

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Veneteknologia

Heikki Seppälä

AURINKOSÄHKÖN HYÖDYNTÄMINEN VENEEN PÄÄASIALLISENA ENER-  
GIALÄHTEENÄ

Opinnäytetyö 2013

## TIIVISTELMÄ

### KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

#### Veneteknologia

SEPPÄLÄ HEIKKI

Aurinkosähkön hyödyntäminen veneen pääasiallisena energialähteenä

Opinnäytetyö

76 sivua + 7 liitesivua

Työn ohjaaja

Mikko Pitkäaho

Toimeksiantaja

Kymi Technology

Tammikuu 2013

Avainsanat

veneet, aurinkoenergia, energialähteet, sähköpropulsio

Opinnäytetyö käsittelee aurinkosähkön hyödyntämistä sähköpropulsiolla varustetun veneen energialähteenä. Työssä tällaista venettä nimitetään aurinkosähköveneeksi. Aurinkosähköveneiden määrä on toistaiseksi pieni, mutta tilanne saattaa muuttua lähitulevaisuudessa. Tämän työn tarkoituksena on ollut selvittää aurinkosähköveneiden kehittymismahdollisuudet yleiseksi venemalliksi ja aurinkosähköveneiden suunnitteluprosessiin vaikuttavat tekijät. Näistä asioista kertovaa kirjallisuutta tai muita laajoja lähteitä ei juuri ole, minkä vuoksi työ on nähty tarpeelliseksi.

Työssä on käsitelty aurinkosähköjärjestelmän tärkeimmät komponentit ja niiden vaikutus veneen suunnitteluun. Lisäksi on perehdytty venekäytön erityisvaatimuksiin aurinkosähköjärjestelmältä. Järjestelmän mitoituksessa on hyödynnetty työtä varten tehtyä laskentataulukkoa. Se pohjautuu venesuunnittelun yleisiin laskentakaavoihin sekä Australian Standard AS4509.2: Stand Alone Power Systems Part 2: System Design Guidelines, System Installation -menetelmään aurinkosähköjärjestelmän mitoitukselta.

Työn tuloksena saatiin selville, että veneolosuhteet ovat erittäin suotuisat aurinkosähkön hyödyntämiselle. Aurinkosähköveneestä on mahdollista rakentaa täysin omavarainen tarvitsemansa energian suhteen. Omavaraisuus, pienet melu- ja saastepäästöt yhdistettynä edullisiin käyttökuluihin ovat aurinkosähköveneiden suurimpia etuja. Aurinkosähkövene on hankintahinnaltaan toistaiseksi verrokkejaan kalliimpi, mutta edulliset käyttökulut tasoittavat hintaeroa pitkällä aikavälillä. Aurinkosähkön yhdistäminen veneeseen vaikuttaa koko venesuunnitteluprosessiin. Aurinkosähkö tulisi huomioida jo venesuunnitteluprosessin alkaessa, sillä tarvittavien muutosten tekeminen jälkikäteen voi osoittautua hankalaksi.

Järjestelmän mitoituksessa käytetyt menetelmät osoittautuivat toimiviksi edellyttäen, että mitoitukseseen liittyvät riittävät pohjatiedot on ensin kunnolla selvitetty. Työn perusteella voidaan todeta, että aurinkosähkövene on oikein suunniteltuna kilpailukykyinen tietyissä veneluokissa ja olosuhteissa.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Boat Technology

SEPPÄLÄ HEIKKI

Solar electricity as a boat main source of energy

Bachelor's Thesis

76 pages + 7 pages of appendices

Supervisor

Mikko Pitkäaho

Commissioned by

Kymi Technology

January 2013

Keywords

boats, solar energy, energy sources, electric propulsion

The purpose of this thesis was to collect information about the exploitation of solar electricity in boats with electric propulsion. In this thesis, boats of this kind are named as solar electric boats. Number of solar electric boats is small for the present, but the situation may change in the near future. The main idea of this thesis has been to clarify the solar electric boat possibilities to develop as common boat type and clarify factors which affect solar electric boat design process. Work has seen to be necessary, because literature about these issues or any other large sources about this topic are minor.

Thesis explains the most important components of the solar electric system and their impact on the design of the boat. In addition, is acquainted with the specific requirements of the solar electric system in boat use. Spreadsheet calculation has been utilized for the system sizing. The spreadsheet is based on the general calculation formulas of boat design, as well as the Australian Standard AS4509.2: Stand Alone Power Systems Part 2: System Design Guidelines, System Installation, which includes a method in sizing the photovoltaic system.

As a result, it has become clear that the boat conditions are very favorable to solar energy utilization. The solar electric boat is possible to build a completely self-sufficient in terms of energy needs. Self-sufficiency, low noise and pollutant emissions, combined with the low running costs of the solar electric boat are the biggest advantages. Solar electric boat purchase costs are slightly higher than equivalent boats, but low running costs compensate to the price difference over the long term. Combining the solar electric system to the boat will affect the entire design process. Solar electricity should be taken into account at the beginning of the entire boat design process, as later changes in design may prove to be difficult.

The system sizing methods which are used in this thesis proved to be effective, provided that the necessary basic knowledge of the system sizing is first properly established. Work shows that the well designed solar electric boat is competitive in certain boat classes and conditions.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
2	AURINKOSÄHKÖ	8
	2.1 Aurinkosähkö ilmiönä	8
	2.2 Aurinkopaneeli	9
	2.3 Aurinkokenno	12
	2.3.1 Aurinkokennojen rakenne ja toimintaperiaate	13
	2.3.2 Kennojen sähköiset ominaisuudet	14
	2.4 Aurinkosähkön tehoon vaikuttavia tekijöitä	15
	2.4.1 Hyötysuhde	15
	2.4.2 Lämpötila	15
	2.4.3 Säteilyn tulokulma ja voimakkuus	17
3	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	18
	3.1 Akku	19
	3.1.1 Lyijyakku	21
	3.1.2 Litium-akku	22
	3.2 Lataussäädin	24
	3.3 Johdotukset	25
	3.4 Muut komponentit	25
	3.5 Sähköpropulsio	26
4	AKUSTON RAKENTAMINEN	28
	4.1 BMS-järjestelmä	28
	4.2 Kytchentävät	29
	4.3 Akuston jännitteen valinta	31
5	AURINKOSÄHKÖ VENEISSÄ	33
	5.1 Aurinkosähköveneen määritelmä	33

5.2	Aurinkosähkön hyödyntämisen nykytila	33
5.3	Aurinkosähkövenehankkeet, -tuotteet ja kilpailut maailmalla	35
6	AURINKOSÄHKÖVENEEN SUUNNITTELUSSA HUOMIOITAVIA TEKIJÖITÄ	39
6.1	Paneelien asennusympäristö	39
6.1.1	Viileys	40
6.1.2	Varjottomuus ja huollettavuus	40
6.1.3	Suuntaus	41
6.1.4	Kosteus ja suolaisuus	42
6.2	Energian riittävyys	43
6.3	Kustannukset	45
6.4	Muotoilulliset tekijät	48
6.5	Soveltuvuus eri venetyypeille	49
7	JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	50
7.1	Tarpeiden kartoitus	50
7.2	Kulutuslaitetaulukon luominen	51
7.3	Vaihtoehtojen arviointi ja mitoitus	52
7.3.1	Perustiedot	52
7.3.2	Rakenne ja materiaalit	52
7.3.3	Propulsio	53
7.3.4	Akkutyypit	53
7.3.5	Paneelityyppi	55
7.3.6	Lataussäädin	56
7.3.7	Muu tekniikka	56
7.4	Mitoitustapa	57
8	JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN VALITUISTA KOMPONENTEISTA	58
8.1	Esimerkkiveneen perustiedot	58
8.2	Sähköpropulsio	60
8.3	Akusto	60
8.4	Aurinkopaneelit	63
8.5	Muu tekniikka	66

LIITTEET

Liite 1. Esimerkkiveneen tiedot

Liite 2. Konetehon laskenta

Liite 3. Akuston mitoitus

Liite 4. Aurinkopaneeliston mitoitus

Liite 5. Säteilyvertailu

Liite6. Esimerkkiveneen mallinnokset

## 1 JOHDANTO

Aurinkosähkövene on venekonseptina valtavirrasta poikkeava. Se eroaa normaaleista moottoriveneistä hiljaisuudellaan, ympäristöystävällisyydellään ja omavaraisuudellaan. Huviveneiden käyttö ajoittuu pääosin aurinkoiseen vuodenaikaan, mikä antaa mahdollisuuden aurinkoenergian tehokkaalle hyödyntämiselle juuri venekäytössä.

Aurinkosähkö on aiemmin ollut veneissä melko hyödyntämätön energiantuotantomuoto. Sitä on hyödynnetty jonkun verran akkupankin ylläpitolatauksessa, mutta isot järjestelmät ovat olleet harvinaisia. Aurinkopaneeleiden ja osin myös järjestelmän muun tekniikan huomattava kustannusten lasku on aikaansaanut sen, että aurinkosähköä on alettu hyödyntää enemmän uusien veneiden suunnittelussa. Myös jo olemassa oleviin veneisiin on asennettu jälkikäteen entistä suurempia aurinkosähköjärjestelmiä. Itse perustekniikka on pysynyt pitkään muuttumattomana, joskin aurinkopaneeleiden hyötysuhde ja järjestelmän muu tekniikka ovat hiljalleen kehittyneet. Useat aurinkosähköveneprojektit ja -kilpailut ovat osoittaneet tekniikan toimivuuden venekäytössä.

Opinnäytetyön aihe valikoitui oman kiinnostukseni pohjalta. Osallistuminen Midnight Sun Finland -aurinkosähkökilpaveneen valmistusprojektiin ja veneen menestyminen kilpailussa lisäsi omalta osaltaan kiinnostustani aiheeseen. Aurinkosähköveneessä olisi potentiaalia tunnetummaksi tuotteeksi.

Aurinkosähköveneiden harvinaisuuden vuoksi aiheesta kertovaa kirjallisuutta on huonosti tarjolla. Aurinkosähköjärjestelmän suunnittelusta rakennuksiin on sen sijaan runsaasti kirjallisuustarjontaa. Työssä on sovellettu näiden lähteiden antamaa tietoa veneympäristöön sekä pyritty löytämään venekäytön erityisvaatimukset järjestelmän suunnittelulle. Työssä on jouduttu miettimään aurinkosähköjärjestelmän vaikutusta veneen suunnitteluun, mutta myös veneympäristön vaikutusta totuttuihin aurinkosähköjärjestelmän suunnittelutapoihin. Aihepiiriä on rajattu jättämällä käsittelyn ulkopuolelle venesuunnittelun yleiset perustiedot. Työssä on käsitelty vain niitä venesuunnitteluun liittyviä asioita, jotka ovat olleet aurinkosähköjärjestelmän kannalta välttämättömiä.

Työn loppupuolella (luku 8) olevassa esimerkissä on sovellettu työssä esiin tulleita asioita. Veneen suunnitteluprosessin laajuuden vuoksi sovelluksessa on paneuduttu etupäässä aurinkosähköjärjestelmän, siihen olennaisesti liittyvän muun tekniikan sekä asennusympäristön suunnitteluun.

## 2 AURINKOSÄHKÖ

Aurinkosähkö tarkoittaa sähkön tuottamista auringon säteilyn avulla. Usein käytetään myös termiä aurinkoenergia, mutta se on käsitteenä laajempi ja sisältää mm. lämmön tuottamisen auringon säteilyn avulla. Tässä työssä perehdytään lähes ainoastaan aurinkosähkön hyödyntämiseen. Auringon säteilyenergia on käytännössä ehtymätön voimavara ja aurinkosähköä pidetään näin yhtenä vihreimmistä energiamuodoista.

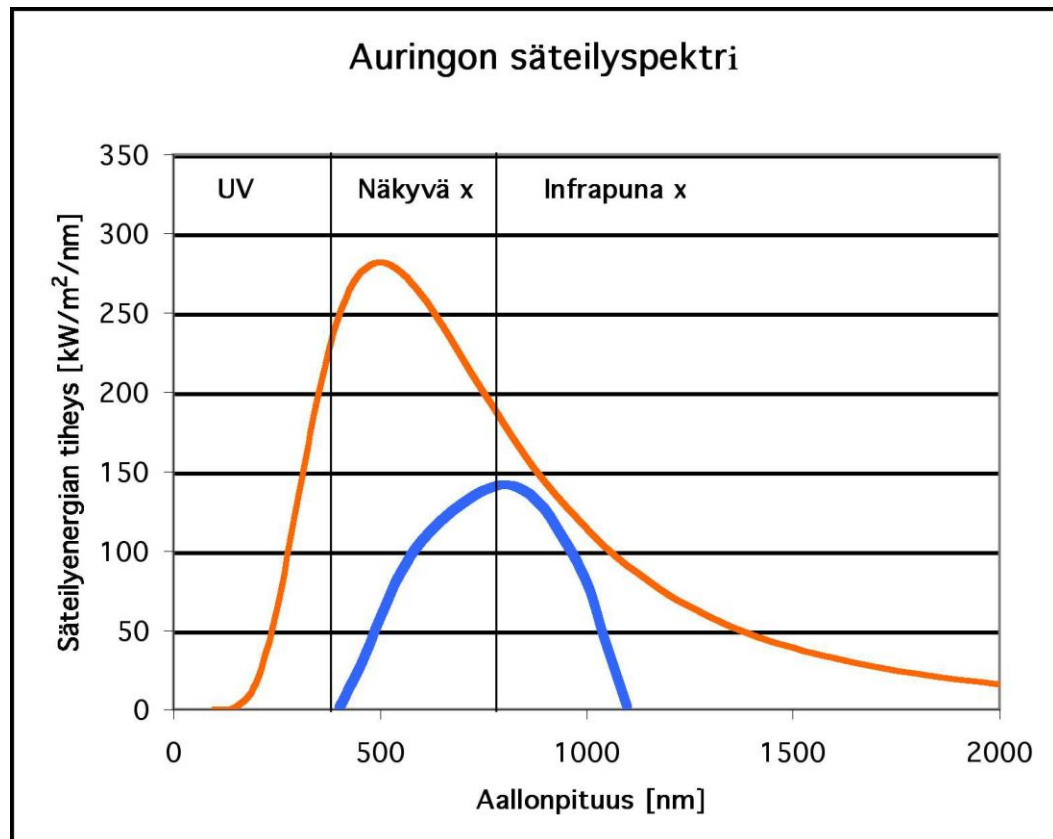
Tässä luvussa käsitellään aurinkosähköä ilmiönä sekä aurinkopaneelien ja -kennojen rakenteita ja ominaisuuksia. Lisäksi käsitellään aurinkosähkön tehoon vaikuttavia tekijöitä.

### 2.1 Aurinkosähkö ilmiönä

Auringon sisällä tapahtuvat ydinreaktiot ja niistä johtuva auringon lämpeneminen saavat aikaan elektromagneettista säteilyä. Säteily koostuu fotoneista eli valohiukkasista, joilla ei ole massaa, mutta jotka pitävät sisällään suuren määrän energiaa. Fotonit sisältävät eri aallonpituuksia (ks. kuva 1), joista osa on ihmissilmälle näkymättömiä. Aurinkosähkön kannalta merkittävä aallonpituus on valkoinen valo, jota on yli puolet maan pinnalle tulevasta valosta (aallonpituus välillä 400 – 700 nm). Fotonien sisältämä energiamäärä on riippuvainen aallonpituudesta. Mitä pienempi aallonpituus, sitä enemmän energiaa. (Komp 2001, 5–6.) Maan ilmakehä absorboi suuren osan fotoneista, ennen kuin ne pääsevät maan pinnalle. Mitä suurempi ilmakehän paksuus on, sitä enemmän fotoneita absorboituu ilmakehään eikä pääse maan pinnalle. Tämän arkipäiväisen ilmiön huomaa, kun vertailee keskipäivän auringon ja ilta- tai aamuauringon lämmittävyttä. Keskipäivän aurinko tulee maan pinnalle suuremmassa kulmassa, eli ilmakehä on tällöin ohuempi. Sama ilmiö saa aikaan myös vuodenaikaerot lämpötiloissa. Ilmakehän suodattavuuteen vaikuttaa myös ilmakehän vesihöyrypitoisuus. Ilmakehän paksuuden ja vesihöyrypitoisuuden lisäksi säteilyn voimakkuuteen vaikuttaa fotonien kulkeman kokonaisetäisyyden vaihtelut. Kun aurinko paistaa suuremmassa kulmassa, on myös fotonien kulkema matka lyhyempi. Aurinkopaneelin toiminta pe-



rustuu siihen, että se pyrkii absorboimaan mahdollisimman suuren määrän säteilyä ja muuttamaan sen sähköenergiaksi. (Boxwell 2011, 3–5.)



Kuva 1. Auringon säteily spektri (oranssi käyrä) ja aurinkopaneelin vastaanottama spektri (sininen käyrä) (Aurinkopaneelit. Suntekno)

## 2.2 Aurinkopaneeli

Aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista. Aurinkopaneelit voidaan jakaa alatyyppeihin kahdella eri tavalla. Rakenteen osalta paneelit jakautuvat kolmeen päätyyppiin, joita käsitellään seuraavaksi. Toisessa jaottelutavassa paneelityypit jakautuvat niiden sisältämien kennojen tyyppin mukaan kolmeen pääryhmään: yksikiteisiin, monikiteisiin ja ohutkalvopaneeleihin. Näitä kolmea ryhmää käsitellään osiossa 2.3.

Paneelit jakautuvat rakenteen osalta kolmeen päätyyppiin; jäykkiin kehyksellisiin paneeleihin, puolitaipuviin paneeleihin ja taipuviin ohutkalvopaneeleihin. Kehykselliset paneelit ovat tyypiltään yksi- tai monikidepaneeleja. Ne koostuvat tietyistä määrästä kennoja, jotka on yhdistetty toisiinsa metallisilla johdinliuskoilla. Kennojen lukumäärä määräytyy halutun tehon mukaan. Kennot kytketään paneeleissa yleensä sarjaan.

Sarjaan kytkettyjen kennojen lukumäärä määrittää paneelin jännitteen. 12 V - järjestelmään tehdyssä paneelissa kennoja on yleensä 32 - 36 kpl sarjassa. Yleinen 36 kennoa sarjassa antaa 20,9 V tyhjäkäyntijännitteen (0,58 V kennojännite), joka riittää 12V akuston lataukseen, vaikka paneelin latausjännite hieman laskisi (esim. heikosta valaistuksesta johtuen). (Designing a solar panel. Good idea.)

Kehyksellisissä paneeleissa rakenteeseen kuuluu lasi, joka suojaa paneelia etupuolelta (ks. kuva 2). Lasina käytetään vähärautaista erikoislasiä, jotta sen heijastava vaikutus kennoille saapuvaan säteilytehoon olisi mahdollisimman pieni. Lasi lisää huomattavasti paneelin painoa, sillä se ei voi olla ohut kestävyuden vuoksi (esim. raekuurot). Lasin sijasta paneelin etupinnalla on käytetty myös muoveja, kuten polykarbonaattia. Kennot ja juotokset kapseloidaan lasin (tai lasin sijasta etumuovin) kanssa tiiviiksi paketiiksi. Kapselointiin käytetään kahta eri menetelmää. Eva-muovikalvon käyttäminen on yleisin tapa. Siinä kennot ja juotokset jäävät sulan Eva-kalvon sisään. Prosessi tapahtuu autoklaavissa. Lopputuloksena on tasalaatuinen ja täysin vedenpitävä rakenne. Kennojen ja juotosten valaminen silikonin sisään on vaihtoehto Eva -kalvon käytölle. Käytettävä silikonin on erikoisvalmisteista. Se on erittäin hyvin valoa läpäisevää eikä luovuta ympäristöön haitallisia korrosoivia aineita. Silikonin käyttö on nykyään harvinaista ja lähinnä itserakentajien suosiossa. Paneelin kehyksinä käytetään lähes yksinomaan alumiinia. Kehyksellisiä paneeleja käytetään etupäässä rakennusten järjestelmissä, mutta ne soveltuvat myös veneisiin kohteesta riippuen. Kehykselliset paneelit tarjoavat parhaimman €/W-suhteen, eli niissä on paras hinnan ja tehon suhde. (Komp 2001, 51–53.)

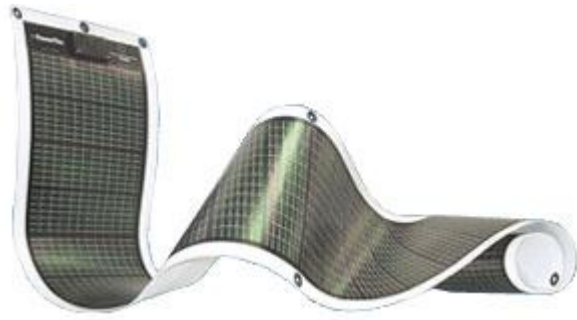
Puolitaipuvat paneelit ovat suosittuja kohteissa, joissa vaaditaan keveyttä ja suorituskykyä. Ne ovat usein kennojen ja juotosten osalta samanlaisia kuin kehykselliset paneelit. Erot muodostuvat kehysten puuttumisesta ja lasin korvaamisesta muovilla. Lasin ja kehysten poistaminen vähentää paneelin painoa merkittävästi. Puolitaipuvan paneelin paino on parhaimmillaan vain 1/8 kehyksellisen paneelin painosta. Puolitaipuvaa paneelia voi taivuttaa hieman kaarelle, mikä mahdollistaa asennuksen suoraan kaarevalle pinnalle (ks. kuva 2). Puolitaipuvat paneelit ovat myös ohuita (paksuus n. 2 – 3mm, joten ne on helpompi sovittaa veneen ulkonäköön. Nämä paneelit kestävät useimmiten päällä kävelemistä. (Technology, Solbianflex.) Puolitaipuvat paneelit eivät häviä hyötysuhteeltaan kehyksellisille paneeleille, sillä parhaimmilla puolitaipuvilla paneeleilla hyötysuhde on lähelle 20 %. Hinta rajoittaa puolitaipuvien paneelien

käyttöä, sillä ne ovat merkittävästi kehyksellisiä paneeleja kalliimpia. Puolitaipuvat paneelit ovat venekäyttöön parhaiten soveltuvia paneeleja, jos hinta ei ole este. (Flexible solar panel. Eco green for us.)



*Kuva 2. Vasemmalla kehyksellinen yksikidepaneeli. Oikealla puolitaipuva yksikidepaneeli. (Baltic solar power; Bestpowerinverter)*

Ohutkalvopaneelit ovat laajalti käytettyjä. Niiden edullisuus ja taipuvuus mahdollistaa niiden hyödyntämisen erityyppisissä tuotteissa. Ohutkalvopaneelien valmistus kuluu huomattavasti vähemmän energiaa ja materiaaleja kuin muut paneelityypit. Ohutkalvopaneelien ongelma on niiden heikko hyötysuhde. Monissa tapauksissa tämä ei ole ongelma, mutta esimerkiksi veneissä energiantarve voi muodostua liian suureksi ohutkalvopaneelien tuottoon nähden. Ohutkalvopaneelit sallivat yleensä päällä kävelyn ja taivuttelun pienelle säteelle, mikä mahdollistaa niiden käyttämisen kohteissa, joissa muut paneelityypit eivät tule kyseeseen (ks. kuva 3) . Ohutkalvopaneelit toimivat hämärässä muita paneelityyppejä paremmin. Lämpötila vaikuttaa ohutkalvopaneelien toimintaan vähemmän kuin muilla paneelityypeillä. Ohutkalvopaneelien tuotto heikkenee muita paneelityyppejä nopeammin ikääntymisen myötä. Tästä syystä paneelin tuotolle annetut takuuajat ovat myös lyhyempiä. (Miten valita oikea aurinkopaneelityyppi, Eurosolar.)



Kuva 3. Ohutkalvopaneeli. (Tactical solar)

Kaikille paneelityypeille yhteinen komponentti on liitinrasia tai liitinpistoke paneelin etu- tai takapinnalla. Liitinrasia tai -pistoke on yleensä tehty veden- ja pölynpitäväksi, jotta liitinpinnoille ei pääse epäpuhtauksia. Liitinrasia voi myös sisältää ns. by pass -diodit (ohitusdiodit). Näiden diodien on tarkoitus estää kennojen varjostuksesta johtuvia ongelmia. Ilman ohitusdiodeja yksittäiset varjossa olevat kennot voivat lämmentä haitallisesti tai vähintäänkin aiheuttaa merkittävää tehohäviötä paneelin muissa kennoissa. Ohitusdiodien tehtävä on ohittaa varjostuneet kennot ja näin paneelin toiminta pysyy turvallisena ja mahdollisimman tehokkaana. Paneelien yhdistämiseksi järjestelmään käytetään erityyppisiä liittimiä, esimerkiksi Mc-4-tyyppiä. Myös liittimien tulisi olla vedenpitäviä. (Junction box for solar panels 2010.)

### 2.3 Aurinkokenno

Pii on aurinkokennojen yleisin puolijohdemateriaali. Sen käyttöä puoltaa mm. yleisyys alkuaineena ja edullisuus. Piitä käytetään aurinkokennoissa joko yksikiteisenä, monikiteisenä tai amorfisena. Yksikiteiseen piihin perustuvat kennot ovat hyötysuhteeltaan tehokkaimpia, ne yltyvät jopa 25 % hyötysuhteeseen. Yksikiteinen kenno valmistetaan leikkaamalla siivu (paksuus noin 300 mikrometriä) yhtenäisestä piikidesauvasta. Lopputulos on tasalaatuinen, mutta kallis ja hukkamateriaalin osuus on suuri. Yksikiteiset kennot yltyvät yleisesti käytössä olevista kennoista parhaaseen W/m<sup>2</sup>-suhteeseen. Yksikiteiset kennot ovat muita kalliimpia, sillä ne maksavat n. 35 – 50 % enemmän kuin monikiteiset kennot. (Boxwell 2011, 64.)

Monikiteinen pii valmistetaan saattamalla sula piimassa kiinteään muotoon, joka viipaloidaan oikean paksuisiksi (300 µm) kennoiksi. Hyötysuhde on hieman heikompi (n. 20 %), mutta kennotyyppi on edullisempi. Amorfista piitä, jolla ei ole lainkaan ki-derakennetta, käytetään ohutkalvopaneeleissa. Puolijohdemateriaali on näissä ken-

noissa huomattavasti kiteisiä kennoja ohuempi. Amorfiseen piihin perustuva kenno on edullinen ja sallii yleensä kennon/paneelin taivuttelun. Hyötysuhde on kuitenkin huomattavasti yksi- ja monikidekennoja heikompi (parhaimmillaan n. 12 %). (Komp 2001, 37–43.)

Amorfisen piin lisäksi ohutkalvopaneeleissa käytetään muitakin materiaaleja, mm. metalli-puolijohdeyhdisteitä kadmium-telluridi CdTe ja kupari-indium-diselenidi CuInSe<sub>2</sub>. Nämä kennot yltyvät hieman parempaan hyötysuhteeseen, mutta ovat kalliimpia. Ohutkalvokennot ovat erityisen suosittuja veneissä, sillä niiden sijoittelu ja liikuttaminen on painavia kehyksellisiä yksi- ja monikidepaneeleja helpompaa. Ne sallivat yleensä myös päälle astumisen. Edellä mainittujen kennotyyppien lisäksi käytetään muitakin materiaaleja, mutta ne eivät ole yleistyneet laajemmin. Yksi tällainen ryhmä on avaruudessa käytetyt kennotyypit, jotka ovat olleet liian kalliita hyödynnettäviksi muissa kohteissa. Nanokideteknologiaa on kehitetty ahkerasti, mutta se ei ole vielä yleisesti käytössä. Nanokideteknologia mahdollistaisi toimiessaan mm. maalien, kankaiden ja purjeiden käyttämisen aurinkopaneelimateriaalina. (Aurinkosähköteknologiat, Helsingin teknillinen yliopisto.)

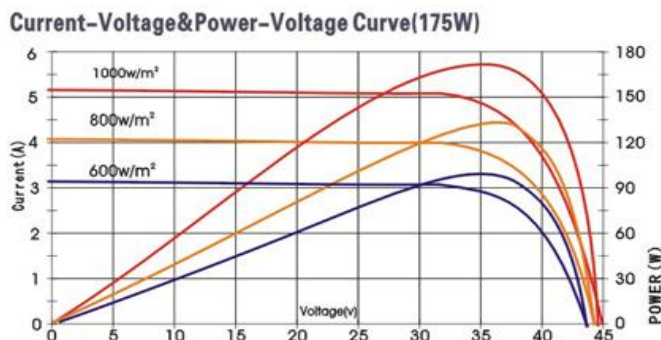
### 2.3.1 Aurinkokennojen rakenne ja toimintaperiaate

Aurinkokenno rakentuu kahdesta erityyppisestä puolijohdemateriaalista, materiaalista p ja n. P -materiaalissa on elektronivajaus, kun taas n-materiaalissa on ylimäärä elektroneja. Fotoni, jolla on riittävän suuri energia, pääsee absorboitumaan kennoon ja irrottamaan elektronin kidehilassa olevalta atomilta. Vapautunut elektroni on vapaa liikkumaan kidehilassa hetken, ennen kuin se kiinnittyy takaisin alkuperäiseen atomiin tai toiseen atomiin. Atomille, josta elektroni irtoaa, syntyy niin sanottu aukko ja sille jää positiivinen varaus. Aukko on vapaa liikkumaan kidehilan valenssivyössä. Aurinkokennon toiminta jakautuu siis negatiivisten elektronien ja positiivisten aukkojen liikkeeseen. Irronnut elektroni palaa nopeasti täyttämään irtoamispaikkansa. Tätä kutsutaan rekombinaatioksi. Jotta valosähköistä ilmiötä voitaisiin hyödyntää, tulee rekombinaatio estää. Rekombinaatio pyritään estämään seostamalla kennon piihin muita atomeita, esimerkiksi fosforia ja booria. Fosforilla seostettu pii edustaa n -tyyppiä ja boorilla seostettu p -tyyppiä. Nämä materiaalit yhdistetään, jolloin rajapinnan eri puolilla on eri varaus. Kun auringonvalo vapauttaa elektroneja molemmiin puolin aurinkokennoa, ajaa aurinkokennon sisäinen sähkökenttä n-puolella syntyneet aukot p-

puolelle ja p-puolella vapautuneet elektronit n-puolelle. Sieltä ne voidaan kuljettaa ulkoiseen virtapiiriin. (Miten aurinkokenno toimii, Helsingin teknillinen yliopisto.)

### 2.3.2 Kennojen sähköiset ominaisuudet

Kun aurinkokenno on valaistuna, se käyttäytyy pariston tavoin, sillä se muodostaa jännitteen etu- ja takaosansa välille. Tätä jännitettä käytetään muodostamaan virtaa, joka on riippuvainen kennoon osuvan säteilyn määrästä. Kun aurinkokennoon kytketyn kuorman resistanssi on erittäin suuri tai se on pois kytkettynä (ääretön), saadaan aurinkokennosta maksimijännite. Tätä kutsutaan tyhjäkäyntijännitteeksi ( $V_{oc}$ ), joka on tyypillisesti 0,58 V. Virtaa ei tällöin ole. Kun aurinkokennoon kytketyn kuorman resistanssi on nolla, eli kenno on oikosulussa, se tuottaa maksimivirran. Tätä kutsutaan kennon oikosulkuvirraksi ( $I_{sc}$ ). Silloin jännitettä ei ole. Kuorman vastusta muutettaessa muuttuu myös kennon jännite- ja virtasuhteet. Näistä arvoista voidaan koostaa kennon ominaiskäyrä (virta-jännite käyrä, I-V curve). Käyrältä löytyy maksimitehopiste (mpp= maximum power point), jossa jännitteen ja virran tulo on suurin (Joulen laki  $P=U * I$ ). Maksimitehopiste sijaitsee avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran asettamien raja-arvojen sisällä. Kuvassa 4 on esitetty kennon virta-jännitekäyrä ja tehojännitekäyrä eri säteilyvoimakkuuksilla. (Komp 2001, 2–4.) Kennosta saatava virta vaihtelee säteilyn mukaan. Mitä enemmän säteilyä kennoon osuu, sitä suurempi on virta. Sen sijaan kennosta saatava jännite ei muutu merkittävästi säteilyn voimakkuuden mukaan.



Kuva 4. Kennon I-V -käyrä (0 -arvosta lähtevät) eri säteilyvoimakkuuksilla sekä tehojännitekäyrä eri säteilyvoimakkuuksilla. (Paneelin tuottama energiamäärä, Suntekno)

Aurinkokennon pn -liitoksessa muodostuva energia kulkeutuu kennon läpi yleensä hopeasta tai nikkelistä valmistettuja liuskoja (fingers) pitkin. Nämä liuskat ovat erittäin ohuita, jotta niillä olisi mahdollisimman vähän vaikutusta kennon säteilyä keräävään pinta-alaan. (Komp 2001, 32–33.)

## 2.4 Aurinkosähkön tehoon vaikuttavia tekijöitä

Paneelin tuottamaan tehoon vaikuttavat sekä paneelin sisäiset ominaisuudet, kuten hyötysuhde sekä käyttöolosuhteet. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tärkeimpiä tehoon vaikuttavia tekijöitä sekä olosuhteiden muutosten vaikutusta saatavaan tehoon.

### 2.4.1 Hyötysuhde

Kennoihin liittyy tiettyjä yleistermejä ja lainalaisuuksia. Yksi näistä on hyötysuhde. Valmistajat ilmoittavat aurinkokennoilleen tai paneeleilleen tietyn hyötysuhteen. Hyötysuhteen mittaaminen on tehty standardisoiduissa laboratorio-olosuhteissa, joissa vallitsevat tietyt olosuhteet: valon intensiteetin tulee olla  $1000 \text{ W/m}^2$ , ympäristön lämpötilan  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ja valon spektrin tulee vastata ilmakehän läpi tullutta valoa (kun aurinko on  $42^\circ$  horisontin yläpuolella). Valmistajat saattavat ilmoittaa myös standardiolosuhteiden ulkopuolisia arvoja, jotka ovat lähempänä todellista suorituskykyä. (Chen 2011, 24.)

Fill factor on hyötysuhteen yhteydessä käytetty termi, joka ilmaisee kennon todellisen ( $V_{mp} * I_{mp}$ ) tehon suhteessa teoreettiseen tehoon ( $V_{oc} * I_{sc}$ ). Piiaurinkokennojen fill factor on yleensä  $>0,7$ . Hyötysuhde ilmoitetaan standardioiloissa saatavilla olevan aurinkokennon säteilytehon ja kennosta ulos saatavan tehon suhteena. Luku ilmoitetaan prosentteina. Nimellistehoarvo (Peak Watt) ilmoittaa kennon (paneelin) huipputehon, joka saavutetaan standardioiloissa. (Chen 2011, 24.) Todellisuudessa ulos saatava teho vaihtelee olosuhteiden mukaan. Piikennojen hyötysuhde on tavallisesti välillä 15 – 22%. (Aurinkopaneelit. Suntekno.)

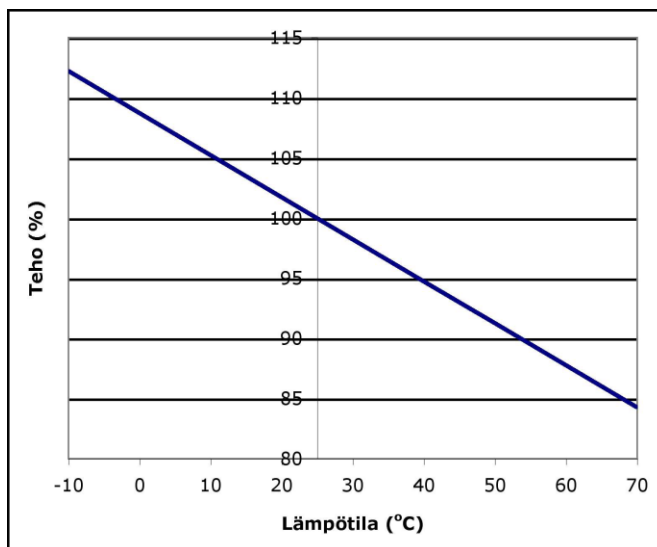
### 2.4.2 Lämpötila

Aurinkokennon tuottama teho on lämpötilariippuvainen (ks. kuva 5). Sitä kuvaa lämpötilakerroin  $T_c$ . Kun kennon lämpötila nousee, sen tuottama teho kasvaa, koska lämpötila lisää varauksenkuljettajien määrää. Lämpötilan nousun vaikutus virtaan ei ole merkittävä, n.  $+0,065 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ . Lämpötilan nousulla on sen sijaan heikentävä vaikutus.

tus kennon tyhjäkäyntijännitteeseen ja se voi olla jopa  $-0,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Koska virran muutos on hyvin heikko, on tehon alenema ( $T_c P_{\text{mmp}}$ ) lähes sama kuin jännitteen alenema. Sijoituspaikan valinnalla pystytään hieman vaikuttamaan lämpötilahäviöön. Joissain tapauksissa myös koneellinen ilmanvaihto paneelien jäähdyttämiseksi voi tulla kyseeseen. (Aurinkopaneelit. Suntekno.) Paneelien sijoittelusta kerrotaan enemmän luvussa 6.1

Koska paneelit on tehty absorboimaan säteilyä mahdollisimman tehokkaasti, ne myös lämpenevät herkästi. Paneeleita lämmittää pääosin niiden vastaanottama infra-punasäteily, joka on aallonpituudeltaan liian pitkää, jotta paneeli voisi käyttää sitä tehokkaasti hyväkseen. Lämpimässä ilmastossa paneeli voi helposti lämmitä  $80 - 90 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan. Jos esimerkiksi paneelin lämpötilakerroin on  $-0,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  ja paneelin lämpötila nousee lämpötilasta  $25 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan  $85 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ , heikentyy paneelin tuottama teho  $30 \text{ } \%$  verrattuna standardiolosuhteisiin. Toisaalta paneelin teho myös kasvaa samassa suhteessa, mikäli olosuhteet ovat kylmemmät verrattuna standardiolosuhteisiin.

(Boxwell 2011, 41.)



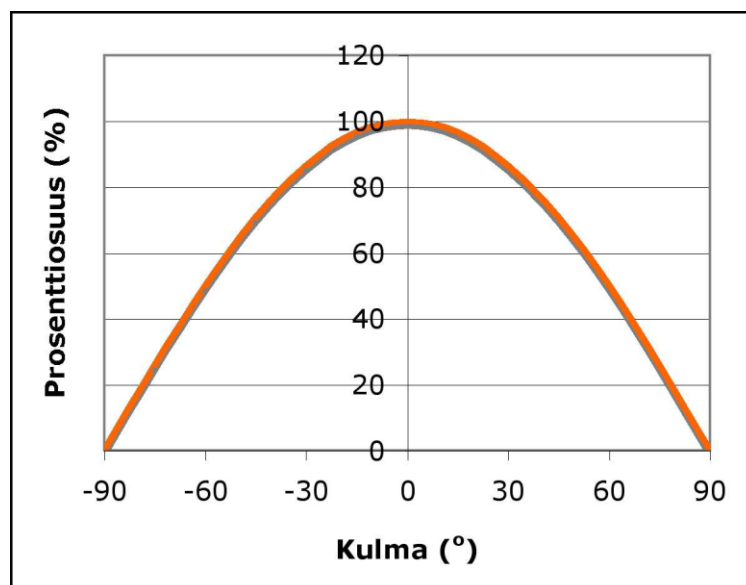
Kuva 5. Kennon lämpötilan vaikutus sen tuottamaan tehoon. (Aurinkoenergia, Suntekno)



### 2.4.3 Säteilyn tulokulma ja voimakkuus

Paneelien suuntaus on oleellinen asia aurinkopaneeleja sijoitettaessa. Paneeliin kohdistuvan valon intensiteetti saadaan maksimoitua, kun paneeli on kohtisuorassa auringon valoon nähden (eli paneelin kallistuskulma on yhtä suuri kuin auringon korkeus horisontista). Tällöin auringon säteily osuu suurimmalle mahdolliselle pinta-alalle. Suuntauksen vaikutus saadaan laskettua kaavasta  $P_s = SA \cos \alpha$  (jossa  $P_s$  = vinosti pinnalle tulevan aurinkosäteilyn teho,  $S$  = säteilyn voimakkuus,  $A$  = paneelin pinta-ala ja  $\alpha$  auringonsäteiden ja paneelin normaalin välinen kulma). Pienet muutokset kulmassa eivät vaikuta merkittävästi tuottoon, mutta kulman ollessa esimerkiksi  $60^\circ$  säteilyteho puolittuu. (Aurinkoenergia, Suntekno.)

Tulokulma vaikuttaa myös paneelin pinnassa syntyviin heijastuksiin.  $60^\circ$ :n kulmassa tulevasta valosta n. 10 % heijastuu ja  $80^\circ$ :n kulmalla heijastus on jo n. 40 %. Heijastumisen määrässä tapahtuu merkittävä muutos juuri  $60^\circ$ :n kohdalla (ks. kuva 6). (Aurinkopaneelit. Suntekno.) Vaakatasoon asennetuilla paneeleilla tämä tarkoittaa sitä, että tuotto kesäkuukausien ulkopuolella on erittäin huono, kun aurinko paistaa matalalta. Esimerkiksi Helsingin korkeudella aurinko käy  $30^\circ$ :n yläpuolella ainoastaan huhtijaksuun välisenä aikana. (Sunposition calculator.)



Kuva 6. Säteilyn tulokulman vaikutus paneelin tehoon. (Aurinkopaneelit. Suntekno.)

Keskimääräisenä pilvettömänä päivänä 30 % säteilystä on hajasäteilyä, johon suuntaus ei vaikuta. Puolipilvisenä päivänä hajasäteilyn osuus voi olla n. 70 % ja pilvisenä päi-

vänä 100 %. Jotta hajasäteilyä saataisiin kerättyä mahdollisimman tehokkaasti suoran säteilyn lisäksi, voidaan käyttää hyväksi mm. veden ja lumen heijastusta paneelia sijoitettaessa. (Aurinkoenergia, Suntekno.)

Paneelin kallistuksen lisäksi sijoittamisessa on huomioitava myös ns. atsimuuttikulma, eli suuntaus ilmansuuntiin nähden. Tehokkain ratkaisu on suunnata paneeli kohti etelää, sillä auringon säteilyteho on voimakkaimmillaan etelän ( $180^\circ$ ) suunnassa. Tämä johtuu siitä, että ilmakehän säteilytehoa heikentävä vaikutus vähenee, mitä suuremmissa kulmassa (eli mitä korkeammalta) aurinko paistaa kohti maapallon pintaa. Jos etelän suunnassa on varjostavia esteitä tms., joku muu suuntaus saattaa olla parempi. Veneissä atsimuuttikulma muuttuu veneen ollessa vesillä. Tällöin suuntaus menettää merkityksensä tai siitä voi olla jopa haittaa. Veneen ollessa paikallaan satamassa suuntauksella voidaan saavuttaa etuja (ks. luku 6.1.3). Suuntauksessa on aina otettava huomioon asennusympäristö (varjot). (Aurinkoenergia, Suntekno.)

Säteilyn tulokulman vaikutus tuottoon on useiden tekijöiden summa, joita ovat kallistuskulma (paneelin pinta-alaan vaikuttava), atsimuuttikulma (jonka vaikutus perustuu pinta-alaan ja auringon säteilyn voimakkuus- eli intensiteettieroihin eri vuorokaudenaikoina) ja paneelin pinnassa tapahtuvat heijastukset. Jos nämä kaikki kulmat poikkeavat huomattavasti ihanteellisesta auringon kohtisuorasta säteilykulmasta, voi hetkellinen tehonmenetys olla merkittävä. Näiden lisäksi myös hajasäteily vaikuttaa saatavaan tuottoon. Lopulliseen aurinkopaneelin tuottamaan energiamäärään vaikuttaa säteilyn tulokulma paneeliin nähden, säteilyn intensiteetti, paneelin lämpötila, paneelin pinnan puhtaus ja aurinkopaneelin ominaisuudet. Akustolla varustetussa aurinkosähköveneessä päivän kokonaisenergiasaanto on merkitsevä tekijä, eivät hetkelliset huipputehot. Näin ollen esim. vaakatasoon asennettu paneeli voi olla epäsuotuisista säteilykulmista huolimatta tehokas ratkaisu, sillä vaakatasoon asennettuun paneeliin osuu säteilyä pidemmän aikaa.

### 3 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

Aurinkosähköjärjestelmä voi yksinkertaisimmillaan koostua vain pelkästä aurinkopaneelistä ja siihen kytketystä kuormasta. Aurinkosähköveneissä käytetään paneelien lisäksi muitakin komponentteja. Veneiden aurinkosähköjärjestelmän tekniikka on hyvin samankaltaista kuin asunnoissa käytettävissä järjestelmissä. Asunnoissa käytettävät järjestelmät jakautuvat on-grid (verkkoon liitetty) ja off-grid (verkosta irti oleva)

-tyyppeihin sen mukaan, onko laitteisto kytketty valtakunnan sähköverkkoon vai ei. Veneissä käytettävät järjestelmät ovat off-grid -tyyppisiä. Off-grid -laitteiston keskeisiä komponentteja ovat aurinkopaneelien lisäksi akusto, lataussäädin, kaapeloinnit ja mahdollisesti akkumonitori sekä muut mittarit. Näiden lisäksi aurinkosähköveneeseen kuuluu sähköpropulsion vaatimat komponentit. Venekäytössä laitteisto altistuu hieman erilaisille rasituksille kuin asutokäytössä, mikä johtuu liikkuvasta kohteesta, vedestä ja meri-ilmastosta (ks. luku 6.1.4) Seuraavissa alaluvuissa esitellään aurinkosähköveneille ominaiset komponentit.

### 3.1 Akku

Off-grid -aurinkosähköjärjestelmässä akku on laitteiston tärkeimpiä komponentteja. Yhdistettäessä useita akkuja toisiinsa puhutaan akustosta tai akkupankista. Aurinkopaneelien latausteho on riippuvainen säätilasta. Tästä syystä tarvitaan energiavaro, johon energiaa saadaan varattua tilanteisiin, joissa tuotto ei riitä kattamaan kulutusta. Akuston ansiosta järjestelmä ei ole altis hetkellisille puutteille energiantuotannossa. (Boxwell 2011, 20.) Samalla kun akku on järjestelmän tärkeimpiä komponentteja, se on liikkuvissa laitteissa (autot, veneet, matkapuhelimet jne.) myös käyttöä rajoittavin osa. Tämä johtuu akkujen pienestä energiatiheydestä verrattuna polttoaineisiin. Tällä hetkellä yleisesti käytössä olevilla parhailla akuilla energiatiheys on  $<200 \text{ Wh/kg}$  (LiCoO<sub>2</sub>) kun vastaava luku bensiinille on n.  $13000 \text{ Wh/kg}$ . Bensiini varastoi siis 65 -kertaisen määrän energiaa ( $13 \text{ kWh}/0,2 \text{ kWh} = 65$ ) verrattuna akkuun. Eroa lisää vielä se tosiasia, että akkua ei käytännössä ikinä voida purkaa kokonaan tyhjäksi. (The high power lithium-ion, Battery university; Lithium-ion car battery, EVs Roll.)

Akkuihin ja akkujen ominaisuuksiin liittyy termejä, joiden avulla akkuja voidaan verrata toisiinsa. Kennojännite ilmaisee yksittäisen kennon lepojännitteen. Kennoja sarjaan ja rinnan kytkemällä saadaan akulle muodostettua haluttu kapasiteetti. Mitä suurempi kennojännite on, sitä vähemmän kennoja tarvitaan muodostamaan haluttu jännite (Chen 2011, 83). Akun kapasiteetti ilmoitetaan ampeeritunteina Ah. Se kertoo, kuinka kauan akkua voidaan purkaa tietyllä virralla. Esimerkiksi 100 Ah:n akkua voidaan purkaa 1 ampeerin virralla 100 tuntia tai 100 A:n virralla yksi tunti. Valmistajat ilmoittavat akun kapasiteetin tietyn C -arvon (charge) mukaisena. Esim. 100 Ah:n akulla C -arvo C/10 ilmoittaa että ilmoitettu kapasiteetti on laskettu 10 tunnin purkuajalla (eli 10 A purkuvirralla,  $100 \text{ Ah}/10$ ). (Battery physics, Cameron software.) Liti-

um -akuista puhuttaessa C -arvoa käytetään usein poikkeavasti kertoimena. Litium -akulle saatetaan ilmoittaa C -arvoksi esim. C2, joka tarkoittaa, että akkua saa purkaa maksimissaan arvolla 2 \* akun kapasiteetti. Merkintätavasta tietää, kumpaa tapaa käytetään (kauttaviiwa vai ei).

Purkuvirran suuruus vaikuttaa akusta saatavaan kapasiteettiin. Mitä suurempi purkuvirta on, sitä vähemmän akusta saadaan energiaa ulos. Tämä pohjautuu Peukertin lakiin, joka taas on yhteydessä akun sisäiseen resistanssiin. Akun sisäinen resistanssi kasvaa suuremmaksi purkuvirran kasvaessa ja häviöt lisääntyvät. Akkua tulisi siis purkaa mahdollisimman pienellä virralla, jos siitä halutaan ulos maksimaalinen kapasiteetti. Akkua ostaessa kannattaa huomioida millä C -arvolla akku on mitattu, koska vasta se kertoo akun todellisen kapasiteetin. (Deep cycle battery FAQ, Wind&Sun.)

Akun syklinen elinikä kertoo, kuinka monta kertaa akku voidaan purkaa tiettyyn varaukseen saakka. Yleensä valmistajat käyttävät raja-arvona tiettyä lukua esim. 80 % DoD (depth of discharge), eli akun varauksesta on tällöin purettu 80 %. Toinen tapa ilmaista akussa olevan varauksen määrä on ilmoittaa luku SOC (state of charge), eli jäljellä olevan varauksen määrä. Esimerkin tapauksessa se olisi 20 %. Akun syklinen ikä on tietona tärkeä, sillä sen avulla saadaan selville, kuinka paljon akusta on purettavissa energiaa. Syklinen ikä on erityisen tärkeä tieto sovelluksissa, joissa akkua puretaan toistuvasti (sähköautot, veneet, matkapuhelimet). Akun purkamisen syvyys vaikuttaa ratkaisevasti sykliseen ikään. Esimerkiksi hyvä syväpurkausta kestävä lyijyaku voi kestää 350 sykliä purettuna 80 % DoD, mutta jopa 1200 sykliä purettuna 40 % DoD. (Boxwell 2011, 69.)

Akuilla on tietty elinikä myös vuosissa laskettuna. Vaikka akkua ei käytettäisi, se vanhenee aikanaan. Vanhenemiseen vaikuttavat ympäristön lämpötila ja akun ominaisuudet. (Battery and energy technologies.) Valmistajat ilmoittavat yleensä akun eliniän tuotetiedoissaan, esimerkiksi syväpurkausta kestäväällä lyijyakulla se on tavallisesti 5 – 8 vuotta. (Komp 2001, 104.)

Seuraavissa alaluvuissa esitellään yleisimpiä aurinkosähköjärjestelmissä esiintyviä akkutyyppejä, joita ovat lyijy- ja litium -akut. Lyijy- ja litium-akkujen lisäksi on toki muitakin kauan markkinoilla olleita akkutyyppejä, joita käytetään myös veneissä. Tällaisia ovat mm. NiMh- eli nikkelimetallihybridiaikut. Niiden osuus on toistaiseksi hyvin pieni, joten työssä ei käsitellä niitä tarkemmin.

### 3.1.1 Lyijyakku

Yleisimmin aurinkoenergiajärjestelmissä käytössä oleva akkutyyppe on lyijyakku (Lead-acid). Siinä positiivinen elektrodi koostuu lyijydioksidista  $PbO_2$  ja negatiivinen elektrodi on tehty puhtaasta lyijystä. Elektrolyytti on laimennettua rikkihappoa. Akun tyhjennyttyä Molemmat elektrodit muuttuvat  $PbSO_4$ :ksi. Rikkihappo on tuolloin kulu-tettu. Akun varaus voidaan todeta elektrolyytin ominaispainosta eli rikkihapon kon-sentraatiosta tarkoitukseen tehdyllä ominaispainomittarilla. Positiivinen elektrodi ku-luu purun aikana ja negatiivinen elektrodi oksidoituu. Akun latautuessa prosessi on käänteinen. Lyijy on raskasmetalli ja rikkihappo vaarallista ympäristölle ja käyttäjille. Lyijyakku on myös painava energiasäilönsä nähden. Sen syklinen elinikä on lyhyt, normaalisti vain 300 – 800 purkausta (DoD 50 %) riippuen lyijyakun tyypistä. (Deep cycle battery FAQ Cycles vs life, Wind&Sun.)

Lyijyakut voidaan jaotella eri ryhmiin käyttöympäristön ja rakenteen mukaan. Yleinen käyttöympäristön mukaan tehty jaottelu on: auto-, vapaa-aika- ja syväpurkausakut. Auto- ja vapaa-aika -akut on yleensä suunniteltu antamaan suuria virtamääriä, mutta niiden elinkaari on melko lyhyt. Syväpurkausakut pitävät sisällään esimerkiksi sähkö-ajoneuvoissa käytetyt lyijyakut ja aurinkosähköjärjestelmien akut. Toinen tapa lyijy-akkujen jaotteluun perustuu niiden rakenne-eroihin. Jaottelutavat menevät osittain ris-tiin keskenään. Rakenteen mukainen jaottelu on: neste-, geeli- ja AGM -akut. Neste-lyijyakku on näistä yleisin. Sen elektrolyytti on nestemäisessä muodossa. Nesteakku voi olla huollettava tai ns. huoltovapaa, joka tarkoittaa että akkunestettä tarvitsee lisä-tä harvemmin. Nesteakkua ladattaessa sen elektrolyyttiä höyrystyy ja muodostuu her-kästi syttyvää vety- ja happikaasua. Tämä pitää huomioida akun huollossa, eli elektro-lyyttiä on tarpeen vaatiessa lisättävä mikäli se on mahdollista. Yleensä oikea elektro-lyytin määrä on ilmoitettu akun kyljessä. Huoltovapaissa akuissa höyrystynyt elektro-lyytti tiivistyy ja palaa takaisin akkuun. Höyryjä syntyy silti myös huoltovapaissa akuissa pienissä määrin, eli paloturvallisuusasiat on otettava yhtäläillä huomioon. (Deep cycle battery FAQ, Wind&Sun.)

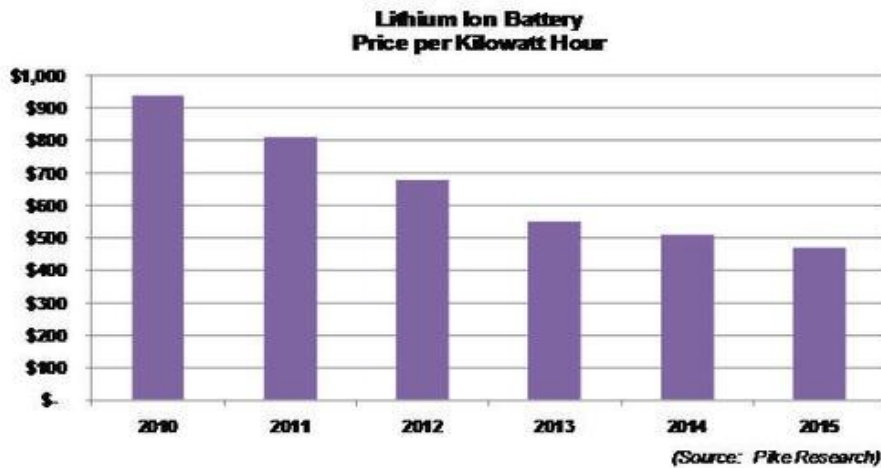
Toinen lyijyakkutyyppe on geeliakku. Siinä elektrolyytin sekaan on lisätty elektrolyyt-tiä paksuntavaa lisäainetta, kuten silicaa. Paksunnos saa aikaan sen, että elektrolyytti on jähmeää eikä valu akusta ulos. Elektrolyytin ollessa jähmeää se ei myöskään ker-rostu, kuten nesteakuissa voi käydä. Geeliakut ovat rakenteeltaan suljettuja, joten niitä

ei voi täyttää. Umpinaisuuden vuoksi geeliakut ovat nesteakkuja tarkempia latausjännitteelle ja virralle. Geeliakku tuottaa erittäin vähän tulenarkoja höyryjä, joten se on turvallinen asennettavaksi suljettuihin tiloihin. (Deep cycle battery FAQ, Wind&Sun.)

Kolmas lyijyakkutyypin on AGM-akku (absorbed glass mat) jossa elektrolyytti on imeytetty lasikuitumattoon. Tämä takaa vuotamattomuuden ja hyvän sietokyvyn tärinää vastaan. Itsepurkautuvuus on AGM-akulla pieni. Se ei geeliakun tavoin juurikaan tuota tulenarkoja kaasuja ympäristöönsä. AGM- ja geeliakun turvallisuus kaasujen suhteen johtuu niiden suljetusta venttiilillä säädellystä rakenteesta (VRLA, valve regulated lead-acid). VRLA-akuissa positiivisten levyjen happi ja negatiivisten levyjen vety rekombinoituvat ja syntyy vettä, joka palautuu pääosin kiertoon. Venttiili toimii varokeinona, mikäli vedyn määrä kasvaa liian korkeaksi, esimerkiksi väärästä latauksesta johtuen. (Comparing deep-cycle flooded batteries to VRLA batteries. Trojan battery.) Tavallisimmin aurinkosähkön yhteydessä käytetään syväpurkausta kestäviä lyijyakkuja, jotka sietävät hyvin syklistä käyttöä ja purkamista alle 50 % soc. Nämä voivat olla tyypiltään neste-, geeli- tai AGM-akkuja. Näiden akkujen kennolevyt ovat tavallista paksummat, mikä takaa niiden hyvät syväpurkausominaisuudet. Syväpurkausakut ovat tavallisesti muita lyijyakkuja kalliimpia, mutta syklien suurempi määrä korvaa useissa tapauksissa kalliin ostohinnan. (Battery types, Vonwentzel.)

### 3.1.2 Litium-akku

Toisena pääakkutyypinä on syytä käsitellä litium-akut. Niiden määrä tulee lisääntymään sähköautojen lisääntyessä. Tämä kehitys laskee myös hintoja, jolloin ne tulevat kasvattamaan suosiotaan myös veneissä (ks. kuva 7). VTT:n tekemä kyselytutkimus paljastaa, että veneilijöiden kiinnostus litium-akkuja kohtaan on korkea (Alanen 2010, 73). Tällä hetkellä näyttää siltä, että hinta on ainut yleistymistä rajoittava tekijä. Litium-akkujen käyttöä puoltaa ennen kaikkea keveys, energiatehokkuus ja pitkäikäisyys.



Kuva 7. Arvio litium-akkujen hintakehityksestä (Gartner 2010)

Litium -akkuja on useaa tyyppiä. Akkujen anodi on yleensä grafiittia ja katodina käytetään akkutyypistä riippuen yleisimmin litium-rautafosfaattia ( $\text{LiFePO}_4$ ), litium-kobolttioksidia ( $\text{Li-CoO}_2$ ) tai litium-mangaanioksidia ( $\text{LiMnO}_2$ ). Akkujen kennojännite vaihtelee tyyppistä riippuen 1,5:stä - 3,7 V:iin. Litium-akkutyypien välillä on eroja esimerkiksi energiasisällössä, purkusykliden määrässä ja turvallisuudessa. Litium-rautafosfaatti -akkuja pidetään turvallisimpana vaihtoehtona ja samalla se on myös edullisin. Sen energiasisältö on kuitenkin muita litium-akkuja heikompi. Litium-rautafosfaatti-akku onkin turvallisimpana vaihtoehtona erinomainen valinta veneakuksi. Sen energiasisältö on kolminkertainen parhaimpiin lyijyakkuihin verrattuna (n. 110 Wh/kg), koska se voidaan myös purkaa syvemmälle kuin lyijyakit. Se kestää erittäin hyvin suuria purkuvirtoja ja sen purkusykliden määrä on litium-akkutyypeistä suurin tarjoten yleensä yli 2000 purku-latauskertaa Dod 80 %. (Alanen 2010, 34.)

$\text{Li-CoO}_2$  ja  $\text{LiMnO}_2$  -akut ovat energiatiheydeltään  $\text{LiFePO}_4$  -akkuja parempia akkutyyppejä, mutta niissä on omat heikkoutensa. Niiden syklimäärät ovat pienempiä, ne eivät ole yhtä turvallisia ja suurien purkuvirtojen kesto on heikompi. Oikeanlaisella suojaelektronikalla varustettuna ne ovat sopivia myös veneasennuksiin. Litium-akkujen huono ominaisuus on niiden vanheneminen täyteen ladattuina (pois lukien litium-rautafosfaattiakku). Täyteen ladattu litium-akku menettää noin 20 % kapasiteetistään vuodessa (25 °C). Akun ollessa 40 % varauksessa menetys on tosin enää 4 %. Akkua ei siis tulisi säilyttää täyteen ladattuna, vaan mielellään reilusti purettuna. Tämä käytäntö poikkeaa lyijyakun säilytyksestä, jossa akku pyritään säilyttämään täyteenä. Myös käyttölämpötila tulee huomioida akkua valittaessa, sillä mitä kuumemmassa

litium-akkua käytetään, sitä nopeammin se vanhenee. Valmistajat ilmoittavat yleensä akkunsuorituskyvyn huoneenlämmössä. Akkujen heikkeneminen iän ja käytön myötä johtuu akun sisäisen resistanssin kasvamisesta. Se aiheuttaa sen, että akun jännite ja käytettävä maksimipurkuvirta pienenevät kuormituksen alla. (Alanen 2010.)

Yksi lupaavimmista akkukeksinnöistä on yhdysvaltalaisen Envia systemsin kehittämä litium-akku, jolle on testeissä saatu jopa 400 Wh/kg energiatiheys. Akun luvataan olevan myös puolet edullisempi kuin tämänhetkiset litium-akkuteknologiat. Toteutessaan tämä keksintö toisi merkittäviä parannuksia sähköveneilyn laajentamiseksi erityyppisiin veneisiin. (LaMonica 2012.)

### 3.2 Lataussäädin

Lataussäätimen tehtävänä on ohjata akuston latausta ja valvoa akuston tilaa. Säätimen tärkein tehtävä on estää akuston yllilatautuminen. Säädin saattaa sisältää myös näytön, joka antaa yleensä tietoja latauksesta ja akuston varauksesta. Tällä hetkellä on käytössä pääosin kahta erityyppistä lataussäädintä, PWM ja MPPT-säätimiä. Asennuskohteesta ja tapauksesta riippuu kumpi säädinvaihtoehto on kyseiseen käyttöön parempi valinta.

PWM-säädin (Pulse width modulation) perustuu pulssinleveysmodulaation käyttämiseen latauksessa. Lataus jakautuu yleensä eri vaiheisiin, joissa latausjännitteen ja virran arvot muuttuvat akuston varaustilan mukaan. PWM-säätimen valinta on sidottu paneelin jännite ja virta-arvoihin. Paneelin tuottaman jännitteen tulisi olla mahdollisimman lähellä akuston latausjännitettä (mutta kuitenkin korkeampi), sillä PWM-säädin ei pysty hyödyntämään ylimääräistä jännitettä. Esimerkki: 100 W aurinkopaneelin latausjännite on 28 V ja latausvirta 3,57 A. Se lataa säätimen kautta 12 V akustoa, jonka latausjännite on 14 V. Tällaisessa tapauksessa paneeli lataa akustoa vaajaalla teholla, sillä säädin pudottaa paneelin jännitettä. Jännitteen pudotus saa aikaan tehohäviön,  $14 \text{ V} * 3,57 \text{ A} = 50 \text{ W}$ . PWM-säädin pudottaa lähes kaikissa olosuhteissa paneeliston tehoa, vaikka akuston ja paneeliston jännitteet olisivat lähellä toisiaan. Tämä johtuu siitä, että paneelien jännitteen on aina oltava hieman akkujännitettä suurempi, jotta paneelissa on "reserviä" esim. korkeasta lämpötilasta johtuvaa jännitteen pudotusta varten. (Comparing PWM and MPPT charge controllers, Altstore.)



MPPT-säädin (maximum powerpoint tracker) on yleensä PWM-säädin, johon on lisätty Mppt-algoritmi. Mppt toiminnon ansiosta säädin pyrkii aina ottamaan paneelilta maksimitehon (mpp=maximum powerpoint). MPPT-säädin pystyy muuttamaan paneelilta tulevan virran ja jännitteen suhdetta. Jos paneelijännite on reilusti akuston jännitettä suurempi, säädin pudottaa jännitettä mutta nostaa latausvirtaa. Näin ollen paneelin teho saadaan kokonaan käyttöön. Mppt-algoritmin tarkoituksena on tarkkailla paneelin mpp pistettä vallitsevissa olosuhteissa ja muuttaa jännitteen ja virran arvoa lataukselle optimaaliseksi. MPPT-säädin ei ole häviötön, sillä jännitteen muunnoksessa (dc-dc muunnin) hukataan energiaa yleensä muutamia prosentteja. MPPT-säätimen yksi merkittävä etu on korkeiden paneelijännitteiden hyödynnettävyys. Järjestelmässä voidaan käyttää korkeaa paneelijännitettä (esim. 50 V) vaikka akusto olisikin esimerkiksi 24 V. Korkean paneelijännitteen hyödyt tulee esiin kaapeleiden paksuudessa. Jännitteen kasvaessa ne voivat olla ohuemmat. Myös liitoksissa ja kytkimisissä tapahtuvat häviöt ovat pienempiä korkeampaa jännitettä käytettäessä. (What the heck is MPPT?, Wind&Sun.) MPPT-säädintä käytettäessä saadaan talteen noin 20 % enemmän energiaa verrattaessa tavalliseen PWM-säätimeen. Säätimien hyötysuhde on tavallisesti 90 – 95 %. MPPT-säädin on hinnaltaan selkeästi PWM-säädintä kalliimpi, joten aivan joka kohteeseen MPPT-säädin ei välttämättä sovi (Solar electricity handbook, 74). Yleisenä nyrkkisääntönä MPPT-säätimen hankinnan järkevyydelle pidetään 200 W paneelitehoa, jonka jälkeen säädin on kustannustehokas. (Boxwell 2011, 40)

### 3.3 Johdotukset

Standardi ISO 10133 määrittelee johtimilta vaadittavat ominaisuudet. Johdinmateriaalina tulee käyttää monisäikeistä eristettyä kuparijohdinta (poikkeuksena maajohdin). Johtimien merkitys tulee olla tunnistettavissa (esim. värityksen avulla). Käytettävissä olevat johtimien väritykset on mainittu edellä mainitussa standardissa. Johtimien eristeen tulee olla paloa hidastavaa. ISO 10133 -standardi määrittelee myös johdotusten mitoitukseen, kiinnitykseen ja sijoitteluun liittyvät asiat. Myös tarvittavat IP-luokitukset ja maadoitukseen liittyvät asiat löytyvät ISO 10133 -standardista. (SFS-EN ISO 10133 2000.)

### 3.4 Muut komponentit

Edellämainittujen komponenttien lisäksi aurinkosähköveneen järjestelmään kuuluu yleensä akun monitorointiin liittyvä elektroniikka, eli akkumonitori. Akkumonitori on

verrattavissa polttomoottorin polttoainemittariin. Akkumonitorin näyttö kertoo yleensä ainakin akussa jäljellä olevan kapasiteetin sekä akuston senhetkisen jännitteen. Lisäksi akkumonitorin näyttö voi ilmoittaa tiedon jäljellä olevasta ajomatkasta ja käytössä olevasta tehosta sekä hälyttää laitteeseen määriteltyjen rajojen alittamisesta tai ylittämisestä. Akkumonitorin avulla on mahdollista myös käynnistää automaattisesti veneeseen sijoitettuja laitteita, esim. aggregaatti. Aurinkosähköveneen tekniikkaan voi kuulua myös muita mittarointiin liittyviä komponentteja.

Veneen hallintaan liittyviä komponentteja ovat sekä ohjaukseen- että moottorin hallintaan liittyvät osat. Aurinkosähköveneen ohjaus on toteutettu vastaavasti kuin muissakin venetyypeissä, eli joko peräsimellä tai propulsion työntö-/vetosuuntaa muuttamalla. Moottorin kierrosluvun hallinta on polttomoottorilla varustetuista veneistä poikkeavaa. Sähköpropulsiossa ei ole käynnistymisviivettä. Virta-avaimen tai muun käynnistyskytkimen ollessa oikeassa asennossa, moottori reagoi viiveettä kierroslukua säättävän ohjaimen käskyihin. Kierrosluvun säätö on yleensä toteutettu potentiometrillä. Sähkömoottorin käynnistykseen ja kierrosluvun säätämiseen käytetyt hallintalaitteet ovat usein vastaavaa polttomoottori järjestelmää sirommat. Sirompien hallintalaitteiden ansiosta tilaa säästyy enemmän muille hallintalaitteille ja elektroniikalle.

### 3.5 Sähköpropulsio

Sähkömoottori tarjoaa polttomoottoriin verrattuna ylivoimaisia ominaisuuksia veneikäytössä. Sähköpropulsio on oikein suunniteltuna erittäin hiljainen ja se ei tuota käytön aikana lainkaan saasteita. Sähköpropulsiota onkin luonnehdittu purjehtimiseksi ilman purjeita. Sähkömoottori antaa täyden väännön heti alakierroksilla. Tämä mahdollistaa suuremmalla halkaisijalla ja/tai nousulla varustetun potkurin käytön ilman että moottori hyytyy. Pienen kierrosluvun ja suuren potkurihalkaisijan käyttö parantaa potkurin hyötysuhdetta. Suurempi halkaisija potkurissa yhdessä sähkömoottorin kanssa parantaa myös veneen käsiteltävyyttä, kun jo pienillä kierroksilla saadaan hyvä työntövoima. Polttomoottorin kanssa paras mahdollinen hyötysuhde saavutetaan pienen kierroslukualueen sisällä, kun sähkömoottori tarjoaa laajan kierrosalueen hyvällä hyötysuhteella. Tämä tuo joustavuutta mm. matkanopeuden valintaan. Polttomoottorin hyötysuhde on nykyaikaisilla moottoreilla 20 – 40 % riippuen moottorin tyypistä. Sähkömoottorilla vastaava luku voi olla jopa 97 %, tavallisesti kuitenkin aina yli 80 %

(veneissä käytettävissä moottoreissa). (Engine efficiency, Wikipedia; Sähkömoottori, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.)

Koska energiaa on sähköpropulsiossa käytettävissä vähemmän kuin polttomoottori-tekniikassa (syynä akkujen pieni energiatiheys), on järjestelmän komponenttien hyötysuhteilla merkittävä rooli. Propulsiosta on saatava mahdollisimman pienihäviöinen, jotta järjestelmän kokonaisyötysuhde saadaan käyttökelpoiselle tasolle. Moottorin hyötysuhde on ensimmäinen huomionarvoinen tekijä. Veneissä käytetään yleisesti laadukkaita kestromagneettimoottoreita, jotka voivat olla hiiliharjallisia tai -harjattomia. Harjallinen moottori on edullisempi, mutta vaatii hieman enemmän huoltoa (harjojen vaihto). Tosin harjallinen moottorikin on polttomoottoriin verrattuna vähän huoltoa vaativa. Kummallakin moottorivaihtoehdolla saavutetaan hyvät hyötysuhdearvot. Moottorin valinnassa olisi kiinnitettävä huomiota myös kierroslukualueeseen. Hyvällä hyötysuhteella toimiakseen suurella halkaisijalla varustettu potkuri vaatii uppoumanopopeuksilla matalat kierrokset. Moottorin kierrosten noustessa yli käyttökelpoisen alueen tarvitaan järjestelmään alennusvaihte, joka heikentää propulsiion hyötysuhdetta. Vaihteen tyylistä ja ominaisuuksista riippuu kuinka merkittävä häviö vaihteessa tapahtuu. (Catamaran electric propulsion, The multihull company.) Markkinoilta löytyy tarkoitukseen tehtyjä moottoreita, jotka eivät vaadi alennusvaihteita (Etech water cooled electric drives, Starboats). Vaihtovirtamoottoreille riittää ohuemmat kaapelit (säätimeltä moottorille kolme kaapelia), mikä on eduksi etenkin pitkillä siirtoetäisyyksillä. Tasa- ja vaihtovirtamoottoreiden toimintajännitteet ovat usein välillä 24 – 72 V. Tällä tavoin moottori määrittää käytettävissä olevan akuston jännitealueen.

Myös vetotavan valinnalla voidaan vaikuttaa järjestelmän hyötysuhteeseen. Vetolaite (perä- tai S-vetolaite) sisältää kulmavaihteen. Kulmavaihteen häviöt ovat parhaimmillaan vain pari prosenttia. Akselivedon tapauksessa potkurin työntö suuntautuu alaviistoon, joka potkuriakselin kulmasta riippuen heikentää hyötysuhdetta 0 – 4 % (maks. 15° akselikulma). (Shaft angles, Rice propulsion.) Toisaalta akselivedossa ei ole kulmavaihdetta (poislukien V-veto) ja vedenalaiset rakenteet tuottavat vähäisesti vastusta. Pod-vetolaitteessa ja perämoottorissa moottori on yleensä veden alla ja potkuri on usein suoraan moottoriakselilla. Pod-vetolaitteessa ei ole kulmavaihdetäviä häviöitä ja potkurivirta on vaakasuuntainen. Perämoottorissa saattaa olla erillinen vaihteisto, jolla moottorin kierrokset muutetaan potkurille sopiviksi (esim. Torqeedo-

sähköperämootorit). Moottori on ympäröivän veden ansiosta hyvin jäädytetty (lisäjäähdystä saatetaan silti tarvita). Pod-vetolaite ja perämoottori lisäävät veneen kuvastusta hieman enemmän kuin muut vetotavat, koska vedenalaiset osat ovat moottorin sijainnin vuoksi suuremmat. Moottorin maksimihalkaisija on pod -vetolaitteessa rajallinen, jotta se ei aiheuta liikaa häiriötä veden virtaukseen potkurille.

Edellä on korostettu sähköpropulsiohyötysuhteen merkitystä, sillä sen merkitys on polttomoottoriin verrattaessa tärkeämpää. Sähköpropulsiota valitessa tulee kuitenkin kiinnittää huomiota myös käsiteltävyyteen, kestävyys- ja käytettävyyteen. Lopullinen veneeseen valittu sähköpropulsioratkaisu on aina useiden tekijöiden summa ja tapauskohtainen.

## 4 AKUSTON RAKENTAMINEN

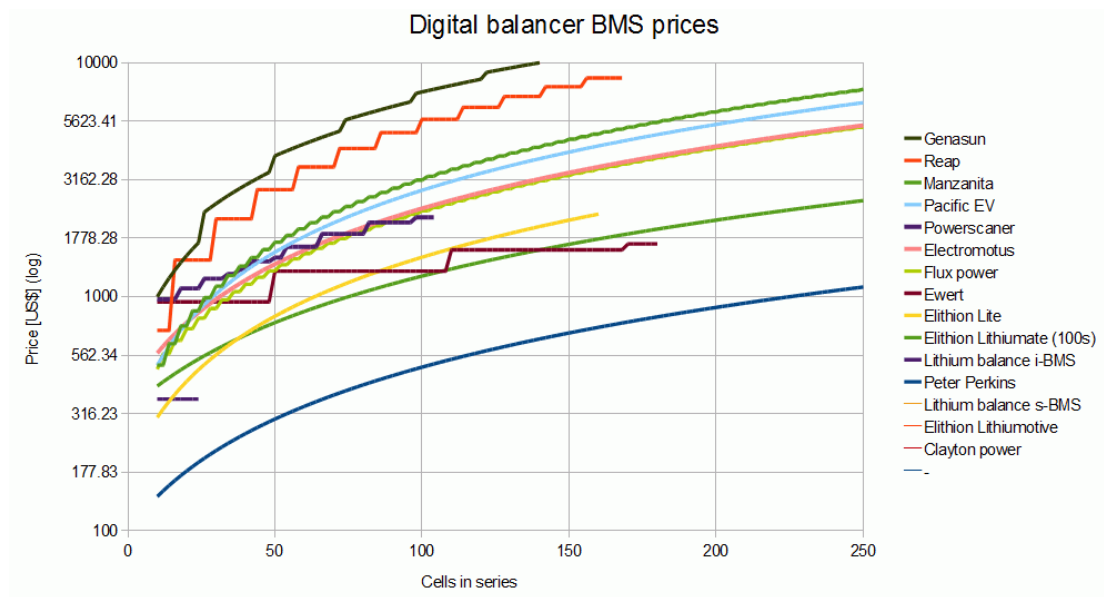
Akuston muodostamisessa tulee ottaa huomioon erinäisiä asioita. Erityyppisiä akkuja ei saa sekoittaa keskenään. Esimerkiksi geeli- ja nestelyijyakut olisi pidettävä omina akustoinaan, koska akkujen latausominaisuudet eroavat toisistaan. Myöskään eri ikäisiä akkuja ei tulisi yhdistää samaan akustoon, sillä akkujen sisäisissä resistansseissa on eroja. Erilaiset sisäiset resistanssit johtavat siihen, että akuston kapasiteetti putoaa heikoimman akun tasolle. Hyväkuntoisia käytettyjä akkuja voi käyttää akustossa, mutta niiden tulee olla samaa tyyppiä ja samanikäisiä. (Boxwell 2011, 71.) Akkupankkia ei tulisi jakaa osiin. Yksi yhtenäinen akkupankki toimii taloudellisemmin kuin vastaava akkukapasiteetti jaettuna useisiin akustoihin. Tähän on syynä Peukertin laki (ks. luku 3.1). Purkuvirta on yhtenäisessä akustossa pienempi suhteessa akuston kokoon, jolloin akustosta saadaan purettua enemmän energiaa.

### 4.1 BMS-järjestelmä

Litium -akustot tarvitsevat akkujen lisäksi BMS-järjestelmän (battery management system) valvomaan akkujen latausta ja purkua. BMS-järjestelmä voi seurata mm. kennojen jännitettä, virtaa ja lämpötilaa sekä varoittaa liian alhaisista tai korkeista arvoista. Joissain tapauksissa BMS-järjestelmä voi hälytyksen lisäksi rajoittaa tai estää akuston käytön virhetilanteessa. BMS-järjestelmä estää liiallisen syväpurkautumisen tai ylilatauksen. Se voi myös säädellä litiumkennoja toimimaan optimoidusti kuormittamalla kennoja tasaisesti. (Tech info: Batteries, Ev works.) Tietyillä epävakailta litium-

akkutyypeillä ( $\text{Li}(\text{NiCo})\text{O}_2$  ja  $\text{LiCoO}_2$ ) yli- tai alilataus voisi aiheuttaa jopa räjähdyksen.

Litium -akustot vaativat myös laturilta lyijyakkuja enemmän. Sama laturi, joka käy lyijyakuille, ei välttämättä käy litium -akuille. Litium-akustojen hinnassa pitää huomioida myös lähes pakollisen Bms-järjestelmän hinta.  $\text{LiFePo}_4$  -akut ovat litium -akuista turvallisimpia ja näitä akkuja käytettäessä Bms-järjestelmä voi olla yksinkertaisempi. BMS-järjestelmän hinta riippuu mm. kennojen määrästä ja ominaisuuksista ja siitä, onko kyseessä analoginen vai digitaalinen järjestelmä (digitaaliset ovat monipuolisempia, mutta kalliimpia) (ks. kuva 8).



Kuva 8. BMS-järjestelmän hinnan (US\$) riippuvuus merkistä ja kennojen määrästä sarjassa. (Li-ion BMS Options, Li-ion BMS)

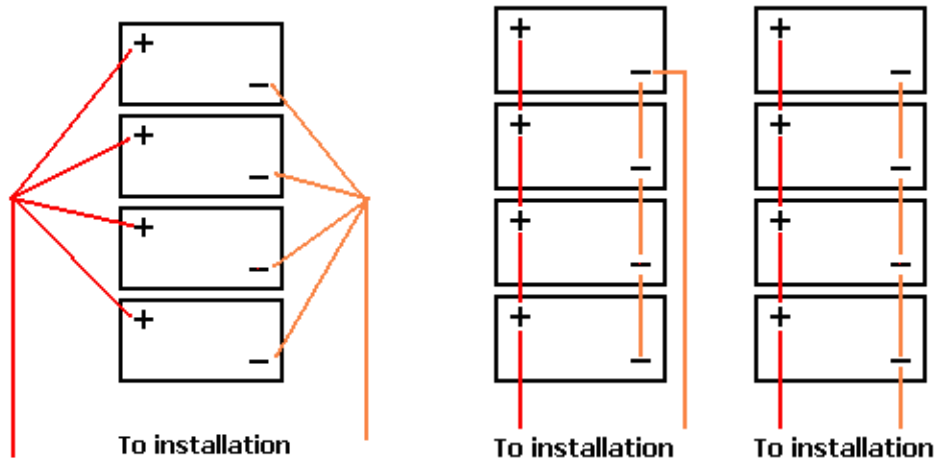
## 4.2 Kytchentävät

Akkujen yhdistämisessä käytetään sekä sarjaan- että rinnankytkentää sekä näiden yhdistelmiä. Kytchentäpa riippuu akustolta vaadittavista ominaisuuksista ja asennuskohteesta. Rinnankytkentä on herkempi reagoimaan yksittäisiin kennovikoihin (kennon oikosulku). Jos rinnankytketyn akuston yhteen akkuun tulee kennovika, latausjännite kasvaa siinä akussa oleville lopuille kennoille liian suureksi. Tämä aiheuttaa mahdollista kiehumista lopuissa kennoissa. Kennovan sattuessa terve akku alkaa syöttämään (kun latausta ei ole) viallista akkua, siihen asti kunnes jännitteet akustossa ovat akkujen välillä samat. Tämä ilmiö kuormittaa turhaan ehjiä akkuja ja saa aikaan kapasiteet-

tin laskun sekä akuston enneaikaisen vanhenemisen. Sama ilmiö tapahtuu lievempänä jos akun kennoista joku vanhenee toisia nopeammin. Eriaikainen kennojen vanheneminen on yleensä huomioitu valmistajan ilmoittamassa eliniässä.

Sarjaankytketyssä akustossa kennovian merkitys on vähäisempi. Kennot saavat yhtälailla ylijännitettä rikkoutuneessa (kennovika) akussa, mutta akkujen välistä purkautumista ei tapahdu. Kennovika ei siis sarjaankytketyssä akustossa vaikuta muiden akkujen elinikään. Aina pelkkä sarjaankytkeminen ei ole mahdollista tai järkevää. Jos akkupankin jännitteeksi halutaan esimerkiksi 12 V, mutta kapasiteetistä halutaan suuri, pitää sarjaankytkettyjen kennojen Ah määrä olla erittäin suuri. Sarjaankytkemisen rajat määräävät siis haluttu akkupankin jännite ja käytettävissä olevien akkujen Ah määrä. Yleensä siirrytään käyttämään myös rinnankytkentää viimeistään siinä vaiheessa, kun suurin mahdollinen Ah kapasiteetti kyseisellä jännitteellä on saavutettu. (Lyijyakkujen ostajan abc 2012.)

Jos rinnankytkentää joudutaan käyttämään, se tulee tehdä oikeaoppisesti. Häviöiden minimoinnin ja akkujen kestävyyskannalta on järkevää kytkeä akut niin, että jokaisen akun navalta lähtee oma kaapeli, joka yhtyy yhteiseen kiskoon/kaapeliin. Näin toimitaan sekä plus- että miinusnapojen kohdalla, eli kummallakin on oma kiskonsa. Navoilta lähtevien kaapeleiden tulee olla keskenään yhtä pitkiä ja oikein mitoitettuja. Tällaisella kytkennällä saavutetaan tasainen kuormitus kaikille akuston akuille ja minimoidaan sisäinen resistanssi. Yksi yleinen kytkentätapa on kytkeä akut kaapeleilla keskenään rinnan ja ottaa plus toisesta päästä akustoa ja miinus toisesta. Tämä on myös toimiva tapa, joskaan ei yhtä hyvä kuin ensin mainittu (ks. kuva 9). Tässä kytkentätavassa on tärkeää muistaa mitoittaa akkujen väliset kaapelit riittävän järeästi, sillä akkujen välissä kulkee suurimmat virrat. (How to correctly interconnect multiple batteries to form one larger bank, Smart gauge.)



Kuva 9. Akkujen kytkentä oikeaoppisesti. Vasemmalla yksi toimivimmista kytkentätavoista, jossa akkujen navat yhdistetään yhteiseen pisteeseen. Keskellä yleinen ja yksinkertainen tapa, joka on myös toimiva. Oikeassa reunassa väärä kytkentämuoto, akut kuormittuvat epätasaisesti (How to correctly interconnect multiple batteries to form one larger bank, Smart gauge.)

Yleinen virhe rinnankytketyn akuston rakentamisessa on plussan sekä miinuksen ottaminen akkupankin samasta päästä. Tämä kytkentätapa kuormittaa akkuja erittäin epätasaisesti eikä ole suositeltava missään olosuhteissa (ks.kuva 9). Akku, johon kaapelit on kytketty, kuormittuu eniten ja seuraavat akut porrastetusti niin, että viimeinen akku on pienimmällä kuormituksella. Ilmiö johtuu akkujen sisäisestä resistanssista sekä akkuja yhdistävien kaapeleiden resistanssista. Resistanssit lisääntyvät sitä enemmän, mitä kauemmas virranottopäästä edetään. (How to correctly interconnect multiple batteries to form one larger bank, Smart gauge.)

#### 4.3 Akuston jännitteen valinta

Akuston jännitteen valinnalla voidaan vaikuttaa järjestelmän hyötysuhteeseen ja kustannuksiin. Häviöiden kannalta on järkevää käyttää riittävän korkeaa jännitettä akkupankissa. Jännitteen kasvaessa järjestelmässä kulkeva virtamäärä putoaa, jos kuorma pysyy samana ( $P = U \cdot I$ ). Virran putoaminen mahdollistaa mm. pienemmän poikkipinta-alan käyttämisen siirtojohtimissa (Ohmin laki). Häviöt liitoksissa pienenevät ja akkujännite notkahtaa vähemmän virran arvojen ollessa pienempiä. (Battery bank sizing, Hardysolar.) Akuston jännitteen valinta on aina tapauskohtaista ja siihen vaikut-

tavat mm. sähkömoottorin ominaisuudet ja teho, akuston koko, johtimien pituudet sekä muut järjestelmän komponentit.

Koska sähköpropulsio on sähköveneissä yleensä suurin kulutuslaite, kannattaa akusto optimoida moottorin mukaan. Esim. 24 – 48 V käyttäminen akkupankin jännitteenä on yleistä ja sähköpropulsioon tarpeisiin valmistettuja moottoreita on tässä jänniteluokassa hyvin tarjolla. Lataussäätimistä löytyy myös hyvin tarjontaa tällä jännitealueella. Akkujännitteen valintaan voi vaikuttaa myös sähkömoottorin hyötysuhde eri virran ja jännitteen arvoilla. Moottorien hyötysuhteet yleensä vaihtelevat hieman käytössä olevan jännitteen (kierrosluvun) mukaan (Gilchrist 2007).

Usein vene-elektroniikka ja muut veneiden kulutuslaitteet toimivat 12 V jännitteellä. Akkupankin yli 12 V korkeampi jännite voidaan helposti muuntaa 12 voltiksi käyttämällä dc -dc muunninta. Toinen vaihtoehto on käyttää näitä laitteita erillisellä 12 V akustolla. Aurinkosähköjärjestelmä tuo omat rajoitteensa akuston jännitteeseen. Aurinkopaneeleita voidaan yleensä kytkeä sarjaan niin, että jännitteeksi muodostuu satoja voltteja, joten paneelien osalta riittävän latausjännitteen saavuttaminen ei ole ongelma. Sen sijaan lataussäätimet ovat yleensä mitoitettuja tietyille jännite- ja virtamäärille. Veneiden tasavirtajärjestelmiä käsittelevä standardi käsittää alle 50 Vdc järjestelmät (SFS-EN ISO 10133 2000). Alle 50 Vdc jännitteet ovat yleensä täysin riittäviä sähköpropulsioon tarpeisiin, joten asennukset voidaan suorittaa standardin vaatimien säännösten mukaan. Alle 50 Vdc jännitteet ovat usein ihmiselle vaarattomia, mikä on etenkin venekäytössä tärkeä tekijä (sähköä johtava ympäristö). Veneenomistaja, jolla ei ole sähköalan pätevyksiä, saa tehdä omaan veneeseen itse asennuksia, joissa jännite on alle 50 Vac tai 120 Vdc (Sähköurakointi, Tukes). Tämä sääntö mahdollistaa melko suurien venesähköjärjestelmien rakentamisen laillisesti itse ilman ammattilaista. On kuitenkin huomioitava, että esimerkiksi akut voivat olla erittäin vaarallisia väärin asennettuina tai käytettyinä. Veneenomistajan tulisi aina turvautua ammattilaisen apuun, ellei varmasti tiedä mitä on tekemässä.



## 5 AURINKOSÄHKÖ VENEISSÄ

### 5.1 Aurinkosähköveneen määritelmä

Veneissä käytetään paljon aurinkopaneeleja, mutta kaikki tällaiset veneet eivät ole aurinkosähkövenettä. Pienellä aurinkosähköpaneelistolla varustettuja veneitä kutsutaan usein virheellisesti aurinkosähköveneksi. Usein tällaisissa veneissä aurinkopaneelit eivät ole pääasiallinen energialähde vaan ainoastaan muiden energialähteiden apuna. Aurinkosähköveneen määrittelyyn on menetelmä. Electric boat news -lehden artikkelin mukaan aurinkovene on määriteltävissä sen paneelitehon ja propulsioon käytetyn sähkötehon suhteesta (Lynn 2005). Propulsiolla tarkoitetaan sähköpropulsiota, eli polttomootorit ovat automaattisesti määritelmän ulkopuolella. Käytössä on niin sanottu "Solar boat index" SBI (aurinkoveneindeksi). SBI saadaan kaavasta:  $SBI = 3(P_{pv}/P_m)$ , jossa  $P_{pv}$  = asennettu aurinkopaneeliteho ja  $P_m$  = propulsioon matkanopeudella ottama teho. Jos kaavan tulos on  $>1$ , vene luokitellaan aurinkosähköveneksi. Jos tulos on  $<1$ , mutta  $>0$ , vene luokitellaan aurinkosähköavusteiseksi veneksi. Esimerkki: Jos veneessä on asennettuna 1 kW aurinkopaneelitehoa ja veneen matkanopeudella käyttämä koneteho on 2,5 kW, saadaan kaavasta  $SBI = 3(1/2,5)$  tulokseksi arvo 1,2. Esimerkin vene luokitellaan siis aurinkosähköveneksi. Tämä opinnäytetyö käsittelee veneitä, joiden SBI arvo  $>1$ , mutta suurin osa asiasta on sovellettavissa myös SBI  $<1$  veneisiin. SBI-kaava on suunniteltu käsittämään Englannin vesillä liikkuvat alukset, mutta se on sovellettavissa sellaisenaan myös alueille, joissa auringon säteilyteho on samaa luokkaa (esim. Suomi). SBI-kaavan tulos kertoo keskiarvon käytettävissä olevien ajotuntien määrästä päivässä. Esimerkin veneellä olisi siis mahdollista ajaa matkanopeudella keskiarvona 1,2 tuntia päivässä. SBI-kaava on karkea arvio, eikä sitä tule käyttää lopullisena totuutena. Se on vain yksi tapa aurinkosähköveneen määrittelymiseen. (Lynn 2005.)

### 5.2 Aurinkosähkön hyödyntämisen nykytila

Aurinkosähkön käyttäminen veneen propulsioon energiantarpeeseen on tällä hetkellä vähäistä. Vain harvat myytävänä olevat venemallit täyttävät SBI  $>1$  kriteerin. Sen sijaan aurinkopaneelien hyödyntäminen kulutuselektroniikan tarpeisiin tai akkujen latauksen ylläpitoon on ollut veneilijöiden suosiossa jo pidempään. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin suurempiin järjestelmiin, joissa pääasiallinen energiankuluttaja on veneen propulsioon käytetty sähkömoottori(t) ja SBI  $>1$ . Yhtenä suurimpana

syynä aurinkosähkön vähäiseen käyttöön on sähköpropulsioiden harvinaisuus, sillä sähkömoottorit ovat vasta nyt yleistymässä veneissä. Aurinkosähköveneeseen isoa aurinkopaneelista voidaan toki hyödyntää pelkästään kulutuselektroniikan tarpeisiin kun vene on pysähdyksissä.

On arvioitu, että ns. satamaveneily tulee kasvattamaan suosiotaan tulevaisuudessa. Satamaveneily tarkoittaa veneilyä, jossa suurin osa vesilläoloajasta vietetään satamissa. Tämä veneilijäryhmä haluaa mukavuutta ja helppoutta. He haluavat olla maasähkön piirissä, jotta kaikki veneen laitteet ovat käytettävissä. Aurinkosähköveneeseen iso aurinkopaneelista mahdollistaa tämän käyttäjäryhmän reiviin laajentumisen myös luonnonsatamiin, sillä kaikki veneen laitteet ovat aurinkopaneeliston ja suuren akuston ansiosta käytettävissä. On myös arvioitu, että tietyn ihmisryhmän kiireinen elämäntyyli tulee säilymään tai jopa kasvamaan tulevaisuudessa. Nämä ihmiset haluavat kokeilla lyhyiden lomiansa aikana eri harrasteita, eivätkä välttämättä halua sitoutua viettämään koko lomaansa veneillen. (Peltonen & Pekkala 2011, 26.) He harrastavat päiväretkiä ja haluavat veneilyltä elämyksiä ja rauhoittumista. Aurinkosähkövene soveltuu erinomaisesti myös tämän ihmisryhmän käyttöön, sillä se tarjoaa riittävän toimintamatkan päiväretkiin sekä mahdollistaa hiljaisen tavan nauttia luonnosta.

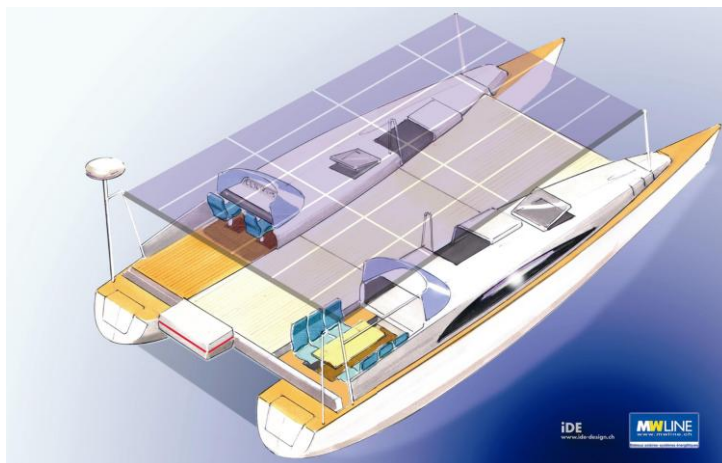
Open wave -hanke teki kyselytutkimusta, jossa kartoitettiin veneilijöiden mielipiteitä tiettyihin väittämiin. (Peltonen & Pekkala 2011, 38). Tutkimuksen perusteella voi tehdä johtopäätöksen, että aurinkosähkövene soveltuu erinomaisesti suuren veneilijäryhmän käyttöön. Syitä ovat mm. halu kiireettömyyteen ja luonnosta nauttimiseen, veneily mieluiten tutuilla vesillä ja huomion kiinnittäminen veneilyssä erityisesti ympäristöasioihin. Aurinkosähkövene soveltuu erinomaisesti myös vapaa-ajankalastukseen, jos kalastukseen ei kuulu pitkiä siirtymäajoja. Esimerkiksi vetouistelussa käytettävät nopeudet ovat yleensä vain 2 – 3 solmua. Tällaista nopeutta hyvin suunniteltu aurinkosähkövene kulkee erittäin pienellä energiankulutuksella ja hyvällä kelillä suoraan aurinkopaneeliston energialla. Aurinkosähkövene on siis ennen kaikkea päiväretkeilijöiden, vapaa-ajankalastajien (varauksin), kiireettömien veneilystä nautiskelijöiden ja satamaveneilijöiden vene.

Kuten aiemmin jo mainittiin, aurinkopaneeleja on pidetty venepuolella kalliina ratkaisuna suuremmissa mittakaavassa. Aurinkopaneelien merkittävä tuotannon kasvu ja lisääntynyt käyttö rakennuksissa on pudottanut niiden hintoja. Näin on käynyt etenkin

taloihin asennettavien kehyksellisten paneelien osalta. Mikään ei estä näiden kehyksellisten paneelien käyttöä myös veneissä, jos asennuspaikka on niille soveltuva. Huomiota tulee kiinnittää paneelien meriveden keston (murtovesissä merkitys vähäinen). Erityyppisten aurinkopaneelien saatavuus on tällä hetkellä hyvä, niin paneelien kuin muidenkin komponenttien osalta.

### 5.3 Aurinkosähkövenehankkeet, -tuotteet ja kilpailut maailmalla

Maailmalla on toteutettu muutamia merkittäviä aurinkosähkövenehankkeita. Vuonna 2012 päättyneessä Planet solar -projektissa kuljettiin maapallon ympäri saksalaisvalmisteisella aurinkosähköveneellä (First around the world with solar energy, Planet solar). Sveitsiläinen Transatlantic 21 (ks. kuva 10) oli ensimmäinen Atlantin ylittänyt aurinkosähkövene vuonna 2007 (The "sun21", Transatlantic 21). Solarwave on Itävaltalainen projektivene, joka on kiertänyt maailmaa jo 7000 merimailia pelkästään aurinkoenergian voimalla, osoittaakseen tekniikan toimivuuden venekäytössä (Project, Solarwave). Suomessa urauurtava aurinkosähköveneen kehittäjä on ollut Jorma Pongkala, joka on tullut tunnetuksi kuvassa 11 esiintyvistä persoonallisesta Aton -aurinkosähköveneestään.

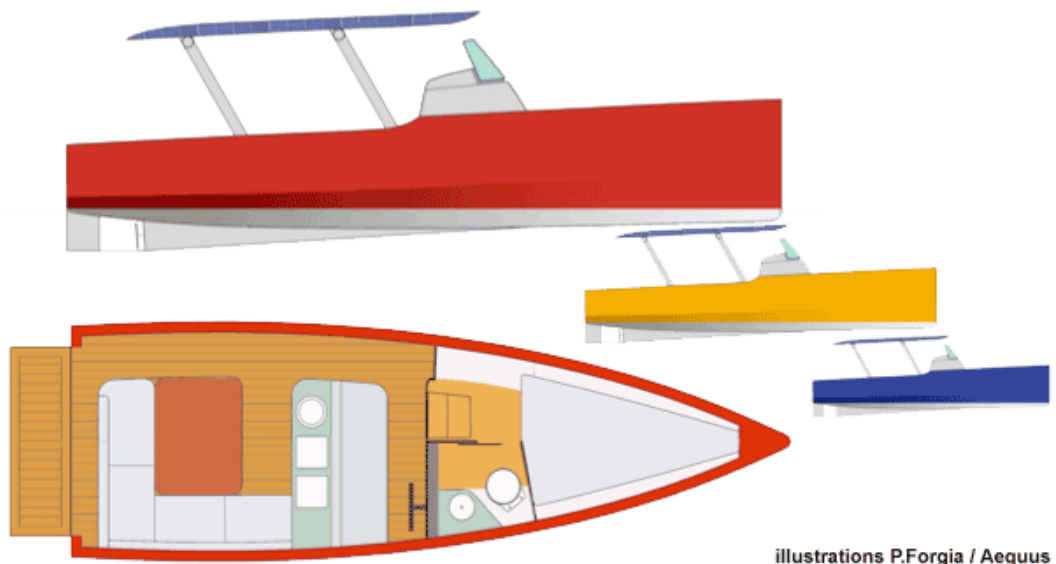


Kuva 10. Transatlantic 21 -mallinnos (The "sun21", Transatlantic 21)



*Kuva 11. Aton -aurinkosähkövene (Wallen matkassa, Yle)*

Tarjolla on myös kaupallisia aurinkosähköveneitä. Yksi markkinoilla olevista veneistä on ranskalaisen Aequus boats:in valmistama uppoumarunkoinen Aequus 7.0 (kuva 12). Se on varustettu 6 m<sup>2</sup>:n aurinkopaneelikatoksella, jonka ansiosta vene on täysin autonominen tarvitsemansa energian suhteen. Katos on taittavissa alas kuljetuksen tai satamasäilytyksen ajaksi. Alas laskettuna katos suojaa ohjaamoja sateelta ja epäpuhtauksilta. Veneen 7 -metrinen runko on lasikuitua ja se saavuttaa 7 solmun nopeuden. Veneessä on sähköpropulsio ja AGM -akusto. Lisäenergiantarpeeseen veneessä on 220 V maasähköliitäntä, jonka kautta akut pystytään lataamaan. (Aequus 7.0 Solar boat, Aequus boats.)



*Kuva 12. Aequus 7.0 -mallinnos (Aequus 7.0, l'électro-solaire qui n'a pas de complexe)*

Ruotsalainen venevalmistaja Roiro valmistaa Roiro 55 aurinkosähkövenettä. Veneen lasikuiturunko on 5,5 metriä pitkä ja painaa akustoineen (litium) 165 kg (lyijyakustolla 210 kg). Toimintasäteeksi valmistaja lupaa 25 - 50 mpk riippuen akustosta. Roiro 55 saavuttaa 9 solmun nopeuden 3 kW moottorillaan. Vene saa energiansa aurinkopaneeleista, jotka on sijoitettu veneen laitoihin sisäpuolelle. Lisäenergiantarpeeseen veneessä on maasähköliitäntä. (Technical facts, Roiro.)

Saksalainen venevalmistaja Solarwaterworld AG valmistuttaa Suncat 23 venettä Taiwanissa. Suncat 23 (ks. kuva 13) on aurinkosähköstä energiansa saava katamaraani. 7 metrinen runko on lasikuitua ja se saavuttaa 6 solmun nopeuden 2,8 kW sähköperämoottorillaan. Aurinkopaneelikatos on teholtaan 860 W. Samalla venevalmistajalla on myös muita aurinkosähkövenemalleja valikoimissaan. (SC23 Overview, Horizonyacht.)



*Kuva 13. Suncat 23 (Suncat 23 Solar powered yacht 2009)*

Suomalainen Port Arthur Oy valmistaa Simppu 620E -venettä. Lisävarusteena saatava teholtaan 350 W aurinkopaneelikatos muuttaa veneen osittain aurinkosähköllä kulkevaksi. Vene ei siis täytä SBI-kaavan mukaan aurinkosähköveneen määritelmää. Simppu on uppoumarunkoinen kokonaispituudeltaan 6,1 metriä pitkä lasikuituvene. Sähkömoottorivaihtoehtona on joko 4 kW perämoottori tai 4,3 kW pod-vetolaite. Akustona veneessä on joko 48 V 160 – 220 Ah lyijyakusto tai 48 V 160 Ah litium-akusto. Veneessä on lisäenergiantarpeeseen maasähköliitäntä. (Simppu 620e, Simppu.)

Kaupallisia vaihtoehtoja siis on, mutta tarjonta on silti hyvin vähäistä. Litium -akkujen hinnan laskun ohella aurinkosähkövenneiden yleistymisen edellyttää sähköpropulsioon yleistymistä ja laajempaa markkinointia.

Aurinkosähköveneitä tuo osaltaan tunnetuksi eri aurinkosähkövenekilpailut, joita järjestetään ympäri maailmaa. Kisoista tunnetuimpia ovat Hollannissa järjestettävä DONG Energy Solar Challenge ja Dutch Open Solarboat Challenge sekä Yhdysvalloissa pidettävä Solar Splash. Kisoihin osallistuvat veneet ovat muotoilultaan ja käytävyydeltään usein melko kaukana normaalista huviveneestä, mutta tekniikka on täysin sovellettavissa myös huviveneisiin. Kisat edistävät omalta osaltaan aurinkosähköveneiden teknistä kehitystä ja tunnettavuutta.

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun ja Mikkelin ammattikorkeakoulun yhteisprojektina suunniteltu ja valmistettu "Midnight Sun Finland" -aurinkosähkövene (ks. kuva 14) osallistui DONG Energy Solar Challenge -kilpailuun vuonna 2012. Tuloksena kisoista oli kolmas sija B-luokassa. B-luokka käsitti veneet, joiden maksimi runkopituus on 8 metriä ja veneessä on kyydissä kaksi henkilöä kisan aikana. Veneen runko suunniteltiin mahdollisimman pienellä kulkuvastuksella liikkuvaksi. Runkomuodoksi valikoitui trimaraani, jonka sivurungot ovat normaalissa ajossa lähes ilmassa, mutta veneen kallistuessa painuvat reilusti veteen ja tuovat lisävakautta. Runko rakennettiin pääosin hiilikuituisena ja kerroslevyrakenteisena. Moottoriksi valittiin Perm132 kes- tomagneettimoottori, joka yhdistettiin itse suunniteltuun vetolaitteeseen. Aurinkopaneelitehoa veneessä oli kisajärjestäjien rajaama 1250 W. Aurinkopaneelit lataavat MPPT -säätimen kautta European Batteries:n valmistamaa 1 kW LiFePo<sup>4</sup> akustoa (jännite 26 V). Tällä akustojäännitteellä Perm 132 -moottori tuottaa 2,2 kW tehon.



Kuva 14. Midnight Sun Finland -aurinkosähkövene. Mallinnos: Visa Vartiainen

## 6 AURINKOSÄHKÖVENEEN SUUNNITTELUSSA HUOMIOITAVIA TEKIJÖITÄ

Vene on aurinkosähkön hyödyntämisen kannalta erinomainen ympäristö etenkin huviveneissä. Se vaatii asennusympäristönä aurinkopaneeleilta kuitenkin sellaisia kriteereitä, joita rakennusympäristössä käytettäessä ei täydy samalla tavalla huomioida. Vene, joka saa energiansa täysin auringosta, on hyvin altis säännuutoksille ja muille säteilytehoa rajaaville tekijöille. Nämä tekijät tulee ottaa huomioon energian riittävyyttä arvioitaessa. Myös muotoilulliset tekijät ja venetyyppi asettavat vaatimuksia aurinkosähkön hyödyntämiselle. Näistä kriteereistä, sekä aurinkosähköveneen kustannuksista on kerrottu enemmän seuraavissa alaluvuissa.

### 6.1 Paneelien asennusympäristö

Huviveneitä käytetään eniten kesäkuukausina, ja säällä, jolloin auringon säteilyteho on suurimmillaan. Pääosalle veneilijöistä lomakauden ulkopuolinen käyttö on satunnaista, joten aurinkopaneelilla on tällöin enemmän aikaa lataukseen (Veneilyn määrä ja taloudelliset vaikutukset Suomessa 2005,18). Akuston täytyttyä latausjärjestelmä siirtyy ylläpitolataukseen, jolloin vene on valmiudessa kunnes sitä seuraavan kerran tarvitaan.

Veneen akkupankin tullessa täyteen olisi mahdollista suunnata paneelien tuotto muihin tarpeisiin. Isoissa aurinkosähköveneissä saattaa olla teholtaan jopa 5 – 10 kW järjestelmiä. Tuottoa olisi mahdollista ohjata esim. satamapalveluiden tarpeisiin tai sataman toisiin veneisiin. Sähköntuotosta voisi saada korvauksen esimerkiksi edullisemman satamapaikkamaksun muodossa. Tämä toimintamalli edellyttäisi satamaan rakennettavaa erillistä toiminnan mahdollistavaa järjestelmää ja aurinkosähköveneiden yleistymistä. Aurinkosähköveneiden energiantuotantoa olisi mahdollista hyödyntää myös kesämökkien sähköntuotantoon. Esimerkiksi saarissa sijaitsevat mökit ovat usein valtakunnan sähköverkon ulkopuolella. Mökinkäyttäjä voisi aurinkosähköveneen avulla hoitaa mökkinsä sähköistyksen.

Aurinkopaneelien toimivan sijoittelun kannalta tärkeimmät kriteerit ovat: viiveys, varjottomuus, huollettavuus ja suuntaus. Lisäksi asennusympäristö asettaa vaatimukset komponenttien korroosiokestävyydelle. Näitä tekijöitä esitellään tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

### 6.1.1 Viileys

Hyvän säteilytehon lisäksi aurinkosähkön venekäyttöä puoltaa viileä meri- tai järvi-ilma. Viileä ilmasto parantaa aurinkopaneelien, akuston ja lataussäätimen hyötysuhdetta (ks. luku 2.4.2).

Mahdollisimman viileä asennusympäristö saavutetaan asentamalla paneelit hyvintuultuvaan paikkaan. Veneen katto on asennuspaikkana hyvin tuulettuva, jos se ei sisällä syvennyksiä, joissa ilma ei pääse vaihtumaan. Jos paneelit ovat kehyksellisiä, ne tulisi asentaa irti veneen pinnasta, jotta ilma pääsee vaihtumaan. Veneen pintaan kiinnitettävät taipuvat tai puolitaipuvat paneelityypit ovat vaikeampia saada tuulettumaan, ellei paneelin alle jätetä ilmatilaa. Paneelien viilennykseen on kehitetty koneellisia tuuletusjärjestelmiä tai haihtumiseen (evaporaatioon) perustuvia järjestelmiä. Viilennysjärjestelmillä on saavutettu parannusta paneelien tuottoon. Asennuspaikan materiaalin (lujitemuovi, puu, metalli) tulisi olla mahdollisimman vähän valoa absorboivaa, eli esim. väriltään valkoista. Tällöin pinta säteilisi mahdollisimman vähän lämpöä.

### 6.1.2 Varjottomuus ja huollettavuus

Satamalaiturit sijaitsevat usein etäällä varjostavista kohteista, kuten rakennuksista ja puista. Käyttäjä voi mahdollisesti myös itse vaikuttaa varjottomuuteen valitsemalla venepaikan, joka on mahdollisimman etäällä rannasta. Yleensä paras paikka paneelien asennukselle varjottomuuden kannalta löytyy veneen katolta. Varjottomuus saavutetaan asentamalla paneelit mahdollisimman kauas veneen rakenteista, jotka voisivat muodostaa paneelien päälle varjoja. Tällaisia voivat esimerkiksi olla asennustilan vieressä sijaitsevat kaiteet, mastot, seinät tai muut korkeat rakenteet. Paneelit tulisi lisäksi sijoittaa sellaiseen paikkaan, johon veneessä olevat henkilöt eivät tavallisessa käyttötilanteessa muodosta varjoja.

Oikein valittu paneelien asennuspaikka veneessä takaa varjottomuuden, tosin purjeverneissä täydellinen varjottomuus voi olla vaikea saavuttaa ellei mastoa laske alas. Kaukana puista oleva venepaikka on hyvä myös syksyisten lehtien kannalta, joita kertyy silloin vähemmän paneelien päälle. Pienikin varjo paneelin päällä vaikuttaa merkittävästi paneelin tuottoon.



Helppo huollettavuus mahdollistetaan asentamalla paneelit helposti saavutettavaan paikkaan, jossa paneelit on puhdistettavissa. Jos asennuspaikkana on esim. katto, sinne täytyy päästä kävelemään tai puhdistus on mahdollistettava kattoluukun kautta. Katto voi olla myös alaslaskettava. Paneelirivistöjen väliin voi olla tarpeen suunnitella huoltokäytävät (jos katto on kävelyn kestävä), mikä helpottaa paneelien puhdistamista. Aurinkopaneelijärjestelmä on muuten lähes huoltovapaa lukuun ottamatta ajoittaista paneelien puhdistusta.

### 6.1.3 Suuntaus

Paneelit voidaan päätyä suuntaamaan aurinkoa kohti tietyssä kulmassa. Tähän voi olla syynä vähäisempi puhdistustarve tai suuremmat tuottovaatimukset tietyllä paneelipinta-alalla. Jos venettä käytetään paljon kesäkuukausien ulkopuolella, kallistuksen merkitys korostuu. Auringon tulokulman vaikutuksesta tehoon kerrottiin luvussa 2.4.3. Paneelien asentaminen kulmaan kohti aurinkoa on normaali toimintapa asennettaessa aurinkopaneeleja rakennuksiin. Liikkuviissa kohteissa asennustapaan vaikuttavat muutkin asiat.

Paneelien asentaminen optimaaliseen kallistuskulmaan voi osoittautua veneissä hankalaksi. Kiinteästi tiettyyn kallistuskulmaan asennetut paneelit eivät veneissä toimi tehokkaasti, sillä veneen liikkuaessa suuntaus aurinkoon muuttuu (ks. luku 2.4.3 atsimuuttikulma). Veneasennuksissa kallistusjärjestelmän kiinnityksen pitäisi olla kääntyvä ja auringonseuranta automaattista, jotta kallistetut paneelit tulisivat kyseeseen. Tällaisesta asennustavasta puhuttaessa käytetään nimitystä aurinkoseurain. Aurinkoseuraimia, jotka ovat auringon suunnan mukaan kääntyviä paneelien asennustelineitä, käytetään melko yleisesti aurinkopaneelijärjestelmissä. Veneissä ne ovat kuitenkin harvinaisia. Aurinkoseuraimia pidetään yleensä kannattavina hankintoina vasta siinä vaiheessa, kun asennustila ei salli lisäpaneelitehon hankintaa (Boxwell 2011, 48). Veneissä asennustila on usein hyvin rajattu, joten aurinkoseuraimella voitaisiin saada parempi tuotto, mikäli asennustila uhkaa loppua. Tällainen järjestelmä on kuitenkin arvokas ja vaatii huoltoa. Lisäksi kallistetut paneelit lisäävät ilmanvastusta ja vaativat tuulikuorman takia paneelien kiinnitysrakenteilta enemmän. Kääntyvistä paneeleista olisi kyllä etua veneen kelluessa satamassa tai ollessa talvisäilytyksessä. Veneen ollessa paikallaan satamassa, saadaan kallistettavilla paneeleilla mahdollisesti lisätuottoa verrattuna vaakatasoon asennettuihin paneeleihin. Kallistetut paneelit vähentävät puh-

distustarvetta, kun vesi, lika ja roskat eivät pysy pinnassa yhtä hyvin kuin vaakasennuksessa. Jos tällaista paneelia ei puhdisteta säännöllisesti, sen teho heikkenee (Greenspan, Solar panel efficiency).

Suuntauksen tuoma lisäetu paneeliston tuottoon voidaan vaakasennuksessa korvata lisäämällä paneelien määrää. Aina paneelien määrän lisääminen ei kuitenkaan ole tilan tai lisäkustannusten vuoksi mahdollista. Paneelit voidaan asentaa myös veneen kyljille, jos halutaan lisätehoa hajasäteilyn muodossa. Laidalle asennetut paneelit voivat hyödyntää veden heijastusta ja kaappaavat hajasäteilyä katolle asennettuja paneeleja tehokkaammin. Ohutkalvopaneelit sopivat erityisen hyvin laita- ja kylkiasennukseen sillä ne toimivat yksi- ja monikidepaneelina tehokkaammin heikossa valaistuksessa ja varjoisissa olosuhteissa. (Casey 2012.)

#### 6.1.4 Kosteus ja suolaisuus

Ympäristön kosteus ja suolaisuus asettavat erityisvaatimuksia aurinkosähköjärjestelmälle. Tällainen ympäristö altistaa laitteet korroosiolle. Vene-elektroniikalta vaaditaan näin ollen korroosiokestävyyttä normaalia enemmän. Aurinkopaneelit asennustelineineen ovat yleensä ainoat ulkotiloissa olevat komponentit yhdessä virtajohtimien kanssa. Suolaisen meriilmaston on todettu vaikuttavan aurinkopaneelien alumiinisiin kehyksiin, jos alumiini ei ole ollut tarpeeksi hyvälaatuista. Veneissä tulisi siis käyttää paneeleita, joiden kehykset on luokiteltu kestäväksi myös meriilmastossa tai vaihtoehtoisesti on käytettävä kehyksettä paneeleita. Myös aurinkopaneelien liitäntöjen tulee kestää suolavesirasitusta. Paneelien kiinnitykset joutuvat veneissä kovalle rasitukselle, joten ne on syytä mitoittaa normaalia järeämmiksi. Aurinkopaneelissa ei ole liikkuvia osia ja niille luvataan pitkä käyttöikä (pitkät takuuajat). Siksi aurinkopaneelit sopivat hyvin vaatimaan veneympäristöön.

Veneiden tasavirtajärjestelmiä koskeva standardi SFS-EN ISO 10133 määrittää rajat kaapelityypeille, mitoitukselle, liittimille ja mm. akuston sijoitukselle. Standardi ei ota kantaa suoraan aurinkosähköjärjestelmän komponentteihin, mutta antaa yleiset rajat veneiden sähköjärjestelmälle. Aurinkosähköjärjestelmät ovat ulkokäyttöön suunniteltuja ja paneelilla on korkea IP-luokitus. Veneiden tasavirtajärjestelmiä koskeva standardi antaa säännöt laitteiden IP-luokitukselle. Veneen kannella sijaitsevat laitteet ja liitokset, jotka voivat joutua upotusrasitukseen, tulee olla luokitukseltaan IP67. Sama IP67 koskee myös muita järjestelmän laitteita, jotka voivat altistua upotusrasituk-

selle sekä pilssissä kulkevia johtimia ja liitoksia (liitokset oltava aina pilssivesitason yläpuolella). Roiskevedelle altistuvien, säältä suojaamattomien komponenttien ja käytettyjen liitosten tulee olla vähintään luokkaa IP55. (SFS-EN ISO 10133 2000.) Lataussäädin ja mahdolliset muut järjestelmän komponentit on yleensä sijoitettu suojattuun tilaan. Venekäyttöön valmistetaan sellaisia lataussäädinmalleja, jotka on paremmin suojattuja ulkoilmalta. Myös suoraa upotusrasitusta kestäviä lataussäädinmalleja on kaupan. (Phocos, Smsolar). Säältä suojatut sisätiloissa olevat järjestelmän osat saavat olla IP20-luokiteltuja. (SFS-EN ISO 10133 2000, 6–7).

## 6.2 Energian riittävyys

Kuten todettua, asennusympäristö veneissä tarjoaa hyvät puitteet aurinkosähkön hyödyntämiselle. Tästä huolimatta yksi tärkeimmistä kysymyksistä on; riittääkö tuotto kattamaan kulutuksen? Jos aurinkosähköä aiotaan käyttää veneen liikuttamiseen ilman energian varastointia, on veneessä oltava huomattavan paljon aurinkopaneelipinta-alaa ja tyydyttävä alhaisiin nopeuksiin sekä hyväksyttävä se, että käyttöä rajoittaa auringon säteilyn intensiteetti käyttöhetkellä. Aurinkosähköveneen käyttäminen ilman energian varastointia on siis tietyissä tapauksissa mahdollista, mutta se asettaa paljon rajoitteita. Aurinkosähkön hyödyntäminen ilman energian varastointia parantaa käytettäessä kuitenkin hieman järjestelmän hyötysuhdetta, sillä häviöt akuston latauksessa jäävät pois. Myös akustollinen järjestelmä voidaan suunnitella niin, että kaikki paneeleilta saatava energia otetaan suoraan käyttöön ilman energian varastointia.

Käytännössä veneiden aurinkosähköjärjestelmissä on aina mukana akusto. Akuston avulla aurinkosähköveneen käyttöalue laajenee ja se mahdollistaa konetehon käytön säästä riippumatta. Keskityn tässä työssä järjestelmiin, joissa on energian varastointimahdollisuus. Koska aurinkopaneeleista ei yleensä saada venematkan aikana kuin murto-osa tarvittavasta energiasta, pitää energia ottaa akustosta. Akuston koko rajaa näin veneen toimintamatkaa käytössä olevasta konetehosta ja paneelien tuotosta riippuen. Jos kulutus on suuri veneen kokoon nähden, voi akkupankin paino tai hinta nousta esteeksi aurinkosähkön hyödyntämiselle. Jos kyseessä on lyijyakusto, rajoittavana tekijänä on yleensä paino, jos taas litium -akusto, rajoittavana tekijänä on tällä hetkellä hinta.

Aurinkopaneelien kohtalaisen heikosta hyötysuhteesta ja akkujen pienestä energiatihedystä johtuen aurinkosähköveneen (kuten myös sähköveneen) toteutukselle on

tiettyjä rajoitteita. Niiden huomiotta jättäminen ei useinkaan ole kustannustehokkuuden ja veneen ominaisuuksien kannalta järkevää. Veneen energiankulutus pitää olla maltillinen. Yleensä tämä rajaa liukuvarunkoiset veneet suunnitelmista pois, ellei toiminta-aikaa supisteta pieneksi. Uppoumarunkoinen vene on aurinkosähkön hyödyntämiseen paras runkomalli. (Background knowledge, Electricboat motors). Mahdollisimman pienellä kulkuvastuksella matkanopeutta liikkuva uppoumarunkovene, mahdollistaa aurinkosähkön tehokkaan hyödyntämisen toimintamatkan kärsimättä. Uppoumarunkoiselle veneelle lasketaan "nyrkkisäännön" mukaisesti tehontarpeeksi sähköpropulsiolla 2 – 3 kW/tonni (Electric drive systems, FisherPanda). Tehovaatimus on pieni liukuvarunkoisen veneen tehosuositukseen verrattuna. Kapearunkoiset (suuri pituus-leveysuhde,  $L_{wl}/B_{wl}$ ) monirunkoveneet liikkuvat energiatehokkaasti vielä puoliliukunopeuksilla, joten ne tarjoavat mahdollisuuden nopeampaankin liikkumiseen aurinkosähkön voimin. (Graham 1996.)

Paneelien asennukseen soveltuva pinta-ala on tärkeä aurinkosähkön hyödynnettävyyttä säätelevä tekijä. Veneessä tulisi olla riittävästi paneelien asennuspinta-alaa suhteessa energiatarpeeseen. Käytännössä suurimmat asennuspinta-alat saavutetaan monirunkoveneissä. Jos aurinkopaneelin hyötysuhde on esimerkiksi 18 %, saadaan  $1000 \text{ W/m}^2$  valon intensiteetillä kooltaan  $1 \text{ m}^2$  aurinkopaneelistä 180 W energiaa. Tätä energiamäärää ei yleensä saada kokonaisuudessaan käyttöön vaan johdin-, lataussäädin- ja akkuväviöt kuluttavat tästä osan. Kun tiedetään auringon säteilyteho, olosuhteet, paneelien ja muun järjestelmän hyötysuhde, tarvittava energiamäärä ja missä ajassa se täytyy saada tuotettua, voidaan laskea tarvittava paneelipinta-ala. Aurinkosähkön yksi suurista eduista on sen helppo laajennettavuus. Kun laajennettavuus huomioidaan järjestelmää suunniteltaessa, paneelikapasiteettia on helppo kasvattaa tarvittaessa jälkeinpäin. Laajennettavuus tietysti edellyttää, että veneen asennuspinta-ala on riittävä laajennukselle.

Veneen käyttötiheys (käyttökertojen väli) määrittää yhtenä tekijänä aurinkopaneeliston koon. Mitä tiheämpi veneen käyttöväli on, sitä lyhyempi on latausaika. Lyhentyneet latausaikat vaatii enemmän lataustehoa. Lisätehontarve voidaan saavuttaa joko paneeliston ja muun järjestelmän hyötysuhdetta kasvattamalla tai lisäämällä paneelipinta-alaa. Veneen hyödynnettävissä olevan paneelien asennuspinta-alan määrä rajaa veneen minimi käyttövälin. Lataustehon määrä on riippuvainen vuodenajasta, eli paneelipinta-ala, joka riittää kesällä, ei riitä enää syksyllä. Oletuksena tässä on, että käyt-

töaste säilyy samana. Voidaan siis sanoa, että akusto määrää toimintamatkan ja paneelipinta-ala veneen minimi käyttövälin. Aurinkosähkö ei siis sovi ainoaksi energialähteeksi veneisiin, joille halutaan pitkä toimintamatka säästä riippumatta ja erittäin lyhyt käyttökertojen väli. Tällaisissa tapauksissa aurinkosähkö vaatii tuekseen esim. generaattorin, jolloin puhutaan hybridikäytöstä.

### 6.3 Kustannukset

Sähkövene ilman aurinkopaneeleita voi tietyissä tapauksissa olla aurinkosähkövenettä järkevämpi sijoitus. Jos käyttäjällä on laituripaikassaan latausmahdollisuus maasähköstä ja hän tekee vain lyhyitä venematkoja, on ehkä turhaa maksaa ylimääräistä aurinkopaneelistosta. Aurinkosähköveneen edut verrattaessa sähköveneseen tulee parhaiten esille tilanteissa, joissa käyttäjällä ei ole maasähköä tarjolla ja käyttäjä viettää paljon aikaa vesillä. Voi myös olla niin, että venemalli tai veneen käyttö ei salli aurinkopaneeliston asennusta, mutta sähköpropulsio on mahdollinen.

Aurinkosähköveneen valmistuskustannukset ovat vastaavaa polttomoottorilla varustettua venettä korkeammat. Tämä johtuu tekniikan suuremmasta määrästä ja sen kustannuksista. Aurinkosähkövenessä ei ole käyttökuluja, lukuunottamatta harvoin tehtäviä huoltoja ja akuston uusimiskuluja. Koska käyttökuluja ei juuri ole, on aurinkosähkövene sitä taloudellisempi, mitä enemmän sillä ajetaan. Veneestä ja asennetusta tekniikasta riippuu, missä käytön vaiheessa aurinkosähkövene tulee edullisemmaksi kuin polttomoottorivene vai tuleeko ollenkaan. Yleistäen voidaan kuitenkin sanoa, että tämänhetkisellä hintatasolla aktiivinen veneilyn harrastaja voi päästä aurinkosähköveneen kanssa voitolle 10 -vuoden sisällä veneen hankinnasta. Polttoaineen hinta tulee todennäköisesti jatkamaan nousuaan. Vaikka venemoottoreiden polttoaineenkulutus tulisi vähenemään, se tuskin riittää korvaamaan polttoaineen hinnannousua. Polttomoottoriveneen ja aurinkosähköveneen kustannuksia voidaan käsitellä esimerkin avulla (ks. taulukko 1).

Taulukko 1. Esimerkkiveneen tiedot eri tekniikoilla. Veneen runko on kaikissa sama, ainoastaan tekniikka vaihtuu.

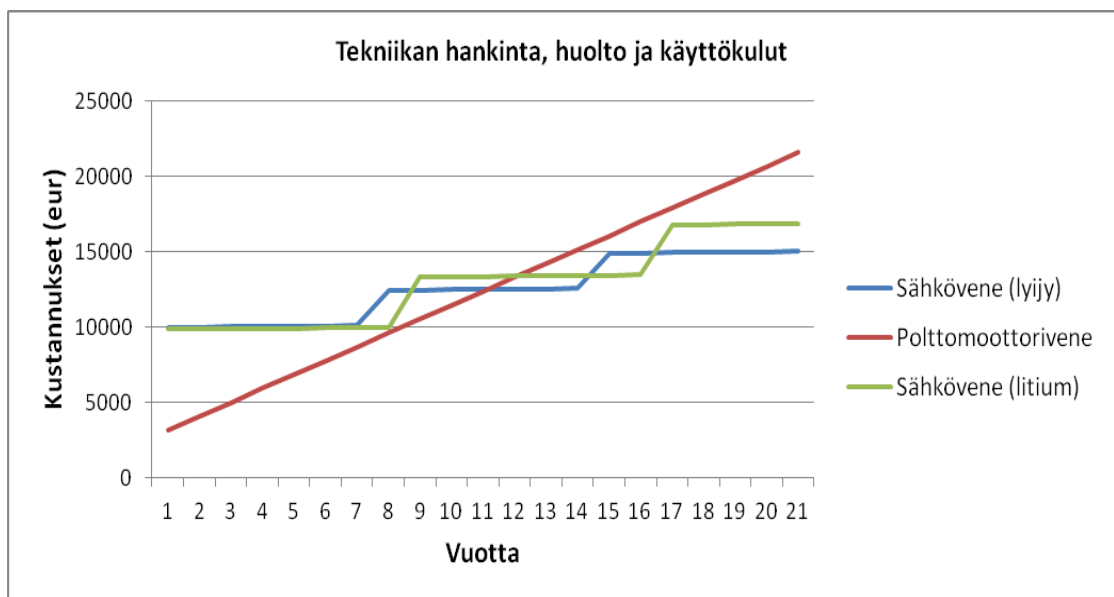
	Aurinkosähkövene (lyijy-akusto)	Aurinkosähkövene (Litium-akusto)	Vene polttomoottorilla
Pituus (m)	6	6	6
Veneen paino (t)	1	0,7	0,6
Matkanopeus (kn)	5	5	5
Toimintamatka (nml)	10	10	10
Akuston kapasiteetti (kW)	12	6,5	0,1
Akuston DoD (%)	70	80	
Akuston paino (kg)	400	80	
Akuston syklien määrä (kpl)	700	1500	
Akuston hinta (eur)	2700	3300	150
Moottorin teho (kW)	4	4	6
Moottorin hinta (eur)	4000	4000	3000
Polttoaineen kulutus matkanopeudella (L)			2
Energian kulutus matkanopeudella (kW)	2,4	1,7	
Vuotuiset huoltokulut (eur)	20	20	200
Polttoaineen hinta (eur/L)			1,8

Aurinkopaneelien kokonaisteho (W)	1750	1200	
Aurinkopaneeliston hinta (eur)	1750	1200	
MPPT-lataussäätimen hinta (eur)	500	500	
Paneelien kiinnikkeet (eur)	100	100	
Johdotukset ym (eur)	100	100	

Tekniikan kustannukset yhteensä (eur)	9150	9200	3150
--	------	------	------

Tässä käsiteltävän esimerkkiveneen tiedot näkyvät yllä olevasta taulukosta 1. Polttomoottoriveneeseen on asennettu teholtaan 6 kW bensiinikäyttöinen perämoottori. Aurinkosähköveneessä on teholtaan 4 kW sähköperämoottori. Ero asennetussa moottoritehossa johtuu sähkömoottorin paremmasta kiihtyvyydestä, manööverausrakenteesta ja potkurin hyötysuhteesta. Veneellä ajetaan kauden aikana sata 10:n merimailin matkaa. Yhteensä kauden aikana matkaa kertyy siis 1000 merimailia. Kuvan 15 kuvaajasta voidaan nähdä, että litium- ja lyijyakkuvaihtoehdot ovat lähes tasoissa kulujen suhteen. Syy tasaisuuteen on akuston paino, joka vaikuttaa veneen kulkuvastukseen. Kulkuvastuksen väheneminen vähentää konetehon tarvetta. Tästä syystä litium-akusto saa esimerkin tapauksessa olla kapasiteetiltaan huomattavasti pienempi, mikä laskee hintaa.

Kuvan 15 kuvaajasta nähdään, että polttomoottori on esimerkin tapauksessa edullisempi 11 – 12 vuoden käyttöikänsä asti, jonka jälkeen aurinkosähkövene muuttuu polttomoottoria edullisemmaksi. Kuten kuvaajasta nähdään, jo 8 vuoden kohdalla aurinkosähkövene käy lähellä polttomoottoriversion kuluja. Akustojen uusimiset näkyvät kuvaajassa portaina. Huoltokuluihin on aurinkosähköversioissa laskettu mahdolliset sulakkeiden ja hiiliharjojen tai laakereiden vaihdot (20 eur/vuosi). Polttomoottoriversion osalta huoltokuluihin on laskettu vuotuinen kausihuolto huoltoliikkeessä (200 eur/vuosi). Pitää muistaa, että polttomoottori kuluu kun sillä ajetaan. Se aiheuttaa kulutuksen ja päästöjen kasvua. Sähkömoottori kestää sen sijaan paljon kauemmin ja kuluu hitaammin. Esimerkin tapauksessa akuille on laskettu 8 vuoden käyttöikä. Akut ovat 8 vuoden jälkeen menettäneet vasta 20 % kapasiteetistaan. Ne ovat siis myytävissä käytettyinä eteenpäin muihin sovelluksiin. Akkujen myynnistä saatava summa tasoittaa akuston uusimisesta koituvia kuluja. Tätä ei ole huomioitu taulukossa, sillä käytettyjen akkujen hinnoista ei löytynyt luotettavaa tietoa.



Kuva 15. Esimerkkiveneen vaihtoehtoisten tekniikoiden kustannusten vertailu. Vertailussa on sähkövene lyijy- ja litium -akustolla, sekä polttomoottorivene.

Akkujen hintaa voidaan vertailla eri tavoin. Vertailun kohteena voivat olla: akun ostohinta, hinta suhteessa akun luovuttamaan energiamäärään syklisen ikänsä aikana tai hinta suhteessa akun luovuttamaan energiamäärään elinikänsä aikana. Vertailussa on tärkeää katsoa akkujen C-arvoa, jonka tulisi olla sama vertailtavilla akuilla. Jos akkua puretaan usein ja syväälle, voi olla järkevää sijoittaa akkuun joka tarjoaa parhaan Wh/€

suhteen syklisen eliniän mukaan. Jos taas akkua käytetään vähän, voi akun eliniän mukainen Wh/€ suhde olla parempi vertailukeino. Suuren syklisen iän omaavan akun sykleistä voi mennä suuri osa hukkaan jos akkua käytetään vähän, sillä akku tuhoutuu vanhuuteensa. Akkutyypin on siis valittava käytön mukaan. Ostohinnaltaan edullisin akku ei välttämättä ole edullisin pitkällä aikavälillä.

#### 6.4 Muotoilulliset tekijät

Suuren aurinkopaneeliston mahduttaminen pieneen tilaan ei ole muotoilullisesti helppoa. Aurinkosähkövene vaatii suunnittelua, jossa paneelien tilatarpeet ja asennuspaikan vaatimukset otetaan huomioon. Tästä syystä aurinkopaneelien jälkiasennus isossa mittakaavassa voi osoittautua hankalaksi jo olemassa olevaan veneeseen. Puolitaipuvien- ja taipuvien paneelien sijoittaminen veneen muotoihin on kehyksellisiä paneeleja helpompaa keveyden ja taipuvuuden ansiosta (ks. luku 2.2). Kehykselliset paneelit vaativat tasaisen asennuspaikan. Tasaisen asennuspaikan ei välttämättä tarvitse olla itse veneen muodoissa, vaan sellainen alusta voidaan luoda myös erillisillä telineillä. Kehykselliset paneelit eivät kestä kävelyä, joten niiden sijoituspaikka ei saa olla kävelyreitillä. Kehykselliset paneelit ovat myös painavampia, jolloin kattoasennuksissa tulee ottaa huomioon veneen vakavuuteen ja rakenteiden kestävyysliittyvät asiat. Kehykselliset paneelit kiinnitetään usein erillisillä kiskoilla tai kulmapaloilla veneeseen. Mikään ei kuitenkaan estä kiinnityksen suunnittelemista suoraan veneen muotoihin (ks. luku 5.3 Midnight Sun Finland -projekti). Kehyksellisten paneelien osalta käytetään myös paljon kaiteisiin kiinnitettäviä telineitä. Nykyiset pääasialliset kiinnitysmenetelmät on luotu jälkiasennuksen tarpeisiin, joten pelkästään aurinkosähkökäyttöön suunnitellun veneen ratkaisut voivat poiketa olemassa olevista tavoista. (Pv solar panels for catamarans, The multihull company.)

Kehyksettömät taipuvat tai puolitaipuvat paneelit kiinnitetään veneisiin eri keinoin. Yleisiä tapoja ovat tarrakiinnitys, pintoihin liimaaminen tai kaiteisiin ripustaminen. Taipuisat paneelit ovat kevyitä ja kestävätkä päällä kävelyä. Puolitaipuvat ovat hinnaltaan kehyksellisiä huomattavasti kalliimpia, joten laajan paneeliston rakentaminen pelkästään puolitaipuvista paneeleista voi muodostua kustannuksiltaan liian korkeaksi. Taipuvat ohutkalvopaneelit ovat edullisia, mutta toisaalta niiden hyötysuhde on heikko. Taipuvia paneeleja kannattaa niiden heikon hyötysuhteen vuoksi käyttää ainoastaan paikoissa, joihin muiden paneelityyppien asentaminen on hankalaa tai muotoilul-



lisesti kannattamatonta. Puolitaipuvat sekä taipuvat ohutkalvopaneelit ovat helposti ingroitavissa veneen rakenteisiin. Integroidulla rakenteella saadaan aikaan kevyt kokonaisuus (Gorter, 288). Valmistajien antamat takuut ovat kehyksellisillä paneeleilla yleensä pidempiä, joten niiden voidaan olettaa kestävän myös venekäytössä kehyksetömiä pidempään. Toimiva, tehokas, hyvännäköinen ja kustannuksiltaan edullinen aurinkosähkövene syntyy hyödyntämällä eri paneelityyppejä järkevästi.

## 6.5 Soveltuvuus eri venetyypeille

Kuten mainittua, aurinkosähkö soveltuu tällä hetkellä parhaiten uppoumarunkoisiin veneisiin. Syynä on uppoumarungon energiatehokas liikkuminen pienellä koneteholla. Aurinkosähkö sopii energiamuotona sekä yksi- että monirunkoveneisiin. Yksirunkoveneissä voi kylläkin olla liian vähän kansitilaa paneelien sijoitteluun, joten erillinen aurinkopaneelikatos voi olla tarpeen. Monirunkoveneessä on yleensä enemmän tasaista kansitilaa, joten se tarjoaa suuremman aurinkopaneelipinta-alan. Tapauksesta riippuen voi kuitenkin olla niin, että kaikkea tilaa ei tarvita, jolloin yksirunkoisenkin tarjoama asennuspinta-ala riittää. Verrattaessa tavanomaisia yksirunko- ja monirunkoveneitä, katamaraani on kulkuvastukseltaan kilpailukykyinen (Lazauskas & Tuck, 1996). Ollakseen kulkuvastukseltaan reilusti pienempi, yksirunkoinen vaatii kapean rungon, jolloin vakavuus heikkenee. Epävakautta pidetään veneissä yleisesti negatiivisena ominaisuutena. Aurinkosähköveneissä usein tarvittava lisäkatos ja kattokuorma (etenkin kehyksellisillä paneeleilla) lisäävät vakavuuden merkitystä. Kun summataan yhteen monirunkoveneen energiatehokkuus ja hyvä vakavuus sekä suuri tasainen ja varjoton paneelien asennustila, voidaan todeta, että monirunkovene on aurinkosähkökäyttöön ihanteellisimmin. Monirunkoveneiden kuormankantokyky on yleensä yksirunkoisia heikompi. Tämä asia pitää ottaa huomioon veneen rungon ominaisuuksissa ja rakenteissa, jotta mm. akuston tuoma lisäpaino ei muodostu ongelmaksi. Myös akkutyypin valinnalla voidaan vaikuttaa tähän asiaan. (Pv solar panels for catamarans, The multihull company.)

Moottoriveneet soveltuvat aurinkosähkön hyödyntämiseen pääsääntöisesti purjeveneitä paremmin. Purjeveneiden masto ja purjeet aiheuttavat varjon paneelien päälle, mikä heikentää paneelien tuottoa. Aurinkosähkö voi olla toimiva ratkaisu purjeveneessä, jos veneellä edetään aina pääsääntöisesti purjeilla. Tällöin energiavaatimus on pieni ja varjoisuudesta johtuvat häviöt voidaan sallia.

## 7 JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

### 7.1 Tarpeiden kartoitus

Järjestelmän suunnittelun kannalta ensimmäinen askel tarpeiden kartoituksessa on selvittää aurinkosähköveneen soveltuvuus asiakkaan käyttöön ja olosuhteisiin. Asiakkaalta tulisi selvittää hänen yleisimmät käyttötilanteet ja olosuhteet. Järjestelmä mitoitetaan yleisimmässä käyttötilanteessa toimivaksi. Yleisimmän käyttötilanteen ja olosuhteiden osalta tulisi selvittää mm. haluttu matkanopeus, toimintamatka, käyttötiheys, energiantarve, sijainti ja käyttökuukaudet. Näiden lisäksi täytyy tietysti selvittää yleiset venesuunnittelua koskevat asiakkaan tarpeet ja resurssit, kuten veneen fyysinen koko, henkilömäärä, muotoilulliset seikat, budjetti, materiaalit jne. Tässä työssä paneudutaan etupäässä vain aurinkosähköjärjestelmää koskeviin suunnittelutekijöihin.

Yleisimmästä käyttötilanteesta ja olosuhteista poikkeavat tilanteet selvitetään. Näin saadaan selville suorituskykytarpeen ylä- ja alarajat. Koko järjestelmää ei kannata ylimitoitaa ja suunnitella sitä kestävämpään jatkuvaa ylärajoilla ajoa. On järkevämpää suunnitella laitteisto yleisimmän käyttötilanteen mukaan ja suunnitella mahdollisuus tilapäiselle rajojen ylittämiseksi. Tällä tavoin vältetään esim. akkupankin yli- tai alimitoitus. Propulsion osalta tulee erityisesti kiinnittää huomiota yleiskäytöstä poikkeaviin tilanteisiin. Moottoritehon on oltava mitoitettu niin, että veneellä selviää kaikissa suunnittelukategorian tilanteissa (kuten myrsky).

Aurinkosähkövene on polttomoottorilla varustettua venettä herkempi käyttöolosuhteiden ja käytön muutoksille. Otetaan esimerkkinä tavallinen kuusimetrinen uppoumarunkoinen vene, jossa toimintamatkaa halutaan kasvattaa nykyisestä 20 merimailista 40 merimailiin. Polttomoottorin tapauksessa tämä tarkoittaa usein vain polttoainetankin kasvattamista ja ehkä pieniä muutoksia rakenteisiin. Aurinkosähköveneessä voi selvittää akkupankin kasvattamisella, rakenteiden pienillä muutoksilla ja paneelitehon kasvattamisella. Joissain tapauksissa voi tulla eteen myös akkutyypin, lataussäätimen tai kaapelipaksuuden vaihtaminen, paneelien asennustilan kasvattaminen jne.. Aurinkosähköveneessä muutokset ominaisuuksissa tai käyttöolosuhteissa aiheuttavat usein siis suurempia muutoksia tekniikkaan ja rakenteisiin, kuin polttomoottorilla varustetussa veneessä.

Toimintakenttää voi laajentaa lisäämällä kokoonpanoon polttomoottorigeneraattorin tai maasähkön latausmahdollisuuden. Jo olemassa olevan veneen muuntaminen aurinkosähkökäyttöön voi osoittautua hankalaksi. Aikoinaan polttomoottorille suunniteltu vene ei välttämättä sovellu lainkaan aurinkosähkökäyttöön. Paras lähtökohta on siis aurinkosähkön huomiointi jo suunnittelupöydällä, tosin myös olemassa olevaa venettä muokkaamalla voidaan saada toimiva kokonaisuus. Aurinkosähköveneen suunnittelu vaatii järjestelmän suunnittelun kohdentamista tietyille käyttäjäryhmälle.

## 7.2 Kulutuslaitetaulukon luominen

Kun asiakasryhmän tarpeet on tiedossa, voidaan saatujen tietojen pohjalta laatia kulutuslaitetaulukko järjestelmän kokonaisenergiatarpeen mitoituksen pohjaksi. Kulutuslaitetaulukon luomiseksi tarvitaan propulsioon vaadittava energiamäärä. Tämän saa laskettua, kun tiedetään aluksen pituus, rungon muoto, uppouma, toimintamatka ja matkanopeus. Propulsioon kuluva energiamäärä on yleensä selkeästi suurempi verrattuna muihin kulutuslaitteisiin. Seuraavaksi selvitetään muiden kulutuslaitteiden energiantarpeet ja tiedot syötetään taulukkoon. Taulukon avulla on nähtävissä veneen kokonaisenergiankulutus ja tiedot energiankulutuksen jakautumisesta toimintamatkan aikana. Kokonaisenergiankulutuksen avulla saadaan veneeseen mitoitettua riittävän suuri akkupankki ja paneeliston koko, kun tiedetään lisäksi veneen käyttötiheys ja säteilymäärä.

Kulutuslaitetaulukkoon syötettävät arvot on syytä laittaa hieman yläkanttiin. Silloin mitoituksessa ollaan varmallalla pohjalla. Paneelit tuottavat ajon aikana energiaa. Tämä energiamäärä ei kuitenkaan yleensä riitä edes hyvissä olosuhteissa veneen koko energiantarpeeseen. Koska paneelien ajon aikana tuottama energia on täysin riippuvainen olosuhteista, ei niiden varaan voi laskea mitään. Paneelien ajon aikana tuottamaa tehoa ei siis huomioida akkupankin mitoituksessa, sillä veneen tulee suoriutua käyttötilanteesta vaihtelevissa sääolosuhteissa. Paneelien ajon aikana tuottama energiamäärä saadaan kuitenkin lähes aina hyötykäyttöön ja se voidaan kuluttaa suoraan propulsiossa tai muissa kulutuslaitteissa. Tämä vähentää akuston kuormitusta ja näin lisää akkupankin elinikää.

### 7.3 Vaihtoehtojen arviointi ja mitoitus

Lopputuloksen kannalta on parasta jos aurinkosähköjärjestelmä otetaan huomioon suunnitteluprosessin alusta alkaen. Näin vältetään suurilta prosessin aikaisilta muutoksilta veneen rakenteessa, ulkonäössä ja ominaisuuksissa. Aurinkosähköjärjestelmä vaikuttaa joko suoraan tai välillisesti suureen osaan veneen suunnittelutekijöistä. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi aurinkosähköveneen suunnitteluprosessissa huomioon otettavia tekijöitä.

#### 7.3.1 Perustiedot

Kun veneen perustiedot, kokonaisenergiankulutus ja käyttötiedot sisältäen käyttötilanteen ja olosuhteet on selvitetty, voidaan alkaa arvioimaan järjestelmän suunnittelun eri vaihtoehtoja, joilla kriteerit täyttyvät. Runkotyypin (yksirunko, monirunko) valinta on yksi ensimmäisistä päätettävistä asioista. Kuten mainittua, monirunkoveneillä on useita etuja puolellaan, mutta useissa tapauksissa myös yksirunkoinen on täysin mahdollinen toteutustapa. Runkotyypin valinnassa huomio tulee kiinnittää ainakin riittäviin paneelien asennustiloihin sekä rungon hydrodynamiikkaan ja -statiikkaan. Asennustilan määrään vaikuttavat valittu runkotyyppi, hyttirakenteen koko ja -muodot. Monirunkoveneessä runko tarjoaa mahdollisuuden suureen paneelialaan hytistä ja kansirakenteista riippuen. Yksirunkoveneissä tila on rajoitetumpi, vaikka hyttirakenteet olisi suunniteltu aurinkosähköasennukset huomioiden.

#### 7.3.2 Rakenne ja materiaalit

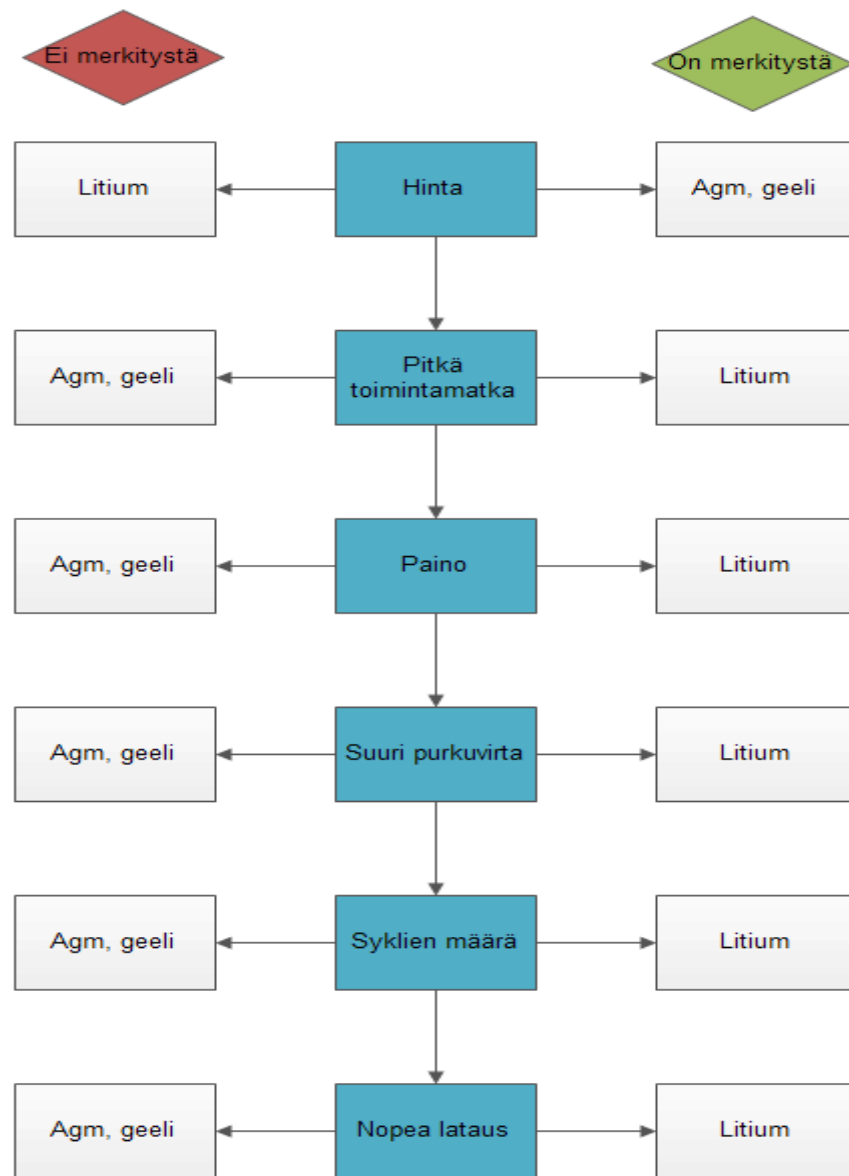
Ensimmäisiin valintoihin kuuluu usein myös pääasiallisen valmistusmateriaalin valinta. Tapauksesta riippuen akusto ja paneelisto saattavat nostaa aurinkosähköveneen painoa polttomoottorivaihtoehtoa enemmän. Jos veneen kantavuus ei salli lisäpainoa tai veneelle halutaan parempi suorituskyky, voidaan joutua kiinnittämään erityistä huomiota rakenteiden painoon. Oikeilla materiaaleilla vene saadaan tehtyä kevyenä ja kilpailukykyisenä. Aurinkosähkövenessä energiaa on usein käytettävissä normaalia rajoitetummin, jolloin veneen painon merkitys korostuu entistä enemmän. Aurinkosähkövenessä konetehon lisääminen ei useinkaan ole järkevin etenemistapa suorituskykyä haettaessa. Kannattaa sen sijaan keskittyä enemmän veneen painoon, hydrodynamiikkaan ja energiatehokkuuteen.

### 7.3.3 Propulsio

Aurinkosähköveneeseen tulisi valita erittäin hyvällä hyötysuhteella toimiva moottori, joka kestää veneolosuhteita ja on helposti huollettavissa (ks. luku 3.5). Kokonaishyötysuhteen kannalta on järkevää valita moottori, jonka kierrosluku asettuu sopivaksi ilman alennusvaihdetta. Aina tällainen ratkaisu ei kuitenkaan ole mahdollinen. Kes- tomagneettimoottoreiden (PMDC/PMAC) käyttäminen on yleisin ratkaisu venekäytössä. Ne voivat olla joko tasa- tai vaihtovirtamoottoreita. Vetotavan valinta riippuu useista tekijöistä, mutta hyötysuhteen kannalta akselivetoa pidetään heikoimpana vaihtoehtona verrattaessa perämoottoriin, vetolaitteeseen tai pod-malliin.

### 7.3.4 Akkutyypit

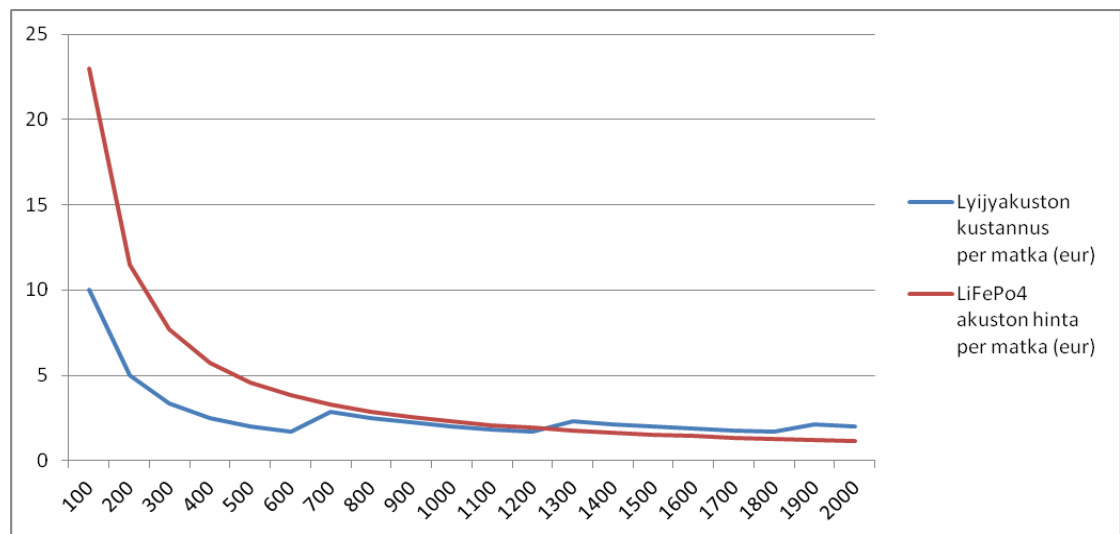
Veneen kantavuudesta, teho-paino -suhteesta, käytöstä ja budjetista riippuen valitaan oikea akkutyypit. Litium-akut tarjoavat yleisesti tarjolla olevista akuista parhaimman energiatihedden ja saattavat tietyissä tapauksissa olla ainut akkuvaihtoehto, jotta akuston paino ei kasva liian suureksi (ks. Litium-akku 3.1.2). Litium -akku on usein ainut akkutyypitvaihtoehto suunniteltaessa liukuvarunkeista tai pitkän toimintasäteen veneitä. Koska litium -akut kestävät lyijyakkuja paremmin suuria purkuvirtoja ja syväpurkausta, niiden ominaisuuksia voidaan hyödyntää tehokkaasti kohteissa, joissa kone-teho on tavallista suurempi suhteessa akustoon tai kun akkupankista halutaan mahdollisimman suuri energiamäärä. Vaikka litium -akkujen syklimäärät ovat reilusti lyijyakkuja suurempia, on kuitenkin harvoja tilanteita, joissa litium -akusto on lyijyaku- toa kustannustehokkaampi ratkaisu. Jotta litium-akuston hankinta olisi taloudellisesti kannattavaa, tulisi käyttötiheyden olla tämänhetkiselällä hintatasolla suuri. Kuva 16 esittää tiettyjen venekäytössä tärkeiden ominaisuuksien jakautumista yleisimpien akkutyypitien kesken. Kuvasta voidaan todeta, että kaikki muut ominaisuudet paitsi hinta ovat litium-akuissa paremmat. Akkutyypin valinta riippuu ominaisuuksien painotuk- sista ja on siis tapauskohtaista.



Kuva 16. Ominaisuuksien jakautuminen akkutyypin mukaan

Kuva 17 esittää akkutyypin hintaeroa per ajettu matka suhteessa purkukertoihin. Tarkasteluajaksi on otettu 8 vuotta, mikä on ilmoitettu kummankin akkutyypin eliniäksi normaalikäytössä. Litium -akuston (LiFePo<sup>4</sup>) lähtöhinta on 2300 € ja lyijyakuston (AGM) 1000 €. Tämä vastaa akkutyypin tämänhetkistä hintaeroa. Kummankin akuston purkusyvyydeksi on laskettu 70 % DoD. Litium -akuston syklinen ikä on 2000 sykliä ja lyijyakustolla 700 sykliä. Kuvaajasta nähdään, että jos veneellä ajetaan 8 vuoden aikana yli 1250 matkaa (oletuksena on että akku ajetaan joka matkalla purkusyvyyteen 70 % DoD) on litium-akusto edullisempi vaihtoehto. Syy tähän on lyijyakun uusimiskerrat, joita lyijyakustolle ehtii tulla käyttöaikana kaksi kertaa. Taulukko ei huomio energiansäästöä, joka aiheutuu litium -akuston hyväksi sen keveyden ansi-

osta. Kyvympi vene kuluttaa vähemmän. Tulee huomioida, että litium -akuston kustannus on jo 700 matkan kohdalla hyvin lähellä lyijyakuston kuluja. Kun huomioidaan litium -akuston keveyden mukanaan tuoma energiansäästö, voi litium -akusto tulla edullisemmaksi jo 700 matkan jälkeen. Pitää kuitenkin huomioida, että jo 700 matkaa voi olla osalle veneilijöistä hyvin paljon. Jos yhden matkan pituus on esimerkiksi keskimäärin 10 merimailia, tarkoittaisi 700 matkaa 7000 matkaa 8 vuodessa. Se tekee 875 merimailia vuodessa ( $7000/8 = 875$ ).



Kuva 17. Litium- ja lyijyakuston ero kustannuksissa (€/matka) suhteessa käytettyihin sykleihin. Mitä enemmän syklejä (käyttöä) on, sen edullisemmaksi litium -akusto tulee.

### 7.3.5 Paneelityyppi

Kun veneen kansilayout ja veneeltä halutut ominaisuudet on haarukoitu riittävällä tarkkuudella, voidaan keskittyä oikeantyyppisten ja -kokoisten paneelien valintaan. Paneelityypin valintaan vaikuttavat käytettävissä oleva paneelien asennustila ja sen sijainti veneessä, tarvittava energiamäärä, saatavilla oleva säteily määrä, muotoilulliset asiat ja kestävyystekijät. Jos paneelien asennustila on pieni suhteessa tarvittavaan energiamäärään, voidaan joutua tilanteeseen, jossa heikolla hyötysuhteella varustetut ohutkalvopaneelit eivät tule kyseeseen. Valintaa saatetaan joutua tekemään myös paneelityyppien sisällä, sillä hyötysuhteissa voi olla merkittäviä muutaman prosentin eroja. Asennuspaikan varjoinen sijainti tai kulkureitillä oleva asennuspaikka puoltavat ohutkalvo- ja puolitaipuvien paneelien käyttöä. Varjotonta riittävän suurta asennus-

tilaa paneeleille voidaan pitää tärkeimpänä kriteerinä aurinkosähköveeneen suunnittelussa. Eri paneelityyppien ominaisuuksista kerrottiin tarkemmin luvussa 2.2. Kun paneelityypit ja sijoituspaikka valitaan huolella, kokonaisuus säilyy tyylikkäänä ja toimivana.

### 7.3.6 Lataussäädin

Lataussäätimen valinta on merkittävä tekijä järjestelmän toimivuuden ja tehokkuuden kannalta. MPPT-säädin on PWM -säädintä energiatehokkaampi ratkaisu. MPPT-säätimen hankintaa pidetään yleisesti järkevänä kun paneeliteho ylittää 200W. Se ylittyy aurinkosähköveeneissä lähes aina. On kuitenkin huomattava, että asennuspaikan rikkonaisuus ja varjoisuus voi muuttaa tilannetta. Eripuolille venettä ripotellut paneelit voivat toimia hyvinkin eri mpp-pisteellä, jolloin MPPT-säädin ei saa paneelistosta irti kaikkea tehoa ja voi toimia jopa heikommin kuin PWM-säädin. Tällaisissa tapauksissa paras ratkaisu on asennustilan uudelleenjärjestely, jos se on mahdollista. Muita vaihtoehtoja on useiden MPPT-säätimien hankinta ja paneelien jakaminen kullekin säätimelle niin, että jokainen ryhmän paneeli toimisi samassa mpp-pisteessä. PWM-säätimien käyttö voi myös tulla kyseeseen, etenkin jos järjestelmä on kooltaan pieni ja toimitaan alhaisella jännitteellä.

### 7.3.7 Muu tekniikka

Järjestelmän muu tekniikka riippuu edellä mainituista kokonaisuuksista ja valinnat voidaan tehdä vasta kokonaisuuden hahmottuessa. Venekäytössä huomio tulee kiinnittää komponenttien IP-luokitukseen (ks. luku 6.1.4). Riittävällä IP-luokituksella varustettuja komponentteja on hyvin tarjolla ja asiaa helpottaa se, että herkimvät komponentit (lataussäätimet, invertterit) on yleensä mahdollista sijoittaa suojaisaan paikkaan. Kaapelit tulee mitoittaa veneiden tasavirtajärjestelmiä käsittelevän standardin mukaan. Sama koskee liittimiä ja kaapeleiden kiinnityksiä.

Aurinkosähkövene kannattaa aina varustaa maasähkölatausmahdollisuudella. Maasähkölatausta saatetaan tarvita tilanteissa, joissa käyttö ylittää veneelle mitoitettut arvot tai jos olosuhteet ovat poikkeuksellisen huonot. Maasähkölatausjärjestelmää varten riittää, että veneeseen on asennettu riittävän tehokas akun kanssa yhteensopiva laturi sekä yleiset maasähköjärjestelmän vähimmäiskomponentit.



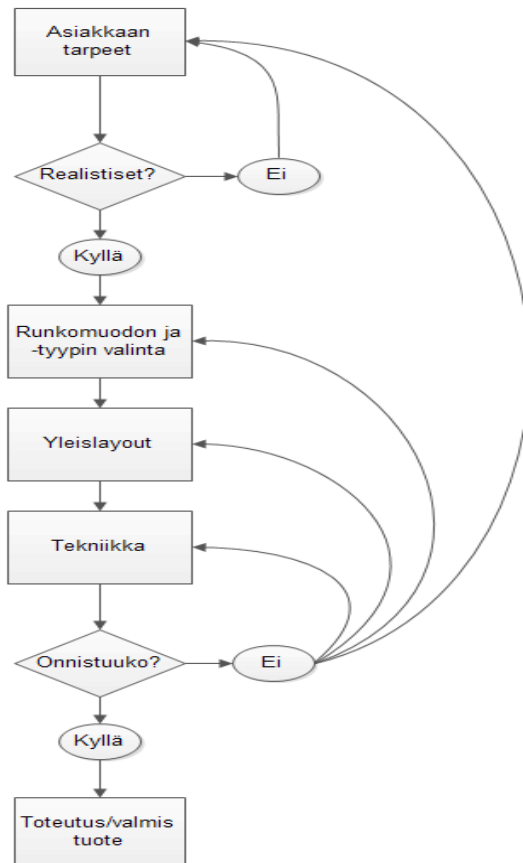
## 7.4 Mitoitustapa

Tässä työssä aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa käytetään Australian Standard AS4509.2: Stand Alone Power Systems Part 2: System Design Guidelines, System Installation -mukaista laskentatapaa. Menetelmä on tehty aurinkosähköjärjestelmän mitoitukseen. Standardin mukainen järjestelmän mitoitus jakautuu kuuteen vaiheeseen:

- Laske käytettävissä olevan säteilytehon määrä asennuspaikalla
- Kerää järjestelmän kuormat
- Luo kulutuslaitetaulukko ja laske järjestelmän kokonaiskuorma sekä kokonaisenergiavaatimus
- Laske tarvittava akkukapasiteetti, joka perustuu kokonaisenergiavaatimukseen
- Laske yksittäisen aurinkopaneelin tuotto käyttöolosuhteessa
- Laske koko järjestelmän aurinkopaneelitarve

Tätä mitoitustapaa käytetään tämän työn sovellusosassa (luku 8), jonka laskentaosuus löytyy liitteistä 1 - 4.

Kuva 18 kuvaa veneen suunnittelu- ja mitoitusprosessin kulkua. Suunnitteluun vaikuttavat tekijät ovat kytköksissä toisiinsa. Kuten kuvasta voidaan todeta, saatetaan suunnitteluprosessissa joutua palamaan useita kertoja taaksepäin, mikäli valittu reitti ei tuota haluttua lopputulosta.



Kuva 18. Aurinkosähköveneen suunnittelun mahdollinen kulku (ns. suunnitteluspiraali)

## 8 JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN VALITUISTA KOMPONENTEISTA

Koska aurinkosähköveneen suunnittelu on yleisellä tasolla erittäin laaja kokonaisuus, käsitellään aihetta seuraavan esimerkin avulla. Työtä varten on tehty mallinnos aurinkosähköveneestä päiväretki- ja kalastuskäyttöön. Alaluvut käsittelevät tämän veneen teknisten ratkaisujen valintaa ja mitoitusta. Tässä esimerkkipöytä esittelyssä sovelletaan työssä aikaisemmin käsiteltyjä aurinkosähköveneen suunnittelussa huomioitavia asioita.

### 8.1 Esimerkkipöytäveneen perustiedot

Veneen suunnittelun lähtökohtana on asiakkaan tai asiakasryhmän haluamat ominaisuudet, joiden pohjalta on laadittu veneen perustiedot alla olevaan taulukkoon (taulukko 2)

*Taulukko 2. Esimerkkiveneen perustiedot*

<b>Veneen tiedot</b>			
	<b>Lyhenne</b>	<b>Arvo</b>	<b>Yksikkö</b>
Vesilinjan pituus	Lwl	6	m
Kokonaisleveys	Boa	2,4	m
Rungon syväys	Dhull	0,3	m
Uppouma kuormattuna	Disp.	0,8	t
Toimintamatka	Dist.	10	mpk
Matkanopeus	Vc	6	kn

Esimerkkivene on suunniteltu päiväretki- ja kalastuskäyttöön. Vene rakennetaan EN ISO -standardin D-kategorian olosuhteisiin. Vene on rakennettavissa pienin muutoksin C-kategorian veneeksi, jos kategoriamuutokselle ilmenee tarvetta. Rungoksi valitaan katamaraanirunko, koska siihen on mahdollista suunnitella helposti riittävän suuri asennustila paneeleille. Valittu runkomuoto tuo myös etuja veneen vakavuuteen, mikä helpottaa veneessä liikkumista. Lisäksi valittu runkomuoto sopii hyvin pyörätuolilla liikkuville. Materiaalivalintoihin ja rakenteeseen tulee kiinnittää erityistä huomiota kuten myös tekniikan painoon (ks. luku 6.5). Vene on kuljetettavissa henkilöautolla vedettävällä trailerikalustolla.

Esimerkkivene rakennetaan lujitemuovista sandwich -rakenteisena, jossa ydinaineena toimii PVC-vahto. Sandwich -rakenteella saavutetaan hyvät lujuusominaisuudet suhteessa painoon. Lujitteena käytetään lasikuitua ja matriisina polyesterihartsia. Lujitteissa hyödynnetään suunnattuja lasikuitukudoksia, joilla saavutetaan hyvät lujuusominaisuudet suhteessa painoon. Runko ja kansi toteutetaan alipaineinjektiotekniikalla. Kansirakenteissa käytetään myös sandwich-rakenteita, joissa hyödynnetään hunajakennoydinainetta ja pintalaminaateissa lasikuitua polyesterihartsilla lujitettuna.

Kannelle rakennetaan yksinkertaiset ja väljät tilaratkaisut. Osa penkeistä tehdään irrotettaviksi, jolloin sisätiloja voidaan hieman muokata käyttöä vastaaviksi. Kansiratkaisusta tehdään modulaarinen, jotta saman rungon pohjalle voidaan jatkossa toteuttaa eri tilaratkaisuja. Aurinkopaneeleja varten veneeseen rakennetaan katos, joka on laskettavissa alas huoltotöitä varten. Muotoilultaan veneestä tehdään käytännöllisen ja toimivan näköinen. Muotokieli on kulmikas ja selkeä.

Järjestelmän mitoituksessa käytetään Australian Standard:AS4509.2:n mukaista menetelmää. Laskenta on tehty Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, jonka tiedot ovat liitteissä 1 - 4.

## 8.2 Sähköpropulsio

Veneeseen asennetaan kaksi sähköperämoottoria, yksi kumpaankin runkoon. Moottoreiden koko mitoitetaan käyttöolosuhteiden ja veneen fyysisen koon sekä uppouman mukaan. Vetotavaksi valitaan perämoottori, koska tällöin moottorit on helppo puhdistaa ylös nostamalla. Käyttö, johon vene suunnitellaan, saattaa edellyttää vesikasvuston seassa ajamista ja rantautumisia, jolloin potkuriin voi kertyä puhdistettavaa tai moottorit voi joutua nostamaan pois vedestä syvyyksen pienentämiseksi. Nyrkkisääntönä sähköpropulsio mitoituksessa käytetään usein 2 – 3 kW:n tehoa per tonni uppoumaa, riippuen käyttöolosuhteista ja veneestä. Vene on suunniteltu suojaisille vesialueille, mutta moottorit mitoitetaan ylikanttiin laskemalla tehoksi 4 kW/tonni uppoumaa. Ylimääräisestä tehosta on hyötyä liikuttaessa veneen suunnittelukategorian ylärajoilla. Lisäksi se mahdollistaa tarvittaessa suuremman matkanopeuden puoliliikualueella (ks. luku 6.2). Veneen painoksi kuormattuna on saatu 0,8 tonnia, joten minimikonete-hoksi saadaan laskettua  $0,8 \text{ t} * 4 \text{ kW} = 3,2 \text{ kW}$ . Moottoreiksi valitaan harjattomat Kräutler Gpav 2,2 moottorit, joille ilmoitetaan akselitehoksi 1870 W. Näin ollen kokonaistehoksi akseleilta saadaan  $2 * 1,87 \text{ kW} = 3,74 \text{ kW}$ . Moottorin hyötysuhteeksi on ilmoitettu 85 %. Lopulliseen työntötehoon vaikuttaa esimerkin tapauksessa lisäksi potkurin hyötysuhde. Tehontarpeen (akseliteho, 60 % potkurihyötysuhteella) laske-taan olevan matkanopeudella 1,84 kW (Laskentamenetelmä De Groot)

Valmistaja toimittaa moottoreiden mukana moottorisäätimet sekä tarvittavat moottorin hallintalaitteet. Veneeseen asennetaan hydrauliohjaus. Moottorit yhdistetään toisiinsa ohjaustangolla, minkä ansiosta ohjaukseen riittää vain yksi ohjaussylinteri.

## 8.3 Akusto

Vene suunnitellaan 10 merimailin (mpk) toimintamatkalle. Tämä on se matka, joka veneellä voidaan kulkea suunnittelukategorian mukaisissa olosuhteissa pelkällä akkuihin varastoidulla energialla. Tämä toimintamatka saavutetaan siis olosuhteista riip-pumatta (suunnittelukategoria huomioiden), mikäli akut ovat matkan alkaessa olleet täydessä varauksessa. Tämän lisäksi aurinkopaneelit lataavat akustoa myös matkan ai-

kana, mikä tuo lisää toimintamatkaa kelistä riippuen. 10 merimailin toimintamatka tarkoittaa kuuden solmun matkanopeudella noin 1 t 45 min pituista ajomatkaa. Akuston purkamisen alarajaksi määritellään 80 % DoD. Satunnaisesti akku voidaan purkaa myös hieman tyhjemmäksi (jos olosuhteet vaatii) akun eliniän suuremmin kärsimättä. Akuiksi valitaan LiFePo<sup>4</sup> -kennoista koostuva akkupaketti, joilla saavutetaan hyvä käyttöikä, keveys ja hyvä suuren purkuvirran kestävyys. Lyijyakuston paino olisi muodostunut huomattavan suureksi, mikä sulki sen pois suunnitelmasta. Kyseisten litium -akkujen sykliseksi iäksi ilmoitetaan 80 % purkamissyvyydellä 1500 purkusykliä (25 °C).

Akkupankin koko voidaan laskea tehdyn kulutuslaitetaulukon ja toimintamatkan pohjalta (ks. taulukko 3). Toimintamatkan kokonaisenergiankulutukseksi saadaan 4,464 kWh (ks. taulukko 4). Akkujen lasketaan olevan vaihtoiässä, kun niiden kapasiteetista on enää 80 % jäljellä. Akkupankin mitoituksessa tulee huomioida akuston kapasiteetin lasku ikääntymisen ja käytön myötä. Tämä otetaan huomioon laskemalla 25 % ylimääräistä akkupankin kokoon.

*Taulukko 3. Kulutuslaitetaulukko esimerkin veneelle.*

Akuston kapasiteetin laskenta				Perustuu: Australian standard AS4509.2	
<b>Step1: kulutuslaitetaulukko</b>					
	Kuorma (W)	Tehokerroin	Kuorma (W)	Kuorman päälläoloaika (h)	Wh
Moottori	1844	0,85	2170	1,7	3639
Kulkuvalot (led)	5	1	5	1,7	8
Kaiku/plotteri	9	1	9	1,7	15
Pilssipumput (käyntiaika 10% matkajasta)	12	1	12	1,7	20
Muu (mm. matkapuhelimen lataus)	4	1	4	1,7	7
	<b>Kokonaiskuorma</b>		<b>2200</b>		<b>3689</b>

Taulukko 4. Esimerkkiveneen kokonaiskuorma ja -energiankulutus

<b>Step 2: Suunnitelman kuormat ja energian tarve</b>		
Kokonaisteho Sp	2200	W
Järjestelmän laajennus kerroin kg	0,1	
Suunnittelumarginaali kerroin kc	0,1	
Suunnittelukuorma Sd	2662	W
Kokonaisenergiankulutus Et	3689	W
Järjestelmän laajennus kerroin kg	0,1	
Suunnittelumarginaali kerroin kc	0,1	
Suunnitteluenergiavaatimus Ed	4464	W

Akuston koko 80 % purkusyvyydellä tulee olla 6,7 kWh ( $4,464 \text{ kWh} * 1,25/0,8$ ), jossa on otettu huomioon akkujen vanheneminen (25 %), katso taulukko 5. Moottorin toimintajännite on 36 V. LiFePo<sup>4</sup> -kennojen jännite on 3,2 V. Lähimmäksi moottorin jännitettä päästään 12 LiFePo<sup>4</sup> -kennon akustolla, jolloin akkupankin jännitteeksi tulee 38,4 V ( $12 * 3,2 \text{ V} = 38,4 \text{ V}$ ). Näiden pohjatietojen avulla saadaan laskettua, että akustoon tarvitaan 12 kpl 174,5 Ah kennoja ( $6700 \text{ Wh}/38,4 \text{ V} = 174,5 \text{ Ah}$ ).

Taulukko 5. Tarvittava akuston koko eri kertoimien huomioinnin jälkeen

<b>Step 3: Akuston määrittäminen</b>		
Akuston jännite	38	V
Akuston ikääntymiskerroin ka	1,25	
Lämpötilakorjauskerroin kt (taulukosta)	0,956	
Kapasiteetin häviö kerroin kc	1	
Purkamisen maksimi syvyys DoD	80	%
Akun minimi kapasiteetti	175	Ah
Tarvittava akuston koko	6,7	kWh

Sopivia 175 Ah kennoja ei löydy markkinoilta, joten käyttöön valitaan seuraava suurempi koko, joka on 180 Ah. Kokonaisakkukapasiteetiksi saadaan 6,9 kWh ( $(38,4 \text{ V} * 180 \text{ Ah})/1000 = 6,9 \text{ kWh}$ ). Akkupankkiin tulee näin ollen 0,2 kWh ( $6,9 \text{ kWh} - 6,7 \text{ kWh} = 0,2 \text{ kWh}$ ) ylimääräistä energiaa. Akuston kokonaispainoksi tulee 78 kg. Akkupaketti sisältää BMS-valvontajärjestelmän, joka estää akkupankin vaurioitumisen ja kertoo

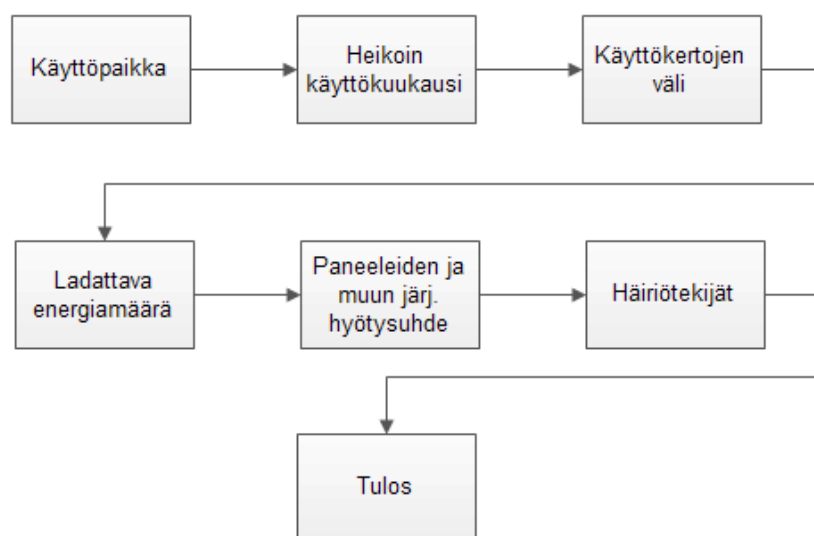
tiedot akuston varauksesta. Akusto sijoitetaan turkille veneen takaosaan istuinlaatikon sisään. Akkutila on valmistettu palosuojattua hartsia käyttäen, jotta mahdollinen tulipalo akkutilassa ei pääse leviämään tilan ulkopuolelle. Akkutilaan asennetaan pieni kipinäsuojattu puhallin, joka huolehtii tilan tuuletuksesta. Akut kiinnitetään laatikkoon standardin ISO 10133 vaatimalla tavalla. Kumpaakin moottoria käytetään samasta akustosta. Akkutila sijoittuu alle 2 metrin etäisyydelle moottoreista, jotta häviöt saadaan pidettyä pieninä. Johtimeksi valitaan 16 mm<sup>2</sup> kaapeli, jolla tehohäviö on kahden metrin johdinpituudella alle 1,5 %.

#### 8.4 Aurinkopaneelit

Veneeseen tuleva katos mahdollistaa kehyksellisten aurinkopaneelien käytön. Kehykselliset paneelit tarjoavat parhaimman hyötysuhteen suhteessa hintaan ja käytettävissä olevaan asennuspinta-alaan (ks. luku 2.2). Tarvittava paneelipinta-ala saadaan laskettua, kun tiedetään veneen käyttöpaikka (maanosa/valtio/kaupunki), heikoin käyttökuukausi, ladattavan energian tarve, paneelien sekä muun elektroniikan hyötysuhde ja käyttökertojen väli. Käyttöpaikaksi veneelle määritetään Pirkanmaa (Tampere). Käyttöpaikan valinnalla määrätään auringonsäteilymääräolosuhteiden minimi, jossa vene saavuttaa sille asetetut tavoitteet. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi Suomen Lapissa vene ei täytä kaikkia kriteerejä ja näissä olosuhteissa joudutaan tinkimään jostain ominaisuudesta (toimintamatka, matkanopeus, käyttökertojen väli). Toisaalta Tamperetta paremmissa säteilyolosuhteissa tuote toimii paremmin. Tiedot säteilymäristä on saatavissa useista eri internet lähteistä, esimerkiksi osoitteesta <http://www.gaisma.com>.

Heikoin käyttökuukausi tarkoittaa kuukautta, jolloin kulutus on suurinta suhteessa tuottoon. Tämän veneen vuosittaiseksi käyttöajaksi on suunniteltu aika toukokuun alusta elokuun loppuun. Venettä voidaan käyttää tämän käyttöalueen ulkopuolella, mutta jostain joudutaan ehkä tinkimään (toimintamatka, matkanopeus, käyttökertojen väli). Heikoimmaksi käyttökuukaudeksi esimerkin veneelle valitaan elokuu. Syynä tähän on elokuun heikoin säteilytuotto käyttökuukausista, ja koska elokuu on vielä kesälomakuukausi, pysyy käyttöaste edelleen korkeana. Ladattavan energian tarve on jo tiedossa, sillä lopulliseksi energiankulutukseksi saatiin laskettua 4,46 kWh. Latausjärjestelmän kokonaishyötysuhteeksi on laskettu 12 % (huomioitu paneelien hyötysuhde ja häviöt siirrossa, lataussäätimessä ja akussa). Käyttökertojen väli kertoo lyhyimmän

mahdollisen käyttökertojen välin eli latausajan. Esimerkin veneellä se on 24 tuntia. Näillä pohjatiedoilla saadaan laskettua paneelitarve. Paneelitarpeen mitoittamiseen käytetään Australian standard AS4509.2 -menetelmää, joka on tehty aurinkosähköjärjestelmien paneelitarpeen mitoittamiseen. Paneelitarpeeksi saadaan laskettua 1,4 kW, eli 9,3 m<sup>2</sup> jos paneelien hyötysuhde on 15 % (ks. liite 4). Tulos kertoo paneelitarpeen keskiarvo säteilyolosuhteissa. Heikoissa olosuhteissa (pilvinen ja sateinen päivä) saatetaan joutua tinkimään ominaisuuksista tai käyttämään latauksessa apuna maasähköä/aggregaattia. Keskiarvoa heikommalla käyttöolosuhteilla voidaan huomioida tarvittaessa myös laskennassa asettamalla kerroin häiriötekijöiden vaikutuksille. Kuva 19 esittää paneelipinta-alan mitoittukseen vaikuttavat tekijät. Kaikki kuvassa olevat tekijät tulee huomioida, joskin häiriötekijöitä ei välttämättä aina ole. Arvoina tulee käyttää realistisia lukuja. Ylioptimistisuutta tulee välttää.

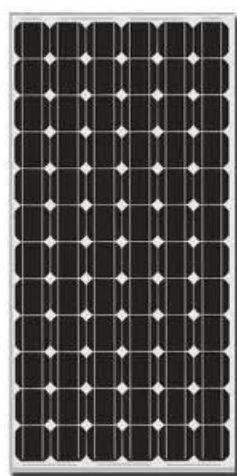


Kuva 19. Paneelipinta-alan mitoitus.

Veneeseen suunniteltu katos on kooltaan 12 m<sup>2</sup> (2,4 m \* 5 m), joten asennuspinta-alaa on riittävästi. Paneelien valinnassa tulee kiinnittää huomiota hyvään hyötysuhteeseen, lämpötilakertoimeen, kestävyteen meriolosuhteissa ja hintaan. Myös paneelin mitat voivat olla tärkeitä sijoittelun helppouden ja sopivuuden kannalta. Esimerkkiveeneeseen valitaan kuusi 250 W:n Propsolar PS-M596250 -yksikidepaneelia (ks. kuva 20). Paneelien kokonaistehoksi tulee 1500 W (6 \* 250 W = 1500 W). Yksi paneeli painaa 20,5 kg, joten paneelien painoksi tulee yhteensä 123 kg (6 \* 20,5 kg). Siirtojohtimeksi paneeleilta säätimelle ja säätimeltä akulle valitaan 6 mm<sup>2</sup> johdinkoko. Joh-



dinhäviöksi jää alle 5 %. Katos rakentuu aukotetusta rungosta, johon asennetaan kiinnikkeet paneeleille. Paneelit asennetaan alumiinisiin kiinnikkeisiin ja tiivistetään toisiinsa liimatiivistemassalla, jolloin paneelit muodostavat vedenpitävän kerroksen. Lopputulos on kevyt ja tyylikäs. Katoksen runko ja reunalistat maalataan valkoiseksi, jotta ne absorboisivat mahdollisimman vähän valoa ja tällöin lämpenisivät vähemmän. Katos on ylhäällä neljän kääntyvän tukivarren varassa. Katos voidaan taittaa alas puhdistuksen tai talvisäilytyksen ajaksi. Katoksen paikkaa voidaan muuttaa veneen pituussuunnassa, mikä mahdollistaa avotilan sijoittumisen joko keulaan tai perään. Katoksen alla on seisomakorkeus.



Malli:PS-M569250

Teho:250W +/-3%

Max. jännite: 1000V

Voc: 59,5V

Isc: 5,6A

Vmp: 48,3V

Imp: 5,18A

Paino:20,5kg

Toiminta lämpötila: -40C-+85C

Kosteus:0-100%

Kennojen koko: 125mm\*125mm

Paneelin mitat: 1602mm\*1061mm\*50mm

*Kuva 20. Propsolar 250W:n -yksikidepaneeli (Nordicsolar)*

Paneelit on asennettu vaakasuoraan, mikä altistaa ne likaantumisen. Pieni likaantuminen ei vaikuta merkittävästi tuottoon (siitepöly, tms.), mutta paneelit tulisi kuitenkin huuhdella säännöllisesti, jotta vältytään tehon menetykseltä (vrt. luku 6.1.2). Parin viikon välein tehtävä puhdistus on arvioitu olevan riittävä. Syksyllä vene saattaa kärsiä merkittävästä tehon menetyksestä, jos puiden lehdet pääsevät putoamaan paneelien päälle. Syksy ei ole määritelty tämän veneen aktiiviseksi käyttöajaksi, joten asialla ei ole suurta merkitystä. Veneen aurinkopaneelimäärää olisi mahdollista vieläkin kasvattaa lisäämällä taipuvia paneeleja veneen kylkiin ja kaiteisiin. Taipuvien paneelien sijoittaminen veneen kylkiin aiheuttaisi lisäkustannuksia ja heikentäisi mahdollisesti ulkonäköä, joten niitä ei ole asennettu.

## 8.5 Muu tekniikka

Veneeseen valitaan lataussäätimeksi Tristar TS-MPPT-45 -säädin (ks. kuva 26). Aurinkopaneelit liitetään rinnan kuuden paneelin ryhmäksi, jolloin avoimen piirin jännitteeksi jää 59,5 V. Paneelien korkea latausjännite takaa pienet siirtohäviöt ja on riittävästi akkujännitettä korkeampi kaikissa latauksen mahdollistavissa käyttöolosuhteissa. Jos paneelit sijaitsisivat eri puolilla venettä, saatettaisiin joutua käyttämään useampaa säädintä. Tässä tapauksessa paneelit on sijoitettu samaan tasoon katoksen päälle, jolloin valaistuseroja ei esiinny. MPPT-säädin sijoitetaan akun läheisyyteen kuljettajanpenkin sisään hyvin tuulettuvaan ja säältä suojattuun tilaan.

Järjestelmään asennetaan akkumonitori Victron BMV 600s, jolla nähdään mm. akuston jännite, akustosta kulutetun ja jäljellä olevan energian määrä ja jäljellä oleva ajoaika sen hetkisellä kulutuksella (ks. kuva 21). Monitorin näyttö asennetaan kojetauluun. Monitorin avulla voidaan ohjata myös aggregaattia, mikäli sellainen veneeseen asennetaan.



*Kuva 21. Vasemmalla Tristar TS-MpPt-45 -lataussäädin ja oikealla Victron Bmv 600s -akkumonitori (Soltech nrj; Cosas de barcos)*

Sähköjärjestelmä rakennetaan ISO 10133 -standardin mukaisena. Kaapeloinnit mitoitetaan niin, että hyväksytään maksimissaan 5 % tehohäviö johtimissa ja liitoksissa. Veneeseen tulee kulutuslaitetaulukossa mainitut elektroniset laitteet, joita ovat kulkuvalot, muu valaistus, kaiku/plotteri ja pilssipumput (kumpaankin runkoon oma). Veneeseen suunnitellaan mahdollisuus aggregaatin hyödyntämiselle lisävarusteena. Ag-

gregaatti sijoittuu ohjauspulpetin eteen lisävarusteena hankittavan penkin sisään. Penkille tehdään valmiit kiinnitykset ja läpiviennit. Penkki äänieristetään ja pakokaasut johdetaan veneen alle lattian läpi. Aggregaatin jäähdyttämiseksi penkin etuseinään asennetaan puhallin. Aggregaatin tehoksi mitoitetaan 3 kW ja se asetetaan käynnistymään automaattisesti, kun akuston varaustaso laskee alle 80 % DoD.

Aggregaatin lisäksi varataan paikka kahdelle (1000 W) Piktronik Kop1001 -laturille, joilla aggregaatin tuottama vaihtovirta muutetaan 36 V:n tasavirraksi akkujen lataukseen. Samoja latureita voidaan hyödyntää maasähkölatauksessa. Laturit kytketään etäohjattavaan Tuta S30 gsm -pistorasiaan (Tuta S30. Tuta). Etäohjattavan pistorasian avulla lataus maasähköstä voidaan käynnistää tarvittaessa puhelimesta. Näin voidaan varmistaa, että akustossa on varmasti täysi lataus matkan alkaessa. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi, jos käyttö on aktiivista ja säätila on huono (pilvistä). Järjestelmän toimivuus edellyttää, että vene kytkettynä sataman maasähkölatausjärjestelmään. 12 V kulutuslaitteita varten veneeseen asennetaan dc-dc -muunnin Mppt-säätimen kanssa samaan tilaan. Dc-dc -muuntimen avulla akkupankin 38,4 V jännite muunnetaan 12 voltiksi.

Veneestä laaditaan edellä mainitun kokoonpanon mukaiset rakennepiirustukset, sähkökaaviot, materiaalistat ja lujuuslaskelmat EN-ISO -standardin mukaisina. Hahmotelma veneen ulkonäöstä on nähtävissä liitteessä 6.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tällä hetkellä markkinoilla olevat aurinkosähköveneet toimivat pääosin uppoumanopeuksilla. Uppoumarunko ja kohtalaisen vaatimaton toimintamatka rajaavat ulkopuolelle monta asiakasryhmää. Litium -akkujen hyödyntämisellä on mahdollista laajentaa veneen nopeusaluetta ja sitä kautta asiakaskuntaa, mutta toisaalta hinta saattaa tällöin nousta liian korkeaksi. Viimeisimpien ennusteiden mukaan litium -akkujen hinnat laskevat merkittävästi lähitulevaisuudessa. Näin saattaa käydä myös puolitaipuvien paneelien osalta. Polttoaineen hinnan mahdollinen nousu ja veneilykulttuurin mahdollinen muuttuminen päiväretkeilyn sekä satamaveneilyn suuntaan edesauttaa asiakkaiden kiinnostuksen lisääntymistä tällaisia veneitä kohtaan. Tämän työn antaman selvityksen pohjalta aurinkosähkövene on jo tällä hetkellä sopiva tiettyihin käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi vapaa-ajankalastajat ja lyhyitä päiväretkiä tekevät veneilijät sopi-

vat erinomaisesti aurinkosähköveneiden asiakaskuntaan. Aurinkosähkövene olisi varmasti houkutteleva myös ns. asuntoveneilijöiden tarpeisiin.

Aurinkosähköveneiden suunnittelussa tulee yhdistellä aurinkosähköjärjestelmän ja vene suunnittelun tietoja. Aurinkosähköjärjestelmän yhdistäminen veneeseen vaikuttaa koko veneen suunnitteluprosessiin. Vene on toimintaympäristönä suotuisa aurinkosähkön hyödyntämiselle, mutta se asettaa myös rajoituksia. Nämä rajoitukset on kyettävä näkemään ja ottamaan huomioon, jotta veneestä tulee toimiva sille suunniteltuun käyttöön.

Veneiden aurinkosähköjärjestelmistä oli löydettävissä heikosti laajoja julkaisuja. Jouduin käyttämään työssä paljon lähteitä, koska tieto oli pirstoutunutta ja usein löydettävissä vain verkkolähteistä. Vain harvoissa verkkolähteissä oli julkaisijan lisäksi mainittu kirjoittajan nimeä tai tarkkaa julkaisuajankohtaa. Suoraan aurinkosähköveneiden suunnittelusta kertovaa kirjallisuutta en löytänyt lainkaan. Tieteellisiä julkaisuja ei useinkaan ollut saatavilla, mutta pyrin kiinnittämään huomiota tiedon ja lähteen luotettavuuteen. Asioiden yhdistelemistä ja tiedon luotettavuuden arviointia helpotti mm. aktiivinen toimiminen Midnight Sun Finland -aurinkosähköveneprojektissa, josta oli kertynyt kirjoittamatonta tietoa. Tiedon hajanaisuus hidasti kuitenkin työtä merkittävästi ja työstä tuli lopulta sivumäärältään laajempi, kuin olin odottanut

Jotta aurinkosähköveneille löytyisi tulevaisuudessa asiakkaita, täytyy markkinoille tulla kiinnostusta herättäviä tuotteita. Menestys riippuu venevalmistajien ennakkoluulottomuudesta ja siitä, kuinka hyvin he osaavat hyödyntää uutta tekniikkaa suunnittelussaan. Aurinkosähköveneessä on sähköveneiden ohella kaikki ainekset tulevaisuuden hittituotteeksi venealalla.

Laadin työssä esille tulleiden asioiden pohjalta SWOT-analyysin (kuva 22). Siinä kootaan yhteen aurinkosähköveneiden vahvuuksia, heikkouksia, uhkia ja mahdollisuuksia.

## SWOT -analyysi: Aurinkosähkövene

## Sisäiset tekijät

## Vahvuudet

## Heikkoudet

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vähäpäästöisyys</li> <li>- Meluttomuus</li> <li>- Energian omavaraisuus, riippumattomuus palveluista</li> <li>- Vähäinen huollon tarve</li> <li>- Painojakauman muokattavuus</li> <li>- Mahdollisuus tuottaa ylijäämäenergia verkkoon</li> <li>- Sähköpropulsioon hyvä manööverauskyky</li> <li>- Energiatehokas eteneminen koko kierrosalueella</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Akuston rajoitteet maksimitehon suhteen</li> <li>- Akuston hinta</li> <li>- Akuston rajoitteet toimintasäteen suhteen</li> <li>- Paino (tietyissä tapauksissa)</li> <li>- Latauksen riippuvuus säätilasta</li> <li>- Mahdollinen aurinkopaneelikatoksen tarve</li> <li>- Muotoilliset haasteet</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vihreä ajattelu voimistuu</li> <li>- Akkujen (litium) hinnat putoavat</li> <li>- Aurinkopaneelien hinnat putoavat</li> <li>- Ihmiset haluavat entistä helpompaa veneilyä</li> <li>- Meluttomuus nousee tärkeäksi ostokriteeriksi</li> <li>- Polttomootorikiellot sisävesillä</li> <li>- Polttoaineen hinnan merkittävä nousu</li> <li>- Veneily siirtyy enemmän ns. satamaveneilyn ja päiväretkeilyn suuntaan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huoltopalvelujen saatavuus vikatilanteessa</li> <li>- Akkujen hinnat eivät tipu odotetusti</li> <li>- Ostajat eivät ole kiinnostuneita uppoumarunkoisista veneistä</li> <li>- Aurinkosähköveneen ulkonäköä (paneeleja) vierastetaan</li> <li>- Sähköpropulsiota vierastetaan sen erikoisuuden tai harvinaisuuden vuoksi</li> <li>- Mielletään vain aurinkoisen kelin veneeksi</li> <li>- Latauspisteiden liian harva verkosto</li> <li>- Satamien riittämätön kiinnostus aurinkoveneiden tukemiseen</li> </ul>

## Mahdollisuudet

## Uhat

## Ulkoiset tekijät

Kuva 22. Aurinkosähköveneen Swot -analyysi.

Swot-analyysistä voidaan todeta, että aurinkoveneelle löytyy sekä etuja, että haittoja. Sähköveneet ovat yleistymässä ja se saattaa muuttaa tilannetta nopeasti. Tulevaisuutta on vaikea ennustaa, mutta aurinkosähköveneellä näyttäisi olevan hyvät mahdollisuudet kehittyä kaupallisesti menestyväksi tuotteeksi.

## LÄHTEET

Aequus 7.0 Solarboat. Aequus boats. Saatavissa:

<http://www.aequusboats.com/en/home/> [Viitattu 17.12.2012].

Aequus 7.0, l'électro-solaire qui n'a pas de complexe. Saatavissa:

<http://www.allboatsavenue.com/blog-bateaux/wp-content/uploads/2009/11/081204aequus.gif> [Viitattu 20.10.2012].

Alanen, R. 2010. Veneiden uudet energiajärjestelmät. Valtion teknillinen tutkimus-

keskus. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W154.pdf> [Viitattu 3.1.2013].

Aurinkoenergia. Suntekno. Saatavissa:

<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki//aurinkoenergia.pdf> [Viitattu 18.9.2012].

Aurinkopaneelit. Suntekno. Saatavissa:

<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki//paneelit.pdf> [Viitattu 13.12.2012].

Aurinkosähköteknologiat. Helsingin teknillinen yliopisto. Saatavissa:

<http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-tekno.html> [Viitattu 9.11.2012].

Australian Standard AS4509.2: Stand Alone Power Systems Part 2: System Design Guidelines, System Installation

Background knowledge. Saatavissa: [http://electricboatmotors.com.au/?page\\_id=2](http://electricboatmotors.com.au/?page_id=2)

[Viitattu 13.10.2012].

Baltic solar power. Saatavissa: <http://www.bsp.lt/32-84-large/12v-120w-monocrystalline-solar-panel-rigid.jpg> [Viitattu 7.1.2013].

Battery and energy technologies. Saatavissa. <http://www.mpoweruk.com/life.htm>

[Viitattu 12.12.2012].

Battery bank sizing. Saatavissa: <http://www.hardysolar.com/solar-battery/battery-bank-sizing.html> [Viitattu 12.12.2012].

Battery physics. Cameron software. Saatavissa: [http://www.cameronsoftware.com/ev/EV\\_BatteryPhysics.html](http://www.cameronsoftware.com/ev/EV_BatteryPhysics.html) [Viitattu 2.10.2012].

Battery types. Vonwentzel. Saatavissa: <http://www.vonwentzel.net/Battery/00.Glossary/index.html> [Viitattu 14.10.2012].

Bestpowerinverter. Saatavissa: <http://www.bestpowerinverter.com/images/v/201205/13384527910.jpg> [Viitattu 17.12.2012].

Boxwell, M. 2011. Solar electricity handbook 2011 edition. Iso-Britannia: Greenstream Publishing.

Casey, D. 2012. Installing a solar panel to maintain batteries. Saatavissa: <http://www.boatus.com/boattech/casey/installing-solar-panel.asp> [Viitattu 13.10.2012].

Catamaran electric propulsion. The multihull company. Saatavissa: [http://www.multihullcompany.com/Article/Catamaran\\_Electric\\_Propulsion](http://www.multihullcompany.com/Article/Catamaran_Electric_Propulsion) [Viitattu 17.10.2012].

Chen, J. 2011. Physics of solar energy. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Comparing deep-cycle flooded batteries to VRLA batteries. Trojan battery. Saatavissa: [http://www.trojanbatteryre.com/Tech\\_Support/ComparingFlood2VRLA.html](http://www.trojanbatteryre.com/Tech_Support/ComparingFlood2VRLA.html) [Viitattu 25.9.2012].

Comparing PWM and MPPT charge controllers. Altestore. Saatavissa: <http://www.altestore.com/howto/Solar-Electric-Power/Design-Components/Comparing-PWM-and-MPPT-Charge-Controllers/a100/> [Viitattu 13.12.2012].

Cosas de barcos. Saatavissa:

<http://imagenes.cosasdebarcos.com/articulos/0/8/1/6/monitor-de-baterias-victron-bmv-600s-24501110120668525251505566524548x.jpg> [Viitattu 20.10.2012].

Deep cycle battery FAQ Cycles vs life. Wind & sun. Saatavissa:

[http://www.windsun.com/Batteries/Battery\\_FAQ.htm#Cycles%20vs%20Life](http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm#Cycles%20vs%20Life) [Viitattu 15.9.2012].

Deep cycle battery FAQ. Wind & sun. Saatavissa:

[http://www.windsun.com/Batteries/Battery\\_FAQ.htm](http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm) [Viitattu 12.12.2012].

Designing a solar panel. Good idea. Creative services. Saatavissa:

<http://www.goodideacreative.com/spsample.html> [Viitattu 18.9.2012].

Electric drive systems. Saatavissa:

[http://www.fischerpanda.co.uk/electric\\_propulsion.html](http://www.fischerpanda.co.uk/electric_propulsion.html) [Viitattu 11.9.2012].

Engine efficiency. Wikipedia. Saatavissa:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Engine\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Engine_efficiency) [Viitattu 26.11.2012].

Enviromotors. Saatavissa: <http://enviromotors.com/wiki/uploads/Sparrow/TS-LFP-40.jpg> [Viitattu 13.12.2012].

Etech water cooled electric drives. Starboats. Saatavissa:

<http://www.starboats.eu/en/water-cooled-electric-drives-496> [Viitattu 4.12.2012].

First around the world with solar energy. Planetsolar. Saatavissa:

<http://www.planetsolar.org/> [Viitattu 2.1.2013].

Flexible Solar Panel: Semi Flexible vs. Fully Flexible. Eco green for us. Saatavissa:

<http://www.ecogreen4us.com/stories/green-technology-stories/solar-panel-semi-fully-flexible/> [Viitattu 17.12.2012].

Gartner, J. 2010. The EV Conundrum: Uncertain Resale Value Complicates Li-ion

Battery Market. Pike research. Saatavissa: <http://www.pikeresearch.com/2010/01> [Viitattu 17.12.2012].



Gilchrist, A. 2007. Electric motor basics. Saatavissa:

<http://www.fastelectrics.com/electmotorbasics.htm> [Viitattu 12.12.2012].

Gorter, T. 2011. A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boat. Hollanti. Applied energy.

Graham, J. 1996. How To Choose an "Electric" Boat and Estimate Its Performance.

Saatavissa: <http://www.qis.net/~jmgraham/boatspd.htm> [Viitattu 11.9.2012].

Greenspan, J. Solar Panel Efficiency - Dirt Affects The Amount Of Electricity Your Solar Panels Produce. Ezinearticles. Saatavissa: <http://ezinearticles.com/?Solar-Panel-Efficiency---Dirt-Affects-The-Amount-Of-Electricity-Your-Solar-Panels-Produce&id=6277841> [Viitattu 7.1.2013].

How to correctly interconnect multiple batteries to form one larger bank. Smart gauge.

Saatavissa: [http://www.smartgauge.co.uk/batt\\_con.html](http://www.smartgauge.co.uk/batt_con.html) [Viitattu 7.10.2012].

Junction box for solar panels. 2010. Saatavissa:

<http://www.electronicweekly.com/products/2010/05/26/21520/junction-box-for-solar-panels.htm> [Viitattu 27.11.2012].

Komp, R. 2001. Practical photovoltaics. Electricity from solar cells. Michigan: Aatec Publications.

LaMonica, M. 2012. Startup Envia battery promises to slash EV costs. Cnet news.

Saatavissa: [http://news.cnet.com/8301-11386\\_3-57384864-76/startup-envia-battery-promises-to-slash-ev-costs/](http://news.cnet.com/8301-11386_3-57384864-76/startup-envia-battery-promises-to-slash-ev-costs/) [Viitattu 4.11.2012].

Lazauskas, L. Tuck, E. 1996. Small, Low Drag, Solar-Powered Monohulls and Multihulls. Saatavissa: <http://www.cyberiad.net/library/multihulls/solar1/solar.htm> [Viitattu 4.1.2013].

Li - ion BMS Options. Li-ion BMS. Saatavissa:

[http://liionbms.com/php/bms\\_options.php](http://liionbms.com/php/bms_options.php) [Viitattu 10.10.2012].

Lithium-ion car battery. EVs roll. Saatavissa:

[http://www.evscroll.com/Lithium\\_Ion\\_Car\\_Battery.html](http://www.evscroll.com/Lithium_Ion_Car_Battery.html) [Viitattu 17.12.2012].

Lyijyakkujen ostajan abc. 2012. Reps Oy. Saatavissa:

<http://www.reps.fi/datasheetsandmanuals/REPS-lyijyakkujen-ABC-22-4-2012.pdf>

[Viitattu 18.9.2012].

Lynn, P. 2005. Electric points. "What is solarboat?". Lehdessä: Electric boat news. nro 4.

Miten aurinkokenno toimii. Helsingin teknillinen yliopisto. Saatavissa:

<http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html> [Viitattu 7.1.2013].

Miten valita oikea aurinkopaneelityyppi. Eurosolar. Saatavissa:

<http://www.eurosolar.fi/aurinkoenergiaopas/9s.pdf> [Viitattu 18.9.2012].

Nordicsolar. Saatavissa: <http://www.nordicsolar.net/img/p/107-107-home.jpg> [Viitattu 20.10.2012].

Paneelin tuottama energiamäärä. Suntekno. Saatavissa:

<http://www.suntekno.fi/paneelin%20tuotto> [Viitattu 17.12.2012].

Peltonen, S. Pekkala, J. 2011. Open wave. Venealan tuotteiden ja palveluiden visiointi. Aalto-yliopisto. Tutkimusraportti.

Phocos. Saatavissa: [http://www.smsolar.net/files/Phocos\\_CIS\\_ENG.pdf](http://www.smsolar.net/files/Phocos_CIS_ENG.pdf) [Viitattu 13.10.2012].

Project. Solarwave. Saatavissa: <http://www.solarwave.at/autark-um-die-welt-2.html> [Viitattu 7.1.2013].

Pv solar panels for catamarans. The multihull company. Saatavissa:

[http://www.multihullcompany.com/Article/PV\\_Solar\\_Panels\\_for\\_Catamarans](http://www.multihullcompany.com/Article/PV_Solar_Panels_for_Catamarans) [Viitattu 30.10.2012].

SC23 Overview. Horizonyacht. Saatavissa:

<http://horizonyacht.com/Overview.aspx?Cond=e61f7b91-1998-4bf4-b066-840e7e0078c4> [Viitattu 7.12.2012].

SFS-EN ISO 10133. 2000. Small craft. Electrical systems. Extra low-voltage d.c. installations. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Shaft angles. Ricepropulsion. Saatavissa:

[http://www.ricepropulsion.com/TNLS/Shaft\\_Angles.htm](http://www.ricepropulsion.com/TNLS/Shaft_Angles.htm) [Viitattu 18.9.2012].

Simppu 620e. Simppu. Saatavissa: [http://www.simppu.fi/suomi/simppu\\_620\\_e.html](http://www.simppu.fi/suomi/simppu_620_e.html) [Viitattu 7.12.2012].

Soltech nrj. Saatavissa: <http://www.soltech->

[nrj.com/images/Image/Morningstar\\_tristar\\_mppt\\_45\\_1288605344.jpg](http://www.soltech-nrj.com/images/Image/Morningstar_tristar_mppt_45_1288605344.jpg) [Viitattu 20.10.2012].

Suncat 23 Solar powered yacht. 2009. Saatavissa <http://lifealternate.com/wp-content/uploads/2009/08/horizon-solar-yacht.jpg> [Viitattu 11.9.2012].

Sunposition calculator. Saatavissa:

<http://www.sunposition.info/sunposition/spc/locations.php#1> [Viitattu 27.11.2012].

Sähkömoottori. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa:

[http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/electrical\\_motor/Sivut/Default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/electrical_motor/Sivut/Default.aspx) [Viitattu 11.9.2012].

Sähköurakointi. Tukes. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Palvelut/Usein-kysytya-UUSI/Sahko-ja-hissit/Sahkourakointi/> [Viitattu 3.12.2012].

Tactical solar. Saatavissa [http://www.tacticalsolar.com/images/5watt\\_rollable.jpg](http://www.tacticalsolar.com/images/5watt_rollable.jpg) [Viitattu 17.12.2012].

Tech info: Batteries. Ev works. Saatavissa:

<http://www.evworks.com.au/tech/?section=batteries> [Viitattu 7.11.2012].

Technical facts. Roiro. Saatavissa: [http://roiro.se/eng/roiro\\_fakta.html](http://roiro.se/eng/roiro_fakta.html) [Viitattu 17.11.2012].

Technology. Solbianflex. Saatavissa: <http://www.solbian.eu/en/technologies.html> [Viitattu 27.11.2012].

The "sun21". Transatlantic21. Saatavissa: <http://www.transatlantic21.org/> [Viitattu 19.10.2012].

The high power lithium-ion. Battery university. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_high\\_power\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_high_power_lithium_ion) [Viitattu 7.11.2012]

Tuta S30. Tuta. Saatavissa: <http://www.i-tuta.com/Product.asp?id=16>

Wallen matkassa. Saatavissa: <http://yle.fi/vintti/yle.fi/kirppis/files/kirppis/keksi3.jpg> [Viitattu 12.12.2012].

Veneilyn määrä ja taloudelliset vaikutukset Suomessa. 2005. Merenkululaitos. Liikennevirasto. Saatavissa: [http://portal.fma.fi/portal/page/portal/fma\\_fi/tietopalvelut/tilastot/tilastojulkaisut/Veneilyraportti\\_5\\_2005](http://portal.fma.fi/portal/page/portal/fma_fi/tietopalvelut/tilastot/tilastojulkaisut/Veneilyraportti_5_2005) [Viitattu 30.10.2012].

What the heck is MPPT?. Wind & sun. Saatavissa: <http://www.windsun.com/ChargeControls/MPPT.htm> [Viitattu 17.9.2012]

Konetehon ja akuston määrittäminen		
<b>Veneen tiedot</b>		
Vesilinjan pituus (Lwl)	6	m
Fn matkanopeudella	0,4	
Uppouma kuormattuna (mldc)	0,8	tonnia
Pituus/uppoumasuhde (Lwl/∇)	6,5	
Matkanopeus (V <sub>s</sub> )	3,1	m/s
		6,0 kn
Tehontarve (akseliteho) matkanopeudella (P <sub>s</sub> )	1,8	kW
Kokonaistehontarve min. (P <sub>min</sub> )	3,2	kW
Haluttu toimintasäde	10	nml
Kokonaiskulutus (akseliteho) määritetyllä toimintasäteellä	3,1	kWh
Matkaan kuluva aika	1,7	h
Haluttu latausaika, eli käyttökertojen väli	24	h

Akuston määrittäminen		
Akkutyypin	LiFePo4	
Purkusyvyyden DoD	80	%
Kapasiteetin tarve	6,7	kWh
		175,5 Ah
Akuston jännite	38	V
Akustolta matkanopeudella otettava virta	49	A
Akustolta otettava maksimivirta	84	A
Akustosta tunnissa otettava kapasiteetti	49	Ah
C-kerroin	3,6	C/
Kelpoisuus C-kertoimen perusteella (jos lyijyakku)	Huono	
Valitun akkutyypin energiatiheys	0,120	kWh/kg
Akuston paino	78	kg
Kelpoisuus akuston painon perusteella	Sopiva akusto	
Akuston hinta	0,5	eur/Wh
Akuston hinta (LiFePo4 BMS mukana)	3401	eur
Akuston syklinen elinikä (montako matkaa)	1500	kpl

Akuston kustannus (eur/sykli)	2,3	e
Ajotunteja akustolla jos kaikki syklit käytetään	2516	h
Reissuja kesässä	100	kpl
Kesän ajomatka yhteensä	1000	nml
Kesän ajoaika	168	h
Reissuja akun elinikä (ks. Akun elinikä vuosissa)	800	kpl
Akuston kustannus per toteutunut matka	4,3	eur
Akun elinikä vuosissa (kun akussa enää 80% alkup kapasiteetistä)	8	vuotta
Ajomatka yhteensä akun elinikä	8000	nml
Ajotunnit akun elinikä	1342	h
Akuston vaihdon syy	Elinikä täynnä	

**Resistanssin ja konetehon laskenta**

De Grootte -menetelmä. Uppouma- ja puoliliikuveneille

Projekti: 6m

Pvm: 12.1.2013

**Veneen tiedot:**

		Min	Max
LWL, m	6,0	LWL/B 6,67	3,3 10,1
B, m	0,9	l 6,46	5 8
DSPL, t	0,8	K <sub>E</sub> 0,6	
WS, m <sup>2</sup>	7	Z 2	1 3
C <sub>A</sub>	0,0003	K <sub>WS</sub> 3	2,5 3

**Laskennan tulokset**

vs	v	F <sub>nL</sub>	F <sub>nV</sub>	SLR	R <sub>R</sub> /(gD)	R <sub>R</sub>	Re	C <sub>F0</sub>	R <sub>F</sub>	R <sub>AP</sub>	R	P <sub>E</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>
kts	m/s	-	-		-	N	-	-	N	N	N	kW	kW	h.p.
<b>Uppoumatila</b>														
1,49	0,77	0,10	0,25		0,00046	4	4,18E+06	0,00351	8	1	12	0,0	0,02	0,02
2,99	1,53	0,20	0,51		0,00096	8	8,37E+06	0,00309	27	3	38	0,1	0,10	0,13
4,48	2,30	0,30	0,76		0,00361	28	1,26E+07	0,00288	57	9	94	0,2	0,36	0,49
5,22	2,69	0,35	0,89		0,00791	62	1,46E+07	0,00281	76	15	152	0,4	0,68	0,93
<b>Puoliliikutila</b>														
4,70	2,41	0,31	0,80		0,00478	38	1,32E+07	0,00286	62	1	101	0,2	0,41	0,55
5,28	2,72	0,35	0,90		0,00905	71	1,48E+07	0,00281	77	3	151	0,4	0,68	0,93
5,87	3,02	0,39	1,00		0,01693	133	1,65E+07	0,00276	94	5	231	0,7	1,16	1,58
6,46	3,32	0,43	1,10		0,02727	214	1,81E+07	0,00271	112	7	333	1,1	1,84	2,51
7,05	3,62	0,47	1,20		0,03844	302	1,98E+07	0,00267	131	11	444	1,6	2,68	3,64
7,63	3,92	0,51	1,30		0,04902	385	2,14E+07	0,00264	152	15	552	2,2	3,61	4,90
8,81	4,53	0,59	1,50		0,05600	440	2,47E+07	0,00258	199	20	658	3,0	4,96	6,74
9,39	4,83	0,63	1,60		0,05584	438	2,63E+07	0,00255	224	21	684	3,3	5,50	7,47
10,57	5,43	0,71	1,80		0,05711	448	2,96E+07	0,00251	279	26	753	4,1	6,81	9,26
11,74	6,04	0,79	2,00		0,06134	481	3,29E+07	0,00246	339	31	852	5,1	8,57	11,64
13,50	6,94	0,90	2,30		0,06713	527	3,79E+07	0,00241	440	40	1007	7,0	11,65	15,82
14,68	7,54	0,98	2,50		0,07567	594	4,12E+07	0,00238	514	48	1156	8,7	14,53	19,75
15,85	8,15	1,06	2,70		0,08782	689	4,44E+07	0,00235	593	58	1340	10,9	18,20	24,73

<b>Step1: kulutuslaitetaulukko</b>					
	Kuorma (W)	Tehokerroin	Kuorma (W)	Kuorman päälläoloaika (h)	Wh
Moottori	1844	0,85	2170	1,7	3639
Kulkuvalot (led)	5	1	5	1,7	8
Kaiku/plotteri	9	1	9	1,7	15
Pilssipumput (käyntiaika 10% matka-ajasta)	12	1	12	1,7	20
Muu (mm. matkapuhelimen lataus)	4	1	4	1,7	7
	<b>Kokonaiskuorma</b>		<b>2200</b>		<b>3689</b>

<b>Step 2: Suunnitelman kuormat ja energian tarve</b>		
Kokonaisteho Sp	2200	W
Järjestelmän laajennus kerroin kg	0,1	
Suunnittelumarginaali kerroin kc	0,1	
Suunnittelu kuorma Sd	2662	W
Kokonaisenergiankulutus Et	3689	W
Järjestelmän laajennus kerroin kg	0,1	
Suunnittelumarginaali kerroin kc	0,1	
<b>Suunnitteluenergiavaatimus Ed</b>	<b>4464</b>	W

<b>Step 3: Akuston määrittäminen</b>		
Akuston jännite	38	V
Akuston ikääntymiskerroin ka	1,25	
Lämpötilakorjauskerroin kt (taulukosta)	0,956	
Kapasiteetin häviö kerroin kc	1	
Purkamisen maksimi syvyys DoD	80	%
Akun minimi kapasiteetti	175	Ah
<b>Tarvittava akuston koko</b>	<b>6,7</b>	kWh

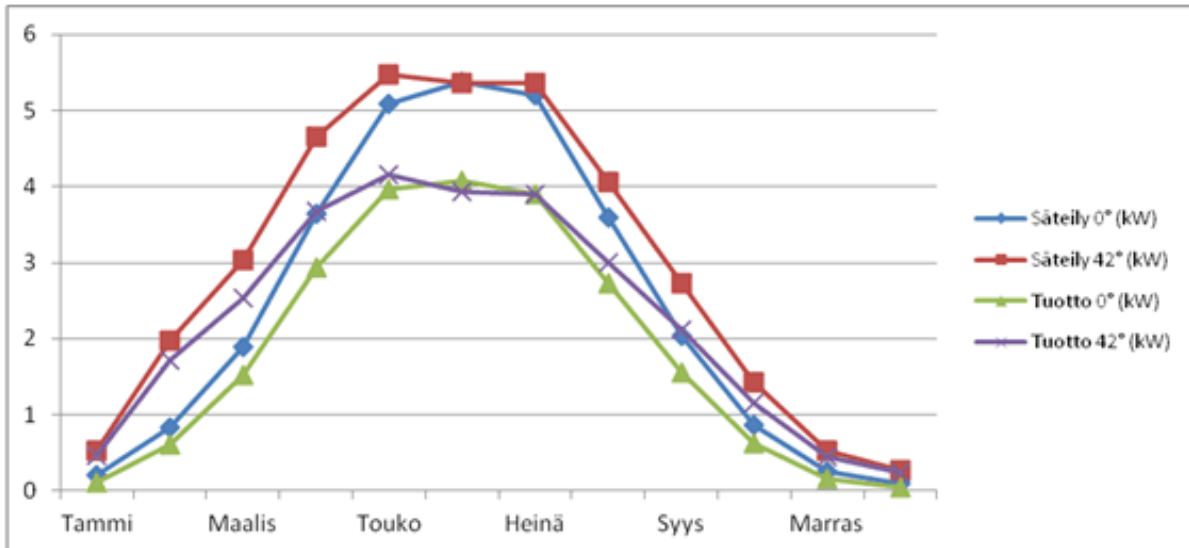
**Aurinkopaneelitehon/-  
määrän laskentaa**
**(Australian standard: AS4509.2)**

Teho-lämpötila suhde	0,3	%/°C
Asennuspaikan lämpötila (Ta,day)	20	°C
Toiminnassa olevan kennon ka. Lämpötila (Tcell,eff)	45	°C
Standardiolosuhteiden lämpötila (Tstc)	25	°C
Lämpötilakerroin (ftemp)	0,94	
<b>Paneelin todellinen teho</b>		
Paneelin ilmoitettu teho standardiooloissa (Pstc)	250	W
Tehon ulosanto toleranssi (fman)	0,96	
Epäpuhtaus kerroin (fdirt)	0,97	
Lämpötilakerroin (ftemp)	0,94	
Paneelin teho käyttöoloissa (Pmod)	<b>219</b>	W
<b>Tarvittava paneeliston koko</b>		
Tarvittava energiamäärä (Ed)	4464	Wh
Ylitarjonta kerroin (fo)	1	
Säteily määrä G (Elokuu)	4,04	kWh/m2
Järjestelmän hyötysuhde (npvss)	0,9	
Tarvittava paneelien määrä	5,6	kpl
<b>Tarvittava kokonaisteho</b>	<b>1402</b>	W
Paneelin hyötysuhde	15	%
<b>Tarvittava paneelipinta-ala</b>	<b>9,3</b>	m2

<b>Auringon säteilyarvoja eri kuukausille (tasopinta)</b>				
Tampere (vaakataso)				
Touko	5,5	kWh/päivä	228,8	Wh/h
Kesä	5,7	kWh/päivä	236,7	Wh/h
Heinä	5,3	kWh/päivä	221,3	Wh/h
Elo	4,0	kWh/päivä	168,3	Wh/h
Syys	2,5	kWh/päivä	102,9	Wh/h
Ka.	4,60	kWh/päivä		



Kuvassa 1 m<sup>2</sup> alueelle tulevan säteilyn sekä järjestelmän tuoton vertailua paneelien ollessa vaakatasossa (0°) tai käännettynä 42° kulmaan (joka on optimi kesäajan kulma Suomessa). Tuotto perustuu teholtaan 1kW järjestelmään. Kuvaajasta huomaa, että 42° kulmaan asennetussa paneelissa kennojen lämpötilan nousun aikaansaama tehonpudotus on hieman merkittävämpi. Kuvaajasta näkee myös, että ero paneelin tuotossa parhaimpina kesäkuukausina (Touko-Elo) on kahden vaihtoehdon välillä melko pieni, mutta korostuu näiden kuukausien ulkopuolella.



Säteilymäärien vertailu eri kaupunkien välillä kesäkuukausien aikana. Kuvaajasta voidaan mm. todeta, että Suomessa saadaan suuremmat säteilymäärät parhaimpina kesäkuukausina kuin Berliinissä tai Lontoossa.

