

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Diplomityö

*Miika Wallius*

## **Vesiväylien turvalaitteiden energianlähteiden valinta**

Tarkastajat: Dosentti Ahti Jaatinen-Värri

DI Heikki Ketolainen

Ohjaaja: Nina Savijoki

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka

Miika Wallius

### **Vesiväylien turvalaitteiden energianlähteiden valinta**

Diplomityö

2021

75 sivua, 23 kuvaa ja 16 taulukkoa

Tarkastajat: Dosentti Ahti Jaatinen-Värri  
DI Heikki Ketolainen

Ohjaaja: Nina Savijoki

Hakusanat: vesiväylä, akku, mitoitus, polttokenno, aurinkokenno

Digitalisaatio on nykyään osa vesiväylien turvalaitteita. Tämä tarkoittaa esimerkiksi niihin asennettavia etäohjattavia sensoreita, sääasemia ja valoja. Nämä lisälaitteet vaativat energianlähteen, joka toimii luotettavasti kylmässä ja vaikeissa olosuhteissa. Siksi tässä työssä karotetaan erilaisten lisälaitteiden kulutusta, akkujen ominaisuuksia sekä sähköntuottomenetelmien teoriaa. Lisälaitteiden osalta keskitytään vesiväylien turvalaitteissa jo käytössä oleviin laitteisiin sekä mahdollisesti tulevaisuudessa käytettäviin laitteisiin. Sähköntuotantomenetelmissä käsitellään lyhyesti poltto- ja aurinkokennoja sekä aaltovoimaloita. Näitä tietoja hyödynnetään tätä työtä varten tehdyn energianlähteiden laskentatyökalun pohjana.

Laskentatyökalun tuloksia tarkastellaan yksinkertaisen esimerkkitapauksen kautta. Havaittiin, että kylmyys vaikuttaa merkittävästi akkujen kapasiteettiin ja aurinkokennojen tuotantoon vaikuttaa eniten varjostukset. Laskentatyökalu laskee kuukautisia keskiarvoja, jonka takia edellä mainitut häviöt jäävät huomioimatta. On siis käyttäjän vastuulla valita tarpeeksi suuri energianlähde, joka riittää kylmien kuukausien yli ja silloin, kun tuotanto on heikkoa.

Laskentatyökalun kehityskohteina ovat kulutuksen ja tuotannon tarkempi arviointi mittaus-  
ten avulla. Lisäksi akuilla voitaisiin luoda esimerkiksi taulukko, joka sisältäisi kaikkien akkutyyp-  
pien kapasiteetit ja jännitteet eri lämpötiloissa. Näin saataisiin laskettua kuukausi-  
taista lämpötilaa vastaava kapasiteetti ja jännite taulukosta interpoloimalla. Myös laskennan  
nopeutta voitaisiin tehostaa, mikä mahdollistaisi samalla useamman nimikkeen listaamisen  
taulukoihin.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology  
School of Energy Systems  
Energy Technology

Miika Wallius

### **Selection of energy sources for waterway safety equipment**

Master's thesis 2021

75 pages, 23 figures and 16 tables

Examiner: Docent Ahti Jaatinen-Värri

M.Sc. Heikki Ketolainen

Supervisor: Nina Savijoki

Keywords: waterway, battery, sizing, fuel cell, solar cell

Today, digitalization is part of waterway safety equipment. This includes, for example, the use of remotely operated sensors, weather stations and lights. These accessories require an energy source that works reliably in cold weather and in difficult conditions. Therefore, this work examines the consumption of various equipment, the characteristics of batteries, and the theory of power generation methods. The focus is on equipment already in use in waterway safety and on equipment that may be used in the future. Electricity generation methods that are considered are fuel cells and solar cells as well as wave power plants. This information is used as a basis for the energy source calculation tool developed for this work.

The results produced by the calculation tool are examined through a simple example case. It was found that the cold significantly affects the capacity of the batteries, and the production of solar cells is mostly affected by shading. The calculation tool calculates monthly averages, which means that the above-mentioned losses are ignored. It is therefore the user's responsibility to choose a large enough energy source that is sufficient during the cold months and when production is low.

The development targets of the calculation tool are more accurate assessment of consumption and production of electricity by means of measurements. In addition, a table containing the capacities and voltages of all battery types at different temperatures could be created for batteries. It would be then possible to calculate the capacity and voltage that corresponds to the monthly temperature by interpolating between the listed values. The speed of the calculation could also be improved, which would at the same time allow more items to be listed to the tables.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Tutkimuksen tausta.....	6
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset.....	7
1.3	Diplomityön rakenne .....	7
2	MERIMERKIT .....	9
2.1	Kelluvat merimerkit.....	9
2.2	Kiinteät merimerkit .....	10
3	LISÄLAITTEIDEN SÄHKÖNKULUTUS JA KOKOLUOKAT.....	13
3.1	Sähkönkulutus nykyään.....	13
3.1.1	Valonlähteet .....	13
3.1.2	Sensorit.....	15
3.1.3	Loggerit.....	15
3.1.4	Lähettimet .....	16
3.1.5	Sääasemat.....	17
3.2	Sähkönkulutus tulevaisuudessa .....	17
3.2.1	5G-lähettimet .....	18
3.2.2	Videokamerat .....	18
3.3	Yhteenveto kulutuksista .....	19
4	SÄHKÖKEMIALLISET ENERGIAVARASTOT .....	21
4.1	Paristot.....	22
4.1.1	Alkali-mangaaniparistot.....	22
4.1.2	Litiumparistot.....	22
4.2	Akut .....	23
4.2.1	Lyijyakut .....	23
4.2.2	Nikkeliakut.....	26
4.2.3	Suola-akut .....	29
4.2.4	Litium-ioniakut .....	31
4.3	Energiavaraston valintakriteerit.....	34
5	SÄHKÖNTUONTANTOMENETELMÄT .....	36
5.1	Polttokennot.....	36
5.1.1	Polttokennotyypit.....	37
5.1.2	Polymeeripolttokenno .....	38
5.1.3	Alkalipolttokenno.....	38

5.1.4	Kiinteäoksidipolttokenno .....	39
5.1.5	Fosforihappopolttokenno .....	40
5.1.6	Sulakarbonaattipolttokenno .....	40
5.2	Aurinkokenno .....	41
5.2.1	Kennon rakenne .....	41
5.2.2	Kennojen ominaisuudet.....	43
5.2.3	Olosuhteiden vaikutus kennon toimintaan.....	45
5.3	Aaltovoima .....	47
5.3.1	OWC-voimala .....	48
5.3.2	Lineaarigeneraattori .....	49
6	ENERGIANLÄHTEIDEN LASKENTATYÖKALU .....	50
6.1	Taustatiedot .....	50
6.1.1	Laitteiden tiedot .....	50
6.1.2	Energianlähteiden tiedot .....	51
6.1.3	Aurinkopaneelien tiedot.....	51
6.1.4	Auringonsäteilyn tiedot.....	52
6.1.5	Lämpötilojen tiedot.....	53
6.2	Ohjelman käyttö, toiminta ja rakenne .....	53
7	LASKENTATYÖKALUN TULOSTEN TARKASTELU.....	58
7.1	Kulutus .....	58
7.2	Energianlähde .....	59
7.3	Tuotanto.....	63
7.4	Kehityskohteet.....	64
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO.....	67
	LÄHTEET .....	69

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

<i>A</i>	pinta-ala	m <sup>2</sup>
<i>FF</i>	täyttökerroin	
<i>H</i>	auringonsäteilyn energia	Wh/m <sup>2</sup>
<i>I</i>	virta	A
<i>k</i>	Boltzmannin vakio	
<i>P</i>	teho	W
<i>PR</i>	sähköntuottohyötysuhde	
<i>q</i>	sähkövaraus	C
<i>T</i>	lämpötila	°C, K
<i>U</i>	jännite	V
<i>v</i>	ominaistilavuus	m <sup>3</sup> /kg
<i>V</i>	aurinkokennon jännite	V

### Kreikkalaiset

<i>η</i>	hyötysuhde
----------	------------

### Alaindeksit

0	kokonais
o1	ensimmäinen kyllästysvirta
o2	toinen kyllästysvirta
OC	avoin piiri
SC	oikosulku
m	maksimi

### Lyhenteet

AFC	Alkalipolttokenno (englanniksi Alkaline Fuel Cell)
CEF	Verkojen Eurooppa (englanniksi Connecting Europe Facility)
DMFC	Suorametanolipolttokenno (englanniksi Direct Methanol Fuel Cell)
IALA	Kansainvälinen majakkaliitto (englanniksi International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities)

IoT	Esineiden internetti (englanniksi Internet of Things)
MCFC	Sulakarbonaattipolttokenno (englanniksi Molten Carbonate Fuel Cell)
MPP	Maksimitehopiste (englanniksi Maximum Power Point)
OWC	Värähtelevä vesipylväs (englanniksi Oscillating Water Column)
PAFC	Fosforihappopolttokenno (englanniksi Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEMFC	Polymeeripolttokenno (englanniksi Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
PTO	Tehontuottotapa (englanniksi Power Take Off)
SOFC	Kiinteäoksidipolttokenno (englanniksi Solid Oxide Fuel Cell)
STC	Standardiolosuhte (englanniksi Standard Test Condition)
WEC	Aaltoenergiamuunnin (englanniksi Wave Energy Converter)
ZEBRA	Natrium-nikkelikloridiakku (englanniksi Zero Emissions Batteries Research Activity)

# 1 JOHDANTO

Digitalisaatio on koko yhteiskuntaa koskettava, ajankohtainen ilmiö. Se tarkoittaa palveluiden ja tuotantoprosessien turvallisuuden, tehokkuuden ja ekologisuuden kehittämistä sähköisten järjestelmien avulla. Digitalisaation hyödyntäminen poijujen kaltaisissa, sähköverkon ulkopuolella olevissa järjestelmissä vaatii keinon säilöä tai tuottaa energiaa paikan päällä. Tavoitteena on, että sähköä riittäisi läpi vuoden. Haasteina kuitenkin ovat kaupallisten energiavastojen suhteellisen pieni energiatiheys, poijujen sisällä oleva rajallinen asennustila, kylmyys sekä vaativat olosuhteet. Sähkönkulutuksen ja -tuoton tarkka mitoittaminen kaikki edellä mainitut tekijät huomioiden on välttämätöntä, jotta sähköisten laitteiden toimintavarmuus voidaan taata.

Sähkökemialliset energiavarastot ovat potentiaalisin vaihtoehto energianlähteeksi, sillä niissä käytetty teknologia on laajalti kaupallisessa käytössä ja helposti saatavilla. Erityisesti akuilla on lukuisia etuja, kuten ladattavuus, huoltovapaus ja pitkä käyttöikä. Yhdistettynä sopivaan sähköntuottojärjestelmään, kuten aurinkokennoon, voi akku ylläpitää sähköistä järjestelmää ympäri vuoden. Akkujen heikkoutena on niiden suhteellisen korkea hinta ja alhainen energiatiheys. Tämän takia myös paristoja, polttokennoja ja aaltovoimaloita tutkitaan tässä työssä vaihtoehtoisina energianlähteinä.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä diplomityö on tehty vuoden 2021 aikana osana Intelligent Sea-projektia. Projektin tavoitteena on kehittää vesiväylien turvallisuutta, tehokkuutta ja ekologisuutta digitalisaation kautta. Digitalisaatio mahdollistaa merenkulun turvalaitteiden kaukovalvonnan ja -hallinnan sekä tuo niihin erilaisia älyominaisuuksia, kuten sensoreita, joilla voidaan seurata ympäristöä. Tarkoituksena on etsiä sopivia energianlähteitä ja sähköntuotantomenetelmiä vastaamaan digitalisaation asettamiin vaatimuksiin. Rajaus on tehty laitteiden osalta sellaisiin, joiden koko, teho ja käyttötarkoitus soveltuu merimerkkeihin ja turvalaitteisiin. Laitteiden taustalla olevaa teoriaa esitetään lähinnä yleisellä tasolla.

Projekti on osittain Verkkojen Euroopan (engl. Connecting Europe Facility – CEF) rahoittama ja projektissa yhteistyökumppaneita ovat Meritaito, Port of Stockholm ja Naantalin



Satama. Meritaito Oy on Suomen valtion omistaman Arctia Oy:n tytäryhtiö ja sen pääasiallinen toimiala on vesirakentaminen, joka sisältää vesialueiden infrastruktuuriin liittyvät palvelut ja merimerkkien valmistamisen. Port of Stockholm on Tukholman kaupungin omistaman Stockholms Hamn AB:n tytäryhtiö, jonka toimialaan kuuluu kuljetus, kiinteistöt sekä terminaali- ja satamatoiminnot. Naantalın Satama Oy on Naantalın kunnan omistama satamayhtiö, ja sen toimialaan kuuluu terminaali- ja satamatoiminnot.

Tämä diplomityö on tehty Arctian, Meritaidon ja Väyläviraston alaisuudessa ja kaikki työtä varten tuotettu materiaali tulee heidän käyttöönsä. Väylävirasto on Suomen valtion virasto, joka vastaa Suomen vesiväylistä sekä tie- ja rataverkosta.

## **1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset**

Tässä diplomityössä on tutkittu teoreettisesti energialähteiden ja sähköntuotantomenetelmien ominaisuuksia ja valintakriteereitä. Näissä painotus on soveltuvuudessa vesiväylien turvalaitteiden toimintaan, mikä tarkoittaa jatkuvaa ympärivuotista toimintaa mahdollisimman vähällä huollolla. Työn tavoitteena on

- esitellä lyhyesti käytössä olevat vesiväylien turvalaitteet, eli merimerkit,
- tehdä kattava kirjallisuuskatsaus aiheesta tehtyyn teoreettiseen tutkimustyöhön,
- kartoittaa käytettävien lisälaitteiden sähkönkulutus ja olennaisimmat ominaisuudet,
- löytää käyttötarkoitukseen sopivia energianlähteitä ja sähköntuotantomenetelmiä,
- luoda Excel-pohjainen laskentatyökalu, joka auttaa käyttäjää oikean energianlähteen valinnassa sovelluskohteen mukaisesti, sekä
- tarkastella kriittisesti laskentatyökalun tuottamia tuloksia.

Laskentatyökalun päätavoitteena on antaa lähinnä karkeita arvioita energian kulutuksesta ja tuotannosta kuukausitasolla. Työssä ei myöskään tehdä kokeellisia mittauksia, sillä se vaatisi asennettavien järjestelmien pitkää ympärivuotista tarkkailua.

## **1.3 Diplomityön rakenne**

Tämän diplomityön pääpaino on energianlähteissä ja niiden valintakriteereissä. Kappaleessa 2 on esitelty yleisimmät kelluvat ja kiinteät merimerkit. Kappaleessa 3 on esitelty poijuissa

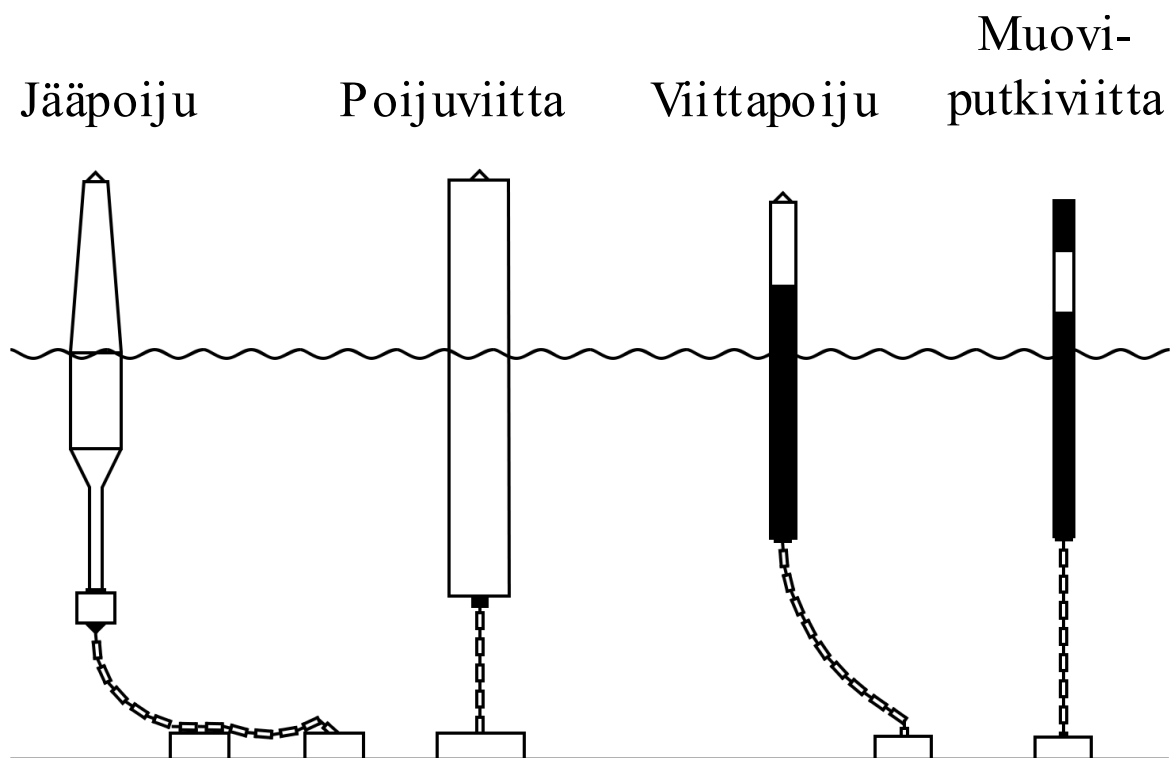
ja kummeleissa käytettävien kaupallisten lisälaitteiden sähkönkulutus, kokoluokat ja olennaisimmat tekniset tiedot. Näitä lisälaitteita ovat nykyään käytössä olevat valonlähteet, sensorit, loggerit, lähettimet ja sääasemat. Myös tulevaisuudessa mahdollisesti käytettäviä lisälaitteita ja niiden sähkönkulutusta esitellään kappaleen lopussa. Kappaleessa 4 on tehty kattava kirjallisuustutkimus sähkökemiallisista energiavarastoista, joihin kuuluvat paristot ja akut. Kappaleessa 5 on puolestaan tehty kirjallisuustutkimus sähköntuotantomenetelmistä, jotka voisivat sopia merimerkkien sisälle tai niiden ulkopinnalle. Näihin sähköntuotantomenetelmiin kuuluvat polttokennot, aurinkokennot sekä aaltovoimalat. Kappaleessa 6 on esitetty kerätyn tiedon pohjalta tehty Excel-pohjainen laskentatyökalu sekä käytetyt laskukaaavat, käyttöohjeet ja huomiot. Kappaleessa 7 tarkastellaan kyseisen laskentatyökalun tuottamia tuloksia esimerkkitapauksen kautta.

## 2 MERIMERKIT

Tämän työn kannalta oleellimmat merimerkit ovat vesiväyliin kelluvat merimerkit, eli poi-  
jut ja viitat sekä maanpinnalle rakennettavat kummelit. Merimerkkien tehtävä on osoittaa  
vesistön väyläalueen reunaan, ja siksi ne sijoitetaan hieman väyläalueen ulkopuolelle. Kar-  
tasta voidaan lukea etäisyys reunamerkeistä väylän reunaan.

### 2.1 Kelluvat merimerkit

Kelluvat merimerkit ovat yleensä lieriön muotoisia, ja ne valmistetaan tyypillisesti joko  
muovi- tai teräsputkesta. Ne seisovat vedessä tavallisesti ympäri vuoden, eikä niitä poisteta  
talven ajaksi kuin poikkeustapauksissa. Kuvassa 1 on esitetty kaikki yleisimmät kelluvat  
merimerkit.



**Kuva 1.** Kelluvat merimerkit. (mukaillen Lasma 2014, 6)

Kuvassa 1 näkyvä sukkulan muotoinen jääpoiju on vapaasti kelluva ja jääoloihin soveltuva  
teräspoiju. Poijuviitta on puolestaan polyeteeniputkesta valmistettu suurikokoinen viitta,  
joka on ankkuroitu meren pohjaan esijännitetyllä kettingillä, jolloin se pysyy paikallaan. Sii-  
hen voidaan asentaa lukuisia lisälaitteita, joita on tarkemmin esitetty kappaleessa 3.

Viittapoiju on poijuviitan kaltainen, mutta vapaasti kelluva ja pienempi merimerkki, joka on myös valmistettu polyeteenistä. Muoviputkiviitta on poijuviitan tapaan ankkuroitu esijännitetyllä kettingillä pohjaan, mutta on huomattavasti pienempi merimerkki, joka ei yleensä sisällä lisälaitteita. Merimerkin näkyvyyttä lisätään merimerkin päälle asennettavalla lyhydellä tai ylös kylkeen asennettavilla heijastimilla. (Väylävirasto 2021), (Meritaito 2018, 7-27)

Nykyään Suomessa eniten käytetty poijujen valmistusmateriaali on HD 100 suurtiheys polyeteeni. Polyeteenin merkittävin etu teräkseen nähden on sen keveys, jonka ansiosta voidaan käyttää kevyempää ketjua ja ankkuria. Polyeteeni on myös materiaalina halvempaa ja kestävämpää, joten sitä voidaan käyttää myös jääpoijuissa. Lisäksi se kestää korroosiota hyvin, ja väri säilyy siinä 20-30 vuotta, joten se ei vaadi myöskään yhtä paljon huoltoa. Poijujen halkaisija on tavallisesti 160-800 millimetriä ja korkeus 3-11 metriä. (Ibid.)

## **2.2 Kiinteät merimerkit**

Kiinteisiin merimerkkeihin kuuluvat kummelit, loistot, linjamerkit, reunamerkit, tutkamerkit, majakat ja tunnusmajakat. Ne pystytetään yleensä maalle tai kiinni veden pohjaan.

Loisto on valolla varustettu turvalaite, joka on yleensä useita metrejä korkea ja valkoiseksi maalattu. Loiston tehtävä on näyttää väylän suuntaa tai toimia navigoinnin kiintopisteenä. Lisäksi loistoja käytetään myös varoittamiseen ja lentoliikenteen ohjaamiseen. Loiston valo auttaa navigoinnissa erityisesti öisin. (Väylävirasto 2021)

Majakka on valolla varustettu merimerkki, jonka tehtävä on helpottaa avomerialuksien navigointia, varoittaa karikoista ja opastaa tärkeiden, saaristojen sisään vievien väylien alkuun. Tunnusmajakka on yleensä puusta tai kivistä rakennettu valaisematon merimerkki. Sen tehtävänä on osoittaa kaupunkiväylän alkua tai luotsiaseman paikkaa. (Nyman 2009, 8-11)

Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen sektoriloisto, majakka sekä tunnusmajakka. Kyseinen loisto on alun perin rakennettu valkoisen polttoainekopin vasemmalla puolella näkyvälle graniittiperustukselle, mutta korotettu myöhemmin pyöreälle ylätasanteelle (Nyman 2009, 10).



**Kuva 2.** Kuvassa vasemmalta oikealle katsottuna: Airiston selän eteläpäässä sijaitseva Orhisaaren loisto, Marjaniemen majakka ja Lyökin tunnusmajakka. (Nyman 2009, 8-11)

Kuvan 2 suuria merimerkkejä yleisempiä ovat erilaiset heijastimilla varustetut taulut ja pylvää. Esimerkiksi taulun muotoinen linjamerkki osoittaa väylälinjan tarkan sijainnin. Niitä asetetaan kaksi peräkkäin eri korkeuksille siten, että ne näkyvät päällekkäin väylältä katsottuna. Linjamerkki voi olla valaistu, jolloin sitä kutsutaan linjaloihostoksi. Reunamerkki on viitoitusjärjestelmän mukainen merkki, jonka tehtävä on osoittaa väylän reunaan. Kartalle merkitään etäisyys merkistä väylän reunaan. Lisäksi on olemassa tutkaheijastimella varustettu tutkamerkki. Se vastaanottaa tutkan signaalin ja lähettää tutkan kuvapinnalla näkyvän vastauskoodin takaisin tutkalle. (Väylävirasto 2021)

Merkkien tavoin myös kummelit ohjaavat laivaliikennettä. Perinteinen kummeli on kivistä kasattu, tyypillisesti valkoiseksi kalkittu päivämerenkulun kiintopiste (Nyman 2009, 7). Kummeli voi olla myös valkeaksi maalattu betoni-, puu- tai teräsrakenne. Kuvassa 3 on esitetty perinteinen kummeli ja moderni, akkukäyttöinen levykummeli.



**Kuva 3.** Vasemmalla Kyrkogårdsön kummeli Kirkkonummen edustalla ja oikealla aurinkopaneeleilla ladattava akkukäyttöinen levykummeli Norvikin sataman edustalla. (Nyman 2009, 7), (Bergström 2020)

Kuvan 3 vuonna 1905 rakennettu kummeli ei sisällä elektroniikkaa tai heijastinta. Se ei myöskään ole Kansainvälisen majakkaliiton (IALA) viitoitusjärjestelmää noudattava merkki, sillä se ei osoita tarkkaan väylän tai vaarapaikkojen sijaintia. Se auttaa kuitenkin veneilijää paikan ja kulkusuunnan määrittämisessä karkealla tasolla. Kuvan levykummeli on varustettu valoilla, jotka ovat kauko-ohjattavissa. Se on mobiiliverkon kautta yhteydessä kolmeen samantyyppiseen levykummeliin ja yhteen valaistuun poijuun. Näiden kaikkien valoja voidaan hallita samanaikaisesti. Tukholman sataman tavoitteena on kehittää automaattinen valojen hallintajärjestelmä, jotta valot eivät olisi päällä silloin, kun laivoja ei ole väylällä. Tämä säästäisi huomattavasti energiaa. Kyseiset neljä kummeliä ja valaistu poiju ovat Meritaidon toimittamia, ja ne ovat osa EU:n Intelligent sea -projektia. (Bergström 2020)

### 3 LISÄLAITTEIDEN SÄHKÖNKULUTUS JA KOKOLUOKAT

Poijujen sähkönkulutukseen vaikuttaa erilaiset lisälaitteet, joita ovat tässä kappaleessa käsiteltävät valonlähteet, lähettimet, sensorit, loggerit, lähettimet ja sääasemat. Näiden lisäksi kappaleessa esitellään potentiaalisia tulevaisuuden lisälaitteita, kuten 5G-lähtimiä ja videokameroita. Laitteiden sähkönkulutus ja olennaisimmat ominaisuudet ovat kirjattu tyyppilisten kaupallisten laitteiden pohjalta. Jännitteistä puhuttaessa tarkoitetaan tässä kappaleessa aina tasavirtana tulevaa jännitettä (VDC).

#### 3.1 Sähkönkulutus nykyään

Tässä kappaleessa käsitellään nykyään käytössä olevien laitteiden sähkönkulutusta ja muita ominaisuuksia, kuten mittasuhteita, painoa ja käyttölämpötilaa.

##### 3.1.1 Valonlähteet

Poijuihin asennettavia valonlähteitä ovat hehkulamput ja ledit. Valonlähde muodostaa optiikan ja elektroniikan kanssa konstruktion, jota kutsutaan lyhdyksi. Lyhtyä ohjaa vilkkulaite, jonka tehtävänä on muodostaa valotunnus sekä ohjata valon syttymistä ja sammumista tietyssä valaistusvoimakkuudessa. Lisäksi se pitää valon kirkkauden vakiona energiavaraston jännitteen vaihdella. Vilkkulaite mahdollistaa myös lyhdyn toimintatietojen keruun sekä erilaisten asetusten ohjelmoimisen lyhtyyn. Kuvassa 4 on esitetty hehkulamppulyhty, tyyppillinen LED-lyhty sekä aurinkokennoilla ladattava lyhty. (Lasma 2014, 7-8)



**Kuva 4.** Vasemmalta oikealla katsottuna: VP-3 lyhdyn yläosa, Sabik Oy:n VP LED-lyhty asennettuna viittaaan ja Sabik Oy:n VLB-5X-SS-lyhty kiinnitettynä aurinkokennoilla ympäröityyn akkuun. (Ibid., 8)

Taulukossa 1 on esitetty merimerkeissä käytössä olevien kaupallisten lyhtyjen teknisiä tietoja. Kyseiset lyhdyt sisältävät myös vilkkulaitteen ja ovat Kansainvälisen majakkaliiton ohjeistuksen mukaisia. Hehkulampullisia lyhtyjä ei ole esitelty, sillä niitä ei enää valmisteta. Kaikissa lyhdyissä on joko IP 67 tai IP 68 tiiviysluokitus.

**Taulukko 1.** Kaupallisten lyhtyjen teknisiä ominaisuuksia.

Parametri	MPV LED	VLB-44X	SL-510-SA	SL-155-10D	MBL150
Valmistaja	Sabik	Sabik	Sealite	Sealite	Mesemar
Valaisukulma (°)	10	10	10	10	8
Valon intensiteetti (cd)	120-240	920-1650	200-650	2041-3910	574-950
Teho (W)	6		15	18	12
Näkyvyys, kun $T = 0,74$ (NM)	6	6-14	5-9	6-13	3-10
Halkaisija (mm)	160	300	228	230	230
Paino (kg)	25	4,5	1,2	5,0	
Jännite (V)	10-32	10-18	12-24	12-24	9-36
Käyttöikä vuosissa	10		15	12	15
Käyttölämpötila (°C)	-40+60	-30+50	-30+50	-40+80	-20+55

Taulukon 1 lyhtyjen tarkemman tiedot löytyvät lähteistä Sabik 2021a, Sabik 2021b, Sealite 2021a, Sealite 2021b ja Mesemar 2021. Sabik ja Sealite valmistavat myös akulla ja aurinkokennoilla varustettuja lyhtyjä, jotka eivät tarvitse erillistä energianlähdettä. Kyseisten lyhtyjen teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Kaupallisten, aurinkokennoilla ladattavien lyhtyjen teknisiä ominaisuuksia.

Parametri	VLB-5X-SS	M860	SL-75	SL-C510
Valmistaja	Sabik	Sabik	Sealite	Sealite
Valaisukulma (°)	7	10	7	10
Valon intensiteetti (cd)	157-177	239-445	65-131	200-650
Aurinkokennojen yhteenlaskettu teho (W)		15,2	5	20,0-33,6
Näkyvyys, kun $T = 0,74$ (NM)	5,5	4-7	3-5	5-9
Halkaisija (mm)	240	235	231	234
Paino (kg)	6,0	6,4-10,2	2,5	9,2-16,0
Jännite (V)	9-18	10-18	12-24	12-24
Käyttöikä vuosissa	10		12	15
Käyttölämpötila (°C)	-40+50	-30+50	-40+80	-30+50
Akun kapasiteetti (Ah)	12	16-25	17,2-21,5	



Taulukon 2 lyhtyjen tarkemman tiedot löytyvät lähteistä Sabik 2021c, Sabik 2021d, Sealite 2021c ja Sealite 2021d. Selvennyksenä, taulukoissa 1 ja 2 näkyvyys on ilmoitettu merimailleina. Yksi merimaili on 1852 metriä. *T* kuvaa valon läpäisykykyä (engl. transmissivity) ilmassa. Laitevalmistajat käyttävät tyypillisesti lukua 0,74, joka tarkoittaa, että valon intensiteetistä 74 % läpäisee ilman.

### 3.1.2 Sensorit

Sensorit ovat laitteita, joilla mitataan fysikaalista tai kemiallista suuretta. Poijuissa käytetään sensoreita ympäristön reaaliaikaiseen seurantaan tai datan keräämiseen. Taulukossa 3 on esitetty Meritaidon perusvalikoiman sensorit ja niiden teknisiä tietoja.

**Taulukko 3.** Meritaidon perusvalikoiman sensorit. (mukaiillen Meritaito 2018, 7)

Parametri	Valmistaja	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus	Teho
Lämpötila	YSI	-5+50 °C	0,01 °C	+0,15 °C	
Johtavuus	YSI	0-100 mS/cm	0,001 mS/cm	0,5 %	
Suolapitoisuus	YSI	0-70 ppt	0,01 ppt	± 1 %	
Liuennot happi	YSI	0-50 mg/l	0,01 mg/l	± 2 %	
Sameus	YSI	0-1000 NTU	0,1 NTU	± 2 %	
Levät - chl-a	YSI	0-400 µg/l	0,1 µg/l		
Levät - syanobakteerit	YSI	0-280000 cells/ml	1 cells/ml		
Vuoroveden korkeus	Aanderaa	0-20 m	< 0,0001 %	± 0,02 %	0,60 W
Aallonkorkeus	Aanderaa	0-20 m	< 0,0001 %	± 0,02 %	0,60 W
Virran nopeus	Aanderaa	0-300 cm/s	0,1 %	1 %	25 W
Virran suunta	Aanderaa	0-360 °	± 0,35 °	± 5 °	25 W
Öljyvuoto - raaka	Turner	1-1500 ppb	1 ppb	1 ppb	2,4 W
Öljyvuoto - hieno	Turner	3-3500 ppb	1 ppb	1 ppb	2,4 W

Kokoluokaltaan sensorit ovat suhteellisen pieniä. Niiden halkaisija on yleensä 30-150 mm ja paino 0,1-15 kg. Painoa lisää erityisesti joihinkin sensoreihin liitetty akku. Sensoreiden käyttämää tehoa on vaikea arvioida, sillä mittaustajuuus vaikuttaa kulutukseen merkittävästi. Taulukossa ilmoitetut arvot ovat siksi maksimitehoja ja ne on saatu valmistajien sivuilta.

### 3.1.3 Loggerit

Loggerit keräävät sensoreilta tulevaa dataa ja tallentavat sen sähköiseen muotoon kovalevyille. Loggerit voivat lähettää datan myös suoraan tietokoneelle johtimen tai etäyhteyden

välityksellä. Loggerin mittaustaajuus ja aloitusajankohta ovat yleensä käyttäjän valittavissa. Taulukossa 4 on esitetty joidenkin merikelpoisten dataloggereiden teknisiä tietoja.

**Taulukko 4.** Loggereiden teknisiä tietoja. (YSI 2021), (Aanderaa 2021), (Lindfors 2021)

Parametri	Storm 3	Smartguard	Luode-loggeri
Valmistaja	YSI	Aanderaa	Luode
Paino (kg)	1,0		2,0
Käyttöjännite (V)	10-16	12-30	11-15
Käyttövirta (mA)	3,5-50,0	1,0-20,0	1,0
Teho (W)	0,04-0,6	0,01-0,2	0,01
Käyttölämpötila (°C)	-40+60	-40+60	-40+60
Suurin mittaustaajuus (Hz)	100	2	1000
Analogiset kanavat	4	6	8-16
Digitaaliset kanavat	4	2	0
Muisti (MB)	256	2000	
Radiomodeemi-yhteys	Kyllä	Kyllä	Kyllä
USB-yhteys	Kyllä	Kyllä	Ei
Wi-Fi-yhteys	Kyllä	Ei	Ei
Satelliitti-yhteys	Kyllä	Kyllä	Kyllä

Selvennyksenä taulukossa 4 mittaustaajuus tarkoittaa kuinka monta mittausta voidaan kirjata sekunnissa. Mittaustaajuuden nostattaminen lisää sähkönkulutusta. Taulukon käyttövirran alempi arvo kuvaa lepotilan kulutusta ja suurempi arvo tyypillistä kulutusta mitattaessa.

### 3.1.4 Lähettimet

Lähettimet ovat laitteita, joilla lähetetään sähkömagneettisia radioaaltoja radiovastaanottimelle. Niitä käytetään merellä AIS-järjestelmässä (Automatic Identification System) laivojen, alusten ja merimerkkien tunnistamiseen. Yleensä lähettimet ovat integroituna turvalaitteeseen, mutta saatavilla on myös erillisiä lähettämiä. Taulukossa 5 on esitetty joidenkin merikelpoisten AIS-lähettimien teknisiä tietoja.

**Taulukko 5.** AIS-lähettimeiden teknisiä tietoja. (Sabik 2021e), (Sealite 2021e)

Parametri	LightGuard AIS	SL-AIS-C
Valmistaja	Sabik	Sealite
Paino (kg)	1,3	1,2
Jännite (V)	10-32	12-24
Teho (W), kun jännite 12 V	0,045-0,450	
Virrankulutus (Ah/d), kun 1 viesti/3 min	0,09-0,9	0,08-0,09
Käyttölämpötila (°C)	-25-+55	

### 3.1.5 Sääasemat

Sääasema on laitteisto, joka sisältää useita sensoreita, joilla mitataan eri sääsuureita. Yleisimpiä mitattavia suureita ovat lämpötila, ilmanpaine, ilmakeuhuus, tuulen nopeus ja suunta sekä sateen määrä. Sääasemien sähkönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. mittaus-taajuus, sähkölämmitys, sensoreiden määrä ja etäohjaus. Taulukossa 6 on esitetty joidenkin merikelpoisten sääasemien teknisiä tietoja.

**Taulukko 6.** Sääasemien teknisiä tietoja. (Vaisala 2021), (Airmar 2021)

Parametri	WXT530	200WX-IPX7
Valmistaja	Vaisala	Airmar
Paino (kg)	0,5-0,7	0,3
Jännite (V)	6-24	9-40
Virrankulutus (mA), kun jännite 12 V	0,1-15,0	< 75,0
Lämmityksen virrankulutus (mA), kun jännite 12 V	800	
Käyttölämpötila (°C)	-52-+60	-25-55

Taulukossa 6 esitellyt sääasemat mittaavat kaikkia yleisimpiä suureita ja ne eivät sisällä liikkuvia osia. Tarkemmat tiedot esimerkiksi mittaustarkkuudesta löytyy valmistajien sivuilta.

## 3.2 Sähkönkulutus tulevaisuudessa

Tulevaisuudessa poijuihin asennetaan mahdollisesti lisälaitteita, jotka eivät ole vain ympäristön seurantaan tai laivaliikenteen turvallisuutta varten. Erityisesti 5G-lähettimeet, videokamerat ja liikennevalot ovat herättäneet kiinnostusta. Tässä kappaleessa tehdään selvitys kyseisten laitteiden sähkönkulutuksesta karkealla tasolla.

### 3.2.1 5G-lähettime

5G tarkoittaa televiestinnässä viidennen sukupolven mobiilidatayhteys standardia. 5G-verkot välittävät tietoa radioaaltojen välityksillä, ja niiden käyttämä taajuuskaista on yli 40 GHz, mutta Euroopassa on tällä hetkellä käytössä vain 3,4-3,8 GHz ja 24,25-27,5 GHz taajuuskaistat (GSA 2017). Suomessa kyseiset taajuuskaistat ovat myös jo käytössä (Liikenne- ja viestintävirasto 2020).

5G mahdollistaa nopeamman tiedonsiirtonopeuden 4G:hen verrattuna, mikä luo edellytykset esineiden internetin (engl. Internet of Things – IoT) laajenemisen lähes viiveetöntä yhteyttä vaativaan teknologiaan, kuten itseohjautuviin robottiajoneuvoihin. Lisäksi teollisuuden automatiikka ja korkearesoluutioisen videokuvan lähettäminen nopeutuu (GSA 2017). 5G:n heikkous on sen huono seinien läpäisykyky, minkä takia tukiasemia tulee asentaa maalla tiheään luotettavan yhteyden takaamiseksi. 5G-lähettimeä on saatavilla useassa kokoluokassa. Näitä lähettimeä kutsutaan tukiasemiksi, eli soluiksi (engl. cell). Taulukossa 7 on esitetty eri kokoisten solujen teknisiä tietoja.

**Taulukko 7.** 5G-tukiasemien teho, kantama, käyttäjämäärä ja sijainti. (Nguyen 2017)

Tukiaseman tyyppi	Teho (W)	Kantama (km)	Käyttäjämäärä	Sijainti
Femtosolu	0,001-0,250	0,01-0,10	1-30	Sisätiloissa
Pikosolu	0,25-1,00	0,1-0,2	30-100	Sisätiloissa / Ulkona
Mikrosolu	1-10	0,2-2,0	100-2000	Sisätiloissa / Ulkona
Makrosolu	10-50	8,0-30,0	> 2000	Ulkona

Nguyen (2017), johon taulukko 7 perustuu, käsittelee Qorvon valmistamia 5G-lähettimeä. Muiden valmistajien arvot voivat hieman poiketa näistä, mutta esimerkiksi Dhananin ja Hsun artikkelissa puhutaan samoista kokoluokista (Dhanani & Hsun, 2020).

### 3.2.2 Videokamerat

Nykyaikainen videokamera on laite, joka tallentaa liikkuvaa kuvaa elektroniseen muotoon esimerkiksi muistikortille tai kiintolevyille. Videokameroita on kaupallisesti saatavilla lukuisia eri tyyppisiä ja malleja, mutta tässä kappaleessa keskitytään sellaisiin kameroihin, jotka ovat vesitiiviitä, kestäviä ja etäohjattavia. Taulukossa 8 on esitelty kaksi nämä kriteerit täyttävää videokameraa.

**Taulukko 8.** Eräiden videokameroiden teknisiä tietoja. (Bosesh 2021), (Dahua Technology 2021)

Parametri	NC03G	IPC-HFW4230M-4G-AS-I2
Valmistaja	Bosesh	Dahua
Jännite (V)	12	12
Virrankulutus (A)	2	< 1
Maksimiresoluutio (25 fps)	1920x1080	1920x1080
Käyttölämpötila (°C)	-20-+60	-30-+60
Näkyvyys yöllä (m)	20	40
Muistia maksimissaan (GB)	128	256
Äänen nauhoitus	Ei	Kyllä
4G-tuki	Kyllä	Kyllä

Taulukon 8 kamerat ovat saatavilla useista suomalaisista verkkokaupoista. Valikoima on valtava, jonka takia kameraa valitessa kannattaa perehtyä sen lisäominaisuuksiin. Esimerkiksi osa kameroista, kuten taulukossa mainittu Dahuan valvontakamera, voi lähettää tallenteet verkon välityksellä etäpalvelimelle, kun taas osa tallentaa vain muistikortille. Suurikin muistikortti menee nopeasti täyteen, jos videokuvaa otetaan paljon. Vesiväylien vaikeasti huollettavissa turvalaitteissa tämä on huomioitava.

### 3.3 Yhteenveto kulutuksista

Yhteenveto kappaleissa 3.1.1 ja 3.2 käsiteltyjen laitteiden kulutuksesta on koottu taulukkoon 9. Puuttuneet virrankulutuksen arvot saatiin jakamalla tehot 12 V:n jännitteellä.

**Taulukko 9.** Yhteenveto lisälaitteiden virrankulutuksesta ja tehosta 12 V:n jännitteellä.

Laite	Virrankulutus (mA)	Teho (W)
Valonlähteet	500-1500	6-18
Sensorit	17-2100	0,2-25
Loggerit	1-50	0,01-0,6
Lähettimet	4-40	0,045-0,45
Sääasemat	800	9,6
5G-lähettimet	0,1-4200	0,001-50
Videokamerat	2000	24

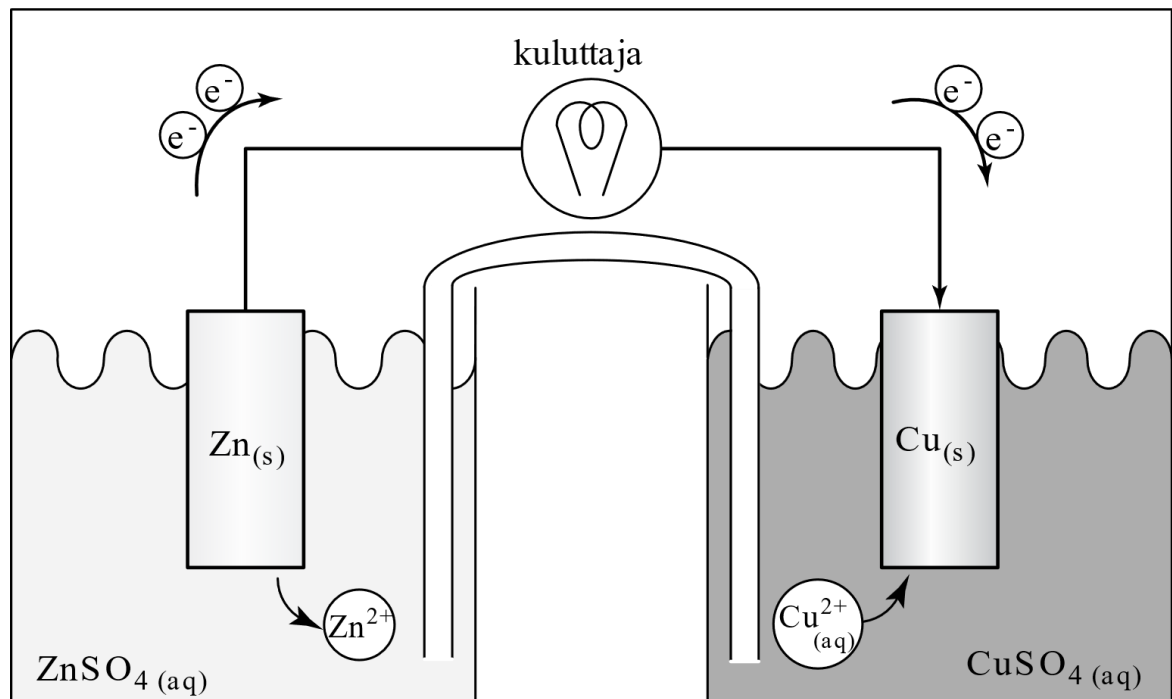
Taulukon 9 arvot ovat lähinnä suuntaa antavia, sillä esimerkiksi lyhtyjen ei tarvitse yleensä palaa täydellä teholla, jonka valmistaja on ilmoittanut. Lisäksi osa esimerkiksi 5G-

lähettimistä ei toimi 12 V:n jännitteellä, joten taulukon arvot kertovat vain lähinnä kulutuksen kokoluokasta.

## 4 SÄHKÖKEMIAALLISET ENERGIAVARASTOT

Tässä kappaleessa käydään tämän työn kannalta oleelliset sähkökemialliset energiavarastot, joita ovat patterit ja akut. Niissä kemiallinen energia muutetaan suoraan sähköenergiaksi prosessissa, johon osallistuu vähintään kaksi reagoivaa yhdistettä. Tästä prosessista saatava energia on käytettävissä sähkövirtana määritellyssä jännitteessä ja ajassa. Koska sähkökemiallisissa energianlähteissä energianmuunto tapahtuu vain yhdessä vaiheessa, on niiden energiatehokkuus korkea. (Daniel & Besenhard 2011, 3)

Sähkökemiallisia varastoja on useita erilaisia, ja niissä käytetty kemiallinen reaktio, rakenne ja muotoilu riippuvat sovelluskohteesta. Yksinkertaisin tällainen varasto on galvaaninen kenno, jonka jännite on 0,5-5 V. Jännitettä voidaan kasvattaa kytkemällä kennoja sarjaan, ja kapasiteettia voidaan puolestaan kasvattaa kytkemällä kennoja rinnan. Useasta kennosta koostuvaa kokonaisuutta kutsutaan paristoksi ja akkujen yhteydessä akustoksi. Eräs tunnettu galvaaninen kenno on kuvassa 5 näkyvä Daniellin pari, jossa sinkkianodi (Zn) on sinkkisulfaatin ( $\text{ZnSO}_4$ ) ja kuparikatodi (Cu) kuparisulfaatin ( $\text{CuSO}_4$ ) vesiliuoksessa. (Ibid.)



**Kuva 5.** Daniellin pari. Kuvassa alaindeksi (s) tarkoittaa kiinteää ja (aq) vesiliuosta. (mukaiillen Ibid., 4)

Kappaleessa 4.1 käsitellään paristoja ja kappaleessa 4.2 akkuja. Niiden tärkeimmät tunnusluvut, kuten ominaisenergia (Wh/kg), energiatiheys (Wh/L), ominaisteho (W/kg), tehoteho (W/L), kennon nimellisjännite (V), sykli-ikä, itsepurkautuvuus kuukaudessa (%), toimintalämpötila (°C) ja sovelluskohteet on esitetty kootusti kappaleiden lopussa.

Tarkennuksena seuraavissa kappaleissa sykli-ikästä puhuttaessa tarkoitetaan täydellisten varaus-purkausjaksojen lukumäärää, jonka jälkeen akun kapasiteetti on alle 80 % nimelliskapasiteetista. Hyötysuhde puolestaan tarkoittaa energiahyötysuhdetta, eli akusta saatavan energiamäärän ja akkuun syötetyn energiamäärän suhdetta. Paristoilla nämä kaksi tietoa eivät ole oleellisia, koska paristoja ei voi ladata.

## **4.1 Paristot**

Paristot ovat kertakäyttöisiä sähkökemiallisia varastoja. Niissä sähkökemiallinen prosessi on peruuttamaton, eli paristoa ei voi ladata, sillä reagoivat yhdisteet kuluvat virtaa purkaessa. Paristoilla on hyvä energiatiheys ja varastointiominaisuudet. (Ibid., 27) Paristotyyppinä on lukuisia, jonka takia tässä työssä keskitytään alkali-mangaaniparistoon ja litiumparistoon, jotka ovat eräitä yleisimpiä paristotyyppinä.

### **4.1.1 Alkali-mangaaniparistot**

Emäksistä liuosta elektrolyyttinä käytettäviä paristoja kutsutaan alkaliparistoiksi. Ne ovat suhteellisen suuritehoisia emäksisen liuoksen korkean johtavuuden ansiosta. Alkali-mangaaniparisto kehitettiin Leclanchén parin, eli sinkki-hiili pariston edeltäjäksi, ja sillä on noin kolme kertaa sinkki-hiili pariston kapasiteetti. Alkalipariston rakenne on ilmatiivis, minkä takia sillä on hyvä varastokestävyys. Alkali-mangaaniparistot ovat laajalti käytössä ympäri maailmaa. Tarkempia alkalipariston tunnuslukuja on esitetty kappaleen 4.1.2 taulukossa 10. (Ibid., 27-29)

### **4.1.2 Litiumparistot**

Litiumparistoja on saatavilla lukuisilla eri katodiyhdisteillä, joista jokaisella on omat erityispiirteensä, mutta myös paljon yhteistä. Litiumparistoilla on korkea energiatiheys muihin paristo- ja akkutyyppeihin verrattuna ja niiden kaupallinen kehitystyö on nopeasti edennyt. Litiumparistoja onkin saatavilla pieninä nappiparistoina sekä suurina erikoisparistoina, joita käytetään esimerkiksi avaruus- ja armeijasovelluksissa. Yleisimmät kiinteää katodia



käyttävät litiumparistotyypit ovat litium mangaanidioksidi (Li-MnO<sub>2</sub>) ja litium hiilimonofluoridi (Li-(CF)<sub>x</sub>). Vastaavasti yleisimmät nestemäistä katodia käyttävät litiumparistotyypit ovat litium tionyylikloridi (Li-SOCl<sub>2</sub>) ja litium rikkidioksidi (Li-SO<sub>2</sub>). (Ibid., 924-927)

Litiumparistoilla on tyypillisesti noin 3 V:n kennojännite, joka mahdollistaa suuren ominaisenergian. Tyypillinen arvo on katodimateriaalista ja pariston rakenteesta riippuen 230-590 Wh/kg. Lisäksi litiumparistoilla on todella alhainen itsepurkautuvuus ja laaja käyttölämpötila-alue. Yleisin rakenne muistuttaa kuvan 6 nikkeliakkua. Etuna tässä rakenteessa on matala sisäinen vastus, suuri virransyöttökyky ja hyvä varastokestävyys. Tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 10. (Ibid.)

**Taulukko 10.** Alkali- ja litiumparistojen tunnuslukuja. (Crompton 2001, 2/4), (Khan et al. 2018, 4222), (Daniel & Besenhard 2011, 924-927)

	Alkali-mangaani- paristo	Litium mangaanidioksi- diparisto	Litium rikkidiok- sidi
Kemiallinen kuvaaja	MnO <sub>2</sub>	Li-MnO <sub>2</sub>	Li-SO <sub>2</sub>
Ominaisenergia (Wh/kg)	66-99	230	260
Energiatiheys (Wh/L)	122-268		
Kennon nimellisjännite (V)	1,5	3,0-3,3	3,0
Itsepurkautuvuus kuukaudessa (%)	0,3	< 0,1	< 0,1
Käyttölämpötila (°C)	-30-+50	-20-+55	-40-+55

## 4.2 Akut

Akut ovat sähkökemiallisia varastoja, joiden etu paristoihin nähden on, että niissä sähkövirran tuottoon käytetty kemiallinen prosessi voidaan palauttaa purkamisen jälkeen alkutilaan, eli ladata, ulkoisen sähkövirran avulla. Akuista puhuttaessa yhdellä kennolla tarkoitetaan katodin ja anodin muodostamaa paria, joiden välillä on erotin ja elektrolyytti. Akun tilavuuteen ja massaan vaikuttaa merkittävästi kennojen määrä sekä akkutyypin, joita ovat lyijy-akut, nikkeliakut sekä litium-ioniakut. (Daniel & Besenhard 2011, 4)

### 4.2.1 Lyijyakut

Lyijyaku koostuu kahdesta lyijysulfaattilevystä (PbSO<sub>4</sub>), joiden välissä on tavallisesti rikkihapon vesiliuos. Ladattaessa anodina toimiva lyijysulfaatti muuttuu lyijyoksidiksi (PbO<sub>2</sub>) ja anodina toimiva lyijysulfaatti lyijyksi (Pb). Purettaessa levyt muuttavat takaisin

lyijysulfaatiksi. Lyijyparin välillä on noin 2 voltin nimellisjännite. Kytkemällä lyijypareja sarjaan saadaan tämä jännite moninkertaistettua. Kaupalliset lyijyakut ovat jännitteeltään yleensä vain 6 V tai 12 V johtuen lyijyn painavuudesta. Lyijyakkujen hyvät puolet ovat halpa hinta, kyky antaa suuria virtoja hetkellisesti ja yksinkertainen lataus. Lyijyakkuja käytetään näistä syistä erityisesti käynnistysakkuina esimerkiksi autoissa. (Daniel & Besenhard 2011, 921)

Lyijyaku tulisi pitää kuivana ja puhtaana vuotovirtojen estämiseksi. Lisäksi lyijyakun varaus tulisi mitata säännöllisin väliajoin. Tämä vähentää akun hajoamisen riskiä. On myös syytä tarkkailla kennojen jännitettä ja lämpötilaa sekä akun sijoituspaikan ilman vedyn määrää, jonka tulisi olla alle neljä tilavuusprosenttia. Vetyä syntyy vesipohjaisen elektrolyytin kaasuuntuessa. Kaasuuntumista aiheutuu vesipohjaista elektrolyyttiä käyttävää lyijyakkua liikaa tai liian nopeasti ladattaessa. Sähkövirta hajottaa veden elektrolyysillä vety- ja happikaasuiksi. Tämä aiheuttaa myös akun kuivumista ja lyijylevyjen korroosiota, mikä lopulta johtaa akun hajoamiseen. Kuivuminen voidaan estää lisäämällä akkuvettä säännöllisesti tai käyttämällä suljettua akkua. Suljetuissa akuissa on toisaalta räjähdysriski, sillä muodostuneet kaasut jäävät ulkokuoren sisään. Normaalioloissa ylipaineventtiili tasaa paineen, mutta on mahdollista, että venttiili ei toimi oikein esimerkiksi siihen kertyneen lian takia. Kaasujen päästessä ulos suljettukin akku kuivuu (Rusch et al. 2006, 6). Kaasuuntumisen riskejä voidaan pienentää välttämällä ylilataamista, käyttämällä akussa sopivia metalliseoksia (Pavlov 2017, 162) ja toimivalla ilmanvaihdolla akun sijoituskohteessa. (Liu et al. 2011, 19)

Lyijyakkua tulisi säilyttää kuivassa ja viileässä paikassa täyteen ladattuna, kun se ei ole käytössä. Matala lämpötila vähentää lyijyakun itsepurkautumisen määrää, mikä puolestaan lisää sen käyttöikää. Jos lyijyaku purkautuu tai se puretaan liian tyhjäksi, aiheutuu sulfatoitumista, joka heikentää akun kapasiteettia. Normaalisti ladattaessa lyijysulfaatti muuttuu takaisin lyijyksi, lyijydioksidiksi ja rikkihapoksi, mutta puutteellisen lataamisen takia osa lyijysulfaatista ehtii kiteytyä. Kiteytynyt lyijysulfaatti ei yhdisty takaisin elektrolyyttiin, jonka takia lyijylevyjen sisältämä sähköä tuottamiseen tarvittava materiaali vähenee pysyvästi. Laaja sulfatoituminen voi estää kokonaan akun lataamisen. Tyhjä lyijyaku voi myös jäätää pakkasella, sillä rikkihapon konsentraatio elektrolyytissä on silloin pienemmillään.

Vastaavasti täyteen ladattu lyijyaku kestää noin -60 °C:n lämpötilaa, ja 40 %:n varaustilaan ladattu lyijyaku kestää noin -25 °C:n lämpötilaa. Mahdollisimman pitkän käyttöiän saavuttamiseksi tulee lyijyakkua ladata säännöllisin väliajoin.

Lyijyakkua ladataan tyypillisesti vakiojännitteellä, mikä on latausmenetelmänä yksikertainen mutta suhteellisen hidas. Lisäksi lataus saattaa tällä menetelmällä jäädä vajaaksi. Latausjännite yhdelle lyijyparille on tyypillisesti 2,2 V:n ja 2,5 V:n välillä. Virtaa ei siirry lyijyakuun, ennen kuin navan maksimijännite on saavutettu. Tähän auttaa latausjännitteen ja latausvirran nostaminen lyhyeksi hetkeksi latauksen alkuvaiheessa. Liian korkea jännite ja virta voi kuitenkin nopeasti vaurioittaa akun kennoja.

Lyijyakut voidaan jakaa avoimiin (engl. VLA, Vented Lead-Acid) ja suljettuihin (engl. VRLA, Valve Regulated Lead-Acid) akkuihin. Molemmissa kemiallinen reaktio on samanlainen, mutta suljetussa akussa tapahtuu vety- ja happikaasujen rekombinaatio takaisin vedeksi (Liu et al. 2011, 19). Avoimessa akussa nämä kaasut pääsevät vapaasti ulos, jonka takia rekombinaatioprosessia ei tapahdu (Rusch et al. 2006, 1).

Suljetut lyijyakut jaetaan geeli- ja AGM-akkuihin (engl. Absorbent Glass Mat). Näissä erona on elektrolyytin materiaali, joka geeliakuissa on geelimäisessä muodossa, kun AGM-akuissa se on puolestaan sitoutuneena huokoiseen lasivillaerottimeen. Etuna AGM-akuissa on niiden kevyempi paino, edellisempi hinta ja parempi soveltuvuus lyhyisiin purkausaikoihin. Geeliakuilla on puolestaan parempi syvien purkauksien ja syklisen käytön kesto. Avoin lyijy-akun itsepurkautuminen tapahtuu nopeasti, jopa 1 % päivässä, kun taas suljetulla akulla tämä arvo on vain noin 5 % kuukaudessa. Geeliakut saavuttavat 10-20 vuoden käyttöiän, ja ne kestävät 500-1500 lataussykliä, mutta perinteiset avoimet lyijyakut saavuttavat vain 4 vuoden käyttöiän ja kestävät 300-400 lataussykliä (Liu et al. 2011, 19). (Rusch et al. 2006, 1).

Suljetut lyijyakut ovat rakenteensa puolesta turvallisempia käsitellä kuin avoimet, sillä akkuhapon vuodon riskiä ei ole. Tällöin akun sijoituspaikka ei vaadi akkuhapon kestäviä vuotoaltaita tai rakenteita. Suljetuilla akuilla on lisäksi vapaa käyttöasento hyvä tärinän sietokyky. Ne ovat huoltovapaita ja vaativat vähemmän tilaa kuin avoimet akut, mutta koska

niihin ei voi lisätä akkuvettä, tulee akun kuivumista välttää. Tämän takia suljettujen akkujen käyttölämpötila on matalampi kuin avointen akkujen. (Rusch et al. 2006, 5)

Lyijyakuille ominaista on *Coup de fouet* -ilmiö, joka ilmenee purkaussyklin alussa suurena hetkellisenä jännitteen pienentymisellä (Pavlov 2017, 554). Jännite palautuu suhteellisen nopeasti, mutta ilmiö voi aiheuttaa laitteissa toimintahäiriöitä, joten se tulee huomioida akkujen mitoituksessa. Uusissa akuissa ja pienillä purkausvirroilla jännitteen pienentyminen on suhteellisen vähäistä, mutta se syvenee akuston ikääntyessä ja purkausvirran kasvaessa (Ryynänen 2016, 30). Lyijyakkujen tunnuslukuja on esitetty kappaleen 4.2.2 taulukossa 11.

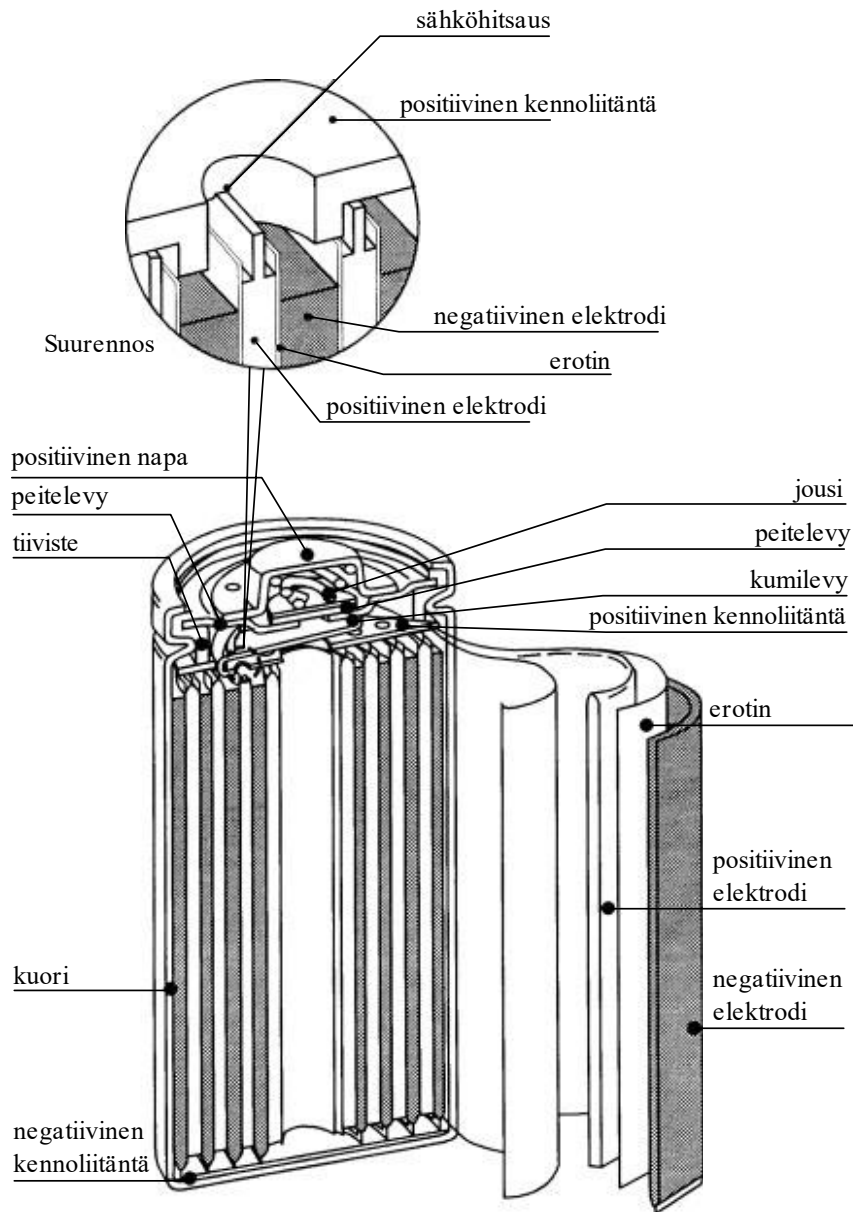
#### 4.2.2 Nikkeliakut

Nikkeliakut, jotka sopivat paikallisakuiksi, ovat nikkeli-kadmiumakku ja nikkeli-metallihydridiakku. Nikkelikadmiumakuissa katodina toimii nikkelioksidihydroksidi ( $\text{NiOOH}$ ) ja anodina kadmiumyhdiste ( $\text{Cd}$ ). Elektrolyytinä käytetään emäksistä kaliumhydroksidiliuosta ( $\text{KOH}$ ). Purettaessa positiivisella elektrodilla oleva nikkelioksidihydroksidi reagoi elektrolyytin sisältämän veden kanssa muodostaen nikkelihydroksidia. Negatiivisella elektrodilla oleva kadmium puolestaan reagoi emäksen hydroksidi-ionien kanssa muodostaen kadmiumhydroksidia. Reaktiot ovat päinvastaiset ladattaessa. (Daniel & Besenhard 2011, 30)

Vesimolekyylit, jotka muodostuvat latauksen aikana kulutetaan purettaessa, joten muutokset elektrolyytin konsentraatiossa ovat merkityksettömiä. Tämän ansiosta nikkeli-kadmiumakku kestää lyijyakkuja paremmin korkeita ja matalia lämpötiloja. Nikkeli-kadmiumakkujen sovelluskohteita ovat esimerkiksi matalatehoiset hätävirtalähteet ja korkeatehoiset langattomat porakoneet. (Ibid., 31)

Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen sylinterimäisen nikkeli-kadmiumakun rakenne. Sen yläpäässä on ylipaineventtiili, joka aktivoituu, jos sisäinen paine kasvaa liian suureksi kaasuuntumisen takia (Ibid.). Kaasuuntumista aiheutuu ylilataamisesta ja liian nopeasta latauksesta. Pahimmassa tapauksessa liian nopea lataaminen johtaa kennon ylikuumenemiseen, mikä joissakin äärimmäisissä tapauksissa rikkoo erottimen. Tämä aiheuttaa sisäisen oikosulun, mikä voi johtaa kennon räjähtämiseen (Ibid., 923). Avonaisilla nikkeli-kadmiumakuilla ei

ole tätä vaaraa, mutta ne vaativat kaasuuntumisen seurauksena useimmiten koneellisen ilmanvaihdon ja säännöllistä kaliumhydroksidiliuoksen lisäämistä (Crompton 2001, 4/3).



**Kuva 6.** Sylinterimäisen nikkeli-kadmiumakun rakenne. (mukaillen Ibid., 32)

Nikkeli-kadmiumakuilla on suuri virransyöttökyky, joka on yleensä 4 C ja parhaimmillaan 10 C. Lisäksi nikkeli-kadmiumakku kestää hyvin lukuisia varaus-purkujaksoja, eikä kapasiteetti heikkene merkittävästi edes 1000 varaus-purkausjakson jälkeen. Akulla on siis pitkä käyttöikä (Ibid.) Muita nikkeli-kadmiumakun merkittäviä ominaisuuksia ovat Danielin ja Besenhardin (2011, 34) mukaan

- Matala sisäinen resistanssi, joka mahdollistaa suuren virransyöttökyvyn ja vakaan purkujännitteen.
- Ilmatiivis rakenne, joka estää elektrolyytin vuotamisen ja on huoltovapaa. Lisäksi akun voi asentaa miten päin tahansa.
- Kyky kestää ylilatausta ja syväpurkua.
- Pitkä varastointiaika ilman suorituskyvyn heikkenemistä ja palautuminen normaaliin suorituskykyyn latauksen jälkeen.
- Laaja käyttölämpötila-alue.
- Ei *Coup de fouet*-ilmiötä (Ryynänen 2016, 31).

Nikkeli-kadmiumakkujen heikkoutena on muisti-ilmiö, joka ilmenee, kun akkua puretaan aina samaan varausmäärään. Tämän seurauksen akun kapasiteetti alenee akun muistamaan varaukseen. Muisti-ilmiö voidaan estää purkamalla akku säännöllisesti tyhjäksi, ja sitten lataamalla se täyteen. (Daniel & Besenhard 2011, 922) Muita heikkouksia ovat korkea hinta, alhainen kennojännite sekä huomattava varaus- ja purkausjännitteen välinen ero (Crompton 2001, 4/3). Lisäksi nikkeli-kadmiumakuilla on merkittävä itsepurkautumisen määrä. (Crompton 2001, 4/13). On myös huomioitava, että kadmium on ympäristölle erittäin vaarallista ongelmajätettä (Daniel & Besenhard 2011, 922).

Toinen nikkeliakkutyyppe on nikkeli-metallihydridiakku. Siinä positiivinen elektrodi on nikkelioksidihydroksidia ja negatiivinen vetyä absorboivaa metallihydridiä. Elektrolyytinä toimii kaliumhydroksidi. Verrattuna nikkeli-kadmiumakkuun, nikkeli-metallihydridiakulla on parempi energiatiheys, ja se ei sisällä myrkyllistä kadmiumia, joten sillä on pienempi ympäristöriski. Heikkoutena sillä on kuitenkin suuri itsepurkautuvuuden määrä, kalliimpi hinta ja hieman lyhyempi sykli-ikä. (Liu et al. 2011, 20)

Nikkeliakkujen sovelluskohteita ovat mm. kuluttajaelektroniikka, sähkötyökalut, raitiovau-  
nut, turvavalaisuus, tietoliikenne ja hybridi-autot. (Warner 2015, 72) Nikkeliakkujen tunnus-  
lukuja on esitetty taulukossa 11 yhdessä lyijyakkujen kanssa.

**Taulukko 11.** Lyijy- ja nikkeliakkujen tunnuslukuja. (Warner 2015, 72), (Daniel & Besenhard 2011, 66)

	Lyijy	Nikkeli-kadmium	Nikkeli-hydridi
Kemiallinen kuvaaja	PbA/LAB	NiCd	NiMh
Ominaisenergia (Wh/kg)	30-40	40-60	30-80
Energiatiheys (Wh/L)	60-70	50-150	140-300
Ominaisteho (W/kg)	60-180	150	250-1000
Tehotiheys (W/L)	100	210	400
Yhden kennon nimellisjännite (V)	2,0	1,2	1,2
Sykli-ikä	300-800	1000-2000	500-1500
Itsepurkautuvuus kuukaudessa (%)	3-5	20	30
Käyttölämpötila (°C)	-20+60	-40+60	-20+60
Hyötysuhde (%)	65-70	55-65	55-65
Hinta (€/kWh)	150-200	400-800	200-300

### 4.2.3 Suola-akut

Suola-akuissa positiivisena elektrodina toimii yleensä nikkeli tai rikki riippuen akkutyypistä ja negatiivisena elektrodina sula natrium. Tästä syystä elektrodien välissä on erottimena kiinteä beta-alumiinielektrolyytti, jonka läpi voi kulkeutua ainoastaan positiiviset natrium-ionit. Tällä hetkellä kaupallisesti pisimmälle kehitetyimmät suola-akut ovat natrium-rikki- (NaS) ja natrium-nikkelikloridiakut (NaNiCl<sub>2</sub>). (Hueso et al. 2013, 736)

NaS-akuissa natrium muodostaa rikin kanssa natriumpolysulfidia katodilla. Ladattaessa natrium palaa anodille, jossa se reagoi natriummetalliksi (Alanen et al. 2003, 53). Elektrodien välillä on noin 2 V:n kennojännite ja kennon toiminta vaatii arviolta 300 °C:n lämpötilan. NaS-akkujen merkittävimmät ominaisuudet ovat korkea hyötysuhde, suuri teho, ympäristöystävällisyys, suuri energiatiheys ja vakaa lämpötila. Heikkoutena on turvallisuus, sillä hauraan erottimen murtuessa tapahtuu voimakas eksoterminen reaktio. (Hueso et al. 2013, 736)

Natrium-nikkelikloridiakuissa, eli ZEBRA-akuissa (Zero Emissions Batteries Research Activity) katodilla nikkelikloridi ja natrium reagoivat muodostaen natriumkloridia ja nikkeliä. Ladattaessa natrium palaa metalliksi ja nikkeli nikkelikloridiksi. Natrium-nikkelikloridialla on NaS-akkua korkeampi kennojännite, joka on 2,58 V. Lisäksi sillä on parempi yllätauksen kesto, helpompi kokoonpano, ja korkeampi turvallisuus. Heikkoutena on akun esilämmitys käyttölämpötilaan. (Ibid.)

Yhteisenä vahvuutena molemmilla on halpa hinta, huoltovapaus, ei kaasuuntumista ja mitätön itsepurkautuvuus. Tosin yhteisenä heikkoutena niillä on korkea käyttölämpötila ja sula natriumelektrodi, jonka takia suojarakenteet ja eristeet ovat käytön kannalta välttämättömiä. Lisäksi molemmat käyttävät 10-14 % kapasiteetistaan päivässä lämpötilan ylläpitämiseen, kun akku ei ole käytössä. NaS-akkujen sovelluskohteita ovat stationääriset energiavarastot, mutta natrium-nikkelikloridiakut sopivat myös esimerkiksi sähköautoihin. (Ibid., 736-738)

Näiden kahden yleisimmän suola-akun lisäksi kehitteillä on suola-akkuja, joissa katodina toimii natriumkloridikiteet (NaCl) kyllästettynä hyvin sähköä johtavaan rikkidioksidipohjaiseen (SO<sub>2</sub>) katolytyttiin. Ladattaessa katodilla oleva natriumkloridista vapautuu natrium-ioneja. Ne kulkeutuvat katodin ja anodin välissä olevan erottimen kautta anodille, jossa ne pelkistyvät metalliseksi natriumiksi. Purettaessa reaktio on päinvastainen. Varauksen säilyminen perustuu sähkösaostukseen ja kiteytymiseen. (BroadBit 2018, 7)

Kyseisen suola-akun merkittävimmät ominaisuudet ovat korkea energiatiheys, laaja käyttölämpötila, turvallisuus, ei ylilataamisen riskiä, ei syttyvää elektrolyyttiä, lataus litium-ioniakkujen latureilla, halpa hinta, korkea kennojännite ja varastointi täysin purettuna (Ibid., 3). Heikkoutena ovat lyhyt sykli-ikä ja 40-50 varaus-purkausjakson toteuttaminen ennen nimellisiä jännitteen, -kapasiteetin ja -hyötysuhteen saavuttamista (Ibid., 18). Tarkempia suolaakkujen tunnuslukuja on esitetty taulukossa 12.

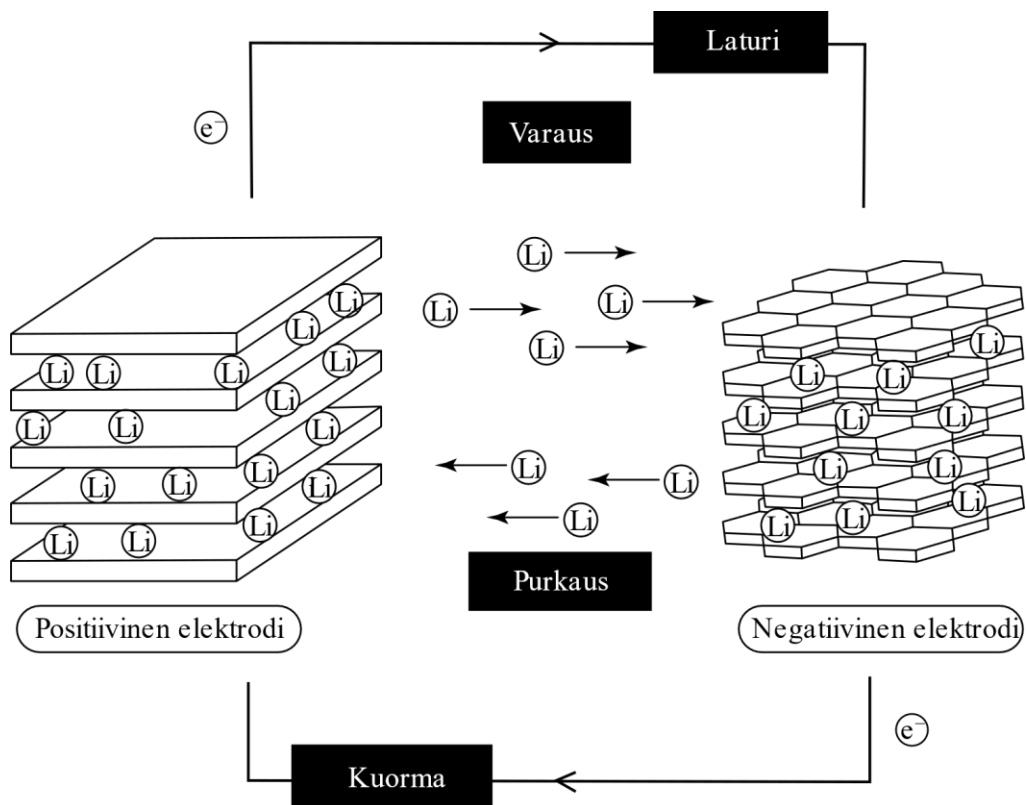
**Taulukko 12.** Suola-akkujen tunnuslukuja. (Hueso et al. 2013, 736), (BroadBit 2018, 13-31)

	Natrium-rikki	Natrium-nikkelikloridi	Natrium-kloridi
Kemiallinen kuvaaja	NaS	NaNiCl <sub>2</sub>	NaCl
Ominaisenergia (Wh/kg)	140-240	120	300-400
Energiatiheys (Wh/L)			600
Ominaisteho (W/kg)	90-245	130-160	
Yhden kennon nimellijännite (V)	1,78-2,08	2,58	2-4
Sykli-ikä	3500-5000	3500-5000	200
Itsepurkautuvuus kuukaudessa (%)	< 1	< 1	< 2
Käyttölämpötila (°C)	300-350	270-350	-20+60
Hyötysuhde (%)	80-90	80-90	70-80
Hinta (€/kWh)	150-200	400-800	60



#### 4.2.4 Litium-ioniakut

Litium-ioniakuissa positiivisena elektrodina on litiumia, joka sisältää siirtymämetallioksidia ja negatiivisena elektrodina hiilimateriaalia, kuten grafiittia. Elektrolyytti ei ole vesipohjaista, sillä litium reagoi voimakkaasti veden kanssa muodostaen litiumhydroksidia ja vetykaasua. Tästä syystä elektrolyyttinä käytetään esimerkiksi eteenikarbonaattia tai dietyylikarbonaattia (Liu et al. 2011, 21). Ladattaessa litium ionit liikkuvat positiiviselta elektrodilta elektrolyytin kautta negatiiviselle elektrodille ja purettaessa päinvastoin. Vastaavasti positiiviselta elektrodilta vapautuvat elektronit kulkevat negatiiviselle elektrodille ulkoisen piirin kautta. Tähän piiriin kytketään myös kuorma. Kuvassa 7 on esitetty litiumioniakun toimintaperiaatetta havainnollistava kaaviokuva. (Daniel & Besenhard 2011, 66)



**Kuva 7.** Litium-ioniakun toimintaperiaate. (mukaillen Ibid.)

Kuvassa 7 litiumionien tunkeutuessa elektrodimateriaaliin tapahtuu interkalaatio, joka saa materiaalin laajenemaan. Tämä puolestaan aiheuttaa pitkällä aikavälillä akkuun pieniä mekaanisia vaurioita lyhentäen akun käyttöikää (Ibid., 884). Muita heikkouksia ovat korkea hinta ja huono korkeiden lämpötilojen sietokyky (Warner 2015, 75-80). On myös

huomioitava, että litium-ioniakkujen lataaminen vaatii varausjännitettä ja -lämpötilaa kontrolloivaa laturia, sillä ne eivät kestä ylilataamista. Tämän takia käytetään yleensä 2,7 V:n sulkujännitettä (Alanen et al. 2003, 52).

Litium-ioniakkujen merkittävimpiä ominaisuuksia ovat korkea kennojännite, pitkä sykli-ikä, suuri energiatiheys, korkea hyötysuhde ja vähäinen itsepurkautuvuus. Litium-ioniakkujen suurempi kennojännite mahdollistaa lyijy- ja nikkeliakkuja suuremman ominaistehon, sillä litium-ioniakkujen kennoja ei tarvitse kytkeä yhtä monta sarjaan halutun jännitteen aikaansaamiseksi ja käytetyt materiaalit ovat myös kevyempiä. Lisäksi litium-ioniakuilla ei ilmene kaasuuntumista, joten niitä voi ladata suhteellisen suurella virralla. (Daniel & Besenhard 2011, 78)

Litium-ioniakut nimetään niissä käytettävien siirtymämetallien mukaan, joita ovat esimerkiksi litium-rautafosfaatti (LFP), nikkeli-mangaanikobolttioksidi (NMC), litiumkobolttioksidi (LCO), nikkelikobolttialumiinioksidi (NCA), litium-mangaanioksidi (LMO) ja litiumtitaanioksidi (LTO). Käytetty siirtymämetalli vaikuttaa huomattavasti varaukseen ja käyttöjännitteeseen, joka siirtymämetallista riippuen on 2,2-3,8 V. Alla on lyhyesti esitelty edellä mainittujen siirtymämetallien ominaisuuksia ja niiden käyttökohteita. (Warner 2015, 77)

LFP on yleisesti käytetty materiaali autoteollisuudessa sen suhteellisen matalan hinnan ja korkean virransyöttökäyvyn ansiosta. Se kykenee varastoimaan jarrutusenergian tehokkaasti ja antamaan suuren purkausvirran kiihdytyksissä. LFP on myös suhteellisen turvallinen, sillä se sietää ylilataamista ja korkeita lämpötiloja muita materiaaleja paremmin. (Ibid., 79)

NMC on käytetty materiaali täyssähköautoissa sen korkean energiatiheyden ja kennojännitteen takia. Kennojännite on tyypillisesti 3,6-3,8 V ja energiatiheys 140-180 Wh/kg sarjatuotetuille soluille, mutta kokeellisesti on saavutettu yli 200 Wh/kg:n energiatiheys. (Ibid.)

LCO on suosittu materiaali kannettavissa elektronisissa laitteissa, kuten kannettavissa tietokoneissa, matkapuhelimissa ja kameroissa, koska se mahdollistaa suhteellisen suuren energiatiheyden ja pitkän käyttöiän. Sen heikkoutena on herkkyys korkeille lämpötiloille. Jo 130 °C:ssa aiheutuu lämpöryntäys, joka johtaa akun hajoamiseen ja mahdolliseen

vaaratilanteeseen. Tästä syystä LCO ei käytetä suuremmissa sovelluskohteissa, kuten sähköautoissa. LCO on myös suhteellisen kallis katodimateriaali sen sisältämän koboltin takia. (Ibid., 80)

NCA on joissakin kannettavissa sovelluskohteissa käytetty katodimateriaali sen korkean tehon takia. Sitä kehitellään myös käytettäväksi suuremmissa kohteissa, kuten autoteollisuudessa, mutta tällä hetkellä sen kallis hinta ja alhainen turvallisuus ovat haasteena. (Ibid.)

LMO sopii kannettaviin laitteisiin se korkean energiatiheuden ja tehon ansiosta, mutta sen käyttöikä on suhteellisen lyhyt, joten se ei sovellu esimerkiksi autoihin. (Ibid.)

LTO on materiaalina turvallisin ja kestävin, koska sillä on pienin lämpöryntäyksen riski ja korkein sykli-ikä. Lisäksi se kestää hyvin pikalatausta ja pystyy antamaan suurta purkausvirtaa. Sen heikkoutena on korkea hinta, matala kennojännite ja matala energiatiheys. (Ibid., 77) Tästä huolimatta se on yleistyvä akkutyyppejä ja käytössä jo useissa sarjavalmistetuissa autoissa ja energian talteenotossa (Toshiba 2021). LTO:n ja muiden edellä mainittujen akkutyyppeiden tunnuslukuja on esitetty taulukoissa 13 ja 14.

**Taulukko 13.** Litium-ioniakkujen (LFP, LMO ja LTO) tunnuslukuja. (Warner 2015, 77), (Linden & Reddy 2002, 35.47)

	Litium-rautafosfaatti	Litium-mangaanioksidi	Litium-titanaatti
Katodin kemiallinen kuvaaja	LFP	LMO	LTO
Ominaisenergia (Wh/kg)	80-130	105-120	70
Energiatiheys (Wh/L)	220-250	250-265	130
Ominaisetehe (W/kg)	1400-2400	1000	750
Tehotiheys (W/L)	4500	2000	1400
Yhden kennon nimellisjännite (V)	3,2-3,3	3,8	2,2-2,3
Sykli-ikä	1000-2000	>500	>4000
Itsepurkautuvuus kuukaudessa (%)	< 1	5	2-10
Käyttölämpötila (°C)	-20-+60	-20-+60	-40-+55
Hyötysuhde (%)	95-98	95-98	95-98
Hinta (€/kWh)	400-1200	400-900	600-2000

**Taulukko 14.** Litium-ioniakkujen (LCO, NCA ja NMC) tunnuslukuja. (Warner 2015, 77), (Linden & Reddy 2002, 35.47)

	Litium-ko- bolttioksidi	Litium-nikkelikoboltti- alu- miinioksidi	Litium-nikkeli-man- gaanikobolttioksidi
Katodin kemiallinen kuvaaja	LCO	NCA	NMC
Ominaisenergia (Wh/kg)	120-150	80-220	140-180
Energiatiheys (Wh/L)	250-450	210-600	325
Ominaisteho (W/kg)	600	1500-1900	500-3000
Tehotiheys (W/L)	1200-3000	4000-5000	6500
Yhden kennon nimellisjännite (V)	3,6-3,8	3,6	3,6-3,7
Sykli-ikä	>700	>1000	1000-4000
Itsepurkautuvuus kuukaudessa (%)	1-5	2-10	1
Käyttölämpötila (°C)	-20-+60	-20-+60	-20-+55
Hyötysuhde (%)	95-98	95-98	95-98
Hinta (€/kWh)	250-450	600-1000	500-900

### 4.3 Energiavaraston valintakriteerit

Tässä kappaleessa käydään läpi yleiset valintakriteerit, jotka vaikuttavat energiavaraston valintaan. Lähtökohtaisesti on määritelty, että energiavaraston tulisi olla huoltovapaa ja pitkäikäinen. Tästä syystä avoimia paristo- ja akkutyyppejä ei käsitellä. Akkutyyppeiden tunnusluvut ovat saatavilla kappaleiden 4.1.2, 4.2.2, 4.2.3 ja 4.2.4 lopussa.

Lähtökohtaisesti akku tulee valita käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi auton akku voi vaikuttaa toimivalta ratkaisulta jatkuvaan päällä olevan lyhdyn energialähteeksi sen halvan hinnan takia. Auton akut ovat kuitenkin suunniteltu antamaan suurta virtaa lyhyitä aikoja, jonka takia niiden käyttöikä pientä virtaa vaativissa sovelluksissa on huomattavasti lyhyempi kuin siihen tarkoitukseen suunniteltujen teollisten akkujen. Lisäksi vääränlaisen akun käyttäminen voi mitätöidä laitevalmistajan ilmoittamat tekniset tiedot ja olla vakuutusyhtiön ehtojen vastainen. (Crompton 2001, 32/6)

Säästöt, jotka syntyivät vääränlaisen akun valinnasta voivat nopeasti mennä hukkaan lyhyen käyttöikänsä seurauksena etenkin, jos akun kapasiteetti ja tyyppi ovat molemmat valittu väärin. Jos laite johon akku on kytketty, on esimerkiksi valaistu karimerkki, voi silloin järjestelmän pettäminen aiheuttaa hengenvaaraa ja oikeudellisia toimia. On syytä siis selvittää

asiantuntijan kanssa, kenen vastuulla laitteiston toimimattomuudesta mahdollisesti aiheutuva vahingot ovat, ja onko käytössä oleva akku riittävä tarkoitukseensa. (Ibid.)

Laitteiston kulutuksen profiili on tärkeä tieto, jonka laitevalmistaja tarvitsee suositellakseen sopivaa akkua. Tämä sisältää tiedot järjestelmän käyttämästä jännitteestä, virrasta ja käytön tiheydestä. Jos kulutus on tasaista, on akun valinta yksinkertaista. Esimerkiksi jos 2 A lyhdyn pitäisi olla päällä 10 tuntia, tarvitaan silloin akku, jonka kapasiteetti on 20 Ah. Jos kulutus on vaihtelevaa ja järjestelmään on kytketty laitteita, jotka tarvitsevat tietyn jännitteen toimiakseen, muuttuu akun valinta monimutkaisemmaksi. Kaikilla akuilla jännite pienenee kapasiteetin vähentyessä, joten on mahdollista, että esimerkiksi 5G-lähetin lakkaa toimimasta, vaikka akussa olisi vielä varausta jäljellä. Akku tulee tällöin mitoittaa niin, että kapasiteettia jää aina tarpeeksi yli, jotta jännite ei putoa kriittisesti. Lisäksi akkuja ladatessa on muutettava vaihtovirta (AC) tasavirraksi (DC) ja käytettävä kullekin akkutyypille ominaista latausjännitettä. Akun valinnassa apuna on akkuvalmistajien tietotaito ja mitoitusohjelmat, joiden avulla taloudellisin ja tehokkain akku saadaan valittua. (Ibid.)

Akun elinkaarikustannuksiin vaikuttaa hankinnan, huoltojen ja latausten lisäksi akun hävityksen eliniän tullessa täyteen. Yrityksille hävittäminen on joko ilmaista tai maksullista riippuen jätehuoltopisteestä ja akkutyypistä. Esimerkiksi lyijyakkuja otetaan Suomessa yleensä vastaan ilmaiseksi ja suuremmista eristä maksetaan joskus hyvitys, mutta teollisista alkaliparistoista, litiumakuista ja nikkeliakuista peritään vastaanottoveloitus. Vastaanottoveloitus on suuruusluokaltaan muutamia euroja kiloa kohti. Lisäksi logistiikkakustannuksia aiheutuu akkujen ja paristojen kuljettamisesta jätehuoltopisteeseen. Nämä kustannukset heikentävät erityisesti paristojen kannattavuutta, sillä niitä on vaihdettava useammin.

## 5 SÄHKÖNTUONTANTOMENETELMÄT

Sähköntuotanto tarkoittaa energian muuntamista sähköksi esimerkiksi kemiallisen reaktion, valosähköisen ilmiön tai mekaanisen työn kautta. Tässä kappaleessa käydään läpi poijuihin soveltuvia laitteita, jotka hyödyntävät näitä edellä mainittuja sähköntuotantomenetelmiä.

### 5.1 Polttokennot

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuntaa polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi hapetus-pelkistysreaktion kautta. Polttokennolla on näin ollen korkeampi hyötysuhde kuin perinteisillä lämpövoimakoneilla, jotka muuntavat polttoaineiden palamisreaktiossa muodostuvaa lämpöenergiaa mekaanisen työn kautta sähköenergiaksi.

Polttokenno koostuu akkujen tavoin anodista ja katodista, joiden välissä on elektrolyytti. Kuten akuissa, anodi tarkoittaa negatiivista elektrodiä ja katodi positiivista elektrodiä. Polttokennoissa yleisen käytössä oleva polttoaine on vety, jota syötetään jatkuvana virtauksena anodille. Katodille puolestaan syötetään jatkuvana virtana happea, joka toimii polttokennossa hapettimena. Elektrolyytti eristää polttoaineen ja hapettimen toisistaan päästäen vain anodin ja katodin välillä liikkuvat ionit lävitseen. Polttoaineen hapettuessa vapautuu elektroneja, jotka siirtyvät anodilta ulkoisen piirin kautta katodille muodostaen sähkövirran. Samalla katodilla tapahtuu pelkistymisreaktio. Matalalämpöiset polttokennoilla hapetus-pelkistysreaktiot ovat hitaita, minkä takia reaktioita kiihdytetään katalyytillä kuten platinalla. Korkealämpöisillä polttokennoilla hapetusreaktiot tapahtuvat nopeammin, joten katalyytin käyttö ei ole välttämätöntä.

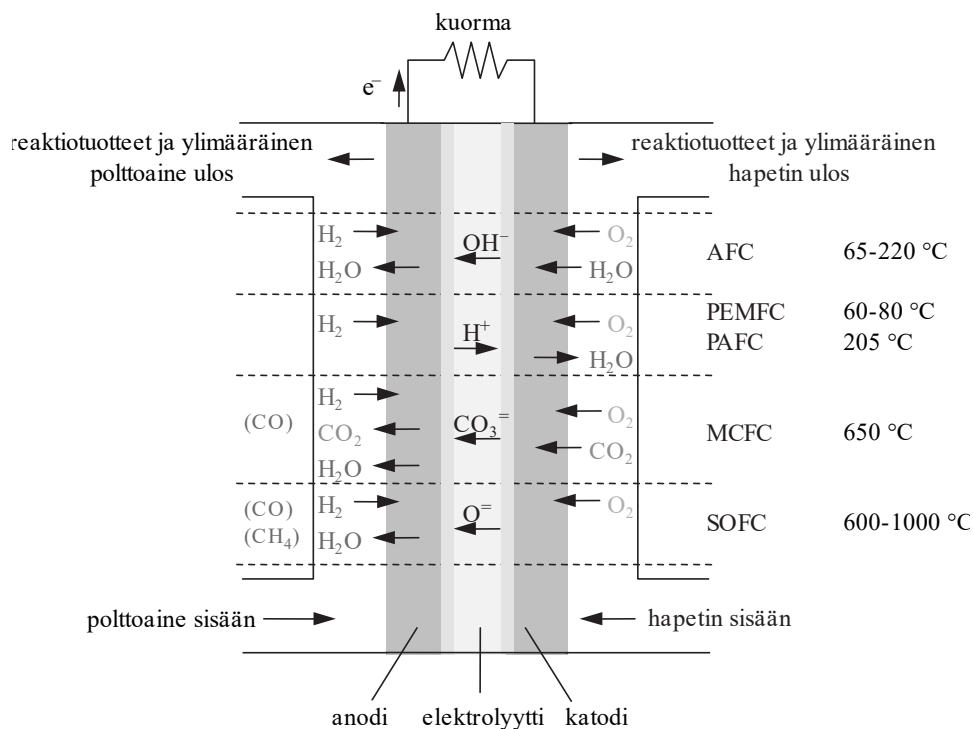
Yleisimmät reagoivat aineet, joita polttokennoissa käytetään, ovat vety ja happi. Kyseisten kaasujen ei tarvitse olla aina puhtaita kaasuja, sillä tietyt polttokennotyypit voivat käyttää polttoaineena vetyä sisältäviä hiilivetyjä sellaisenaan. Esimerkiksi maakaasu ja metanoli ovat yleisiä polttokennoissa käytettäviä hiilivetyypohjaisia polttoaineita. Vety erotellaan niistä reformoimalla. Hapettimena toimiva happi saadaan puolestaan ilmasta. (Barbir 2013, 337)

### 5.1.1 Polttokennotyypit

Polttokennot jaotellaan toimintalämpötilan tai elektrolyyttimateriaalin mukaan eri tyyppisiin. Elektrolyyttimateriaalin mukaan jaoteltuna yleisimmät viisi eri polttokennotyyppiä ovat

- Polymeeripolttokenno (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC),
- Alkalipolttokenno (engl. Alkaline Fuel Cell – AFC),
- Kiinteäoksidipolttokenno (engl. Solid Oxide Fuel Cell – SOFC),
- Fosforihappopolttokenno (engl. Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC) ja
- Sulakarbonaattipolttokenno (engl. Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC).

Edellä mainittujen polttokennotyyppien lisäksi on olemassa muitakin nestemäisiä polttoaineita kuten etanolia käyttäviä polttokennoja. Myös esimerkiksi suorametanolipolttokennoa (engl. Direct Methanol Fuel Cell – DMFC) pidetään joskus erillisenä polttokennotyyppinä, vaikka se on puhtaan vedyn sijaan metanolia käyttävä polymeeripolttokenno. Polttokennon perusrakenne sekä polttokennotyyppien hapetus-pelkistysreaktiot ja yleiset toimintalämpötilat on esitetty kuvassa 8. (Barbir 2013, 8-10)



**Kuva 8.** Polttokennon perusrakenne sekä polttokennotyyppien hapetus-pelkistysreaktiot ja yleiset toimintalämpötilat. (mukaillen Barbir 2013, 9)

### 5.1.2 Polymeeripolttokenno

Polymeeripolttokennot (PEMFC) kuuluvat pääosin matalan lämpötilan polttokennoihin, eli niiden toimintalämpötila on 60-80 °C. Kehitystyö on kuitenkin meneillään nostaa lämpötilaa kohti 100 °C:tta. Elektrolyytinä toimii ohut polymeerimembraani, joka päästää lävitseen vain protoneita. Elektrodit ovat puolestaan elektrolyytin pinnalle levitetystä ohuesta katalyytikerroksessa. Käytetty katalyytti on yleensä platinaa, joka on kantajamateriaalina toimivien hiilipartikkelien pinnalla. Polymeeripolttokennoja käytetään autoissa sekä pienen koluokan energiantuotannossa. (Barbir 2013, 8)

Hapetus-pelkistysreaktiossa polttokennon sisään syötetyt vetymolekyylit hajoavat anodilla kahdeksi protoniksi ja kahdeksi elektroniksi. Protonit kulkevat elektrolyytin läpi ja elektronit ulkoisen piirin kautta katodille, jossa ne reagoivat ilmasta saatavan hapen kanssa muodostaen vettä. Vesi poistuu reagoimattoman ilman mukana ulos polttokennosta. (Ibid., 10-11)

Kennon suorituskykyyn vaikuttaa merkittävästi reaktio-olosuhteiden hallinta, sillä tuotettu vesi ei saa höyrystyä liian nopeasti, jotta polymeerimembraani ei pääse kuivumaan (Ibid., 121). Lisäksi katalyytin toimintaan vaikuttaa erilaiset epäpuhtaudet, hiilimonoksidi (CO), rikkiyhdisteet ja ammoniakki, jotka tulee erotella polttoaineesta ennen käyttöä. Myös katodille menevästä ilmasta on suodatettava epäpuhtaudet pois. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa tilapäistä tai pysyvää haittaa polttokennossa (Ibid., 348).

### 5.1.3 Alkalipolttokenno

Alkalipolttokennon (AFC) elektrolyytinä toimii alkali, kuten kaliumhydroksidi (KOH) tai natriumhydroksidi (NaOH). Näistä yleisempi on kaliumhydroksidi, jota käytetään väkevänä (85 massa-%) liuoksena korkealämpöisissä polttokennoissa (noin 250 °C) ja laimeampana (35-50 massa-%) liuoksena matalalämpöisissä polttokennoissa (alle 120 °C). Elektrolyytti sidotaan matriisimateriaaliin kuten asbestiin. Katalyytiksi sopii useat eri metallit, kuten nikkeli, hopea sekä monet metallioksidit ja jalometallit. Huomioitavaa on, että hiilimonoksidia (CO) tai hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>) ei saa olla polttoaineen tai hapettimen seassa, sillä kaliumhydroksidi (KOH) reagoi sen kanssa muodostaen kaliumkarbonaattia (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Tämä vaurioittaa elektrolyyttiä. (Barbir 2013, 8)



Alkalipolttokennojen käyttökohteet ovat rajoittuneet avaruussovelluksiin kennotyypin hiilidioksidiherkkyden takia. Elektrolyyttiä kierrättämällä tätä herkkyyttä voidaan pienentää (Kordes et al. 2000, 164), mikä mahdollista hiilidioksidipitoisen ilman käytön hapettimena. Etuina alkalipolttokennolla muihin polttokennoihin nähden ovat hyvä hyötysuhde, kun polttoaineena käytetään vetyä ja hapettimena happea, sekä laaja valikoima katalyytteja. Haasteena on hiilimonoksidin ja -dioksidin aiheuttamat ongelmat. Ratkaisu on joko poistaa ne reagoivien aineiden joukosta tai käyttää elektrolyytin kierrätystä. Tämä tosin laskee järjestelmän hyötysuhdetta ja monimutkaistaa polttokennoa. (EG&G Technical Services 2004, 1-10)

#### **5.1.4 Kiinteäoksidipolttokenno**

Kiinteäoksidipolttokennoissa (SOFC) käytetään elektrolyytinä kiinteää, ei-huokoista metallioksidia. Eräs yleinen elektrolyyttimateriaali on yttriumoksidilla ( $Y_2O_3$ ) stabiloitu zirkoniumoksidilla ( $ZrO_2$ ). Katodina toimii puolestaan lantaanilla seostettu mangaani. Toimintalämpötila kyseisellä kennotyypillä on 800-1000 °C, mutta kehitystyötä toimintalämpötilan alentamiseksi on tehty. Alemmalla lämpötilalla voitaisiin käyttää edullisempia materiaaleja polttokennon rakenteessa. (Barbir 2013, 9)

Kiinteä elektrolyytti mahdollistaa polttokennolle vapaamman muodon, ja sen keraaminen rakenne vähentää korroosion haittoja. Lisäksi kiinteä elektrolyytti ei liiku, ja siksi ei ole riskiä sen tulvimisesta elektrodeille. Hapetus-pelkistymisreaktio on kennotyypissä melko nopea ja polttoaineena voidaan käyttää hiilivetyjä, kuten polymeeripolttokennossa. Lisäksi kiinteäoksidipolttokennoilla on suuri tehotehous. Kiinteäoksidipolttokennoja käytetään lähinnä suurta tehoa vaativissa stationaarisissa sovelluksissa, kuten teollisuudessa ja sähkökeskuksilla. Sähköntuoton hyötysuhde on tyypillisesti 60 %. (EG&G Technical Services 2004, 1-12)

Haasteita kiinteäoksidipolttokennoilla on materiaalien erilainen lämpölaajeneminen, mikä aiheuttaa suurta mekaanista rasitusta kennoon. Lisäksi materiaalivehtoehdot ovat vähäisiä korkean toimintalämpötilan takia ja valmistusprosessi on monimutkainen. Metallisten komponenttien korrosio on myös haasteena. (Ibid.)

### 5.1.5 Fosforihappopolttokenno

Fosforihappopolttokennoissa (PAFC) käytetään väkevöityä fosforihappoa (noin 100 %) elektrolyytinä, joka on sidottu matriisimateriaaliin, kuten piikarbidiin (SiC). Katalyyttinä molemmilla elektrodilla toimii platina, ja kennon tyypillinen toimintalämpötila on 150-220 °C. (Barbir 2013, 8-9)

Fosforihappopolttokennoja on saatavilla keskisuuriin, noin 200 kW:n stationäärisiin sähkön- tuotantosovelluksiin. Kaupallisia yksiköitä on valmistettu jo satoja ja niitä on käytössä ympäri maailman. Lisäksi järjestelmässä muodostuvaa hukkalämpöä voidaan käyttää yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, eli CHP-laitoksissa. Etuna kennotyypissä on, että se on alkali- ja polymeeripolttokennoa kestävämpi hiilimonoksidin suhteen. Toimintalämpötila on myös tarpeeksi alhainen, ettei erikoismateriaaleja tarvita kennon rakenteessa. Kennotyypin hyötysuhde on 37-42 % laskettuna maakaasun alemman lämpöarvon kautta. Haasteena elektrolyytinä toimivan fosforihapon syövyttävyyys, mikä vaatii kalliita, haponkestäviä materiaaleja kennossa. Lisäksi polttoaine vaatii enemmän prosessointia kuin muissa polttokennotyypeissä. (EG&G Technical Services 2004, 1-11)

On myös olemassa korkean lämpötilan fosforihappopolttokennoja (engl. High-Temperature PEM tai HT-PEM). Niitä on saatavilla kaupallisesti ainoastaan elektrolyytinä polybentsimidatsoli-kalvoa (PBI) elektrolyytillä. Kyseinen polttokennotyyppi muistuttaa ominaisuuksiltaan fosforihappopolttokennoa. (Ibid.)

### 5.1.6 Sulakarbonaattipolttokenno

Sulakarbonaattipolttokennossa (MCFC) elektrolyytinä käytetään keraamiseen matriisiin, kuten litiumalumiinioksidiin ( $\text{LiAlO}_2$ ), sidottua eri alkalikarbonaattien seosta. Toimintalämpötila on 600-700 °C. Kyseisessä lämpötilassa karbonaatit muodostavat hyvin johtavia sulia suoloja, mikä mahdollistaa hyvän ionijohtavuuden elektrolyytissä. Katalyyttinä käytetään jalometalleja halvempia vaihtoehtoja, kuten nikkeliä anodilla ja nikkelioksidia katodilla. (Ibid.)

Sulakarbonaattipolttokennojen pääasiallisena sovelluskohteena on tällä hetkellä stationäärienergian tuotto. Syynä tähän on se, että kyseinen kennotyyppi on suhteellisen suuri,

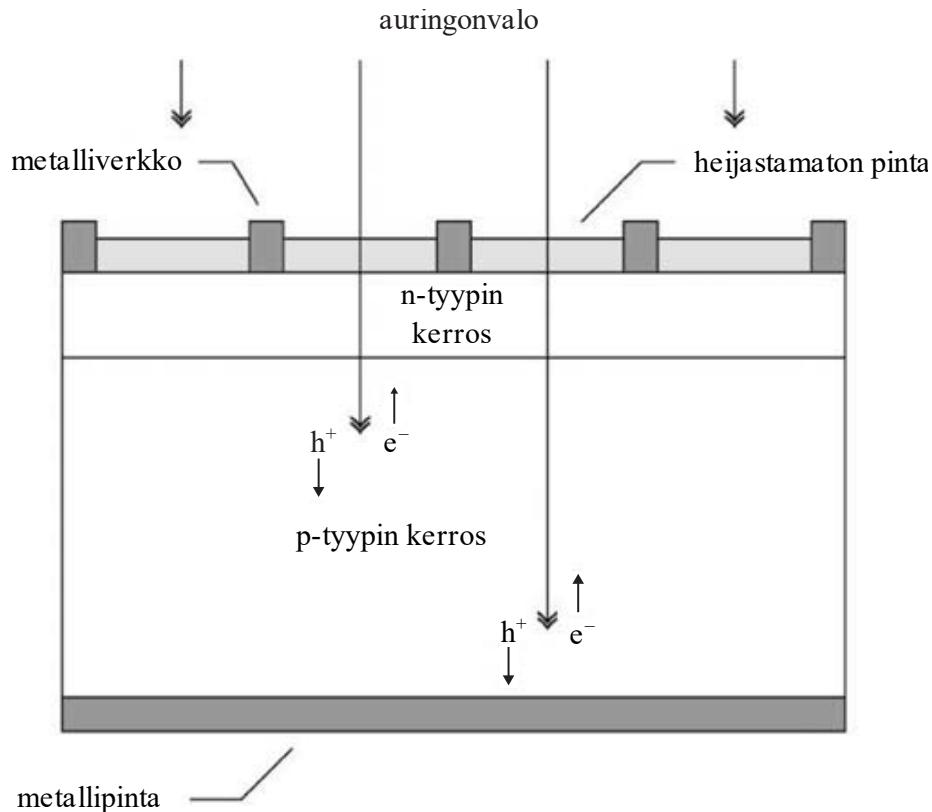
painava sekä hidas käynnistymään. Energiantuotossa nämä seikat eivät ole ongelma toisin kuin muissa sovelluksissa. Korkea toimintalämpötila tuo myös etuja, joita ovat edullinen katalyyttimateriaali, ja polttoaineena käytettävät hiilivedyt voidaan reformoida vedyksi kennon sisällä. Hyötysuhde on tämän ansiosta noin 50 % alemman lämpöarvon mukaan lasketuna. Kokonaishyötysuhde voi olla jopa yli 80 % jos kennon hukkalämpöä hyödynnetään esimerkiksi CHP-laitoksissa. Haasteena polttokennossa on syövyttävä ja sula elektrolyyttimateriaali. Polttokennon materiaalina tulee tämän takia käyttää korkeatasoista ruostumattomaa terästä. Myös korkea lämpötila tulee huomioida materiaalien valinnassa. (Ibid.)

## **5.2 Aurinkokenno**

Aurinkokenno koostuu puolijohdekerroksista ja sähköisistä liitoksista. Se on auringonvaloa sähköksi muuntava laite. Usean aurinkokennon rakennetta kutsutaan aurinkopaneeliksi. Aurinkopaneelissa haluttu jännite saadaan kytkemällä kennoja sarjaan ja virta kytkemällä kennoja rinnan.

### **5.2.1 Kennon rakenne**

Aurinkokennojen toiminta perustuu valosähköisestä ilmiöön, jossa fotoneiden liike-energia muunnetaan sähköksi. Kennoissa oleva puolijohdemateriaali absorboi valoa ja kuljettaa osan fotonien energiasta johtimelle. Koska virta kulkee vain yhteen suuntaan, voidaan aurinkokennoa pitää yksinkertaisuudessaan puolijohdediodina. Kennon alustana toimii metallipinta, jonka päällä on p- ja n-tyypin puolijohdekerros. Niiden päällä on heijastamaton pinta ja metalliverkko, kuten kuvassa 9.



**Kuva 9.** Yksinkertaistettu aurinkokennon rakenne. (mukaillen Luque & Hegedus 2011, 83).

Metalliverkko luo sähköisen kontaktin kennon päällä ja metallialusta kennon alla. Auringonvalo kulkeutuu verkon läpi puolijohdekerroksiin. Verkon alla oleva heijastamaton kerros lisää läpi pääsevää valon määrää. Yleisin puolijohdemateriaali on pii (Si), koska se absorboi hyvin valoa ja sen valmistus on todella kehittynyttä. Vuonna 2019 valmistetuista aurinkopaneeleista yli 90 % käytti piitä puolijohteena (Fraunhofer ISE 2016, 5). Muita puolijohteita ovat kadmiumtelluuri (CdTe), gallium-indiumfosfori (GaInP) sekä galliumarseeni (GaAs).

Tyypillisessä yhden liitoksen piikennossa fotonit absorboituvat siihen vain, jos niillä on suurempi energia kuin energiavöiden välinen energia-aukko. Energia-aukkoa suurempi energia muuttuu lämmöksi, jos taas fotonin energia on pienempi kuin energia-aukko, ei absorbointia tapahdu.

Galliumarseeni- ja galliumindiumfosforipaneelit hyödyntävät moniliitosteknologiaa, jossa energia-aukkoja on useita. Tämän ansiosta saadaan suurempi määrä fotoneita absorboitumaan materiaaliin. Moniliitostennoilla onkin parempi hyötysuhde kuin tavallisilla piikennoilla, ja se voi olla parhaimmillaan jopa 40 %. Ongelmana näillä kennoilla on korkea hinta,

jonka takia niiden käyttökohteet ovat lähinnä avaruussovelluksia. Myös kadmiumtelluuripaneelilla on parempi hyötysuhde kuin piikennoilla, sillä energiavyöt ovat kohtisuorassa toisiaan vasten. Tämä lisää fotonin absorboitumisen todennäköisyyttä verrattuna epäsuoran välin piikennoihin (Luque & Hegedus 2011, 317).

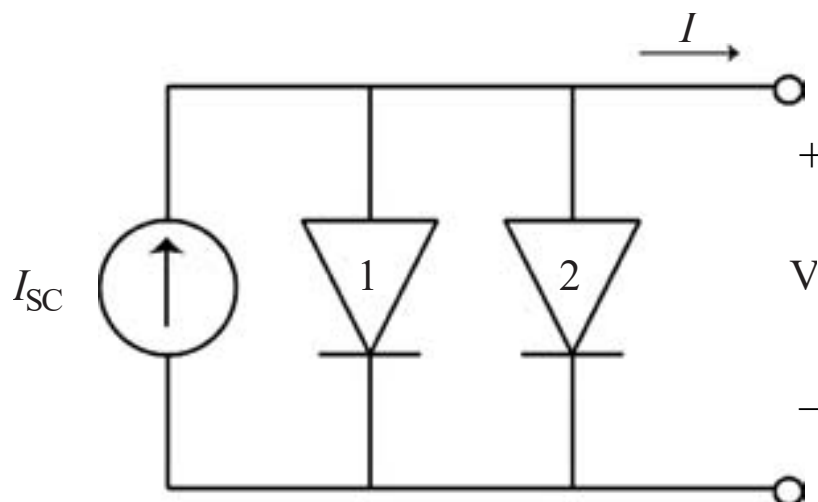
### 5.2.2 Kennojen ominaisuudet

Aurinkokennojen sähköntuottoon vaikuttaa monet tekijät, kuten säteilyn voimakkuus, lämpötila ja puolijohteen ominaisuudet. Kennon tuottama virta lasketaan yhtälöllä

$$I = I_{SC} - I_{01}(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) - I_{02}(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1) \quad (1)$$

missä  $I_{SC}$  on kennon oikosulkuvirta,  $I_{01}$  ja  $I_{02}$  ovat kyllästysvirtoja,  $q$  on sähkövaraus,  $k$  on Boltzmannin vakio,  $T$  on lämpötila ja  $V$  on kennon jännite. Ensimmäinen kyllästysvirta  $I_{01}$  syntyy pn-liitoksen neutraaleilla alueilla ja toinen kyllästysvirta  $I_{02}$  tyhjennysalueella. Ne ovat seurausta rekombinaatiosta, ja ne vähentävät tuotettua kokonaisvirtaa. (Luque & Hegedus 2011, 111)

Aurinkokenno voidaan esittää yksinkertaisena piirinä, jossa on yksi virtalähde. Esimerkki tällaisesta sijaiskytkennästä on nähtävissä kuvassa 10.

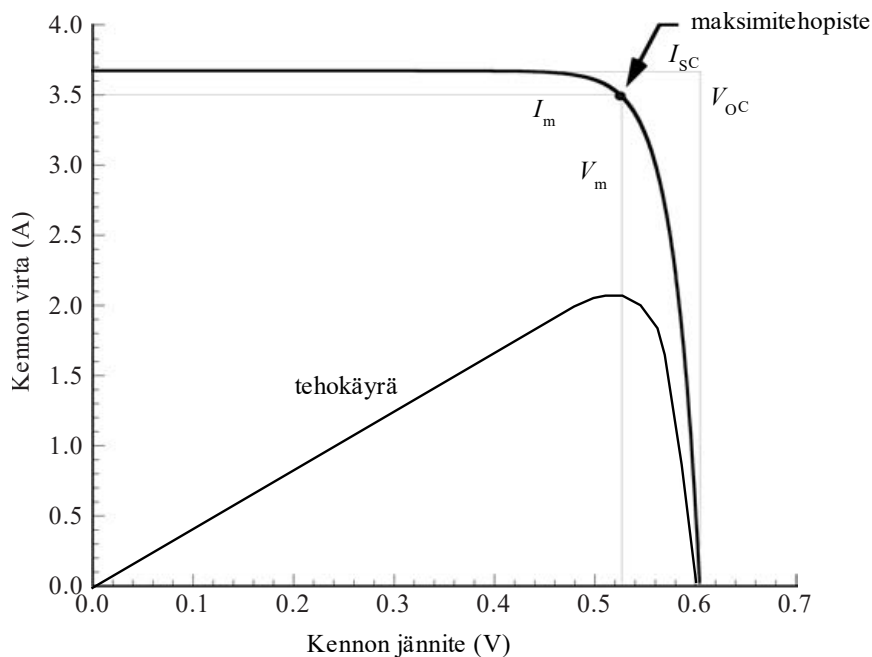


**Kuva 10.** Yksinkertaistettu aurinkokennon sijaiskytkentä (mukaillen Luque & Hegedus 2011, 111).

Kuvassa 10 on aurinkokennon oikosulkuvirtaan kytketty rinnan kaksi diodia. Diodi 1 kuvaa  $I_{o1}$  rekombinaatiovirtaa pn-liitoksen neutraaleilla alueilla ja diodi 2  $I_{o2}$  rekombinaatiovirtaa tyhjennysalueella. Piiri voidaan esittää myös yhdellä diodilla, joka kuvaa molempia kyllästysvirtoja. Kyllästysvirtoihin vaikuttavat kennon rakenne, jännite, sisäiset vastukset, materiaalit, sekä käyttöolosuhteet. Kyllästysvirrat ovat merkittävässä osassa kennojen sähköisiä ominaisuuksia tarkastellessa, sillä ne vaikuttavat avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran väliseen suhteeseen. Tämä suhde on nähtävillä kuvassa 11. Kuvassa näkyvä avoimen piirin jännite, eli kennon maksimijännite  $V_{OC}$ , saadaan yhtälöllä

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right) \quad (2)$$

missä  $I_0$  on kokonaiskyllästysvirta. Yhtälössä ei ole huomioitu vastuksia. (Luque & Hegedus 2011, 112)



**Kuva 11.** Esimerkki aurinkokennon virta-jännitekäyrästä yhdelle kennolle (mukaiillen Ibid., 112).

Kuvasta 11 voidaan nähdä, että virta pysyy vakiona jännitteen ollessa alle 0,5 V. Virta vastaa tällöin kennon oikosulkuvirtaa  $I_{SC}$ . Kun jännite kasvaa yli 0,5 V:n ja lähestyy avoimen piirin jännitettä  $V_{OC}$ , virta pienenee nopeasti nolnaan. Tämä ilmiö on kyllästysvirtojen aiheuttama, sillä ne kulkevat vastakkaiseen suuntaan kuin kennon tuottama virta. Kuvassa näkyvässä

maksimitehopisteessä (engl. Maximum Power Point – MPP) kennon tuottama teho on suurimmillaan. Se saadaan laskettua yhtälöllä

$$P_{\text{MPP}} = I_m V_m \quad (3)$$

missä  $I_m$  on maksimitehopisteen virta ja  $V_m$  maksimitehopisteen jännite. Optimaalinen teho olisi vastaavasti kennon oikosulkuvirran ja avoimen piirin tulo. Optimaalisen tehon ja maksimitehon suhdetta kutsutaan täyttökertoimeksi. Se saadaan yhtälöllä

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}} \quad (4)$$

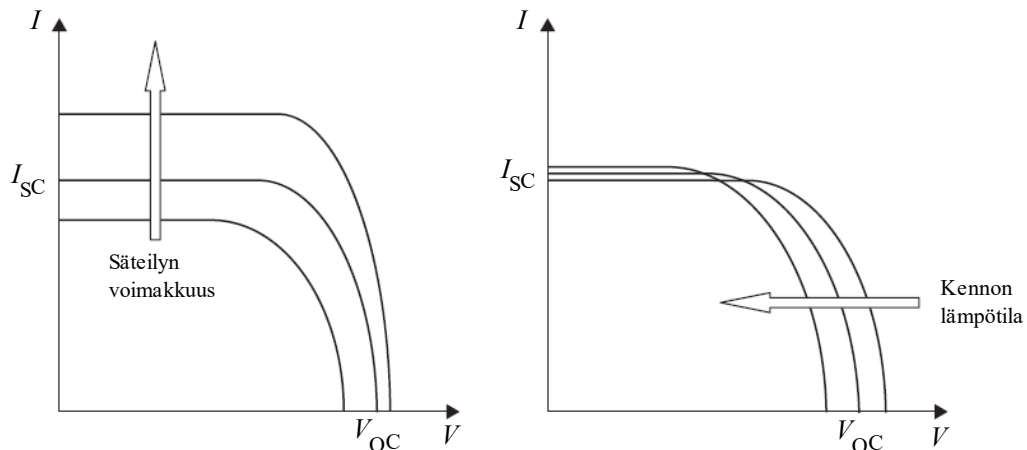
Täyttökertoimen avulla saadaan kennon kokonaishyötysuhde laskettua yhtälöllä

$$\eta = \frac{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}} FF}{P_s} \quad (5)$$

missä  $P_s$  on kennon pinnalle tuleva säteilyteho. (Ibid., 113)

### 5.2.3 Olosuhteiden vaikutus kennon toimintaan

Kennon sisäisten ominaisuuksien lisäksi sähköntuottoon vaikuttaa ympäristön olosuhteet. Näistä merkittävimmät ovat säteilyn voimakkuus, lämpötila ja varjostukset. Kuvassa 12 on esitetty lämpötilan ja säteilyn vaikutus kennon virtaan ja jännitteeseen.

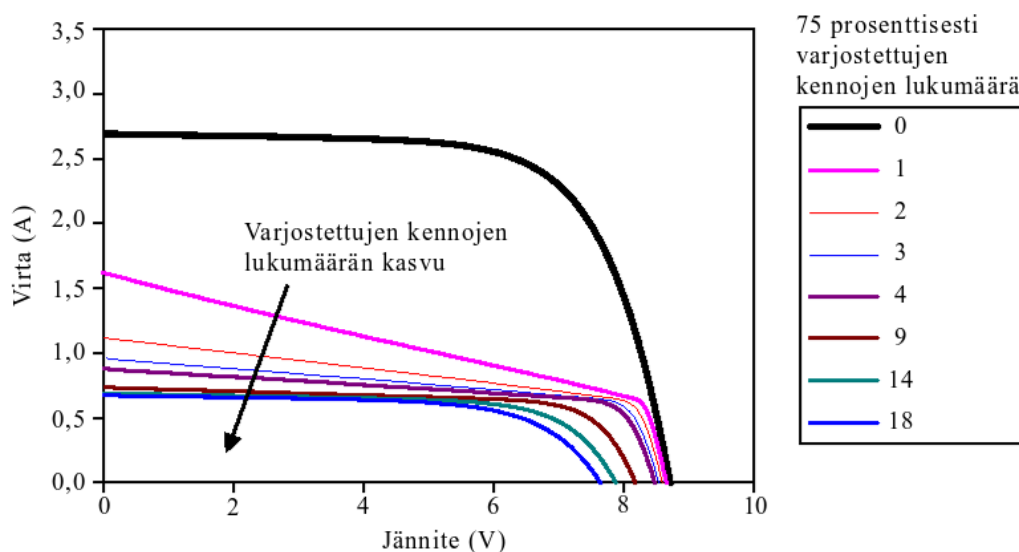


**Kuva 12.** Kennon virta-jännitekäyrän muutos säteilyvoimakkuuden ja lämpötilan vaikutuksesta. (mukaillen Kalogirou 2014, 494)

Kuvasta 12 voidaan nähdä, että säteilyn voimakkuus lisää kennon tuottamaa virtaa sekä suurentaa jännitettä, joten maksimiteho kasvaa. Tämä johtuu siitä, että säteily voimistuessa fotonit virittävät elektronit tehokkaammin johtavuusvyölle. Valoa absorboituu siis enemmän, mikä lisää kennon johtavuutta ja sen seurauksena myös kennon tuottamaa virtaa. Myös lämpötilan noustessa virittyminen helpottuu, jolloin virta kasvaa. Toisaalta tällöin kyllästysvirrat kasvavat ja jännite pienenee nopeammin kuin virta suurenee. Kenno tuottaa siis lämpötilan noustessa vähemmän tehoa, ja sen hyötysuhde huononee. (Rekioua & Matagne 2012, 11)

Varjostukset pienentävät säteilyn määrää, joten ne pienentävät kennon tuottamaa virtaa merkittävästi. Kennoja kytketään tavallisesti sarjaan, jolloin niiden läpi kulkee sama virta. Jos yksi kenno tällaisessa järjestelmässä varjostuu, se muodostaa niin sanotun kuuman pisteen (engl. hot spot) ja alkaa tuottaa lämpöä. Tämä voi pysyvästi vahingoittaa kennoa, ja siksi kennot tulee suojata varjostumisista vastaan. Tämä onnistuu jakamalla paneelin sisältämät kennot sarjoihin, joiden välille asennetaan ohitusdiodi, joka ohjaa virran varjostuneiden kennojen ohitse ja pitää kennon virran kennon oikosulkuvirran tasolla. Ilman ohitusdiodia virta ja siten myös teho pienentyisivät enemmän. Kuvassa 13 on esitetty, miten 75 prosenttisesti varjostettujen kennojen määrä vaikuttaa 18 kennon rinnankytkennän virta-jännite käyrään.





**Kuva 13.** Varjostettujen kennojen lukumäärän vaikutus 18 kennon rinnankytkennän virta-jännite käyrään. (mukaillen Alonso-García et al. 2006, 1991)

Kuvasta 13 voidaan nähdä, että jo yksi varjostunut kenno pienessä paneelissa vaikuttaa merkittävästi kennon tuottamaan virtaan. Virta pienenee vielä kahden, kolmen ja neljän varjostetun kennon jälkeen jonkin verran. Kun puolet kennoista on varjostettu, virta ei juuri pienene, mutta avoimen piirin jännite sen sijaan putoaa, eli maksimitehopiste pienenee.

### 5.3 Aaltovoima

Aaltovoimala muuntaa aaltojen liike-energian sähköksi. Aaltovoimalat jaetaan yleensä niiden sijainnin, sovellustyypin ja tehontuottotavan (engl. Power Take Off – PTO) mukaan eri luokkiin. Tässä kappaleessa perehdytään eri tehontuottotapoihin.

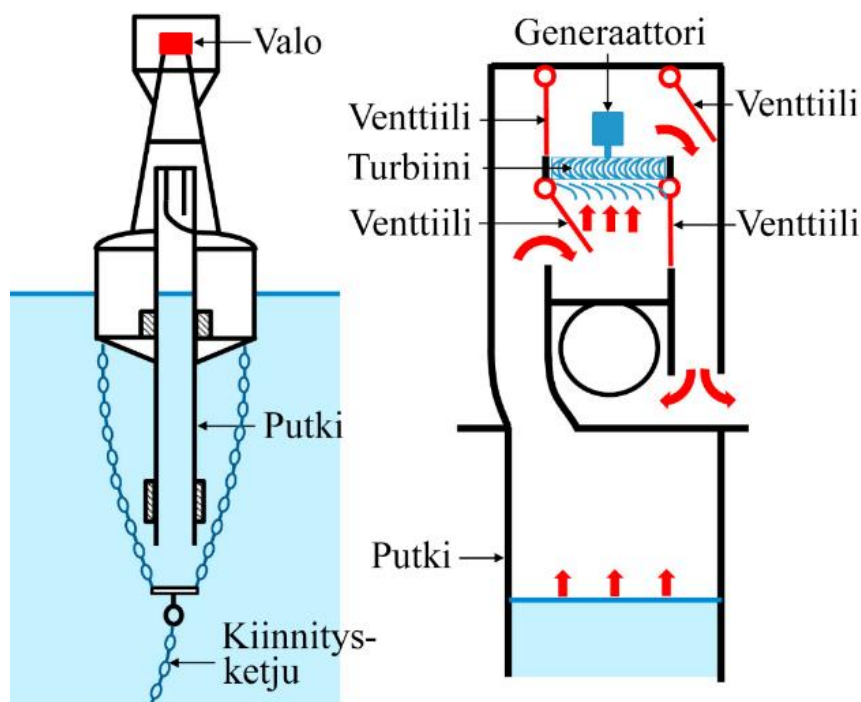
Aaltovoimalat voidaan sijoittaa rannalle, rannan läheisyyteen tai syvälle merelle. Energiantuotanto on suurinta syvällä merellä ja pienintä rannalla, mutta toisaalta olosuhteet ovat syvällä merellä on myös todella vaativat. Syvällä merellä tarkoitetaan merialuetta, jossa meren syvyys on yli puolet aallonpituudesta. (Rhinefrank et al. 2005, 1281)

Aaltovoimaloiden tehontuottoon vaikuttavia tekijöitä on aallon modaalinen periodi (jaksonaika), aallon korkeus, aallon suunta ja joissain tapauksissa virtauksen nopeus. Lähtökohteisesti aaltovoimalat tuottavat parhaiten, kun aallot ovat mahdollisimman korkeita ja modaalinen periodi on mahdollisimman lyhyt.

### 5.3.1 OWC-voimala

OWC-voimalassa (engl. Oscillating Water Column – OWC) on osittain upoksissa oleva ilmakammio. Kun aalto kulkeutuu ilmakammioon, sen veden pinta nousee. Tämä liikuttaa ilmaa, joka ohjataan turbiinin läpi. Kun aalto laskeutuu, syntyy alipaine, mikä saa ilman vetäytyä takaisin kammioon. Tällöin se kulkee uudelleen turbiinin läpi. Siksi Wells-turbiinia käytetään OWC-voimaloissa, sillä se on riippumaton ilman tulosuunnasta.

OWC-voimalat ovat tyypillisesti suuria rannalle asennettavia laitoksia, mutta niitä on kehitetty myös pienemmässä mittakaavassa. Kuvassa 14 on esitetty Masudan kehittämä kelluva navigointilaitte. Niitä on valmistettu yli 1000 kappaletta, ja toimintaikä on niille parhaimmillaan ollut yli 30 vuotta. Laitte toimii yksisuuntaisella turbiinilla yhdistettynä monimutkaiseen venttiilijärjestelmään. Se on siksi hankala huoltaa ja haastava skaalata suuremmaksi, sillä venttiileistä voi tulla liian painavia. (Takao & Setoguchi 2006, 2383–2384)

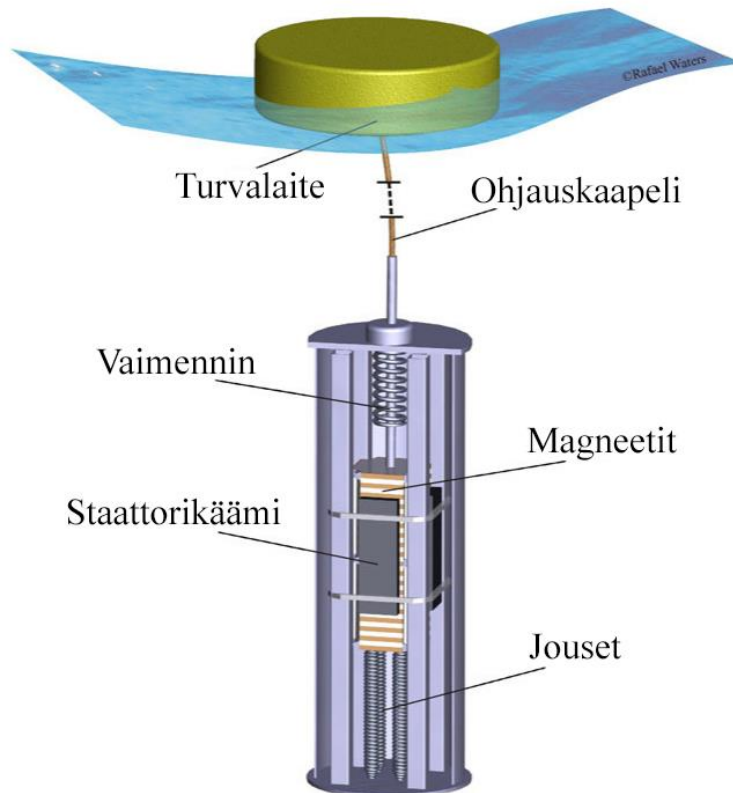


**Kuva 14.** Vasemmalla näkyy navigointilaitte kokonaisuudessaan ja oikealla turbiini ja venttiilijärjestelmä. Punaiset nuolet kuvaavat ilman kulkusuuntaa ja sininen viiva veden pintaa. (mukaillen Falcão & Henriques 2016, 1393)

Kuvassa 14 näkyvää venttiilijärjestelmää olisi mahdollista yksinkertaistaa esimerkiksi Wells-turbiinin avulla.

### 5.3.2 Lineaarigeneraattori

Lineaarigeneraattori koostuu magneeteista ja staattorikämmistä. Se luokitellaan WEC-laitteeksi (engl. Wave Energy Converter – WEC), koska se muuntaa aaltojen edes takaisen liikkeen sähköenergiaksi. Magneettien liikkumassa staattorikämmien läpi indusoituu käämiin magneettikentän muuttuessa vaihtovirta. Vaihtovirta tulee muuttaa tasavirraksi, jotta sillä voidaan ladata akkuja. Magneetit saa liikkumaan kellukkeeseen liitetty ohjausvaijeri. Tärkeimmät lineaarigeneraattorin komponentit on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 15.** Lineaarigeneraattorin tärkeimmät komponentit ja esimerkkikiinnitys. (mukaillen Li et al. 2015, 248)

Pienen kokoluokan kaupallisia mereen asennettavia lineaarigeneraattoreita ei ole vielä saatavilla, mutta eräs kaupallisesti valmistettu 2 MW:n lineaarigeneraattoria hyödyntävä aaltovoimala on Seabased WEC S2, joka on ruotsalaisen Seabased AB:n kehittämä (Seabased AB 2021). Sen rakenne on samankaltainen kuvan 15 laitteen kanssa.

## 6 ENERGIANLÄHTEIDEN LASKENTATYÖKALU

Tässä työssä suunnitellaan energianlähteiden laskentatyökalu, joka laskee kuukausikohtaisen sähkönkulutuksen käyttäjän valitsemille sähkölaitteille. Käyttäjän tulee myös valita energianlähde ja tarvittaessa myös aurinkokenno. Laskentatyökalu laskee annetuilla tiedoilla kuukausikohtaisen energiataseen ja piirtää siitä pylväsdiagrammin, jossa kulutus, tuotanto ja energiavarastojen kapasiteetti näkyy ensimmäiselle 24 kuukaudelle. Tämän lisäksi työkalu ilmoittaa arvioidun päivämäärän, jolloin energiavarastot ovat tyhjä sekä autonomisten päivien lukumäärän, jonka laitteisto toimisi ilman aurinkopaneeleita energiavarastojen ollessa alussa täynnä. Käyttäjä voi myös ilmoittaa tavoiteajan vuorokausissa autonomiselle ajalle, jolloin työkalu laskee tarvittavan kapasiteetin keskiarvoisen kulutuksen mukaan.

Vesiväylien turvalaitteiden energianlähteiden mitoittaminen kulutuksen mukaan on haastavaa, sillä kulutus ei ole tasaista vuorokausitasolla tai kuukausitasolla. Esimerkiksi lyhdyt ovat päällä vain pimeällä, joten niiden kulutus on Suomessa kesäisin pienempää kuin talvisin valoisan ajan pituudesta johtuen. Laskentatyökalu ei huomioi tätä vaihtelua, joten käyttäjän tulee laskea keskiarvoinen kulutus itse ja ilmoittaa se laitteen tietoihin. Laskentatyökaluun voi kuitenkin ilmoittaa kuukausittaisen lisäkulutuksen ja lisätuotannon. Lisäkulutusta voi syntyä esimerkiksi lämmityksestä talvikuukausille ja lisätuotanto voi tarkoittaa esimerkiksi polttokennon tankkausta jonkin kuukauden kohdalla.

Laskentatyökalun laitevalikko toimii alas aukeavilla listoilla, jotka saavat tiedot kullekin laitetypille omistetusta taulukosta. Nämä taustatiedot ovat esitetty tarkemmin kappaleessa 6.1. Laskentatyökalun toiminta on puolestaan esitetty kappaleessa 6.2.

### 6.1 Taustatiedot

Tämä kappale sisältää tiedot laitteista, energianlähteistä, aurinkopaneeleista, auringonsäteilystä, lämpötiloista sekä niihin liittyvistä yhtälöistä.

#### 6.1.1 Laitteiden tiedot

Laitteiden tiedot on saatu valmistajien verkkosivuilta. Laskennan kannalta työkaluun tulee kirjata laitteen tyyppi, nimi ja virta. Tyyppejä ovat tällä hetkellä kappaleessa 3 esiintyvät lyhty, sensori, loggeri, lähetin, sääasema, videokamera, 5G-lähetin ja videokamera. Näitä ei

ole pakko käyttää uusia laitteita lisätessä, vaan käyttäjä voi ilmoittaa tyypiksi mitä vain. Laitteiden nimien sen sijaan tulee olla uniikkeja, eli samaa nimeä ei saa olla toisella laitteella.

Laskentatyökalu laskee laitteiden kulutuksen virrankulutuksen (Ah), käytössä olevien tuntien sekä laitteiden lukumäärän tulona. Kuukausikohtaiseen kulutukseen vaikuttaa myös, kuinka monta päivää kuukaudessa laite on päällä.

### **6.1.2 Energianlähteiden tiedot**

Energianlähteiden tiedot on saatu valmistajien verkkosivuilta. Laskennan kannalta työkaluun tulee kirjata energianlähteen tyyppi, nimi, kapasiteetti (Ah) ja jännite (V). Myös itsepurkautuvuus kuukaudessa (%) kannattaa ilmoittaa, sillä muuten oletusarvona käytetään 0 %. Energianlähteiden tyyppejä ovat tällä hetkellä kappaleessa 4 esiintyvät akut ja paristot, kuten VRLA-akku, Li-Ion-akku, alkaliparisto ja NiCd-akku.

Laskentatyökalu laskee energiamäärän (kWh) kapasiteetin ja jännitteen tulona. Kokonaisenergiamäärään vaikuttaa ilmoitettu laitteiden lukumäärä. Itsepurkautuva energiamäärä on puolestaan kokonaisenergiamäärän ja ilmoitetun prosentin tulo.

### **6.1.3 Aurinkopaneelien tiedot**

Aurinkopaneelien tiedot on saatu valmistajien verkkosivuilta. Laskennan kannalta työkaluun tulee kirjata paneelin tyyppi, nimi, teho, pituus, leveys ja sähköntuottohyötysuhde. Sähköntuottohyötysuhteeseen vaikuttavat monet tekijät, kuten

- muuntajan häviöt,
- lämpötilan aiheuttamat häviöt,
- kaapeleiden häviöt,
- varjostus,
- heikosta säteilystä johtuvat häviöt ja
- lian ja lumen aiheuttamat häviöt.

Tämän takia sähköntuottohyötysuhdetta on vaikea määritellä tarkasti. Konservatiivisen arvion saamiseksi laskentatyökalu käyttää oletusarvona 80 %. Tämän lisäksi laskentatyökalu

laskee paneelin hyötysuhteen  $\eta$ , jolla se muuttaa auringonsäteilyn energiaksi. Se saadaan yhtälöllä

$$\eta = P / (A \cdot 1000 \text{ W/m}^2) \quad (6)$$

jossa  $P$  on paneelin nimellisteho (W),  $A$  on paneelin pinta-ala ( $\text{m}^2$ ) ja  $1000 \text{ W/m}^2$  on auringon säteilyvirta standardiolosuhteissa (engl. Standard Test Condition – STC). Valmistaja ilmoittaa monesti vain nimellistehon, jonka takia hyötysuhde on laskettava. Aurinkopaneelien tuottama energia  $E$  (Wh) saadaan puolestaan yhtälöllä

$$E = A \cdot \eta \cdot H \cdot PR \quad (7)$$

jossa  $H$  on säteilyn energia pinta-alaa kohden ( $\text{Wh/m}^2$ ) ja  $PR$  on sähköntuottohyötysuhde. Tämä energia  $E$  jaetaan energianlähteen jännitteellä, jolloin saadaan tuotettu sähkövirta (Ah). Jos energianlähteitä on useita, käytetään laskussa suurimman jännitettä.

#### 6.1.4 Auringonsäteilyn tiedot

Auringonsäteilyn tiedoista merkittävin osa on saatu Nasan POWER Data Access Viewer-selainohjelman kautta (Nasa 2021). Lisäksi Suomen säteilytietoja on saatu Ilmatieteen laitokselta. Nasan tietokannat perustuvat vuosina 1984-2013 tehtyihin mittauksiin ja Ilmatieteen laitoksen tietokannat vuosina 1981-2009 tehtyihin mittauksiin (Ilmatieteen laitos 2012). Säteilymäärät on ilmoitettu kuukausikohtaisesti viidelle eri paneelin kallistuskulmalle, jotka ovat

- pystysuora,
- vaakasuora,
- leveysasteen kulma,
- leveysasteen kulma + 15 astetta ja
- leveysasteen kulma – 15 astetta.

Kyseiset kallistuskulmat osoittavat kohti etelää. Suomen oloihin paras vaihtoehto on monesti pystysuora, sillä näin talvella saadaan kerettyä lumesta ja jäästä heijastuvaa säteilyä eikä

lumi peitä paneelia. Jos maassa ei sada tavallisesti lunta, on silloin paras vaihtoehto leveysasteen kulma, jos vaihtoehtoina on vain paneelin kiinteä kiinnitys.

Säteilytietoja on kerätty lukuisten kaupunkien sijainneista. Ne on jaoteltu maanosien ja maiden mukaan, jotta sijainnin löytäminen laskentatyökalun valikosta olisi helpompaa. Käyttäjällä on mahdollisuus lisätä laskentatyökaluun aurinkosäteilyn tietoja. Jotta uusi sijainti tulee näkyville laskentatyökaluun, tulee sille ilmoittaa asento, maanosa tai meri, maa, nimi ja kuukausikohtaiset säteilymäärät yksikössä kWh/m<sup>2</sup>/vrk.

### **6.1.5 Lämpötilojen tiedot**

Lämpötilojen kuukausittaiset keskiarvot kaikissa sijainneissa on ilmoitettu celsiusasteina. Ne on saatu samoista lähteistä kuin auringonsäteilyn tiedot kappaleessa 6.1.4.

Lämpötilaa ei käytetä laskentatyökalussa laskentaan, mutta sen tietäminen on oleellista akkujen ja laitteiden toiminnan kannalta, sillä esimerkiksi tyypillinen moderni lyijyakku jäätyy -25 °C:ssa, jos sen varaustaso alittaa 40 %. On kuitenkin huomioitava, että ilmoitetut lämpötilat ovat kuukausittaisia keskilämpötiloja, joten todellisuudessa päiväkohtainen lämpötila vaihtelee paljon ilmoitetusta arvosta.

Käyttäjällä on mahdollisuus lisätä laskentatyökaluun lämpötilojen tietoja. Ainoastaan lämpötilan sijainnin nimi ja lämpötilojen arvot ovat välttämättömiä tietoja. Vaatimuksena sijainnin nimelle on, että sen täytyy löytyä myös auringonsäteilyn tiedoista.

## **6.2 Ohjelman käyttö, toiminta ja rakenne**

Ohjelman rakenne on pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisena ja laskenta selkeänä. Lisäksi ohjelmalle vaatimuksena oli helppo käytettävyys ja liikuteltavuus. Tästä syystä työkalu tehtiin Microsoftin Excel-työpöytäsovelluksella.

Ohjelma on jaettu valkoisiin ja erisävyisiin sinisiin soluihin. Valkoiset solut ovat käyttäjän muokattavissa olevia soluja ja siniset solut ovat laskentasoluja, jotka eivät ole muokattavissa, ellei käyttäjä halua oleellisesti muokata koko ohjelman laskentaketjua.

Ohjelma koostuu viidestä eri osiosta. Ensimmäisessä osiossa lasketaan laitteiden keskimääräinen sähkökulutus kuukaudessa. Toisessa osiossa lasketaan energianlähteiden yhteinen kapasiteetti. Kolmannessa osiossa lasketaan aurinkopaneelien pinta-ala ja keskimääräinen sähköntuotto kuukaudessa. Neljännessä osiossa valitaan aurinkopaneelien asento, sijainti ja aloituskuukausi. Samalla lasketaan myös päivämäärä, jolloin energiavarastot ovat tyhjt, autonomisten päivien lukumääränä ja kapasiteetti, joka vastaa tavoiteaika laitteiston itsenäiselle toiminnalle. Lopuksi viidennessä osiossa lasketaan kuukausittainen auringonsäteilyn teho, tuotanto, kulutus, energiavarastojen taso sekä lämpötila. Arvot vastaavat ilmoitettua asentoa ja sijaintia. Taulukossa 15 on esitetty ohjelman etusivu, jossa on näkyvillä kaikki mainitut osiot ja esimerkkilaskenta. Käyttäjälle kriittisin tieto on energiavarastojen taso, joka näkyy osiossa 5.

Huomioitava on, että alas aukeavat listat näyttävät tyhjää, jos solu on valmiiksi tyhjä. Tämä johtuu siitä, että Excel valitsee listan aloituskohdan virheellisesti muualta kuin listan alusta. Kaikki valittavat nimikkeet tulevat näkyviin, kun sivupalkin vierittää aivan ylös asti. Jos solussa on valmiiksi tekstiä, ei tätä virhettä ilmene, vaan listan aloituskohta on listan alussa. Kuvassa 16 on nähtävissä edellä mainittu tilanne. Tämä tapahtuu kaikille työkalussa olevilla alas aukeaville listoille.

No	Laitteen tyyppi
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

**Kuva 16.** Alas aukeava valikko, joka näyttää tyhjältä.



Taulukko 15. Ohjelman etusivu ja osiot.

SÄHKÖNKULUTUKSEN LASKENTATYÖKALU									
Tavoiteaika itsenäiselle toiminnalle Kokonaisvirta		90 1,01	vuorokautta A	Kokonaiskulutus kuukaudessa Energiavarastojen kokonaiskapasiteetti Kokonaistuotanto kuukaudessa			1,50 3,30 0,00	kWh kWh kWh	
<b>Osio 1</b>	<b>No</b>	<b>Laitteen tyyppi</b>	<b>Laitteen nimi</b>	<b>Virta (A)</b>	<b>Tunteja käytössä päivässä</b>	<b>Laitteiden lukumäärä</b>	<b>Kulutus päivässä (Ah)</b>	<b>Päiviä käytössä kuukaudessa</b>	<b>Kulutus kuukaudessa (Ah)</b>
	1	Lyhty	MPV LED Punainen	0,011	13,00	1	0,146	30	4,380
	2	Videokamera	4G Full HD kamera	1,000	3,00	1	3,000	30	90,000
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								
	9								
	10								
	11								
	12								
	13								
	14								
	15								
	16								
	17								
	18								
	19								
	20								
	21								
	22								
	23								
	24								
	25								
<b>Osio 2</b>	<b>No</b>	<b>Energianlähteen tyyppi</b>	<b>Energianlähteen nimi</b>	<b>Kapasiteetti (Ah)</b>	<b>Jännite (V)</b>	<b>Laitteiden lukumäärä</b>	<b>Energiamäärä (Wh)</b>	<b>Itsepurkautuvuus kuukaudessa (%)</b>	<b>Itsepurkautuva kapasiteetti kuukaudessa (Ah)</b>
	1	Li-Ion-akku	LFP Battery 26700	152,000	16,000	1	2432	0,024	0,036
	2								
	3								
	4								
	5								
<b>Osio 3</b>	<b>No</b>	<b>Aurinkopaneelin tyyppi</b>	<b>Aurinkopaneelin nimi</b>	<b>Teho (W)</b>	<b>Hyötysuhde (%)</b>	<b>Laitteiden lukumäärä</b>	<b>Sähköntuotto hyötysuhde (%)</b>	<b>Pinta-ala (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Keskimääräinen sähköntuotto kuukaudessa (Ah)</b>
	1	Monikiteinen pii	SNG40	40,00	14,21	1	80,00	0,28	142,50
	2								
	3								
	4								
	5								
<b>Osio 4</b>	<b>No</b>	<b>Aurinkopaneelin asento</b>	<b>Maanos tai meri</b>	<b>Maa</b>	<b>Sijainti</b>	<b>Aloituskuukausi</b>	<b>Päivämäärä, jolloin energiavarastot ovat tyhjt</b>	<b>Autonomisia päiviä</b>	<b>Tavoitteet täyttyvä kokonaiskapasiteetti (Ah)</b>
	1	Pystysuora	Eurooppa	Suomi	Helsinki	Tammikuu		48	283,25
<b>Osio 5</b>	<b>No</b>	<b>Kuukausi</b>	<b>Lisätuotanto (Ah)</b>	<b>Lisäkulutus (Ah)</b>	<b>Auringon säteilyn teho (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tuotanto (Ah)</b>	<b>Kulutus (Ah)</b>	<b>Energiavarastot (Ah)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>
	0	Alussa						152,00	
	1	Tammikuu			27,30	54,60	94,42	112,18	-5,34
	2	Helmikuu			53,40	106,80	94,42	124,57	-6,31
	3	Maaliskuu			95,40	190,80	94,42	152,00	-2,65
	4	Huhtikuu			102,60	205,20	94,42	152,00	2,83
	5	Toukokuu			103,80	207,60	94,42	152,00	8,61
	6	Kesäkuu			96,30	192,60	94,42	152,00	13,60
	7	Heinäkuu			96,60	193,20	94,42	152,00	16,82
	8	Elokuu			90,00	180,00	94,42	152,00	15,88
	9	Syyskuu			80,10	160,20	94,42	152,00	11,25
	10	Lokakuu			53,10	106,20	94,42	152,00	6,05
	11	Marraskuu			36,00	72,00	94,42	129,58	0,95
	12	Joulukuu			20,40	40,80	94,42	75,97	-3,14
	13	Tammikuu			27,30	54,60	94,42	36,15	-5,34
	14	Helmikuu			53,40	106,80	94,42	48,54	-6,31
	15	Maaliskuu			95,40	190,80	94,42	144,92	-2,65
	16	Huhtikuu			102,60	205,20	94,42	152,00	2,83
	17	Toukokuu			103,80	207,60	94,42	152,00	8,61
	18	Kesäkuu			96,30	192,60	94,42	152,00	13,60
	19	Heinäkuu			96,60	193,20	94,42	152,00	16,82
	20	Elokuu			90,00	180,00	94,42	152,00	15,88
	21	Syyskuu			80,10	160,20	94,42	152,00	11,25
	22	Lokakuu			53,10	106,20	94,42	152,00	6,05
	23	Marraskuu			36,00	72,00	94,42	129,58	0,95
	24	Joulukuu			20,40	40,80	94,42	75,97	-3,14

Taulukossa 15 näkyvät tyyppi-sarakkeet toimivat suodattimina valittaville laitteille. Näihin sarakkeisiin kuuluvat Laitteen tyyppi, Energianlähteen tyyppi ja Aurinkopaneelin tyyppi. Tyyppi valitaan alas aukeavasta listasta, joka sisältää vain kyseiseen osioon kuuluvat tyypit.

Alas aukeava lista tulee näkyviin, kun solua klikataan hiirellä. Tyypit on määritelty kullekin osiolle omistetussa taulukossa, jotka ovat nähtävissä ohjelman alareunassa olevan valikon (Kuva 17) kautta.

<b>Laskentatyökalu</b>	Laitteiden tiedot	Energianlähteiden tiedot	Aurinkopaneelien tiedot	Auringonsäteilyn tiedot	Lämpötilojen tiedot
------------------------	-------------------	--------------------------	-------------------------	-------------------------	---------------------

**Kuva 17.** Excelin taulukkovalikko.

Kun tyyppi on valittu, tulee valita nimi. Nimi valitaan alas aukeavasta listasta, joka sisältää vain aiemmin valittua tyyppiä vastaavat nimet. Näin on helpompi tietää, mitä laitteita on valitsemassa. Monet laitteet ovat nimetty monimutkaisella tuotekoodilla, joten ilman tyyppiä ei voisi tietää, mikä niiden käyttötarkoitus on. Nimet on kirjattu samaan taulukkoon kuin tyypit. Jos laitteelle ei ilmoita tyyppiä, tulee nimi listaan kaikki laitteet näkyviin.

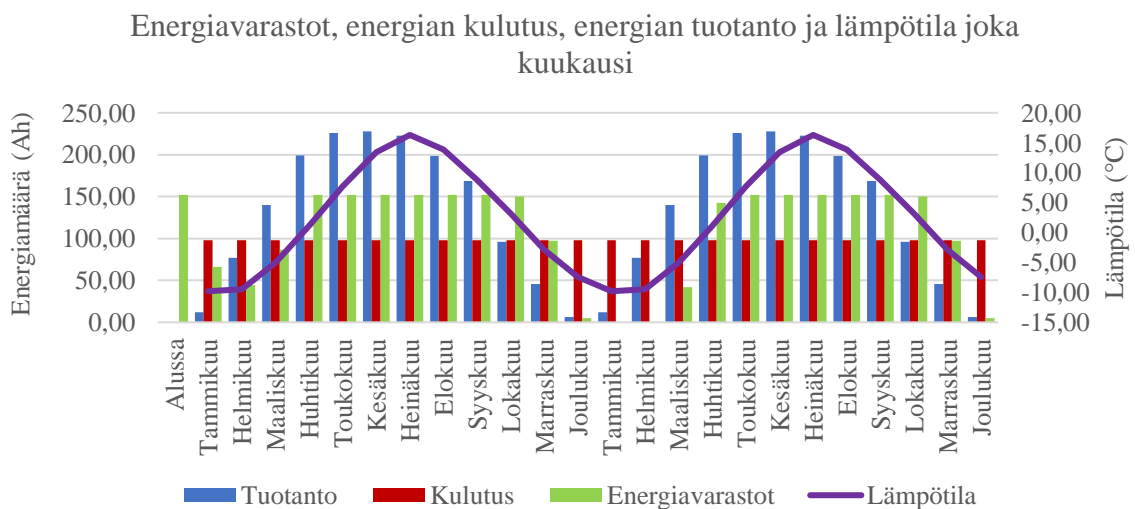
Kun nimi ja laitteiden lukumäärä on valittu, laskee ohjelma kyseiselle laitteelle sinisiin soluihin ilmoitetut tiedot. Ensimmäisessä osiossa tulee myös ilmoittaa, monta tuntia laite on käytössä vuorokauden aikana, sillä oletusarvona on nolla. Laitteiden lukumäärän oletusarvo on puolestaan yksi.

Aurinkopaneelien valinnan jälkeen tulee valita aurinkopaneelien asento. Asento toimii suodattimena sarakkeelle Maanosa tai meri, joka puolestaan toimii suodattimena sarakkeelle Maa, joka taas toimii lopullisena suodattimena sarakkeelle Sijainti. Kaikkiin nämä valikot toimivat alas aukeavilla listoilla. On huomioitava, että jos suodattimet valitsee väärässä järjestyksessä, ei mahdollisesti yhtään sijaintia tule näkyviin. Esimerkiksi jos on valinnut maaksi Suomi ja valitsee sitten maanosaksi Aasia, näyttää sijaintivalikko silloin tyhjää.

Aloituskuukauden oletusarvona on tammikuu, mutta sen voi tarvittaessa muuttaa, jolloin myös viidennen osion kuukausien järjestys muuttuu. On huomioitava, että lisätuotanto ja lisäkulutukset eivät päivitty automaattisesti aloituskuukautta vaihtaessa, vaan ne tulee määrittää manuaalisesti samoille kuukausille kuin ennen vaihtoa. Viidennen osion toisen vuoden lisätuotanto ja lisäkulutukset ovat oletusarvoisesti samat kuin edellisen vuoden, mutta käyttäjä voi halutessaan pyyhkiä kyseisistä soluista laskukaavat pois ja ilmoittaa eri arvot.

Auringonsäteilyn teho on noudettu asennon ja sijainnin mukaan Auringonsäteilyn tiedot sivulta ja kerrottu luvulla 30 vastaamaan yhtä kuukautta. Käyttäen yhtälöä (7) saadaan jokaiselle osion kolme aurinkopaneelille laskettua kuukausittainen energiantuotto. Tuotanto on näiden ja lisätuotannon yhteenlaskettu summa. Kulutus on puolestaan osion yksi kuukausittaisen kulutuksen, osion kaksi kuukausittaisen itsepurkautuvan energiamäärän ja osion viisi lisäkulutuksen summa. Energiavarastot lasketaan tuotannon ja kulutuksen erotuksena, niin että suurin arvo on osion kaksi energiamäärien summa ja pienin arvo nolla. Viimeinen sarake osiossa viisi on kuukausittainen lämpötila. Sen arvot noudetaan sijainnin mukaan taulukosta Lämpötilojen tiedot.

Lukuarvojen lisäksi ohjelma piirtää myös taulukon 15 osion viisi sarakkeista tuotanto, kulutus, energiavarastot ja lämpötila kuvaajan ensimmäiselle 24 kuukaudelle alkaen ilmoitetusta aloituskuukaudesta.



**Kuva 18.** Ohjelman piirtämä kuvaaja, joka vastaa taulukon 15 arvoja. Sijaintina on Helsinki.

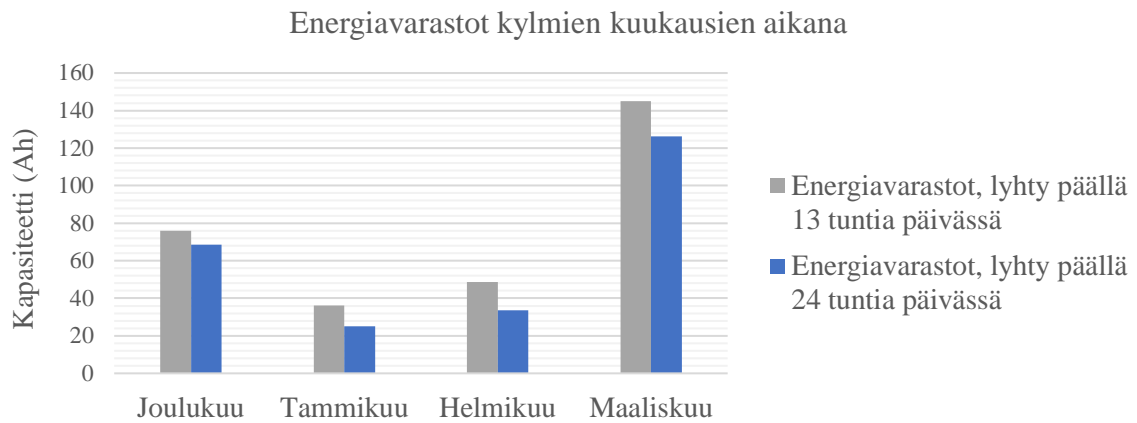
Kuvassa 18 vasemmalla puolella oleva y-akseli näyttää energiamäärän ampeeritunneissa ja oikealla puolella oleva y-akseli lämpötilan celsiusasteina. Kuvasta on helppo katsoa energiavarastojen oletettu taso joka kuukauden lopussa.

## 7 LASKENTATYÖKALUN TULOSTEN TARKASTELU

Kappaleessa 6 käsitelty laskentatyökalu käyttää laskennassa paljon yleistyksiä ja keskiarvoisia mittaustuloksia. Tästä syystä sen tuottamat lukuarvot ovat vain karkeita arvioita todellisesta kulutuksesta ja tuotannosta. Onkin syytä tarkastella, mitkä asiat vaikuttavat tuloksiin, kuinka lähellä totuutta tulokset ovat, ja ovatko tulokset johdonmukaisia muiden lähteiden kanssa. Esimerkkitapaukseksi otetaan kappaleessa 6 käsitelty skenaario. Laitteina ovat siis LED-lyhty ja videokamera. Energianlähteenä on Li-Ion-akku ja aurinkopaneelina pieni 40 watin paneeli.

### 7.1 Kulutus

Kulutuksen todenmukaisuus riippuu eniten käyttäjän ilmoittamista lähtötiedoista. Erityisesti laitteelle ilmoitettu virta ja käytössä olevien tuntien määrä päivässä vaikuttavat merkittävästi kulutukseen. Kun laitteet ovat 30 päivää käytössä kuukaudessa, vaikuttaa jo yhden tunnin muutos päivässä merkittävästi kuukausittaiseen kulutukseen. Esimerkiksi 1 A:n videokamera kuluttaa 30 Ah kuukaudessa jokaista päivässä käytössä olevaa tuntia kohden. Jos siis laite on käytössä enemmän kuin on suunniteltu, ylittyy pienen energianlähteen kapasiteetti nopeasti. Vastaavasti jos laitteen käyttämä virta on todellisuudessa suurempi, voi kulutus poiketa lasketusta arvosta moninkertaisesti. Olennaista on siis tietää, onko mitoitettu kapasiteetti riittävä kattamaan päiväkohtaiset kulutuksen muutokset ja poikkeustilanteet, joissa esimerkiksi aurinkopaneelit eivät toimi. Järkevintä on testata aluksi useita lähtöarvoja, jotta voidaan varmistaa, että järjestelmä toimii myös huonommassa tilanteessa. Esimerkiksi joulukuun ja maaliskuun välillä tuotanto on heikointa, joten kyseiseen alueeseen kannattaa tässä tilanteessa keskittyä. Kuvassa 19 voidaan nähdä, mikä energiavarojen taso olisi, jos lyhty olisi päällä 24 tuntia 13 sijaan.



**Kuva 19.** Energiavarastojen taso lyhdyn ollessa päällä 13 ja 24 tuntia päivässä.

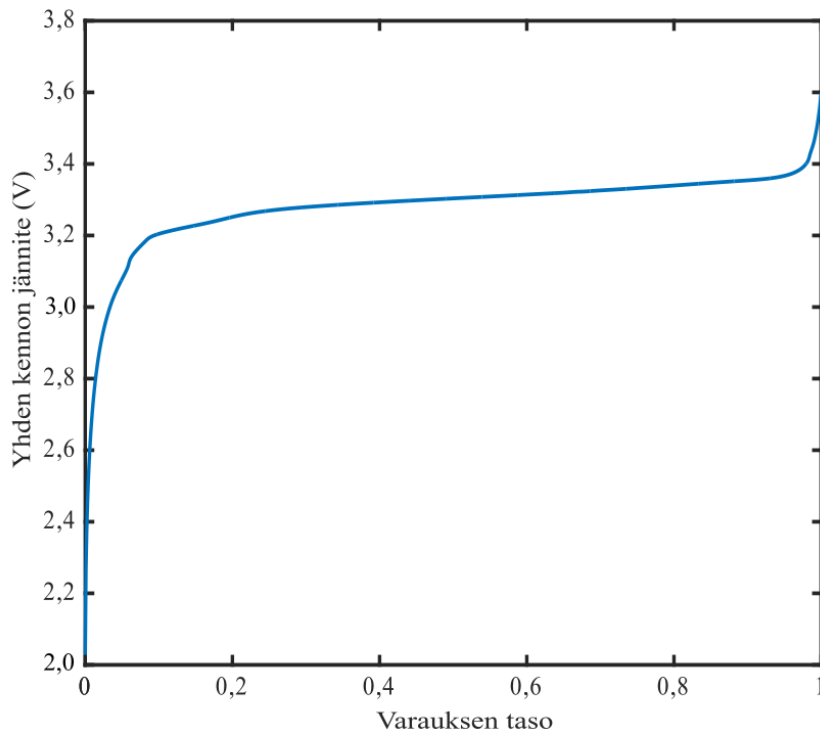
Kuvasta 19 voidaan nähdä, että lyhty ei ole järjestelmässä rajoittava tekijä, sillä akun varaus pysyy tammikuunkin lopussa yli 25 Ah, mikä vastaa noin 16 % akun kokonaiskapasiteetista. Lisäksi lyhdyn käyttäminen 24 tuntia päivässä lisää lyhdyn kulutusta vain 3,71 Ah kuukaudessa verrattuna 13 tunnin käyttöön, joka on 4,38 Ah. Tällä olisi enemmän merkitystä, jos heikosti tuottavia kuukausia olisi enemmän kuin kolme, sillä suurempi kulutus kertautuisi joka kuukaudelle. Jos puolestaan kameran käyttöaikaa nostettaisiin edes tunnilla, aiheuttaisi se todennäköisesti akun loppumisen kummassakin tilanteessa. On nimittäin muistettava, että akun varaukseen vaikuttaa merkittävästi lämpötila, joka on Helsingissä alhaisimmillaan juuri joulukuun ja maaliskuun välillä.

Työn tavoitteiden osalta kulutuksen arviointi on riittävällä tasolla. Käyttäjän on mahdollista kokeilla lukuisia eri asetuksia, kuten laitteiden lukumäärää, käyttöaikaa ja käyttövirtaa, selvittääkseen laitteiston kokonaiskulutuksen monessa eri skenaariossa.

## 7.2 Energianlähde

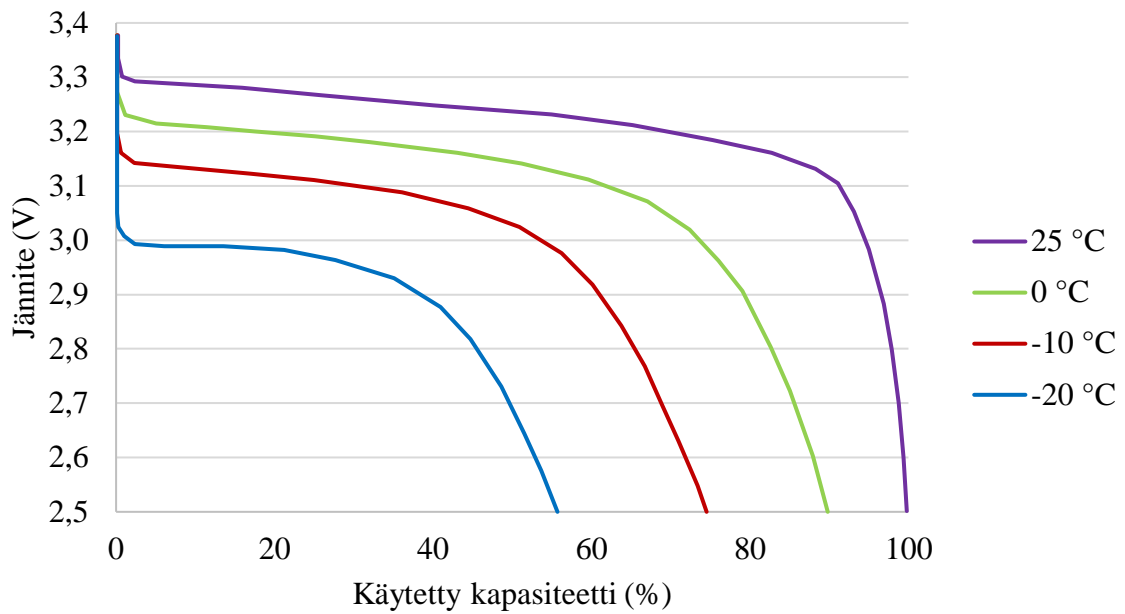
Energianlähde kannattaa lähes aina ylimitoittaa kulutusta vastaan, sillä akkujen kapasiteetti ja tuotettu jännite pienenevät ajan kuluessa. On myös huomioitava, että jännite pienenee myös akkua purettaessa ja kapasiteettiin vaikuttaa lämpötila. Joissakin tilanteissa akun valintaa rajoittaa myös sen suurin mahdollinen purkausvirta, mutta ei ole tämän työn kannalta oleellista, sillä akkujen käyttökohteet ovat virrankulutukseltaan pieniä.

Tässä kappaleessa käsitelty taulukon 15 Li-Ion-akku on tyypiltään litium-rautafosfaatti (LFP). Sille on luvattu sykli-iäksi ainakin 2000 lataus-purkaus-sykliä ja sen minimijännite on 12,5 V, nimellisjännite 16,0 V ja latausjännite 18,5 V. Minimijännite vastaa 2,5 V jännitettä yhdelle kennolle. Kuvasta 20 voidaan nähdä yhden LFP-kennon varauksen taso kyseisellä jännitteellä.



**Kuva 20.** LFP-akun jännite varauksen tason funktiona. 0 tarkoittaa tyhjää ja 1 täyttä. (mukaiillen Mendoza et al. 2016, 4)

Kuvasta 20 voidaan arvioida, että varauksen taso on noin 0,008, eli 0,8 % jännitteen ollessa 2,5 V. Tämä vastaa noin 1,24 Ah kyseiselle akulle. Käytännössä siis akku pystyy käyttämään lähes koko kapasiteetin, ennen kuin se ei enää anna virtaa. On kuitenkin huomioitava, että varauksen ollessa noin 9 %, alkaa jännite laskea nopeasti. Tästä voi joillekin laitteille olla haittaa. Esimerkiksi lyhdyt palavat himmeämmin matalammalla jännitteellä. Lämpötilan vaikutus jännitteeseen ja kapasiteettiin voidaan nähdä kuvasta 21.



**Kuva 21.** LFP-akun jännite eri lämpötiloissa käytetyn kapasiteetin funktiona. (mukaillen Bretscher 2021)

Kuvasta 21 voidaan nähdä, että koska jännite pienenee akkua purettaessa nopeammin kylmällä, saavuttaa kenno aikaisemmin minimijännitteen 2,5 V. Taulukossa 16 on esitetty joka lämpötilalle käytettävissä oleva kapasiteetti.

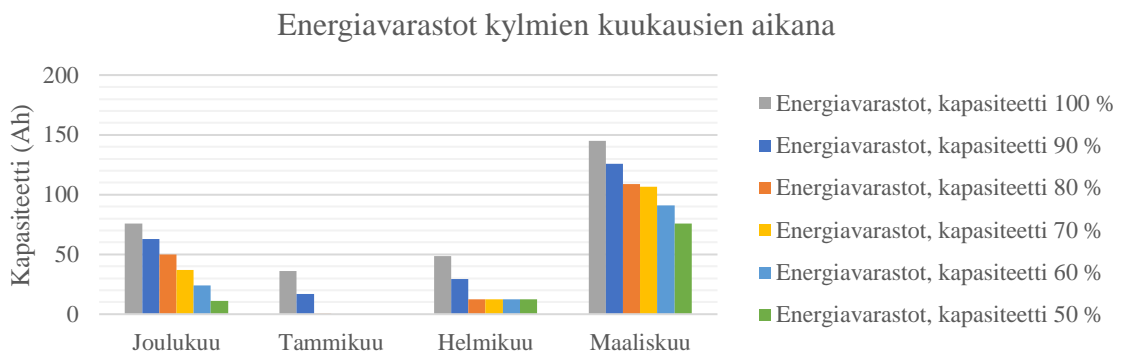
**Taulukko 16.** LFP-kennon käytettävissä oleva kapasiteetti eri lämpötiloissa, kun minimijännite on 2,5 V.

Lämpötila (°C)	Käytettävissä oleva kapasiteetti (%)
25	100
0	90
-10	75
-20	56

Jos kennokohtainen minimijännite olisi pienempi kuin 2,5 V, voitaisiin kapasiteetista hyödyntää suurempi osuus. Esimerkiksi LFP-akun kohdalla pienin mahdollinen yhden kennon jännite on 2 V. Syväpurkaminen kuitenkin lyhentää akun käyttöikä, joten akkujen valmistajat jättävät tarkoituksella minimijännitteen suuremmaksi.

Joulukuun ja maaliskuun välinen keskilämpötila on alimmillaan  $-2,65$  °C ja ylimmillään  $-6,31$  °C Helsingissä. Lisäksi päiväkohtaisesti lämpötila voi mennä alle  $-20$  °C. Kapasiteetin voidaan siis olettaa vaihtelevan 50-90 %:n välillä. Laskentatyökalussa kapasiteetin

vaihtelua voi testata ilmoittamalla laitteiden lukumääräksi alle yhden tai yli yhden. Tämä tosin vaikuttaa kaikkiin kuukausiin, joten tarkempi menetelmä on lisätä kerroin suoraan energiavarastojen kuukausittaiseen laskentakaavaan. Tällä tavoin saadaan luotua vertailu, joka on nähtävillä kuvassa 22.



**Kuva 22.** Energiavarastojen taso, kun kyseisten kuukausien käytössä oleva kapasiteetti vaihtelee.

Kuvasta 22 ja taulukosta 16 voidaan päätellä, että käytössä olevan LFP-akun kapasiteetti ei riitä tammikuussa ja mahdollisesti myös helmikuussa, jos lämpötila laskee alle 0 °C. Joulukuussa keskilämpötila on −3,14 °C, joten on selvää, että kapasiteetista ei ole tuolloin käytössä 100 %. Lisäksi maaliskuussa on jo huomattavasti enemmän tuotantoa, mutta pienentynyt kapasiteetti ei mahdollista sen kaiken hyödyntämistä. Tämä tulee ilmeiseksi jo 70 %:n kohdalla.

LFP-akun voidaan olettaa kestävän ainakin 10 vuotta. Jos oletetaan, että kapasiteetti pienenee tasaisesti, on vuodessa menetetty kapasiteetti 2 %, sillä akun katsotaan olevan hajonnut, kun sen kapasiteetti täyteen ladattuna on 80 % tai alle alkuperäisestä kapasiteetista. Tämä osoittaa sen, että akku on liian pieni, vaikka lämpötilat Helsingissä olisivat läpi talven 0 °C.

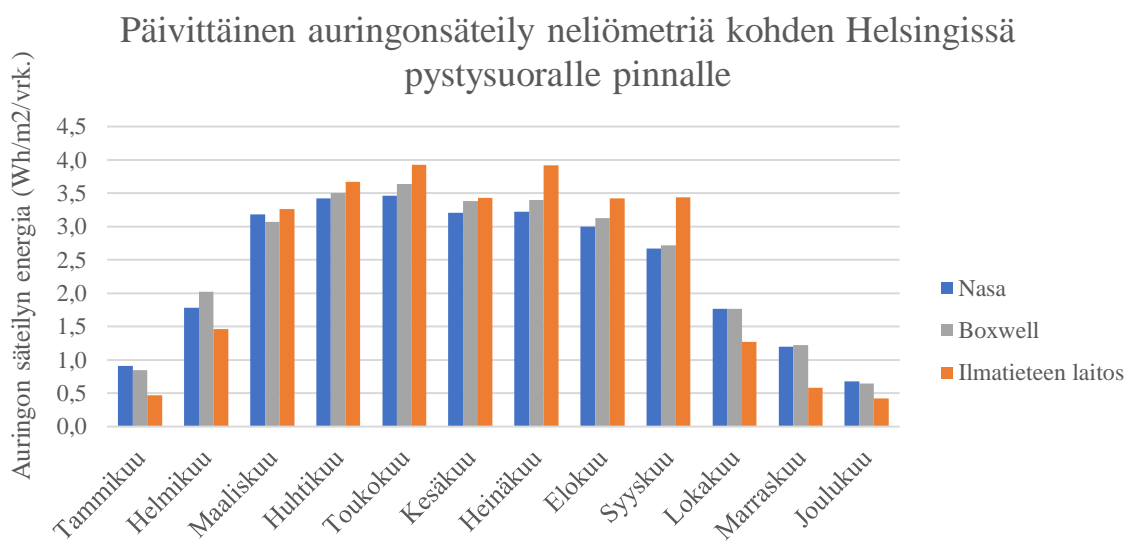
Työn tavoitteiden osalta energiavarastojen tason arviointi on riittävän tarkkaa, vaikka kapasiteetin heikkenemää ei huomioidakaan. Käyttäjän voidaan olettaa tietävän, että akkujen kapasiteetti laskee kylmässä ja myös ajan saatossa. Tämä heikkenemä voidaan huomioida valitsemalla useita akkuja tai yhden suuremman akun. Hyvä nyrkkisääntö on valita kapasiteetti kylmimmän päivän mukaan, kun tavoitteena on keskeyttämätön toiminta.



### 7.3 Tuotanto

Tuotantoon vaikuttaa merkittävästi ilmoitettu sähköntuottohyötysuhde ja se on käytännössä ainut lähtöarvo, jolla yksittäisen paneelin tuotantoa voidaan säädellä. Kappaleessa 6.1.3 mainitaan tarkemmin sähköntuottohyötysuhteeseen vaikuttavat asiat. On kuitenkin mainittava, että tarkan sähköntuottohyötysuhteen arvioiminen vaatisi mittauksia asennuskohteessa, mikä ei tässä työssä ole mahdollista. Aurinkopaneelin asento vaikuttaa myös tuotantoon, mutta se ei tässä tapauksessa ole muutettavissa. Paneelien lukumäärää voisi myös kasvattaa, mutta akkuun nähden se lisäisi turhaa tuotantoa kesäkuukausille ja nostaisi kustannuksia. Lisäksi järjestelmä ei ole kovin luotettava, jos sen toimintakyky vaatii aurinkopaneelien jatkuvan toiminnan.

Oleennaista on myös auringonsäteilyn tietojen vertailu muihin lähteisiin. Vertaillaan esimerkiksi Helsingin arvoja kolmesta eri lähteestä. Ensimmäiset auringonsäteilyn tiedot on saatu Nasan POWER Data Access Viewer-selainohjelman kautta (Nasa 2021). Laskentatyökäslusta löytyy myös arvot Vantaalle, joka sijaitsee aivan Helsingin pohjoispuolella alle 0,1 leveysasteen päässä. Kyseiset Vantaan arvot on saatu Ilmatieteen laitokselta ja niiden voidaan olettaa olevan lähes samat kuin Helsingissä. Lisäksi Boxwellin keräämän aineiston arvot on myös otettu mukaan vertailuun (Boxwell 2019). Kuvassa 23 on esitetty kaikkien kolmen lähteen arvot vertailua varten.



**Kuva 23.** Päivittäinen auringonsäteily neliometriä kohden Helsingissä pystysuoralle pinnalle.

Kuvasta 23 voidaan nähdä, että kaikki arvot ovat suhteellisen lähellä toisiaan ja etenkin Nasan ja Boxwellin arvot ovat lähes samat. Ilmatieteen laitoksen mitaamat arvot ovat muita pienemmät talvikuukausilla, mutta muita suuremmat kesäkuukausilla. Merkittävin ero on marraskuussa, jossa eroa Nasan ja Boxwellin arvoihin on noin 48 %.

Auringonsäteilyn määrä on sidoksissa auringonkiertoon, joten kuukausittainen keskimääräinen tuotanto erittäin tarkkaan ennustettavissa. Sääolosuhteet vaihtelevat kuitenkin vuosittain, jonka takia mitoitettu tuotanto voi poiketa todellisesta tuotannosta jopa kymmenillä prosenteilla. Tuntikohtainen tuotanto poikkeaa vielä enemmän. Lisäksi virhettä mitoitukseen tuo paikallisen mikroilmaston erityispiirteet. (Tahkokorpi 2016, 17)

Suuren haasteen aurinkopaneelijärjestelmille tuo varjostukset, sillä ne vähentävät tuotantoa usein oletettua enemmän. Varjostuksia syntyy aina, kun jokin objekti tulee aurinkopaneelin eteen. Yleisiä varjostuksen aiheuttajia ovat puut, rakennukset, vuoret, metsät ja pilvet. Tarvittaisiin erillinen simulointiohjelma, jolla järjestelmän sähköinen ja geometrinen suunnittelu voitaisiin optimoida ja nähdä varjostuksen aiheuttamat häviöt. (DGS 2013, 301)

Työn tavoitteiden osalta tuotannon laskenta on riittävän tarkkaa, sillä tarkoituksena oli saada suuntaa antavia arvoja. Todellisuudessa paneelit tuottavat todennäköisesti vähemmän kuin arvioitu, sillä paneelit asennetaan kelluvaan muoviputkeen, jonka asento ei pysy vakaana. Lisäksi lika ja varjostukset vaikuttavat negatiivisesti tuotantoon. Käyttäjän on siis järkevä ylimitoittaa aurinkopaneelien määrä laitteistolle, jotta energiaa saadaan varmuudella talteen silloin, kun aurinko paistaa.

## **7.4 Kehityskohteet**

Kappaleissa 7.1, 7.2 ja 7.3 käytiin läpi olennaisimmat laskentatyökalua koskevat epätarkkuudet, ja kuinka ne voidaan huomioida laskennassa. Turvallisin vaihtoehto on olettaa, että kulutus on todellisuudessa suurempaa kuin mitoitettu ja tuotanto puolestaan pienempää kuin mitoitettu. Lisäksi akkujen osalta on huomioitava lämpötilan vaikutus kapasiteettiin, joten on turvallisinta valita akun kapasiteetti kylmimmän päivän mukaan. Kehityskohteena olisi siis päästävä eroon näistä epätarkkuuksista. Kulutuksen osalta epätarkkuus johtuu lähinnä datan puutteesta, sillä laitteiden todellisesta kulutuksesta ei ole tehty mittauksia kuin

yleisimpien lyhtyjen osalta. Tämä ongelma korjautuu ajan kanssa, kun kulusta mitataan ja tiedot päivitetään laskentatyökaluun.

Tuotannon osalta epätarkkuus johtuu pääosin sähköntuottohyötysuhteen arviosta. Sen oletetaan olevan vakio, vaikka todellisuudessa siihen vaikuttaa muuntajan häviöt, lämpötilan aiheuttamat häviöt, kaapeleiden häviöt, varjostukset, heikosta säteilystä johtuvat häviöt sekä lian ja lumen aiheuttamat häviöt. Nämä häviöt voivat muuttua merkittävästi jo tuntitasolla. On kuitenkin haastavaa arvioida häviöiden vaikutusta ilman erillistä simulointiohjelmää, jotta toteuttamiskelpoisimmaksi vaihtoehdoksi jää sähköntuoton mittaaminen asennuskohdessa. Tällöin saadaan selville, paljon aurinkopaneeli todellisuudessa tuottaa verrattuna nimellistehoon. Näin saataisiin myös selville tarkempi sähköntuottohyötysuhde kuin oletuksena käytetty 80 %. Jotta päästäisiin vielä tarkempaa arviointiin, tulisi sähköntuottohyötysuhde määrittellä joka kuukaudelle erikseen, mikä olisi suhteellisen yksinkertaista lisätä nykyiseen laskentatyökaluun. Tätä tarkempaan arviointiin ei voisi päästä ilman merkittäviä muutoksia koko laskentatyökaluun.

Energiavarastojen osalta olisi mahdollista luoda esimerkiksi taulukko joka akulle, joka sisältäisi akun kapasiteetin eri lämpötiloissa. Laskentatyökalu hakisi sitten kuukausittaista lämpötilaa vastaavan kapasiteetin taulukosta interpoloimalla. Samalla periaatteella voitaisiin hakea akulle myös sen jännite. Taulukkoa ei tarvitsisi tehdä joka akulle erikseen, vaan se tehtäisiin joka akkutyypille, sillä samaa kemiallista reaktiota käyttävien akkujen voidaan olettaa käyttäytyvän samalla tavalla. Tämä tosin tarkoittaa, että akkutyypit on nimettävä tarkemmin, sillä esimerkiksi Li-ion kattaa lukuisia eri sähkökemiallisia reaktioita. Lisäksi on huomioitava, että tällä hetkellä laskentatyökalu sisältää vain kuukausien keskiarvoiset lämpötilat. Työkaluun olisi hyvä lisätä myös kylmimmät vuorokaudet, jotta kapasiteetti saataisiin selville myös ääritilanteissa.

Muita kehityskohteita ovat nimikkeiden määrä ja laskennan hitaus. Tällä hetkellä joka taulukossa on tilaa vain 500 nimikkeelle, koska muuten laskenta olisi turhan hidasta. Syynä hitaudelle on sadat monimutkaiset funktiot, jotka suodattavat alas aukeavia listoja tyyppien mukaan. Syy miksi funktioita on satoja, johtuu siitä, että ohjelma on suunniteltu toimivan myös vanhemmilla Excelin versioilla, jotka eivät tue uusimpia Microsoft Office 365:n

mukana tulevia funktioita. Nämä uudet funktiot pystyvät esimerkiksi etsimään kaikki ainutlaatuiset nimikkeet vaihtelevan kokoisesta listasta yhdellä komennolla, mikä on huomattavasti tehokkaampi menetelmä kuin nykyinen usean funktion ketju, jonka kokoa tulee aina kasvattaa, jos listassa olevien nimikkeiden määrää lisätään. Tehokkaammilla funktioilla nimikkeiden lukumäärä voisi olla jopa 10000 ilman merkittävää laskennan hidastumista.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli etsiä sopivia energianlähteitä ja sähköntuotantomenetelmiä vastaamaan vesiväylien turvalaitteiden energiankulutuksen asettamiin vaatimuksiin nyt ja tulevaisuudessa. Tärkein tavoite oli luoda Excel-pohjainen laskentatyökalu, joka auttaisi oikean energianlähteen valinnassa sovelluskohteen mukaisesti.

Työssä selvitettiin erilaisten poijuihin asennettavien turvalaitteiden sähkönkulutusta markkinoilla olevien laitteiden perusteella. Sähkönkulutus on vaikea arvioida, sillä laitevalmistajat ilmoittavat lähinnä vain maksimitehon, joka saattaa olla reilusti yli todellisen kulutuksen. Tämän lisäksi voi olla vaikeaa arvioida, kuinka pitkään laite on keskimäärin päällä vuoden aikana, jos sen kulutus vaihtelee esimerkiksi valoisuuden mukaan. Vaikka kappaleessa 3.3 esitelty kulutusten yhteenveto antaakin suuntaa kulutusten kokoluokista, jää tarkempi selvitys tämän työn ulkopuolelle.

Energiavarastoja käsiteltiin yleisellä tasolla, mutta rajausta tehtiin yleisimpiin akkuihin, eli lyijy-, nikkeli-, suola- ja litium-ioniakkuihin. Paristoista käsiteltiin vain alkali-mangaaniparistoja ja litiumparistoja. Olennaisimmat tunnusluvut kirjattiin taulukoihin, mikä helpottaa esimerkiksi ominaisenergian ja kustannusten hahmottamisessa. Energiavarastojen valintakriteereitä käytiin myös läpi. Olennaisinta on, että akku valitaan käyttökohteen mukaan ja valitaan sille myös tarpeeksi suuri kapasiteetti. Lähtökohtaisesti tässä kannattaa aina käyttää akkuvalmistajien asiantuntemusta, sillä he tuntevat tuotteensa parhaiten ja pystyvät tarjoamaan kulutusprofiiliin sopivaa akkua.

Sähköntuotantomenetelmiä esiteltiin yleisesti ja rajattiin menetelmät polttokennoihin, aurinkokennoihin ja aaltovoimaan. Kappale esittelee laitteiden käyttökohteita ja ominaisuuksia. Aurinkokenno on ainut suoraan vesiväylien turvalaitteisiin soveltuva sähköntuotantomenetelmä, sillä sen on todettu toimivan yrityksen testeissä ja sen tuotto on suhteellisen varmaa. Polttokennot voivat toimia lähinnä varavoimalähteinä, sillä ne vaativat polttoaineen tankkaamista. Aaltovoimalat ovat puolestaan vasta prototyyppiasteella siinä kokoluokassa, joka tässä työssä oli tarkastelun alla. Niiden tuotto on myös jään takia talvella heikkoa, sillä jää estää aaltojen synnyn.

Laskentatyökalun rakenteessa ja käytettävyydessä päästiin tavoitteisiin. Siihen on helppoa lisätä tietoja ja se on selkeä myös uudelle käyttäjälle. Laskentatyökalun heikkoudet ovat sen liian positiivinen arvio energiavarastojen tasosta, sillä kapasiteetin heikkenemistä lämpötilan ja akun iän takia ei huomioida. Käyttäjän on siis tunnettava akun kapasiteetin vaihtelu eri lämpötiloissa sekä arvioida, paljon kapasiteetistä menetetään vuodessa. Lisäksi tuotanto vaihtelee todellisuudessa paljon ja on vaikeasti ennustettavissa häviöiden, kuten varjostuksen takia. Merellä varjostukset eivät ole suuri ongelma, mutta esimerkiksi kapeiden jokien varsilla ne ovat. Poijussa myös paneelit eivät osoita kaikki etelään, kuten laskentatyökalussa oletetaan, mikä vääristää tuloksia. Lisäksi pyöreässä poijussa, jonka ympäri on asennettu aurinkopaneeleita, on aina joku paneeli osittain varjon puolella.

Työn vaikuttavuuden osalta päästiin työlle asetettuihin tavoitteisiin. Työstä hyöttyy Arctia, Meritaito sekä Väylävirasto, joiden tarpeiden mukaan työ tehtiin. Teoriaosa kertoo tiivistetyt olennaisimmat tiedot ennalta sovituista laitteista, energiavarastoista sekä sähköntuotantomenetelmistä. Työn etuna on myös, että se on kirjoitettu suomeksi, sillä työn sisältö tulee ensisijaisesti kotimaiseen käyttöön. Laskentatyökalu oli työn hyödyllisin osa, sillä se tuo konkreettista apua vesiväylien turvalaitteiden sähkönkulutuksen ja sähköntuotannon arvioimiseen. Kun kulutus ja tuotanto pystytään arvioimaan edes karkealla tasolla, on huomattavasti helpompi valita myös sopiva energiavarasto. Vaikka laskentatyökalussa on vasta vain hyvin rajallinen määrä laitteita, energiavarastoja ja aurinkopaneeleita, on se silti täysin toimiva ohjelma itsessään. Laskentatyökalun kannalta oleellisinta on lisätä laitteita ja päivittää laitteiden tiedot vastaamaan todellista kulutusta. Jatkoa ajatellen laskentatyökalua voisi päivittää kappaleen 7.4 kehityskohteiden perusteella tarkemmaksi ja monipuolisemmaksi. Tämä tosin monimutkaistaisi ohjelmaa, mikä saattaisi vaikuttaa käytettävyyteen ja nostaa kynnystä käyttää ohjelmaa.

## LÄHTEET

Aanderaa. 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.3.2021]. Saatavissa: <https://www.aanderaa.com/productsdetail.php?SmartGuard-36>

Airmar. 2021. 200WX-IPX7 WeatherStation Instrument. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.3.2021]. Saatavissa: <https://www.airmar.com/weather-description.html?id=6000>

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S., Saari, P. 2003. Energia varastoinnin nykytila. Espoo: VTT oy. VTT Tiedotteita 2199. 237 s.

Alonso-García, M.C., Ruizb, J.M., Herrmann, W. 2006. Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays. *Renewable Energy*, volyymi 31, s. 1988-1991. [viitattu 12.6.2021]

Barbir, F. 2013. PEM Fuel Cells Theory and Practice. 2. painos. Elsevier Inc. 518 s. ISBN 978-0-12-387710-9.

Bergström, N. 2020. Sjömärken på plats i farleden till Norvik. Transportnet. [verkkoaineisto]. [viitattu 1.2.2021]. Saatavissa: [https://www.transportnet.se/article/view/715939/sjomarken\\_pa\\_plats\\_i\\_farleden\\_till\\_norvik](https://www.transportnet.se/article/view/715939/sjomarken_pa_plats_i_farleden_till_norvik)

Bosesh. 2021. Smart home security 3g 4g wifi ip camera P2P mini 4G sim card security ip camera. [verkkokauppa]. [viitattu 21.6.2021]. Saatavissa: [https://www.alibaba.com/product-detail/Smart-home-security-3g-4g-wifi\\_60725577378.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Smart-home-security-3g-4g-wifi_60725577378.html)

Boxwell, M. 2019. Solar Irradiance figures. [verkkoaineisto]. [viitattu 16.6.2021]. Saatavissa: <http://www.solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html>

Bretscher, E. 2021. Practical Characteristics of Lithium Iron Phosphate Battery Cells. [verkkoaineisto]. [viitattu 15.6.2021]. Saatavissa: <http://nordkyndesign.com/practical-characteristics-of-lithium-iron-phosphate-battery-cells/>

BroadBit. 2018. Novel Low Cost / High Performance NaCl – Metallic Sodium Batteries. BroadBit Batteries Oy. 32 s. [verkkoaineisto]. [viitattu 26.1.2021]. Saatavissa: <https://soff.se/wp-content/uploads/2018/05/Q.-David-Brown.pdf>

Crompton, T. 2000. Battery Reference Book. 3. painos. Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 774 s. ISBN 07506 4625 X

Dahua Technology. 2021. IPC-HFW4230M-4G-AS-I2. [verkkoaineisto]. [viitattu 21.6.2021]. Saatavissa: <https://www.dahuasecurity.com/products/All-Products/Network-Cameras/Special-Series/4G-Camera/IPC-HFW4230M-4G-AS-I2>

Daniel, C. & Besenhard, J. O. 2011. Handbook of Battery Materials. Weinheim, Saksa: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA. ISBN 978-3-527-32695-2.

Dhanani, S., Hsu, S. Enabling 5G Small Cells with Efficient Power Solutions. [verkkoaineisto]. [viitattu 17.6.2021]. Saatavissa: <https://www.electronicdesign.com/industrial-automation/article/21144106/maxim-integrated-enabling-5g-small-cells-with-efficient-power-solutions>

DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. 2013. Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers. 3. painos. Routledge. 524 sivua. ISBN-13: 978-1-84971-343-6.

EG&G Technical Services. 2004. Fuel Cell Handbook. 7. painos. Morgantown, West Virginia, USA: U.S. Department of Energy. 427 s.

Falcão A.F. de O. & Henriques J.C. 2016. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. Renewable Energy, volyymi 85. s. 1391–1424.

Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report. 2016. s. 19. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.3.2021]. Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>



GSA. 5G Spectrum Bands. [verkkojulkaisu]. [viitattu 4.3.2021]. Saatavilla: <https://gsacom.com/5g-spectrum-bands/>

Hueso, K., Armand, M., Rojo, T. 2013. High temperature sodium batteries: status, challenges and future trends. *Energy Environ Sci* 6, s. 734–749.

Kalogirou, S. 2013. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2. painos. 840 s. ISBN-13: 978-0-12397-270-5.

Khan, K.A., Hossain, M A., Obaydullah, A K M, Wadud, M.A. 2018. PKL Electrochemical Cell and the Peukert's Law. *International Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education*, volyymi 4, numero 2. s. 4219-4227. ISSN 2395-4396.

Kordesch, K., Hacker, V., Gsellmann, J., Cifrain, M., Faleschini, G., Enzinger, P., Fankhauser, R., Ortner, M., Muhr, M. & Aronson, R.R. 2000. Alkaline fuel cells applications. *Journal of Power Sources*, volyymi 86, numero 1-2, s. 162-165.

Ilmatieteen laitos. 2012. Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.5.2021]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>

Lasma, S. 2014. Vesiväylien poijujen ja viittojen valolaitteet - huolto- ohje. Helsinki: Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 3/2014. 26 s. ISBN 978-952-255-404-8.

Liikenne- ja viestintävirasto. 2020. 5G-taajuuksien huutokauppa päätynyt. [tiedote]. [viitattu 4.3.2021]. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/5g-taajuuksien-huutokauppa-paattynyt>

Linden, D. & Reddy, T. 2002. *Handbook of Batteries*. 3. painos. The McGraw-Hill Companies, Inc. 1200 s. ISBN 0-07-135978-8.

Lindfors, A. 2021. Filosofian maisteri; mittausteknologia ja vedenlaatukysymykset, Luode Consulting Oy. Lappeenranta. Sähköpostikeskustelu.

Liu, R.-S., Zhang, L., Sun, X., Liu, H. ja Zhang, J. 2011. Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion, 2 Volume Set. 1. painos. John Wiley & Sons Inc. ISBN 978-3-527-32869-7.

Luque, A. & Hegedus, S. 2011. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2. painos. John Wiley & Sons Inc. 1162 s. ISBN 978-0-470-97470-4.

Nyman, H. 2009. Meriväylien rakennusperintö. Helsinki: Museovirasto. Museoviraston rakennushistorian osaston raportteja 21. 77 s. ISBN 978-951-616-200-6.

Mendoza, S., Liu, J., Mishra, P. ja Fathy, H. K. 2016. Statistical Quantification of Least-Squares Battery State of Charge Estimation Errors. [verkkoaineisto]. [viitattu 15.6.2021]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/304655337\\_Statistical\\_Quantification\\_of\\_Least-Squares\\_Battery\\_State\\_of\\_Charge\\_Estimation\\_Errors](https://www.researchgate.net/publication/304655337_Statistical_Quantification_of_Least-Squares_Battery_State_of_Charge_Estimation_Errors)

Meritaito. 2018. Buoy Product Catalogue. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.2.2021]. Saatavissa: [https://www.arctia.fi/media/esitteet/viitat-ja-pojjut/seahow\\_buoy\\_product\\_catalogue.pdf](https://www.arctia.fi/media/esitteet/viitat-ja-pojjut/seahow_buoy_product_catalogue.pdf)

Mesemar. 2021. MBL150. [verkkoaineisto]. [viitattu 19.2.2021]. Saatavissa: <https://mesemar.com/en/product/mbl150/>

Pavlov, D. 2017. Lead-Acid Batteries: Science and Technology. 2. painos. Elsevier Inc. 707 s. ISBN 978-0-444-59552-2.

Nasa. 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.5.2021]. Saatavissa: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Nguyen, T. 2017. Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1). [verkkoaineisto]. [viitattu 8.3.2021]. Saatavissa: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>

Rekioua, D., Matagne, E. 2012. Optimization of Photovoltaic Power Systems. 1. painos. Springer-Verlag London. 284 s. ISBN: 978-1-4471-2403-0.

Rhinefrank, K., Agamloh, E.B., von Jouanne, A., Wallace, A.K., Prudell, J., Kimble, K., Aills, J., Schmidt, E., Chan, P., Sweeny, B., Schacher, A. 2005. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy. Renewable Energy, volyymi 31. s. 1279-1298.

Rusch, W., Vassalo, K., Hart, G. 2007. Understanding The Real Differences Between Gel And AGM Batteries. [verkkoaineisto]. [viitattu 20.1.2021]. 8 s. Saatavissa: <https://www.baebatteriesusa.com/wp-content/uploads/2019/03/Understanding-The-Real-Differences-Between-Gel-AGM-Batteries-Rusch-2007.pdf>.

Ryynänen, A. 2016. Kokonaistaloudellisin ratkaisu uusien sähköasemien apusähköjärjestelmän varmentamiseksi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampere. 86 s.

Sabik. 2021a. MPV LED. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.2.2021]. Saatavissa: <https://marine.sabik.com/marine-signals/sabik-mpv-led-detail>

Sabik. 2021b. VLB-44X. [verkkoaineisto]. [viitattu 19.2.2021]. Saatavissa: <https://marine.sabik.com/marine-signals/buoy-lanterns/vlb-44-detail>

Sabik. 2021c. VLB-5X-SS. [verkkoaineisto]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavissa: <https://marine.sabik.com/marine-signals/buoy-lanterns/vlb-5x-ss-detail>

Sabik. 2021d. M860. [verkkoaineisto]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavissa: <https://marine.sabik.com/marine-signals/buoy-lanterns/m860-detail>

Sabik. 2021e. LightGuard AIS. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.3.2021]. Saatavissa: <https://marine.sabik.com/marine-signals/ais-products/lightguard-ais-detail>

Seabased AB. 2021. SEABASED technology. [verkkoaineisto]. [viitattu 26.4.2021]. Saatavissa: <https://www.seabased.com/the-technology>

Sealite. 2021a. 5-9NM Stand Alone Marine Lantern (SL-510-SA). [verkkoaineisto]. [viitattu 18.2.2021]. Saatavissa: <https://www.sealite.com/5-9nm-stand-alone-marine-lantern-sl-510-sa/>

Sealite. 2021b. 6-13NM+ Stand Alone Marine Lantern (SL-155). [verkkoaineisto]. [viitattu 18.2.2021]. Saatavissa: <https://www.sealite.com/5-9nm-stand-alone-marine-lantern-sl-510-sa/>

Sealite. 2021c. 5-9NM Solar Marine Lantern (SL-C510). [verkkoaineisto]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavissa: <https://www.sealite.com/5-9nm-solar-marine-lanterns-sl-c510/>

Sealite. 2021d. 3-5NM+ Solar Marine Lantern (SL-75). [verkkoaineisto]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavissa: <https://www.sealite.com/3-5nm-solar-marine-lantern-sl-75/>

Sealite. 2021e. AIS Monitoring. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.3.2021]. Saatavissa: <https://www.sealite.com/ais-monitoring/>

Tahkokorpi, M. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into Kustannus. 208 sivua. ISBN: 978-952-264-663-7.

Takao M. & Setoguchi T. 2006. Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion. Energy Conversion and Management, volyymi 47: numero 15–16. s. 2382-2396.

Toshiba. 2021. Applications. Toshiba Corporation. [verkkosivu]. [viitattu 22.1.2021]. Saatavissa: <https://www.scib.jp/en/application/index.htm>

Vaisala. 2021. WXT530-sarjan säälähetin. [verkkoaineisto]. [viitattu 16.3.2021]. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/fi/products/anturit-ja-muut-mittauslaitteet/saaasemat-ja-anturit/wxt530>

VNa 3.7.2014/520 Valtioneuvoston asetus akuista ja paristoista. [viitattu 23.6.2021]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140520>

Väylävirasto. 2021. Turvalaitteiden käyttökuvaukset. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.2.2021]. Saatavissa: <https://vayla.fi/vaylista/vesivaylat/turvalaitteet/kayttokuvaukset>

Warner, J. 2015. The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design Chemistry, Components, Types and Terminology. Elsevier Inc. 239 s. ISBN: 978-0-12-801456-1.

YSI. 2021. Storm 3 Data Logger. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.3.2021]. Saatavissa: <https://www.yei.com/storm3>