

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Tarvittava konstruktio riittävän energian tuottamiseen
keskimääräisessä Itämeren aallokossa

The necessary construction for generating enough energy
in the average surge of the Baltic Sea

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta 10.5.2019

Miika Wallius

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Miika Wallius

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2018

39 sivua, 17 kuvaa, 15 taulukkoa

Hakusanat: aaltoenergia, aaltovoima, kandidaatintyö, lineaarigeneraattori, tuotantokustannukset, vesiturbiini, virtausenergia

Tässä kandidaatintyössä perehdytään aaltoenergiaa ja virtausenergiaa hyödyntäviin energianmuuntojärjestelmiin tarkoituksena löytää niistä sopivin ratkaisu tarkasteltavaa konstruktiota varten. Käsitellyjä järjestelmiä ovat lineaarigeneraattori, vesiturbiini ja ilmaturbiini.

Työssä esitellään myös olemassa olevien aaltovoimaloiden tehontuottotapoja ja pohditaan niiden soveltuvuutta työn tarkoitukseen. Esiteltyt aaltovoimalat ovat OWC-voimala, vaimennin ja hydraulinen vaimennin.

Lisäksi työssä lasketaan keskimääräisestä Itämeren aallokosta saatava teoreettinen energia ja selvitetään erään prototyyppiasteella olevan lineaarigeneraattorin rakenne ja sähköntuotanto Itämerta vastaavassa ympäristössä.

Lopuksi lasketaan tuotantokustannukset edellä mainitulle lineaarigeneraattorille karkealla tasolla. Samalla pohditaan myös lyhyesti konstruktion valmistettavuutta ja siihen liittyviä arviointikriteerejä.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
2 Energianmuuntojärjestelmät	7
2.1 Turvalaitteen konstruktio	7
2.2 Lineaarigeneraattori.....	7
2.3 Upotettu vesiturbiini.....	8
2.4 Ulkopuolinen vesiturbiini.....	10
2.5 Ilmaturbiini	11
3 Aaltovoimaloiden sovellukset	13
3.1 OWC-voimala	13
3.2 Vaimennin	15
3.3 Kelluva hydraulinen vaimennin	16
4 Aalloista saatava energia	18
5 Generaattori	23
5.1 Vaatimukset ja rakenne	23
5.2 Prototyypigeneraattori	23
6 Tuotanto	29
6.1 Valmistettavuus	29
6.2 Tuotantokustannukset.....	31
7 Johtopäätökset	38
8 Yhteenveto	39
Lähdeluettelo	40

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

AEP	energiantuotanto	Wh, kWh
$CAPEX$	tuotantokustannukset	€
d	syvyys	m
g	putoamiskiihtyvyys	m/s ²
H_s	aallon huipun korkeus	m
L	leveys	m
$LCOE$	tuotantokustannukset	€/kWh
n	elinaika	a
$OPEX$	käyttö- ja ylläpitokustannukset	€
P	teho	W, kW
PC	kapasiteettikerroin	Wh, kWh
r	laskentakorko	%
t	vuosi	-
T_e	aallon huippujen jaksonaika	s
T_p	modaalinen periodi	s

Kreikkalaiset aakkoset

α	korjauskerroin	-
γ	huipputekijä	-
η	hyötysuhde	-
λ	aallonpituus	m
ρ	tiheys	kg/m ³

Dimensiottomat luvut

AF	saatavuuskerroin
CF	kapasiteettikerroin

Alaindeksit

5–12 kuukaudet huhtikuusta joulukuuhun

h	tunti
kk	kuukausi
t	teoreettinen, vuotuinen
tod	todellinen

Lyhenteet

CEC	Current Energy Converter
DFM	Design for Manufacturability
OWC	Oscillating Water Column
WEC	Wave Energy Converter

1 JOHDANTO

Meret ovat merkittävä uusiutuvan energian lähde. Tämä energia sitoutuneena eri muodoiksi, kuten aalto-, liike- ja lämpöenergiaksi. Tässä työssä keskitytään aalto- ja virtausenergiaan.

Aaltoenergia on epäsuoraa aurinkoenergiaa. Aurinko säteilee maapallolle epätasaisesti, jonka seurauksena ilmaan syntyy lämpötilaeroja. Tämä saa puolestaan aikaan paine-erovoiman, joka synnyttää tuulet. Tuulet saavat aallot liikkeelle, jolloin niihin sitoutuu liike-energiaa. Aaltovoiman tarkoituksena on muuntaa tämä liike-energia sähköksi. Virtausenergia puolestaan tarkoittaa merivirtausten kuljettaman fluidin liike-energiaa, jota voidaan muuntaa sähköksi esimerkiksi vesiturbiinin avulla.

Tämän työn tavoitteena on esitellä erään kelluvan turvalaitteen konstruktio, johon tulisi yhdistää jokin aaltovoimaa hyödyntävä energianmuuntojärjestelmä akkujen lataamista varten. Lisäksi työssä arvioidaan tuotantokustannuksia karkealla tasolla eräälle prototyypitasolla olevalle lineaarigeneraattorille.

Toisessa kappaleessa esitellään tutkittavan turvalaitteen konstruktio, ja sen tärkeimmät vaatimukset. Lisäksi kappaleessa pohditaan eri energianmuuntojärjestelmien sovittamista osaksi tätä konstruktiota.

Kolmannessa kappaleessa esitellään aaltovoimaloita, joissa hyödynnetään työn kannalta potentiaalisia tehontuottotapoja.

Neljännessä kappaleessa selvitetään, onko mahdollista edes teoriassa tuottaa tarpeeksi energiaa keskimääräisessä Itämeren aallokosta. Tuloksia hyödynnetään viidennessä kappaleessa esiteltävän lineaarigeneraattorin arviointiin.

Kuudennessa kappaleessa arvioidaan edellä mainitun lineaarigeneraattorin tuotantokustannuksia suuremman laitoksen tietojen pohjalta. Lisäksi kustannusten jakautumista käsitellään eri eräkoille ja valmistettavuutta pohditaan lyhyesti.

Työn luettuaan lukijan pitäisi ymmärtää aaltovoiman tuomat haasteet ja mahdollisuudet pienen kapasiteetin projektissa. Tuotantokustannukset kertovat vain pienen osan kaikista muista asioista, jotka tulee ottaa huomioon uutta tuotetta suunniteltaessa.

2 ENERGIANMUUNTOJÄRJESTELMÄT

Tässä kappaleessa käsitellään energianmuuntojärjestelmiä, jotka sopivat tarkasteltavan kelluvan turvalaitteen konstruktion. Aaltovoimalat käyttävät tavallisesti energianmuuntoon hydraulista järjestelmää, lineaarigeneraattoria, vesiturbiinia tai ilmaturbiinia, minkä vuoksi tähän kappaleeseen valittiin esimerkeiksi kyseisiä järjestelmiä.

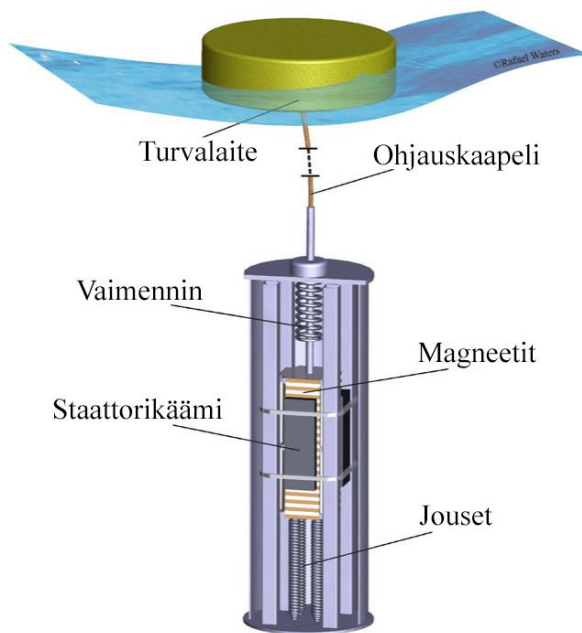
2.1 Turvalaitteen konstruktio

Tarkastelussa oleva turvalaite on sisähalkaisijaltaan 500 mm ja sen vuotuinen energiankulutus on 500–1000 Ah, riippuen siitä, kuinka pitkään sitä pidetään meressä vuoden aikana. Turvalaite kelluu meressä heiluen aaltojen tahtiin, ja se on ankkuroitu meren pohjaan. Turvalaite saa virran 220 Ah akusta, ja pystyy toimimaan yhdellä latauksella yhtäjaksoisesti noin 3 kuukautta kesäkäytössä. Tarkoituksena olisi löytää energiantuottojärjestelmä, joka tuottaisi tarpeeksi energiaa akkujen lataamiseen Itämeren aallokossa.

2.2 Lineaarigeneraattori

Tehon tarpeen, yksinkertaisuuden ja koon puolesta konstruktion sopisi hyvin tyyppilinen yksirunkoinen lineaarigeneraattori. Lineaarigeneraattori koostuu magneeteista ja staattorikäämmistä. Magneetit liikkuvat staattorikäämmien sisällä aaltojen liikkeen mukaan, jolloin käämeihin indusoituu magneettikentän muuttuessa vaihtojännite, joka vakavoitetaan akkuihin sopivaksi. Lineaarigeneraattori voi olla kiinnitettynä joko meren pohjaan tai itse turvalaitteeseen. Lineaarigeneraattorin tärkeimmät komponentit on esitetty kuvassa 1. Lineaarigeneraattori luokitellaan WEC-laitteeksi (Wave Energy Converter – WEC), koska se muuntaa aaltojen edes takaisen liikkeen sähköenergiaksi.

Eräs kaupallisesti valmistettu lineaarigeneraattoria hyödyntävä aaltovoimala on ruotsalaisen Seabased AB:n kehittämä Seabased WEC S2 (Seabased AB 2019), joka muistuttaa pääosin kuvan 1 esimerkklaitetta.



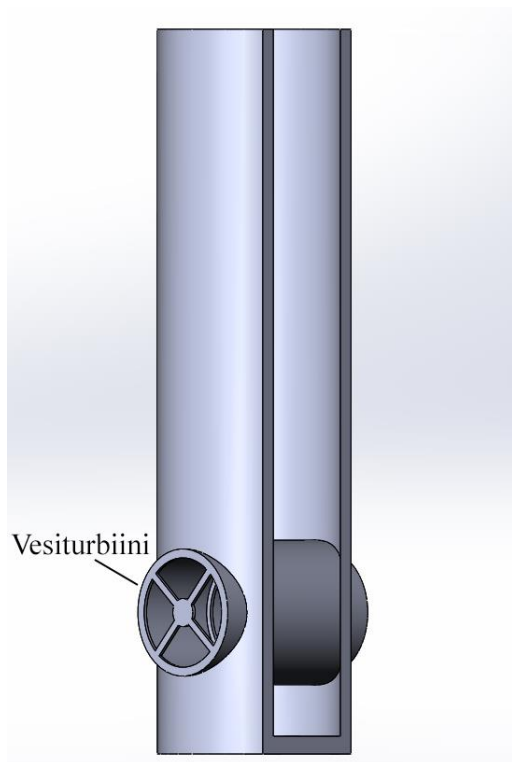
Kuva 1. Lineaarigeneraattorin tärkeimmät komponentit ja esimerkkikiinnitys. (mukaiillen Li et al. 2015, 248)

2.3 Upotettu vesiturbiini

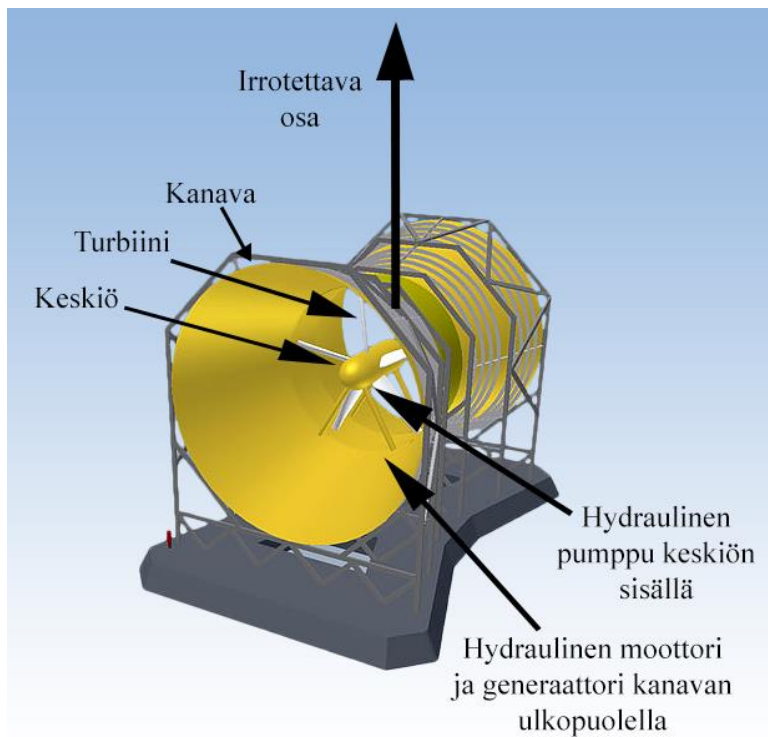
Toinen mahdollinen vaihtoehto olisi hyödyntää vesiturbiineja, jotka ovat jo laajassa käytössä olevaa teknologiaa. Haasteena olisi kuitenkin kehittää konstruktion sopiva vesiturbiini ja varmistaa rakenteen lujuus, sillä vesiturbiinin asentaminen vaatii reiän poraamista turvalaitteen kylkeen. Kuvassa 2 on visualisoituna, kuinka tämä voisi käytännössä tapahtua. Kuvassa ei ole näkyvissä generaattoria, mutta sen pystyisi sijoittamaan turvalaitteen kuoren sisälle. Vesiturbiini luokitellaan CEC-laitteeksi (Current Energy Converter – CEC), koska se muuntaa fluidin liike-energian turbiinin pyörimisenergiaksi.

Eräs kaupallisesti valmistettu erittäin yksinkertainen vesiturbiini on Lunar Energyn kehittämä Rotech Tidal Turbine (kuva 3), joka olisi helposti skaalattavissa pienempään kokoon, ja siten yhdistettävissä turvalaitteeseen. Siinä turbiini pyörittää hydraulista pumppua, joka ajaa kanavan ulkopuolella olevaa moottoria. Tämä moottori puolestaan pyörittää generaattoria. (Røkke & Nilssen 2013, 338)

Vesiturbiinin käytännön ongelmia ovat likaantuminen, liikkuvien osien suuri rasitus merenalaisissa olosuhteissa ja toiminnan riippuvuus merivirtausten suunnasta.



Kuva 2. Havainnekuva, kun vesiturbiini on upotettuna turvalaitteen konstruktion. Seinämä on läpileikattu.

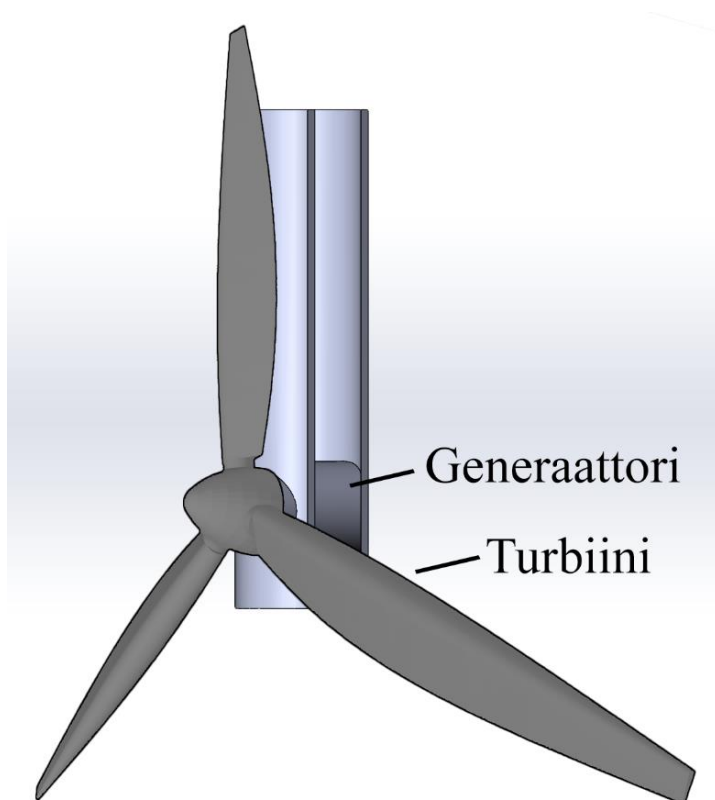


Kuva 3. Lunar Energy'n Rotech Tidal Turbine vesiturbiinin tärkeimmät komponentit. (mukaillen REUK 2019)

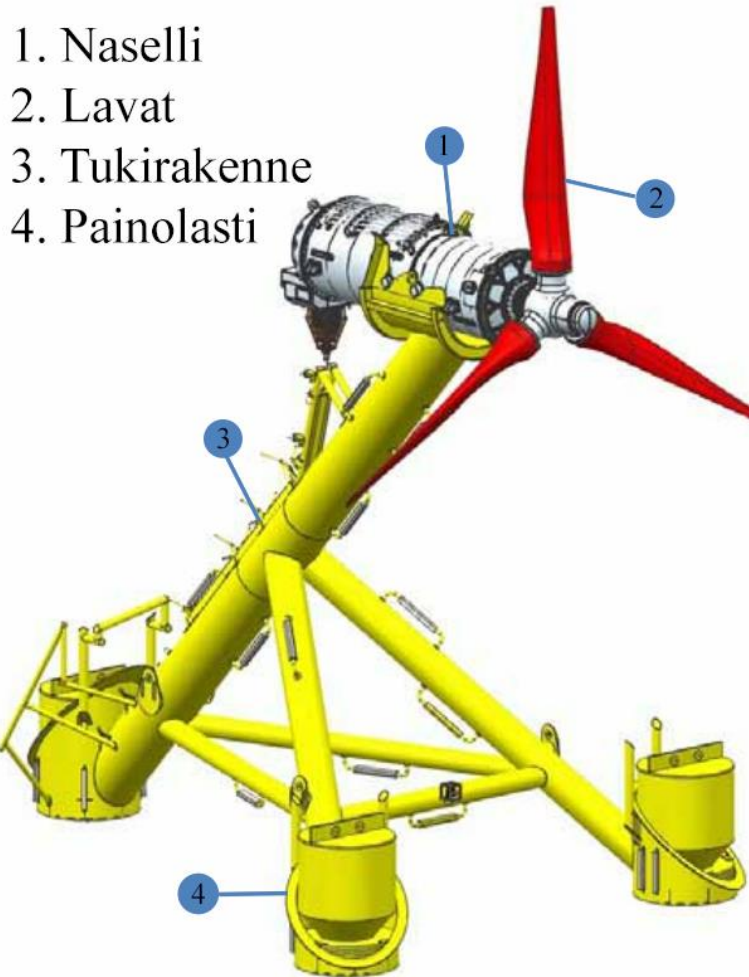
2.4 Ulkopuolinen vesiturbiini

Vesiturbiini voi olla myös turvalaitteen ulkopuolella, jolloin se pyörittäisi turvalaitteen sisällä olevaa generaattoria. Tämä vaatisi sen, että turvalaitteen upoksissa oleva osa olisi tarpeeksi pitkä, jotta turbiinin pitkät lavat mahtuisivat pyörimään meren pinnan alla. Kuvassa 4 on visualisoituna, miltä rakenne voisi tällöin näyttää. Olisi myös mahdollista, että kuvan lapoja pienemmätkin lavat riittäisivät tuottamaan tarpeeksi energiaa.

Eräs kaupallisesti valmistettu kolmilapainen vesiturbiini on ANDRITZ HYDRO Hammerfestin kehittämä HS 1000 (kuva 5), jonka kaltaista teknologiaa olisi mahdollista skaalata pienempään kokoon ja yhdistää siten turvalaitteeseen. Kyseisessä laitteessa turbiini pyörittää generaattoria suoravedolla. (Røkke & Nilssen 2013, 338)



Kuva 4. Havainnekuva, kun vesiturbiini on turvalaitteen ulkopuolella. Seinämä on läpileikattu.

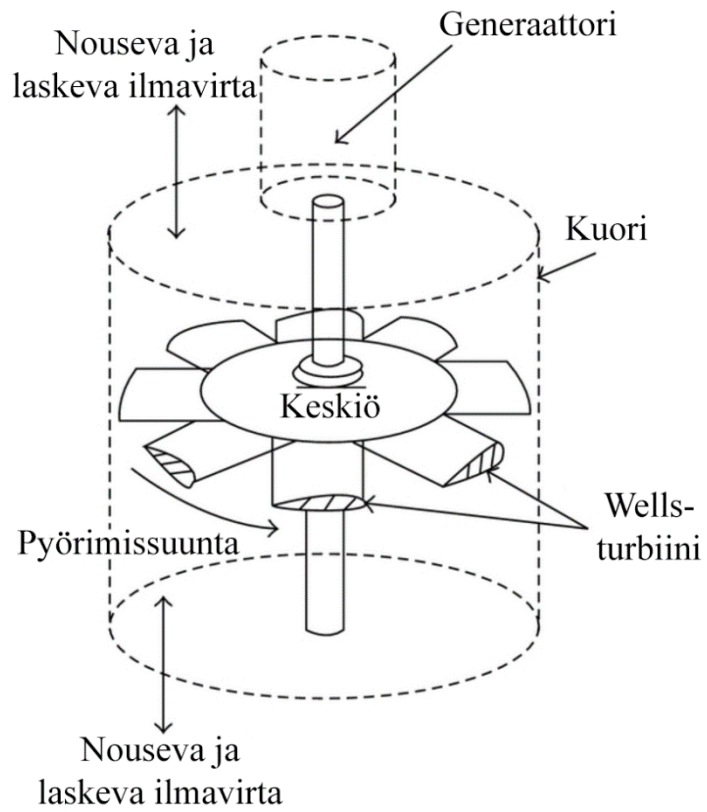


Kuva 5. ANDRITZ HYDRO Hammerfestin kehittämä HS 1000 vesiturbiini ja sen muut osat. (mukaillen ANDRITZ HYDRO Hammerfest 2019)

2.5 Ilmaturbiini

Kolmas mahdollinen vaihtoehto olisi hyödyntää ilmaturbiinia, joka on aaltovoimaloissa jo käytössä olevaa teknologiaa. Ilmaturbiini toimii samalla periaatteella kuin vesiturbiini, eli ilmavirtaus pyörittää turbiinia ja turbiini pyörittää generaattoria. Ilmavirtaus syntyy, kun meren pinta nousee ja laskee kammion sisällä, jonka päässä on ilmaturbiini. Kammio on siis avoin ulkoilmaan ja merenpohjaan päin. Aaltovoimaloissa yleisesti käytössä oleva virtauksen tulosuunnasta riippumaton Well-turbiini on esitelty kuvassa 6.

Ilmaturbiinin yhdistäminen osaksi turvalaitteen konstruktiota vaatisi merkittäviä rakenteellisia muutoksia yksinkertaiseen sylinterimuotoon nähden, mikä vähentäisi turvalaitteen toimintavarmuutta ja lisäisi rakenteen monimutkaisuutta. Jos tekniset ja rakenteelliset haasteet saadaan selvitettyä, voi ilmaturbiini olla hyvinkin toimiva ratkaisu.



Kuva 6. Wells-turbiinin tärkeimmät komponentit. (mukaiillen Takao & Setoguchi 2012, 2)

3 AALTOVOIMALOIDEN SOVELLUKSET

Maailman ensimmäinen aaltovoimalan patentti rekisteröitiin vuonna 1799 Pariisissa. Yli 200 vuoden kehitystyön jälkeen aaltovoimaloiden patenteja on kertynyt yli 1500 kappaletta. Syy tähän on uusiutuvan energian kasvava trendi maailmalla. (Rhinefrank et al. 2005, 1280)

Aaltovoimalat voidaan jakaa niiden sijainnin, sovellustyyppin ja tehontuottotavan (Power Take Off – PTO) mukaan eri luokkiin. Tässä työssä kuitenkin sijainti ja sovellustyyppi pysyvät vakioina, joten ainoastaan tehontuottotavat ovat tarkastelun alla.

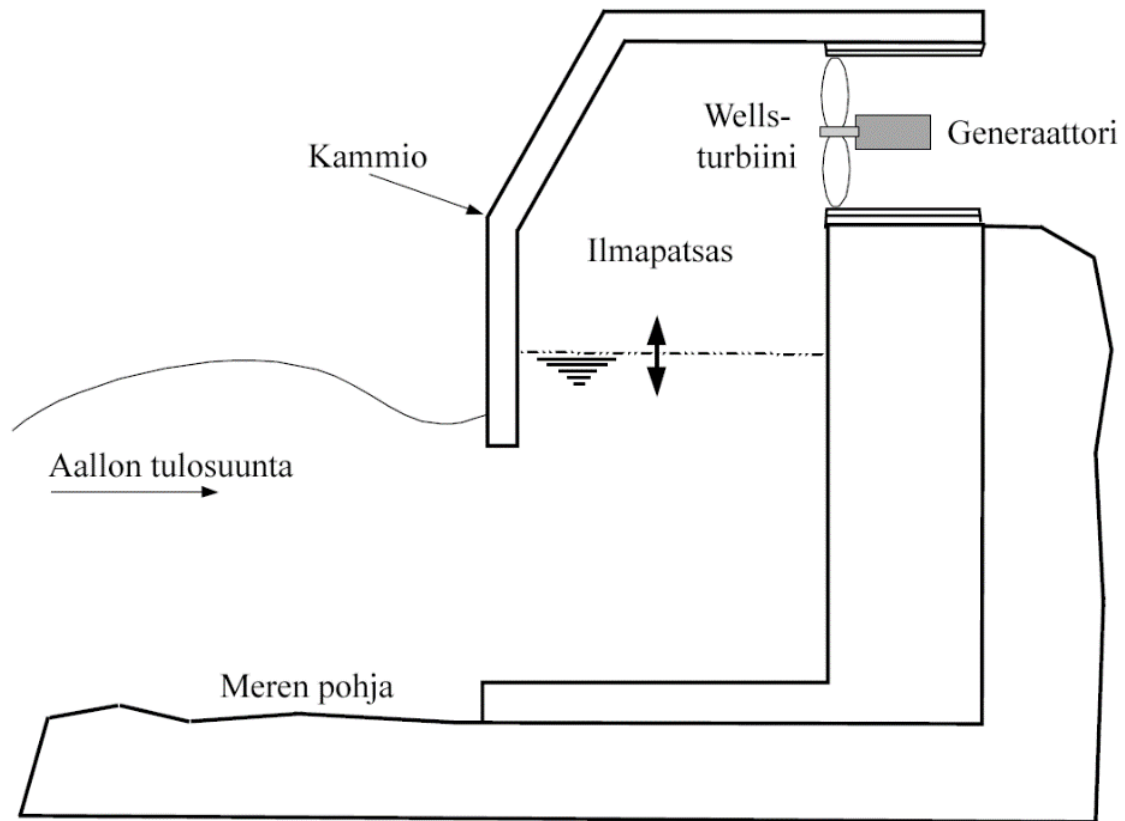
Aaltovoimalat voidaan sijoittaa rannalle, merelle rannan läheisyyteen tai syvälle merelle. Energiatiheys on suurin syvällä merellä ja pienin rannalla, mutta toisaalta syvällä merellä on myös vaativimmat olosuhteet näistä kolmesta vaihtoehdosta. Rannalle asennettavat voimalat ovat puolestaan helpompia asentaa ja huoltaa kuin muut, mutta ne tuottavat myös vähemmän energiaa. Syvällä merellä tarkoitetaan merialuetta, jossa meren syvyys on yli puolet aallonpituudesta. (Rhinefrank et al. 2005, 1281)

Tämän kappaleen tavoitteena on esitellä työn aiheen kannalta oleellimmat tehontuottotavat ja niitä hyödyntävät aaltovoimalat.

3.1 OWC-voimala

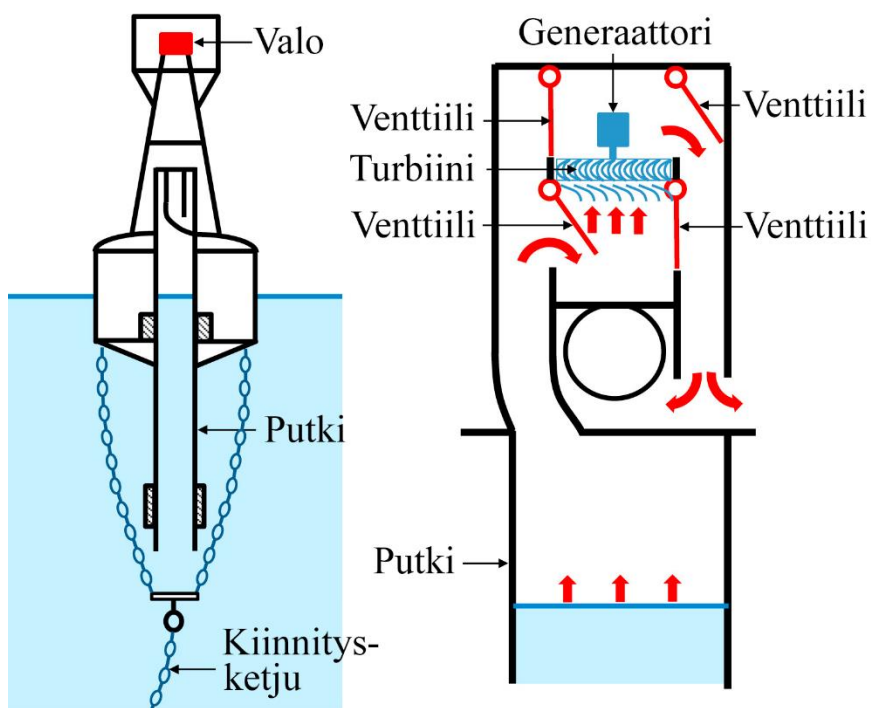
OWC-voimalat (Oscillating Water Column – OWC) asennetaan yleensä rantaviivalle. OWC-voimalassa on osittain upoksissa oleva ontto ilmakammio, joka avautuu merelle pinnan alla. Aalto kulkeutuu ilmakammioon nostaen veden pintaa. Tällöin ilma kammiossa ohjautuu turbiinin läpi. Kun aalto laskeutuu, ilma vetäytyy takaisin ja kulkee uudelleen turbiinin läpi. Wells-turbiini, joka on riippumaton ilman tulosuunnasta, on tunnetuin turbiini tällaiselle sovellukselle. Kuvassa 7 OWC-voimalan toimintaperiaate näkyy paremmin.

Maailman ensimmäinen kaupallinen OWC-voimala on Wavegenin LIMPET 500, joka on asennettu Skotlannin Islay-saaren rantakalliolle. Se tuottaa 500 kW:n huipputehon, joka riittää noin 400:lle saaren kotitaloudelle. Tämä järjestelmä on tuottanut sähköä Iso-Britannian sähköverkkoon marraskuusta 2000 lähtien. (Rhinefrank et al. 2005, 1281)



Kuva 7. OWC-voimalan toimintaperiaate (mukaillen Rhinefrank et al. 2005, 1281)

OWC-voimalaa on kokeiltu myös pienemmässä mittakaavassa, kuten eräässä Y. Masudan kehittämässä kelluvassa navigointilaitteessa (kuva 8). Kyseistä laitetta on valmistettu yli 1000 kappaletta, ja osa niistä on ollut toiminnassa jo yli 30 vuotta. Laite ei hyödynnä Wells-turbiinia, vaan perinteistä yksisuuntaista turbiinia ja monimutkaista venttiilijärjestelmää. Tämän takia sitä on vaikea huoltaa ja lisäksi mahdotonta skaalata suuremmaksi, sillä venttiileistä tulisi liian painavia. Kyseistä laitetta olisi kuitenkin mahdollista kehittää yksinkertaisemmaksi Wells-turbiinin avulla. (Takao & Setoguchi 2006, 2383–2384)



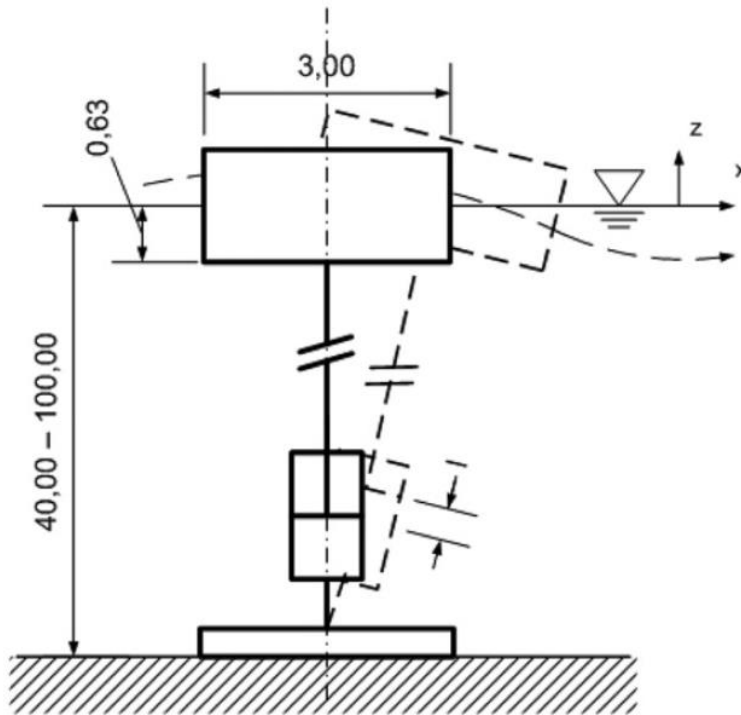
Kuva 8. Kelluvan navigointilaitteen tärkeimmät komponentit. Oikealla näkyy energianmuuntojärjestelmä tarkemmin. Sininen vaakasuora viiva kuvaa merenpintaa ja punaiset nuolet ilman kulkusuuntaa. (mukaiillen Falcão & Henriques 2016, 1393)

3.2 Vaimennin

Vaimennin (Point Absorber) pystyy hyödyntämään aaltojen energian niiden tulosuunnasta riippumatta. Ne voivat olla joko täysin tai osittain upoksissa. Täysin upoksissa olevan vaimentimen liike syntyy paineen vaihtelusta, kun aalto ylittää kellukkeen. Aallonharjalla kelluke painuu ensin alas ja aallonpohjalla se nousee takaisin pintaan. Osittain upoksissa oleva vaimennin puolestaan mukailee aaltojen liikettä merenpinnalla. Kellukkeen liikkeessa ohjauskaapeli siirtää liikkeen lineaarigeneraattoriin. Kuvassa 9 voidaan nähdä vaimentimen leikkauskuva ja toimintaperiaate sekä esimerkkilaitoksen suuntaa antavat dimensiot.

Vaimentimet tuottavat tyypillisesti vähemmän energiaa kuin muut aaltovoimalatyypit, mutta niitä voidaan asentaa useita muodostamaan aaltovoimapuisto, jonka kapasiteettia on helppoa kasvattaa. Vaimentimet ankkuroidaan merenpohjalla olevaan betoniseen perustukseen. Kelluke ja vaimennin yhdistetään ketjun tai kaapelin avulla toisiinsa,

kuten kuvassa 9. Vaimennin olisi mahdollista asentaa myös kellukseen sisälle. (Falcão 2009, 906–907)

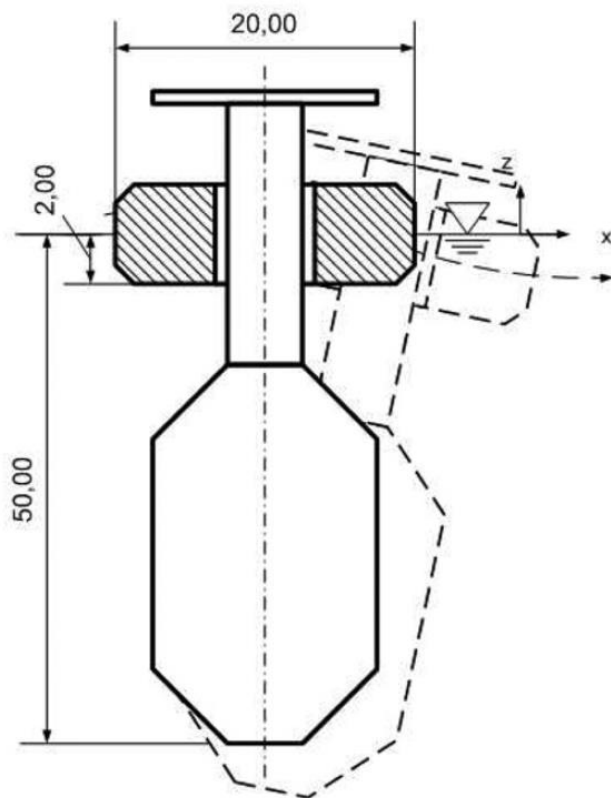


Kuva 9. Yksinkertaistettu leikkauskuva vaimentimesta. Yksiköt ovat metreissä. (Babarit et al. 2012, 52)

3.3 Kelluva hydraulinen vaimennin

Kelluva hydraulinen vaimennin koostuu aksisymmetrisestä, automaattisesti tasapainottavasta kaksirunkoisesta järjestelmästä, joka liikkuu aaltojen tahtiin. Siinä lyhyempi kelluke liukuu pitkin pitempää kelluketta, jolloin hydraulinen tehontuottojärjestelmä tuottaa energiaa. Laitteen toiminta perustuu näiden kahden rungon väliseen suhteelliseen liikkeeseen. Hydraulinen vaimennin asennetaan avomerelle samalla tapaa kuin tavallinen vaimennin, ja se ankkuroidaan pohjaan kaapelin tai ketjun avulla. (Babarit et al. 2012, 54)

Kuvassa 10 voidaan nähdä hydraulisen vaimentimen leikkauskuva ja toimintaperiaate sekä esimerkkilaitoksen suuntaa antavat dimensiot.



Kuva 10. Yksinkertaistettu leikkauskuva hydraulisesta vaimentimesta. Yksiköt ovat metreissä.
(Babarit et al. 2012, 54)

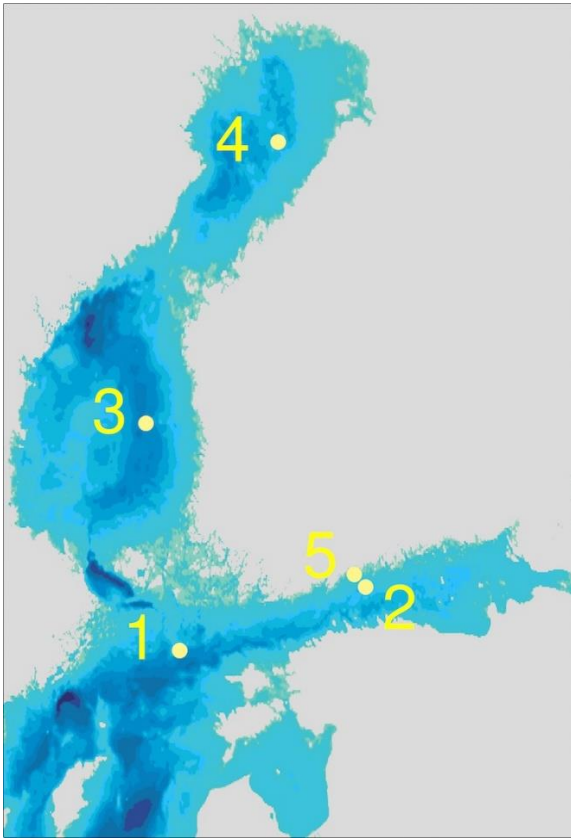
4 AALLOISTA SAATAVA ENERGIA

Tässä osuudessa lasketaan keskimääräinen aallonpituus ja aalloista saatava teoreettinen energia kaikissa mittapisteissä. Itämerellä on viisi Suomen Ilmatieteen laitoksen operoimaa kelluvaa mittalaitetta, jotka mittaavat aallokon tulosuunnan, veden lämpötilan, aallonkorkeuden, aallokon tulosuunnan hajonnan ja modaalisen periodin. Ne sijaitsevat Suomenlinnalla, Perämerellä, Pohjoisella Itämerellä, Selkämerellä ja Suomenlahdella. Mittauksia kerätään 30 minuutin välein. Mittapisteiden tarkat sijainnit leveys- ja pituusasteiden mukaan sekä mittausajankohdat on kirjattu taulukkoon 1. Meren keskisyvyys mittapisteiden läheisyydessä on laskettu arviolta 40 km² alueelta Suomen Liikenneviraston syvyyskarttojen pohjalta, ja se on myös kirjattu taulukkoon 1. Kuvassa 11 on tarkemmin havainnollistettu poijujen sijainnit tunnuksien mukaan.

Taulukko 1. Meren syvyys mittapisteiden läheisyydessä (Liikennevirasto 2018), mittausajankohdat ja mittapisteiden sijainnit leveys- ja pituusasteiden mukaan (Ilmatieteen laitos 2018).

	Suomenlahti	Selkämeri	Pohjoinen Itämeri	Perämeri	Suomenlinna
Tunnus	2	3	1	4	5
d [m]	-59,14	-114,05	-85,68	-68,56	-7,96
leveysaste [°]	59,96500	61,80010	59,25000	64,68410	60,12333
pituusaste [°]	25,23500	20,23267	20,99683	23,23800	24,97283
aloitus pvm.	1.1.2010	28.5.2011	1.1.2010	30.5.2012	4.5.2016
lopetus pvm.	19.11.2018	19.11.2018	19.11.2018	19.11.2018	19.11.2018

Mittalaitteiden keräämästä datasta tarvittavat tiedot ovat aallonkorkeus ja modaalinen periodi. Niitä tarvitaan aallonpituuden ja aalloista saatavan teoreettisen energian selvittämiseen. Aallonkorkeuksien ja modaalisen periodin keskiarvot kuukausittain on kirjattu taulukoihin 2 ja 3. Perämerellä ja Suomenlinnalla osa kuukausista on tyhjiä jäätikön takia. On myös huomioitavaa, että myös Suomenlahdella, Selkämerellä ja Pohjoisella Itämerellä meri on usein ensimmäiset 1–4 kuukautta jäässä. Tämän takia tammikuun alusta huhtikuun loppuun ei mittalaitteilla ole täyttä toimintavarmuutta. Kaikkiin tämän kappaleen laskuihin on käytetty Microsoft Excel-työpöytäsovellusta.



Kuva 11. Aaltopoijujen sijainnit Itämerellä. (Ilmatieteen laitos 2018)

Taulukko 2. Mittapisteiden aallonkorkeudet kuukausittain. (Ilmatieteen laitos 2018)

Kuukausi	Suomenlahti, H_s [m]	Selkämeri, H_s [m]	Pohjoinen Itämeri, H_s [m]	Perämeri, H_s [m]	Suomenlinna, H_s [m]
tammikuu	1,07	1,39	1,65		
helmikuu	1,32	1,24	1,40		
maaliskuu	0,57	1,02	1,12		
huhtikuu	0,63	0,69	0,92		0,38
toukokuu	0,49	0,62	0,68	0,52	0,18
kesäkuu	0,60	0,61	0,79	0,45	0,27
heinäkuu	0,58	0,63	0,77	0,48	0,24
elokuu	0,67	0,83	1,00	0,75	0,32
syyskuu	0,89	1,02	1,28	0,89	0,37
lokakuu	1,04	1,22	1,55	0,98	0,44
marraskuu	1,18	1,33	1,69	1,23	0,53
joulukuu	1,39	1,61	2,06	1,50	0,70

Taulukko 3. Mittapisteiden aaltojen modaaliset periodit kuukausittain. (Ilmatieteen laitos 2018)

Kuukausi	Suomenlahti, T_p [s]	Selkämeri, T_p [s]	Pohjoinen Itämeri, T_p [s]	Perämeri, T_p [s]	Suomenlinna, T_p [s]
tammikuu	5,01	5,26	5,99		
helmikuu	5,24	5,03	5,81		
maaliskuu	4,34	4,63	5,09		
huhtikuu	4,71	4,09	4,88		4,06
toukokuu	4,42	3,97	4,52	3,74	3,79
kesäkuu	4,62	3,96	4,80	3,60	3,73
heinäkuu	4,54	4,00	4,65	3,66	3,99
elokuu	4,63	4,42	5,14	4,17	3,93
syyskuu	4,82	4,70	5,46	4,33	4,11
lokakuu	4,97	5,05	5,89	4,47	4,33
marraskuu	5,19	5,22	6,19	4,95	4,13
joulukuu	5,65	5,70	6,67	5,49	4,64

Merensyvyys on suurempi kuin puolet aallonpituudesta puhutaan syvästä merestä. Syvän meren aalloista hyödynnettävä teoreettinen energia P_t saadaan seuraavasti (Su et al. 2017, 816)

$$P_t = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (1)$$

jossa ρ veden tiheys [kg/m^3]

g normaali putoamiskiihtyvyys [m/s^2]

T_e aallon huippujen jaksonaika [s]

H_s aallon huipun korkeus [m]

Yhtälön 1 muuttuja T_e määritetään aallon modaalisen periodin T_p avulla käyttäen korjauskerrointa α seuraavasti (Su et al. 2017, 816)

$$T_e = \alpha T_p \quad (2)$$

jossa α korjauskerroin

Aallonpituus λ syvässä meressä saadaan puolestaan seuraavasti (Xu et al. 1999, 129)

$$\lambda = 0,86 \cdot \frac{g}{2\pi} T_p^2 \quad (3)$$

Oletetaan Itämeren veden tiheydeksi 1025 kg/m^3 , putoamiskiihtyvyydeksi $9,81 \text{ m/s}^2$ ja käytetään korjauskerrointa 0,9. Korjauskerroin on saatu standardi JONSWAP-spektristä huipputekijän γ arvolla 3,3. (Su et al. 2017, 816) Lasketaan esimerkkinä teoreettinen teho metriä kohden ja aallonpituus Suomenlahdella tammikuussa taulukoiden 2 ja 3 arvojen mukaisesti yhtälöillä (1) ja (3). Kirjataan loput arvot taulukoihin 4 ja 5.

$$P_t = \frac{1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2}{64\pi} \cdot (1,07 \text{ m})^2 \cdot 0,9 \cdot 5,01 \text{ s} = 2507,97 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

$$\approx 2,51 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

$$\lambda = 0,86 \cdot \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{2\pi} \cdot (5,01 \text{ s})^2 = 33,65 \text{ m}$$

Taulukko 4. Mittapisteiden aallonpituudet kuukausittain.

Kuukausi	Suomenlahti, λ [m]	Selkämeri, λ [m]	Pohjoinen Itämeri, λ [m]	Perämeri, λ [m]	Suomenlinna, λ [m]
tammikuu	33,65	37,08	48,15		
helmikuu	36,85	34,03	45,39		
maaliskuu	25,34	28,76	34,77		
huhtikuu	29,83	22,47	31,92		22,11
toukokuu	26,23	21,19	27,37	18,75	19,27
kesäkuu	28,69	21,08	31,00	17,43	18,71
heinäkuu	27,74	21,51	29,01	17,95	21,40
elokuu	28,79	26,29	35,46	23,31	20,74
syyskuu	31,20	29,63	40,08	25,12	22,65
lokakuu	33,17	34,24	46,53	26,79	25,19
marraskuu	36,22	36,60	51,37	32,90	22,90
joulukuu	42,94	43,70	59,70	40,47	28,96

Taulukko 5. Mittapisteiden teoreettiset tehot leveysmetriä kohden kuukausittain.

Kuukausi	Suomenlahti, P_t [kW/m]	Selkämeri, P_t [kW/m]	Pohjoinen Itämeri, P_t [kW/m]	Perämeri, P_t [kW/m]	Suomenlinna, P_t [kW/m]
tammikuu	2,51	4,49	7,18		
helmikuu	4,01	3,43	5,00		
maaliskuu	0,63	2,11	2,82		
huhtikuu	0,83	0,85	1,81		0,26
toukokuu	0,47	0,67	0,92	0,45	0,06
kesäkuu	0,75	0,64	1,33	0,32	0,12
heinäkuu	0,67	0,70	1,21	0,38	0,10
elokuu	0,93	1,34	2,29	1,03	0,18
syyskuu	1,67	2,14	3,94	1,51	0,25
lokakuu	2,37	3,32	6,22	1,88	0,37
marraskuu	3,19	4,09	7,81	3,30	0,51
joulukuu	4,79	6,54	12,44	5,45	1,01

Taulukon 1 meren syvyyden ja taulukon 4 aallonpituuden arvoista voidaan nähdä, että Suomenlinna ei täytä syvän meren vaatimusta minkään aktiivisen kuukauden kohdalla. Kaikki muut mittapisteet puolestaan täyttävät vaatimuksen jopa joulukuun aikana, joka on kuukausista aktiivisin. Suomenlinnan aallonpituuden ja teoreettisen tehon arvot eivät täten ole vertailukelpoisia muiden mittapisteiden tulosten kanssa.

Lasketaan teoreettisen tehon vuotuiset keskiarvot mittapisteissä taulukon 5 perusteella. Lasketaan esimerkkinä teoreettisen tehon vuotuinen keskiarvo Suomenlahdella. Vertailun vuoksi lasketaan myös keskiarvot mittapisteille olettaen, että meri on kuukaudet 1–4 täysin jäässä. Kirjataan arvot taulukkoon 6.

$$\bar{P}_t = (2,51 + 4,01 + 0,63 + 0,83 + 0,47 + 0,75 + 0,67 + 0,93 + 1,67 + 2,37 + 3,19 + 4,79) \frac{\text{kW}}{\text{m}} / 12 = 1,90 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

Taulukko 6. Teoreettisen tehon vuotuiset keskiarvot leveysmetriä kohden mittapisteissä.

	Suomenlahti	Selkämeri	Pohjoinen Itämeri	Perämeri	Suomenlinna
P_t [kW/m]	1,90	2,53	4,41	1,19	0,24
$P_{t,5-12}$ [kW/m]	1,24	1,62	3,01	1,19	0,22

5 GENERAATTORI

Tässä kappaleessa käsitellään generaattoreita, jotka täyttävät kappaleessa 2.1 esitellyn turvalaitteen vaatimukset.

5.1 Vaatimukset ja rakenne

Generaattorin vaatimukseksi asetetaan jännitetaso, jota generaattorin tulisi pystyä ylläpitämään. Generaattorin on tarkoitus ladata yhtä 12 voltin akkua, joten määritetään 14 voltia latausjännitteeksi aallonkorkeuden ollessa 1 metri ja modaalisen periodin ollessa 3 sekuntia. Toinen vaatimus on 220 ampeeritunnin sähkön tuotto kuukaudessa. Kolmas vaatimus on laitteen halkaisija, joka saa olla maksimissaan 500 mm.

5.2 Prototyypigeneraattori

Erään vaatimukset täyttävän prototyypigeneraattorin dimensiot on esitetty taulukossa 7 sekä kuvissa 12, 13 ja 14.

Taulukko 7. Prototyypigeneraattorin dimensiot (mukaiillen Rhinefrank et al. 2005, 1286)

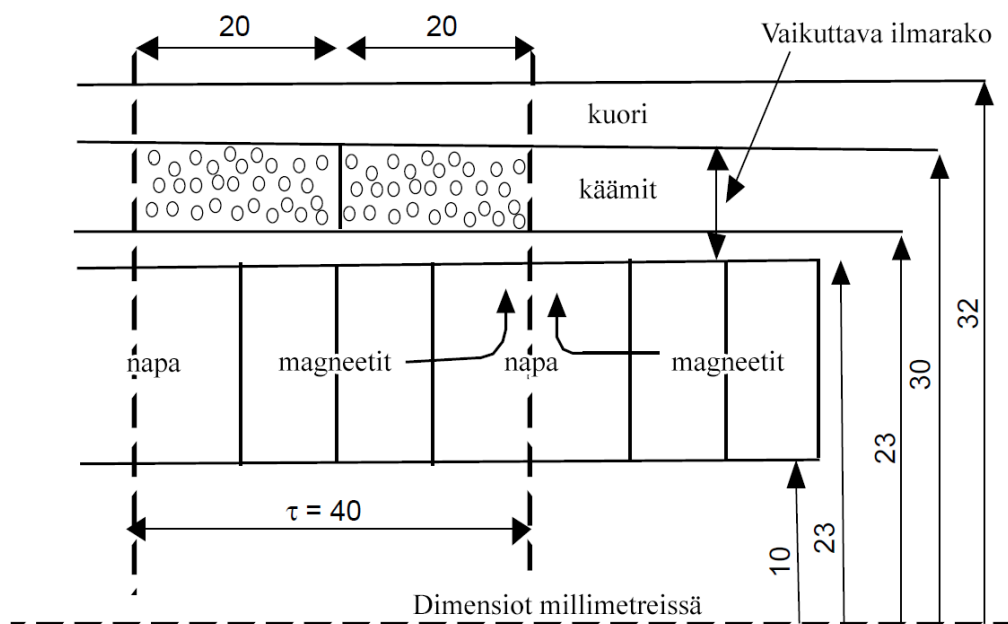
Dimensio	Arvo	Yksikkö
Kuoren ulkohalkaisija	0,4	m
Kuoren pituus	1,2	m
Magneettiparin kokonaispaksuus	0,02	m
Magneetin ulkohalkaisija	0,045	m
Magneetin sisähalkaisija	0,02	m
Teräsvälilevyjen paksuus	0,02	m
Liikkuvan osan kokonaispituus	0,32	m
Staattorinapojen lukumäärä	4	
Käämin pituus	0,02	m
Kelan osan säteittäinen leveys	0,006	m
Ilmaväli	0,0006	m

Generaattorin kuori on valmistettu PVC-muovista. Kuvassa 13 näkyvät ristinmuotoiset vaakasuorat poikkipalkit, jotka pitävät käämin paikallaan, ovat valmistettu polyasetaalista ja kiinnitetty pulteilla kuoreen. Kuoren päädyissä on tulpat ja yläosassa

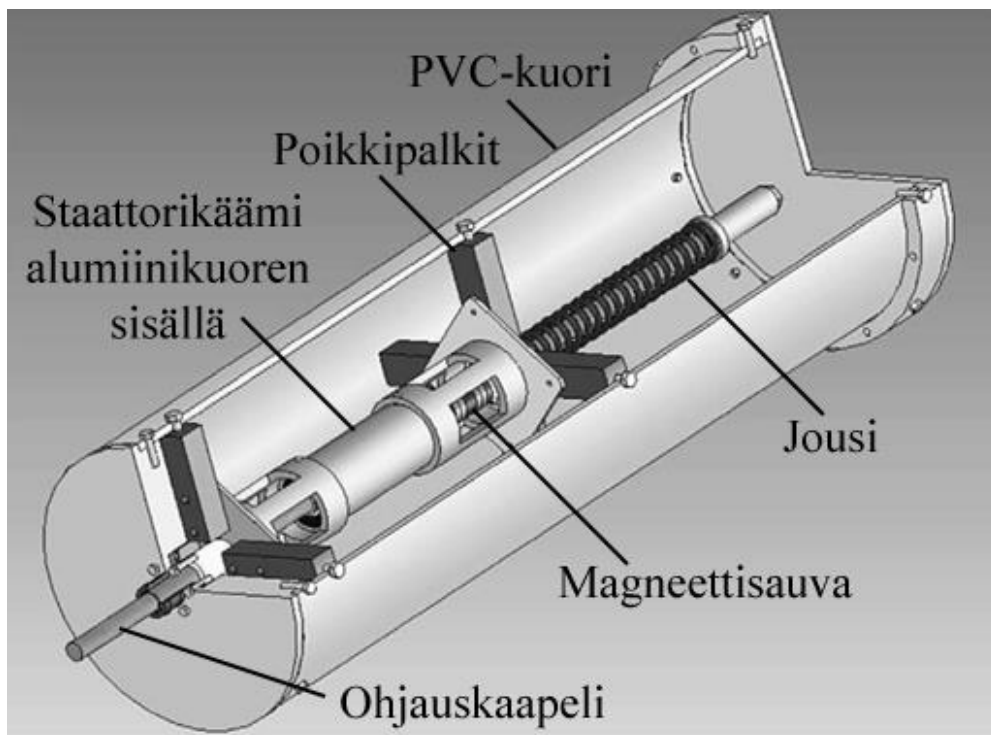
jousi, joka voidaan esijännittää säätölaitteen avulla ja lukita haluttuun asentoon lukkomutterilla. Rakenne ei sisällä syövyttäviä materiaaleja ja ainoat liikkuvat osat ovat jousi ja magneettisauva, mikä lisää laitteen toimintavarmuutta. (Rhinefrank et al. 2005, 1285)

Kuvissa 12 ja 14 näkyvä magneettisauva koostuu 0,010 m paksuista neodyymi-rauta-boori (Nd-Fe-B) magneeteista, jotka on asetettu pareittain siten, että vastakkaiset magneettivoimat liikkuttavat sähkövirtaa pehmeän raudan läpi. Yhden magneettiparin paksuus on siis 0,020 m. Napojen väli on tällöin 0,040 m ja liikkuvan osan kokonaispituus on 0,320 m. Kun magneettisauva liikkuu käämiin läpi, käämiin indusoituu jännite magneettivuon muutoksen takia. (Rhinefrank et al. 2005, 1285)

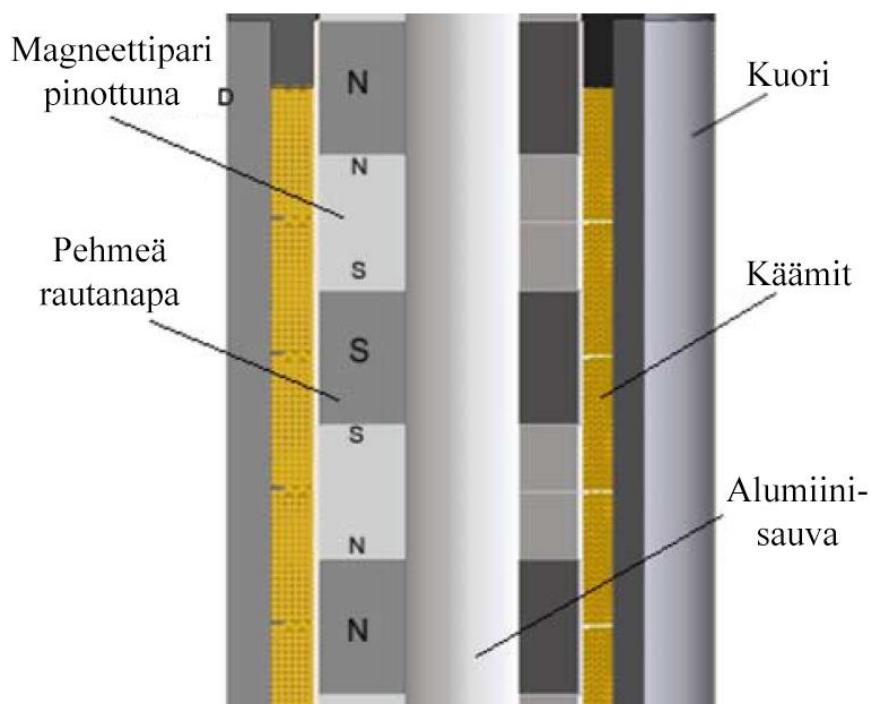
Kaksivaiheinen käämi koostuu ohutseinäisestä putkesta, jonka ympärille on kierretty 97 kierrosta emaloitua kuparilankaa muodostaen kahdeksan erillistä käämiä. Käämien välin ollessa 0,020 m ja napojen välin ollessa 0,040 m syntyy 90 asteen vaihesiirto vierekkäisten käämien välille. Käämit on eristetty toisistaan mica-eristeiden avulla. Virran paluureitin aikaansaamiseksi käämit on päällystetty ohuella sähköteräksellä. Kokonaisuus on päällystetty lieriömäiseen alumiinikuoreen rakenteen vahvistamiseksi. (Rhinefrank et al. 2005, 1285–1286)



Kuva 12. Prototyypigeneraattorin dimensiot (mukaan Rhinefrank et al. 2005, 1287)



Kuva 13. Prototyypigeneraattorin 3D-mallin läpileikkaus. (mukaiillen Rhinefrank et al. 2005, 1285)



Kuva 14. Prototyypigeneraattorin leikkauskuva. (mukaiillen Rhinefrank et al. 2005, 1286)

Edellä mainitun prototyypigeneraattorin sähköiset parametrit ovat esitetty taulukossa 8 ja fyysisen aaltosimulaation tulokset taulukossa 9.

Taulukko 8. Prototyypigeneraattorin sähköiset parametrit. (mukaiillen Rhinefrank et al. 2005, 1297)

Parametri	Arvo	Yksikkö
Nimellisjännite	25	V
Nimellisvirta	3	A
Nimellisteho	50	W
Vaiheiden lukumäärä	2	

Taulukon 8 arvot on saatu laboratorio-olosuhteissa aaltoja simuloivan moottorin avulla, joka liikuttaa generaattorin magneettisauvaa edes takaisin 0–2 m/s nopeudella. (Rhinefrank et al. 2005, 1292)

Taulukko 9. Prototyypigeneraattorin fyysisen aaltosimulaation tulokset (mukaiillen Rhinefrank et al. 2005, 1297)

Vastus [Ω]	Aallon korkeus [m]	Aallon modaalinen periodi [s]	Huippujännite [V]	Huippuvirta [A]	Huipputeho [W]
5	1,37	3	20	1,4	25
2	1,37	3	16	1,6	18
10	1,37	3	19	1,2	12
5	0,98	3	12	0,6	6
5	1,21	3	10	0,5	5
5	0,66	3	9	0,5	5
2	0,98	3	6	0,7	4
5	0,98	2	10	0,5	3,6
2	0,82	6	2,4	0,1	0,2
10	0,98	3	20	0	0
0	0,98	3	20	0	0

Taulukon 9 heikommat tulokset selittyvät aaltojen aiheuttamalla epälinearisella liikkeellä, jolloin generaattori ei ole suorassa ja magneettisauva ei täten pysty liikkumaan yhtä kitkattomasti kuin laboratorio-olosuhteissa. Tästä huolimatta energiantuotto on riittävää. Vertailua varten tarvittava generaattorin tuottama ampeerituntimäärä I_h saadaan seuraavasti

$$I_h = I \cdot t \quad (4)$$

jossa I virta [A]

t aika [h]

Taulukosta 9 voidaan puolestaan nähdä vastuksen ollessa 5Ω , aallonkorkeuden ollessa $0,98 \text{ m}$ ja modaalisen periodin ollessa 3 s , että huippujännite on 12 V ja huippuvirta $0,6 \text{ A}$. Tämä vastaa suunnilleen Itämeren olosuhteita. Jännite on hieman alhainen akun lataamiseen, mutta se ei laskujen kannalta ole oleellista. Kuukaudessa on keskimäärin 720 tuntia, joten kuukaudessa, 8 kuukaudessa ja vuodessa tuotettu ampeerituntimäärä voidaan laskea yhtälöllä (4).

$$I_{h,kk} = 0,6 \text{ A} \cdot 720 \text{ h} = 432 \text{ Ah}$$

Kirjataan tulokset taulukkoon 10. Taulukosta 8 saadaan generaattorin nimellisvirta, joka on 3 A . Kuukaudessa, 8 kuukaudessa ja vuodessa tuotettu maksimiampeerituntimäärä voidaan tällöin myös laskea yhtälöllä (4). Kirjataan tulokset taulukkoon 10.

Taulukko 10. Prototyypigeneraattorin tuottamat ampeeritunnit simuloitussa Itämeren aallokossa.

	Keskiarvo [Ah]	Maksimi [Ah]
Kuukausi	432	2160
8 kuukautta	3456	17280
Vuosi	5184	25920

Generaattorin nimellishyötysuhde η saadaan laitteen leveyden, nimellistehon ja aalloista hyödynnettävän teoreettisen tehon avulla seuraavasti

$$\eta = \frac{P}{L \cdot P_t} \quad (5)$$

jossa P nimellisteho [W]

L laitteen leveys [m]

P_t aalloista hyödynnettävä teoreettinen teho leveysmetriä kohden [W/m]

Lasketaan generaattorin nimellishyötysuhde yhtälöllä (5), ja käytetään aalloista hyödynnettävän teoreettisen tehon arvona taulukon 6 Selkämeren $P_{t,5-12}$ arvoa. Laitteen leveys saadaan taulukosta 7.

$$\eta = \frac{50 \text{ W}}{0,4 \text{ m} \cdot 1,62 \cdot 10^3 \text{ W/m}} = 0,0777 = 7,77 \%$$

Hyötysuhde on huono johtuen laitteen pienen koon aiheuttamista suurista toleransseista ja laitteen heikosta optimoinnista. Kyseessä on kuitenkin prototyyppi, joka on todella pieni verrattuna tyypillisiin aaltovoimaloihin kokonsa ja kapasiteettinsa puolesta.

Lasketaan laitteelle myös kapasiteettitekijä CF (Capacity Factor), joka kuvaa laitteen todellisen tuottaman tehon ja nimellistehon suhdetta. Kapasiteettikerroin saadaan seuraavasti

$$CF = \frac{P_{\text{tod}}}{P} \quad (6)$$

jossa P_{tod} todellinen tuotettu teho [W]

P nimellisteho [W]

Lasketaan kapasiteettikerroin yhtälöllä (6), kun todellinen tuotettu teho on 6 W ja nimellisteho on 50 W.

$$CF = \frac{6 \text{ W}}{50 \text{ W}} = 0,12 = 12 \%$$

Saatu kapasiteettikerroin on huono, mutta aaltovoimalalle välttävä. On kuitenkin huomioitava, että todellisissa Itämeren olosuhteissa modaalinen periodi on noin 4 sekuntia, mikä saattaisi vakauttaa generaattoria siten, että se tuottaisi enemmän sähköä.

6 TUOTANTO

Tässä kappaleessa käsitellään tuotantoon liittyviä asioita, kuten valmistettavuutta ja tuotantokustannuksia karkealla tasolla.

Energiantuotantokustannukset tulee laskea yhteisellä laskentatavalla, jolloin eri energiantuotantomuodoista tulee vertailukelpoisia toistensa kanssa. Sähkön- ja lämmöntuotannon kustannuksien arvioimiseen käytetty yhtälö esitellään seuraavassa kappaleessa.

Laitosten vertailussa tulee huomioida, missä vaiheessa kunkin laitoksen kehitys on. Prototyypivaiheessa olevan laitoksen tuotantokustannukset ovat lähes aina suuremmat kuin sarjatuotantovaiheessa. Tyypillisesti vertailua tehdään ainoastaan käytössä oleville laitoksille, mutta aaltovoimalat ovat vasta pääosin kehitysvaiheessa olevaa teknologiaa, jonka takia tuotantokustannusarvio voidaan tehdä myös kehitysvaiheessa oleville laitoksille.

Tässä työssä kustannusten valuuttana käytetään euroja. Lähteet, joissa on käytetty dollareita, on muutettu tähän työhön euroiksi suhteella 1 euro on yhtä kuin 1,33 dollaria.

6.1 Valmistettavuus

Valmistettavuus (Design for Manufacturability – DFM) käsittää kaikki menetelmät ja järjestelyt, jotka tekevät tuotekonstruktion valmistamisesta yksinkertaisempaa ja kustannustehokkaampaa. Valmistettavuuden päätavoite on alentaa tuotteen valmistuskustannuksia täyttäen samalla tuotteelle asetetut kriteerit, kuten siistin ulkonäön, huollettavuuden, luotettavuuden ja ympäristön kuormituksen. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 13)

Valmistettavuuden arviointiin paras konsepti on yksinkertaisesti vertailla eri konstruktiovaihtoehtoja. Arviointi kannattaa suorittaa yritystasolla, tuoteperhetasolla, rakennetasolla ja komponenttitasolla. Tämä mahdollistaa sen, että tuote sopii yrityksen strategiaan, muihin tuotteisiin ja valmistusmenetelmiin. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 16–17) Konseptisuunnitteluvaiheessa olevien tuotekonstruktioiden arviointikriteerit on esitetty taulukossa 11.

Ennen arviointia tulee kuitenkin suorittaa DFM-diagnoosi, asettaa DFM-tavoitteet, määrittää tuotteen päätoiminnot sekä selventää kehitysparemetrit ja suunnitteluideat. DFM-diagnoosilla selvitetään nykyisen tuoteportfolion, tuotteiden valmistusympäristön sekä kilpailijoiden tuotteiden valmistukseen liittyviä asioita ja menetelmiä.

Taulukko 11. Tuotekonstruktion arviointikriteerit. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 20–21)

Kriteeri	Selitys
1. Laatu	Tuotteen tulee olla tuoteselosteen ja spesifikaatioiden mukainen sekä täyttää asiakkaan vaatimukset.
2. Tuotantokustannukset	Sisältää tuotteen kiinteät ja muuttuvat kustannukset sekä kokoonpantavuusindeksit.
3. Joustavuus	Kyky siirtää muutokset valmiiseen tuotteeseen.
4. Riski	Sisältää jatkuvan valmistuksen riskialttiuden ja tuotantovolyymin nopeasta kasvattamisesta seuraavat riskit.
5. Läpimenoaika	Tuotteella tulee olla nopea läpimenoaika valmistuksessa. Tämä pätee perustuotteelle ja asiakkaan tarpeisiin räätälöidylle tuotteelle.
6. Tehokkuus	Kyky hyödyntää henkilöstö- ja talousresurssit tehokkaasti.
7. Ympäristövaikutukset	Sisältää materiaalien kierrätettävyyden, tuotteen purettavuuden ja valmistusprosessin ympäristövaikutukset.

Taulukon 11 arviointikriteerien perusteella voidaan arvioida kappaleessa 2 esiteltyjen energianmuuntojärjestelmien konsepteja. Tämä vaatisi kuitenkin laajempaa yhteistyötä yrityksen kanssa ja tietoa valmistusmenetelmistä, joten asiaa ei tässä työssä käsitellä pidemmälle.

Uusien tuotteiden kehittämisen perustana ei voida käyttää valmistettavuutta, mutta se voi toimia inspiraation lähteenä projekteissa, jossa yleistä valmistuskokemusta tarvitaan. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 31) Esimerkiksi vesiturbiinin yhdistäminen muovirunkoisen turvalaitteen konstruktion vaatii suunnittelutiimiltä kokemusta muovin

koneistamisesta, valamisesta ja hitsaamisesta sekä tietoa materiaalin ominaisuuksista. Valmistettavuuden kannalta paras vaihtoehto olisi tuottaa alihankintana tai ostaa valmistajalta komponentit, joiden valmistamiseen ei yrityksellä ole laitteistoa. Tällöin yritys voi keskittyä muiden komponenttien ja varsinaisen tuotteen kokoonpanon suunnitteluun.

6.2 Tuotantokustannukset

Tuotantokustannukset (Levelized Cost of Energy – *LCOE*) kertoo kulutetun rahamäärän tuotettua energiayksikköä kohden. Tyypillisesti kirjallisuudessa valuuttana käytetään dollaria (\$) tai euroa (€). Tuotettu energiamäärä ilmoitetaan puolestaan yleensä megawattitunteina (MWh) tai kilowattitunteina (kWh). *LCOE* saadaan seuraavasti (IES-OES 2015, 11)

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{AEP_t}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

missä AEP_t vuosittainen energiantuotanto [Wh]

$CAPEX$ investointikustannukset [€]

$OPEX_t$ vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset [€]

r laskentakorko [%]

n laitoksen elinaika [a]

t tarkasteltava vuosi laitoksen käynnistyttyä [-]

Yhtälön (7) osoittajassa on $CAPEX$, joka sisältää laitoksen investointikustannukset. Investointikustannukset on esitelty tarkemmin taulukossa 12. Lisäksi osoittajassa on $OPEX$, joka sisältää vuotuiset käyttö- ja ylläpitokustannukset diskontattuna nykyarvoon. Nämä on esitelty tarkemmin taulukossa 13. Vuotuisen energiantuotannon (Annual Energy Production – AEP) diskonttaaminen nykyarvoon tarkoittaa tuotannosta saatavan taloudellisen hyödyn pienenemistä.

Taulukko 12. Investointikustannusten (CAPEX) eri komponentit selityksineen. (Jenne et al. 2015, 3)

<i>CAPEX</i>	<i>Selitys</i>
Kehitys	Laitoksen vaatima kehitystyö.
Infrastruktuuri	Laitokseen liittyvät rakennukset ja tiet.
Kiinnitys/Perustus	Laitokseen kuuluva perustus ja kelluke.
Rakenteelliset komponentit	Laitokseen kuuluvat komponentit, jotka pitävät sen rakenteen koossa.
Tehontuottojärjestelmä	Laitokseen kuuluvat liikkuvat osat sekä sähkölinjat, muuntajat ja kytkinlaitokset.
Alajärjestelmien yhdistäminen	Laitoksen yhdistäminen organisaation suurempaan järjestelmään.
Voittomarginaali	Laitokselta vaadittu tuotto.
Asennus ja siihen liittyvät epäsuorat kustannukset	Laitoksen rakentaminen, työmaan hallinta, rakentamisen suunnittelu, turvapalvelut, urakoitsijoiden yleiskustannukset, kuljetukset ja ylläpito.
Omistajan kustannukset	Laitokseen sisältyvät alustavat kustannukset, joita ovat projektin suunnittelu, oikeudelliset maksut, työmaaluvat, maanhankinta, verot ja lisensointi.

Taulukko 13. Käyttö- ja ylläpitokustannusten (*OPEX*) eri komponentit selityksineen. (Jenne et al. 2015, 3)

<i>OPEX</i>	Selitys
Vakuutukset	Sisältää laitoksen esim. vahinkovakuutukset ja henkilöstövakuutukset.
Asennuksen jälkeiset kustannukset	Sisältää pääasiassa huoltokustannukset.
Merioperaatiot	Sisältää toiminnan merellä ja siihen liittyvät kustannukset.
Maaoperaatiot	Sisältää toiminnan maalla ja siihen liittyvät kustannukset
Varaosat	Sisältää kaikki laitoksen tarvitsemat osat, joita vaihdetaan vain tarpeen tullen.
Kulutusosat	Sisältää kaikki laitoksen tarvitsemat osat, joita vaihdetaan säännöllisesti.

Vuotuinen energiantuotanto *AEP* kertoo vuoden aikana tuotetun sähkön määrän. Yksikkönä käytetään yleensä megawattituntia (MWh) tai kilowattituntia (kWh). *AEP* voidaan mitata aiempien laitosten tuotannon keskiarvona, tai sille voidaan laskea teoreettinen arvo seuraavasti (Chang et al. 2018, 346)

$$AEP = PC \cdot CF \cdot AF \cdot 8766 \text{ h} \quad (8)$$

missä *PC* laitoksen kapasiteetti (Project Capacity) [Wh]

CF kapasiteettikerroin (Capacity Factor) [%]

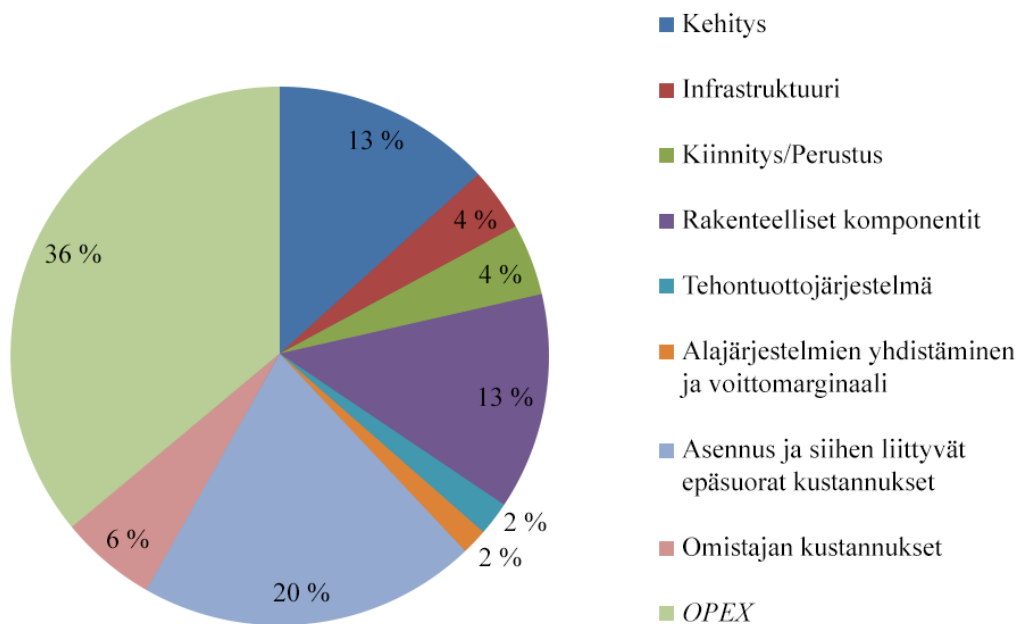
AF saatavuuskerroin (Availability Factor) [%]

8766 tuntien lukumäärä vuodessa mukaan lukien karkausvuodet [h]

Kuvasta 15 voidaan nähdä investointikustannusten jakaantumisen ja niiden osuuden *LCOE*-arvosta. Vaikka kyseessä on eri tehontuottotavalla toimiva laitos, on sen *LCOE*-jakauma kuitenkin hyvin samanlainen vaimentimen kanssa. (Jenne et al. 2015, 5) Asennuskustannukset ovat investointikustannuksista suurin menoerä, mikä johtuu merelle rakentamisen monimutkaisuudesta ja pienestä yksikkökoosta. *OPEX* on

luonnollisesti korkea, sillä pienet hankkeet kuluttavat suhteessa paljon työtunteja suuriin nähden.

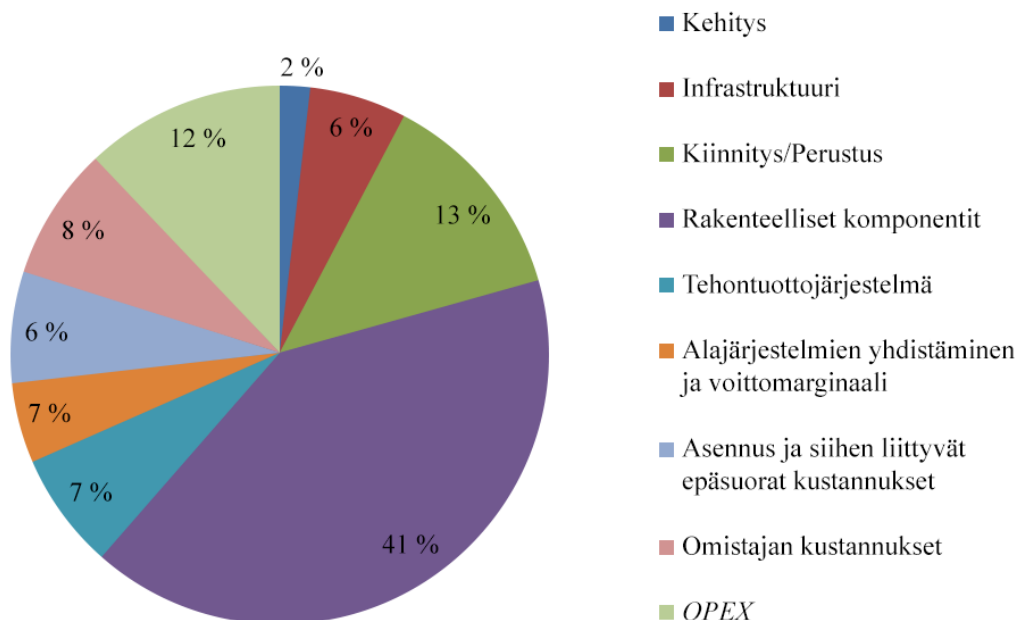
Pohja-aaltoja hyödyntävä heiluva läppä, 1 kpl (Oscillating Surge Flap)



Kuva 15. Pohja-aaltoja hyödyntävän vellovan laitoksen *LCOE*-arvon komponenttien osuudet yksittäiselle laitokselle. (mukaillen Jenne et al. 2015, 5)

Kun yksikkökoko kasvatetaan 100 kappaleeseen voidaan huomata merkittävää muutosta *LCOE*-arvon jakaumassa (kuva 16). Tällöin rakenteelliset komponentit saavat suurimman osuuden *LCOE*-arvosta. Tämä selittyy yksinkertaisesti skaalaedulla, jolloin henkilöstö voi käyttää tehokkaammin aikansa tuotannon eri vaiheisiin ja laitosten myynti kattaa paremmin kiinteät kustannukset.

Pohja-aaltoja hyödyntävä heiluva läppä, 100 kpl (Oscillating Surge Flap)



Kuva 16. Pohja-aaltoja hyödyntävän vellovan laitoksen *LCOE*-arvon komponenttien osuudet 100 kappaleen erälle. (mukaillen Jenne et al. 2015, 5)

Työssä tarkasteltujen prototyyppigeneraattorien tuotantokustannuksia voidaan karkeasti arvioida samantyyppisten, mutta suurempien laitosten tuotantokustannuksien perusteella. Erään vaimentimen nimellisteho on 286 kW, ja sen oletettu kapasiteettitekijä on 0,3. (Jenne et al. 2015, 4) Kyseisen vaimentimen *LCOE*-arvot on kirjattu taulukkoon 14.

Taulukko 14. Vertailtavan vaimentimen *LCOE*-arvo 1, 10, 50 ja 100 kappaleen erille. (Jenne et al. 2015, 4)

Lukumäärä	1	10	50	100	kpl
<i>LCOE</i>	3,28	1,06	0,62	0,55	€/kWh

Kuten taulukosta 11 voidaan nähdä, tuotantokustannukset pienenevät merkittävästi eräkoon kasvaessa. On kuitenkin huomioitavaa, että pienemmän laitteen suhteelliset tuotantokustannukset ovat yleensä suuremmat kuin suuremman, minkä takia suoraan taulukoiden arvoilla lasketut tulokset ovat vain suuntaa antavia.

Hyödynnetään taulukon 14 tietoja kappaleessa 5.2 käsitellyn prototyypigeneraattorin tuotantokustannusten arviointiin. Oletetaan, että saatavuuskerroin on yksi. Lasketaan ensin *AEP* yhtälöllä (8). Diskonttaaminen jätetään laskuissa huomioimatta.

$$AEP = 50 \text{ W} \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot 8766 \text{ h} = 52596 \text{ Wh} = 52,6 \text{ kWh}$$

Lasketaan seuraavaksi *CAPEX*- ja *OPEX*-arvon summa vertailtavalle vaimentimelle taulukon 11 yhden kappaleen *LCOE*-arvolla käyttäen yhtälöä (7).

$$CAPEX + OPEX = 3,28 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 286 \text{ kW} \cdot 0,30 \cdot 1 \cdot 8766 \text{ h} = 2\,466\,963 \text{ €}$$

Oletetaan, että *CAPEX*- ja *OPEX*-arvon summa pienenee suoraan verrannollisesti nimellistehon mukaan. Lasketaan nyt prototyypigeneraattorin *CAPEX*- ja *OPEX*-arvon summa.

$$CAPEX + OPEX = 2\,466\,963 \text{ €} \cdot \frac{50 \text{ W}}{286 \cdot 10^3 \text{ W}} = 431,3 \text{ €}$$

Lasketaan seuraavaksi yksittäisen prototyypigeneraattorin tuotantokustannukset yhtälöllä (7) käyttäen edellä laskettua tuotetun energian arvoa sekä *CAPEX*- ja *OPEX*-arvon summaa.

$$LCOE = \frac{431,3 \text{ €}}{52,6 \text{ kWh}} = 8,2 \text{ €/kWh}$$

Lasketaan loput arvot kaikille eräkoille ja kirjataan saadut tulokset eräkojen mukaan taulukkoon 15.

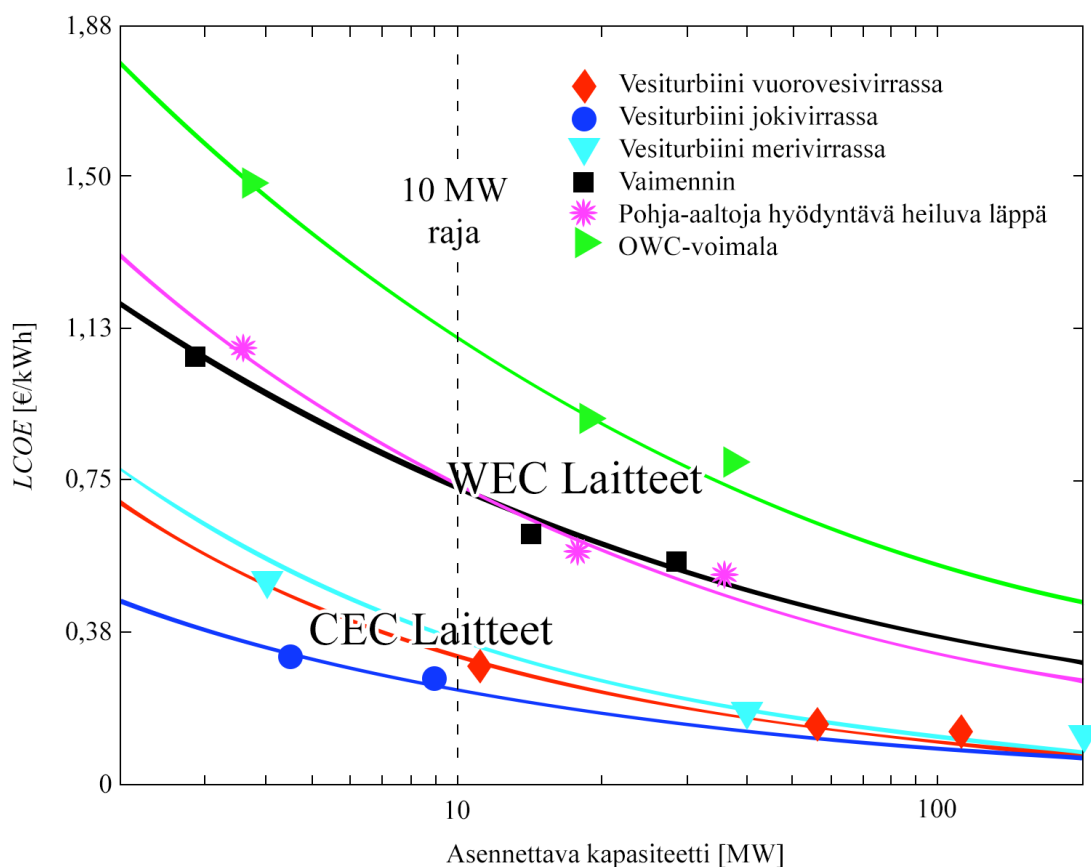
Taulukko 15. Prototyypigeneraattorin *LCOE*-arvo sekä *CAPEX*- ja *OPEX*-arvon summa 1, 10, 50 ja 100 kappaleen erille.

Lukumäärä	1	10	50	100	kpl
<i>LCOE</i>	8,20	2,65	1,55	1,35	€/kWh
<i>CAPEX</i> + <i>OPEX</i>	431,3	139,4	81,5	72,3	€

Taulukon 14 arvoissa ei ole huomioitu sitä, että kyseinen prototyypigeneraattori tulee turvalaitteen sisälle, ja sen ohjauskaapeli ankkuroidaan samaan betoniperustukseen kuin

itse turvalaite. Muovista kuorta ei tarvitse tällöin välttämättä ollenkaan ja asennuskustannukset myös laskevat, minkä takia todelliset kustannukset voisivat olla hieman pienemmät.

Kuvassa 17 on esitetty erityyppisten kaupallisten laitosten *LCOE*-arvoja asennettavan kapasiteetin funktiona. Käyrien alkupäätt ovat tämän työn kannalta oleelliset, sillä asennettu kapasiteetti ei tule olemaan kovin suuri.



Kuva 17. Erityyppisten kaupallisten laitosten *LCOE*-arvoja asennettavan kapasiteetin funktiona. Pisteet perustuvat todellisiin arvoihin ja käyrät ovat polynomisovitteita, jotka ovat piirretty näiden pisteiden kautta. (mukaillen Jenne et al. 2015, 5)

Kuva 17 antaa hieman suuntaa siitä, mitä CEC- ja WEC-laitosten kustannukset ovat kaupallisella tasolla, ja kuinka kustannukset pienenevät asennettavan kapasiteetin mukaan. Lisäksi kuvasta voidaan nähdä, että CEC-laitokset ovat huomattavasti halvempia kuin WEC-laitokset, mikä saattaa selittyä sillä, että WEC-teknologia on vielä kehitysasteella ja WEC-laitokset tarvitsevat kalliimpia komponentteja.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kappaleessa 2 käsitellyistä energianmuuntojärjestelmistä CEC-laitteet vaikuttavat kaikista lupaavimmilta. Etenkin vesiturbiini voidaan yhdistää monella eri tavalla turvalaitteen konstruktion, ja vesiturbiinissa käytetty teknologia on paremmin tutkittu kuin lineaarigeneraattori. Vesiturbiini on myös kaupallisella tasolla halpa vaihtoehto suhteessa WEC-laitteisiin, kuten kuvasta 17 voidaan nähdä. On kuitenkin huomioitava, että lineaarigeneraattorissa on myös omat hyvät puolensa, kuten hyvä toimintavarmuus, riippumattomuus aaltojen tulosuunnasta ja yksinkertainen yhdistäminen turvalaitteen konstruktion. Vesiturbiini voi helpommin likaantua, se on riippuvainen virtausten suunnasta ja sen yhdistäminen konstruktion vaatii aina porausta.

Kappaleessa 3 esitellyistä aaltovoimaloista pienen kokoluokan kelluva OWC-voimala ja vaimennin ovat tehontuottotavaltaan parhaiten vertailtavissa työssä käsiteltyyn turvalaitteeseen. Molemmat sisältävät kellukkeen, lieriömäisen muodon, samanlaisen ja ankkuroinnin. Lisäksi kumpikaan ei vaadi ulkoisia liikkuvia osia. Hydraulisen vaimentimen ongelma on sen kaksirunkoisuus, joka tekee rakenteesta monimutkaisemman ja vaikeamman skaalata pienempään kokoon.

Kappaleessa 4 saatiin selville, että keskimääräisestä Itämeren aallokosta on teoriassa saatavissa tarpeeksi energiaa akkujen lataamista varten. Vuotuinen energiansaanti aalloista on kuitenkin vaihtelevaa, sillä meri on usein tammikuun alusta huhtikuun loppuun asti jäässä. Tämän lisäksi Itämeren aaltojen energiatiheys on todella heikko, eikä sinne siksi kannata rakentaa suurta aaltovoimalaa.

Kappaleessa 5 käsitelty lineaarigeneraattori täytti sille asetetut minimivaatimukset, vaikka sen kehitysaste on vasta prototyyppiasteella ja käytetty teknologia 14 vuotta vanhaa. Sen rakenne on myös yksinkertainen, mikä on valmistettavuuden kannalta hyvä.

Kappaleessa 6 käsiteltiin tuotantokustannuksia karkealla tasolla edellä mainitulle lineaarigeneraattorille ja saadut tulokset olivat tyydyttäviä kyseisen kehitysasteen aaltovoimalalle. Jatkoa ajatellen myös kaupallisten laitteiden hankintaa voisi harkita, jos ne täyttävät tarvittavat vaatimukset. Sopivia laitteita ei kuitenkaan tähän työhön löytynyt.

8 YHTEENVETO

Energianmuuntojärjestelmiä käsiteltiin työn kannalta oleellisesti. Työssä esiteltiin potentiaalisia vaihtoehtoja, jotka olivat kustannustehokkaita ja rakenteeltaan yksinkertaisia. Lisäksi niiden sovittaminen osaksi turvalaitteen konstruktiota onnistui konseptitasolla suhteellisen helposti.

Itämerestä saadaan tarpeeksi energiaa akkujen lataamiseen teoriassa mutta myös käytännössä, mikä oli työn kannalta tärkeä löytö. Kappaleessa 5 esitelty lineaarigeneraattori vastasi työn odotuksia tuottamalla tarpeeksi sähköä Itämeren aallokkoa vastaavassa fyysisessä aaltosimulaatiossa.

Valmistettavuutta ei voitu tutkia työn kannalta kovinkaan tarkasti, mutta yleiset valmistettavuuden arviointikriteerit taulukoitiin mahdollista jatkotutkimusta varten.

Tuotantokustannuksia arvioitiin karkealla tasolla, mikä oli työn kannalta sopivaa. Tuloksista kävi olennainen tieto ilmi, eli suuret eräkoot ovat kannattavia ja tarkastellun lineaarigeneraattorin tuotantokustannukset järkeviä. Kustannusten jakautumista selvitettiin myös eri eräkoille vertailukelpoisen laitteen pohjalta.

Julkisesti ilmoitetuille laitteille saatavilla olevat tiedot rajoittuvat yleensä luonnoksiin, kuviin ja animaatioihin, ja joissakin tapauksissa myös laitteen dimensiot ja järjestelmän konstruktio on ilmoitettu. Aaltovoimaloista tunnetaan tällä hetkellä vain muutamia määrällisiä lukuja arvioiduista ja mitatuista tehoista. Tämän seurauksena aaltoenergiaa vaikuttaa usein hämmentävältä ja riskialttiilta sijoittajien, yritysten ja päättäjien näkökulmasta. Etenkin tähän työhön oli vaikeaa löytää oikean teholuokan laitteita, sillä kirjallisuudessa esitetyt pienet aaltovoimalat ja vesiturbiinit ovat monesti prototyyppiasteella, ja niiden kaupalliset versiot ovat puolestaan jopa kymmeniä kertoja suurempia.

LÄHDELUETTELO

ANDRITZ HYDRO Hammerfest. 2019. Tidal current turbines. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.4.2019]. Saatavissa: <https://www.andritz.com/products-en/group/products/tidal-current-turbines>

Babarit A., Hals J., Muliawan M.J., Kurniawan A., Moan T., Krokstad J. 2011. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renewable Energy*, volume 41. s. 44–63.

Chang G., Jones C.A., Roberts J.D., Neary V.S. 2018. A comprehensive evaluation of factors affecting the levelized cost of wave energy conversion projects. *Renewable Energy*, volume 127. s. 344–354.

Falcão A.F. de O. 2010. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 14: issue 3. s. 899–918.

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

IEA-OES. 2015. International Levelized Cost of Energy for Ocean Energy Technologies. International Energy Agency and Ocean Energy Systems. 48 s.

Ilmatieteen laitos. 2018. Aallonkorkeus. [verkkoaineisto]. [viitattu 28.11.2018]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/aallonkorkeus>

Jenne D.S., Yu Y.-H., Neary V. 2015. Levelized cost of energy analysis of marine and hydrokinetic reference models. *Proceedings of the 3rd Marine Energy Technology Symposium*, Washington, D.C, huhtikuu 27–29. NREL/CP-5000e64013. 7 s.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003. Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu: Lyhyt johdatus tuotteiden valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys ry. 180 s. ISBN 951-97329-2-6.

Li W., Isberg J., Engström J., Waters R., Leijon M. 2015. Parametric Study of the Power Absorption for a Linear Generator Wave Energy Converter. *Journal of Ocean and Wind Energy*, volume 2: issue 4. s. 248–252.

Liikennevirasto. 2018. Syvyysaineistot. [verkkoaineisto]. [viitattu 20.1.2019].
Saatavissa: <https://vayla.fi/avoindata/tietoaineistot/syvyysaineistot#.XFGCY6ozaUk>

REUK. 2019. Lunar Energy Tidal Power. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.4.2019].
Saatavissa: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/tidal/lunar-energy-tidal-power/>

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

Røkke A. & Nilssen R. 2013. Marine Current Turbines and Generator preference. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13). *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, volume 1: issue 11. s. 336–341. ISSN 2172-038X.

Seabased AB. 2019. SEABASED technology. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.4.2019].
Saatavissa: <https://www.seabased.com/the-technology>

Su W.-R., Chen H., Chen W.-B., Chang C.-H., Lin L.-Y., Jang J.-H., Yu Y.-C. 2017. Numerical investigation of wave energy resources and hotspots in the surrounding waters of Taiwan. *Renewable Energy*, volume 118, s. 814–824.

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

Takao M. & Setoguchi T. 2012. Air Turbines for Wave Energy Conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, volume 2012. 10 s.

Xu D., Lu H., Yu D. 1999. On the relationships between the mean wavelength and wave-period of wind waves in deep water. *Applied Ocean Research*, volume 21. s. 127–131.