

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Aaltoenergia

Wave energy

Jori Lindgren

0356809

Työn tarkastaja: TkT Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaaja: TkT Ahti Jaatinen-Värri

Lappeenranta 20.2.2014

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Jori Lindgren

Opinnäytteen nimi: Aaltoenergia, Wave energy

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014

33 sivua, 12 kuvaa

Hakusanat: kandidaatintyö, aaltoenergia, aaltovoima, uusiutuva energia, wave energy, wave power, wave energy converters

Työssä tutustutaan aaltoenergian nykytilaan maailmalla. Tarkoituksena on selvittää mitä aaltoenergia on ja miten sitä voidaan hyödyntää. Lähtökohtana on, ettei lukija ole perehtynyt aaltoenergiaan millään tavoin. Työssä tutustutaan eri sovelluksiin ja tekniikoihin ja pyritään keskittymään lähinnä sellaisiin tekniikoihin, jotka ovat tällä hetkellä selvästi kehityksen kärjessä tai esikaupallisessa kehitysvaiheessa. Lisäksi työssä pohditaan aaltoenergian potentiaalia ja mahdollisia ympäristövaikutuksia.

Kandidaatintyön luettuaan toivon lukijan saavan hyvät perustiedot aaltovoimasta ja sen nykytilasta.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Perusteet ja periaate	7
2.1 Haasteet	9
3 Tekniikat ja sovellukset	12
3.1 OWC-laitokset (<i>Oscillating Water Column</i>)	13
3.1.1 Oceanlinx	14
3.2 Poijut (<i>Point Absorbers</i>).....	14
3.2.1 Archimedes Wave Swing – AWS	15
3.2.2 Seabased.....	16
3.2.3 PowerBuoy.....	16
3.3 Vaimentimet (<i>Attenuators, terminators</i>)	17
3.3.1 Pelamis	18
3.4 Potentiaalienergiaa hyödyntävät voimalat (<i>Overtopping Devices</i>)	19
3.4.1 Wave Dragon	20
3.5 OWSC-laitokset (<i>Oscillating Wave Surge Converter</i>).....	20
3.5.1 WaveRoller	21
3.5.2 Oyster	22
3.6 Muita	22
3.6.1 Wello Penguin.....	23
4 Potentiaali	24
5 Vaikutukset ympäristöön	26
6 Yhteenveto	28
Lähdeluettelo	30

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c	nopeus	m/s
E	energia	J
g	putoamiskiihtyvyys	m/s ²
H	korkeus	m
P	teho	W
T	jaksonaika	s

Kreikkalaiset aakkoset

ρ	tiheys	kg/m ³
--------	--------	-------------------

Alaindeksit

m0	merkitsevä
g	ryhmä

Lyhenteet

AWS	Archimedes Wave Swing
EMEC	European Marine Energy Centre
LIMPET	Land Installed Marine Power Energy Transformer
OWC	Oscillating Water Column
OWSC	Oscillating Wave Surge Converter
PTO	Power Take Off
WEC	Wave Energy Converter

1 JOHDANTO

Maailmalla etsitään jatkuvasti uusia energianlähteitä ja -tuotantomuotoja. Ilmastonmuutos ja kestävä kehityksen trendi pitävät huolen, että uusiutuva energia on jatkuvasti esillä. Yksi merkittävistä energianlähteistä on tähän asti ollut varsin vähällä käytöllä, nimittäin meret. Meret ovatkin tarjonneet ihmiskunnan historian aikana ravintoa ja pohjan erilaiselle teollisuudelle. Tämän lisäksi meret sisältävät suuren määrän energiaa. Merienergiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi aaltoenergian, vuorovesienergian tai veteen sitoutuneen lämpöenergian avulla. Tässä työssä tutustutaan merien aaltoenergiaan.

Aaltoenergia perustuu auringon säteilyyn ja maan pyörimisliikkeeseen. Säteily sitoutuu mereen pääosin lämpönä ja lämpötilaerot maapallolla saavat aikaiseksi tuulia. Tuulet saavat meren pinnan liikkeelle, jolloin aallot saavat liike-energiaa. Nykyään tätä liike-energiaa toivotaan saavan hyödynnettyä ja valjastettua sähköksi.

1970-luvun öljykriisi edesauttoi muiden energiantuotantomuotojen, kuten tuuli- ja aaltovoiman kehittämistä. Myöhemmin 1980-luvulla öljyn halpeneminen hidastutti jälleen näiden tuotantomuotojen kehitystä. Nykyään monet maat ovat kuitenkin aloittaneet aaltoenergian tutkimisen ja tätä myöten erilaisia sovelluksia on jo satamäärin (EMEC 2013a). Projekteja löytyy ympäri maailmaa mm. Iso-Britanniasta, Australiasta, Yhdysvalloista, Japanista, Portugalista, Norjasta, Tanskasta, Ruotsista ja Ranskasta (Clément et al. 2002, 410–416). Suomessa aaltoenergiaa kehittää AW-Energy ja Wello Oy. AW-Energyllä on tutkimusprojekti käynnissä Portugalin rannikolla ja yritys on myös rakennuttamassa uutta aaltovoimalan testauslaitosta Suomeen (AW-Energy 2013). Wello Oy on tehnyt lupaavia tutkimuksia puolestaan Skotlannin Orkneyssä (Wello 2014).

Aaltoenergia on nykymuodossaan vielä varsin uusi käsite ja saattaa olla monelle energia-alan vaikuttajalle melko tuntematonta aluetta. Vihreiden arvojen noustessa yhä suosittumaksi ja päästörajoitusten tiukentuessa voi aaltoenergia nousta varsin merkittäväksi uusiutuvan energian tuotantomuodoksi tuuli- ja aurinkovoiman rinnalle.

Tässä työssä tutustutaan laajaan kirjoon eri aaltovoimasovelluksia ja pohditaan mm. aaltovoiman potentiaalia ja ympäristövaikutuksia. Koska eri sovelluksia on kehitteillä paljon, pyritään tutustumaan sellaisiin sovelluksiin, jotka ovat kehityksessä esikaupallisessa vaiheessa tai esiintyvät kirjallisuudessa useaan kertaan. Työssä aluksi perehdytään aaltoenergian perusteisiin ja haasteisiin. Kolmannessa kappaleessa tutustutaan sovelluksiin ja neljännessä kappaleessa pohditaan aaltovoiman potentiaalia maailmalla. Viidennessä kappaleessa kirjataan mahdollisia ympäristövaikutuksia.

Koska työn aihe on erittäin laaja, ei ole tarkoituksena ottaa esille kaikkea mahdollista aaltoenergiaa liittyvää. Työssä ei käydä juurikaan läpi aaltovoimaan liittyvää hydrodynamiikkaa, mallinnusta, kustannuskohteita tai edes kaikkia sovelluksia. Työssä ei myöskään paneuduta kovin syvälle tehontuotantotapoihin ja näistäkin otetaan esille vain yleisimmät. Aiheen rajaaminen onkin haasteellinen tehtävä työn sisällön kannalta. Työ onkin lähinnä yleinen katsaus aaltoenergiaan ja sen mahdollisuuksiin. Tavoitteena on, että lukija saa hyvä yleisen kuvan aaltoenergian tilasta.

2 PERUSTEET JA PERIAATE

Aaltoenergia on epäsuoraa aurinkovoimaa. Aurinko lämmittää meriä ja ilmaa meren yläpuolella synnyttäen lämpötilaeroja. Lämpötilaerot saavat aikaan tuulia, jotka puolestaan synnyttävät pyörteisyyttä meren pinnalla. Pyörteisyys kasvattaa tuulen ja merenpinnan välistä kitkaa sekä tuulen vaikutus-alaa meren pintaan ja mahdollistaa näin aaltojen kasvamisen. Mitä kauemmin tuulet kuljettavat aaltoja, sitä suuremmiksi ne kasvavat. Tuuli ei pysty kasvattamaan aaltoja joiden nopeus on jo tuulen nopeutta suurempi ja nämä aallot voivatkin kulkea tuhansia kilometrejä vaimentumatta. Tuulen nopeus, vaikutusaika ja suunta ovat siis merkittäviä tekijöitä aaltojen syntyyn, suuntaan, suuruuteen ja energiatiheuteen. Tuulien lisäksi aallot saattavat syntyä esimerkiksi myrskyjen seurauksena. (Pettersen & Lumiaro 2014.)

Aaltojen energiasisältö riippuu koon lisäksi myös niiden etäisyydestä rannikosta. Rannikkoa lähestyessä vesi on matalampaa ja aaltojen energiasisältö voi laskea matalassa vedessä jopa kymmeniä kW/m (Duckers 2004, 309). Aallot menettävät energiaa merenpohjan välisen kitkan ja rikkoutumisen vuoksi (Cruz 2008, 1). Rannan läheisyydessä aaltojen heijastuminen ja refraktio synnyttävät tosin niin kutsuttuja energiakeskittymiä (Clément et al. 2002, 408).

Käytännössä aallot ovat vesipartikkelien ympyrätaista liikettä. Rannan läheisyydessä tämä liike muuttuu merenpohjan ja partikkelien välisen kontaktin takia. Eräät sovellukset perustuvat tähän ilmiöön ja tästä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.5.

Aaltojen energia on jakautunut kineettiseksi energiaksi ja potentiaalienergiaksi. Potentiaalienergia syntyy, kun tasainen vedenpinta muuttuu mekaanisen työn (tuuli) vuoksi aaltoilevaksi. Tämä työ vastaa veden nousua painovoimaa vastaan. (Falnes 2007, 187.) Kineettisen energian muodostaa vesipartikkelien pyörivä liike veden pinnan alapuolella (EPRI 2011, 30).

Aallon energia merenpinnan pinta-alaa kohden voidaan laskea yhtälöllä (Falnes 2007, 187)

$$E = \frac{\rho g H_{m0}^2}{16} \quad (1)$$

missä $\rho =$ veden tiheys [kg/m^3]

$g =$ putoamiskiihtyvyyys [m/s^2]

$H_{m0} =$ merkitsevä aallonkorkeus [m]

Tyypillisesti aaltojen sisältämä teho ilmoitetaan yksikössä wattia per aaltorintaman leveys metreinä (W/m). Teho saadaan yhtälöstä

$$P = c_g E = \frac{c_g \rho g H_{m0}^2}{16} \quad (2)$$

missä $P =$ teho [W/m]

$c_g =$ aaltojen ryhmä nopeus [m/s]

Syvässä vedessä aallon nopeuden voidaan tyypillisesti arvella olevan verrannollinen putoamiskiihtyvyyteen ja jaksonaikaan seuraavasti (Duckers 2004, 304)

$$c_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (3)$$

missä $T =$ aallon jakson aika [s]

Sijoittamalla yhtälö (3) yhtälöön (2) saadaan aallon teho metriä kohden

$$P = \frac{\rho g^2 H_{m0}^2 T}{64\pi} \quad (4)$$

Yhtälö voidaan esittää myös muodossa (Duckers 2004, 304)

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (5)$$

missä H = aallon korkeus [m]

Merkitsevä aallon korkeus $H_{m0} = H\sqrt{2}$. Otetaan esimerkkinä aalto, jonka korkeus on 1,5 metriä ja jaksonaika 8 s. Veden tiheys merellä on n. 1030 kg/m^3 ja putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$. Tällöin aallonrintaman tehoksi metriä kohden saadaan

$$P = \frac{1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2 \cdot (1,5 \text{ m})^2 \cdot 8 \text{ s}}{32\pi} = 17,7 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

Tai yhtälöllä 4

$$P = \frac{1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2 \cdot (1,5\sqrt{2} \text{ m})^2 \cdot 8 \text{ s}}{64\pi} = 17,7 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

2.1 Haasteet

Aaltoenergiasovellusten suunnittelussa tulee ottaa varsin laaja kirjo asioita huomioon. Internacional Energy Agency (IEA) ja useat muut lähteet (Christensen et al. 2005; SI

Ocean 2012) listaavat aaltovoiman kohtaavan haasteita liittyen mm. aaltojen ennustettavuuteen, laitteiden suunnitteluun, käyttöön, huoltoon, tutkimukseen sekä kannattavuuteen.

Aaltoja ennustetaan tuulen suunnan ja voimakkuuden avulla. Ennuste on mahdollista tehdä jopa kahden vuorokauden päähän, sillä aallot seuraavat tuulia muuttamatta kuitenkaan suuntaansa nopeasti. Ennustettavuus on tärkeää mahdollisen energiantuotannon ennustamisessa. Lisäksi aaltojen oikea ennustaminen antaa mahdollisuuden suorittaa testejä, joilla tutkitaan sovelluksien käyttäytymistä eri aaltoolosuhteissa. (IC Ocean 2012, 67–69.) Tämä on tärkeää tietoa esimerkiksi aaltovoimayrityksille, sijoittajille, energialaitoksille ja poliitikoille tehdessään päätöksiä (AEA 2006, 44–46).

Laitteiden suunnittelussa on otettava huomioon meren ja aaltojen luomat olosuhteet ja voimat. Meri antaa haasteensa laitteiden ja näiden osien, kuten ankkuroinnin ja tehontuotantojärjestelmän materiaaleille ja kestävyydelle. Sovellusten täytyy toimia kaikissa olosuhteissa aaltojen amplitudin, jakson ja suunnan vaihdellessa. Myrskyissä rakenteet saattavat kohdata 100 kertaa normaaliolosuhteita voimakkaampia voimia. (Clément et al. 2002, 408.) Lisäksi voimaloiden asentaminen ja kunnossapito merellä saattavat vaatia erikoiskalusteita ja –toimenpiteitä (AEA 2006, 44–46; IC Ocean 2012, 67–69). Öljy- ja kaasunporauksista mereltä saadaan kuitenkin arvokasta tietoa laitteiden ja materiaalien kestävydestä näissä olosuhteissa (Christensen et al. 2005, 5).

Aaltovoima on toistaiseksi varsin uusi tutkimuskohde. Esimerkiksi voimaloista aiheutuvia mahdollisia ympäristövaikutuksia ei voida vielä varmasti sanoa. Kappaleessa 5 kuitenkin esitetään arvioituja ympäristövaikutuksia tarkemmin.

Rahoitus on tällä hetkellä suurimpia kehittäjien kohtaamia haasteita. Toistaiseksi maailmalla on vasta varsin maltillisia voimaloita, jotka toimivat ennemmin tutkimuslaitoksina kuin kaupallisina toimijoina. Kun laitoksia saadaan massatuotantoon, kustannuksia saadaan alas. Esimerkiksi vuodesta 1999 kehityksen alla ollut poijumallinen voimala Wabebob hanke kariutui vuoden 2013 huhtikuussa epäonnistuttuaan rahoituksen ja yhtiökumppaneiden hankinnassa. (Bloomberg 2013.)

Tällä hetkellä aaltovoimalat eivät kykene kilpailemaan muiden uusiutuvan energian tuotantomuotojen kanssa. Aaltovoimalat ovat vielä kalliita, joskin tuotetulle sähkölle saatu hinta pienenee kokoajan. Koska aaltovoimaloita on useita erilaisia, ei voida sanoa suoraa hintaa aaltovoimalla tuotetulle sähkölle vaan hinta riippuu hyvin paljon käytetystä sovelluksesta ja sijaintikohteesta. Duckers kuitenkin esittää joidenkin isobritannialaisen voimalan saavuttavan 6–10 snt/kWh hinnan (Duckers 2004, 332). Clément et al. tutkimuksessa aaltoenergian hinnaksi arvioidaan n. 8 snt/kWh 8 % vuosittaisella hinnan pudotuksella (Clément et al. 2002, 418). Euroopan komission arvioi tämän hetken hinnaksi kuitenkin 37,3 snt/kWh ja vuoteen 2050 mennessä 8,3 snt/kWh (Euroopan komissio 2014a, 121). Lisäksi komission laatiman raportin mukaan ensimmäisten kaupallisten laitosten investointikustannusten arvioidaan olevan 2500...7000 €/kW. Nykyisten prototyyppien hinnat ovat olleet 6450...13500 €/kW. (Euroopan komissio 2014b, 4.)

3 TEKNIIKAT JA SOVELLUKSET

Aaltojen energiaa hyödyntäviä sovelluksia on kehitteillä paljon. Näistä otetaan esille muutamia tärkeimpiä ja menestyneimpiä. Aaltovoimaloiden jakoperusteena on yleensä joko sijainti, sovellustyyppi tai tehontuottotapa (*power take off – PTO*). Tämän työn aaltovoimaloiden jako perustuu European Marine Energy Centren laatimaan listaukseen kuitenkin hieman soveltaen (EMEC 2014a). Kaikki sovellukset eivät kuitenkaan sovi näihin raameihin ja listausperiaatteita onkin useita.

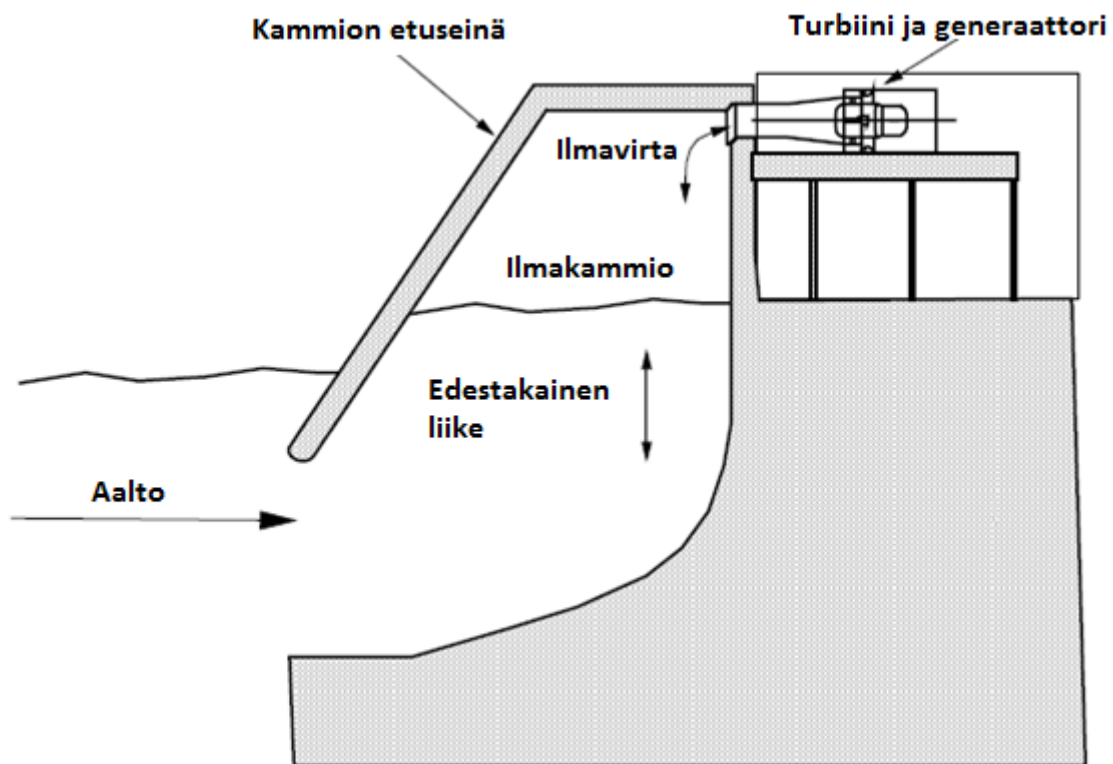
Aaltoenergia-alan yksi erikoispiirteistä on sovellusten lukumäärä. Toistaiseksi ei ole löytynyt suunnannäyttäjää tai sovellusta, joka olisi selkeästi toista parempi. Tutkimusten mukaan tällä hetkellä on käynnissä noin sata eriasteista aaltoenergiaprojektia (Falcão 2010, 904). EMEC listaa www-sivuillaan 156 eri aaltovoimakonseptia, joskin osa näistä hankkeista lienee jo kariutunut (EMEC 2014b).

Aaltovoimaloiden sijoitusvaihtoehdot ovat rannat, rannan läheisyys ja avomeri. Avomerellä aaltojen energiatiheys on suurin ja rannalla energiatiheys on pienin. Tyypillisesti avomerellä sijaitsevat voimalat ovat kelluvia ratkaisuja. Rannalle asennettavat sovellukset ovat usein helposti asennettavia ja huollettavia, joskin niiden energiatuotanto on pienempi kuin avomerellä sijaitsevilla voimaloilla (Waveplam 2009, 10). Lähellä rantaa sijaitsevat sovellukset eivät koe avomeren rajuja voimia ja samalla kuitenkin kohtaavat suuremman energiatheyden aaltoja kuin rannalla. Duckersin mukaan avomerellä tarkoitetaan sijaintia, jossa meren syvyys on yli puolet aallonpituudesta. Rannan läheisyydessä meren syvyys on puolestaan pienempi kuin neljännes aallonpituudesta. (Duckers 2014, 304.)

Tyypilliset energianmuuntojärjestelmät aaltovoimaloille ovat hydraulinen järjestelmä, lineaarigeneraattori, vesiturbiini tai ilmaturbiini. Tässä kappaleessa pyritään kertomaan jokaisen sovelluksen tehontuottotapa ja avaamaan näitä hieman lukijalle. Kappaleessa pyritään kertomaan myös voimalatyyppien sähköntuotantokapasiteetti tai nimellisteho, mikä vaihtelee sadoista kilowateista jopa megawattiluokkaan asti. Laitosten energiantuotannon suuruutta kuvaa myös käyttökerroin, mikä osoittaa, kuinka suuren osan ajasta laitos toimii nimellistehollaan. Monen sovelluksen arvellaan pääsevän 25–40 % käyttökerroksiin (Folley et al. 2009, 2).

3.1 OWC-laitokset (*Oscillating Water Column*)

OWC-laitosten peruseräiteena on, että aaltojen edestakaista liikettä hyödynnetään ilman kuljettamiseen turbiinin läpi. Aallot toimivat ikään kuin mäntinä, jotka liikuttavat ilmaa edestakaisin. OWC-voimalassa on kammio, jonka alaosasta vesi pääsee liikkumaan. Aallot saavat aikaiseksi liikkeen, jossa vedenpinta kammiossa nousee ja laskee. Tällöin ilma kammiossa kulkeutuu edestakaisin ilmaturbiiniin pyörittäen sen roottoria. Ilmaturbiini on samalla akselilla generaattorin kanssa, missä roottorin pyörimisenergia muutetaan sähköenergiaksi. OWC-laitoksissa turbiinina saatetaan käyttää esimerkiksi Wellsin turbiinia, mille on ominaista roottorin pyöriminen samaan suuntaan riippumatta ilman tulosuunnasta. Kuvassa 1 nähdään OWC-laitoksen periaatekuva. Voimalat rakennetaan usein rannalle mutta nykyään on kehitteillä myös kelluvia sovelluksia. (Falcão 2010, 904–905.)



Kuva 1. OWC:n periaatekuva. (Thorpe 1999, 27)

Iso-Britanniassa ensimmäinen sähköä verkkoon syöttävä OWC-laitos rakennettiin jo vuonna 2000 Skotlantiin. Sen rakensi Wavegen yhtiö. Kyseessä oli LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*) niminen laitos ja sen installoitu kapasiteetti on 500 kW. LIMPET toimii nykyään tutkimuslaitoksena eri ilmaturbiineille. (Cruz 2008, 288.)

3.1.1 Oceanlinx

Oceanlinx (entinen Energetech) on australialainen yritys, joka valmistaa OWC laitoksia. Yhtiöllä on kolme erilaista OWC tyyppin aaltovoimalamallia, jotka poikkeavat toisistaan kooltaan, kapasiteetiltaan, sijainniltaan ja ankkuroinniltaan. Yhtiö asensi ensimmäisenä maailmassa 1 MW kapasiteetin saavuttaneen kaupallisen aaltovoimalan, greenWAVEn. Se sijoitetaan n. 10 – 15 metrin syvyiselle alueelle, jossa se lepää omalla painollaan merenpohjassa. GreenWAVE mallissa ei ole tarvetta erilliselle ankkuroinnille tai muulle kiinnitykselle. Yhtiö on suunnitellut myös blueWAVE nimisen laitoksen, jossa on useampi vesikammio ja turbiini. Sen nimellistehoksi on arvioitu 3 MW. Yhtiön kolmas aaltovoimalamalli ogWAVE on suunniteltu etäisiin kohteisiin, kuten esimerkiksi öljy- tai kaasunporauslaitoille. BlueWAVE ja ogWAVE ovat kelluvia OWC laitoksia. (Oceanlinx 2013.)

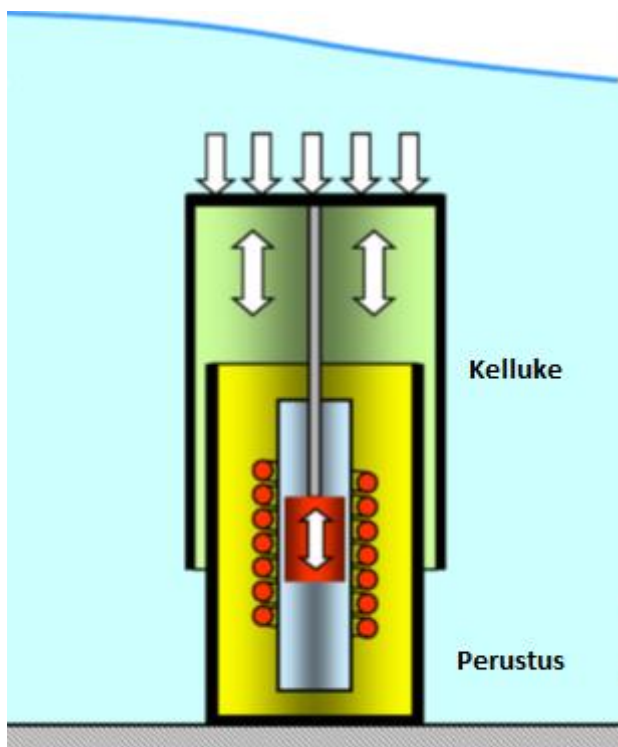
3.2 Poijut (*Point Absorbers*)

Pojjut ovat joko täysin upoksissa olevia tai osittain upoksissa olevia aaltovoimaloita, jotka vastaanottavat aaltojen energian niiden tulosuunnasta riippumatta. Merenalaisten poijujen liike perustuu paineen vaihteluun aallon ylittäessä kellukkeen. Aallon harjan kohdalla painavat vesimassat liikuttavat kellukkeen alakohtaan ja aallonpohjan kohdalla kelluke nousee takaisin pintaan. Osittain upoksissa olevissa malleissa merenpinnalla on aaltojen liikettä mukaileva ns. koho, jonka varteen energianmuuntojärjestelmä on liitetty. Poijut ovat tavallisesti kapasiteetiltaan pienempiä kuin muun mallin aaltovoimalat ja niitä on tarkoitus asentaa useampia muodostamaan ns. aaltovoimapuisto. Poijut voidaan kiinnittää meren pohjaan betonisen perustuksen avulla tai ne voidaan ankkuroida myös ketjulla tai kaapelilla. (Falcão 2009, 906–907.)

Poijumallin voimaloiden tehontuottotavat vaihtelevat hydraulisen systeemin ja lineaarisen generaattorin välillä. Hydraulinen järjestelmä koostuu männästä, akuista sekä moottorista, kun lineaarigeneraattorit koostuvat magneeteista ja staattorikäämistä.

3.2.1 Archimedes Wave Swing – AWS

Hollannissa kehitetty Archimedes Wave Swing (kuva 2) on täysin upoksissa oleva poijutyypin aaltovoimala. AWS koostuu liikkuvasta yläosasta, ns. kellukkeesta ja merenpohjassa kiinni olevasta perustuksesta. Kellukkeen edestakainen liike ja siihen liitetty energianmuuntojärjestelmä mahdollistavat sähkön tuoton. Wave Swing oli ensimmäinen sovellus, jossa käytettiin lineaarista sähkögeneraattoria (Falcão 2009, 908). Prototyyppi on teholtaan 2 MW. Täysin upoksissa olevan sovelluksen etuina on suoja myrskyiltä ja pieni vaikutus maisemaan. (Cruz 2008, 350–353.)



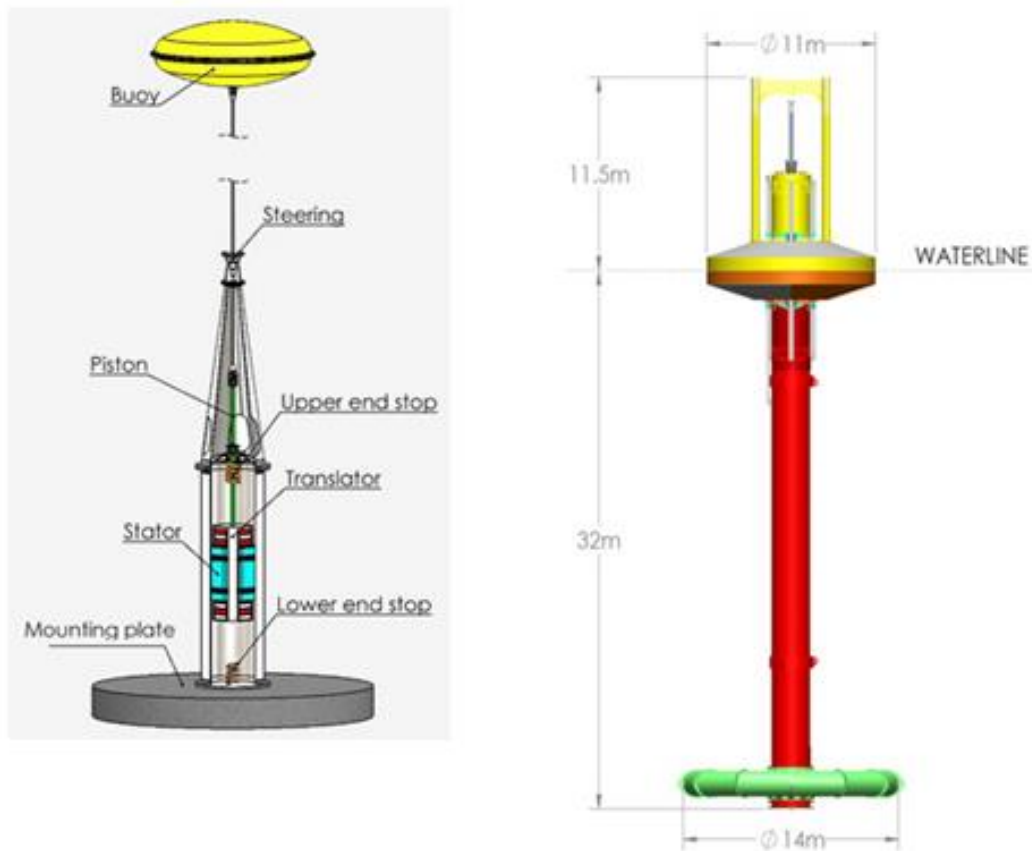
Kuva 2. AWS:n periaatekuva. (Falcão 2009)

3.2.2 Seabased

Seabased on ruotsalainen yritys, joka valmistaa nimeään kantavia aaltovoimaloita. Voimalat ovat tyypiltään osittain upoksissa olevia poijuja, jotka asennetaan merenpohjaan eräänlaiselle perustukselle. Merenpinnalla on kuitenkin koho, joka mukailee aaltojen liikettä. Kohoon liitetty ohjauskaapeli liikuttaa magneetteja staattorin sisällä (kuva 3). Tehontuottojärjestelmänä laitoksissa käytetään lineaarigeneraattoria. Sähkö johdetaan yhtiön kehittämiin merenalaisiin matalajännitteisiin aseisiin (*Low Voltage Marine Substation*), joissa sähkö muunnetaan verkkoon sopivaksi. Seabased voimaloiden nimellistehoksi arvioidaan 20–200 kW. (Seabased 2013.)

3.2.3 PowerBuoy

PowerBuoy on yhdysvaltalaisen Ocean Power Technologies yrityksen kehittämä voimala. Voimala koostuu kohosta, tehotuottojärjestelmästä ja vedenalaisesta painosta (*Submerged plate*). Koho liikkuu vertikaalisesti mukaillen aaltoja mutta painolla tätä liikettä ei tulisi olla johtuen sen sijainnista syvällä meren pinnan alapuolella. Mitä suurempi kohon ja painon välinen suhteellinen liike sitä enemmän on mahdollista saada tehoa. (Corr-Barberis 2012, 1-2.). PowerBuoy on ankkuroituna merenpohjaan ketjujen avulla ja siinä käytetään niin kutsuttua kolmen pisteen ankkurointia (*three point mooring*). Tehontuotto tapahtuu hydraulisen järjestelmän avulla. PowerBuoy Mark 3:n huipputeho on 866 kW ja yhtiö on kehittämässä Mark 4 voimalaa, jonka kapasiteetti tulisi olemaan 2,4 MW. Poijut ovat suunniteltu n. 30 – 60 metrin syvyyteen. Yhtiö arvelee poijujen saavuttavan 30–45 % käyttökertoimen riippuen voimaloiden sijainnista. (Ocean Power Technologies 2013.)



Kuva 3. Vasemmalla Seabased poiju ja oikealla OPT:n PowerBuoy. (Seabased 2013; Ocean Power Technologies 2013)

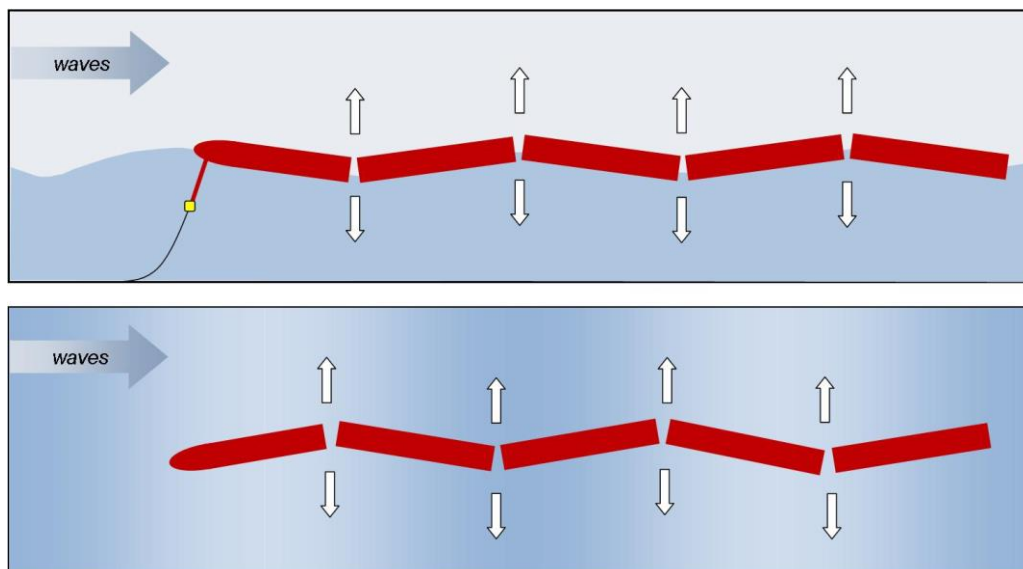
3.3 Vaimentimet (*Attenuators, terminators*)

Vaimentimet ovat kelluvia aaltovoimaloita, jotka voidaan asettaa joko kohtisuoraan tai linjaan aaltorintamaa vasten. Voimaloita kutsutaan joko vaimentimiksi (*attenuator*) tai terminaattoreiksi (*terminator*) riippuen niiden asettelusta aaltorintamaa nähden. Vaimentimet ovat kohtisuorassa aaltorintamaa vastaan ja terminaattorit ovat yhdensuuntaisia rintaman kanssa. Tämän tyyppin voimaloiden sähköntuotto perustuu aaltorintaman liikkeen vastustamiseen. Energianmuunto on usein toteutettu hydraulijärjestelmällä. Vaimentimet ovat saaneet nimensä aikanaan vaimennusilmistä, joka myöhemmin osoittautui virheelliseksi. (Cruz 2008, 45.)

3.3.1 Pelamis

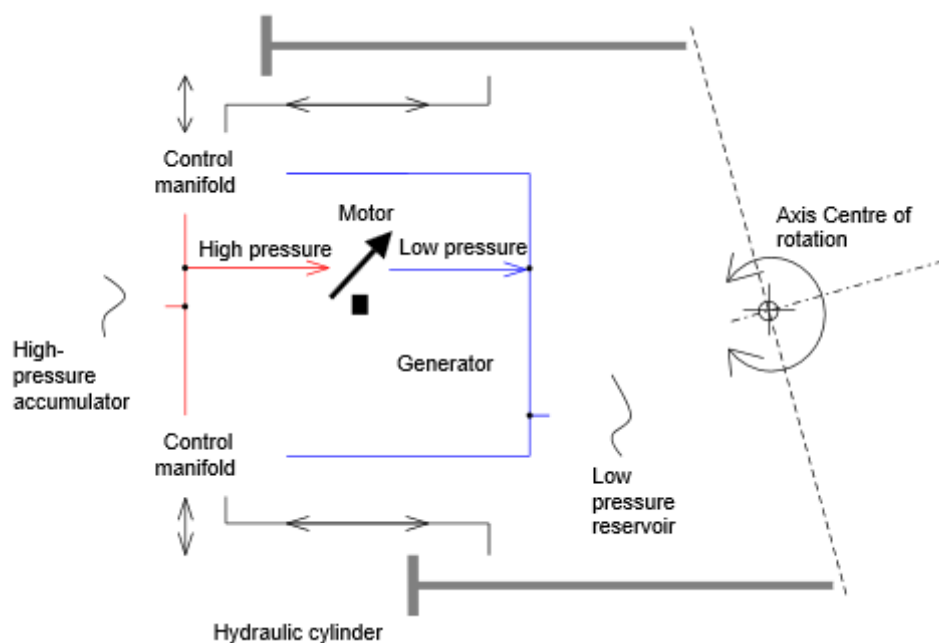
Pelamis Wave Power yhtiön kehittämä Pelamis on yksi maailman johtavista aaltovoimalamalleista. Vuonna 2008 yhtiö toimitti kolme täysikokoista voimalaa Portugaliin ja ne muodostavat maailman ensimmäisen aaltovoimapuiston. Voimaloiden yhteenlaskettu teho on 2,25 MW ja tavoiteltu käyttökerroin 25–40 %. Yhtiö on kehittänyt jo Pelamis P2 mallin, joka on vanhempaa mallia suurempi kooltaan ja teholtaan. (Pelamis Wave Power Ltd 2013.) Pelamista on suunniteltu myös Kanadan rannikolle, missä sille arvioitiin 20 – 29 % käyttökerrointa (Robertson 2010, 15–17).

Pelamis on käärmeennäköinen kelluva voimala, joka asetetaan kellumaan kohtisuorasti aaltorintamaa vastaan. Pelamis asennetaan 2-10 km:n päähän rannikosta, missä veden syvyys on arviolta 50 metriä. Pelamis ankkuroidaan merenpohjaan kiinni. Pelamis koostuu halkaisijaltaan 3,5 tai 4 m:n putkista mallista riippuen. Putket ovat liitettynä toisiinsa nivelillä, joiden avulla voimala mukaillee aaltojen liikettä horisontaalisesti ja vertikaalisesti (kuva 4). Aaltojen liike muutetaan sähköksi hydraulisen järjestelmän avulla. Sähkö siirretään verkkoon merikaapeleiden avulla. (Pelamis Wave Power Ltd 2013.)



Kuva 4. Pelamiksien liike sivulta ja päältäpäin katsottuna. (Pelamis Wave Power Ltd 2013)

Pelamiksen tehontuotto tapahtuu keskenään identtisissä putkissa, joihin hydraulijärjestelmä on rakennettu. Nivelissä hydrauliset sylinterit vastustavat aaltojen liikettä, jolloin sisäiset männät pumppaavat korkeapaineista hydraulioöljyä paineakkuihin. Paineakuista öljy purkautuu hiljalleen hydraulimoottoriin, joka on kytketty sähkögeneraattoriin. Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva Pelamiksen sähköntuotosta. Sama periaate toistuu myös useissa muissa hydraulijärjestelmissä. (Henderson 2005, 272- 273.)



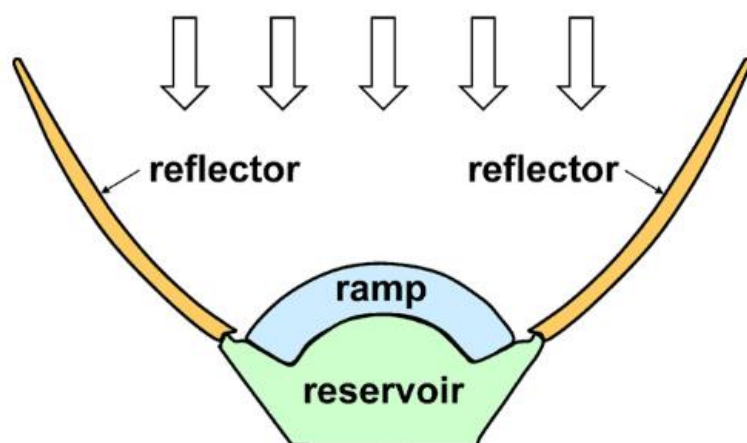
Kuva 5. Pelamiksen sähköntuoton periaatekuva. (Henderson 2005, 275)

3.4 Potentiaalienergiaa hyödyntävät voimalat (*Overtopping Devices*)

Tämän tyyppin voimalat muuntavat aaltojen liikkeen potentiaalienergiaksi. Aallot ohjataan vedenpinnan yläpuolella olevaan varastoon, josta vesi ohjataan perinteisiin vesiturbiineihin. Sähköntuotto tapahtuu siis perinteisen vesivoimalan tavoin. Etuna tällä systeemillä on jo paljon tutkittu vesiturbiiniteknologia. Yleisin vaihtoehto turbiiniksi on tyypillisesti Kaplan turbiini. (Khan & Bhuyan 2009, 12.)

3.4.1 Wave Dragon

Tanskalaisessa Wave Dragon:ssa on avomerelle ankkuroitu aaltovoimala, joka koostuu siivistä (kerääjistä), rampista sekä vesivarastosta. Kerääjät ohjaavat saapuvat aallot ramppiin, joka nostaa vesimassan merenpinnan yläpuolella sijaitsevaan vesivarastoon. Kerääjät kasvattavat saapuvaa vesimassan määrää ja vaikuttavat täten saapuvaan energiamäärään. Vesivarastosta vesi ohjataan perinteisiin vesiturbiineihin. Vesivaraston suuruus on 8000 m^3 ja sen tulisi tyhjentyä kahden aallon välissä. Kuvassa 6 on esitetty Wave Dragonin periaatekuva. Voimalan kapasiteetti on verrannollinen sen kokoon. Esimerkiksi 7 MW:n laitoksen koko olisi $300 \times 170 \text{ m}$. (Wave Dragon 2005.) Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa Wave Dragonin arveltiin pääsevän jopa 50 – 59 % käyttökertoimiin (Robertson 2010, 15–16).



Kuva 6. Wave Dragonin periaate (Falcão 2010, 911).

Koska voimala sijoitetaan avomerelle, se kohtaa varsin rajuja olosuhteita. Wave Dragonin etuna on kuitenkin sen yksinkertaisuus. Siinä ei ole turbiinin ja generaattorin lisäksi yhtään liikkuvaa osaa, jolloin rikkoutumisen todennäköisyys saadaan pieneksi. (Wave Dragon 2005.)

3.5 OWSC-laitokset (*Oscillating Wave Surge Converter*)

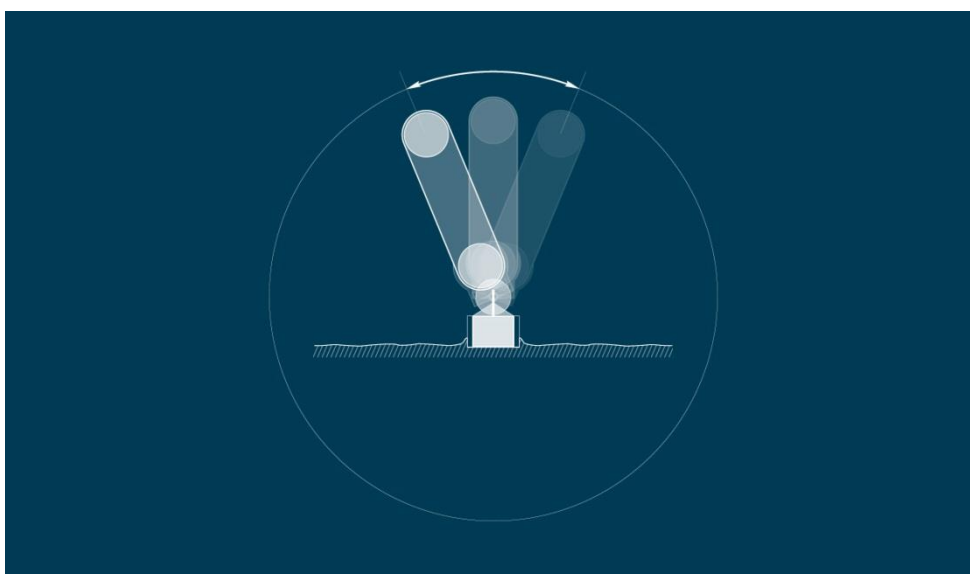
OWSC tyyppin laitokset hyödyntävät veden vellontaa. Vellonta tarkoittaa vesipartikkelien liikettä, kun aallot lähestyvät matalampaa rantaa. Käytännössä vesipartikkelit ovat ympyräliikkeessä ja lähestyessään rantaa vesipartikkelit törmäävät

merenpohjaan. Tämä aiheuttaa ympyräliikkeeseen muutoksen ja liike muuttuu elliptiseksi ja lopulta partikkelit liikkuvat edestakaisin. Ilmiö antaa rajat OWSC voimaloiden optimaaliselle sijainnille. OWSC voimalat sijoitetaankin lähelle rantaa, missä tämä ilmiö esiintyy. (AW-Energy 2012b.)

3.5.1 WaveRoller

Waveroller on suomalaisen AW-energy yhtiön kehittämä OWSC tyyppin aaltovoimala. Waveroller on paneeli, joka hyödyntää meren pohja-aaltoja lähellä rantaa. Pohja-aallot liikuttavat paneelia edestakaisin saaden voimalan hydraulijärjestelmän toimimaan. Tehontuottojärjestelmän muodostaa hydraulimoottori, joka on yhdistetty generaattoriin. Yhden Waverollerin sähköntuotantokapasiteetti vaihtelee 500–1000 kW välillä ja käyttökertoimeksi arvioidaan 25–50 %. Energiantuotannossa voimaloista on tarkoitus muodostaa aaltovoimapuisto, missä ne toimivat toisistaan riippumattomina. Näin ollen yhden vikaantumisen ei vaikuta muiden paneelien toimintaan. (AW–Energy 2012a.)

Waverollerit ovat täysin upoksissa olevia voimaloita ja ne ovat merenpohjassa perustuksissaan kiinni. Voimaloiden optimaalinen asennussyvyys on noin 8–20 metriä ja etäisyys rannasta 300–2000 metriä. Kuvassa 7 on esitetty Waveroller konsepti. (AW–Energy 2012a.)

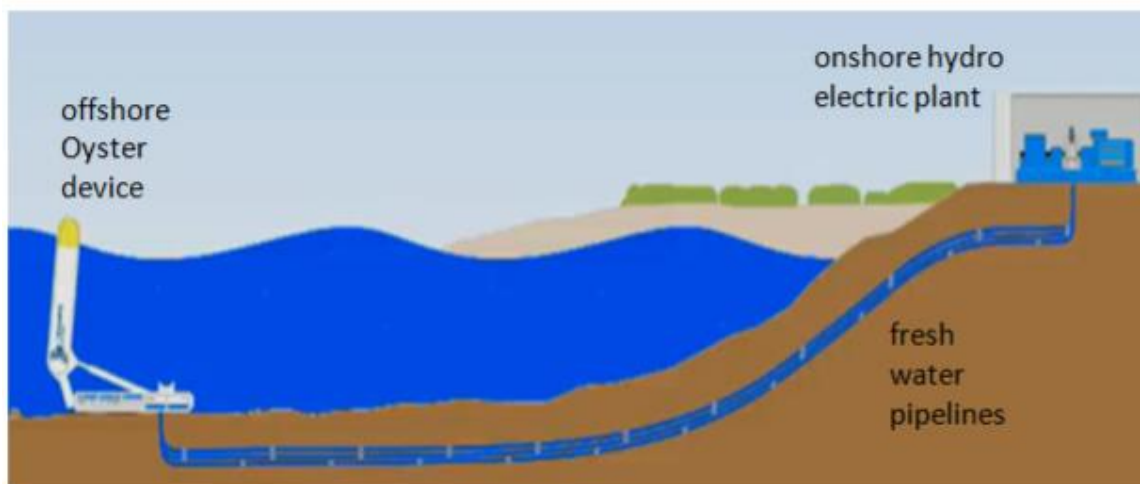


Kuva 7. Waveroller konsepti (AW–Energy 2012a).

3.5.2 Oyster

Englantilainen Aquamarine Power yhtiö on kehittänyt Oyster nimistä aaltovoimalaa. Oyster on OWSC tyyppin sovellus, joka toimii käytännössä pumppuna. Oysterin energiantuotanto voidaan karkeasti jakaa kahteen alueeseen, merelle ja maalle. Merellä Oysterissa on paneeli, jota aallot liikuttavat. Paneelin liike ohjaa kahta hydraulista mäntää, jotka ohjaavat korkeapaineista vettä maalla olevaan vesiturbiiniin. Vesi on suljetussa kierrossa, jotta välttyään meriveden aiheuttamilta haasteilta kuten suodatukselta ja korroosiolta (Cameron et al. 2010, 4). Tulevaisuudessa useita Oystereita on mahdollista sijoittaa samaan vesikiertoon ja kasvattaa näin sähköntuotantokapasiteettia. (Aquamarine Power 2011.)

Oyster sijoitetaan lähelle rantaa n. puolen kilometrin päähän rannasta 10–15 metrin syvyyteen. Oyster ei ole kokonaan merenpinnan alapuolella, koska aalloista halutaan saada maksimaalinen voima (Cameron et al. 2010, 3). Kuvassa 8 on esitetty Oyster konseptin periaatekuva.



Kuva 8. Aquamarine Powerin Oyster konsepti (Cameron et al. 2010, 4).

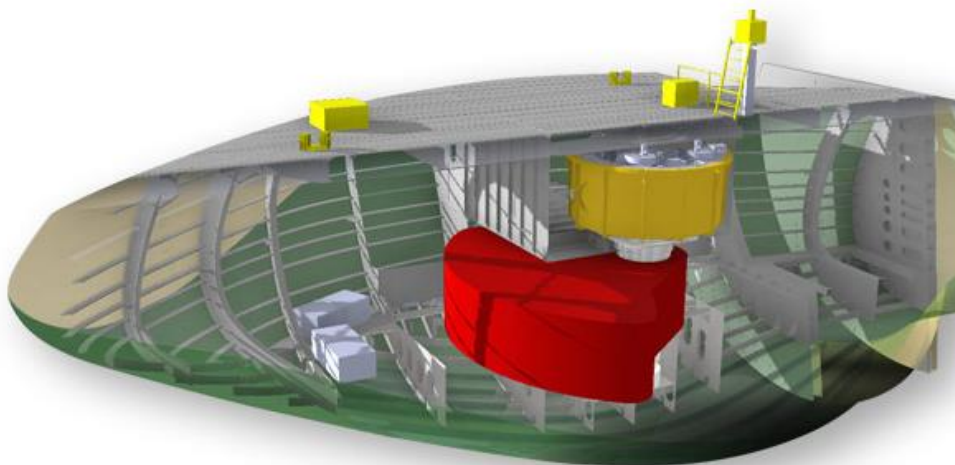
3.6 Muita

Tässä kappaleessa esitetään muita aaltovoimasovelluksia, jotka eivät varsinaisesti kuulu mihinkään luokkaan tai ne muodostavat oman luokkansa. EMEC on listannut varsin kattavan määrän muita sovelluksia mutta niiden kaikkien esille ottaminen ei ole tarkoituksena tässä työssä.

3.6.1 Wello Penguin

Wello Penguin on suomalaisen yhtiön Wellon kehittämä sovellus, jonka tehontuotto perustuu pyörivään massaan. EMEC on listannut pyörivän massan (*Rotating Mass*) omaksi luokakseen mutta tämän tyyppin sovelluksia ei ole vielä muita (EMEC 2013b). Wello Penguin on kelluva ”alus” (kuva 9), joka mukailee aaltojen liikettä. Aluksen sisällä on generaattoriin liitetty paino, joka pyörii aaltojen liikkeen vuoksi. Yhtiö on tehnyt testejä Skotlannin Orkneyssä, jossa sijaitsee EMEC:n tutkimuskeskus. Laitoksen huipputeho on vaihdellut 300 – 700 kW välillä jo kevyessä aallokossa. (Wello 2014.)

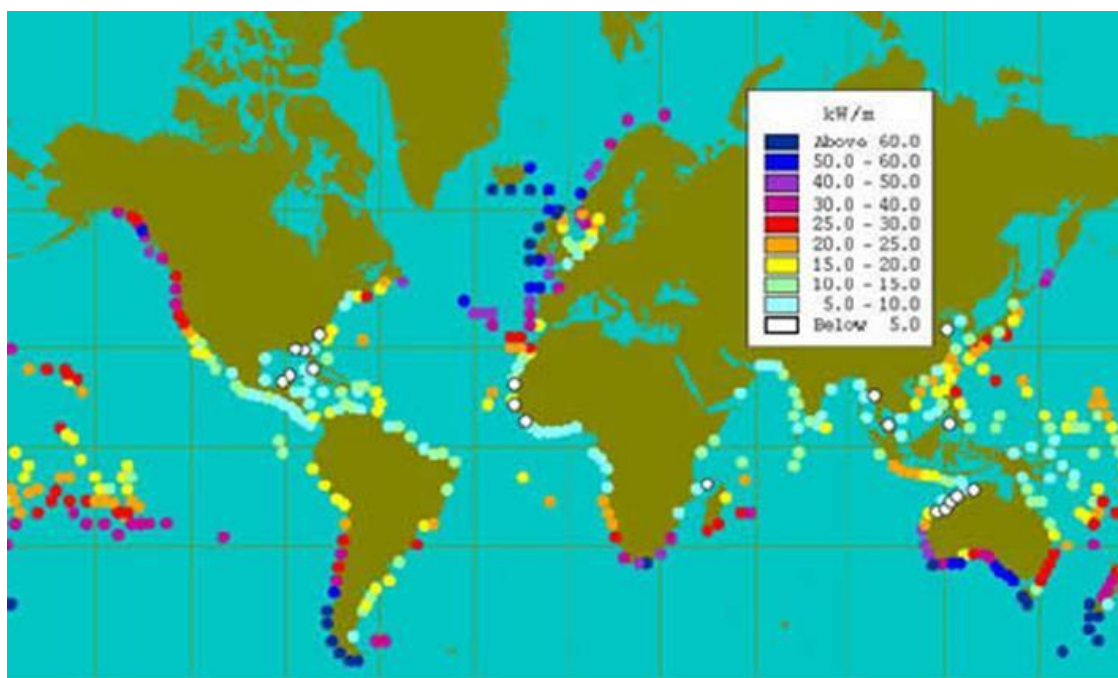
Wello Penguinin kehitys on ollut nopeaa ja syynä tähän on ollut laitoksen yksinkertaisuus ja jo olemassa oleva tekniikka sekä osat. Wello Penguin on hyvin pitkälle rakennettu teollisuuden ns. hyllytavarasta. (Wello 2014.)



Kuva 9. Wello Penguin konsepti (Wello 2014).

4 POTENTIAALI

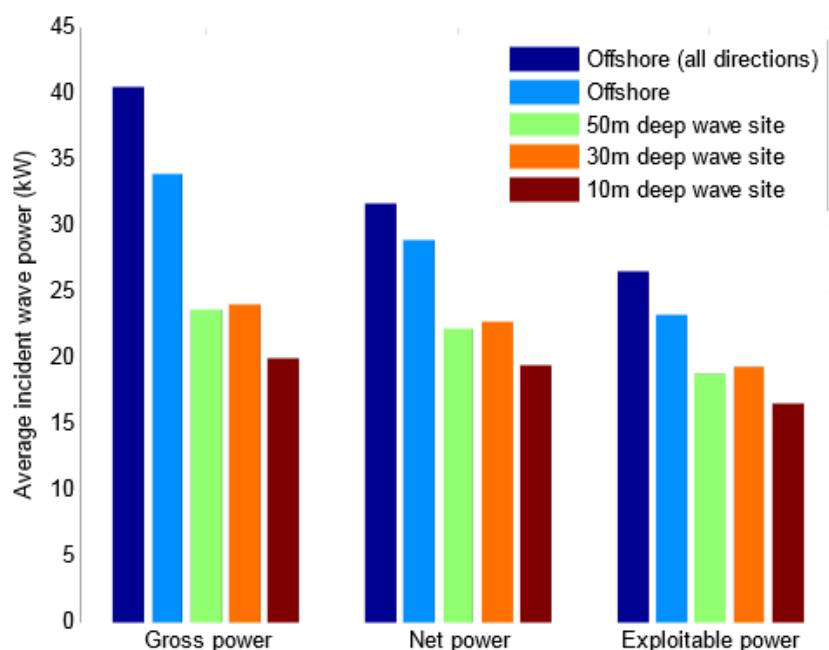
Maailman energianeuvoston (*The World Energy Council*) mukaan maapallon merien aaltovoimaresurssit ovat 2 TW, josta erään arvion mukaan on hyödynnettävissä 10–25 prosenttia (Cruz 2008, 1). Vuodessa tämä voisi tehdä n. 800–3 500 TWh. Pelkästään Iso-Britannian rannalle kulkeutuu päivän aikana n. 1 TWh:n edestä aaltoja. (Cruz 2008, 93). Erityisesti Euroopan länsirannikot ovat potentiaalisia alueita aaltovoimaloille ja koko Euroopan aaltoenergiapotentiaaliksi arvioidaan 320 GW (Clément et al 2002, 408). Yhdysvalloissa on arvioitu, että aaltoenergian avulla voitaisiin kattaa noin 25 % maan sähkönkulutuksesta (Crawford 2013, 40). Australian etelä-rannikolla vuotuiseksi aaltoenergiaksi on keskimäärin mitattu yli 1300 TWh (Hemer & Griffin 2010, 12). Aaltovoiman avulla voidaan siis kattaa merkittävä osa maapallon energiantarpeesta. Kuvasta 10 nähdään, että parhaimmat alueet aaltovoiman hyödyntämiseen löytyvät Australiasta, Uudesta-Seelannista sekä Euroopan, Pohjois- ja Etelä-Amerikan länsirannikoilta. Kuvassa tummansinertävät alueet tarkoittavat korkeaa sähköntuottopotentiaalia.



Kuva 10. Aaltojen energiasisältö maapallolla (GENI 2014).

Yksi aaltojen tärkeimmistä ominaisuuksista on niiden energian häviön pienuus. Aallot voivat kulkea pitkiäkin matkoja ilman suuria häviöitä, jolloin niiden energiavaranto voidaan hyödyntää rantojen läheisyydessä pienin siirtokustannuksin. Toinen tärkeä ominaisuus liittyy aaltojen ennustettavuuteen. Aaltoja voidaan ennustaa varsin helposti jopa kahden vuorokauden päähän. Aalloilla on myös korkeampi energiatiheys kuin tuulella tai auringonsäteilyllä. Tämä tarkoittaa, että aaltovoimalat ovat mahdollisesti pienempiä kuin esimerkiksi saman kapasiteetin tuulivoimalat.

Folley ja Whittaker ovat tutkimuksissaan kartoittaneet aaltojen energiasisältöä niin rannalla kuin avomerellä. He ottavat tutkimuksissaan kantaa niin sanottuun hyödynnettävissä olevaan aaltovoimaan. Vaikkakin aallot sisältävät avomerellä suurimman energiamäärän, osuus hyödynnettävästä energiamäärästä ei ole paljoa suurempi kuin rannalla. Tämä tekee rannan läheisyyden kiinnostavaksi kohteeksi avomeren sijaan. Kun otetaan huomioon vielä avomerellä olevat olosuhteet ja vaatimukset laitteelta, rannan läheisyys tulee todennäköisesti houkuttelemaan aaltovoiman kehittäjiä avomerta enemmän. Kuvassa 11 esitetään aaltovoiman tehoja ja hyödynnettävyyksiä eri syvyyksillä. (Folley et al. 2009; Folley & Whittaker 2009.)



Kuva 11. Aaltovoiman tehot ja hyödynnettävyys eri sijainneissa (Folley et al. 2009, 7).

5 VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN

Aaltovoimaloiden etuna yhdessä muiden uusitutuvien energiantuotantomuotojen kanssa on päästöttömyys sähköntuotannon aikana. Aaltovoimalat eivät normaaliolosuhteissa tuota päästöjä ympäristöön. Tosin jotkin voimalat saattavat rikkoutuessaan tai huoltojen aikana vuotaa esimerkiksi hydraulii- tai voiteluöljyä mereen. Tästä seuraavia haittoja voidaan ehkäistä käyttämällä mahdollisimman ympäristöystävällisiä tai biohajoavia öljyjä. Tietyissä olosuhteissa saatetaan käyttää myös epäpuhtauksia torjuvia pinnoitteita tai maaleja, jotka saattavat olla haitallisia merieläimille. (Cruz 2008, 410.)

Erilaisten vuotojen lisäksi aaltovoimalat voivat aiheuttaa merenalaista melua. Valaiden, hylkeiden ja eri kalalajien tiedetään paikantavan saaliinsa ja kohteet merenalaisten äänien avulla. Melun arvellaan häiritsevän myös eliöiden kommunikaatiota. Melu saattaa aiheuttaa lisäksi stressiä ja käyttäytymisen muutoksia eläinlajeissa. (Langhamer et al. 2009, 1333.)

Merisähkökaapeliin aiheuttaman sähkömagneettikentän vaikutuksia merieliöihin ei tiedetä tarkasti. Tiedetään kuitenkin, että jotkin lajit suunnistavat maapallon magneettikentän avulla. Gillin tekemän tutkimuksen mukaan kaapeliin luomalla sähkömagneettikentällä ei ole suurta vaikutusta kaloihin. Asiaan voidaan kuitenkin vaikuttaa haudautamalla sähkökaapelit merenpohjaan. (Gill 2001, 8.)

Jotkin sovellustyypit toimivat aallonmurtajina. Aaltojen pieneneminen voimaloiden jälkeen saattaa vaikuttaa mm. rannalle kulkeutuvan pohjamateriaalin määrään ja sitä myöten eroosioon. Lisäksi aaltojen pieneneminen saattaa johtaa pienempään meriveden sekoittumiseen ja täten vaikuttaa merien eläimistöön. (Pelc, Fujita 2002, 476.) Useimmat voimalat tosin sijoitetaan kauemmaksi merelle, jolloin meren virtauksen muutokset jäävät vähäiseksi (Cruz 2008, 410). Voimaloiden asentamista alueille, joissa ne aiheuttaisivat merkittäviä muutoksia luonnonprosesseihin, tulisi välttää.

Maiseman muutokset riippuvat aaltovoimasovelluksesta ja niiden sijainnista. Jotkin voimalat ovat täysin upoksissa, jolloin niistä ei ole vaikutusta maisemaan. Lisäksi kauempana avomerellä sijaitsevat voimalat aiheuttavat vain pientä vaikutusta maisemaan. Niihin voimaloihin, jotka näkyvät rannalle uskotaan olevan positiivinen

vaikutus esimerkiksi turistikohteissa. Merenkulun kannalta niihin on asennettava tarvittavia valoja, jotta ne näkyvät merenkulkuvälineille myös pimeään aikaan.

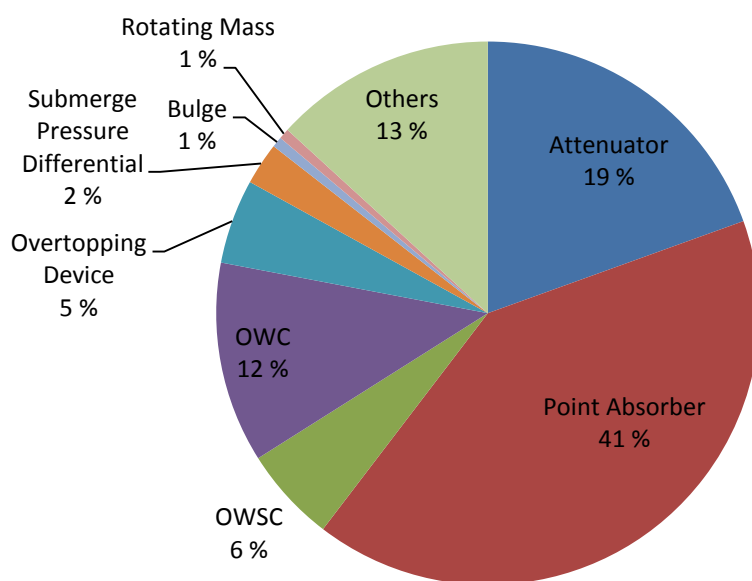
Aaltovoimaloiden toisaalta arvellaan myös kasvattavan esimerkiksi kalakantoja ja lajien rikkautta sekä merieläinten elinympäristöä toimimalla suojana ja keinotekoisina riuttoina. Aaltovoimapuistot ehkäisevät kalastuksen alueellaan ja näin puistot toimivat ikään kuin suojelualueina ja Langhamerin tutkimuksen mukaan näillä on ollut positiivinen vaikutus alueen kalakantoihin ja vaikuttanut näin positiivisesti myös kalastukseen. (Langhamer et al. 2009, 1331.)

Voimaloiden toiminnallisen ajan lisäksi huomioon täytyy ottaa myös niiden rakentamisesta, kuljetuksesta ja purkamisesta aiheutuvat väliaikaiset haittavaikutukset kuten melu ja saasteet.

6 YHTEENVETO

Aallot ovat uusiutuva energianlähde ja aaltovoiman toivotaan nousevan yhdeksi merkittäväksi uusiutuvan energian tuotantomuodoksi tuuli- ja aurinkovoiman rinnalle. Uusiutuvana energianlähteenä se on päästötön ja sen energiatiheys on erittäin suuri.

Aaltovoima on alana varsin uusi, joskin sitä kehitetään tällä hetkellä varsin monessa maassa. Toistaiseksi ei ole löytynyt selvästi muita parempaa sovellusta ja tästä syystä kehitteillä on erittäin laaja kirjo erilaisia sovelluksia. Sovellukset voidaan jakaa niiden tyyppin, sijainnin tai tehontuotantotavan avulla. Tässä työssä sovellettiin European Marine Energy Centren laatimaa jaottelua sovellusten tyyppin mukaan. Kuvasta 12 nähdään sovellusten jako EMEC:n mukaan ja kuinka kehitteillä olevat sovellukset jakautuvat kuhunkin voimalatyyppiin. Yhteensä EMEC listasi 156 eri sovellusta.



Kuva 12. Voimalatyyppien osuudet kehitteillä olevista sovelluksista.

Aaltoenergia on tutkitusti potentiaalinen energianlähde. Työssä selvitettiin mm. Euroopan ja Yhdysvaltojen mahdollisia aaltovoiman tuotantolukuja sekä selvitettiin voimalan sijainnin vaikutusta tuotannon suuruuteen. Rannan läheisyyden arveltiin houkuttelevan yhä enemmän kehittäjiä suotuisten olosuhteiden ja hyödynnettävissä

olevan energian suuruuden takia. Avomerellä hyödynnettävissä oleva energia ei ole kovinkaan paljoa suurempi kuin rannan läheisyydessä.

Aaltovoiman kohtaamia ongelmia ovat esimerkiksi voimaloiden pienet kapasiteetit, mikä johtaa epätaloudelliseen rakentamiseen ja kannattamattomuuteen. Voimaloiden hintoja tulisi saada alas samalla kun tehoa nostaa. Suunnittelussa haasteen tuo myös meren luomat vaikeat olosuhteet ja laitteiden optimointi niin, että ne toimisivat odotetusti myös osakuorman aikana. Kannattavuuden parantamiseksi tarvitaan myös tukia valtioilta esimerkiksi investointituen tai sähkötariffin muodossa.

Aaltovoimaloiden kaikkia ympäristövaikutuksia ei voida vielä varmasti sanoa. Kuitenkin huomioon tulee ottaa niin rakennusvaiheen, käytön, huollon ja käytönpoistamisen aikana tapahtuvia vaikutuksia. Aaltovoimalat saattavat aiheuttaa tiettyjä ongelmia merieläimiin, maisemaan tai veden virtaukseen alueellaan mutta toisaalta toimia myös suojana ja keinotekoisina riuttoina.

Kaiken kaikkiaan aaltovoimasta on tulossa tutkitumpi, kehittyneempi ja kannattavampi energiantuotantomuoto. Aaltovoima tuskin tulee olemaan ihmelääke jatkuvasti nousevan energiankulutuksen ja päästöjen torjunnassa mutta se kuitenkin tulee nousemaan tuuli- ja aurinkovoiman rinnalle yhdeksi merkittäväksi uusiutuvan energian tuotantomuodoksi.

LÄHDELUETTELO

AEA Energy & Environment, 2006. Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies, sivut 44–46. Report on the behalf of Sustainable Energy Ireland. Published by Implementing Agreement on Ocean Energy System.

Aquamarine Power. Technology: How Oyster wave power works [Aquamarine Power www-sivuilla]. Päivitetty 2011. Viitattu 13.1.2014. Saatavissa: <http://www.aquamarinepower.com/technology/how-oyster-wave-power-works/>

AW-Energy Oy. 2012a. WaveRoller Concept [AW-Energy Oy www-sivuilla]. [Viitattu 9.1.2014]. Saatavissa: <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept>

AW-Energy Oy. 2012b. Surge Phenomenon [AW-Energy Oy www-sivuilla]. [Viitattu 23.1.2014]. Saatavissa: <http://aw-energy.com/wave-energy-resources/surge-phenomenon>

Bloomberg. Wavebob Shuts Down After Failing to Raise Funds, Find Partner. [Bloomberg www-sivuilla]. Päivitetty 2013. Viitattu 26.9.2013. Saatavissa: <http://www.bloomberg.com/news/2013-04-03/wavebob-shuts-down-after-failing-to-raise-funds-find-partner.html>

Cameron L et al., 2010. Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter, sivut 1–10. International Conference of Ocean Energy.

Christensen L, Friis-Madsen E, & Kofoed J P, 2005. The Wave Energy Challenge: the Wave Dragon case. In Proceedings of the POWER-GEN 2005 Europe Conference.

Clément A et al, 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives. Renewable & Sustainable Energy Reviews, issue 6, sivut 405–431. Elsevier.

Corr-Barberis P, 2012. Improving the Dynamics and Efficiency of the PowerBouy, sivut 1-14. Verkkojulkaisu. [Viitattu 5.2.2014]. Saatavissa: http://www.mbari.org/education/internship/12interns/2012_papers/corr-barberis.pdf

Cruz Joao, 2008. Ocean Wave Energy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Crawford Mark, 2013. Waves currents & electric potential, sivut 40–46. USA. Mechanical Engineering

Duckers L, 2004. Renewable Energy; Wave energy, sivut 298–337. Ed. Godfrey Boyle. Oxford University Press. England.

EMEC a. Wave Devices. [European Marine Energy Centre www-sivuilla]. Päivitetty 2014. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>

EMEC b. Wave Developers. [European Marine Energy Centre [www-sivuilla](http://www.emec.org.uk)]. Päivitetty 2014. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>

EPRI, 2011. Mapping and Assessment of the United States Ocean Wave Energy Resource. Technical Report.

Euroopan komissio, 2014a. Vaikutusten arviointi. Verkkojulkaisu. [Viitattu 19.2.2014]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/ocean_energy/index_fi.htm

Euroopan komissio, 2014b. Technology Information Sheet-Ocean Wave Energy. Verkkojulkaisu. [Viitattu 19.2.2014]. Saatavissa: <http://setis.ec.europa.eu/publications/technology-information-sheets/ocean-wave-energy-technology-information-sheet>

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

Falnes J, 2007. A review of wave-energy extraction. Marine Structures, volume 20, issue 4, sivut 185–201. Elsevier

Folley M, Elsaesser B, Whittaker T, 2009. Analysis of the wave energy resource at the European Marine Energy Centre. Verkkojulkaisu. [Viitattu 31.1.2014], Saatavissa: <http://www.aquamarinepower.com/sites/resources/Published%20papers/2472/Analysis%20of%20the%20wave%20energy%20resource%20at%20the%20European%20Marine%20Energy%20Centre.pdf>

Folley M, Whittaker T, 2009. Analysis of the nearshore wave energy resource. Renewable Energy, volume 34, sivut 1709–1715. Elsevier

GENI, Global Energy Network Institute. Global Renewable Energy Resources; Ocean Energy [GENI [www-sivuilla](http://www.geni.org)]. Päivitetty 2014. [Viitattu 24.1.2014]. Saatavissa: <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/ocean.shtml>

Gill AB, Taylor H, 2001. The potential effects of electromagnetic fields generated by cabling between offshore wind turbines upon Elasmobranch Fishes. Country-side for Wale Report 2001

Hemer M. A, Griffin D. A, 2010. The wave energy resource along Australia's Southern margin. Journal of Renewable and Sustainable Energy, issue 2.

Henderson Ross, 2005. Design, simulation and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. Renewable Energy, volume 31, issue 2, sivut 271–283. Elsevier

Khan J, Bhuyan G, 2009. Ocean Energy: Global Technology Development Status, Report prepared by Powertech Labs for the IEA-OES.

Langhamer O, Haikonen K, Sundberg J, 2009. Wave power- Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. Renewable And Sustainable Energy Reviews, volume 14, issue 4, s. 1329–1335. Elsevier

Oceanlinx. Technology; Products. [Oceanlinx www-sivuilla] Päivitetty 2013. Viitattu 24.1.2014. Saatavissa: <http://www.oceanlinx.com/technology/products>

Pelamis Wave Power Ltd. Development History, Pelamis Technology. [Pelamis Wave Power Ltd. www-sivuilla]. Päivitetty 16.9.2013. [Viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.pelamiswave.com/development-history>

Pelc R, Fujita R. M, 2002. Renewable Energy from the ocean. Marine Policy, volume 26, issue 6, sivut 475-476. Elsevier.

Pettersson H, Lumiaro R, 2014. Tuulen kehittämien aaltojen elinkaari. [Itämeriportaali www-sivuilla]. [Viitattu 6.2.2014]. Saatavissa: http://www.itameriportaali.fi/fi/tietoa/yleiskuvaus/veden_liikkeet/aallokko/fi_FI/aaltojen-elinkaari/

Robertson B, 2010. Ocean Wave Energy Generation on the West Coast of Vancouver Island and the Queen Charlotte Islands. Guelph Engineering Journal (3), sivut 9–18. ISSN: 1919-1107.

Seabased. Technology; Seabased wave energy. [Seabased www-sivuilla]. Päivitetty 2013. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: <http://www.seabased.com/en/technology/seabased-wave-energy>

SI Ocean, 2012. Ocean Energy: State of the Art. Technological Status Report, sivut 66–69. Verkkojulkaisu. [Viitattu 9.1.2014]. Saatavissa: http://si-ocean.eu/en/upload/docs/WP3/Technology%20Status%20Report_FV.pdf

Thorpe T W, 1999. A Brief Review of Wave Energy, sivu 27. UK

Waveplam, 2009. Wave energy: State of the art, non-technological barriers and best practices-pdf. Verkkojulkaisu. [Viitattu 18.10.2013]. Saatavissa: <http://www.waveplam.eu/files/downloads/waveplam.pdf>

Wave Dragon, Technology; Principles. [Wave Dragon www-sivuilla]. Päivitetty 2005. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=5

Wello. Wello Penguin [Wello www-sivuilla]. Päivitetty 2014. [Viitattu 24.1.2014].
Saatavissa: <http://www.wello.eu/penguin.php>