

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**AALTOVOIMALAITOKSIEN TEKNINEN KEHITTYMINEN**  
**TECHNOLOGICAL EVOLUTION OF WAVE ENERGY CONVERTERS**

Markus Puikkonen

Työn tarkastaja Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja Esa Vakkilainen

# TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Markus Puikkonen

Opinnäytteen nimi: Aaltovoimalaitoksien tekninen kehittyminen

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2017

Lappeenrannassa 11.9.2017

Asiasanat: aaltovoima, aaltoenergia, aaltovoimalaitokset, aaltovoimalat, WaveRoller, Penguin

28 sivua, 16 kuvaa ja 1 taulukko

Veden aaltoja sähköntuotannossa hyödyntävä aaltovoima on nouseva uusiutuvan energian muoto. Jatkuvasti aaltoileviin meriin sitoutunutta energiaa ei ole ennen 2000-lukua juurikaan hyödynnetty. Aaltojen energia on peräisin Auringosta. Aurinko saa aikaan tuulia, jotka puolestaan synnyttävät aaltoja. Voimakkaimmat aallot syntyvät avomerellä ja ne voivat syvässä vedessä matkata pitkiäkin matkoja pienillä energiahäviöillä.

Aaltovoimalaitoksen tehtävä on ottaa vastaan aaltojen energiaa ja muuttaa se sähköksi. Tätä varten on kehitetty useita erilaisia teknologioita. Euroopan merienergiakeskus EMEC listaa kahdeksan erilaista voimalatyyppiä. Kaikista voimalatyypeistä on käynnissä useita projekteja eri puolilla maailmaa. Erilaisia aaltovoimalatyyppisiä ovat esimerkiksi vaimentimet, poijut, OWC- ja OWSC-laitokset. Hyvin edistyneitä projekteja ovat esimerkiksi suomalaiset WaveRoller ja Penguin, ruotsalainen Seabased S2.7 sekä australialainen mWave.

Tällä hetkellä aaltoenergiantuotantoa tapahtuu vain varsin pienessä mittakaavassa. On mahdollista, että aaltoenergian osuus maailman energiantuotannosta ei koskaan kasva suureksi. Toisaalta kehitystä on tapahtunut ja uusia projekteja kehitellään jatkuvasti ympäri maailman. Aaltovoiman suurimpana haasteena on saada aaltosähköstä taloudellisesti kannattavaa ja kilpailukykyistä esimerkiksi tuulivoiman kanssa. Kehitys on kuitenkin kokonaisuudessaan lupaavaa.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Sisällysluettelo</b>	<b>1</b>
<b>Symboliluettelo</b>	<b>2</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2 Aaltovoimalaitoksen teoriaa</b>	<b>4</b>
2.1 Aaltojen muodostuminen .....	4
2.2 Aaltojen ominaisuuksia .....	5
2.3 Vesimolekyylien ympyräliike .....	7
2.4 Aallot eri syvyyksissä vesissä .....	7
2.5 Aaltoenergiapotentiaali maailman merillä .....	9
<b>3 Erilaisia aaltovoimalaitoksia</b>	<b>11</b>
3.1 Vaimentimet (Attenuators) .....	12
3.2 Poijutyypiset (Point absorbers) .....	13
3.2.1 Seabased WEC S2.7 .....	13
3.3 OWSC .....	15
3.3.1 WaveRoller .....	15
3.4 OWC (Oscillating water column) .....	19
3.5 Overtopping .....	20
3.5.1 Wave Dragon .....	21
3.6 Submerged pressure differential .....	23
3.6.1 mWave .....	24
3.7 Bulge Wave -voimalat .....	25
3.7.1 Anaconda .....	25
3.8 Pyörivä massa (Rotating mass) .....	26
3.8.1 Penguin .....	26
<b>4 Tulevaisuudennäkymiä</b>	<b>29</b>
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>30</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>31</b>

## SYMBOLILUETTELO

$g$	putoamiskiihtyvyyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	aallonkorkeus	[m]
$P$	teho aaltorintaman leveyttä kohti	[W/m]
$T$	jaksonaika	[s]

### Kreikkalaiset

$\lambda$	aallonpituus	[m]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Alaindeksit

#### Lyhenteet

EMEC	European Marine Energy Centre
OWC	oscillating water column
OWSC	oscillating wave surge converter
WEC	wave energy converter

# 1 JOHDANTO

Uusiutuvien energialähteiden hyödyntämistä pyritään lisäämään kaikkialla maailmassa. Fossiilisten polttoaineiden määrät vähenevät jatkuvasti ja niiden hyödyntäminen tulee ennemmin tai myöhemmin taloudellisesti kannattamattomaksi. Ydinvoimaa kehitetään jatkuvasti mutta suuren yleisön silmissä se ei ole puhdas ja turvallinen energiamuoto tulevaisuutta varten. Pyrkimykset kohti ympäristöystävällisempää energiantuotantoa ovat johtaneet tuuli-, vesi- ja aurinkovoiman käytön lisääntymiseen. On kuitenkin selvää, että nämä eivät tule nykytahdilla kattamaan maailman energiantarvetta. Tarvitaan jotain uutta. Tässä vaiheessa kuvaan astuu mukaan erityyppinen vesivoima: aaltoenergia.

Perinteinen vesivoima vaatii jatkuvasti virtaavaa vettä tuottaakseen sähköä. Monissa maissa, kuten Suomessa, on käytännössä saavutettu maksimikapasiteetti. Koskia ei synny lisää, ja kaikki mahdolliset on valjastettu sähköntuotantoon. Valtamerissä on kuitenkin paljon energiaa, jota ei kyetä hyödyntämään. Meret aaltoilevat jatkuvasti tuulten vaikutuksesta ja niihin on sitoutunut valtavat määrät energiaa. Aaltovoima on tämän liike-energian käyttämisestä sähköntuotantoon. Se on uusiutuva ja ympäristöystävällinen energiantuotantomuoto joka ei kuitenkaan toistaiseksi ole juurikaan kaupallisessa käytössä joitain koelaitoksia lukuun ottamatta. Tämä johtuu siitä, ettei aaltovoiman kaltaisille vaihtoehtoisille energiamuodoille ole ollut aiemmin tarvetta tai ne eivät ole olleet taloudellisesti kilpailukykyisiä. Fossiilisia polttoaineita on ollut enemmän kuin riittävästi.

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan aaltovoimalaitoksiin ja niiden tekniikan kehittymiseen. Ensin käydään pääperiaateiltaan läpi aaltoenergian tuotannon teoriaa ja sen fysikaalisia perusperiaatteita. Tämän jälkeen esitellään erityyppisiä aaltovoimalaitoksia sekä joitain esimerkkiprojekteja eri voimalatyypeistä. Lopussa pohditaan lyhyesti alan tulevaisuudennäkymiä läpi käytettyjen projektien pohjalta ja arvioidaan niiden tulevaisuutta ja menestymismahdollisuuksia. Aiheen laajuudesta johtuen työssä ei juurikaan käsitellä aaltoenergian hyödyntämisen taloudellisia haasteita tai kannattavuutta eikä myöskään sen ympäristövaikutuksia.

## 2 AALTOVOIMALAITOKSEN TEORIAA

Aaltoenergia on monen muun uusiutuvan energianlähteen tavoin epäsuoraa aurinkoenergiaa. Aurinko lämmittää ilmaa, joka lämpenemisen myötä kohoaa ylöspäin. Tilalle virtaa viileämpää ilmaa. Tämä ilmiö on tuuli ja se saa aikaan aaltoja vesistöissä. Näihin aaltoihin sitoutuu kokonaisuudessaan valtavat määrät energiaa aaltojen liike-energiaksi. Aaltovoimalaitoksen (WEC, *wave energy converter*) tehtävä on ottaa tämä energia talteen ja muuttaa se edelleen sähköenergiaksi.

Tässä kappaleessa käydään yleisellä tasolla läpi aaltovoimalaitoksen teoreettisia toimintaperiaatteita. Erityyppisiä aaltovoimaloita käsitellään kappaleessa kolme.

### 2.1 Aaltojen muodostuminen

Tuulet synnyttävät aaltoja. Tuulen ja vedenpinnan vuorovaikutus aaltojen muodostuessa on varsin monimutkainen ilmiö, eikä sen yksityiskohtainen tarkasteleminen ole olennaista tässä kandidaatintyössä. Pääpiirteittäin prosessi etenee kolmessa vaiheessa.

Ensin tuuli saa veden pintaan aikaan tangentialisen jännitysvoiman joka alkaa muodostaa ja kasvattaa aaltoja. Koska tuulesta johtuva ilmavirtaus on lähellä vedenpintaa turbulენტista, se saa veden pinnalla aikaan paine-eroja ja leikkausjännityksiä. Nämä voimat voimistavat jo syntyneitä aaltoja. Kun aaltojen aallonkorkeus on kasvanut riittävästi, tuuli voi tarttua myös nouseviin aallonharjoihin ja vahvistaa aaltoja entisestään. (Duckers 2004, p. 303)

Tuulen synnyttämien aaltojen voimakkuus riippuu kolmesta tekijästä. Tuulen nopeuden ja sen keston lisäksi aaltojen saamaan energiasisällön suuruuteen vaikuttaa pyyhkäisymatka, eli etäisyys jolla tuuli on vuorovaikutuksessa vedenpinnan kanssa. (Duckers 2004, p. 303) (Ilmatieteen laitos – Aallokko Itämerellä).

Aallot syntyvät avomerellä, jossa tuuli on voimakkainta ja sillä on riittävästi matkaa olla kosketuksissa veden kanssa. Syntymäalueensa lähellä olevat aallot ovat myrskyaaltoja, joiden energia on suurimmillaan. Myrskyaallot voivat vahvistaa toisiaan interferenssillä. Lopulta aallon nopeus voi olla tuulen nopeutta suurempi, jolloin tuuli ei enää pysty vahvistamaan aaltoa. Lopulta aalto poistuu kokonaan tuulen vaikutusalueelta. Nämä aallot ovat *maininkeja* (*swell*

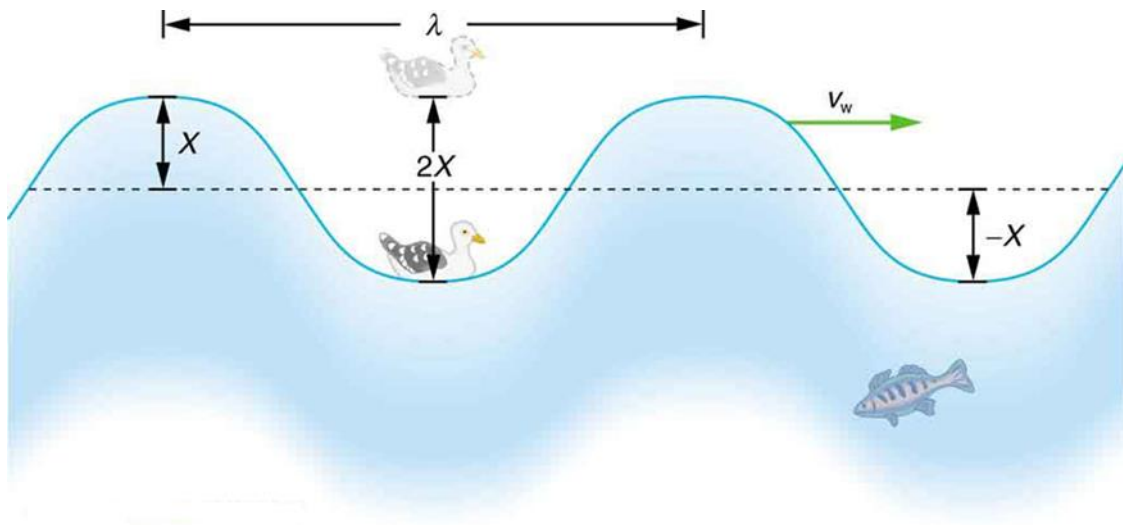
*wave*). Ne voivat matkata jopa tuhansia kilometrejä menettäen vain hyvin pienen osan energiastaan, esimerkiksi läntiseltä Atlantilta Eurooppaan asti (López et al. 2013, p 414). (Duckers 2004, p 303) (Ilmatieteen laitos – Tuulen kehittämien aaltojen elinkaari)

## 2.2 Aaltojen ominaisuuksia

Aaltoja voidaan karakterisoida aallonpituuden  $\lambda$ , aallonkorkeuden  $H$  ja jaksonajan  $T$  avulla. Näitä kolmea ominaisuutta tarvitaan aaltorintaman lineaaritehon  $P$  laskemiseen. Lineaariteho ilmoittaa aaltorintaman sisältämän tehon pituusyksikköä kohti. Taulukossa 1 on määritelty tärkeimpiä aaltoenergian teoreettisia käsitteitä. Käsitteitä havainnollistetaan kuvassa 1.

**Taulukko 1.** Aaltoenergian teorian keskeiset suuret.

Suure	Symboli, yksikkö	Määritelmä
Aallonpituus	$\lambda$ [m]	Matka aallon kahden samassa vaiheessa olevan pisteen välillä
Aallonkorkeus	$H$ [m]	Aallonpohjan ja -harjan välinen korkeusero
Jaksonaika	$T$ [s]	Aika, joka aallolla kuluu yhteen jaksoon, eli siirtymään
Ryhmänopeus	$v$ [m/s]	Aallon etenemisnopeus
Aaltorintaman lineaariteho	$P$ [w/m <sup>2</sup> ]	Aallon sisältämä teho pituusyksikköä kohti



**Kuva 1.** Aallon perusominaisuuksia. Kuvassa  $X$  on amplitudi,  $2X$  on aallonkorkeus,  $\lambda$  on aallonpituus ja  $v_w$  aallon etenemisnopeus eli ryhmänopeus.

Yksittäisen, ideaaliseksi oletetun aallon lineaariteho  $P$  voidaan laskea yhtälöllä 1. Sitä varten tarvitaan merkitsevä aallonkorkeus  $H$ , aallon jaksonaika  $T$ , veden tiheys  $\rho$  sekä putoamiskiihtyvyys  $g$ . (Duckers 2004, p 304).

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (1)$$

$g$  = putoamiskiihtyvyys  $9,81 \text{ m/s}^2$

Aaltojen energiatiheys on luokkaa  $2\text{-}3 \text{ kW/m}^2$ . Ne ovat tiivistynyttä aurinkoenergiaa ja teholtaan suurempia kuin tuulienergia. Aurinkoenergian intensiteetti on luokkaa  $0,1\text{-}0,2 \text{ kW/m}^2$  ja tuulen  $0,4\text{-}0,6 \text{ kW/m}^2$ . (López et al 2013, p 414)

Yhtälö (1) antaa kuitenkin vain yksittäisen aallon tehon. Jokaisen aallon tarkasteleminen on mahdotonta johtuen niiden suuresta määrästä ja epäsäännöllisyydestä. Se ei toisaalta ole tarpeellistakaan. Silmin näkemämme merenpinta aaltoineen on lopputulos kaikkien yksittäisten erisuuntaisten ja – vahvuisten aaltojen liikkeistä. Osa aalloista heikentää ja osa vahvistaa toisiaan. Keskimäärin vedenpinnankorkeus on aina nolla, kun huomioidaan sekä aaltojen pohjat että harjat. Tämä vastaa tyyntä merenpintaa. (Duckers 2004, p. 303-304)

## 2.3 Vesimolekyylien ympyräliike

Vaikka silmin havaittaessa vaikuttaa, että aaltoilu on vain pinnalla tapahtuva ilmiö, vesimolekyylit liikkuvat myös veden alla. Periaatteessa aaltoliikettä tapahtuu koko vesimassan matkalla pohjaan asti, mutta suurin osa aaltojen energiasta sijaitsee lähellä pintaa. Aallon energiasta noin 95 % sijaitsee syvyydellä, joka vastaa neljäsosaa aallon aallonpituudesta. Tämän vuoksi merenpohja ei juurikaan vaikuta aallon energiaan kun syvyys on tätä isompi. Kuitenkin aallon saapuessa veteen, jonka syvyys on alle neljäsosa aallonpituudesta, on vuorovaikutuksella pohjan kanssa merkittävä vaikutus aallon nopeuteen ja energiaan. (Duckers 2004, p 304,309)

Veden aaltoliike on kuvan 2 mallin mukaisesti vesimolekyylien ympyräliikettä. Aaltojen energia on jakautunut liike- ja potentiaalienergiaksi. Kineettinen energia johtuu vesimolekyylien liikkeestä. Potentiaalienergia on peräisin aaltoilusta. Kun vesi aaltoilee aallonharjojen ja –pohjien välillä, painovoimaa vastaan tehty työ varastoituu aaltojen potentiaalienergiaksi. Energiaa vaihtuu jatkuvasti muodosta toiseen. (Falnes 2007, p. 187)

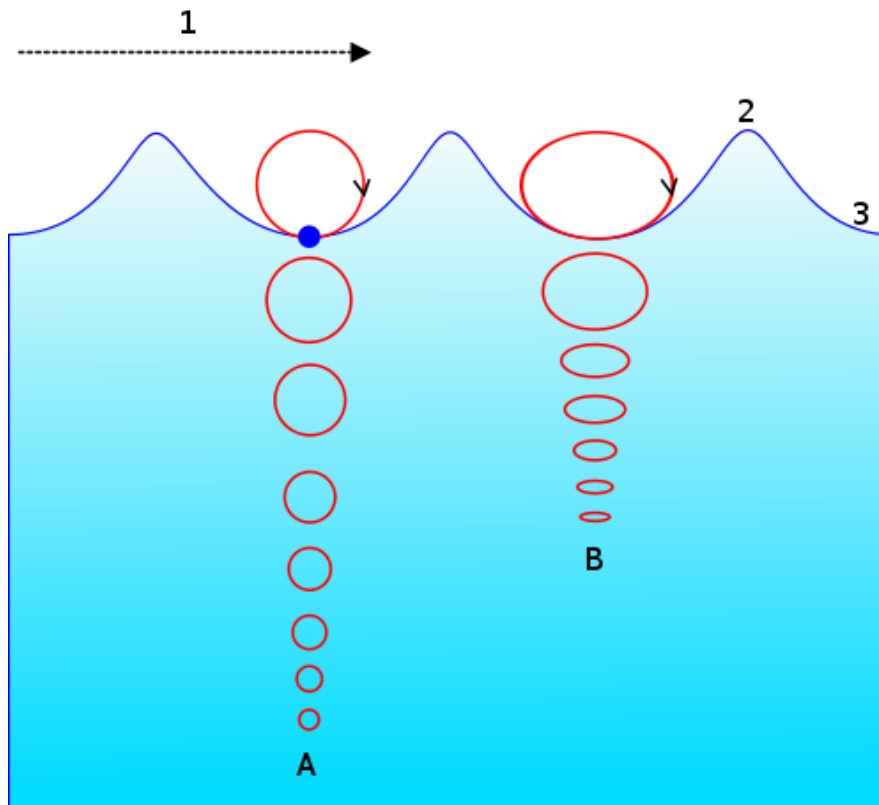
## 2.4 Aallot eri syvyisissä vesissä

Mainingit matkaavat suuren osan elinajastaan avomerellä, jossa veden syvyys on suurempi kuin noin neljännes aallon aallonpituudesta. Tällöin niiden etenemisnopeuteen ei vaikuta veden syvyys. Aallon etenemisnopeus on suoraan verrannollinen aallon jaksonaikaan ja sitä kautta myös aallonpituuteen. Syvissä vesissä pidemmät aallot etenevät siis nopeammin kuin lyhyet. (Duckers 2004, p 304).

Kun veden syvyys pienenee, alkaa pohja yhä enemmän vaikuttaa aallon nopeuteen ja siten myös sen sisältämään energiaan. Kun syvyys lopulta pienenee noin neljäsosaan aallonpituudesta, tulee veden syvyydestä aallon nopeutta hallitseva parametri. Tällaisissa matalissa vesissä aallon etenemisnopeuteen ei jaksonaika enää vaikuta ollenkaan, nopeus riippuu ainoastaan syvyydestä. (Duckers 2004, p 304)

Kun aallokko saapuu matalaan veteen, alkaa pinnan alla oleva osuus eli pohja-aallot vuorovaikuttaa pohjan kanssa. Aallokko siis menettää energiaa pohja-aaltojen ja veden pohjan välisen kitkan vuoksi. Samalla pohjaan osuvien vesimolekyylien liikerata muuttuu ympyrästä elliptiseksi. (Cruz 2008, p 1).

Kuvassa 2 on esitelty yksittäisten vesimolekyylien liikeratoja aaltoliikkeessä. Tapauksessa A aalto etenee syvässä vedessä, jolloin radat ovat ympyröitä. Ympyröiden säteet pienentyvät syvemmälle mentäessä, mikä tarkoittaa aallon tehon laskua syvemmällä vedessä. Tapauksessa B aalto saapuu madaltuvaan veteen, jossa pinnanalaisten molekyylien rata alkaa kitkan aiheuttaman hidastumisen myötä muuttua elliptiseksi.



**Kuva 2.** Vesipartikkelien ympyräliike aaltoliikkeessä. Numero 2 on aallonharja, 3 aallonpohja. Nuoli osoittaa aallon etenemissuunnan.

Molekyylien elliptisen liikeradan säde pienenee, kunnes lopulta molekyylit liikkuvat käytännössä edestakaisin täysin ilman pystysuuntaista liikettä. Tätä ilmiötä kutsutaan *syöksyaalloksi* (*surge wave*). Näitä aaltoja hyödynnetään pohjaan sijoitettavissa OWSC-laitoksissa. (AW-Energy)

Myös aaltojen suunta muuttuu matalaan veteen saavuttaessa. Koska aallon etenemisnopeus hidastuu veden madaltuessa, sen suunta muuttuu, kunnes lopulta aaltorintama on yhdensuuntainen rantaviivan kanssa. Aaltorintama taittuu, kuten valo saapuessaan aineesta toiseen jolla on

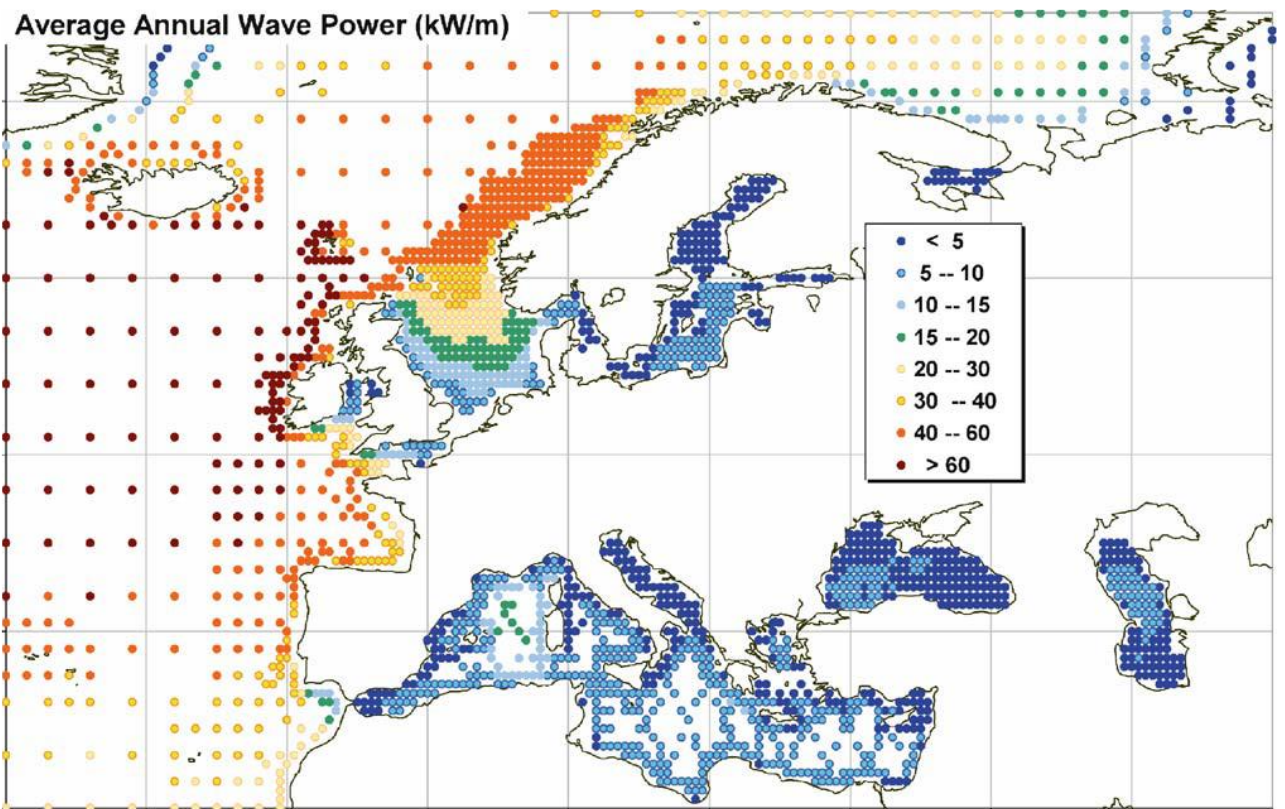
eri optinen tiheys. Aaltorintaman reuna saapuu matalaan veteen ensin, jolloin sen nopeus hidastuu ennen muuta aaltorintamaa. Kun koko aaltorintama on hidastunut, on sen suunta samalla kääntynyt rantaviivan suuntaiseksi. (Duckers 2004, p 310).

## **2.5 Aaltoenergiapotentiaali maailman merillä**

Itämeri soveltuu aaltovoiman hyödyntämiseen melko huonosti. Rungas saaristo rajoittaa rantaan sijoitettavien voimalaitosten potentiaalia. Itämeren keskimääräisestä mataluudesta johtuen aallot eivät pääse kasvamaan kovin suuriksi ennen kuin ne alkavat vaimeta pohjan kitkan vuoksi. Lisäksi talvinen jääpeite pienentää aaltojen määrää, koska jääpeite lyhentää tuulen pyyhkäisymatkaa jolloin sulana oleville merialueille muodostuvien aaltojen voimakkuus pienenee entisestään. (Ilmatieteen laitos)

Kaikkien aaltojen tarkasteleminen on mahdotonta johtuen niiden suuresta määrästä ja vaihtelevasta koosta. Vesistöjen keskimääräisiä energioita pidemmällä aikavälillä voidaan mitata muutamalla eri tavalla. Eri alueiden keskimääräisiä aallokkojen lineaaritehoja määritetään erilaisten poijujen ja satelliittimittausten avulla. Nämä ovat kuitenkin liian kalliita jatkuvaan käyttöön, joten niiden keräämän datan avulla luodaan erilaisia tietokonemalleja. Näiden avulla aallokkojen ominaisuuksia saadaan yleistettyä pidemmille aikaväleille. (Barstow et al. 2008, p 116-123)

Kuvan 3 kartasta nähdään, että Euroopassa suurin aaltovoimapotentialiaali sijaitsee Atlantilla ja Pohjanmerellä, Norjan, Iso-Britannian ja Portugalin rannikoilla. Kuvan 4 maailmankartasta voidaan lisäksi todeta, että muita vahvoja alueita sijaitsee esimerkiksi Etelä-Amerikassa, eteläisessä Afrikassa, Pohjois-Amerikan länsirannikolla sekä Intian valtamerellä. (Duckers 2004, p 307) (Barstow et al. 2008, p 99)



**Kuva 3.** Euroopan vesistöjen vuosittaisia keskimääräisiä aallokkojen lineaaritehoja. (Kuva: Barstow et al. 2008, p 99)



**Kuva 4.** Keskimääräisiä aaltorintamien vuosittaisia lineaaritehoja maailman merillä.

### 3 ERILAISIA AALTOVOIMALAITOKSIA

Tässä kappaleessa esitellään erityyppisiä aaltovoimalaitoksia, jotka on luokiteltu tekniikoidensa perusteella eri ryhmiin. Luokittelu perustuu Euroopan merienergiakeskus EMEC:n luokitteluun. Joitain voimalaitostyyppjä käsitellään enemmän kuin toisia johtuen käynnissä olevien projektien määrästä ja etenemisestä. Yksikään voimalaitostyyppi tai sovellus ei kuitenkaan ole osoittautunut yksiselitteisesti muita paremmaksi teknologialtaan ja soveltuvuudeltaan energiantuotantoon. Luokkia on kahdeksan, yhdeksäs luokka sisältää aaltovoimalat jotka eivät tekniikkansa puolesta sovi muihin. Ensin esitellään kunkin aaltovoimalatyypin toimintaperiaatteita ja tekniikkaa yleisellä tasolla. Tämän jälkeen joistain tyypeistä esitellään yksi esimerkkiprojekti. EMEC:n internetsivuilla on lueteltu suuri määrä projekteja useissa eri maissa, mutta joistain näistä oli hyvin hankalaa löytää mitään tietoa. Osa projekteista lienee jo keskeytetty. Tässä kandidaatintyössä on pyritty keskittymään käynnissä oleviin projekteihin ja kehittyviin teknologioihin. (EMEC, 2017)

Aaltovoimaloita voidaan tekniikan lisäksi luokitella myös sijoituspaikan mukaan. Mahdollisuuksia ovat ranta, rannan läheisyys sekä avomeri. Rannalla sijaitsevat voimalaitokset ovat osittain maalla, kuten OWC-laitokset. Näitä voimaloita on helppo huoltaa ja ne voidaan sijoittaa lähelle sähkökäyttökohteita. Niihin saapuvat aallot ovat kuitenkin yleisesti energioiltaan pienempiä kuin kauempana rannasta olevat, johtuen aaltojen heikkenemisestä niiden saapuessa matalaan veteen. Toisaalta samasta syystä myös mahdolliset voimakkaat myrskyaallot vaimeinevat eivätkä voimalat altistu voimakkaille aalloille jotka voisivat vahingoittaa niiden rakenteita. Paras paikka rannikolle sijoitettavalle voimalalle on paikka, jossa kallio johtaa lähes pystysuorassa melko syvään veteen. Näin voimalaan saapuvat aallot ovat energialtaan korkeampia kuin matalan veden aallot. (Duckers 2004, p 309)

Avomerelle sijoitettavat aaltovoimalaitokset pääsevät kosketuksiin voimakkaimpien aaltojen kanssa. Avomerellä ei myöskään juuri ole rajoitteita rakentaa esimerkiksi aaltovoimapuistoja. Voimalat joutuvat kuitenkin myös kestämiään avomeren hankalat olosuhteet. Avomerellä on myös vaikea arvioida varmasti mistä suunnasta aallot tulevat, jolloin voimaloiden olisi suunnattava itsensä aaltojen mukaan mahdollisimman suuren energiamäärän hyödyntämiseksi. Lisäksi näiden voimaloiden huoltaminen on vaikeaa. (López et al. 2013, p 414) (Duckers 2004, p 317)

### 3.1 Vaimentimet (Attenuators)

Vaimentimet ovat kelluvia aaltovoimalaitoksia. Yleisesti niiden fyysiset mitat ovat samaa suuruusluokkaa niiden kohtaamien aaltojen aallonpituuksien kanssa. Vaimentimet ovat kooltaan suurempia vaakasuunnassa kuin pystysuunnassa. Ne sijoitetaan veteen siten, että niiden pisin osuus on kohtisuorassa saapuvaa aaltorintamaa vastaan. Näin aallokko kulkee pikkuhiljaa vaimentuen koko vaimentimen ali luovuttaen aaltovoimalalla energiaansa. (Gareth 2008, p 45)

Vaimennin-tyyppisen aaltovoimalaitoksen sijoittamista suhteessa saapuvaan aaltorintamaan on havainnollistettu kuvassa 5.



**Kuva 5.** Vaimentimet sijoitetaan siten, että niiden pitkä sivu on kohtisuorassa aaltorintamaa vastaan.

Mikäli vaimennin sijoitetaan samansuuntaisesti saapuvan aaltorintaman kanssa, kutsutaan sitä terminaattoriksi (terminator). (López et al. 2013, p 417)

Vaimennintyyppisiä aaltovoimalaprojekteja ovat esimerkiksi belgialainen Laminaria sekä tanskalainen Floating Power Plant, joka on tuuli- ja aaltovoimalaitoksen hybridi. (EMEC, 2017)

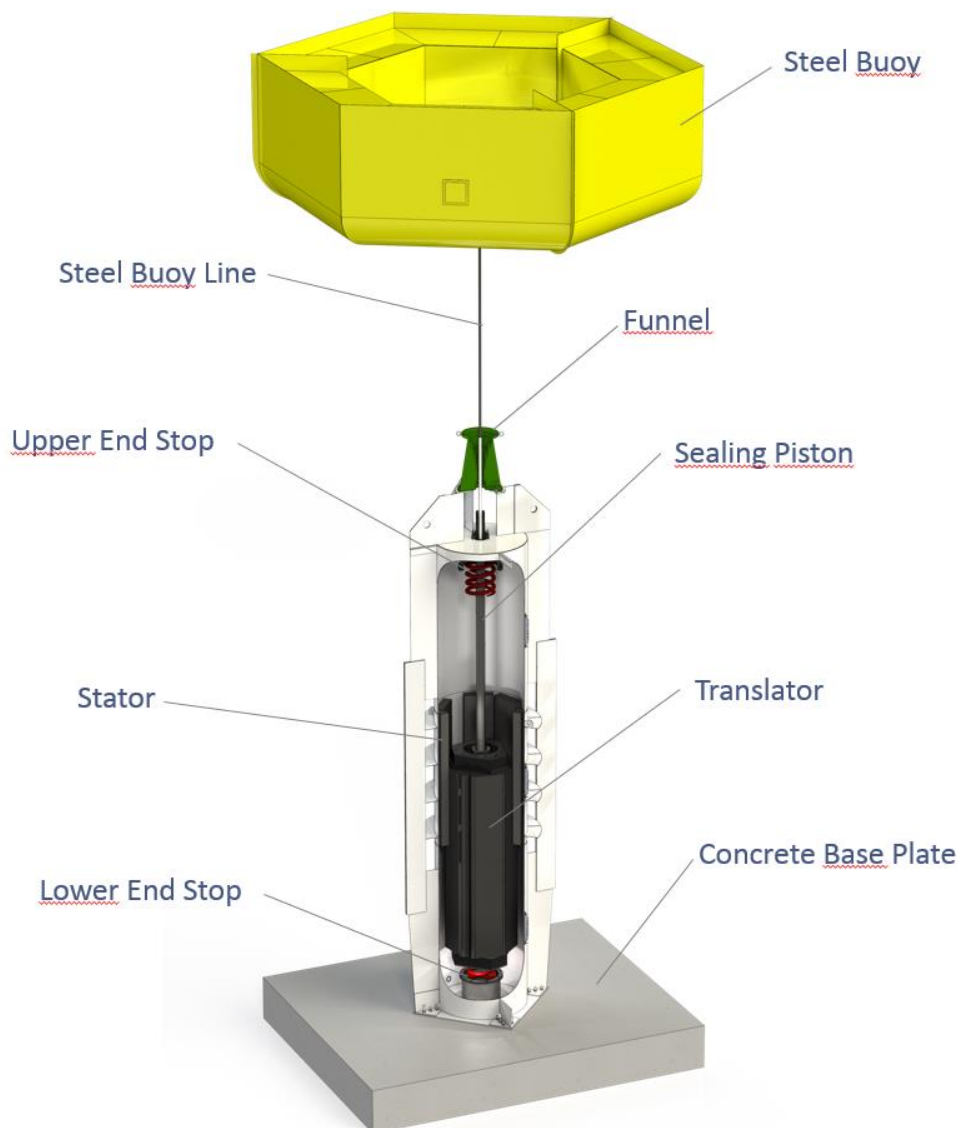
## **3.2 Poijutyypiset (Point absorbers)**

Pojutyypiset voimalaitokset on kiinnitetty poijujen tyyliin vedenpohjalla olevaan sähköä tuottavaan osaan. Pinnalla oleva liikkuva osa liikkuu aaltojen vaikutuksesta staattisen osan suhteen tuottaen samalla sähköä. Poijut pystyvät ottamaan energiaa vastaan eri suunnista tulevilta aaltorintamilta. Poijutyypiset aaltovoimalat ovat fyysisiltä mitoiltaan usein huomattavan pieniä verrattuna saapuvien aaltojen aallonpituuksiin (López et al. 2013, p 417)

### **3.2.1 Seabased WEC S2.7**

Ruotsalainen energiayhtiö Seabased AB on kehittänyt poijutyypisen aaltovoimalaitoksen, kutsuanimeltään Seabased WEC S2.7.

Voimalaitoksen alaosassa on betoninen alusta, joka sijoitetaan merenpohjaan. Generaattoriosaa on kiinnitetty betonialustaan. Teräksinen, kelluva poijuosa on puolestaan kiinnitetty generaattoriosaan kaapelilla. Aallot saavat poijun liikkumaan. Poijun liike-energia välittyy pohjan lineaarigeneraattorille kaapelia pitkin. Generaattorin tuottama sähkö muunnetaan vedenalaisella muuntajalla verkkoon sopivaksi ennen sen syöttämistä vedenalaisilla kaapeleilla sähköverkkoon. Voimalan rakenne on esitetty kuvassa 6. (Seabased Ab)



**Kuva 6.** Seabased WEC S2.7 –voimalan perusrakenne. (Kuva: Seabased AB)

Voimalaitos on rakenteeltaan melko yksinkertainen. Siinä on vain muutamia liikkuvia osia, joten vaurioiden mahdollisuus pienenee.

Seabased on suomalaisyhtiö Fortumin tuella rakentanut Ruotsin Sotenäsin edustalle S2.7-voimalan, joka syöttää sähköä Ruotsin valtakunnanverkkoon. Laitos otettiin käyttöön 2015, ja sen aikana on tarkoitus sähköntuotannon ohella tutkia ja tarkkailla voimalan toimintaa. (Seabased, 2015)

### 3.3 OWSC

OWSC-laitokset sijoitetaan veden alle lähelle rantaa. Kun aalto saapuu matalaan veteen, alkaa pohjan lähellä olevien vesimolekyylien ympyrärata loiventua ja muuttua ellipsin muotoiseksi. Tämä johtuu veden ja pohjan välisestä kitkasta. Kun ellipsi on riittävän ohut, on liike lähes vaakasuoraa edestakaista liikettä. Tämä ilmiö on *syöksyaalto* (surge wave). OWSC-laitokset hyödyntävät juuri tätä vesimolekyylien voimistunutta vaakatasoista liikettä tuottaessaan energiaa. Tämä poikkeaa monista muista aaltovoimalaitoksista, jotka hyödyntävät aaltojen aikaansaamaa pystysuoraa liikettä sähköenergian tuottamisessa. (Folley & Whitaker 2012, p 345)

Vuonna 2002 Belfastin yliopistossa suoritettiin syöksyaaltojen hyödyntämisen mahdollisuuksia energiantuotannossa. Kahden vuoden tutkimusten päätteeksi todettiin, että lupaavin aaltovoimalamalli on matalaan veteen sijoitettava levy, joka on saranoitu yhdeltä sivultaan pohjaan. OWSC-laitokset sijoitetaankin usein lähelle rantaa, 10 – 20 metrin syvyyteen. Rannan läheisyydessä OWSC-laitokset säästyvät suurimmilta myrskyaalloilta, jotka heikkenevät saapuessaan matalaan veteen. Lisäksi rantaan saapuvien aaltojen etenemissuunta on yhdenmukaisempi kuin avomeren aaltojen. (Folley & Whitaker 2012, p 345-346).

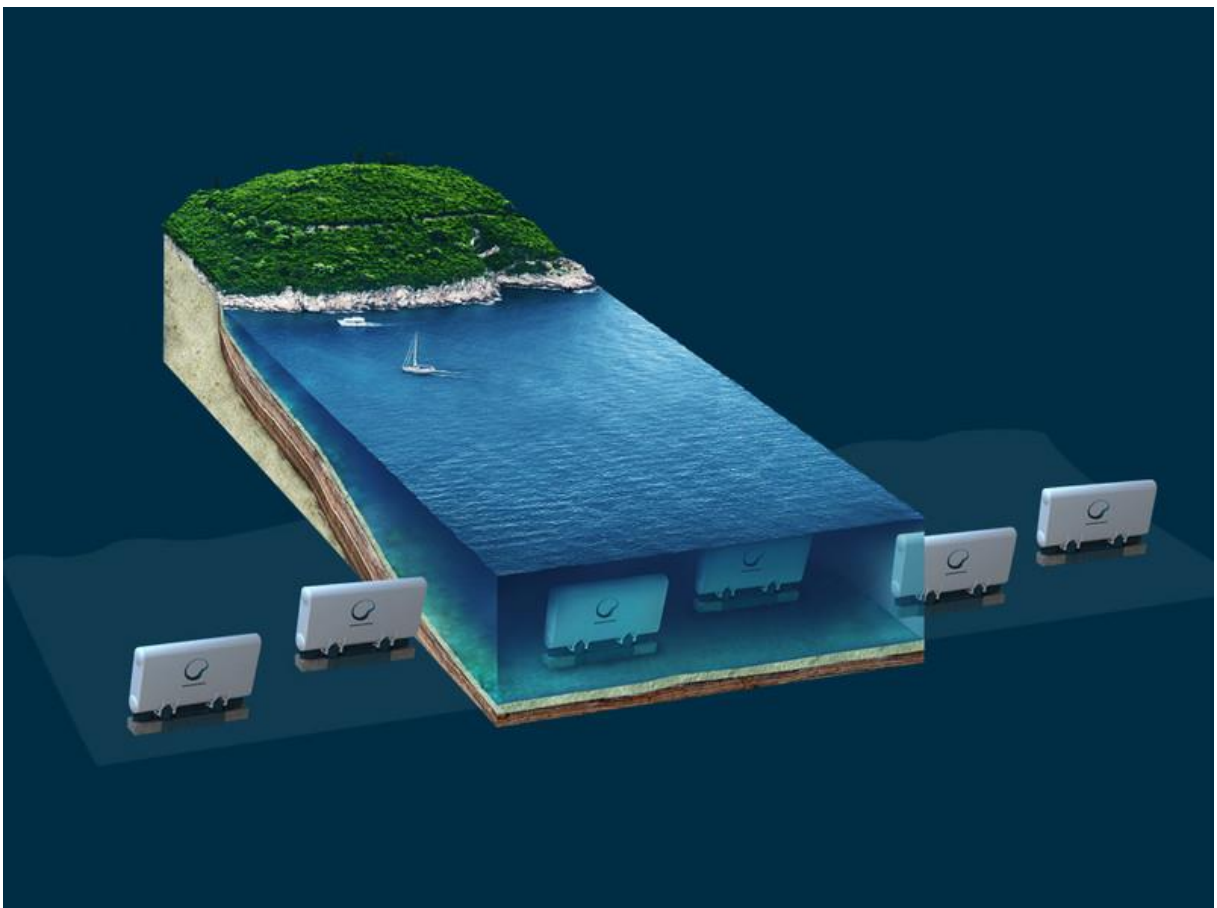
Seuraavassa alaluvussa esitellään suomalainen aaltovoimaprojekti WaveRoller. Toinen OWSC-tyyppinen voimalaitosprojekti on esimerkiksi australialaisen BPS-yhtiön bioWave. (EMEC, 2017)

#### 3.3.1 WaveRoller

WaveRoller on suomalaisen AW-Energy Ltd.:n kehittämä OWSC-aaltovoimalaitos. WaveRolleriin kuuluu levy, joka on kiinnitetty pohjaan. Levy on yhdeltä sivultaan saranoitu kiinni tukirakenteeseen. Merenpohjan syöksyaallot saavat tämän levyn edestakaiseen liikkeeseen, joka saa levyyn kiinnitetyn mäntäpumpun pumppaamaan hydraulista nestettä suljettuun hydrauliseen piiriin. Korkeapaineinen neste ohjataan sähkömoottorille joka puolestaan pyörittää generaattoria. Moottori saa generaattorin tuottamaan sähköä. Generaattori on yhdistetty sähköverkkoon merenalaisilla kaapeleilla. (AW-Energy 2012a)

Yhden WaveRollerin teho on 500 ja 1000 kilowatin välillä, riippuen paikallisista aalto-olosuhteista. Tehotuoton maksimoimiseksi WaveRoller sijoitetaan 8-20 metrin syvyyteen, jossa syöksyaallot ovat voimakkaimmillaan. Etäisyys rannasta on arviolta 300 – 2000 metriä. WaveRollerin paneeli mitoitetaan siten, että paneelin yläreuna on lähellä pintaa, muttei kuitenkaan missään vaiheessa pinnan yläpuolella. (AW-Energy 2012a)

Useita WaveRollereita voidaan yhdistää aaltovoimapuistoksi. Jokaisen yksittäiseen voimalaan kuuluu oma sähköntuottopiiri, josta tuotettu sähkö johdetaan kaapelilla sähköiselle ala-asemalle. Tähän ala-asemaan voidaan helposti liittää uusia voimaloita. Vastaavasti jonkin voimalan tehon pienentyminen, tai huollosta tai viasta aiheutuva sammuminen ei vaikuta puiston muiden voimaloiden toimintaan. Kuvassa 7 näkyy WaveRoller-aaltovoimapuiston yksinkertainen malli. (AW-Energy 2012b)



**Kuva 7.** Useita WaveRoller-voimaloita voidaan sijoittaa lähekkäin aaltovoimapuistoksi. (Kuva: AW-Energy)

Jokaisessa WaveRoller-voimalassa on mukana painolastivesisäiliöt, joiden avulla voimala voi kellua. Tämä helpottaa voimaloiden kuljettamista vesitse. Kun voimala otetaan käyttöön, säiliöt täytetään vedellä ja voimala uppoaa toimintavalmiina pohjaan. Säiliöt helpottavat myös WaveRollerin huoltamista. Huoltotarpeen ilmetessä säiliöt täytetään uudelleen ilmalla, minkä seurauksena se nousee takaisin pintaan ja huoltotoimenpiteet voidaan suorittaa suoraan voimalan ja veden pinnan päällä. (AW-Energy 2012c)

Kuva 8 on valokuva WaveRoller-alustasta, joka on valmis käyttöön otettavaksi. Alustaan kuuluu kolme levyä. Alustan reunoilla näkyvät painolastivesisäiliöt.



**Kuva 8.** WaveRoller-alusta, johon kuuluu kolme levyä. (Kuva: AW-Energy)

Ammattisukeltaja Rauno Koivusaari keksi WaveRollerin idean vuonna 1993 huomattuaan, kuinka vedenalaiset aallot heiluttivat uponneen laivan kansiluukkuja. Fortumin asiantuntijoiden kanssa suoritettujen testien onnistuminen johti AW-Energyn perustamiseen vuonna 2002. Tämän jälkeen suoritettiin kokeita Suomenlahdella ja Helsingin yliopistolla, tarkoituksena testata

pumppausjärjestelmää, joka juoksuttaisi vettä maalla sijaitsevan Pelton-vesiturbiinin läpi. Turbiini-ideasta luovuttiin, johtuen sen monimutkaisuudesta ja tehottomuudesta usean voimalan toimiessa samanaikaisesti. WaveRollerissa päätettiin siirtyä hydrauliseen tehontuottojärjestelmään (AW-Energy 2012a).

AW-Energy testasi kahta pienikokoista WaveRoller-prototyyppiä Portugalin rannikolla vuosina 2007-2009. Kolmesta 100 kilowatin yksiköstä koostuva koevoimalaitos otettiin käyttöön Portugalin rannikolla, lähellä Penichen kaupunkia elokuussa 2012. WaveRollerit yhdistettiin onnistuneesti sähköverkkoon kesällä 2012. Koelaitos altistui voimakkaille aalloille ja vaikeille olosuhteille. Laitos kuitenkin selvisi koejaksosta ilman vahinkoja. (AW-Energy 2012) (AW-Energy 2014b)

Vuonna 2013 AW-Energy, Fortum ja ranskalainen energiayhtiö DCNS allekirjoittivat sopimuksen 1,5 megawatin aaltovoimapuiston rakentamisesta Ranskan rannikolle. WaveRoller valittiin puiston käyttämäksi teknologiaksi. (AW-Energy 2013)

Vuoden 2014 syyskuussa AW-Energy sai Suomen innovaatorahoituskeskus Tekesiltä ja Euroopan unionilta yhteensä 14,8 miljoonan euron rahoituksen. Rahoituksen avulla voidaan ottaa käyttöön täysikokoinen, sähköverkkoon yhdistettävä WaveRoller. Sen käyttöönotossa voidaan hyödyntää Portugalin koelaitokselta saatuja tietoja. (AW-Energy 2014a)

AW-Energy aloitti onnistuneesti 350 kW tehontuottojärjestelmänsä testaamisen Järvenpäässä. Siellä otettiin loppuvuodesta 2015 käyttöön Suomen suurin aaltoenergian testilaitos, jonka AW-Energy omistaa. Kuva 9 on lehdistökuva testilaitoksesta, jonka kaikkia osia ei esitellä julkisesti. (AW-Energy 2015b)



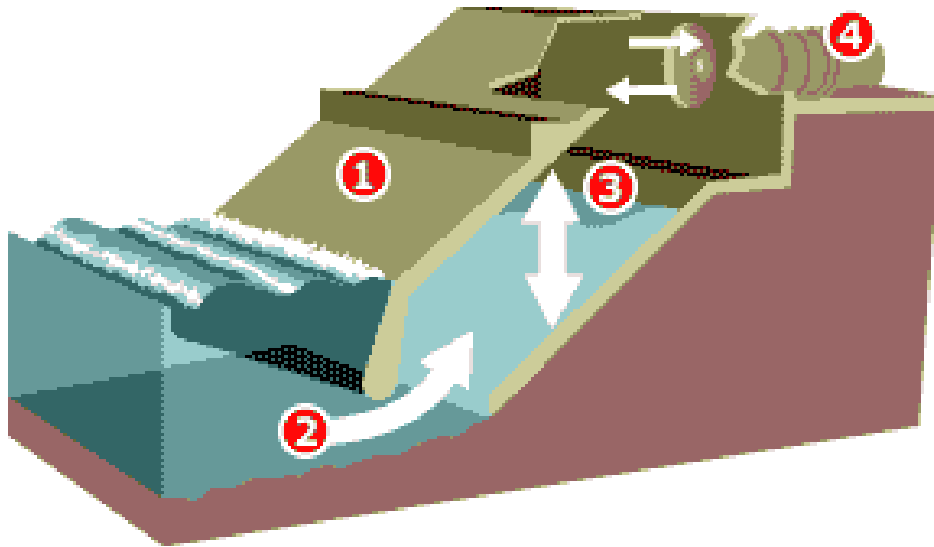
**Kuva 9.** Vilaus Järvenpään tehontuottojärjestelmän testilaitoksesta.

Euroopan investointipankki EIB sijoitti AW-Energyyn vuoden 2016 heinäkuussa 10 miljoonaa euroa. Yhtiön on tarkoitus ottaa käyttöön täysikokoinen, 350 kW WaveRoller Portugalissa, samalla alueella jossa aiemmin testattiin kolmesta yksiköstä koostuvaa koelaitosta. WaveRoller-projekteja on myös suunnitteilla esimerkiksi Meksikossa. AW-Energy ja Meksikolainen uusiutuvan energian yhtiö ENAL allekirjoittivat vuonna 2015 alustavan sopimuksen 10 MW aaltovoimapuiston rakentamisesta Meksikon länsirannikolle. (AW-Energy 2015a,2016)

### **3.4 OWC (Oscillating water column)**

OWC- voimalaitoksissa aallot työntävät ja poistavat ilmaa osittain vedenalaisessa kammiossa. Aallot saavat kammiossa olevan veden pinnankorkeuden nousemaan ja laskemaan. Aallon liikkuessa sisään ilma työntyy kammiossa eteenpäin ja aallon poistuessa kammiossa ilma vetäytyy takaisin. Tämän ilmvirran liike-energia otetaan talteen turbiinilla jota ilmavirta pyörittää. OWC-laitoksessa käytetään usein Wells-tyyppistä turbiinia, joka pyörii aina samansuuntaisesti riippumatta ilmvirran suunnasta. Turbiinin siipien muodosta johtuen ilmavirta saa aikaan aina

samansuuntaisen voiman aaltoliikkeen eri vaiheissa. Wells-turbiini pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria jatkuvasti aaltojen liikuttaessa ilmapatsasta edestakaisin. Kuvassa 10 on esitetty mallikuva tyypillisestä OWC-aaltovoimalasta. (Heath 2008, p 287-288)



**Kuva 10.** Mallikuva OWC-aaltovoimalasta.

Kuvassa 10 esitettyssä mallissa numero 1 osoittaa aallokkoa varten rakennetun kammion. Kohdassa 2 pohja-aallot työntävät vettä kammioon. Kohdassa 3 kammiossa olevan vesipatsaan pinnan korkeus vaihtelee, jolloin se vuoroin työntää ilmaa ja poistaa sitä kammion perällä olevasta turbiinista (4). Kammion lattian kaltevuus tehostaa vesipatsaan liikettä kammiossa. Näin vältetään turbulenssilta ja sen aiheuttamilta energiahäviöiltä. (Duckers 2004, p 301-302)

Esimerkki OWC-tyyppisestä aaltovoimaprojektista on tanskalainen LEANCON. (EMEC 2017)

### 3.5 Overtopping

Potentiaalienergiaa hyödyntävät *overtopping*-laitokset tuottavat sähköä perinteisen vesivoimalan tapaisesti. Aallot nostavat vettä koholla pidettävään altaaseen, jonne aallot kiipeävät eräänlaisia ramppia pitkin. Kun altaassa on riittävästi vettä, sen annetaan virrata vesiturbiinin lävitse

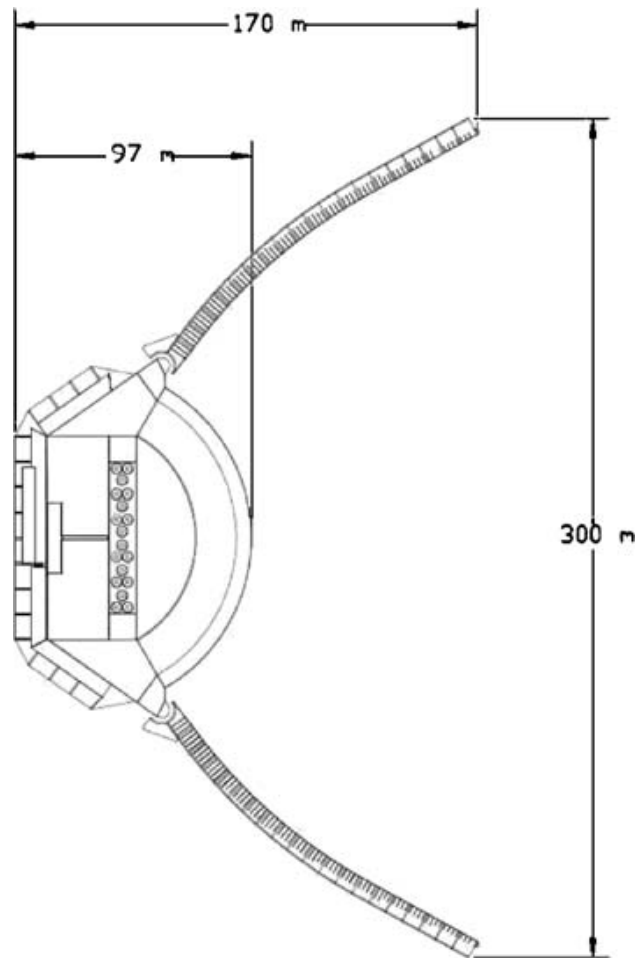
joka pyörittää edelleen sähköä tuottavaa generaattoria. Turbiinina näissä laitoksissa on usein vesivoimaloistakin tuttu Kaplan. Overtopping-laitoksissa aallot siis antavat vedelle potentiaalienergiaa nostamalla sitä merenpinnan yläpuolella sijaitsevaan altaaseen. (López et al. 2013, p 418,424)

### 3.5.1 Wave Dragon

Wave Dragon on tanskalaisen Wave Dragon Aps.:n potentiaalienergiaa hyödyntävä aaltoenergiaprojekti. Wave Dragon on kooltaan ja teholtaan varsin suuri ja se on tarkoitettu sijoittamaan avomerelle. Voimalaitoksessa on kolme osaa. Pääosa on betonista valmistettu vesiallas, sekä kaareva ramppi, jota pitkin aallot nousevat altaaseen. Patentoidut, suurikokoiset ohjaussiivet sijoitetaan rampin reunalle. Nämä siivet ohjaavat aaltoja altaaseen ja samalla vahvistavat niitä, jolloin altaaseen saadaan siirrettyä suurempi määrä aaltoja. Kolmantena osana ovat vesiturbiinit, joiden läpi altaaseen kerättyä vettä juoksetetaan takaisin mereen. Turbiinit pyörittävät sähköä tuottavaa generaattoria. (Tedd et al. 2008, p 321–322)

Wave Dragonin vesialtaan koko on noin 8000 m<sup>3</sup>. Tämä vesimäärä on tarkoitettu juoksettaa turbiinin läpi kahden aallon välisenä aikana. (Wave Dragon, 2005)

Wave Dragon on mitoiltaan suurikokoinen. Kaaviokuva on esitetty kuvassa 11. Suuren koon ja kestävien rakenteiden vuoksi Wave Dragon ei joudu ongelmiin suurissakaan aallokoissa, koska korkeat aallot vain vyöryvät voimalaitoksen yli aiheuttamatta vahinkoa. (Tedd et al. 2008, p 324)



**Kuva 11.** Wave Dragonin mallikuva ylhäältä päin. (Kuva: Tedd et al. 2008, p 324)

Kuvasta 11 nähdään että Wave Dragonin ohjaussiipien kärkiväli on peräti 300 metriä. Rampin ja altaan yhteispituus on lähes sata metriä. Kuvan mukainen voimalaitos olisi teholtaan noin 7 MW. (Tedd et al. 2008, p 324)

Wave Dragon sijoitetaan yli 20 metriä syvään veteen avomerelle, jossa aaltojen energia on suurimmillaan. Näin suuren voimalaitoksen sijoittaminen rannikon lähelle olisi haastavaa. Suuren koon etuna myös laitoksen huoltaminen helpottuu, koska huoltotyöt voi tehdä suoraan voimalaitoksen päällä. (Tedd et al. 2008, p 324)

Kuva 12 on valokuva Wave Dragonin prototyypistä, jonka testaaminen aloitettiin 2003.



**Kuva 12.** Wave Dragonin prototyyppi.

Yhtiön internet-sivuilla ilmoitettiin 2009 talouskriisin viivästyttäneen projektia. Sivuston edellinen päivitys on vuodelta 2011, jolloin oli suunnitelmassa rakentaa Tanskaan 1,5 megawatin koelaitos. Varmuutta projektin nykytilasta ei ole. (Wave Dragon, 2009,2011)

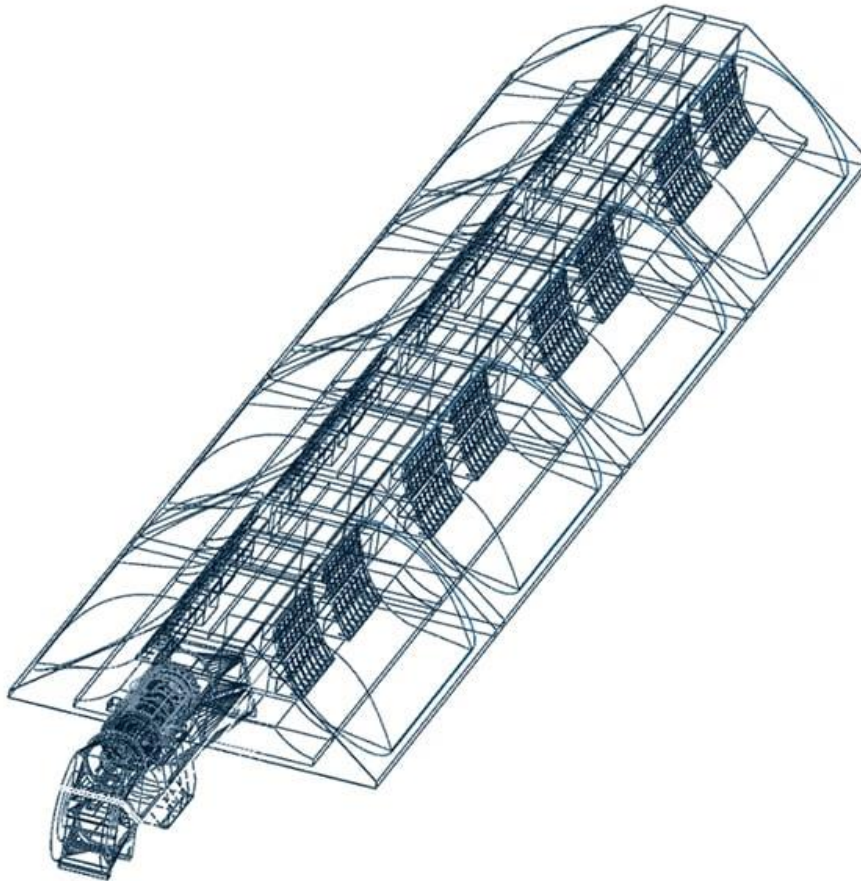
### **3.6 Submerged pressure differential**

Tämän tyyppiset aaltovoimalat ovat upoksissa olevia poijumaisia laitoksia, jotka on kiinnitetty pohjaan. Ne hyödyntävät energiantuotannossa aaltojen aiheuttamaa vedenalaista paine-eroa, josta voimalaitostyyppin nimikin on peräisin. Paine-ero syntyy aaltojen pohjien ja harjojen välille. Voimalan poijuosa on täytetty ilmalla. Kun poijun kohdalle osuu aallonharja, poijun sisällä oleva ilma menee pienempään tilaan vedenpaineen vaikutuksesta ja se vajoaa hetkellisesti syvemmälle. Vastaavasti aallonpohja saa poijun nousemaan. Tämä edestakaisen liikkeen energiaa hyödynnetään sähköntuotannossa. (López et al. 2013, p 418)

### 3.6.1 mWave

mWave on australialaisen Bombora Wave Powerin aaltovoimaprojekti. mWave hyödyntää energiantuotannossa paine-eroa. Laitos sijoitetaan merenpohjaan, noin 10 metrin syvyyteen. mWaven perustana on betoninen tukirakenne, johon on kiinnitetty useita ilmalla täytettyjä membraaneja. Kun aaltorintama ylittää voimalaitoksen, paine-ero saa membraanit tyhjentymään. Ilma virtaa paine-eron vaikutuksesta turbiiniin, saaden sen pyörimään. Turbiini pyörittää generaattoria, jonka tuottama sähkö siirretään maalle vedenalaista kaapelia pitkin. (mWave 2017)

Kuvassa 13 on esitetty mWaven perusrakenteen kaaviokuva. Laitoksen uskotaan kestävän hyvin voimakkaitakin aaltoja, koska siinä ei ole paljaita liikkuvia osia. Herkät osat on suojattu betonirakenteen sisään. (mWave 2017)



**Kuva 13.** mWaven rakenteen kaaviokuva. (Kuva: Bombora wave power)

Yhtiön suorittamassa tutkimuksessa 60 MW mWave-aaltovoimapuiston uskotaan tuottavan hinnaltaan kilpailukykyistä uusiutuvaa energiaa 2020-luvun puoliväliin mennessä. Bombora suunnittelee täysikokoisen voimalan testaamista vuoden 2017 alussa Länsi-Australian Hendersonissa. Tämän lisäksi yhtiö aikoo sijoittaa neljästäkymmenestä 1,5 MW laitoksesta koostuvan aaltovoimapuiston Portugalin Penicheen 2020-luvun alussa. Ensimmäinen voimala on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2017 aikana. (Bombora 2016)

### 3.7 Bulge Wave -voimalat

Tämän tyyppiset aaltovoimalaitokset hyödyntävät aaltojen aikaan saamaa vedenpaineen vaihtelua taipuisassa putkessa. Aaltojen aiheuttama paineenvaihtelu pyörittää laitteen yhteydessä olevaa vesiturbiinia. Turbiini puolestaan pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. (EMEC 2014)

#### 3.7.1 Anaconda

Tällä hetkellä EMEC:n listauksissa mainitaan vain kaksi pullistusaaltoa hyödyntävää projektia. Toinen niistä on britannialaisen CheckMate Seaenergy Ltd.:n Anaconda.

Anaconda on useita metrejä pitkä kuminen putki, joka on molemmista päistään umpinainen. Se ankkuroidaan pohjaan ja se leijuu vedessä juuri pinnan alapuolella. Putken annetaan liikkua vaakasuorassa aallokon mukana ja se suunnataan kohtisuoraan saapuvaa aaltorintamaa vastaan. Kuvassa 14 on esitetty konseptitaidetta Anacondien täyttämästä aaltovoimapuistosta.



**Kuva 14.** Mallikuva Anacondien muodostamasta aaltovoimapuistosta. (Kuva: Checkmate Seaenergy)

Putki on täytetty vedellä. Aallokko saa putken vedessä aikaan paineen vaihteluita, synnyttäen teknologian nimen mukaisen pullistusaallon. Tämä pullistuma etenee putken päästä toiseen. Anaconda on mitoitettu siten, että pullistuma etenee lähes samalla nopeudella kuin ympäröivä aalto, jolloin pullistusaalto vahvistuu matkan aikana entisestään. Aalto etenee takaisinvirtauksen estävien venttiilien läpi säiliöön, jossa paineen annetaan nousta. Tämän jälkeen korkeapaineinen vesi päästetään virtaamaan vesiturbiinin läpi, joka pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. (University of Southampton 2012)

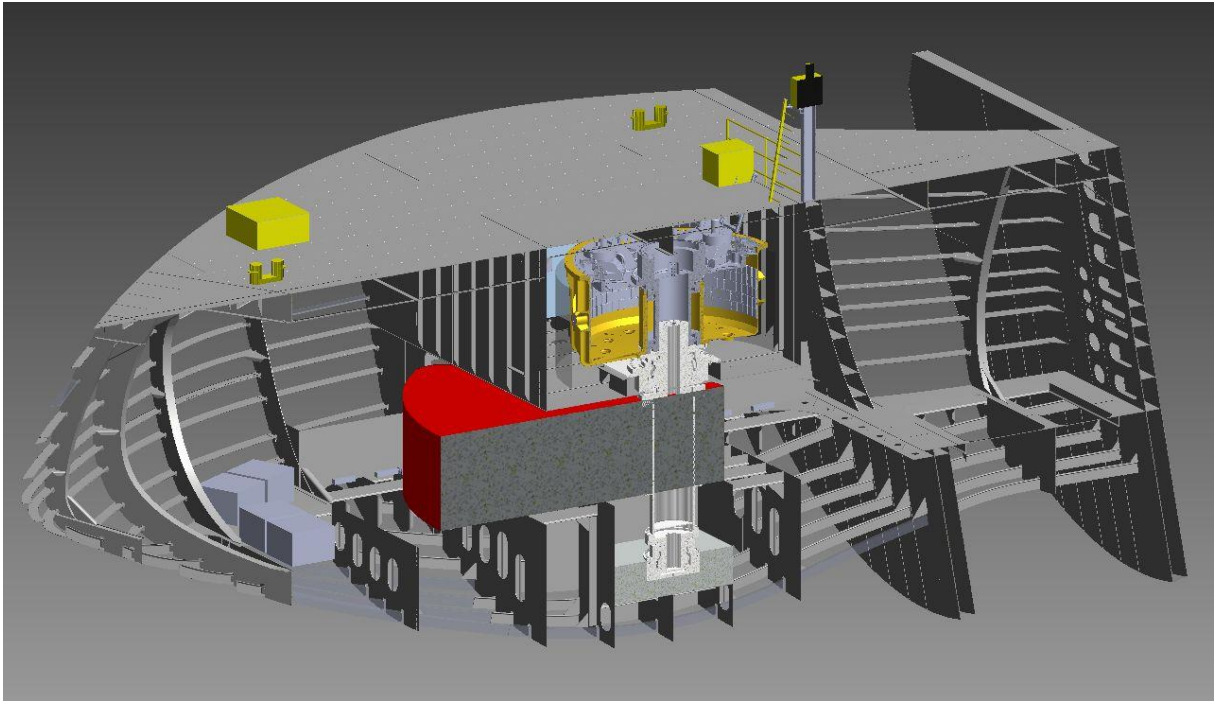
Kun pullistusaalto on luovuttanut energiaansa turbiinille, kulkee se uusien takaisinvirtauksen estävien venttiilien läpi takaisin itse putkeen. Tämä on prosessin matalapaineosa. Anacondassa on siis jatkuvasti edestakaisia ja eri paineisia virtauksia. (Checkmate Seaenergy Ltd.)

### **3.8 Pyörivä massa (Rotating mass)**

Pyörivää massaa hyödyntäviä aaltovoimalaitoksia on kahta erilaista tyyppiä. Toisessa hyödynnetään gyroskooppiä, toisessa epäkeskistä massaa. Tämä massa pyörittää laitteen sisällä olevaa generaattoria joka puolestaan muuttaa massan liike-energiaa sähköksi. (EMEC 2014)

#### **3.8.1 Penguin**

Suomalaisen Wello Oy:n kehitelemä Penguin on suuri, kelluva laite jonka sisällä akseloitu massa pyörii akselinsa ympäri aaltojen vaikutuksesta. Penguinin teknologia perustuu yhtiön mukaan jo käytössä oleviin ratkaisuihin ja tekniikoihin tuulivoiman alalta. Penguinin käyttämä generaattori on samanlainen, jota tyyppillisesti käytetään tuulivoimaloissa. Laitteet voidaan rakentaa jo olemassa olevilla telakoilla. Lisäksi Penguinin tarvitsemia osia ei tarvitse suunnitella pelkästään sitä varten, vaan se voi hyödyntää jo valmiiksi saatavilla olevia materiaaleja. Voimalaitoksen on tarkoitus tuottaa sähköä halvemmalla kuin merelle sijoitettavien tuulivoimaloiden. Kuvassa 15 on esitetty Penguinin läpileikkauskuva. (Wello Oy 2017)



**Kuva 15.** Penguinin läpileikkauksen kaaviokuva. Pyörivä massa on väritetty kuvassa punaisella. (Kuva: Wello Oy)

Kaikki Penguinin komponentit on sijoitettu suljettuun, kelluvaan ulkokuoreen. Penguin on Wello Oy:n mukaan ainoa aaltovoimala, joka tuottaa sähköä jatkuvasti ilman edestakaiseen liikkeeseen perustuvien laitosten vaiheittaista sähköntuotantoa. Penguinin patentoitu teknologia muuttaa aaltojen energiaa suoraan pyörimisen liike-energiaksi. Pyörivä massa on suoraan yhteydessä generaattoriin, jolloin säästytään vaihteiston aiheuttamilta häviöiltä. Täysikokoisen Penguinin tehoksi ilmoitetaan 600 kW. Voimala mitoitetaan 30 metriä pitkä, 16 metriä leveä ja painaa 220 tonnia (Wello Oy 2017)

Vuonna 2008 perustetun yhtiön ensimmäinen täysikokoinen prototyyppi otettiin käyttöön Skotlannin Orkneyssa 2012. Orkneyn Penguin pysyi käytössä ja tuotti onnistuneesti sähköä verkkoon vuoteen 2016 asti, jolloin laitteen sijaintia päätettiin muuttaa. Skotlannin testien aikana osoittautui, että Penguin kestää jopa 12 metrin korkuisia myrskyaaltoja ja että se tuottaa heikoissakin aalloissa odotettua enemmän sähköä. Kuvassa 16 on merellä kelluva Penguin-voimalaitos. (Wello Oy 2017)



**Kuva 16.** Wello Penguin. (Kuva: Wello Oy)

Fortumin koordinoima uusiutuvan energian tutkimushanke ”Clean energy from ocean waves” (CEFOW) sai vuonna 2015 EU:lta 17 miljoonan euron rahoituksen. Wellon Penguin on osa projektia. Viisivuotisen hankkeen tarkoitus on kehittää Penguinin sähköntuotantoa valtameri-olosuhteissa. (Fortum 2015)

Vuoden 2017 alussa testilaitoksen sijaintia muutettiin. Penguin hinattiin Orkneysta EMEC:n toiseen tutkimuskeskukseen, Billia Croohon. Penguin otettiin käyttöön siellä maaliskuussa 2017. (Wello Oy 2017).

Wello on myös testannut 1:5 kokoista koevoimalaitosta Gran Canarian koillisrannikolla sijaitsevassa Plocanin testilaitoksessa. (Wello Oy 2015)

## 4 TULEVAISUUDENNÄKYMÄ

Tässä kappaleessa esitän omia arvioitani aaltovoiman tulevaisuudesta.

Uusiutuvien energialähteiden käyttö sähköntuotannossa tulee luultavasti lisääntymään lähivuosina. Myös aaltovoiman merkitys ja osuus uusiutuvan energian tuotannosta tulee kasvamaan. Kuitenkin vaikuttaa siltä, että aaltovoiman osuus kaikesta energiantuotannosta ei nouse kovinkaan suureksi, ainakaan nopeasti. Nykyiset laitokset ovat tehoiltaan varsin pieniä esimerkiksi tuulivoimaloihin verrattuna. Voimaloiden tehot vaikuttavat kuitenkin olevan kasvussa, joten kymmenen vuoden päästä aaltovoima voi hyvinkin kilpailla tuulivoiman kanssa.

Uusia voimalatyyppejä kehitetään jatkuvasti. Olemassa olevien voimaloiden kehitys etenee ja uskon niiden pääsevän osaksi vakituista sähköntuotantoa kymmenen vuoden sisällä. On vaikea arvioida, mikä voimalatyyppi tulee menestymään parhaiten. Tätä kandidaatintyötä tehdessä huomasin joidenkin pitkäaikaisten, hyvinkin lupaavilta vaikuttaneiden projektien kariutuneen. Kotimaisesta näkökulmasta katsottuna WaveRoller vaikuttaisi olevan kehityksen kärjessä. AW-Energyllä on suunnitteilla useita suuria projekteja ja teknologia on todettu toimivaksi. Monet projektit vaikuttaisivat kuitenkin toimivan vielä varsin pienessä mittakaavassa.

Tulevaisuuden merkittävin haaste on saada aaltovoimasta taloudellisesti kilpailukykyinen uusiutuvan energian muoto. Kehitys on kuitenkin lupaavaa ja suunta oikea.

## 5 YHTEENVETO

Aaltoenergia on nouseva uusiutuvan energian muoto. Aurinko synnyttää tuulia, jotka puolestaan saavat vesistöissä aikaan aaltoja. Aaltorintaman energia on siis tiivistynyttä aurinkoenergiaa. Syntyvien aaltojen voimakkuuteen vaikuttavat tuulen nopeus sekä matka, jolla tuuli on vuorovaikutuksessa veden kanssa.

Aaltojen energiaa pyritään ottamaan talteen aaltovoimalaitoksilla. Ne ottavat vastaan aaltojen liike-energiaa ja muuttavat sen generaattorin avulla sähköenergiaksi. Aaltovoimalat voidaan sijoittaa rantaan, rannan lähelle tai avomerelle. Avomerelle sijoitettavat voimalat pääsevät kosketuksiin voimakkaimpien aaltojen kanssa, mutta niiden on toisaalta kestettävä avomeren hankalat olosuhteet.

Erilaisia aaltovoimateknologioita on useita. Niihin kuuluvat esimerkiksi poijutyypiset, vaimentimet, pyörivät massat, OWSC-laitokset sekä OWC-voimalat. Euroopan merienergiakeskus EMEC on listannut kahdeksan erilaista voimalatyypistä, ja yhdeksäntenä voimalat, jotka eivät sovi teknologialtaan muihin luokkiin. Kustakin voimalatyypistä on käynnissä useita projekteja eri puolilla maailmaa.

Toistaiseksi mikään laitostyyppi ei ole teknologialtaan osoittautunut yksiselitteisesti muita paremmaksi. Hyvin edistyneitä projekteja ovat esimerkiksi suomalaiset WaveRoller ja Penguin, sekä ruotsalainen Seabased S2.7.

Aaltovoiman, kuten muidenkin uusiutuvien energialähteiden käyttö tulee luultavasti lisääntymään seuraavan kymmenen vuoden aikana. Tällä hetkellä aaltovoima on kuitenkin hyvin pitkälti alkutekijöissään ja toiminta varsin pientä verrattuna muihin energiamuotoihin. Kehitystä kuitenkin tapahtuu jatkuvasti, ja on hyvin mahdollista, että aaltovoima nousee tulevina vuosikymmeninä merkittäväksi uusiutuvan energian ja sähkön tuotantotavaksi.

## LÄHTEET

Anaconda Bulge tube operation. Saatavilla: <http://www.checkmateukseaenergy.com/anaconda/> (Viitattu 30.1.2017)

AW-Energy, 13.9.2013: Fortum, DCNS, AW-Energy and Bretagne Region cooperate on wave power demonstration project in France. Saatavilla: <http://aw-energy.com/fortum-dcns-aw-energy-and-bretagne-region-cooperate-on-wave-power-demonstration-project-in-france>. (Viitattu 10.4.2017)

AW-Energy - Calm seas carried the WaveRoller: Successful installation started the commissioning period, 27.8.2012. Saatavilla: <http://aw-energy.com/the-waveroller-was-installed> (Viitattu 25.2.2017)

AW-Energy – Surge phenomenon, 2012. Saatavilla: <http://aw-energy.com/wave-energy-resources/surge-phenomenon> (Viitattu 20.2.2017)

AW-Energy – Wave Roller concept 2012a. Saatavilla: <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept> (Viitattu 22.2.2017)

AW-Energy – Wave farms 2012b. Saatavilla: <http://aw-energy.com/about-waveroller/wave-farms> (Viitattu 21.2.2017)

AW-Energy – Operation & Maintenance 2012c- Saatavilla: <http://aw-energy.com/about-waveroller/operation-maintenance> (Viitattu 21.2.2017)

AW-Energy - WaveRoller secures nearly 15 M€ for projects from the EU and TEKES, 16.9.2014a. Saatavilla: <http://aw-energy.com/waveroller-secures-nearly-15-me-for-projects-from-the-eu-and-tekes> (Viitattu 26.2.2017)

AW-Energy - Lloyd's Register clears WaveRoller™ to be in original condition after rough sea trials, 8.12.2014b. Saatavilla: <http://aw-energy.com/lloyds-register-clears-waveroller-to-be-in-original-condition-after-rough-sea-trials> (Viitattu 2.3.2017)

AW-Energy - AW-Energy and ENAL signed MoU for 10MW WaveRoller wavefarm in Mexico, 2.12.2015a. Saatavilla: <http://aw-energy.com/aw-energy-and-enal-signed-mou-for-10mw-waveroller-wavefarm-in-mexico> (Viitattu 2.3.2017)

AW-Energy – Impressive first results from AW-Energy’s Järvenpää Research Center, 7.12.2015b. Saatavilla: <http://aw-energy.com/impressive-first-results-from-aw-energys-jarvenpaa-research-center> (Viitattu 2.3.2017)

AW-Energy - EIB to bank WaveRoller commercialisation project, 6.7.2016. Saatavilla: <http://aw-energy.com/eib-to-bank-waveroller-commercialisation-project> (viitattu 2.3.2017)

Barstow, S., Mørk, G., Mollison, D. & Cruz, J. 2008. Wave Energy Resource. In: Ocean Wave Energy – Current Status and Future Perspectives, pages 93-132. Springer

Bombora Wave Power Pty Ltd: Market Update for Bombora’s mWave. 6.12.2016. Saatavissa: <http://www.bomborawavepower.com.au/wp-content/uploads/2016/12/Bombora-Wavepower-Market-Update-for-Bomboras-mWave.pdf> (Viitattu 25.3.2017)

Bombora wave power – mWave. Saatavilla: <http://www.bomborawavepower.com.au/mwave/> (Viitattu 25.3.2017)

Cruz, J. 2008. Introduction. In: Cruz, J. (ed.): Ocean Wave Energy – Current Status and Future Perspectives, pages 1-6. Springer

Duckers, L. 2004. Chapter 8: Wave Energy, pages 297-331. In: Boyle, G. (ed.) Renewable energy: Power for sustainable future. Oxford, 2<sup>nd</sup> Edition.

EMEC – Wave Developers. Päivitetty 3.2.2017. Saatavilla: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/> (Viitattu 20.3.2017)

Falnes, Johannes – A Review Of Wave Energy Extraction. Marine Structures 20, 2007, pages 185-201

Folley, Matt & Whitaker, Trevor – Nearshore oscillating wave surge converters and the development of the Oyster. School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen’s University Belfast 2011.

Fortum Oyj, Lehdistötiedote 6.5.2015. Saatavilla: <http://www.fortum.com/fi/media/pages/fortumin-koordinoimalle-aaltovoiman-tutkimushankkeelle-17-miljoonan-euron-rahoitus-eun-horisontti-2020-ohjelmasta.aspx> (Viitattu 10.4.2017)

Gareth, T. 2008. The Theory Behind the Conversion of Ocean Wave Energy: a Review. In: Cruz, J. (ed.): Ocean Wave Energy – Current Status and Future Perspectives, pages 41-91. Springer

Heath, T. 2008. LIMPET. In: Cruz, J. (ed.): Ocean Wave Energy – Current Status and Future Perspectives, pages 287-294. Springer

Ilmatieteen laitos – Itämeren aallokko. Saatavilla <http://ilmatieteenlaitos.fi/aallokko-itamerella> (Viitattu 27.1.2017)

Ilmatieteen laitos – Tuulen kehittämien aaltojen elinkaari. Saatavilla <http://ilmatieteenlaitos.fi/aallokko> (Viitattu 28.1.2017)

Iraide López, Jon Andreu, Salvador Ceballos, Iñigo Martínez Alegría, Iñigo Kortabarria - Review of wave energy technologies and the necessary equipment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27 (2013), pages 413-434

Seabased Ab – Seabased wave energy. Saatavilla: <http://www.seabased.com/en/technology/seabased-wave-energy> (Viitattu 19.4.2017)

Seabased Ab – The Sotenäs Wave Energy Plant Grid Connected! 16.12.2015. (Viitattu 20.2.2017). Saatavilla: <http://www.seabased.com/en/newsroom>

Tedd, J., Friis-Madsen, E., Kofoed, J.P. & Knapp, W. 2008. In: Cruz, J. (ed.): Ocean Wave Energy – Current Status and Future Perspectives, pages 321-335. Springer

University of Southampton – Anaconda Wave Energy Converter Concept (Julkaistu toukokuussa 2012). Saatavilla: <http://www.energy.soton.ac.uk/anaconda-wave-energy-converter-concept/> (Viitattu 30.1.2017)

Wave Dragon: Uutinen, 3/2011 ja 25.8.2009. Saatavilla: [http://www.wavedragon.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=42&Itemid=67](http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=67)

Wello Oy – The Hidden Truth about the Penguin, 2017. Saatavilla: <http://www.wello.eu/en/penguin/technology>. Viitattu (20.6.2017)

### **Kuvien lähteet:**

Kuva 1: Phil Schatz – Physics. Chapter 16.9: Waves. Saatavilla: <http://philschatz.com/physics-book/contents/m42248.html> (Viitattu 28.1.2017)

Kuva 2: Wikimedia commons 2007. Saatavilla: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave\\_motion-i18n.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave_motion-i18n.svg) (Viitattu 28.1.2017)

Kuva 4 Goldman, A. What is wave energy?. Renewable Green Energy Power, 2013. Saatavilla: <http://www.renewablegreenenergypower.com/what-is-wave-energy/> (Viitattu 29.1.2017)

Kuva 5: The Tribal Energy and Environmental Information Clearinghouse: Utility-Scale and Distributed Hydrokinetic Energy Generation. Saatavilla: <https://teeic.indianaffairs.gov/er/hydrokinetic/restech/scale/index.htm> (Viitattu 29.1.2017)

Kuva 9: Juuti, P., YLE: Aaltovoima kirii auringon ja tuulivoiman täydentäjäksi – ainutlaatuinen laboratorio matkii lähes kaikkia maailman rantavesiä 2015. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-8464264> (Viitattu 1.3.2017)

Kuva 10: Cyberphysics: Wave Energy, 2017. Saatavilla: <http://www.cyberphysics.co.uk/topics/energy/wave.htm> (Viitattu 29.1.2017)

Kuva 12: Maritime Journal: Denmark's Wave Dragon Delivers Power to the Grid. Saatavilla: [http://www.maritimejournal.com/news101/industry-news/denmarks\\_wave\\_dragon\\_delivers\\_power\\_to\\_the\\_grid](http://www.maritimejournal.com/news101/industry-news/denmarks_wave_dragon_delivers_power_to_the_grid) (Viitattu 21.6.2017)