

Neela Walin

AALTOENERGIATEKNOLOGIAT ENERGIANTUOTANNOSSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Seppo Syrjälä
12/2021

TIIVISTELMÄ

Neela Walin: Aaltoenergiateknologiat energiantuotannossa
Wave energy technologies in energy production
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Ympäristö- ja energiatekniikka
12/2021

Yhteiskunnan energiantarve on kasvanut väestönkasvun ja teknologian kehityksen myötä. Ilmastomuutoksen vakavoitumisen ja fossiilisten polttoaineiden hupenemisen takia on löydettävä uusia, vähäpäästöisempiä energiantuotantomuotoja kattamaan kasvava energiantarve. Tässä työssä perehdytään melko uuteen uusiutuvaan energialähteeseen, aaltoenergiaan. Työ tehdään kirjallisuusselvityksenä, ja sen tavoitteena on selvittää, miten eri aaltoenergiamuuntajat eroavat toiminnaltaan ja mitkä niistä ovat tällä hetkellä potentiaalisimpia energiantuotannon kannalta. Työssä tehdään myös katsaus aaltoenergian suurimpiin haasteisiin ja tulevaisuuden näkyymiin.

Aaltoenergia on peräisin Auringon energiasta, mutta aaltoenergiamuuntajat tuottavat energiaa muuntamalla aaltojen sisältämää energiaa hyödynnettävään muotoon. Maapallon aaltoenergia-varastojen on arvioitu olevan 2 TW, ja tästä määrästä olisi tulevaisuudessa hyödynnettävissä 10–25 %. Aaltoenergiamuuntajan sijoittelun kannalta on tärkeää tuntee sijoitusalueen aaltoolosuhteet. Aaltoenergian tuotannon kannalta parhaat alueet sijaitsevat 40 ja 60 leveysasteen välillä sekä pohjoisella että eteläisellä pallonpuoliskolla. Maapallolla vallitsevien tuulensuuntien vuoksi parhaat aalto-olosuhteet sijoittuvat maanosien länsirannikoille.

Kaikki aaltoenergiamuuntajat voidaan jakaa samoihin toiminnallisiin komponentteihin. Komponentit ovat muuntajan fyysinen ulkokuori/rakenne, muuntajan perustus, eli systeemi, jolla muuntaja on kiinnitetty merenpohjaan, ja muuntajan tehonottosysteemi. Kun nämä toiminnalliset komponentit optimoidaan muuntajan sijoituspaikan olosuhteisiin, saadaan toimiva aaltoenergiamuuntaja. Tässä työssä muuntajat on jaettu eri luokkiin tehonottosysteemien pohjalta. Luokkia ovat potentiaalienergiaa hyödyntävät muuntajat, oskilloivaa vesipatsasta hyödyntävät muuntajat, sekä oskilloivien runkojen luokka. Jokaisesta tehonottosysteemistä annetaan konkreettinen esimerkki eri kyseistä tehonottosysteemiä hyödyntäviä aaltoenergiamuuntajia esittelemällä. Työssä esitellään myös yksi muuntaja, jota ei voida jakaa tehonottonsa perusteella mihinkään aiemmista luokista.

Aaltoenergiamuuntajia vertaillaan neljän eri parametrin suhteen. Parametrit ovat selviytymiskyky, huollettavuus, suorituskyky ja skaalautuvuus. Työssä havaittiin, että vertailua on joidenkin parametrien suhteen vaikeaa tehdä alan uutuuden vuoksi. Suurin osa alan toimijoista ei halua kertoa uusien innovaatioidensa tarkkoja teknisiä tietoja, mikä vaikeuttaa muuntajien vertailua. Vertailua tehdessä havaittiin kuitenkin se, että aaltoenergiamuuntajien kenties suurin haaste tällä hetkellä on niiden suorituskyky ja skaalautuvuus. Suurin osa muuntajista saavuttaa optimaaliset mittansa liian pieninä, jolloin nimellisteho jää alhaiseksi, ja taloudellinen kannattavuus ei nouse tarpeeksi korkealle. Ongelmia pohtiessa pitää kuitenkin ottaa huomioon alan nuoruus. Aaltoenergiateknologioilla on mahdollisuus kehittyä tehokkaammiksi mitä enemmän tutkimusta ja kehitystyötä tehdään.

Avainsanat: aaltoenergia, aaltoenergiamuuntaja, uusiutuva energiantuotanto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AALTOENERGIA	2
2.1 Meriaaltojen muodostuminen	2
2.2 Meriaaltojen energia.....	3
3. AALTOENERGIAMUUNTAJAT	6
3.1 Aaltoenergiamuuntajien luokittelu.....	6
3.2 Potentiaalienergiaa hyödyntävät muuntajat.....	7
3.2.1 Wave dragon	8
3.2.2 SSG	9
3.3 Oskilloiva vesipatsas.....	10
3.3.1 Mutriku.....	11
3.3.2 OE Buoy	13
3.4 Oskilloivat rungot	14
3.4.1 Seabased poijut	15
3.4.2 Wavepiston vaimennin	17
3.4.3 Biowave terminaattori	19
3.5 Muut aaltoenergiamuuntajat.....	20
3.6 Aaltoenergiamuuntajien vertailu	21
4. AALTOENERGIAN HAASTEET JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT	26
4.1 Aaltoenergian haasteet	26
4.2 Aaltoenergia tulevaisuudessa	28
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	30
LÄHTEET.....	32

1. JOHDANTO

Maailman väkiluku on kasvanut noin 2,5 miljardista noin 7,8 miljardiin vuosien 1950–2019 aikana (United Nations 2019) samalla, kun teknologinen kehitys on mennyt eteenpäin. Muun muassa näistä syistä yhteiskunnan energiantarve on kasvanut, mutta ilmastonmuutoksen tuoman uhan ja fossiilisten polttoaineiden vähenemisen takia energiantuotannosta pitäisi saada kestävämpää ja päästöttömämpää. Vuonna 2019 uusiutuvat energiat kattoivat kuitenkin vain 11,4 % maapallon primäärienergiasta (BP 2020). Tällä hetkellä uusiutuvilla energioilla ei siis kyetä kattamaan fossiilisista polttoaineista luopumista. Aaltoenergialla on suuri kehittämispotentiaali, ja sitä kehittämällä ja hyödyntämällä uusiutuvien energioiden osuutta energiantuotannossa on mahdollista kasvattaa. Maapallon 2 TW:n suuruista aaltoenergiavarastoista olisi arvioiden mukaan mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa 10–25 % (Cruz 2008).

Tämän kandidaatintyön tavoite on tarkastella ja analysoida erilaisia aaltoenergiateknologioita ja niiden soveltuvuutta energiantuotantoon. Työ tehdään kirjallisuuskatsauksena, ja sen tarkoituksena on selvittää, miten eri aaltoenergiamuuntajat eroavat toiminnaltaan ja mitkä niistä ovat tällä hetkellä toimivimpia. Työssä tarkastellaan myös aaltoenergian suurimpia haasteita ja tulevaisuuden kehityskohteita, joita kehittämällä aaltoenergiasta saadaan kilpailukykyisempää. Koska ala on uusi ja suurin osa aaltoenergiamuuntajista on vielä kehittämisvaiheessa, tarkempaa kannattavuuslaskentaa ei työssä suoriteta. Työssä keskitytään ensisijaisesti aaltoenergian teknisiin ratkaisuihin ja siihen, miten ne vertautuvat toisiinsa.

Työn 2. luvussa kerrotaan yleisesti aaltoenergiasta ja teoriasta aaltoenergian taustalla, kuten aaltojen muodostumisesta ja aaltojen sisältämästä energiasta. Luvussa 3 esitellään eri aaltoenergiateknologioita ja vertaillaan potentiaalisimpia teknisiä ratkaisuja. Luvussa 4 käsitellään aaltoenergian suurimpia kehityskohteita sekä aaltoenergian tulevaisuudennäkymiä ja luvussa 5 kootaan yhteen tärkeimmät johtopäätökset.

2. AALTOENERGIA

Maapallon valtamerissä on runsaasti energiaa esimerkiksi meriaaltojen, merivirtojen ja vuorovesien muodossa (Kofoed et al. 2017, s. 17). Aaltoenergia on uusiutuvan energian muoto, joka käyttää energiantuotantoon nimenomaan meriaaltojen sisältämää energiaa. Maapallon aaltoenergiavarastojen on arvioitu olevan noin 2 TW (Cruz 2008). Tämä vastaa melkein ihmiskunnan sähkönkulutusta vuodessa, joka vuonna 2019 oli noin 2,6 TW (IEA 2021). Tästä aaltoenergiamäärästä voidaan tulevaisuudessa hyödyntää 10–25 % (Cruz 2008). Jotta eri aaltoenergiamuuntajia voi vertailla keskenään, pitää tarkastella teoriaa aaltoenergian taustalla.

Tässä luvussa käsitellään aaltojen muodostumisen ja niiden sisältämän energian teoriaa. Luvussa tarkastellaan myös sijainnin vaikutusta olosuhteisiin, sillä olosuhteet vaikuttavat lopulta siihen, millaisia teknisiä ominaisuuksia aaltoenergiamuuntajalta tulisi löytyä.

2.1 Meriaaltojen muodostuminen

Aaltoenergiamuuntajat hyödyntävät energiantuotannossaan tuulten nostattamia meriaaltoja, mutta viime kädessä aaltoenergiankin energia on peräisin Auringosta. Aurinko lämmittää maapalloa epätasaisesti, minkä seurauksena Maan pinnalle syntyy lämpötilaeroja. Nämä lämpötilaerot saavat aikaan eroja ilmanpaineessa. Ilmanpaine-erojen tasaantumisen aiheuttamat ilmavirrat ovat tuulia. Paine-erot tasaantuvat aina korkeammasta paineesta matalampaan.

Aaltoenergian tuotannossa käytetään siis epäsuorasti Auringon energiaa. Varsinainen energia saadaan kuitenkin aaltojen liikkeistä, ja siksi onkin tärkeää ymmärtää, miten aallot syntyvät.

Meriaallot lähtevät muodostumaan tuulen nostattamista pienistä väreistä, jotka aluksi muodostavat kapillaariaaltoja. Kapillaariaallot ovat usein epävakaita ja heikentyvät herkästi tuulen lakatessa pintajännityksen vaikutuksesta. Aallot lähtevät kasvamaan, jos tuuli puhaltaa riittäväällä nopeudella tarpeeksi kauan. (Massel 2013) Aaltojen syntymisen kannalta tuulen tärkeimmät ominaisuudet ovat sen nopeus, suunta ja jatkuvuus (Xie & Zuo 2013). Aallot jatkavat kasvamistaan tuulelta saadun jatkuvan energiasyötön vuoksi. Aallot eivät kuitenkaan voi kasvaa loputtomasti. Kun aallot saavuttavat maksii-

maalisen jyrkkyytensä, ne hajoavat vaahtopäiksi neutraloiden tuulelta saadun energian vaikutuksen. (Banner & Peregrine 1993, Massel 2013 mukaan) Aalto voi jatkaa etenemistään pitkiäkin matkoja ilman suuria energiahäviöitä, vaikka tuuli lakkaa tai aallonnopeus kasvaa suuremmaksi kuin tuulennopeus (Kofoed et al. 2017, s. 44).

Aallot määritellään usein tulva-aalloiksi, kun niiden aikaansaaneella tuulella ei ole niihin enää vaikutusta. Tuulen vaikutuksen alaisia aaltoja kutsutaan tuuliaalloiksi. Näillä ei ole kuitenkaan virtausopillisesti mitään perustavanlaatuista eroa. (Kofoed et al. 2017, s. 45)

Aaltoenergiamuuntajan sijoittamisen kannalta alueen aalloista on tärkeä tietää aaltojen korkeus (H), aallonpituus (λ) ja ajanjakso (T). Kun nämä parametrit tiedetään, voidaan määrittää aallolle taajuus

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (1)$$

jossa ω on taajuus ja T on ajanjakso. Tämän lisäksi aallolle voidaan määrittää jyrkkyytluku kaavalla

$$s = \frac{H}{\lambda}, \quad (2)$$

jossa s on jyrkkyytluku, H on aallonkorkeus ja λ on aallonpituus. Jyrkkyytlukua käytetään erottelemaan lineaariset ja epälineaariset aallot toisistaan. Sen ollessa alle 0,01 voidaan analysoida tehden käyttöä lineaarisesta aaltoteoriasta. Todellisuudessa kyseistä teoriaa käytetään myös korkeammilla jyrkkyytluvuilla, sillä se soveltuu teorioista parhaiten – vaikkakaan ei täydellisesti – epäsäännöllisten aaltojen mallintamiseen. (Kofoed et al. 2017, s. 46–47)

2.2 Meriaaltojen energia

Meriaaltojen muodostumisen jälkeen aaltoenergiamuuntajan sijoittelun kannalta on tärkeää tietää, kuinka paljon energiaa aallot sisältävät tietyllä alueella. Tässä alaluvussa tarkastellaan, miten aaltojen sisältämää energiaa voidaan laskea. Energian laskemisen ja aaltoenergiamuuntajan sijoittamisen vuoksi pitää siis myös tietää, millaiset aaltoolosuhteet suunnitellussa sijainnissa on.

Falnesin (2007) mukaan meriaallon energia pinta-ala yksikköä kohden voidaan laskea kaavalla

$$E = \frac{\rho g H_{m0}^2}{16}, \quad (3)$$

jossa ρ on veden tiheys [kg/m^3], g on putoamiskiihtyvyyys [m/s^2] ja H_{m0} on merkitsevä aallonkorkeus [m]. Tämä energia jakautuu veden liikkeen sisältämään kineettiseen energiaan ja aallon potentiaalienergiaan, joka syntyy tuulen mekaanisen energian vaikutuksesta. Tämä tuulen tekemä mekaaninen työ vastaa veden nousemista painovoimaa vastaan. (Falnes 2007)

Aaltojen teho saadaan kertomalla edellä laskettu energia aaltojen ryhmänopeudella C_g [m/s]. Teho saadaan siis laskettua yhtälön

$$P = E \cdot C_g \quad (4)$$

mukaan, jossa E on aaltojen sisältämä energia ja C_g on aaltojen ryhmänopeus [m/s]. (Kofoed et al. 2017)

Syvissä vesissä aaltojen ryhmänopeuden C_g voidaan olettaa olevan muotoa

$$C_g = \frac{gT}{4\pi}, \quad (5)$$

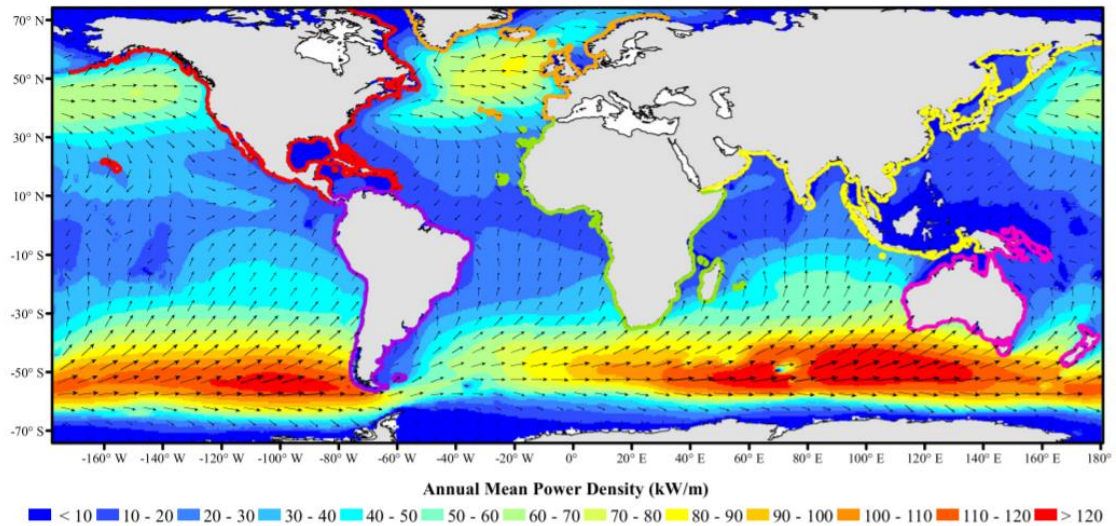
jossa T on aallon jaksonaika [s]. (Falnes 2007) Kun kaavat (3) ja (5) sijoitetaan kaavaan (4), saadaan seuraava kaava

$$P = \frac{\rho g^2 H_{m0}^2 T}{64\pi}, \quad (6)$$

jossa P on aallon teho pituuden yksikköä kohti [W/m].

Avomerellä aalloilla on usein suurempi energia kuin rannikkoalueilla. Energiahäviöt matalille rannikkoalueille tullessa johtuvat erityisesti aaltojen hajoamisesta sekä kitkasta aallon ja merenpohjan välillä. Aalto-olosuhteet yleisesti ottaen myös vaihtelevat rannikkoalueilla voimakkaammin kuin avomerellä. Rannikkoalueiden matalissa vesissä voi syntyä paikallisia korkean energiatason alueita aaltojen etenemissuunnan muuttuessa. Tällaiset alueet syntyvät usein niemekkeiden kohdalle. Toisaalta matalan energian alueita voi syntyä vastaavasti lahtiin. (Falnes 2007)

Kuvassa 1 nähdään aaltojen vuotuinen keskimääräinen tehotiheys. Kuvasta nähdään, että aaltoenergiaa on parhaiten saatavilla 40 ja 60 leveysasteen välillä sekä pohjoisella että eteläisellä pallonpuoliskolla. Eteläisellä pallonpuoliskolla tehotiheys on huomattavasti suurempi. (Gunn & Stock-Williams 2012)



Kuva 1. Kartta aaltojen vuotuisesta keskimääräisestä tehotiheydestä (Gunn & Stock-Williams 2012)

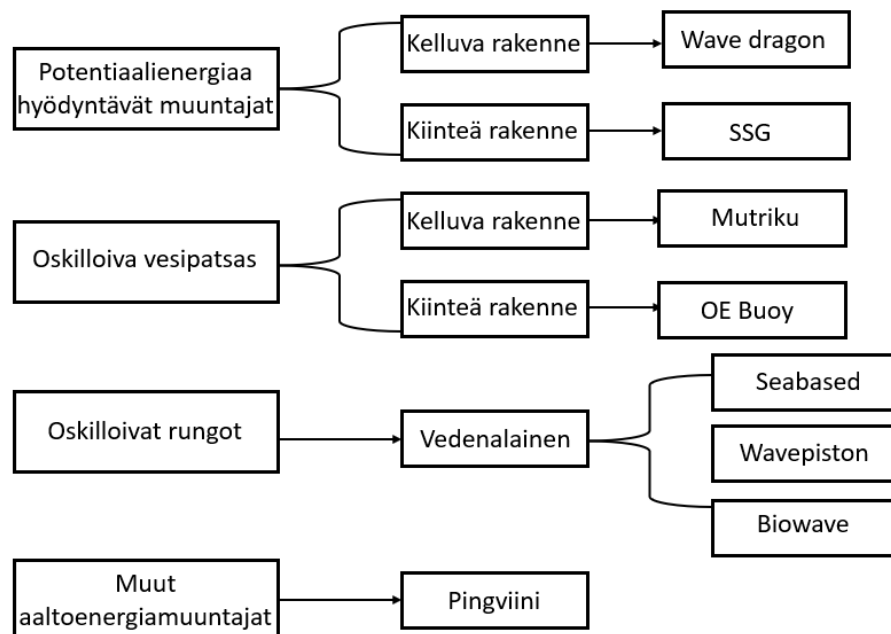
Kartasta voidaan myös nähdä, että suurin potentiaali aaltoenergiantuotannolle löytyy maanosien länsirannikoilta. Tämä johtuu siitä, että tuulet puhaltavat yleisimmin lännestä itään, mikä puolestaan johtaa siihen, että aaltojen suunta on useimmiten myös lännestä itään. Kuvassa 1 aaltojen suuntaa kuvaavat nuolet. (Gunn & Stock-Williams 2012) Kofoed et al. (2017) mukaan aaltoenergiamuuntajan sijoituspaikassa tehotiheyden tulisi olla yli 15 kW/m kannattavuuden takaamiseksi.

3. AALTOENERGIAMUUNTAJAT

Tässä luvussa perehdytään aaltoenergiamuuntajien luokitteluun ja esitellään käytetyn luokittelun perusteella jokaisesta eri luokasta vähintään kaksi eri aaltoenergiamuuntajaa. Luvun on tarkoitus antaa kattava kuvaus aaltoenergiamuuntajien eri tehonotto menetelmistä ja niiden mahdollisista sovellutuksista. Luvun lopuksi vertaillaan työssä esiteltyjä aaltoenergiamuuntajia valittujen ominaisuuksien pohjalta.

3.1 Aaltoenergiamuuntajien luokittelu

Aaltoenergiamuuntajat ovat laitteita, joilla aaltojen sisältämä energia muutetaan hyödynnettävään muotoon esimerkiksi sähköksi. Muuntajia voidaan luokitella usealla eri tavalla esimerkiksi sijainnin, toimintaperiaatteen, tehonottojärjestelmän ja rakenteellisten ominaisuuksien perusteella (Zhang et al. 2021). Koska tässä työssä keskitytään muuntajien tekniseen toteutukseen, käytetään IEA:n (International Energy Agency) luokittelua aaltoenergiamuuntajille. Tämä kuvassa 2 esitetty luokittelu sisältää kolme yläkategoriaa, jotka hajautuvat omiin alakategorioihinsa.



Kuva 2. IEA:n mukainen luokittelu aaltoenergiamuuntajille, muokattu lähteestä (Falcao 2010).

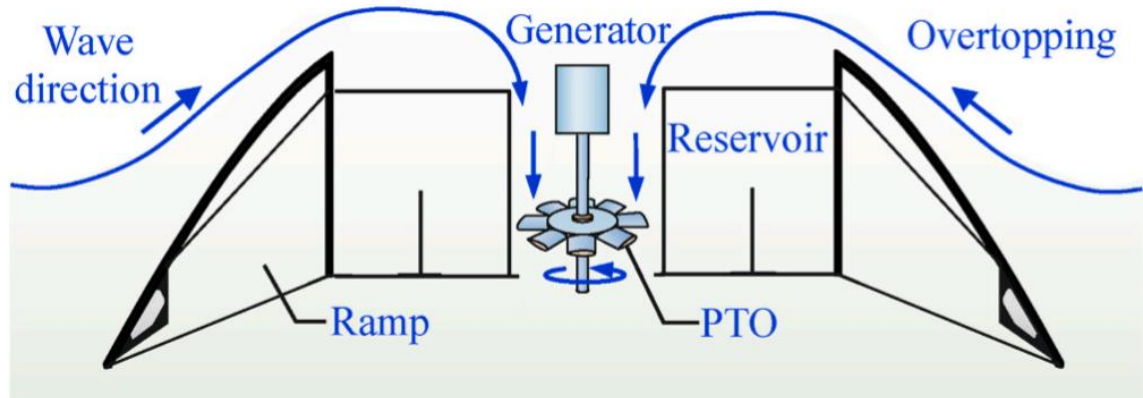
Pääryhmiä ovat potentiaalienergiaa hyödyntävät muuntajat, oskilloiva vesipatsas sekä aktiivinen aaltorunko. Nämä kolme pääryhmää luokitellaan edelleen sen mukaan ovatko ne kiinteitä, kelluvia vai kokonaan vedenalaisia rakennelmia. Suurin osa aaltoenergiamuuntajista kuuluu joihinkin näistä alakategorioista.

Yksittäiset muuntajat voidaan myös jakaa toiminnallisiin komponentteihin. Ensimmäinen komponentti on aaltoenergiamuuntajan fyysinen ulkokuori/rakenne, joka ottaa vastaan aaltojen liikehdinnän ja sitä kautta energian. Toinen komponentti on muuntajan perustus, joka muuntajasta riippuen on joko kiinteä rakennuspohja tai merenpohjaan porattu kiinnityspiste. Perustuksen ideana on pitää muuntaja paikallaan. Kolmantena komponenttina tulee muuntajan varsinainen PTO-systeemi (Power Take-Off) eli tehonottojärjestelmä. Se muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Viimeisimpänä komponenttina on muuntajan valvontajärjestelmä, jonka tarkoitus on turvata muuntajan toiminta ja optimoida se vallitseviin käyttöolosuhteisiin. (IRENA 2014) Kun nämä komponentit optimoidaan suhteessa muuntajan sijaintiin, saadaan teknisesti toimiva aaltoenergiamuuntaja.

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään kutakin pääryhmää yleisellä tasolla ja sen jälkeen tarkastellaan muutamia toimivimpia innovaatioita kustakin pääryhmästä. Tarkoituksena on avata erilaisten teknisten ratkaisuiden vahvuuksia ja heikkouksia, jotta voitaisiin päätellä, minkä tyyppiset aaltoenergiamuuntajat ovat sopivimpia energiantuotantoon.

3.2 Potentiaalienergiaa hyödyntävät muuntajat

Potentiaalienergiaa hyödyntävät aaltoenergiamuuntajat (englanniksi overtopping wave energy converters) voidaan jakaa kahteen luokkaan. On kelluvia syvissä vesissä toimivia voimaloita sekä kiinteitä voimaloita, jotka rakennetaan joko mantereelle tai rannikovesialueille (Zhang et al. 2021). Molemmissa tyypeissä yleinen toimintaperiaate on kuitenkin sama, ja perustuu niin sanottuun overtopping-menetelmään. Aallot ohjataan kanavaa tai ramppia pitkin meren pinnan yläpuolella olevaan varastoaltaaseen (Xie & Zuo 2013). Aaltojen epävakaa kineettinen energia muunnetaan siis vakaaksi potentiaalienergiaksi. Varastoaltaasta vesi ohjataan poistoputkea pitkin takaisin mereen. Poistuva vesi saa tehonottolaitteen liikkeelle, mikä puolestaan saa generaattorin tuottamaan sähköä. (Zhang et al. 2021) Overtopping-laitteiden yleinen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.



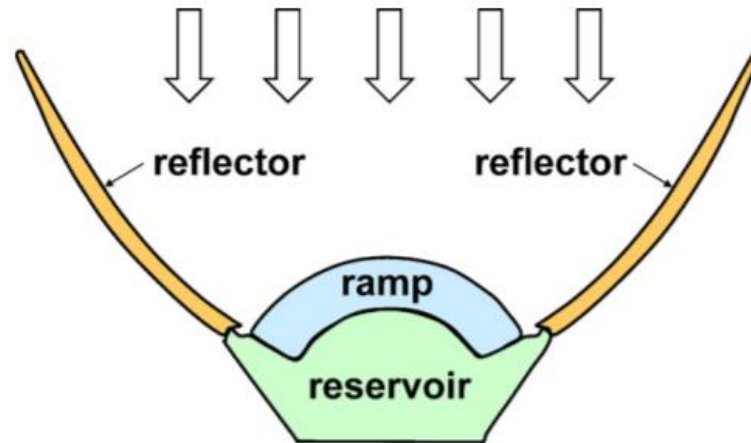
Kuva 3. *Potentiaalienergiaa hyödyntävien aaltoenergiamuuntajien yleinen toimintaperiaate (Zhang et al. 2021)*

Potentiaalienergiaa hyödyntävissä muuntajissa käytetään tehonottolaitteena yleensä matalapaineturbiineja. Nämä turbiinit ovat lähes samanlaisia kuin maalla vesivoiman tuotannossa käytettävät turbiinit, mutta ne soveltuvat paremmin tilanteisiin, joissa veden putoamiskorkeus on vain muutaman metrin luokkaa. (Handoko & Mukhtasor 2021) Ne soveltuvat siis erinomaisesti potentiaalienergiaa hyödyntäviin aaltoenergiamuuntajiin.

3.2.1 Wave dragon

Wave dragon on Tanskassa kehitetty merenpohjaan ankkuroitava, kelluva aaltoenergiamuuntaja, joka on tällä hetkellä kenties yksi kehittyneimmistä muuntajista. Wave dragonin kehittämisen aloitti tanskalainen Erik Friis-Madsen niinkin aikaisin kuin vuonna 1986. Ensimmäinen merellä testattava prototyyppi saatiin toimintaan melkein 20 vuotta myöhemmin vuonna 2003. Wave dragon oli ensimmäinen kelluva aaltoenergiamuuntaja, joka on ollut yhteydessä sähköverkkoon. (Cruz 2008)

Wave dragonin toimintaperiaate on hyvin samanlainen, kuin potentiaalienergiaa hyödyntävien aaltoenergiamuuntajien yleinen toimintaperiaate. Aallot ohjataan ramppia pitkin merenpintaa korkeammalla olevaan varastoaltaaseen, josta vesi ohjataan edelleen turbiinin läpi, takasin mereen. Wave dragonissa hieman erilaista on siihen kuuluvat suuntaajat, jotka nimensä mukaisesti suuntaavat aallot kohti ramppia. Näin saapuvaa energiamäärää saadaan nostettua 70 prosentilla. (Kofoed et al. 2006) Havainnekuva Wave dragonista ylhäältä päin on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Wave dragon, havainnekuva (Falcao 2010)

Wave dragon on mittakaavaltaan todella suuri aaltoenergiamuuntaja. Suuntaajien kärkiväli on 4 MW:n muuntajassa 230 m. Varasto altaan ja suuntaajan kärjen välissä on samankokoisessa muuntajassa 150 m ja varastoallas on 3–6 m merenpinnan yläpuolella. (Wave Dragon 2017)

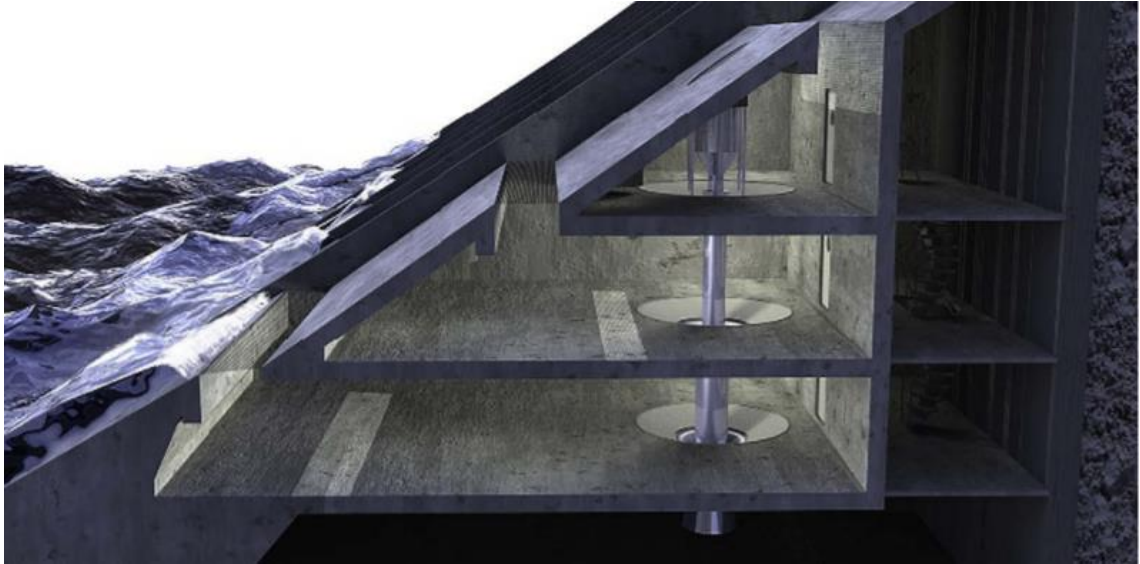
Wave dragon:ssa käytettävät turbiinit ovat Kaplan-turbiineja. Nämä turbiinit toimivat parhaiten, kun veden putouskorkeus on pieni ja tilavuusvirta suuri. Kaplan-turbiinit soveltuvat siis hyvin käytettäväksi juuri potentiaalienergiaa hyödyntävissä aaltoenergiamuuntajissa. Turbiinit ovat suoraan yhteydessä generaattoriin, jonka avulla tuotetaan sähköä. (Kofoed et al. 2005)

Suuresta koostaan huolimatta Wave dragon on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen muuntaja. Sen ainoat liikkuvat osat ovat energiantuotantoon käytettävät turbiinit. Tämä on hyvin tärkeää muuntajan kestävyuden kannalta, sillä Wave dragon toimii tehokkaimmin avomerellä, missä olosuhteet ovat rankimmillaan. (Kofoed et al. 2006) Wave dragonin kapasiteetti vaihtelee 1,5 MW:sta 12 MW:iin (Wave Dragon 2017). Walesin Pembrokeshireen on suunnitteilla 112 MW:n kokoinen aaltoenergiapuisto, jonka kapasiteetti on tarkoitus asentaa 28 MW:n ryhmissä (Tethys Wave Dragon 2021).

3.2.2 SSG

SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) on Norjassa kehitetty, potentiaalienergiaa hyödyntävä aaltoenergiamuuntaja. SSG voidaan integroida aallomurtajaan kuten luvussa 3.2.1 esiteltävä Mutriku. SSG-muuntajan ideaa voidaan kuitenkin soveltaa sekä maalle että avomerelle rakennettaviin aaltoenergiamuuntajiin. (Margheritini et al. 2009)

Toisin kuin Wave dragonissa, jossa on vain yksi varastoallas, SSG:ssä altaita on useampia. Aallonmurtajaan integroidun muuntajan seinässä on aukkoja eri korkeuksilla, ja aaltojen lyödessä muuntajan yli aukoista pääsee vettä rakennelman sisällä oleviin altaisiin. (Margheritini et al. 2009) Rakennelmaa havainnollistetaan kuvassa 5.



Kuva 5. Poikkileikkaus SSG-muuntajasta (Margheritini et al. 2009)

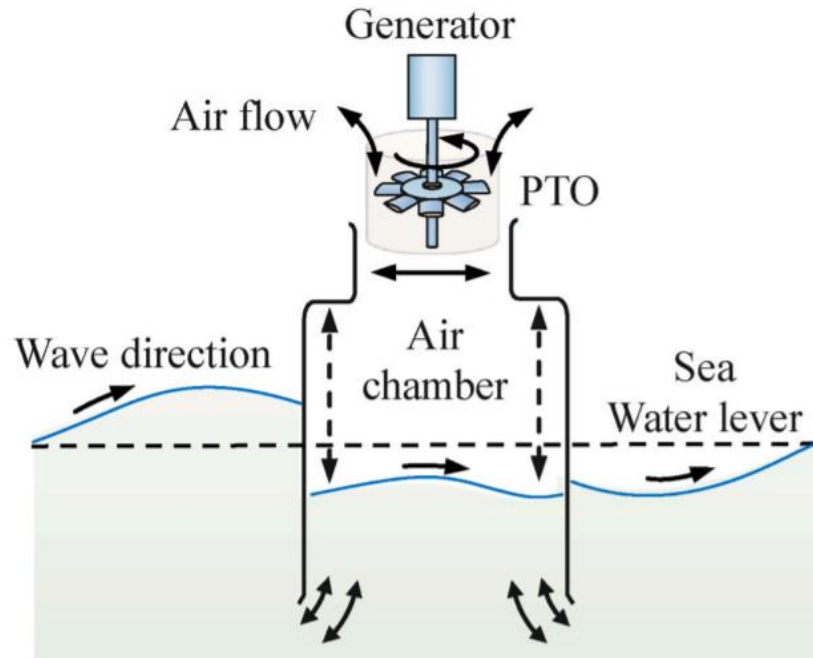
Kuvassa 5 nähtävien tasojen ideana on, että muuntaja kykenee tuottamaan energiaa jatkuvasti aalto-olosuhteista riippumatta. Pienemmillä aallokoilla vettä varastoituu alimpaan tasoon, ja aaltojen kasvaessa ylemmät tasot tulevat käyttöön. (Margheritini et al. 2009)

Kuten Wave dragon:ssa myös SSG:ssä käytetään tehonottoon generaattoriin kytkettyjä Kaplan-turbiineja. Veden virtausta turbiinien läpi kontrolloidaan sylinteriluukuilla. Kolmetasoisena, neljällä turbiinilla varustetun SSG-muuntajan odotetaan tuottavan 320 MWh vuodessa nimellisteholla 163 kW. (Margheritini et al. 2009)

3.3 Oskilloiva vesipatsas

Oskilloivaa vesipatsasta hyödyntävät muuntajat, eli OWC-muuntajat (Oscillating Water Column), käyttävät ilmaa muuntoväliaineenaan. OWC-muuntajissa on ilmakammio, jonka toinen pää on yhteydessä meren pintaan ja toinen ilmakehään. Kun aalto kulkee muuntajan ohitse, se pakottaa vesipatsaan liikkumaan ilmakammion sisällä pystysuoraan. Tämä liike saa ilmakammion sisällä olevan ilman tiivistymään kammion tilavuuden pienenessä. Näin syntyy oskilloiva ilmavirta. Ilmavirta ohjataan turbiiniin, joka on yhteydessä generaattoriin. Turbiinin liike saa generaattorin tuottamaan sähköä. Aalto-

jen energia muunnetaan siis ilman paine-energiaksi ja sitä kautta kineettiseksi energiaksi, joka puolestaan muunnetaan sähköenergiaksi. (Zhang et al. 2021) Kuvassa 6 esitetään OWC-muuntajan yleinen toimintaperiaate.



Kuva 6. OWC-muuntajien yleinen toimintaperiaate (Zhang et al. 2021)

Koska näissä muuntajissa ilmavirta, joka aiheuttaa turbiinin liikkeen, on edestakainen, perinteisiä yksisuuntaisia turbiineita ei voida hyödyntää tehonottoon niiden ohjauksen rajoittuvuuden vuoksi. Tämä ongelma korjataan usein itsekorjaavilla tuuliturbiineilla. OWC-muuntajissa käytetään yleisesti kolmea eri turbiinityyppiä tehonottoon: Wells-turbiinia, itsekorjaavaa impulssiturbiinia sekä Denniss–Auld-turbiinia. (Zhang et al. 2021)

Myös OWC-muuntajat voidaan jakaa kelluviin ja kiinteisiin rakennelmiin. Tulevissa alaluissa esitellään ja analysoidaan molempia muuntajatyyppejä.

3.3.1 Mutriku

Espanjan rannikolle rakennettu Mutrikun aaltoenergiamuuntaja otettiin käyttöön vuonna 2011. Mutriku on maailman ensimmäinen aaltoenergiamuuntaja, joka toimii samalla aallonmurtajana suojaten Mutrikun kaupungin satamaa. Mutriku rakennettiin vanhan, kunnan korjaaman aallonmurtajan sisälle. Tämän mahdollisti olemassa olevan infra-

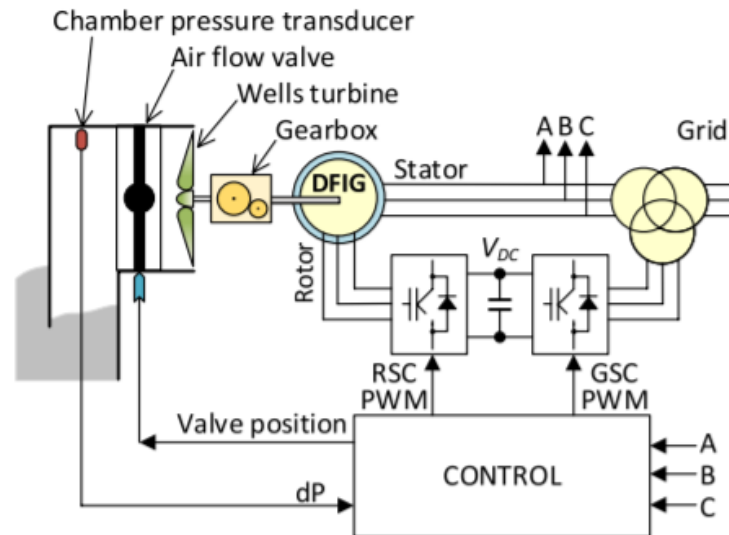
struktuurin, kuten verkkoliitännän ja sisääntuloteiden, hyödyntämisen, mikä puolestaan madalsi rakennuskustannuksia. Mutriku voimalaitos on ollut jatkuvasti toiminnassa sen valmistumisesta lähtien. (Delmonte et al. 2016) Vuonna 2020 Mutriku oli tuottanut toimintansa aikana yhteensä 2 GWh energiaa. (Tethys Mutriku 2020) Kuva 7 on ilmakuva Mutrikusta ja sen yhteydessä olevasta aallonmurtajasta.



Kuva 7. Ilmakuva Mutriku-voimalaitoksesta ja aallonmurtajasta (Verdict Media Limited 2021)

Mutrikussa on 16 yksikamarista OWC-muuntajaa. Jokaisen muuntajan yhteydessä on Wells-turbiini. Jokaisen muuntajan teho on 18,5 kW ja niiden yhteenlaskettu nimellisteho on 296 kW. (Torre-Enciso et al. 2009)

Mutrikussa käytetyt Wells-turbiinit ovat kiinteälapaisia, yksinkertaisia turbiineja. Niiden lavat ovat symmetrisiä, jonka vuoksi turbiini pyörii samaan suuntaan riippumatta ilmavirran suunnasta. Ilmavirran tasasuuntaukseen ei siis tarvita erillistä laitetta. Kyseisten turbiinien toinen hyvä puoli on niiden pieni koko. Mutrikussa käytetyt turbiinit ovat 2,83 m korkeita, suurimmillaan 1,25 m leveitä ja ne painavat noin 1 200 kg. Tämä tekee kokoamis- ja purkutöistä suhteellisen helppoja, sillä turbiineja voidaan liikuttaa vaivattomasti kokonaisina. (Torre-Enciso et al. 2009) Kuvassa 8 on Mutriku yksinkertaisesti järjestelmäkaavio.



Kuva 8. Mutrikun järjestelmäkaavio (Delmonte et al. 2016)

Kuvasta 8 nähdään kaaviomuodossa, miten Mutrikussa aaltojen liike muutetaan sähköverkkoon syötettäväksi energiaksi. Prosessi on melko yksinkertainen ja se pohjautuu turbiinilla tapahtuvaan energiantuotantoon.

3.3.2 OE Buoy

OE Buoy (Ocean Energy Buoy) on Irlannissa kehitetty aaltoenergiamuuntaja, joka niimestään huolimatta käyttää energiantuotantoon OWC-tekniikkaa. Toisin kuin Mutriku, joka on rakennettu lähelle satamaa aallonmurtajan sisään, OE Buoy on avomerelle asennettava muuntaja. (Ocean Energy 2020)

OE Buoy:n rungossa on kammioita, joissa vesi pääsee liikkumaan. Kammiot on rakennettu niin, että veden pinta nousee ja laskee aaltojen ohittaessa muuntajan. Veden liikkeen vuoksi ilmanpaine kammion yläosassa nousee saaden ilman liikkeelle ja kuten muissakin OWC-tekniikkaa hyödyntävissä muuntajissa tämä liike saa turbiinin pyörimään, mikä puolestaan tuottaa energiaa. (Ocean Energy 2020) Kuvassa 9 on OE Buoy, joka ollaan nostamassa veteen. Kuvassa näkyy hyvin vesikammiot, joihin energiantuotanto perustuu.

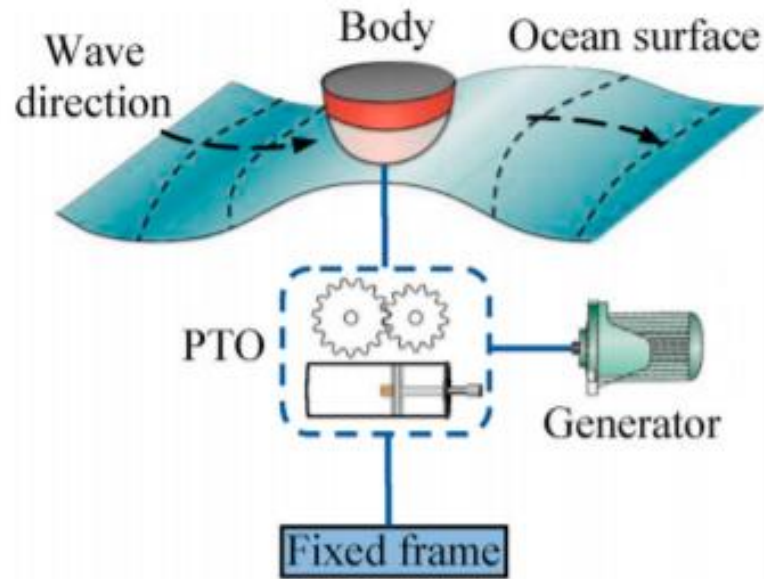


Kuva 9. OE Buoy ylhäällä vedestä (Ocean Energy 2020)

Vuonna 2019 yksi 500 kW:n OE Buoy vietiin Havaijille, jossa sitä testattiin Yhdysvaltojen merivoimien aaltoenergian koeasemalla. Kyseinen muuntaja oli 35 m pitkä ja sen oli tarkoitus kyetä tuottamaan energiaa 500 kotitaloudelle. (Offshore Energy 2019)

3.4 Oskilloivat rungot

Aaltoenergiamuuntajien luokista suurin on oskilloivien runkojen luokka, joka voidaan jakaa edelleen kolmeen eri alaluokkaan: poijuihin, vaimentimiin sekä terminaattoreihin (Xie & Zuo 2013). Yhteistä näille alaluokille on se, että ne kaikki hyödyntävät voimakkaampia aalto-olosuhteita, joita tavataan yleensä yli 40 m syvässä vesissä (Falcao 2010). Näitä muuntajia yhdistää myös se, että ne ottavat energiansa aaltojen aiheuttamasta keinuvasta liikkeestä. Kuvassa 10 on esitetty oskilloivien runkojen yleinen toimintaperiaate.



Kuva 10. Oskilloivan rungon yleinen toimintaperiaate (Zhang et al. 2021)

Oskilloivat rungot voivat olla kuvan 10 kaltaisia kelluvia laitteita, mutta ne voivat olla myös kokonaan vedenalaisia.

Poijut ovat usein vertikaalisen akselinsa suhteen symmetrisiä muuntajia, jotka voivat joko kellua tai olla vedenalaisia. Aallonpituuteen nähden poijut ovat usein verrattain pieniä laitteita, mikä tekee niistä houkuttelevia mallinnuksen ja testauksen suhteen. (Cruz 2008) Yksi poijujen erityispiirre liittyen niiden symmetriaan on kyky absorboida energiaa mistä tahansa suunnasta tulevasta aallosta (Xie & Zuo 2013).

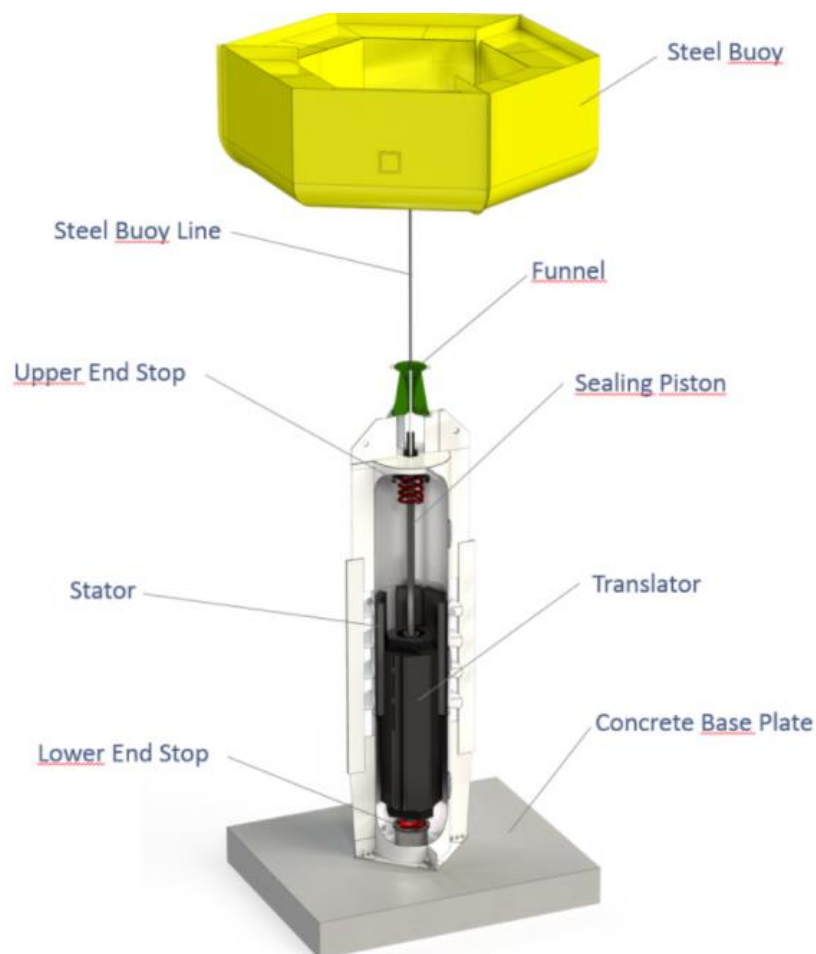
Vaimentimet ja terminaattorit ovat toimintaperiaatteeltaan keskenään samankaltaisempia kuin poijut. Vaimentimet ovat kelluvia rakennelmia, jotka ovat linjassa tulevaan aaltoon nähden. Terminaattorit sen sijaan ovat vedenalaisia rakennelmia, jotka sijoitetaan kohtisuoraan tulevia aaltoja vastaan. (Cruz 2008) Jokaiseen edellä mainittuun muuntajatyypin perehdytään tarkemmin tulevissa alaluvuissa.

3.4.1 Seabased poijut

Seabased on Ruotsalainen aaltoenergiayhtiö, joka on vuodesta 2006 asti testannut täyden mittakaavan muuntajiaan avovesillä. Seabased:lla on ollut projekteja ympäri maailmaa esimerkiksi Norjassa, Ruotsissa sekä Ghanassa (Chatzigiannakou et al. 2017). Viimeisimmän hankkeensa Ruotsalainen yritys julkisti keväällä 2021. Hankkeen tavoitteena on rakentaa Ranskan rannikolle 2 MW:n aaltoenergiapuisto, jonka tehoa on

tarkoitus kasvattaa pilottivaiheen jälkeen 10 MW:iin. 2 MW:n aaltoenergiapuisto koostuu 20 poijusta, joiden nimellisteho on 100 kW. (Offshore Energy 2021) Seabased on testannut poijujaan myös Suomen Ahvenanmaalla. (Seabased 2021)

Seabased aaltoenergiamuuntajat ovat tyypiltään poijuja, jotka toimivat osittain vedenalaisesti. Muuntajat koostuvat veden pinnalla kelluvasta poijusta, joka on kaapelilla kiinnitettyä vedenalaisiin magneetteihin. Tehonottojärjestelmänä muuntajissa on lineaarigeneraattori. Kaapelissa kiinni olevat magneetit liikkuvat staattorin sisällä, kun aallot liikuttavat kaapelin toiseen päähän kiinnitettyä poijua. (Seabased 2021) Tästä liikkeestä syntyy lähdejännite ankkurikäimitykseen, joka aiheuttaa sähkövirran, kun laite on kiinnitettyä kuormaan (Kofoed et al. 2017). Syntynyt sähkövirta ohjataan yhtiön kehittämiin vedenalaisiin sähkökeskuksiin, joissa sähkövirta muunnetaan valtakunnalliseen sähköverkkoon sopivaksi. Seabased:n aaltoenergiamuuntajien kiinnitystä varten ei tarvitse tehdä porauksia, vaan ne pysyvät paikoillaan betonisen pohjalaattansa avulla. (Seabased 2021) Seabased aaltoenergiamuuntajan havainnekuva näkyy kuvassa 11.



Kuva 11. Havainnekuva Seabased aaltoenergiamuuntajan toimintaperiaatteesta (Seabased 2021)

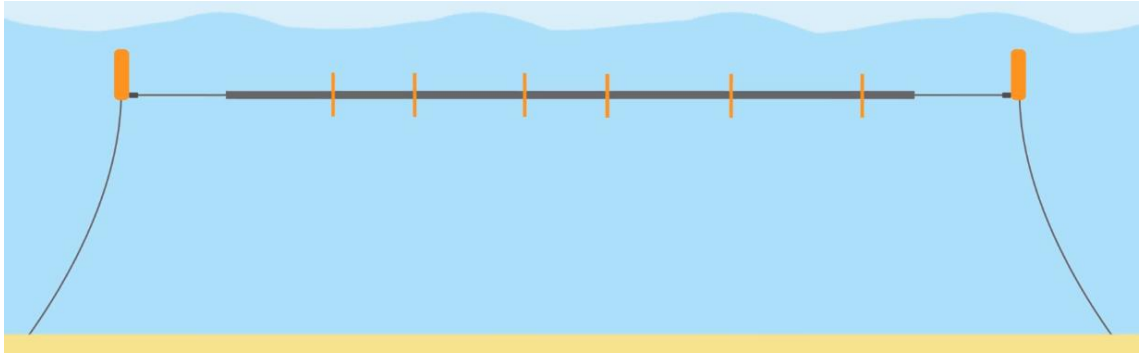
Seabased aaltoenergiamuuntajat toimivat parhaiten keskitason aalto-olosuhteissa. Niitä ei ole suunniteltu rankimpaan merenkäyntiin. (Seabased 2021)

3.4.2 Wavepiston vaimennin

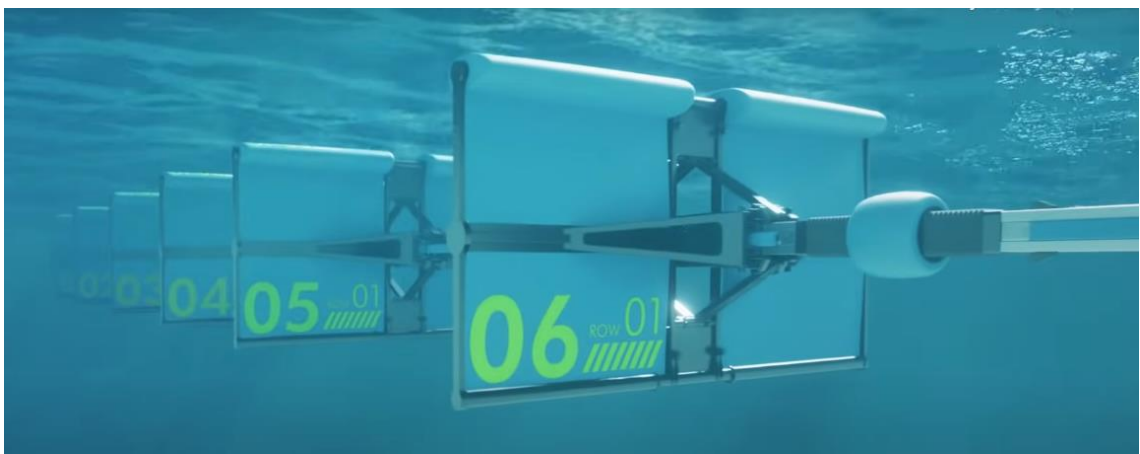
Wavepiston on tanskalaisen samaa nimeä kantavan yrityksen aaltoenergiamuuntaja, jota on kehitetty vuodesta 2006 lähtien. Muuntajan erikoispiirre on sen kyky toimia energiantuotannon ohessa vedenpuhdistajana. Voimalaitoksen yhteyteen voidaan rakentaa suolanpoistosysteemi, joka tekisi muuntajassa käytettävästä merivedestä juomakelpoista. Wavepistonin ensisijaiset markkinat ovatkin juuri alueilla, joilla juomavedestä on pulaa ja energiantuotantoon käytetään pääosin fossiilisia polttoaineita. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi pienet valtamerten asutut tai turistien suosiossa olevat saaret. (Wavepiston 2021)

Wavepiston asennetaan kellumaan lähelle meren pintaa. Lähes koko laite on kuitenkin pinnan alla vähentäen ulkonäköhaittoja merellä. Wavepiston on täysikokoisena noin 200 m pitkä rakennelma, joka kiinnitetään molemmista päistä pohjaan kiinnitetyillä poijuilla. Poijujen väliin jää itse aaltoenergiamuuntaja, joka koostuu 200 m mittaiseen kaapeliin kiinnitetyistä liikkuvista levyistä. Täysikokoisessa muuntajassa kyseisiä levyjä on tarkoitus olla 24. (Wavepiston 2021)

Energiantuotanto muuntajassa tapahtuu levyjen liikkeen avulla. Aallot liikuttavat levyjä edestakaisin. Tämä liike ajaa pumppuja, jotka imevät merivettä sisäänsä ja pumppaavat vettä eteenpäin kaapelin sisällä kulkevassa putkessa. Paineistettu vesi johdetaan putkea pitkin maalle rakennettuun voimalaitokseen, jossa vesi johdetaan generaattoriin kiinnitetyn turbiinin läpi. Turbiinin oheen voidaan rakentaa myös suolanpoistosysteemi, jossa osa vedestä voidaan käyttää juomaveden valmistamiseen. Yhteistuotantoa ei ole pakko käyttää, vaan Wavepistonilla voidaan tuottaa myös pelkästään sähköä tai pelkästään juomavettä. Kuvassa 12 on havainnollistettu Wavepiston-systeemiä. Kuvassa 13 puolestaan on yksityiskohtaisempi havainnekuva Wavepistonin energiaa keräävistä levyistä. (Wavepiston 2021)



Kuva 12. Wavepistonin havainnekuva (Wavepiston 2021)



Kuva 13. Wavepistonin aalloista energiaa keräävät levyt (Wavepiston 2021)

Wavepistonilla on tällä hetkellä kaksi täyden mittakaavan testausprojektia meneillään. Testaukset tehdään noin 11 km Las Palmasin sataman eteläpuolella Kanariansaarilla. Alueen merkitsevä aallonkorkeus on 5,8 m ja korkeimmillaan aallot voivat olla 9,3 m luokkaa. Joustavan muotoilunsa takia Wavepistonin oletetaan kestävän hyvinkin rajuja olosuhteita. (Wavepiston 2021)

Täyden mittakaavan testit tehdään vuosien 2018 ja 2023 välillä muuntajalla, joka on 200 m pitkä ja jonka levyt ovat 8 m leveitä. Näissä olosuhteissa täysikokoisella muuntajalla Wavepiston odottaa 200 kW:n huipputehoa ja 547 MWh:n vuotuista energiantuotantoa. Täyden mittakaavan testien jälkeen Wavepistonin on tarkoitus lähteä toteuttamaan kaupallisia hankkeita. (Wavepiston 2021)

3.4.3 Biowave terminaattori

Biowave on australialaisen Biopower Systems -yhtiön kehittämä terminaattoriksi luokiteltava aaltoenergiamuuntaja. Biowave on verrattain uusi innovaatio. Sen ensimmäiset meritestaukset aloitettiin vasta vuonna 2015 Australian etelärannikolla sijaitsevan Port Fairyn edustalla. (Tethys Biowave 2020)

Biowave on merenpohjaan kiinnitettävä muuntaja, jonka alustasta lähtee kolme sylinterimallista, kelluvaa lapa. Kukin lavoista voidaan täyttää osittain ilmalla ja osittain vedellä. Ilman ja veden suhdetta voidaan säätää vallitseviin aalto-olosuhteisiin sopivaksi, jotta tehonotto olisi mahdollisimman tehokasta. Biowave kaappaa aaltojen energiaa niiden aiheuttamasta aaltoilevasta liikkeestä sekä poikittaisakselin suhteen tapahtuvasta edestakaisesta liikkeestä. (Tethys Biowave 2020) Tehonottoon käytetään O-drive-nimistä energianmuuntoyksikköä, jota voidaan käyttää juuri meriolosuhteissa. O-drive on suunniteltu muuntamaan epäsäännöllinen voimakas liike sähköverkkoon sopivaksi vaihtovirraksi. (Biopower Systems LTD 2020) Biowaven havainnekuva on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Biowave-muuntajan havainnekuva (Biopower Systems LTD 2020)

Kuvassa 14 näkyvät muuntajan lavat voidaan täyttää myös kokonaan vedellä. Tämä on hyödyllistä liian rajujen olosuhteiden aikana. Täyttämällä lavat vedellä ne painuvat poh-

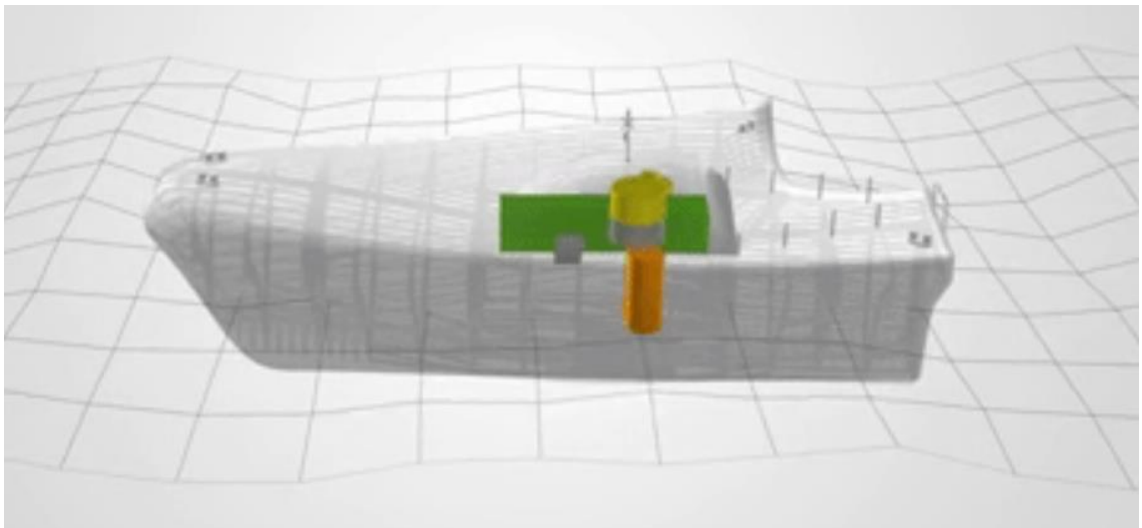
jaan ja ovat suojattuna kovilta myrskyiltä, jotka voisivat mahdollisesti aiheuttaa muuntajalle vahinkoa. (Tethys Biowave 2020)

Port Fairy'n edustalle sijoitettu pilottiprojekti käytti 250 kW:n muuntajaa. Muuntaja oli 26 m syvyisessä vedessä. Pilottiprojektin aikana sattui useampi vikatilanne, joista viimeisin oli muuntajassa tapahtunut sähkövika. Vika vahingoitti joitain O-driven komponentteja, ja lopulta viimeisimmän vian korjaamiseen ei enää saatu rahoitusta. Biowaven pilottiprojekti on tällä hetkellä käytöstäpoistovaiheessa. (Tethys Biowave 2020)

3.5 Muut aaltoenergiamuuntajat

Suuri osa aaltoenergiamuuntajista kuuluu johonkin kolmesta edellä esitellystä kategoriasta. On kuitenkin monia muuntajia, joita ei voi luokitella varsinaisesti yhteenkään niistä. Yksi tällainen muuntaja on esimerkiksi suomalaisen Wello Oy:n kehittämä Pingviini (englanniksi Penguin) kutsuttu aaltoenergiamuuntaja.

Pingviinin energiantuotanto perustuu pyörimisliikkeeseen. Muuntajan sisällä on suuri massa, joka pyörii aaltojen aiheuttaman liikkeen vuoksi. Pingviinin runko on epäsymmetrinen. Epäsymmetrisyyden tarkoituksena on mahdollistaa energian kaappaaminen aalloista laitteen jokaiselta sivulta. Aaltojen liikuttaessa Pingviinin runkoa massa Pingviinin sisällä alkaa pyöriä Pingviinin keskiakselin ympäri. Tehonottojärjestelmä on kiinnitettynä suoraan sisällä liikkuvaan massaan, niinpä aina sen liikkuessa pystytään tuottamaan energiaa. Pingviinin havainnekuva on esitetty kuvassa 15. (Wello Oy 2021)



Kuva 15. *Pingviini, havainnekuva (Wello Oy 2021)*

Kuvassa 15 oranssiksi värjätty osa on Pingviinin sisällä pyörivä massa. Kuvasta voi myös nähdä Pingviinin rungon muodon.

Pingviini-muuntajia tuotetaan tällä hetkellä useammassa eri koossa, joiden rungon pituus vaihtelee 30–56 m välillä. Muuntajien nimellisteho vaihtelee koosta riippuen 0,5–1 MW:n välillä. Kuvassa 16 on kaupallinen, 44 m pitkä Pingviini-muuntaja. (Wello Oy 2021)



Kuva 16. Wello Oy:n Pingviini aaltoenergiamuuntaja (Wello Oy 2021)

Kuvassa 16 oleva muuntaja on 44 m pitkä, mutta Pingviinin koko suhteutetaan aina vallitseviin aalto-olosuhteisiin. (Wello Oy 2021)

3.6 Aaltoenergiamuuntajien vertailu

Edellä on esitelty joitain aaltoenergiamuuntajia jokaisesta IEA:n käyttämästä aaltoenergiamuuntajaluokasta. Muuntajia on vaikea laittaa absoluuttiseen paremmuusjärjestykseen, mutta tässä luvussa pyritään vertailemaan muuntajia keskenään ja osoittamaan lukijalle kunkin laitteen vahvuudet ja heikkoudet. Kofoed et al. (2017) listaavat kirjassaan aaltoenergiamuuntajille keskeisimmät ominaispiirteet. Näihin piirteisiin kuuluu selviytymiskyky, luotettavuus ja huollettavuus, suorituskyky, skaalautuvuus sekä ympäristölliset edut. Tässä luvussa keskitytään pääasiassa neljään ensimmäiseen piirteeseen. Ympäristöystävällisyys ja taloudellinen kannattavuus jätetään huomiotta, jotta aiheen rajaus pysyy selkeänä.

Selviytymiskyvyllä Kofoed et al. 2017 tarkoittavat muuntajan ankkuroinnin luotettavuutta sekä muuntajan turvallisuusjärjestelmää. Ankkurointia voidaan tarkastella kelluvien

aaltoenergiamuuntajien tapauksissa. Kiinteät muuntajat kuten Mutriku ja SSG jätetään huomiotta ankkurointeja vertailtaessa.

Ankkurointimetodit voidaan jakaa yksinkertaisimmillaan kahteen eri kategoriaan. On monipisteankkurointeja sekä yksipisteankkurointeja. Monipisteankkuroinnissa useat kiinnitysvaijerit ovat suoraan kiinni muuntajassa, ja yksipisteankkuroinnissa kiinnitysvaijereita on nimen mukaisesti yksi. Yksipisteankkurointi antaa muuntajalle enemmän tilaa liikkua, mikä voi olla hyödyllistä muuntajan tehonottotavasta riippuen. Aaltoenergiamuuntajan toiminnan kannalta ankkurointimetodit voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Passiivinen ankkurointi on suunniteltu vain pitämään muuntaja paikallaan. Aktiivisen ankkuroinnin tarkoituksena on parantaa muuntajan tehonottoa, ja reaktiivisessa ankkuroinnissa ankkurointisysteemi on olennainen osa tehonottosysteemiä. (Xu et al. 2019) Esimerkiksi Seabased:n poijuissa on reaktiivinen ankkurointi.

Ankkuroinnin suunnittelussa pitää kiinnityslinjojen määrän lisäksi ottaa huomioon myös ankkuroinnin materiaali. Aaltoenergiamuuntajien ankkuroinnissa käytetään yleisimmin ketjuja ja synteettisiä köysiä. Molemmilla materiaaleilla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Pääosin ketjuista koostuvat ketjulinjat mahdollistavat raskaan rakenteensa takia linjan kiinnityskohtaan mahdollisimman pienen vetokulman. Tämä nostaa ankkuroinnin kestävyyttä rankoissakin olosuhteissa. Tämän lisäksi ketjuja käytetään niiden hyvien kulumista vastustavien ominaisuuksien vuoksi. Tämän takia ketjuja käytetäänkin usein ankkuroinnin merenpohjaa koskettavalla osuudella, vaikka kiinnityslinjat olisivat muilta osin eri materiaalia. (Xu et al. 2019)

Synteettiset köydet toimivat erityisen hyvin pingottuneissa ankkuroinneissa niiden suhteellisen hyvän joustavuuden takia. Lisäksi joustavat synteettiset köydet vähentävät kiinnityksien huippukuormitusta, omaavat hyvät jännityksen aiheuttamaa väsymystä ehkäisevät ominaisuudet sekä kärsivät vähemmän korroosion aiheuttamista ongelmista kuin ketjulinjat (Weller et al. 2015). Yksi synteettisten köysien suurimmista hyödyistä lienee olevan niiden matala hinta verrattuna ankkurointiin käytettävien ketjujen hintaan. Vuonna 2014 Thomsen et al. (2016) Xu et al. (2019) mukaan arvioivat ketjun ja synteettisten köysien hinnoiksi tässä järjestyksessä 4140 €/t ja 161 €/t. Synteettinen köysi on huomattavasti kustannustehokkaampaa varsinkin, kun otetaan huomioon, että ketjulinjojen vaatimat löysät ankkurointilinjat ovat usein huomattavasti pidempiä kuin synteettisiä köysiä käyttävien pingottuneiden ankkurointien linjat.

Luotettavuudella ja huollettavuudella Kofoed et al. (2017) tarkoittavat sitä, että aaltoenergiamuuntajan keskeisimpiä osia olisi helppo päästä huoltamaan ja tarkastamaan. Kirjassaan he katsovat eduksi mahdollisuuden huoltaa muuntajaa sen varsina-

sessä sijainnissa ilman, että muuntajaa tarvitsee siirtää sen toimintapaikasta satamaan.

Tässä kandidaatintyössä esiteltyt muuntajat voidaan sijainnin perusteella jakaa avomerimuuntajiin ja rannikon lähellä toimiviin muuntajiin. Kahdeksasta muuntajasta vain SSG ja Mutriku ovat rannikon lähistölle asennettavia muuntajia. Niistä kumpikin voidaan integroida aallonmurtajaan. Niiden lisäksi Biowave toimii verrattain matalissa vesissä (testi Port Fairyn edustalla tapahtui 26 m syvyydessä), ja Pingviini voidaan käyttöpaikasta riippuen sijoittaa joko rannikon läheisyyteen tai avomerelle. Muut työssä esiteltyt muuntajat ovat avomerellä toimivia muuntajia.

Avomerellä sijaitsevat muuntajat ovat huollettavuuden kannalta lähtökohtaisesti huonompia kuin rannikon lähellä toimivat muuntajat. Eroja kuitenkin syntyy muidenkin seikkojen takia. Esimerkiksi Wave Dragon on avomerimuuntaja, mutta siinä on vain yksi liikkuva osa (turbiinit) ja se kelluu veden päällä, mikä tekee siitä helposti huollettavan ja ennen kaikkea kestävän. Biowave sen sijaan voi olla haastava huollettava, sillä se toimii kokonaan veden alla ja on kiinnitetty merenpohjaan. Kaiken huoltotyön tulee siis tapahtua vedenalaisesti, mikäli muuntajaa ei haluta tuoda satamaan asti korjattavaksi. Tämä aiheuttaa lisäkustannuksia ja tekee huoltamisesta haastavaa.

Aaltoenergiamuuntajan suorituskyvyllä Kofoed et al. 2017 tarkoittavat yksinkertaisesti muuntajan tehonoton toimivuutta sekä muuntajan hyötysuhdetta. Liian pienillä hyötysuhteilla muuntajan aalto-sähkö-muuntoketjussa häviää liikaa energiaa ja muuntajan kannattavuus laskee. Tätä osa-aluetta on muuntajakohtaisesti hieman hankala tarkastella, sillä kaikki valmistajat eivät halua ilmoittaa tarkkoja lukemia muuntajiensa hyötysuhteelle. Tässä kohdassa voidaan kuitenkin tarkastella muuntajien nimellistehoja.

Esitellyistä muuntajista Wave Dragon on ilmoittanut kaikista suurimman nimellistehon. Nimellistehoksi on ilmoitettu 1,5–12 MW riippuen laitteen koosta. Suomen nimellisteholtaan suurimmat tuulivoimalat ovat vuonna 2014 Varsinais-Suomeen rakennetut 5 MW:n tuulivoimalat (Suomen Tuulivoimayhdistys 2021). Wave Dragonin yli 1 MW:n nimellisteho alkaa siis olemaan jo kaupallisesti merkittävää. Myös suomalaisen Wello Oy:n Pingviini-muuntajan nimellistehon on kerrottu olevan korkeimmillaan 1 MW. Pingviinin etu Wave Dragoniin verrattuna on sen pieni koko. Muut työssä esiteltyt muuntajat liikkuvat nimellisteholtaan muutamien satojen kW:n luokassa. On kuitenkin hyvä muistaa, että verrattuna esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimaan aaltoenergia on vielä melko uusi energiantuotantomuoto ja sillä ei ole ollut yhtä kauan aikaa kehittyä. Tutkimuksen ja kehitystyön edetessä aaltoenergiamuuntajat saavuttavat luultavasti suurempia nimellistehoja.

Viimeisenä vertailukohteena on aaltoenergiamuuntajien skaalautuvuus. Kofoed et al. 2017 kertovat kirjassaan, että suurin osa aaltoenergiamuuntajista saavuttavat optimaaliset mittansa liian pieninä. Täysimittaisen muuntajan pitäisi olla nimellisteholtaan muutamana MW:n luokkaa ollakseen taloudellisesti kannattava. Kofoed et al. 2017 mukaan suurin osa muuntajista kuitenkin toimii parhaiten ollessaan kW:n luokassa. Skaalautuvuudella on tarkoitus parantaa aaltoenergiamuuntajan LCOE-kustannuksia (levelized cost of energy), eli voimalan elinkaaren aikana tulleiden kustannuksien suhdetta saatuun energiamäärään. LCOE ilmoitetaan usein €/kWh ja sen tarkoituksena on toimia indikaattorina sijoittajalle sijoituksen kannattavuudesta. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2021)

Työssä esitellyistä muuntajista, OE Buoyta ja Biowaven terminaattoria lukuun ottamatta, kaikilla on täysikokoinen prototyyppi. Täydestä mittakaavasta huolimatta vain Wave dragon on saavuttanut selkeästi yli 1 MW:n nimellistehon. Tämä osoittaa, että haastaviin meriolosuhteisiin ei ole helppo suunnitella ja rakentaa suuren mittakaavan aaltoenergiamuuntajaa nykyisellä teknologialla. Alla olevassa taulukossa on esitetty työssä käsiteltävien aaltoenergiamuuntajien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Työssä esiteltujen aaltoenergiamuuntajien ominaisuuksia

Muuntaja	Ankkurointi	Sijainti	Koko	Nimellisteho [MW]
Wave dragon	Passiivinen monipisteankkurointi	Avomeri, kelluva	Täysikokoinen	1,5–12
SSG	Kiinteä	Rannikko, kiinteä	Täysikokoinen	0,163
Mutriku	Kiinteä	Rannikko, kiinteä	Täysikokoinen	0,296
OE Buoy	Passiivinen monipisteankkurointi	Avomeri, kelluva	1:4	0,5
Seabased	Kiinteä/reaktiivinen yksipisteankkurointi	Avomeri, vedenalainen	Täysikokoinen	0,1
Wavepiston	Passiivinen monipisteankkurointi	Avomeri, vedenalainen	Täysikokoinen	0,2
Biowave	Kiinteä	Avomeri, vedenalainen	Ei tietoa	0,25
Pingviini	Passiivinen monipisteankkurointi	Avomeri, kelluva	Täysikokoinen	0,5–1

Ankkuroinnin puolesta aaltoenergiamuuntajat eivät juuri eroa. Vain Seabased poijuilla on reaktiivinen ankkurointi, kun taas muut muuntajat ovat joko kiinteitä rakennelmia tai passiivisen monipisteankkuroinnin varassa. Sijainnin puolesta Mutrikun ja SSG:n voidaan sanoa olevan optimaalisimpia, sillä niiden huoltaminen on avomerimuuntajia helpompaa. Avomerimuuntajista kelluvat ovat samasta syystä huollon kannalta parempia,

kuin avomerellä sijaitsevat vedenalaiset muuntajat. Nimellistehonsa puolesta selkeästi onnistunein muuntaja on Wave dragon, jonka nimellisteho kykenee kilpailemaan tämän hetken suurimpien tuulivoimaloiden kanssa. SSG:n nimellisteho on kuitenkin muuntajien pienimmästä päästä, joten ei voida sanoa potentiaalienergiaa hyödyntävien muuntajien olevan teknologialtaan parempia muihin muuntajiin verrattuna. Yksittäiset muuntajat mistä tahansa kategoriasta voivat saavuttaa hyviä tuloksia. Kuitenkin esimerkiksi Zhang et al. (2021) mukaan kokonaissuorituskyvyltään yleisesti parhaita muuntajia ovat terminaattori- ja poijutyypiset muuntajat.

4. AALTOENERGIAN HAASTEET JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Edellisissä luvuissa on käsitelty teoriaa aaltoenergian taustalla sekä tutustuttu erilaisiin aaltoenergiamuuntajiin ja arvioitu, mitkä ovat tällä hetkellä potentiaalisimmat tavat tuottaa aaltoenergiaa. Tässä luvussa on puolestaan tarkoitus käsitellä aaltoenergian suurimpia tämänhetkisiä haasteita ja tehdä katsaus aaltoenergian tulevaisuuteen.

4.1 Aaltoenergian haasteet

Aaltoenergiasektorin kehityksestä huolimatta aaltoenergia kaupallisen mittaluokan energiantuotantomuotona kohtaa edelleen haasteita, joiden yli olisi päästävä, jotta se olisi kilpailukykyistä muiden uusiutuvien energioiden kanssa.

Aalto-olosuhteita kyetään ennustamaan ja laskemaan tiettyyn pisteeseen saakka mittauksien, vedensyvyyden, merivirtojen suunnan ja nopeuden sekä tuulen suunnan ja nopeuden perusteella. Aina näitä tietoja ei kuitenkaan ole saatavilla, jolloin on tehtävä karakterisointi tietyn paikan tai alueen aalto-olosuhteista. Muuntajan sijoituspaikasta olisi hyvä tietää mahdollisimman paljon, jotta muuntaja kyetään suunnittelemaan vallitseviin aalto-olosuhteisiin sopivaksi. Tiedot auttavat myös mahdollisen kaapattavan tehon laskennassa. Aaltoenergiasektori on tällä hetkellä tilanteessa, jossa muuntajat ovat keskenään niin erilaisia, että jokainen niistä pitäisi testata erikseen samoissa olosuhteissa, jotta kyseisiin olosuhteisiin löydettäisiin paras muuntajatyyppejä. Olosuhteiden suuren kirjon vuoksi aaltoenergiaa ei ole saatu standardoitua eikä välttämättä kyetä tulevaisuudessakaan standardoimaan samalla tavalla kuten esimerkiksi tuulivoimaa. (Kofod et al. 2017, s. 60–62)

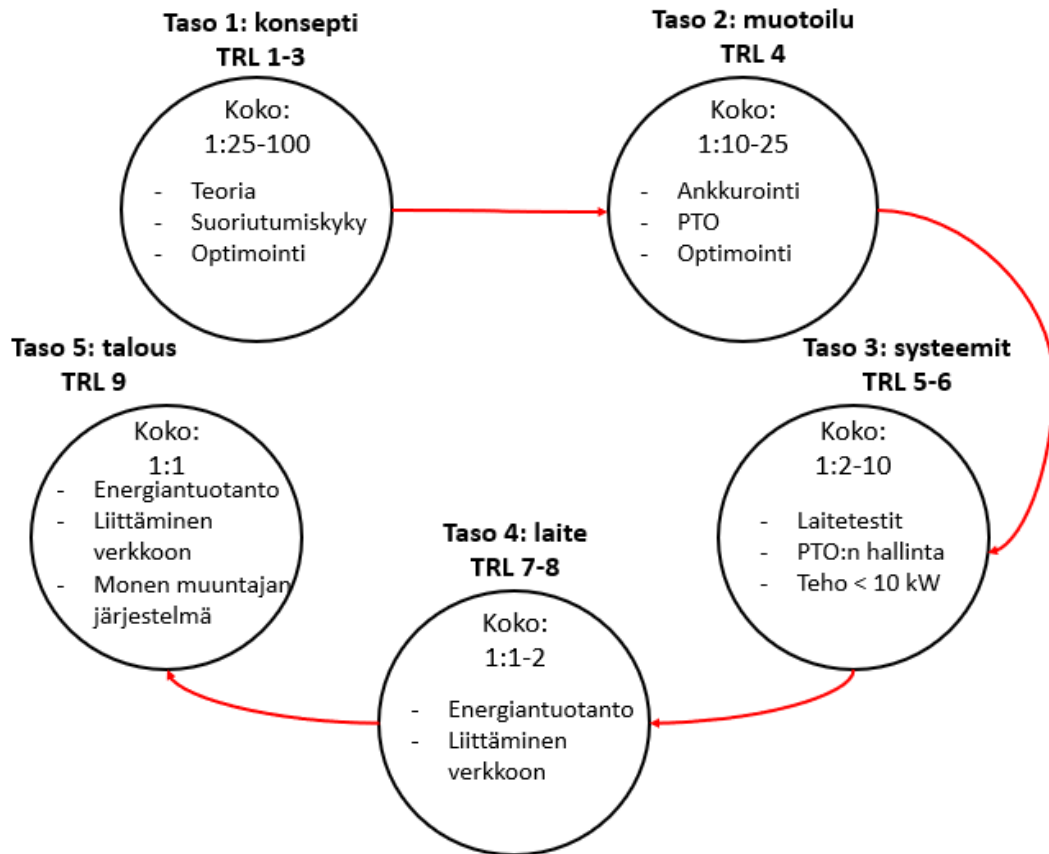
Vaihteleviin olosuhteisiin liittyy muitakin ongelmia. Aaltojen muuntajiin ja niiden ankkurointiin kohdistama voima ja meriveden suolaisuus kuluttavat muuntajan osia nopeammin kuin esimerkiksi tuuli tai aurinko kuluttaa niitä energiantuotannossaan käyttäviä voimaloita. Kulumisen ja mahdollisten rikkoutumisien myötä muuntajia pitäisi päästä huoltamaan helposti, mutta olosuhteet tekevät tästäkin haastavaa etenkin avomerelle sijoitettujen aaltoenergiamuuntajien kohdalla.

Vaikeiden olosuhteiden lisäksi aaltoenergiamuuntajien skaalautuvuus on yksi isoista ongelmista. Jotta energiantuotantokustannuksia saataisiin ajettua kestäväälle ja kilpailu-

kykyiselle tasolle, yhden aaltoenergiamuuntajan pitäisi olla teholtaan useamman megawatin luokkaa (> 5MW). Tällä hetkellä suurin osa muuntajista saavuttaa optimaalisen kokonsa huomattavasti aikaisemmin ja tehot liikkuvat kilowateissa, eli liian matalalla kaupalliseen käyttöön. Skaalautuvuuden ongelma ei varsinaisesti poistu, vaikka samaan paikkaan asennettaisiin useampi muuntaja, koska laitteiden määrän kasvaessa myös infrastruktuuri- ja teknologiakustannukset nousevat. Tämän seurauksena energiantuotannon hinta ei juurikaan laske, vaikka tehoa saadaankin kerralla enemmän. (Koofoed et al. 2017, s. 6) Tehokkainta olisi siis kehittää tarpeeksi suuria aaltoenergiamuuntajia, jotka kykenisivät toimimaan itsenäisinä voimaloina.

Tekniset haasteet ovat tiettyyn pisteeseen asti ratkaistavissa, mutta aaltoenergiamuuntajien suurimmat ongelmat eivät liity tekniseen puoleen vaan rahoitukseen. Muuntajien kehittäminen on kallista. Useimmat yhtiöt aloittavat kehitysprosessin rakentamalla laboratoriomalleja muuntajasta ja onnistuneiden kokeiden jälkeen siirtyvät suuremman prototyypin testaukseen aaltoaltaassa. Haasteet tulevat vastaan siinä kohtaa, kun muuntajan prototyyppijä aletaan testaamaan merellä oikeissa olosuhteissa. Sisätiloissa ei voida mitenkään altistaa muuntajaa todellisille olosuhteille ja muuntajan rikkoutuminen merellä hyvistä alustavista testituloksista huolimatta ei ole tavatonta. (Aderinto & Li 2018)

Meritestaukset ovat usein pitkiä prosesseja ja hyvistä tuloksista huolimatta ei ole taatua, että rahoitus riittää tuomaan muuntajaa kaupallisille markkinoille saakka. Aaltoenergiamuuntajien suunnittelusta voidaan käyttää kuvan 17 mukaista 5-tasoista luokittelua.



Kuva 17. Aaltoenergiamuuntajan kehityksen vaiheet (Muokattu lähteestä Kofoed et al. 2017)

Kuvassa 17 TRL on Technology Readiness Level, joka kuvaa kehitteillä olevan teknologian valmiutta. Kofoed et al. 2017 mukaan vain harva muuntaja pääsee kehityksen tasolle 5, jossa TRL on 9 ja kaupallinen toiminta voi alkaa. Tavoitteen haastavuudesta kertoo se, että Terrero Gonzales et al. (2021) listaavat artikkelissaan EU:n sisältä 95 eri aaltoenergiamuuntajaa, joista vain 3 on kaupallistettu ja suurin osa listatuista muuntajista on tutkimus-/kehitysvaiheessa tai poistettu käytöstä.

4.2 Aaltoenergia tulevaisuudessa

Aaltoenergiasektorin voidaan sanoa olevan vielä kehitysvaiheessa. Tuotantomuodon saavuttaessa suurimman potentiaalinsa sen on kuitenkin arvioitu pystyvän hyödyntämään 10–25 % maapallon 2 terawatin suuruudesta aaltoenergiavarastosta (Cruz 2008). Kuten aikaisemmin jo mainittiin, kaupallisessa käytössä olevia aaltoenergiamuuntajia on kuitenkin vielä erittäin vähän, eikä mahdollista potentiaalia ole kyetty vielä valjastamaan.

Alan haasteellisuudesta kertoo se, että vuonna 2011 merivoiman asennuskapasiteetti oli 503 MW ja vuonna 2020 kapasiteettia oli 527 MW (tähän lukuun sisältyy muutkin merivoimaa hyödyntävät tuotantomuodot, kuten vuorovesienergia). Viimeisen vuosikymmenen aikana asennettua kapasiteettia on tullut siis vain 24 MW lisää, kun taas esimerkiksi tuulivoiman kapasiteetti on samana aikana kasvanut noin 500 000 MW:lla. (IRENA 2021) Haastavan luonteensa takia aaltoenergiasektori on jäänyt kehityksessä jälkeen yleisimmille uusiutuvan energian muodoille.

Haasteista huolimatta aaltoenergian määrä maapallolla tulee mitä todennäköisimmin kasvamaan tulevaisuudessa. Vuonna 2021 EU jatkoi Horizon 2020 rahoitusohjelmansa uudella Horizon Europe ohjelmalla. Ohjelman budjetti on 95,5 miljardia euroa vuosille 2021–2027. Horizon European tarkoituksena on rahoittaa tutkimusta ja innovaatiota, joka tukee YK:n kestävän kehityksen tavoitteita sekä EU:n kilpailukykyä. Aaltoenergia on sopiva Horizon European rahoituskohde. (European Commission 2021) Samana vuonna Yhdysvaltojen DOE (Department of Energy) ilmoitti laittavansa 27 miljoonaa dollaria aaltoenergiainkkehiden rahoitukseen. Rahoituksen tavoitteena on edistää teknologioiden kehitystä. (U.S. DOE 2021)

Yksi tulevaisuuden mahdollisuus aaltoenergialle olisi käyttää sitä yhdessä merituulivoiman kanssa. Esimerkiksi ruotsalainen Seabased esittää mahdollisuuden käyttää aaltoenergiapoijujaan yhdessä merituulivoimaloiden kanssa. Yhtiön mukaan kyseisten energiantuotantomuotojen yhdistäminen voisi olla suotuisaa, sillä yhteistuotannossa energiansaanti olisi jatkuvampaa. (Seabased 2021) Aallot eivät menetä juurikaan energiaa edetessään, joten vähäisen tuulen periodeja voitaisiin tasoittaa aaltoenergialla. Yhdistetyissä aalto - tuuli -voimaloissa voitaisiin myös hyödyntää yhteistä infrastruktuuria (kuten merenalaisia kaapeleita) sekä yhteistä luvanmyöntämisprosessia, jotta lupaa ei tarvitsisi hakea erikseen sekä aalto- että tuulivoimalalle. (Seabased 2021) Mihin aaltoenergiaa sitten tulevaisuudessa käytetäänkään, todennäköistä on se, että aaltoenergiateknologioiden rahoituksen jatkaminen mahdollistaa tulevaisuudessa aaltoenergian käytön laajemmassa, kaupallisessa mittakaavassa. Tarve päästä eroon fossiilisista polttoaineista ja meren aaltojen suuret ja jatkuvat energiavarastot puoltavat aaltoenergian menestystä tulevaisuudessa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on esitelty teoriaa aaltojen muodostumisen taustalla, sekä aaltojen sisältämän energian laskentaa. Tämä on ollut pohjana aaltoenergiamuuntajien, ja etenkin niiden tehonottosysteemien, esittelyyn. Aaltoenergian tuotanto perustuu siis siihen, että aaltoenergiamuuntajiksi kutsutut laitteet kaappaavat aaltojen energiaa, ja muuntavat sen hyödynnettävään muotoon. Muunnosprosessia varten aaltoenergiamuuntajissa on erilaisia tehonottosysteemeitä.

Aaltoenergiamuuntajat voidaan jakaa kolmeen eri toiminnalliseen komponenttiin. Komponentit ovat muuntajan runko/fyysinen rakenne, muuntajan perustus ja muuntajan tehonottosysteemi. Tässä työssä keskityttiin nimenomaan muuntajan tehonottosysteemien tarkasteluun, ja siksi muuntajat jaettiin luokkiin tehonottosysteemin perusteella. Tehonottosysteemit voidaan jakaa yleisesti kolmeen luokkaan. Ensimmäinen luokka on potentiaalienergiaa hyödyntävät muuntajat, joiden toiminta perustuu aaltojen ohjaamiseen jonkinlaiseen varastoaltaaseen, josta ne ohjataan takasin mereen esimerkiksi turbiinin kautta. Potentiaalienergiaa hyödyntävät muuntajat muistuttavat toiminnaltaan eniten perinteistä vesivoimaa. Toinen tehonoton luokka on oskilloivan vesipatsaan luokka. Tämän luokan muuntajat hyödyntävät energiantuotannossaan aaltojen ilmaan aiheuttamaa edestakaista liikettä. Aaltoenergiamuuntajat ilmakammioissa ilman edestakainen liike pyörittää turbiinia tuottaen energiaa. Kolmas luokka on oskilloivien runkojen luokka, joka voidaan edelleen jakaa poijuihin, vaimentimiin ja terminaattoreihin. Tämä on kaikista suurin aaltoenergiamuuntajien luokka. Tämän luokan muuntajat hyödyntävät energiantuotannossa suoraan aaltojen liikettä.

Aaltoenergiamuuntajan hyvyyteen vaikuttavat sen selviytymiskyky, huollettavuus, suorituskyky ja skaalautuvuus. Työssä arvioitiin esiteltyjä muuntajia juuri näiden parametrien suhteen. Joidenkin ominaisuuksien, kuten selviytymiskyvyn ja suorituskyvyn, arviointi oli haastavaa, sillä tarkkaa tietoa näistä parametreista ei ollut kaikille muuntajille saatavissa. Aaltoenergia on energiantuotantomuotona varsin uusi, ja siksi alan tämänhetkistä innovaatioista ei välttämättä ole tarkkaa teknistä tietoa saatavilla.

Vertailua tehdessä selvää oli kuitenkin se, että aaltoenergian suurin tämänhetkinen ongelma on nimenomaan suorituskyvyssä ja skaalautuvuudessa. Tällä hetkellä suuri osa aaltoenergiamuuntajista ovat liian tehottomia. Monien muuntajien nimellisteho liikkuu

joidenkin satojen kW:n suuruusluokassa, kun taloudellisen kannattavuuden kannalta olisi tärkeää, että nimellistehot nousisivat MW:n luokkaan.

Toistaiseksi aaltoenergia on vielä melko kallis energiantuotantomuoto. Ala on vielä niin uusi, että tutkimukseen ja kehitykseen pitää käyttää huomattavia summia rahaa, mikä kasvattaa aaltoenergiamuuntajien LCOE-kustannuksia. Alan kehittyminen vaatisikin rahallista tukea valtioiden ja esimerkiksi EU:n tasolta. Tarve tuottaa energiaa uusiutuvien keinoin ja aaltoenergian suuri potentiaali johtaa kuitenkin todennäköisesti aaltoenergia-sektorin kehitykseen myös tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- ADERINTO, T. & LI, H., (2018). Ocean Wave energy converters: Status and challenges. *Energies*, Vol.11(5), 1250.
- BIOPOWER SYSTEMS LTD (2020). [Viitattu: 25.7.2021] Saatavissa: <https://bps.energy/>
- BP (2020). Statistical Review of World Energy 2020. [Viitattu 24.6.2021] Saatavissa: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- CHATZIGIANNAKOU, M.A., DOLGUNTSEVA, I. & LEIJON, M., (2017). Offshore deployments of wave energy converters by seabased industry AB. *Journal of marine science and engineering*, Vol.5(2), 15.
- CRUZ, J., (2008). *Ocean wave energy: current status and future prepectives [i.e. perspectives]*. Springer.
- EUROPEAN COMMISSION (2021). Home, Research and Innovation, Funding, Funding Opportunities, Funding Programmes and Open Calls, Horizon Europe. [Viitattu: 2.8.2021] Saatavilla: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
- FALCÃO, A.F.O., (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14(3), pp. 899-918.
- FALCÃO, A.F.O. & HENRIQUES, J.C.C., (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, Vol.85, pp. 1391-1424.
- FALNES, J., (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, Vol.20(4), pp. 185-201.
- GUNN, K. and STOCK-WILLIAMS, C., 2012. Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, Vol.44, pp. 296-304.
- HANDOKO, C.R. & MUKHTASOR, (2021). The development of power take-off technology in wave energy converter systems: A Review. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, Vol.739(1).
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021). World electricity final consumption by sector, 1974-2019. [Viitattu 23.8.2021] Saatavissa: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2019>
- IRENA (2014). Wave Energy Technology Brief. [Viitattu:] Saatavissa: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Wave-Energy_V4_web.pdf
- IRENA (2021). Renewable Energy Statistics 2021. [Viitattu: 4.8.2021] Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>

KOFOED, J.P., FRIGAARD, P., KNAPP, W. & FRIIS-MADSEN, E., (2005). Description of the Power Take-off System on board the Wave Dragon Prototype. Proceedings of the Second CA-OE Workshop: Component Technology and Power Take-Off, Aalborg University.

KOFOED, J.P., FRIGAARD, P., FRIIS-MADSEN, E. & SØRENSEN, H.C., (2006). Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable Energy*, Vol.31(2), pp. 181-189.

KOFOED, J.P. & PECHER, A., (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. 1 edn. Cham: Springer International Publishing.

MARGHERITINI, L., VICINANZA, D. & FRIGAARD, P., (2009). SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renewable Energy*, Vol.34(5), pp. 1371-1380.

MASSEL, S.R., (2013). *Ocean surface waves their physics and prediction*. 2 edn. Hackensack] N.J: World Scientific.

OCEAN ENERGY (2020). [Viitattu: 28.7.2021] Saatavissa: <https://oceanenergy.ie/>

OFFSHORE ENERGY (2019). [Viitattu: 28.7.2021] Saatavissa: <https://www.offshore-energy.biz/oe-buoy-arrives-in-hawaii/>

OFFSHORE ENERGY (2021). Seabased to build utility-scale wave energy park in France. [Viitattu: 22.7.2021] Saatavilla: <https://www.offshore-energy.biz/seabased-to-build-utility-scale-wave-energy-park-in-france/>

SEABASED (2021). [Viitattu: 13.8.2021] Saatavissa: <https://seabased.com/>

SUOMEN TUULIVOIMAYHDISTYS (2021). [Viitattu: 12.10.2021] Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/>

TERRERO GONZÁLEZ, A., DUNNING, P., HOWARD, I., MCKEE, K. & WIERGROCH, M., (2021). Is wave energy untapped potential? *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.205, 106544.

TETHYS BIOWAVE (2020). Home, Content; OES-Environmental Metadata, BioWave Port Fairy Pilot Wave Energy Project. [Viitattu: 20.7.2021] Saatavissa: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/biowave-port-fairy-pilot-wave-energy-project>

TETHYS MUTRIKU (2020). Home, Content, OES-Environmental Metadata, Mutriku Wave Power Plant. [Viitattu: 8.7.2021] Saatavissa: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/mutriku-wave-power-plant>

TETHYS WAVE DRAGON (2021). Home, Content, OES-Environmental Metadata, Wave Dragon Project - Milla Fjord Site. [Viitattu: 23.7.2021] Saatavissa: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/wave-dragon-project-milla-fjord-site>

UNITED NATIONS (2019). Total Population by sex. [Viitattu: 24.6.2021] Saatavissa: <https://population.un.org/wpp/DataQuery/>

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (2021). Advancing wave energy technologies through open water testing at Pacwave. [Viitattu: 13.8.2021] Saatavilla: <https://eere-exchange.energy.gov/Default.aspx#Foaldfce24ff4-aa78-4591-a187-7e7ab6abc7ae>

VERDICT MEDIA LIMITED (2021). Power Technology, Mutriku Wave Energy Plant. [Viitattu 8.7.2021] Saatavissa: <https://www.power-technology.com/projects/mutriku-wave/>

WAVE DRAGON (2017). [Viitattu: 23.7.2021] Saatavissa: <http://www.wavedragon.co.uk/>

WAVEPISTON (2021). [Viitattu: 24.7.2021] Saatavissa: <https://www.wavepiston.dk/#top>

WELLER, S.D., DAVIES, P., VICKERS, A.W. and JOHANNING, L., 2015. Synthetic rope responses in the context of load history: The influence of aging. *Ocean Engineering*, Vol.96, pp. 192-204.

WELLO OY (2021). [Viitattu: 28.7.2021] Saatavissa: <https://wello.eu/>

XIE, J. & ZUO, L., (2013). Dynamics and control of ocean wave energy converters. *International journal of dynamics and control*, Vol.1(3), pp. 262-276.

XU, S., WANG, S. and GUEDES SOARES, C., 2019. Review of mooring design for floating wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.111, pp. 595–621.

ZHANG, Y., ZHAO, Y., SUN, W. & LI, J., (2021). Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.141, 110764.