Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Aaltovoiman tuotantokustannukset

Levelized cost of energy of wave power

Työn tarkastaja: Aija Kivistö

Työn ohjaaja: Aija Kivistö

Lappeenranta 20.02.2018

Markus Lahtinen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Markus Lahtinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aija Kivistö

Kandidaatintyö 2018

31 sivua, 20 kuvaa ja 2 taulukkoa

Hakusanat: Aaltovoima, tuotantokustannukset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia aaltovoiman tuotantokustannuksia ja mistä kustannukset muodostuvat. Työssä tutkitaan lyhyesti myös aaltoenergian perusteita, potentiaalia energiantuotantoon ja tuotantomenetelmiä. Lopussa esitellään myös esimerkkejä historiallisista ja nykyisistä aaltovoimaloista. Pääpaino työssä on kuitenkin tuoda esille tuotantokustannuksien nykytilanne ja miten ne tulevaisuudessa mahdollisesti kehittyvät. Tietoa on kerätty eri energiaviranomaisten tutkimuksista ja kirjallisuudesta. Tuotantokustannuksista on paljon vaihtelevaa tietoa ja tämä on pyritty tuomaan esille vertailemalla kyseisiä arvoja ja muodostamalla niistä keskiarvoja.

Aaltovoimaloiden kehitys on vasta alkutekijöissä, joten yksittäisen laitoksen tuotantokustannuksia täytyy verrata samassa vaiheessa kehitystä olevan laitoksen kanssa. Suurin vaikuttava tekijä tuotantokustannuksiin on investointikustannukset. Alkuvaihetta kehitystä olevan laitoksen investointikustannukset laskevat moninkertaisesti sen aikana, kun laitos kehittyy kaupalliseen käyttöön sopivaksi. Ensimmäiset kaupallisessa vaiheessa olevien aaltovoimaloiden tuotantokustannukset ovat keskiarvojen perusteella laskettuna vuonna 2018 noin 280 €/MWh.

Jos aaltovoimatekniikka kehittyy toimivaksi tulevien vuosien aikana, voidaan odottaa tuotantokustannuksien laskevan alle 100 €/MWh. Ruotsalainen Seabased mainostaa kykenevänsä jo nyt 100 €/MWh:n tuotantokustannuksiin ja Suomalainen Wello Oy uskoo laskevansa kustannuksensa seuraavien vuosien aikana 130 €/MWh:iin.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä **2**

Sisällysluettelo **3**

Symboli- ja lyhenneluettelo **4**

1 Johdanto **5**

2 Perusteet **6**
2.1 Teoreettinen energia 6
2.2 Potentiaali 6

3 Teknologia **9**

4 Tuotantokustannukset **12**
4.1 Tuotantokustannuksien laskeminen 12
4.2 Investointikustannukset 13
4.3 Käyttö- ja ylläpitokustannukset 17
4.4 Vuotuinen energiantuotanto 18
4.5 Tuotantokustannukset 20

5 Tulevaisuus **22**

6 Tuotantolaitokset **25**

7 Yhteenveto **29**

Lähdeluettelo **30**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

g	normaali putoamiskiihtyvyys	[m/s^2]
H	korkeus	[m]
n	laitoksen elinaika	[a]
P	Aallon energia	[W/m]
r	laskentakorko	[%]
t	tarkasteltava vuosi laitoksen käynnistyttyä	[-]
T	aika	[s]

Kreikkalaiset aakkoset

ρ	tiheys	[kg/m^3]

Lyhenteet

AEP	Vuosittainen energiantuotanto
Av	Saatavuuskerroin
CAPEX	Investointikustannukset
GCF	Brutto kapasiteettikerroin
$LCOE$	Tuotantokustannukset
$OPEX$	Käyttö- ja ylläpitokustannukset

1 JOHDANTO

Uusiutuvien energiamuotojen yleistyminen on ollut nopeaa viimeisen kymmenen vuoden aikana. Nykyajan suuntaus vähentää hiilidioksidipäästöjä on kasvattanut varsinkin tuuli- ja aurinkovoimaloiden määrää. Niiden ympärille on kehittynyt oma liiketoimintansa, jonka avulla kyseiset energiamuodot ovat kehittyneet teknillisesti todella paljon. Samaan aikaan on alettu etsimään muita mahdollisia energialähteitä, joista yhdeksi mielenkiintoiseksi mahdollisuudeksi on muodostunut meri. Merestä voidaan hyödyntää energian talteenotossa nousuvesiä, meriveden lämpötilaa ja aaltojen liike-energiaa. Tässä työssä keskitytään aaltoenergiaan ja varsinkin aaltovoimaloiden tuotantokustannuksien kehitykseen.

Viimeisen kymmenen vuoden aikana aaltovoimaloiden teknologia on kehittynyt pienistä testilaitoksista suuren mittakaavan ei-kaupallisiin laitoksiin. Eturintamassa aaltovoimaloiden kehitykseen ovat lähteneet maat, joilla on meren rantaviivaa ja korkea potentiaalista aallokkoa ympäri vuoden. Näistä Iso-Britannia on ollut teknologian kehittämisessä kärkimaita. (IRENA 2014a, 11.)

Työn tavoitteena on selvittää aaltovoimaloiden tuotantokustannuksien suuruus ja se, miten ne ovat ajan saatossa kehittyneet. Alussa esitellään lyhyesti aaltovoimateoriaa, potentiaalia ja voimaloiden teknologioita. Sen jälkeen tarkastellaan tapoja selvittää investointien suuruus ja vertaillaan eri tahojen laskelmia voimaloiden kustannuksista. Lopuksi tehdään katsaus eri aaltovoimalaprojekteista ja suomalaisiin aaltovoimayrityksiin. Työn laajuutta on karsittu jättämällä aaltoenergian teoria vähemmälle käsittelylle. Lisätietoa teoriasta voi lukea João Cruzin teoksesta Ocean Wave Energy (2008).

Aaltovoimaloiden teknologian monipuolisuuden takia tuotantokustannukset vaihtelevat suuresti, joten aiheesta ei ole voinut tehdä täysin tarkkoja laskelmia. Työssä käytetään päälähteinä International Energy Agencyn (IEA) ja Euroopan komission Joint Research Centren (JRC) raportteja.

Työn luettuaan lukijalla pitäisi olla hyvä käsitys, mistä aaltovoimaloiden hinta muodostuu, sekä kuinka suuri osa kokonaiskuluista kuluu investointeihin tai käytön aikaisiin kuluihin ja miten näistä arvoista saadaan laskettua tuotantokustannukset.

2 PERUSTEET

Aallot syntyvät, kun tuulen liike-energia siirtyy meriveden pintaan. Isot aallot ovat tuulen energian kertymää pitkiltäkin matkoilla. Tuulet syntyvät, kun ilmakehässä muodostuu lämpötila- ja paine-eroja, joiden takia ilma siirtyy korkeammasta paineesta matalaan. Aallot voi liikkua pitkiäkin matkoja ilman suurempia häviöitä. Kun aallot lähestyvät rannikkoa ja veden normaali korkeus pohjaan on pienempi kuin aallon korkeus, niin aallon korkeus veden normaalitasosta nousee ja saavuttaa lopulta harjakorkeuden, joka lopulta kaatuu omaan painoonsa. Tämä aaltojen ominaisuus vaikuttaa valintaa, kuinka kaukana rannikosta aaltojen energiaa halutaan hyödyntää ja millainen voimalaitostyyppi soveltuu parhaiten alueelle. Voimalaitostyyppeihin keskitytään tarkemmin kappaleessa kolme.

2.1 Teoreettinen energia

Aalloista saatava teoreettinen energia ilmaistaan yleensä yksiköllä kilowatti metriä kohden (kW/m). Energialle on mahdollista johtaa useita yhtälöitä, joista yksi käytetyimmistä on seuraava (Karimirad 2014, 80):

$$P \approx \frac{\rho g^2}{64\pi} T H^2 \tag{1}$$

jossa ρ veden tiheys [kg/m^3]

g normaali putoamiskiihtyvyys [m/s^2]

T aallon huippujen jaksonaika [s]

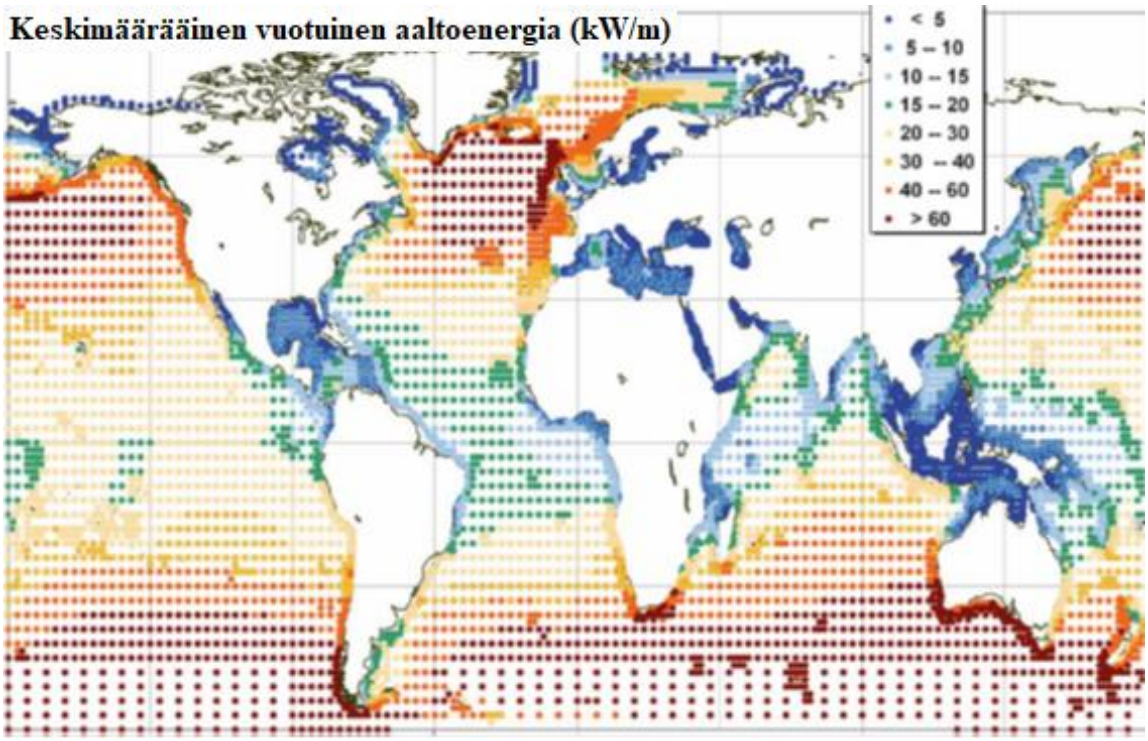
H aallon huipun korkeus [m]

Aaltojen energia metriä kohti on yleensä 5-60 kW/m. Jos aaltojen vuotuinen keskimääräinen energia ylittää 15 kW/m, voidaan alue mahdollisesti hyödyntää aaltovoimalan paikaksi (Karimirad 2014, 81.)

2.2 Potentiaali

Aaltojen voimakkuuksia maailmalla on tarkasteltu jo kauan aikaa. Meressä kelluvat poijut olivat ensimmäisiä aalloista tietoa kerääviä laitteita. Ensimmäinen tällainen otettiin käyttöön jo 1960-luvun alussa. Myöhemmin mukaan tulivat satelliitit, joilla saa entistä

tarkemmin tietoa aaltojenkorkeudesta ympäri maailmaa. Yhdysvaltojen merivoimien satelliitti vuonna 1985 oli ensimmäinen, joka mittasi aaltojen korkeutta ja jaksonaikaa. (Cruz 2008, 117-120.) Furgo OCEANOR on kehittänyt poijuista ja satelliiteista saatujen tietojen perusteella maailmanlaajuisen tietokannan, josta voi lukea aaltojen korkeudet ja jaksonajat vuoden jokaiselle päivälle. Tietokannasta on luettavana tietoa vuodesta 1996 tähän päivään asti. (Furgo.) Näiden tietojen avulla on laskettu kuvassa 1 näkyvä keskimääräinen vuotuinen aaltojen tehojakauma maailmanlaajuisesti.

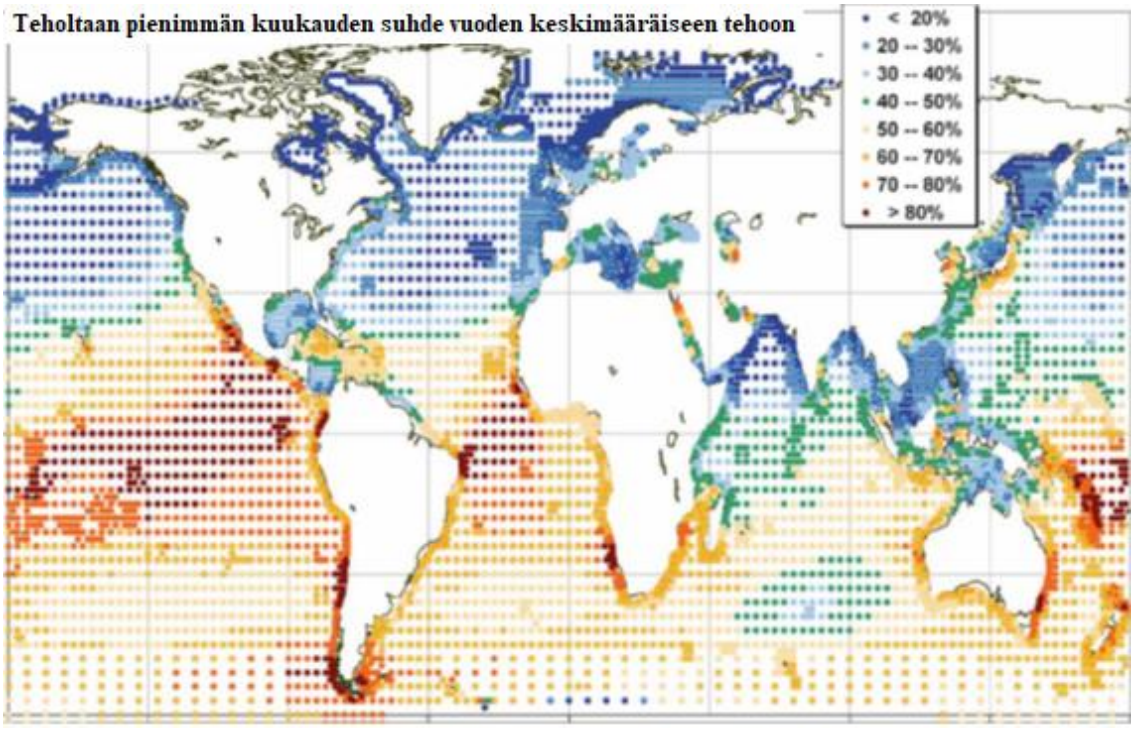


Kuva 1. Keskimääräinen vuotuinen aaltojen tehojakauma maailmalla (kW/m). Sininen väri on noin 5 kW/m ja punainen 60 kW/m. (Cruz 2008, 95.)

Euroopasta suurimmat tuotantopotentiaalit ovat Britannian ja Portugalin edustalla. Etelä-Amerikan, Afrikan ja Australian potentiaalisimmat alueet löytyy mantereiden eteläkärjistä. Päiväntasaajan kohdilla aaltojen energia ei ole niin suuri kuin pohjoisella tai eteläisellä pallon puoliskolla.

Vaikka pohjoisilla leveysasteilla on keskimääräisesti hyvät aalto-olosuhteet, on niissä paljon vaihtelua vuoden ajan mukaan. Tammikuussa on mitattu suurimmat aallot, jotka lähentelevät jopa 200 kW/m, mutta kesällä ei päästä kuin 25 kW/m tasolle. Eteläisillä leveysasteilla hyvissä aalto-olosuhteissa, voidaan pysyä ympäri vuoden noin 60 kW/m

tasolla. Kuvassa 2 on esitetty vuoden tehollisesti pienimmän kuukauden suhde koko vuoden keskimääräiseen tehoon.



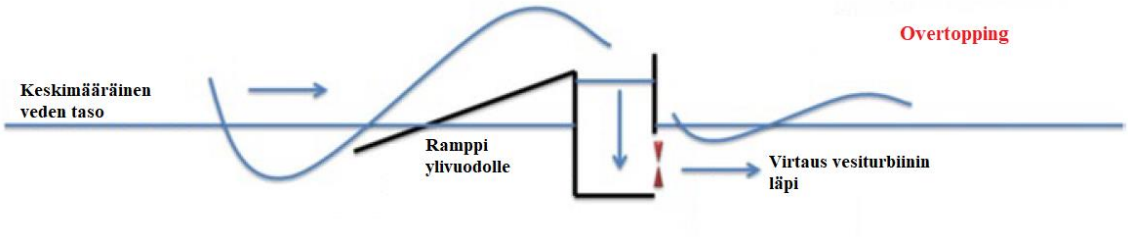
Kuva 2. Vuoden pienimmän tuotantokuukauden suhde koko vuoden keskimääräiseen tehoon. (Cruz 2008, 101.)

Eteläiselle leveysasteelle olisi kaikista parhainta sijoittaa aaltovoimaloita, koska ne voidaan suunnitella kestämään samanlaista kuormaa ympäri vuodeksi. Pohjoiseen sijoitetut voimalat täytyy suunnitella kestämään kausittaisia kovemman aallokon kuormaa.

3 TEKNOLOGIA

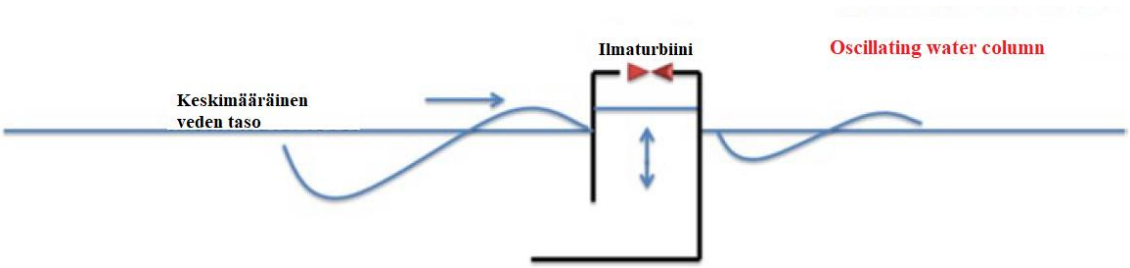
Tekniikaltaan aaltovoimalat voidaan luokitella moneen eri kategoriaan. Voidaan tarkastella, kuinka kaukana merellä voimala sijaitsee tai onko voimala pinnassa, pohjassa vai jopa rannassa. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi voimalat sen perusteella, millä tekniikalla se muuntaa aallon energian sähköksi. Erilaisten voimalaitosten joukosta ei ole vielä noussut selvää voittajaa, vaan yrityksen satsaavat mitä erilaisimpiin ratkaisuihin, kukin toivoen, että itse kehittämä teknologia olisi tulevaisuuden suunnannäyttäjä aaltovoimaloiden saralla.

Aaltoenergian muuntaminen sähköksi voidaan toteuttaa pääasiassa kolmella tavalla. Kuvassa 3 on esitettynä overtopping-laitos. Laitos on veden normaalin tason yläpuolella ja sisältää rampin, veden keruu altaan ja turbiiniin. Laitosta kohti tulevat aallot ylittävät veden keruu altaan reunan ja täyttävät allasta, josta ylimääräinen vesi poistuu turbiiniin läpi. Aallon kineettinen energia muutetaan potentiaalienergiaksi ja turbiinin kautta sähköksi.



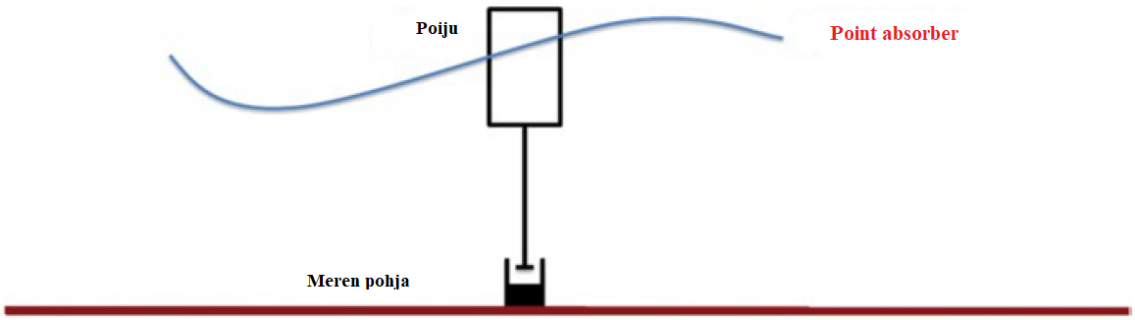
Kuva 3. Overtopping. Aalto kuljettaa veden altaaseen, josta se poistuu vesiturbiinin kautta takaisin mereen. (Karimirad 2014, 82.)

Kuvassa 4 on mallinnettu oscillating water column (OWC) -tekniikka. Siinä aaltojen voima aiheuttaa männän lailla toimivan vesipatsaan, joka pyörittää sylinterin päässä olevaa ilmaturbiinia. OWC:n hyöty on sen yksinkertaisuus. Sen ainoa liikkuva osa on turbiini, joten se on käyttäjäystävällinen. Toisaalta niistä saatava teho on pienempi verrattuna muihin voimalaitostyyppeihin. Ilmaturbiinin hyötysuhde on vain 50-60 %, kun taas vesiturbiineilla voidaan saavuttaa hyötysuhteeksi 70-90 % (IRENA 2014b, 11.)



Kuva 4. Oscillating water column, jossa sylinterin täyttämä vesipatsas kohoaa ja laskee aaltojen mukana. Sylinterin ylhäällä oleva ilma poistuu turbiinin kautta. (Karimirad 2014, 82.)

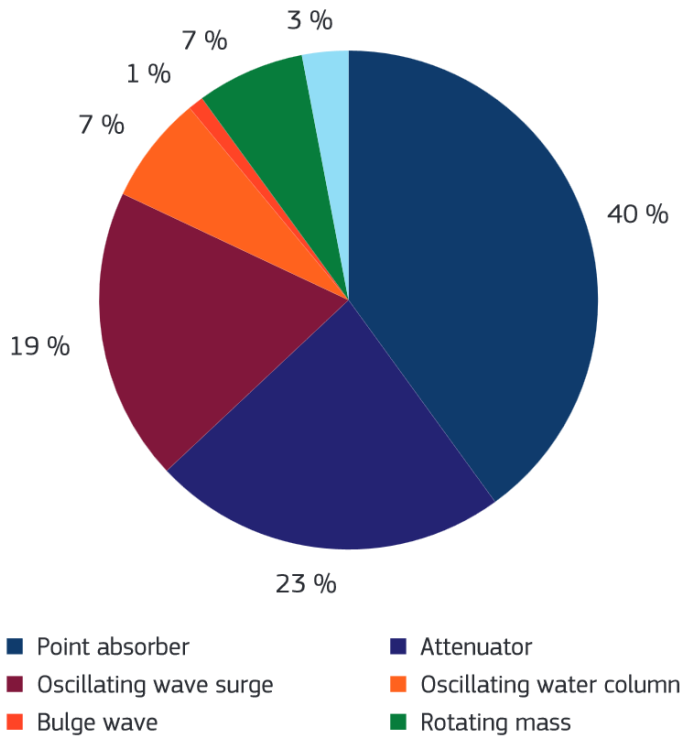
Kuvassa 5 on esitetty kolmas tapa ottaa talteen aaltojen energia. Kyseessä point absorber, jonka idea on seurata aaltojen liikettä ja muuttaa tämä liike-energia sähköksi. Point absorber voidaan toteuttaa pinnassa olevalla poijulla tai pohjaan ankkuroidulla rakenteella, kuten suomalainen AW-Energy on toteuttanut omassa WaveRollerissaan (kappale 6). Liike-energia muutetaan sähköksi hydraalisella generaattorilla tai lineaarisella induktorilla riippuen voimalan suunnittelusta.



Kuva 5. Point absorboijan idea on seurata aaltojen liikettä ja muuttaa liike-energia sähköksi (Karimirad 2014, 82.)

Point absorboijien osuus aaltovoimaloiden tutkimus ja kehitystyöstä on todella suuri, joten esimerkiksi JRC:n raportissa ne jaetaan useaan luokkaan. Nämä ovat Attenuator, Point absorber, Oscillating wave surge converter, Submerged pressure differential, bulge wave ja rotating mass. En käy tässä työssä läpi edellä mainittujen eroavaisuuksia. Kirjassa Offshore energy structures (Karimirad 2014, 82) on kaikki edellä mainitut jaoteltu asian yksinkertaistamiseksi pelkästään point absorboijiksi.

Kuvassa 6 on esitetty tutkimukseen ja kehitykseen sijoitetut resurssit eri voimalaitostyyppien välillä. Voidaan huomata, että 90 % kehityksestä on ollut point absorboijien kaltaisissa voimaloissa.



Kuva 6. Tutkimus ja kehitys osuudet eri voimalaitos mallien välillä (JRC 2014, 32.)

4 TUOTANTOKUSTANNUKSET

Energiantuotantokustannuksia laskiessa on hyvä käyttää kaikissa tapauksissa samaa laskentametodia. Kun jokainen energiantuotantomuoto voidaan laskea samalla tavalla, saadaan kaikista vertailukelpoisia toisiinsa nähden. Yleisimmäksi sähkön- ja lämmöntuotannon kustannuksien laskutavaksi on muodostunut seuraavassa kappaleessa esitetty menetelmä.

Kun vertaillaan laitosten kustannuksia, pitää ottaa huomioon missä vaiheessa kehitystä laitos on. Luonnollisesti prototyyppi-vaiheessa tuotantokustannukset ovat suuremmat kuin sarjatuotanto-vaiheessa. Normaalisti vertaillaan täysin toiminnassa olevia laitoksia, mutta aaltovoimaloiden tapauksessa täytyy ottaa kehitysvaiheessa olevat voimalat huomioon. Täydessä toiminnassa olevia laitoksia ei ole käytössä riittävästi, jotta saataisiin vertailukelpoista tietoa. Yksi merkittävimmistä lähteistäni on International Energy Agencyn (IEA) ja Ocean Energy Systemsin (OES) yhdessä laatima tutkimus Cost of Energy for Ocean Energy Technologies, jossa voimalaitoksien kustannuksia tarkastellaan kolmessa teknologian kehitysvaiheessa. Ensimmäinen vaihe on esikaupallinen projekti, jossa testataan laitoksen prototyyppiä oikeassa toimintaympäristössä. Toinen vaihe on vielä esikaupallinen projekti, jossa käytössä on lähes täysimittainen laitos ja kehittäjillä on tietämystä aiheesta enemmän. Kolmas vaihe on toimiva kaupallinen voimalaitos, jonka tarkoituksena on tuottaa verkkoon sähköä ilman ulkopuolista rahallista tukea lukuun ottamatta mahdollista syöttötariffia. (IEA-OES 2015, 5.) Edellä mainitut kehityksen vaiheet ovat paljon esillä seuraavissa kappaleissa.

Tässä työssä puhutaan kustannuksista euroina, vaikka monessa lähteessä on käytössä dollarit. Seuraavissa kappaleissa on mukana kuvaajia, joiden yksiköinä voi olla dollareita. Kun näitä arvoja käydään tekstissä läpi, on ne muutettu euroiksi. Muuntosuhteena käytetään 1 euro = 1,33 dollaria, jota on käytetty edellä mainitun Cost Of Energy for Ocean Energy Technologiesin laskuissa (IES-OES 2015, 11.)

4.1 Tuotantokustannuksien laskeminen

Tuotantokustannuksien, englanniksi levelized cost of energy (LCOE), laskemiseen on kehitetty kaikilla energiantuotanto muodoilla toimiva laskentatapa. Kun kaikki lasketaan samaa yhtälöä noudattaen, ovat ne vertailukelpoisia keskenään. Tuotantokustannuksien laskemiseen on kehitetty yhtälö 2. Yhtälöllä saa laskettua kulutetun rahamäärän tuotettua

energiayksikköä kohden. Yleisimmin kirjallisuudessa yksiköinä käytetään valuuttana dollaria ($) tai euroa (€) ja tuotettuna energiamääränä megawattituntia (MWh) tai kilowattituntia (kWh).

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^{n} \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{AEP_t}{(1+r)^t}} \tag{2}$$

jossa CAPEX investointikustannukset [€]

$OPEX_t$ vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset [€]

AEP_t vuosittainen energiantuotanto [Wh]

r laskentakorko [%]

n laitoksen elinaika [a]

t tarkasteltava vuosi laitoksen käynnistyttyä [-]

Yhtälön yläpuolella on CAPEX, joka kertoo laitoksen investointikustannukset. Investointikustannuksiin summataan tuotannon aikana syntyvät vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset (OPEX) diskontattuna nykyarvoon. Investointikustannukset ja käyttö- ja ylläpitokustannukset käsitellään tarkemmin luvuissa 5.2 ja 5.3. Vuosittaisen energiantuotannon (Annual Energy Production, AEP) diskonttaaminen nykyarvoon voi vaikuttaa aluksi hämmentävältä. Tällä ei tarkoiteta, että tuotanto vähenisi vuosien saatossa, vaan tuotannosta saatava taloudellinen hyöty pienenee.

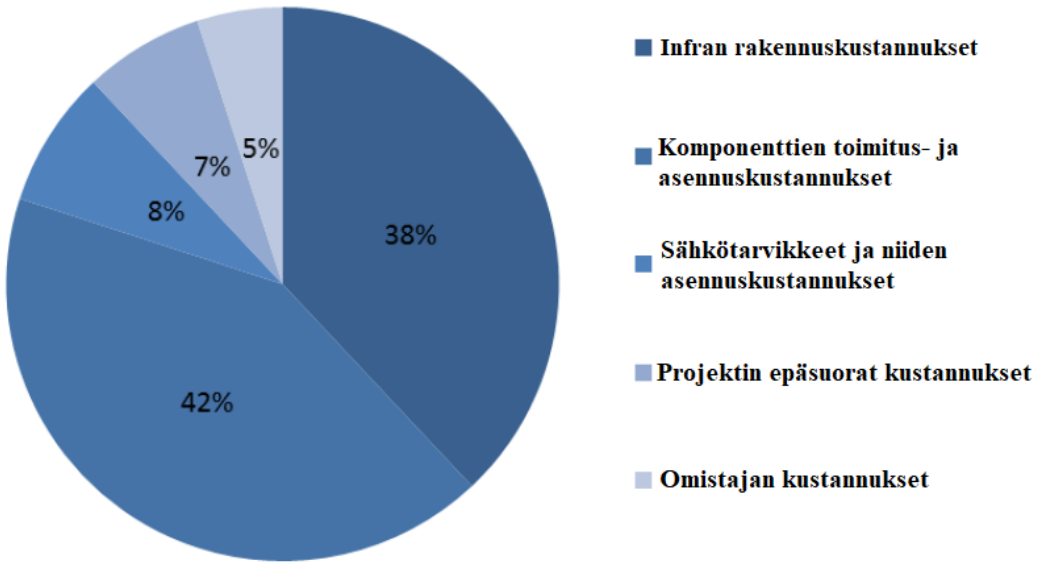
4.2 Investointikustannukset

Investointikustannus (CAPEX) kertoo laitokseen kuluneen rahamäärän ennen kuin se tuottaa energiaa. Aaltovoimaloiden tapauksessa investoinnit voi jakaa eri osatekijöihin taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Investointikustannuksien muodostavat osatekijät (Etri 2014, 10.)

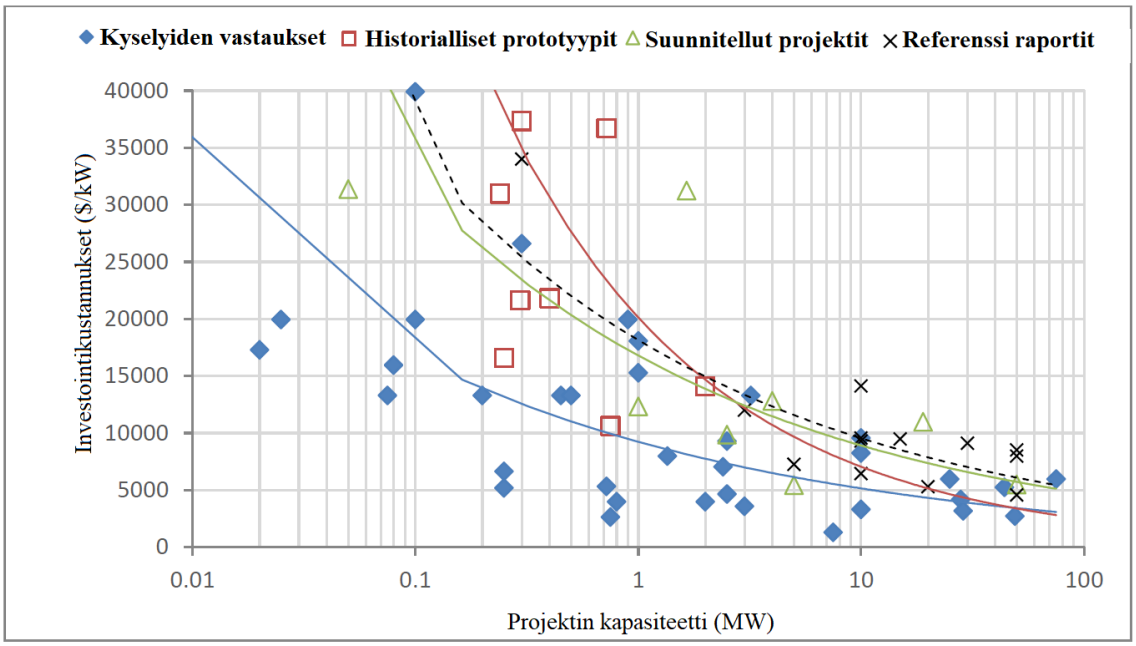
Investointikustannuksen osatekijä	Selite
Infran rakennuskustannukset	Laitosalueen valmistelu kustannukset. Esimerkiksi tiet alueelle, perustukset ja laitokseen liittyvät rakennukset.
Komponenttien toimitus- ja asennuskustannukset	Laitoksen pääkomponentit ja niiden asennus. Lisäksi kaikki komponentit, jotka eivät suoranaisesti liity voimalan toimintaan.
Sähkötarvikkeet ja niiden asennuskustannukset	Sähkölinjat, muuntajat, kytkinlaitokset.
Projektin epäsuorat kustannukset	Rakennustyön aikaiset suunnittelut, työmaan hallinta, turvapalvelut, urakoitsijoiden yleiskustannukset ja ylläpito.
Omistajan kustannukset	Kaikki ylimääräiset kustannukset, jotka täytyy maksaa alustavasta projektin suunnittelusta, työmaaluvat, oikeudelliset maksut, maanhankinta, verot ja lisensointi.

Kuvasta 7 voi nähdä arvion investointikustannuksien jakaantumisesta. Merellä rakentaminen on paljon monimutkaisempaa ja kalliimpaa kuin maalle rakentaessa. Tämän takia rakennuskustannukset muodostavat lähes yhtä suuren osuuden itse laitteiston kanssa. Kuva muistuttaakin hyvin paljon merellä rakennettavan tuulivoimalan investointijakaumaa.



Kuva 7. Investointikustannuksien osuudet eri osa-alueille (Etri 2014, 33.)

Kuvaan 8 on koottu vuoden 2015 arvoja investointikustannuksista. Suurin osa tiedosta on saatu tekemällä kyselyitä aaltovoimaloiden kehittäjille, jotka ovat antaneet arvionsa projektinsa kustannuksista. Kyselyitä oli lähetetty vain kehittäjille, joilla on kokemusta pitkälle edenneestä prototyypistä tai täysikokoisesta laitoksesta. Nämä tiedot on merkitty sinisellä ruudulla. Lisäksi kuvaan on lisätty tiedot, jotka on saatu julkisista raporteista, joissa on käsitelty prototyyppejä (punainen neliö), suunnitteilla olevia projekteja (vihreä kolmio) tai kyseessä on ollut kustannuksia käsittelevä verrokki raportti (musta x). Mukana on siis erittäin kattavasti tietoa monista lähteistä. (IEA-OES 2015, 27.) Pitää ottaa huomioon, että samassa kuvaajassa on sekaisin eri vaihetta kehitystä olevia laitoksia. Mukana on vasta kehityksen alussa olevia voimaloita, joiden investointiarviot voi poiketa valmiista voimalasta todella paljon. Kehittäjien arvioista osa voi olla ylioptimistisia ja mahdollisesti tähän päivään mennessä kariutuneita projekteja.

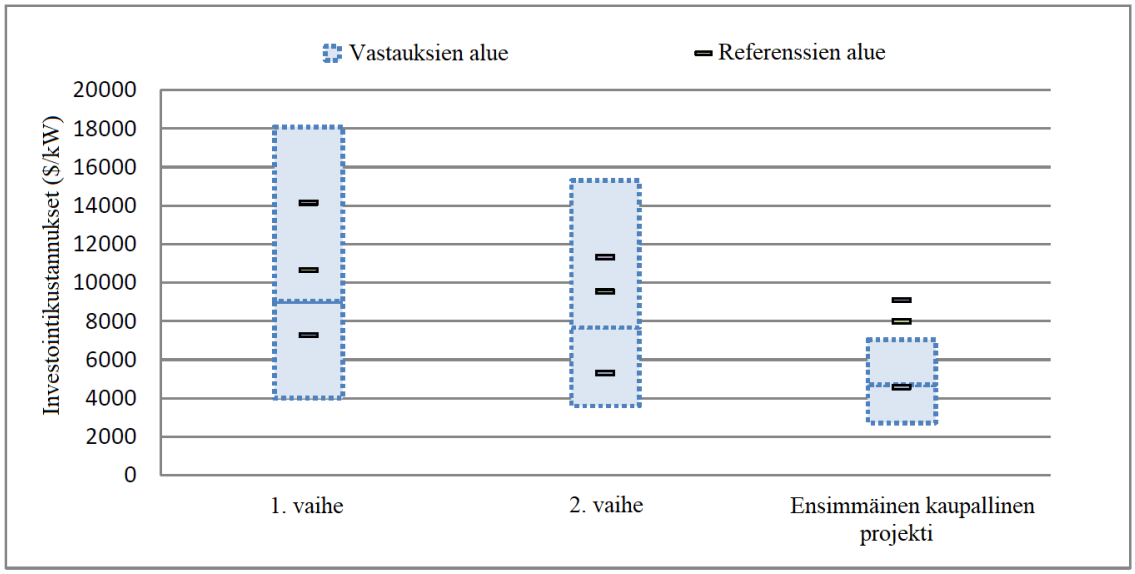


Kuva 8. Investointikustannukset lueteltuna kuvaajaan. pystyakselilla laitoksen investointikustannus kilowattia kohden ja vaaka-akselilla kyseisen laitoksen kapasiteetti (IEA-OES 2015, 27.)

Voidaan tehdä havainto, kuinka kehittäjien ilmoittamat lukemat ovat keskiarvollisesti halvempia kuin toteutuneet tai suunnitteilla olevat projektit. Varsinkin alkuvaihetta kehitystä olevien laitoksien kehittäjillä on taipumusta aliarvioida projektin todellinen hinta. Useiden projektien kustannusennustukset ovat kohonneet sen jälkeen, kun on alettu rakentamaan täysikokoista prototyyppiä ja on todettu mereen rakentamisen

haasteellisuus. Mielenkiintoista kuvaajassa on kuinka kustannusarviot tai toteutuneet kustannukset voivat vaihdella saman kokoisilla laitoksilla parhaimmillaan 22 600 €/kW. Tämä vaihtelu tuo lisähaasteita keskimääräiseen tuotantokustannuksien laskemiseen.

Kuvaan 9 on koottu tiedot investointikustannuksista laitoksen eri kehitysvaiheissa. Vaalean sinisellä täytetty alue kuvastaa kehittäjiltä saatuja vastauksia ja mustat viivat ovat referenssiraporteista saadut tiedot. Mukaan on otettu vastaukset laitoksista, joiden toiminta on jo testattu käytännön olosuhteissa ja pois on jätetty kaikki teknologialtaan vasta alkutekijöissä olevat laitokset. Ensimmäisessä vaiheessa kustannukset ovat vaihdelleet 3000 – 13500 €/kW välillä. Toisessa vaiheessa ollaan päästy eroon kalleimmista projekteista ja investointikustannuksien arvio on 2900 – 11700 €/kW. Voidaan huomata kuinka alkuvaiheen projektien tulokset ovat samassa hintahaarukassa referenssiraporttien ja kehittäjien vastauksien kanssa. Ensimmäisen vaiheen kustannukset ovat aina suuremmat verrattuna ensimmäiseen kaupalliseen projektiin. Kun ollaan päästy kaupalliseen vaiheeseen, niin laitokselle on onnistuttu kehittämään kunnon tuotantoketju ja saatu kustannuksia reilusti alas. Ensimmäisille kaupallisilla projekteilla kehittäjien vastaukset ovat optimistia verrattuna referenssiraportteihin. Kehittäjien arviot investointikustannuksissa ovat 2260 – 5300 €/kW ja referenssiraporteissa 3400 – 6800 €/kW välillä.



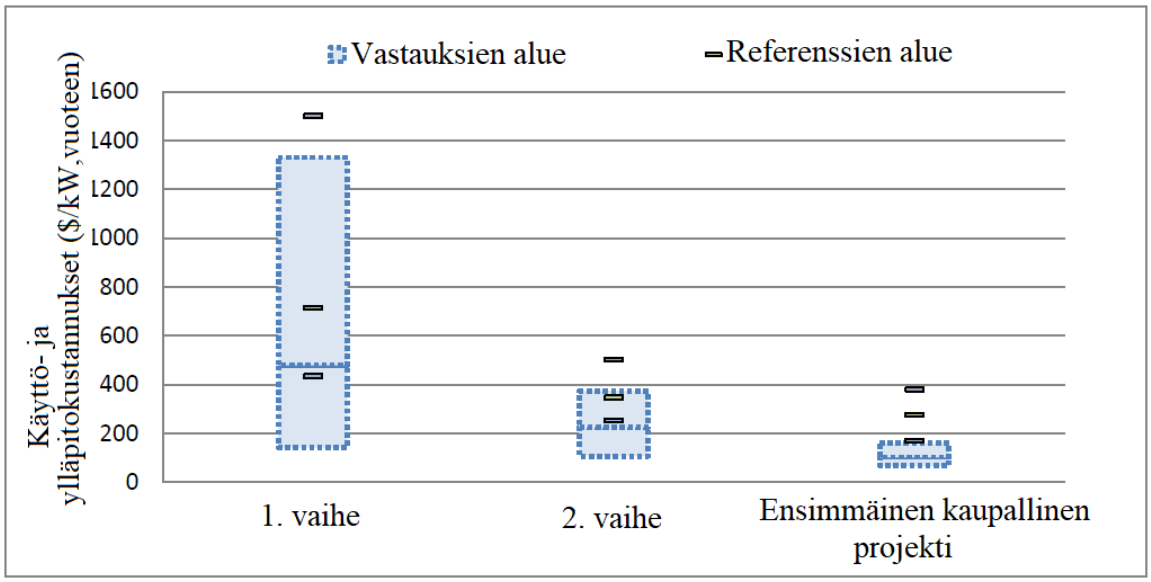
Kuva 9. Investointikustannuksien vaihtelua projektien eri vaiheissa (IEA-OES 2015, 28.)

On luonnollista, että uusien aaltovoimaloiden investoinnit ovat kalliita verrattuna vanhoihin energiantuotantomuotoihin. Esimerkiksi hiilivoimaloiden kehitys on jo niin pitkällä, että niiden hintaa on lähes mahdoton saada alemmas. Siellä ongelmana on nykyiset päästörajoitukset ja säädökset, jotka lisäävät laitoksessa olevien komponenttien määrää ja täten laitoksen investointi voi olla korkeampi kuin ennen pyrkimyksiä vähentää hiilidioksidipäästöjä. Katsomalla miten muiden uusiutuvaa energiaan käyttävien laitoksien hinta on kehittynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana, niin voidaan tehdä olettamus, että aaltovoimaloille tulee käymään mahdollisesti samanlailla. Esimerkiksi vuodesta 2008 vuoteen 2015 aurinkopaneeleja asennettiin tuhansia megawatteja ja tämän avulla investointikustannukset laskivat kolmanneksella. (IEA-OES 2015, 28.)

4.3 Käyttö- ja ylläpitokustannukset

OPEX kertoo vuoden aikana muodostuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset. Normaalissa polttoainetta käyttävässä voimalassa käytön aikaset kustannukset ovat paljon suuremmat kuin voimaloissa, jotka ottavat energiansa ympäristöstä. Aaltovoimalan tapauksessa vuosittaiset kustannukset tiedetään muodostuvan huolloista, ylläpidosta, vakuutuksista, vuokrista ja siirtomaksuista (SI Ocean 2014, 29.) Polttoainetta aaltovoimalaan ei luonnollisesti tarvitse ostaa.

Kuvaan 10 on laskettu käyttö- ja ylläpitokustannukset projektin eri vaiheille. Ensimmäisenä havaintona voidaan tehdä, että kehittäjien vastaukset ovat projektin jokaisessa vaiheessa keskimääräisesti pienempi kuin referenssiraporteissa. Ensimmäisen vaiheen projekteilla on todella suuri hajonta saaduissa tuloksissa. Kehittäjien antamissa vastauksissa hajonta on 113 – 980 €/kW. Pahimmillaan referenssiraportissa on kerrottu vuosittaisten kustannusten kohoavan 1130 €/kW:n tasolle. Ensimmäisen vaiheen projektien kohdalla joillakin yrityksillä on niin vähän kokemusta aiheesta, joten kulut voivat nousta todella korkealle. Toisessa vaiheessa vuosittaiset kustannukset ovat kehittäjien arvioiden mukaan 75 – 300 €/kW ja referenssiraporteissa 150 – 380 €/kW. Kaupallisessa vaiheessa ollaan referenssiraporttien mukaan 130 – 290 €/kW vuosittaisiin kustannuksiin. Kehittäjien arvio 53 – 130 €/kW vuodessa on lähes sama kuin nykyaikaisten merelle rakennettujen tuulivoimaloiden kanssa. (IEA-OES 2015, 29)



Kuva 10. Käyttö- ja ylläpitokustannukset projektin eri vaiheissa (IEA-OES 2015, 29.)

Voimalan sijoittaminen mereen on riskialtista ja vaatii laitoksen kehittäjältä hyvää valmistautumista, jotta käyttö- ja kunnossapitokustannukset pysyisi kohtuullisina. Voimalaan tulevat komponentit pyritään tekemään jo ensimmäisestä prototyypistä lähtien kestäväksi ja vähän huoltoa tarvitsevaksi. Niihin myös sijoitetaan paljon sensoreita, jotta ongelmat voidaan havaita hyvissä ajoin. Voimaloiden kestävyyden parantamisella on myös suora vaikutus laitoksen saatavuuskertoimeen. (IEA-OES 2015, s30.)

4.4 Vuotuinen energiantuotanto

Vuotuinen energiantuotanto (Annual Energy Production, AEP) kertoo nimensä mukaisesti vuoden aikana tuotetun sähkön määrän. Yksikkönä on yleensä megawattitunti (MWh) tai kilowattitunti (kWh). Sen arvona voidaan käyttää aikaisemmista laitoksista muodostuneiden tuotantojen keskiarvoa tai laskea teoreettinen arvo seuraavalla yhtälöllä (IEA-OES 2014, 32):

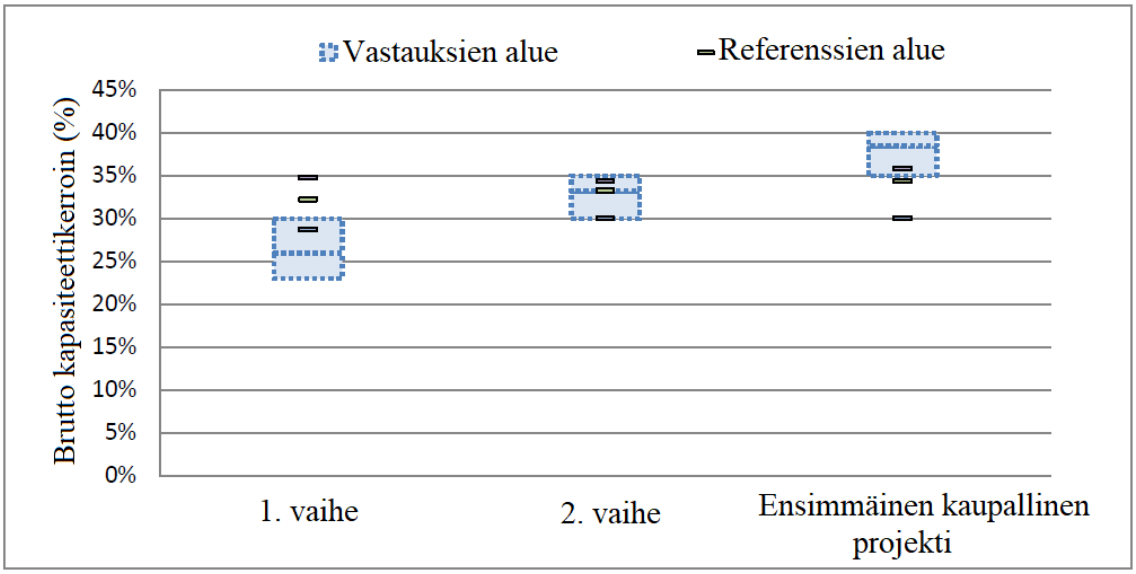
$$AEP = Laitoksen\ kapasiteetti * GCF * Av * 8760 \qquad (3)$$

jossa GCF Brutto kapasiteettikerroin [%]

Av Saatavuuskerroin [%]

Kapasiteettikerroin on laitoksen huipunkäyttöaika jaettuna tunneilla, joilla laitos on toiminnassa. Toisin sanoa, jos laitos tuottaisi maksimitehon jatkuvasti, niin kuinka suuri osa laitoksen toiminta ajasta sillä menisi tuottaa normaalisti syntyvä teho.

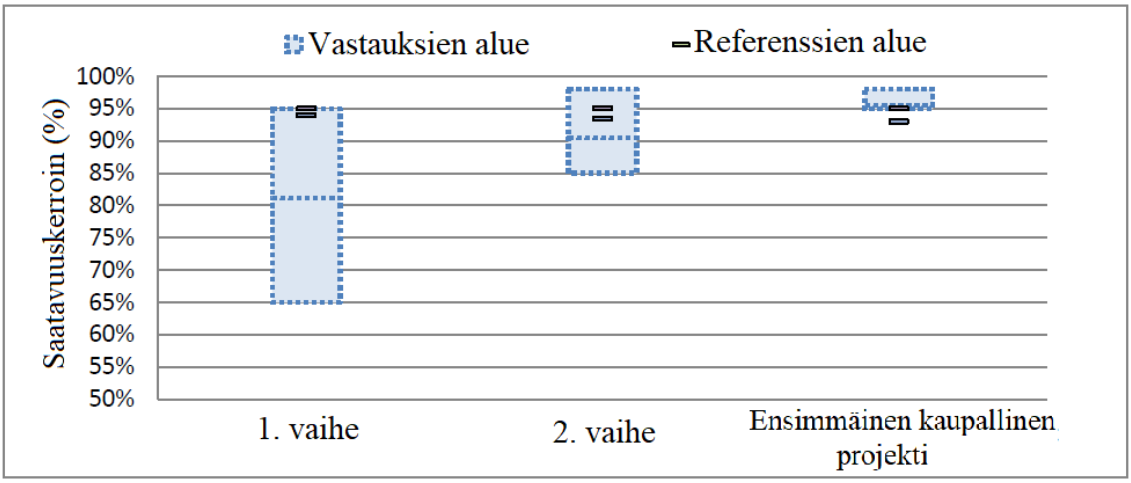
Kuvassa 11 nähdään kapasiteettikertoimen muutos projektien eri vaiheille. Referenssiraportit pysyvät lähes samoissa arvoissa jokaisessa projektin eri vaiheessa. Ne ovat noin 30 – 35 % luokkaa. Kehittäjien vastauksissa on nähtävissä hienoista nousua eri vaiheille. Alussa ollaan 23 – 30 % kapasiteettikertoimessa ja ensimmäisen kaupallisen projektin aikana kerroin on noussut 35 – 40 % tasolle. Kertoimen paranemista voidaan selittää käytettävän teknologian kehityksellä ja sillä, että voimalaitokset opitaan sijoittamaan niille suotuisimmille ja energiatiheille alueille. Tulevaisuudessa on mahdollista, että aaltovoimayrityksillä on tarjota eri malleja aaltovoimaloista erilaisiin ympäristöihin ja aalto-olosuhteisiin.



Kuva 11. Brutto kapasiteettikerroin projektin eri vaiheille (IES-OES 2015, 31.)

Saatavuuskerroin on laitoksen toiminnassa olo aika jaettuna vuoden tunneilla. Sitä ei pidä sekoittaa kapasiteettikertoimeen, vaikka joissakin tapauksissa saatavuuskerroin on sisällytettynä siihen. Kuvassa 12 on saatavuuskertoimet projektin eri vaiheille. Taas voidaan huomata, että referenssiraporttien saatavuuskerroin ei muutu paljon projektin eri vaiheissa. Kehittäjien arvioissa osataan ottaa huomioon, että varsinkin ensimmäisissä testilaitoksissa saatavuuskerroin voi olla todella huono. Tämä johtuu meren haastavista olosuhteista ja laitoksien jatkuvista huoltotarpeista. Ensimmäisessä vaiheessa ollaan 65 –

95 % kertoimissa, joka sitten paranee projektin edetessä. Kaupallisessa vaiheessa ollaan 95 % ympärillä, joka on todella hyvä luku ja sitä paremmaksi on hankala päästä.



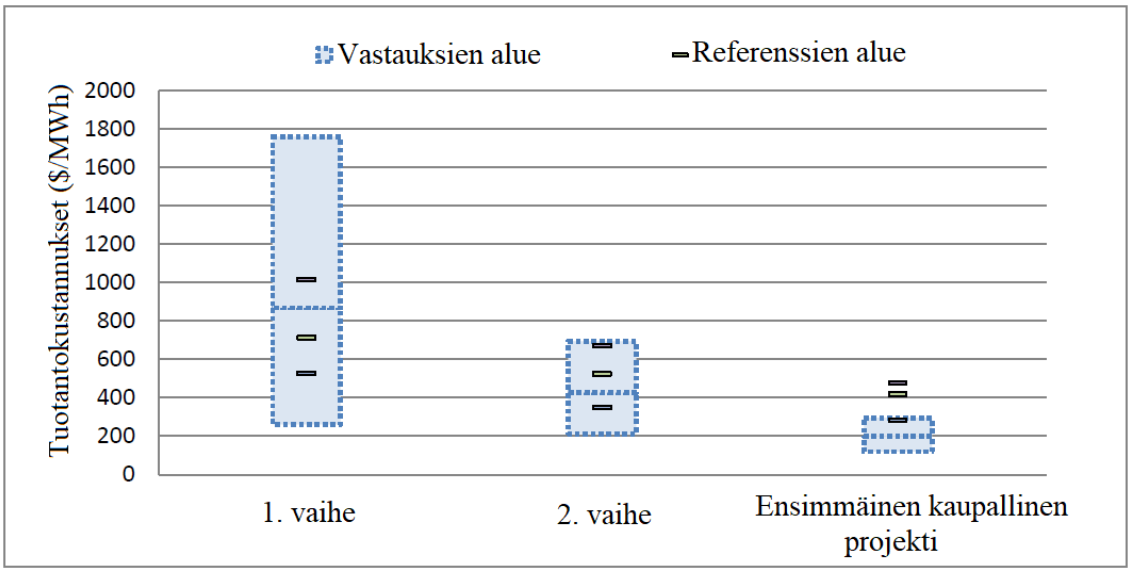
Kuva 12. Saatavuuskerroin projektin eri vaiheille (IES-OES 2015, 32.)

Vuotuisia energiantuotanto arvoja ei ole lueteltuna tässä työssä, koska niiden laskeminen on riippuvainen laitoksien kapasiteeteistä. Lähteen (IES-OES) tutkimuksessa olleet laitokset ovat vaihdelleet kapasiteeteiltään muutamasta kilowatista satoihin kilowatteihin. Vuotuisia energiantuotantoja voitaisiin vertailla keskenään, jos jokainen tutkittava laitos olisi kapasiteetiltään sama.

4.5 Tuotantokustannukset

Kun investointikustannukset, vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset ja vuotuinen energiantuotanto on selvitetty, voidaan laskea tuotantokustannukset. Päälähteenä käytetty Cost of Energy for Ocean Energy Technologies on käynyt hyvin tarkasti läpi voimaloiden tuotantokustannuksiin vaikuttavat tekijät ja kuvassa 13 on heidän loppupäätelmänsä. Kuten edellisten kappaleiden perusteella voi odottaa, on ensimmäisen vaiheen projektilla todella suuri hajonta lopullisessa hinnassa. Kehittäjien antamat arvot voimalaitoksien tuotantokustannuksiksi on noin 150 – 1350 €/MWh. Toisen vaiheen projekteille on laskettu 150 – 530 €/MWh hajonta. Ensimmäisille kaupallisille projekteille odotetaan olevan kehittäjien vastauksien perusteella 90 - 210 €/MWh ja referenssiraporteissa ollaan päästy 210 – 350 €/MWh luokkaan. Pitää kuitenkin muistaa, että edellä mainitut arvot kuvaavat kustannuksien kehittymistä, kun teknologiaa lähdetään kehittämään lähes alkupisteestä. Lähes kaikilla vastaavilla tapauksilla on ollut samanlainen oppimiskäyrä. Toiseksi täytyy huomioida, että ensimmäinen kaupallinen projekti ei kerro tuotteen

lopullista hintaa, vaan sekin tulee vielä kehittymään paljon, jos aaltovoimalat saavat jalansijaa energiamarkkinoilla.



Kuva 13. Tuotantokustannukset laskettuna jokaiselle projektin vaiheelle (IEA-OES 2015, 33)

5 TULEVAISUUS

Edellisessä kappaleessa käytiin läpi International Energy Agency ja Ocean Energy Systemsin yhteistä tutkimusta aaltovoimaloiden kustannuksista. Tutkimus on laajuudeltaan kattavin kaikista tähän mennessä aihetta käsittelevistä julkaisuista. Siinä ei kuitenkaan tarkastella aihetta tulevaisuuteen tai tehdä mallinnuksia, miten aaltovoimaloiden hinta voisi kehittyä tulevina vuosikymmeninä. Joint Research Centre (JRC) ja International Renewable Energy Agency (IRENA) ovat keränneet tai tehneet omaa tutkimusta aaltovoimaloiden eri osa-alueiden hinnan kehityksestä. Taulukkoon 2 on koottu edellä mainittujen keräämä data ja laskettu niiden pohjalta keskiarvoja eri kustannuksille.

Taulukko 2. Aaltovoimaloiden investointikustannuksien, käyttö- ja ylläpitokustannuksien ja tuotantokustannuksien kehittyminen vuosien 2010-2050 välillä. (JRC 2014, 43) ja (IRENA 2014b, 18.)

Investointikustannukset [€/kW]				
Lähde	2010	2020	2030	2050
JRC	9080	5790	4480	2300
IEA	5650	4070	3350	1750
UK	5000 - 9000	3000 - 5000		2500 - 3000
ETI/UKERC	4840 - 9680	2723 - 4235	2118 - 2723	1513 - 2118
keskiarvo	7248	4335	3563	2154
Käyttö- ja ylläpitokustannukset [€/kW,vuosi]				
IEA	86 (Ennustavat laskua 46:een)			
ETI/UKERC	48 - 97	30 - 73	18 - 30	12 - 24
Tuotantokustannukset [€/MWh]				
IEA	286	207	172	
UK	213 - 500		113 - 226	88 - 125
ETI/UKERC	242 - 605	121 - 242	85 - 121	61 - 97
E&Y	505	268	148	108
SI Ocean	330 - 630	280 - 350	150 - 180	
keskiarvo	410	243	152	98

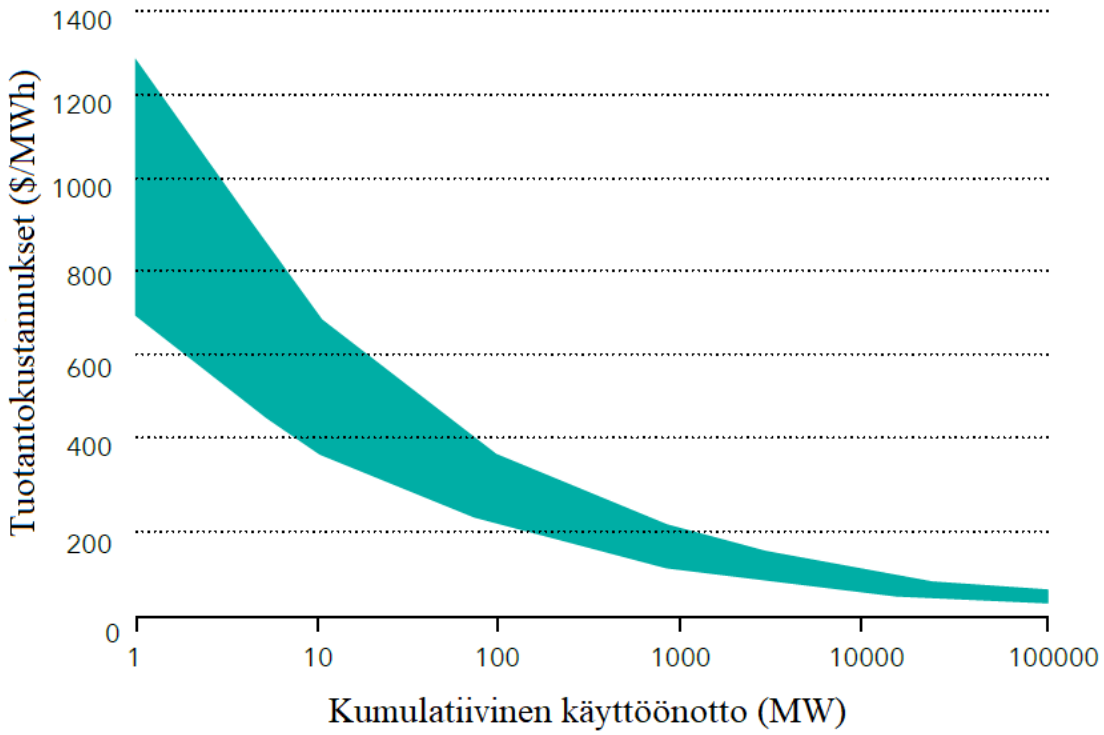
Vuoden 2010 keskiarvoksi investointikustannuksille saadaan 7248 €/kW:a. Kappaleessa 4.2 ensimmäisen kaupallisen projektin investointikustannukseksi on sanottu olevan 2260 – 6800 €/kW välillä. On siis olemassa aaltovoimaloiden valmistaja, jotka väittävät saavansa investointikustannukset yllä olevan taulukon 2050-luvun tasolle. Investointikustannuksien suurta eroa voidaan selittää sillä, että laitosvalmistajat tekevät

eri tyylisiä voimalaitoksia ja vaikka investointikustannus on halvempi, voi kyseisen laitoksen yllä- ja käyttöpitokustannukset olla suuremmat.

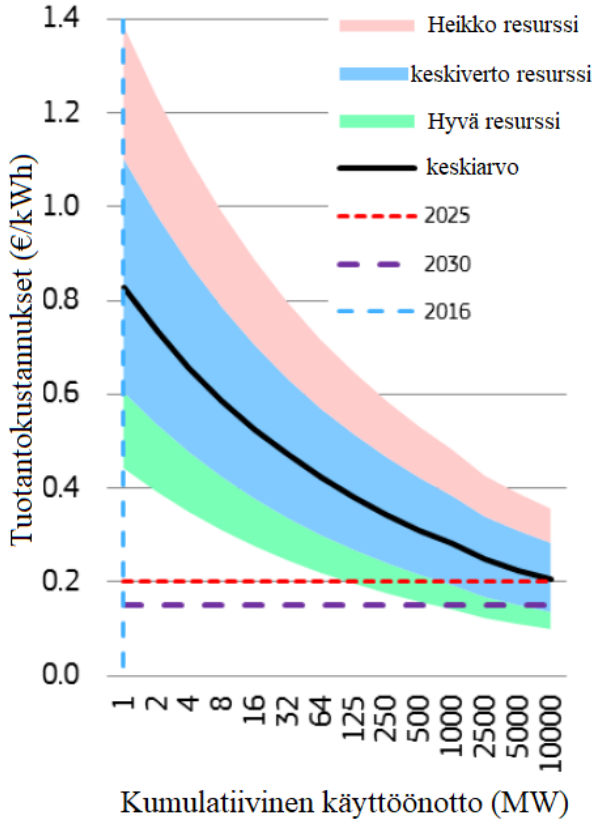
Käyttö- ja ylläpitokustannukset kehittyvät vuosien 2010 – 2050 välillä 97 €/kW:sta 24 €/kW:n. Kappaleessa 4.3 kaupallisen vaiheen laitosten käyttö- ja ylläpitokustannukseksi on kerrottu olevan 53 – 290 €/kW välillä.

Tuotantokustannukset kehittyvät vuosien 2010 – 2050 välillä 410 €/MWh:sta 98 €/MWh:iin. Kappaleessa 4.5 kaupallisen vaiheen laitosten tuotantokustannuksien on kerrottu olevan 90 – 350 €/MWh välillä. Jos otetaan vuosien 2010 ja 2020 keskiarvolliset tuotantokustannukset ja lasketaan niistä vuoden 2018 tuotantokustannus, saadaan tulokseksi 280 €/MWh. Aaltovoimala olisi kilpailukykyinen muita voimalaitoksia vastaan, jos kustannukset saataisiin vakiintumaan noin 100 €/MWh luokkaan. Tämän rajan asettamalla joidenkin aaltovoimaloiden olisi mahdollista tuottaa sähköä kannattavasti jo nyt.

Toinen tapa ennustaa tuotantokustannuksien kehittymisen on tarkastella kumulatiivista käyttöönottoa, jossa laitoksen hinnan oletetaan putoavan aina tietyn prosentin verran, kun laitoksen tuotanto tuplataan. Viimeisimmän 30 vuoden aikana tuulivoimalla ollaan huomattu 15% kustannuksien lasku, kun tuotanto on tuplattu. Aurinkovoimalla kyseinen luku on lähempänä 20%. Kuvassa 14 on Ocean Energy Systemsin (OES) kuvaaja kustannuksien kehittymisestä, kun aaltovoimaloiden tuotantoa kasvatetaan. 10 MW:n tuotannon kohdalla ovat kustannukset keskimääräisesti 385 €/MWh. Kun ollaan saavutettu 10 000 MW:n tuotanto, tuotantokustannuksien pitäisi olla noin 58 €/MWh. Kuvassa 15 on Joint Research Centren (JRC) vastaava kuvaaja, johon on jaoteltu voimalan sijainnin vaikutus kustannuksiin. Hyvä resurssisella alueella kustannukset ovat luonnollisesti paremmat kuin huono resurssisella alueella. Lisäksi kuvaajaan on merkitty ennusteet, missä hintataso on vuosina 2025 ja 2030. 10 MW:n tuotannon kohdalla ovat kustannukset keskimääräisesti 570 €/MWh ja 10 000 MW:n kohdalla keskimääräinen kustannus on 200 €/MW. OES:n kuvaaja on reilusti optimistisempi kuin JRC:n. Tätä voidaan selittää sillä, että OES haluaa aaltovoimaloiden yleistyvän tulevaisuudessa, eikä sijoittajien mielenkiintoa saada pessimistisillä arvioilla.



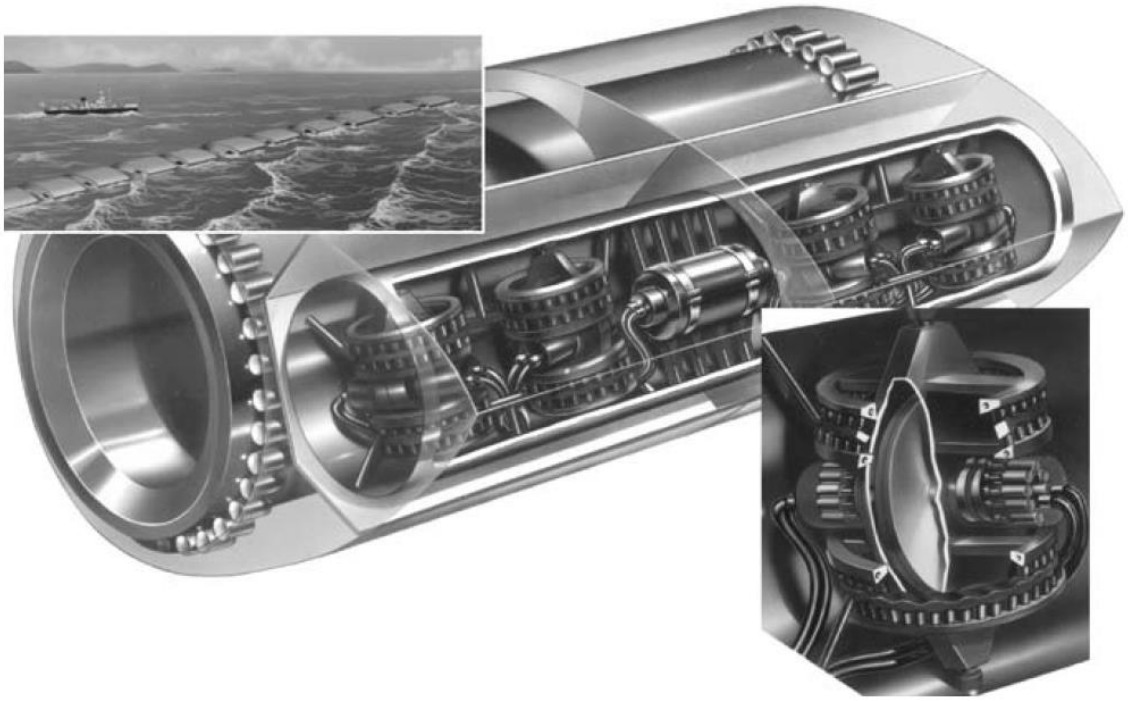
Kuva 14. Tuotantokustannuksien kehittyminen valmistetun laitostehon mukaan (OES 2017, 15.)



Kuva 15. Tuotantokustannuksien kehittyminen valmistetun laitostehon mukaan (JRC 2016, 15.)

6 TUOTANTOLAITOKSET

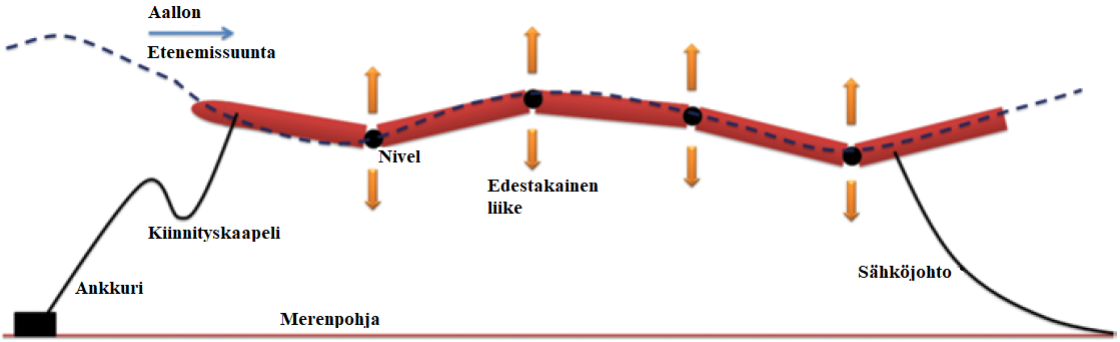
Sähkön tuotantoon ensimmäisiä aaltovoimaloita kehitettiin jo 1970-luvun Britanniassa. Laitokset olivat kyyneleen muotoisia kelluvia poijuja (kuva 16). Laitos sai nimensä keksijänsä Stephen Salterin mukaan Salter's Duckiksi. 1970-luvulla ei oltu totuttu hajautettuun energiantuottamiseen, vaan suuriin yksiköihin, jotka olivat parhaimmillaan yli 1000 MW:n laitoksia. Salter's Duck joutui kilpailemaan näiden laitosten kanssa ja siksi ensimmäistä aaltovoimapuistoa suunniteltiin jopa 600 MW suuruiseksi. Puistossa olisi ollut kymmeniä 45 metriä leveitä ja 60 metriä toisistaan olevia poijua rivissä. Voimalaitosta ei kuitenkaan ikinä rakennettu, koska todettiin helpommaksi panostaa ydinvoimaan, kuin kalliisiin laitoksiin, joiden toiminnasta ei ollut täyttä varmuutta. Karkea arvio Salter's Duckin kustannuksille olisi ollut noin 752 €/MWh. (Economist.) Vertaillun vuoksi ydinvoiman hinta 1980-luvun alun Britanniassa oli 91 €/MWh (IEA 2015, 105.) Suunnitelmistaan ja laboratoriotesteistään huolimatta Salter's Duck tuskin olisi ikinä saavuttanut lupaamiaan tehoja. Nykyään kehitteillä olevat aaltovoimapuistot ovat yltäneet parhaimmillaan yli 3 MW:n tehoihin.



Kuva 16. Salter's Duckin havainnekuva. Kehittäjä väitti, että kyseisellä muotoilulla voi kerätä 90% vastaan tulevan aallon energiasta (Cruz 2008, 244.)

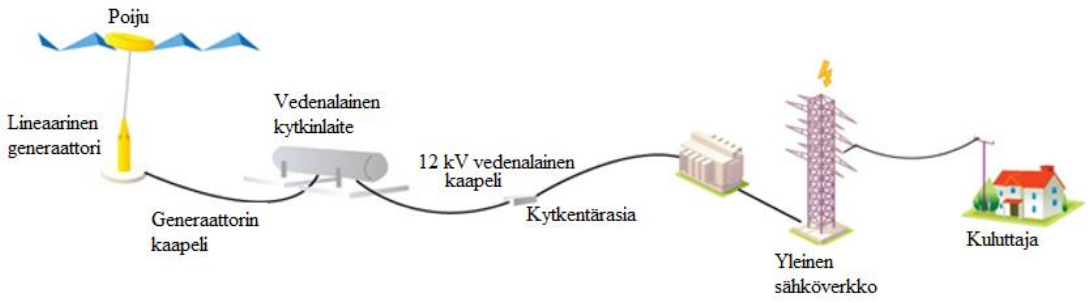
2000-luvun alussa kiinnostus aaltovoimaloita kohtaan heräsi uudestaan ja ympäri maailmaa nähtiin erilaisia testilaitoksia. Ensimmäinen kunnollinen aaltovoimapuisto

avattiin vuonna 2008 Portugalin rannikolle. Puiston yhteisteho oli 2,25 MW. (Irena 2014b, 12.) Aaltovoimalan oli kehittänyt Pelamis Wave Power niminen Skotlantilainen yritys. Yksittäisen voimalan nimi on Pelamis ja se on attenuator tyyppinen laitos (kuva 17). Se koostuu useista noin kolme metriä leveistä putkista, jotka on yhdistetty päistään toisiin samanlaisiin putkiin. Putket muodostavat pitkän kelluvaa käärmettä muistuttavan rakenteen, joka aallon kohdatessaan tekee aaltoilevaa liikettä. Aaltoileva liike saadaan muutettua sähköksi hydraulisen järjestelmän avulla. (Karimirad 2014, 93.) Portugalin taloudellisten ongelmien takia puisto jouduttiin sulkemaan kuukauden jälkeen käynnistämisestä.



Kuva 17. Palemis aaltovoimalan havainnekuva. Sähkö tuotetaan hydraulisella järjestelmällä, kun putket liikkuvat toisistaan eri suuntaan. (Karimirad 2014, 94)

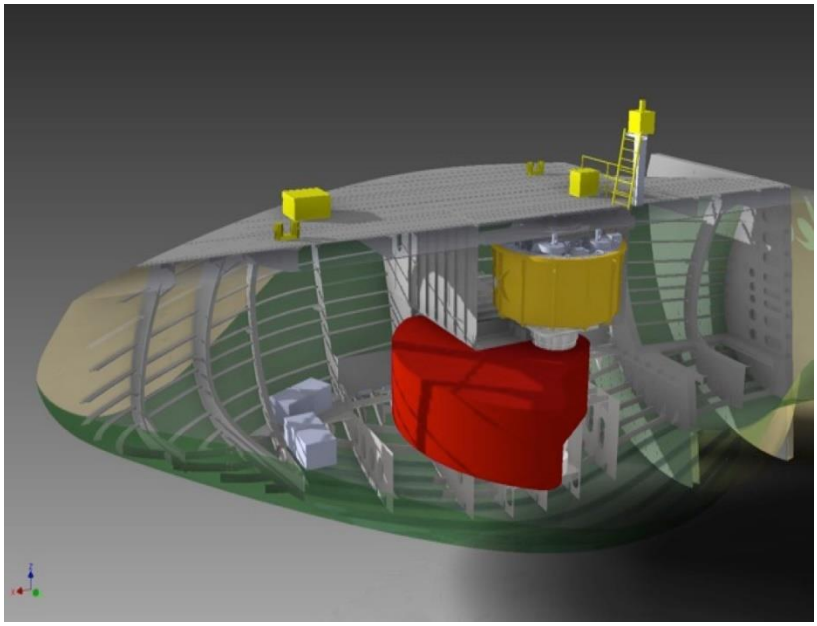
Ruotsin Sötenäsissä oli ensimmäinen pohjoismaiden verkkoon sähköä tuottava aaltovoimapuisto. Puisto ehti olla toiminnassa tammikuusta 2016 helmikuuhun 2017. Päärakennuttaja oli ruotsalainen Seabased yhdessä suomalaisen Fortumin ja ruotsin energiaviraston kanssa. Puisto koostui 36 pienemmästä voimalasta, joiden suunniteltu yhteiskapasiteetti oli 1 MW. Käytön aikana kuitenkin huomattiin, että kyseisistä laitoksista voisi parhaimmillaan tuottaa lähes 3 MW:n edestä sähköä. Laitoksen valmistajan laskelmien mukaan kyseisellä teknologialla saataisiin tuotantokustannukset alle 100 €/MWh. Kuvassa 18 on Seabasedin aaltovoimapuiston periaatekuva. Poijut on yhdistetty vedenalaiseen kytkinlaitteeseen, josta ne voi kytkeä yksitellen pois päältä esimerkiksi huoltotöiden ajaksi. (Seabased.)



Kuva 18. Seabasedin aaltovoimapuiston periaatekuva. Kaikki poijut on yhdistetty vedenalaiseen kytkinlaitteeseen. (Seabased)

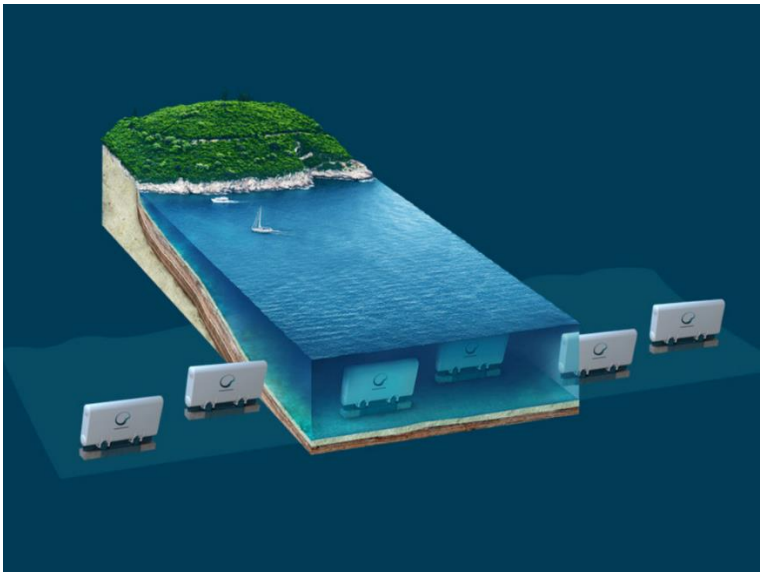
Suomalaisittain aaltovoimaan ollaan panostettu merkittävän paljon ottaen huomioon, että suomen aalto-olosuhteet eivät ole hyvät energian tuotantoon. Suomesta löytyy kaksi pitkälle edennyttä aaltovoimaloiden kehittäjää. Wello Oy ja Aw-Energy. Lisäksi Fortum on mukana rahoittamassa näitä suomalaisia ja muutamia ulkomaisia yrityksiä, kuten edellä mainittua Seabasedia.

Wello Oy on perustettu vuonna 2008 ja sillä on ehtinyt olemaan muutamia testilaitoksia Skotlannin rannikolla ja Kanarian saarilla. Kuvassa 19 on Wellon kelluva voimalaitosmalli, jonka nimi on Penguin. Laitos muistuttaa laivan nokkaa ja sisältää kallellaan olevan generaattorin. Aalto aiheuttaa voimalan muodosta johtuen keinuvan liikkeen, joka pyörittää generaattoria. Huhtikuussa 2017 Wello yhdisti voimalaitoksen Skotlannin sähköverkkoon Orkneyn saarilla. Voimalaitos todisti kykynsä toimimalla yhtäjaksoisesti yli 150 päivää ja selviytymällä hankalistakin olosuhteista. Joulukuussa 2017 Wello ilmoitti toimittavansa voimaloita Indonesiaan 10 MW:n edestä, joka on valmistuessaan maailman suurin aaltovoimapuisto. (Wello Oy.) Wello on saanut Euroopan Unionilta yli 10 miljoonaa euroa tukea ja hakee parhaillaan yksityisiä sijoittajia. Sijoittajille tarkoitetulla sivustolla Wellon edustaja kertoo voimalaitoksen kykenevän nykyisellään noin 200 €/MWh tuotantokustannuksiin ja Indonesia projektin aikana on tavoitteena laskea kustannukset alle 130 €/MWh. (Invesdor.)



Kuva 19. Wellon Penguin aaltovoimala. Aalto aiheuttaa pyörivän liikkeen alhaalla olevassa punaisessa massassa, joka vastaavasti pyörittää generaattoria (Invesdor.)

AW-Energy on vuonna 2002 perustettu aaltovoimaa tutkiva yritys. AW-Energyllä on ollut WaveRoller testilaitoksia Portugalin rannikolla. Lisäksi yritys on rakentanut aaltojen testausaltaan, jossa voi simuloida aaltoja ja testata voimaloiden prototyyppejä pienemmässä mittakaavassa. AW-Energy tekee yhteystyötä esimerkiksi Fortumin ja Wärtsilän kanssa. Kuvassa 18 on esitetty WaveRoller. Voimalat ankkuroidaan meren pohjaan ja siellä ne mukailevat aaltojen liikettä tuottaen samalla sähköä. (AW-Energy)



Kuva 20. AW-Energyn WaveRoller. Meren pohjaan kiinnitetyt lavat liikkuvat aaltojen tahtiin (AW-Energy.)

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia aaltovoiman tuotantokustannuksia ja mistä kustannukset muodostuvat. Lukijalle haluttiin antaa myös perustiedot aaltoenergiasta, potentiaalista energiantuotantoon ja tuotantomenetelmistä. Pääpaino työssä oli kuitenkin tuoda esille tuotantokustannuksien nykytilanne ja miten ne tulevaisuudessa mahdollisesti kehittyvät. Tietoa kerättiin energiaviranomaisten tutkimuksista ja kirjallisuudesta. Tuotantokustannuksista on paljon vaihtelevaa tietoa ja tämä pyrittiin tuomaan esille vertailemalla kyseisiä arvoja ja muodostamalla niistä keskiarvoja. Kustannuksia käsittelevissä kappaleissa kerrottiin tuotantokustannuksien laskentamenetelmästä, jota käytetään kaikissa energiantuotantomuodoissa. Kun laskentamenetelmä oli tuttu, käytiin sen eri osa-alueet läpi ja kuinka aaltovoimaloiden tapauksissa ne vaikuttavat lopputulokseen. Tuotantolaitokset kappaleessa haluttiin tuoda esille esimerkkejä historiallisista ja nykyisistä aaltovoimaloista.

Tuotantokustannukset muodostuvat investointikustannuksista ja käyttö- ja ylläpitokustannuksista. Suurin vaikuttava tekijä tuotantokustannuksiin on investointikustannukset. Aaltovoimalatekniikoita on monenlaisia, joten investointikustannukset vaihtelevat 2200 – 9000 €/kW välillä. Tulevaisuudessa investoinnit saadaan luultavasti laskemaan 2000 €/kW:n luokkaan. Alkuvaihetta kehitystä olevan laitoksen investointikustannukset laskevat moninkertaisesti sen aikana, kun laitos kehittyy kaupalliseen käyttöön sopivaksi. Käyttö- ja ylläpitokustannukset eivät ole niin merkittävä tekijä tuotantokustannuksia laskiessa. Niiden arvoksi saatiin 53 -290 €/kW vuoteen, joka on lähes vastaava merellä olevien tuulivoimaloiden kanssa.

Koska tuotantokustannuksista on paljon eri arvioita, laskettiin siitä suuntaa antava keskiarvo. Ensimmäiset kaupallisessa vaiheessa olevien aaltovoimaloiden tuotantokustannukset ovat keskiarvojen perusteella vuonna 2018 noin 280 €/MWh. Jos aaltovoimatekniikka kehittyy odotusten mukaan tulevien vuosien aikana, voidaan olettaa tuotantokustannuksien laskevan alle 100 €/MWh. Ruotsalainen Seabased mainostaa kykenevänsä jo nyt 100 €/MWh:n tuotantokustannuksiin ja Suomalainen Wello Oy uskoo laskevansa kustannuksensa seuraavien vuosien aikana 130 €/MWh:iin.

LÄHDELUETTELO

AW-Energy. viitattu 9.1.2018. luettavissa http://aw-energy.com/

Cruz João, 2008. Ocean Wave Energy, Current Status and Future Perspectives. Springer-Verlag Berlin Heideberg. 431s. ISBN 978-3-540-74895-3

Economist. viitattu 22.11.2017. http://www.economist.com/node/11482565

Furgo OCEANOR, World wave database. viitattu 12.3.2017. luettavissa http://www.oceanor.no/Services/Worldwaves/WW_database

IEA, 2015. Projected Costs of Generating Electricity. International Energy Agency, Pariisi Ranska. 213s.

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

Invendor, Wello – The power of waves. viitattu 9.1.2018. luettavissa https://www.invesdor.com/en/pitches/888

IRENA, 2014a. Ocean Energy Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook. IRENA the International Renewable Energy Agency. 60s.

IRENA, 2014b. Wave Energy Technology Brief. IRENA the International Renewable Energy Agency. 28s.

JRC, 2015. 2014 JRC Ocean Energy Status Report. Luxemburg Publications Office of the European union. 72s.

JRC, 2016. JRC Ocean Energy Status Report 2016 Edition. Luxemburg Publications Office of the European union. s59.

Karimirad Madjid, 2014. Offshore Energy Structures for Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 301s. ISBN 978-3-319-12175-8

OES, 2017. An International Vision for Ocean Energy. 28s.

SI Ocean, 2014. Wave and Tidal Energy Market Deployment Strategy for Europe. 54s.

Seabased. viitattu 9.1.2018. Luettavissa http://www.seabased.com/en/projects/sotenas-wave-pover

The Engineer. viitattu 22.11.2017 luettavissa https://www.theengineer.co.uk/issues/9-april-2007/stephen-salter-pioneer-of-wave-power/

Wello Oy. Viitattu 9.1.2018. luettavissa https://wello.eu/