Tuomas Siltala

Kelluvat merituulivoimalat verrattuna kiinteäpohjaisiin merituulivoimaloihin

Tekniikan ja innovaatiojohtami-
sen akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Tuomas Siltala
Tutkielman nimi: Kelluvat merituulivoimalat verrattuna kiinteäpohjaisiin merituulivoimaloihin
Tutkinto: Tekniikan kandidaatti
Oppiaine: Sähkö- ja energiatekniikka
Työn ohjaaja: Anne Mäkiranta
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** 32

TIIVISTELMÄ:

Tutkielman tavoitteena on tuoda esille merituulivoiman globaalia ja paikallista nykytilannetta sekä erityisesti tutkia ja vertailla kelluvien- ja kiinteäpohjaisten merituulivoimaloiden perustustyyppejä keskenään tietyistä näkökulmista. Tutkimuksella pyrittiin saatujen tietojen ja datan perusteella toteamaan, mikä perustustyyppi on paras millekin alueelle. Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Merituulivoiman nykytilanne on lupaava. Sen mahdollista potentiaalia on alettu ymmärtämään paremmin ja sillä tulee olemaan suuri rooli uusiutuvassa energiantuotannossa. Suomessakin on käytössä jo yksi merituulivoimapuisto ja uusia hankkeita suunnitellaan koko ajan lisää. Hankkeiden tarkempi suunnittelu voidaan toivottavasti aloittaa syksyllä 2025, jolloin valtioneuvoston tavoitteena olisi tehdä päätös ensimmäisistä kilpailutettavista hankealueista.

Työssä vertailtiin voimalatyyppejä hyötysuhteen, energiatehokkuuden, ympäristövaikutusten sekä kustannusten näkökulmasta. Voidaan todeta, että kiinteäpohjaiset voimalat soveltuvat paremmin matalille vesialueille niiden vakauden ja tasaisen energiantuotannon ansiosta. Syvemmille alueille sopii paremmin kelluvat merituulivoimalat, koska niitä ei tarvitse kiinnittää merenpohjaan. Kustannuksiltaan kiinteäpohjaiset voimalat ovat kalliimpia ja niiden asennusprosessi vaikuttaa suuresti asennusalueen ympäristöön, kuten merenpohjan rakenteeseen. Kelluvien voimaloiden ongelmana on sähkönsiirrosta aiheutuvat siirtohäviöt ja niiden vaikutukset voimalan tehoon sekä hyötysuhteeseen ja energiatehokkuuteen.

Tutkielman lopussa tuotiin esille voimalamallien nykyisiä käyttökohteita ja merituulivoiman edelläkävijöitä, joita ovat globaaleilla markkinoilla Kiina ja Euroopassa Saksa sekä Iso-Britannia. Esimerkiksi Skotlantiin rakennettiin vuonna 2017 Hywind-merituulivoimapuisto, joka on maailman ensimmäinen kelluva puisto. Tämä heijastaa sitä, kuinka merituulivoima vakiinnuttaa asemaansa pysyvänä energiantuotantomuotona nyt ja tulevaisuudessa.

AVAINSANAT: nykytilanne, kelluva merituulivoimala, kiinteäpohjainen merituulivoimala, hyötysuhde, energiatehokkuus, ympäristövaikutukset, kustannukset

Sisällys

1 Johdanto 5

2 Merituulivoiman yleiskatsaus 6

2.1 Globaali nykytilanne 6

2.2 Paikallinen nykytilanne 8

3 Kiinteäpohjaiset merituulivoimalat 10

3.1 Paaluperustus 11

3.2 Jacket-perustus 12

3.3 Gravitaatioperustus 13

3.3.1 Teräskuorirakenteinen gravitaatioperustus 13

3.3.2 Betonirakenteinen tai hybridigravitaatioperustus 14

4 Kelluvat merituulivoimalat 15

4.1 Puoliksi upotettava perustus 16

4.2 Spar-perustus 17

4.3 Jännitetty tuotantolautta (TLP) 18

5 Vertailu 19

5.1 Hyötysuhde ja energiatehokkuus 19

5.2 Ympäristövaikutukset 21

5.3 Kustannukset 23

5.4 Nykyiset käyttökohteet 25

6 Johtopäätökset 27

7 Yhteenveto 28

Lähteet 29

Kuvat

Kuva 1. Globaalin merituulivoiman kasvu vuosina 2014–2023 (WFO, 2024, s. 8). 7

Kuva 2. Suunnitellut merituulivoimahankkeet (Suomen uusiutuvat, 30.1.2025, s. 8). 9

Kuva 3. Merituulivoimalan rakenne (YVA, 2020, s. 21). 10

Kuva 4. Paaluperustus (Letcher, 2017, s. 231). 11

Kuva 5. Perinteinen jacket-perustus (Merz ja muut, 2018, s. 194). 13

Kuva 6. Teräskuorirakenteinen gravitaatioperustus 15 m vesisyvyydessä. Mitat viitteellisiä, esitetty Tahkoluodon rakennetun puiston mukaisesti (YVA, 2020, s. 23). 14

Kuva 7. Kelluvien merituulivoimaloiden kolme pääryhmää (Gomes ja muut, 2022, n.d.). 15

Kuva 8. Tuuliturbiini asennettuna yhden pylväsmäisen putken päälle vs. putkien keskipisteeseen (Gomes ja muut, 2022, n.d.). 16

Kuva 9. Siirtokaapelin pituuden vaikutus saatuun tehoon (IET, 2021, n.d.). 21

Taulukot

Taulukko 1. Kiinteäpohjaisten vs. kelluvien merituulivoimaloiden vuosittaiset käyttökustannusarviot kilowattia kohti (NREL, 2023, n.d.). 25

Lyhenteet

GW	gigawatti
MW	megawatti
kWh	kilowattitunti
m	metri
km	kilometri
AC	vaihtovirta
DC	tasavirta
Hz	taajuus
TLP	Tension Leg Platform

1 Johdanto

Fossiilisia polttoaineita pyritään jatkuvasti korvaamaan uusiutuvilla energialähteillä, jotka tukevat siirtymää kohti vihreää energiantuotantoa. Tällaisia energialähteitä ovat esimerkiksi aurinkovoima, biopolttoaineet, vesivoima ja tuulivoima (Euroopan unioni (EU), 2024, s. 1). Merellisten energiatuotantomuotojen potentiaalia ja käyttömahdollisuuksia on alettu hyödyntämään enemmän vasta kuluvan vuosikymmenen aikana. EU:n tekemässä katsauksessa (2024, s. 4) linjataan, että EU:n merellä tuotettavan uusiutuvan energian sähköntuotannon tulisi olla 60 GW vuonna 2030 ja 300 GW vuonna 2050. Kaikki tämä energia olisi merituulivoiman avulla tuotettua.

Merituulivoimalat ovat vakiinnuttaneet asemaansa merellisenä energiantuotantomuotona (Marine Spatial Planning (MSP), 2024, s. 9–10). Uusia merituulivoimapuistoja suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon rakennusalueen olosuhteet sekä merenpohjan ominaisuudet ja näiden pohjalta valita oikea voimalatyyppi. Sopivat olosuhteet ovat esimerkiksi Suomenlahden alueella, johon on suunnitteilla useita merituulivoimaprojekteja. Vaihtoehtoina ovat kelluva- tai kiinteäpohjainen merituulivoimala.

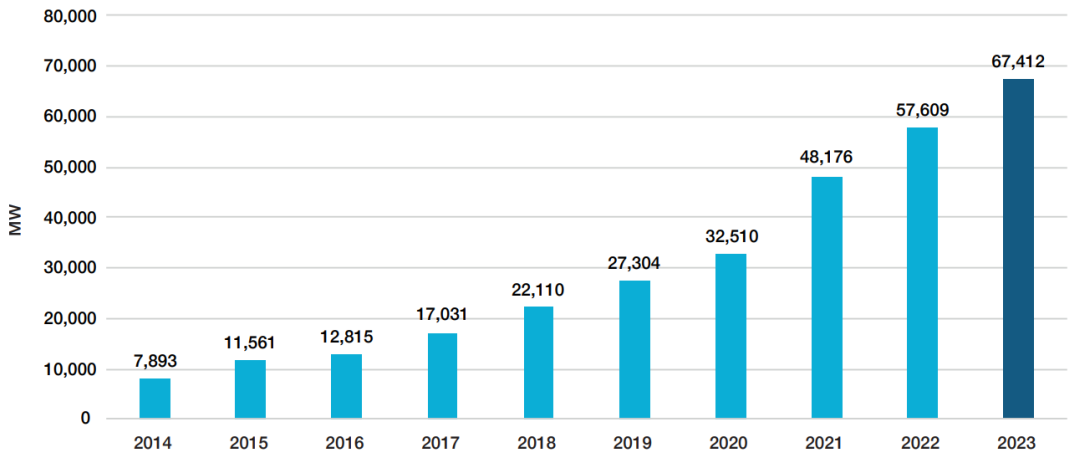
Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja tavoitteena on vertailla näitä kahta voimalatyyppiä sekä niiden eri malleja keskenään erityisesti hyötysuhteen, energiatehokkuuden, ympäristövaikutusten ja kustannusten näkökulmasta. Saatujen tietojen avulla todetaan, millainen voimalatyyppi on paras ratkaisu tietyissä meriolosuhteissa. Tutkielman ensimmäinen teorialuku johdannon jälkeen käsittelee merituulivoimaa sisältäen yleiskatsauksen globaaliin ja paikalliseen nykytilanteeseen. Seuraavissa luvuissa käydään läpi kelluvia- ja kiinteäpohjaisia merituulivoimaloita ja niiden eri perustuksia. Viidennessä luvussa vertaillaan kyseisiä merituulivoimalatyyppejä ottaen huomioon aiemmin mainitut näkökulmat. Kaksi viimeistä lukua koostuvat käsiteltyyn teoriaan ja dataan pohjautuvista johtopäätöksistä sekä tutkielman yhteenvedosta.

2 Merituulivoiman yleiskatsaus

Tällä hetkellä suurin osa käytössä olevista voimaloista on kiinteäpohjaisia merituulivoimaloita, mutta teknologisen ja tuotannollisen kehityksen ansiosta myös kelluvan merituulivoiman käyttäminen yleistyy. MSP:n raportin (2024, s. 9–10) mukaan merituulivoiman hyödyntäminen energiantuotannossa on nyt ja lähitulevaisuudessa tärkeää johtuen kasvavasta sähkön kysynnästä sekä kiristyvistä ilmastotavoitteista. Merituulivoimaa pyritään hyödyntämään erityisesti tuulisissa rannikko-olosuhteissa, jolloin niiden täysi potentiaali saadaan valjastettua.

2.1 Globaali nykytilanne

World Forum Offshore Windin (WFO) Global Offshore Wind-raportissa (2024, s. 3) käsitellään globaalia merituulivoiman kehitystä vuonna 2023. Kyseisenä vuonna pystytettiin 25 uutta merituulivoimalaa, joista 18 sijaitsee Aasiassa ja seitsemän Euroopassa. Näiden voimaloiden kokonaisteho on 9,8 GW. Tällöin kaikkien merituulivoimaloiden tuottama yhteisteho nousi 67,4 GW:iin. Hallitseva valtio merituulivoiman energiantuotannossa on Kiina, jossa tuotetaan melkein puolet (31,5 GW) kaikesta merituulivoiman tuottamasta energiasta. Raportissa mainitaan, kuinka Euroopan alueella tapahtui kehitystä erityisesti Ranskassa, joka vuonna 2023 melkein tuplasi merituulivoiman energiantuotantonsa 978 MW:iin. Suurin tähän mennessä rakennettu kelluva merituulivoimala otettiin myös käyttöön noin 140 km etäisyydellä Norjan rannikosta; sen tuotantoteho on 88 MW (WFO, 2024, s. 3). Kuvasta 1 näkyy selvästi, kuinka merituulivoiman osuus energiantuotannosta on moninkertaistunut reilussa vuosikymmenessä.



Kuva 1. Globaalin merituulivoiman kasvu vuosina 2014–2023 (WFO, 2024, s. 8).

Vaikka merituulivoiman valjastaminen hyötykäyttöön onkin yleistynyt ja sen potentiaali yhtenä osana uusiutuvaa energiantuotantoa on huomattu, on suunnitelluissa projekteissa ollut myös ongelmia. Uusia projekteja tai alueiden laajennuksia on jouduttu viivästyttämään tai jopa kokonaan perumaan riittämättömän tuen sekä kustannusinflaation takia (WFO, 2024, s. 4). Nämä syyt ovat saaneet kehittäjät tarkastelemaan ja miettimään uudelleen strategioita, joilla projektit saataisiin toteutettua onnistuneesti. Päättäjät yrittävät edistää tilannetta uusilla säädöksillä ja poliittisilla päätöksillä, mutta niiden vaikutusta ei voi vielä nähdä selvästi. On oleellista, että tällaisena epävarmana aikana ymmärretään hankkeiden riskit ja mahdollisuudet.

Vuonna 2023 myönnettiin 42 GW:n verran vuokrakapasiteettia uusille voimaloille ja vuoden 2024 ennuste oli, että kapasiteetti ylittäisi 70 GW (WFO, 2024, s. 4). Saksalainen energia-alan yhtiö RWE voitti vuonna 2023 vuokraoikeudet suurimpaan suunniteltuun merituulivoimapuistoon Japanin edustalla. Puiston tuotantoteho olisi toteutuessaan 684 MW. Suuri, lähes 70 % kasvuennuste kapasiteetissa vuodelle 2024 on seurausta jo vakiintuneilta sekä uusilta alan markkinoilta esimerkiksi Australian (9,2 GW), Intian (4,6 GW) ja Portugalin (3,5 GW) alueilla. Yhdysvaltojen oletetaan myös myöntävän vuokrakapasiteettia uusille voimaloille 16,8 GW:n verran, josta kelluvan merituulivoiman osuus olisi 2,7 GW. Alue sijaitsisi Oregonin rannikon edustalla.

Raportissa (WFO, 2024, s. 4) korostetaan, että on tärkeää huomioida projektien tarjouskilpailujen kiristyvät vaatimukset, jolloin parhaan tarjouksen valinnassa otetaan huomioon hinnan lisäksi myös tarjouksen laatu sekä mahdollisesti muitakin kriteerejä. Lisäksi raportissa kuvaillaan, kuinka puolet vuonna 2024 myönnetystä vuokrakapasiteetista valittiin tehdyn tarjouksen hinnan lisäksi jonkin toisen kriteerin perusteella, tai jopa jättämällä hinta kokonaan huomioimatta.

2.2 Paikallinen nykytilanne

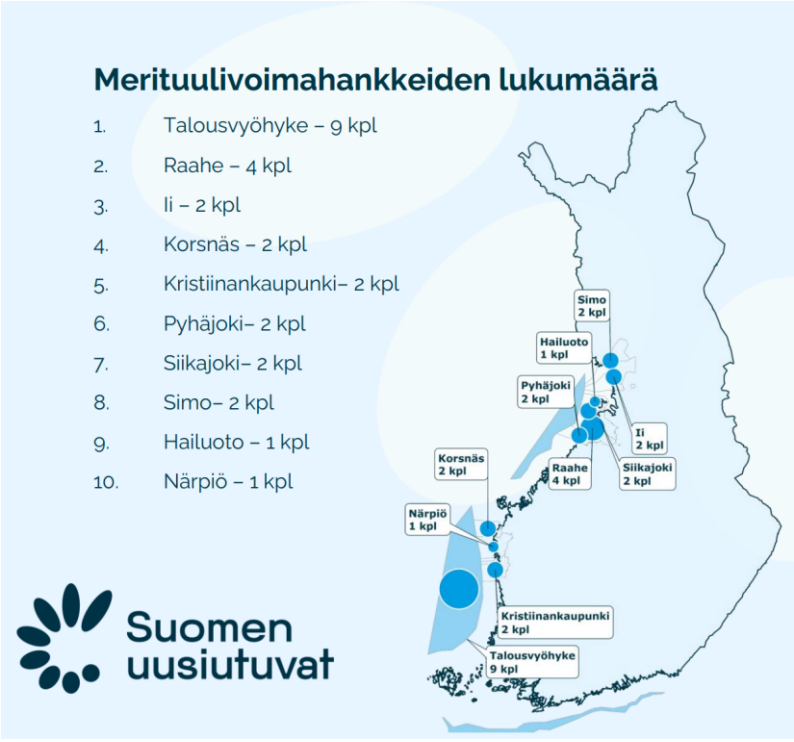
MSP:n raportti (2024, s. 19) käsittelee merituulivoiman tilannetta sekä sen kehitystä Suomen rannikkoalueilla. Vuonna 2017 otettiin käyttöön Suomen ensimmäinen ja tällä hetkellä ainoa käytössä oleva merituulivoimapuisto, joka sijaitsee Porin Tahkoluodossa. Puisto koostuu 11 voimalasta, joiden nimellisteho on 4,2 MW. Vuosituotannon arvioidaan olevan noin 155 GWh ja puiston kapasiteettikertoimen noin 43 %. Kapasiteettikertoimella kuvataan voimalan sähköntuotantoa vuositasolla suhteessa sen teoreettiseen maksimituotantoon (Suomen uusiutuvat, n.d.). Tahkoluodon merituulivoimapuistolle suunnitellaan parhaillaan laajennusta (MSP, 2024, s. 19), joka koostuisi alussa kahden voimalan demonstraatiohankkeesta. Näiden pohjalta saadaan tarkempaa tietoa alueella vallitsevien olosuhteiden vaikutuksista valittavan meriperustuksen malliin, merenpohjan rakennusmenetelmiin sekä uusien merituulivoimaloiden valittaviin mittaluokkiin.

Keväällä 2024 Suomen merialueille oli suunnitteilla kymmeniä merituulivoimaprojekteja (MSP, 2024, s. 19). Valtion omistamien aluevesien hankkeiden koordinoinnista ja esiselvitysvaiheesta vastaa Metsähallituksen Kiinteistökehitys. Esiselvityksen jälkeen valitaan kaupallinen kumppani toteuttamaan hanketta. Eri selvitysvaiheissa olevia hankkeita on käynnissä myös Suomen talousvyöhykkeellä (kuva 2).

Valtioneuvoston selvityksessä (2024, s. 21) käydään läpi Fingridin tekemää Merellä tuulee -skenaariota, jonka mukaan merituulivoiman rakentamisesta tulee koko ajan maatuulivoimaa kannattavampaa. Kokonaistuulivoiman kapasiteetin oletetaan kasvavan tasaisesti 1 GW vuodessa 2020-luvun loppupuolelle asti, jolloin ylitetään 10 000 MW.

Selvityksen mukaan vuoteen 2035 mennessä maa- ja merituulivoiman tuottamat kapasiteetit ovat yhtä suuria (10 000 MW) ja vuonna 2045 pelkästään merituulivoiman kapasiteetin ennustetaan olevan jo 20 000 MW, mikä on määrällisesti mitattuna kaksinkertainen maatuulivoimaan verrattuna. Energiantuotannon näkökulmasta ero tulee olemaan vielä suurempi.

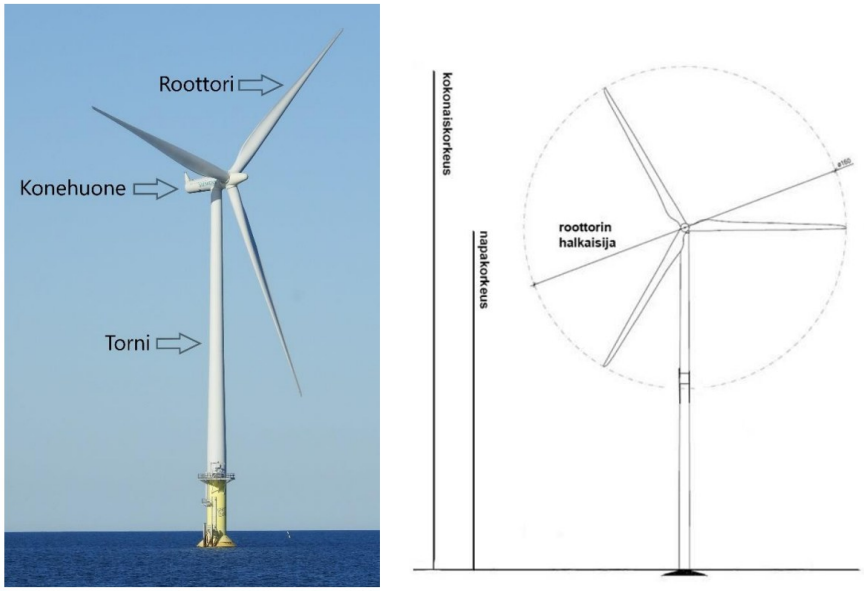
Korsnäsin edustalle oli vuonna 2023 suunnitteilla nimellisteholtaan 2500 megawatin suuruinen merituulivoimapuisto, jonka kilpailutuksesta vastasi Metsähallitus (Valtioneuvosto, 2024, s. 21). Metsähallituksen toimesta oli tulossa kilpailutukseen vielä neljä uutta hanketta vuosina 2023 ja 2024. Näiden alueiden myötä olisi tavoitteena kasvattaa Suomen merituulivoiman tuotantoa yhteensä 5,5 GW.



Kuva 2. Suunnitellut merituulivoimahankkeet (Suomen uusiutuvat, 30.1.2025, s. 8).

3 Kiinteäpohjaiset merituulivoimalat

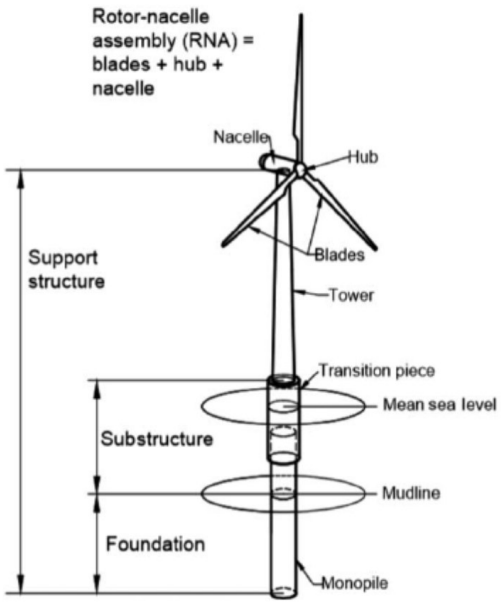
Suomen Hyötytuuli Oy:n tekemä ympäristövaikutusten arviointiohjelma YVA (2020, s. 20) kertoo merituulivoimaloiden koostuvan tornista, konehuoneesta eli nasellista, roottorista sekä merenpohjaan ulottuvista meriperustuksista (kuva 3). Konehuoneeseen kuuluu voimalan ohjausjärjestelmä, voimalaitos sekä vaihteisto (MSP, 2024, s. 15). Tornin tehtävä on kannatella voimalan komponentteja, kuten juuri konehuonetta ja roottoreita. Roottorin lavat pyörivät tuottaen liike-energiaa, jonka ne muuntavat roottorin pyörimisliikkeeksi. YVA:n (2020, s. 20) kuvauksen mukaan voimalat ovat kooltaan suuria: kokonaiskorkeus on noin 260 m, napakorkeus 150 m ja roottorin halkaisija 220 m. Voimaloiden nimellisteho on 10–12 MW. Rakennukseen valittavan perustuksen tyyppi riippuu paljon merenpohjan ominaisuuksista. Seuraavissa kappaleissa käsitellään eri olosuhteisiin sopivia perustusratkaisuja.



Kuva 3. Merituulivoimalan rakenne (YVA, 2020, s. 21).

3.1 Paaluperustus

Paaluperustus (engl. monopile) on tunnetuin ja yleisin merituulivoimaloiden perustustyyppi; noin 80 % kaikista merituulivoimaloista on paaluperustuksella rakennettuja (Gupta & Basu, 2020). Tämä johtuu mallin yksinkertaisesta rakenteesta, valmistuksesta ja asennusprosessista. Rakenteeltaan merenpohjaan juntattava perustus koostuu ontosta, ympyränmuotoisesta teräspaalusta, joka on halkaisijaltaan noin 5 m. Letcherin (2017, s. 234) mukaan paalu asennetaan 25–40 metrin syvyyteen. Tämän jälkeen teräspaaluun kiinnitetään teräsputki (engl. transition piece), johon liitetään voimalan torni (kuva 4). Teräsputki vakauttaa voimalaa niin, että sitä voidaan lähestyä veneellä ja että sen tikkaita voidaan käyttää turvallisesti esimerkiksi huoltotöitä varten (Letcher, 2017, s. 234).



Kuva 4. Paaluperustus (Letcher, 2017, s. 231).

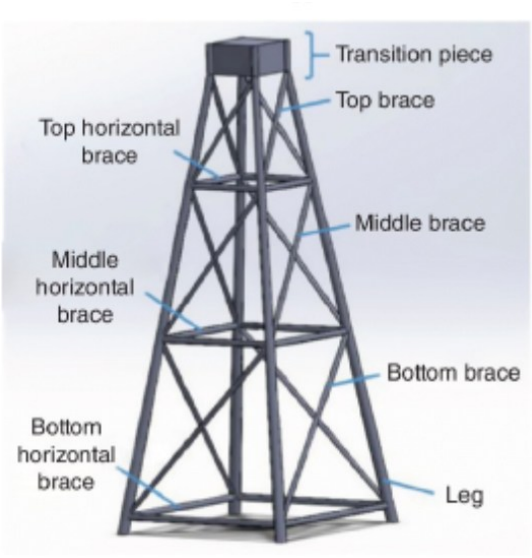
Letcher (2017, s. 234) kertoo, että perustus yleensä juntataan kiinni merenpohjaan käyttämällä höyryllä tai hydraulisesti toimivaa vasaraa. Tämä asennustapa on standardina useimpien voimaloiden rakentamisessa. Perustusten ohjaus ja hallinta tapahtuu käyttämällä kelluvia aluksia tai nostoaluksia, jotka on varustettu suurilla nostureilla ja

poraustarvikkeilla. Junttaamiseen voidaan käyttää apuna drive-drill-drive (3D) -menetelmää tilanteissa, joissa asennusalue koostuu kovasta savesta tai kivestä. Tällöin teräspaalu ei pysty läpäisemään merenpohjaa yksinään. 3D -menetelmä yhdistää poran ja vasaran käytön merenpohjan läpäisyssä, mikä säästää aikaa sekä kustannuksia vähentämällä asennukseen tarvittavia materiaaleja, kuten betonia tai laastia (Acteon, 2025). Letcherin (2017, s. 235) mukaan paaluperustuksen asennus aiheuttaa paljon melua, minkä takia nasellista ja roottorista koostuva turbiini kiinnitetään voimalaan vasta perustuksen valmistuttua.

3.2 Jacket-perustus

Vesialueille, jotka ovat syvyydeltään 50–80 metriä, soveltuu parhaiten jacket-perustus (MSP, 2024, s. 15). Perustus koostuu kolmesta tai neljästä pitkästä, merenpohjaan upotettavasta nelikulmaisen tai kuusikulmaisen rakenteen muodostavasta teräspylväästä (kuva 5). Pylväiden rakenne on joko avoin tai umpinainen ja niiden pituus riippuu paljon tuuliturbiinin mallista sekä meren syvyydestä. Perustus juntataan kiinni merenpohjaan samalla tavalla kuin paaluperustus, eli poraamalla tai vasaroimalla. Raportin mukaan avoimen teräspylvään rakenne mahdollistaa veden virtaamisen rakenteen läpi, mikä vähentää ympäristövaikutuksia.

Merz ja muut (2018, s. 194) tuovat teoksessaan esille perustustyypin etuja sekä siihen liittyviä haasteita. Teoksen mukaan jacket-perustusta käyttämällä voidaan säästää materiaalikuluissa johtuen sen geometrisesti tehokkaammasta muotoilusta. Osasyynä mallin käyttöön syvemmillä merialueilla on niiden parempi kustannustehokkuus verrattuna paaluperustukseen. Haasteina mallin suunnittelussa on kuluman syntyminen rakenteen liitoksissa sekä sen valmistettavuus. Mallista pyritään tekemään kilpailukykyisempi optimoimalla kevyempi tai helpommin valmistettava rakenne. Tavoitteena on myös parantaa tarkkuutta voimalan kuormitusennusteissa, jotta voidaan minimoida mallin käyttöön liittyvät riskit ja epävarmuudet (Merz ja muut, 2018, s. 194).



Kuva 5. Perinteinen jacket-perustus (Merz ja muut, 2018, s. 194).

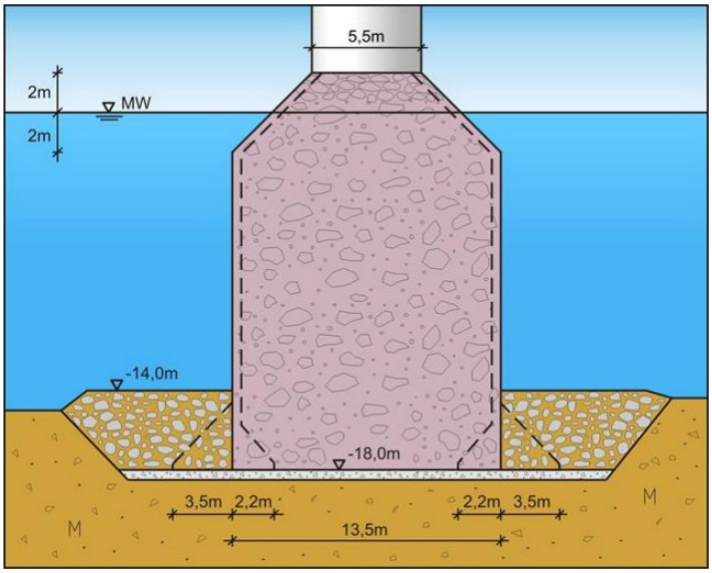
3.3 Gravitaatioperustus

Gravitaatio- eli painovoimaperustuksen perustustapa pohjautuu nimensä mukaisesti painovoimaan (MSP, 2024, s. 15). Perustuksen rakenne on yleensä betonia tai terästä, joka pysyy paikallaan painovoiman avulla. Perustusalueella tulee olla kiinteä ja tasainen merenpohja, jota voi olla tarpeen valmistella asennusta varten esimerkiksi ruoppaamalla tai lisäämällä pohjalle mursketta tai soraa. Raportissa todetaan, kuinka perustusta suunniteltaessa on huomioitava merituulivoimalan koko, koska yksi perustuksen tehtävistä on vastustaa voimalan liikettä. On tärkeää huomioida myös voimalan asennusalueella vallitsevat aalto-, jää- ja syvyysolosuhteet. Perustustyyppi on toimiva alueilla, joilla ilmenee suuria jääkuormia, kuten Suomen aluevesillä.

3.3.1 Teräskuorirakenteinen gravitaatioperustus

Perustus koostuu kiviaineksella täytetystä ja jäykistetystä teräsrakenteesta, joka muistuttaa malliltaan lieriön ja katkaistun kartion yhdistelmää (YVA, 2020, s. 23–24). Sen pohjassa on rengasmainen antura, jonka päällä on mursketta sekä eroosiosuojaus (kuva 6). Jään rakenteelle aiheuttamaa kuormitusta pienennetään vesirajassa olevalla kartiolla. Perustuksen teräksisen kuoriosan rakentaminen tapahtuu mahdollisuuksien mukaan

maalla jo olemassa olevissa rakennuspaikoissa. Tällöin perustamisella olisi pääosin vaikutuksia vain merikuljetuksiin, pohjan muokkaamiseen sekä asennuksen eri vaiheisiin. Esimerkiksi Tahkoluodon merituulivoimapuistossa perustustyyppiä käytetään 8–15 metrin syvyyden voimaloissa, jotka ovat teholtaan 2 MW:n ja 4 MW:n kokoluokkaa. YVA:ssa mainitaan, että Tahkoluodon syvemmällä sijaitsevalle laajennusalueelle suunnitellaan 11–16 MW kokoluokan voimaloita, joiden teräsrakenteen halkaisija olisi 30 metriä ja teräsanturan ulkohalkaisija noin 40 metriä.



Kuva 6. Teräskuorirakenteinen gravitaatioperustus 15 m vesisyvyydessä. Mitat viitteellisiä, esitetty Tahkoluodon rakennetun puiston mukaisesti (YVA, 2020, s. 23).

3.3.2 Betonirakenteinen tai hybridigravitaatioperustus

Betonirakenteinen perustus muistuttaa paljon teräskuorirakenteista perustusta rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan (YVA, 2020, s. 24). Hybridigravitaatioperustuksen massiiviosa, eli merenpohjassa oleva perustus, koostuu betonista ja varsi teräksestä. Ulkomitoiltaan molemmat mallit ovat samaa luokkaa teräskuorirakenteisen perustuksen kanssa.

4 Kelluvat merituulivoimalat

Gomesin ja muiden (2022, n.d.) mukaan tuulienergian tuotannon kustannukset per kilowattitunti (kWh) ovat nopeassa laskussa. Erityisesti merituulivoiman suosio lisääntyy jatkuvasti, koska sillä ei ole samanlaisia rajoitteita verrattuna maatuulivoimaan, kuten riittävät resurssit ja ympäristöön liittyvät syyt. Gomes ja muut (2022, n.d.) toteavat juuri kelluvien merituulivoimaloiden kiinnostavan alan yrityksiä. Tämä johtuu siitä, että ne voidaan sijoittaa suoraan alueille, joissa tuulennopeus on jatkuvasti korkea, mikä takaa voimaloiden hyvän energiatehokkuuden. Kelluvien voimaloiden mallit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään niiden perustusmallin pohjalta: puoliksi upotettava, spar-perustus ja jännitetty tuotantolautta (TLP). Oikean mallin valinta riippuu asennustavasta, vesisyvyydestä, tasaisuudesta, ympäristövaikutuksista sekä ylläpito- ja huoltokustannuksista. Kuvassa 7 näkyy voimaloiden kolmen pääryhmän rakenteet.

Kuva 7. Kelluvien merituulivoimaloiden kolme pääryhmää (Gomes ja muut, 2022, n.d.).

4.1 Puoliksi upotettava perustus

Perustus koostuu useasta suuresta pylväsmaisesta putkesta, jotka on yhdistetty toisiinsa putkimaisilla jäsenillä (Gomes ja muut, 2022, n.d.). Pylväiden kelluva osa takaa sen, että voimala ei heilu vaan pysyy vakaana. Perustus kiinnitetään merenpohjaan ankkurointijärjestelmällä, johon kuuluvat pitkät, kierrerakenteiset ja painavat teräsketjut. Nämä pitävät kelluvan alustan paikallaan. Puoliksi upotettavan perustusmallin hyödyt korostuvat tuulivoimalan vakauden takaamisessa ja matalan vesisyvyyden tarpeessa. Mallia pidetään siksi yhtenä soveltuvimmista erilaisille merialueille.

Gomes ja muut (2022, n.d.) kertovat, että tuuliturbiini voidaan asentaa yhden kelluvaan perustaan kuuluvan pylväsmäisen putken päälle (kuva 8). Toinen ratkaisu on sijoittaa tuuliturbiini pylväsmäisten putkien keskipisteeseen ja tukea rakennetta sivuttaistuilla. Perustus on kelluvista voimalatyypeistä suosituin johtuen sen vakiintuneesta suunnittelumenetelmästä ja merelliseen öljyteollisuuteen pohjautuvasta valmistuskokemuksesta.

Kuva 8. Tuuliturbiini asennettuna yhden pylväsmäisen putken päälle vs. putkien keskipisteeseen (Gomes ja muut, 2022, n.d.).

Toinen tunnettu puoliksi upotettavan perustuksen malli on ponttoniperustus (Gomes ja muut, 2022, n.d.). Perustus pysyy vakaana jakautuneen nosteen ansiosta. Kiinnitys tapahtuu perinteisillä ketjuankkureilla. Etuna mallissa on helppo asennus ilman siihen erikoistunutta alusta sekä sen sopeutuvuus geologisesti erilaisiin merenpohjiin. Yksi sen huonoista puolista on alttius kallistus- ja keinumisliikkeille, jonka takia mallia voidaan käyttää vain rauhallisissa meriolosuhteissa.

4.2 Spar-perustus

Kelluva spar-perustus on rakenteeltaan pitkä teräs- tai betonisylinteri, jolla on pieni säde (Gomes ja muut, 2022, n.d.). Heidän mukaansa perustus painotetaan joko vedellä tai kiinteällä materiaalilla, jotta sen painopiste pysyy nosteen keskipisteen alapuolella. Perustuksen luoma oikaisumomentti ja korkea hitausvastus takaavat sen, että tuuliturbiini kelluu veden pinnalla ja pysyy pystysuorassa kallistuvissa ja keinuvissa liikkeissä. Veden pinnan alla oleva perustus on kooltaan suurempi tai yhtä suuri kuin turbiinin napakorkeus merenpinnan yläpuolella. Tällä taataan voimalan stabiilisuus ja minimoidaan sen pystysuuntainen liike.

Gomesin ja muiden (2022) raportissa nostetaan esille, että perustuksen käyttö on mahdollista vain yli 100 metrin vesisyvyyksissä, koska perustuksen pohjan ja merenpohjan välinen riittävä etäisyys on välttämätön ankkuroinnin onnistumiseksi. Ankkurointiin käytetään joko kireää tai kaarimaista ankkurointijärjestelmää. Kireä ankkurointijärjestelmä koostuu synteettisistä kuiduista tai teräsvaijerista, joka nosteen ja ankkurin avulla ylläpitää korkeaa jännitystä voimalan vakauttamiseksi. Mallin heikkoutena pidetään sen soveltuvuutta ainoastaan syville vesialueille ja sen hankalaa asentamista, johon tarvitaan siihen erikoistunutta alusta (Gomes ja muut, 2022, n.d.).

4.3 Jännitetty tuotantolautta (TLP)

Gomes ja muut (2022, n.d.) kuvailevat TLP-perustuksen koostuvan riittävästä nosteesta, jota rajoittaa TLP-ankkurointijärjestelmä. Perustukseen kuuluu matala syväys, suuri keskipylväs ja upoksissa olevat varret, joihin alustan kiinnitysköydet on liitetty. TLP-perustuksen toiminta perustuu siihen, että syntyvä noste syrjäyttää painovoiman pitäen kiinnitysköydet jatkuvasti kireänä. Ankkuri on rakenteeltaan painovoimaperusteinen, paalutettu tai imukiinnitteinen. Perustus ei reagoi aaltoihin yhtä dynaamisesti kuin muut kelluvat rakenteet ja sen valmistaminen tapahtuu maalla, jotta vältytään logistisilta ongelmilta. Gomes ja muut (2022, n.d.) kertovat ongelmaksi mallin paikkariippuvaisuuden johtuen ankkureiden vaatimasta tietynlaisesta merenpohjan rakenteesta. Mallia pidetään tähän mennessä vähiten teknologisesti kehittyneenä verrattuna muihin kelluviin merituulivoimalaperustuksiin.

5 Vertailu

Sopivimman voimalatyypin valitsemiseen vaikuttaa monta eri tekijää. On otettava huomioon esimerkiksi rakennusalueen tuuliolosuhteet, syvyys ja merenpohjan ominaisuudet. Voimalan rakentaminen lisää myös ympäristöpäästöjä, jotka vaikuttavat merialueen ekosysteemiin. Voimaloita on tärkeää vertailla keskenään aluekohtaisesti ja saatujen tulosten pohjalta valita sopivin vaihtoehto.

5.1 Hyötysuhde ja energiatehokkuus

Tuulivoimaloiden hyötysuhteen määrittämiseen käytetään Betzin lakia, joka kuvaa teoreettista maksimia siitä, kuinka suuri osa ilmavirrasta voidaan muuttaa energiaksi (Villanueva ja Feijóo, 2010). Lain mukaan hyötysuhteen prosentuaalinen maksimi on noin 59 %, mutta käytännön olosuhteissa hyötysuhteeksi arvioidaan noin 50 % (Mäkiranta, 2023). Hyötysuhde saadaan Tekniikan Kaavaston (2022, s. 92) mukaan laskettua kaavalla

$$\eta = \frac{\mathrm{P}_{anto}}{\mathrm{P}_{otto}}, \tag{1}$$

missä antoteho on tässä tapauksessa turbiinin tuottama teho ja ottoteho on tuulen sisältämä teho. Vaasan Sähkö (15.9.2023) kertoo energiatehokkuuden tarkoittavan yksinkertaisesti energian tuottoa ja käyttöä mahdollisimman tehokkaasti – tavoitteena on tuottaa energiaa vain käyttötarpeen verran.

Vallitsevilla tuuliolosuhteilla on suuri vaikutus merituulivoimalan hyötysuhteeseen. Syvemmillä merialueilla, kauempana rannikosta, tuulennopeus on tasainen ja nopea, jolloin voimala toimii optimaalisella teholla. Gomes ja muut (2022, n.d.) tuovat raportissaan esille, kuinka juuri kelluvat merituulivoimalat ovat toimiva ratkaisu syvillä alueilla. Yli 100 metrin syvyyksille spar-perustus on hyvä valinta riittävän hyötysuhteen takaamiseksi. Matalammissa syvyyksissä ja rannikon läheisyydessä tuulennopeudet ovat epätasaisempia ja hitaampia johtuen maastonmuotojen vaikutuksista, jolloin

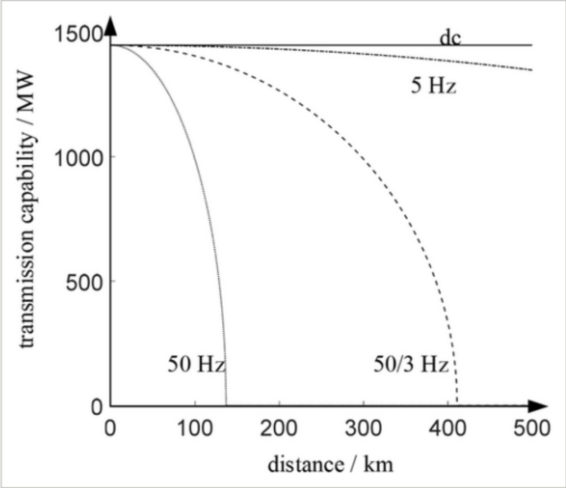
energiantuotanto ja hyötysuhde on alhaisempi. Tällaisiin olosuhteisiin soveltuu tiettyyn pisteeseen asti puoliksi upotettava perustus, mutta yleisesti ratkaisuna näissä tilanteissa on kiinteäpohjainen merituulivoimala. Ne on kiinnitetty tukevasti merenpohjaan, mikä takaa niiden vakauden. Voimalan hyötysuhde ja tehokkuus ei siis kärsi esimerkiksi perustuksen kallistumisen tai liikkeen seurauksena. Kuten Letcher (2017, s. 234) mainitsee, esimerkiksi 25–40 metrin syvyydessä suositaan paaluperustusta.

Edwards ja muut (2023, n.d.) käsittelevät artikkelissaan kelluvia merituulivoimalatyyppejä vakauden sekä kallistumisen näkökulmasta. Heidän mukaansa monien alan yritysten suunnittelutavoitteena on rajoittaa voimaloiden nousuliikettä tai voimalan nasellin kiihtyvyyttä käyttöolosuhteissa. Tämän lisäksi tavoitteena on myös minimoida perustusten liikettä kaikilla tasoilla. Puoliksi upotettavan perustuksen etuna on vähäinen kallistus- ja heiluntaliike, jolloin perustus pysyy vakaana. Haasteena on muihin voimalatyyppeihin verrattuna aaltojen aiheuttama pystysuuntainen liike, millä on vaikutusta tasaiseen energiantuotantoon. Spar- ja TLP-perustusten pystysuuntainen liike on sen sijaan vähäistä, mutta ongelmina ovat perustuksen kallistuminen ja keinahtelu (spar) sekä paikkariippuvuus (TLP).

Merituulivoimaloiden tuottama sähkö siirretään mantereelle merenpohjassa kulkevien sähkökaapeleiden avulla (MSP, 2024, s. 17). Mantereella sähkö siirtyy sähköasemalle, jossa se muunnetaan jännitteeltään ja taajuudeltaan valtakunnalliseen sähköverkkoon sopivaksi. Sähkönsiirto tapahtuu joko vaihtovirralla (AC) tai tasavirralla (DC). Kelluvat voimalat sijaitsevat kauempana rannikosta, joten ne vaativat myös pidemmät siirtokaapelit. Tämä tarkoittaa mahdollisesti suurempia sähkönsiirtohäviöitä kuin lähempänä rannikkoa sijaitsevilla kiinteäpohjaisilla voimaloilla, mikä vaikuttaa suoraan energiatehokkuuteen.

Li ja muut (2021) käsittelevät julkaisussaan AC- ja DC-yhteyksien sähkönsiirtokykyä. He mainitsevat, että taajuudeltaan 50 Hz olevan AC-yhteyden käyttö on mahdollista 140 km etäisyydelle rannikosta ilman tarvetta loistehon kompensoinnille, joka vaikuttaisi

voimalan energiatehokkuuteen. DC-yhteydellä on paljon parempi siirtokyky erityisesti pitkillä matkoilla johtuen sen pienemmistä siirtohäviöistä. Siksi DC-yhteys on hyvä valinta kelluvien merituulivoimaloiden sähkönsiirrolle. Kuvasta 9 näkyy, kuinka siirtokaapelin pituus vaikuttaa saatuun tehoon.



Kuva 9. Siirtokaapelin pituuden vaikutus saatuun tehoon (IET, 2021, n.d.).

5.2 Ympäristövaikutukset

Ennen uuden merituulivoimapuiston rakentamista tulee tehdä kattava arviointi sen ympäristövaikutuksista. Arviointi perustuu YVA-lakiin ja -asetukseen ja se toteutetaan tapauskohtaisesti hanke kerrallaan (MSP, 2024, s. 46). Tavoitteena on ottaa ympäristö huomioon hankkeen suunnittelussa ja päätöksenteossa. YVA-menettelyssä keskitytään kaikista merkittävimpiin osa-alueisiin, joita ovat esimerkiksi hankkeen vaikutukset kalastoon tai kalastukseen, ekosysteemiin, meriliikenteeseen, merenpohjan olosuhteisiin ja ilmastoon. Menettely tehdään aina vähintään 10 merituulivoimalan ja kokonaisteholtaan 45 MW:n hankkeissa.

MSP:n raportti (2024, s. 47) käsittelee yleisesti merituulivoimahankkeiden vaikutuksia meriluontoon. Hankkeen jokainen vaihe rakennuksen aloittamisesta sähkönsiirtoon vaikuttaa niin elolliseen kuin elottomaan luontoon. Rakentamisen yhteydessä tulee tehdä tilaa uusille voimaloille sekä sähköasemille, mikä edellyttää merenpohjan muokkausta.

Tämä tuhoaa alueella olevaa eliöstöä sekä muuttaa merenpohjan rakennetta pysyvästi, mikä taas voi muuttaa alueen virtauksia. Veteen mahdollisesti vapautuu haitallisia aineita ja vesi voi samentua rakentamisen seurauksena johtuen sedimenttikerroksen häiriintymisestä. Raportti kuvailee, kuinka tämä voi vaikuttaa alueen ravintoverkkoihin ja sitä kautta koko vesiekosysteemiin. Muokkaamisella voi olla positiivisiakin vaikutuksia, kuten uusien kasvualustojen syntyminen merenpohjan lajeille. Merkittävimmät vaikutukset painottuvat hankkeen rakennusvaiheeseen, mutta suurin osa, noin 70 %, ajoittuu tuotantovaiheeseen.

Merituulivoimaloista aiheutuu myös meluhaittoja, jotka vaikuttavat Itämeressä eläviin merinisäkkäisiin (MSP, 2024, s. 47). Esimerkiksi hylkeet ja valaat kommunikoivat ja saalistavat äänen avulla, jota voimaloista aiheutuva melu haittaa merkittävästi. Meluhaittaa on eniten rakennusvaiheessa, jolloin merinisäkkäät välttävät alueella liikkumista. Käytön aikana meluhaitta on vähäisempää, mikä mahdollistaa nisäkkäiden ravinnonhankinnan voimalan lähiympäristössä.

Kiinteäpohjaisten merituulivoimaloiden ympäristövaikutuksia ovat esimerkiksi aiemmin mainitut merenpohjan muokkautuminen sekä rakentamisen ja käytön aiheuttamat meluhaitat. Rezaei ja muut (2023, n.d.) mainitsevatkin kiinteäpohjaisten voimaloiden suurimmaksi ongelmaksi niiden rakennusvaiheen vaikutukset paikalliseen ympäristöön ja ekosysteemiin. Haittana ovat muun muassa elinympäristön häviäminen, lintujen törmäykset turbiineihin, korkea äänitaso sekä voimaloiden aiheuttama sähkömagneettinen häirintä, joka voi häiritä luonnollisesti olemassa olevia sähkömagneettisia kenttiä. Voimalan osissa, jotka ovat kosketuksissa suolaisen meriveden kanssa, voi tapahtua korroosiota, josta syntyy metallipäästöjä meriveteen sekä sedimenttikerroksiin. Pitkällä aikavälillä tätä pidetään uhkana alueen meriympäristölle.

Kelluvien merituulivoimaloiden ympäristövaikutuksia pidetään kiinteäpohjaisia vähäisempinä (Vaasan ammattikorkeakoulu (VAMK), 2024). Kelluvat voimalat pysyvät paikallaan ankkurin avulla, jolloin pohjan rakennetta ei tarvitse muokata niin paljon. Tästä

syystä asennuksen meluhaitat ja sen seurauksena vaikutukset alueen eliökantaan ovat vähäisemmät. Weinzettelin ja muiden (2009, n.d.) mukaan kelluvien voimaloiden rakennukseen tarvitaan kuitenkin enemmän materiaaleja, pääasiassa terästä ja betonia. Materiaalien tuotanto- ja rakennusvaiheet ovat päästömäärältään hankkeen suurimmat, joten on tärkeää arvioida ympäristövaikutuksia siirryttäessä syvemmille vesialueille.

Asentaminen ja huoltotoimenpiteet vaativat alusten, lauttojen tai helikopterien käyttöä, koska voimalat sijaitsevat kaukana rannikosta (Weinzettel ja muut, 2009, n.d.). Voimalan osien rakennus tapahtuu rannikolla, josta ne kuljetetaan asennusalueelle hinausveneellä. Pitkän kuljetusmatkan, asentamisen ja huoltotoimenpiteiden ympäristövaikutukset liittyvät pääosin suureen polttoaineen ja energian kulutukseen.

Voimalan elinkaaren lopussa turbiini puretaan ja suurin osa sen materiaaleista kierrätetään (Weinzettel ja muut, 2009, n.d.). Kierrätysmateriaaleja käytetään uusien rakennusmateriaalien valmistuksessa, minkä avulla vähennetään ympäristövaikutuksia. Haasteena on yhä ratkaista, kuinka kasvaneet materiaalivaatimukset sekä erilainen asennustapa vaikuttavat voimalan kokonaiselinkaareen ja että pystyykö voimakkaiden tuulien aikaansaama korkea sähköntuotanto kompensoimaan syntyneitä ympäristövaikutuksia.

Rezaei ja muut (2023, n.d.) tuovat esille, että vaikka merituulivoiman vaikutukset väestötasolla ovat vielä epäselviä, on voimaloiden vaikutukset ympäristöön suhteellisen pieniä. He mainitsevat myös, että pitkän aikavälin seurantaohjelmat ovat välttämättömiä, kun arvioidaan toipumista lyhyen aikavälin vaikutuksista.

5.3 Kustannukset

Johnston ja muut (2020, n.d.) käsittelevät artikkelissaan merituulivoiman kustannuksiin liittyviä haasteita. He kertovat, kuinka merituulivoimaa käyttämällä saadaan vähennettyä melu- ja maisemahaittoja sekä lintulajeille aiheutuvia törmäysuhkia verrattuna maatuulivoimaan. Haasteena tavoitteiden saavuttamisessa ovat muun muassa tekniset ja logistiset ongelmat, jotka lisäävät rakennuskustannuksia. Asennusalueen syvyys ja etäisyys

rannikosta vaikuttavat suuresti valittavaan perustustyyppiin, mikä täytyy ottaa huomioon voimalan asennus- ja käyttökustannuksissa sekä taloudellisessa kannattavuudessa.

Merituulivoimaloiden käyttö- ja huoltokustannukset kattavat noin 25–30 % voimalan kokonaiskustannuksista (Röckmann ja muut, 2017, n.d.). Summa on lähes yhtä paljon kuin pelkkien tuuliturbiinien kustannukset ja suunnilleen saman verran kuin rakennus- ja asennusvaiheen kustannukset. Tuuliturbiineille tehdään vakituinen vuosihuolto ja sen lisäksi yleensä 3–4 huoltoa toimintahäiriön sattuessa. Tämä tekee yhteensä noin 5 huoltoa vuodessa. Teknologian kehittyessä huoltotiheyttä on tavoitteena vähentää kolmeen kertaan per vuosi. Röckmann ja muut (2017, n.d.) mainitsevat esimerkkinä merituulipuiston, joka sisältäisi 200 voimalaa ja olisi kokonaisteholtaan 5 MW. Tällainen puisto vaatisi noin 3000 vierailua per vuosi. Käynnit puistossa toteutettaisiin veneellä tai helikopterilla.

Stehlyn ja muiden (2023, n.d.) raportissa vertaillaan kiinteäpohjaisten ja kelluvien merituulivoimaloiden kustannuksia eri osa-alueiden näkökulmista. Taulukossa 1 vertaillaan voimaloiden käyttökustannuksia. Kustannuksia laskettaessa on oletettu olevan käytössä 30 teknikkoa per voimalaprojekti. Kiinteäpohjaisten voimaloiden tapauksessa oletetaan, että kohteen vaihtotöissä käytetään jack-up-alusta ja vastaavasti kelluvissa voimaloissa vaihtotöiden oletetaan tapahtuvan hinaamalla voimalan osat satamaan. Taulukosta nähdään, että huoltokustannukset ovat huomattavasti suuremmat kiinteäpohjaisissa voimaloissa. Ero näkyy erityisesti alusten käytössä huolto- tai vaihtotöiden yhteydessä, mikä on kalliimpi vaihtoehto verrattuna töiden tekemiseen satamassa. Käyttökustannuksissa eroa tulee vakuutusmaksuissa, jotka ovat kelluvilla merituulivoimaloilla korkeammat johtuen niiden vaatimasta teknologiasta ja siitä, että niistä ei ole vielä niin paljon kokemusta. Kokonaisuutena huomataan, että kiinteäpohjaisten voimaloiden kustannukset ovat suuremmat.

Taulukko 1. Kiinteäpohjaisten vs. kelluvien merituulivoimaloiden vuosittaiset käyttökustannusarviot kilowattia kohti (NREL, 2023, n.d.).

Parameter	Fixed Value ($/kW-yr)	Floating Value ($/kW-yr)
Maintenance	**91**	**56**
Labor (technicians)	4	4
Materials	2	3
Equipment (vessels)	85	49
Operations	**17**	**30**
Management administration	2	2
Port fees	1	14
Insurance	15	15
Total OpEx	**108**	**87**

5.4 Nykyiset käyttökohteet

Eurooppaa pidetään merituulivoiman suurimpana edistäjänä (Soares-Ramos ja muut, 2020). Merkittävimmät maat sen kehityksessä ovat Saksa ja Iso-Britannia, jotka hyödyntävät 80 % asentamastaan merituulivoimakapasiteetista. Euroopan ulkopuolisista valtioista Kiina on edelläkävijä, joka lisää panostustaan merituulivoimaan jatkuvasti. Nykyhetkenä paaluperustus on yhä suosituin perustustyyppi; sen osuus on 80 % kaikista rakennetuista perustuksista. Soares-Ramos ja muut (2020) toteavat jacket-perustuksen suosion kasvavan lähitulevaisuudessa johtuen perustuksen aikaansaamasta, korkeammasta turbiinien tehosta sekä käyttömahdollisuuksista syvemmillä vesialueilla.

Suurin osa maailman merituulivoiman resursseista sijaitsee yli 60 metrin syvyydessä, mikä on taloudellisesta näkökulmasta rohkaisevaa kelluvan merituulivoiman kehittämisessä ja käyttämisessä (Barooni ja muut, 2023). Hyvänä esimerkkinä on maailman ensimmäinen kelluva merituulivoimapuisto Hywind, joka sijaitsee Skotlannissa (Equinor, n.d.). Se otettiin käyttöön vuonna 2017 ja sisältää viisi voimalaa, joiden kokonaiskapasiteetti on 30 MW. Puisto sijaitsee 95–120 metrin syvyydessä ja perustustyyppinä

käytetään spar-perustusta. Baroonin ja muiden (2023) mukaan kelluvien voimaloiden kehittämisessä on tapahtunut suurta edistystä viime vuosikymmenen aikana, mutta jatkuva teknologinen kehitys ja tutkimus on tärkeää kustannustehokkaampien mallien suunnittelussa.

Suomessa suunnitellaan Tahkoluodon merituulivoimapuiston lisäksi muitakin hankkeita Selkämeren alueelle. Yksi näistä on Navakka-merituulivoimahanke, jonka tulisi muodostua 70–100 kiinteäpohjaisesta voimalasta, jotka ovat yksilöteholtaan 15–25 MW (Sitowise Oy, 2023, s. 46). Hankkeen voimalat ovat pääosin rakenteeltaan pohjaperusteisia, tässä tapauksessa paaluperustuksia tai gravitaatioperusteisia. Jacket-perustusta ja kelluvaa voimalatyyppiä voidaan myös harkita, jos olosuhteet ovat oikeanlaiset. Toinen vireillä oleva hanke on Halla-merituulivoimapuisto, joka sijoittuu Oulun ja Raahen edustalle Pohjanlahdelle (OX2, n.d.). Puisto sisältäisi 160 voimalaa ja niiden vuotuinen sähköntuotanto olisi 12 TWh. Vuonna 2023 Suomen sähköntuotanto oli 78 TWh, josta puiston tuottama sähkö olisi kattanut noin 15 %.

Valtioneuvosto julkaisi vuoden 2024 lopussa tiedotteen, jossa ilmoitettiin uudesta laista koskien merituulivoiman käyttöä Suomen talousvyöhykkeellä. Lain myötä valtioneuvostolla on oikeus valita vyöhykkeeltä merituulivoiman käyttöön sopivia alueita ja päättää niiden kilpailuttamisesta. Valtioneuvoston vastuulla on valita sopivat alueet, joiden kilpailutuksista vastaa Energiavirasto. Kilpailutuksen voittava taho saa yksinoikeudella hakea valtioneuvoston lupaa alueen määräaikaiseen hyödyntämiseen merituulivoimahankkeelle (Valtioneuvosto, 2024). Syksyyn 2025 mennessä on tavoitteena tehdä päätös ensimmäisistä kilpailutettavista alueista.

6 Johtopäätökset

Merituulivoiman suosio tulee kasvamaan tasaisesti tulevina vuosina. Globaalit markkinat kehittyvät jatkuvasti ja Suomella on suuri potentiaali olla mukana kehityksessä edellyttäen, että talousvyöhykkeen merituulipuistoalueiden kilpailutusta koskeva laki saadaan voimaan.

Tutkielman teorian pohjalta voidaan todeta, että matalille vesialueille soveltuu parhaiten kiinteäpohjaiset merivoimalat niiden vakauden ja tasaisen energiantuotannon ansiosta. Syvemmillä vesialueilla, joissa on kovat tuulennopeudet ja ankarammat olosuhteet, on kannattavampaa käyttää kelluvia merituulivoimaloita. Kiinteäpohjaiset voimalat ovat kokonaiskustannuksiltaan suuremmat, vaikka kelluvien voimaloiden käyttö vaatii niitä kehittyneempää teknologiaa. Ne rasittavat enemmän myös ympäristöä johtuen niiden vaativasta asennusprosessista, jolla on vaikutusta asennusalueen ja merenpohjan ekosysteemille.

Kauempana rannikosta sijaitsevien, kelluvien voimaloiden sähkönsiirtoon liittyvät siirtohäviöt ovat tavoitteena minimoida, jotta saadaan saavutettua mahdollisimman hyvä teho, josta seurauksena on hyvä hyötysuhde sekä energiatehokkuus. Kiinteäpohjaisilla voimaloilla ei ole tätä ongelmaa eikä niiden energiatehokkuus kärsi perustuksen kallistumisen ja liikkeen seurauksena.

Oikean perustustyypin valinta on paikkakohtaista. Paaluperustus on yhä suosituin malli sen soveltuvuuden ansiosta, mutta syvemmille alueille siirryttäessä ja teknologian kehittyessä kelluvien perustusten, kuten spar-perustuksen käyttö, voi yleistyä huomattavasti. Siirtymä kohti vihreää energiantuotantoa povaa merituulivoimalle lupaavaa tulevaisuutta.

7 Yhteenveto

Tutkielman tavoitteena oli tuoda esille merituulivoiman nykytilannetta, käsitellä erilaisia perustustyyppejä sekä vertailla kelluvia ja kiinteäpohjaisia merituulivoimaloita. Vertailussa pyrittiin selvittämään, millainen hyötysuhde ja energiatehokkuus voimaloilla on ja mitkä asiat niihin vaikuttavat. Tutkittiin myös mallien ympäristövaikutuksia sekä kustannuksia ja vertailtiin niitä keskenään.

Tutkielmassa käsitelty teoria ja data pohjautuu kirjallisuuskatsaukseen. Käsiteltyä teoriaa pyrittiin havainnollistamaan kuvilla paremman kokonaiskuvan aikaansaamiseksi. Pyrittiin tuomaan esille laajasti erilaisia perustusratkaisuja niin kiinteäpohjaisille kuin kelluville merituulivoimaloille sekä kuvaamaan niiden rakennetta ja käyttöolosuhteita.

Tarkastelun näkökulmana oli erityisesti voimaloiden vertailu tieteellisiin lähteisiin pohjautuen. Tutkielmassa tuotiin esille myös voimaloiden nykyisiä käyttökohteita ja merituulivoiman suosiota energiantuotannossa.

Saaduista tuloksista voidaan todeta, että voimalatyypeissä on selkeitä eroja, jotka vaikuttavat suuresti mallin valintaan. Kiinteäpohjaiset voimalat ovat vakaita ja tuotannoltaan tasaisia, mutta kelluvat voimalat mahdollistavat myös syvien vesialueiden hyödyntämisen. Merituulivoimalla on jo nyt merkittävä rooli uusiutuvassa energiantuotannossa ja teknologian kehittyessä sekä uusia puistoja rakennettaessa sen rooli vain kasvaa entisestään.

Lähteet

Acteon. (2025). *Drive-drill-drive technique for pile installation.* Noudettu 19.2.2025 osoitteesta https://acteon.com/blog/drive-drill-drive-technique-for-pile-installation/

Ahola, J., Annala, S., Bryer, C., Dankowska, A., Grönman, A., Hynynen, K., Hyvärinen, J., Jaanto, J., Havukainen, J., Honkapuro, S., Karjunen, H., Kauranen, P., Kosonen, A., Kuparinen, K., Laaksonen, P., Lassila, J., Martinez, C., Paulomäki, H., Proskurina, S., … Vakkilainen, E. (2024). Varma, kestävä ja kohtuuhintainen energia. *LUT-yliopiston energiaselonteko.* Noudettu 4.3.2025 osoitteesta https://www.lut.fi/sites/default/files/media/documents/LUT-yliopisto-Energiaselonteko-fi-2024-for-web.pdf

Barooni, M., Ashurj, T., Velioglu Sogut, D., Wood, S. & Ghaderpour Taleghani, S. (2023). Floating Offshore Wind Turbines: Current Status and Future Prospects. *Energies,* 16(1), 2. https://doi.org/10.3390/en16010002

Ciucci, M. (2024). Uusiutuvat energialähteet*. Euroopan Unioni (EU).* Noudettu 2.3.2025 osoitteesta https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/fi/FTU_2.4.9.pdf

Edwards, Emma C., Holcombe, A., Brown, S., Ransley, E., Hann, M. & Greaves, D. (2023). Evolution of floating offshore wind platforms: A review of at-sea devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 183. Noudettu 12.3.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113416.

Equinor. (n.d.). *Hywind Scotland.* Noudettu 19.3.2025 osoitteesta https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland

Gomes, J. G., Lin, Y., Yan, N., Dai, S., Jiang, J. & Yang, T. (2022). Review of Offshore Wind Projects Status: New Approach of floating turbines. *Institute of Electrical and Electronic Engineers, 5th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)* [rajattu pääsy].

Gupta, Bipin K. & Basu, D. (2020). Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives*. Ocean Engineering*, Volume 213 [rajattu pääsy].

Haverinen, L. & Nyman, J. (2024, 28. marraskuuta). Merituulivoima: Globaalit mahdollisuudet ja haasteet, osa 1. *Vaasan ammattikorkeakoulun (VAMK) verkkolehti.* Noudettu 17.3.2025 osoitteesta http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2024112897394

Johnston, B., Foley, A., Doran, J. & Littler, T. (2020). Levelised cost of energy, A challenge for offshore wind. *Renewable Energy,* Volume 160, Pages 876-885 [rajattu pääsy].

Letcher, T. (2017). *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. ProQuest* Ebook Central [rajattu pääsy].

Li, Z., Song, Q., An, F., Zhao, B., Yu, Z. & Zeng, R. (2021). Review on DC transmission systems for integrating large-scale offshore wind farms. *The Institution of Engineering and Technology (IET)* [rajattu pääsy].

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. (2022). *Tekniikan Kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä.* (23. painos). Tammertekniikka.

Mäkiranta, A. (2023). *Energiatekniikan fysikaaliset perusteet* [luentomateriaali]. Moodle [rajattu pääsy].

Merz, K., Anaya-Lara, O., Olav Tande, J., Uhlen, K. (2018). *Offshore Wind Energy Technology.* ProQuest Ebook Central [rajattu pääsy].

MSP. (2024). *Merituulivoiman tilanne- ja kehityskuvan kokonaistarkastelu.* Marine Spatial Planning. Noudettu 25.2.2025 osoitteesta https://www.merialuesuunnittelu.fi/wp-content/uploads/2024/06/Merituulivoiman-tilanne-ja-kehitys-kuva.pdf

Nizamani, Z., Cong, N.C., Khan, M.A., Nakayama, A., Wahab, M.A., Fakhruddin, K.H. & Ahmed, M.M. (2023). Performance Evaluation of Offshore Wind turbine Support Structures – A review. *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* [rajattu pääsy].

OX2. (n.d.). *Tiedot hankkeesta.* Noudettu 19.3.2025 osoitteesta https://www.ox2.com/fi/suomi/hankkeet/halla/

Rezaei, F., Contestabile, P., Vicinanza, D. & Azzellino, A. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned

from the fixed-bottom offshore wind farms. *Ocean & Coastal Management,* Volume 243. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106772.

Röckmann, C., Lagerveld, S. & Stavenuiter, J. (2017). Operation and Maintenance Costs of Offshore Wind Farms and Potential Multi-use Platforms in the Dutch North Sea. *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean.* Noudettu 18.3.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7_4

Sitowise Oy. (2023). Ympäristövaikutusten arviointiohjelma, Navakka-merituulivoimahanke. *ymparisto.fi.* Noudettu 19.3.2025 osoitteesta https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Eolus%20Finland%20Oy%2C%20Navakka-merituulivoimahanke%2C%20Arviointiohjelma%20osa%20A%2C%20Tuotantoalue%20ja%20s%C3%A4hk%C3%B6nsiirto%20merialueella.pdf

Soares-Ramos, E. P. P., Oliveira-Assis, L., Sarrias-Mena, R. & Fernandez-Ramirez, L. M. (2020). Current status and future trends of offshore wind power in Europe. *Energy*, Volume 202 [rajattu pääsy].

Stehly, T., Duffy, P. & Hernando D. M. (2023). 2022 Cost of Wind Energy Review. *National Renewable Energy Laboratory (NREL).* Noudettu 18.3.2025 osoitteesta https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/88335.pdf

Suomen hyötytuuli Oy. (2020). Tahkoluodon merituulipuiston laajennus: Ympäristövaikutusten arviointiohjelma. *ymparisto.fi*. Noudettu 25.2.2025 osoitteesta https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Tahkoluodon_merituulipuiston_laajennus_YVA_ohjelma.pdf

Suomen Uusiutuvat. (2025, 30. tammikuuta). *Tuulivoimahankkeet Suomessa.* Noudettu 17.2.2025 https://suomenuusiutuvat.fi/media/2025.01_surf-tuulivoimahankkeet-suomessa.pdf

Suomen Uusiutuvat. (n.d.). *Talvella tuulee eniten.* Noudettu 17.2.2025 osoitteesta https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten/

Vaasan Sähkö. (2023, 15. syyskuuta). *Energiatehokkuus – mitä se tarkoittaa ja miten käyttää energiaa mahdollisimman tehokkaasti?* Noudettu 13.3.2025 osoitteesta

https://www.vaasansahko.fi/ajankohtaista/energiatehokkuus-mita-se-tarkoittaa-ja-miten-kayttaa-energiaa-mahdollisimman-tehokkaasti/

Valtioneuvosto. (2024, 19. joulukuuta). *Laki talousvyöhykkeen merituulivoimasta voimaan – Ensimmäinen tuulivoima-alueiden kilpailutus voi käynnistyä ensi vuoden lopussa.* Noudettu 19.3.2025 osoitteesta https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/laki-talousvyohykkeen-merituulivoimasta-voimaan-ensimmainen-tuulivoima-alueiden-kilpailutus-voi-kaynnistya-ensi-vuoden-lopussa

Vihavainen, P., Saari P., Länsisalo, E., Tkachenko E., Jaatinen, K., Väisänen, A., Lantta E-A., Lehtoranta, I., Irrmann, L., Huhtanen, S., Semkin, N., Peltoniemi, M., Bonn, T., Nurminen-Piirainen, M. & Pihjalasaari, M. (2024). Merituulivoiman edistäminen. *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja.* Valtioneuvosto.fi. Noudettu 25.2.2025 osoitteesta https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165452/VNTEAS_2024_4.pdf

Villanueva, D. & Feijóo, A. (2010). Wind power distributions: A review of their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Volume 14, Issue 5, Pages 1490-1495 [rajattu pääsy].

Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C. & Hertwich, E. G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy,* Volume 34, Issue 3 [rajattu pääsy].

World Forum Offshore Wind (WFO). (2024). *Global Offshore Wind Report.* Noudettu 14.2.2025 osoitteesta https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2024/04/WFO-Report-2024Q1.pdf