Tampereen yliopisto

Kaisa Vornanen

MERITUULIVOIMAN (OFFSHORE) POTENTIAALI JA HAASTEET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Risto Mikkonen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kaisa Vornanen: Merituulivoiman (Offshore) potentiaali ja haasteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2023

Tuulivoiman suosio on kasvanut huomattavasti viimeisten kymmenen vuoden aikana ja maailmanlaajuisesti tuulivoima on suosituin energiantuotantomuoto, mitä tulee uuteen rakennettavaan energiantuotantokapasiteettiin. Tuulivoimaa voidaan rakentaa niin maalle kuin merelle ja esimerkiksi maatuulivoima on halvin sähköntuotantomuoto Suomessa. Maailmassa on kuitenkin paljon mahdollista potentiaalia merituulivoiman rakentamiselle, sillä rannikkoa on satoja tuhansia kilometrejä käytettävissä.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan merituulivoiman potentiaalia ja haasteita sekä tehdään katsaus tuulivoiman perusteisiin, niin maalla kuin merellä. Työssä käsitellään aluksi tuulivoimalan rakennetta ja erityyppisiä voimaloita, joiden jälkeen perehdytään tuulivoimalan kustannusrakenteisiin, tuulivoimaan energiantuotantomuotona ja merituulivoiman erityispiirteisiin. Seuraavaksi perehdytään tarkemmin merituulivoiman potentiaaliin ja haasteisiin. Lopuksi esitellään tarkemmin muutama merkittävä merituulipuisto ja käsitellään merituulivoiman tulevaisuudennäkymiä.

Työssä ilmenee, että merituulivoimalla on etuja verrattuna maatuulivoimaan. Meren hyvät tuuliolosuhteet ovat otolliset energiantuotannon kannalta ja merelle voidaan rakentaa suurempia voimaloita sekä puistoja. Merituulivoimaloissa vaadittava teknologia vaatii enemmän kuin maatuulivoimaloissa käytettävä, joka tekee merituulivoiman kustannuksista huomattavasti suurempia. Tämä hintaero tulee kuitenkin kaventumaan teknologian kehityksen myötä, mutta toistaiseksi korkeat investointikustannukset ja haastavat viranomaismenettelyt hidastavat merituulipuistojen läpilyöntiä.

Maailmalla on useita merkittäviä merituulipuistoja ja seuraavien vuosien aikana uusien merituulipuistojen merkitys korostuu energiantuotannossa. 2030-luvun taitteessa merituulivoiman uskotaan olevan merkittävä osa maailman energiajärjestelmää.

Avainsanat: tuulivoima, merituulivoima, merituulipuisto, potentiaali, haasteet, uusiutuva energia, offshore

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. TUULIVOIMA 2
    2.1 Tuulivoimalan rakenne 2
        2.1.1 Vakionopeuksinen tuulivoimala 3
        2.1.2 Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat 4
    2.2 Tuulivoimalan ja tuulen teho 5
    2.3 Tuulivoimalan kustannusrakenne 6
    2.4 Tuulivoima energiantuotantomuotona Suomessa 6
        2.4.1 Suomen sähköntuotannon rakenne 6
        2.4.2 Suomen tuulivoimakapasiteetti 7
        2.4.3 Tuulivoimateknologian kehitys 8
    2.5 Merituulivoima 8
    2.6 Tuulivoimalan sijoittaminen 10
3. MERITUULIVOIMAN POTENTIAALI 11
    3.1 Olosuhteet 11
    3.2 Euroopan Unionin merituulivoimastrategia 12
4. MERITUULIVOIMAN HAASTEET 13
    4.1 Ympäristövaikutukset ja olosuhteet 13
    4.2 Kustannustekijät ja kannattavuus 14
    4.3 Lupa- ja viranomaismenettelyt 16
5. MERITUULIVOIMALAT 17
    5.1 Tahkoluodon merituulipuisto 17
    5.2 Merituulivoimalat maailmalla 17
        5.2.1 Hornsea 1 ja 2 – Iso-Britannia 18
        5.2.2 Horns Rev 1–3 – Tanska 19
        5.2.3 Shanwei Jiazi ja Shanwei Houhu - Kiina 20
    5.3 Merituulivoimaloiden tulevaisuus 21
6. YHTEENVETO 23
LÄHTEET 24

1. JOHDANTO

Maapallomme kärsii tällä hetkellä ennennäkemättömästä ilmastokriisistä, johon kehitetään jatkuvasti ratkaisuja. Uusiutuvaa energiaa sen eri muodoissa tarvitaan ilmastonmuutoksen hidastamiseksi ja lopulta pysäyttämiseksi. Monet valtiot ovat asettaneet hiilineutraaliustavoitteita ja esimerkiksi Suomi on sitoutunut olemaan hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi pyritään luopumaan fossiilisista polttoaineista ja lisäämään huomattavasti uusiutuvien energiamuotojen, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, määrää Suomen energiajärjestelmässä. Tuulivoima on tunnistettu tärkeäksi keinoksi energiamurroksen toteuttamisessa ja sen suosio kasvaa maailmalla jatkuvasti. Uusiutuvien energialähteiden kehittäminen on nyt tärkeämpää kuin koskaan, jotta energiahuollon vakautta ja kestävyyttä voidaan lisätä ilmastokriisin hoitamisen lisäksi.

Tuulivoimaloita voidaan sijoittaa niin maalle kuin merellekin, ja tässä työssä tarkastellaan merituulivoimaa ja sen potentiaalia ja haasteita suhteessa muihin energiantuotantomuotoihin, erityisesti maatuulivoimaan. Merituulivoimalle sopivia alueita on ympäri maailman ja työssä käsitellään merituulivoimaa niin Suomessa kuin muualla maailmalla. Työ pyrkii vastaamaan siihen, onko merituulivoiman rakentaminen kannattavaa ja mihin kaikkialle sitä on järkevää rakentaa.

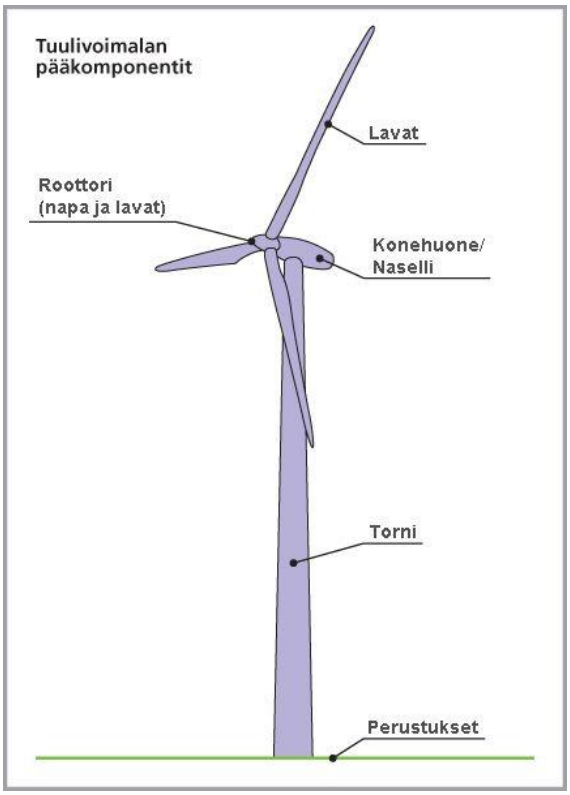
Aluksi perehdytään tuulivoimaloihin ja niiden rakenteeseen sekä toimintaperiaatteisiin. Tämän jälkeen käsitellään sekä merituulivoiman potentiaalia että haasteita. Lopuksi tehdään vielä katsaus muutamiin suurimpiin merituulipuistoihin sekä tutustutaan merituulivoiman ja -voimaloiden tulevaisuudennäkymiin.

2. TUULIVOIMA

Tuulivoimaloiden toiminta perustuu tuulen liike-energian muuntamiseen sähköenergiaksi. Tuulivoimala käyttää sähkögeneraattoria, josta ulostuleva sähköenergia voidaan varastoida esimerkiksi akkuihin tai liittää sähköverkkoon. Tuulivoimaloiden käyttöaste on vahvasti riippuvainen tuulen nopeudesta ja suunnasta. [1]

2.1 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimaloita on useita erilaisia ja useimmiten ne jaetaan vaaka- ja pystyakselisiin voimaloihin. Tässä työssä keskitytään nykypäivän suosituimpaan tuulivoimalamalliin eli kolmilapaiseen vaaka-akseliseen tuulivoimalaan ja sen toimintaperiaatteisiin. Kolmilapaisessa tuulivoimalassa eli HAWT-tuulivoimalassa (horizontal axis wind turbine) tuulen liike-energia muunnetaan ensin mekaaniseksi energiaksi lapojen pyörimisliikkeessä ja lopulta sähköenergiaksi voimalan generaattorin avulla. Kuvassa 1 näkyy voimalan perusrakenne.



Kuva 1: Periaatekuva vaaka-akselisesta tuulivoimalasta [2]

Tuulivoimalalla on muutama peruselementti, joista se koostuu. Tuulivoimalan rakenteeseen kuuluu roottori, konehuone, torni ja perustukset. Roottori sisältää lavat sekä navan

ja konehuone eli naselli taas sisältää sähköntuotannon kannalta oleelliset komponentit. Etäisyys maanpinnan ja nasellin välillä kertoo voimalan napakorkeuden. Tuulivoimaloita voi olla sekä vakio- että muuttuvanopeuksisia.

2.1.1 Vakionopeuksinen tuulivoimala

Vakionopeuksisen tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeus on lähes vakio ja sähkön tuottamisessa käytetään useimmiten epätahtigeneraattoria, sillä se sopii tarkoitukseen paremmin kuin tahtigeneraattori. Vakionopeuksisen tuulivoimalan generaattori on saatava pyörimään vähän nopeammin kuin sähköverkon tahtinopeus, jolloin epätahtigeneraattori soveltuu hyvin tähän voimalatyyppiin. Käsitellään ensin hieman epätahtikoneen toimintaa. Epätahtigeneraattori on käytetyin generaattori tuulivoimaloissa, sillä se on mekaanisesti yksinkertainen, käyttövarma ja massatuotannon takia myös edullinen. Epätahtikoneen oikosuljettuihin staattorikäämeihin syötetään vaihtovirtaa, jonka seurauksena staattorikäämit synnyttävät magneettikentän. Tämä magneettikenttä on ajan suhteen muuttuva ja roottorikäämeihin kohdistuessa se indusoi käämeihin vaihtojännitteen ja -virran. [1] [3]

Vakionopeuksinen voimala ottaa käynnistyessään loistehoa sähköverkosta, sillä epätahtigeneraattorin täytyy saada verkosta tehoa magnetoidakseen roottorin oikosuljetut käämit. Vakionopeuksisessa tuulivoimalassa on tyypillisesti energiavarastona toimiva kondensaattoripankki, jotta kaikkea loistehoa ei tarvitsisi ottaa sähköverkosta. Vakionopeuksinen tuulivoimala aiheuttaa käynnistyessään virtapiikkejä, joita pyritään pienentämään pehmeäkäynnistimen avulla, jottei sähköverkkoon aiheutuisi ongelmia. [3]

Vakionopeuksissa tuulivoimaloissa tarvitaan lisäksi vaihteisto, sillä roottorin pyörimisnopeus on hidas. Roottorin pyörimisnopeus täytyy mitoittaa oikein, jotta generaattori tuottaa aina verkon kanssa saman taajuista sähköä. Voimalan roottori on yhdistetty epätahtigeneraattoriin vaihteiston avulla ja generaattori on yhdistetty verkkoon usein vielä muuntajan avulla. [3] [4]

Vakionopeuksinen tuulivoimala on yksinkertaista kytkeä verkkoon epätahtigeneraattorin takia. Vakionopeuden takia voimala ei pysty tuottamaan sähköä yhtä tehokkaasti muilla tuulennopeuksilla ja roottori on optimoitava tietylle tuulennopeudelle. Voimala ei siis pysty hyödyntämään tuulen energiaa optimaalisesti ilman aktiivista tehonsäätöjärjestelmää. Tämän takia vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa käytetään usein passiivista sakkaussäätöä, jotta mekaanisia vaurioita ei pääsisi syntymään. Passiivisessa sakkaussäädössä lavoilla on kiinteät lapakulmat ja ne alkavat sakkaamaan, kun tuulen nopeus kasvaa riittävän suureksi maan päällä. [5]

2.1.2 Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat

Muuttuvanopeuksisia tuulivoimaloita on muutamia erityyppisiä, joita toteutetaan niin epätahtigeneraattorilla kuin tahtigeneraattorillakin. Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala on voimalatyyppi, jossa käytetään epätahtigeneraattoria. Ero vakionopeuksisen ja rajoitetusti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan välillä on generaattorin säädettävä vastus. Säätövastuksen avulla roottorikäämien resistanssia saadaan kasvatettua ja epätahtigeneraattorin jättämää lisättyä. Tällä keinolla saadaan vapautettua generaattorin toimintaa, eikä se ole sidottu enää niin tiukasti toimimaan jollakin tietyllä pyörimisnopeudella. Epätahtigeneraattorin vahvuus on sen yksinkertainen rakenne, joten roottorikäämien resistanssin säätömahdollisuus lisää generaattorin teknistä monimutkaisuutta. Tämä vaikuttaa muun muassa hintaan. [3]

Toinen muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, jonka valmistuksessa käytetään epätahtigeneraattoria, on muuttuvanopeuksinen tuulivoimala osatehoisella suuntaajakäytöllä. Tässäkin voimalatyypissä nopeutta saadaan muokattua jättämää kasvattamalla, mutta periaate on erilainen, kuin rajoitetusti muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa. Roottorin pyörimisnopeus on tarkoitus saada poikkeamaan huomattavasti staattorin määräämästä tahtinopeudesta. Tämä onnistuu, kun jättämän kasvusta aiheutunut teholisäys siirretään sähköverkkoon osatehoisen suuntajakäytön avulla. [3]

Roottorin pyörimisnopeuden vaihteluväli on suoraan kytköksissä osatehoisen suuntaajakäytön mitoitukseen eli mitä enemmän teholisäyksestä voidaan siirtää suuntaajakäytön avulla roottorista muuntajalle, sitä suurempi on pyörimisnopeuden vaihteluväli. Suuntaajakäytön tehon kasvattaminen on kuitenkin kallista. Suuntaajakäytön kautta verkkoon syötetäänkin yleensä vain noin 30 % generaattorista peräisin olevasta sähkötehosta ja loput 70 % syötetään staattorin kautta. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala osatehoisella suuntaajakäytöllä on tuulivoimalatyypeistä yleisin. [3]

Täystehoisella suuntaajakäytöllä toimiva muuttuvanopeuksinen tuulivoimala on kolmas muuttuvanopeuksinen tuulivoimalatyyppi. Kyseessä on aidosti muuttuvanopeuksinen tuulivoimalatyyppi, jossa käytetään useimmiten tahtigeneraattoria, mutta voimala on mahdollista toteuttaa myös epätahtigeneraattorilla. Tahtigeneraattorin toiminta perustuu siihen, että kenttäkäämeihin syötetään tasavirtaa, joka synnyttää ajan suhteen muuttumattoman magneettikentän. Staattori ja roottori valmistetaan ferromagneettisesta aineesta, sillä se voimistaa magneettivuontiheyttä verrattuna ei-magneettiseen aineeseen. Roottori saatetaan pyörimisliikkeeseen ja staattorin ankkurikäämi kokee ajan suhteen

muuttuvan magneettikentän. Roottorin pyörittyä yhden kokonaisen kierroksen, ankkurikäämin kokema magneettivuontiheys ja käämin napojen välinen jännite ovat muodostaneet yhden jakson sinikäyrää. Roottorin pyörimisnopeus ja ankkurikäämin jännitteen taajuus ovat yhtä suuret. Laitetta kutsutaan siis tahtigeneraattoriksi, sillä sähköinen taajuus ja mekaaninen pyörimisliike ovat samassa tahdissa toistensa kanssa. [3] [5]

Jos muuttuvanopeuksisessa täystehoisella suuntaajakäytöllä toimivassa tuulivoimalassa käytetään epätahtigeneraattoria, tarvitaan vaihteisto. Tällöin generaattori saadaan toimimaan riittävän hyvällä hyötysuhteella, kun pyörimisnopeus on riittävän suuri. Vaihteettoman tuulivoimalan generaattorina on usein kestomagneettigeneraattori. Vaihteettoman, suuren kokoluokan voimalan generaattorin roottori pyörii samalla nopeudella, kuin voimalan roottori. Suurissa voimaloissa roottorin pyörimisnopeus on hidas, jonka takia generaattorin napaparien lukumäärän tulee olla useita kymmeniä, jotta tahtigeneraattorin tuottaman sähköenergian hyötysuhde saadaan hyväksi. [3]

2.2 Tuulivoimalan ja tuulen teho

Tuulessa oleva energia on ilmamolekyylien kineettistä energiaa ja kyseinen energia muunnetaan ensin tuulivoimalassa roottorin liike-energiaksi ja sen jälkeen generaattorissa sähkömagneettisen induktion avulla sähköenergiaksi. Ilmavirtauksen teho on sen energia per aikayksikkö ja teho saadaan yhtälöstä

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho A v_0^3, \tag{1}$$

jossa ρ on ilman tiheys, A on ilmavirtausta kohti suorassa oleva pinta-ala ja v_0 on tuulen nopeus. Ilmavirtauksen teho riippuu siis suoraan tuulennopeuden kuutiosta. [3]

Yhtälöstä (1) saatava teho ei ole suoraan tuulivoimalan teho, vaan Betzin laki mallintaa teoreettisen ylärajan roottorin ja tuulen tehon väliselle suhteelle. Tuulivoimala hyödyntää teoriassa Betzin lain mukaisesti maksimissaan 59,3 % tuulen sisältämästä kineettisestä energiasta. Betzin laki tekee joitain oletuksia tuulivoimalasta ja erityisesti sen ideaalisesta roottorista, kuten roottorin kitkattomuudesta ja massattomuudesta. Lisäksi roottori on lain mukaan ilmaa läpäisevä kiekko, jossa on ääretön määrä lapoja. Roottoriin kohdistuvan vastusvoima merkitään nollaksi ja vaikuttavana voimana on ainoastaan nostovoima. Viimeisenä roottorin takana olevan ilmavirtauksen oletetaan olevan pyörteetöntä, vaikka todellisuudessa näin ei ole. [3]

2.3 Tuulivoimalan kustannusrakenne

Tuulivoimalan kustannukset koostuvat investointi-, käyttö-, ylläpito- ja rahoituskustannuksista. Investointikustannuksiin kuuluu itse tuulivoimala ja sen perustukset, sisäisen sähköverkon ja infrastruktuurin rakennus, sähköverkkoon liittäminen ja projektin hallinta sekä kehitys. Maatuulivoimalan investointikustannukset ovat n. 1,2–1,5 M€ / MW ja merelle rakennettavan tuulivoimalan investointikustannukset 20–50 % suuremmat.

Vuotuiset kustannukset muodostuvat käyttö- ja ylläpitokustannuksista, jotka voidaan eritellä tarkemmin huolto-, vakuutus-, korjaus- ja hallinnointikustannuksiin. Merituulivoimaloiden huoltaminen on selkeästi kalliimpaa etäisyyksien ja huoltoyhteyksien takia verrattuna maalle rakennettuihin tuulivoimaloihin. Käyttö- ja ylläpitokustannukset pysyvät lähes vakiosuuruisina tuotannosta riippumatta, joskin voimalan vanhentuessa kustannukset hieman nousevat. [6]

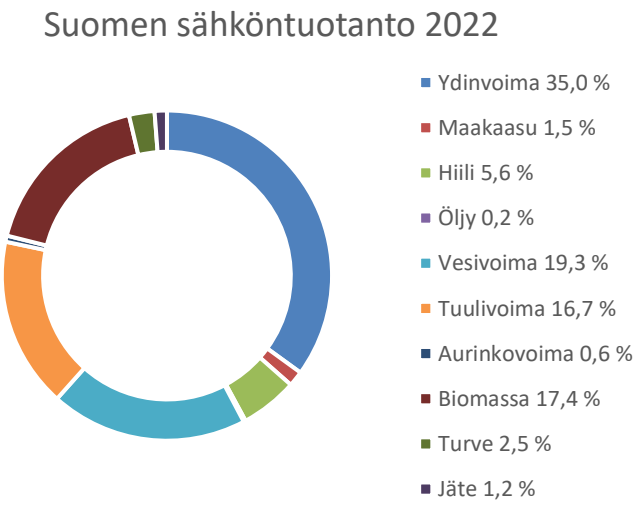
Uusiutuvia energiatuotantomuotoja on tuettu niin Suomessa kuin maailmallakin erilaisin tavoin vuosien aikana. Tukemisen taustalla on ollut tahtotila kunnianhimoisten ilmastotavoitteiden saavuttamisesta ja fossiilisten polttoaineiden korvaamisesta uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla. Suomessa on myönnetty tuulivoimahankkeille investointitukea, jonka lopettamisen jälkeen siirryttiin syöttötariffijärjestelmään. Takuuhintajärjestelmän tarkoituksena on taata sähköntuottajalle tietty ennalta sovittu hinta tuotetusta sähköstä. Järjestelmään ei voi hakeutua enää uudet tuulivoimalat ja viimeiset tuet maksetaan vuonna 2030. Nykyään Suomessa tuulivoimaloita rakennetaan suurimmaksi osin markkinaehtoisesti. [7]

2.4 Tuulivoima energiantuotantomuotona Suomessa

Tuulivoiman suosio on voimakkaassa kasvussa ja tuulivoiman osuus Suomen energiantuotannossa on merkittävä. [8] Tuulivoimalla tuotetaan yhä enemmän sähköä ja tuulivoimakapasiteetti on kasvanut viimeisten kymmenen vuoden aikana moninkertaiseksi.

2.4.1 Suomen sähköntuotannon rakenne

Suomen sähköntuotannossa, -tuonnissa ja -kulutuksessa on tapahtunut viimeisten vuosien aikana suuria muutoksia. Kuvassa 2 on kuvattuna Suomen sähköntuotannon rakenne vuonna 2022 ilman tuontisähkön osuutta.



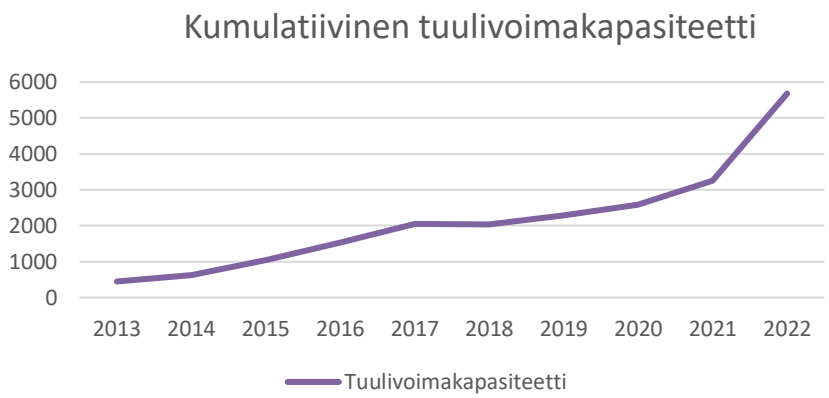
Kuva 2: Suomen sähköntuotannon rakenne vuonna 2022 [8]

Merkittävin muutos on tapahtunut tuulivoimatuotannon parissa, kun tuulella tuotetun sähkön osuus Suomen kokonaistuotannosta nousi 5 % vuodesta 2021, jolloin tuulivoiman osuus oli 11,7 %. Nykyisellään Suomen sähköntuotannosta hiilidioksidineutraalia sähköä on jo 89 %. [8]

2.4.2 Suomen tuulivoimakapasiteetti

Suomessa oli vuoden 2022 lopussa 1 393 toiminnassa olevaa tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu tuulivoimakapasiteetti oli 5 677 MW. Kapasiteetti nousi edellisvuodesta 2 430 MW, kun uusia voimaloita asennettiin 437 kappaletta. Vuoden 2022 aikana purettiin 5 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu nimellisteho oli 9 MW. [9]

Kuvasta 3 voidaan lukea selkeästi, että vuosien 2021 ja 2022 on asennettu huomattava määrä tuulivoimaa Suomeen. Nyt lähestytään jo 6000 MW:n rajapyykkiä ja vuonna 2015 on vasta rikottu 1000 MW:n raja. Vuonna 2022 tuulivoimalla tuotettiin sähköä 11,5 TWh:a, joka vastaa 14,1 % Suomen sähkön kulutuksesta, kun otetaan tuontisähkön osuus mukaan. [10]



Kuva 3: Suomen kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti 2013–2022 [10]

2.4.3 Tuulivoimateknologian kehitys

Suomen ensimmäinen sähköverkkoon kytketty tuulivoimala valmistui vuonna 1986 Imatralle. Kyseessä oli nimellisteholtaan 300 kW koevoimala. Tuulivoiman rakentaminen oli hidasta kuitenkin yli 20 vuotta, ennen kuin rakentaminen lähti merkittävään kasvuun vuonna 2012. Tällöin tuulivoiman tuotantokustannukset olivat laskeneet reippaasti vuonna 2011 käyttöönotetun syöttötariffijärjestelmän takia.

Teknologinen kehitys on tällä hetkellä nopeaa ja uusien voimaloiden kapasiteettikerroin verrattuna vanhempiin voimaloihin on huomattavasti korkeampi. Tuulivoimalan kapasiteettikertoimella tarkoitetaan sitä, paljonko voimala tuottaa vuodessa sähköä suhteessa sen teoreettiseen maksimiin. Vuonna 2022 asennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen teho oli 5,6 MW kun vastaava luku on ollut vuotta aiemmin 4,8 MW ja vuonna 2018 keskimääräinen teho oli 3,3 MW. Niin kuin tehot, myös voimaloiden napakorkeus ja roottoreiden halkaisijat ovat kasvaneet. Vuonna 2022 asennettujen voimaloiden napakorkeus on keskimäärin jo yli 140 metriä ja roottorin halkaisija lähes 160 metriä. [9]

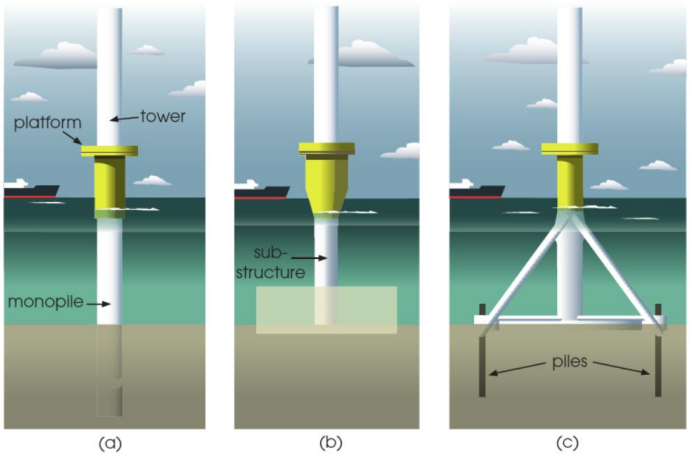
2.5 Merituulivoima

Merituulivoimaloita on rakennettu enemmän vasta viimeisen kymmenen vuoden aikana ja vuosi 2021 oli merituulivoiman kannalta merkittävin vuosi tähän mennessä. Vuonna 2021 maailmanlaajuisesti asennettiin 21,1 GW merituulivoimaa, joka on kolminkertainen määrä vuoteen 2020 verrattuna. Vuoden 2021 lopussa merituulivoimaa oli maailmalla yhteensä 56 GW, joka vastaa 7 % maailman tuulivoimatuotannosta. Merituulivoimaa on alueellisesti lähinnä Euroopassa ja Aasiassa, mutta merituulivoimaloita suunnitellaan rakennettavaksi ympäri maailmaa. Merituulivoiman osuus uusista

tuulivoimainvestoinneista kasvaa koko ajan ja tavoitteena on, että vuoteen 2031 mennessä 30 % uusista tuulivoimaloista ovat merituulivoimaloita. [11]

Merituulivoimaloiden ja maatuulivoimaloiden välillä ei ole merkittäviä eroja, mutta merituulivoimalat vaativat kuitenkin joitain erityisominaisuuksia komponenteiltaan. Meriolosuhteisiin sijoitetun voimalan komponenttien täytyy olla järeämpiä ja kestää mm. korroosiota paremmin. Voimaloiden tulee myös kestää erittäin suuria tuulennopeuksia ja rankkoja sääolosuhteita, jonka vuoksi ne rakennetaan erityisen vankoiksi ja luotettaviksi. [12] [13]

Meri- ja maatuulivoimaloiden isoin erottava tekijä on niiden perustukset. Maatuulivoimalan perustukset tehdään melko suoraviivaisesti joko kallioankkuri- tai maanvaraisella perustuksella. [14] Merituulivoimalan perustusten tekeminen on vaativampaa ja perustuksia suunniteltaessa pitää ottaa huomioon mm. merenpohjan laatu, veden syvyys ja odotettavissa olevat myrskyt. Merituulivoimaloiden perustukset voidaan jakaa muutamaan päätyyppiin: paaluperustukseen (monopile), kasuuniperustukseen (gravity foundation) ja kolmijalka- tai putkiristikkoperustukseen (tripod or jacket). [12] [13]



Kuva 4: Merituulivoimalan erilaisia perustuksia: a) paaluperustus, b) kasuuniperustus ja c) kolmijalkaperustus [13]

Paaluperustus vaatii suhteessa melko vähän tilaa, mutta se ei sovi kovinkaan syville vesille. Paaluperustus on edullisin ja yksinkertaisin perustustyyppi ja sitä käytetään useissa Pohjanmeren merituulivoimaloissa. Kasuuniperustus on suuri betoni- tai teräspainosta tehty perustustyyppi, jota voidaan käyttää syvemmissä vesissä. Kasuuniperustus vaatii paljon tilaa. Kolmijalka- ja putkiristikkoperustuksessa merituulivoimala rakennetaan joko kolmijalan tai kehikon päälle. Nämä perustukset vaativat vähemmän tilaa kuin kasuuniperustus ja ne voidaan rakentaa syvään veteen. Tulevaisuudessa merituulivoimaloita voidaan rakentaa yhä syvemmille merialueille mm. kelluvien perustusten ja merenpohjaan kiinnitettävien vaijeriratkaisujen ansiosta. [12] [13]

2.6 Tuulivoimalan sijoittaminen

Tärkeintä tuulivoimaloiden sijoittamisen kannalta on löytää riittävän tuulinen alue sähköntuotannon kannalta, jossa kuitenkin rakennus- ja ylläpitokustannukset pysyvät mahdollisimman alhaisina. Tuulivoimaloiden sijoittamiseen vaikuttavat monet tekijät näiden lisäksi, kuten luontoarvot ja sähköverkkoon liittymismahdollisuudet. Tuulivoimahankkeen esiselvityksessä tehdään alustava arviointi projektin teknisille, taloudellisille, ympäristöllisille ja maankäytöllisille edellytyksille. Huolellisesti tehty esiselvitys antaa paremmat edellytykset projektin onnistumiselle. [15] [16]

Tuulen nopeuden lisäksi muutkin ilmastotekijät vaikuttavat voimalan sijoittamiseen. Luonnonkatastrofien mahdollisuus, kuten myrskyt ja maanjäristykset, ovat huomioitava sijoitussuunnittelussa, jotta tuulivoimalat kestäisivät mahdollisimman pitkään. Maantieteelliset olosuhteet ovat merkityksellisiä voimaloiden sijoittamisen kannalta. Vaihtelevat maastonmuodot vaikuttavat tuulen nopeuteen ja vaikeuttavat voimalan ja sen infrastruktuurin rakentamista, jonka takia useimmat maatuulivoimalat sijoitetaan mahdollisimman tasaisille ja helposti saavutettaville alueille. Merituulivoiman rakentaminen tarkoittaa vaihtelevampia sääolosuhteita ja esimerkiksi kylmyyteen ja sen myötä roottorin lapojen jäätämiseen on kiinnitettävä huomiota. Merituulivoimalat sijoitetaan paikkoihin, joissa meri ei ole liian syvä eivätkä aallot liian korkeita. [15]

Ympäristöllisillä tekijöillä tuulivoiman yhteydessä tarkoitetaan voimaloista aiheutuvaa vaikutusta sen ympäristöön eli alueen ihmisiin, eläimiin ja luontoon. Tuulivoimaloista aiheutuva haitta pyritään minimoimaan huomioimalla esimerkiksi maisema-, melu- ja turvallisuusvaikutukset. Tuulivoimahankkeen aikana tehtävän ympäristöselvityksen avulla saadaan tärkeää tietoa alueen elimistöstä ja kasvillisuudesta, jotta hankkeen vaikutuksia voidaan arvioida mahdollisimman hyvin. Merituulivoimaloiden sijoittamisessa merkittävimmät ympäristövaikutukset tapahtuvat perustustenrakennusvaiheessa, kun merenpohjassa tapahtuu muutoksia. Mahdolliset satamat ja laivareitit on otettava myös huomioon merituulivoiman sijoittamisessa. [17]

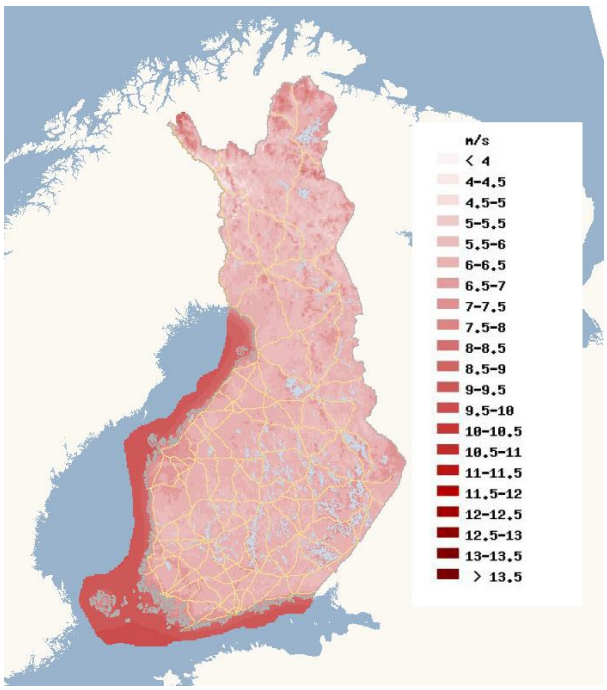
Tuulivoimaloita rakennetaan usein useampia samalle alueelle ja ne muodostavat yhdessä tuulipuiston. Tällöin voimaloiden järkevä sijoittaminen suhteessa toisiinsa on tärkeää, sillä lapojen pyörimisestä syntyy pyörteitä ja häiriöitä, jotka vaikuttavat ilmavirtaukseen ja siten muiden voimaloiden sähköntuotantoon. Nämä häiriöt ja haitat minimoidaan hyvällä suunnittelulla, johon kuuluu esimerkiksi voimaloiden sijoittaminen riittävän kauas toisistaan. [18]

3. MERITUULIVOIMAN POTENTIAALI

Maapallolla on satoja tuhansia kilometrejä rannikkoa ja siten myös paljon mahdollisia sijoituspaikkoja merituulivoimalle. Muiden uusiutuvien energiateknologioiden ohella merituulivoiman potentiaalin selvittäminen ja sen hyödyntäminen ovat tärkeässä roolissa hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamisessa. Merituulivoiman potentiaalia verrataan erityisesti suhteessa maatuulivoimaan. Luvussa käsitellään ensin positiivisia olosuhteita ja ympäristöä merituulivoimalle, jonka jälkeen käsitellään Euroopan Unionin merellä tuotettavan uusiutuvan energian strategiaa.

3.1 Olosuhteet

Aiemmin luvussa 2.6 käsiteltiin tuulivoiman sijoittelua ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Merituulivoiman selkeänä etuna maatuulivoimaan verrattuna on merialueiden tuulisuus. Tuulen teho (kaava 1) on riippuvainen tuulen nopeuden v kolmannesta potenssista, joten pienikin tuulen nopeuden muutos vaikuttaa voimakkaasti tuulen tehoon ja siten sähköntuotantoon. Tuulen nopeus kasvaa sitä suuremmaksi, mitä kauemmas merellä mennään. Merialueiden vähäinen tuuliturbulenssi parantaa voimalan hyötysuhdetta. Kuvasta 5 nähdään, miten tuulen nopeus kasvaa, kun siirrytään sisämaasta merelle päin.



Kuva 5: Tuulen keskinopeuden jakautuminen Suomessa 50 metrin korkeudella [19]

Merialueilla ei ole yhtä paljon ympäristöllisiä vaikutustekijöitä, kuin maalla. Tämä mahdollistaa isompien projektien toteuttamisen helpommin, sillä rakentamiselle ei ole juurikaan konkreettisia esteitä. Merituulipuistoja varten rakennettava sähköverkko kulkee merenpinnan alapuolella, mikä vähentää linnustolle aiheutuvaa haittaa. Merituulivoimaloiden perustukset voivat toimia kiinnittymispintoina erilaisille makroleville ja pohjaeläimille, joka usein houkuttelee kaloja ja lisää siten merien eläimistön monimuotoisuutta. [20]

Merellä on paljon tilaa uudelle tuulivoimarakentamiselle, jolloin voimalat eivät häiritse asutusta tai aiheuta muita haittoja samoin, kuin mahdollisesti maalla. Maailmanpankin arvion mukaan maailmassa olisi mahdollisuus asentaa yli 71 000 GW:n edestä merituulivoimaa, joka on lähes kymmenkertainen määrä maailman tämänhetkiseen sähköntuotantokapasiteettiin verrattuna. [21]

3.2 Euroopan Unionin merituulivoimastrategia

Euroopan Unionin (EU) alueella on valtavasti merituulivoimapotentiaalia sekä alan osaamista, jonka avulla voidaan toteuttaa nopeammin vihreää siirtymää. EU on johtavassa asemassa tuulivoimaloiden komponenttien tuottamisessa ja perustus- sekä kaapeliteollisuudessa; lähes puolet tuulivoima-alan yritysten pääkonttoreista sijaitsee EU:n alueella. Useat eurooppalaiset yritykset panostavat kelluvien merituulivoimaloiden kehittämiseen, jotta merialueita voitaisiin hyödyntää entistä paremmin energiantuotannossa. Merituulivoiman hyödyntäminen on kriittinen keino saavuttaa EU:n ilmastotavoitteet, joista suurimpana tavoitteena on EU:n ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä. [22]

EU:n merituulivoimastrategian mukaisesti asennettua merituulivoimakapasiteettia tulisi olla 60 GW vuonna 2030 ja 300 GW vuonna 2050. Näiden kapasiteettitavoitteiden saavuttaminen edistäisi huomattavasti sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämistä, mahdollistaisi vihreän vedyn hyödyntämistä ja lisäisi työpaikkoja. Vihreällä vedyllä tarkoitetaan uusiutuvan energian, esimerkiksi tuulivoiman, avulla tuotettua vetyä. EU:n omassa vetystrategiassa on määritetty, että EU:n alueella on 40 GW:n edestä elektrolyysikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä ja merituulivoima on yksi uusiutuvan energian muodoista, jonka avulla tavoitteeseen voidaan päästä. Tavoitteiden saavuttaminen lisäisi myös kasvua ja vahvistaisi EU:n asemaa johtavana puhtaiden teknologioiden kehittäjänä ja käyttäjänä. Merituulivoimaan täytyy tehdä tulevaisuudessa miljardien eurojen investoinnit, jotta päästään haluttuihin tavoitteisiin. Strategian avulla saadaan merituulivoiman merkitys energiantuotannossa nostettua Euroopan energiajärjestelmän ytimeen. [23]

4. MERITUULIVOIMAN HAASTEET

Merituulivoiman suuren potentiaalin ja positiivisten tulevaisuudennäkymien lisäksi merituulivoimalla on omat haasteensa ja negatiiviset vaikutuksensa. Niin maa- kuin merituulivoimaan liittyy useita haasteita, joihin törmätään jo suunnitteluvaiheessa. Julkisessa keskustelussa suurimmiksi haitoiksi ja haasteiksi tuulivoimarakentamiselle nousee maisemointi, meluhaitat ja ympäristön elinolosuhteiden, sekä eläinten että ihmisten, muokkaantuminen. Näistä syistä merituulivoimasuunnittelu ja aluekartoitus tulee tehdä huolella, jotta energiantuotanto tuulivoimalla on taloudellisesti kannattavaa, mutta haitat ympäristölle pysyvät mahdollisimman pieninä.

Tässä luvussa käsitellään aluksi olosuhteiden ja ympäristön muodostamia haasteita merituulivoimalle, jonka jälkeen tarkastellaan merituulivoiman kannattavuutta ja siitä syntyviä kustannuksia. Lopuksi käsitellään vielä sähköverkkoon liittämisen haasteita ja erilaisia lupa- sekä viranomaismenettelyjen aiheuttamia haasteita.

4.1 Ympäristövaikutukset ja olosuhteet

Merituulivoimaloiden vaikutukset ympäristöön riippuvat sijoituspaikasta, mutta pääosin ne kohdistuvat lähinnä alueen merelliseen eliöstöön. Vaikutuksia voidaan tarkastella eri jaksoissa, kuten rakentamisen, käytön ja purkamisen jaksoissa. Nämä kaikki vaiheet otetaan huomioon ympäristövaikutuksia arvioidessa. Rakentamisvaiheessa erityisesti ruoppaukset, läjitykset ja mahdolliset räjäytystyöt muokkaavat ympäristöä ja vaikuttavat eliöihin. Mataliin vesiin rakennettavien merituulivoimaloiden rakennustyöt kohdistuvat usein sellaisille alueille, jotka ovat merkittäviä kalojen kutu- ja poikasalueita. Voimalan erityyppisillä perustuksilla on myös hieman erilaisia vaikutuksia ympäristöön ja esimerkiksi siihen, kuinka paljon pohjaa täytyy ruopata. [24] Uudet merituulivoimalat pystytään rakentamaan jo hieman syvempiin vesiin, jolloin vaikutukset esimerkiksi veden monimuotoisuuteen ovat pienemmät. [25]

Linnustolle merituulipuistot voivat aiheuttaa monenlaista haittaa, joita voidaan arvioida törmäysvaikutuksilla, häiriö- ja estevaikutuksilla ja elinympäristönmuutosten aiheuttamilla vaikutuksilla. Korkeat merituulivoimalat aiheuttavat linnustolle törmäystapaturmia, joille alttiita ovat erityisesti muuttolinnut voimalan sijoittuessa päämuuttoreitille ja päiväpetolinnut, jotka kaartelevat ja liitävät paljon. [20] Tarvittaessa merituulipuistoon voi ottaa käyttöön lintututkan, jonka avulla voidaan seurata alueen linnustoa ja puiston vaikutuksia siihen. Esimerkiksi Porin Tahkoluodon merituulipuistossa on käytössä lintututka, jonka

avulla on havaittu, että useimmiten linnut kiertävät voimalat. Tarkkailun avulla on saatu selvitettyä, että Tahkoluodon linnustovaikutukset ovat alkuperäistä arviota vähäisemmät. [26]

Merelle rakennetun tuulivoimapuiston huoltaminen ja kunnossapito on huomattavasti haastavampaa, kuin maatuulivoimapuiston. Tähän vaikuttaa erityisesti mahdollinen huono sää, joka luo omat haasteensa puistoon pääsylle. Parhaiten huollon helpottamiseen voi vaikuttaa rakentamalla merituulivoimalat mahdollisimman kestäviksi ja huoltovapaiksi. Jäätyville merille rakennettavan merituulivoiman erityishaaste on jäätäminen, joka tarkoittaa jään muodostumista roottorin lapoihin joko jäätävien sateiden tai pilvijäätämisen myötä. Tämä paitsi heikentää voimalan hyötysuhdetta, myös saattaa aiheuttaa komponenttien kulumista. Voimalan komponenteista pitää rakentaa siis mahdollisimman kestäviä myös kylmän sään olosuhteisiin. Jäätämistä voidaan estää myös lapalämmityksen avulla, jolla pyritään estämään jään kertymistä lapoihin tai sulatetaan jo jäätynyt lapa. Meriveden suolaisuus vaikuttaa myös komponenttien mahdolliseen kulumiseen ennenaikaisesti. [12] [27]

Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida myös jaottelemalla vaikutusalueet pinnan päällisiin, pinnan alapuolisiin ja sähkönsiirrosta johtuviin vaikutuksiin.

4.2 Kustannustekijät ja kannattavuus

Tuulivoimalan kustannukset voidaan jakaa investointikustannuksiin sekä käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin. Merituulivoiman kustannukset ovat kaikilla osa-alueilla maatuulivoimaa korkeammat ja niiden välinen kustannusrakenne eroaa jonkin verran. Merituulivoiman investointikustannukset muodostavat n. 80 % sen tuotantokustannuksista, joista merkittävän osuuden vie voimaloiden perustukset ja sähköverkkoliityntä. [28]

Perustusten kustannuksiin vaikuttavat oleellisesti perustustavasta ja yleisesti hinta kasvaa sitä korkeammaksi, mitä syvemmälle voimala rakennetaan. Merituulivoimalan perustusten kustannusten arvioidaan olevan n. 3–10 kertainen verrattuna maatuulivoimalan perustuksiin. Merituulipuistot liitetään suurten nimellistehojensa vuoksi lähes poikkeuksetta kantaverkkoon ja liittymisestä aiheutuvat kustannukset nousevat korkeiksi. Sähköverkkoliitynnän kustannuksiin vaikuttaa puiston etäisyys rannikosta ja siitä, miten etäällä lähin mahdollinen sähköverkon liittymispiste on. Kustannuksiin vaikuttaa lisäksi se, käytetäänkö kaapelina tasasähkö- vai vaihtosähkökaapelia. Tasasähkökaapelin käyttäminen edellyttää suuntaaja-asemien rakentamista, joka on vaihtosähköasemaa kalliimpi ratkaisu. Jos merituulipuisto rakennetaan kuitenkin yli 40 km päähän rannikosta, liityntä tehdään tasasähköliitynnällä teknisistä syistä. Suurten merituulipuistojen

rakentaminen kymmenien kilometrien päähän rannikosta voi tarkoittaa jopa satojen miljoonien eurojen kokonaiskustannusta verkkoliitynnälle. [28] Esimerkiksi Suomessa joko kantaverkkoyhtiö Fingrid tai alueella toimiva sähköverkkoyhtiö määrittää liittymispisteen ja -hinnan. Suomessa merituulipuiston hankekehittäjän tulee lisäksi kustantaa tarvittava sähköverkko merelle itse, sillä verkkoa ei ole vielä rakennettu merelle.

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset muodostavat loput n. 20 % merituulivoiman tuotantokustannuksista ja ne ovat noin kaksinkertaisia maatuulivoimaan verrattuna. Suurimman kustannuseron muodostavat kiinteistöveron suuruus ja logistiikkakustannukset. Logistiikkakustannusten suuruus pohjaa siihen, että merialueilla toimiminen vaatii erikoisalusta miehistöineen. Tällöin tarvittava kalusto ja työvoima on huomattavasti kalliimpaa kuin maalla. Käyttö- ja kunnossapitokustannusten suuruus riippuu etäisyydestä lähimpään logistiikkapisteeseen eli merituulivoiman tapauksessa etäisyyttä hyödynnettävään satamaan. Mitä pidempi etäisyys logistiikkapisteeseen on, sitä suuremmat ovat logistiikkakustannukset. [28]

Merituulivoimaloiden kiinteistöverotus Suomessa on huomattavasti maatuulivoimaloita kireämpää, sillä kiinteistöveron suuruus on riippuvainen perustusten hinnasta. Merituulivoimaloiden perustusten kustannusten ollessa moninkertainen maatuulivoimaloihin verrattuna, nousee kiinteistöveron suuruus myös huomattavaksi kulueräksi. Tuulivoimaloiden kiinteistöverotusta on nostettu useampaan kertaan 2000-luvulla lainsäädännön avulla, ja niiden myötä tuulivoimaloiden kiinteistövero on noussut merkittävästi ja muokannut asetelmaa epäedulliseksi merituulivoimaloiden kannalta. [28] Merituulivoimaloiden erillisestä kiinteistöveroprosentista luopuminen ja niiden siirtäminen samaan kiinteistöveroprosenttiin maatuulivoiman kanssa voisi parantaa merituulivoiman toimintaedellytyksiä ja rakentamismahdollisuuksia. Kiinteistöveron alentamista koskeva laki on ollut Suomen eduskunnassa käsiteltävänä, mutta lainsäädäntömuutos ei kuluneella hallituskaudella ehtinyt valmistua. [29] [30]

Merituulivoimalan koko ja sen kapasiteettikerroin vaikuttavat oleellisesti voimalan tuottamaan sähköenergian määrään. Merelle rakennetaan keskimäärin tehokkaampia voimaloita, joiden kapasiteettikerroin on suurempi, kuin maalle rakennettavien, minkä vuoksi merituulivoimalla saadaan tuotettua enemmän sähköä maatuulivoimaan verrattuna. Eri merituulivoimahankkeiden kustannukset vaihtelevat paljon hankkeen mukaan, minkä takia merituulivoiman kannattavuuteen liittyvät arviot voivat poiketa runsaasti tietyn hankkeen kustannuksista. Tämän vuoksi kannattavuutta voi olla myös vaikea arvioida. Erityisesti maissa, joissa hankkeita ja käytännön kokemusta kustannuksista on vähän, kuten Suomessa, hankkeen kannattavuutta voi olla erityisen haasteellista arvioida.

4.3 Lupa- ja viranomaismenettelyt

Tuulivoimahankkeet, niin maa- kuin merituulivoimahankkeet, vaativat useampia erilaisia lupia ennen rakentamista. Maailmalla lupaprosessit ja viranomaismenettelyt ovat aina maakohtaisia, joten keskitytään tässä Suomen valtion asettamiin menettelytapoihin.

Suomessa merituulivoimapuistolle yleisesti tarvittavia lupia ja läpikäytäviä prosesseja ovat tuulivoimayleiskaava, rakennuslupa, ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA-menettely), mahdollisesti ympäristölupa, vesilupa, lentoestelupa, Puolustusvoimien ja Rajavartiolaitoksen puoltava lausunto ja purkamislupa. [31] [32] Merituulipuisto voidaan sijoittaa joko talousvyöhykkeelle tai aluevesille. Talousvyöhykkeelle rakennettavan merituulipuiston lupaprosessi on hieman erilainen, sillä siellä sovelletaan eri lainsäädäntöä. Talousvyöhykkeelle rakennettaessa ei tehdä kaavoitusta, mutta hankkeelta edellytetään valtioneuvoston suostumusta vyöhykkeen hyödyntämiseen ja sinne rakentamiseen. Muuten talousvyöhykkeelle sijoittuva merituulivoimahanke edellyttää samoja viranomaismenettelyjä, kuin aluevesille sijoittuva hanke. [32]

Merituulivoimahankkeiden kannalta vesilupa on oleellinen lupa niin hankkeen rakenteen ja teknologian kannalta mutta myös ajallisesti, sillä vesilupaprosessi kestää noin yhdestä kahteen vuotta ja se haetaan aluehallintovirastolta. Vesilupa tarvitaan, kun hanke voi vaikuttaa haitallisesti vesistön syvyyteen, asemaan, vedenkorkeuteen, virtaamaan, rantaan, vesiympäristöön tai pohjavedenlaatuun tai sen määrään. Vesilupa vaaditaan myös, mikä tuulivoimahanke vähentää merkittävästi luonnon kauneutta, ympäristön viihtyisyyttä, kulttuuriarvoja tai vesistön soveltuvuutta virkistyskäyttöön. Maatuulivoimahankkeet tarvitsevat harvemmin vesilupaa. Merituulivoimahankkeet voivat tarvita vesiluvan lisäksi tutkimusluvan, jonka hankkiminen voi olla tarpeen jo ennen vesiluvan hankkimista, jotta merenpohjan tutkimustyöt saadaan käyntiin jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa. [28]

Suomessa tuulivoimahankkeiden luvitusprosessi on moniportainen ja vie paljon aikaa, vaikkakin joitain menettelyjä voidaan hoitaa samanaikaisesti. Esimerkiksi YVA-menettelyllä ja tuulivoimayleiskaavalla on mahdollisuus yhteismenettelyyn, mutta YVA-menettely voi viedä joka tapauksessa vuosia. Näiden viranomaismenettelyjen jälkeen jäljellä on vielä muita lupia, kuten liittymisjohdon luvitus ja vesilupa, joiden hankkimiseen voi mennä taas vuosia. Lupaprosessi vie kokonaisuudessaan, selvitystarpeen mukaan, useita vuosia ja kustantaa satoja tuhansia euroja, joka hidastaa huomattavasti merituulivoimahankkeen etenemistä. Vuonna 2019 laaditun hallitusohjelman mukaan valtion tavoitteena onkin vähentää tuulivoiman rakentamisen hallinnollisia esteitä ja siten tehdä hankekehityksestä yksinkertaisempaa ja suoraviivaisempaa. [28]

5. MERITUULIVOIMALAT

Maailman ensimmäinen merituulivoimala on otettu käyttöön 1992 Tanskassa ja se on ollut hyvin vaatimaton verrattuna nykypäivän vaatimuksiin. Ensimmäisen merituulivoimalan jälkeen voimalat ovat kehittyneet ja niiden kehitykseen on panostettu huomattavasti. [5]

5.1 Tahkoluodon merituulipuisto

Porin Tahkoluotoon rakennettu merituulipuisto on toistaiseksi Suomen ainoa merelle rakennettu tuulipuisto ja maailman ensimmäinen jäätyvälle merelle rakennettu tuulipuisto. Tahkoluodon merituulipuistossa on 10 voimalaa ja yksittäisen voimalan teho on 4,2 MW. Merituulipuisto tuottaa vuodessa sähköä noin 155 GWh. Tämä kattaa Suomessa n. 80 000 kerrostaloyksiön vuotuisen sähkönkulutuksen. [33]

Tahkoluodon tuuliolosuhteet ja valmiiksi rakennettu infrastruktuuri sopivat erityisen hyvin sähköenergiantuotantoon tuulivoiman avulla, jonka takia Tahkoluodon merituulipuistoa aiotaan laajentaa. Hankkeen avulla Suomi tuottaa entistä enemmän hiilineutraalia sähköä ja lähestyy asetettuja ilmastotavoitteita. Laajennuksessa Tahkoluotoon on tarkoitus rakentaa 40 uutta merituulivoimalaa, joiden nimellistehot ovat 11–20 MW ja joiden vuosituotanto on parhaimmillaan n. 2000 GWh. Laajennus tällaisenaan tulee olemaan merkittävä ja suunniteltujen voimaloiden nimellistehot ovat suuria huomioiden nykyisten suurimpien voimaloiden nimellistehot. Laajennushankkeen on tarkoitus valmistua vuonna 2027. [34] [35]

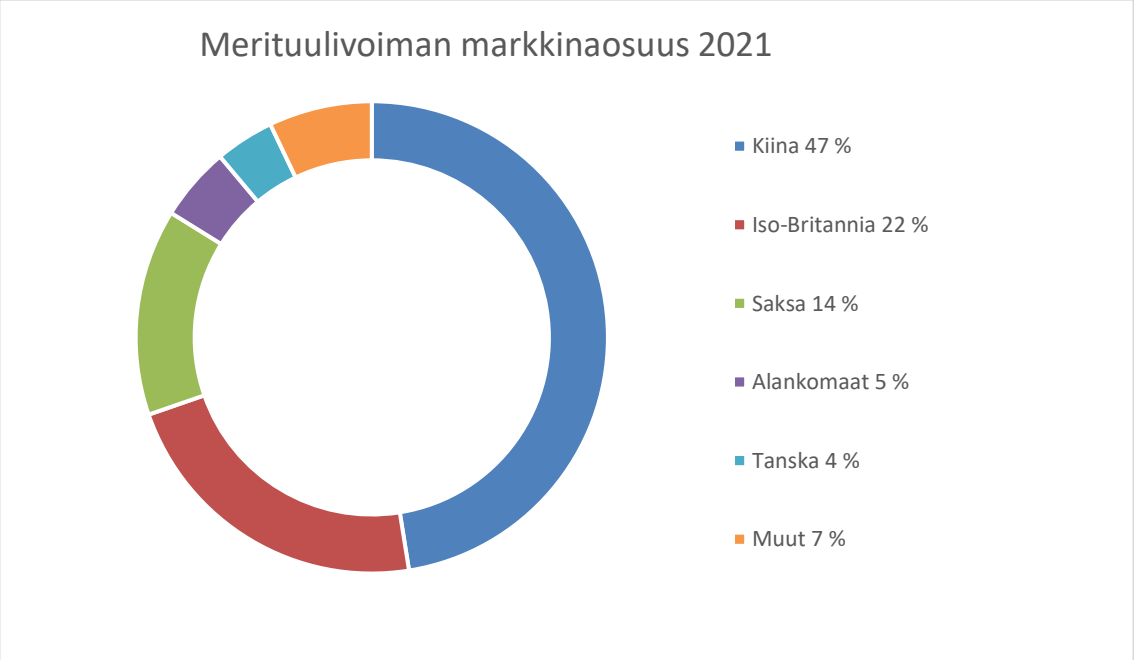
Ennen Tahkoluodon merituulipuiston laajennuksen valmistumista alueella toteutetaan demonstraatiohanke, jonka tarkoituksena on demonstroida ja selvittää kahden 15 MW:n merituulivoimalan avulla syvempään veteen soveltuvia perustuskonsepteja ja jäätäviin olosuhteisiin sopivia rakennusmenetelmiä. Hanke on saanut Työ- ja elinkeinoministeriöltä 30 miljoonan euron tuen, jonka avulla kehitetään merituulivoimaliiketoiminnan valmiuksia Suomessa. [36]

5.2 Merituulivoimalat maailmalla

Suurin osa maailman merituulivoimasta sijoittuu Eurooppaan ja Aasiaan. Eurooppa oli pitkään selkeästi johtavassa asemassa asennetun merituulivoimakapasiteetin suhteen, mutta vuoden 2018 jälkeen Aasiassa on rakennettu huomattavasti enemmän

merituulivoimaa kuin muualla. Kumulatiivisesti Euroopassa on kuitenkin vielä suurempi markkinaosuus merituulivoimakapasiteetin suhteen. [11]

Kuvassa 6 on esitetty merituulivoiman markkinaosuuden jakautuminen maailmalla vuonna 2021. Yhteensä vuoden 2021 lopulla asennettua merituulivoimakapasiteettia oli 55,9 GW.



Kuva 6: Merituulivoiman jakautuminen maailmalla 2021 [11]

5.2.1 Hornsea 1 ja 2 – Iso-Britannia

Iso-Britanniassa on asennettua merituulivoimakapasiteettia yli 10 GW, joka on maailman toiseksi eniten, vain hieman Kiinaa vähemmän. Merituulivoimaa rakennetaan Iso-Britanniassa moninkertaisesti verrattuna maatuulivoimaan. Iso-Britannian tavoitteena on, että asennettua merituulivoimaa on 50 GW vuoteen 2030 mennessä. Rakenteilla on 5 GW:n edestä merituulivoimaa ja suunnitteilla 11 GW:n edestä. [37]

Hornsea 1 sijaitsee Pohjanmerellä, 120 kilometrin päässä Yorkshiren rannikosta Itäisessä Iso-Britanniassa. Hornsea 1 alkoi tuottamaan säännöllisesti sähköenergiaa vuonna 2019 ja se oli kapasiteetiltaan maailman ensimmäinen yli 1 GW:n merituulipuisto. Hornsea 1 muodostuu 174:stä 7 MW:n merituulivoimalasta, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 1,2 GW. Jokaisen voimalan korkeus on 190 metriä ja yksittäisen lavan pituus on 75 metriä. Yhden Hornsea 1 merituulivoimalan roottorin kierroksella voidaan kattaa

yhden talouden keskimääräinen sähköenergiantarve vuorokauden aikana. Hornsea 1 kokonaistuotanto kattaa yli miljoonan kotitalouden sähköenergiantarpeen. [38]

Hornsea 2 on vuonna 2022 valmistunut merituulipuisto Hornsea 1 pohjois- ja länsipuolelle. Hornsea 2 koostuu 165:stä 8 MW:n merituulivoimalasta, joten se on kokonaiskapasiteetiltaan hieman edeltäjäänsä suurempi, 1,32 GW ja samalla maailman suurin merituulipuisto. Jokainen Hornsea 2 merituulivoimalan korkeus on 200 metriä ja roottorin halkaisija on 167 metriä.

Kuvassa 7 näkyy Hornsea 1 ja 2 nykyiset sijoittelut, sekä tulevaisuudessa rakennettavien Hornsea 3 ja 4 suunnitellut sijainnit toisiinsa nähden. [39]

Kuva 7: Hornsea 1–4 merituulipuistojen sijainnit [39]

5.2.2 Horns Rev 1–3 – Tanska

Ensimmäinen suuremman kokoluokan merituulipuisto Horns Rev 1 valmistui vuonna 2002 Tanskan länsipuolelle, Pohjanmerelle. Puisto sijaitsee 18 kilometrin päässä rannikosta. Horns Rev 1 koostuu 80 merituulivoimalasta, joiden jokaisen kapasiteetti on 2 MW ja kokonaiskapasiteetiltaan puisto on 160 MW. Nykyajan mittakaavassa Horns Rev 1 ei

ole järin suuri tuulipuisto, mutta aikanaan sen valmistuminen oli merkittävä virstanpylväs koko merituuliliiketoiminnalle. Puiston vuosituotannolla katetaan 150 000 kotitalouden sähkönkulutus. [40] [41]

Horns Rev 2 rakennettiin myös Pohjanmerelle, hieman Horns Rev 1:stä kauemmas, noin 30 kilometrin päähän rannikosta. Vuonna 2009 käyttöönotettu merituulipuisto koostuu 91 voimalasta, joiden jokaisen kapasiteetti on 2,3 MW. Kokonaiskapasiteettia puistolla on 209 MW ja vuosituotanto on noin 800 GWh. Valmistuessaan Horns Rev 2 oli maailman suurin merituulipuisto ja se rakennettiin kauimmas merelle, mitä yksikään aiempi merituulipuisto. [42]

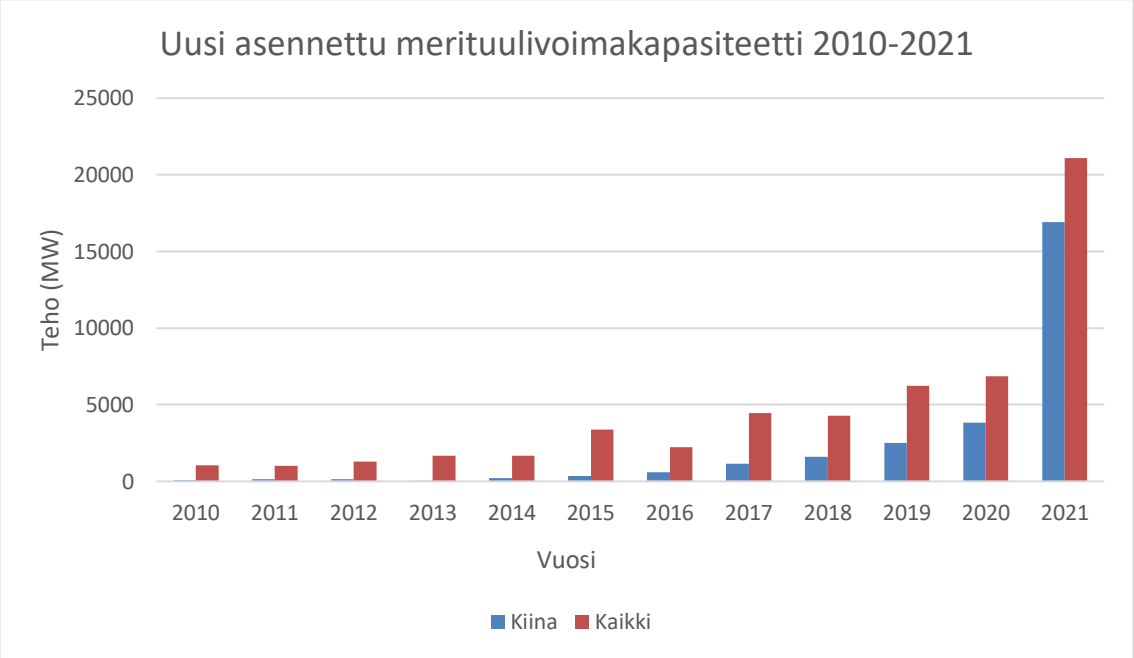
Pohjoismaiden suurin merituulipuisto Horns Rev 3 otettiin käyttöön vuonna 2019. Puiston kokonaiskapasiteetti on 406,7 MW ja se koostuu 49 voimalasta, joiden jokaisen turbiinin teho on 8,3 MW. Horns Rev 3 sähköenergiantuotanto kattaa n. 425 000 tanskalaisen kotitalouden sähköntarpeen. [43]

5.2.3 Shanwei Jiazi ja Shanwei Houhu - Kiina

Vuoden 2022 lopussa Kiinaan valmistui sen tähän mennessä suurimmat merituulipuistot, joihin kuuluu Shanwei Jiazi I ja II sekä Shanwei Houhu. Näiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 1,4 GW ja yhteensä puistojen sähköenergian vuosituotanto on 4,5 TWh. Jo pelkästään näiden puistojen energiantuotannolla pystytään leikkaamaan Kiinan hiilidioksidipäästöjä 3,5 miljoonan tonnin edestä. [44]

Kiinan tuulivoimaliiketoiminta on kasvanut nopeasti viime vuosien aikana ja kehityksessä sekä korkealaatuisten laitteistojen parissa on tehty läpimurtoja. Kiinassa on onnistuttu tekemään 13,6 MW:n tehoinen tuuliturbiini, jonka roottorin halkaisija on 252 metriä. Kapasiteetiltaan kyseinen turbiini on Aasian markkinoiden suurin ja halkaisijaltaan maailman suurin. Vuonna 2021 Kiina liitti uutta merituulivoimaa sähköverkkoon 16,9 GW, joka oli 80 % koko maailmassa rakennetusta merituulivoimasta kyseisenä vuonna. Kiinan aktiivinen rakentaminen ja investoinnit merituulivoimaan kiihdyttävät merituulivoiman rakentamista myös muualla maailmassa.

Kuvassa 8 on esitetty uuden asennetun merituulivoimakapasiteetin suhde Kiinan ja koko maailman välillä. [11]



Kuva 8: Asennettu merituulivoimakapasiteetti vuosina 2010–2021 [11]

5.3 Merituulivoimaloiden tulevaisuus

Merituulipuistohankkeita on Suomessa suunnitteilla tällä hetkellä 12 kappaletta, joiden yhteenlaskettu teho on yli 13 GW. [45] Suomeen suunniteltujen merituulipuistojen sijoituspaikka on Pohjanlahdella, yleisvesialueilla. Ne soveltuvat mataluutensa puolesta erityisen hyvin merituulivoiman hyödyntämiseen. [46] Korsnäsin merituulivoimahanke on yksi Suomen merkittävimpiä tulevia tuulivoimahankkeita. Puiston suunniteltu kapasiteetti on 1,3 GW ja tuottavan vuodessa sähköenergiaa jopa 5 TWh. Korsnäsin merituulipuisto rakennetaan 15 kilometrin päähän rannikosta ja on valmistuessaan Suomen ensimmäinen avomerelle rakennettu merituulipuisto. [47]

Ahvenanmaalla on valtava potentiaali merituulivoiman hyödyntämiseen ja alueella voitaisiin tuottaa vuosittain sähköä jopa 31 TWh. Ahvenanmaan hyödyntäminen merituulipuiston rakentamiseen vaikuttaisi vahvasti Suomen ja Ruotsin energiamarkkinoihin. Samalla, kun aluetta voitaisiin käyttää sähköntuotantoon merituulivoiman avulla, olisi Ahvenanmaalla mahdollisuuksia hyödyntää myös uusiutuvalla energialla valmistettuja tuotteita, kuten vetyä. [48]

Iso-Britannian Yorkshiren rannikolle rakennettujen Hornsea 1 ja 2 lisäksi alueelle on suunnitteilla Hornsea 3 ja 4 merituulipuistot. Hornsea 3 tulee muodostumaan 231

tuulivoimalasta, joiden yhteenlaskettu teho 2,85 GW. Valmistuessaan Hornsea 3 on maailman suurin merituulipuisto ja sen tuottama sähköenergia riittää kattamaan yli 3 miljoonan kotitalouden keskimääräisen sähkön tarpeen. [49] Hornsea 3:lla on merkittävä rooli Iso-Britannian ilmastotavoitteissa ja energiastrategiassa, kun se tavoittelee 50 GW asennettua merituulikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä. Puiston on tarkoitus valmistua vuonna 2026. [50] Hornsea 4 on suunniteltu sijoitettavaksi muiden Hornsea projektien luoteispuolelle, mutta se odottaa vielä rakennuslupaa. Puisto olisi kooltaan 180 merituulivoimalan suuruinen ja sen kapasiteetti olisi n. 2,6 GW. [50] [51]

Merituulivoimalla on valtava merkitys useiden maiden ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Odotettu keskimääräinen vuotuinen kasvutahti maailman merituulivoiman kokonaiskapasiteetilla on 6,3 % vuoteen 2026 asti ja 13,9 % seuraavan vuosikymmenen alkuun asti. Tällä kasvutahdilla uusien vuoden aikana asennettavien voimaloiden odotetaan saavuttavan 30 GW:n rajan vuonna 2027 ja 50 GW:n rajan 2030 mennessä. Kokonaiskapasiteetin odotetaan olevan 370 GW vuoden 2031 loputtua. Monilla Aasian valtioilla, erityisesti Kiinalla ja Taiwanilla, merituulivoima on yksi tärkeimmistä uusiutuvan energiantuotannon investointikohteista. [11]

Tulevaisuudessa tullaan rakentamaan ja kehittämään yhä enemmän kelluvaa merituulivoimaa, jolloin merituulipuistojen rakennusmahdollisuudet kasvavat entisestään. Kauempana merellä tuulee voimakkaasti ja lähes 80 % maailman merituulivoimapotentiaalista on vesissä, jotka ovat yli 60 metriä syviä. Kun voimalat eivät ole enää riippuvaisia merenpohjasta ja siihen rakennettavista perustuksista, voidaan valita optimaalisimmat sijainnit uudelle merituulivoimakapasiteetille. Tällä hetkellä maailmalle on rakennettu muutamia kelluvia merituulivoimaloita ja niiden odotetaan olevan seuraava askel uusiutuvan energian saralla. [52]

6. YHTEENVETO

Merituulivoima on tällä hetkellä murroksessa ja todella suuressa roolissa niin nykyhetken kuin tulevaisuuden kasvavan energiantarpeen ratkaisuissa. Merituulivoimarakentaminen on suurimmillaan Euroopassa ja Aasiassa, mutta tulevaisuudessa merituulivoimaloita tullaan näkemään yhä enenevissä määrin ympäri maailmaa.

Tuulivoiman kehittyminen ja suosio on ottanut viimeisten kymmenen vuoden aikana suuria harppauksia, joka näkyy uusina tuulivoimainvestointeina. Tuulivoiman, tässä tapauksessa erityisesti merituulivoiman, rakentamiseen liittyy sen potentiaalin lisäksi myös haasteita.

Merituulivoiman potentiaali liittyy erityisesti suotuisiin sää- ja rakentamisolosuhteisiin. Maailmassa on satoja tuhansia kilometrejä rannikkoa, joihin voidaan mahdollisesti sijoittaa merituulivoimaloita. Merelle voidaan rakentaa suurempia ja tehokkaampia voimaloita, joka on myös taloudellisesti järkevämpää ja suuri etu verrattuna maatuulipuistoihin. Merituulipuistojen kohdalla puhutaan lähtökohtaisesti aina satojen megawattien nimellistehoista, suurimpien puistojen kohdalla nykyään jo yli gigawatin kokoisesta kokonaisuudesta. Merituulivoima on tunnistettu niin tärkeäksi tulevaisuuden energiantuotantomuodoksi, että Euroopan Unioni on muodostanut sen ympärille oman strategiansa.

Haasteita merituulirakentamiselle ja -tuotannolle muodostaa erilaiset ympäristöolosuhteet, kustannustekijät ja viranomaismenettelyt. Merituulipuiston rakentaminen on valtava projekti, joka vaatii ympäristöltä paljon ja siksi ennen rakentamista tulee tehdä tarkat selvitystyöt mm. sijainnin sopivuudesta ympäristöllisesti. Erityisesti Suomessa viranomais- ja lupamenettelyt merituulivoimapuistoille vievät paljon aikaa ja projekteilla kestää usein vuosia päästä rakentamisvaiheeseen. Tämä hankaloittaa projektien käynnistämistä ja investointipäätösten tekemistä.

Suomessa on vasta yksi käynnissä oleva merituulipuisto, Tahkoluodon merituulipuisto, mutta uusia hankkeita on suunnitteilla useita ja myös Tahkoluodon puistoa on tarkoitus laajentaa kymmenillä tuulivoimaloilla. Maailmanlaajuisesti merituulivoiman kokonaiskapasiteetin odotetaan olevan 370 GW:a vuoden 2031 loputtua ja merituulivoimalla on suuri merkitys monien maiden ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

LÄHTEET

[1] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 1. Aufl. Hoboken: Wiley, 2005.

[2] Tuulivoimateknologia, Motiva Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia

[3] A. Korpela, Tuulivoiman perusteet, AMK-Kustannus Oy, Tammertekniikka, 2016

[4] J. Bastman, Sähkökoneet -opintomoniste, Tampereen yliopisto, 2021.

[5] P. A. Lynn, Onshore and offshore wind energy: an introduction. Wiley, Chichester, 2012.

[6] Tuulivoiman kustannukset, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus

[7] Syöttötariffi, Motiva Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/syottotariffi_eli_takuuhintajarjestelma

[8] Energiavuosi 2022, Energiateollisuus ry, julkaisu. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf

[9] Tuulivoima Suomessa 2022, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, julkaisu. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2022-1.pdf

[10] Tuulivoimatilastot vuosilta 2013–2022, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, julkaisut. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/kategoria/tilastot-2

[11] Global Offshore Wind Report 2022, Global Winf Energy Council (GWEC), julkaisu. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/06/GWEC-Offshore-2022_update.pdf

[12] M. Jääskeläinen, L. Rantala, A. Sundelin, Merituulipuiston rakentaminen, Prizztech Oy, julkaisu. Saatavissa (viitattu 17.3.2023): https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/merituulipuistonrakentaminen2012.pdf

[13] P. A. Lynn, Onshore and Offshore Wind Energy: an introduction. Wiley, Chichester, 2012.

[14] Onshore tuulivoimalaperustukset, Peikko, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.3.2023): https://www.peikko.fi/tuotteet/tuulivoimaloiden-perustusratkaisut/kuvaus/

[15] Isabel C. Gil-Garcia, M. Socorro Garcia-Cascales, A. Fernandez-Guillamon, A. Mollina-Garcia, Categorization and Analysis of Relevant Factors for Optimal Locations in Onshore and Offshore Wind Power Plants: A Taxonomic Review, Journal of marine science and engineering, 2019, Vol.7 (11)

[16] Esiselvitys ja sopivan alueen etsintä, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/esiselvitys-ja-sopivan-alueen-etsinta

[17] Tuulivoiman ympäristövaikutukset, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset

[18] Tuulivoimaloiden sijoittelu, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuulivoimaloiden-sijoittelu

[19] Suomen tuuliatlas, Ilmatieteen laitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/#

[20] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöministeriö, julkaisu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH_5_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[21] Global Offshore Wind Report 2021, Global Wind Energy Council (GWEC), julkaisu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/09/GWEC-offshore-wind-2021-updated-1.pdf

[22] Offshore Renewable Energy, European Comission, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en

[23] An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future, European Comission, julkaisu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:741:FIN&qid=1605792629666

[24] H. Auvinen, M. Hario, M. Kunnasranta, T. Vehanen, Merituulivoiman vaikutukset rannikon kaloihin, lintuihin ja nisäkkäisiin, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, 2010. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/531244/rks2010_17.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[25] Merituulivoiman ympäristönäkökulmat, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/merituulivoima/merituulivoiman-ymparistonakokulmat

[26] A. Tiihonen, Tutkatiedot kertovat: Tahkoluodon merituulivoimapuiston linnustovaikutukset ovat ennakoitua vähäisempiä, Tuulivoimalehti, 2021. Saatavissa

(viitattu 22.3.2023): https://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/tutkatiedot-kertovat-tahkoluodon-merituulivoimapuiston-linnustovaikutukset-ovat-ennakoitua-vahaisempia.html

[27] Jäätäminen, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/jaataminen

[28] A. Hujanen & al., Tuulivoimarakentamisen edistäminen, Valtioneuvoston kanslia, 2021. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163302/VNTEAS_2021_51.pdf

[29] Lausunto luonnoksesta hallituksen esitykseksi laista kiinteistöverolain 3 §:n muuttamisesta, Energiateollisuus ry, 2020. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): https://energia.fi/files/5272/VM_Lausunto_merituulivoiman_kiinteistoverosta_20200923.pdf

[30] M. Vento, Merituulivoiman suosio kovassa kasvussa – hankkeita nyt kolmannes enemmän kuin keväällä, Kuntatekniikka, 2022. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): https://kuntatekniikka.fi/2022/11/08/merituulivoiman-suosio-kovassa-kasvussa-hankkeita-nyt-kolmannes-enemman-kuin-kevaalla/

[31] Tuulivoimaloille haettavat luvat, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/tuulivoimaloille-haettavat-luvat

[32] Uusiutuvan energian lupaneuvonta – Merituulivoima, ELY-keskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://www.ely-keskus.fi/web/uusiutuvan-energian-lupaneuvonta/merituulivoima

[33] Sähkönkulutus yksiössä, Fortum, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://yhdessa.fortum.fi/sahkonkulutus#Yksio

[34] Tahkoluodon merituulivoimahankkeen laajennus, Hyötytuuli, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://hyotytuuli.fi/tuulipuistot/tahkoluodon-merituulivoimahankkeen-laajennus

[35] Tahkoluodon merituulipuiston laajennus etenee kaavoituksesta vesi- ja rakennuslupavaiheeseen, Hyötytuuli, tiedote. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://hyotytuuli.fi/tahkoluodon-merituulipuiston-laajennus-etenee-kaavoituksesta-vesi-ja-rakennuslupavaiheeseen/

[36] Suomen Hyötytuulen Tahkoluodon merituulivoiman demonstraatiohankkeelle TEM:ltä 30 000 000 euron tuki, Hyötytuuli, tiedote. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://hyotytuuli.fi/suomen-hyotytuulen-tahkoluodon-merituulivoiman-demonstraatiohankkeelle-temlta-30-000-000-euron-tuki/

[37] Offshore wind, Department for Business & Trade, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://www.great.gov.uk/international/content/investment/sectors/offshore-wind/

[38] Hornsea 1 Wind Farm, Ørsted, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/our-wind-farms/hornsea1

[39] Hornsea Two Offshore Wind Farm, Ørsted, julkaisu, 2022. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://orstedcdn.azureedge.net/-/media/www/docs/corp/uk/hornsea-project-two/hornsea-2-newsletter-march-2022.ashx?rev=f22f9f2d1124487fb5ed95389a6448a0&hash=222999B742A4FB33203327C378CAF099

[40] Making green energy affordable, Ørsted, julkaisu, 2019. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://orstedcdn.azureedge.net/-/media/www/docs/corp/com/explore/making-green-energy-affordable-june-2019.ashx?rev=8c160c2c03bb4fcfb8814c0571393370&hash=276D269FC09562FE2E11B5378D8FE900

[41] Our offshore wind farms, Ørsted, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://orsted.com/en/our-business/offshore-wind/our-offshore-wind-farms

[42] Horns Rev 2 Offshore Wind Farm, Ørsted, julkaisu Saatavissa (viitattu 25.3.2023): https://orstedcdn.azureedge.net/-/media/www/docs/corp/com/our-business/wind-power/wind-farm-project-summary/horns-rev-2_uk_2018.ashx?rev=7078128df406404ea7c450c0d8f7ed05&hash=EC1FB80FBAF902C1F03E9F45F195AAB7

[43] Horns Rev 3, Vattenfall, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.3.2023): https://powerplants.vattenfall.com/horns-rev-3/

[44] China's largest unsubsidized offshore wind power project completed, Global Times, tiedote. Saatavissa (viitattu 26.3.2023): https://www.globaltimes.cn/page/202212/1282301.shtml

[45] Tuulivoimahankkeet Suomessa 11/2022, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, julkaisu. Saatavissa (viitattu: 26.3.2023): https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet_syksy_2022_11.pdf

[46] Tulevat hankkeet, Metsähallitus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.3.2023): https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/merituulivoimassa-suuret-mahdollisuudet/tulevat-hankkeet/

[47] Korsnäsin merituulivoimapuistohankkeen taustaa, Metsähallitus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.3.2023): https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/korsnasin-merituulivoimapuisto/korsnasin-merituulivoimapuiston-hankekuvaus/

[48] Maailman suurin merituulipuisto Ahvenanmaan merialueille, LUT University, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.5.2023): https://www.lut.fi/fi/uutiset/maailman-suurin-merituulipuisto-ahvenanmaan-merialueille

[49] About the project Hornsea Three, Ørsted, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): https://hornseaproject3.co.uk/about-the-project

[50] Ørsted awarded contract for world's single biggest offshore wind farm, Ørsted, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): https://orsted.com/en/company-announcement-list/2022/07/2022070754191

[51] About the project Hornsea Four, Ørsted, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): https://hornseaprojects.co.uk/hornsea-project-four/about-the-project-4

[52] Floating wind, Equinor, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): https://www.equinor.com/energy/floating-wind