

Marja Vilkko

TUULIVOIMAN POTENTIAALI SUOMESSA – SÄHKÖVERKKOON LIITTÄMISEN NÄKÖKULMAT

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tekniikan kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Marja Vilkkö: Tuulivoiman potentiaali Suomessa – sähköverkkoon liittämisen näkökulmat
Tekniikan kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Kesäkuu 2019

Tässä työssä tarkastellaan Suomen tuuliolosuhteita ja niiden tarjoamaa potentiaalia tuulivoimalle. Työssä perehdytään siihen, miten uuden tuulivoimalan sijainti voidaan valita ja mitkä asiat siihen vaikuttavat. Tarkasteluissa otetaan myös huomioon Suomen sähköverkko, sen sijainti ja milloin ja miten siihen voidaan liittyä. Tuulivoimalat tarvitsevat säätövoimaa, mutta sitä Suomella on vielä riittävästi ja tuulivoimaloiden liittäminen sähköverkkoon ei vaaranna toimitusvalmiutta.

Työssä käydään läpi tuulivoiman teoria ja tarkastellaan mitä asioita pitää ottaa huomioon tuulivoimalaa suunnitellessa. Työssä käsitellään enemmän tuulivoimalan sijoitteluun liittyviä asioita, ja tarkastellaan esimerkiksi Suomen tuuliatlaksen avulla Suomen tuuliolosuhteita. Työssä käsitellään myös tuulivoimalan kehushankkeeseen liittyviä asioita, esimerkiksi tuulivoimalan tarvitsemia lupia ja miten tuulivoimalahanke kehittyy.

Työn tuloksia havainnollistetaan ja esimerkkitarkastelussa käytetään työssä kerättyä tietoa ja etsitään mahdolliselle tuulivoimalalle sijainti. Tuuliatlaksen tietojen avulla valittiin Vestas V117-3.45 tuulivoimala. Voimalan tehokäyrän ja muiden teknisten ominaisuuksien avulla kuitenkin lopulta valitsemani paikka ja voimala eivät olleet sopivia ja voimalan hyötysuhteeksi saatiin vain noin 25 %. Tuulivoimalan paikan sekä voimalatyyppin valitseminen on iteratiivinen projekti, ja tässä työssä esitettiin työn ensimmäinen kierros. Työn case-tarkastelu on havainnollistava tarkastelu tuulivoimalan paikan ja mallin valitsemisesta.

Avainsanat: tuulivoima, tuulipuisto, sähköverkko, tuulivoima Suomessa, onshore-voimala, tuuliolosuhteet, tuuliatlas

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUULIVOIMAN NYKYTILANNE	2
2.1 Tuulivoiman teoria.....	2
2.2 Tuulivoimalan rakenne	3
2.2.1 Tuulivoimalan rakenteen suunnittelu	4
2.2.2 Tuulivoimalan lisälaitteet	4
2.3 Tuulivoiman kapasiteetti Suomessa	6
2.4 Tuulipuistot	7
2.5 Tuulivoiman tilanne maailmalla	8
3. SÄHKÖVERKKOON LIITTÄMINEN	9
3.1 Suomen sähköverkko.....	9
3.2 Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon	10
4. TUULIVOIMALAN SIJOITTELU	13
4.1 Suomen tuuliolosuhteet.....	14
4.2 Tuulivoimalan tuotanto-odotukset.....	16
4.2.1 Pinta-alamenetelmä	17
4.2.2 Tehokäyrämenetelmä	18
4.3 Offshore- ja onshore-voimalat	19
5. TUULIVOIMALAN KEHYSHANKE	22
6. CASE-TARKASTELU.....	24
7. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DFIG	Double-Fed Induction Generator, kaksoissyötetty epätahtigeneraattori
GW	gigawatti
kV	kilovoltti
Lat	leveyspiiri
Lon	pituuspiiri
MVA	megavolttiamppeeri
MW	megawatti
TWh	terawattitunti
WRIG	Wound rotor induction generator, liukurengasepätahtigeneraattori
YVA	Ympäristövaikutusten arviointimenettely
A	pinta-ala
A_{turbiini}	turbiinin pyyhkäisyypinta-ala
C	määräkerroin
C_F	kapasiteettikerroin
f_i	esiintymistodennäköisyys tietyllä tuulennopeudella
h	tunti
k	muotokerroin
m	metri
P'_{ka}	tuulen keskimääräinen tehotiheys
v_0	ilmavirtauksen nopeus
v_1	roottorin jälkeen ilmavirtauksen nopeus
ρ	ilman tiheys
€	euro
η	hyötysuhde

1. JOHDANTO

Tuulivoima on puhdasta uusiutuvaa energiaa, jonka potentiaalia ei vielä Suomessa käytetä kokonaan. Tuulivoimaloiden ja tuulipuistojen rakennushankkeita on Suomessa ollut lisääntyvissä määrin jo monta vuotta, ja tuulivoimalla saadaankin katettua jo 6,7 % osuus Suomen sähkön tarpeesta. Tuulivoimalla voidaan tuottaa sähköä suoraan Suomen sähköverkkoon tai kuluttaja voi itse rakentaa oman tuulivoimalan ja käyttää siitä saatavan sähköenergian omiin tarpeisiinsa. Pientuulivoimaloiden tuottamaa kuluttajalle omaan käyttöön tulevaa sähköä voidaan myös varastoida. Suuremaan teholuokan voimalat usein kuitenkin syöttävät sähkön suoraan verkkoon.

Tässä työssä tarkastellaan Suomen tuulivoiman tilannetta vuonna 2019 ja sitä, millainen potentiaali sillä on myös tulevaisuudessa. Suomessa on hyvät tuuliolosuhteet rannikoilla, maalla sekä merellä, mutta tässä työssä keskitytään erityisesti siihen, miten tuulivoimalat saadaan kytkettyä suoraan Suomen sähköverkkoon. Tässä työssä rajataan merelle rakennettavat voimalat eli offshore-voimalat työn ulkopuolelle, sillä niiden liittäminen Suomen sähköverkkoon on erilainen prosessi kuin maalla olevien onshore-voimaloiden.

Luvussa 2 käsitellään tuulivoiman fysiikkaa, tuulivoimaloiden rakennetta sekä tarkastellaan tuulivoiman tilannetta Suomessa sekä maailmalla. Luvussa 3 käydään läpi Suomen sähköverkon tilaa, sekä tekniikkaa, jolla tuulivoima liitetään sähköverkkoon. Näiden jälkeen luvussa 4 tarkastellaan tuulivoimaloiden sijoitteluun liittyviä seikkoja ja esimerkiksi Suomen tuulisuutta ja sen tuomaa tuulivoiman potentiaalia. Luvussa 5 käydään lyhyesti läpi muita tuulivoimahankkeeseen liittyviä vaihteita, kuten lupien hakemista ja rahoitukseen liittyviä seikkoja. Tässä työssä kerätyn tiedon avulla luvussa 6 tarkastellaan Suomen tuuliatlaksen avulla potentiaalista paikkaa tuulivoimalalle ja tehdään energiatuotanto-odotuksista arvioita. Lopuksi tarkastellaan olisiko valitulle paikalle todellisuudessa kannattavaa rakentaa voimalaa.

2. TUULIVOIMAN NYKYTILANNE

Tässä luvussa tarkastellaan tuulivoiman teoriaa, sitä miten tuulen teho voidaan laskennallisesti määrittää ja miten tehon hyödyntäminen toimii tuulivoimaloissa. Rakenteiden sekä esimerkiksi lapojen suunnittelu vaikuttavat tuulivoimalan tuottamaan tehoon. Tuulivoimaloissa tarvitaan myös erilaisia lisälaitteita riippuen siitä, käytetäänkö voimalassa epätahti- vai tahtigeneraattoria. Joissain voimaloissa on vaihteisto ja jotkut tarvitsevat erinäisiä suuntaajia, jotta sähköä voidaan syöttää sähköverkkoon. Näihin erilaisiin lisälaitteisiin tutustutaan myös tässä luvussa. Suomen tuuliolosuhteisiin sekä tuulisuuden mallintamiseen keskitytään enemmän luvussa 4.

2.1 Tuulivoiman teoria

Tuulivoiman teoria perustuu ilmavirtaan ja sen sisältämään kineettiseen energiaan. Koska ilmavirtauksen teho on ilmavirtauksen energia aikayksikköä kohden, on tuulivoimalan tuottama teho sähköenergiaa aikayksikköä kohti. Ilmavirran teho saadaan kaavasta

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3, \quad (2.1)$$

jossa ρ on ilman tiheys, A on ilmavirtausta kohti suoraan vastaan oleva pinta-ala, ja v_0 on ilmavirtauksen nopeus, eli tuulen nopeus [1, s. 36]. Tämä teho ei kuitenkaan ole suoraan tuulivoimalan roottorin tuottama teho. Tuuliturbiinin hyötysuhdetta koskevan Betzin lain avulla määritellään tuulivoimalan teoreettinen yläraja roottorin ja ilmavirtauksen osamäärälle. [1, s. 36–42]

Betzin laki tekee muutamia oletuksia tuulivoimalasta, kuten että sen roottori on ilmaa läpäisevä kiekko äärettömällä määrällä lapoja, ja että se on kitkaton sekä massaton. Lisäksi siihen kohdistuvan vastusvoiman ajatellaan olevan nolla ja vaikuttavana voimana on ainoastaan nostovoima. Näihin voimiin palataan luvussa 2.2 vielä tarkemmin sekä niiden vaikutukseen tuulivoimalan hyötysuhteeseen. Viides oletus on, että tuulivoimalan roottorin takana oleva ilmavirtaus on pyörteetöntä, vaikka kitkan takia esteen jälkeen todellisuudessa ilmavirtaukseen syntyy pyörteitä. Roottorin teholle voidaan esittää yhtälö

$$P_{roottori} = \frac{1}{2} \rho A_{roottori} v_0^3 \frac{(1 + \frac{v_1}{v_0})(1 - (\frac{v_1}{v_0})^2)}{2}, \quad (2.2)$$

jossa v_1 on roottorin jälkeen ilmavirtauksen nopeus [1, s. 40]. Roottorin tehon ja ilmavirran tehon osamäärää derivoimalla v_1 suhteen saadaan selvitettyä maksimi ilmavirtaukselle roottorin jälkeen. Vastaukseksi saadaan, että nopeuden v_1 maksimi on $v_0/3$. Tämä tulos sijoitetaan yhtälöön 2.2 ja jaetaan puolittain yhtälöllä 2.1. Tulokseksi saadaan tuulivoimalan hyötysuhteen ideaalinen maksimi

$$\frac{P_{turbiini}}{P_0} = \frac{(1 + \frac{v_0/3}{v_0})(1 - (\frac{v_0/3}{v_0})^2)}{2} = \frac{16}{27}, \quad (2.3)$$

eli noin 59,3%. [1, s. 36—42]

2.2 Tuulivoimalan rakenne

Tässä työssä käsitellään lähtökohtaisesti kolmilapaisia vaaka-akselisia tuulivoimaloita, jotka ovat yleisin tuulivoimalatyyppejä. On olemassa myös voimaloita, joilla on vain yksi tai kaksi lapaa, tai useampia kuin kolme lapaa. Tyypillisen vaaka-akselisen voimalan lisäksi löytyy myös pystyakselisiä voimaloita. Pystyakselisissä voimaloissa etuna on se, ettei sitä tarvitse kääntää tuulen suuntaa kohti. Myös huoltoa vaativat voimalan osat voidaan sijoittaa maan pinnalle, jolloin huoltotoimenpiteet on helpompi tehdä. [2]

Vaaka-akselisen tuulivoimalan rakenteeseen kuuluu sen perustukset maassa, torni, roottori, sisältäen lavat sekä navan ja konehuone eli naselli. Nasellin sisältö vaihtelee tuulivoimalan tyypistä riippuen, esimerkiksi on olemassa vaihteettomia eli suoravetoisia tuulivoimaloita. Tämä tarkoittaa sitä, että roottorin akseli on myös generaattorin akseli. [1, s. 49—51] Tuulivoimalan rakennetta suunniteltaessa pitää ottaa huomioon rakennuspaikan tuulisuus. Jos valitulla paikalla tuulee hyvin vaihtelevasti, kannattaa valita vaihtelevalla nopeudella pyörivä voimala. Jos taas valitulla paikalla on tasaisempi tuulisuus, vakionopeudella pyörivä voimala voi olla parempi vaihtoehto. Näihin voimalatyyppeihin palataan vielä tässä luvussa.

Paikan tuulisuus vaikuttaa myös tuulivoimalan kokoon. Tuulivoimalan tuottama teho kasvaa, jos voimalan pyyhkäisyypinta-ala kasvaa. Jos voimalan pyyhkäisyypinta-ala on suuri, tarvitsee sen olla myös korkeampi. Korkeampi voimala, jolla on suuri pyyhkäisyypinta-ala, pystyy hyödyntämään suuretkin tuulennopeudet. Suuri voimala käynnistyy noin 3-4 m/s tuulessa, mutta pystyy tuottamaan sähköä jopa yli 20 m/s tuulilla. Matalampi voimala, jonka pyyhkäisyypinta-ala on pienempi, pystyy hyödyntämään pienemmät tuulennopeudet. Voimala saattaa käynnistyä 3 m/s tuulennopeudessa, mutta saavuttaa jo nimellistehonsa esimerkiksi 10 m/s tuulennopeudessa. Tällöin 3-10 m/s tuulennopeuksien hyödyntäminen tehostuu.

Tuulivoimaloiden korkeus onkin kasvanut vuosien ja teknologian kehityksen myötä noin 40:stä metristä yli 200 metriin. Napakorkeus voi olla esimerkiksi 120-140 metriä ja lapojen pituus noin 60 metriä. Näin ollen pyyhkäisykorkeus voi olla yli 200 metriä. [3]

Tuulivoimaloiden käyttöikä on noin 20-25 vuotta. Käytön aikana kuitenkin osia joudutaan huoltamaan sekä vaihtamaan. [4] Tuulivoimalassa koneisto ja erityisesti vaihteet ovat herkkiä vaurioille ja huoltotoimenpiteet usein kohdistuvatkin niihin.

2.2.1 Tuulivoimalan rakenteen suunnittelu

Tuulivoimalan yhtenä tärkeänä suunnittelun kohteena ovat lavat. Niiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon monia asioita, kuten nostovoima sekä vastusvoima ja suhteellinen tuuli. Nostovoima ja vastusvoima ovat voimat, jotka siipiprofiili kohtaa ilmavirtauksessa. Nostovoima pyrkii sananmukaisesti nostamaan lapaa ylöspäin, tuulivoimaloissa siis pyörittämään lapaa eteenpäin ja vastusvoima taas painaa lapaa taaksepäin. Nostovoima pyritään saamaan mahdollisimman suureksi ja vastusvoima pieneksi. Suhteellinen tuuli on maanpäällisen tuulen sekä lavan nopeuden aiheuttaman vauhtituulen yhteisvaikutus eli ilmavirtaus, jonka lapa tuntee. [1, s. 56-59]

Suhteellisen tuulen saapumiskulma vaikuttaa vahvasti lavan kohtauskulmaan, joka liian suureksi kasvaessaan saattaa aiheuttaa lavan sakkaamisen. Kohtauskulma tarkoittaa siis kulmaa lavan jänneviivan sekä suhteellisen tuulennopeuden välillä. Optimaalisen kohtauskulman löytäminen on hyvin tärkeää. Kun kohtauskulmaa kasvatetaan, nostovoima kasvaa ja ilmavirtaus alkaa hieman irrota lapaprofiilin yläpuolelta. Kun ilmavirtaus irtoaa kokonaan, alkaa lapa sakkaamaan eikä siihen kohdistu enää nostovoimaa. [1, s. 57—61]

Tuulivoimalan kokoa suunnitellessa tulee ottaa huomioon se, kuinka suuri teho sillä halutaan saada. Jos roottorin lavan pituutta kasvatetaan 40 metristä 44 metriin, pyyhkäisy-pinta-ala kasvaa 5026 m²:sta 6082 m²:in. Tällöin 10% korotus roottorin lavan pituuteen antaa 21% korotuksen tehon tuotannossa. [5, s. 80] Tietenkin myös tuulen nopeus vaikuttaa tuotettuun tehoon. Yleisesti tuulivoimala tarvitsee noin 3,5 m/s tuulennopeuden, jotta se käynnistyy. Kun tuulennopeus kasvaa noin yli 25 m/s, voimala suojataan mekaanisilta vaurioilta pysäyttämällä se. [4]

2.2.2 Tuulivoimalan lisälaitteet

Tuulivoimalat jaetaan usein kahteen eri luokkaan niiden toiminnallisuuden mukaan. On muuttuvalla nopeudella sekä vakionopeudella pyöriviä tuulivoimaloita. Sen mukana

kumpi näistä halutaan, rakennetaan tuulivoimalaan tahtigeneraattori tai epätahtigeneraattori. [1, s. 76]

Vakionopeuksiset tuulivoimalat rakennetaan usein epätahtigeneraattoreilla, sillä ne ovat vaihteiston avulla helppo saada pyörimään nimellisellä nopeudella. Vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa käytetään usein massatuotantogeneraattoreita, jolloin ne ovat halpoja. Tämän tyyppinen voimala tarvitsee vaihteiston ja tämä nostaa voimalan hintaa. Vaihteistot ovat myös hyvin alttiita erilaisille vaurioille, ja tämä onkin voimalatyyppin suurin ongelma. Toisena ongelmana on, että voimala ei pysty vakionopeuden takia tuottamaan sähköä yhtä tehokkaasti muilla tuulennopeuksilla. Vakionopeuksisissa voimaloissa käytetäänkin usein passiivista sakkaussäätöä ehkäisemään mekaanisia vaurioita. Passiivinen sakkaussäädössä lavat ovat asetettu tiettyyn kulmaan, jolloin ne alkavat sakkaamaan, kun maanpäällinen tuuli kasvaa riittävän suureksi. [1, s. 77—79]

Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala on myös epätahtigeneraattorilla toteutettu tuulivoimala. Generaattori on liukurengasepätahtigeneraattori (WRIG) ja ideana on epätahtigeneraattorin kanssa rinnan olevan vastuksen säätäminen. Jos roottorikämmien resistanssi on lähes nolla, on voimala pakotettuna pyörimään oikealla nopeudella. Resistanssia kasvattamalla voidaan saada 0-10 % korkeampi pyörimisnopeus kuin määrätty tahtinopeus. [6, s. 58]

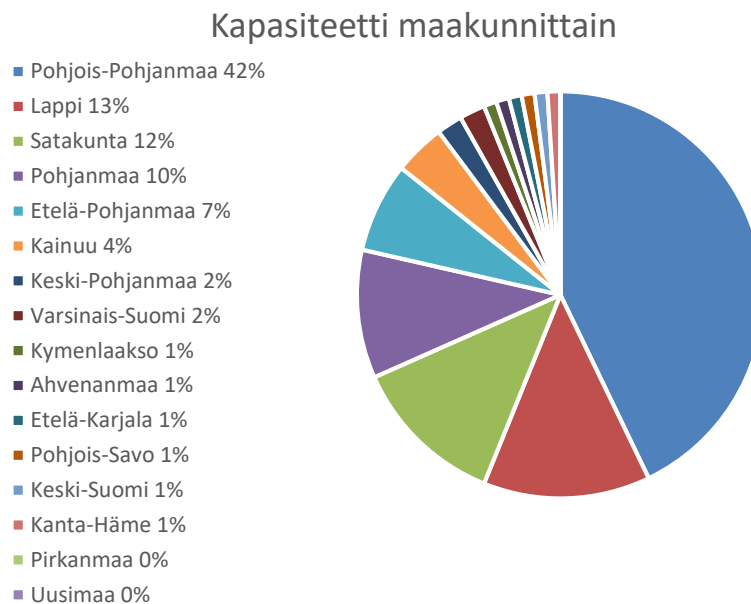
Kolmas epätahtigeneraattorilla toimiva tuulivoimala tyyppi perustuu osatehoiseen suuntaajakäyttöön eli kaksoissyötettyyn epätahtigeneraattoriin (Double-Fed Induction Generator, DFIG). Poikkeama staattorin määräämästä tahtinopeudesta saadaan, kun jättämää kasvatetaan ja ylimääräinen teho siirretään osatehoisen suuntaajakäytön avulla verkkoon. Tällä hetkellä tämän tyyppinen tuulivoimala on suosituin, se voi hyödyntää eri tuulennopeuksia, ja siitä saatu teho voidaan hyödyntää tehokkaasti. Usein suuntaajakäytön kautta verkkoon syötetään 30 % voimalan tuottamasta tehosta ja loput 70 % normaalisti staattorin kautta. [1, s. 80] [6, s. 58—59]

Tahtigeneraattorilla sekä suuntaajakäytöllä voidaan muodostaa muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. Vaihteistoa ei tarvita, jos tahtigeneraattorina on tuulivoimalaan suunniteltu generaattori. Massatuotantotahtigeneraattori tai epätahtigeneraattori tarvitsee tässäkin tuulivoimala tyyppissä vaihteiston, sillä ne tarvitsevat nopean pyörimisnopeuden toimiakseen hyvällä hyötysuhteella. Vaihteetonta tuulivoimalaa kutsutaan suoravetoiseksi tuulivoimalaksi. Suoravetoisessa tahtigeneraattorivoimalassa staattorissa tulee olla useita kymmeniä, jopa satoja, napapareja jotta hidas pyörimisnopeus (noin 10 kierrosta minuutissa) saadaan muunnettua sähköverkkoon sopivaksi sähköksi. Tahtigeneraattorivoimalassa on siis kestopagneettigeneraattori. [1, s. 81]

2.3 Tuulivoiman kapasiteetti Suomessa

Vuonna 2018 asennettu tuulivoimakapasiteetti Suomessa oli 2041 megawattia (MW), ja tuulivoimaloita Suomessa oli vuoden 2018 loppuun mennessä 698. Vuoden 2018 aikana ei myöskään lisätty tuulivoimakapasiteettia, kaksi voimalaa kuitenkin purettiin. Vuonna 2017 tehtiin 516 MW kapasiteetin lisäys. [7, 8] Voimaloita puretaan, kun niiden käyttöikä loppuu, tai osien korjaaminen on liian kallista. Usein voimaloiden osia voidaan käyttää muissa kohteissa ja voimalan perusteet voidaan esimerkiksi maisemoida ympäristöön, tai hyödyntää muissa käyttökohteissa.

Suomen tuulivoimaloiden kumulatiivisesta kapasiteetista on 70% kotimaisessa omistuksessa.



Kuva 1 Tuulivoiman kapasiteetti maakunnittain [7, mukailen].

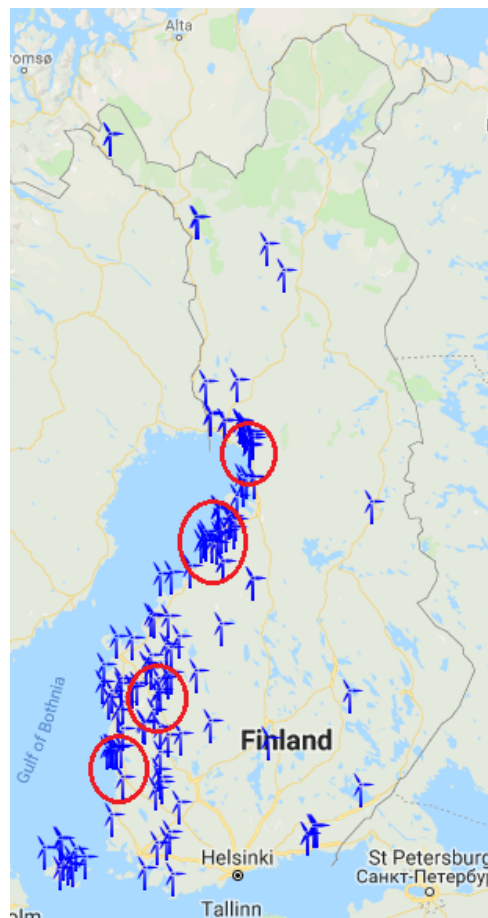
Kuvan 1 mukaan nähdään, että Pohjois-Pohjanmaalla on suurin osa Suomen tuulivoimakapasiteetista. Tämä johtuu Pohjois-Pohjanmaan hyvistä tuuliolosuhteista sekä tasaisesta maanmuodosta, jolloin maaston kitkavaikutus on vähäinen. Kalajoella, eli Pohjois-Pohjanmaalla on Suomen suurin tuulipuisto, jonka kokonaisteho on 92,4 MW [9]. Suomessa vuonna 2018 tuotettiin tuulivoimalla 9 % koko Suomen sähkötuotannosta [10]. Sähkönkulutuksesta tuulivoimalla tuotettu sähkö kattoi 6,7 % [8].

Vuonna 2018 lisäyksiä ei tullut, koska tuulivoiman syöttötariffijärjestelmä sulkeutui 1.11.2017. Syöttötariffin tarkoituksena on tukea tuottajia uusiutuvien energialähteiden käytössä ja parantaa niiden kilpailukykyä. Syöttötariffi on 83,5 euroa (€) tuotettua megawattituntia kohden. Kun tuulivoimatuottaja myy sähköä markkinahinnalla, hän saa sen

päälle tuen, joka on markkinahinnan sekä takuuhinnan erotus. Hankkeet, jotka siirtotariffiin kuuluvat, saavat tukea 12 vuoden ajan. [11] Uusi ehdotettu tukijärjestelmä on tarjouskilpailuun perustuva preemiojärjestelmä.

2.4 Tuulipuistot

Suomessa tuulivoima on keskittynyt selkeästi länteen, Pohjanlahden rannikolle, kuten kuvasta 2 voidaan nähdä. Tuulipuistoiksi määritellä sellaiset tuulivoimalakeskittymät, joissa on useampi tuulivoimala yhdistettynä keskenään syöttämään sähköä verkkoon.



Kuva 2 Suomen tuulivoimalat vuonna 2019 [12].

Kuvassa 2 näkyvät Suomen käytössä olevat, sähköenergiaa tuottavat tuulivoimalat. Punaisella ympyröidyt kohdat ovat Suomen neljä suurinta tuulipuistoa. Pohjoisimpana on Kalajoen tuulipuisto, jossa on 22 turbiinia ja kokonaisteho on 73 MW, sen alapuolella on Iin tuulipuisto 22 turbiinilla ja 66 MW teholla. Kolmantena on Ilmajoen tuulipuisto, jossa on 17 käytössä olevaa turbiinia ja kokonaisteho on 56 MW. Eteläisin näistä nostetuista tuulivoimapuistoista on Porin tuulipuisto, jossa on 12 turbiinia ja kokonaisteho on 54 MW. [8]

Suomessa tuulivoimaloiden koko on noin 2-3 MW, mutta myös jopa 5 MW:n voimaloita on rakennettu [13]. Esimerkiksi Simossa Leipiön tuulipuistossa on 4,5 MW:n voimaloita, sekä Salon Märynummella on kolme 5 MW:n voimalaa [14]. Tuulipuistoissa voimaloiden välillä tulee olla 4-5 kertaa roottorin halkaisijan pituinen matka, eli noin 600-700 metriä. Tuulivoimalan roottorit aiheuttavat pyöriessään ilmavirtaukseen pyörteitä. Jos tuulivoimalat ovat liian lähekkäin toisiaan, voimaloiden aiheuttavat pyörteet vaikuttavat muiden voimaloiden tuottamaan tehoon. [3]

2.5 Tuulivoiman tilanne maailmalla

Euroopassa maantieteelliset vaihtelut ovat suuria, esimerkiksi suuret lämpötilaerot, maan ja meren välinen suhde ja maan muodot vaikuttavat tuuliolosuhteisiin. Pohjois-Euroopassa on kylmää ilmaa, kun etelä-Euroopassa on lähes trooppinen ilmasto. Keski-Euroopassa esimerkiksi Alpit ovat suuri vaikuttaja tuulen laatuun. [15]

Vuoden 2018 loppuun mennessä maailmanlaajuisesti oli asennettu alustavien tilastojen mukaan yhteensä 600 gigawattia (GW) tuulivoimakapasiteettia. Lisätty kapasiteetti oli 53 900 MW, joka on hieman enemmän kuin vuonna 2017 lisätty 52 552 MW. Kaikki maailman tuuliturbiinit kattavat lähes 6 % maailman sähkön tarpeesta. [16]

Kiinalla on selkeä etumatka asennetusta kapasiteetista jopa 221 GW kapasiteetilla. Kiinan jälkeen suurimpia tuottajia ovat Yhdysvallat, Saksa sekä Intia. Kiinan kapasiteetti on maailmanlaajuisesta kapasiteetista kolmasosa. [17]

Vuoden 2018 aikana Eurooppaan asennettiin 11,7 GW tuulivoimakapasiteettia, sekä poistettiin käytöstä 0,4 GW. Näiden jälkeen kokonaiskapasiteetti Euroopassa oli vuoden 2018 loppuun mennessä 189 GW. Euroopan maista Saksa asensi eniten tuulivoimaa, ja on myös samalla eniten tuulivoimakapasiteettia (59 GW) omaava maa Euroopassa. Saksan jälkeen eniten kapasiteettia on Espanjalla 23 GW, Iso-Britannialla 20,9 GW ja Ranskalla 15 GW. [18, s. 7—11]

Euroopassa onshore-voimaloita on selkeästi enemmän kuin offshore-voimaloita. Ainoastaan Iso-Britannialla on enemmän offshore kapasiteettia kuin onshore kapasiteettia [18, s. 12]. Iso-Britannialla onkin selkeästi enemmän meripinta-ala kuin muilla Euroopan mailla, joka on hyvää aluetta rakentaa offshore-voimaloita.

Vuonna 2018 tuulivoimalla tuotettu sähköenergia kattoi 14 % Euroopan Unionin jäsenvaltioiden sähköenergian tarpeesta, tästä 12% tuotetaan onshore-voimaloilla ja 2% offshore-voimaloilla. Tanskassa tuulivoimalla katetaan jopa 41% tarvittavasta sähköenergiasta. Saksassa, jossa on suurin asennettu kapasiteetti, tuulivoima kattoi vuonna 2018 21% sähköenergian tarpeesta. [18, s. 17—19]

3. SÄHKÖVERKKOON LIITTÄMINEN

Tuulivoimaloiden liittäminen sähköverkkoon on oma haasteensa ja Suomen sähköverkon kattavuus liittyy myös paljon siihen, miten ja minne tuulipuistoja voidaan rakentaa. Tuulipuistojen liittäminen sähköverkkoon pystytään toteuttamaan vastaamaan energiantuotannon sekä -kulutuksen tasapainoa tukevaksi sekä energiatehokkaasti. Tässä luvussa käsitellään Suomen sähköverkon ominaisuuksia sekä esitellään Suomen sähköverkko.

3.1 Suomen sähköverkko

Suomessa sähköverkko koostuu kantaverkosta, suurjännitteisestä jakeluverkosta sekä jakeluverkoista. Fingrid Oyj ylläpitää, valvoo sekä kehittää Suomen kantaverkkoa. Suurjännitteistä jakeluverkkoa sekä jakeluverkkoa ylläpitävät paikallisen sähköverkkoyhtiöt. Näitä kutsutaan alueverkoiksi. [19] Kantaverkon jännitetaso on 110-400 kilovoltia (kV) ja jakeluverkot voivat liittyä suoraan tähän. Suurjännitteinen jakeluverkon jännitteen taso on 110 kV ja jakeluverkon jännite taso on 20, 10, 1 tai 0,1 kV. [20]

Jakeluverkkoa Suomessa on noin 388 000 kilometriä (km) ja kantaverkkoa noin 14 000 km. Voimalaitokset, jotka tuottavat sähköä, voivat liittyä mihin tahansa näistä jännitetasoista ja verkoista. Kuitenkin mitä enemmän voimalaitoksia liitetään jakeluverkkoon suoraan, sitä monimutkaisemmaksi verkko muuttuu. [20]

Sähkömarkkinalain mukaan verkonhaltijan tulee liittää sähköverkkoonsa alueellansa olevat voimalat. Voimaloiden tulee täyttää tekniset vaatimukset ja liitäntä tulee tehdä pyynnöstä kohtuullista korvausta vastaan. Verkonhaltijan on myös sähkönsiirtovelvollinen. [21]

Kuvassa 3 on Suomen sähkönsiirtoverkkoa eli kantaverkkoa. Näistä linjoista lähtee suurjännitteiset jakeluverkot sekä jakeluverkot. Kuluttajat saavat sähkönsä jakeluverkosta. [20] Kuten kuvasta voidaan nähdä, kantaverkko kattaa lähes koko maan, eniten verkkoa on rakennettu rannikoille. Suomessa asutus on tiheimmillään etelässä sekä lännessä rannikoilla. Esimerkiksi ydinvoimalat ovat sijoittuneet rannikoille ja niiden lähelle on rakennettu suurjännitteistä siirtoverkkoa.

Kuvassa 3 on Suomen sähkönsiirtoverkkoa eli kantaverkkoa. Näistä linjoista lähtee suurjännitteiset jakeluverkot sekä jakeluverkot. Kuluttajat saavat sähkönsä jakeluverkosta. [20]



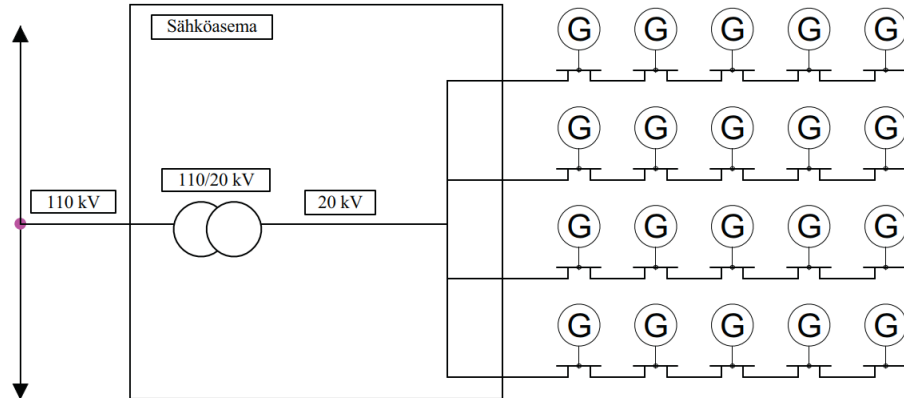
Kuva 3 Suomen sähkösiirtoverkko [22].

Kuten kuvasta voidaan nähdä, kantaverkko kattaa lähes koko maan, eniten verkkoa on rakennettu rannikoille. Suomessa asutus on tiheimmillään etelässä sekä lännessä rannikoilla. Esimerkiksi ydinvoimalat ovat sijoittuneet rannikoille ja niiden lähelle on rakennettu suurjännitteistä siirtoverkkoa.

3.2 Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon

Yksittäisten tuulivoimaloiden ja tuulipuistojen liittäminen sähköverkkoon eroavat toisistaan. Tuulivoimapuisto koostuu useammasta tuulivoimalasta, jotka ovat kytketty toisiinsa tuottamaan suurempaa tehoa. Tuulipuistoon kuuluvat itse tuulivoimalat, huoltotiet, 20 kV

maakaapelia, jolla tuulivoimalat liitetään yhteen. Lisäksi on sähköasema ja 110 kV ilma-johtoa, joka liitetään verkkoon. [23] Kuvassa 4 on havainnollistettu, millainen tuulipuiston liitäntä 110 kV:n verkkoon voisi olla [24].



Kuva 4 Tuulipuiston yksinkertaistettu sähköverkko [24].

Kyseisen kuvan tuulivoimalat ovat 2 MW voimaloita ja se on liitetty 110 kV:n verkkoon, sillä tuulivoimaloiden tuottama teho on niin suuri. Suomessa tuulipuistot liitetäänkin usein keskijänniteverkkoon tai 110 kV:n verkkoon niiden tuottaman suuren tehon vuoksi. [24] Voimaloiksi, jotka voidaan sähköverkkoon liittää, kutsutaan Suomessa yli 2 megavolt-tiamppeeria (MVA) tuottavia sähkövoimaloita. Tätä pienemmän voimat ovat kuluttajien omia voimaloita.

Jos kohde halutaan liittää suoraan kantaverkkoon, tuulivoimalaprojektia suunnitellessa tiedot suunnitellusta kohteesta, voimalan tehosta sekä tyypistä lähetetään Fingridille. Fingrid tekee alustavan selvityksen tavoista, joilla tuulivoimala voidaan liittää sähköverkkoon. Kun sopiva liityntätapa löytyy, tehdään aiesopimus, joka ei ole sitova ja on voimassa 12 kuukautta. Aiesopimuksen tarkoituksena on helpottaa lupaprosesseja sekä rahoitusneuvotteluja. Tuulivoimalaprojektin toteuttajan tulee tehdä yksityiskohtaiset suunnitelmat liitynnöistä ja pitää Fingrid niistä ajan tasalla. Fingridin tulee myös hyväksyä liityntäsuunnitelmat ennen varsinaisen rakentamisen aloittamista. Sitova liittymissopimus on voimassa, kun se on allekirjoitettu sekä liittymismaksu on maksettu. 24 kuukauden kuluessa sopimuksen allekirjoittamisesta liitynnän tulisi olla käyttöön otettavissa, tai sopimus raukeaa. [25]

Tuulivoimalat tarvitsevat myös säätövoimaa, sillä ne eivät tuota sähköä samalla tasaisella tavalla kuten esimerkiksi vesivoima. Suomessa säätösähköä saadaan usein vesivoimasta, mutta kuka tahansa sähköntuottaja voi tarjota säätövoimaa. Tuulivoima tarvitsee eniten lyhytaikaista säätöä, eli 10-15 minuutissa käyttöönotettavaa säätösähköä.

Tuulivoimalla on myös mahdollista tuottaa säätösähkö. [26] Säätösähköä ei ole vielä tarvinnut rakentaa lisää tuulivoimaloiden takia, ja on ennustettu, että vuonna 2030 on tuulivoimatuotannolle tilaa 15 terawattituntia (TWh). Tämä tarkoittaa, että asennettua tuulivoimakapasiteettia voi olla noin 5000-6000 MW. [27]

Suomessa tuulipuistot, joiden teho on yli 15 megawattia, tulee liittää suoraan kantaverkkoon, eli joko 110 kV tai suurempaan linjaan. Suuria useamman megawatin tuottavia voimaloita ei voida liittää 20 kV:n jakeluverkkoihin, sillä niiden siirtokyky ei yksinkertaisesti riitä. [25] Tuulivoimaloiden tulee täyttää kaikki samat vaatimukset kuin muutkin sähköverkkoon liitettävät voimalaitokset, jotta voidaan varmistaa sähköverkon käyttövarmuus [11].

Pienet, alle 25 MVA tuottavat voimalaitokset, voidaan liittää suoraan 110 kV:n voimajohtoon. Yleisesti voimajohtoon liitettävä voimala saa tuottaa enintään 5 MVA, mutta tuulivoimala, jonka tuotto on enintään 25 MVA ja jonka oikosulkuvirransyöttö on enintään 1,2-kertainen laitoksen nimellisvirtaan, voidaan liittää voimajohtoon. Huomioon tulee ottaa myös, että tuotannon liittyessä voimajohtoon, pitää liitynnässä olla myös tietoliikenneyhteys. Yli 25 MVA tuottavat tuulivoimalat tulee liittää verkkoon kytkinlaitoksen kautta 400, 220 ja 110 kV:n verkkoihin. [25]

4. TUULIVOIMALAN SIOITTELU

Tuulivoimaloiden sijoittelussa lähtökohtana on löytää optimaalisesti tuulinen ympäristö voimalalle, jotta sen energiantuotanto olisi mahdollisimman korkea. Energiantuotanto-odotukset voidaan laskea muutamalla vaihtoehdoisella tavalla, joita käymme hieman tässä luvussa läpi. Tuulivoimalan tehokkuutta voidaan arvioida esimerkiksi hyötysuhteen, huipunkäyttöajan sekä kapasiteettikertoimen avulla ja tuulivoimalan kokoa voidaan arvioida esimerkiksi nimellistehon avulla, roottorin halkaisijan koolla, vuosituotolla tai napakorkeudella [1, s. 86] [3].

Luvussa 2 saatiin tuulivoimalan hyötysuhteen huippuarvoksi 59,3%, mutta käytännössä sitä on mahdotonta saavuttaa, sillä tuulivoimala ei ole ideaalinen ilmaa läpäisevä kiekko, eikä ilmavirtaukset ole pyörteettömiä. Näin ollen jopa 40% hyötysuhde on jo todella hyvä tuulivoimalalle. Huipunkäyttöaika määritellään nimellistehon avulla, joka on voimalan enimmillään tuottama teho. Se annetaan usein megawatteina ja se kertoo sen ajan tunteina, minkä tuulivoimalan tulisi toimia nimellistehollaan saavuttaakseen vuosituotannon. Hyvin toimivilla tuulivoimaloilla voidaan olettaa noin 2400 tunnin (h) huipunkäyttöaika. Kapasiteettikerroin (C_F) on huipunkäyttöajan ja vuoden tuntien eli 8760 tunnin suhde. [1, s. 86] Tuulivoimalan energiantuotanto-odotuksista kerrotaan enemmän tässä luvussa.

Jo projektin alkuvaiheissa tulee ottaa huomioon luvussa 3 esitetyt vaatimukset tuulivoimaloiden liittämiseen sähköverkkoon. Tärkeää on suunnitella, onko lähellä riittävän kestävää suurjänniteverkkoa, johon suuritehoisen tuulipuiston voi liittää. Esimerkiksi kuvan 3 mukaan Itä-Suomessa sekä Pohjois-Suomessa kantaverkkoa ei ole, vaan paikallisesti on jakeluverkkoa ja 20 kV:n verkkoa.

Tuulivoimaloiden sijoittelussa tulee ottaa huomioon myös tuulivoimaloiden ympäristövaikutukset. Luvussa 5 käydään tarkemmin läpi tuulivoimalahanketta ja sen vaiheita, mutta yhtenä vaiheena isommilla tuulipuistoilla on ympäristövaikutusten arviointi. Huomioon tulee ottaa esimerkiksi, voiko alueelle sen historiallisuuden takia rakentaa tuulivoimaloita. Suomessa on myös esimerkiksi suojeltuja maisemia, joihin ei voida rakentaa tuulivoimaloita muuttamaan maisemaa. Usein tuulivoimaloiden vastustajat eivät halua tuulivoimaloita pilaamaan maisemaan, sekä usein "not in my back yard" (ei minun takapihaleni) ajattelu korostuu tuulivoimarakentamiskeskusteluissa [28, s. 208].

Toinen ihmisiä huolestuttava tuulivoimaloiden vaikutus on niiden aiheuttama melu. Nykypäivänä uusien ja modernien voimaloiden generaattorit ja vaihteistot eivät pidä juuri mitään ääntä. Pyörimisliikkeeseen yhdistettyä ääntäkään ei voi kuulla, ellei asu noin 200

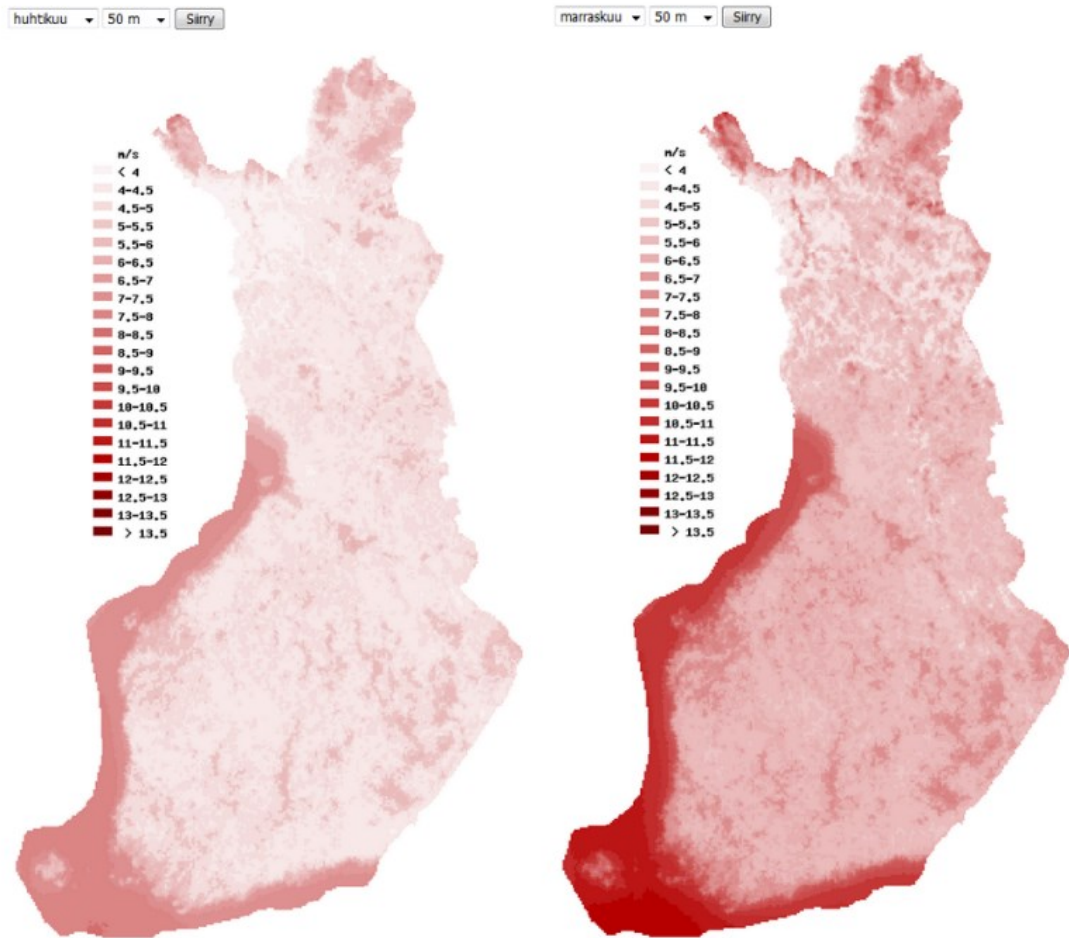
metrin säteellä voimalasta. Ärsytystä aiheuttavaa melua syntyy aerodynaamisista syistä, kun tuuli kohtaa sekä irtoaa tuulivoimalan lavasta. [28, s. 211]

Kolmas tuulivoimaloiden aiheuttama häiriö, välkyntä, koostuu kahdesta osasta. Koska tuulivoimala ei tuota sähköä tasaisesti, se saattaa aiheuttaa jännitevaihtelua. Jännitevaihtelut aiheuttavat välkyntää, joka on valonlähteen luminanssin tai spektrijakauman muutosten aiheuttama näköaistimuksen epävakaisuus. Tämä epävakaisuus ärsyttää ihmisistä ja saattaa aiheuttaa esimerkiksi päänsärkyä. Toinen tuulivoimaloihin liitettävä välkyntä syntyy päiväsaikaa, kun aurinko paistaa tuulivoimalan takaa ja pyörivät lavat aiheuttavat varjoja. [28, s. 211]

4.1 Suomen tuuliolosuhteet

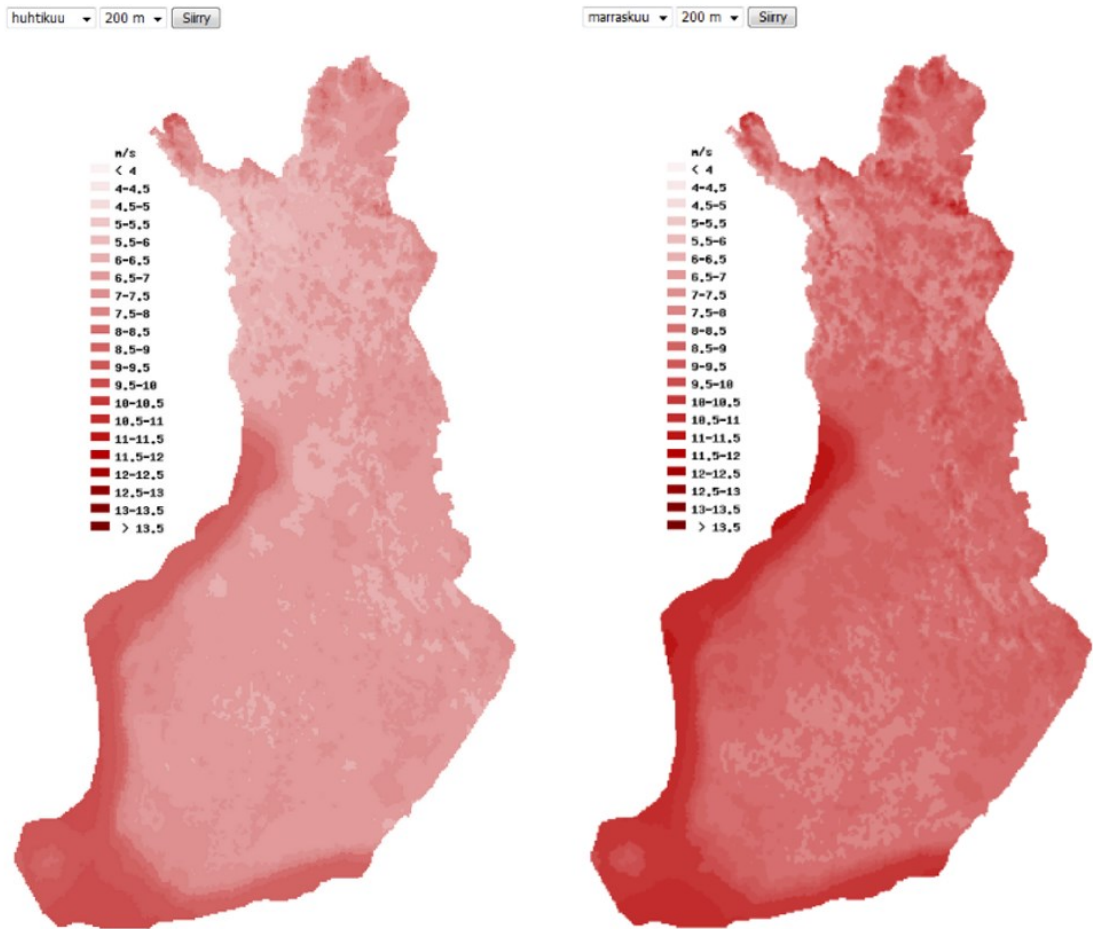
Suomen tuuliolosuhteita voidaan tarkastella Suomen Tuuliatlaksen avulla, joka on avattu käyttöön vuonna 2009. Atlaksessa voi tarkastella tuulen keskinopeutta 50, 100 ja 200 metrin korkeuksilla. Tämä on tärkeä tieto, kun suunnitellaan voimalaa, ja suunnitellaan mikä napakorkeus voimalalle kannattaa valita. [29] Tuuliatlaksesta saadaan tiedot tuulen keskinopeudesta kuukausittain 50, 100 ja 200 metrin korkeuksilla. Saatavilla on myös 3 MW:n tuulivoimaloiden energiantuotanto kuukausittain 50, 100 ja 200 metrin korkeuksilla.

Kuva 5 on Suomen tuuliatlaksen sivuilta. Vertailun vuoksi tähän työhön on valittu huhtikuun sekä marraskuun tuuliolosuhteiden vertailut. Marraskuussa on keskimääräisesti tuulisempaa kuin huhtikuussa, jotenka ne antavat hyvät vertailukohtat. Kaikista tummimman punainen tarkoittaa yli 13,5 m/s tuulennopeutta ja kaikista vaalein tarkoittaa 4 m/s. Alle 4 m/s tuulennopeus tarkoittaa periaatteessa sitä, ettei voimala toimi, jos oletuksena on, että voimala käynnistyy 3,5 m/s tuulessa. Kuitenkin sääntönä voidaan pitää, että alueella tuulen nopeus olisi yli 6,5 m/s, jotta alueelle olisi kannattavaa rakentaa voimala [31].



Kuva 5 Tuulen keskinopeus Suomessa 50 metrin korkeudessa huhtikuussa sekä marraskuussa [30].

Vertailun vuoksi kuvassa 6 nähdään tuulen keskinopeus 200 metrin korkeudessa huhtikuussa sekä marraskuussa. Kuvasta voidaan huomata, että 200 metrin korkeuteen siirtymässä voimat ovat toiminnassa lähes koko ajan, sillä tuulen keskinopeus ei laske alle 3,5 m/s. Kuitenkin, nykypäivänä tuulivoimaloiden napakorkeus on noin 120-140 metriä, jolloin aivan 200 metrin korkeudessa oleviin tuulennopeuksiin ei päästä.



Kuva 6 Tuulen keskinopeus Suomessa 200 metrin korkeudessa huhtikuussa sekä marraskuussa [30].

Kuvista 5 ja 6 on myös selkeästi nähtävillä, että rannikoilla, Etelä- ja Länsi-Suomessa on parhaat tuuliolosuhteet. Myös esimerkiksi Pohjois-Suomessa on havaittavissa kohtuullisia tuuliolosuhteita. Kuitenkin kuten luvussa 2.4 todettiin, tuulivoimat ovat sijoittuneet rannikoille. Pohjois-Suomeen rakentaminen on kuitenkin hankalaa esimerkiksi puuttuvien tieyhteyksien takia. Myös kuten luvussa 3.1 kuvasta 3 voidaan nähdä, kantaverkkoa ei ylety esimerkiksi Suomen käsivarteen, jolloin suora liitäntä sähköverkkoon olisi hankalaa. Tästä aiheesta lisää seuraavassa luvussa.

4.2 Tuulivoimalan tuotanto-odotukset

Tuulivoimaloiden tuotantoa voidaan tarkastella muutamalla keinolla etukäteen. Näillä voidaan arvioida tuulivoimalan kannattavuutta sekä sitä, kuinka hyvin voimalat toimivat. Hyötysuhde, huipunkäyttöaika ja kapasiteettikerroin esiteltiin jo aikaisemmin luvun 4 alussa. Niiden avulla voidaan arvioida jo tuotannossa olevan tuulivoimalan toimivuutta. Kuitenkin jo ennen voimalan rakentamista voidaan tehdä erilaisia laskelmia siitä, kuinka

hyvin jokin tietty voimalatyyppi tuottaisi sähköä jollain tietyllä paikalla. Tässä työssä esitellään kaksi menetelmää, pinta-alamenetelmä sekä tehokäyrämenetelmä. Näiden menetelmien avulla saadaan kohtuullisen hyvä kuva tulevan voimalan tuotanto-odotuksista. Menetelmillä voidaan saada myös tässä työssä esitetyjä tuloksia tarkempia tietoja, kun paikan tuulisuusmittaukset ovat edenneet pidemmälle.

Näissä menetelmissä tarvitaan tuulisuuden mallintamiseen liittyviä tietoja. Tärkeä tieto on usein se, miten tuulennopeus vaihtelee mitatun keskinopeuden molemmin puolin ja mitkä ovat tiettyjen tuulennopeuksien esiintymistodennäköisyydet. Näiden mallintamiseen käytetään usein Weibull-jakaumaa. [1, s. 45-46]

Tuulen esiintymistodennäköisyyttä mallinnetaan yhtälöllä

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (4.1)$$

jossa k on muotokerroin ja C määräkerroin [1, s. 45]. Muotokerroin k on mantereella usein $k=2$, ja esimerkiksi merellä offshore-voimaloilla $k=4$. Tämä johtuu siitä, että merellä tuulee selkeästi tasaisemmin kuin maalla ja muotokertoimen kasvaessa kasvaa todennäköisyys tuulen keksinopeuteen. Määräkerroin C saadaan gammafunktion avulla yhtälöstä

$$C = \frac{v_{ka}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)}, \quad (4.2)$$

jossa v_{ka} on tuulennopeuden keskiarvo [1, s. 45]. Näitä yhtälöitä käyttämällä saadaan esimerkiksi tuuliatlaksen tietojen avulla luotua tuulennopeuden esiintymistodennäköisyyden kuvaaja. Esiintymistodennäköisyyden lisäksi on tärkeä tuntea tuulen tehotehiys. Tämä saadaan laskettua, kun yhtälöön

$$P'_i = f_i * \frac{1}{2} \rho v_i^3 \quad (4.3)$$

laitetaan tietty tuulennopeus v_i ja sen esiintymistodennäköisyys f_i [1, s. 47]. Tehotehiys voidaan laskea jokaiselle tuulennopeuden esiintymistodennäköisyydelle. Tällöin saadaan tehotehiysjakauma. Tehotehiysjakaumaa voidaan integroida

$$P_{ka}' = \int_0^{v_{max}} P'_i dv, \quad (4.4)$$

jossa v_{max} on suurin tehotehiysjakaumassa esiintyvä tuulennopeus ja tulokseksi saadaan keskiarvo tehotehiydelle [1, s. 48].

4.2.1 Pinta-alamenetelmä

Pinta-alamenetelmä on helppo ja yksinkertainen tapa, sillä rakennettavasta tuulivoimalasta tulee tietää ainoastaan sen pyyhkäisyypinta-ala. Kuten jo aikaisemmin on todettu,

tuulivoimalan teho riippuu roottorin pyyhkäisy-pinta-alasta. Tehotiheyden keskiarvon sekä turbiini pyyhkäisy-pinta-alan $A_{turbiini}$ avulla voidaan laskea kaavalla

$$P_{ka} = A_{turbiini} * P_{ka}', \quad (4.5)$$

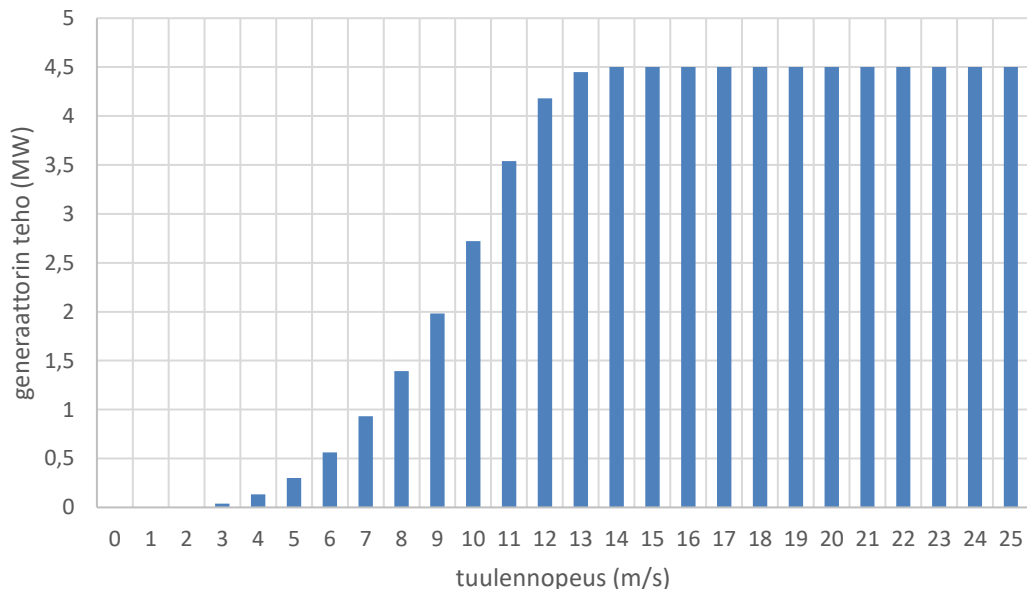
voimalan vuosittain keskimäärin tuottama teho [1, s. 87]. Vuosituotanto voidaan arvioida hyötysuhteen η sekä keskiarvotehon avulla yhtälöllä

$$W_a = \eta P_{ka} * 8760 \text{ h}. \quad (4.6)$$

Tämän avulla saadaan tieto siitä, kuinka monta GWh:a voimala tuottaa vuosittain. [1, 87—88]

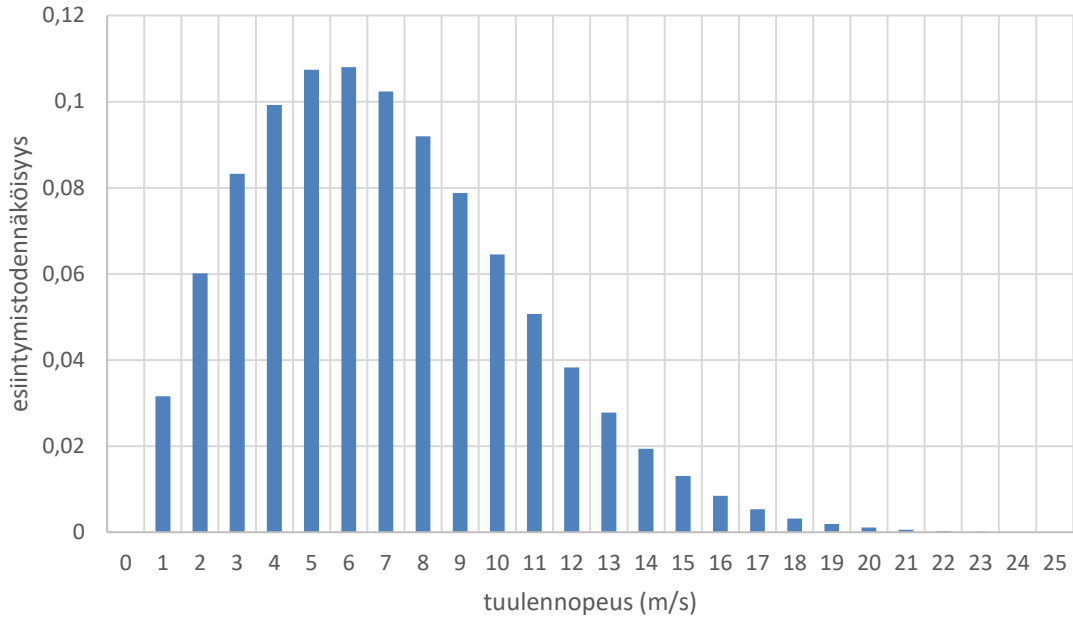
4.2.2 Tehokäyrämenetelmä

Tehokäyrämenetelmä perustuu voimalan generaattorin tehojakauman tarkasteluun. Energia-arvioinnissa tehokäyrämenetelmä on tarkempi kuin edellä käsitelty pinta-alamenetelmä. Tehokäyrämenetelmää käyttäessä tulee tuntea voimalan generaattori ja sen tehokäyrä sekä tuulivoimalan rakennuspaikan tuulten nopeuksien esiintymistodennäköisyyskäyrä. Tehokäyrä sekä esiintymistodennäköisyyskäyrät yhdistetään ja niistä voidaan laskea arvio voimalan vuosituotannosta. [1, 88—91]



Kuva 7 Enercon E-112/45.114 tuulivoimalan tehokäyrä [36].

Kuvassa 7 on esitetty esimerkkinä Enercon E-12/45.114 voimalan tehokäyrä. Tämän voimalan nimellisteho on 4,5 MW, jonka se saavuttaa 13 m/s tuulen nopeudella. Tehokäyrästä voidaan siis nähdä, kuinka suuren tehon voimala tuottaa tietyllä tuulen nopeudella.



Kuva 8 Esimerkkijakauma tuulen esiintymistodennäköisyyksistä.

Kuvassa 8 on esitettyä esimerkki tuulen nopeuksien esiintymistodennäköisyyksistä. Esimerkissä muotokerroin $k=2$ ja keskituulenopeus $v_{ka}=7$ m/s. Luotu esiintymistodennäköisyyskäyrä on esimerkkiä antava eikä perustu minkään tietyn paikan tuulitietoihin.

Ensin lasketaan, kuinka monta tuntia voimala toimii kullakin tuulenopeuden arvolla vuodessa. Tehokäyrästä voidaan tämän jälkeen katsoa, millä teholla voimala toimii tietyllä tuulenopeudella. Nämä yhdistämällä saadaan, kuinka monta tuntia voimala toimii tietyllä teholla. Huomioon tulee ottaa, millä tuulenopeudella voimala alkaa toimia, ja millä tuulenopeudella sen generaattori pysäytetään ja voimala sammutetaan vaurioiden estämiseksi. [1, 88—91]

4.3 Offshore- ja onshore-voimalat

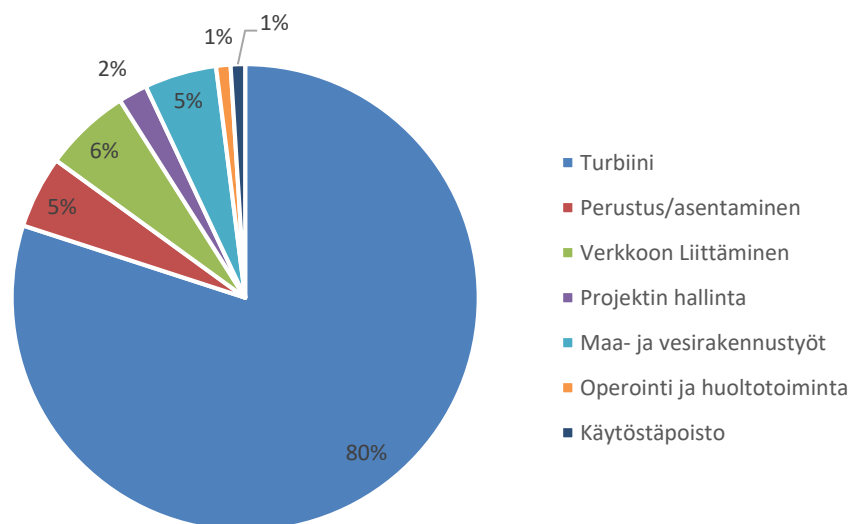
Offshore-voimalat eli merituulivoimalat poikkeavat hieman tässä työssä käsitellyistä onshore-voimaloista. Nykypäivänä merelle asennettavat tuulivoimalat ovat hieman suurempaa kokoluokkaa kuin maalle asennettavat. Merellä voimalat ovat keskimäärin noin 5-6 MW ja jopa 10 MW:n voimaloita on suunnitteilla. Merelle asennettavat offshore-voimalat ovat siis myös hieman kookkaampia kuin onshore-voimalat. [28, s. 153]

Offshore-voimalat ovat onshore-voimaloiden tapaan usein kolmilapaisia vaaka-akselisia voimaloita. Uusia isoja pystyakselisiä voimaloita ollaan suunnittelemassa, mutta niiden kannattavuutta ei olla vielä voitu todistaa ja perinteiset mallit johtavat edelleen markkinoita. [28, s.161] Offshore-voimalat eivät ole suoraan samoja, joita maalla käytetään,

niiden tulee olla mekaanisesti vahvempia, jotta ne kestävät esimerkiksi aallokon ja kovemman tuulenopeuden. Suomessa esimerkiksi Pohjanlahdella voimaloiden tulisi myös kestää paremmin jäätä. Suurin ero offshore- ja onshore-voimaloiden välillä onkin niiden erilaiset perustukset [28, s. 161].

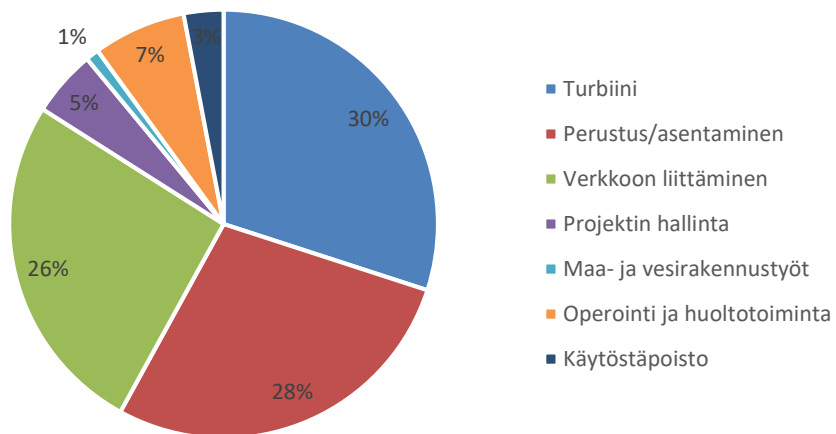
Offshore-voimaloiden perustuksille ja kiinnitykselle on useita tapoja, ne voidaan jakaa kahteen ryhmään: kiinteisiin merenpohjaan kiinnitettäviin voimaloihin sekä vajereilla merenpohjaan kiinnitettäviin kelluviin voimaloihin. Ensimmäistä kiinnitystapaa käytetään matalammissa vesissä, joissa merenpohjaan tehtävien perustusten tekeminen ei ole liian vaikeaa tai kallista. Kiinteät rakenteet voidaan tehdä alle 50 metrin syvyyseen veteen. [28, s. 161—166] Suomessa ei kuitenkaan käytetä kelluvia perustuksia, sillä niille ei ole tarvetta.

Offshore-voimaloiden sähköasemat voivat sijaita joko merellä, voimaloiden läheisyydessä, tai rannalla, jos voimalat eivät ole kovin kaukana rannasta. Voimaloiden tuottama sähköenergia kerätään merikaapeleilla sähköasemalla, samaan tapaan kuin onshore-voimaloissa ja tuulipuistoissa. [28, s. 173—175] Kuvassa 9 on esitettyä maalle rakennetun tuulivoimalan kustannuserittely. Kuvasta voidaan nähdä, että suurin osa kustannuksista (noin 80 %) koostuu voimalan turbiinista.



Kuva 9 Kustannuserittely maalle rakennetusta tuulivoimasta [38, mukailen].

Offshore-voimalat ovat kustannuksiltaan kalliimpia, sillä voimaloiden osat, kaapelit sekä perustukset joutuvat kestämään äärisääolosuhteita. Niiden kannattavuus kuitenkin syntyy niiden hyvästä hyötysuhteesta, merellä tuuli on tasaisempaa ja tuulen nopeus on suurempi. Kuvassa 10 on esiteltynä merelle rakennetun tuulivoimalan kustannuserittely. Suurimpia kulueriä ovat turbiini, perustukset, voimalan asentaminen sekä verkkoon liittäminen.



Kuva 10 Kustannuserittely merelle rakennetusta tuulivoimasta [38, mukailen].

On arvioitu, että maalle rakennetun voimalan investoinnit ovat noin 1,3 miljoonaa euroa megawattia kohden. Merelle rakennetussa voimalassa investoinnit ovat noin 2,7 miljoonaa euroa megawattia kohden. [38]

5. TUULIVOIMALAN KEHYSHANKE

Tuulivoimalahankkeeseen kuuluu useita vaiheita ja sen käynnistämiseen aloite voi tulla usealta eri taholta. Suuremman tuulivoimapuistohankkeen kesto on 4-6 vuotta. Pienemmän voimalan hankkeet voivat valmistua alle kahdessa vuodessa.

Kuva 11 mallintaa sitä, miten tuulivoimahanke etenee. Jotkin vaiheet saattavat toimia limittäin. Tässä luvussa tarkastellaan pintapuolisesti jokainen vaihe.



Kuva 11 Tuulivoimahankeksen eteneminen [32, mukailleen]

Esiselvityksessä etsitään tuulivoimalalle sopiva alue, eli tarkastellaan niitä asioita, joita tässä työssä on käyty läpi tuulivoimalan sijoitteluun liittyen. Toisena osana esiselvitystä tehdään erilaisia arvioita ja tarkasteluja. Esimerkiksi arvioidaan hankkeen taloudellisuutta ja ympäristön sekä maankäytön vaikutuksia. Esiselvitys pyritään tekemään mahdollisimman tarkasti, jotta projektin myöhemmissä vaiheissa ei syntyisi yllätyksiä, jotka saattaisivat vaarantaa projektin etenemisen. [33]

Maanhankinta on myös alkuvaiheilla tehtävä asia, maa-alue voidaan vuokrata tai ostaa. Joskus myös tehdään alustava maavaraus sekä tarkempia mittauksia esimerkiksi tuulisuudesta. Huomioon tulee ottaa myös esimerkiksi, onko maa-alue suojeltu tai ollaanko sille jo rakentamassa jotain esimerkiksi kunnan puolesta. Tuulimittauksia tehdään valitulla maa-alueella noin 1-2 vuotta. Kun käytössä on selvää dataa siitä, millainen tuulisuus rakennetun tuulivoimalan kohdalla on, voidaan vähentää taloudellisia riskejä. [33]

Tuulivoimaloiden rakentamista säätelee maankäyttö- ja rakennuslaki sekä sitä täydentävän asetuksen (895/1999, MRA) kaava- ja lupajärjestelmä. Vuonna 2011 tuli voimaan tuulivoimarakentamista koskeva maankäyttö- ja rakennuslain muutos (134/2011) jonka avulla rakennuslupa tuulivoimaloille voidaan myöntää suoraan yleiskaavan perusteella.

Alueiden käytön suunnittelujärjestelmä koostuu valtakunnallisista alueidenkäyttötavoitteista, maakuntakaavoista, yleiskaavoista sekä yksityiskohtaisista kaavoista. [34] Näihin rakentamista koskeviin lupiin sekä prosesseihin ei kuitenkaan tässä työssä mennä syvemmin.

Sähkönsiirtosopimusten selvittäminen ja esimerkiksi liittymismaksu kannattaa selvittää mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuulivoimaprojektia. Tuulivoimalan liittämistä Suomen sähköverkkoon käsiteltiin luvuissa 3 ja 4.

Tuulipuistojen lupien hakemiseen ja hyväksymiseen menee aikaa ja 10 tai useamman tuulivoimalan tuulipuiston luvitukseen voi kulua jopa kolme vuotta. Ympäristövaikutuksen arviointi (YVA) tulee tehdä aina, tämän jälkeen voidaan edetä kaavoitukseen, rakennuslupa- ja ympäristölupaan sekä mahdolliseen ympäristölupaan. Nämä luvat myöntää sekä tarkastelee kunta. Pienempien, alle 10 tuulivoimalan projekteissa YVA ei ole pakollinen, ja ilman tätä lupaprosessi kestää noin vuoden. Näiden lupien lisäksi offshore-voimalat saattavat tarvita vesiluvan, jos ne muuttavat jotenkin vesistön olosuhteita. Jos tuulivoimala on yli 60 metriä korkea, se tarvitsee lentoestoluvan ilmailuviranomaisilta. Lähtökohtaisesti siis kaikki voimalat tarvitsevat sen. Tämän lisäksi yli 50 metriä korkeat voimalat tarvitsevat myös Puolustusvoimilta luvan. Lupa tarvitaan sillä tuulivoimalat aiheuttavat Puolustusvoimien ilmailuviranomaisille häiriöitä. [33, 35]

Usein lupaprosessin loppupuolella tehdään toteutettavuusselvitys. Toteutettavuusselvityksessä esitetään projektin mahdolliset ongelmat, mahdollisuudet sekä kustannukset. Tässä vaiheessa esimerkiksi tuulimittauksien tulisi olla loppusuoralla, sekä lupien sellaisessa tilassa, ettei voimalan rakentamisen pitäisi enää peruuntua. Mahdollisten rahoittajien on toteutettavuusselvityksen avulla helpompi laskea projektin kannattavuutta ja investointeja. [32]

Toteutussuunnitelmaa tarkennetaan koko projektin ajan ja sen edetessä. Toteutussuunnitelmassa on suunniteltuna kaikki tuulivoimaprojektin fyysiseen rakentamiseen liittyvät kohdat. Siihen kuuluvat tarkat tiedot tuulivoimalan tarkoista rakennuspaikoista sekä rakennuspaikan maaperästä, maa-alueella tehtävistä raivaustöistä ja muista muokkauksista. Myös tuulivoimalan osien kuljetus- ja nostosuunnitelma sekä tieverkoston suunnitelmat kuuluvat toteutussuunnitelmaan. Toteutussuunnitelmassa tulisi myös käydä ilmi puiston sähköjohtojen linjaus sekä sähköaseman sijaintin. [32, 33]

Tuulivoimalan rakennuttamiseen kuuluvat erilaiset maanrakennustyöt, esimerkiksi tiet, sähköjohtojen, kaapelien ja sähköasemien rakentamiset. Näiden jälkeen tehdään voimalalle perustukset ja pystytetään itse voimala. [33]

6. CASE-TARKASTELU

Tässä luvussa esitellään muutama erilainen voimalatyyppi, tarkastellaan niiden tehokäyriä ja tekniikkaa. Tarkastelun tarkoituksena on etsiä Suomesta tehokkaalle tuulivoimalalle tai tuulipuistolle sopiva paikka. Tarkastelussa otetaan huomioon sähköverkkoon liitettävyyden, tuulivoimalan tuotannonodotukset sekä miten voimalan rakentaminen vaikuttaisi sen ympäristöön. Tarkastelussa jätetään taloudellinen laskenta vähemmälle ja kustannuksia arvioidaan vain sen perusteella, olisiko projekti lähtökohtaisesti mitenkään mahdollinen.

Haluan tarkastella työssä Onshore-voimaloiden potentiaalia ja kuten luvussa 4 todetaan, Suomessa tuuliolosuhteet tuulivoimalalle ovat otollisimmat rannikolla. Tarkastelussani käytän Suomen Tuuliatlaksen karttapalvelua, Fingridin karttaa, jossa näkyy Suomen sähkönsiirtoverkot sekä tavallista karttaa tarkistaakseni esimerkiksi, onko lähistöllä asutusta.

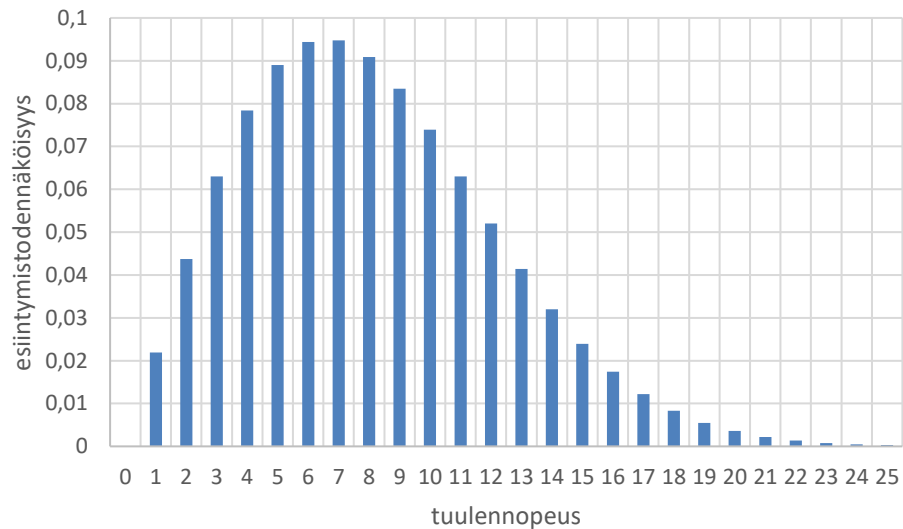
Valitsin sijainniksi Siikajoen koordinaateilla $64^{\circ}48'48,5''$ (64,81346) pohjoista pituutta ja $24^{\circ}32'36,8''$ (24,54356) itäistä pituutta. Paikka löytyi tuuliatlaksen 250 x 250 metrin tarkkuudella tehdystä kartasta. Vuoden keskimääräinen tuulennopeus paikalla 100 metrin korkeudessa on 8,10 m/s.

Taulukko 1 Valitun kohteen lisätiedot [30].

Lat	Lon	Korkeus (m)	V (m/s)	Weibull k
64,81346	24,54356	50	7	1,904
64,81346	24,54356	75	7,7	1,998
64,81346	24,54356	100	8,1	2,045
64,81346	24,54356	125	8,4	2,045
64,81346	24,54356	150	8,7	2,037

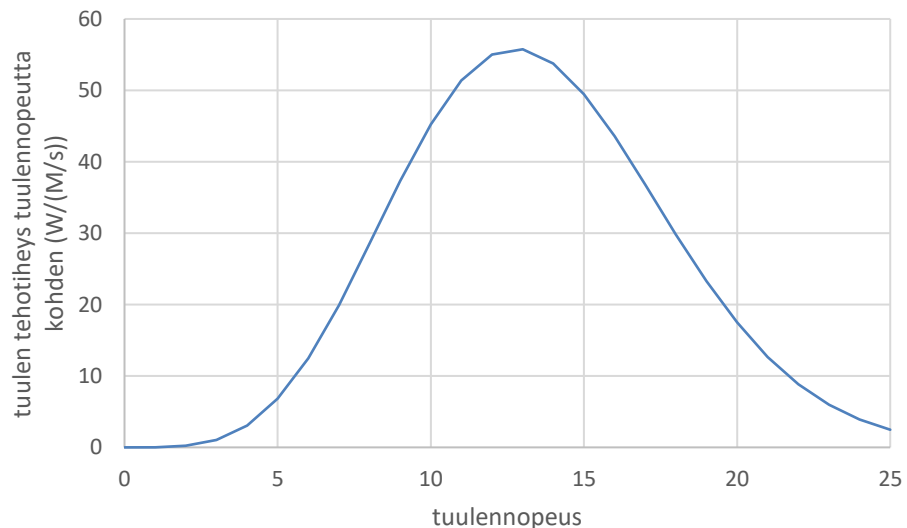
Taulukon 1 tiedoilla saadaan kaavoilla 4.1 ja 4.2 laskemalla tiedot tuulen esiintymistodennäköisyyksistä. Tarkastellaan 100 metrin korkeudella tuulisuutta, jolloin muotokerroin $k=2,045$ ja kaavan 4.2 mukaan määräkerroin $C=9,1430$.

Kuvassa 12 on esitettyä lasketut tulokset. Kuvasta nähdään, että suurin esiintymistodennäköisyys on 7 m/s tuulennopeudella eli 9,48 %. Tuulen keskiarvolla 8,1 m/s esiintymistodennäköisyys on 9,03 %. Huomataan siis, ettei keskimääräinen tuulennopeus olekaan kaikista yleisin esiintyvä tuulennopeus.



Kuva 12 Tuulen esiintymistodennäköisyydet 100 metrin korkeudella kohteessa.

Esiintymistodennäköisyyksien lisäksi on tärkeä tietää tuulen tehotiheysjakauma kuten luvussa 4 todettiin. Kaavan 4.3 avulla saatiin laskettua tämän paikan tehotiheysjakauma. Kuvasta 13 voidaan nähdä, että noin 13 m/s kohdalla on suurin tehotiheys, noin 55 W/m².



Kuva 13 Sijainnin 2 tuulennopeusjakaumasta laskettu tiheysjakauma.

Tehotiheysjakaumasta voidaan edelleen kaavan 4.4 mukaisesti laskea tehotiheyden keskiarvo $P'_{ka}=607,50 \text{ W/m}^2$. Kun voimala on valittu ja sen pyyhkäisyypinta-ala tunnetaan, voidaan pinta-alamenetelmällä laskea sille arvio tehon tuotannosta tehotiheyden keskiarvon avulla. Keskimääräinen tehotiheyden arvo on erittäin hyvä.

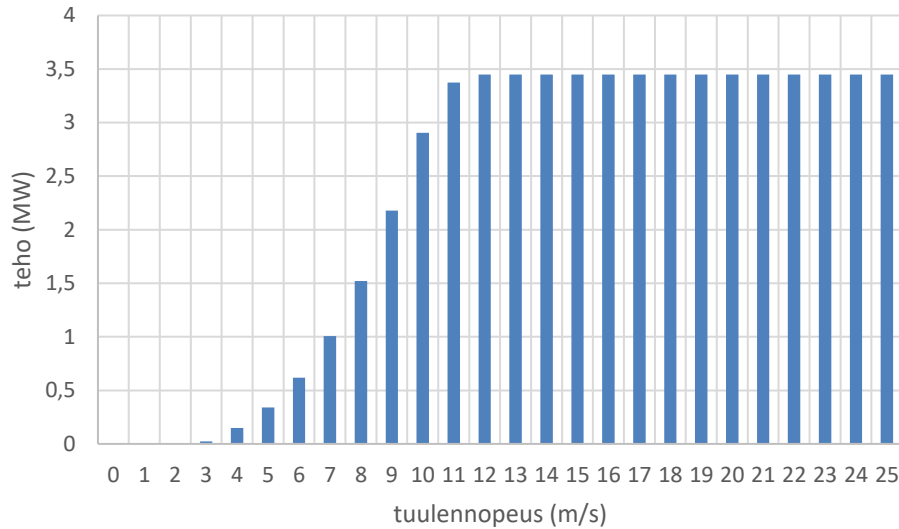
Sopivan turbiinin etsimiseen käytin wind-turbine-models.com sivuston turbiinien tehokäyrän vertailuohjelmaa [35]. Työssä valittiin Vestas V117-3.45 tuulivoimala, jonka tekniset tiedot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2 Vestas V117-3.45 tekniset tiedot [37].

Nimellisteho	3,45 MW
Käynnistys tuulennopeus	3,0 m/s
Tuulennopeus, jolla nimellisteho saavutetaan	12,5 m/s
Pysäytys tuulennopeus	25,0 m/s
Roottorin halkaisija	117,0 m
Pyyhkäisyypinta-ala	10 751 m ²

Taulukosta nähtävien teknisten tietojen perusteella voidaan tehdä voimalalle pinta-alamenetelmällä tuotantoarvio. Kaavan 4.5 mukaan roottorille tuleva keskimääräinen teho $P_{ka}=6,53 \text{ MW}$. Ilman tiheydeksi oletetaan 1.225 kg/m^3 . Kun arvioidaan, että tuulivoimalan hyötysuhde on yleensä noin 20-40 % saadaan vuotuiseksi tuotannoksi kaavan 4.6 mukaan noin 11,44-22,88 GWh. Tämä on vielä vain arvio eikä kovin tarkka, tehokäyrämenetelmällä saadaan laskettua tarkempi vuosituotanto sekä hyötysuhde.

Tehokäyrämenetelmää varten tarvitaan valitun voimalan tehokäyrä. Tehokäyrä on esitettyä kuvassa 14. Kuvasta voidaan nähdä, ettei tuulivoimalan teho nouse sen nimellistehon yläpuolelle, vaikka tuulennopeus kasvaisi yli 12 m/s.



Kuva 14 Vestas V117-3.45 tuulivoimalan tehokäyrä [37, mukailen].

Yhdistämällä kuvat 12 ja 14 saadaan arvioitua voimalan vuosituotantoa. Lasketaan, kuinka monta tuntia voimala toimii milläkin tuulennopeudella, perustuen tuulen esiintymistodennäköisyyteen. Turbiinille saapuvan ilmavirtauksen vuosittainen energia on kuvan 8 mukaisilla esiintymistodennäköisyyksillä noin 57 GWh. Oletuksena on edelleen, että ilman tiheys on vakio 1.225 kg/m^3 .

Voimalan vuosituotannoksi saadaan noin 14,36 GWh. Eniten energiaa tuotetaan, kun tuulennopeus on 10 m/s, vuodessa tätä tuulennopeutta esiintyy keskimäärin 647 tuntia ja tänä aikana tuotettu energia on 1880,6 MWh. Näin ollen voimalan hyötysuhde on 25,19 %. Tämä ei ole kovin hyvä hyötysuhde, ja paikalle voisi mahdollisesti harkita isompaa voimalaa, joka voisi hyödyntää suuremmat tuulennopeudet paremmin. Toisaalta tälle voimalalle hieman pienempi keskituulen nopeus voisi olla ideaalisempi, esimerkiksi 7,5 m/s tuuli ajatellaan olevan hyvä tuulennopeus.

Fingridin kartan mukaan lähimmälle 110 kV johdolle olisi noin 20 kilometrin matka, joka on suhteellisen pitkä matka. Alueelle ei voi rakentaa kuin yhden tai kaksi voimalaa, mutta kahdenkin voimalan teho on jo niin suuri, että se kannattaisi liittää suurjänniteverkkoon. Alueella on myös asutusta jonkin veran, joten toinen vaihtoehto olisi liittää voimalat jakeluverkkoon ja paikallisten kuluttajien käyttöön.

Kun valittu voimalatyyppi ei ollutkaan sopiva valittuun paikkaan, voitaisiin iteratiivisesti lähteä etsimään joko uutta paikkaa, tai paikalle sopivampaa voimalaa. Tässä tilanteessa lähtisin kuitenkin etsimään parempaa paikkaa. Alueella on jonkin verran asutusta, joten suuremman tuulipuiston rakentaminen olisi hankalaa.

7. YHTEENVETO

Tuulivoimalalle sopivaa paikkaa etsiessä on otettava usea asia huomioon. Tärkeimpänä on tietenkin paikan tuulisuus. Huomioon tulee ottaa myös sijainti sähköverkon kannalta. Uusien pitkien sähkölinjojen rakentaminen on kallista ja siksi tuulivoimalat kannattaa sijoittaa lähelle riittävän suurjännitteistä verkkoa. Myös esimerkiksi tieverkoston huomiointi on tärkeää, jos uusia teitä huoltoon ja rakentamista varten joudutaan tekemään, kustannukset nousevat huomattavasti.

Suomessa rannikoilla olevat hyvät tuuliolosuhteet ovat tuulivoimalle otolliset. Teknologian kehittyessä yhä suurempaa tuulennopeuden skaalaa pystytään hyödyntämään. Tuulivoimaa Suomessa on jo hyvä määrä, ja kun katsotaan muuta Eurooppaa, tuulivoiman voidaan olettaa olevan pysyvä ratkaisu energiantuotannossa. Suomessa on kattava suurjänniteverkosto, joka ylettyy rannikoilla sinne missä sähköä tuotetaan. Myös kantaverkon sähkönsiirtokyky on hyvä, ja tuulivoimaloiden liittäminen siihen ei pitäisi tuottaa ongelmia suurimmassa osassa maata.

Suomen sähkömarkkinat kestävät tuulivoimaloiden vaihtelevan tuotannon, eikä tulevaisuudessakaan vaikuttaisi olevan ongelmia, vaikka tuotantoa lisättäisi vuoteen 2030 mennessä kaksinkertaisesti.

Case -tyyppisessä tarkastelussa tutkittiin Siikajoelle sijoitettavan tuulivoimalan tuotanto-odotuksia ja liitettävyyttä sähköverkkoon. Tuotanto-odotukset olivat keskivertoa, tuulivoimalan hyötysuhteeksi valitulla paikalla tuli vain noin 25 %, joka ei kuitenkaan ole kovin hyvä hyötysuhde. Lähimmälle 110 kV:n verkolle oli myös noin 20 kilometriä matkaa, joka on suhteellisen pitkä matka. Paikka oli lopulta huono valinta, eikä valittu voimalatyyppi sopinut vastaamaan paikan tuuliolosuhteita.

Suomessa on paljon potentiaalia tuulivoimalle, ja vaikka työssä jätettiin offshore-voimaloiden tarkastelu vähemmälle, voidaan todeta, että Suomen tuulivoiman tilanne on hyvä. Suomen sähköverkko kestää hyvin Suomessa tuotetun tuulivoiman nyt ja myös tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] A. Korpela, Tuulivoiman perusteet, Tammertekniikka, 2016, 1. painos
- [2] Eri voimalatyyppejä, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 21.5.2019, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne/eri-voimalatyyppeja-sis-linkki>
- [3] Tuulivoimatekniikka, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2018, Viitattu 24.4.2019, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka>
- [4] Tietoa tuulivoimasta, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2018, Viitattu 27.5.2019, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>
- [5] R. P. Walker, A. Swift, Wind Energy Essentials: Societal, Economic, and Environmental Impacts, Wiley, 2015, 491 p.
- [6] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd, 2005, 691 p.
- [7] Tuulivoima Suomessa 2018, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 21.1.2019, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tilastot>
- [8] Tuulivoimahankkeet Suomessa, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 28.3.2018, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>
- [9] Suomen suurin tuulivoimapuisto, TuuliWatti, 23.8.2016, Viitattu 2.4.2019, Saatavissa: <http://www.tuuliwatti.fi/tiedotteet/suomen-suurin-tuulivoimapuistotaydessa-tuotannossa-kalajoella>
- [10] Sähkötuotanto energialähteittäin 2018, Energiateollisuus, 18.1.2019, Viitattu 9.5.2019, Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto
- [11] Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta, 30.12.2010/1396, 2010, Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>
- [12] Suomen tuulivoimalat kartalla, Etha Wind, Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019, Viitattu 3.4.2018, Saatavissa: <http://ethawind.com/map/>
- [13] Uusiutuva energia, Tuulivoima, 26.10.2018, Motiva Oy, Viitattu 18.4.2019, Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima
- [14] Tuulipuistot, 2017, TuuliWatti, Viitattu 9.5.2019, Saatavissa: <http://www.tuuliwatti.fi/tuulipuistot>
- [15] W. Shepherd, L. Zhang, Electricity Generation Using Wind Power, World Scientific, 2010

- [16] Wind Power Capacity reaches 600 GW, 53,9 GW added in 2018, 25.2.2019, World Wind Energy Association, Viitattu 9.4.2019, Saatavissa: <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/>
- [17] Installed Capacity by the end of 2018 (MW), 18.2.2019, World Wind Energy Association, Viitattu 9.4.2019, Saatavissa: <https://library.wwindea.org/2019/02/18/global-statistics-2018-preliminary/>
- [18] Wind energy in Europe in 2018, February 2019, WindEurope, Viitattu 9.4.2019, Saatavissa: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>
- [19] Sähköverkkoyhtiöt, Energiateollisuus, 2015, Viitattu 23.5.2019, Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahko-verkkoyhtiöt
- [20] Suomen sähköverkkojen rakenne, Energiateollisuus, 2015, Viitattu 25.3.2019, Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahko-verkot
- [21] Sähkömarkkinalaki 588/2013, 2013, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#O2L4P20>
- [22] Suomen sähkönsiirtoverkko kartalla, 2018, Fingrid Oyj, Viitattu 18.4.2019, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>
- [23] Tuulivoimala ja –puisto, Suomen Hyötytuuli, 2019, Viitattu 21.5.2019, Saatavissa: <https://hyotytuuli.fi/tuulivoima/tuulivoimala-ja-puisto/>
- [24] T. Koivunen, Tuulipuiston sähköverkon suojaus, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Helmikuu 2011
- [25] Tuulivoimaliittyjän opas, 2015, Fingrid Oyj
- [26] H. Holttinen, Tuulivoiman säätö- ja varavoimatarpeesta Suomessa, Tuulensilmä, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 1/2008
- [27] Säättövoiman tarve, Suomen tuulivoimayhdistys ry, Viitattua 30.5.2019, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/saatovoima>
- [28] P. A. Lynn, Onshore and offshore wind energy, A John Wiley & Sons, Ltd., 2012, 223 p.
- [29] Suomen Tuuliatlaksen yhteenvetoraportti, 28.6.2008, Työ- ja elinkeinoministeriö, Ilmatieteenlaitos, Motiva Oy, Saatavissa: http://www.tuuliatlas.fi/linked/fi/Tuuliatlas_yhteenvetoraportti.pdf
- [30] Suomen tuulitiedot, Suomen Tuuliatlas, Viitattu 27.5.2019, Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>
- [31] A. Mikkonen, Kuinka valita tuulivoima-alue, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 3.11.2010

- [32] M. Lasanen, Tuulipuistoprojektin käsikirja, Opinnäytetyö, Oulun ammattikorkeakoulu, Syksy 2014
- [33] Tuulivoimahankkeen suunnittelu ja toteutus, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 22.5.2019, Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke>
- [34] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöministeriö, Ympäristöhallinnon ohjeita 5, 2016, 121 s
- [35] Kaavio: Tuulivoimahankkeen luvitus Suomessa, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Hankekehittäjävaliokunta, Saatavissa: https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/208-tuulipuiston_luvittaminen_sty.pdf
- [36] Tuulivoimaloiden turbiineja, wind-turbine-models.com, Viitattu: 29.5.2019, Saatavissa: <https://en.wind-turbine-models.com/powercurves>
- [37] Vestas V117-3.45 tuulivoimala, wind-turbine-models.com, Viitattu 29.5.2019, Saatavissa: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1248-vestas-v117-3.45>
- [38] M. Jääskeläinen, L. Rantala, A. Sundelin, Merituulipuiston rakentaminen, Prinxxtech Oy, 30.8.2012, 22 s