

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Tuulivoiman tuotannon kehittyminen Suomessa  
Development of wind power production in Finland

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta 24.4.2020

Nico Passila

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Nico Passila

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2020

45 sivua, 1 kaava, 4 kuvaa ja 18 taulukkoa

Hakusanat: tuulivoimalat, uusiutuvat energialähteet, energiantuotanto

Tässä kandidaatin työssä tarkastellaan tuulivoiman tuotannon aiempaa kehitystä Suomessa, tämänhetkisiä tuulivoimahankkeita, sekä tulevaan kehitykseen vaikuttavia tekijöitä.

Aikaisempaa kehitystä tarkastellaan tilastojen ja kirjallisuuslähteiden avulla. Julkisten tuulivoimahankkeiden tietojen perusteella tarkastellaan nykyisten hankkeiden valmistumisajankohtia ja vaikutuksia tulevaan tuotantoon. Hankkeiden tietojen pohjalta tehdään arvio tuulivoiman tuotannon kehitykselle seuraavien kuuden vuoden aikana. Arviot tehdään neljänä mahdollisena skenaariona ja esitetään kuvaajana. Lopuksi tarkastellaan tuulivoiman kehityksen mahdollisuuksia ja haasteita.

Tuulivoimaloiden määrä on kasvanut nopeasti Suomessa, mutta ne tarvitsevat vaihtelevan tuotantonsa takia säätövoimaa rinnalleen. Säätövoiman tarve voitaisiin täyttää energiavarastoilla. Tuulivoiman tuotannon vaihtelevuus aikaansaa epäsuoria kustannuksia. Nykyään tuulivoimaa rakennetaan markkinaehtoisesti ilman tukia. Tuulivoimateknologian kehittyminen, uudet voimalatyypit ja merituulivoiman kehittyminen edistäisivät tuulivoiman tuotantoa. Haittaavia tekijöitä ovat Suomen kylmä ilmasto, voimaloiden vaikutukset linnustoon, kierrätyksen haastavuus, voimaloista aiheutuva melu, välkyntä ja häiriöt tutkavalvontaan.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Tuulivoiman historiaa</b>	<b>7</b>
<b>3 Tuulivoimahankkeet</b>	<b>10</b>
3.1 Rakenteilla olevat hankkeet .....	14
3.2 Luvitetut hankkeet.....	17
3.3 Luvituksessa olevat hankkeet .....	18
3.4 Ehdotetut hankkeet.....	21
3.5 Hankkeiden vaikutus tuotantoon.....	21
<b>4 Tulevaisuuden näkymät</b>	<b>28</b>
4.1 Mahdollisuuksia .....	30
4.2 Haasteita .....	32
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>37</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>40</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

A	Pyyhkäisyypinta-ala	m <sup>2</sup>
C <sub>p</sub>	Turbiinin tehokerroin	-
P	Teho	W
V	Tuulen nopeus	m/s

### Kreikkalaiset aakkoset

ρ	Tiheys	kg/m <sup>3</sup>
---	--------	-------------------

### Lyhenteet

CAES	Paineilmaenergian varasto, (Compressed-air energy storage)
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
IEA	Kansainvälinen energia assosiaatio, (International Energy Association)
LIDAR	Valotutka, (LIght Detection And Ranging)
PPA	Sähkönhankintasopimus, (Power Purchase Agreement)
PtX	Power-to-X
SODAR	Äänitutka, (SONic Detection And Ranging)
STR	Suunnittelutarveratkaisu
STY	Suomen Tuulivoimayhdistys
VTT	Teknologian tutkimuskeskus
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi, (Environmental Impact Assession)

## 1 JOHDANTO

Suomen energiasektori on siirtymässä fossiilisista polttoaineista ympäristöystävällisempiin ja kestävämpiin vaihtoehtoihin. Kivihiilen käyttö Suomen energiantuotannossa loppuu vuoteen 2029 mennessä (Valtioneuvosto, 2019a). Muidenkin fossiilisten polttoaineiden käyttöä Suomen energiantuotannossa ollaan vähentämässä niiden tuottamien hiilidioksidipäästöjen takia. Näiden tilalle on saatava uutta tuotantoa, mikä toteutetaan vähäpäästöisillä energialähteillä, kuten bioenergialla, aurinko-, tuuli- ja ydinvoimalla. Syinä energiantuotannon muutokselle on mm. ilmastonmuutos, luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen, luonnonvarojen ylikulutus, hiilidioksidi päästöjen vähentäminen ja kansainväliset ympäristösopimukset. (Valtioneuvosto, 2019b) Muita muutokseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. ilmansaasteet, energiantuotannon taloudellisuus, Suomen energiaomavaraisuus ja suomalaisten energia-asenteet.

Suomessa tuulivoimaloiden kumulatiivinen asennettu kapasiteetti on kasvanut vuoden 1986 alle megawatin testivoimaloista yli 2200 megawattiin vuoteen 2019 mennessä (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019c) (Tuulivoimalehti, 2019). Tuulivoima on oiva valinta Suomen oloihin, sillä se tuottaa energiaa ympäri vuorokauden ja on tehokkaampaa talviaikana, jolloin Suomen energiankulutus on korkeimmillaan. Suurimpina haasteina tuulivoiman lisääntymiselle ovat haastava lupaprosessi ja tuulivoiman tuotannon vaihtelevuus. Vaihtelevuutta voidaan kompensoida energianvarastoinnilla ja säätövoimalla, mutta varastointitekniikat eivät ole vielä riittävän kustannustehokkaita laajamittaiseen varastointiin. Valtioneuvoksen mukaa tuulivoiman osuutta Suomen energiantuotannossa tullaan kasvattamaan ja tuulivoiman rakentamiseen liittyviä esteitä tullaan vähentämään (Valtioneuvosto, 2019b).

Tämän kandidaatintyön aiheena on tuulivoiman tuotannon kehityksen tarkastelu Suomessa. Työn tavoitteena on arvioida lähitulevaisuuden tuulivoiman tuotannon määrää Suomessa ja selvittää tuotannon kehittymiseen vaikuttavia tekijöitä. Keskeisimpinä tutkimuskysymyksinä on, kuinka Suomen tuulivoiman tuotanto tulee kehittymään ja mitkä seikat vaikuttavat kehitykseen. Työssä tarkastellaan kirjallisuuslähteiden avulla tuulivoiman tuotannon kehityksen historiaa, tämänhetkisiä tuulivoimahankkeita ja tulevaisuuden trendejä. Tuulivoiman tuotannon kehittymisen tunteminen auttaa

seuraamaan energiaskenaarioiden tavoitteiden, kuten vähäpäästöisen tuotannon, täyttymistä ja antaa kokonaiskuvaa tuulivoiman osuudesta Suomen energian tuotannossa. Kehitykseen vaikuttavien tekijöiden tunteminen auttaa tuulivoiman kehittämisessä, haittojen poistamisessa, uusien hankkeiden suunnittelussa ja lisää kansalaisten tuulivoimatietoisuutta.

Työssä käydään kirjallisuuslähteiden avulla läpi tuulivoiman historiaa Suomessa ja tarkastellaan sen kehitystä tilastojen avulla. Tämän jälkeen tutkitaan tämänhetkisiä julkisessa tiedossa olevia tuulivoimahankkeita. Hankkeista tarkastellaan niiden arvioituja valmistumisaikoja, vaiheita ja vaikutuksia tuulivoimaloiden määrään, kumulatiiviseen asennettuun kapasiteettiin sekä vuosittaiseen tuulivoimatuotantoon. Vuosittaisia tuotantoja tarkastellaan neljässä eri skenaariossa, joissa hankkeiden vaiheiden onnistumistodennäköisyydet ja oletetut koot vaihtelevat. Lopuksi työssä käydään kirjallisuuden pohjalta läpi tulevaisuuden tuotantoon vaikuttavia tekijöitä ja arvioidaan niiden merkityksiä.

## 2 TUULIVOIMAN HISTORIAA

Suomeen ensimmäinen testituulivoimala pystytettiin vuonna 1986. Se oli Imatran voiman omistama, sijaitsi Kopparnäsissä ja oli teholtaan 300 kW. 90-luvun alussa Suomen tuulivoimaloiden kapasiteetti oli yhteensä 370 kW. Tuulivoiman edistämistä varten vuonna 1989 perustettiin Suomen Tuulivoimayhdistys (STY). Yhdistyksen tehtävänä on ollut tiedottaa tuulivoimasta ja edistää tuulivoimaan liittyvää tutkimusta. Vuodesta 1994 eteenpäin tuulivoimatilastojen koonti siirtyi teknologian tutkimuskeskuksen (VTT) ja kansainvälisen energia assosiaation (IEA) vastuulle. Vuoden 1993 lopulla suomen asennettu kumulatiivinen tuulivoima kapasiteetti oli noussut jo 4310 kilowattiin. (Tuulivoimalehti, 2019)

Suomen Tuulivoimayhdistyksen toimesta on kerätty ja pidetty kirjaa Suomen tuulivoimatilastoista. Tilastojen mukaan Suomeen rakennettiin vuonna 2019 56 tuulivoimalaa. Sinä vuonna Suomessa oli 754 tuulivoimalaa, niiden kumulatiivinen kapasiteetti oli 2284 MW ja niiden sähköntuotanto oli 5 987 TWh. Tilastoista nähdään myös, kuinka asennettu kumulatiivinen kapasiteetti on kehittynyt vuoden 2009 noin 200 megawattista vuoden 2019 noin 2200 megawattiin. Asennetun kapasiteetin kasvu on ollut kiihtyvää, mutta vuonna 2018 ei rakennettu uutta tuulivoimaa. Tämä pysähtyminen johtui hallituksen tekemästä uudesta uusiutuvan energian tukijärjestelmä esityksestä (Eduskunta, 2017). Tuulivoiman rakentajat jäivät odottamaan ja katsomaan kuinka uusi esitys tulee vaikuttamaan hankkeisiin. Kumulatiivinen kapasiteetti on kasvanut tuon vuoden jälkeen, mutta ei samalla tahdilla kuin aiemman tukijärjestelmän kanssa. (Tuulivoimayhdistys, 2019c) Tuulivoiman osuus sähköntuotannossa oli vuonna 2010 0,4% ja vuonna 2018 se oli 8,7% (Energiateollisuus, 2019).

Aikaisemmin tuulivoimahankkeita tuettiin vuosina 2011-2017 maksamalla tuotetulle sähkölle syöttötariffia. Tavoitehintaa oli 83,50€ megawattitunnilta. Energiamarkkinaviraston maksaman syöttötariffin määrä oli tavoitehintaa vähennettynä kolmen kuukauden keskimääräisellä sähkön markkinahinnalla. Syöttötariffijärjestelmään voitiin hyväksyä voimaloita, kunnes tuulivoimaloiden generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho ylitti tavoitellut 2500 megavoltiampeeria. (L 30.12.2010/1396)

STY:n tilastoista nähdään myös, kuinka rakennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen teho on kehittynyt. Vuonna 1995 asennetut voimalat olivat alle 0,5 MW tehoisia, kun taas vuoden 2019 voimalat olivat keskimäärin 4,3 MW tehoisia. Vuosittainen keskimääräinen teho ei ole kasvanut lineaarisesti, vaan se on vaihdellut vuosittain. Tehon kasvulle on kuitenkin huomattavissa selvä kasvutrendi. (Tuulivoimayhdistys, 2019c)

Tuulivoimaloiden tehon kasvu johtuu teknologian kehityksestä. Paremmat materiaalit ja rakennusmenetelmät ovat mahdollistaneet korkeammat voimalat, pidemmät lavat ja tehokkaammat koneistot. Kaavassa 1 on esitetty tuulivoimalan tuottama teho.

$$P_{turbiini} = \frac{1}{2} \rho C_p A u^3. \quad (1)$$

missä

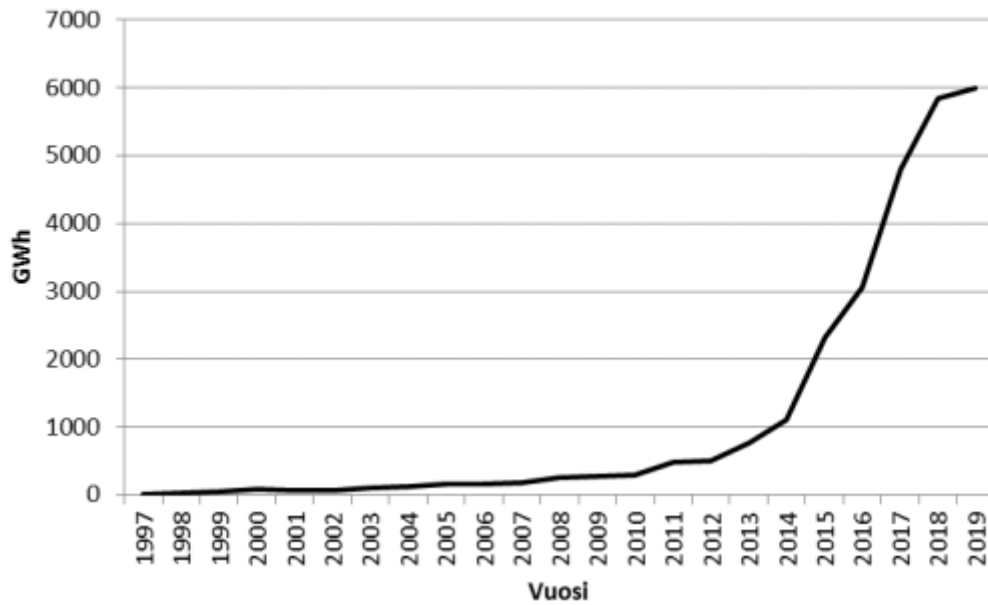
$P_{turbiini}$	turbiinin teho	[MW]
$C_p$	Turbiinin tehokerroin	[-]
$\rho$	ilman tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$A$	siipien pyyhkäisyypinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$u$	tuulen nopeus	[m/s]

Voimaloiden korkeuden kasvu on ollut tärkeää, sillä kuten kaavasta 1 nähdään, tuulivoiman tuottama mekaaninen teho riippuu voimakkaasti tuulen nopeudesta. Tuulen nopeus kasvaa eksponentiaalisesti korkeuden funktiona johtuen rajakerroksen kitkasta. Sama idea on nähtävissä esimerkiksi virtauksen nopeudessa tasolevyllä. Korkeammalla vallitsevan suuremman tuulen nopeuden ansiosta korkeampi tuulivoimala tuottaa enemmän tehoa matalampaan voimalaan verrattuna samalla sijainnilla.

Tämän työn kannalta tärkein STY:n tuottama tilasto on vuosittainen tuulivoimatuotanto, joka on esitetty kuvassa 1.



## Vuosittainen tuulivoimatuotanto (GWh)



**Kuva 1:** Vuosittainen tuulivoimatuotanto gigawattitunteina vuodesta 1997-2019 (Tuulivoimayhdistys, 2019c).

Tuulivoimatuotannon määrä vaihtelee vuosittain tuulisuuden mukaan ja se kasvaa valmistuvien tuulivoimalahankkeiden myötä.

### 3 TUULIVOIMAHANKKEET

Suomen tuulivoimayhdistys on kerännyt tietoja Suomessa olevista tuulivoimahankkeista. Nämä tiedot löytyvät *Suomeen suunnittelussa olevat hankkeet* nimisestä koosteesta. Tiedostossa kerrotaan projektien vaiheista, voimaloiden arvioiduista minimi ja maksimi nimellistehoista sekä turbiinien määrästä. Hankkeiden yhteenveto on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1:** STY:n yhteenveto tuulivoimahankkeiden tilanteista. (Muokattu lähteestä: Suomen tuulivoimayhdistys, 2020b)

Maalla	Projektit	MW	Turbiinit
6 Rakenteilla	22	1347	278
5 Täysin luvitettu	69	3839	845
4 Osayleiskaava tai STR tehty	44	2788	682
3 STR käynnissä	1	15	3
3 Osayleiskaava ehdotus	11	1093	181
3 YVA hyväksytty	8	1434	187
2 Osayleiskaava luonnos	2	137	32
2 YVA käynnissä	7	1267	194
1 Osayleiskaava käynnissä	14	2444	392
0 Ehdotetut hankkeet / Toteutettavuus tutkittu	27	1428	315
<b>Yhteensä</b>	<b>205</b>	<b>15792</b>	<b>3109</b>
<b>Merellä</b>			
4 Osayleiskaava tai STR tehty	3	820	166
3 YVA hyväksytty	2	1120	120
0 Ehdotetut hankkeet / Toteutettavuus tutkittu	2	800	100
<b>Yhteensä</b>	<b>7</b>	<b>2740</b>	<b>386</b>
<b>Kaikkiaan</b>			
<b>Yhteensä</b>	<b>212</b>	<b>18532</b>	<b>3495</b>

Ympäristöministeriö on julkaissut ohjeet tuulivoimarakentamisen suunnittelulle. Tuulivoimarakentamisen tulee noudattaa yleisiä maankäyttö- ja rakennuslain mukaista kaavoitusta, ja rakentaminen edellyttää aina rakennus- ja toimenpidelupaa. Lisäksi voidaan tarvita erityislainsäädännön piiriin kuuluvia lupia kuten ilmailulain, vesilain tai

ympäristösuojelulain mukaisia lupia. Kaavojen ja lupien tarve riippuu kohdealueen kaavatilanteesta, tuulivoimalan sijaintipaikasta, ympäristön ominaisuuksista sekä hankkeen koosta. Tuulivoimarakentamisen ohjauksen tavoitteena on löytää rakentamiselle parhaiten soveltuvat alueet samalla ehkäisten tuulivoimasta luonnolle ja ihmisille aiheutuvia haitallisia vaikutuksia. (Ympäristöministeriö, 2016b. s. 3)

Tuulivoimaprojekti etenee yleisimmin seuraavissa vaiheissa, joista osaa suoritetaan samanaikaisesti. Esiselvitys, sopivan alueen etsintä, neuvottelut kunnan ja maanomistajan kanssa, neuvottelut verkonhaltijan kanssa, tuulimittaukset, ympäristövaikutusten arviointimenettelyn (YVA-menettely) tarve & aloitus, alueen kaavoitus, lopulliset neuvottelut verkonhaltijan kanssa, lupien haku, maanrakennustyöt, voimaloiden hankinta ja rakennus. Lähiympäristön asukkaille tulee tiedottaa hankkeen etenemisestä ja heille tulee tarjota tilaisuuksia keskustella hankkeen etenemisestä. Hankkeen pisimmät vaiheet ovat yleensä osayleiskaava ja YVA.

Ethawind yritys on kartoittanut Suomen tuulivoimaloiden ja tuulivoimalahankkeiden sijainnit. Tämänhetkiset tuulivoimalahankkeiden sijainnit ovat nähtävillä karttakuvana heidän sivullaan. Kartasta voidaan huomata, että tuulivoimalahankkeet ovat sijoittuneet enimmäkseen rannikolle. Meren rannoilla on paremmat tuuliolosuhteet kuin sisämaassa, koska siellä ympäristön pinnankarheus ei hidasta tuulen nopeutta.

Tuulivoimahankkeen sijoittaminen riippuu harkitun alueen tuuliolosuhteista. Suomen tuuliolosuhteista on kerätty kattavasti dataa Tuuliatlakseen (Tuuliatlas, 2009). Tuuliolosuhteiden perusteella ennustetaan hankkeen sähköntuotantoa, joka on tärkeä tekijä sen kannattavuudelle ja täten sen toteuttamiselle.

Alustavan sijoituksen jälkeen tehdään aluekohtaiset tuulimittaukset tuuliolosuhteiden varmentamiseksi. Aluekohtaiset mittaukset tehdään joko mittausmastolla, jossa tuulen nopeus, suunta ja turbulentsisuus mitataan kolmelta korkeudelta, tai LIDAR (Light Detection And Ranging) tai SONAR (SONic Detection And Ranging) laitteilla. Aluekohtaista mittausdataa tulee olla 12kk ajalta. (Korpela, 2016. s. 43-44.)

Sopivan paikan löydyttyä aletaan kaavoittamaan tuulipuistoa. Yleiskaava ohjaa kunnan tai sen osan yhdyskuntarakenteiden ja maankäytön yleispiirteitä, ja toimintojen

yhteensovittamista. Kunta vastaa alueensa kaavoituksesta, minkä takia osayleiskaavan hyväksyntä on kunnan tehtävä. Kaavan laadinta on monivaiheinen prosessi, jossa ollaan vuoropuhelussa useiden eri tahojen kanssa. Maankäyttö- ja rakennuslakiin 1.4.2011 tulleen muutoksen myötä tuulivoimarakentamista suoraan ohjaavalla yleiskaavan nojalla voidaan myöntää suoraan rakennusluvat tuulivoimaloille. Yleiskaavassa pitää ottaa huomioon maakuntakaavan ohjausvaikutus. (Ympäristöministeriö, 2016b. s. 26-27)

Ympäristövaikutusten arviointimenettely tavoitteena on ehkäistä ympäristölle haitallisia vaikutuksia. YVA sovelletaan, kun tuulivoimaloita on vähintään 10 kappaletta tai kokonaisteho vähintään 30 MW. YVA-menettely on kaksivaiheinen. Hankkeesta vastaava taho toimittaa yhteysviranomaiselle arviointiohjelman, jossa suunnitellaan mitä hankkeen vaikutuksia ja vaihtoehtoja arvioidaan, ja kuinka asukkaiden ja muiden tahojen osallistuminen järjestetään. Tuulivoimahankkeissa yhteysviranomaisena toimii alueellinen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY). Yhteysviranomaisena antaa arviointiohjelmasta lausunnon huomioiden asukkaiden ja muiden tahojen mielipiteet. Hankkeesta vastaava toteuttaa hankkeen ympäristövaikutusten arvioinnin annetun lausunnon mukaisesti. Arvioidut vaikutukset kootaan YVA-selostukseen, josta kerätään mielipiteitä. Viranomaisena antaa perustellun päätelmän ympäristövaikutuksista ja hyväksyy YVA:n, kun hankkeen ja sen toteuttamisvaihtoehtojen tarkasteltavien vaikutusten selvitys on todettu riittäväksi. Jos ympäristövaikutukset ylittävät valtion rajat, järjestetään arviointi yhteistyössä toisen valtion kanssa. (Ympäristöministeriö 2016b. s. 43-46)

Tuulivoimahankkeen luvitus voi edetä kolmella eri tavalla. Kaavoituksessa laaditaan YVA ja yleiskaava, kun tuulivoimaloita on kymmenen tai enemmän. Tämä prosessi kestää yleensä 1,5-3 vuotta. Kaavoituksessa laaditaan vain yleiskaava, kun tuulivoimaloita on alle kymmenen. YVA saatetaan tarvita tapauskohtaisesti. Tämä prosessi kestää noin vuoden ilman YVA. Luvitus voi tapahtua myös suunnittelutarveratkaisun kautta. Tämä prosessi kestää vain 6-8kk. Kaikkiin prosesseihin tarvitaan myös luvat puolustusvoimilta, ilmailuviranomaisilta ja lupa kantaverkkoon liittymiselle. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019b)

Tuulipuiston rakentaminen on hankkeen viimeinen vaihe. Luvituksen jälkeen kaavailut voimalat tilataan tuulivoimalavalmistajilta. Voimalat tuodaan Suomeen yleensä meriteitse. Voimalat kuljetetaan osissa kohde alueelle. Lavat siirretään kokonaisina ja niiden kuljetus tapahtuu erityisillä rekoilla. Tällä välin kohdealueelle on rakennettu tie- ja sähköverkot, ja mahdollinen muuntaja-asema. Tuulivoimaloille valetaan perustukset betonista ja ne raudoitetaan. Tuulivoimalan torni kasataan osa kerrallaan ja palat nostetaan paikalleen nosturilla. Lopuksi naselli, koneisto ja roottorin lavat nostetaan paikoilleen. Yhden voimalan pystyttämisessä kuluu noin kuukausi, joten koko puiston valmistumisnopeus riippuu rakennettavien voimaloiden määrästä.

STY:n keräämistä tiedoista saadaan selville missä vaiheissa ja minä vuosina tuulivoimahankkeet on suunniteltu siirtyvän tuotantoon. Nämä tiedot on koottu taulukkoon 2.

**Taulukko 2:** Tuulivoimaloiden vaiheet ja arvioidut valmistumisvuodet. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Projektin vaihe	Arvioitu valmistumisvuosi, 20XX									
	-17	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-25	-30	Ei arviota
6 Rakenteilla		7	4	8						3
5 Täysin luvitettu		1	8	21	12	1				26
4 Osayleiskaava tai STR tehty	1		2	3	11	1	2	1		26
3 Osayleiskaava ehdotus				5	2	2				3
3 YVA hyväksytty			1		2		3		2	2
2 Osayleiskaava luonnos										1
2 YVA käynnissä					2	1	2	1		1
1 Osayleiskaava käynnissä					4	1	2	1		6
0 Ehdotetut hankkeet / Toteutettavuus tutkittu			1		2		2	1		23

Muutama hanke on selvästi aikataulusta jäljessä taikka niiden tietoja ei ole päivitetty. Useista hankkeista puuttuu vuosiarvio.

### 3.1 Rakenteilla olevat hankkeet

Suomen Tuulivoimayhdistyksellä on kaksi tilastoa, jotka käsittelevät rakennettavia tuulivoimaprojekteja. Toinen on *Rakenteilla olevat hankkeet* ja toinen *STY:n hankelista - suunnittelussa olevat hankkeet*. Nämä on päivitetty helmikuussa 2020. Tilastojen tiedoissa on pieniä eroja hankkeiden välillä. *Rakenteilla olevat hankkeet* -tilastossa on useampia hankkeita ja niiden tiedot ovat kattavampia ja tarkempia, joten rakenteilla olevien hankkeiden tiedot otetaan siitä. Suomessa on 27 hanketta rakenteilla. Vain 7 hankkeista on voittanut tuotantotuen kilpailutuksen, muut rakennetaan ilman taloudellisia tukia. Hankkeiden arvioidut koot ovat alla taulukossa 3. Projektien yhteenlaskettu arvioitu tuulivoimaloiden määrä on 366 ja yhteenlaskettu teho on 1900 MW. Näistä 84 voimalaa saa tuotantotukea Suomen valtiolta. Voimaloiden määrä saattaa vielä muuttua, koska kaikkia investointipäätöksiä ei ole vielä tehty. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a) (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

*Rakenteilla olevat hankkeet* -tiedostosta rakenteilla olevat tuulivoimalat ovat jaoteltuina valtion tukea saaneisiin ja saamattomiin hankkeisiin. Näistä 5 hanketta valmistui vuonna 2019 ilman taloudellista tukea. Näissä oli yhteensä 56 voimalaa ja yhteenlaskettu teho oli 242.2 MW. Seuraavina vuosina valmistuvien tuulivoimaloiden tiedot on kerätty alle taulukoihin 3 ja 4. Hankkeet on järjestetty arvioidun valmistumisvuoden mukaan. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a)

**Taulukko 3:** Suomessa ilman taloudellista tukea rakenteilla olevat tuulivoimahankkeet.

(Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a)

Hankkeen nimi	Voimaloiden lkm	Teho (MW)	Valmis
Marttila, Verhonkulma	6	27	2020
Pyhäjoki, Paltusmäki	5	21.8	2020
Maalahti, Långmossan	7	30.1	2020
Maalahti, Ribäcken	5	23	2020
Saunamaa, Teuva ja Kurikka	8	33.6	2020
Suolakangas, Kauhajoki	9	37.8	2020
Kajaani ja Pyhäntä, Piiparinmäki	41	211.4	2020
Pyhäjoki, Oltava	19	91	2021
Uusikaarlepyy, Kröpuln	7	30.1	2021
Vöyri, Storbacken	7	30.1	2021
Pyhäjoki, Polusjärvi	10	56	2021
Karstula, Korkeakangas	9	43.2	2021
Vaala, Metsälamminkangas	24	132	2021
Pihtipudas, Ilosjoki	7	29.4	2021
Sievi, Jakoistenkallio	7	29.4	2021
Haapajärvi, Välikangas	24	100.8	2021
Teuva, Paskoonharju	21	117.6	2022
Kokkola, Kalajoki, Kannus, Mutkalampi	55	250	2022
Pyhäjoki, Karhunnevangas	32	192	2022
Hanke X (teho arvioitu 38 % kapasiteettikertoimella, lukumäärä laskettu 4,5 MW voimalalla)	11	52.6	-
<b>Yhteensä</b>	<b>314</b>	<b>1539</b>	

Taulukon 3 hanke X on Ruotsalaisen Bolidenin pitkäaikaisella sähkönhankintasopimuksella (PPA, Power Purchase Agreement) rakennettava tuulivoimalahanke, jossa Suomeen rakennetaan tuulipuisto, joka tuottaa 175 GWh Bolidenin sulattamolle. Projektin valmistumispäivämäärää taikka sijainti ei ole saatavilla. (RenewablesNow, 2019)

TuuliWatti rakensi vuoden 2019 syksynä 5 voimalan tuulipuiston lin Viinanmäelle. Projekti oli Suomen ensimmäinen tuulipuisto, joka rakennettiin ilman valtion tukea ja sähkömyynnin omakustannus hinta oli alle 30€/MWh. Puiston käyttämät Vestaksen V150-malliset voimalat ovat myös pohjoismaiden korkeimpia voimaloita, joiden

pyyhkäisykorkeus yltää 250 metriin. TuuliWatti rakensi myös Pohjoismaiden suurimman sähkövaraston tämän tuulipuiston yhteyteen, joka on kooltaan 6 MW. Varaston ansiosta sähkötehoa voidaan säätää nopeasti. (TuuliWatti, 2019) (ST1, 2019) Tämä projekti osoittaa tuulivoiman vahvaa kilpailukykyä ja viimeisintä tekniikkaa. Jää nähtäväksi kuinka kustannustehokkaaksi ratkaisuksi suuri akku osoittautuu pitkällä aikavälillä.

YLE kertoo artikkelissaan, että Google on ostanut kolmen rakennetun tuulipuiston tuotannon pitkäaikaisella sähkönostosopimuksella. Nämä hankkeet valmistuivat vuonna 2019 ja ne rakennettiin ilman taloudellisia tukia. Syinä hankinnalle on uusiutuvan sähkön hinnan kilpailukykyisyys pörssisähkölle. Google käyttää tuulipuistojen tuottaman sähkön Haminassa sijaitsevassa datakeskuksessaan. (YLE, 2018) Datakeskusten määrän kasvu lisää sähköntarvetta ja jos useammat firmat päättävät täyttää tämän sähköntarpeen tuulivoima PPA-sopimuksilla, niin se lisää tuulivoiman kysyntää ja hankkeiden määrää.

Rakenteilla olevista hankkeista 8 on arvioitu valmistuvan vuonna 2020, 13 vuonna 2021 ja 5 vuonna 2022. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a)

**Taulukko 4:** Suomessa valtion tukemat rakenteilla olevat tuulivoimahankkeet. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a)

Hankkeen nimi	Voimaloiden min lkm	Voimaloiden max lkm	Teho min (MW)	Teho max (MW)	Valmis
Liminka, Hirvineva	4	4	16,8	16,8	2020
Haapavesi, Hankilanneva	6	7	25,2	29,4	2021
Pyhäjoki, Parhalhti	8	10	33,6	42	2021
Kristiinankaupunki, Lakiakangas	15	23	63	96,6	2022
Närpiö, Kalax	17	21	71,4	88,2	2022
Siikalatva (Kestilä), Kokkoneva	7	7	29,4	29,4	2022
Simo Leipiö III (Sarvisuo)	27	27	113,4	113,4	2021
<b>Yhteensä</b>	<b>84</b>	<b>99</b>	<b>353</b>	<b>416</b>	



Hankkeista osan tuotanto on myyty suoraan ostajille pitkäaikaisilla sähkönhankintasopimuksilla. Rakenteilla olevien voimaloiden yhteenveto on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5:** Rakenteilla olevien tuulivoimahankkeiden yhteinen teho vuosittain. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a)

Markkinaehtoiset ja kilpailutuksesta tulevat hankkeet yhteensä		
Vuosi	Voimaloiden lkm	Teho (MW)
2020	85	431
2021	179	815
2022	149	738
<b>Yhteensä</b>	<b>413</b>	<b>1 957</b>

Taulukosta 5 nähdään, kuinka Suomen tuulivoiman tuotanto tulee todennäköisesti muuttumaan seuraavina vuosina. Osassa hankkeita tuulivoimaloiden lukumäärää taikka tehoa ei ole vielä vahvistettu, mikä aiheuttaa vaihtelua lopullisiin todellisiin arvoihin.

Tuulivoimahankkeet harvoin kariutuvat niiden päästyä rakennusvaiheeseen, niin voidaan olettaa, että kaikki rakenteilla olevat hankkeet toteutuvat. Valmistumisajankohdissa saattaa tosin tulla muutoksia.

### 3.2 Luvitetut hankkeet

Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan 70 tuulivoimahankkeelle löytyy täydet luvitukset. Nämä hankkeet on arvioitu valmistuvan muutaman vuoden sisällä, joten ne siirtyvät pian rakennusvaiheeseen. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b) Täysin luvitettujen hankkeiden tiedot on koottu taulukkoon 6.

**Taulukko 6:** Täysin luvitettujen hankkeiden minimi ja maksimi koot. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

<b>Vuosi</b>	<b>Voimaloiden min lkm</b>	<b>Voimaloiden max lkm</b>	<b>Teho min (MW)</b>	<b>Teho max (MW)</b>
2020	67	80	255	317
2021	230	282	1014	1299
2022	119	202	502	1133
2023	6	6	18	27
-	207	266	376	1012.3
<b>Yhteensä</b>	<b>629</b>	<b>836</b>	<b>2164</b>	<b>3789</b>

Useissa hankkeissa on epävarmuutta tuulipuiston tulevasta koosta. Useissa hankkeissa arvioitu minimi ja maksimi määrä turbiineille ja tehoille vaihtelee suuresti. Joissain minimiteho on ilmoitettu useita megawatteja pienempänä kuin maksimiteho ja joissain minimiteho on arvioitu nollassa. Tämän takia nämä arviot eivät ole täysin varmoja.

Vaikka tuulipuisto onkin luvitettu, jokin voi silti mennä pieleen. Hankkeiden onnistumistodennäköisyydet vaihtelevat, mutta yleisesti onnistumistodennäköisyydet ovat melko matalat. Ruotsalaisen tuulienergia assosiaation (Swedish Wind Energy Association) tilastoissa ruotsalaisille luvitetuille tuulivoimahankkeille onnistumistodennäköisyydeksi arvioidaan 30% perustuen nykyiseen ja tulevaan markkinatilanteeseen Ruotsissa. (Swedish Wind Energy Association, 2020). Ruotsissa on huomattavasti enemmän tuulivoimaa kuin Suomessa, mutta voitaisiin olettaa Suomalaisten tuulivoimahankkeiden onnistumistodennäköisyyksien olevan samaa luokkaa.

### **3.3 Luvituksessa olevat hankkeet**

Suomessa on useita hankkeita, jotka ovat vielä hakemassa luvitusta tai varhaisemmassa vaiheessa. Näiden toteutumisia on vaikea arvioida. Taulukkoon 7 on kerätty lähellä luvitusvaihetta olevien hankkeiden tiedot.

**Taulukko 7:** Hankkeet, joilla on SRT tai OYK valmiina. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

<b>Vuosi</b>	<b>Voimaloiden min lkm</b>	<b>Voimaloiden max lkm</b>	<b>Teho min (MW)</b>	<b>Teho max (MW)</b>
2017	6	6	25	30
2020	38	38	67	146
2021	37	47	160	232
2022	257	167	297	693
2023	9	9	36	45
2024	6	20	30	120
2025	0	18	0	108
-	301	543	239	2234
<b>Yhteensä</b>	<b>654</b>	<b>848</b>	<b>854</b>	<b>3608</b>

Useat näistä hankkeista ovat ilman arviota valmistumisvuodelle. Hankkeet voivat pian aloittaa tai ovat aloittaneet rakennus ja/tai ympäristö lupahakemukset. Hankkeet, jotka ovat tekemässä osayleiskaavaa tai vastaavaa (3-1) ovat taulukossa 8.

**Taulukko 8:** Osayleiskaavaa tai YVA tekevät ja aloittelevat hankkeet. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

<b>Vuosi</b>	<b>Voimaloiden min lkm</b>	<b>Voimaloiden max lkm</b>	<b>Teho min (MW)</b>	<b>Teho max (MW)</b>
2020	0	15	45	90
2021	61	115	479	748
2022	153	186	762	1342
2023	48	66	250	250
2024	250	271	1344	2155
2025	111	111	678	873
2030	110	120	420	1120
-	121	225	472	883
<b>Yhteensä</b>	<b>854</b>	<b>1109</b>	<b>4450</b>	<b>7461</b>

Luvitusprosessien kesto vaihtelee suuresti ja niiden aikana saattaa tulla useita ongelmia ja pitkittymiä. Vasta kaavoitusvaiheessa olevien hankkeiden onnistumistodennäköisyydet ovat matalat. Ruotsalaisen tuulivoima assosiaation tilastoissa tässä vaiheessa oleville hankkeille arvioidaan 15% onnistumistodennäköisyys (Swedish Wind Energy

Association, 2020). Suomalaisten hankkeiden oletetaan onnistuvan vastaavilla todennäköisyyksillä.

Suomen 211 tuulivoimahankkeesta 7 on merituulivoimahankkeita. Näistä pisimmällä olevat ovat saaneet osayleiskaavan tehtyä. Hankkeet ovat alla taulukossa 9.

**Taulukko 9:** Suomen merituulivoimahankkeiden tiedot. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

<b>MERITUULIVOIMHANKKEET SUOMESSA</b>				
<b>Vaihe</b>	<b>Hankkeen nimi</b>	<b>Teho (MW)</b>	<b>Voimaloiden lkm</b>	<b>Valmis</b>
4 Osayleiskaava tai STR tehty	Ii, Suurhiekan merituulipuisto	200	80	
4 Osayleiskaava tai STR tehty	Raahe, Maanahkiainen	175	36	
4 Osayleiskaava tai STR tehty	Tornio, Röyttä, Merituulivoimahanke Kiiri	35	14	
3 YVA hyväksytty	Inkoo / Raasepori	330	60	2030
3 YVA hyväksytty	Kristiinankaupunki, Siipyy	440	55	2030
0 Ehdotettu hanke / Toteutettavuus tutkittu	Pori, Tahkoluodon merituulipuiston laajennus	300	37.5	
0 Ehdotettu hanke / Toteutettavuus tutkittu	Raahe ja Pyhäjoki, Ulkonahkiainen	300	37.5	
	<b>Yhteensä</b>	<b>1780</b>	<b>320</b>	

Merituulivoimahankkeita ei ole useita, mutta ne ovat kokoluokaltaan suurempia kuin maatuulivoimahankkeet. Suuren kokonsa ja haastavuutensa takia ne eivät tule valmistumaan vielä lähiaikoina. Maatuulivoimaa on noin kolme kertaa enemmän suunnitteilla kuin merituulivoimaa.

### 3.4 Ehdotetut hankkeet

Suomen tuulivoimayhdistyksen tilastojen mukaan 29 hanketta ovat vasta ehdotettuina tai niiden toteutettavuutta on tutkittu. Näiden hankkeiden tiedot on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10:** Ehdotetut hankkeet. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Vuosi	Voimaloiden min lkm	Voimaloiden max lkm	Teho min (MW)	Teho max (MW)
2020	6	6	18	24
2021	0	0	0	0
2022	45	45	182	245
2023	0	0	0	0
2024	22	22	105	175
2025	25	8	125	200
-	134	313	552	1584
<b>Yhteensä</b>	<b>232</b>	<b>394</b>	<b>982</b>	<b>2228</b>

Rautalammen kuuden tuulivoimalan tuulipuisto on *hankkeet* tiedoston mukaan arvioitu valmistuvan vuonna 2020, mutta tämä on epätodennäköistä, jos projekti on tosiaan vasta aloittelemassa OSY laatimista. Hanketta alettiin työstämään jo vuonna 2014 (Rautalampilehti, 2014).

Tässä vaiheessa olevien hankkeiden onnistumistodennäköisyydet on arvioitu nollassi. Näinhän ei todellisuudessa ole, mutta tuotannon arvioinnin kannalta nämä hankkeet ovat liian alussa tullakseen otetuksi huomioon tuotannon arvioinnissa.

### 3.5 Hankkeiden vaikutus tuotantoon

Suomessa on meneillään useita tuulivoimahankkeita ja rakenteilla sekä täysin luvitetuilla hankkeilla on korkea todennäköisyys valmistua ajallaan. Aikaisemmin vuosittain asennettu kapasiteetti on illustroituna kuvassa 2. Vuonna 2019 suomessa oli 754 voimalaa ja niiden kumulatiivinen kapasiteetti oli 2284 MW.



**Kuva 2:** Asennetun tuulivoiman kumulatiivinen kapasiteetti megawatteina. (Lähde: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019b)

*Hankkeet* tiedoston tietojen perusteella vuosittainen kehitys olisi taulukon 11 mukaisilla määrillä.

**Taulukko 11:** Tuulivoimahankkeiden koot arvioituina valmistumisvuosina. (Muokattu: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Vuosi	Voimaloiden min lkm	Voimaloiden max lkm	Teho min (MW)	Teho max (MW)
2020	147	177	462	748
2021	465	574	2252	2971
2022	574	600	1742	3413
2023	63	81	304	322
2024	278	313	1479	2450
2025	136	158	803	1181
-	803	1386	1662	5919
<b>Yhteensä</b>	<b>2576</b>	<b>3409</b>	<b>9124</b>	<b>18123</b>

Ylempi taulukko on vain suora kooste *hankkeet* tiedoston datasta. Arvioissa ei ole otettu huomioon projektien onnistumistodennäköisyyksiä. Tehdään todennäköisempi arvio Suomen tuulivoiman kehittymiselle. Karsitaan huonodataisimmat hankkeet, täydennetään puuttuvia tietoja oletusarvoilla ja otetaan hankkeiden

onnistumistodennäköisyydet huomioon. Tarkastellaan neljää eri skenaariota, jotka ovat korkea, peruskorkea, perusmatala ja matala kehitys.

*Hankkeet* tiedostosta karsitaan hankkeet, joille toiminnanharjoittaja ei ole antanut arviota valmistumisvuodelle, jotka ovat vasta ehdotettu (0) vaiheessa sekä hankkeet, joista on riittämättömästi dataa, eli niistä ei ole ilmoitettu minimi tuulivoimala ja MW määrää. Hankkeille, joille ei ole ilmoitettu minimi tai maksimi MW määriä arvioidaan puuttuva minimi tai maksimi teho kertomalla annettujen voimaloiden minimi tai maksimi määrä oletustuulivoimalan teholla. Oletetaan oletustuulivoimalan kooksi 4 MW, koska rakenteilla olevien hankkeiden keskimääräinen voimalan teho on n. 4,3 MW, jolloin oletusarvo 4 MW on keskivertoa pienempi. Tämä jotta arvio olisi konservatiivisempi. Jos arvioitu puuttuva teho ylittää annetun maksimin tai alittaa annetun minimin, niin hankkeen minimi ja maksimitehot arvioidaan yhtä suuriksi.

Ruotsalaisen tuulienergia assosiaation *Tuulivoima tilastot ja ennusteet – kvartaali 4 2019* tiedostossa ennustetaan Ruotsin tulevien vuosien toteutuvaa tuulivoiman tuotantoa. Hankkeille on annettu onnistumistodennäköisyydet eri skenaarioiden mukaisesti. Nämä tiedot on esitetty taulukossa 12. Arviot perustuvat Ruotsin nykyiseen ja tulevaan markkinatilanteeseen, mutta voitaisiin olettaa Suomessa olevilla hankkeilla olevan suunnilleen samanlaiset onnistumistodennäköisyydet.

**Taulukko 12:** Hankkeiden toteutumistodennäköisyydet eri vaiheille ja skenaarioille. (Muokattu lähteestä: Swedish Wind Energy Association, 2020)

<b>Vaihe</b>	<b>Matala</b>	<b>Perus</b>	<b>Korkea</b>
(6) Rakenteilla	95%	100%	100%
(5) Täysin luvitettu	0%	30%	60%
(4-1) Luvitusvaiheessa	0%	15%	30%

Edellä esitettyjen kriteerien perusteella *hankkeet* tiedostosta muokataan neljä skenaariota tuulivoiman kehitykselle Suomessa. Matala-skenaariossa hankkeiden onnistumistodennäköisyys on oletettu huonoiksi. Hankkeiden tiedoista käytetään pienimpiä arvoja tehoille ja voimaloiden määrille. Perusmatala-skenaariossa oletetaan

hankkeiden onnistuvan tämänhetkisten tuulivoimamarkkinoiden mukaisesti, eli perusonnistuminen, mutta hankkeista käytetään pienimpiä arvoja. Peruskorkea-skenaariossa käytetään perusonnistumistodennäköisyyksiä ja hankkeiden korkeimpia arvoja. Korkea-skenaariossa oletetaan hankkeille tuplasti korkeammat onnistumistodennäköisyydet perusprosentteihin verrattuna ja käytetään hankkeiden korkeimpia arvoja. Muokkauksen perusteella arvioidut vuosittaiset muutokset tuulivoimaloiden määriin on esitetty taulukossa 13 ja vuosittaiset muutokset kapasiteettiin on esitetty taulukossa 14.

**Taulukko 13:** Arvioitu vuosittainen tuulivoimaloiden määrän muutos eri skenaarioilla.

(Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Vuosi	Vuosittainen tuulivoimaloiden määrän kasvu (lkm)			
	Matala	Perusmatala	Peruskorkea	Korkea
2020	34	63	68	97
2021	124	220	227	324
2022	0	69	98	196
2023	0	10	11	22
2024	0	38	44	87
2025	0	17	19	39

**Taulukko 14:** Arvioitu vuosittainen asennetun kapasiteetin muutos eri skenaarioilla. (Muokattu

lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Vuosi	Vuosittainen kapasiteetin kasvu (MW)			
	Matala	Perusmatala	Peruskorkea	Korkea
2020	142	255	301	432
2021	598	1029	1199	1736
2022	0	318	586	1172
2023	0	48	60	120
2024	0	206	341	683
2025	0	102	147	294

Muutetaan arvioidut vuosittaiset kehitykset kumulatiivisiksi arvoiksi jokaiselle vuodelle. Tämä on siis joka vuoden arvo lisättyä edellisvuoteen. Tulokset esitetty taulukoissa 15 ja 16.



**Taulukko 15:** Arvioitu tuulivoimaloiden kumulatiivinen lukumäärä eri skenaarioilla. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Vuosi	Kumulatiivinen tuulivoimaloiden määrä (lkm)			
	Matala	Perusmatala	Peruskorkea	Korkea
2020	788	817	822	851
2021	912	1037	1049	1176
2022	912	1106	1147	1371
2023	912	1116	1157	1393
2024	912	1154	1201	1480
2025	912	1171	1220	1519

**Taulukko 16:** Arvioitu kumulatiivinen kapasiteetti eri skenaarioilla. (Muokattu lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Vuosi	Asennettu kumulatiivinen kapasiteetti (MW)			
	Matala	Perusmatala	Peruskorkea	Korkea
2020	2426	2539	2585	2716
2021	3024	3567	3784	4451
2022	3024	3885	4370	5623
2023	3024	3933	4430	5743
2024	3024	4139	4771	6425
2025	3024	4241	4918	6719

Itse tuotanto ei tule suoraan kumulatiivisesta kapasiteetista, mutta ne korreloituvat vahvasti. Verrattaessa viiden aikaisemman vuoden tuotantoja ja kapasiteetteja saadaan arvio tuotetun energian ja asennetun kumulatiivisen kapasiteetin välille. Arviot on esitetty taulukossa 17. Suhteeseen vaikuttaa voimakkaasti vuosittainen tuulisuus.

**Taulukko 17:** Tuulivoiman tuotannon ja asennetun kapasiteetin suhde. (Muokattu lähteestä: Energia, 2018)

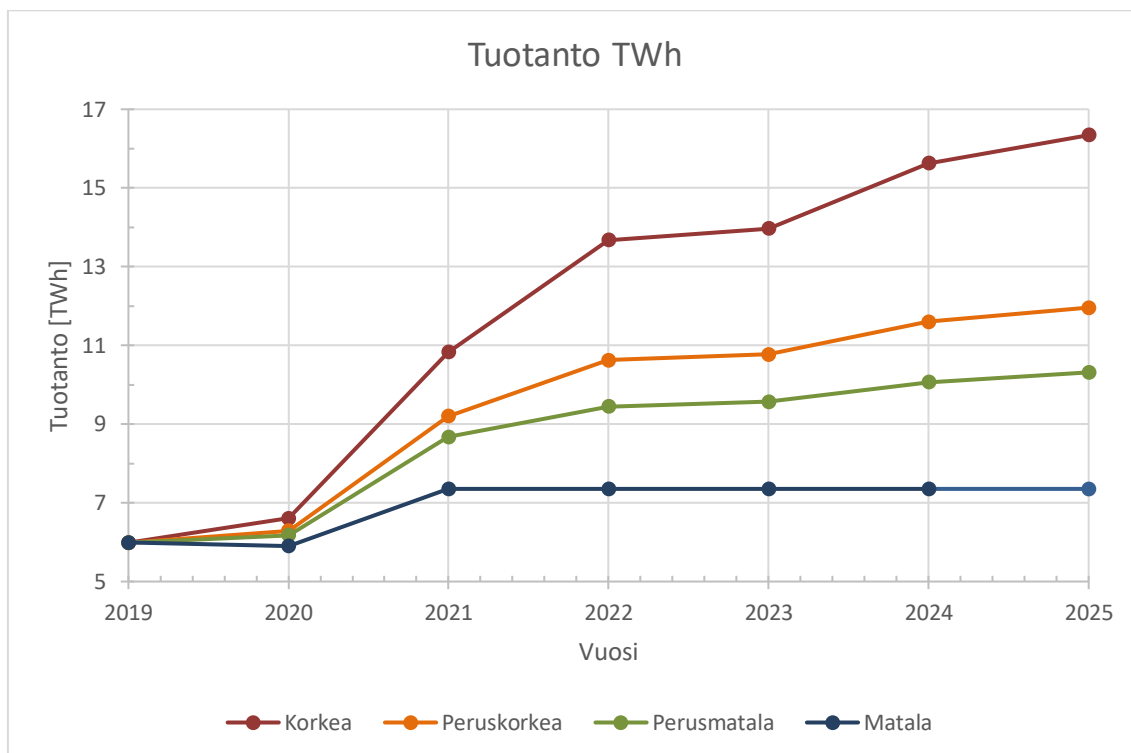
Vuosi	Tuulivoimaloiden kumulatiivinen määrä (lkm)	Tuulivoimaloiden kumulatiivinen kapasiteetti (MW)	Tuulivoiman tuotanto (TWh)	Tuotetun energian suhde asennettuun kapasiteettiin
2015	387	1005	2.3	2.3
2016	552	1533	3.1	2.0
2017	700	2044	4.8	2.3
2018	698	2041	5.9	2.9
2019	754	2284	6.0	2.6
			<b>Keskiarvo</b>	2.4

Kapasiteetin ja tuotannon välinen suhde vaihtelee voimakkaasti vuosittain. Tämä vaikeuttaa tulevan tuotannon arviointia. Jos oletamme tuulivoiman tuottavan 2.4 MWh asennettua MW kohden, voimme arvioida karkeasti seuraavien vuosien tuotantoa. Arviot vuosittaisista tuotannoista on koottu taulukkoon 18.

**Taulukko 18:** Arvioidut vuosittaiset tuotannot eri skenaarioilla.

Vuosi	Matala (TWh)	Perusmatala (TWh)	Peruskorkea (TWh)	Korkea (TWh)
2019	6	6	6	6
2020	5,9	6,2	6,3	6,6
2021	7,4	8,7	9,2	10,8
2022	7,4	9,4	10,6	13,7
2023	7,4	9,6	10,8	14,0
2024	7,4	10,1	11,6	15,6
2025	7,4	10,3	12,0	16,3

Tämä on kuitenkin vain hyvin karkea arvio, sillä tuotanto vaihtelee vuoden tuulisuuden, huoltojen yms. mukaan. Hankkeiden valmistumisajankohdan sijoittuminen eri kohtiin vuotta vaikuttaa niiden sen vuotiseen tuotantoon. Arviot perustuvat muutamiin oletuksiin, ja ne eivät vastaa täysin todellisia arvoja. Tuotannon kehittymisen arviot eri skenaarioilla on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3:** Tuulivoiman tuotannon vuosittainen arvio eri skenaarioilla. (Data lähteestä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b)

Tuotannon arvioiden varmuus laskee huomattavasti pidemmällä aikavälillä. Vuoden 2020 tuotannon kasvu on arvioitu pieneksi edelliseen vuoteen verrattuna. Vuosien tuulisuus tulee olemaan suurin vaikuttaja todellisiin tuotantoarvoihin. Vuoden 2018 kaltaisilla tuulisuuksilla tuotanto ylittäisi 7 TWh perusmatalassa skenaariossa.

Vuodesta 2022 eteenpäin tuotannon kasvu tulee oletettavasti kasvamaan entisestään uusien tuulivoimahankkeiden myötä. Hankkeiden toteutumisnopeus vaikuttaa siihen, milloin tuotanto kasvaa.

## 4 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Kuten aiemmissa kappaleissa huomattiin, Suomessa on 211 hanketta suunnitteilla. Tässä työssä tehty arvio tuotannon kasvulle osoittaa tuulivoiman olevan kasvussa. Tuulivoimalla on useita ympäristövaikutuksia ja tuulivoiman tuotanto vaikuttaa myös muuhun energian tuotantoon. Useat tekijät vaikuttavat tuulivoiman yleistymiseen ja sen tuotannon kasvuun. Tarkastellaan tuulivoiman kehitykseen vaikuttavia tekijöitä.

Energian tuotannon kehittymistä pyritään ennustamaan erilaisilla energiaskenaarioilla. Energiaskenaariot pohjautuvat valtiollisiin visioihin. Suomen energiaskenaarioissa ennustetaan tuulivoiman kasvavan. Työ- ja elinkeinoministeriön vuonna 2014 teettämässä *Energia- ja ilmastotiekartta 2050*:ssä tuulivoiman tuotannon tavoite vuodelle 2020 on 6TWh ja vuodelle 2025 9 TWh. Merkittäväksi tekijäksi mainitaan merituulivoiman rakentaminen. Raportissa tuulivoiman merkittävän lisäämisen aikaansaamiseksi arvioidaan vaativan eri hallinnollisten lupaprosessien parantamista. Uusiutuvan energian nelikenttäanalyysissä tuulivoiman heikkoudeksi mainitaan suuri tuen tarve, ja että tuulivoiman lisäämisessä ei onnistuta, mikäli tuulivoimaloista aiheutuvia haittoja ei oteta riittävästi huomioon ja minimoida tehokkaasti. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2014, s. 34-35) Raportti on muutaman vuoden takaa, ja nykyään tuulivoima on tarpeeksi kustannustehokasta, että sitä rakennetaan ilman tukia, kuten rakenteilla olevista projekteista näkee. Vuoden 2020 tavoite tullaan todennäköisesti saavuttamaan, kuten myös vuoden 2025.

Toinen Suomalainen energiaskenaario on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n tuottama *Low Carbon Finland* -raportti. Sen mukaan tuulivoiman tuotanto voisi olla 7-29 TWh/a vuonna 2050. Tuulisähkön optimistiseksi hinta-arvioksi on annettu 60€/MWh vuodelle 2020. (VTT, 2012, s. 42-43) Esimerkiksi vuonna 2019 Viinamäkeen rakentuneet voimalat tuottavat sähköä jopa 30€/MWh hinnoin (ST1, 2019). Jos tuulivoiman tuotanto vastaa perusmatalaa arviota ja sitä interpoloidaan vuoteen 2050, niin energian tuotanto saattaa ylittää tuon 29 TWh/a. Mainitut energiaskenaariot ovat aliarvioineet tuulivoiman kehityksen nopeuden.

Kasvava tuulivoiman tuotanto vaatii vaihtelevan tuotantonsa vuoksi rinnalleen säätövoimaa, jotta sähköverkon tehotasapaino säilyy. Tutkimuksessa *Higher renewable*

*energy integration into the existing energy system of Finland – Is there any maximum limit?* tarkasteltiin, kuinka paljon Suomeen voitaisiin lisätä uusiutuvaa energiaa. Tutkimuksen tuloksena oli, että tuulivoiman tuotanto voisi kattaa 18-19% Suomen vuosittaisesta tehon tarpeesta ilman, että tarvittaisiin suuria parannuksia energiainfrastruktuurin joustavuuteen. Tämä vastaisi 16 TWh/a. Arvio pohjautuu vuoden 2012 arvoihin ja 85 TWh/a kuormitukseen. (Behnam et al., 2015) Tutkimus on 5 vuotta vanha, joten tuo tuotannon raja-arvio saattaa olla muuttunut. Jos tuulivoiman tuotannon kehitys seuraisi korkeaa skenaariota, niin tämä raja saavutettaisiin jo vuonna 2024. Todennäköisemmin tuo 16 TWh saavutetaan suunnilleen vuonna 2030. Suurempi tuulivoiman määrä vaatisi kulutuksen energiatehokkuuden kasvattamista, ja joustavuutta energiantuotannon ja kulutuksen välillä. Tämä jousto voitaisiin saavuttaa energiavarastoilla.

Kirjassa *Handbook of Energy Storage* käsitellään eri energian varastointi menetelmiä. Energian varastointi voidaan jakaa lyhyen- ja pitkäaikavälin varastoihin. Hetkellisen säätövoiman kannalta lyhyenaikavälin varastot auttaisivat ylläpitämään tehotasapainoa. Mahdollisia teknologioita tälle ovat akut, tuntuvan lämmön varastot, pumppuvoimalaitokset ja CAES (Compressed-air energy storage). Pitkäaikavälin varastoilla energiaa voidaan varastoida päivistä jopa vuosiin ja tämä voitaisiin toteuttaa tuntuvan lämmön varastoilla, pumppuvoimalaitoksilla, CAES ja PtX (Power to X) tekniikoilla. (Sterner M., Stadler I., 2019. S.43-44) Varsinkin PtX mahdollistaisi tuulivoiman pitkäaikaisen varastoinnin. Tämä toimisi joko elektrolyysin tai metanaation kautta. Näin saataisiin polttoaineita, joita voitaisiin hyödyntää liikenne sektorilla. Useat energian varastointi menetelmät ovat teknologisesti kypsiä ja niiden yleistymistä edistäisi hintojen lasku (Sterner M., Stadler I., 2019. S.669). Energian varastointi mahdollistaisi tuulivoimankasvun yli tuosta aikaisemmin arvioidusta 18-19% osuudesta sähköntuotannossa. Tämä kuitenkin vaatii kustannustehokkaita ratkaisuja.

Toinen tapa lisätä säätövoimaa on älykkäillä sähköverkoilla. Näissä kuluttajat voivat osallistuvat aktiivisesti tehotasapainon ylläpitoon automaation avulla. Älykkäät sähkömittarit ja kaksisuuntainen tehonsiirto mahdollistavat kotitalouksien laitteiden osallistumisen kulutuksen säätöön, ja mahdollisten akkujen osallistumisen sähkön varastointiin ylituotannon aikana. Esimerkiksi sähköautojen lataus voidaan ohjata

vähäisen kulutuksen ajalle, mikä tasoittaa sähkön kulutuskäyrää. (Dileep G., 2019. S. 2589-2592, 2599) Tämä vaatisi sähköverkon päivityksiä, mutta se mahdollistaisi tuulivoiman ja muiden vaihtelevien uusiutuvan energian tuotannon lisäämisen.

Tuulivoima sisältää myös epäsuoria kustannuksia. Nämä ilmenevät hetkellisen vaihtelun, epävarmuuden ja sijainnin kautta. Vaihtelun vuoksi tuulivoimaa vaatii tuekseen säätö- ja huippuvoimaa, se vähentää peruskuorman käyttötunteja ja aiheuttaa aikoinaan ylituotantoa. Tuotannon vaihtelevuus tekee tuotannon tarkasta ennustamisesta vaikeaa, mikä vaikeuttaa sähköpörssin toimintaa ja voimaloiden ajamisen kaavailua. Tuulivoimalan ja kulutuksen välisen sijainnin takia sähköä saatetaan joutua kuljettamaan pitkiä matkoja, ja liittynät vaativat uutta verkkoa. Nämä tekijät aiheuttavat epäsuoria kustannuksia. (Hirth et. al. 2015, s. 926, 929) Epäsuorat kustannukset kasvavat vaihtelevan uusiutuvan energian osuuden mukaan. Suurilla määrillä ne voivat olla 60 €/MWh kun tuulivoiman osuus sähköntuotannossa on 40% (Ueckerdt et. al. 2013. s. 72). Suomessa tämän määrä on tosin vielä vähäistä, mutta sen osuus kasvaa tuulivoiman tuotannon lisääntyessä.

Osa rakenteilla olevista tuulivoimahankkeista saa tukea energiavirastolta preemiojärjestelmän kautta. Vuonna 2018 järjestettiin teknologianeutraali uusiutuvan energian tarjouskilpailu, jonka voittaneet hankkeet saavat preemion mukaista tukea 12 vuoden ajan. Hyväksytyjen tarjousten keskihinta oli 2,5€/MWh. (Energiavirasto, 2019) Tuulivoiman tuotannon kehittymistä voitaisiin tukea järjestämällä uusi kilpailutus, mutta tämä ei vaikuta tarpeelliselle. Maatuulivoima on tarpeeksi kustannustehokasta pärjätäkseen ilman tukia. Mahdolliset tuet kannattaisi pikemminkin kohdistaa merituulivoiman edistämiseen taikka energian varastointiin.

## **4.1 Mahdollisuuksia**

Uusia hankkeita varten löytyy hyvin tuulidataa tuuliatlaksesta. Tämä helpottaa uusien hankkeiden sijoittelua ja tuotannon arviointia. Voimalatekniikan kehittyessä ja voimaloiden korkeuden kasvaessa tuulipuistojen sijoitusmahdollisuudet laajenevat. Korkeammat voimalat tuottavat korkeutensa ansiosta riittävästi energiaa aikaisemmin liian vähätuulisilla alueilla. MAKE konsultointi firman raportin mukaan maailmalla

asennettujen tuulivoimaloiden napakorkeudet ovat kasvaneet ja voimaloiden keskimääräinen teho on kasvanut vuosittain noin 3%. Vuonna 2020 tuulivoimaloiden keskiarvo koon arvioidaan olevan 2,4 MW. Suurin osa tilauksessa olevista voimaloista ovat 5 MW ja osa jo 8 MW kokoluokkaa. Raportin mukaan 12 MW voimaloita saattaisi tulla markkinoille viiden vuoden sisällä. (Greentechmedia, 2017) Tuulivoimaloiden teho skaalautuu vahvasti pyyhkäisyypinta-alan ja napakorkeuden mukaan, minkä takia isommat voimalat ovat pienempiä voimaloita kustannustehokkaampia.

Tuulivoimalat voisivat kehittyä entisestään uusilla materiaaleilla ja tekniikoilla. Tuulivoimaloiden valmistuksessa käytetään mm. terästä, kuparia, komposiitteja, silikonia, betonia ja vahvoja magneetteja. Lapojen valmistuksessa käytetään mm. lasikuitua, hiilikuitua, puulaminaattia, polyesteri resiinejä ja epokseja. Näistä lasikuitumuovi on yleisimmin käytetty. (Manwell, 2009. s. 266-270.) Uudet vahvemmat ja kustannustehokkaat materiaalit mahdollistaisivat suurempien lapojen kannattavan tuotannon. Esim. hiilikuidun massatuotanto voisi mahdollistuu seuraavan sukupolven lapojen tuotannon.

Kehitys on tuonut mukanaan myös uudentlaisia voimaloita kuten ilmassa olevat voimalat. Näitä ovat mm. leijavoimalat ja jäykkäsiipiset voimalat. Niiden toimintaperiaate perustuu myötä- tai ristituulen hyödyntämiseen. Leijavoimalassa kaksi leijaa lentää vuorotellen kauemmas myötätuulen mukana ja liitvät sitten takaisin niissä olevan miehittämättömän ilma-aluksen ohjaamina. Tämä aikaansaa pumppaavan liikkeen, joka pyörittää kaapelien päässä olevaa generaattoria. Kiinteäsiipisessä voimalassa miehittämätön ilma-alus on kiinnitettynä kaapelin kautta maahan. Tämä lennokki lentää ristituulella ympyrän muotoista rataa, joka muistuttaa tuulivoimalan siiven kärjen kulkemaa rataa. Lennokissa olevat roottorit pyörittävät generaattoreita tuottaen sähköä. Sähkö siirretään kaapelia pitkin maahan. Nämä teknologiat ovat kuitenkin vasta kehitysvaiheilla ja muutamat ovat prototyypivaiheessa. Niillä olisi muutamia etuja klassisiin tuulivoimaloihin verrattuna. Ne ovat helpompia pystyttää, vähäisemmän tukirakenteiden tarpeen takia halvempia, voimaloiden kapasiteettikerroin on suurempi, tuotannon vaihtelevuus vähäisempää, ja voimaloiden toimintakorkeus voi olla korkeampi. Leijavoimaloita voitaisiin käyttää myös merellä, mikä laajentaa niiden sijoitusmahdollisuuksia. Näillä voimaloilla on muutamia haittapuolia kuten vajerin katkeaminen, leijan karkaaminen ja ilmailumääräykset.

(Schmehl 2018, S.2-12, 117-118) Näillä tekniikoilla on potentiaali, jota voitaisiin tutkia tarkemmin ja ehkä soveltaa Suomen oloissa.

Kehityksen toisessa suunnassa on pientuuli. Pienet alle 50 kW voimalat sopivat yksityishenkilöille, mutta pienen kokonsa takia ne eivät pääse suurille tuulenopeuksille. Tämän takia niiden tuotto jää vähäiseksi investointiin nähden. Niillä on kuitenkin olla käyttöä haja-asutulla seudulla julkisensähköverkon ulkopuolisissa sovelluksissa, missä niillä voidaan tuottaa esim. osa kesämökin sähköstä.

Tekniikan kehittyminen ja kustannusten lasku saattaa lisätä merituulivoiman yleisyyttä. Merituulivoimalla on useita etuja kuten laajemmat mahdolliset sijoitusalueet, kaupunkien ja kulutuksien läheisyys, mahdollisuus rakentaa suurempia voimaloita ja tuulipuistoja, merellä vallitsevat suuremmat tuulenopeudet, pienemmät turbulenssit ja tuuliväänteet. Haittapuolina on suurempi projektihinta erikoistuneiden laitteistojen tarpeen takia, haastavat työskentelyolosuhteet, voimaloiden kallis asennusprosessi, haasteellinen kunnossapito, ja tarve korroosion estolle. (Manwell, 2009. s. 461-462.) Suomessa oli vuoden 2019 lopussa 3 merituulipuistoa, joiden kumulatiivinen kapasiteetti oli 70,7 MW (WindEurope, 2020. s. 11). Vuonna 2010 rakennettiin pilottivoimala kartoittamaan haastavien olosuhteiden tarvetta. Suomessa on vuodesta 2017 asti toiminnassa ollut haastaviin jääolosuhteisiin rakennettu merituulivoimala (Hyötytuuli, 2019). Merituulivoimalalla on potentiaalia, mutta myös muutamia haasteita.

## **4.2 Haasteita**

Merituulivoiman haasteina ovat luonnonsuojelu, jätehuolto, saasteet, työympäristö ja paalutusäänet. Näihin haasteisiin varaudutaan hyvin. Luvitusvaiheessa tehdään laajat suunnitelmat, mistä voidaan todeta luonnon vahingoittumattomuus koko tuulivoimalan elinkaaren aikana. Projektien aikana pidetään kirjaa syntyneistä jätteistä ja niiden kuljettamisesta jätehuoltamolle. Merituulivoimaloiden perustuksia paaluttaessa syntyy kovaa ääntä. Merituulivoimalan perustuksena toimivat paalut lyödään merenpohjaan valtavalla hydraulisella vasaralla, mistä saattaa koitua 200dB ääni veden alle. Tämä saattaa vahingoittaa paikallista merieläimistöä. Tämän takia merieläimet häädetään alueelta pingerien avulla, jotka pitävät meteliä veden alla. Säädöksissä on määrätty, että



enintään 160dB saa kuulua vedessä 750 metrin päässä paalutuksesta. Paaluttamisen ääniä redusoidaan useilla tavoilla. (Thomsen, 2012. s. 277-289) Merituulivoimaprojektien haasteet ovat tiedossa ja niitä pyritään hallitsemaan parhaan mukaan.

Suomen kylmät talvet tuovat haasteita maa- ja merituulivoimaloille. Talvisin varsinkin merellä ja merenrannoilla on jäätävät oltavat. Suomen Tuuliatlaksesta löytyy jäätämisesatlas, jossa on mallinnettu Suomen jäätämisolosuhteita. Atlaksesta voi nähdä jäätämisen määrän ja sen vaikutuksen voimalan tuotantoon. (Tuuliatlas, 2011) Kylmät olosuhteet aiheuttavat sensorien ja rakenteiden jäätymistä. Alhaisilla lämpötiloilla materiaalien ominaisuudet muuttuvat tehden niistä hauraampia ja esim. tiivisteet saattavat vuotaa. Jääta saattaa muodostua lavoille iljanteena tai huurteen muodossa, mikä huonontaa lapojen aerodynaamista suorituskykyä, aiheuttaa epätasapainoa, ja mahdollisesti putoavaa jääta. Tämän takia useisiin tuulivoimaloihin on saatavilla lämmittimiä tai erikoismateriaaleja, joilla estetään kylmyyden negatiivisia vaikutuksia. Kylmät olosuhteet tekevät voimaloiden asennuksesta ja huoltamisesta hankalampaa. (Manwell, 2009. s. 479.)

Tuulivoimasta aiheutuu kuolemia lintu- ja lepakkokantoihin. Euroopassa keskimääräisen kuolleisuuden on arvioitu olevan 5-10 lintua vuodessa voimalaa kohti. Tuulivoimalan lapoihin törmäyksille altteimpia ovat lintulajit, jotka lentävät kaartelevasti, ovat suurikokoisia, ja lajit, joilla on pienet siivet suhteessa ruumiinkokoon. Tuulivoiman aiheuttamat lintukuolemat aiheutuvat suoranaisesti, kun taas fossiilisten polttoaineiden vaikutukset tulevat epäsuorasti elinympäristöjen tuhoutumisesta ja ilmaston lämpenemisestä. Tuulivoima aiheuttaa myös epäsuoria haittoja lintukannalle, kuten sopivien pesimä-, ruokailu- ja elinalueiden vähenemistä. Häirintävaikutukset vaihtelevat lajien välillä ja häirintävaikutukset yltävät useimmiten alle 100-200 metrin päähän voimalasta. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017a. s. 11, 15, 19, 22-23, 46)

Tuulivoimalat lisäävät lepakoiden kuolleisuutta suoran lapatörmäyksen lisäksi barotrauman muodossa. Barotrauma aiheutuu voimalan lapojen liikkeen tuottamasta nopeasta paineen muutoksesta, joka aiheuttaa lepakoissa keuhkovaurioita. Barotrauman osuudesta kokonaiskuolleisuuteen ei ole tarkkaa arviota. Vuoden 2017 yhteenvedon mukaan tuulivoimalakohtaisen lepakko kuolleisuuden keskiarvoksi arvioitiin noin 10-15

lepakkoa vuodessa. Suomen lepakkotörmäyksistä on vähäisesti dataa, mutta havaintojen perusteella törmäykset vaikuttavat harvinaisille. Pitkän iän ja hitaan lisääntymisen vuoksi lepakoiden törmäyskuolemat voivat uhata lepakkopopulaatioita. Suurimman törmäysriskin ajankohdat ovat kuitenkin hyvin ennustettavissa, mikä mahdollistaa voimaloiden ajoittaisen pysäyttämisen kuolleisuuden vähentämiseksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017a. s. 33-35, 39-40, 42)

Tuulivoimaloista linnuille ja lepakoille aiheutuvia haittoja voidaan minimoida sijoittamalla tuulipuistot ihmistoiminnan valmiiksi muokkaamille alueille, pois tunnettujen lintujen muuttoreittien varrelta, välttämällä korkeiden lintutiheyksien alueita, siirtämällä paikalliset linnunpesät kauemmas puiston alueelta, ja pysäyttämällä voimat hetkellisesti törmäysriskien ajaksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017a. s.14, 18, 45) (Manwell, 2009. s. 552) Tuulivoiman lisäämisen ei ole arvioitu uhkaavan lintu- tai lepakkopopulaatioiden pysymistä elinvoimaisina. Tarvetta olisi populaatiovaikutusten jatkotutkimuksille; varsinkin lepakkojen suhteen. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017a. s.47-48)

Tuulivoimaloiden käyttöikä on noin 25 vuotta, jonka jälkeen voimala puretaan. Suomessa on 1999-2018 välillä purettu 61 voimalaa (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019a). Voimaloiden purkaminen vähentää asennettua kumulatiivista kapasiteettia. Vuosittainen purettujen voimaloiden määrä on suunnilleen yhtä suuri kuin 25 vuotta sitten asennettujen voimaloiden määrä. Tämä tarkoittaa noin 10 MW purkua vuodelle 2020. Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan purettujen voimaloiden paikoille voidaan pystyttää uudet voimat, jolloin voidaan hyödyntää aikaisemmin rakennettua infrastruktuuria. Tämä kuitenkin vaatii uutta lupahakemusta ja uusia perustuksia. Vanhat perustukset voidaan poistaa taikka maisemoida. Tuulivoimalasta suurin osa voidaan kierrättää, mutta lavat ovat vaikeasti uudelleen hyödynnettävää kuitulujitettua muovia. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019d) Suomessa on Conenor yritys, joka on kehittänyt menetelmiä kuitulujitetun muovin uusiokäytölle (Conenor, 2017). Tämä ei ollut aikaisemmin mahdollista, jolloin yleisin tapa lapojen jälkikäsittelylle oli viedä ne jätteenkäsittelylaitokselle loppusijoitusta varten. Käytetyt tuulivoimat voidaan kierrättämisen sijaan myydä jälkimarkkinoilla.

Tuulivoimalat vaikuttavat ympäristöönsä tuottamalla ääntä ja välkettä. Nämä saattavat häiritä voimaloiden lähiasukkaita. Voimalasta syntyvän äänen voimakkuus ja taajuus vaihtelevat tuulipuiston voimaloiden lukumäärän, niiden etäisyyden ja tuulen nopeuden mukaan. Tuulivoimaloiden sijoittelussa otetaan huomioon, että lähiasutuksen sisä- ja ulkomelu pysyvät sallituissa rajoissa. (Ympäristöministeriö, 2016b. s. 76-78)

Toinen mahdollinen häiriötekijä on infra-ääni. Tuulivoima-kansalaisyhdistyksen tuulivoimaa kohtaan kriittisen raportin mukaan tuulivoimaloiden aiheuttama infraääni aikaansaa useita terveyshaittoja. Yleisempiä ovat unihäiriöt, mutta vakavampiakin oireita esitetään. (Tuulivoima-kansalaisyhdistys, 2015. s. 12-17) Työ- ja elinkeinoministeriön raportin mukaan infra-ääni ei kuitenkaan ole merkityksellistä ja sillä ei ole havaittu olevan vaikutusta terveyteen. Ennako-odotusten on todettu vaikuttavan voimakkaasti sekä tuulivoimasta aiheutuvan häiritsevyyden että oireilun kokemukseen. Aiheesta tehtyjen tutkimusten määrä on kuitenkin vähäinen. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017b, 129) Suurin osa tutkimuksista ei ole löytänyt yhteyttä infra-äänen ja terveysvaikutusten välille. Tuulivoimalle ominaisen melun ja infraäänen pitkäaikaisten vaikutusten tutkimukselle on raporttien perusteella tarvetta. Juuri julkaistun valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan hankkeessa tarkasteltiin tuulivoimalle ominaisen infraäänen vaikutuksia pitkäaikaismittauksilla, kyselytutkimuksilla sekä kuuntelukokeilla. Hankkeessa ei havaittu yhteyttä tuulivoiman infraäänen ja oireilun välille. (Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, 2020. s.3-8)

Voimalan lapojen liike voi aiheuttaa jopa 3 kilometrin pituisia varjoja. Varjojen liike aiheuttaa välkettä, jota on havaittavissa aurinkoisina päivinä ja tiettyinä aikoina vuorokaudesta. Tuulivoimalaa suunnitellessa välkyntä mallinnetaan laskennallisesti. Suomessa ei ole määritelty suosituksia välkevaikutukselle, mutta arvioinneissa käytetään apuna muiden maiden suosituksia. Voimalat voidaan pysäyttää pahimman välkyntän ajaksi. (Ympäristöministeriö, 2016. s. 82-84)

Tuulivoimalat häiritsevät ilmavalvonnan tutkajärjestelmiä varjostamisella ja ei-toivotuilla heijastuksilla, joiden takia voimala voi varjostaa varsinaisia tutkamaaleja ja näkyä itse tutkassa. Suomessa on tutkakompensaatioalue Perämerellä. Tällä alueella puolustusvoimien valvontajärjestelmää on kehitetty teknillisillä tai muilla ratkaisuilla

siten, ettei tuulivoimaloiden rakentaminen alueelle edellytä erillisiä tutkavaikutus selvityksiä. (Ympäristöministeriö, 2016b. s. 96-97). Alueelle rakennettavista voimaloista tulee maksaa tuulivoimamaksu, joka on 50 000€ (L. 28.6.2013/490). Muilla alueilla tuulivoimahanke vaatii tutkavaikutusten selvityksen ja puolustusvoimien hyväksynnän rakentamiselle. Varsinkin Itä-Suomen tuulivoimahankkeet saavat harvoin hyväksynnän puolustusvoimilta. Jos tutkakompensaatio alueita olisi enemmän, niin useampi tuulivoimahanke voisi toteutua. Tuulivoiman kustannustehokkuus tekee mahdollisista tuulivoimamaksuista investoinnin kannalta kannattavia.

Tuulivoimalat ovat suuria ja ne näkyvät kauas, ja niiden lisäksi alueelle rakennetaan sähkönsiirtorakenteita ja tieyhteyksiä. Nämä elementit muokkaavat alueen maisemakuvaa. Maisemanmuokkaus on suurempaa koskemattomilla luonnonalueilla kuin jo teollisia elementtejä sisältävillä alueilla. Luonnonaluille rakentaminen saattaa luoda suuren kontrastin maiseman luonteeseen. Maakuntakaavassa selvitetään maisema- ja kulttuuriympäristöt huomioiden tuulivoima-alueiden sijoittamiseen soveltuvat alueet. Maisemavaikutuksia voidaan havainnollistaa virtuaalimalleilla, teemakartoilla ja poikkileikkauksilla. (Ympäristöministeriö, 2016a. s. 3, 14, 16, 24, 40, 43) Maisemakuvan muuttuminen voidaan kokea negatiivisena tai jopa positiivisena. Suhtautuminen on subjektiivista ja siihen vaikuttaa asenne tuulivoimaa kohtaan ja maisemanmuokkauksen laajuus. Tuulivoimalat saattavat vähentää turismia, jos ne sijoitetaan alueilla, joilla koskematon luonnonmukainen maisema on tärkeä kävijämäärien kannalta.

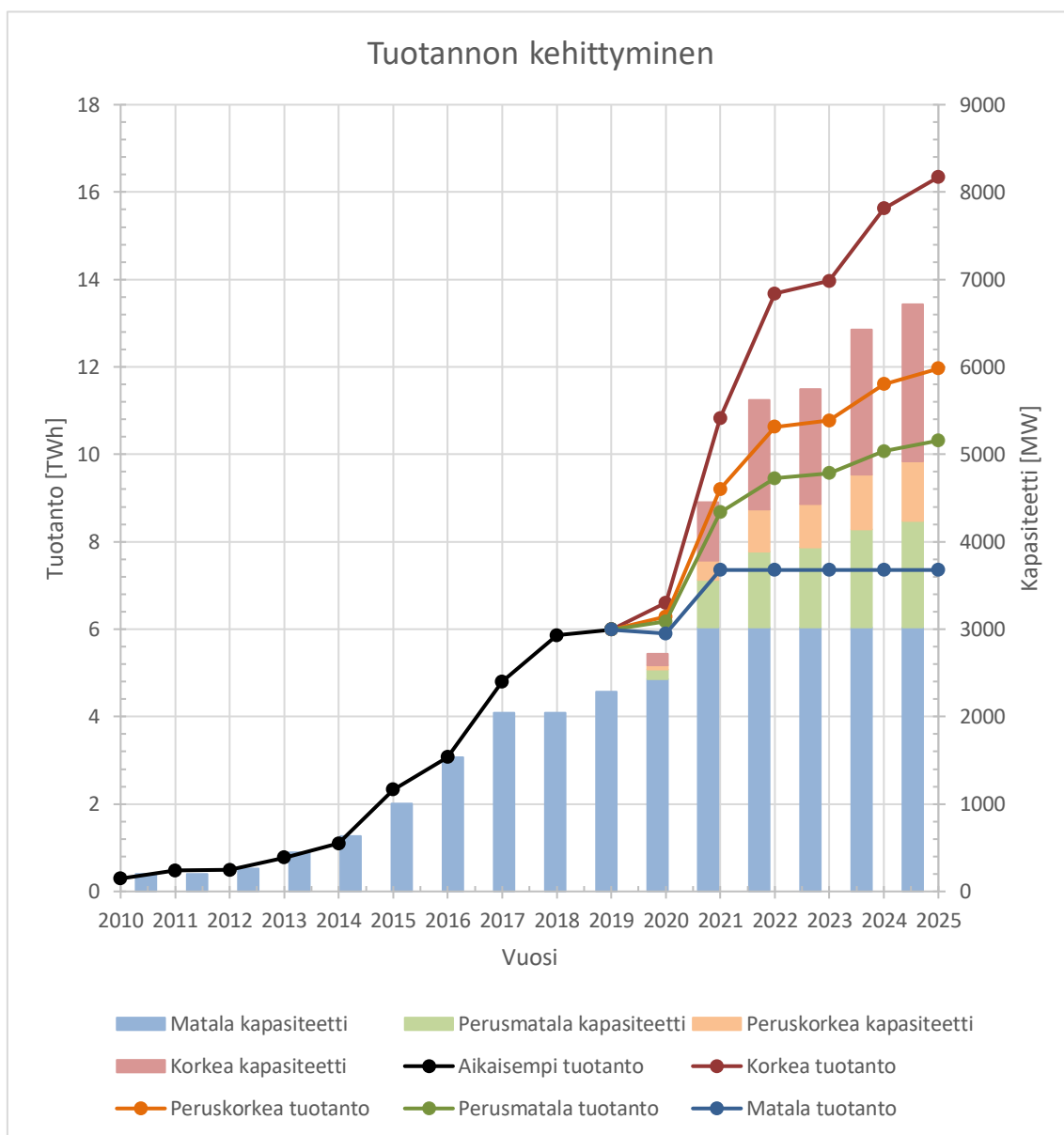
Vaikka tuulivoimalla on haasteita, niin se kuitenkin koetaan hyödylliseksi. Energiateollisuuden energia-asenne tutkimuksen mukaan 80% vastanneista kannatti tuulivoiman lisäämistä (Energiateollisuus, 2018). Suomeen on perustettu yhdistyksiä, jotka ajavat tuulivoimarakentamisen piirissä olevien kansalaisten etuja. Tavoitteena on edistää tuulivoimasta asukkaisiin, luontoon ja kulttuuriympäristöön kohdistuvien haittojen minimointia, ja tuulivoimasta tiedottamista. (Tuulivoima-kansalaisyhdistys, 2018) Paikallisilla asukkailla on mahdollisuus vaikuttaa tuulivoimahankkeeseen YVA vaiheessa esittämällä vaikutuskohteita tarkasteltavaksi kommenttien kautta. Kiinnostus tuulivoimaa kohtaan ja tietoisuus sen mahdollisuuksista ja haasteista auttaa osallistumaan tuulivoimahankkeiden selvitystyön ohjaamiseen.

## 5 YHTEENVETO

Tuulivoiman rakentaminen alkoi Suomessa vuonna 1986. Sen kehitystä edistämään on luotu yhdistyksiä ja taloudellisia tukia. Vuoden 2019 lopussa Suomessa oli asennettuna 754 voimalaa, joiden kumulatiivinen kapasiteetti oli 2284 MW. Asennettu kumulatiivinen kapasiteetti tulee olemaan vuoden 2020 loppuun mennessä noin 2426-2716 MW ja voimaloiden määrä noin 788-851. Arviot saattavat vaihdella toteutuneiden tuulivoimahankkeiden myötä. Covid-19 tilanteen vuoksi tuulivoimaloiden toimittaminen ja rakentaminen saattavat myöhästyä, mikä vähentää arvioituina vuosina toteutuvien hankkeiden määrää.

Suomessa on useita hankkeita rakenteilla, luvitettuna, luvituksessa sekä ehdotettuina. Hankkeiden kesto vaihtelee sijainnista, vaiheesta ja selvitysten laajuudesta riippuen. Suurin osa nykyisistä hankkeista on arvioitu valmistuvan 3 vuoden sisään. Uusia hankkeita oletettavasti ilmaantuu ja kehityksen voitaisiin olettaa jatkuvan.

Nykyisten hankkeiden pohjalta arvioitiin kuuden seuraavan vuoden kehitykset Suomen tuulivoimaloiden kumulatiiviseen asennettuun kapasiteettiin, voimaloiden lukumääriin ja vuosittaisiin tuotantoihin. Muutokset arvioitiin neljässä eri skenaariossa: matala, perusmatala, peruskorkea sekä korkea -skenaario. Arviot löytyvät taulukosta 18. Kyseisen taulukon tiedot ja tilastojen mukaiset aiemmat määrät ovat esitettynä kuvassa 4.



**Kuva 4:** Tuulivoiman kumulatiivinen asennettu kapasiteetti ja vuosittainen tuotanto vuodesta 2010, sekä kuuden seuraavan vuoden arviot eri skenaarioille. (Data lähteistä: Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b, 2019a)

Tuleva tuotanto tulee todennäköisimmin seuraamaan perusmatalan tuotannon -skenaariota. Tuotannon määrä riippuu toteutuneiden tuulivoimalahankkeiden määrästä sekä vuosittaisesta tuulisuudesta Suomessa. Varsinkin kahden seuraavan vuoden tuotannon voitaisiin olettaa vastaavan kyseistä skenaariota. Pidemmällä aikavälillä määrä tulee oletettavasti kasvamaan uusien hankkeiden alettua ja toteuduttua. Vanhojen

tuulivoimaloiden purkaminen vähentää asennettua kapasiteettia, mutta tämä on vielä niin vähäistä, että sitä ei ole otettu arvioissa huomioon.

Tuulivoiman kasvunopeus on ollut nopeampaa kuin mitä tarkastelluissa energia skenaarioissa arvioitiin. Kasvava tuulivoiman tuotannon määrä vaatii säätövoimaa rinnalleen. Lisääntyvä säätövoiman tarve voitaisiin täyttää energiavarastoilla kuten akuilla, paineilmaparastoilla tai PtX-teknologioilla. Tuulivoiman vaihteleva tuotanto aiheuttaa räsitystä muulle tuotannolle, sähköjärjestelmälle sekä siirtoverkolle, mikä aiheuttaa epäsuoria kustannuksia. Tuulivoima on tarpeeksi kustannustehokasta, että sitä rakennetaan ilman tukia.

Tuulivoimaloiden koon kasvu ja teknologian kehittyminen mahdollistavat suuremman tuotannon ja laajemmat sijoittelumahdollisuudet. Uudet voimalatyypit mahdollistavat entistä helpomman sijoittelun ja rakentamisen, mutta nämä vaativat vielä lisää kehitystä ja tutkimusta. Merelle rakennetulla tuulivoimalla on paljon potentiaalia, mutta se ei ole vielä tarpeeksi kustannustehokasta kokeakseen suurta kasvua ilman kustannusten laskua tai tukia.

Tuulivoiman kehittymiselle haasteellisina tekijöinä ovat Suomen kylmät oltavat, voimaloiden vaikutus linnustoon ja lepakoihin, voimaloiden purkamisen jälkeisen kierrätyksen mahdollistaminen, voimaloista aiheutuva melu ja välke, sekä voimaloiden aiheuttamat häiriöt Suomen ilmatilanvalvontaan.

## LÄHDELUETTELO

Conenor, 2017. Recycling Thermoset FRP-Waste. [viitattu 6.4.2020]. Saatavissa: <https://www.conenor.com/recycling-thermoset-frpwaste>

Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. Julkaisussa: *Renewable Energy*. Science Direct. February 2020, Vol. 146, pp. 2589-2625. [viitattu 20.3.2020]. ISSN 0960-1481. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>

Eduskunta, 2017. Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta annetun lain ja tuulivoiman kompensatioalueista annetun lain 6 §:n muuttamisesta. [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: [https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/KasittelytiedotValtiopaivaasia/Sivut/HE\\_175+2017.aspx](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/KasittelytiedotValtiopaivaasia/Sivut/HE_175+2017.aspx)

Energiateollisuus, 2018. Suomalaisten Energia-asenteet 2018. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.11.2019]. Saatavissa: [https://energia.fi/files/3278/Energia-assenne\\_2018\\_MATERIAALIPANKKIKUVAT.pdf](https://energia.fi/files/3278/Energia-assenne_2018_MATERIAALIPANKKIKUVAT.pdf)

Energiateollisuus, 2019. Sähkön hankinta energialähteittäin 2007-2018 [viitattu 27.02.2020]. Saatavissa: [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkon\\_hankinta\\_energialahteittain\\_2007-2018.html#material-view](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkon_hankinta_energialahteittain_2007-2018.html#material-view)

Energiavirasto, 2019. Preemiojärjestelmä. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/preemiojarjestelma>

Finlex, 2013. (L. 28.6.2013/490). Laki tuulivoiman kompensatioalueista. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130490>

Finlex, 2010. (L 30.12.2010/1396). Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. [viitattu 15.3.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>



Greentechmedia, 2017. An Illustrated Guide to the Growing Size of Wind Turbines. [viitattu 21.3.2020]. Saatavissa: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/an-illustrated-guide-to-the-growing-size-of-wind-turbines>

Hirth, L., Ueckerdt, F., Edenhofer, O. Integration costs revisited – An economic framework for wind and solar variability. Julkaisussa: *Renewable Energy*. Science Direct. February 2015, Vol. 74, pp. 925-939. [viitattu 18.3.2020]. ISSN: 0960-1481. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.065>

Hyötytuuli, 2019. Merituulivoima. [viitattu 17.12.2019]. Saatavissa: <https://hyotytuuli.fi/merituulivoima/>

Korpela Aki. *TUULIVOIMAN PERUSTEET*. Tampere: Tammertekniikka, 2016. ISBN 978-952-5491-84-5

Manwell J. F., J. G. McGowan, A. L. Rogers. *WIND ENERGY EXPLAINED: Theory, Design and Application*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1

Rautalampilehti, 2014. Tuulipuistohankkeelle vihreää valoa. [viitattu 1.3.2020]. Saatavissa: <http://www.rautalampilehti.fi/uutiset/rautalampi/tuulipuistohankkeelle-vihreaa-valoa>

RenewablesNow, 2019. Swedish miner Boliden buying 415 GWh of wind power. [viitattu 23.11.2019]. Saatavissa: <https://renewablesnow.com/news/swedish-miner-boliden-buying-415-gwh-of-wind-power-654969/>

Schmehl R. *Airborne Wind Energy*. Singapore: Springer, 2018. [viitattu 22.3.2020]. ISBN 978-981-10-1947-0

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a. Rakenteilla olevat hankkeet. [viitattu 22.11.2019]. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020b. STY:n hankelista – suunnittelussa olevat hankkeet. [viitattu 22.11.2019]. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019a. Tilastot. [viitattu 3.3.2020]. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tilastot>

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019b. Tuulivoimahankkeen luvitus Suomessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1397-STY\\_tuulivoiman\\_luvittaminen\\_5\\_2019.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1397-STY_tuulivoiman_luvittaminen_5_2019.pdf)

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019c. Tuulivoima Suomessa 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2020]. Saatavissa: [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1456-Tuulivoimatilastot\\_AFRY\\_full.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1456-Tuulivoimatilastot_AFRY_full.pdf)

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019d. Tuulivoimaloiden purku ja kierrätys. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.4.2020]. Saatavissa: [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1451-Tuulivoimaloiden\\_purku\\_ja\\_kierratys.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1451-Tuulivoimaloiden_purku_ja_kierratys.pdf)

Stern M. & Stadler I. *Handbook of Energy Storage: Demand, Technologies, Integration*. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-662-55503-3

ST1, 2019. TuuliWatti rakensi markkinaehtoisin tuulipuiston lin Viinanmäkeen. [viitattu 22.11.2019]. Saatavissa: <https://www.st1.eu/fi/tuuliwatti-rakensi-markkinaehtoisin-tuulipuiston-iin-viinanmakeen>

Swedish Wind Energy Association, 2020. Swedish Wind Energy Association, Wind Power Statistics and Forecast – Quarter 4 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.3.2020] Saatavissa: <https://swedishwindenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/Statistics-and-forecast-Svensk-Vindenergi-feb-2020-FINAL.pdf>

Thomsen Kurt E. *OFFSHORE WIND: A comprehensive Guide to Successful Offshore Wind Farm Installation*. Waltham: Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-385936-5

Tuuliatlas, 2009. Tuuliatlas - tuulitiedot Suomen kartalla. [viitattu 27.2.2020]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Tuuliatlas, 2011. Jäätämisaatlas. [viitattu 28.3.2020] Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/jaatamisatlas/index.html>

Tuulivoimalehti, 2019. Tuulivoiman historia blogi. [viitattu 17.2.2020]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/tuulivoiman-historia-blogi.html>

Tuulivoima-kansalaisyhdistys, 2018. Tietoa meistä. [viitattu 13.4.2020]. Saatavissa: <https://tvky.info/tietoa-meista/>

Tuulivoima-kansalaisyhdistys, 2015. TUULIVOIMALOIDEN INFRAÄÄNEN AIHEUTTAMA TERVEYSONGELMA SUOMESSA. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.4.2020]. Saatavissa: [https://tvky.info/wp-content/uploads/2015/10/TUULIVOIMALOIDEN\\_INFRA-AANEN\\_AIHEUTTAMA\\_TERVEYSONGELMA\\_SUOMESSA\\_19-10-2015\\_TVK\\_RY.pdf](https://tvky.info/wp-content/uploads/2015/10/TUULIVOIMALOIDEN_INFRA-AANEN_AIHEUTTAMA_TERVEYSONGELMA_SUOMESSA_19-10-2015_TVK_RY.pdf)

TuuliWatti, 2019. TuuliWatti rakentaa jättiakun Viinamäen tuulipuistoon. [viitattu 22.11.2019]. Saatavissa: <http://www.tuuliwatti.fi/tiedotteet/tuuliwatti-rakentaa-jattiakun-viinamaen-tuulipuistoon>

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2014. Energia- ja ilmastotiekartta 2050. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.11.2019]. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2628105/Energia-+ja+ilmastotiekartta+2050.pdf/1584025f-c5c7-456c-a912-aba0ee3e5052/Energia-+ja+ilmastotiekartta+2050.pdf>

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017a. Kirjallisuusselvitys tuulivoimaloiden vaikutuksista linnustoon ja lepakoihin. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.12.2019]. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80066/TEMrap\\_27\\_2017\\_verkkojulkaisu.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80066/TEMrap_27_2017_verkkojulkaisu.pdf)

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017b. Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.12.2019]. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80067/TEMrap\\_28\\_2017\\_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80067/TEMrap_28_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., Edenhofer, O. *System LCOE: What are the costs of variable renewables?* Julkaisussa: Energy. Science Direct. December 2013, Vol. 63. pp. 61-75. [viitattu 18.3.2020]. ISSN 0360-5442. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.072>

Valtioneuvosto, 2019a. Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa. [viitattu 17.11.2019]. Saatavissa: [https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset\\_publisher/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa?\\_101\\_INSTANCE\\_YZfcyWxQB2Me\\_groupId=1410877](https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa?_101_INSTANCE_YZfcyWxQB2Me_groupId=1410877)

Valtioneuvosto, 2019b. 3.1 Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. [viitattu 17.11.2019]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/rinteenhallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, 2020. Tuulivoimaloiden infraääni ja terveys. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.4.2020]. Saatavissa: <https://tietokayttoon.fi/documents/1927382/2116852/11-2020-Tuulivoimaloiden+infra%C3%A4%C3%A4ni+ja+terveys.pdf/b5dc1005-24c9-67c3-087c-8846e1e48a18/11-2020-Tuulivoimaloiden+infra%C3%A4%C3%A4ni+ja+terveys.pdf?version=1.0>

VTT, 2012. Low Carbon Finland. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.11.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2012/V2.pdf>

WindEurope, 2020. Offshore wind in Europe – key trends and statistics 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.3.2020]. Saatavissa: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>

Ympäristöministeriö, 2016a. Maisemavaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.4.2020]. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/160313/SY\\_1\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/160313/SY_1_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ympäristöministeriö, 2016b. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH\\_5\\_2016.pdf?sequence=1](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH_5_2016.pdf?sequence=1)

Zakeri B., Syri S., Rinne S. Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland – Is there any maximum limit? Julkaisussa: *Energy* [online]. ScienceDirect. December 2015, vol. 92, no. 3. [viitattu 3.3.2020]. ISSN 0360-5442. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.007>