

TUULIVOIMALA - ENNEN, NYT JA TULEVAISUUDESSA

Paukkunen Iiris

Opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2022

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Iiris Paukkunen	Vuosi	2022
Ohjaaja	Ins. (YAMK) Aila Petäjäjärvi		
Toimeksiantaja	Lapin AMK		
Työn nimi	Tuulivoimala - ennen, nyt ja tulevaisuudessa		
Sivumäärä	43		

Opinnäytetyössä tavoitteena oli perehtyä yleisesti tuulivoimaloihin. Työssä keskityttiin tarkemmin tuulivoiman historiaan, rakenteeseen, toimintaan, vaikutuksiin ja niiden nykytilanteeseen Suomessa.

Opinnäytetyössä tutkittiin miten tuulivoimalat ovat kehittyneet vuosien varrella, mikä vaikuttaa niiden tuottamaan tehoon, mitä rakennuslupia sovelletaan, tuulivoimaloiden vaikutus ympäristöön sekä miltä tuulivoiman tulevaisuus näyttää.

Opinnäytetyö tehtiin kirjallisuustutkimuksena, jossa käytettiin aineistona alan kirjallisuutta ja verkkosivuja. Apuna käytettiin myös aikaisempia kursseja, joita olivat tuulivoimatekniikan perusteet ja sähköntuotannon voimalaitosratkaisut.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tietoa tuulivoimasta ja niiden tulevaisuuden ennusteista.

Avainsanat

tuulivoimalat, tuulimyllyt, uusiutuvat energialähteet, tuulipuistot

Electrical and Automation
Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Iiris Paukkunen	Year	2022
Supervisor	Aila Petäjäjärvi, M. Sc		
Commissioned by	Lapin AMK		
Subject of thesis	Wind Power Plant - Before, Now and in The Future		
Number of pages	43		

The aim of the thesis was to learn about wind power plants in general. The thesis focused on the history, structure, operation, impact and current situation of wind power in Finland.

The thesis showed how wind turbines have developed over the years, what influences the power they produce, what construction permits are applied, their impact on the environment and what the future of wind power looks like.

The thesis was done as a literature study, using industry books and websites as working methods. With the aid of previous courses, such as Fundamentals of Wind Power Engineering and Power Plant Solutions for Electricity Generation.

As a result of the thesis, knowledge was gained about wind power and its future predictions.

Key words wind power plants, windmills, renewable energy sources, wind farms

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TUULIVOIMAN HISTORIA	7
3	TUULIVOIMALAN RAKENNE.....	12
3.1	Perustukset.....	12
3.2	Torni.....	13
3.3	Konehuone	14
3.4	Roottori ja lavat.....	16
4	TUULIVOIMALAT	18
4.1	Toiminta	18
4.2	Generaattoriratkaisut	18
4.2.1	Tahtigeneraattori	18
4.2.2	Epätahtigeneraattori.....	19
4.3	Tuulivoimatyypit.....	19
4.3.1	Vaaka-akseliset tuulivoimalat	19
4.3.2	Pystyakseliset tuulivoimalat.....	22
4.4	Teho.....	24
4.4.1	Tuottama teho	25
4.4.2	Tehon rajoitukset.....	25
4.4.3	Ilman tiheyden vaikutus.....	26
4.5	Hyötysuhde.....	26
4.6	Betzin luku	26
5	RAKENTAMINEN JA VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN.....	28
5.1	Esiselvitykset	28
5.2	Suunnittelu.....	28
5.3	Kaavoitus	28
5.4	Luvat.....	29
5.5	Projektin vaiheet	30
5.6	Purkaminen.....	30
5.7	Ympäristö- ja muut vaikutukset.....	31
6	TUULIVOIMA SUOMESSA	32

6.1	Nykytilanne	32
6.2	Määrät maakunnittain	34
6.3	Sähkön tuotanto uusiutuvilla energianlähteillä	35
6.4	Vuosituotanto 2021-2023.....	39
6.5	Tuulivoimaennusteet.....	40
7	POHDINTA.....	41
	LÄHTEET	42

1 JOHDANTO

Tuulivoima on ekologinen sekä nykyaikainen tapa sähköenergian tuotantoon ja sen osuus kasvaa koko ajan. Tuulivoimaa on käytetty purjelaivoissa ja myös tuulimyllyjen pyörittämisessä. Ilmastonmuutos sekä pelko öljyn vähenemisestä on lisännyt sähköenergian tuotantoa uusiutuvilla energialähteillä sekä myös tuulivoimalla.

Opinnäytetyö tehdään kirjallisuustutkimuksena ja tavoitteena on selvittää tuulivoimaloista yleisesti, perehtyä laajemmin tiettyihin yksityiskohtiin ja tuulivoimaan Suomessa. Tavoitteena on myös saada itselle enemmän tietoa ja perehdytystä aiheesta. Tuulivoiman yleistymisen takia, aihe on alkanut kiinnostaa itseäni ja tulevaisuudessa haluaisin työskennellä niiden parissa.

Työssä perehdytään tuulivoimaloihin, niiden historiaan, toimintaan, erilaisiin generaattoriratkaisuihin ja tuulivoimalatyyppeihin. Perehdytään myös tuulivoimaloiden tuottamaan tehoon, tehon rajoitukseen, kuinka ilman tiheys vaikuttaa tehoon, mikä on Betzin luku, hyötysuhteeseen, tuulivoimaloiden rakenteeseen, miten rakentaminen tapahtuu sekä ympäristö- ja muihin vaikutuksiin. Tutustutaan tuulivoimaan Suomessa, jossa vertaillaan sähköntuotantoa uusiutuvilla energialähteillä, ja sitä miten ne ovat muuttuneet vuosien 2014-2020 aikana. Lopuksi selvitetään tuulivoiman ennusteita sekä mikä on arvioitu vuosituotanto vuosina 2021-2023.

2 TUULIVOIMAN HISTORIA

Ennen vanhaan tuulimyllyjä on käytetty viljan jauhamiseen sekä kasteluveden nostamiseen viljelyksille. Aluksi 1100-luvun loppupuolella eurooppalaisten myllyjen runko oli laatikkomainen ja se sisälsi myllynkivet ja muun jauhamiseen kuuluvan laitteiston. Tällaista myllyä kutsuttiin varvasmyllyksi eli konttimyllyksi (Kuva 1). Kun mylly haluttiin sopivaan asentoon tuulen kannalta, koko rakennelmaa käännettiin tuulta kohti. (Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 14-15; Niinistö-Salmela & Salmela 2013, 62-64.)



Kuva 1. Nelisiipinen varvastuulimylly (Turunen 1958).

1400-luvulla yleistyi harakkamyllyt, joissa alettiin sijoittamaan laitteisto kiinteään tornin sisälle, eli tuulimyllyt koostuivat kahdesta osasta (Kuva 2). Ylempää osaa voitiin kääntää tuulen suuntaan, jotta tuuli alkoi pyörittää siipiä, jotka olivat kiinnitettyinä myllyn yläosaan. Myllyn alemmassa osassa myllynkivet jauhoivat jyviä, jolloin viljoista saatiin jauhoa. (Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 14-15; Niinistö-Salmela & Salmela 2013, 62-64.)



Kuva 2. Harakkamylly (Niinistö-Salmela & Salmela 2013, 62).

Mamsellimylly on kehittynein myllytyyppi (Kuva 3), mikä toimii samalla periaatteella harakkamyllyn kanssa. Myllyn yläosa on laakeroitu alaosaan, jolloin osat

muodostavat ääri viivoiltaan yhtenäisen rakennelman. (Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 14-15.)



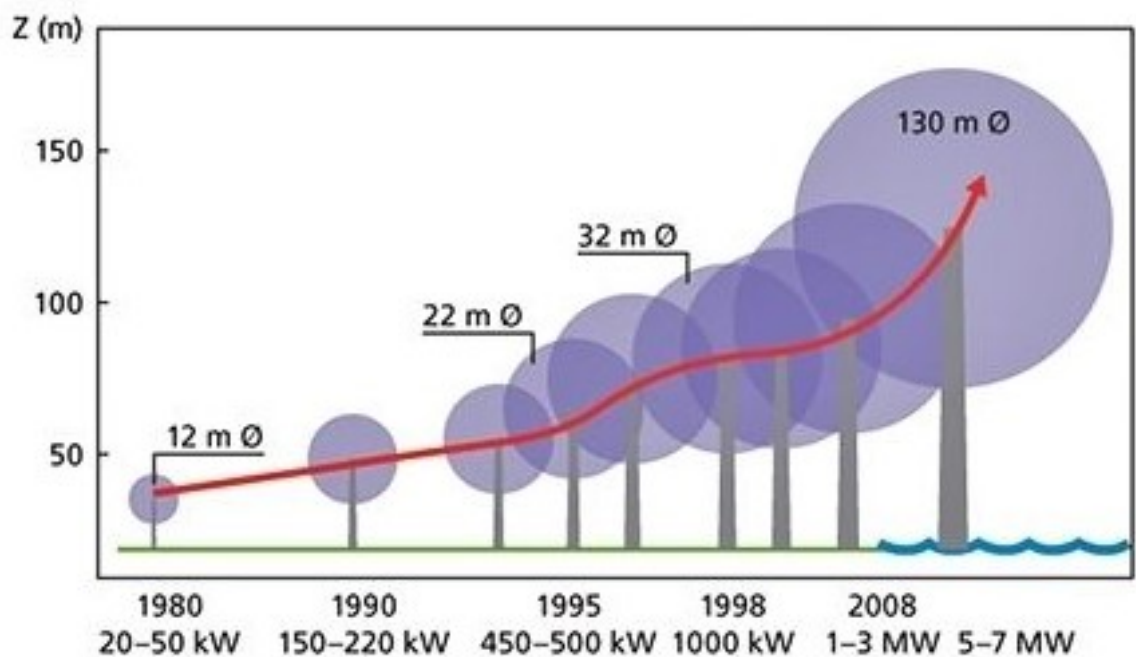
Kuva 3. Mamsellituulimylly Vehmaalla (Sirelius 1914).

1800-luvulla amerikkalainen keksijä Charles Brush kokeili uudenlaista sähkötuotantojärjestelmää, jossa pienen generaattorin lähteenä käytettiin tuulta hevosen vetämän polkumyllyn tilalla. Brush rakennutti puutarhaansa tuulipyörän, joka latsasi 408 akkua, jotka toimivat 350 hehkulampun virranlähteenä. Ensimmäiset tuulivoimalat olivat ristikkovetimiä. Ristikkovetimiä käytettiin 1980-luvulle asti ja niiden roottori oli sijoitettu tuulen alapuolelle. (Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 20-22; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Suomeen rakennettiin ensimmäinen sähköverkkoon liitetty voimala vuonna 1986 Imatralle, josta alkoi suomalaisen teollisen tuulivoiman historia. Ensimmäinen tuulivoimapuisto valmistui vuonna 1991 Pohjanmaalle, jossa oli neljä tuulivoimalaa sekä lisäksi rakennettiin voimaloita Kemiin, Siikajoelle ja Kalajoelle. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Kasvuharppaus tapahtui 1990-luvun lopulla, sillä vuonna 1996 astui voimaan energiainvestointien tukijärjestelmä, joka kannusti tuulivoimahankkeiden rakentamista 40 % investointituella. Tuulivoimakapasiteetti kaksinkertaistui vuonna 1999, jolloin tuulivoimaloita pystytettiin Oulunsaloon, Poriin, Kotkaan ja Uuteenkaupunkiin, mutta voimaloiden rakentaminen hidastui poliittisen tahdon puutteen vuoksi. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Tuuliatlas julkaistiin vuonna 2009, mikä mahdollisti sen, että sen avulla nähtiin mitkä alueet olisivat hyviä ja missä tuulee. Suomessa tuulivoiman syöttötariffijärjestelmä saatiin käyttöön 2011. Syöttötariffi eli takuuhintajärjestelmä on valtion ohjauskeino lisätä uusiutuvien ja kotimaisten energianlähteiden käyttöä ja sen tarkoituksena on maksaa tuotetusta sähköstä sovittu hinta. Tuulivoimaloiden rakentaminen alkoi kunnolla vuosina 2012-2014. Vuonna 2015 rikottiin tuulivoimakapasiteetin 1 000 MW:n raja ja seuraava tuhat rikottiin vuonna 2018. Tuulivoimaloiden koko on kasvanut paljon viimeisien vuosien aikana (Kuvio 1). (Motiva 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)



Kuvio 1. Tuulivoimaloiden koon kehitys (Motiva Oy 2022).

Nykypäivänä tuulipuistoissa on yleensä 6-20 voimalaa, mutta suurimmilla alueilla voimaloita voi olla parhaimmillaan 100. Tornin korkeus oli alussa 22 metriä, mutta nykyään pituus vaihtelee 50-180 metrin välillä. Vuonna 1991 keskiteho oli vain

173 kW, mutta vuonna 2019 saavutettiin 4,3 MW:n lukema. Voimalat rakennetaan alueille, joissa niistä saa parhaimman hyödyn irti, tällaisia paikkoja ovat rannikko- ja merialueet, tunturit ja aukeat paikat. Tuulivoimalat tuottivat vuonna 2021 melkein 10 % eli 8,1 TWh Suomen sähkökulutuksesta. Niitä oli 962 kappaletta ja niiden kokonaiskapasiteetti oli 3 257 MW, mikä oli noussut vuodessa 671 MW. Voimaloiden keskikoko on yli 4 MW, mutta suurimmat voimalat ovat kooltaan jopa 5,6 MW. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b, 2022c.)

3 TUULIVOIMALAN RAKENNE

3.1 Perustukset

Tuulivoimaloille tehdään vakaa perustus (Kuva 4), jossa rauditus toimii tukirunkona betonille. Perustuksen halkaisija on yleensä 15-30 metriä. Rakenteet ovat betonisia tai teräsrakenteisia. Perustuksen suunnitteluun vaikuttaa alueen maaperä ja pohjaolosuhteet, sillä jos maaperä ei ole tarpeeksi kantava, sen alle tehdään massanvaihto sekä paalutus tai jos voimalat sijoitetaan kallioalueille, ne ankkuroidaan kallioon. Kallioalueilla perustus on pienempi, kun taas pehmeällä pohjalla tarvitaan suurempaa ja leveämpää perustusta. (Motiva Oy 2022; Suomen hyötytuuli Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

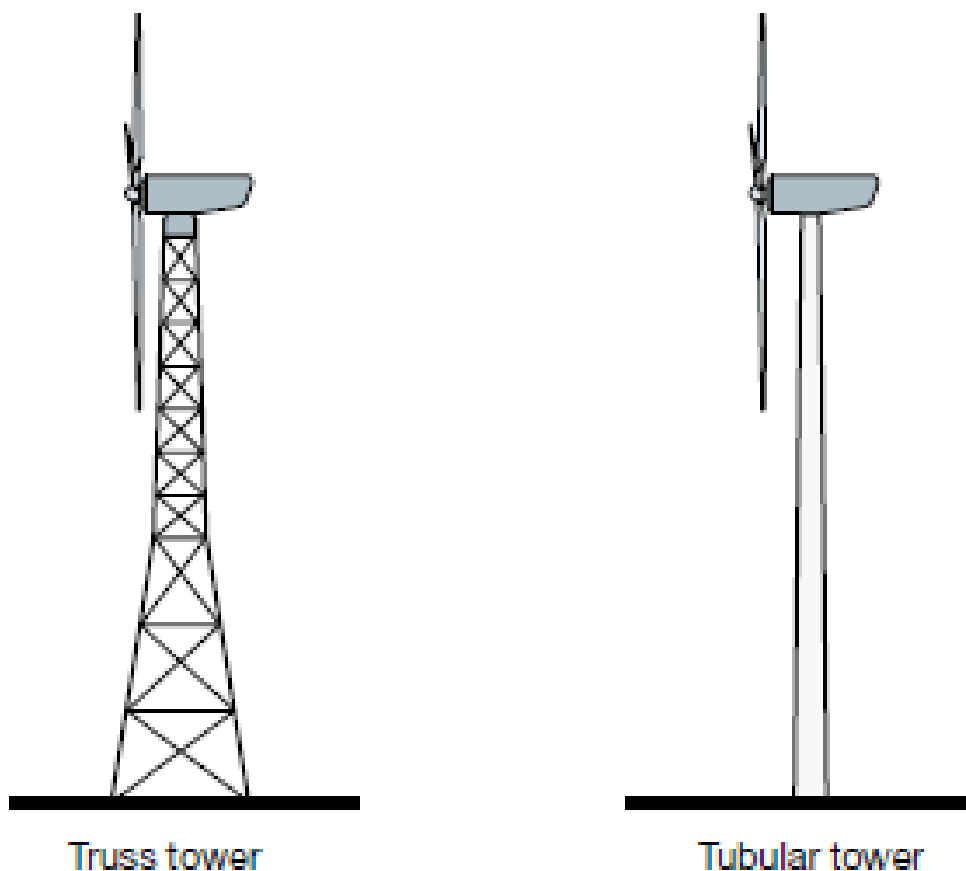
Perustuksien tulee kestää erilaiset sääolosuhteet eli vaikka tuulisi kovaa, torni ei saa päästä kaatumaan myrskyssäkin. Merituulivoimaloiden perustukset ovat erilaisia kuin maatuulivoimaloiden ja tehdään eri tekniikoin. (Motiva Oy 2022; Suomen hyötytuuli Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)



Kuva 4. Tuulivoimalan perustus (EPV tuulivoima 2021).

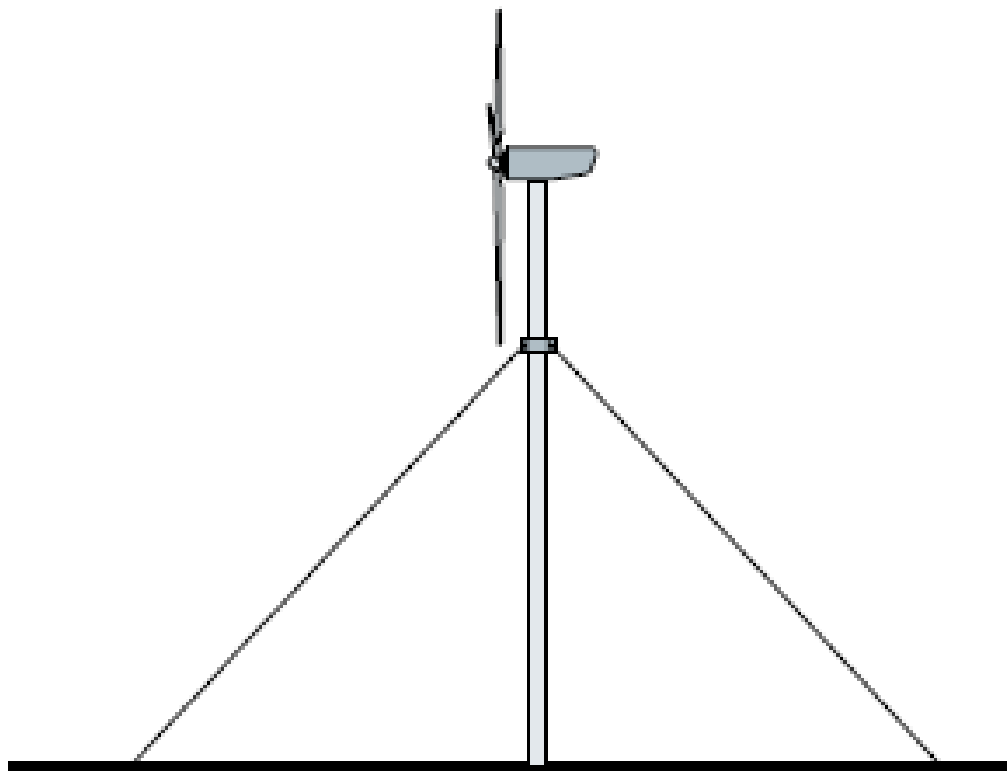
3.2 Tornit

Ensimmäiset tuulivoimalat olivat ristikkovetimiä. Ristikkovetimiä voimaloita käytettiin 1980-luvulle asti. Putkirakenteiset tuulivoimalat ovat yleistyneet, sillä niillä on lukuisia etuja verrattuna ristikkorakenteisiin voimaloihin. Putkimaiset tornit eivät vaadi runsaasti pultteja, jotka pitää tarkastaa säännöllisesti. Kiipeäminen konehuoneeseen on turvallisempaa ja helpompaa sisäportaikon tai hissillä. Ne ovat myös esteettisesti paljon hyväksyttävämpiä kuin ristikkotorni. Kuviossa 2 näkee miten tornit eroavat ulkonäöltään toisistaan. (ABB 2011, 29.)



Kuvio 2. Ristikkorakenteinen- ja putkirakenteinen torni (ABB 2011, 29).

Tornityyppejä on kolmaskin, mikä on harustettu ristikkotorni (Kuvio 3). Niitä käytetään vähän keskikokoisissa ja suurissa voimalaitoksissa. (ABB 2011, 29.)



Kuvio 3. Harustettu ristikkotorni (ABB 2011, 29)

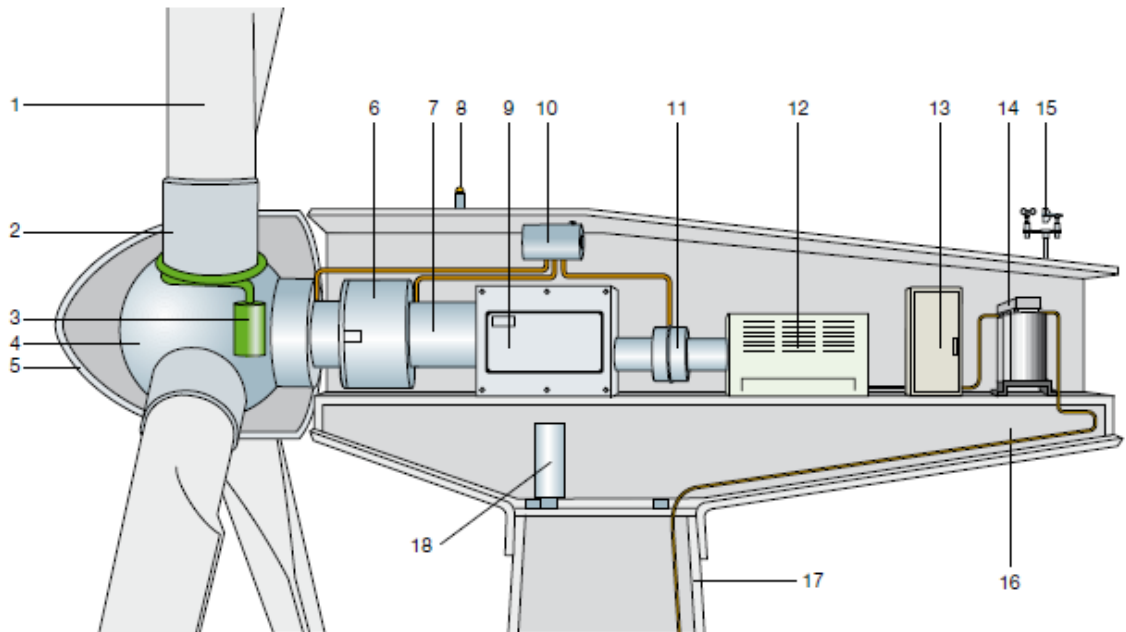
Tuulivoimaloiden tornin korkeus vaihtelee 50-180 metrin välillä. Eurooppalaisissa tuulivoimaloissa torni on yleensä putkirakenteinen terästorni, joka on kiinnitetty betoniseen perustukseen. Torni voi olla myös ristikkorakenteinen tai hybriditorni, jossa tornin alaosaa on valmistettu betonista ja yläosa teräksestä. Tornit ovat kartionmuotoisia ja ne pystytetään paikan päällä nostokurkien avulla, sillä ne kasaetaan kolmesta tai neljästä osasta. (Motiva Oy 2022.)

3.3 Konehuone

Generaattori, vaihteisto, muuntaja sekä säätö- ja ohjausjärjestelmät löytyvät konehuoneesta. Joissakin voimaloissa kokonaispainon pienentämiseksi sekä huoltotöiden helpottamiseksi muuntaja ja ohjauskeskus voivat sijaita tornin alaosassa. (ABB 2011, 24-25; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Konehuoneen rungossa on kaksi kerrosta, joista konehuonetta ympäröivä suojaava kuori on lasikuitua sekä runko on yleensä valmistettu teräksestä. Konehuo-

neen kokoa voi verrata linja-autoon tai junan veturiin. Kuviossa 4 näkyy, minkälainen konehuone vaaka-akselisessa on ja sen pääkomponentit. (ABB 2011, 24-25; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)



Kuvio 4. Vaaka-akselinen konehuone (ABB 2011, 24).

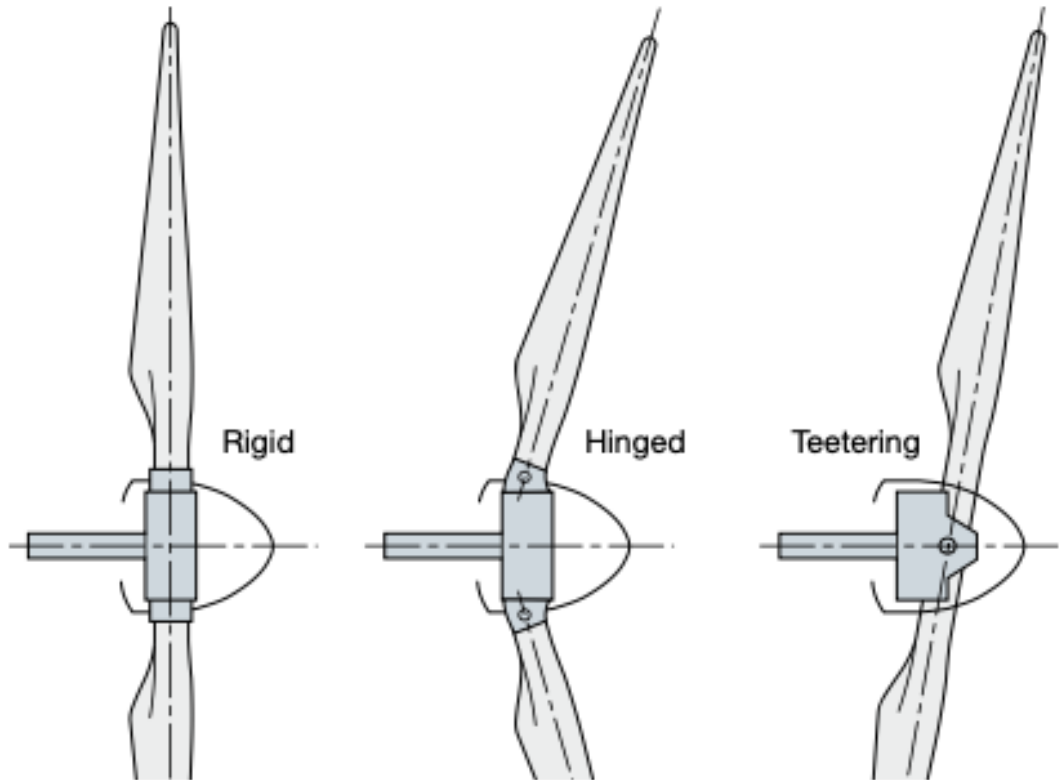
Vaaka-akselisen konehuoneiston pääkomponentit numeroituna:

1. Siipi
2. Siiven tuki
3. Kallistuskulman toimilaite
4. Keskitin
5. Napa eli spinner
6. Päätuki
7. Pääakseli
8. Varoitusvalo lentokoneelle
9. Vaihteisto

10. Mekaaninen jarru
11. Hydraulinen jäähdytyslaite
12. Generaattori
13. Tehonmuunnin ja sähköiset ohjaus-, suoja ja erotuslaitteet
14. Tuulimittari
15. Anemometri eli tuulen nopeusmittari
16. Konehuoneen runko
17. Tornin runko
18. Kääntömoottori

3.4 Roottori ja lavat

Tuuli pyörittää siipirakennetta, jota kutsutaan roottoriksi. Teräksiseen kärkikarti-oon eli napakuppiin kiinnitetään lavat, joissa niiden tehtävänä on pyörittää vaihteiston akselia sekä toimia sen lisäksi pysäytysmekanismina. Navat, joita on kolme päätyyppiä jäykkä, heiluva ja nivelletty (Kuvio 5), valmistetaan teräksestä tai pallografiittivaluraudasta. Ne suojataan soikealla kotelolla ulkopuolelta, jota kutsutaan myös spinneriksi. (ABB 2011, 25-26; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)



Kuvio 5. Erilaiset napatyypit (ABB 2011, 26).

Jäykkä napa pitää osat kiinteässä asennossa pääakseliin nähden, joten tätä käytetään yleisimmin roottoreissa, joissa lapoja on kolme tai useampi. Heiluvaa käytetään vähentämään akseliin välittyvää aerodynaamista epätasapainoa tuulivoimaloissa, joissa on kaksi lapaa. Nivelletty napa on jäykän ja heiluvan navan sekoitus, jossa on nivelet lapoja varten. Sitä käytetään voimakkaan tuulen aikana liiallisen kuormituksen vähentämiseksi. (ABB 2011, 25-26; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Lavat ovat tuulen kanssa vuorovaikutuksessa ja niihin on suunniteltu siivekkeet, jolloin aerodynaaminen tehokkuus maksimoidaan. Roottori koostuu kolmesta lavasta, jotka valmistetaan komposiittimateriaaleista, jossa käytetään lasikuitua, hiilikuitua tai puuta epoksin tai polyesterin kanssa. Komposiittimateriaalia käytetään myös esimerkiksi veneissä, lentokonerakenteissa ja suksisauvoissa. Komposiittimateriaalin vanheneminen estetään värillisellä geelikerroksella, joka laiteaan lapojen ulkopintaan. Suomessa pisimmät lavat ovat noin 75 metriä pitkiä. (ABB 2011, 25-26; Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 22-23; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

4 TUULIVOIMALAT

4.1 Toiminta

Tuulen liike-energia muutetaan voimalan akselin pyörimisenergiaksi, jota kutsutaan myös mekaaniseksi energiaksi. Aurinko lämmittää ilmaa, jolloin ilma nousee ylöspäin ja tilalle tulee kylmempää ilmaa, jonka takia syntyy tuulta. Jotta voimala käynnistyy, on tuulennopeuden oltava 3 m/s, ja tuulen nopeuden ollessa 13–14 m/s voimalan nimellisteho on saavutettu. Voimalat soveltuvat toimimaan vain, kun tuulen nopeus on alle 25 m/s, sillä kovemmalla nopeudella voimalan rakenteisiin kohdistuu rasituksia ja suuri laiterikkoutumisen vaara. (Suomen tuulienergia Oy 2010; Niinistö-Salmela & Salmela 2013, 62-64.)

Kun tuuli yltyy tarpeeksi, lämpötila- ja paine-erojen seurauksena ilma alkaa liikkua ja lavat alkavat pyöriä, jolloin myös generaattori alkaa pyöriä ja tuottaa sähköä. Sähkö johdetaan muuntajan kautta sähköverkkoon. Voimalat ovat vaakakselisiä, joissa on kolme lapaa ja niiden roottori on torniin nähden tuulen yläpuolella, tällaisten voimaloiden pyyhkäisypinta-ala on lähes 2 hehtaaria. (Suomen tuulienergia Oy 2010; Niinistö-Salmela & Salmela 2013, 62-64.)

4.2 Generaattoriratkaisut

Tuulivoimaloissa käytetään pääosin tahti- eli synkronigeneraattoria ja epätahti- eli oikosulkugeneraattoria. Tahtigeneraattorin avulla tapahtuu melkein kokonaan suurimittainen voimantuotanto. Suurvoimantuotannossa yleisin käytetty tyyppi on epätahtigeneraattori. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 1994.)

4.2.1 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattorin roottori koostuu tasavirtasähkömagneetista tai kestopagneetista. Tässä ratkaisussa normaalissa käyttötilanteessa roottorin kehittämä magneettikenttä pyörii tarkalleen samalla nopeudella, kun staattorin kehittämä pyörivä kenttä, jota kutsutaan tahtinopeudeksi. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 1994; ABB 2011, 27-28.)

4.2.2 Epätahtigeneraattori

Epätahtigeneraattori on pohjimmiltaan kolmivaiheinen induktiomoottori. Se lakkaa toimimasta moottorina ja alkaa toimia generaattorina, kun roottorin akseliin vaikuttava mekaaninen vääntömomentti on vastuksen sijaan positiivinen. Tämä ilmiö saa pyörimisnopeuden kasvamaan ja ylittämään synkronointinopeuden, jolloin sähköenergiaa syötetään verkkoon. Nopeuserosta syntyy nimitys epätahtigeneraattori. (ABB 2011, 27-28.)

4.3 Tuulivoimatyypit

Tuulivoimaloita on eri tyyppisiä, pysty- ja vaaka-akselisia, 1-, 2-, 3-lapaisia sekä monilapaisia, mitkä ovat erilaisia rakenteiltaan. Useimmiten teollisessa tuotannossa olevat voimalat ovat 3-lapaisia vaaka-akselisia voimaloita, joiden nimellisteho on 4-5 MW, roottorin halkaisija on 130-160 m ja tornin korkeus 140-175 m, sillä ne ovat sähköntuotannon kannalta tehokkaimmat. (Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 23; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Merituulivoimaloissa on matalammat tornit, pidemmät lavat ja suuremmat tehot, mutta muuten ne ovat samantyyppisiä maatuulivoimaloiden kanssa. Yleisimmin pientuulivoimaloissa, joita käytetään omakotikäytössä, on 2 tai 3 lapaa. Pystyakselisia voimaloita on pystytetty kaupunkiympäristöön ja telemastoihin. (Wilkins, Valjakka & Palanterä 2012, 23; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

4.3.1 Vaaka-akseliset tuulivoimalat

Vaaka-akselisen voimalan pyyhkäisyypinta-alaksi määritetään se alue, mikä on kärkien piirtämän ympyrän pinta-ala ja napakorkeudeksi se, mikä on roottorin keskikohdan korkeus maan pinnasta. Ne toimivat parhaiten silloin, kun ne on suunniteltu määrätyleiselle tuulen nopeusalueelle. (ABB 2011, 13, 29.)

Etuna vaaka-akselisilla tuulivoimaloilla on se, että tuulesta saadaan enemmän energiaa talteen, koska roottorin pyyhkäisyypinta-ala on suurempi sekä se toimii keskinopeilla tuulilla paremmalla tehokertoimella kuin pystyakselinen voimala. Jos voimalan halutaan toimivan, silloin sen roottori pitää kääntää tuulta kohden, mikä tapahtuu joko moottorikäyttöisesti tai pienemmissä käytetään pyrstöä tai

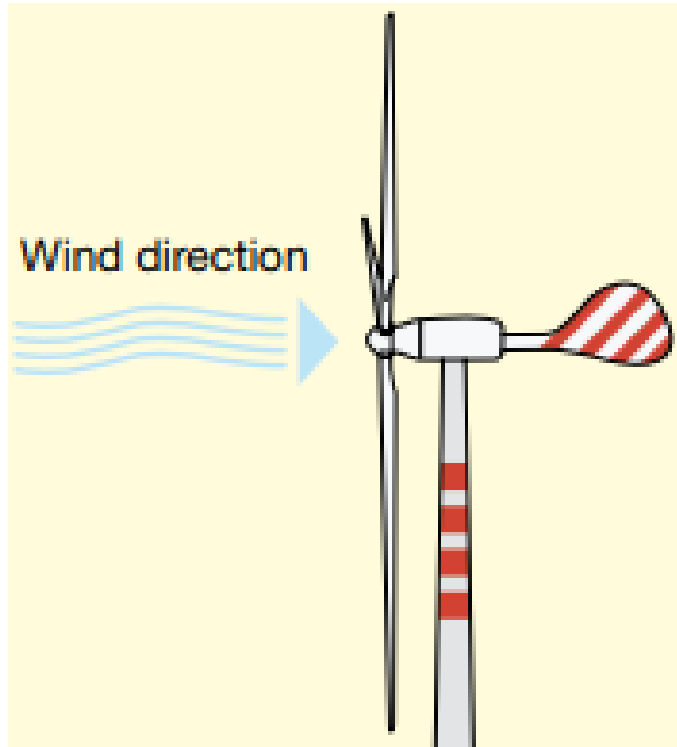
poikittaista kääntöpotkuria. Vaaka-akselisissa voimaloissa torneina käytetään vaapaasti seisovaa ristikköä tai putkimaista. Kuvassa 5 on Hailuodossa, Marjanien kalastajakylässä sijaitseva vaaka-akselinen voimala. (ABB 2011, 13, 29.)



Kuva 5. Vaaka-akselinen voimala (Peltonen 2002).

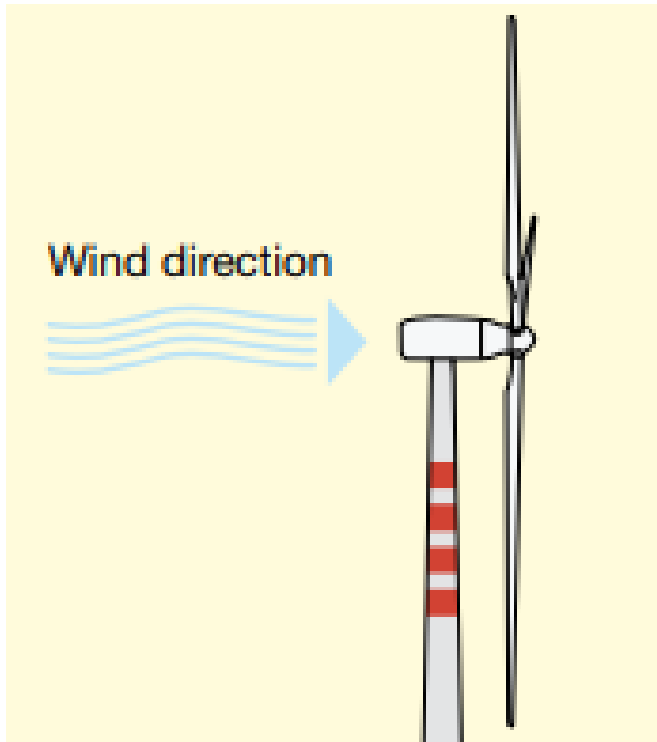
Vaaka-akselisissa voimaloissa on kahta päätyyppiä, jotka ovat etutuuli- ja takatuulivoimalat. Yleisin käytetty voimalatyyppi on etutuulivoimala (Kuvio 6), jossa

akseli on vaakatasossa ja tornista katsoen roottori on tuulen puolella. (ABB 2011, 13.)



Kuvio 6. Etutuulivoimala (ABB 2011, 13).

Takatuulivoimaloissa (Kuvio 7) akseli on myös vaakatasossa ja tornista katsoen roottori on tuulen alapuolella. Tornin taakse syntyy pyörteitä, jonka takia ne aiheuttavat ongelmia osuessaan roottoriin. Takatuulivoimalat olivat ennen yleinen voimalatyyppi, koska lavat toimivat tuuliviirin lailla ja ohjasivat voimalaa oikeaan suuntaan, jolloin suuntauskoneiston tai peräsimen pois jättäminen oli mahdollista. Ongelmana on myös melu ja värinä sekä niiden hyötysuhde on pienempi. (ABB 2011, 13; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)



Kuvio 7. Takatuulivoimala (ABB 2011, 13).

4.3.2 Pysty akseliset tuulivoimalat

Pysty akselisen voimalan pyyhkäisy pinta- alaksi määritetään se alue, mikä on pyörivän roottorin suurin tuulta vastaan oleva kohtisuora pinta-ala ja napakorkeudeksi se, mikä on roottorin keskipisteen pyyhkäisy pinta- alan korkeus maanpinnasta. Voimala ei tarvitse erillistä tuulen suuntausta eli se toimii samalla tavalla riippumatta tuulen suunnasta, sillä tuuli voi pyörittää lapoja mistä tahansa suunnasta. Savonius, Darrieus ja Windside ovat pysty akselisiä voimaloita. (ABB 2011, 11-13.)

Savonius-turbiinissa (Kuva 6) on alhainen hyötysuhde, minkä takia se soveltuu alhaiselle tuulenopeudelle ja hyvä puoli on se, että se on riippumaton tuulen suunnasta sekä siinä on alhainen melutaso. Savonius-turbiinissa käynnistysmomentti on heikko ja käynti nykivä, sillä momentti vaihtelee suuresti siiven asennossa. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 1994; ABB 2011, 11.)



Kuva 6. Savonius-turbiini (ABB 2011, 11).

Darrieuksen (Kuva 7) tärkeitä ominaisuuksia on se, että se on nopea turbiini, minkä takia hyötysuhde on vaakatason turbiineihin verrattuna pienempi. Turbiini soveltuu hyvin esimerkiksi rinteeseen tai katolle, sillä siinä on alhainen melutaso. Darriusturbiinin tärinä rajoittuu perustuksiin. Pyörimisen aikana vaikuttavat voimat aiheuttavat kovan väsytytkuormituksen, joten ongelmana on mekaaninen kestävyys. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 1994; ABB 2011, 12.)



Kuva 7. Pystyakselinen voimala Darrieus (ABB 2011, 12).

4.4 Teho

Roottorin pyörähdyspoikkipinta-ala riippuu lapojen pituudesta, joka tarkoittaa sitä, että se on suoraan verrannollinen tehoon. Jos lapojen pituus kaksinkertaistuu, silloin teho nelinkertaistuu. Tehoon vaikuttaa eniten tuulen nopeus, sillä tuulen nopeus kolmanteen potenssiin on verrannollinen tehoon. Tämä tarkoittaa sitä, että tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa teho kahdeksankertaistuu. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 1994; Motiva Oy 2022.)

Tuulen nopeus pitää olla 4 m/s, jotta voimalat lähtevät päälle. Kun tuulen nopeus on 13-15 m/s, saavutetaan nimellisteho, jolloin alkaa tehonsäätö. Tehonsäädöllä pyritään pitämään teho vakiona. Nykyvoimaloilla huipunkäyttöajat ovat 2500-3500 h/a, jolloin kapasiteettikertoimet ovat noin 0,28-0,40. Tehon pystyy laske-
man kaavalla 1, jos tiedetään ilman tiheys, tehokerroin, lavan pituus tai pyyhkäi-
sypinta-ala sekä tuulen nopeus. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 1994; Motiva Oy
2022.)

$$P = \frac{1}{2} \rho \times C_p \times A \times V^3 \quad (1)$$

missä

ρ	on	ilman tiheys, [kg/m ³]
C_p	on	tehokerroin
R	on	lavan pituus, m
A	on	$\pi \times R$ eli pyyhkäisypinta-ala
V	on	tuulen nopeus, m/s

4.4.1 Tuottama teho

Turbiinin ulkopuoliset vaikutukset voivat pienentää tuulivoiman tuottamaa tehoa. Häviöitä syntyy muun muassa seuraavista syistä: ilmanpaineen vaihtelusta, jossa oletettuna vakiotiheytenä toimii merenpinnan taso 15 °C:een lämpötilassa, tiheys pienenee lähes 1 % jokaista 100 metrin korkeutta kohden. Lämpötilan noususta asennuspaikalla, minkä seurauksena tiheys pienenee 3 % jokaista 10 °C:tta kohden sekä lapojen aerodynaamista tehokuutta vähentää niiden jäätyminen ja li-
kaantuminen. (ABB 2011, 34-35.)

4.4.2 Tehon rajoitukset

Voimalaa pidetään vakiona nimellistehossaan, ja tarvittaessa tehoa rajoitetaan sakkaus- tai lapakulmansäädöllä, mikä tarkoittaa sitä, että kokonaishyötysuh-
detta heikennetään tarkoituksella. Roottorin pyöriminen pysäytetään, jos tuulen
nopeus nousee 24 m/s, jotta laitevikoja ei syntyisi. (ABB 2011, 10; Motiva Oy
2022.)

4.4.3 Ilman tiheyden vaikutus

Ilman tiheys vaikuttaa tehoon, sillä jos tuulen nopeus on sama, talvipakkasilla teho on suurempi kuin kesällä. Tämä johtuu siitä, kun jos lämpötila laskee, ilman tiheys kasvaa. (Motiva Oy 2022.)

4.5 Hyötysuhde

Ilma, joka kulkee roottorin läpi, voidaan teoriassa hyödyntää 59 %, jota pidetään myös tuulivoimalan maksimihyötysuhteena. Tuulen nopeus on roottorin etupuolella suurempi kuin roottorin jälkeen, mikä aiheuttaa häviötä. Häviöt voivat johtua lapatyypin ja roottorin pyörimisnopeuden optimaalisuudesta sekä virtauksen turbulenssista, kun roottori kykenee käyttämään tuulesta ne osat, jotka ovat roottorin suuntaisia. Mekaanisessa voimansiirrosta, generaattorissa, muuntajassa ja kaapeleissa syntyy myös häviöitä, mutta ne eivät ole keskiarvallisesti merkityksellisiä. (ABB 2011, 10-11; Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Massavirran säilyessä vakiona ilmamassa laajenee, kun nopeus pienenee. Tämä tarkoittaa sitä, että käytännössä hyötysuhde on maksimissaan 50 %. (ABB 2011, 10-11; Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

4.6 Betzin luku

Ideaalisen tuuliturbiinin tehon määrittämiseen käytetään Albert Betzin yksinkertaistettua mallia. Sen mukaan mitä suuremman liike-energian turbiini voi ottaa tuulesta, sitä hitaampi on turbiinista lähtevän tuulen nopeus. Tämän seurauksena tuuli hidastuu, että turbiinin jälkeinen nopeus vaihtelee nollan ja ylävirran puoleisen nopeuden välillä ja siten molemmissa raja-arvotapauksissa purettu teho olisi nolla. (ABB 2011, 31-33; Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Betzin luvun mukaan tuulivoimalan kokonaishyötysuhteen teoreettinen maksimiarvo on $16/27 = 0,593$ eli 59,3 %. Käytännössä luku on aina alhaisempi johtuen mekaanisista epätäydellisyyksistä. Voimalan tuotantoon vaikuttavat monet eri tekijät, joita ovat muun muassa lavan muotoilu ja määrä, lavan säätökulma sekä se, kuinka korkea voimala on. (ABB 2011, 31-33.)

Tehokertoimen avulla voidaan verrata hyötysuhdetta, jonka kertoimeen vaikuttaa kärkinopeus, ilmantiheys, voimalan säätötapa ja pyörimisnopeus. Kun voimala toimii optimitilanteessa, yleensä tehokerroin on vain 0,4, vaikka teoreettisesti korkein kerroin on 0,59. (ABB 2011, 31-33.)

5 RAKENTAMINEN JA VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN

5.1 Esiselvitykset

Ennen kuin aloitetaan suunnittelemaan tuulivoimaloita, selvitetään Tuuliruusun avulla alueen tyypilliset tuuliolosuhteet. Siitä käy ilmi tuulen voimakkuus sekä suunnan prosentuaalinen jakauma. Tuuliruusuja voi laskea tietyille havaintojaksoille, joihin vaikuttaa sijainnin korkeus tai keskittyä vaikka vain kesä- ja talvikausien tilastoihin. (Ilmatieteenlaitos 2022.)

Lidar-laitteella voidaan määrittää tuulen suunta sekä myös vaaka- ja pystysuuntainen tuulensuunta. Anemometrimitauksella määritetään tuulen nopeus. Mittauksia tehdään yleensä vuoden ajan, jotta tuulisuuden vaihtelut näkyvät parhaiten. (Ympäristöministeriö 2014; Ilmatieteenlaitos 2022.)

5.2 Suunnittelu

Vuonna 2011 astui voimaan lainmuutos, joka mahdollistaa sen, että yleiskaavaa voi käyttää suunnitteluvälineenä tuulivoimarakentamiseen. Tuulivoimahanke toteutetaan yksityiskohtaisen kaavan ja luparatkaisujen perusteella riippuen tuulivoimalan sijainnista ja koosta. Joskus toteuttaminen edellyttää ympäristövaikutusten arviointimenettelyä, mikä tulee olla YVA-lain mukainen, mutta silloin kaava laajennetaan täyttämään sen vaatimukset. (Motiva Oy 2022.)

5.3 Kaavoitus

Aluksi selvitetään maankäyttö- ja rakennuslain perusteella, tarvitseeko voimaloiden rakentamiseen alueen kaavoittamista vai olisiko ne mahdollista rakentaa perustuen luparatkaisuihin. Kaavaa tehdessä on otettava huomioon suunnitelman ja tarkasteltavien vaihtoehtojen toteuttamisen ympäristövaikutukset sekä myös sosiaaliset, kulttuuriset, yhdyskuntataloudelliset ja muut vaikutukset. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Avointa ja vuorovaikutteista tapaa edellytetään maankäyttö- ja rakennuslaissa. Kaavoituksen keskeisiä lähtökohtia ovat vuorovaikutuksen järjestäminen ja arviointi kaavan vaikutuksista. Nykyään erillistä YVA-selvitystä ei tarvita, jos kaava

on laajennettu täyttämään myös YVA-lain vaatimukset. Tuulivoimalat tulee sijoittaa siten, että sinne saa useamman voimalan. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

5.4 Luvat

Ennen kuin tuulivoimaloita voidaan rakentaa, pitää niille hakea useita lupia. Niiden rakentamiseen tarvitaan aina rakennuslupa tai pientuulivoimalalle riittää toimenpidelupa. Kunnan rakennusviranomaisen päättää, saako rakentamiseen rakennus- tai toimenpidelupaa. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Tuulivoimalan pääpiirustukset ja rakennuspaikan hallinnan selvitys tulee liittää hakemukseen, sekä koska vaatimukset saattavat vaihdella eri kunnissa, kannattaa pyytää kunnalta listaus rakennusvalvontaviranomaisen vaatimista lupahakemuksen liitteistä. Yleensä tähän riittää kaavoituksen tai YVA:n aikana tehdyt selvitykset. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Kaikki yli 30 metriä korkeat rakennelmat lentoasemien lähellä ja muualla sijaitsevat yli 60 metriä korkeat rakennelmat vaativat lentoesteluvan, joka tulee anoa tuulivoimaloiden rakentamista varten Liikenne- ja viestintävirastolta eli Trafilta. Luvan saamiseksi tulee varmistaa, että tuulivoimalat eivät häiritse ilmailua palvelevia laitteita tai lentoliikennettä eikä voimalat saa aiheuttaa vaaraa lentoturvallisuudelle. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Puolustusvoimien hyväksyntä tarvitaan, jos tuulivoimala on yli 50 metriä korkea. Hyväksyntää kannattaa hakea aikaisessa vaiheessa, sillä se tarvitaan viimeistään kaavoitusvaiheessa. Myös Suomen Erillisverkot Oy:ltä tarvitaan tuulivoimalausunto, ja se tarvitaan ennen kuin Puolustusvoimat laativat lausunnon. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Tuulivoimaloiden ympäristövaikutuksia hallitaan niiden huolellisella sijoittamisella, minkä takia ympäristölupaa ei yleensä tarvita. Jos voimaloista saattaa aiheutua melu- ja välkevaikutuksia lähikiinteistöille, silloin tulee hakea ympäristölupaa kunnan ympäristösuojeluviranomaiselta. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Maatuulivoimalat ei yleensä tarvitse vesilupaa, mutta jos voimalat vaikuttavat vesistöihin jollakin tavalla, silloin vesilupa pitää hakea aluehallintovirastolta. Merituulivoimalat tarvitsevat aina vesiluvan. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Jos tuulivoimaloita halutaan purkaa kaavoitetuilla tuulivoima-alueilla, silloin siihen tarvitaan purkamislupa. Purkamislupaa varten selvitetään, miten purkamistyö järjestetään, miten huolehditaan asianmukaisesti purkamisesta syntyvän rakennusjätteen käsittelystä sekä mitä käyttökelpoisia rakennusosia pystyisi vielä käyttämään muualla. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

5.5 Projektin vaiheet

Kesto tuulivoimapuiston alkuselvityksistä valmiiseen on 4-6 vuotta. Ensimmäiseksi etsitään sopiva alue tuulivoimapuistolle ja tehdään sille esiselvitys, jonka jälkeen neuvotellaan kunnan ja maanomistajien kanssa sekä laaditaan myös vuokrasopimus. (Motiva Oy 2022.)

Alueelle tehdään myös tuulimittauksia, jotta tiedetään, onko alue sopiva tuulivoimapuistolle. Jos alue on tuulivoimalle soveltuva, tehdään kaavoitus ja lopulliset neuvottelut verkonhaltijan kanssa sekä haetaan tarvittavat luvat. Tämän jälkeen aloitetaan maanrakennustyöt eli rakennetaan tiet, perustukset ja liitosjohto alue tai kantaverkkoon. Myös voimaloiden välille tehdään sähköyhteydet, jonka jälkeen voimaloiden rakentaminen alkaa. (Motiva Oy 2022.)

5.6 Purkaminen

Tuulivoimaloiden käyttöikäksi on arvioitu 25 vuotta, mutta nykyisin rakennettavat voimalat voivat olla käytössä jopa yli 30 vuotta, tästä huolimatta materiaalien kierrätystä suunnitellaan jo etukäteen huolellisesti. Elinkaarensa päähän tulleiden tuulivoimaloiden kunto arvioidaan, että kannattaako ne huoltaa vai korjata, sillä niiden käyttöikä voi pidentää huomattavasti. Mietitään myös, olisiko vanhan tilalle järkevämpää rakentaa uusi voimala, jolla saisi tuotettua enemmän energiaa. (Motiva 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Ennen purkamista käydään keskustelua kunnan sekä maanomistajan kanssa, jossa käydään läpi, voisiko sopimuksen uusia ja jatkaa tuulivoimalan tuotantoa. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Tuulivoimaloista voidaan kierrättää jopa 80-90 prosenttia, jollei voimalaa myydä muualle. Tuulivoimaloiden lavat ovat ongelmallisimpia, sillä ne on tehty komposiittimateriaalista, mutta niitä voidaan käyttää esimerkiksi sementin valmistukseen tai tulevaisuudessa rakennusmateriaalina. Torni on iso elementti, jossa on paljon maametalleja, jotka ovat arvokkaita. Perustukseen on olemassa kaksi erilaista purkamistapaa, joko sen pinta kuoritaan pois ja maisemoidaan tai sitten se poistetaan kokonaan. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

5.7 Ympäristö- ja muut vaikutukset

Tuulivoimalla on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia ympäristöön. Suurin vaikutus on se, että tuulivoimala vähentää hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöjä, mikä tarkoittaa sitä, että ilma, vesi tai maaperä ei saastu. Tuulivoiman hiilidioksidipäästöt ovat 10-11 g/kWh, jotka koostuvat rakentamisesta, kuljettamisesta ja huolloista, mutta itse tuotannosta ei synny päästöjä. Voimaloiden alueella teiden kunnossapidosta pidetään huolta, jotta voimaloita päästään huoltamaan ja korjaamaan tarvittaessa. Jos tiet ovat huonossa kunnossa, niitä kunnostetaan tai tilalle rakennetaan uusi tie, josta hyötyy myös maanomistajat ja metsästäjät. Rakentaminen tuo tuloja kunnalle ja kuntalaisille sekä työllistää monia eri aloilta. (ELY-keskus 2021, 4-5; Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

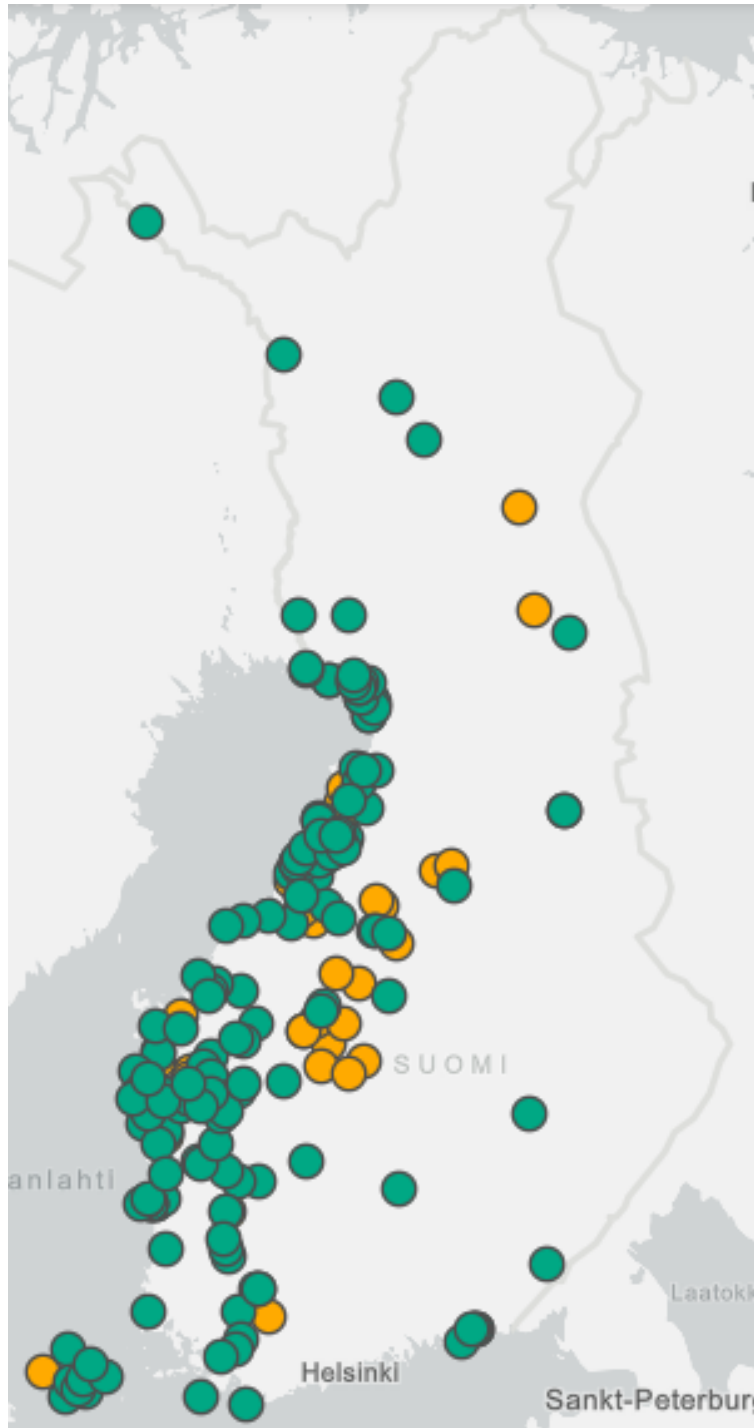
Negatiivisia vaikutuksia ovat maiseman muutokset, ympäristömelu, lapojen välke ja mahdolliset vaikutukset eläimiin. Häiriötä voi aiheutua myös tutkayhteyksiin sekä radio- ja TV-verkkoihin. Vaikutukset riippuvat monista tekijöistä, mitkä ovat hankkeen koko ja toteutustapa, sijoituspaikan olosuhteet ja alueen muut käyttömuodot. (Motiva Oy 2022; Suomen tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

6 TUULIVOIMA SUOMESSA

6.1 Nykytilanne

Suomessa oli vuoden 2020 lopulla toiminnassa olevia tuulivoimaloita yhteensä 821 kappaletta. Uusia voimaloita rakennettiin 67 kappaletta, jolloin tuulivoimakapasiteetti kasvoi 2 586 MW ja jolla tuotettiin 7,8 TWh sähköä. Vuonna 2021 tuulivoimaloita rakennettiin 141, jolloin tuulivoimaloita on tällä hetkellä 962. Uusien voimaloiden ansiosta kokonaiskapasiteetti oli 3 257 MW, mitkä tuottivat 8,1 TWh sähköä. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022c.)

Tuulivoimalat ovat rakennettu pääasiassa rannikko- ja merialueille, mutta myös tuntureille ja meren lähellä oleville aukeille paikoille, sillä ne ovat kannattavinta rakentaa tuulisille alueille, jotta niistä saisi suurimman hyödyn irti. Tuulivoimaloita on vähemmän sisämaassa, koska siellä ei tuule paljoa, että sinne olisi kannattava pystyttää niitä. Voimaloiden toimintalämpötilaraja on Suomessa -30 °C, mikä tarkoittaa sitä, että lämpötilan laskiessa voimala pysäytetään tai jos se on ollut pysähtyneenä, sitä ei käynnistetä. Alla olevasta kuvioista 8 näkee tuotannossa (vihreä) ja rakenteilla (keltainen) olevat voimalat. (Motiva Oy 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022c.)



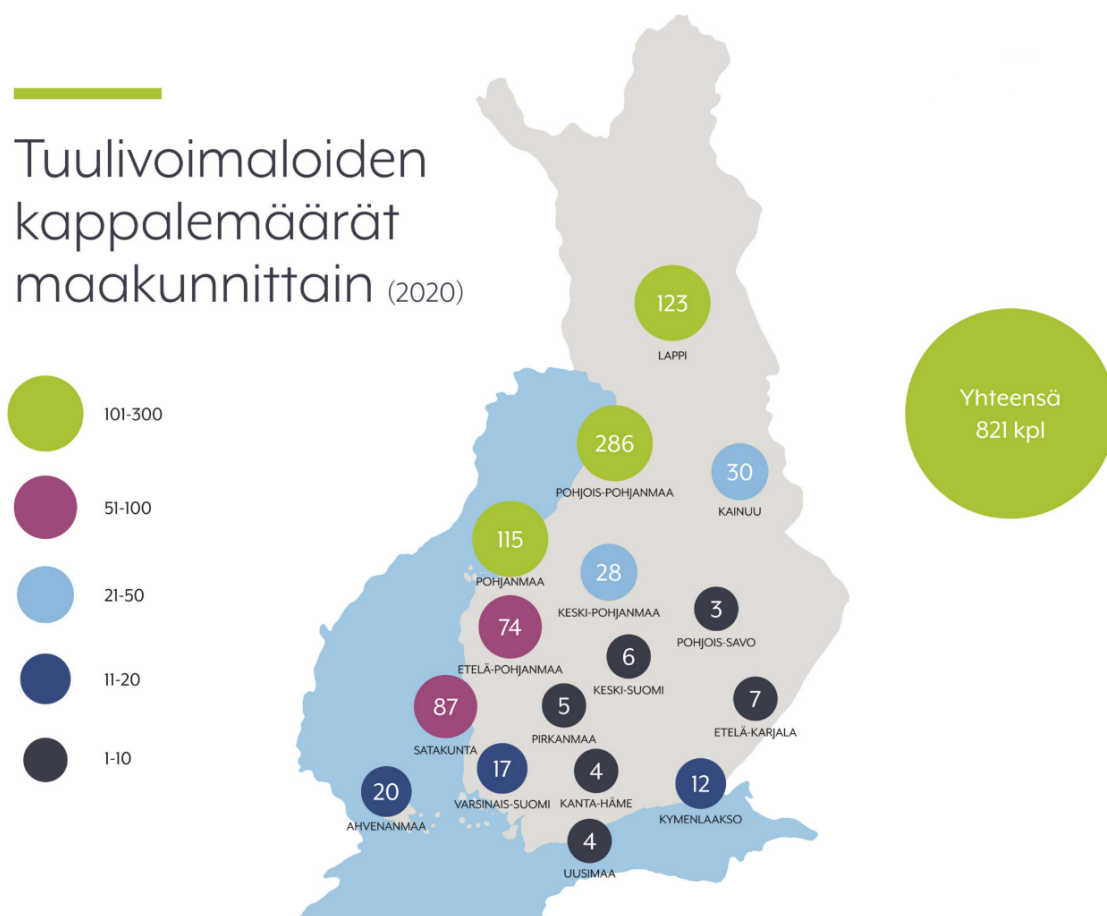
Kuvio 7. Toiminnassa ja rakenteilla olevat voimalat (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022c).

Tuulivoimakapasiteetti on tuonut investointeina vuoden 2018 loppuun mennessä yli 6 miljardia euroa. Kustannuksiin vaikuttavat voimaloiden hinta sekä muut kustannukset, joita ovat tiet ja sähköverkkoliittymän rakennus. Tuulivoimaloiden hintaa nostaa, jos lautojen pitää olla pidemmät tai voimalan tornien tulee olla korke-

ampia. Investointikustannukset ovat noin 12-15 miljoona euroa / MW maalle rakentaessa. Mitä useampi voimala rakennetaan, sitä enemmän kustannukset laskevat, sillä pienien hankkeiden kustannukset ovat suuremmat suhteessa niiden tuotantoon. Tyypillisesti 65-80 % kokonaisinvestoinnista on tuulivoimalaitosten osuus, sillä loput koostuvat muun muassa maarakennustöistä, sähkötöistä ja sähköverkkoon liittämisestä. Tuotantokustannuksista suuriosa menee rahoitukseen, sillä niiden osuus voi olla 30-40 %. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

6.2 Määrät maakunnittain

Suurin osa tuulivoimaloista ovat sijoitettu Pohjois-Pohjanmaalle, jossa on 39 % Suomen tuulivoimaloista. Tuulivoimaloita rakennetaan tuntureille sekä rannikon läheisyyteen Kemistä Poriin. Tällä hetkellä Lappiin on suunnitteilla ja rakenteilla kymmenesosa maan tuulivoimahankkeista. Kuviossa 9 näkyy miten tuulivoimalat ovat sijoittuneet maakunnittain. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022a.)



Kuvio 8. Tuulivoimalat maakunnittain vuonna 2020 (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022a).

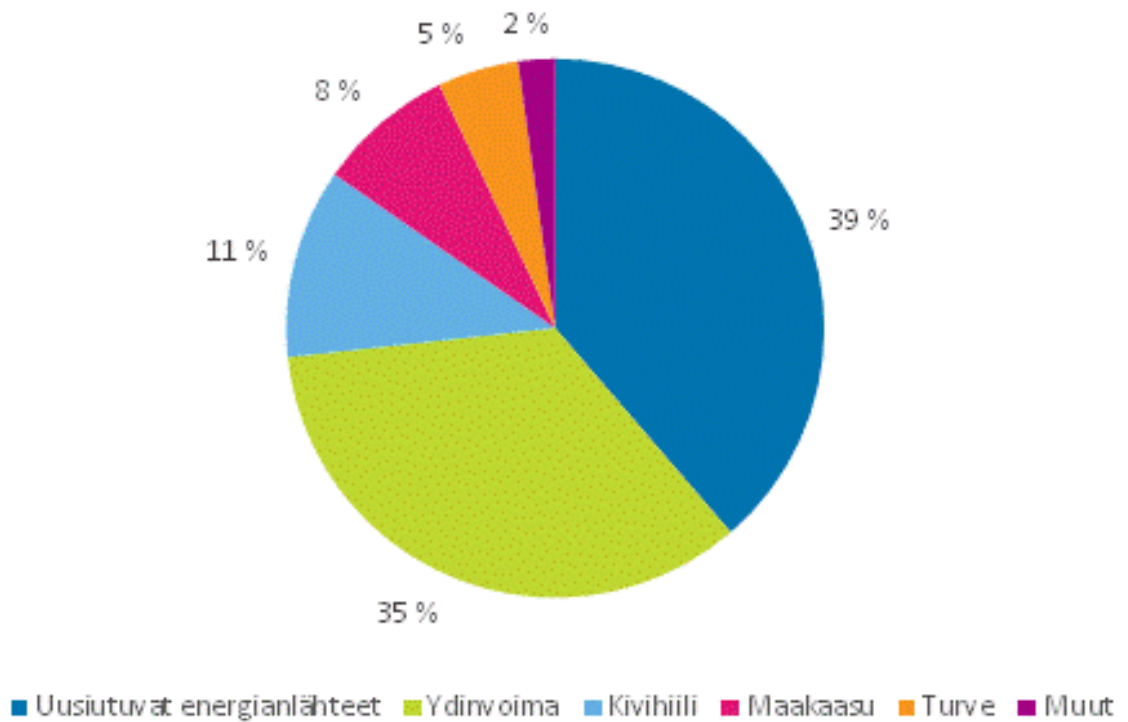
Tuuliatlaksesta pystyy seuraamaan tuuliolosuhteita, jota voidaan hyödyntää suunnitteilla oleviin voimaloihin, minkä takia siitä on tullut hyödyllinen työkalu tuulivoimarakentajille sekä kaavoittajille. Se sisältää dynaamisen karttaliittymän, jonka ansiosta Suomen tuuliolosuhteita pystyy tarkastelemaan. (Motiva Oy 2022.)

Suurin tuulipuisto on Pohjanmaalla Kristiinankaupungissa sijaitseva Metsälä, jossa tuulivoimaloita on 34. Närpiöön Hedetin tuulivoimapuistoon rakennettiin 18 voimalaa vuonna 2019, mutta suurin tuulivoimakunta on Kalajoki, jossa on 64 tuulivoimalaa. Vuonna 2020 Närpiöön nousi Kalaxin tuulivoimapuisto, joka on vuoden 2020 käyttöönotetuista puistoista vuosituotannoltaan suurin. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

6.3 Sähkön tuotanto uusiutuvilla energianlähteillä

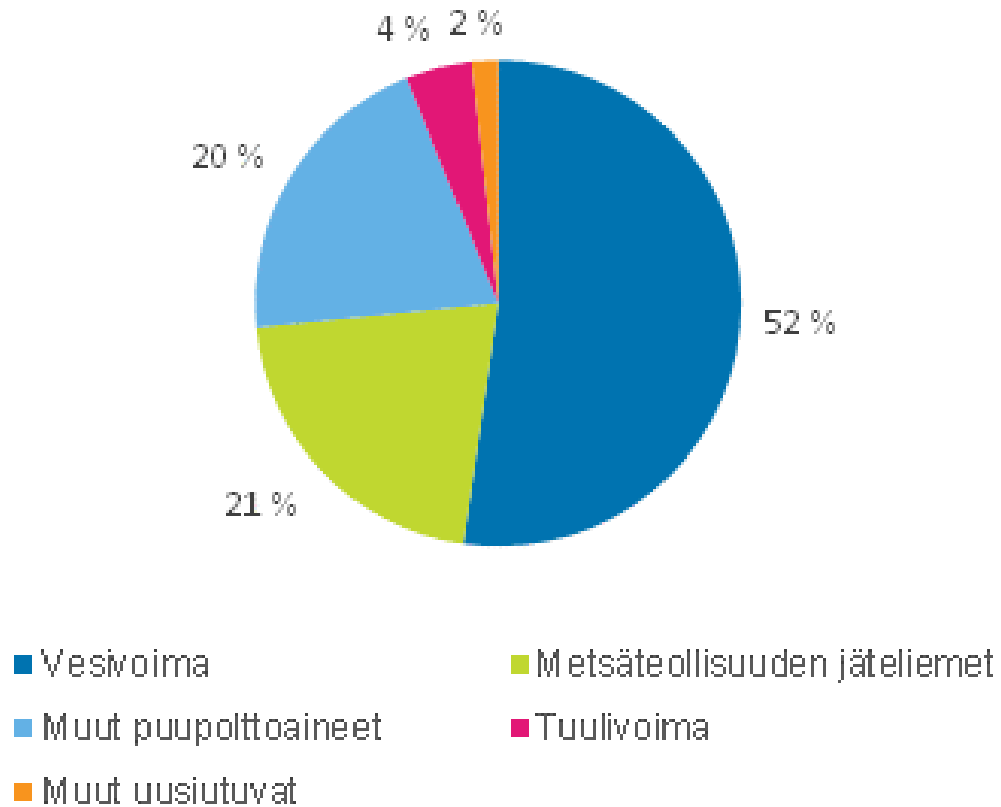
Tuulivoiman sähkön tuotanto on kasvanut kuuden vuoden aikana 19 %. Tuulivoiman yleistyessä lauhdevoiman tuotanto on laskenut, minkä tilalle on tullut tuulivoima sekä aurinkovoima.

Vuonna 2014 sähköä tuotettiin ydinvoimalla 35 % ja uusiutuvilla energianlähteillä 39 % (Kuvio 10). Kolmanneksi eniten sähköä on tuotettu kivihieillä, jonka osuus on ollut 11 %.



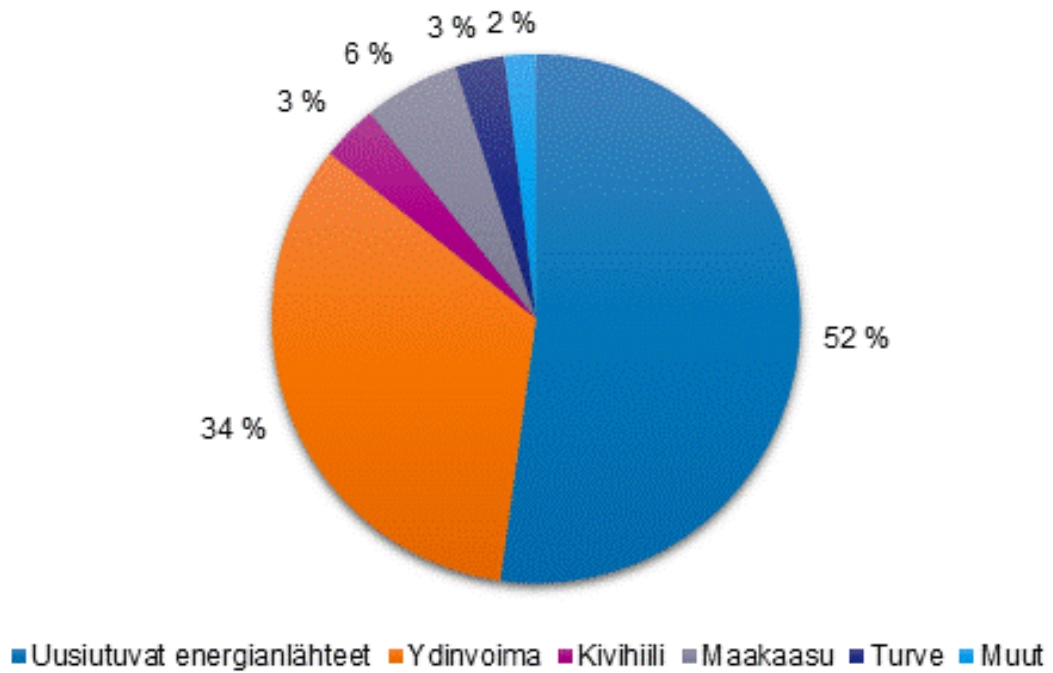
Kuvio 9. Sähkön tuotanto energialähteittäin (Tilastokeskus 2022).

Tuulivoiman osuus oli vain 4 % (Kuvio 11), kun taas vesivoiman osuus oli 52 %. Kuvio 11 näkee sähkön tuotannon prosenttimäärät vuonna 2014 uusiutuvilla energialähteillä.



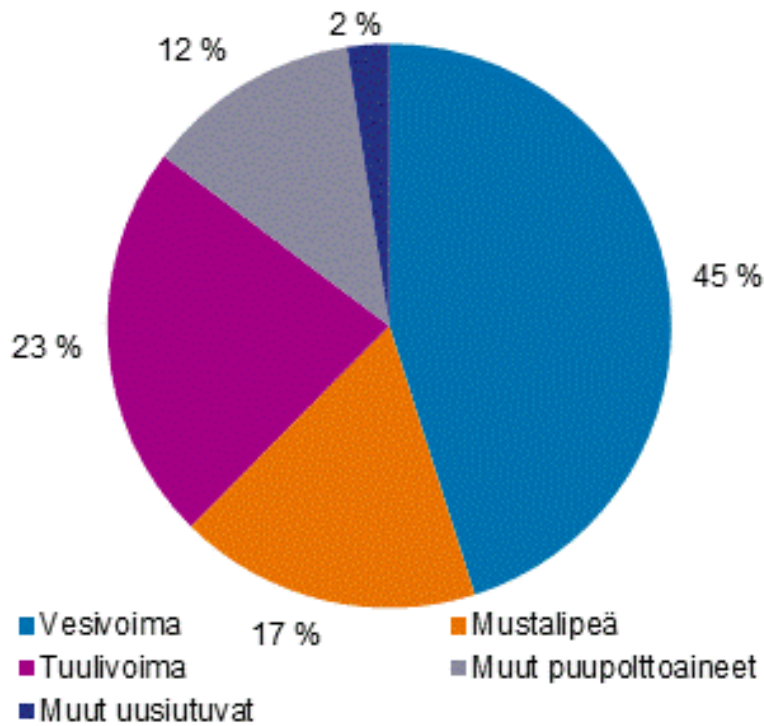
Kuvio 10. Sähkötuotanto uusiutuvilla energialähteillä (Tilastokeskus 2022).

Vuonna 2020 sähköä tuotettiin ydinvoimalla 34 % ja uusiutuvilla energialähteillä 52 % (Kuvio 12). Ydinvoiman määrä on laskenut 1 % kuuden vuoden aikana, mutta uusiutuvien energialähteiden määrä on noussut 13 %. Sähköä tuotettiin kolmanneksi eniten maakaasulla, jonka osuus on ollut 6 %. Kivihiilen osuus on laskenut 5 %.



Kuvio 11. Sähkön tuotanto energialähteittäin (Tilastokeskus 2022).

Tuulivoiman osuus oli 23 % (Kuvio 13) ja vesivoiman 45 %. Kuvio 13 näkee sähkön tuotannon prosenttimäärät vuonna 2020 uusiutuvilla energialähteillä.

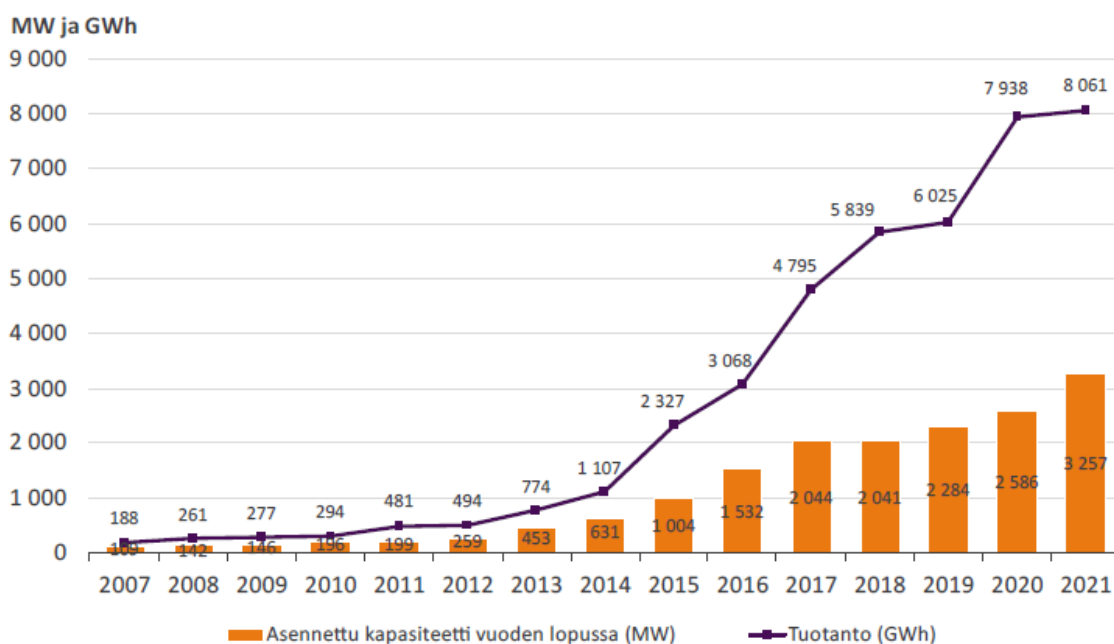


Kuvio 12. Sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä (Tilastokeskus 2022).

6.4 Vuosituotanto 2021-2023

Suomessa tuulivoimaloiden määrä oli 821 vuoden 2020 lopulla. Vuonna 2021 tuulivoimaloita oli 1028. Ennusteena on, että vuonna 2022 voimaloiden määrä olisi kasvanut jopa 1 265 sekä vuonna 2023 voimaloiden määrä olisi 1 451. Tämä meinaa sitä, että tehon olisi tarkoitus kaksinkertaistua tulevan kolmen vuoden aikana. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Vuonna 2021 tuulivoima kattoi sähköntuotannosta 11,7 % ja sähkönkulutuksesta 9,3 %. Tuulivoimakapasiteetti kasvoi 26 % ja tuotanto 1,5 % edellisvuodesta (Kuvio 13), josta huomaa, että tuulivoima on kasvussa. Kapasiteetin tavoitteena vuosien 2021-2023 aikana kaksinkertaistua vuoden 2020 valmistuneesta kapasiteetista. Maaliskuuhun 2022 mennessä maatuulivoimahankkeita oli kartoitettu 44 466 MW ja merelle 9 905 MW. (Energiateollisuus ry 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)



Kuvio 13. Tuulivoiman kasvu (Energiateollisuus ry 2022).

Arvellaan, että vuonna 2024 tuulivoima kattaisi 20 % Suomen sähkönkulutuksesta. Vuoteen 2025 mennessä määrän odotetaan kasvavan 25 %. (Energiateollisuus ry 2022; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

6.5 Tuulivoimaennusteet

Ennusteiden laatiminen on haastavaa, sillä toteutumiseen vaikuttaa monet tekijät esimerkiksi nopea tuotantokustannusten lasku. Maailman energiajärjestö IEA on ennustanut, että uusiutuva energia kasvattaa kapasiteettiaan 50 % vuosien 2019 ja 2024 aikana, jossa neljännes tulee maatuulivoimasta ja 4 % merituulivoimasta. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Jos tuulivoimaloiden rakentaminen etenee Suomessa estettä, Suomen Tuulivoimayhdistyksen ennusteiden mukaan Suomella on mahdollisuus kasvattaa tuulivoimatuotanto 30 TWh vuoteen 2030 mennessä. On myös annettu ennuste, että vuoteen 2030 mennessä maatuulivoimatuotanto kasvaisi 26,5 TWh ja merituulivoimatuotanto 15 TWh. Vuonna 2040 mennessä Smart Energy Transition hankkeen mukaan tuulivoimatuotanto voisi olla 60 TWh. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

Tällä hetkellä Suomessa on noin 1 028 tuulivoimalaa, ja on arvioitu, että tuulivoimaloita rakennettaisiin lähivuosina jopa 200-300 uutta voimalaa. Tarkoittaa sitä, että vuonna 2030 ennuste on se, että tällä kasvulla yli neljännes kotimaan sähköstä tuotettaisiin tuulivoimaloilla. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.)

7 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli kerätä tietoa, mitä pystytään käyttämään tuulivoimaan perusteiden oppimiseen. Työ sisältää tietoa tuulivoiman menneisyydestä, nykytilanteesta ja tulevaisuudesta.

Opinnäytetyö aloitettiin kertomalla tuulimyllyjen kehityksestä tuulivoimaloiksi. Seuraavaksi kerrottiin tuulivoimalan rakenteesta ja mistä voimalan konehuoneisto koostuu. Tutkittiin, myös minkälaisia tuulivoimalatyyppejä on olemassa ja niiden eroavaisuuksista toisiinsa. Työtä tehdessä päällimmäisenä jäi mieleen, kuinka Betzin teorian mukaan teoreettisesti korkein tehokerroin on 0,59, silti optimitilanteessa tehokerroin on vain 0,4.

Lopuksi tutkittiin tuulivoimaa Suomessa. Saatiin selville, että suurin osa tuulivoimaloista sijaitsevat Pohjois-Pohjanmaalla, ja että vuonna 2021 Suomeen rakennettiin tuulivoimaloita 141 kappaletta. On ennustettu, että yli 25 % kotimaan sähkötuotannosta tapahtuisi tuulivoiman avulla, mikä viittaa siihen, että tuulivoima on tulevaisuus.

Opinnäytetyötä oli mielenkiintoista työstää, sillä aihe on pitkään ollut minulle kiinnostava ja tunnen, että tämä kirjallisuustutkimus on tuottanut perehdytystä aiheesta. Uskon, että tämän aiheen tutkiminen on minulle hyödyksi tulevaisuuden kannalta, sillä minua kiinnostaisi suuresti työskennellä tuulivoimaloiden parissa.

LÄHTEET

- ABB. 2011. Technical Application Papers No. 13. Wind power plants. Viitattu 1.5.2022. <https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf>
- ELY-keskus. Tuulivoiman yleisopas. 2021. Viitattu 5.5.2022. <https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/57296/Tuulivoiman+yleisopas.pdf/9f0ed0a3-7df6-ee6c-81ed-e90279b264fe?t=1636093932871>.
- Energiateollisuus ry. 2022. Energiavuosi 2021. Viitattu 5.5.2022. https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2021_netti.pdf
- EPV tuulivoima. 2021. Puhtaasti tuulen voimalla. Viitattu 1.11.2021. <https://www.epvtuulivoima.fi/>
- Ilmatieteenlaitos. 2022. Tuuliruusut. Viitattu 1.5.2022. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliruusut>
- Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.
- Motiva Oy. 2022. Uusiutuva energia: Tuulivoima. Viitattu 30.4.2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima
- Niinistö-Salmela, S. & Salmela, J. 2013. Mitä on energia? Tietoa selkokielellä. Kärkölä: Pieni Karhu.
- Peltonen, K. 2002. Hailuoto, Marjaniemen kalastajakylä. Museovirasto: Rakenushistorian kuvakokoelma.
- Sirelius, U. 1914. Mamsellityyppinen tuulimylly Vehmaalla. Museovirasto: Kansatieteen kuvakokoelma.
- Suomen hyötytuuli Oy. 2021. Tuulivoima. Viitattu 28.11.2021. <https://hyotytuuli.fi/tuulivoima/>
- Suomen tuulienergia Oy. 2010. Tekniikka tutuksi. Viitattu 14.11.2021. <http://www.suomentuulienergia.fi/>
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 1994. Tuulivoimaharrastajan opas. Viitattu 28.11.2021.
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022a. Aineistopankki. Viitattu 1.5.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/aineistopankki>
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022b. Tietoa tuulivoimasta. Viitattu 1.5.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2>
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022c. Tuulivoimalat Suomessa. Viitattu 1.5.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa>

Tilastokeskus. 2022. Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto. 2022. Energiateollisuus ry. Viitattu 28.8.2021. <https://www.stat.fi/til/sala-tuo/kuv.html>

Turunen, A. 1958. Hattuvaaran nelisiipinen varvastuulimylly. Pielisen museo.

Wilkins, M., Valjakka, N. & Palanterä, J. 2012. Vihreä elämä: Tuulivoima. Helsinki: Perhemediat.

Ympäristöministeriö. 2014. Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. Ympäristöhallinnon ohjeita 2014:4. Helsinki. Viitattu 30.4.2022. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42939/OH_4_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y