

# VIHREÄN SIIRTYMÄN TUOTEKEHITYS



# Sisällys

Tuulivoima.....	1
Tuulivoima yleisesti.....	1
Tuulivoimatekniikka .....	3
Hyötysuhde ja kapasiteettikerroin.....	7
Tuulivoimalatyypit.....	11
Teollinen tuulivoima ja vaaka-akseliset voimalat.....	11
Pientuulivoima ja pystyakseliset voimalat.....	13
Tuulivoiman kustannukset.....	15
Tuulivoiman elinkaari ja ympäristökysymykset.....	17
Tuulivoiman tulevaisuus .....	20
Lähteet .....	23

## Tuulivoima

Tämän osion jälkeen sinun pitäisi:

- Ymmärtää tuulivoimalan toimintaperiaate
- Tunnistaa, miten tuulivoimatuotanto riippuu tuulen nopeudesta
- Tunnistaa kapasiteettikertoimen ja huipunkäyttöajan käsitteet
- Hahmottaa miten paljon tuulivoimaa on Suomessa ja miten se vaikuttaa sähköjärjestelmään

## Tuulivoima yleisesti

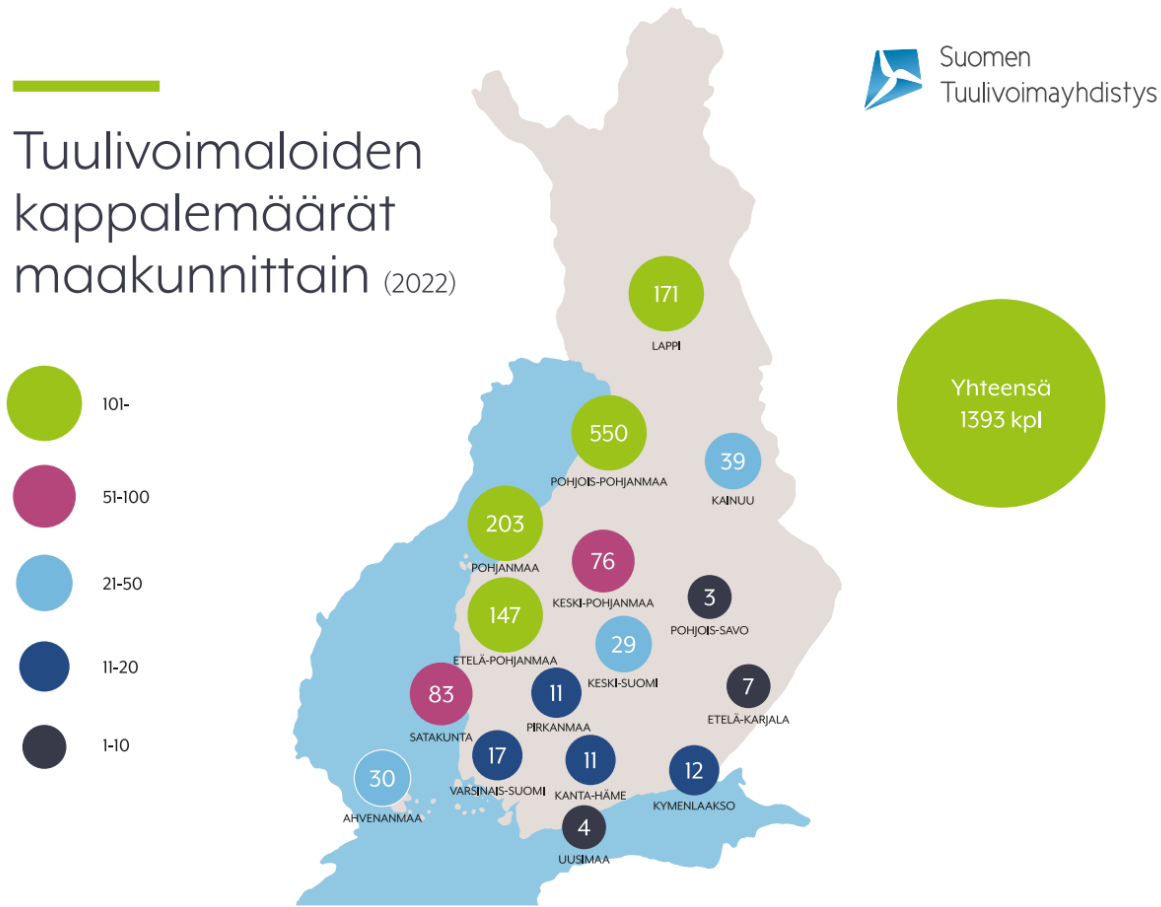
Tuulta on vuosituhansia hyödynnetty liikkumisessa mm. purjehduksessa sekä tuulimyllyjen avulla viljan jauhatukseen, vedennostoon ja kasteluun ja pienteollisuuden voimanlähteenä ennen höyrykoneen yleistymistä. Tuulen valjastamista sähköntuotantoon on käytetty huomattavasti lyhyemmän aikaa. Tässä osiossa keskitytään moderniin tuuliturbiinilla tapahtuvaan sähköntuotantoon.

Moni maa saa jo tänä päivänä merkittävän osan energiastaan tuulesta. Tanska tuottaa tuulivoimalla lähes puolet sähköstään, Irlanti kolmanneksen, Portugali ja Saksa reilun neljänneksen ja Britannia runsaan viidenneksen. Tuulivoimaa rakennetaan IEA:n mukaan nyt sellaisella vauhdilla, että viidessä vuodessa sen kapasiteetti voi maailmanlaajuisesti kaksinkertaistua ja vuosisadan puoliväliin mennessä jopa 11-kertaistua. Tuulivoima on aurinkovoiman ohella globaalisti nopeimmin kasvava puhtaan sähkön tuotantotapa. [Viljanen & Rantanen 2023.]

Tuulivoimarakentaminen alkoi Suomessa selkeästi myöhemmin kuin monessa muussa Euroopan maassa. Vuodesta 2012–2013 alkaen tuulivoimarakentaminen on kuitenkin päässyt hyvään vauhtiin myös Suomessa ja tuulivoiman osuus Suomen sähkönkulutuksesta on noussut viime



vuosien aikana tasaiseen tahtiin. Suomen Tuulivoimayhdistyksen arvion mukaan Suomella on tuulivoimapotentiaalia ainakin 30 TWh vuotuisen tuulivoimatuotantoon vuonna 2030. Suomen tuulivoimalat tuottivat vuonna 2022 sähköä 11,5 TWh, mikä vastasi Suomen sähkönkulutuksesta reilua 14 prosenttia. Vuonna 2022 Tuulivoimaloita oli Suomessa 1393 kappaletta ja ne jakautuivat kuvan 1 mukaisesti. [Tuulivoimaennusteita; Tuulivoimatuotanto kasvoi 41 prosenttia vuonna 2022.]



Kuva 1 Tuulivoimaloiden kappalemäärät maakunnittain (2022) [Tuulivoimaloiden kappalemäärät maakunnittain (2022)].

Tuulivoiman kehitys on tapahtunut tähän asti lähinnä turbiinien kokoa kasvattamalla: mitä pidemmät lavat ja korkeampi torni, sitä tehokkaampi voimala. Valtaosa tuuliturbiineista rakennetaan maalle, missä ne vievät tilaa ja voivat aiheuttavat maisemahaittaa. Yhden megawatin tuottamiseksi vaaditaan vajaan 30 hehtaarin tuulipuisto, siinä missä saman verran energiaa tuottava hiilivoimala mahtuu viiden hehtaarin alueelle. Tuulivoimaa rakennetaan Suomeenkin

lisää, sillä se vähentää energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä, on edullista, tuo työpaikkoja ja kiinteistöverotuloja kunnille. [Viljanen & Rantanen 2023; Miksi tuulivoimaa.]

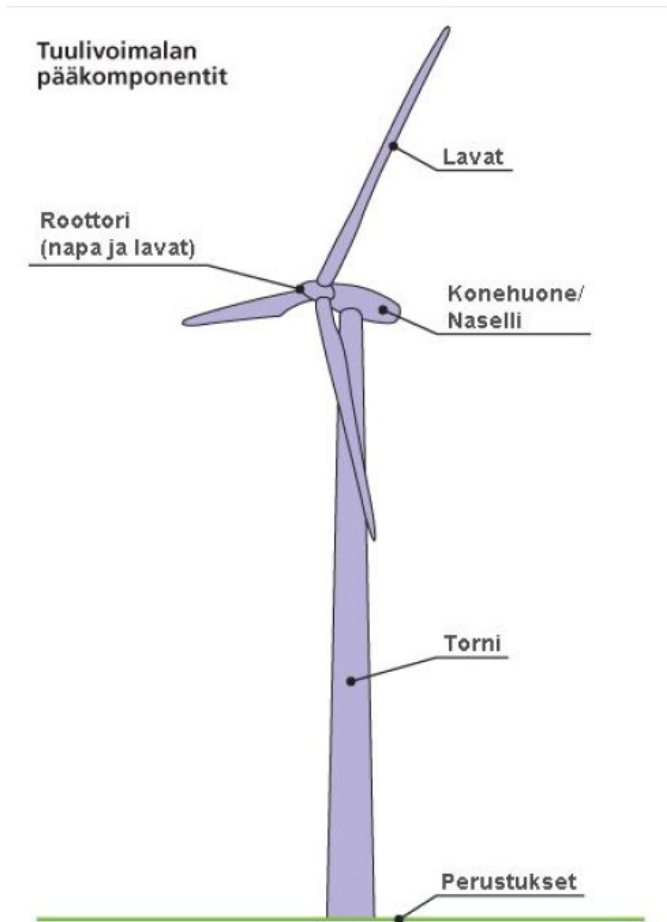
Suomessa rannikoilla, merialueilla, tuntureilla ja monin paikoin myös sisämaassa on hyviä alueita tuulivoiman tuotantoon. Suomessa erityisesti talvikuukaudet ovat tuulisia. Lisäksi kylmä talvi-ilma on tiheämpää kuin lämmin ilma, joten tuotantoa tulee talvella senkin vuoksi enemmän kuin kesällä. Tuulivoima tuottaa eniten sähköä silloin kun sitä myös kulutetaan eniten, ja se sopiikin siksi hyvin Suomen pohjoisiin oloihin. [Tuulivoima Suomessa; Tuulivoimatuotanto talvella.]

Tuulivoima on tänä päivänä edullisin tapa rakentaa uutta sähköntuotantokapasiteettia. Suurin osa tuulivoiman tuotantokustannuksista muodostuu tuulivoimahankkeen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Kun tuulivoimala on valmis, kuluja tulee enää sen ylläpidosta ja huollosta. [Miksi tuulivoimaa.]

## Tuulivoimatekniikka

Tuulen energia on peräisin aurinkoenergiasta kuten muutkin uusiutuvat luonnonvarat (paitsi vuorovesi ja maalämpö). Tuuli syntyy, kun ilma liikkuu ilmassojen lämpötila- ja paine-erojen seurauksena. Tuulivoima perustuu siihen, että tuulen liike-energiaa muutetaan tuulivoimalan akselin pyörimisenergiaksi tuulivoimalan lapojen pyörimisen avulla. Akseli puolestaan pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. Tuotettu sähkö johdetaan muuntajan kautta sähköverkkoon. [Tuulivoiman yleisopas: 1.]

Tuulivoimala rakentuu roottorista, jossa on voimalan napa ja lavat, konehuoneesta eli nasellista (muun muassa generaattori ja vaihteisto), muuntajasta sekä tornista ja maassa olevista perustuksista (Kuva 2). Nykyaikaiset tuulivoimalat ovat suurimmaksi osaksi kolmilapaisia ja vaaka-akselisia. Lapojen pyyhkäisyypinta-ala voi olla jopa 2 hehtaarin luokkaa. Tornit ovat yleensä putkimaisia terästoreja, jotka on kiinnitetty betonisiin tai teräsrakenteisiin perustuksiin. [Tuulivoiman yleisopas: 1.]



Kuva 2 Tuulivoimalan osat [Tuulivoiman yleisopas: 2].

Tuulipuistoksi kutsutaan aluetta, jolla on useita toisiinsa liitettyjä tuulivoimaloita, ja jotka kytkeytyvät yhtenä kokonaisuutena sähköverkkoon. Voimalat tulisi sijoittaa tuulipuistoissa riittävän kauaksi toisistaan, etteivät ne vaikuta toistensa tehoon. Nyrkkisäännön mukaan voimaloiden välisen etäisyyden pitää olla noin viisi kertaa roottorinhalkaisijan verran eli voimaloista riippuen noin 600 – 1000 metriä. [Tuulivoimatekniikka.]

Tuulivoimaloiden runko valmistetaan yleensä teräksestä ja konehuonetta suojaava kuori lasikuidusta. Roottorin lavat valmistetaan yleisimmin komposiittimateriaaleista, joissa käytetään lasikuitua ja joskus myös hiilikuitua tai puuta yhdessä epoksin tai polyesterin kanssa. Erityisesti lapojen materiaalien kierrätys on osoittautunut hankalaksi ja on vasta aivan alussa. Lisäksi teräksen ja betonin tuotanto aiheuttavat paljon hiilidioksidipäästöjä.

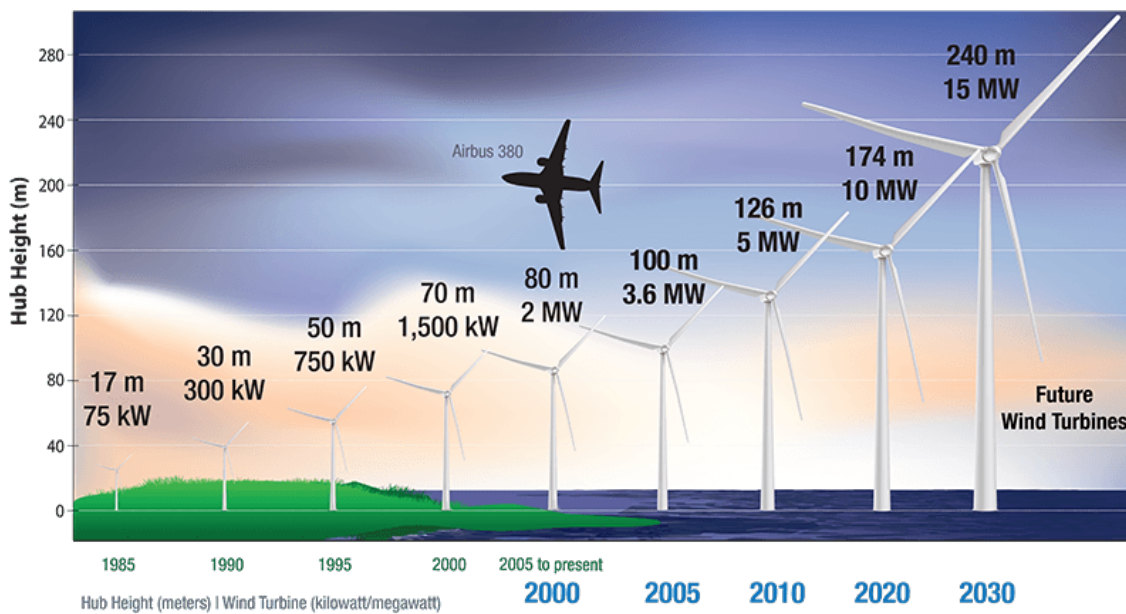
Tuulivoimatoimijat kuten saksalainen energijätti RWE ja ruotsalainen Modvion ovatkin kehilleet vastauksena puusta, muun muassa lvl-puusta (laminated veneer lumber), tehtävää tuulivoimalaa, jotka halutaan ottaa käyttöön heti, kun ne ovat kaupallisesti valmista tekniikkaa (kuva 3). Stora Enso on kertonut kehittävänsä puusta tuulivoimalan lapamateriaalia saksalaisen startupin Voodin Bladen kanssa. Pienentyvien hiilidioksidipäästöjen ohella puiset tuulivoimalarakenteet ovat myös kevyempiä kuljettaa ja asentaa kuin teräksiset. Yhtiöt visioivat, että parhaimmillaan tuulivoimalasta voi tulla hiilinegatiivinen eli se varastoi hiiltä enemmän kuin sen tuotannossa on syntynyt hiilidioksidipäästöjä. [Tuulivoimaloiden rakenne; Laatikainen 2023.]



*Kuva 3 Puinen tuulivoimala tuotannossa Ruotsissa [Laatikainen 2023].*

Käynnistyäkseen tuulivoimalaitos vaatii noin 3 m/s tuulen. Laitoksen teho lisääntyy nopeasti tuulen nopeuden kasvaessa. Tuulivoimaloiden kokoa kuvataan usein nimellisteholla, joka tarkoittaa tehoa, jonka voimala voi enimmillään tuottaa. Nimellisteho saavutetaan voimaloissa, kun tuulen nopeus on välillä 10–15 m/s. Käytännössä voimala tuottaa sähköä aina, kun tuulen nopeus on välillä 3–25 m/s. Kun tuulen nopeus kasvaa 15–25 m/s, tehoa joudutaan mahdollisesti rajoittamaan. Yleensä laitos pysäyttää itsensä yli 25–30 m/s tuulen nopeuksissa, jotta vältetään laitevaurioita. [Tuulivoimateknologia.]

Tuulivoimaloiden koko ja teho on kasvanut moninkertaiseksi viimeisen 35 vuoden aikana (kuva 4) ja tekniikka on muutenkin parantunut merkittävästi. Kun vuonna 1985 tuulivoimalan roottorin halkaisija oli 17 metriä, on se nykyään maatuulivoimaloissa jopa yli 150 metriä. Teho on kasvanut samalla 75 kilowatista maatuulivoimaloiden 5 000 kilowattiin (5 MW) ja merituulivoimaloiden yli 10 000 kilowattiin (10 MW). Voimaloiden tornin korkeus on kasvanut 22 metristä Saksan korkeimpien voimaloiden lähes 180 metriin. Suomessa uusien voimaloiden napakorkeus on tyypillisesti 150 – 175 metriä. Jo pystytettyjen maatuulivoimaloiden teho on yleensä 1–3 megawattia (MW), kun nyt rakenteilla ja suunnitteilla olevien teho on 4–6 MW. [Tuulivoimatekniikka; Tuulivoimateknologia.]



Kuva 4 Tuuriturbiinien koot eri vuosina ja arvio tulevasta [National Renewable Energy Laboratory]

Tuulivoimaloiden tuottama energia riippuu lapojen korkeudella vallitsevasta tuulesta. Tuulen nopeus on maan pinnalla likimain nolla ja kasvaa siitä ylöspäin mentäessä. Korkeammalla myös tuuliolot ovat myös tasaisemmat. Eli mitä korkeammalle tuulivoimalan roottori saadaan, sitä paremmat ovat olosuhteet tuotannolle. Ensimmäisiin tuulivoimaloihin verrattuna modernien tuulivoimaloiden vuosituotto on yli satakertaistunut. Tämä on muun muassa aerodynamiikan kehittymisen ansiosta kasvaneen hyötysuhteen ja korkeampien tuulivoimaloiden, ja samalla parempien tuuliolosuhteiden ansiota. Vuosituoton kasvu ja voimalatekniikan kehittyminen kaikilta

osin ovat laskeneet tuulivoimalla tuotetun sähkön hintaa hyvin voimakkaasti.  
[Tuulivoimatekniikka; Tuulivoiman yleisopas: 2; Tuulivoimatekniikan perusteita (osa1).]

## Hyötysuhde ja kapasiteettikerroin

Ilmavirtauksen eli tuulen laskennallinen teho muodostuu käytännössä vain sen liike-energiasta. Osoittautuu kuitenkin, että tuulivoimalan roottorin läpi virtaavan ilmamassan tehosisällöstä saadaan teoriassa hyödynnettyä vain noin 59 %. Tätä tuulivoimalan kokonaishyötysuhteen teoreettista maksimiarvoa tai kerrointa  $16/27 = 0,593\dots$  kutsutaan Betzin luvuksi. Häviöt johtuvat siitä, että tuulen nopeus roottorin takana on pienempi kuin ennen roottoria, ja nopeuden pienentyessä ilmamassa laajenee, koska massavirta säilyy vakiona. Tuulivoimalasta saatava maksimiteho saadaan tilanteessa, jossa tuulen nopeus laskee kolmasosaan siitä nopeudesta, mikä sillä oli ennen tuulivoimalan roottorin läpöä [Tuulivoimaloiden rakenne; Tuulivoimatekniikan perusteita (osa1).]

Tuulivoimala ei käytännössä pysty hyödyntämään tuulesta saatavissa olevaa teoreettista tehoa. Eri komponenttien, kuten roottorin, vaihdelaatikon ja generaattorin, tuottamat häviöt muodostavat lopulta tuulivoimalan kokonaishyötysuhteen, joka on parhaimmillaan 0,35-0,45. Tuulivoimalan tuottama sähköteho  $P$  on:

$$P = \eta_{kok} * \frac{1}{2} \rho A_R v^3$$

jossa  $\eta_{kok}$  on kokonaishyötysuhde,  $\rho$  ilman tiheys,  $A_R$  roottorin pyörähdyspoikkipinta-ala ja  $v$  tuulen nopeus. [Tuulivoimatekniikan perusteita (osa1).]

Kaavasta voidaan huomata, että tuulivoimalan teho on suoraan verrannollinen roottorin pyörähdyspoikkipinta-alaan ( $A_R$ ), mikä puolestaan riippuu läpöjen pituudesta ( $A_R = \pi L^2$ ). Eli kun pituus  $L$  kaksinkertaistuu, niin teho nelinkertaistuu. Teho taas riippuu ilman tiheydestä  $\rho$ . Niinpä samalla tuulen nopeudella voimalan teho on talvipakkasilla suurempi kuin kesällä koska ilman tiheys kasvaa lämpötilan laskiessa. Eniten saatuun tehoon vaikuttaa kuitenkin tuulen nopeus, sillä teho on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Kun tuulen nopeus kaksinkertaistuu, niin saatu teho kahdeksankertaistuu. Kuvassa 5 on havainnollistettu

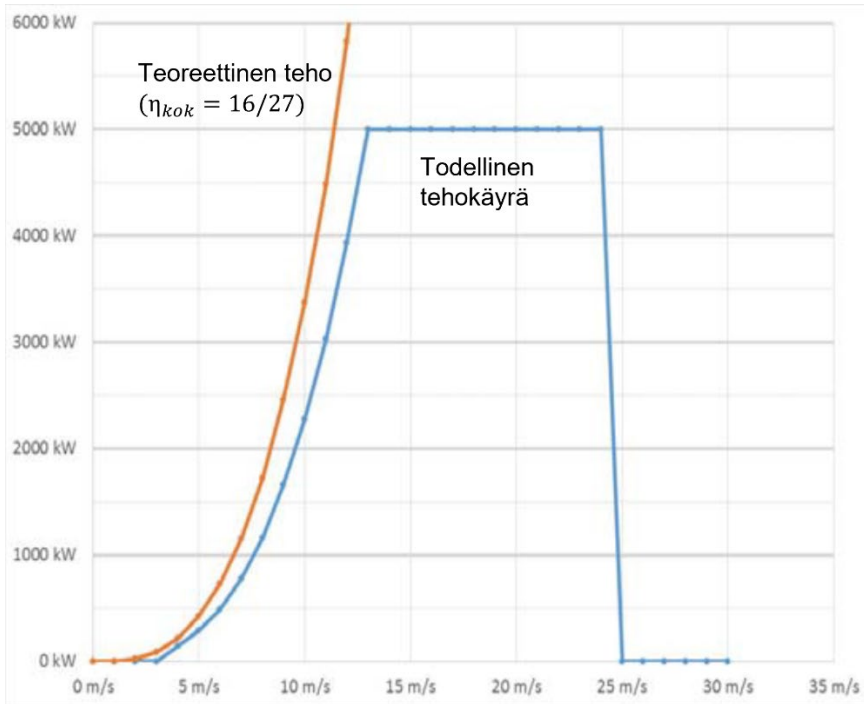
tuulivoimalan tehon muodostumisen kannalta oleelliset komponentit. [Tuulivoimatekniikan perusteita (osa1).]



*Kuva 5 Tuulivoimalan tehon muodostuminen [mukaillen Taskinen 2020].*

Tuulivoimalle on ominaista, että sähköntuotanto vaihtelee sääolosuhteiden mukaan. Tuulivoimalan tuottamaa tehoa joudutaan myös käytännössä jatkuvasti säätämään, sillä voimalan rakenteellista nimellistehoa ei saa ylittää. Kuten aiemmin todettu, voimalat käynnistyvät tyypillisesti vasta sitten, kun tuulen nopeus ylittää arvon noin 3–4 m/s. Teho kasvaa hyvin nopeasti tuulen nopeuden kasvaessa ja voimalan nimellisteho saavutetaan tuulen nopeudella noin 10–15 m/s. Tämän jälkeen tuulivoimalan tehoa rajoitetaan useimmiten joko sakkau- tai lapakulmasäädöllä ja pidetään likimain vakiona nimellistehossaan. Kun tuulen nopeus ylittää noin 25–30 m/s, roottorin pyöriminen pysäytetään kokonaan. [Tuulivoimaloiden rakenne; Tuulivoimatekniikan perusteet (osa 2).]

Tilanne, jossa tuulivoimalan tehoa joudutaan kovalla tuulella rajoittamaan esimerkiksi siipien lapakulmasäädöllä, tarkoittaa käytännössä kokonaishyötysuhteen tahallista heikentämistä. Pahimmillaan kokonaishyötysuhde on vain murto-osa maksimihyötysuhteesta. Kuvassa 6 on esitetty nimellisteholtaan 5 MW tuulivoimalan todellinen tehokäyrä sekä vertailuna tuulesta saatavissa oleva teoreettinen teho. [Tuulivoimatekniikan perusteet (osa 2).]



Kuva 6 Tuulivoimalan todellinen tehokäyrä [mukaillen Tuulivoimatekniikan perusteet (osa 2)].

Tuulivoimala ei siis kykene hyödyntämään kaikkia tuulen nopeuksia ja niinpä se toimii rakenteellisella nimellistehollaan käytännössä vain pienen osan vuodesta. Niinpä tuulivoimaloiden energiantuotanto vaihtelee tuulen voimakkuuden vaihdellessa välillä 0 % – 100 % nimellistehosta. Tuulivoimaloiden yhteydessä vuotuinen huipunkäyttöaika kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan. Esimerkiksi 3500 tunnin huipunkäyttöaika tarkoittaa sitä, että laitos on tuottanut vuoden aikana energiamäärän, jonka se tuottaisi toimiessaan nimellistehollaan 3500 tuntia. Tuulivoimalan huipunkäyttöaika  $t_{hk}$  lasketaan kaavalla:

$$t_{hk} = \frac{E_{tod}}{P_{nim}}$$

jossa  $E_{tod}$  on tuulivoimalan tuottama todellinen vuosienenergia ja  $P_{nim}$  tuulivoimalan nimellisteho. [Tuulivoimatekniikan perusteet (osa 2); Paljon tuulivoimalat tuottavat sähköä ja mitä tarkoittaa huipunkäyttöaika?.]

Tuulivoimaloiden huipunkäyttöajat ovat kasvaneet voimakkaasti teknologian kehittymisen, korkeampien tornien ja pitempien lapojen ansiosta. Suomessa hyvätuulisella paikalla maatuulivoimalan huipunkäyttöaika on tänä päivänä (2019) noin 3 000–4 000 tuntia. Merituulivoimalan huipunkäyttöaika on huomattavasti tätä korkeampi, 4 200–4 600 tuntia. [Paljon tuulivoimalat tuottavat sähköä ja mitä tarkoittaa huipunkäyttöaika?.]

Vastaavasti kapasiteettikerroin kuvaa kuinka paljon tuulivoimala tuottaa vuositason sähköä suhteessa sen teoreettiseen maksimiin. Tuulipuistot tuottavat sähköä yli 90 % ajasta, vaikka eivät tuota koko aikaa täydellä teholla. Tuotantopiikissä tuulivoimaloiden kapasiteettikerroin voi lähennellä 100 prosenttia. Vuoden keskimääräinen kapasiteettikerroin saadaan esimerkiksi jakamalla huipunkäyttöaika koko vuoden tunneilla ( $t_{hk}/8760$ ). Vuonna 2019 Suomen tuulivoimaloiden kapasiteettikerroin oli keskimäärin 33 %, parhaan tuulipuiston yltäessä 47 % kapasiteettikertoimeen. [Tuulivoimaloiden rakenne; Tuulivoimatekniikan perusteet (osa 2).]

Verrattaessa tuulivoimalan tuottamaa energiaa esimerkiksi ydinvoimaan, on otettava huomioon voimaloiden huipunkäyttöajat. Ydinvoimalan huipunkäyttöajat ovat huomattavasti korkeampia kuin tuulivoimaloilla. Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemässä tutkimuksessa [Tutkimus: Tuulivoima on edullisinta – paitsi jos otetaan huomioon todelliset tuotantokustannukset, jolloin ydinvoima on edullisinta] laskettiin ydinvoimalan huipunkäyttöajaksi 8000 tuntia vuodessa kapasiteettikertoimen ollessa siis yli 0,91 (8000 h/8760 h). Pelkästään voimaloiden nimellistehoja vertaamalla päädyttäisiin virheelliseen tulokseen, mikäli tarkasteltaisiin esimerkiksi montako 5 MW tuulivoimalaa tarvittaisiin korvaamaan sähköteholtaan 1600 MW ydinvoimala, kuten alla olevassa esimerkissä todetaan.

#### Kysymys:

Eurajoelle rakennetun Olkiluoto 3 ydinvoimalaitoksen sähköteho on 1600 MW. Sen käyttöaste on 90 % eli voimalaitoksen huipunkäyttöaika on noin  $0,9 \cdot 8760 \text{ h} = 7884 \text{ h/a}$ . Montako 5 MW tuulivoimalaa tarvittaisiin laskennallisesti korvaamaan vain tämä yksi ydinvoimalaitos, jos tuulivoimalan kapasiteettikerroin olisi 0,33?

#### Ratkaisu:

Olkiluoto 3:n tuottama sähköenergia lasketaan nimellistehon 1600 MW ja huipunkäyttöajan 7884 h/a perusteella ja tulos on  $E = 1600 \text{ MW} \cdot 7884 \text{ h/a} = 12\,614\,400 \text{ MWh/a}$  (eli noin 12,6 TWh/a).

Yhden tuulivoimalan nimellisteho on 5 MW ja sen vuotuinen kapasiteettikerroin on 0,33. Näin ollen voimalan huipunkäyttöaika on noin  $0,33 \cdot 8760 \text{ h/a} = 2891 \text{ h/a}$ . Yksi tuulivoimala tuottaisi siten sähköä  $5 \text{ MW} \cdot 2891 \text{ h/a} = 14\,455 \text{ MWh/a}$ .

Jotta kyseisillä 5 MW tuulivoimaloilla saataisiin tuotettua yhtä paljon sähköenergiaa kuin yhdellä 1600 MW ydinvoimalalla, niin niitä tarvittaisiin

$$n = \frac{12\,614\,400 \text{ MWh}}{14\,455 \text{ MWh/kpl}} = 873 \text{ kpl}$$

Oikea vastaus ei siis ole lähellekään  $n = \frac{1600 \text{ MW}}{5 \text{ MW/kpl}} = 320 \text{ kpl}$ , vaan lähes kolminkertainen määrä tähän verrattuna.

Suomeen oli rakennettu vuoden 2022 loppuun mennessä yhteensä 1393 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu nimellisteho on 5677 MW. [Tuulivoimavuosi 2022: Tuulivoimakapasiteetti kasvoi 75 % ja toi Suomeen yli 2,9 miljardin investoinnit.]

## Tuulivoimalatyypit

Tuulivoimalat on perinteisesti jaettu pysty- ja vaaka-akselisiin voimaloihin sekä teollisiin että pientuulivoimaloihin. Teollisessa tuulivoimatuotannossa käytetään nykyään pääasiassa vaaka-akselisia voimaloita, joissa on joko ns. suoravetotekniikka tai vaihteisto. Voimalat jaotellaan myös onshore- ja offshore-voimaloihin, eli maa- ja merituulivoimaloihin sen mukaan, missä voimaloiden perustukset ovat ja missä tuulivoimaloiden sähkökaapelit kulkevat. [Tuulivoimatekniikka.]

## Teollinen tuulivoima ja vaaka-akseliset voimalat

Vaaka-akselisia tuulivoimaloita voi olla 1-, 2-, 3-lapaisia sekä monilapaisina. Yleisimmin teollisessa ja kaupallisessa tuulivoimatuotannossa käytetyt voimalat ovat vaaka-akselisia ja 3-lapaisia (kuva 7). Niiden roottori on torniin nähden tuulen yläpuolella, kun 1980-luvulla valmistetuissa

tuulivoimaloissa roottori oli usein sijoitettu torniin nähden tuulen alapuolelle. Näistä ns. takatuuliroottoreista on kuitenkin luovuttu lähes kokonaan pääasiassa turbulenssi- ja meluongelmien vuoksi. Kolmilapainen vaaka-akselinen voimala on yleisimmin käytetty tuulisähkön tuotannossa, koska se on taloudellisesti edullisin, sillä on erinomainen hyötysuhde verrattuna muihin ratkaisuihin, ja se on pitkäaikaisessa käytössä rakenteellisesti kevein ja luotettavin. [Tuulivoimaloiden rakenne; Eri tuulivoimalatyyppejä.]



*Kuva 7 Tyypillinen kolmilapainen teollinen tuulivoimala [Eri tuulivoimalatyyppejä].*

Vaaka-akselisen tuulivoimalan pyyhkäisy-pinta-ala on lapojen kärkien piirtämän ympyrän pinta-ala, ja tuulivoimalan tuotto on suoraan verrannollinen lapojen pyyhkäisy-pinta-alaan. Vaaka-akselisten voimaloiden etuna on roottorin suuri pyyhkäisy-pinta-ala, jolloin tuulesta saadaan enemmän energiaa talteen. Roottorin pinta-ala suhteessa pyyhkäisy-pinta-alaan on pieni (2-3 %) eli nykyään suurimmillaan suuruusluokaltaan 2 hehtaarin pinta-alan käyttöön tarvitaan minimaalinen määrä materiaalia. Pystyakseliseen voimalaan verrattuna vaaka-akselinen voimala toimii myös paremmalla tehokertoimella keskinopeilla tuulilla. [Eri tuulivoimalatyyppejä; Tuulivoimaloiden rakenne.]

Kolmilapainen roottori on pyörähdyssymmetrisesti tasapainossa ja massahitusvoimat ovat tasapainossa kaikkien akseleiden suhteen. Mikäli voimalassa on vähemmän kuin kolme lapaa, aiheutuu tuuleen käännettäessä koneistoa rasittavaa tärinää, joka johtuu massahitusvoimien eroista vaaka- ja pystyakselin suhteen. Enemmän kuin kolme lapaa ei tuota merkittävästi enempää energiaa, mutta maksaisi kuitenkin enemmän. [Eri tuulivoimalatyyppejä.]

Vaaka-akselisen voimalan roottori on käännettävä kohti tuulta, jotta voimala toimisi. Tuuleen suuntaus tapahtuu joko moottorikäyttöisesti, tai pienissä kilowattiluokan tuulivoimaloissa käyttämällä pyrstöä tai poikittaista kääntöpotkuria, joka toimii tuulen tullessa sivusta. [Eri tuulivoimalatyyppejä.]

Nykyään yleisesti teollisessa tuulivoimatuotannossa käytettyjen voimaloiden nimellisteho on pääasiassa 4–5 MW, roottorin halkaisija vaihtelee välillä 130–160 m ja tornin korkeus 140–175 metrin välillä. Merituulivoimalat ovat samantyyppisiä, mutta niissä on tyypillisesti matalammat tornit, pidemmät lavat ja suuremmat, jopa yli 10 MW tehot. Merituulivoimaloiden perustus voidaan tehdä eri tekniikoin, mutta kaikki merituulivoimaloiden perustukset eroavat suuresti maatuulivoimaloiden perustuksista. Muun muassa niiden perustukset ja osa tornista on merenpinnan alla. [Eri tuulivoimalatyyppejä; Yleistä merituulivoimasta.]

Merituulivoima kasvaa tällä hetkellä maailmalla kovaa vauhtia, mutta rakennettujen voimaloiden määrä on vielä pieni verrattuna maatuulivoimaloiden määrään: kaikista maailman tuulivoimaloista suuruusluokkaa 5 prosenttia on merituulivoimaloita. [Yleistä merituulivoimasta.]

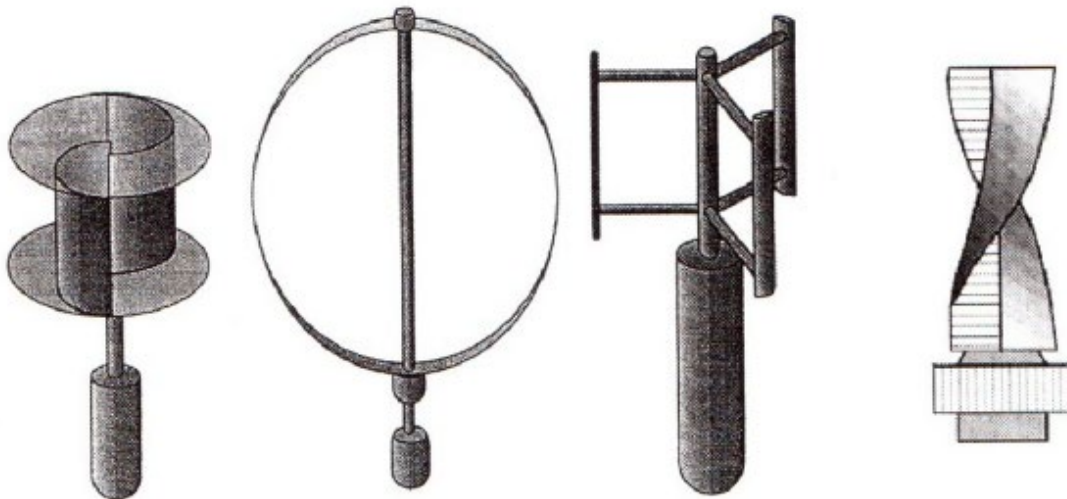
## **Pientuulivoima ja pystyakseliset voimalat**

Pientuulivoimalat ovat teholtaan pienempiä kuin teolliseen tuotantoon tarkoitettut tuulivoimalat. Useimmat pientuulivoimalat ovat muutaman sadan tai tuhannen watin (kW) tehoisia voimaloita, joita voi asentaa kesämökin tai kiinteistön yhteyteen ja niissä on yleisimmin 2 tai 3 lapaa. Kiinteistöjen katoille esimerkiksi kaupunkiympäristöön ja telemastoihin on pystytetty myös pystyakselisia voimaloita. [Eri tuulivoimalatyyppejä; Yleistä pientuulivoimasta.]

Yleisin pientuulivoimalan asennuskohde on mökillä, jossa ei ole yhteyttä sähköverkkoon. Voimalassa on silloin yleensä 2–3 m halkaisijan kokoinen potkuri ja se on asennettu 6–12 m

korkuiseen mastoon. Tuulivoimalan tuottamalla sähköllä ladataan akkuja ja voimalan nimellistehot ovat tässä kokoluokassa alle 1000 W. [Yleistä pientuulivoimasta.]

Pystyakselisiä tuulivoimaloita ovat tyypillisimmin Savonius-, Darrieus- ja Darrieus H- sekä Winside-tyyliset spiraaliroottorit (kierretty versio Savonius-roottorista), jotka on esitelty kuvassa 8 vasemmalta oikealle. Pystyakselisen tuulivoimalan pyyhkäisyypinta-ala on pyörivän roottorin suurin tuulta vastaan oleva kohtisuora pinta-ala. Mahdollisimman suuri tuulta vasten oleva pinta-ala on edullisempaa kattaa vaaka-akselisella potkurivoimalalla. Pystyakseliset voimalat tarvitsevat enemmän tuulta tuottaakseen saman tehon kuin potkurivoimalat eli niiden hyötysuhde on potkurivoimaloita pienempi.



*Kuva 8 Pystyakselisiä tuuliroottoreita [Oksanen 2016: 13].*

Pystyakselisten voimaloiden eduksi voidaan laskea se, että ne toimivat samalla tavalla tuulen suunnasta riippumatta, eivätkä siis tarvitse erillistä tuuleen suuntausta. Lisäksi pystyakselinen tuulivoimala toimii hyvin pyörteisissä tuuliolosuhteissa, mikä lisää niiden sijoitusmahdollisuuksia. [Eri tuulivoimalatyyppejä; Yleistä pientuulivoimasta.]

Savonius-tyyppisen roottorin haittoina ovat epätasainen käynti ja roottorin asennon mukaan vaihteleva käynnistysmomentti. Lisäksi Savonius-roottorin tukirakenteita ja laakereita rasittavat voimakkaat poikittaisvoimat. Tämä aiheuttaa ongelmia suurissa laitoksissa. Winside-roottorista

on saatu pois Savonius-roottorin ongelmat epätasaisesta käynnistä sekä vaihtelevasta käynnistysmomentista. [Oksanen 2016: 14]

Darrieus-roottorin suurimpana haittapuolena on sen mekaaninen kestävyys. Sen rakenteeseen aiheutuu todella suuria väsytysoimia, minkä vuoksi Darrieus-roottoria ei enää käytetä kaupallisissa sovelluksissa. Toinen haittapuoli kyseisessä roottorissa on sen huono käyntiinlähtökyky, minkä vuoksi se tarvitsee esimerkiksi sähkömoottorin apua saavuttaakseen alkunopeuden. [Oksanen 2016: 14.]

## Tuulivoiman kustannukset

Tuulivoimarakentamista on aiemmin tuettu Suomessa valtion myöntämän syöttötariffin eli takuuhintajärjestelmän ja uusiutuvan energian kilpailutuksen kautta. Vuonna 2011 käyttöönotettu syöttötariffijärjestelmä käynnisti tuulivoimarakentamisen Suomessa ja sen ansiosta Suomessa on vahva tuulivoimahankekanta. Kesästä 2018 asti tuulivoimaa on Suomessa rakennettu myös markkinaehtoisesti eli ilman valtion tukea. Esimerkiksi kaikki Suomeen vuonna 2019 valmistuneet 56 tuulivoimalaa rakennettiin markkinaehtoisesti. Syöttötariffia maksetaan viimeisille sen piiriin päässeille hankkeille vuoteen 2029 asti. [Tuulivoiman rakentaminen ilman tukia; Tuulivoimavuosi 2019: Kaikki uudet tuulivoimalat rakennettiin markkinaehtoisesti; Syöttötariffi eli takuuhintajärjestelmä.]

Markkinaehtoisen tuulivoimarakentamisen on mahdollistanut kasvanut yksikkökooko, alentuneet käyttö- ja kunnossapitokustannukset sekä pidentynyt huipunkäyttöaika ja käyttöaste. Uudet voimalat muun muassa yltyvät korkeammalle ja tuottavat siten asennettua megawattia kohden enemmän megawattitunteja kuin vanhemmat voimalat. Tämä tarkoittaa, että tuotetun sähkön kustannus megawattituntia kohden (€/MWh) on laskenut nopeasti. Vaikka tuulivoimaa tuotetaan edelleen osittain valtion tukemana, on maalle rakennettava tuulivoima tällä hetkellä kustannuksiltaan edullisin tapa tuottaa sähköä Suomessa. Uusimmat voimalaitokset on myös rakennettu kokonaan ilman valtion tukea. [Tuotantokustannukset; Tuulivoiman rakentaminen ilman tukia; Tuulivoiman yleisopas: 1.]

Vaihtelevalla uusiutuvalla energialla, kuten tuulivoimalla on kuitenkin erityispiirre, jota perinteisesti ei ole energiamarkkinoilla ollut. Niiden tuotantohuiput eivät vastaa Suomen kulutushuippuja, josta syntyy systeemikustannuksia. Tarvitaan esimerkiksi varastointia, mikä taas

lisää kustannuksia. Lisäksi kustannuksia syntyy muun muassa varavoiman, sähköverkon tehonhallinnan ja sähkön kantaverkon vahvistamiseen liittyvistä kuluista. Uusiutuvaan energiaan liittyy myös profiilikustannuksia, mikä johtaa siihen, että esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimasta saadun sähkön arvo alenee sitä enemmän, mitä suurempi on niiden osuus energiajärjestelmässä. Kun tuulee, niin tuulivoimalan tuottajat pystyvät ja haluavat tuottaa energiaa, mikä johtaa helposti ylituotantoon- ja tarjontaan ja vastaavasti halvempiin hintoihin.

Kun profiili- ja systeemikustannukset otetaan huomioon, tekee se kustannusten arvioimisesta hankalampaa, ja esimerkiksi ydinvoiman hinta alkaa lähentyä tuulivoimaa. Sähköntuotannon hintaa verrattaessa olisikin syytä huomioida kunkin tuotantomuodon kokonaishinta, koska myös muun muassa tarvittava varastointi, huipputeho ja varavoima ovat kustannuksia sähkönsiirron lisäksi.

Tuulivoiman tuotantokustannukset koostuvat investointi- ja käyttökustannuksista. Muuttuvia (tuotetusta energiamäärästä riippuvia) kustannuksia ei polttoainevapaan tuulivoiman kohdalla juuri ole eli tuotantokustannuksista suurin osa muodostuu suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Vuotuiset käyttö- ja ylläpitokustannukset ovat lähes vakiosuuruiset tuotannosta riippumatta. Maalle rakennettaessa tuulivoimalan investointikustannuksen voi karkeasti laskea olevan noin 1,2-1,5 miljoonaa euroa / MW. Merelle rakennettaessa investointikustannukset ovat 20-50 % korkeammat. [Tuotantokustannukset; Investoinnit.]

Tuulivoiman investointikustannuksiin vaikuttavat tuulivoimaloiden hinta sekä muun tarvittavan infrastruktuurin kustannukset (kuten teiden ja sähköverkkoliitynnän rakentaminen). Suomessa on hyvät tuuliolosuhteet, mutta keskituulennopeus on matala. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi voimaloiden lapojen tulee olla suhteessa pidemmät. Sisämaahan ja metsäiseen ympäristöön rakennettaessa myös voimaloiden tornien tulee olla riittävän korkeita. Nämä seikat nostavat tuulivoimaloiden hintaa, mutta toisaalta myös mahdollistavat suuremman tuoton. [Investoinnit.]

Tuulivoimalan vuotuisten käyttö- ja kunnossapitokustannusten arvioidaan olevan noin 2-3 % projektin alkuperäisistä investointikustannuksista. Tuulivoiman käyttö- ja ylläpitokustannukset muodostuvat:

- Huoltokustannuksista,

- Vakuutuskustannuksista ja korjauskustannuksista, sekä
- Hallinnointikustannuksista. [Käyttö- ja ylläpitokustannukset.]

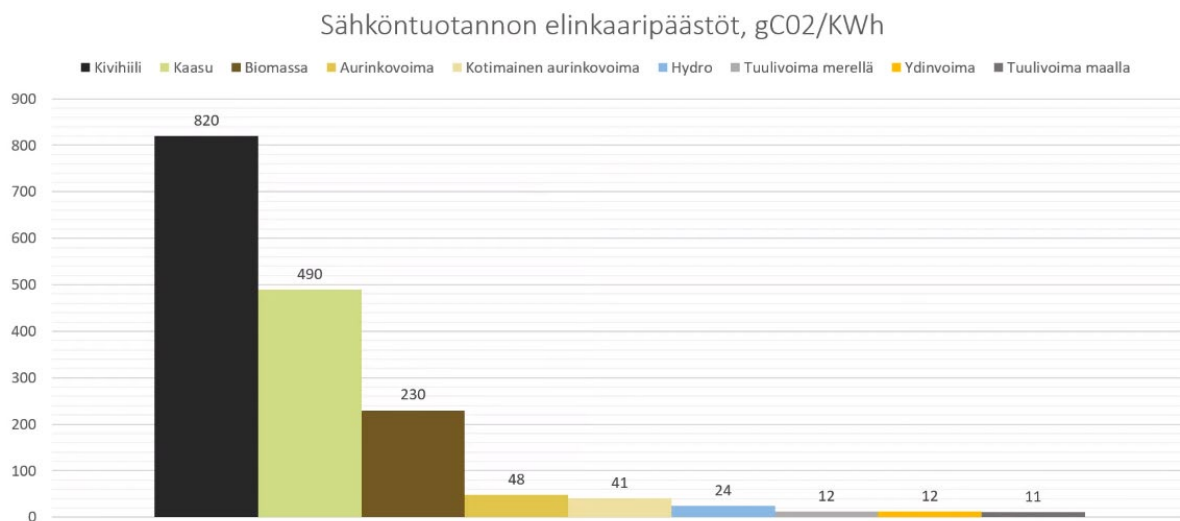
Huolto- ja korjauskustannukset vaihtelevat voimakkaasti riippuen mm. tuulipuiston koosta ja laitosten yksikkökoosta (huollettavien laitosten lukumäärä), huoltoetäisyyksistä ja -yhteyksistä sekä huolto-organisaation tehtyjen huoltosopimusten toimivuudesta. Esimerkiksi merituulivoimaloiden huolto on huomattavasti kalliimpaa kuin maalla sijaitsevien. Itse tuulivoimalayksiköiden kunnossapidon ja huollon lisäksi tuulipuistojen tiet, rakennelmat sekä sähköverkko vaativat myös huolenpitoa. Voimaloiden ikääntyessä huolto- ja korjauskustannukset yleensä vähitellen kasvavat. [Käyttö- ja ylläpitokustannukset.]

## Tuulivoiman elinkaari ja ympäristökysymykset

Tuulivoima ei ole täysin päästötöntä, kuten ei mikään muukaan energiantuotantotapa. Tuulivoimassa päästöjä syntyy rakentamisesta, kuljetuksesta, huollosta ja purkamisesta. Näistä päästöistä muodostuu tuulivoimalan elinkaaren hiilijalanjälki. Lisäksi voimaloiden rakentaminen kuluttaa luonnonvaroja ja voi vaikuttaa negatiivisesti mm. luonnon monimuotoisuuteen ja lähialueiden muiden elinkeinoalojen toimintaan. Tuulivoima kuitenkin vähentää energiantuotannon hiilidioksidi- ja pienhiukkaspäästöjä korvaten uusiutumattomia suuripäästöisempiä energiantuotantotapoja, joten sen kokonaisvaikutus nähdään positiivisena. [Tuulivoiman yleisopas: 2.]

Erään selvityksen mukaan tuulivoiman positiivinen vaikutus, joka saavutetaan päästövähennyksinä, on 50 kertaa suurempi, kuin sen ilmastonegatiiviset vaikutukset. Eri lähteissä tuulivoiman energiayksikköä kohden tuottamien hiilidioksidipäästöjen on arvioitu olevan luokkaa 7–11 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Hiilidioksidiekvivalentilla (gCO<sub>2</sub>-ekv) tarkoitetaan eri kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua ilmastovaikutusta. Vastaavat lukemat esimerkiksi kivihiilen osalta ovat 820–1000 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Ydinvoiman hiilidioksidipäästöt taas vaihtelevat 5–6 ja 12 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh tuntumassa. Ydinvoiman hiilidioksidipäästöt ovat siis myös verrattain pienet, jopa pienemmät kuin tuulivoiman. [Tuulivoiman yleisopas: 4; Tuulivoiman hiilikädenjälki ja vaikutus suomalaiseen metsään.]

Kuvassa 9 esitetään eri sähköntuotantomuotojen elinkaaripäästöjä. Kuvasta voidaan huomata, miten polttamiseen perustuvilla sähkön tuotantomuodoilla, kuten kivihiilellä ja kaasulla, on huomattavasti suuremmat hiilidioksidin elinkaaripäästöt kuin uusiutuvilla polttoon perustumattomilla tuotantotavoilla sekä ydinvoimalla. Esimerkiksi kivihiilen tuottamat elinkaaripäästöt ovat lähes 80-kertaiset tuulivoimaan verrattuna.



*Kuva 9 Sähköntuotannon elinkaaripäästöt eri tuotantomuodoittain [Tuulivoiman elinkaari- ja ympäristökysymykset].*

Tuulivoimala tuottaa alle vuodessa (5-8 kuukaudessa) saman määrän energiaa kuin sen valmistaminen, rakentaminen ja purkaminen vaatii. Koko elinkaarensa aikana tuulivoimala tuottaa yli 60-kertaisesti sen rakentamiseen vaaditun energiamäärän. Kun otetaan huomioon tuulivoimalan aiheuttamat päästöt ja energian takaisinmaksu voimalan elinkaaren aikana, niin näillä mittareilla tuulivoiman voi todeta olevan yksi parhaista energiamuodoista. [Tuulivoiman hiilikädenjälki ja vaikutus suomalaiseen metsään.]

Tuulivoimarakentaminen vaikuttaa ilmastoon myös toisella tavalla. Tuulipuistot vähentävät metsäpinta-alaa, kun puustoa on kaadettava tuulivoimaloiden rakennuspaikoilta sekä voimaloille johtavien teiden ja sähkönsiirtokaapeleiden tieltä. Metsäpinta-alan väheneminen pienentää hiilinieluja, jotka sitovat kasvihuonekaasuja ilmakehästä. Tämän takia tuulivoimalla voidaan nähdä olevan pienemmässä mittakaavassa myös negatiivista ilmastovaikutusta.

Tuulivoimarakentamisesta johtuva metsien väheneminen ei kuitenkaan ole tämänhetkisen tiedon

mukaan niin mittavaa, että se poistaisi päästöjen vähenemisen positiivisen ilmastovaikutuksen.  
[Tuulivoiman yleisopas: 4.]

Tuulivoimalat sijoittuvat pääasiassa talousmetsäkäytössä oleville alueille, joihin kohdistuu muitakin ihmistoimia. Tuulivoima-alueesta noin 2 prosenttia jää tuulivoimaloiden, niiden huoltoalueen ja teiden alle, loppu jää alkuperäiseen maa-, metsätalous- tai harrastekäyttöön. Kun huomioidaan uusien huoltoteiden rakentaminen sekä vanhojen metsäautoteiden leventäminen, poistetaan puustoa yhteensä noin 2–3 hehtaaria yhtä tuulivoimalaa kohti. Tämä vastaa pinta-alaltaan noin kahden jalkapallokentän suuruista aluetta. On arvioitu, että 100 terawattitunnin (TWh) tuulivoimatuotannon tarvitsema maapinta-ala olisi noin 0,15 prosenttia Suomen metsäpinta-alasta. Vuonna 2022 tuulivoimatuotanto oli Suomessa 11,5 TWh. Puun polttaminen on maankäytön tehokkuuden kannalta huomattavasti aurinko- ja tuulienergiaa heikompi vaihtoehto. Teollisista energiantuotannon muodoista ydinvoima ja tuulivoima ovat maankäytön suorien vaikutusten osalta energiatehokkaimmat tuotantomuodot [Tuulivoiman hiilikädenjälki ja vaikutus suomalaisen metsään.]

Tuulivoiman ilmastovaikutuksia voidaan entisestään pienentää energiajärjestelmien puhdistuessa esimerkiksi, jos tuulivoimaan tarvittavat metallit tuotetaan puhtaalla energialla. Tuulivoimaloiden tekninen käyttöikä on noin 25 vuotta, uusimmilla voimaloilla 30 vuotta. Elinkaarensa lopussa voimalat yleensä puretaan. Purettujen voimaloiden tilalle voidaan rakentaa uudet voimalat, jolloin voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa infraa, tai alue voidaan poistaa tuulivoimakäytöstä ja maisemoida. Uusien voimaloiden rakentaminen vaatii aina vanhojen perustusten uusimisen turvallisuussyistä, mutta tuotannon päättyessä perustukset voidaan jättää maahan ja maisemoida.  
[Tuulivoiman yleisopas: 4]

Tuulivoimaloiden osista yli 80 % pystytään kierrättämään. Vaikeimmin kierrätettävä osa ovat voimaloiden lavat, jotka on valmistettu muovikomposiitista. Materiaali on sekoitus erilaisia polymeerejä, joten valmiista lavoista raaka-aineita ei saa eroteltua kierrätykseen. Lapajätteestä voi muodostua tulevaisuudessa suuri ongelma vanhempien voimaloiden poistuessa käytöstä. Tämän takia lapojen kierrättämiseen kehitetään uusia tekniikoita, kuten lapojen murskaus ja uudelleenkäyttö sementin raaka-aineena. Käytöstä poistetut voimalat voidaan joissain tilanteissa myös myydä edelleen käytettäväksi. Lisäksi uusia materiaaleja kuten puuta on kehitelty vaihtoehdoksi voimaloiden komponenteille. [Tuulivoiman yleisopas: 4]

## Tuulivoiman tulevaisuus

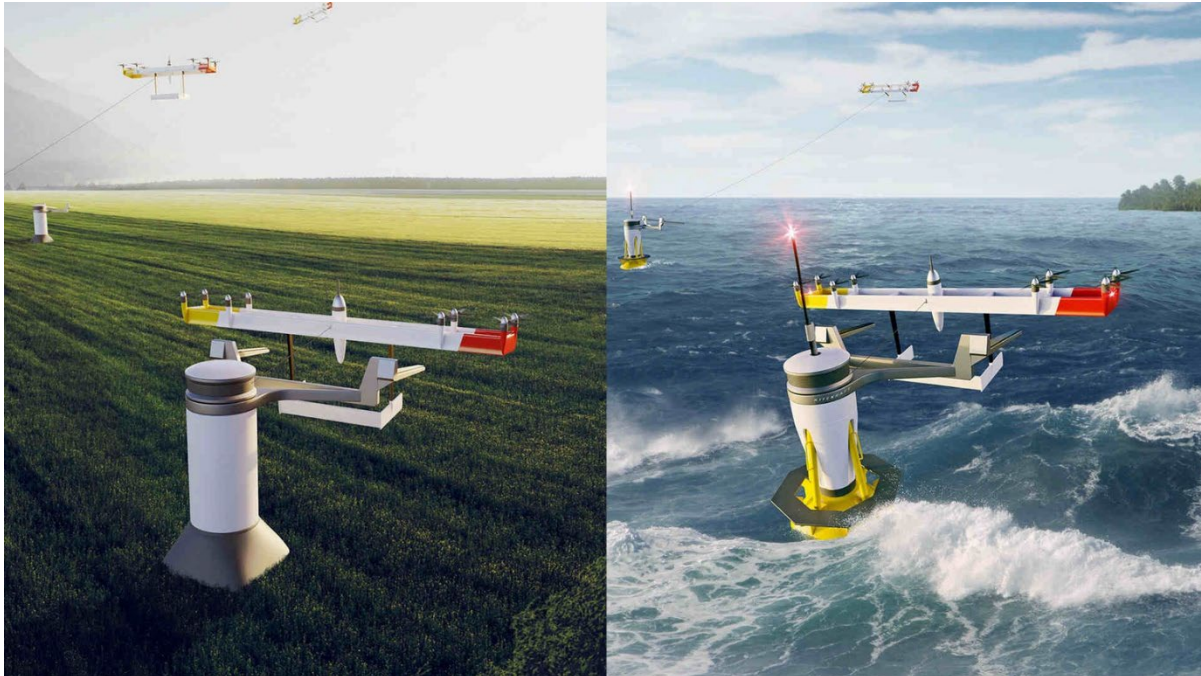
Optimaalisena hetkenä tuulivoimasta saadaan Suomessa sähköä jo nyt enemmän kuin mistään muusta sähköntuotantomuodosta. Esimerkiksi ydinvoiman sähköntuotantomaksimi viidellä voimalaitosyksiköllä (n. 4400 MW) on samaa luokkaa kuin nyt saavutettu tuulivoimamaksimi. On arvioitu, että 2023 tuulivoimaa asennetaan lisää 1600 MW ja Fingridin mukaan on mahdollista, että Suomessa on vuonna 2030 20 GW asennettua tuulivoimaa. Se on moninkertaisesti enemmän kuin mitään muuta sähköntuotantokapasiteettia. [Tuulivoimabuumi haastaa kantaverkon siirtokykyä länsirannikolla.]

Sääriippuvaisen tuotannon voimakas lisääntyminen tulee uudistamaan sähkön hinnoittelua ja käyttöä merkittävästi. Koska ennusteiden mukaan näyttää vahvasti siltä, että välillä sähköntuotanto tulee ylittämään kulutuksen ja samalla vaikuttamaan markkinahintaan, on tärkeää tehdä kehitystyötä erilaisten sähkön varastointimenetelmien ja sähkön jalostustuotteiden (P2X) suhteen. On siis todennäköistä, että mittavat investoinnit tuulivoimaan tuovat mukanaan myös investointeja, joilla hintavaihtelua yritetään tasapainottaa.

Tulevina vuosikymmeninä tuulipuistoja rakennetaan sinne, missä tilaa on enemmän ja rajoituksia vähemmän, siis merelle. Uusinta teknologiaa ovat kelluvat tuulipuistot, joita voi sijoittaa syville merialueille yhä kauemmas rannikosta. Kun perinteistä merenpohjaan kiinnitettävää tuulivoimalaa ei kannata pystyttää yli 60 metrin syvyyteen, kelluvan betonialustan päälle rakennettu turbiini voidaan sijoittaa satoja metrejä syvään veteen. Esimerkiksi marraskuussa 2022 Norjassa aloitti toimintansa maailman suurin kelluva tuulivoimala. Kapasiteetiltaan 88 megawatin voimala tuottaa sähköä läheiselle öljynporauslautalle yli sadan kilometrin päässä Norjan rannikolta. Hankkeen pääsijoittaja, norjalainen öljy-yhtiö Equinor arvioi, että kelluvien tuulivoimaloiden rakentaminen muuttuu kannattavaksi kuluvan vuosikymmenen aikana. [Viljanen & Rantanen 2023; Hartikainen 2022.]

Tuulikapasiteettia kasvatetaan viemällä voimaloita myös korkealle ylätaloihin, missä tuuli puhaltaa voimakkaimmin ja jossa voimalat tavoittavat nopeammat ja tasaisemmat ilmavirtaukset. Tällaiset voimalat tuottavat tuulienergiaa satojen metrien korkeudessa ilman raskaita ja kalliita tornirakennelmia. Kun reiluun sataan metriin kurottava perinteinen voimala tuottaa sähköä 25–35 prosenttia ajasta, kolmensadan metrin korkeudessa lukemat voivat kaksinkertaistua. [Viljanen & Rantanen 2023.]

Yläilmoihin sijoitettavia voimaloita ovat esimerkiksi kehitteillä olevat leijavoimalat (kuva 10). Ne voivat olla muun muassa riippuliitimestä, vaijerista ja sähkögeneraattorista koostuvia kevyitä voimaloita, jotka operoivat parinsadan metrin korkeudessa ja tuottavat sähköä vaikkapa syrjäisen saaren tai tukikohdan tarpeisiin. [Viljanen & Rantanen 2023.]



*Kuva 10 Havainnekuva leijavoimalasta [Numminen 2022].*

Toisissa voimaloissa energiantuotanto perustuu perinteisiin turbiineihin, jotka kuljetetaan tavanomaista korkeammalle. Esimerkiksi yhdysvaltalainen Altaeros Energies kehittää ilmalaivaan asennettua voimalaa, joka kytketään maahan vaijereilla (kuva 11). Se miten tällaiset voimalat yleistyvät jää lopulta nähtäväksi. [Viljanen & Rantanen 2023.]



*Kuva 11 Ilmalaivaan asennettu tuulivoimala [Viljanen & Rantanen 2023].*

## Lähteet

Eri tuulivoimalatyyppejä. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimalayhdistys.

<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppeja>>. Luettu 4.8.2023.

Hartikainen, Jarno. 2022. Maailman suurin kelluva tuulivoimala aloitti tuotantonsa Norjassa.

Verkkoaineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/talous/art-2000009200136.html>>. Luettu 14.8.2023.

Investoinnit. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/investoinnit>>. Luettu 10.8.2023.

Käyttö- ja ylläpitokustannukset. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.

<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/kaytto-ja-yllapitokustannukset>>. Luettu 10.8.2023.

Laatikainen, Tuula. 2023. Puusta tehtyjen tuulivoimaloiden kehitys on jo pitkällä. Verkkoaineisto.

Kauppalehti. <<https://www.kauppalehti.fi/uutiset/puusta-tehtyjen-tuulivoimaloiden-kehitys-on-jo-pitkalla/0deea074-e3cb-4949-affd-372620c40bd5>>. Luettu 1.8.2023.

Miksi tuulivoimaa. Verkkoaineisto. Suomen tuulivoimayhdistys.

<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/miksi-tuulivoimaa>>. Luettu 28.7.2023.

National Renewable Energy Laboratory. Verkkoaineisto. <<https://www.nrel.gov/wind/newsletter-202004.html>>. Luettu 14.8.2023.

Numminen, Pekka. 2022. Kitekraft tekee lentäviä tuulivoimalaitoksia – tehokkaita ja halpoja.

Verkkoaineisto. Tekniikka & Talous. <<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/kitekraft-tekee-lentavia-tuulivoimalaitoksia-tehokkaita-ja-halpoja/f4be06c3-bc93-4b64-a952-d7036ae0e8d9>>. Luettu 15.8.2023.

Oksanen, Hannu. 2016. Tuulivoimalan simulointi laboratorioympäristössä. Opinnäytetyö.

<[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114484/Oksanen\\_Hannu.pdf;jsessionid=97807C39226A169A1A88BD72EDDC1C15?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114484/Oksanen_Hannu.pdf;jsessionid=97807C39226A169A1A88BD72EDDC1C15?sequence=1)>. Luettu 9.8.2023.

Paljon tuulivoimalat tuottavat sähköä ja mitä tarkoittaa huipunkäyttöaika?. Verkkoaineisto.

Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/ukk/tuulivoimalat-2>>. Luettu 3.8.2023.

Syöttötariffi eli takuuhintajärjestelmä. Verkkoaineisto. Motiva Oy.  
<[https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/syottotariffi\\_eli\\_takuuhintajarjestelma](https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/syottotariffi_eli_takuuhintajarjestelma)>. Päivitetty 15.6.2022. Luettu 10.8.2023.

Taskinen, Rauno. 2020. Vihreää sähköä hinnalla millä hyvänsä? Verkkoaineisto. KD-Lehti.  
<<https://osastot.kd.fi/2020/01/28/vihreaa-sahkoa-hinnalla-milla-hyvansa/>>. Luettu 3.8.2023.

Tuotantokustannukset. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.  
<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/tuotantokustannukset>>. Luettu 10.8.2023.

Tutkimus: Tuulivoima on edullisinta – paitsi jos otetaan huomioon todelliset tuotantokustannukset, jolloin ydinvoima on edullisinta. Verkkoaineisto. Tekniikan Maailma.  
<<https://tekniikanmaailma.fi/tutkimus-tuulivoima-edullisinta-paitsi-jos-otetaan-huomioon-todelliset-tuotantokustannukset-jolloin-ydinvoima-edullisinta/>>. Luettu 3.8.2023.

Tuulivoimabuumi haastaa kantaverkon siirtokykyä länsirannikolla. Verkkoaineisto. Fingrid Oy.  
<<https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/tuulivoimabuumi-haastaa-kantaverkon-siirtokyky-lansirannikolla/>>. Luettu 14.8.2023.

Tuulivoimaennusteita. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.  
<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>>. Luettu 28.7.2023.

Tuulivoimatekniikka. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.  
<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimatekniikka-2>>. Luettu 31.7.2023.

Tuulivoimatekniikan perusteet (osa 2). Verkkoaineisto. DIGMA Avoin oppimisympäristö.  
<<https://www.youtube.com/watch?v=A6Za4ImSG24>>. Luettu. 3.8.2023.

Tuulivoimatekniikan perusteita (osa 1). Videosisältö. DIGMA Avoin oppimisympäristö.  
<<https://www.youtube.com/watch?v=KFtvLFdym64>>. Luettu 2.8.2023.

Tuulivoimateknologia. Verkkoaineisto. Motiva Oy.  
<[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/tuulivoima/tuulivoima\\_suomessa/tuulivoimateknologia](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia)>. Luettu 31.7.2023.

Tuulivoimaloiden kappalemäärät maakunnittain (2022). Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/media/2023-kartta-distribution-fin-adobergb.pdf>>. Luettu 14.8.2023.

Tuulivoimaloiden rakenne. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>>. Luettu 1.8.2023.

Tuulivoiman elinkaari- ja ympäristökysymykset. Verkkoaineisto. DIGMA Avoin oppimisympäristö. <<https://www.youtube.com/watch?v=tub8DYyJm8Q>>. Luettu 11.8.2023.

Tuulivoiman rakentaminen ilman tukia. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoiman-rakentaminen-ilman-tukia>>. Luettu 10.8.2023.

Tuulivoimavuosi 2019: Kaikki uudet tuulivoimalat rakennettiin markkinaehtoisesti. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimavuosi-2019-kaikki-uudet-tuulivoimalat-rakennettiin-markkinaehtoisesti>>. Luettu 10.8.2023.

Tuulivoimavuosi 2022: Tuulivoimakapasiteetti kasvoi 75 % ja toi Suomeen yli 2,9 miljardin investoinnit. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimakapasiteetti-kasvoi-75-ja-toi-suomeen-yli-29-miljardin-investoinnit>>. Luettu 19.6.2023.

Tuulivoima Suomessa. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/tuulivoima/tuulivoima\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa)>. Luettu 28.3.2023

Tuulivoiman hiilikädenjälki ja vaikutus suomalaiseen metsään. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoiman-hiilikadenjalki-ja-vaikutus-suomalaiseen-metsaan>>. Luettu 11.8.2023.

Tuulivoiman yleisopas. Verkkoaineisto. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. <[https://www.motiva.fi/files/19414/Tuulivoiman\\_yleisopas.pdf](https://www.motiva.fi/files/19414/Tuulivoiman_yleisopas.pdf)>. Luettu 27.7.2023.

Tuulivoimatuotanto kasvoi 41 prosenttia vuonna 2022. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimatuotanto-kasvoi-41-prosenttia-vuonna-2022>>. Luettu 16.8.2023.

Tuulivoimatuotanto talvella. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.  
<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimatuotanto-talvella>>.  
Luettu 31.8.2023.

Viljanen, Miina & Rantanen, Kalevi. 2023. Saksalaiset rekat ovat merkki siitä, miten aurinkoenergia valtaa maailman — Näin energiatuotanto mullistuu vuoteen 2040 mennessä. Verkko-aineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/tiede/art-2000009312863.html>>. Päivitetty 19.4.2023.  
Luettu 1.6.2023.

Yleistä merituulivoimasta. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.  
<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/merituulivoima/yleista-merituulivoimasta>>.  
Luettu 7.8.2023.

Yleistä pientuulivoimasta. Verkkoaineisto. Suomen Tuulivoimayhdistys.  
<<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/pientuulivoima/yleista-pientuulivoimasta>>.  
Luettu 9.8.2023