



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Martti Hirvonen

Tuulivoiman ympäristövaikutukset

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Energiatekniikan diplomityö
Sähkö- ja energiatekniikan maisteriohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö

Tekijä:	Martti Hirvonen		
Tutkielman nimi:	Tuulivoiman ympäristövaikutukset		
Tutkinto:	Sähkö- ja energiatekniikan diplomi-insinööri		
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Opintosuunta:	Energiatekniikka		
Työn valvoja:	Pekka Ruuskanen		
Työn ohjaaja:	Anne Mäkiranta		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	73

TIIVISTELMÄ:

Tässä diplomityössä tutkitaan tuulivoiman tuottamaa melua ja sen ympäristövaikutuksia osana tuulivoiman kokonaisvaikutuksia. Tutkimuksen lähtökohdat liittyvät tuulivoiman nopeaan kasvuun uusiutuvana energianlähteenä, jonka ympäristövaikutuksia on arvioitava huolellisesti hankkeiden suunnittelun ja hyväksyttävyyden varmistamiseksi.

Keskeinen tutkimuskysymys on tuulivoimaloiden melun synty, leviäminen ja vaikutukset ihmisiin sekä elinympäristöön, huomioiden myös muut ympäristötekijät kuten linnusto, lepakot ja maisema. Työn teoriapohjana käytetään tuulivoiman teknisiä periaatteita, akustiikkaa ja ympäristövaikutusten arviointia. Keskeisiä käsitteitä ovat aerodynaaminen ja mekaaninen melu, äänen eteneminen, häiritsevyys, matalataajuinen ääni sekä tuulivoiman vaikutukset luontoon ja maisemaan.

Kirjallisuustutkimuksena työ pohjautuu tieteellisiin julkaisuihin, viranomaisraportteihin ja alan asiantuntijalähteisiin. Aineistona toimivat myös Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistojen ympäristövaikutusten arviointiraportit. Työssä käsitellään ensin tuulivoiman perusteita ja tuuliolosuhteita, minkä jälkeen siirrytään äänen ja melun käsitteisiin sekä tuulivoimalamelun erityispiirteisiin. Melun vaikutuksia analysoidaan häiritsevyyden, unen laadun ja hyvinvoinnin näkökulmasta, huomioiden ilmakehän olosuhteiden rooli äänen leviämisessä. Lisäksi tarkastellaan tuulivoiman vaikutuksia linnustoon ja maisemaan sekä esimerkkikohteiden kautta.

Keskeisiä havaintoja on, että tuulivoimalamelu syntyy pääasiassa aerodynaamisesti ja sen koettu häiritsevyys riippuu monista tekijöistä kuten taajuudesta, sääolosuhteista ja asenteista. Vaikutukset ovat paikallisia ja liittyvät etenkin viihtyvyyteen, eivät niinkään vakaviin terveysriskeihin. Linnusto- ja maisemavaikutukset korostavat sijoittelun merkitystä ja esimerkkikohteet osoittavat vaikutusten vaihtelevuutta.

AVAINSANAT: tuulivoima, melu, ympäristövaikutukset, aerodynaaminen melu, häiritsevyys, linnusto, maisema, tuulivoimapuisto

Sisällys

1	Johdanto	4
2	Työn tavoite	7
3	Tuuli ja tuulivoima	10
3.1	Tuuli	10
3.2	Tuulivoima	15
4	Ääni	19
4.1	Akustiikan perusteita	19
4.2	Melu	21
5	Linnusto	33
6	Maisema	43
7	Tuulivoiman tutka- radio- ja TV-verkkovaikutukset	51
8	Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistot	53
8.1	Kurikan Santavuoren tuulivoimapuisto	53
8.2	Mustasaaren Merkkikallion tuulivoimapuisto	57
9	Johtopäätökset	61
10	Yhteenveto	63
	Lähteet	67
	Liite 1. Vallitsevat tuuliolosuhteet 100m korkeudessa	72
	Liite 2. Vallitsevat tuuliolosuhteet 200m korkeudessa	73

1 Johdanto

Tuulivoima on yksi merkittävimmistä uusiutuvan energian tuotantomuodoista ja sen rooli on kasvanut nopeasti osana energiajärjestelmän muutosta kohti vähäpäästöisempää tuotantoa. Ilmastonmuutoksen hillintä, fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen sekä energian omavaraisuuden vahvistaminen ovat lisänneet kiinnostusta tuulivoimaan niin Suomessa kuin kansainvälisestikin. Tuulivoiman etuna on, että se ei aiheuta suoria kasvihuonekaasupäästöjä käyttöaikanaan ja sen avulla voidaan korvata fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa sähkön- ja lämmöntuotantoa. Samalla tuulivoimaloiden koko ja teho ovat kasvaneet merkittävästi, mikä on tehnyt niistä aiempaa tehokkaampia, mutta myös näkyvämpiä ja ympäristövaikutuksiltaan haitallisempia.

Tuulivoiman lisääntyminen on tuonut mukanaan myös tarpeen tarkastella sen ympäristövaikutuksia entistä tarkemmin. Vaikutukset eivät rajoitu pelkästään energian tuotantoon, vaan ne ulottuvat myös maisemaan, linnustoon, maankäyttöön ja ihmisten kokemaan viihtyvyyteen. Yksi keskeisimmistä keskustelua herättävistä vaikutuksista on tuulivoimaloiden tuottama melu. Melu syntyy erityisesti roottorin lapojen ilmanvirtauksesta eli aerodynaamisesta melusta, mutta myös voimalan mekaaniset osat voivat aiheuttaa ääntä. Nykyaikaisissa suurissa tuulivoimaloissa aerodynaaminen melu on yleensä hallitseva, koska voimaloiden kasvaessa myös lapojen liikkeestä syntyvä ääni korostuu.

Melun merkitys korostuu erityisesti silloin, kun tuulivoimalat sijoittuvat lähelle asutusta tai muita melulle herkkiä kohteita. Vaikka tuulivoimaloiden melu ei useimmiten ole samalla tavoin jatkuvaa tai voimakasta kuin monien teollisten toimintojen melu, sen koettuun häiritsevyyteen vaikuttavat useat tekijät. Näitä ovat muun muassa äänen voimakkuus, taajuus, ajallinen vaihtelu, ympäristön muut äänet sekä ihmisen oma suhtautuminen melulähteeseen. Erityisesti yöaikaan melu voi koettuna häiritä nukahtamista, heikentää unen laatua tai lisätä ärtyymystä. Myös melun kokeminen voi

vaihdella voimakkaasti yksilöittäin, minkä vuoksi pelkkä desibelitaso ei yksin riitä kuvaamaan vaikutuksen merkittävyyttä.

Tuulivoimaloiden aiheuttamaa melua arvioitaessa on tärkeää ymmärtää myös äänen etenemiseen liittyvät fyysiset ilmiöt. Ilmakehän olosuhteet kuten lämpötila, tuulen suunta ja nopeus sekä maaston muodot, vaikuttavat siihen, miten ääni leviää ympäristöön. Näin ollen melun todellinen koettavuus voi vaihdella huomattavasti eri sää- ja maasto-olosuhteissa, vaikka voimalan tuottama lähtötaso olisi sama. Tämän vuoksi tuulivoimalamelun tutkiminen edellyttää sekä akustista että ympäristöllistä tarkastelua. Pelkän mittaustiedon lisäksi on huomioitava myös se, miten melu koetaan ihmisten arjessa ja millaisia vaikutuksia sillä voi olla asumisviihtyvyyteen ja elämänlaatuun.

Tässä työssä tarkastellaan tuulivoiman tuottamaa melua osana laajempaa tuulivoiman ympäristövaikutusten kokonaisuutta. Aihe on ajankohtainen, koska tuulivoimarakentaminen lisääntyy Suomessa jatkuvasti ja samalla tarvitaan luotettavaa tietoa hankkeiden suunnittelun, sijoittamisen ja vaikutusarvioinnin tueksi. Tuulivoimahankkeiden toteutuksessa joudutaan sovittamaan yhteen uusiutuvan energian tuotanto, ympäristön suojeleminen sekä lähialueiden asukkaiden elinympäristön laatu. Tässä kokonaisuudessa melun arviointi on keskeisessä asemassa, sillä se vaikuttaa suoraan siihen, millaisille alueille tuulivoimaa voidaan rakentaa ja millaisin ehdoin hankkeet voivat edetä.

Tuulivoiman ympäristövaikutuksia ei kuitenkaan voi tarkastella pelkästään melun näkökulmasta. Tuulivoimaloiden rakentaminen ja käyttö voivat vaikuttaa myös linnustoon, erityisesti muuttolintuihin ja herkkiin lajeihin sekä maisemaan, joka muuttuu voimaloiden suuren mittakaavan vuoksi näkyvästi. Lisäksi voimaloiden perustukset, huoltotiet, sähkökaapelit ja muu infrastruktuuri muuttavat paikallista maankäyttöä. Näiden vaikutusten vuoksi tuulivoimahankkeita arvioidaan Suomessa usein ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä, jonka avulla pyritään tunnistamaan

merkittävät haitat jo ennen rakentamista. Tämä tekee aiheesta sekä teknisesti että yhteiskunnallisesti tärkeän.

Työn tarkastelussa on mukana myös Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistoja koskevaa aineistoa, joiden avulla tuulivoiman vaikutuksia voidaan havainnollistaa käytännön esimerkkien kautta. Tällaiset tapausesimerkit auttavat ymmärtämään, miten teoriassa kuvatut melu- ja ympäristövaikutukset näkyvät todellisissa hankkeissa. Ne myös osoittavat, että tuulivoiman vaikutukset ovat usein paikallisia ja riippuvat voimakkaasti alueen maasto-olosuhteista, etäisyyksistä, voimaloiden sijoittelusta sekä ympäristön herkkyydestä. Siksi yksittäisen hankkeen vaikutuksia ei voida arvioida pelkästään yleisten periaatteiden perusteella, vaan arviointi vaatii tapauskohtaista tarkastelua.

Tämän työn tavoitteena on kuvata tuulivoimaloiden tuottaman melun syntyä, leviämistä ja vaikutuksia mahdollisimman selkeästi ja kokonaisvaltaisesti. Samalla työssä pyritään luomaan ymmärrys siitä, miksi tuulivoiman ympäristövaikutusten arviointi on tärkeä osa hankkeiden suunnittelua ja hyväksyttävyyttä.

2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on tarkastella tuulivoiman tuottamaa melua ja sen vaikutuksia osana tuulivoiman laajempia ympäristövaikutuksia. Työssä pyritään muodostamaan kokonaiskuva siitä, miten tuulivoimaloiden melu syntyy, miten se leviää ympäristöön ja millaisia vaikutuksia sillä voi olla ihmisiin, elinympäristöön ja alueen käytettävyyteen.

Työn lähtökohtana on se, että tuulivoima on yksi tärkeimmistä uusiutuvan energian tuotantomuodoista, mutta sen lisääntyminen edellyttää samalla vaikutusten huolellista arviointia. Tuulivoimarakentaminen ei ole pelkästään tekninen ratkaisu sähkön tuotantoon, vaan siihen liittyy myös ympäristöllisiä, sosiaalisia ja maisemallisia kysymyksiä. Erityisesti melu on yksi keskeisimmistä tekijöistä, joka voi vaikuttaa hankkeiden hyväksyttävyyteen ja sijoittamiseen.

Työssä halutaan selvittää, mistä tuulivoimalamelu muodostuu ja millaiset tekijät vaikuttavat sen kokemiseen. Pelkkä melutaso ei riitä kuvaamaan vaikutuksia, vaan tarkastelussa on huomioitava myös äänen taajuus, ajallinen vaihtelu, sääolosuhteet sekä ihmisten yksilöllinen meluherkkyys. Tämän vuoksi työssä pyritään yhdistämään akustinen tarkastelu ja ympäristönäkökulma toisiinsa.

Yksi työn keskeisistä tavoitteista on myös tarkastella tuulivoiman muita ympäristövaikutuksia, jotta melua voidaan arvioida osana laajempaa kokonaisuutta. Tuulivoimalat voivat vaikuttaa esimerkiksi linnustoon, maisemaan ja alueen maankäyttöön, joten niiden vaikutuksia ei voida käsitellä täysin erillään toisistaan. Tämä on tärkeää erityisesti silloin, kun suunnitellaan uusia voimaloita asutuksen, luontoarvojen tai maisemallisesti herkän alueen läheisyyteen.

Lisäksi työssä tarkastellaan Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistoja esimerkkitapahtumina. Näiden tapausten avulla voidaan havainnollistaa, miten tuulivoiman

vaikutukset ilmenevät käytännössä ja millaisia ratkaisuja hankkeiden suunnittelussa on tehty. Samalla voidaan arvioida, kuinka paikalliset tuuliolosuhteet, etäisyydet asutukseen sekä alueen ympäristötekijät vaikuttavat tuulivoiman toteuttamiseen.

Työn tavoitteena on siten tuottaa selkeä ja perusteltu kokonaiskuva tuulivoiman melusta ja sen vaikutuksista sekä osoittaa, miksi näiden vaikutusten huomioon ottaminen on tärkeä osa kestävästä energiasuunnittelusta. Lisäksi työ tarjoaa pohjaa myöhemmälle pohdinnalle siitä, miten uusiutuvan energian lisääminen ja ympäristöhaittojen minimointi voidaan sovittaa yhteen.

Työn rajaus

Tässä työssä keskitytään tuulivoiman tuottamaan meluun sekä sen ympäristövaikutuksiin. Työn painopiste on erityisesti siinä, miten melu syntyy, millaiset tekijät vaikuttavat sen leviämiseen ja miten se voi vaikuttaa ihmisiin ja elinympäristöön. Lisäksi työssä tarkastellaan lyhyesti muita tuulivoiman ympäristövaikutuksia, kuten linnustoa ja maisemaa, koska ne liittyvät olennaisesti tuulivoimahankkeiden kokonaisarviointiin.

Tutkimuskysymykset

Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat seuraavat: Miten tuulivoimaloiden tuottama melu syntyy ja mistä sen eri muodot johtuvat? Millaiset tekijät vaikuttavat tuulivoimalamelun leviämiseen ja koettuun häiritsevyyteen? Millaisia vaikutuksia tuulivoimalamelulla on ihmisiin, asumisviihtyvyyteen ja elinympäristöön? Mitkä muut ympäristövaikutukset on otettava huomioon tuulivoimahankkeita suunniteltaessa? Miten Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistot havainnollistavat tuulivoiman vaikutuksia käytännössä?

Näiden kysymysten avulla pyritään hahmottamaan tuulivoiman meluvaikutuksia mahdollisimman monipuolisesti. Kysymykset ohjaavat työtä siten, että tarkastelu etenee tuulivoiman perustasta sen käytännön vaikutuksiin ja edelleen laajempaan ympäristölliseen merkitykseen.

3 Tuuli ja tuulivoima

Tuulivoimaloissa hyödynnetään tuulen liike-energiaa sähköntuotantoon. Tuulen sisältämä teho määräytyy ilman tiheyden ρ , roottorin pyyhkäisyypinta-alan A sekä tuulennopeuden u perusteella. Näiden suureiden välinen riippuvuus esitetty kaavassa 1.

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

Yhtälöstä voidaan havaita, että tuulen teho kasvaa tuulennopeuden kuutiona. Tästä syystä tuulennopeus on tuulivoiman tuotannon kannalta keskeisin yksittäinen muuttuja. Todellisuudessa sähköntuotantoa rajoittavat kuitenkin useat tekijät, kuten mekaaniset, aerodynaamiset ja sähköiset häviöt. Tuulivoiman tuotantopotentiaalin arvioiminen edellyttää siten kattavaa ymmärrystä sekä tuulen syntyyn liittyvistä ilmiöistä, että alueellisista ja paikallisista tuuliolosuhteista. (Garcia-Sanz & Houppis, 2012, s. 282).

3.1 Tuuli

Tuuli luokitellaan uusiutuvaksi ja käytännössä ehtymättömäksi energialähteeksi, koska sen energia on lähtöisin auringon lämpösäteilystä. Auringon säteily ei jakaudu maapallon pinnalle tasaisesti, vaan synnyttää lämpötilaeroja erityisesti napa-alueiden ja päiväntasaajan välille. Näiden lämpötilaerojen seurauksena muodostuu paine-eroja, jotka pyrkivät tasoittumaan siten, että lämpimät ilmamassat virtaavat kohti viileämpiä alueita.

Tuulen suuntaan ja voimakkuuteen vaikuttavat paine-erosta syntyvän voiman (painegradientin) lisäksi useat muut tekijät. Ne myös vaikuttavat siihen, ettei ilmamassojen liike tapahdu suoraviivaisesti. Painegradientin aiheuttama voima suuntautuu korkeapainealueelta kohti matalapainetta. (Manwell ja muut, 2010, s. 25; Tammelin, 1991, s. 18).

Ilmamassojen liikkeeseen vaikuttaa lisäksi maapallon pyörimisliike, joka synnyttää näennäisvoimia. Näistä merkittävin on Coriolis-voima, pohjoisella pallonpuoliskolla

etelästä pohjoiseen suuntautuva ilmavirta kaartuu itään, kun taas pohjoisesta etelään liikkuva ilmassa kääntyy länteen. Tästä seuraa, että ilmassat kiertyvät pohjoisella pallonpuoliskolla myötäpäivään ja eteläisellä pallonpuoliskolla vastapäivään. (Manwell ja muut, 2010, s. 25; Karttunen ja muut, 2008, s. 48–49). Coriolis-voima F_c kuvattuna kaavassa 2.

$$F_c = f_c u \quad (2)$$

jossa f_c on Coriolis-parametri (rad/s) ja u on tuulennopeus (m/s).

Rajakerroksessa isobaarit, jotka ympäröivät matala- ja korkeapainealueita, ovat kaarevia tai ympyränmuotoisia. Tästä johtuen tuuleen kohdistuu myös keskipakoisvoima Coriolisvoiman ja painegradientin lisäksi. Keskipakoisvoima on näennäisvoima, joka johtuu pyörimisliikkeestä. Kun tämä voima huomioidaan, puhutaan gradienttisuudesta.

Maanpinnan läheisyydessä tuulen käyttäytymiseen vaikuttaa lisäksi pinnan epätasaisuudesta johtuva kitka, jota aiheuttavat esimerkiksi rakennukset ja metsät. Sitä enemmän tuulennopeus hidastuu, mitä lähemmäksi maanpintaa tullaan. Tällöin Coriolisvoiman vaikutus heikkenee, minkä seurauksena tuulen suunta kääntyy jälleen kohti matalapainealuetta. Päiväntasaajan läheisyydessä Coriolis-voima on heikko, eikä kitkan aiheuttamaa merkittävää tuulen suunnan muutosta yleensä esiinny. (Venho, 1971, s. 24).

Kitka ja turbulenttisuus

Ilmakehän alimmassa osassa maanpinnan kitka vaikuttaa voimakkaasti tuulen nopeuteen ja suuntaan. Pinnan rosoisuus, kuten rakennukset, metsät ja maastonmuodot, hidastaa ilmavirtausta ja lisää sen turbulenttisuutta. Tuulennopeus kasvaa korkeuden funktiona logaritmisesti, minkä vuoksi tuulivoimalan napakorkeus on merkittävä tekijä energiansaannon kannalta.

Kun kitka hidastaa tuulta, Coriolisvoiman vaikutus heikkenee ja tuulen suunta kääntyy kohti matalapainetta. Päiväntasaajan läheisyydessä Coriolisvoiman vaikutus on

vähäinen, eikä kitkan seurauksena tapahdu juurikaan tuulen suunnan muutosta. (Niemi, 2013, s. 14).

Tuulivoiman tuotannossa huomioidaan vain roottoriin nähden kohtisuora tuulen nopeuskomponentti. Tästä syystä myös tuulen turbulentsisuus on merkittävä tekijä. Erilaiset esteet, kuten mäet ja rakennukset, lisäävät tuulen pyörteisyyttä. Niiden vaikutus fluidin virtaukseen voi ulottua jopa 20–30-kertaiselle etäisyydelle esteen korkeuteen nähden sekä 2–3-kertaiselle korkeudelle maantasosta katsottuna. Tietyissä tilanteissa maastonmuodot voivat kuitenkin myös nopeuttaa tuulta, esimerkiksi mäkien huipuilla. (Niemi, 2013, s. 14–15).

Paikalliset tuuli-ilmiöt

Tuulen ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti eri alueilla. Paikallisiin tuuliolosuhteisiin vaikuttavat muun muassa pinnanmuodot, rosoisuus sekä vuoristojen tai meren läheisyys. Tyypillisiä paikallisia tuulia ovat maa- ja merituulet, joita esiintyy rannikkoalueilla, sekä vuoristoalueiden föhntuuli. Rannikon merituuli on Suomessa sähköntuotannon kannalta merkittävin paikallinen ilmiö.

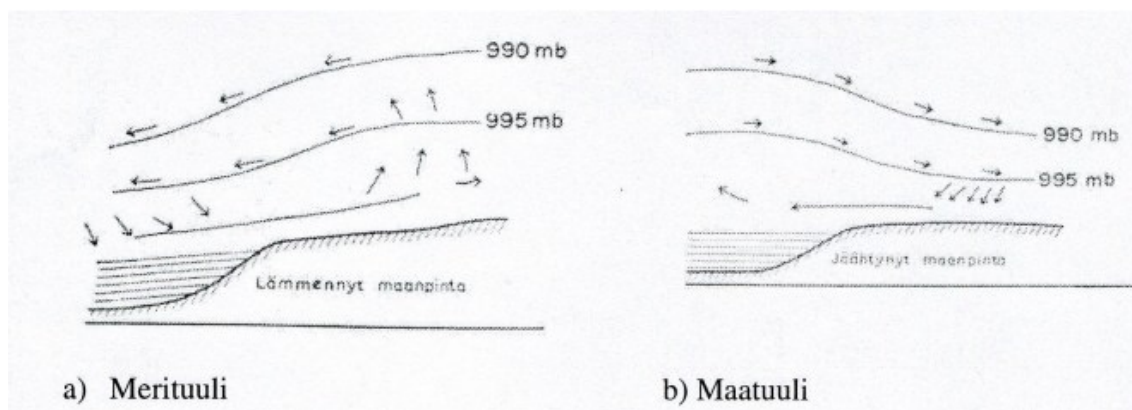
Koko maapallon mittakaavan ilmavirtaukset vaikuttavat myös alueelliseen tuulisuuteen. Vallitseva tuulensuunta Suomessa on lounas, mikä on erityisen tärkeää sisämaan tuulivoimahankkeita arvioitaessa. Yleisesti ottaen voimakkaimmat tuulet esiintyvät tunturialueilla sekä rannikolla.

Betzin lain mukaan tuulen energiasta voidaan teoriassa hyödyntää enintään 59%. Vaaka-akselisilla tuulivoimaloilla käytännössä saavutetaan kuitenkin korkeintaan noin 45% hyötysuhde. (Manwell ja muut, 2010, s. 96).

Maa- ja merituuli

Maa- ja merituulet perustuvat maan ja veden erilaisiin ominaislämpökapasiteetteihin. Päiväsaikaan maa lämpenee merta nopeammin, jolloin maanpinnan yläpuolella oleva ilma kohoaa muodostaen paikallisen matalapainealueen. Viileämpi meri-ilma virtaa tätä

kohti ja ylemmissä ilmakerroksissa ilma palautuu takaisin merelle muodostaen suljetun kierron. Tätä ilmiötä kutsutaan merituuleksi. Ohessa tuulet havainnollistettuna kuvassa 2, a) Merituuli b) Maatuuli.



Kuva 1. Tuulen synnyn periaatekuva a) merituuli. b) maatuuli (Venho, 1971, s 28).

Suomessa merituulen aiheuttama tuulennopeus on tyypillisesti 3–9 m/s. Sen vaikutus voi ulottua kymmenien kilometrien päähän sisämaahan. Yöllä tilanne kääntyy päinvastaiseksi kun maa jäähtyy nopeammin kuin meri, jolloin syntyy maatuuli. Maatuuli on yleensä heikompi ja sen nopeus on tyypillisesti 1–4 m/s.

Maa- ja merituulien synty edellyttää riittävää lämpötilaeroa sekä heikkoa perustuulta. Merituulen muodostuminen vaatii yleensä 5–15 °C lämpötilaeron ja enintään 5–8 m/s perustuulen. Lisäksi sään tulee olla selkeä tai korkeintaan puolipilvinen, auringon säteily synnyttää tarvittavan termiikkivirtauksen. Termiikissä lämpeneminen aiheuttaa maanpinnalla olevan ilman nousemisen ylöspäin. (Karttunen ja muut, 2008, s. 339–341).

Föhntuuli

Föhntuuli syntyy tilanteessa, jossa ilmavirta ylittää vuoriston. Vuoren tuulenpuoleisella rinteellä ilma kohoaa, jäähtyy ja menettää osan kosteudestaan sateena. Vuoriston ylityksen jälkeen ilmassa laskeutuu, lämpenee ja kuivuu, minkä seurauksena syntyy

lämmin ja kuiva föhntuuli. Tällöin ilman lämpötila on noin 5 °C korkeampi kilometriä kohden verrattuna tilanteeseen ennen vuoriston ylitystä. (Karttunen ja muut, 2008, s. 342).

Skandeilta puhaltava föhntuuli vaikuttaa Suomessa erityisesti talviaikaan Länsi-Lapissa ja Pohjanmaalla. Ilmiö esiintyy keskimäärin noin 11 kertaa talvessa ja siihen liittyy voimakkaan puuskittainen tuuli sekä jopa kymmenen asteen lämpötilan nousu muutaman tunnin aikana. (Karttunen ja muut, 2008, s. 256).

Paikalliset tuuliolosuhteet

Paikallisten tuuliolosuhteiden tunteminen on keskeistä tuulivoiman tuotantopotentiaalia arvioitaessa. Tuulivoimaloiden kannalta edullisimpia ovat säännölliset ja voimakkaat tuulet. Suomen rannikkoalueilla tuuliolosuhteet ovat hyvät maa- ja merituulten sekä meren vähäisen kitkavaikutuksen ansiosta. Sisämaassa tuulisuuteen vaikuttavat sen sijaan ensisijaisesti maaston rosoisuus, lähiympäristön esteet sekä voimalan korkeus.

Luotettavan tuulijakauman määrittäminen edellyttää yleensä noin viiden vuoden mittausjaksoa. Niin kutsuttua Weibull-jakaumaa hyödyntämällä tuulisuutta voidaan kuitenkin arvioida melko luotettavasti 1–2 vuoden mittauksen perusteella. Weibull-jakaumalla kuvataan tuulenopeuksien esiintymistodennäköisyyksiä. Pientuulivoimaloiden tapauksessa pitkäaikaiset mittaukset eivät ole taloudellisesti perusteltuja ja tuulisuutta arvioidaan usein Suomen tuuliatlaksen perusteella. (Gipe, 1999, s. 81).

Weibull-jakauma menetelmä soveltuu Suomessa parhaiten rannikko- ja merialueille, joilla tyyniä hetkiä on vähän. Sisämaan osalta tulokset ovat lähinnä suuntaa-antavia, eikä menetelmä korvaa monivuotisia paikallisia mittauksia. (Tammelin, 1991, s. 216).

Tuuliolosuhteet Kurikka ja Mustasaari

Liittestä 1 nähdään, että 100m korkeudessa, vuositasolla Mustasaassa Merkkikallion alueella tuulen keskinopeus on 7,5–8,0 m/s luokkaa, kun taas Kurikassa Santavuoren alueella 6,5–7,0 m/s luokkaa. Liittestä 2 voidaan huomata, että korkeuden kasvaessa 200 metriin on tuulen keskinopeus Mustasaassa Merkkikallion alueella n. 9,5–10,0 m/s ja Kurikassa Santavuoren alueella n. 7,5–8,0 m/s.

3.2 Tuulivoima

Tuulivoiman tuotanto perustuu tuulen liike-energiaan, joka on peräisin auringon lämpösäteilystä. Tuulen teho riippuu ilman tiheydestä, roottorin pyyhkäisyypinta-alasta ja tuulennopeudesta. Teho on suoraan verrannollinen tuulennopeuden kolmanteen potenssiin, mikä korostaa tuulennopeuden merkitystä energiantuotannossa. Tuulivoimalan tuottama teho voidaan laskea kaavalla 1. Missä P on teho, ρ ilman tiheys, A roottorin pyyhkäisyypinta-ala ja u tuulennopeus. Tuulivoimalan hyötysuhde on parhaimmillaan noin 45 %, kun taas teoreettinen maksimihyötysuhde Betz:n lain mukaan on 59 %. (Garcia-Sanz & Houppis, 2012, s 282; Manwell ja muut, s 96).

Tuulivoiman tuottaminen Suomessa

Tuulivoiman tuotanto Suomessa on kasvanut nopeasti ja ollut yksi keskeisistä uusiutuvan sähköntuotannon muodoista viime vuosina. Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta oli vuonna 2023 noin 18 % ja maassa oli käytössä yli 1 600 tuulivoimalaa (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2023). Motivan mukaan tuulivoimaa on rakennettu viime vuosina aiempaa runsaammin. Suomessa on tuulivoimaan soveltuvia alueita monipuolisesti, tuuliolosuhteiden ollessa hyväterityisesti talvikausina (Motiva, 2025). Tuulivoiman rakennuskustannukset ja tuotannon kannattavuus riippuvat sijainnista ja infrastruktuurista. Lisäksi rakentaminen on yleistynyt merkittävästi myös ilman valtion tukia. Tuulivoimaloiden keskikoko

Suomessa on kasvanut 2000-luvulla siten, että yksittäisten tuulivoimaloiden nimellisteho on nyt usein yli 4 megawattia (MW) ja suurimmat jopa noin 5,6 MW (Motiva, 2025). Tuulivoiman rakentamisen odotetaan edelleen lisääntyvän osana kansallista energia- ja ilmastostrategiaa, jolla pyritään kasvattamaan uusiutuvaa energiatuotantoa ja vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä.

Ympäristöystävällisyys

Tuulivoima on ympäristöystävällinen energiantuotantomuoto, sillä se ei tuota kasvihuonekaasupäästöjä toimintavaiheessa. Tuulivoiman avulla voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja näin ollen hiilidioksidipäästöjä. (WWF, 2024). Huolellisella suunnittelulla tuulivoimaa voidaan lisätä samalla kun huomioidaan luonnon ja ympäristön suojelu.

Tuulivoiman ympäristövaikutukset ovat pääasiassa paikallisia, kuten maiseman muutos ja linnustoon kohdistuvat vaikutukset. Tuulivoimalat voivat aiheuttaa törmäysriskejä linnuille, erityisesti muuttolinnuille, mutta huolellisella suunnittelulla nämä riskit voidaan minimoida. (BirdLife Suomi, 2024; Metsähallitus, 2024).

Tuulivoimaloiden vaikutukset vaihtelevat huomattavasti sen mukaan, missä ne sijaitsevat, kuinka suuria ne ovat ja millaisia ympäristöarvoja alueella on. Tuulivoimarakentamista ohjataan yhteensovittamalla eri toimintoja. Siten voidaan valita alueet, jotka sopivat parhaiten rakentamiseen. Samalla pyritään minimoimaan haitalliset vaikutukset ihmisten asuinalueille ja luonnolle. (Ympäristöministeriö, 2016b, s. 13).

Tuulivoimarakentaminen ei yleensä sovi valtakunnallisesti arvokkaille maisema-alueille, merkittäville rakennetuille kulttuuriympäristöille, luonnonsuojelualueille, erämaalain nojalla perustetuille erämaa-alueille tai kansainvälisesti tärkeille linnuston IBA-alueille. (Ympäristöministeriö, 2016b, s. 17).

Tuulivoimaloiden sijoittamisessa ympäristönäkökulma korostuu erityisesti asutuksen ja muiden melulle herkiksi tunnistettujen alueiden läheisyydessä.

Maakuntakaavoituksessa tuulivoima-alueiden sijainti määritellään yleispiirteisesti, jotta voidaan varmistaa, että yksityiskohtaisessa suunnittelussa voidaan huomioida meluhaitat. Yksityiskohtaisessa suunnittelussa laaditaan meluselvitys, jossa arvioidaan, että ulko- ja sisämelut pysyvät voimassa olevien asetusten rajoissa. (Ympäristöministeriö, 2016b s. 82).

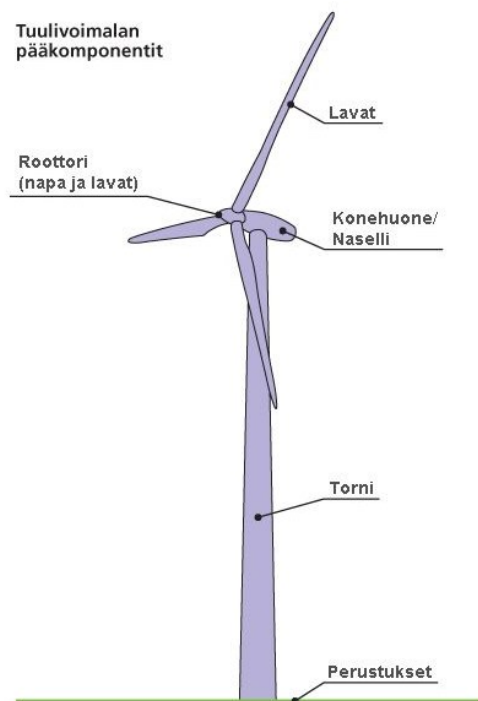
Niin kutsuttu välkevaikutus syntyy roottorin lapojen liikkeessa auringonvalon osuessa niihin, mikä aiheuttaa vilkkuvaa varjoa. Välke voi ulottua jopa 3 kilometrin päähän ja vaikuttaa lähinnä aurinkoisina päivinä. Sen hallinta on tärkeää ympäristön ja asutuksen kannalta. Vaikutusta voidaan vähentää mallinnuksen avulla ja ohjelmoimalla voimalat pysähtymään kriittisinä aikoina. Mallinnuksessa otetaan huomioon alueen auringonpaiste, pilvisuus ja asutuksen sijainti, jotta voidaan arvioida todellinen vaikutus ympäristöön. Muiden maiden suositukset välkevaikutuksen rajoittamisesta tarjoavat hyödyllistä vertailutietoa, vaikka Suomessa ei ole virallisia raja-arvoja. (Ympäristöministeriö, 2016b, s. 82, 84).

Tuulivoimaloiden koko

Tuulivoimalat ovat kooltaan erittäin suuria energiantuotantolaitoksia ja niiden mitat ovat kasvaneet merkittävästi teknologian kehittyessä. Tuulivoimalan keskeisiä mittoja ovat tornin napakorkeus sekä roottorin halkaisija, jotka yhdessä määrittävät voimalan kokonaiskorkeuden ja pyyhkäisyypinta-alan. Suomessa uusien maatuulivoimaloiden napakorkeus on tyypillisesti noin 150–175 metriä ja roottorin halkaisija voi olla yli 160 metriä. Tällöin voimalan siiven kärjen saavuttama suurin korkeus eli pyyhkäisykorkeus voi nousta jopa noin 250 metriin (VSB Uusiutuva Energia, 2024).

Tuulivoimaloiden koko kasvaa jatkuvasti, koska suurempi roottorin pyyhkäisyypinta-ala mahdollistaa suuremman energiamäärän talteenoton tuulesta ja parantaa voimalan tuotantotehokkuutta. Joissakin uusissa suomalaisissa tuulivoimahankkeissa suunniteltujen voimaloiden kokonaiskorkeus voi olla jopa noin 350 metriä, roottorin halkaisija enintään noin 250 metriä ja napakorkeus noin 225 metriä, mikä kuvastaa tuulivoimateknologian nopeaa kehitystä ja voimaloiden koon kasvua (Rejlers Finland, 2024, s. 26).

Kuvassa 2 on kuvattuna tuulivoimala ja kuvaan on nimetty seuraavat osat: roottori, lapa, konehuone, torni ja perustus.



Kuva 2. Tuulivoimalan rakenne (Motiva, 2026a).

Tuuliturbiinit

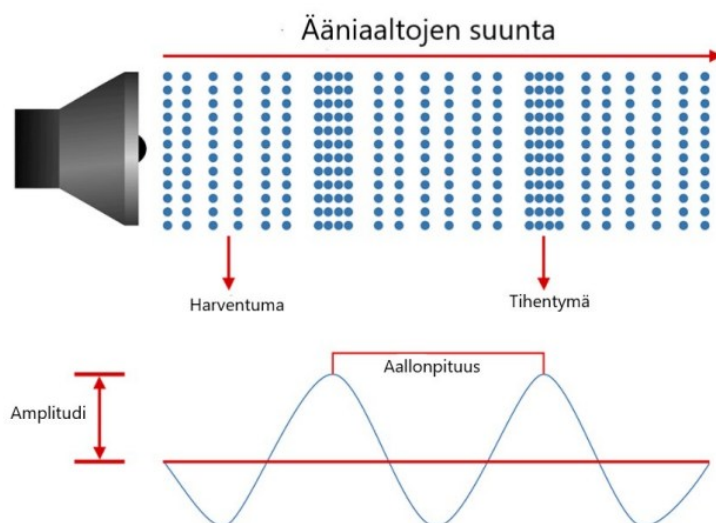
Tuuliturbiineja on kahdenlaisia: vaaka-akseliset (HAWT) ja pystyakseliset (VAWT). Vaaka-akseliset tuuliturbiinit ovat yleisimpiä ja niissä on yleensä 2–3 lapa, jotka muistuttavat lentokoneen potkureita. Pystyakseliset tuuliturbiinit, kuten Darrieus-turbiini, voivat hyödyntää tuulta useasta suunnasta, mutta niiden hyötysuhde on yleensä huonompi kuin vaaka-akselisten turbiinien. Pystyakseliset turbiinit soveltuvat paremmin pienimuotoiseen tuotantoon ja erityisiin sovelluksiin (Rishmany ja muut, 2017, s.208–212).

4 Ääni

Ääni on värähtelyä tai aaltoliikettä, jonka ihmisen kuuloaisti havaitsee. Akustiikassa ääni-ilmiöitä tarkastellaan esimerkiksi koneiden aiheuttaman melun kautta. Ilmassa etenevä ääni syntyy lähes aina mekaanisesta värähtelystä, vaikka ei-mekaanisia ääniäkin voi esiintyä, kuten salamasta aiheutuneena. Melulla tarkoitetaan häiritsevää tai epämiellyttävää ei-toivottua ääntä. Riittävän voimakkaana melu voi vaurioittaa kuuloa. (Karjalainen, 2000, s. 4).

4.1 Akustiikan perusteita

Äänen synnyttää heräte, joka saa aikaan värähtelyn tai aaltoliikkeen. Tämä liike voi edetä väliaineessa, voimistua resonanssin vaikutuksesta, vaimentua häviöiden vuoksi tai muuttua toiseen energiamuotoon, kuten lämmöksi. Värähtelyyn liittyy potentiaali- ja liike-energian jatkuva vuorottelu. Häviöiden seurauksena osa liike-energiasta muuttuu yleensä lämmöksi. Myös muihin energiamuotoihin, kuten sähköiseen, muuntuminen on mahdollista. (Karjalainen, 2000, s. 5–6). Kuvassa 3 on kuvattu pitkittäisten ääniaaltojen kulkua äänilähteestä poispäin sekä niissä esiintyvä harventuma ja tihentymä. Sekä havainnollistettu ääniaallon aallonpituus ja amplitudi.



Kuva 3 Pitkittäinen ääniaalto (Hanna, 2025).

Resonanssi on ilmiö, jossa tietyn taajuinen värähtely tai ulkoinen voima vahvistaa toisen systeemin värähtelyä ja kasvattaa sen amplitudia. Tätä taajuutta kutsutaan systeemin ominaistaajuudeksi. Resonanssilla voi olla sekä myönteisiä että haitallisia vaikutuksia. Soittimissa resonanssia hyödynnetään äänen vahvistamiseen. Koneissa se voi taas aiheuttaa haitallista värähtelyä tai melun kasvua (Karjalainen, 2000, s. 7–10).

Akustiikan suureita

Äänen voimakkuutta kuvataan äänipaineella. Se perustuu aaltoliikkeen aiheuttamiin paineen vaihteluihin suhteessa väliaineen staattiseen paineeseen. Äänipaineen yksikkö on pascal (Pa). Ihmisen kuulemat äänipaineet ovat hyvin pieniä ja sijoittuvat noin välille 2×10^{-5} –50 Pa. Laajan mitta-alueen vuoksi käytetään logaritmista desibeliasteikkoa (dB), joka on suhteellinen mittayksikkö. Ihmisen kuuloalue kattaa noin 0–130 dB. (Karjalainen, 2000, s. 12–13).

Äänen voimakkuutta havainnollistetaan usein esimerkeillä: esimerkiksi suihkumoottorin äänitaso on noin 134 dB, rock-konsertin 114 dB, yleisen toimistomelun 74 dB ja erittäin hiljaisen huoneen noin 14 dB. (Di Napoli, 2007, s. 8).

Äänen teho P kuvaa aikayksikössä tehtyä työtä ja akustiikassa sillä tarkoitetaan äänilähteen ympäristöönsä värähtelemää akustista energiaa. (Karjalainen, 2000, 13–14).

Äänen intensiteetti I on tehoa pinta-alaa kohden (W/m^2) ja se kuvaa äänienergian virtausta. Esimerkiksi pallosymmetrisessä aaltoliikkeessä intensiteetti pienenee etäisyyden kasvaessa säteen neliöön käänteisesti. (Karjalainen, 2000, s. 14).

Värähtelyn taajuus ilmaistaan hertseinä (Hz), joka ilmaisee värähdysten lukumäärän sekunnissa. Ihmisen kuuloalue on keskimäärin noin 16 Hz–20 kHz. Siihen vaikuttavat yksilölliset tekijät kuten ikä ja äänen voimakkuus. Yli 20 kHz:n äänet ovat ultraääniä ja alle 16 Hz:n infraääniä. (Karjalainen, 2000, s. 32; Joutsenvirta, 2009). Taajuus f voidaan laskea kaavalla 3.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (3)$$

Jossa v on äänennopeus ja λ aallonpituus. Äänen nopeus riippuu väliaineesta ja lämpötilasta. Esimerkiksi ilmassa se on noin 331 m/s lämpötilassa 0 °C ja noin 345 m/s lämpötilassa 22 °C. (Joutsenvirta, 2009).

Kaasuja ja nesteitä kutsutaan fluideiksi. Niissä esiintyy pääasiassa pitkittäistä aaltoliikettä. Kiinteissä aineissa voi esiintyä myös poikittaista aaltoliikettä, kuten soittimen palkissa tai kielessä. Esimerkiksi ilman pitkittäisen aallon nopeus on noin 343 m/s, veden 1410 m/s ja teräksen noin 5100 m/s. (Karjalainen, 2000, s. 15–18).

4.2 Melu

Melu on ääntä, joka koetaan häiritseväksi tai haitalliseksi. Se voi aiheuttaa keskittymisen heikkenemistä, unihäiriöitä, psyykkistä kuormitusta ja ärtymystä. Häiritsevyyden kokemus on yksilöllinen, mutta melun haitallisuus kuulolle on objektiivisemmin arvioitavissa. Tiedetyt äänitasot voivat aiheuttaa kuulovaurioita, joko pitkäaikaisen altistuksen tai lyhyen mutta voimakkaan meluannoksen seurauksena. (Karjalainen, 2000, 38). Taulukossa 1 on kuvailtu erilaisia melunlähteitä ja niiden suuruuksia:

Taulukko 1. Erilaisia melunlähteitä (Starck & Terävirta 2009).

Melun aiheuttaja	melutaso dB(A)
lehtien havina	10–30
äänekäs puhe	50–70
tieliikenne	70–85
matkustajalentokone (nousu ja lasku)	75–90
lasten lelut	78–108
rock-konsertti	95–115
yökerho	100–120
moottorisaha	100–105
haulikko	154–160

Melun mittaamisessa käytetään taajuuspainotuksia. Yleisimmät ovat A- ja C-painotukset, jotka vastaavat ihmisen kuulon herkkyyttä. G-painotus korostaa matalia taajuuksia ja infraääniä, kun taas Z-painotus on täysin painottamaton. A-painotusta käytetään yleisesti ympäristömelun arvioinnissa. (Council of Canadian academics, 2015, 30–31).

Tilapäinen kuulon alenema voi syntyä esimerkiksi tuntien altistumisesta noin 74 dB toimistomelulle tai minuuttien altistumisesta yli 100 dB äänille. Pitkäaikainen altistuminen, esimerkiksi 85 dB kahdeksan tuntia päivittäin A-äänitasona mitattuna, voi vuosien kuluessa aiheuttaa pysyvän kuulovamman. (Karjalainen, 2000, s. 38–39).

Ääniaistimus voimistuu kipuaistimukseksi noin 120–130 dB:n tasolla. Pysyvästi kuulojärjestelmää voi vaurioittaa yli 140 dB impulssiääni. Tyypillisiä melun aiheuttamia vaurioita ovat kuulon aleneminen, suuntakuulon heikkeneminen ja tinnitus. (Karjalainen, 2000, s. 39).

Tuulivoimalan melu

Tuulivoimaloiden tuottama melu on yksi tekijä niiden rakentamisen rajoittamisessa. Melu jaetaan aerodynaamiseen ja mekaaniseen. Aerodynaaminen melu syntyy ilmavirran ja roottorin lapojen vuorovaikutuksesta, kun taas mekaaninen melu liittyy sähköntuotantokoneiston toimintaan. Nykyaikaisissa suurissa tuulivoimaloissa aerodynaaminen melu on yleensä hallitseva, koska sen kasvu on suhteessa voimakkaampaa turbiinin koon kasvaessa. Mekaanista melua on pystytty sen sijaan vaimentamaan tehokkaammin. (Oerlemans ja muut, 2007, s. 869; Uosukainen, 2010, s. 8).

Tuuliturbiinin melua kuvataan usein tonaalisena, laajakaistaisena, matalataajuisena tai impulsiivisena. Tonaalinen ääni tarkoittaa kapeakaistaisella tai yksittäisellä taajuudella tavattavaa ääntä. Sitä voivat aiheuttaa esimerkiksi laakerit, hammasratat ja muuttuva ilmavirtaus rakojen, reikien sekä jättöreunojen yli. Laajakaistaista melua syntyy ilmavirtauksen ja roottorinlapojen vuorovaikutuksesta syntyvästä turbulenttisesta ilmavirtauksesta. Matalataajuinen melu sijoittuu taajuusalueelle 20–200 Hz ja syntyy

pääosin turbulenttisen ilmapvirtauksen ja lavan vuorovaikutuksesta. Infraääntä syntyy alle 20 Hz:n taajuuksilla, mutta tasot jäävät yleensä selvästi kuulokynnyksen alapuolelle. Impulsiivinen ääni, jossa amplitudi vaihtelee ajan mukaan kuvataan jyskyttäväksi ääneksi ja akustiseksi impulsiksi. Tällainen ääni syntyy, kun ilmapvirtaus sekoittuu tornin ja roottorin lapojen välissä. (Bolin ja muut, 2011, s. 5; Madsen & Pedersen, 2010, s. 60–61).

Mekaaninen melu

Mekaaninen melu aiheutuu tuulivoimalan pyörivistä mekaanisista ja sähköisistä komponenteista. Suurin osa energiasta on alle 1000 Hz:n taajuusalueella ja melu on usein tonaalista. Merkittävimpiä lähteitä ovat vaihdelaatikko, generaattori, jäähdytystuulettimet ja apulaitteet. Vaihdelaatikko on yleensä suurin yksittäinen melulähde. Ääni voi välittyä ilman kautta tai runkoäänenä rakenteiden kautta, joista jälkimmäinen on usein merkittävämpi. (Rogers, 2006, s. 10–11; Uosukainen, 2010, 13–14; Di Napoli, 2007, s. 11).

Aerodynaaminen melu

Aerodynaaminen melu syntyy ilman virratessa lavan yli ja on usein tuuliturbiinin suurin melulähde. Se kasvaa roottorin pyörimisnopeuden myötä. Merkittävin lähde on lavan jättöreunan aiheuttama melu, jonka pääenergia sijoittuu taajuusalueelle 250–1000 Hz. Lisäksi melua syntyy turbulenttisesta virtauksesta ennen johtoreunaa, lavan kärjestä sekä lavan ja tornin vuorovaikutuksesta. (Tonin, 2012, s. 22–23).

Melun vaimennus

Mekaanista melua voidaan vaimentaa tehokkaasti esimerkiksi koteloinnilla, tärinäeristyksellä ja jäähdytysjärjestelmien optimoinnilla. Aerodynaamisen melun vaimennus on haastavampaa, koska melua vähentävät ratkaisut heikentävät monesti lavan hyötysuhdetta. Melua voidaan pienentää rajoittamalla lavan kärkinopeutta, säätämällä lapakulmaa, lisäämällä kärkeen siivekkeitä tai optimoimalla lavan geometriaa,

kuten jättöreunan sahalaitaista muotoilua. (Di Napoli, 2007, s. 14, Uosukainen, 2011, s. 4).

Ulkomelutason ohjearvot

Suomessa tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvot on määritelty ympäristösuojelulain nojalla ja ne ovat olleet voimassa 1.9.2015 alkaen. Asuinalueilla päiväajan (klo 7–22) A-painotettu keskiäänitaso saa olla enintään 45 dB ja yöaikaan (klo 22–7) 40 dB. Samat rajat koskevat loma-asutusta, hoitolaitoksia ja leirintäalueita. Kansallispuistoissa raja on 40 dB sekä päivällä että yöllä. Mikäli melu on impulssimaista tai kapeakaistaista, mittaustulokseen lisätään 5 dB ennen vertailua ohjearvoihin. (Finlex, 2015).

Infraääni ja tuulivoiman tuottaman melun terveysvaikutukset

Ääni syntyy ilmanpaineen vaihteluista, jotka etenevät aaltoliikkeenä ja joita ihmisen kuulaisti pystyy havaitsemaan. Äänen ominaisuuksia kuvataan keskeisesti kahdella suureella: äänenpainetasolla, joka ilmaisee voimakkuuden desibeleinä, sekä taajuudella, joka kertoo värähtelyjen määrän sekunnissa hertseinä. Äänen fyysikaalinen luonne ei muutu taajuuden mukana, vaan kaikki äänet perustuvat samaan ilmiöön riippumatta siitä, ovatko ne korkeita vai matalia (Hongisto & Oliva, 2017 s. 10–11).

Ihmisen kuulo ei kata kaikkia mahdollisia taajuuksia, vaan havaintokyky rajoittuu tietylle alueelle. Perinteisesti kuuloalueeksi esitetään noin 20–20 000 Hz, mutta tämä on yksinkertaistus. Todellisuudessa ihminen voi havaita ääniä myös tämän alueen ulkopuolelta, erityisesti silloin kun äänen voimakkuus on riittävän suuri. Kuuloherkkyys vaihtelee kuitenkin voimakkaasti taajuuden mukaan ja parhaimmillaan se on keskitaajuuksilla (Hongisto & Oliva, 2017 s. 11–12).

Kuulokynnys määrittelee pienimmän äänenpainetason, jonka ihminen pystyy havaitsemaan. Tämä kynnyksi ei ole vakio, vaan riippuu taajuudesta: matalilla ja korkeilla taajuuksilla tarvitaan suurempi äänenpainetaso kuin keskialueella. Tämän vuoksi

infraäänit, eli alle 20 Hz taajuudet, jäävät usein havaitsematta, koska niiden voimakkuus on tyypillisesti liian alhainen (Hongisto & Oliva, 2017 s. 11–12).

On kuitenkin virheellistä ajatella, että alle 20 Hz taajuudet olisivat täysin kuulumattomia. Äänen havaittavuus määräytyy ensisijaisesti sen voimakkuuden perusteella, ei pelkästään taajuuden. Jos matalataajuinen ääni ylittää kuulokynnyksen, se voidaan havaita samalla tavoin kuin korkeampitaajuinen ääni. Näin ollen raja kuultavan ja ei-kuultavan äänen välillä ei ole jyrkkä, vaan asteittainen (Hongisto & Oliva, 2017 s. 12–13).

Infraääniä esiintyy luonnostaan ympäristössä jatkuvasti, mutta useimmiten niiden taso jää kuulokynnyksen alapuolelle. Tämän vuoksi niitä ei tavallisesti havaita tietoisesti. Kuitenkin tilanteissa, joissa infraäänen voimakkuus kasvaa riittävän suureksi, se voi tulla havaittavaksi. Tästä huolimatta tällaiset tilanteet ovat arjessa harvinaisia (Hongisto & Oliva, 2017 s. 12–13).

Kuulokyvyssä on myös merkittäviä yksilöllisiä eroja. Eri ihmiset voivat havaita ääniä eri voimakkuustasoilla ja esimerkiksi iän myötä kuulo heikkenee erityisesti korkeilla taajuuksilla. Lisäksi herkimmät yksilöt voivat havaita ääniä, jotka jäävät useimmilta huomaamatta. Tämä vaihtelu on tärkeä huomioida, kun arvioidaan äänten vaikutuksia väestötasolla (Hongisto & Oliva, 2017 s. 12–13).

Yksi laajimmista tutkimuksissa tuulivoimaloiden tuottamien matalataajuisten äänten tasoista on erään japanilaisen tutkimusryhmän toteuttama. Tutkimuksessa analysoitiin yhteensä 164 mittausjaksoa, joista kukin kesti viisi päivää ja kohteina oli 29 eri tuulivoima-aluetta. Mittauksia tehtiin noin 100–1000 metrin etäisyydellä voimaloista, joiden teho vaihteli 1–3 megawatin välillä. Tulosten perusteella matalin taajuus, jolla ääni ylitti ihmisen havaintokynnyksen, oli 31,5 hertsiä. On myös huomattava, että mittaukset sisälsivät ympäristön tuulen synnyttämää ääntä, joten saadut arvot kuvaavat todennäköisesti hieman suurempia tasoja kuin pelkästään tuulivoimaloiden aiheuttama melu (Hongisto & Oliva, 2017 s. 21).

Rakennusten sisällä tehtyjä mittauksia tuulivoimaloiden tuottamasta infraäänestä on selvästi vähemmän kuin ulkotiloissa toteutettuja selvityksiä. Yksi tärkeä syy tähän on se, että tarkkojen mittausten suorittaminen edellyttää usein tilojen tyhjentämistä, mikä ei ole käytännössä mahdollista asutuissa kohteissa (Hongisto & Oliva, 2017 s. 22).

Lisäksi sisätiloissa mitattavat äänenpainetasot ovat yleensä hyvin matalia, mikä tekee niiden luotettavasta mittaamisesta vaikeaa. Mittaustuloksiin vaikuttaa merkittävästi rakennuksen omista laitteista syntyvä taustamelu, kuten lämmitysjärjestelmät, kylmälaitteet ja ilmanvaihto, jotka voivat peittää alleen tuulivoimaloiden aiheuttamat äänet (Hongisto & Oliva, 2017 s. 22).

Sisätiloihin kantautuvan tuulivoimalamelun taso määritetään tavallisesti laskennallisesti eri taajuusalueilla. Tämä tehdään vähentämällä ulkona mitatusta äänen voimakkuudesta rakennuksen julkisivun vaimennusvaikutus, jota kuvataan äänitasoerolla DL. Tarkimmat tulokset saadaan silloin, kun kyseisen rakennuksen julkisivun eristävyys on mitattu erikseen. Tällaiset mittaukset ovat kuitenkin työläitä ja aiheuttavat kustannuksia, minkä vuoksi niitä ei usein tehdä. Käytännössä sisätilojen melutasojen arvioinnissa hyödynnetäänkin usein aiempaan tutkimustietoon perustuvia tilastollisia arvoja, jotka kuvaavat rakennusten julkisivujen tyypillistä ääneneristystä. Näiden avulla voidaan arvioida vähimmäistaso, jolla ulkoa tuleva ääni vaimenee ennen sisätiloihin päätymistä (Hongisto & Oliva, 2017 s. 22).

Tuulivoimaloiden äänen ja erityisesti infraäänen mahdollisten terveysvaikutusten tutkiminen on monimutkaista, koska yksiselitteisen syy–seuraussuhteen osoittaminen on vaikeaa. Luotettava näyttö edellyttäisi tarkkaa tietoa altistuksesta, pitkäaikaista seuranta sekä muiden vaikuttavien tekijöiden hallintaa. Käytännössä tutkimuksissa altistuminen vaihtelee yksilöittäin ja samanaikaisesti vaikuttavat esimerkiksi elämäntilanne, ympäristötekijät ja yksilöllinen herkkyys. Lisäksi suuri osa aineistosta

perustuu itse ilmoitettuihin oireisiin, mikä lisää tulosten tulkinnan epävarmuutta ja altistaa esimerkiksi odotuksiin liittyville vaikutuksille (Hongisto & Oliva, 2017 s. 31).

Tieteellisessä tutkimuksessa korostuu myös se, että altistuksen ja vaikutusten välistä yhteyttä arvioitaessa on huomioitava mahdolliset harhat. Esimerkiksi tutkimukseen osallistuvien valikoituminen voi vääristää tuloksia, jos tutkimuksiin osallistuvat herkemmin henkilöt, jotka kokevat oireita. Lisäksi tiedonkeruumenetelmät ja tutkimusasetelmat vaihtelevat, mikä vaikeuttaa eri tutkimusten vertailua. Tämän vuoksi yksittäisten tutkimusten tuloksia ei voida suoraan yleistää koko väestöön ilman kriittistä tarkastelua (Hongisto & Oliva, 2017 s. 31).

Melun häiritsevyys on keskeisin ja johdonmukaisimmin havaittu vaikutus tuulivoimaloiden yhteydessä. Häiritsevyys ei kuitenkaan määräydy yksinomaan äänen voimakkuuden perusteella, vaan siihen vaikuttavat myös äänen ominaisuudet sekä yksilön kokemus ja suhtautuminen melulähteeseen. Esimerkiksi visuaalinen kontakti voimaloihin, ennakkokäsitykset sekä kokemus vaikutusmahdollisuuksista voivat lisätä tai vähentää häiritsevyyttä (Hongisto & Oliva, 2017 s. 32).

Useissa tutkimuksissa on havaittu yhteys äänenpainetason ja häiritsevyyden välillä, mutta yksilöllinen vaihtelu on suurta. Sama melutaso voi aiheuttaa toiselle voimakasta häiriötä ja toiselle vain vähäistä tai ei lainkaan haittaa. Tämä korostaa subjektiivisen kokemuksen merkitystä melun vaikutuksissa. Lisäksi melun ajallinen vaihtelu ja amplitudimodulaatio voivat lisätä häiritsevyyttä, vaikka keskimääräinen taso olisi suhteellisen alhainen (Hongisto & Oliva, 2017 s. 32–33).

Pitkäaikainen altistuminen häiritseväksi koetulle äänelle voi aktivoida elimistön stressireaktioita. Tämä voi näkyä esimerkiksi lisääntyneenä hormonitoiminnan aktivoitumisena tai kohonneena vireystilana. Vaikka tällaisia mekanismeja on esitetty, tutkimusnäyttö ei kuitenkaan osoita selkeitä ja johdonmukaisia fysiologisia muutoksia, jotka voitaisiin suoraan liittää tuulivoimalameluun. Stressireaktioiden voimakkuus

riippuu pitkälti yksilön kokemuksesta ja tilanteen tulkinnasta (Hongisto & Oliva, 2017 s. 34).

Melun mahdolliset stressivaikutukset voivat välittyä epäsuorasti myös hyvinvointiin. Jos ääni koetaan häiritseväksi, se voi lisätä ärtyneisyyttä ja heikentää elämänlaatua. Näiden vaikutusten arviointi on kuitenkin vaikeaa, koska ne ovat usein monitekijäisiä ja liittyvät laajemmin yksilön elämäntilanteeseen (Hongisto & Oliva, 2017 s. 34–35).

Unen häiriintyminen on yksi yleisimmistä ympäristömeluun liitettyistä vaikutuksista ja sama koskee myös tuulivoimalamelua. Melu voi vaikeuttaa nukahtamista, aiheuttaa heräilyä tai heikentää unen laatua. Vaikutukset riippuvat sekä äänen tasosta että yksilön herkkyydestä ja suhtautumisesta meluun. Jos ääni koetaan häiritseväksi, sen vaikutus uneen voi olla merkittävämpi kuin pelkän äänenpainetason perusteella voisi olettaa. (Hongisto & Oliva, 2017 s. 36).

On kuitenkin huomattava, että kaikki altistuneet eivät koe unihäiriöitä. Tämä viittaa siihen, että yksilölliset tekijät, kuten meluherkkyys ja psykologiset tekijät, vaikuttavat keskeisesti siihen, miten melu koetaan ja millaisia vaikutuksia sillä on. (Hongisto & Oliva, 2017 s. 36).

Tuulivoimaloihin liitettyjä oirekokonaisuuksia on kuvattu esimerkiksi käsitteellä tuuliturbiinisyndrooma. Tällä viitataan joukkoon erilaisia oireita, kuten päänsärkyä, huimausta ja keskittymisvaikeuksia. Tieteellinen näyttö tällaisesta selkeästä oireyhtymästä on kuitenkin puutteellista, eikä sitä ole tunnustettu laajasti lääketieteellisessä yhteisössä (Hongisto & Oliva, 2017 s. 37).

Samoin vibroakustiseksi taudiksi kutsuttu ilmiö liittyy voimakkaaseen pitkäaikaiseen altistumiseen matalataajuiselle melulle, mutta sen yhteys tuulivoimaloihin ei ole selkeä. Tutkimusnäyttö ei tue sitä, että tavanomaiset tuulivoimaloiden tuottamat äänenpainetasot aiheuttaisivat tällaisia vaikutuksia (Hongisto & Oliva, 2017 s. 38–39).

Elämänlaadun muutokset liittyvät usein siihen, miten tuulivoimalat koetaan osana elinympäristöä. Jos voimalat koetaan häiritsevinä tai maisemaa heikentävinä, ne voivat vaikuttaa asumisviihtyvyyteen ja koettuun hyvinvointiin. Toisaalta osa ihmisistä suhtautuu tuulivoimaan neutraalisti tai myönteisesti, jolloin vaikutuksia ei koeta negatiivisina (Hongisto & Oliva, 2017 s. 40).

Elämänlaadun muutoksiin vaikuttavat myös sosiaaliset ja taloudelliset tekijät, kuten kiinteistöjen arvoihin liittyvät huolenaiheet tai yhteisön sisäiset ristiriidat. Nämä tekijät voivat vahvistaa negatiivisia kokemuksia riippumatta varsinaisesta melutasosta (Hongisto & Oliva, 2017 s. 40–41).

Tutkimuksissa on tarkasteltu myös mahdollisia yhteyksiä kroonisiin sairauksiin. Esimerkiksi diabeteksen osalta ei ole löydetty vahvaa näyttöä siitä, että tuulivoimalamelu lisää sairastumisriskiä. Tulokset viittaavat siihen, että mahdolliset yhteydet ovat heikkoja tai selittyvät muilla tekijöillä (Hongisto & Oliva, 2017 s. 43).

Kokonaisuutena tutkimusnäyttö viittaa siihen, että tuulivoimaloiden aiheuttamat vaikutukset liittyvät ensisijaisesti melun kokemiseen, erityisesti häiritsevyyteen, eikä suoriin fysiologisiin vaikutuksiin. Keskeinen tekijä on se, miten yksilö kokee ja tulkitsee äänen, mikä korostaa psykologisten ja sosiaalisten tekijöiden merkitystä (Hongisto & Oliva, 2017 s. 31–43).

Tuulivoimaloiden tuottama ääni voi vaikuttaa ihmisten hyvinvointiin erityisesti häiritsevyyden ja unen laadun kautta. Ympäristömelulle tyypillisiä haittoja ovat koettu häiriintyminen sekä univaikeudet ja nämä vaikutukset ovat samankaltaisia melun lähteestä riippumatta (THL, 2020).

Pelkkä äänen voimakkuus ei kuitenkaan selitä häiritsevyyttä, vaan siihen vaikuttavat myös esimerkiksi näkyvyys melulähteeseen, yksilön asenteet sekä huoli mahdollisista terveysvaikutuksista. Vaikka tutkimusnäyttö tuulivoimamelun ja unihäiriöiden välisestä

yhteydestä on vähäisempää kuin häiritsevyyden osalta, on yleisesti tiedossa, että riittävän voimakas ääni voi heikentää unta (THL, 2020).

World Health Organization (WHO) toteaa, että tuulivoimameluun liittyvät haitat rajoittuvat pääasiassa häiritsevyyteen ja unen häiriintymiseen, eikä muista terveysvaikutuksista ole vakuuttavaa näyttöä (WHO, 2018). Laajat tutkimukset, kuten kanadalainen Health Canada's Community Noise and Health Study -tutkimus sekä Tanskassa toteutettu rekisteritutkimus, eivät ole osoittaneet yhteyttä äänen voimakkuuden tai etäisyyden ja sairauksien välillä. Sen sijaan haittojen riski kasvoi, jos voimaloiden ääni, valot tai varjostus koettiin häiritsevinä (THL, 2020).

Suomessa toteutetussa kyselytutkimuksessa eri oireiden esiintyvyydessä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja eri etäisyyksillä voimaloista tarkasteltuna. Infraääni on hyvin matalataajuisia ääntä (alle 20 Hz), jota esiintyy luonnollisesti sekä luonnossa että rakennetussa ympäristössä, usein yhdessä kuultavan äänen kanssa ja tyypillisesti kuulokynnyksen alapuolella. Tuulivoimalat tuottavat tällaista laajakaistaista ääntä, mutta vastaavia taajuuksia esiintyy monissa muissakin ympäristöissä. Osa tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvista on raportoinut erilaisia oireita, kuten päänsärkyä, huimausta, väsymystä ja sydänoireita ja yhdistänyt ne infraääneen. Kuitenkin kattavassa kansallisessa selvityksessä, jossa analysoitiin kansainvälistä tutkimuskirjallisuutta, ei löytynyt näyttöä siitä, että infraäänellä olisi suoria terveysvaikutuksia, vaikka pitkäaikaisen altistumisen vaikutuksia ei voida täysin sulkea pois (THL, 2020).

Mittauksissa on havaittu, että tuulivoima-alueiden laajakaistaisen äänen äänenpainetasot ovat usein pienempiä kuin esimerkiksi liikenteen hallitsemassa ympäristöissä. Infraäänen äänenpainetasot ovat yleensä samaa suuruusluokkaa kuin kaupungeissa ja suurempia kuin luonnonympäristöissä, mutta silti tasoja, joilla ei tunneta suoria haitallisia vaikutuksia (THL, 2020).

Tutkimushankkeen toisessa vaiheessa tarkasteltiin infraäänien vaikutuksia tarkemmin. Tulokset osoittivat, että voimat muuttavat äänimaisemaa, mutta mitatut tasot vastasivat aiempia havaintoja. Oireita raportoitiin enemmän voimaloiden läheisyydessä kuin laajemmalla alueella, mutta oireiden kirjo oli laaja ja yksilöllinen (THL, 2020).

Lisäksi kokeellisissa tutkimuksissa infraääntä ei pystytty havaitsemaan erikseen, eikä sillä ollut vaikutusta äänen koettuun häiritsevyyteen tai elimistön stressireaktioihin. Näiden tulosten perusteella on todennäköistä, että oireiden taustalla on muita tekijöitä kuin pelkkä infraääni, kuten yksilölliset kokemukset ja ympäristöön liittyvät tekijät (THL, 2020).

Sään vaikutukset

Ilmakehä on jatkuvassa liikkeessä ja sen pystysuuntainen rakenne on lähes aina epätasainen. Tämän vuoksi melun leviämistä kuvaavat laskennalliset arviot eivät useinkaan vastaa täysin todellisia, kaukana äänilähteestä tehtyjä mittauksia. Eroihin vaikuttavat ilman lämpötilan, tiheyden ja paineen vaihtelut sekä tuulen nopeuden muutokset sekä vaaka- että pystysuunnassa. Tuulivoimaloiden tuottaman äänen etenemisen kannalta erityisen merkittäviä ovat lämpötilan ja tuulen pystysuuntaisten profiilien vaihtelut eri säätilanteissa ja vuorokauden aikoina (Di Napoli, 2007, s. 18).

Lämpötila vaikuttaa äänen kulkuun siten, että lämpötilaero maanpinnan ja ylempien ilmakerrosten välillä aiheuttaa ääniaaltojen taipumista. Normaalitilanteessa ilman lämpötila alenee korkeuden kasvaessa, jolloin ääni etenee ylöspäin, koska äänen nopeus riippuu lämpötilasta. Inversiotilanteessa tilanne on päinvastainen, lämpötila kasvaa ylöspäin mentäessä, mikä saa äänen kaartumaan kohti maanpintaa. Tämän ilmiön vaikutus vaihtelee äänen taajuuden sekä tarkastelupisteen etäisyyden mukaan. Matalammat taajuudet vahvistuvat suhteellisesti enemmän ja vaikutus korostuu etäisyyden kasvaessa. Kokonaisvaikutusta kuitenkin vaimentavat samanaikaisesti geometrinen leviämismuutos ja ilman aiheuttama vaimeneminen (Di Napoli, 2007, s. 18).

Myös tuuli vaikuttaa äänen kulkuun samankaltaisesti. Myötätuulen suuntaan ääni taipuu alaspäin, koska tuulen nopeus kasvaa korkeuden mukana. Vastatuulen puolella syntyy niin sanottu varjoalue, jossa melutaso pienenee etäisyyden kasvaessa. Tuulen vaikutusta tuulivoimalamelun leviämiseen on arvioitu lisäämällä laskentamalleihin korjaustekijä, joka on noin +1–1,5 dB jokaista tuulennopeuden metriä sekunnissa kohden referenssipisteessä. Koska voimakkaampi tuuli lisää samalla ympäristön taustamelua, jää kokonaisvaikutus käytännössä tätä pienemmäksi (Di Napoli, 2007, s. 18).

Mittauksissa on havaittu, että tuulen nopeuden pystysuuntainen jakauma voi vaihdella huomattavasti vuorokauden aikana, jopa noin 200 metrin korkeuteen asti. Yöllä erot maanpinnan ja napakorkeuden välillä ovat usein suurimmillaan. Tämä johtuu pääosin auringon säteilyn vaikutuksesta ilmakehän sekoittumiseen ja turbulenssiin. Tutkimusten mukaan juuri nämä napakorkeuden tuuliolosuhteiden vaihtelut selittävät osaltaan sen, miksi yöaikaiset melutasot voivat olla korkeampia kuin ennustemallit arvioivat (Di Napoli, 2007, s. 18).

5 Linnusto

Tuulivoimaloiden vaikutukset linnustoon voidaan jäsentää kahteen pääluokkaan: välittömiin ja välillisiin seurauksiin. Suorat vaikutukset liittyvät lintujen kuolemiin törmäystilanteissa, kun taas epäsuorat vaikutukset näkyvät pidemmällä aikavälillä esimerkiksi lajiston rakenteessa ja yksilömäärissä. Näihin epäsuoriin vaikutuksiin kuuluvat muun muassa häirintä, liikkumisen estyminen sekä elinympäristön muutokset. Vaikutukset voivat kohdistua sekä muuttaviin, talvehtiviin että pesiviin lintuihin ja ne vaihtelevat myös rakentamis- ja käyttövaiheen välillä (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 6). Vaikutusten voimakkuus riippuu useista tekijöistä, kuten voimaloiden lukumäärästä, koosta, sijainnista ja ympäristön ominaisuuksista sekä alueen linnustosta. Sijoittelu on keskeinen tekijä vaikutusten kannalta. Haittoja voidaan vähentää esimerkiksi välttämällä arvokkaita lintualueita ja huomioimalla lintujen kulkureitit voimaloiden sijoittelussa. Myös rakentamisen ajoitus, tekniset ratkaisut ja sähkönsiirtotavat vaikuttavat kokonaisvaikutuksiin (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 6).

Suorat vaikutukset: törmäykset

Törmäyksistä johtuva kuolleisuus vaihtelee suuresti sijainnin mukaan. Yksittäisen voimalan vaikutus voi olla nolasta useisiin kymmeneen lintuihin vuodessa. Törmäyksiä tapahtuu pääasiassa pyöriviin lapoihin, mutta myös rakenteisiin ja sähkölinjoihin (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 6–7, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, 11–12).

Vaikutukset kohdistuvat erityisesti lajeihin, jotka ovat uhanalaisia, on vain vähän poikasia ja pitkä elinikä. Riskiin vaikuttavat lintujen käyttäytyminen, sää, maasto sekä voimaloiden tekniset ominaisuudet. Suuret liitävät lajit, kuten petolinnut, haikarat ja kurjet, ovat erityisesti alttiita törmäyksille. Myös huono näkyvyys ja yö lisäävät törmäysten todennäköisyyttä (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 7).

Lintujen kyky väistää voimaloita vähentää riskiä, mutta tämä vaihtelee lajeittain. Lisäksi valaistus voi sekä houkutella että auttaa väistämisessä. Suuremmat ja hitaammin pyörivät voimalat ovat yleensä turvallisempia kuin pienemmät ja nopeammin pyörivät (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 7).

Lintujen riski törmätä tuulivoimaloihin riippuu pitkälti niiden anatomiasta ja lentotyylistä. Eriyisen alttiita ovat lajit, jotka liitävät tai kaartavat ilmassa, ovat kooltaan suuria tai joilla siipien koko on suhteessa kehoon melko pieni. Havaintojen perusteella suurin törmäysriski koskee tiettyjä linturyhmiä, kuten petolintuja, kanalintuja sekä lokkeja ja tiiroja (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 15).

Valtaosa muuttavista linnuista liikkuu pimeään aikaan ja pitkään on tiedetty, että tällaiset lajit ovat herkkiä törmäyksille korkeisiin sekä valaistuihin rakenteisiin, kuten majakoihin, torneihin ja korkeisiin rakennuksiin. Tästä huolimatta tutkimukset eivät yleisesti osoita, että yöllä muuttavat linnut törmäisivät tuulivoimaloihin useammin kuin päiväsaikaan liikkuvat lajit. Törmäysten jakautuminen vaihtelee kuitenkin huomattavasti eri alueiden välillä ja joissakin tuulivoimapuistoissa suuri osa törmäyksistä on koskenut juuri yöaikaan muuttavia lintuja (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 15).

Suurin osa törmäävistä lintuyksilöistä kuuluu varpuslintuihin ja joillakin alueilla myös tuulivoimaloihin törmänneistä linnuista merkittävä osa edustaa tätä ryhmää. Tästä huolimatta yksittäisen varpuslinnun riski joutua törmäykseen on pienempi verrattuna moniin muihin linturyhmiin. Tähän vaikuttaa todennäköisesti se, että monet varpuslinnut muuttavat pääasiassa öisin ja lentävät usein huomattavasti korkeammalla kuin tuulivoimaloiden lapojen taso. Lisäksi voimaloiden varoitusvalaistus ei yleensä ole niin voimakas, että se vetäisi näitä lintuja puoleensa. Varpuslintujen joukossa pääskysset näyttävät kuitenkin olevan muita alttiimpia törmäyksille. Tämä saattaa liittyä niiden käyttäytymiseen, sillä ne voivat ajoittain hakeutua voimaloiden läheisyyteen pyydystämään hyönteisiä, joita voimalat houkuttelevat (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 15).

Päiväaktiivisten petolintujen, kuten haukkojen, kotkien ja korppikotkien, on todettu törmäävän tuulivoimaloihin eri puolilla maailmaa. Useimmissa tutkimuksissa tällaiset tapaukset ovat kuitenkin olleet melko harvinaisia. Joissakin erityisen riskialttiisiin ympäristöihin sijoitetuissa tuulivoima-alueissa törmäyksiä on kuitenkin esiintynyt runsaammin. Tunnettu esimerkki löytyy Kalifornian Altamontista, jossa jo 1980-luvulta toimineen tuulivoimapuiston on arvioitu aiheuttavan merkittävää kuolleisuutta alueen tiheälle maakotkakannalle, jopa kymmeniä yksilöitä vuosittain. Toisaalta kaikilla alueilla vaikutukset eivät ole yhtä suuria. Esimerkiksi Bulgariassa sijaitsevassa tuulivoimapuistossa, joka sijaitsee aktiivisella muuttoreitillä, on havaittu varsin vähäisiä törmäysmääriä sekä petolintujen että muiden lintujen osalta (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 16).

Merikotkat ovat olleet keskeinen tutkimuskohde erityisesti Pohjoismaissa tuulivoiman vaikutuksia tarkasteltaessa. Norjan Smølan alueella useita yksilöitä on menehtynyt törmäyksissä tuulivoimaloihin ja tämän sekä mahdollisen häiriövaikutuksen on arvioitu johtaneen joidenkin pesimäalueiden hylkäämiseen voimaloiden läheisyydessä. Tästä huolimatta Smølan merikotkakanta on jatkanut kasvuaan myös tuulivoimapuiston rakentamisen jälkeen. Suomessa puolestaan on esitetty huolia siitä, että suunnitteilla olevat hankkeet esimerkiksi Merenkurkun ja Ahvenanmaan alueilla voisivat vaikuttaa lajiin. Tähän mennessä käytössä olevien voimaloiden ei kuitenkaan ole havaittu heikentäneen pesinnän onnistumista. Suomessa merikotkien törmäyksiä on raportoitu vain muutamia, mutta läheltä piti -tilanteita on havaittu useammin erityisesti Pohjois-Pohjanmaan seurannoissa. Havainnot viittaavat siihen, että merikotkat eivät aina väistä voimaloita samalla tavoin kuin monet muut lintulajit, vaan jatkavat liikkumistaan niiden läheisyydessä, mikä lisää törmäysriskiä. Törmäysten ehkäiseminen on haastavaa, koska etenkin nuoret yksilöt liikkuvat laajoilla alueilla ja niiden liikeratoja on vaikea ennakoida. Vaikka kannat ovat sekä Suomessa että Norjassa kasvaneet, lajin suhteellisen suuri alttius törmäyksille voi muodostaa riskin, jos tuulivoimaa rakennetaan laajasti alueille, joilla merikotkia esiintyy runsaasti (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 16).

Useat merialueilla elävät lintulajit, kuten ruokkilinnut ovat pitkäikäisiä ja lisääntyvät vasta usean vuoden iässä. Tämän vuoksi niiden kannat reagoivat herkästi kuolleisuuden muutoksiin, kuten mahdollisiin lisämenetyksiin, joita tuulivoimalat voisivat aiheuttaa. Tutkimusten perusteella törmäykset merelle sijoitettuihin tuulivoimaloihin ovat kuitenkin olleet melko harvinaisia ja vähäisempiä kuin alun perin arvioitiin. Esimerkiksi eräässä Ruotsin rannikon läheiselle merialueelle rakennetussa pienessä tuulivoimakokonaisuudessa törmäysten määräksi on arvioitu vain noin yksi lintu vuodessa. Yleisesti vesilinnut näyttävät havaitsevan merellä sijaitsevat voimalat hyvissä ajoin ja muuttavan lentoreittiään niiden välttämiseksi, mikä vähentää törmäysriskiä merkittävästi (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 17).

Kanalinnut näyttävät joutuvan törmäyksiin tuulivoimaloiden kanssa useammin kuin monet muut linturyhmät. Havaintojen perusteella nämä törmäykset kohdistuvat kuitenkin useimmiten voimalan torniosaan, eivätkä niinkään pyöriviin lapoihin. Tämä eroaa monista muista lintulajeista, joiden kuolleisuus liittyy pääasiassa lapoihin osumiseen. Kanalintujen kohdalla vastaavaa käyttäytymistä on havaittu myös muiden ihmisen rakentamien rakenteiden yhteydessä, kuten sähkölinjoihin törmäämisinä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 17).

Häirintävaikutus

Voimaloiden melu, liike ja varjovälke voivat häiritä lintuja, jolloin alueen käyttö lintujen ravinnonhankintaan tai pesintään vähenee. Reaktiot vaihtelevat lajeittain. Osa linnuista välttää aluetta, osa tottuu ajan myötä, eikä kaikilla lajeilla havaita muutoksia (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 7).

Useat vesilinnut, kuten joutsenet ja eri hanhilajit näyttävät usein siirtyvän kauemmaksi tuulivoimaloista tai käyttävän mieluummin alueita, jotka sijaitsevat kauempana, joskus jopa noin puolen kilometrin etäisyydellä. Vaikutukset eivät kuitenkaan ole yhtenäisiä,

vaan ne riippuvat sekä lajista että tutkimusalueesta. Joissakin tutkimuksissa on havaittu, että esimerkiksi tundrahanhet välttävät tuulivoimaloiden lähialueita jopa noin 600 metrin säteellä, kun taas toisen lajiston kuten lyhytnokkahanhien, yksilömäärät vähenevät selvästi vain noin 100–200 metrin etäisyydellä voimaloista. Toisaalta tietyt vesilinnut, kuten joutsenet ja hanhet voivat ajan myötä sopeutua tuulivoimaloiden läsnäoloon ja palata käyttämään alueita useiden vuosien kuluttua rakentamisesta. Tämän vuoksi tuulivoimaloiden pitkäaikaisia vaikutuksia lintujen käyttäytymiseen on vaikea arvioida luotettavasti, koska useimmat tutkimukset perustuvat melko lyhyisiin, usein vain yhden tai muutaman vuoden seurantajaksoihin (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 21).

Tuulivoimaloiden on yleisesti todettu vaikuttavan vain vähäisesti tai ei lainkaan päiväpetolintujen pesimäalueiden käyttöön ja niiden liikkumiseen. Joissakin tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että tietyt petolintulajit saattavat välttää oleskelua tai lentämistä tuulivoimaloiden läheisyydessä. Eroja tutkimustuloksissa selittävät todennäköisesti sekä tuulivoimarakenteiden määrä ja sijoittelu eri tutkimusalueilla että lajien väliset erot käyttäytymisessä. Johtopäätösten perusteella on esitetty, että tuulivoiman välilliset vaikutukset voivat joillekin päiväpetolinnuille olla merkittävämpiä kuin varsinaiset törmäysriskit. Kuitenkin törmäysten ja häiriövaikutusten keskinäistä merkitystä ei ole toistaiseksi pystytty varmuudella arvioimaan (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 21).

Estevaikutus

Voimalat voivat pakottaa linnut muuttamaan reittejään. Tämä lisää lintujen energiankulutusta ja voi vaikuttaa niiden lisääntymiseen tai selviytymiseen. Vaikutukset ovat usein vähäisiä yksittäisten alueiden kohdalla, mutta voivat korostua esimerkiksi levähdysalueiden läheisyydessä (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 7–8).

Elinympäristön muutokset

Rakentaminen voi muuttaa ympäristöä suoraan tai epäsuorasti, esimerkiksi heikentämällä ravinnon saatavuutta. Toisaalta joissakin tapauksissa rakenteet voivat lisätä saaliseläinten määrää. Tieverkosto ja sähkölinjat pirstovat elinympäristöjä ja voivat muuttaa lajistoa (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 8).

Vaikutusten merkittävyys

Vaikutusten suuruus vaihtelee tapauskohtaisesti. Muuttolintujen kannalta suurimmat riskit liittyvät tärkeisiin muuttoreitteihin. Pesiville linnuille keskeisimpiä vaikutusmekanismeja ovat häirintä ja elinympäristön muutokset. Estevaikutus on merkittävä erityisesti, jos voimalat sijoittuvat pesimä- ja ruokailualueiden väliin (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 8).

Linnuston huomiointi suunnittelussa

Suunnittelussa pyritään tunnistamaan sopivat alueet jo maakuntatasolla. Luonnonsuojelualueet ja muut arvokkaat kohteet rajaavat sijoitusmahdollisuuksia. Natura-alueiden osalta arviointi tehdään tapauskohtaisesti niiden suojeluperusteiden mukaan (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 9).

Erityistä huomiota tulee kiinnittää pesimäalueisiin, muuttoreitteihin ja lintujen kokoontumispaikkoihin. Myös uhanalaiset lajit ja suuret lintujoukot vaativat tarkkaa huomiointia. Tärkeiden muuttoreittien keskittymiin ei tulisi sijoittaa voimaloita (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 9–10).

Maakuntakaavoituksessa arvioidaan vaikutukset laajasti, kun taas yksityiskohtaisessa suunnittelussa tarkennetaan voimaloiden sijainti ja vaikutukset paikallisesti. Tarvittaessa tehdään maastotutkimuksia eri vuodenaikoina (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 10–11).

Linnustoselvitykset

Selvitykset kattavat sekä pesivän että muuttavan linnuston. Menetelmiä ovat esimerkiksi laskennat, havainnointi ja lentoreittien seuranta. Aineiston tulee olla riittävän kattava eri vuodenaikoina, jotta lintujen esiintymisestä saadaan luotettava kuva (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 12).

Muuttolintujen osalta seurataan yksilömääriä, lentokorkeuksia ja reittejä. Havainnointia tehdään useiden viikkojen ajan keväällä ja syksyllä, jotta vaihtelu eri vuosien ja sääolosuhteiden välillä huomioidaan (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 12–13).

Vaikutusten arviointi

Merkittävyyttä arvioitaessa tarkastellaan muun muassa lajin ekologiaa, populaation kokoa, vaikutuksen tyyppiä, voimakkuutta ja kestoa sekä todennäköisyyttä. Arviointi tehdään eri mittakaavoissa paikallisesta kansainväliseen. (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 13).

Vaikutusten arvioinnissa keskeiset tekijät on esitettävä huolellisesti ja kattavasti, jotta niiden merkitystä voidaan tarkastella luotettavasti. Samankaltaiset vaikutukset eivät ole kaikissa tilanteissa yhtä merkittäviä, vaan niiden painoarvo vaihtelee lajien ja alueiden ominaisuuksien mukaan. Arvioinnin tulee kattaa koko tuulivoimahankkeen elinkaari, mukaan lukien rakentamisen, käytön ja purkamisen aikaiset vaikutukset. Lisäksi tarkastelussa on huomioitava useiden tuulivoima-alueiden yhteisvaikutukset suhteessa sekä olemassa oleviin että suunnitteilla oleviin hankkeisiin (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 13).

Arvioinnissa on eroteltava toisistaan lyhytaikaiset ja pysyvät vaikutukset sekä eri toteutusvaiheisiin liittyvät vaikutukset. Merkittävyyttä tulee tarkastella useilla tasoilla,

kuten paikallisessa, alueellisessa, valtakunnallisessa ja kansainvälisessä mittakaavassa (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 13).

Tarkastelun kohteena oleva lintupopulaatio määritellään sen mukaan, mihin vaikutukset kohdistuvat, esimerkiksi pesintään, levähtämiseen, talvehtimiseen tai muuttamiseen. Pesimäaikaisia vaikutuksia on tarkoituksenmukaista arvioida paikalliseen tai alueelliseen pesivään linnustoon nähden, kun taas muuttolintujen osalta tarkastelu kohdistuu laajempaan, maantieteellisesti kattavampaan populaatioon (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 13).

Törmäysvaikutusten arviointi

Törmäysvaikutusten arviointi perustuu aineistoon, jonka avulla voidaan luotettavasti mallintaa lintujen törmäysriskiä niille lajeille, joihin tuulivoimat todennäköisimmin vaikuttavat. Mallinnus tehdään erikseen sekä muuttaville että alueella pesiville linnuille (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 13–14).

Arviointiin on kehitetty menetelmä, jonka avulla voidaan laskea törmäyksille altistuvien lintujen määriä. Tämä edellyttää tietoa esimerkiksi siitä, kuinka paljon lintuja liikkuu voimaloiden riskikorkeudella tai kuinka kauan pesivät yksilöt oleskelevat tuulivoima-alueen ilmatilassa (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 14).

Muuttolintujen kohdalla tarvitaan havaintotietojen lisäksi tietoa lentokorkeuksista, kulkureittien sijainnista suhteessa voimaloihin erityisesti roottorien alueeseen. Törmäysvaikutusten arviointi perustuu aineistoon, jonka avulla voidaan luotettavasti mallintaa lintujen törmäysriskiä niille lajeille, joihin tuulivoimat todennäköisimmin vaikuttavat. Mallinnus tehdään erikseen sekä muuttaville että alueella pesiville linnuille (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 13–14).

Mallinnusten tuloksia voidaan hyödyntää myös pitkän aikavälin vaikutusten tarkastelussa. Näin voidaan arvioida esimerkiksi sitä, miten lisääntynyt kuolleisuus vaikuttaa uhanalaisten lajien kantoihin ja lisääntymismenestykseen (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 14).

Häirintä-, este- ja elinympäristövaikutusten arviointi

Häirintöihin, liikkumisen estymiseen ja elinympäristöjen muutoksiin liittyvät vaikutukset voivat kohdistua sekä paikallisiin pesimälajeihin että muuttaviin lintuihin. Erityisen herkkiä häirinnälle ovat alueet, joilla lintutiheydet ovat suuria, kuten merialueiden matalat ruokailualueet, kosteikot sekä viljelysalueet, joilla linnut ruokailevat. Estevaikutukset korostuvat etenkin petolintujen käyttämällä saalistusreiteillä sekä muuttolintujen kokoontumisalueiden läheisyydessä, jos voimalat sijoittuvat keskeisten toimintojen väliin. Elinympäristön muutokset voivat vaikuttaa erityisen voimakkaasti esimerkiksi merialueiden matalikkoihin ja metsälajien kohdalla on tärkeää tarkastella myös ympäristön pirstoutumista (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 14).

Häirintävaikutusten arviointi perustuu tietoon alueella esiintyvistä lajeista sekä niiden elintavoista, käyttäytymisestä ja herkkyydestä ympäristön muutoksille. Voimaloiden aiheuttamaa melua ja varjovälkettä voidaan tarkastella mallinnuksen avulla. Vaikutusten suuruus vaihtelee laji- ja aluekohtaisesti, mutta tutkimusten perusteella maa-alueilla häiriöt ulottuvat yleensä enintään noin kilometrin etäisyydelle, kun taas merialueilla vaikutus voi ulottua tätä kauemmas (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 14).

Estevaikutusten tarkastelu on erityisen tärkeää alueilla, joilla linnut liikkuvat säännöllisesti, kuten petolintujen saalistusreiteillä ja muuttolintujen keskeisten levähdysalueiden ympäristössä, sillä näissä vaikutukset voivat muodostua merkittäviksi (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 14).

Yhteisvaikutusten arviointi

Kun tarkastellaan useiden tuulivoimaloiden yhteisvaikutuksia linnustoon, on huomioitava kaikkien alueella jo olevien ja suunniteltujen voimaloiden kokonaisvaikutus. Tämä koskee sekä pesivää linnustoa että alueen kautta muuttavia lintuja ja sisältää kaikki vaikutustyyppit (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 14–15).

Yksityiskohtaisessa suunnittelussa yhteisvaikutuksia tarkastellaan vielä tarkemmin kuin yleispiirteisessä kaavoituksessa. Samalla pyritään löytämään ratkaisuja, joilla haitallisia vaikutuksia voidaan vähentää yksittäisten hankkeiden tasolla (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 15).

Joillakin muuttoreiteillä kulkee suuria lintumääriä kapeilla alueilla, kuten Suomenlahden suunnassa, jota pitkin liikkuu arktisten alueiden pesimälinnustoa. Tällaisissa tilanteissa on erityisen tärkeää arvioida, voiko useiden voimaloiden yhteisvaikutus kasvattaa törmäysriskiä niin paljon, että sillä on vaikutusta koko populaation säilymiseen tai kehitykseen (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 15).

Laajojen tuulivoimahankkeiden suunnittelussa rannikko- ja merialueilla on suositeltavaa hyödyntää asiantuntijoiden osaamista, jotta tarvittavat selvitykset voidaan toteuttaa oikein ja riittävällä tarkkuudella. Tarvittaessa on huomioitava myös kansainvälinen yhteistyö, mikäli vaikutukset ulottuvat valtioiden rajojen yli (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 15).

Seuranta

Todelliset vaikutukset selviävät usein vasta käytön aikana. Siksi seuranta tehdään useiden vuosien ajan samoilla menetelmillä kuin alkuperäiset selvitykset. Tarvittaessa voidaan toteuttaa lieventäviä toimenpiteitä havaittujen haittojen perusteella (Ympäristöministeriö, 2016a, s. 15).

6 Maisema

Tuulivoimahankkeen toteutuessa maisemaan kohdistuu muutoksia, jotka syntyvät itse voimaloiden lisäksi sähkönsiirtoon liittyvistä rakenteista sekä uusista tai parannetuista kulkuyhteyksistä. Näistä vaikutuksista laajimmalle ulottuvat erityisesti visuaaliset muutokset. Suurikokoiset tuulivoimalat poikkeavat mittakaavaltaan selvästi muista ympäristön elementeistä, minkä vuoksi ne voivat hallita maisemaa. Pienemmät teollisen mittakaavan voimalat voivat joissakin tilanteissa muistuttaa maisemavaikutuksiltaan muita suuria rakenteita, kuten teollisuusrakennuksia, savupiippuja tai mastoja (Ympäristöministeriö, 2024, s. 29–30).

Maisemaan kohdistuvat vaikutukset eivät rajoitu pelkästään siihen, mitä silmin nähdään. Muutokset voivat vaikuttaa myös maiseman rakenteeseen ja eri osa-alueiden välisiin suhteisiin, vaikka suoraa näköyhteyttä voimaloihin ei olisikaan. Tuulivoimalat voivat siis muuttaa maiseman luonnetta epäsuorasti vaikuttamalla siihen, miten eri alueet kytkeytyvät toisiinsa (Ympäristöministeriö, 2024, s. 29–30).

Rakentamisen jälkeen voimaloiden väliin jäävien alueiden ominaisuudet voivat osittain palautua ennalleen, erityisesti luonnonalueilla. Yleensä tuulivoimatuotantoon liittyvät rakenteet ja maaston muokkaukset kattavat vain pienen osan koko hankealueesta. Tästä huolimatta korkeat voimalat toimivat laajalle näkyvinä maamerkkeinä, jotka viestivät ihmisen toiminnasta alueella. Näin syntyy uudenlainen maisemakokonaisuus, jossa luonnonympäristö ja energiantuotantoon liittyvät rakenteet yhdistyvät (Ympäristöministeriö, 2024, s. 30).

Vaikka tuulivoimalat voivat näkyä selvästi maisemassa ja muuttaa sen visuaalista ilmettä, tämä ei automaattisesti tarkoita merkittävää haittaa. Mikäli alueella on jo ennestään suurimittakaavaista toimintaa, muutokset eivät välttämättä vaikuta ratkaisevasti maiseman rakenteeseen tai laatuun. Maiseman muuttumista ei siten voida

yksiselitteisesti tulkita negatiiviseksi, vaan se voi kuvastaa myös uusien toimintojen tuomia muutoksia ympäristöön (Ympäristöministeriö, 2024, s. 30).

Vaikutukset maisemakokonaisuuteen

Tuulivoimarakentamisen vaikutukset maiseman kokonaisuuteen riippuvat sekä tarkasteltavan alueen ominaispiirteistä että voimaloiden sijoittelusta ja mittakaavasta. Arvioinnissa on keskeistä pohtia, sijoittuvatko voimalat alueelle, jossa ihmistoiminta on jo ennestään hallitsevaa, vai tuovatko ne uudenlaista maankäyttöä aiemmin luonnonläheiseen ympäristöön. Vaikutusten merkittävyyteen vaikuttavat muun muassa alueella jo olevat suuret rakenteet, teollinen toiminta sekä ihmisen muokkaaman ympäristön määrä ja intensiteetti. Tuulivoimalat voivat muuttaa maiseman luonnetta, mutta ne voivat myös sulautua osaksi kokonaisuutta muodostaen silti laajalle näkyvän uuden elementin (Valtioneuvosto, 2016, s. 34).

Yleisesti voidaan todeta, että pienimittakaavainen ympäristö on herkempi suurille rakenteille kuin laajapiirteinen maisema, jossa suuret muodot tukevat myös massiivisten rakennelmien sijoittamista. Toisaalta myös laajat maisemat voivat olla herkkiä muutoksille, erityisesti silloin kun voimaloihin liittyy liikettä ja valaistusta. Tuulivoimaloiden hyväksyttävyyys paranee usein alueilla, joilla on jo valmiiksi rakennettua ympäristöä tai teollista toimintaa. Lisäksi valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet korostavat voimaloiden keskittämistä useamman yksikön kokonaisuuksiin, jolloin samalla voidaan säilyttää myös rakentamattomia alueita. Ympäristön ja voimaloiden välinen ajallinen ja toiminnallinen yhteys vähentää ristiriitoja ja jatkuvassa muutoksessa olevissa maisemissa vaikutukset koetaan yleensä vähäisempinä (Valtioneuvosto, 2016, s. 34).

Vaikutukset tuulivoima-alueella

Tuulivoima-alueella ympäristö muuttuu erityisesti voimaloiden, niiden perustusten, uusien kulkuyhteyksien sekä sähkönsiirtoon liittyvien rakenteiden seurauksena. Rakentamisen aikana alueelle voidaan tarvita tilapäisiä työmaa-alueita, jotka yleensä maisemoidaan työn valmistuttua. Jos hankkeen toteutus vaatii merkittäviä maanpinnan muokkauksia, sillä voi olla vaikutuksia alueen maisemalliseen ilmeeseen. Rakennettujen alueiden osuus jää kuitenkin tyypillisesti varsin pieneksi koko tuulivoima-alueesta, minkä vuoksi suuri osa ympäristöstä säilyy ennallaan (Valtioneuvosto, 2016, s. 35).

Myös lähialueen tieverkossa voi tapahtua muutoksia, mikäli suurikokoisten komponenttien kuljetus edellyttää teiden tai liittymien parantamista. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi siltojen vahvistamista tai uusimista, teiden leventämistä sekä risteysalueiden muokkaamista raskaan kuljetuskaluston liikkumisen mahdollistamiseksi. Kokonaisuutena tarkastellen muiden rakenteiden ja muutosten maisemavaikutukset jäävät yleensä paikallisiksi ja melko vähäisiksi, sillä valmiissa tilanteessa suuret tuulivoimalat muodostavat maiseman hallitsevan elementin, johon muut muutokset suhteutuvat (Valtioneuvosto, 2016, s. 35).

Visuaaliset vaikutukset

Tuulivoimaloiden keskeisimmät vaikutukset liittyvät niiden erottumiseen maisemassa. Suuren kokoluokan voimalat näkyvät usein laajalle, minkä vuoksi niiden vaikutuksia tarkastellaan Suomessa ympäristövaikutusten arvioinneissa tyypillisesti noin 20–35 kilometrin säteellä hankealueesta. Joissakin tilanteissa tarkastelu voidaan ulottaa tätä pidemmälle, mikäli vaikutusten arvioidaan olevan huomattavia (Valtioneuvosto, 2016, s. 35–36).

Voimaloiden näkyvyyteen vaikuttavat useat tekijät, kuten maaston muodot ja suunta, maisematilojen avoimuus sekä rannikon muodot, kuten saaret ja niemet. Myös

katselupaikan korkeusasema ja havaitsijan sijainti suhteessa kohteeseen ovat merkityksellisiä. Lisäksi kasvillisuus, rakennettu ympäristö sekä erilaiset säätekijät, kuten ilman kirkkaus ja valaistusolosuhteet, vaikuttavat siihen, kuinka selvästi voimalat erottuvat. Itse voimaloiden ominaisuuksista niiden koko, väritys, valaistus, lukumäärä ja sijoittelu määrittävät pitkälti visuaalista vaikutusta (Valtioneuvosto, 2016, s. 35–36). Vaikutukset korostuvat erityisesti alueilla, joista on esteettömät näkymät tuulivoimalueille, kuten vesistöjen äärellä tai laajoilla peltoaukeilla. Näissä ympäristöissä maaston muodot tai rakenteet eivät rajoita näkökenttää. Vaikutusten voimakkuuteen ei vaikuta pelkästään etäisyys, vaan myös näkymän suunta, laajuus ja muut maiseman piirteet. Laajoja maa-alueille sijoitettavia tuulivoimakokonaisuuksia ei useimmiten voi havaita kokonaisuutena yhdestä pisteestä, koska puusto, rakennukset ja muut esteet katkaisevat näkymiä. Metsäisissä tai rakennetussa ympäristössä näkyviin jää usein vain osa voimaloista, kun taas avoimilla alueilla koko kokonaisuus voi hahmottua selkeämmin. Yleisesti voidaan todeta, että lähellä sijaitsevat näkymiä rajaavat tekijät peittävät tehokkaasti kauempana olevia voimaloita (Valtioneuvosto, 2016, s. 35–36).

Havainnollistavasti voidaan todeta, että noin 1,4 kilometrin etäisyydellä oleva 300 metriä korkea tuulivoimala vie pystysuunnassa suunnilleen saman osuuden näkökentästä kuin huomattavasti lähempänä sijaitsevat pienemmät kohteet, kuten noin 100 metrin päässä oleva puu tai noin 200 metrin etäisyydellä oleva voimajohtopylväs (Valtioneuvosto, 2016, s. 35–36).

Merituulivoimaloiden kehitys on viime vuosina johtanut entistä korkeampien rakenteiden suunnitteluun, mikä on samalla kasvattanut hankkeiden alueellista laajuutta. Lisäksi voimaloita sijoitetaan yhä useammin kauemmas rannikosta, pääasiassa avomerelle. Avoimessa merimaisemassa etäisyyden ja kohteen koon arviointi on usein haastavaa, koska vertailukohtia ei juuri ole. Meriympäristössä näkyvyyteen vaikuttavat lisäksi sääolosuhteiden vaihtelu, ilmakehän valon taittuminen sekä maapallon kaarevuus, jotka erottavat merituulivoimalat maa-alueiden vastaavista kohteista (Valtioneuvosto, 2016, s. 38–39).

Näkyvyys merellä on parhaimmillaan selkeissä olosuhteissa, mutta se voi heikentyä merkittävästi esimerkiksi sumun tai ilman kosteuden vaikutuksesta. Suomessa merisumua esiintyy erityisesti keväällä ja alkukesällä, jolloin merivesi on viileämpää kuin maa-alueet. Pitkillä etäisyyksillä kohteiden erottuvuus heikkenee myös kontrastin pienenytessä, jolloin hyvin kaukana sijaitsevat rakenteet sulautuvat taustaan. Tutkimusten mukaan, kun etäisyys kasvaa noin 55 kilometriin, kohteen ja taustan välinen kontrasti voi laskea tasolle, jossa kohde ei enää ole selvästi havaittavissa (Valtioneuvosto, 2016, s. 38–39).

Ilmakehän taittuminen vaikuttaa siihen, miten valo etenee ilmassa, mikä puolestaan voi muuttaa tuulivoimaloiden havaittua sijaintia ja korkeutta. Tämän vuoksi voimalat voivat näyttää todellista korkeammilta tai matalammilta riippuen olosuhteista. Ilmiö vaihtelee säätilan mukaan, eikä sitä voida täysin tarkasti kuvata havainnekuissa (Valtioneuvosto, 2016, s. 39).

Maapallon kaarevuus rajoittaa näkyvyyttä horisontin yli ja katselukorkeus vaikuttaa siihen, kuinka kauas merelle voidaan nähdä. Erityisissä olosuhteissa horisontti voi ulottua yli 80 kilometrin päähän, mutta yksittäisten kohteiden erottaminen on yleensä mahdollista vain noin 55 kilometriin saakka. Lisäksi katselijan korkeuden vaikutus on merkittävä esimerkiksi 50 kilometrin etäisyydellä suuri osa korkeista tuulivoimaloista voi jäädä horisontin taakse, mikä muuttaa niiden visuaalista vaikutelmaa merkittävästi (Valtioneuvosto, 2016, s. 39).

Visuaalisten muutosten merkitystä ei voida yksiselitteisesti arvioida haitalliseksi tai neutraaliksi, vaan se riippuu alueen luonteesta, maiseman ominaisuuksista ja tarkastelu suunnasta. Etäisyys sekä muut maisemassa näkyvät elementit vaikuttavat siihen, kuinka merkittävänä muutokset koetaan. Vaikutusten arvioinnissa käytettyjä etäisyysvyöhykkeitä on sovellettu laajasti, mutta täysin yleispätevää luokittelua ei voida määrittää (Valtioneuvosto, 2016, s. 40).

Suomessa käytettyä vyöhykejaottelua on hyödynnetty ohjeistuksissa siten, että lähi- ja kaukovaikutusalueet on jaettu useisiin etäisyysluokkiin, jotka ulottuvat voimaloiden välittömästä läheisyydestä aina noin 20–35 kilometrin teoreettiseen näkyvyysalueeseen. Viime vuosina voimaloiden koon kasvu on kuitenkin laajentanut tarkasteluvyöhykkeitä, jotta maisemavaikutuksia voidaan arvioida tarkoituksenmukaisesti eri etäisyyksillä (Valtioneuvosto, 2016, s. 40–41).

Myös Tanskassa käytettyjä arviointimalleja on hyödynnetty vertailukohtana. Niissä maisemavaikutuksia tarkastellaan etäisyysvyöhykkeiden avulla, jotka on alun perin kehitetty pienemmille voimaloille. Näitä vyöhykkeitä on sittemmin sovellettu myös suurempiin, nykyisiä suunnitteluratkaisuja vastaaviin tuulivoimaloihin jatkamalla mallinnuksia suurempiin kokoluokkiin, mikä antaa suuntaa nykyisten hankkeiden maisemavaikutusten arviointiin (Valtioneuvosto, 2016, s. 41).

Tuulivoimaloiden keskinäisen ryhmittelyn vaikutukset

Tuulivoimaloiden sijoittelulla ja keskinäisellä ryhmittelyllä voidaan vaikuttaa jonkin verran siihen, millaisena tuulivoima-alue hahmottuu maisemassa sekä miten se suhteutuu ympäröivän alueen maisemarakenteeseen ja mahdollisiin arvokohteisiin. Voimaloiden sijoittamisen ensisijaiset perusteet liittyvät kuitenkin teknisiin tekijöihin, kuten tuuliolosuhteisiin, maaperän soveltuvuuteen sekä vaadittuihin etäisyyksiin voimaloiden välillä. Maisemallisia näkökohtia voidaan silti huomioida esimerkiksi sovittamalla sijoittelu maaston päämuotoihin, muodostamalla selkeitä geometrisia kokonaisuuksia tai turvaamalla tärkeiden näkymälinjojen säilyminen (Valtioneuvosto, 2016, s. 46).

Ryhmittelyn esteettinen suunnittelu edellyttää tietoa tarkastelupisteistä tai katselusuunnista, joista tuulivoima-aluetta arvioidaan. Jos sijoittelu optimoidaan liian vahvasti yhden näkymäsuunnan perusteella, voi seurauksena olla, että muista suunnista

katsottuna kokonaisuus ei enää muodosta johdonmukaista tai yhtenäistä vaikutelmaa, vaan voi näyttäytyä jäsentymättömänä tai levottomana (Valtioneuvosto, 2016, s. 46).

Sähkösiirtoratkaisujen maisemavaikutukset

Tuulivoima-alueisiin liittyvät sähkösiirron ratkaisut aiheuttavat yleensä rajallisia maisemavaikutuksia, koska suurikokoiset voimalat hallitsevat maisemakuvaa ja esimerkiksi voimajohdot tai maakaapelien vaatimat johtokäytävät sulautuvat osaksi energiantuotannon kokonaisuutta. Vaikutusten suuruus riippuu kuitenkin paikallisista olosuhteista ja niitä voidaan lieventää esimerkiksi reittivalinnoilla sekä pylväiden sijoittelulla erityisesti herkissä näkymäkohteissa. Uudet voimajohdot ja niiden johtoalueet voivat kuitenkin laajemmassa mittakaavassa pirstoa yhtenäisiä maisemakokonaisuuksia, kuten luonnonalueita tai kulttuuriympäristöjä (Valtioneuvosto, 2024, s. 47–48).

Myös maakaapelointi edellyttää puustosta avointa johtokäytävää, mikä tekee sen maisemavaikutuksista ilmajohdon kaltaisia, vaikka avoimilla alueilla muutokset jäävät vähäisemmiksi. Metsäisissä ympäristöissä johtoaukeat muuttavat maiseman rakennetta ja luonnetta selvästi. Kun voimajohtoja rakennetaan useita rinnakkain, ne voivat muodostaa leveitä yhtenäisiä käytäviä, jotka hallitsevat maisemaa erityisesti avoimilla alueilla ja voivat muuttaa maiseman rakennetta. Pylvästyyppien vaihtelu lisää visuaalista kontrastia, mutta niiden sijoittelulla voidaan myös rytmittää ja jäsentää maisemaa. Erityisen tärkeää suunnittelu on kohteissa, joissa johtoalue sijoittuu lähelle asutusta (Valtioneuvosto, 2024, s. 48–49).

Voimajohtojen näkyvyys vaihtelee maiseman ja katselusuunnan mukaan. Metsäisillä alueilla johtoaukea jää usein puuston peittoon, mutta avoimissa näkymäsuunnissa rakenteet voivat erottua selkeästi. Mäkisessä maastossa pylväävät voivat nousta puuston yläpuolelle ja tulla näkyviksi pidemmiltä etäisyyksiltä. Avoimissa maisemissa voimajohdot erottuvat helpoimmin ja niiden vaikutus korostuu erityisesti

maisemallisissa solmukohdissa tai rakennetun ympäristön läheisyydessä. Vaikutusten voimakkuuteen vaikuttavat maiseman ominaispiirteet, suuntautuneisuus sekä etäisyys ja taustaelementit (Valtioneuvosto, 2024, s. 48–49).

Pylväät ja johtolinjat voivat muodostaa merkittäviä visuaalisia vaikutuksia maisemallisesti herkissä kohteissa, kuten avoimilla alueilla. Vaikutuksia voidaan vähentää esimerkiksi pylvästyyppeiden valinnalla ja sijoittelulla, kuten tilanteissa, joissa uusia johtoja rakennetaan olemassa olevien rinnalle. Tällöin voidaan käyttää ratkaisuja, jotka yhdistävät useita johtoyhteyksiä samaan rakenteeseen (Valtioneuvosto, 2024, s. 49).

Sähköasemien maisemavaikutukset ovat maa-alueilla yleensä paikallisia, sillä ne ovat mittakaavaltaan pieniä verrattuna tuulivoimaloihin ja sijoittuvat usein kasvillisuuden suojaan tai sen tasolle. Kasvillisuuden poistaminen muuttaa kuitenkin lähiympäristön ilmettä. Sijoittelulla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka näkyväksi asema jää ympäristöönsä. Merialueilla sähköasemat sijoittuvat avoimeen maisemaan osaksi laajempaa energiantuotannon kokonaisuutta, jolloin niiden näkyvyys korostuu erityisesti hankealueella ja sen lähiympäristössä (Valtioneuvosto, 2024, s. 49–50).

7 Tuulivoiman tutka- radio- ja TV-verkkovaikutukset

Tuulivoimapuistot voivat vaikuttaa tutkajärjestelmien toimintaan. Vaikutuksen suuruus riippuu muun muassa sijainnista, voimaloiden koosta sekä lapien materiaaleista. Häiriöt voivat koskea esimerkiksi merenkulun viranomaisten, rajavalvonnan ja puolustusvoimien käyttämiä tutkia sekä ilmatieteellisiä mittauslaitteita ja säähavaintojärjestelmiä (Motiva, 2026b).

Tutkateknikka perustuu radioaaltoihin, joiden avulla havaitaan ja mitataan kohteita. Tuulivoimalat voivat häiritä tätä toimintaa aiheuttamalla signaalien heijastumista tai vääristymistä (Motiva, 2026b).

Rakentamisen vaikutukset kohdistuvat usein puolustusvoimien keskeisiin toimintoihin, kuten ilma- ja merivalvontaan käytettävien järjestelmien suorituskykyyn sekä joukkojen koulutukseen ja kaluston käyttöön varuskunnissa, varastoalueilla ja harjoitusympäristöissä (Motiva, 2026b).

Mahdolliset vaikutukset valvontajärjestelmiin on tärkeää arvioida jo hankkeen suunnitteluvaiheessa, jotta vältetään lisäongelmat ja ylimääräiset kustannukset. Suomessa nämä vaikutukset selvitetään tapauskohtaisesti yhteistyössä puolustusvoimien kanssa jokaisen hankkeen osalta (Motiva, 2026b).

Tuulivoima-alueet voivat vaikuttaa radio- ja televisiolähetysiin sekä matkapuhelinverkkoihin niiden vaikutuspiirissä. Pelkkä paikallaan oleva voimala ei yleensä aiheuta merkittäviä häiriöitä, vaan ongelmat liittyvät erityisesti pyöriviin lapihin. Ne voivat heikentää signaalin kulkua tuulipuiston läpi tai aiheuttaa voimakkaiden radiosignaalien heijastumista rakenteista, mikä puolestaan voi häiritä vastaanottoa (Motiva, 2026b).

Suomessa televisiolähetyksistä vastaa pääosin Digita, mutta myös muilla toimijoilla on alueellisia verkko-oikeuksia. Tuulivoimahankkeiden suunnitteluvaiheessa on tärkeää pyytää lausuntoja paikallisilta verkko-operaattoreilta, jotta mahdolliset haittavaikutukset voidaan tunnistaa ja minimoida ajoissa (Motiva, 2026b).

Kun vaikutukset on selvitetty, voidaan tarvittaessa laatia suunnitelma niiden vähentämiseksi. Käytännön keinoja ovat esimerkiksi antennijärjestelmien päivittäminen, suuntausten muuttaminen sekä lisälähettimien asentaminen (Motiva, 2026b).

Viranomaisten ohjeistuksen mukaan hankkeesta vastaavan tulee tiedottaa rakentamisesta kaikille tunnetuille radiojärjestelmien käyttäjille lähialueella. Yleisesti suositeltu tarkastelu-etäisyys on noin 30 kilometriä. Radiopaikannukseen ja radiolinkkeihin liittyviä toimijoita on kuitenkin informoitava aina, riippumatta etäisyydestä (Motiva, 2026b).

8 Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistot

Tässä luvussa käydään läpi Kurikan Santavuoren sekä Mustasaaren Merkkikallion tuulivoimapuistojen ympäristövaikutuksia.

8.1 Kurikan Santavuoren tuulivoimapuisto

EPV Tuulivoima Oy on toteuttanut Ilmajoen ja Kurikan rajalle, Santavuoren-Meskaisvuoren alueelle, tuulivoimapuiston. Sen kokonaiskapasiteetti on 56,1 MW ja se koostuu 17 tuulivoimalasta (teholtaan 3,3 MW). Puiston tavoitteena on ollut laajentaa uusiutuvan energian tuotantoa Etelä-Pohjanmaalla ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Alueen pinta-ala on noin 580 hehtaaria ja se sijoittuu pääosin rakentamattomalle maa- ja metsätalousalueelle. (2010, s. 7-8, 19–20).

Ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA)

YVA-menettely perustuu lakiin (468/1994). Sen tavoitteena on edistää ympäristövaikutusten huomioon ottamista suunnittelussa, sekä lisätä kansalaisten osallistumismahdollisuuksia. Menettely sisältää arviointiohjelman ja -selostuksen laadinnan, lausunnot ja mielipiteet, sekä osallistumisen järjestämisen. Hankkeesta vastaava EPV Tuulivoima Oy on tehnyt sopimukset maanomistajien kanssa. Alue on myös edellyttänyt alueen kaavoittamista sekä rakennuslupia (2010, s. 26-29, 31–33).

Ilmastonmuutos

Ilmajoen-Kurikan tuulivoimapuiston on todettu vähentävän hiilidioksidipäästöjä 30 000–165 000 tonnia vuodessa riippuen laskentatavasta. Tuulivoimapuisto ei tuota kasvihuonekaasupäästöjä toimintavaiheessa ja sen avulla voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä. (2010, s. 58–60).

Tuulivoimapuiston rakentaminen on kuluttanut energiaa, mutta se on tuottanut käytetyn energian määrän takaisin 4–6 kuukaudessa toimintavaiheessa. Tämän jälkeen puisto on alkanut tuottaa puhdasta energiaa, joka vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Tuulivoimapuisto on myös edistänyt Suomen kansallisia ja EU:n ilmastotavoitteita, kuten uusiutuvan energian osuuden nostamista 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä (2010, s. 12, 22–25).

Maankäyttö ja yhdyskuntarakenne

Tuulivoimapuistoalue sijaitsee Ilmajoen ja Kurikan rajalla, Santavuoren-Meskaisvuoren alueella, noin 4–9 km Kurikan ja Ilmajoen keskustaajamista. Alue on pääosin maa- ja metsätalouskäytössä, eikä siellä ole vakituista- tai loma-asutusta. Lähimmät asuinrakennukset sijaitsevat noin 500–1000 metrin päässä toteutuneista tuulivoimaloista (2010, s. 61–63).

Tuulivoimalat vaikuttavat maankäyttöön paikallisesti, sillä ne vievät maa-alaa perustuksillaan ja huoltoteillään. Voimaloiden melu ja varjostus rajoittavat asutuksen rakentamista niiden läheisyyteen. (2010, s. 35). Puistoalueen läpi kulkee Varpahaiskyläntie-Salonkyläntie ja alue on merkittävä virkistyskohde. Tuulivoimapuisto ei rajoita ulkoilureittien käyttöä, mutta se on muuttanut maisemaa ja aiheuttaa melu- ja varjostushaittoja lähialueilla (2010, s. 9, 13).

Maisemaan ja kulttuuriympäristö

Ilmajoen-Kurikan tuulivoimapuisto sijoittuu Kyrönjoen viljelymaiseman, sekä Jalasjoen varrella avautuvan lakeuden väliselle kumpuilevalle selännealueelle. Alueen maisemallisesti arvokkaat kohteet, kuten Santavuoren ja Pikku-Santavuoren kallioalueet, sijaitsevat puistoalueen länsipuolella. Alueella on myös valtakunnallisesti arvokkaita maisema-alueita, kuten Ilmajoen Alajoki (8 km etäisyydellä) ja Luopajarvi (11 km etäisyydellä). Tuulivoimalat näkyvät Santavuoren virkistysalueelta, mutta ne eivät muuta merkittävästi kaukomaisemaa. (2010 s. 10, 72–73, 75).

Luonto

Puistoalueella ei ole havaittu liito-oravan elinympäristöjä, eivätkä tuulivoimaloiden sijoituspaikat sijoitu liito-oravan suosimiin alueisiin. Tuulivoimaloiden lavat pyörivät

alimmillaan 74 metrin korkeudessa. Näin ollen ne eivät myöskään aiheuta törmäysriskiä. Rakentamisaikaiset toimenpiteet on lisäksi toteutettu siten, että ne eivät olet häirinneet liito-oravakantaa (2010, s. 102–104, 109).

Puistoalueella ei tehty erillisiä lepakkoselvityksiä, mutta alueen luonnonolosuhteet (kallioiset metsät, vanhat puut) tarjoavat mahdollisen elinympäristön lepakoille. Lepakot ovat herkkiä tuulivoimaloiden aiheuttamalle melulle ja törmäysriskeille, mutta puistoalueen pienikokoisuus ja sijainti ovat vähentäneet näitä riskejä. Lepakoiden suojeluun on kiinnitetty huomiota rakentamisen ja toiminnan aikana (2010, s. 102–106).

Tuulivoimalat sijoittuvat pääosin nuorille kasvatusmetsille ja avohakkuualueille, joten niiden vaikutukset linnustoon ovat vähäiset. Alueella pesivistä lajeista kanahaukka, huuhkaja ja metso ovat alttiimpia tuulivoimaloiden vaikutuksille. Törmäysriskit muuttolinnustolle, kuten hanhille, kurjille ja joutsenille, on arvioitu pieniksi, sillä linnut kykenevät väistämään tuulivoimalat (2010, s. 11, 95–102).

Melu- ja varjostusvaikutukset

Tuulivoimaloiden meluvaikutuksia arvioitiin SoundPlan 6.5 -ohjelmalla käyttäen Nord2000-melulaskentastandardia. Laskentamalli toimii kolmiulotteisessa ympäristössä ja huomioi muun muassa maastonmuodot, rakennukset, heijastukset, vaimenemiset, melulähteiden suuntaavuuden, käyntiajat sekä sääolosuhteet. Nord2000-mallin on todettu soveltuvan aiempia melulaskentamalleja paremmin tuulivoimalamelun mallintamiseen sekä maa- että merialueilla erilaisissa sääolosuhteissa. Meluvyöhykkeet laskettiin kahden metrin korkeudelle maanpinnasta. Laskennassa käytettiin tuulennopeutta 8 m/s 10 metrin korkeudella, koska se vastaa yleensä melun kannalta häiritsevintä tilannetta. Voimakkaammilla tuulilla taustamelu kasvaa ja voimaloiden käyntiäänäni ei välttämättä lisäännä vaan saattaa pienentyä. Tuulennopeus voimaloiden napakorkeudella määritettiin logaritmisella tuulennopeusprofiilin avulla. Mallinnuksen lähtötietoina hyödynnettiin Maanmittauslaitokselta saatua numeerista kartta-aineistoa sekä tuulivoimaloiden suunnittelutietoja, kuten napakorkeutta ja suunniteltuja sijainteja. Melutarkasteluissa käytettiin äänitehotasoa LWA 108 dB, joka vastaa yleisesti

suunniteltujen tuulivoimaloiden enimmäistasoa. Mallinnustulokset kuvaavat myötätuulitilannetta tuulivoimalalta tarkastelupisteeseen, eikä melu esiinny samanaikaisesti koko puiston alueella. Alueen vallitsevan lounaistuulen vuoksi korkeimmat melutasot esiintyvät useammin alueen koillispuolella kuin muilla ilmansuunnilla. (2010, s. 116).

Tuulivoimaloiden melutaso lähimmillä asuinrakennuksilla on 40–45 dB. Melutaso ylittää loma-asumisen yöajan ohjearvon, mutta pysyy vakituisen asutuksen ohjearvojen alapuolella. (2010 s. 12, 116–121).

Tuulivoimaloiden varjostusvaikutukset kohdistuvat 11 asuinrakennukseen napakorkeuden ollessa 120 metriä. Varjostusvaikutukset suurenevat napakorkeuden kasvaessa, jolloin 43 asuinrakennusta joutuu vähintään 8 tunnin vuotuiselle varjostusalueelle. (2010, s. 12, 121–126).

Liikenne ja elinkeinoelämä

Tuulivoimapuiston rakentaminen on lisännyt liikennettä alueella, erityisesti raskaita kuljetuksia tuulivoimaloiden osien ja rakennusmateriaalien kuljetuksesta. Rakentamisen aikana liikenne kasvoi merkittävästi Varpahaiskyläntie-Salonkyläntiellä, jossa on kuljetettu maa-aines- ja betonikuljetuksia. Maa-aineskuljetukset lisäsivät raskaan liikenteen määrää noin 50 ajoneuvolla vuorokaudessa (2010, s. 13, 126).

Tuulivoimapuisto työllisti 400–1 200 ihmistä tuulivoimaloiden valmistusvaiheessa ja 40–120 ihmistä perustamisvaiheessa. Käyttö- ja huoltovaiheessa on syntynyt 13–40 uutta työpaikkaa. Puisto on tukenut paikallista taloutta ja työllisyyttä ja sen on katsottu parantavan Ilmajoen ja Kurikan kuntien taloutta ja imagoa. Asukaskyselyn mukaan 61 % vastaajista on arvellut, että tuulivoimapuisto ei vaikuta heidän asumisviihtyvyyteensä. 23 % ennakoi kielteisiä vaikutuksia, kun taas 16 % odotti myönteisiä vaikutuksia (2010, s. 13, 128-129, 135-136, 139).

8.2 Mustasaaren Merkkikallion tuulivoimapuisto

Merkkikallion tuulivoimapuisto rakennettiin Vaasan kaupungin ja Mustasaaren kunnan alueelle Pohjanmaalle. Hankkeesta vastasi tuulivoimayhtiö OX2 Wind Finland Oy. Tuulivoimapuiston rakentaminen liittyi Suomen ilmasto- ja energiapoliittisiin tavoitteisiin sekä Euroopan unionin uusiutuvan energian strategiaan, joiden tavoitteena oli lisätä uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossa ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Pohjanmaan maakunnassa uusiutuvan energian kehittäminen nähtiin keskeisenä alueellisena tavoitteena ja tuulivoimahankkeet olivat merkittävä osa tätä kehitystä (2015a, s. IV, XVI).

Puisto koostuu 15 tuulivoimalasta, joiden yksikköteho on noin 5,5 MWh ja tuulivoimapuiston kokonaisteho on n. 82,5 MWh. Tuulivoimapuisto koostuu tuulivoimaloista perustuksineen, voimaloiden välisistä huoltoteistä, maakaapeleista sekä sähköasemasta, jonka kautta sähkö siirtyy valtakunnan sähköverkkoon (2015a, s. IV Maatuulivoima Merkkikallio/Märkenkall, 2022).

Tuulivoimapuiston ympäristövaikutuksia arvioitiin koko hankkeen elinkaaren ajalta, joka oli noin 25 vuotta. Arviointi sisälsi rakentamisvaiheen, toiminnan aikaiset vaikutukset sekä käytöstä poistamisen jälkeiset vaikutukset (2015a, s. IX).

Ympäristövaikutukset

Tuulivoimahankkeiden toteuttaminen Suomessa edellyttää ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA), mikäli hankkeen voimalamäärä on vähintään kymmenen tai kokonaisteho ylittää 30 megawattia. YVA-menettelyn tarkoituksena on selvittää hankkeen mahdolliset ympäristövaikutukset ennen hankkeen toteuttamista sekä tarjota tietoa viranomaisille ja kansalaisille päätöksenteon tueksi (2015a, s. IV).

Maaperä ja vesistöt

Tuulivoimapuiston rakentaminen vaikutti maaperään erityisesti voimaloiden perustusten, huoltoteiden sekä sähkökaapelien rakentamisen kautta. Rakentamisen aikana maaperää muokattiin paikallisesti, mikä saattoi aiheuttaa eroosiota ja maaperän tiivistymistä. Vaikutukset jäivät kuitenkin pääosin paikallisiksi, koska rakentaminen kohdistui rajattuihin alueisiin (2015a, s. 78, 83–84).

Vesistövaikutukset liittyivät lähinnä rakentamisen aikaisiin maansiirtotöihin, jotka saattoivat lisätä kiintoaineen kulkeutumista läheisiin vesistöihin. Vaikutuksia pyrittiin vähentämään käyttämällä menetelmiä, jotka rajoittivat kiintoaineen pääsyä vesistöihin sekä ajoittamalla rakentamistoimenpiteet siten, että ne eivät häirinneet vesieliöiden lisääntymisaikoja (2015a, s. 84, 88–89).

Kasvillisuus

Merkkikallion alueella esiintyi pääasiassa talousmetsää sekä kallioisia metsäalueita. Alueella tehtiin kasvillisuus- ja luontotyyppiselvityksiä, joiden tarkoituksena oli kartoittaa alueen luontoarvoa sekä kartoittaa mahdolliset suojelullisesti merkittävät kohteet. Rakentamisen vaikutukset kasvillisuuteen liittyivät pääasiassa metsän raivaamiseen voimaloiden ja huoltoteiden rakentamisen yhteydessä. Vaikutukset olivat kuitenkin paikallisia ja koskivat vain pientä osaa alueesta (Merkkikallion kasvillisuus- ja luontotyyppiselvityksen täydennys, 2015a, s. 90, 99–103; 2014B. s. 7).

Linnusto

Merkkikallion alueella tehtiin linnustonselvityksiä, joissa kartoitettiin sekä pesimälinnustoa että muuttolintuja. Selvityksissä tunnistettiin alueella esiintyvät lintulajit sekä niiden elinympäristöt (2014c s. 4–7).

Tuulivoimalat voivat vaikuttaa lintuihin erityisesti törmäysriskin sekä elinympäristöjen muutosten kautta. Törmäysriskin suuruus riippuu muun muassa lintujen lentokorkeudesta, muuttoreiteistä sekä voimaloiden sijoittelusta. Linnustovaikutusten arvioinnissa huomioitiin myös lähialueiden Natura-alueet sekä lintujen ruokailu- ja levähdysalueet (2015a, s. XI–XII).

Lepakot

Lepakoiden esiintymistä selvitettiin erillisissä lepakkoselvityksissä, joissa kartoitettiin alueella esiintyvät lepakkolajit sekä niiden elinympäristöt. Lepakoille tärkeät ruokailualueet sijaitsivat pääasiassa metsäalueilla (2014a, s. 3-8; 2015a s. 127).

Tuulivoimalat voivat aiheuttaa lepakoille törmäysriskin sekä häiriötä rakentamisen aikana. Merkkikallion alueella lepakoiden esiintyminen oli kuitenkin melko vähäistä, minkä vuoksi tuulivoimapuiston vaikutukset lepakoihin arvioitiin vähäisiksi (2014a, s. 3-8).

Natura 2000 -alueet

Puistoalueen läheisyydessä sijaitsee kaksi Natura 2000 -aluetta: Vassorfjärden ja Sidlåndet. Vassorfjärden sijaitsee alle kolmen kilometrin päässä alueesta ja on kansainvälisesti merkittävä lintualue (2015b, s. 138–139).

Natura-alueella esiintyy monipuolinen pesimälinnusto sekä suuri määrä muuttolintuja. Alueella on tärkeä merkitys lintujen levähdys- ja ruokailualueena. Arvioinnin perusteella tuulivoimapuisto ei kuitenkaan heikentänyt Natura-alueiden suojeluperusteita merkittävästi (2015b, s. 138–139, 143–146).

Ihmiset

Tuulivoimapuiston rakentaminen vaikutti myös ihmisten elinoloihin ja viihtyvyyteen. Vaikutukset liittyivät erityisesti meluun, maisemaan sekä rakentamisen aikaiseen liikenteeseen. Rakentamisvaiheessa alueella liikkui runsaasti raskasta kalustoa, mikä lisäsi tilapäisesti liikennettä lähialueilla (2015a, s. XIII–XIV; 2015b s. 148–149).

Tuulivoimaloiden toiminnan aikana vaikutukset liittyivät pääasiassa maisemamuutoksiin sekä meluun. Mallinnusten perusteella melutasot jäivät kuitenkin ohjearvojen alapuolelle sillä lähimmät asuinrakennukset sijaitsevat n. 1,5–3 kilometrin päässä. Melumallinukset tehtiin WindPro-laskentaohjelmalla kansainvälisen standardin ISO 9613-2 ja ympäristöministeriön ohjeen 2/2014 mukaisesti, tuulen nopeutena käytettiin 8 m/s (2015a, s. 49–50; 2015b s. 148–149, 151).

9 Johtopäätökset

Tässä työssä tarkasteltiin tuulivoiman tuottamaa melua ja sen vaikutuksia osana laajempaa tuulivoiman ympäristövaikutusten kokonaisuutta. Aineiston perusteella voidaan todeta, että tuulivoima on tärkeä uusiutuvan energian tuotantomuoto, mutta sen lisääntyminen edellyttää tarkkaa suunnittelua ja vaikutusten arviointia, jotta tuotanto voidaan sovittaa yhteen ympäristön, asutuksen ja luonnon kanssa.

Keskeinen havainto on, että tuulivoimaloiden melu syntyy pääasiassa aerodynaamisesti lapojen ja ilman vuorovaikutuksesta, kun taas mekaanisen melun merkitys on nykyaikaisissa voimaloissa vähäisempi. Melun kokemus ei kuitenkaan riipu yksinomaan sen voimakkuudesta, vaan siihen vaikuttavat myös taajuus, melun vaihtelu, sääolosuhteet, etäisyys voimalasta sekä yksilöllinen herkkyys. Tämän vuoksi sama melutaso voi vaikuttaa ihmisiin hyvin eri tavoin.

Työn perusteella tuulivoimalamelun merkittävin vaikutus liittyy häiritsevyyteen ja unenlaadun heikkenemiseen, ei niinkään selkeästi todettuihin fyysisiin terveyshaittoihin. Erityisesti asutuksen läheisyydessä koettu melu voi vaikuttaa asumisviihtyvyyteen ja elämänlaatuun, vaikka mitatut tasot pysyisivät ohjearvojen rajoissa. Tämä korostaa sitä, että pelkkä mittaustieto ei aina riitä kuvaamaan vaikutusten todellista merkitystä, vaan myös koettu haitta on otettava huomioon.

Lisäksi työ osoitti, että tuulivoiman ympäristövaikutukset ovat laajempia kuin pelkkä melu. Linnustoon, maisemaan ja alueiden käyttöön kohdistuvat vaikutukset vaikuttavat siihen, millaisille alueille tuulivoimaa voidaan sijoittaa. Sijoittamisessa korostuu siten kokonaisarvio, jossa huomioidaan tekninen tuotantopotentiaali, ympäristöarvot ja lähialueen asukkaiden näkökulma.

Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistojen tarkastelu osoitti, että paikalliset tuuliolosuhteet vaikuttavat merkittävästi tuotantopotentiaaliin ja samalla myös siihen,

millaisia ratkaisuja alueelle voidaan toteuttaa. Tuulivoimahankkeiden onnistuminen riippuu siten sekä luonnonolosuhteista että siitä, miten hyvin ympäristövaikutukset osataan hallita suunnitteluvaiheessa.

Kokonaisuutena voidaan päätellä, että tuulivoima on ympäristön kannalta perusteltu energiantuotantomuoto, mutta sen hyväksyttävyyttä edellyttää huolellista melun, maisemavaikutusten ja muiden ympäristötekijöiden huomioon ottamista. Tuulivoiman lisääminen on mahdollista kestäväällä tavalla vain, jos vaikutuksia arvioidaan avoimesti ja sijoittelussa pyritään minimoimaan haitat ihmisten ja luonnon kannalta.

Jatkossa tuulivoiman meluvaikutuksia olisi hyödyllistä tutkia erityisesti pitkäaikaisen altistumisen näkökulmasta, jotta voidaan paremmin ymmärtää melun mahdollisia kumulatiivisia vaikutuksia ihmisten hyvinvointiin. Lisäksi tarvitaan tarkempaa tutkimusta matalataajuisten äänen ja infraäänien havaitsemisesta sekä niiden mahdollisista epäsuorista vaikutusmekanismeista. Myös yksilöllisten tekijöiden, kuten meluherkkyyden ja asenteiden, vaikutusta koettuun häiritsevyyteen tulisi tarkastella syvällisemmin. Tulevaisuudessa olisi tärkeää kehittää entistä tarkempia mallinnusmenetelmiä, jotka huomioivat paremmin vaihtelevat sääolosuhteet ja maaston vaikutukset äänen leviämiseen. Lisäksi sosiaalisten vaikutusten, kuten paikallisyhteisöjen hyväksyttävyyden ja kokemusten tutkiminen voisi tarjota arvokasta tietoa tuulivoimahankkeiden suunnittelun tueksi.

10 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin tuulivoiman tuottamaa melua osana laajempaa tuulivoiman ympäristövaikutusten kokonaisuutta. Työ osoitti, että tuulivoima on energiapoliittisesti tärkeä ja ilmaston kannalta perusteltu ratkaisu, mutta sen toteuttaminen ei ole vain tekninen kysymys, vaan siihen liittyy myös ympäristöllisiä, sosiaalisia ja maisemallisia vaikutuksia. Tuulivoiman merkitys kasvaa jatkuvasti, koska sillä voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja tukea uusiutuvan energian tuotantoa, mutta samalla hankkeiden suunnittelussa on huomioitava paikalliset olosuhteet, asutus ja luonto.

Työn alkuosassa käsiteltiin tuulen syntyä ja tuulivoiman energiatekijöitä, mikä loi pohjan koko aiheen ymmärtämiselle. Tuulivoimalan tuotanto perustuu tuulen liike-energiaan ja sen kannalta olennaisia muuttujia ovat tuulennopeus, ilman tiheys ja roottorin pyyhkäisyypinta-ala. Erityisen tärkeää on, että tuulen teho kasvaa tuulennopeuden kuutiona, minkä vuoksi pienilläkin nopeuseroilla voi olla suuri vaikutus tuotantoon. Tämä selittää, miksi sijainnin valinta on tuulivoimahankkeissa niin ratkaisevaa ja miksi rannikko- ja merialueet ovat usein tuulivoiman kannalta edullisempia kuin sisämaa.

Työssä tarkasteltiin myös paikallisia tuuliolosuhteita, kuten maa- ja merituulia, föhn-tuulta sekä maaston ja kitkan vaikutusta tuulen käyttäytymiseen. Näillä tekijöillä on merkitystä paitsi energiantuotannolle myös melun leviämislle ja voimaloiden toimintaolosuhteille. Esimerkiksi tuulen nopeuden muuttuminen korkeuden mukana tekee napakorkeudesta tärkeän suunnittelutekijän ja juuri siksi suuret nykyaikaiset voimalat rakennetaan korkeiksi. Kurikan ja Mustasaaren esimerkeissä näkyi, kuinka alueen tuuliolosuhteet vaikuttavat tuulivoimapotentiaaliin eri korkeuksilla. Näin ollen tuulivoiman tuotanto ei riipu vain siitä, missä tuulee, vaan myös siitä, miten tuuli käyttäytyy eri korkeuksissa ja eri vuodenaikoina.

Keskeinen osa työtä oli tuulivoimaloiden melu. Työssä käytiin läpi melun syntyä sekä aerodynaamisen että mekaanisen melun näkökulmasta. Aerodynaaminen melu muodostuu roottorin lapojen ja ilmapirran vuorovaikutuksesta ja se on nykyaikaisissa suurissa voimaloissa yleensä hallitseva melulähde. Mekaanista melua syntyy taas esimerkiksi vaihdelaatikosta, generaattorista ja jäähdytysjärjestelmistä, mutta sen merkitys on vähentynyt tekniikan kehittyessä. Melun laatua voidaan kuvata esimerkiksi tonaalisena, laajakaistaisena, matalataajuisena ja impulsiivisena, mikä auttaa ymmärtämään, miksi kaikki melu ei tunnu ihmisestä samalta. Tämä on tärkeä havainto, koska häiritsevyys ei määräydy pelkän desibelitason perusteella.

Työssä nousi esiin myös se, että melun leviäminen on vahvasti riippuvainen ilmakehän olosuhteista. Lämpötila, tuuli, inversiotilanteet ja maaston muodot voivat joko vahvistaa tai vaimentaa äänen kulkeutumista. Tämä tekee tuulivoimalamelun arvioinnista monimutkaista, koska mallinnettu melutaso ei aina vastaa kaikkia todellisia tilanteita. Erityisesti yöllä, kun taustamelu on vähäisempää ja ilmakehän olosuhteet voivat suosia äänen etenemistä, melu voidaan kokea häiritsevämmäksi. Työstä kävi myös ilmi, että voimakkaampi tuuli voi nostaa taustamelua niin, että voimaloiden ääni ei korostu yhtä paljon, vaikka melua teknisesti syntyykin.

Melun terveys- ja hyvinvointivaikutusten osalta työssä todettiin, että keskeisin haitta liittyy häiritsevyyteen ja uneen. Tuulivoimalamelu voi vaikeuttaa nukahtamista, heikentää unen laatua tai lisätä ärtymistä, mutta tutkimusnäyttö ei tue vahvaa yhteyttä vakaviin suoriin terveysvaikutuksiin. Samalla korostui, että kokemuksellinen puoli on tärkeä: ihmisten suhtautuminen voimaloihin, niiden näkyvyys ja huoli mahdollisista vaikutuksista voivat vaikuttaa siihen, kuinka häiritsevänä melu koetaan. Tämä tekee tuulivoimamelusta osittain myös sosiaalisen ja psykologisen kysymyksen, ei pelkästään akustisen.

Yksi työn tärkeistä lisänäkökulmista oli inframelu ja matalataajuiset äänet. Niitä käsiteltiin siksi, että ne ovat usein esillä tuulivoimaan liittyvässä keskustelussa, mutta

niiden todelliset terveysvaikutukset ovat tutkimusten perusteella epävarmoja tai vähäisiä. Työssä tuli esiin, että inframelua esiintyy luonnostaan myös ympäristössä, eikä sen havaitseminen tai vaikutus ole yksiselitteinen. Tämä näkökulma täydentää tuulivoimalamelun tarkastelua ja osoittaa, että kaikki voimaloiden tuottamat äänet eivät automaattisesti merkitse merkittävää haittaa.

Tuulivoiman ympäristövaikutuksista työssä tarkasteltiin myös linnustoa, mikä toi aiheeseen uuden, hyvin tärkeän ulottuvuuden. Linnustovaikutukset voivat olla sekä suoria että välillisiä: suoria vaikutuksia ovat esimerkiksi törmäykset voimaloihin, kun taas välillisiä vaikutuksia ovat elinympäristön muutokset, häirintävaikutus ja alueen käytön muuttuminen. Vaikutusten voimakkuus riippuu paljon lajista, sijainnista, voimaloiden määrästä ja alueen merkityksestä lintujen muuttoreiteille tai pesimäalueille. Työssä korostui, että erityisesti muuttolintujen ja joidenkin petolintujen kohdalla sijoittelulla on suuri merkitys. Tämä osoittaa, että tuulivoimahankkeiden hyväksyttävyyys ei riipu vain energiatuotannon hyödyistä, vaan myös luonnonsuojelun huomioimisesta.

Maisemavaikutukset olivat toinen merkittävä kokonaisuus, joka täydensi työn näkökulmaa. Tuulivoimalat muuttavat maisemaa näkyvästi, koska niiden mittakaava on suuri ja ne voivat hallita ympäristöä pitkienkin etäisyyksien päästä. Vaikutusten kokemus riippuu kuitenkin siitä, millainen maisema alueella on valmiiksi: avoimessa maisemassa voimalat erottuvat selvemmin, kun taas metsäisessä tai rakennetussa ympäristössä niiden vaikutus voi olla osittain peittyneenä. Työssä tuli esiin myös se, että maisemavaikutuksia ei voi yksiselitteisesti tulkita negatiivisiksi, koska ne voivat myös kuvastaa alueen muuttuvaa käyttöä ja uudenlaista energiainfrastruktuuria. Tällä on merkitystä erityisesti alueilla, joilla tuulivoima sijoittuu jo muutenkin ihmisen muokkaamaan ympäristöön.

Kurikan ja Mustasaaren tuulivoimapuistojen tarkastelu toi työhön käytännöllisen näkökulman. Näiden tapausten kautta voitiin nähdä, miten melu-, maisema- ja luontovaikutukset ilmenevät todellisissa hankkeissa ja miten ne arvioidaan osana

ympäristövaikutusten arviointia. Esimerkit osoittivat, että vaikutukset jäävät usein paikallisiksi, mutta niiden merkitys voi silti olla suuri lähialueen asukkaille ja alueen luontoarvoille. Lisäksi ne havainnollistivat, että hankkeiden toteutuksessa korostuu tasapaino. Tuulivoimaa tarvitaan energiantuotantoon, mutta sen sijoittaminen edellyttää tarkkaa suunnittelua, mittauksia ja vaikutusten lieventämistä.

Työstä voidaan lopuksi todeta, että tuulivoima on kokonaisuutena myönteinen ja tarpeellinen osa tulevaisuuden energiajärjestelmää, mutta sen ympäristövaikutukset tekevät siitä moniulotteisen suunnittelu- ja arviointikohteen. Melu, linnusto, maisema ja maankäyttö muodostavat yhdessä kokonaisuuden, jonka hallinta ratkaisee pitkälti sen, kuinka hyvin tuulivoima voidaan sovittaa ympäröivään yhteiskuntaan. Tämä työ osoittaa, että onnistunut tuulivoimahanke ei ole vain teknisesti toimiva, vaan myös ympäristön, luonnon ja ihmisten näkökulmasta kestäväällä tavalla toteutettu.

Lähteet

- BirdLife Suomi. (2024). *Tuulivoima ja linnut*. Noudettu 12.1.2026 osoitteesta <https://www.birdlife.fi/suojelu/oma-ymparistomme/tuulivoima/>
- Bolin, K., Bluhm, G., Eriksson, G. M & Nilsson M. E (2011). Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environmental research letters*, 6(3) 5. DOI:[10.1088/1748-9326/6/3/035103](https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035103)
- C. Di Napoli, C. (2007). *Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen*. Ympäristöministeriö. Noudettu 1.2.2026 osoitteesta https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38415/SY4_2007_Tuulivoimaloiden_melun_syntytavat_ja_leviaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Council of Canadian academics. (2015). *Understanding the evidence: Wind turbine noise*. Noudettu 15.12.2025 osoitteesta <http://www.scienceadvice.ca/en/assessments/completed/wind-turbine-noise.aspx>. ISBN 978-1-926522-07-4.
- FCG suunnittelu ja tekniikka Oy. (2015a). Merkkikallion tuulivoimapuisto: Ympäristövaikutusten arviointiselostus osa1. Noudettu 12.2.2026 osoitteesta https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/OX2_Merkkikallio_arviointiselostus_Osa1.pdf
- FCG suunnittelu ja tekniikka Oy. (2015b). Merkkikallion tuulivoimapuisto: Ympäristövaikutusten arviointiselostus osa 2. Noudettu 20.2.2026 osoitteesta https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/OX2_Merkkikallio_arviointiselostus_Osa2.pdf
- Garcia-Sanz, M. & Houpis, C. H. (2012). *Wind energy systems*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11673>
- EPV Tuulivoima Oy. (2010). Ilmajoen-Kurikan tuulivoimapuiston ympäristövaikutusten arviointiselostus. Noudettu 7.2.2026 osoitteesta <https://www.epvtuulivoima.fi/wp-content/uploads/sites/3/2017/03/Ilmajoki-Kurikan-tuulivoimapuiston-YVA-selostus.pdf>

- Gipe, P. (1999). *Wind energy basics: A guide to small and micro wind systems*. Chelsea Green Publishing Company. Noudettu 15.2.2026 osoitteesta <https://www.scribd.com/document/15689535/Wind-Energy-Basics-by-Paul-Gipe-Book-Preview>
- Hanna, J. (2025). *Sound waves*. Pasco. Noudettu 6.2.2026 osoitteesta <https://www.pasco.com/products/guides/sound-waves>
- Hongisto, V. & Olivia, D. (2017). *Tuulivoimaloiden infraäänit ja niiden terveysvaikutukset*. [tietoaineisto] Turun ammattikorkeakoulu. Noudettu 25.4.2026. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-216-653-1>
- Joutsenvirta, A. (2009). *Hertsi, sentti ja desibeli*. Sibelius-Akatemia. Noudettu 26.2.2016 osoitteesta <http://www2.siba.fi/akustiikka/?id=13>.
- Jynx Oy. (2014a). Merkkikallion lepakkoselvitys. Noudettu 15.1.2026 osoitteesta https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Merkkikallion_lepakko_muuttoselvitys.pdf
- Jynx Oy. (2014b). Merkkikallion tuulivoimakohteen kasvillisuus- ja luontotyyppiselvityksen täydennys. Noudettu osoitteesta 17.1.2026 https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Merkkikallion_luontotaydennyselvitys.pdf
- Jynx Oy. (2014c). Mustasaaren Merkkikallion linnustoselvitys. Noudettu 22.1.2026 osoitteesta https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Merkkikallion_linnustoselvitys.pdf
- Karjalainen, M. (2002). *Hieman akustiikkaa*. Teknillinen korkeakoulu.
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. (2008). *Ilmakehä, sää ja ilmasto*. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.
- Madsen, K. D. & Pedersen, T. H (2010). Low frequency noise from large wind turbines. *Technical report Delta*. 1272(10) 60–61.
- Manwell, J. F., McGowan, J. & Rogers, A. (2010). *Wind Energy Explained, theory, design and application*. WILEY. Noudettu 19.3.2026 osoitteesta https://ee.tlu.edu.vn/Portals/0/2018/NLG/Sach_Tieng_Anh.pdf

- Metsähallitus. (2024). Tuulivoima ja luonnon monimuotoisuus. Noudettu 10.3.2026 osoitteesta <https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/tuulivoima-ja-luonnon-monimuotoisuus/>
- Motiva. (2025). Tuulivoima. Motiva Oy. Noudettu 7.2.2026 osoitteesta https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima
- Motiva. (2026a). Tuulivoima Suomessa. Noudettu 5.3.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/tietopankki/tuulivoima-suomessa/>
- Motiva. (2026b). Tuulivoiman ympäristö- ja muut vaikutukset. Noudettu 25.4.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/tietopankki/tuulivoiman-ymparisto-ja-muut-vaikutukset/>
- Niemi, J. P. (2013). *Tuulivoima; kehitys, investoinnit ja työllisyys Suomessa* [Diplomityö Lappeenrannan teknillinen yliopisto]. LutPub. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201306043813>
- Oerlemans, S., Sijtsma, P., & López B. (2007). Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, 299(4-5) 896, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.07.032>
- Rejlers Finland. (2024). Haitinkankaan tuuli- ja aurinkovoimahanke – YVA-ohjelma. Noudettu 12.1.2026 osoitteesta <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Haitinkankaan%20tuuli-%20ja%20aurinkovoimahanke%2C%20YVA-ohjelma.pdf>
- Rogers, A. L., Manwell, J. F. & Wright, S. (2006). *Wind turbine acoustic noise*. Noudettu 16.1.2026 osoitteesta https://docs.wind-watch.org/rogerswindturbinenoise_rev2006.pdf.
- Rishmany, J., Daaboul, M., Tawk, I. & Saba, N. (2017). Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine Using FEA, Multibody Dynamics and Wind Tunnel Testing. Noudettu 3.1.2026 osoitteesta <https://www.athensjournals.gr/technology/2017-4-3-3-Rishmany.pdf>
- Starck, S. & Teräsvirta, L. (2009). *Melu*. Työterveyslaitos.

- Suomen Tuulivoimayhdistys ry. (2023). Tuulivoima Suomessa 2013. Noudettu 12.2.2026 osoitteesta https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-2.pdf
- Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. (2020). *Tuulivoima ja melu*. Noudettu 7.1.2026 osoitteesta <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/melu/tuulivoima-ja-melu>
- Tonin, R. (2012). Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoustics Australia*, 40(1) 22–23
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2017). Kirjallisuusselvitys tuulivoimaloiden vaikutuksista linnustoon ja lepakoihin. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-228-6>
- Uosukainen, S. (2010). Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyyt. Noudettu 1.3.2026 osoitteesta <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2010/T2529.pdf>
- Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista 1107/2015. Finlex. Noudettu 27.2.2026 osoitteesta <https://www.finlex.fi/eli?uri=http://data.finlex.fi/eli/sd/2015/1107/ajantasa/2015-08-27/fin>
- Venho, S. N. (1971). *Meteorologia*. WSOY.
- VSB Uusiutuva Energia. (2024). Kuinka suuria tuulivoimalat ovat? Noudettu 22.3.2026 osoitteesta <https://www.vsb.energy/fi/fi/usein-kysytyt-kysymykset/>
- World Health Organization. (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. WHO. Noudettu 7.1.2026 osoitteesta <https://www.who.int/publications/i/item/9789289053563>
- WWF. (2024). *Tuulivoima*. Noudettu 20.2.2026 osoitteesta <https://wwf.fi/tuulivoima/>
- Ympäristöministeriö. (2016a). *Linnustovaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa*. Noudettu 3.4.2026 osoitteesta <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/de621b20-000d-4046-9ba2-0d6abfc55f52/content>
- Ympäristöministeriö (2016b). *Tuulivoimarakentamisen suunnittelu*. Noudettu 20.3.2026 <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/c4425135-9fd4-4af6-a89d-a44f1f8b4582/content>

Ympäristöministeriö. (2024). *Maisemavaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa.*

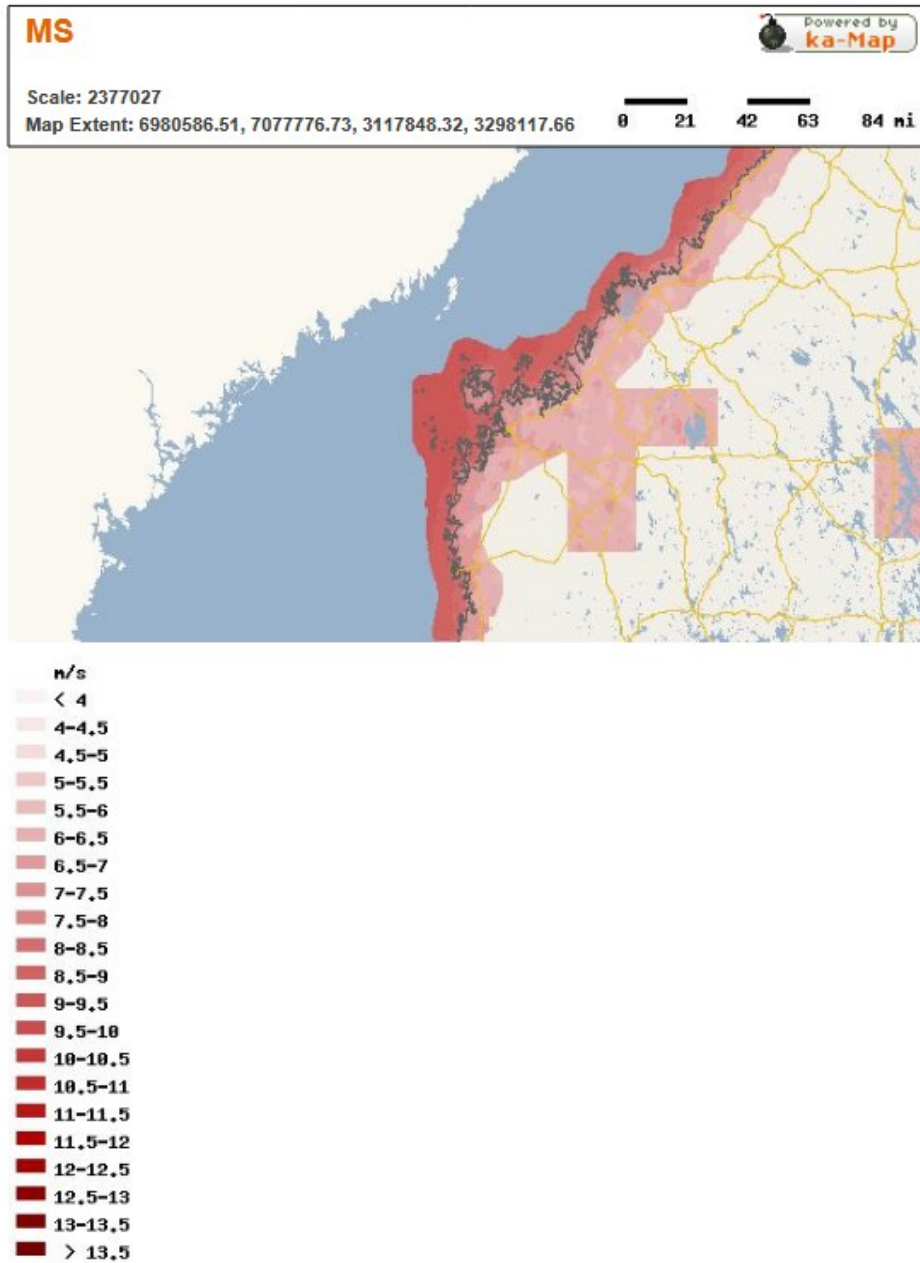
Noudettu

16.3.2026

osoitteesta

<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/742ae39e-3c3d-4e7a-8212-86e4ac918cd3/content>

Liite 1. Vallitsevat tuuliolosuhteet 100m korkeudessa



Liite 2. Vallitsevat tuuliolosuhteet 200m korkeudessa

