

SUOMEN YMPÄRISTÖ 4 | 2007

# Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen

**Carlo Di Napoli**

RAKENNETTU  
YMPÄRISTÖ



YMPÄRISTÖMINISTERIÖ



# Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen

**Carlo Di Napoli**

Helsinki 2007

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ



**YMPÄRISTÖMINISTERIÖ**  
MILJÖMINISTERIET  
MINISTRY OF THE ENVIRONMENT

**SUOMEN YMPÄRISTÖ 4 | 2007**  
Ympäristöministeriö  
Alueidenkäytön osasto

Taitto: Ainoliisa Miettinen  
Kansikuva: Emilia Weckman

Julkaisu on saatavana vain internetistä:  
[www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

Helsinki 2007

ISBN 978-952-11-2585-0 (PDF)  
ISSN 1796-1637 (verkkokoj.)

## ESIPUHE

Energian tuotanto tuulen avulla on kasvussa sekä maailmalla että Suomessa. Meillä tuulivoiman merkittävimmät hyödyntämismahdollisuudet ovat rannikolla ja merialueella. Tuulivoimaloiden rakentamisesta on Suomessa toistaiseksi verrattain vähän kokemusta. Tämän vuoksi kokemus tuulivoimaloiden ympäristövaikutuksista ja vaikutusten arvioinnista on vielä vähäistä. Ympäristöministeriö onkin katsonut tarpeelliseksi edistää asianmukaisten selvitysten ja arviointien laatimista tuottamalla sitä tukevaa tietoa.

Käsillä oleva raportti sisältää perustiedot tuulivoimaloiden meluvaikutuksista: tuulivoimalaitosten käyntiäänien syntytaivoista, vaimentamismahdollisuuksista sekä äänen leviämisestä ympäristöön. Tuulivoimaloiden meluvaikutuksista ei ole Suomessa juurikaan tutkittua tietoa. Julkaisu tuo tähän puutteeseen oman toivotun lisänsä. Raporttia voidaan hyödyntää tietolähteenä muun muassa kaavoituksen, ympäristövaikutusten arvioinnin ja lupamenettelyjen yhteydessä.

Selvityksen on laatinut DI Carlo Di Napoli Pöyry Energy Oy:stä, jota ympäristöministeriö kiittää perusteellisesta työstä. Työtä on ohjannut yli-insinööri Antti Irjala ympäristöministeriöstä.

Helsingissä maaliskuussa 2007

Ulla Koski  
Aluesuunnitteluneuvos



## SISÄLLYS

<b>Esipuhe</b> .....	3
<b>I Johdanto</b> .....	7
1.1 Ääniaallon peruskäsitteitä ja desibeliasteikko .....	7
<b>2 Tuulivoimalaitosten melun syntykohteet</b> .....	9
2.1 Aerodynaaminen melu .....	10
2.2 Laitekohtainen melu ja runkovärähtely .....	11
<b>3 Modernit tuulivoimalat</b> .....	12
3.1 Maalle rakennettavat tuulivoimalaitokset .....	12
3.2 Merituulivoimalaitokset .....	12
<b>4 Melun vaimennusmahdollisuudet</b> .....	14
<b>5 Melun leviäminen ympäristöön</b> .....	16
5.1 Taustamelu .....	16
5.2 Melun etenemisvaimentuminen .....	17
5.3 Maanpinnan heijastusvaikutukset .....	17
5.4 Säätilan vaikutus melun leviämiseen .....	18
5.5 Melun eteneminen veden yli .....	20
5.6 Tuulivoimalaitoksen melun mallintaminen tietokoneavusteisesti .....	20
5.7 Tuulistatistiikka ja melun sääkorjaukset .....	21
5.8 Tuulivoimalaitosten melun häiritsevyys .....	21
5.9 Suojaetäisyyksien määrittäminen .....	22
5.10 Yhteenveto melun leviämislaskennoista .....	23
<b>6 Melun verifiointi ja laitetoimittajien melutakuut</b> .....	24
6.1 Äänitehotason määrittäminen .....	24
6.2 Melumittaukset .....	24
<b>7 Katsaus eri maiden tuulivoimalaitomelun ohjearvoihin</b> .....	26
Viiteluettelo .....	27
Kuvailulehti .....	29
Presentationsblad .....	30
Documentation page .....	31

## Lyhenteet

L <sub>p</sub>	Äänenpainetaso. Tarkastelupisteessä vallitsevan äänen fysikaalinen äänenvoimakkuuden ilmaiseva suure.	[dB]
L <sub>w</sub>	Äänitehotaso. Melulähteen ääniteho suhteessa 1pW:iin, ilmaistuna desibeleinä. Ilmoitetaan yleensä taajuuskaistoittain ja/tai A-painotettuna. Tehotaso voi olla erilainen eri suuntiin.	[dB]
L <sub>w,ref</sub>	Napakorkeudelle tuulisuuskorjattu äänitehotaso.	[dB]
r	Suora etäisyys tornin navasta tarkastelupisteeseen	[m]
ΔL <sub>a</sub>	Ilmavaimentumisen tekijä. Voidaan laskea ISO 9613 -1, tai -2 mukaan tai käyttämällä yleistä kerrointa ΔL <sub>a</sub> = 0,005*r.	[dB]
v	Tuulen nopeus napakorkeudella	[m/s]
H	Tuuliturbiinin napakorkeus	[m]
z <sub>0</sub>	Maanpinnan karheusermi	[m]
v <sub>ref</sub>	Referenssituulennonopeus äänitehotasomittauksessa	[m/s]
z <sub>0,ref</sub>	Referenssi maanpinnan karheusermi	[m]



# 1 Johdanto

Tämän selvityksen tarkoituksena on antaa yleisluontoista tietoa tuulivoimalaitosten käyntiäänien syntytaivoista, vaimentamismahdollisuuksista sekä äänen (melun) leviämistä ympäristöön. Koska tuulivoimatuotanto on nopeimmin kasvava energiantuotantomuoto maailmassa, on myös ympäristövaikutuksiin kiinnitetty entistä enemmän huomiota. Tuulivoimalaitosten koon kasvaessa eniten keskustelua herättäviksi ympäristönäkökohdiksi ovat nousseet visuaalinen haitta sekä vaikutukset linnustoon. Kokonsa ja tuotantotehonsa puolesta suurempia tuulivoimalaitoksia tai usean tuulivoimalan muodostamia tuulipuistoja on kuitenkin ryhdytty maailmalla rakentamaan lähemmäksi loma- ja asutuskeskuksia, jolloin myös melu- ja vilkkumisongelmaan on jouduttu kiinnittämään enemmän huomiota. Lisäksi tuulivoimalaitoksista kantautuva melu on aiheuttanut poikkeuksellisia ongelmia, joissa hetkelliset desibelitasot ovat ylittyneet paikoin suuresti varsinaisiin lupaehtoihin nähden. Nämä tilanteet ovat usein tapahtuneet aikana, jolloin alueen muu melutaso on ollut alhaisempaa ja säätila suosiollinen melun kuuluvuudelle.

Meluongelmaan on pureuduttu maailmalla jo 1990-luvulla, esimerkiksi Tanskassa on tehty selvityksiä ja kattavia ohjeistuksia jo yhdeksänkymmentäluvun alussa. Englannissa tehtiin vuonna 1997 suuri tuulivoimameluselvitys, jonka pohjalta on yhtenäistetty mm. mittaustandardeja (IEC) tuulivoimalaitoksen meluarvon määrittämiseksi. Pohjoismaissa on 2000-luvun alun tutkimusten perusteella johdettu yksinkertaisia laskentayhtälöitä melutason ja suojaetäisyyksien arvioimiseksi. Maailmanlaajuisesti tutkimukset melun vaimentamismahdollisuuksista ovat keskittyneet etenkin lapa- ja lavankärkiprofiilin optimointiin hyötysuhdetta heikentämättä.

Suomessa ulko- ja sisämelun ohjearvot on määrittänyt valtioneuvoston päätöksellä VNp 993/1992. Ohjearvot ovat ensisijaisesti suunnittelun ohjearvoja, joilla pyritään hillitsemään uusien melua ai-

heuttavien toimintojen tai laitteiden melua lisäävää vaikutusta sekä kaavoitusta uusien asuintalojen rakentamiseksi jo olemassa oleville melualueille. Tämä on huomioitu myös valtakunnallisella tasolla asettamalla työryhmä miettimään mahdollisuuksia vähentää ympäristömelun syntyä ja melulle altistumista Suomessa (SY 696, Meluntorjunnan valtakunnalliset linjaukset ja toimintaohjelma, 2004). Työryhmän työhön on kuulunut mm. suositukset hiljaisten alueiden yleistutkimuksesta sekä kartotusohjelmista eri paikkakunnilla. Hiljaisten alueiden kriteerit täyttyvät monessa tärkeässä tuulivoimatuotannon kannalta potentiaalisessa kohteessa, mikä on lisännyt kiinnostusta myös tuulivoimameluselvityksiä kohtaan.

## 1.1

### **Ääniaallon peruskäsitteitä ja desibeliasteikko**

Ääni on aaltoliikettä, joka välittyäkseen eteenpäin tarvitsee aina väliaineen. Ilmassa äänellä on nopeus joka on riippuvainen ilman lämpötilasta. Eri väliaineissa ääniaalto kulkee eri nopeuksilla väliaineen ominaisuuksien mukaan. Normaali ympäristömelu sisältää useiden kohteiden yhtäaikaista ääntä, jossa äänen taajuudet ja aallonpituudet ovat jatkuvassa muutoksessa. Mittauksin voidaan kuitenkin erotella melun hetkelliset komponentit esim. taajuustarkastelulla.

Melu on sen sijaan käsite, jolla ymmärretään äänen negatiivisia vaikutuksia, ei-toivottua ääntä josta seuraa ihmisille haittaa. Melu on siis fyysikaalisten mittareiden lisäksi myös hyvin pitkälti subjektiivinen käsite, jossa kuulijan omilla tuntemuksilla ja äänenenerotuskyvyllä on ratkaiseva merkitys.

Äänen voimakkuutta mitataan käyttäen logaritmista desibeliasteikkoa (dB), jossa äänenpaineelle (eli hyvin pienelle paineenmuutokselle) käytetään referenssipainetta 20 µPa ilmalta sekä 1 µPa muille

aineille. Tällöin 1 Pa paineenmuutos ilmassa vastaa noin 94 dB:ä ja vedessä 120 dB:ä. Melulähteestä ääni emittoituu äänitehona, jonka tasomäärälle käytetään yleisesti symbolia  $L_w$  ja referenssitehona 1 pW. Äänitehotaso voidaan kullekin äänilähteelle mitata tai laskea äänenpaineen  $L_p$  tasosta, joka mitataan äänitasomittarilla määrätyn etäisyyden päässä äänilähteestä (näin esimerkiksi tuulivoimaloiden kohdalla, ks. kappale 5.1). Äänilähteestä voi emittoitua tasomaista (pintalähde), sylinterimäistä (viivalähde), pallomaista (pistelähde) tai puolipallomaista ääntä (esimerkiksi savupiipun lähde). Yleisesti koko tuulivoimalaa käsitellään melumal-leissa pistelähteenä, mutta todellisuudessa konehuone on lähes pallomainen säteilijä (pistelähde), lavan siipipinnat pyöriviä sylinteriäänilähteitä ja tornirunko staattinen sylinteriäänilähde. Äänilähteen geometria vaikuttaa siihen, miten nopeasti ääni vaimentuu etäisyyden suhteessa: Pistemäisen äänilähteen äänenpaine vaimenee 6 dB ja pinta- ja sylinteriäänilähteen 3 dB etäisyyden kaksinkertaisuudessa. Lisäksi on huomioitava ilman, kasvillisuuden, esteiden, rakennusten ja maan aiheuttamat vaimennukset.

Äänen voimakkuutta voidaan havainnollistaa seuraavalla taulukolla, jossa on esitetty kunkin äänenpainetason muutosta vastaava desibelitaso tyypillisen äänilähteen luona mitattuna.

Äänenpaine, $\mu\text{Pa}$	Tyypillinen äänilähde	Äänenpainetaso, dB
1 000 000	Suihkumoottori	134
10 000 000	Rock-konsertti	114
1 000 000	Suuri teollisuusmoottori	94
100 000	Yleistä toimistomelua	74
10 000	Toimistohuone	54
1 000	Hiljainen luontoalue	34
100	Erittäin hiljainen huone	14
20	Kuulokynnys	0

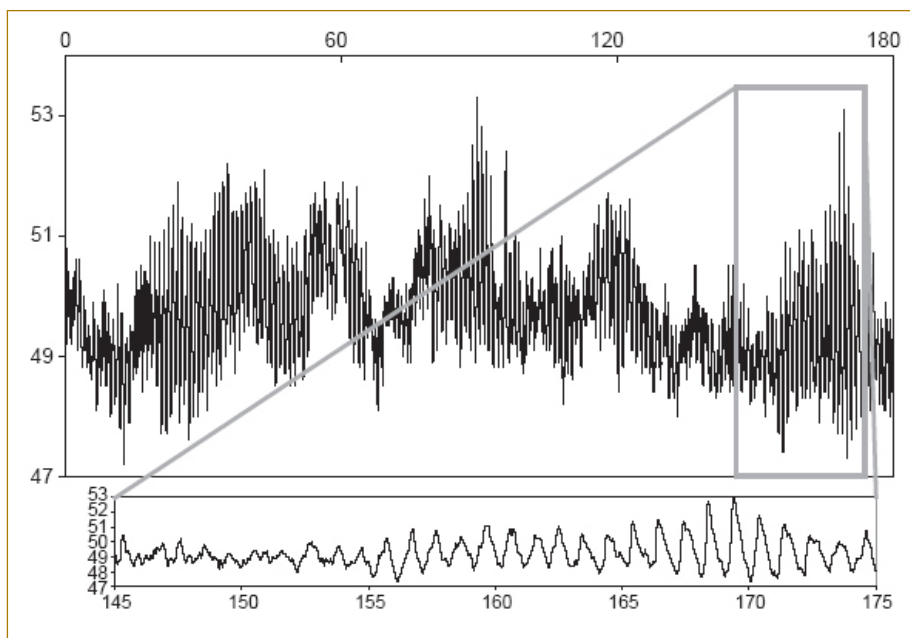
Kuuloaistin herkkyys vaihtelee eri taajuisille äänille, jolloin vaihtelevat myös melun haitallisuus, häiritsevyyys sekä kiusallisuus. Nämä tekijät on otettu huomioon äänen taajuuskomponentteja painottamalla. Yleisin käytetty taajuuspainotus on A-painotus, joka perustuu kuuloaistin taajuusvasteen mallintamiseen ja ilmaistaan usein A-kirjaimella dimension perässä, esimerkiksi dB(A).

## 2 Tuulivoimalaitosten melun syntykohteet

Tuulivoimalaitosten käyntiääni koostuu pääosin laajakaistaisesta (noin 60–4000 Hz) lapojen aerodynaamisesta melusta sekä hieman kapeakaistaisemista sähköntuotantokoneiston yksittäisten osien meluista (mm. vaihteisto, generaattori sekä jäähdytysjärjestelmät). Näistä aerodynaaminen melu on hallitsevin lapojen suuren vaikutuspinta-alan ja jaksollisen ns. amplitudimoduloituneen (äänen voimakkuus vaihtelee jaksollisesti ajan funktiona) äänen vuoksi (kuva 1).

Tuulivoimalaitoksen jaksollinen käyntiääni on seurausta siiven pyörimisestä, jossa doppler -ilmiön vaikutuksesta aerodynaamisen melun taso

vaihtelee lavan pyörimisnopeuden mukaan (siiven äänipisteen etäisyys havaitsijaan muuttuu ajan funktiona). Lavan ohittaessa maston siiven aerodynaaminen melu aiheuttaa sekä äänen heijastumisen että uuden äänen lavan ja tornin väliin jäävän ilmakerroksen puristuessa. Maston ja lavan välinen ohitusmelu on sitä voimakkaampaa mitä lähempänä lapa on mastoa. Jaksollisuus voi olla jopa 6 dB:n luokkaa, ja useassa tutkimuksessa jaksollisuuden on paikoin havaittu olevan merkittävä melun häiritsevyystekijä pisteissä joissa mitattu melutaso on alhainen.

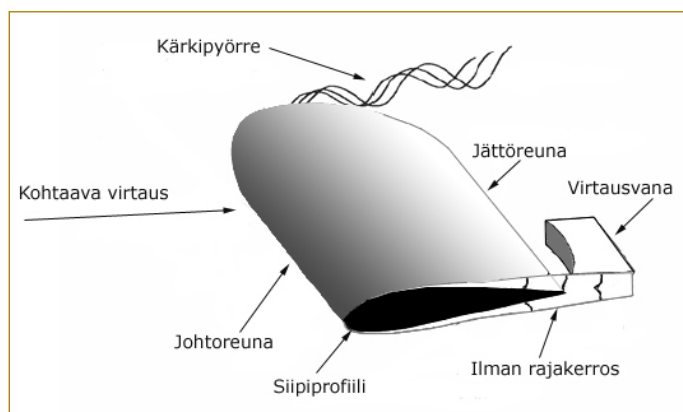


Kuva 1. Tuulivoimalaitoksen jaksollinen käyntiääni mittausten perusteella //

## 2.1

### Aerodynaaminen melu

Tuulivoimalaitosten lavan pääasiallinen tarkoitus on siirtää tuulen virtausenergia rotaatioenergiaksi generaattorin akselille. Lavat alkavat pyöriä, kun niihin kohdistuva aerodynaaminen voima ylittää pyörimiskoneiston lepokitkavoiman (mikäli seisontajarru ei ole toiminnassa). Kun roottori saavuttaa generaattorin toiminnallisen miniminopeuden, laitos kytkeytyy verkkoon ja alkaa tuottaa sähköä. Roottorin pyöriessä ilmavirtaus osuu lavan profiilin kohtauspinnalle jatkaen matkaa lavan yli jättöreunalle, jossa virtaus lopulta irtoaa (ks. kuva 2). Kitkan vaikutuksesta ilmavirtaus on hitaampaa lähellä lavan pintaa ja syntyy rajakerros, jossa ilman nopeus kasvaa lavan pinnalta ylöspäin mentäessä. Profiilin muodosta riippuen muuttuu myös ilmanpaine lavan eri pinnoilla (yli- ja alipainepuoli), mikä synnyttää lapaan varsinaisen aerodynaamisen nosteen. Virtaukset kulkevat aluksi lähellä lavan pintaa laminaarisesti, mutta lapaprofiilin muuttuessa jättöreunaa kohti terävämmäksi kasvaa rajakerroksen paksuus ja virtaus muuttuu turbulenttiseksi. Eri painepuolten ilmavirtaukset kohtaavat lopulta lavan jättöreunalla jolloin syntyy pyörteinen virtausvana. Lavan yli tapahtuva ilman turbulentsisuus on siis sitä voimakkaampaa, mitä suurempi on lavan profiilin muutos (paksuus) pitkin profiilin pituutta. Lisäksi turbulenssia lisäävät jättöreunan geometria (tylppä vai terävä) sekä kohtaavan ilman oma turbulenssi ja nopeus. Koska turbulenssin määrä on suoraan suhteessa kohinamaisen melun määrään, on turbulenssin

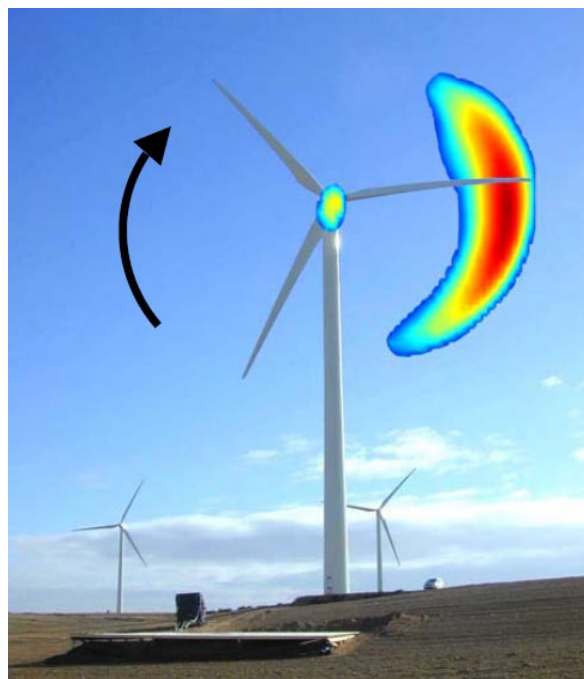


Kuva 2. Lapaprofiili ja siihen vaikuttavat virtausvastukset /2/

kokonaishallinnalla merkittävä rooli lapaprofiilisuunnittelussa.

Lavan kärkinopeus, joka nykyturbiineissa on luokkaa 60–80 m/s, sekä aerodynaamisen melun taajuus, kasvavat lavan pituuden ja pyörimisnopeuden mukaan. Tällöin kasvaa myös ilman turbulenssi lavan jättöreunalla ja siten myös aerodynaaminen melu. Aivan lavan kärjessä lavan pinta-ala kapenee moderneissa lapaprofiileissa voimakkaasti, jolloin suurimman meluntuoton onkin osoitettu olevan lähellä kärkeä kohdassa, jossa profiili on noin 75–95 % jätteen pituudesta (kuva 3). Lavan kärjessä ilmavirtaukset kohtaavat nyt kolmelta suunnalta (kohtauspinnalta vastaavalle jättöreunalle tasosuunnassa molemmilta puolilta sekä leikkaussuunnassa kärjen yli), minkä seurauksena virtaukset muodostavat ns. kärkipyörteen (engl. tip vortex).

Aerodynaaminen melu kuullaan usein viheltävänä tai viuhuvana äänenä ja on puhtailla lapa-pinnoilla tasoltaan matalampaa, koska likainen pinta lisää rosoisuutta josta seuraa turbulenssin kasvu. Sakkaussäätöisillä laitoksilla virtaus alkaa sakata lavan pinnalla tuulennopeuden kasvaessa



Kuva 3. Akustisella paikannuksella horisontaaliselle mittauspinnalle (noin 150 mikrofoniin muodostama mittauspintaverkko) voidaan paikantaa suurimmat melulähteet myös tuulivoimalaitoksissa. /3/

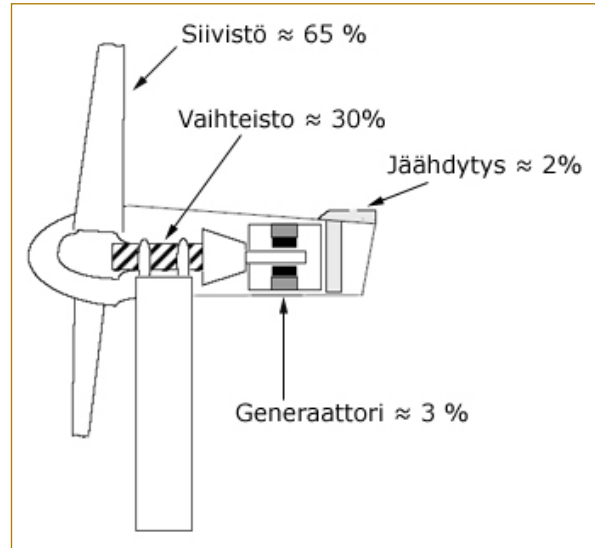
yli nimellistehorajan, jolloin tehontuotto ei enää kasva tuulen nopeuden kasvaessa. Sakkaustilanteessa rajakerros kasvaa suureksi ja kuullaan voimistunut aerodynaaminen kohinamelu. Lapakulmasäätöisissä laitoksissa tehonrajoitus tapahtuu lapakulmaa säätämällä, jolloin kaikissa tilanteissa pysytään sakkausrajan alapuolella ja vältetään sakkaustilanteissa syntyvä melun voimistuminen. Uusissa lapakulmasäätöisissä laitoksissa voidaan muuttaa lapakulman lisäksi myös pyörimisnopeutta, jolloin molemmilla toiminoilla on melua vähentävä vaikutus. Sakkaussäätöiset laitokset ovat yleensä kaksinopeuksisia ja toimivat alhaisilla tuulennopeuksilla (noin 7–8 m/s tuulennopeuteen asti) hitaammalla pyörimisnopeudella, mikä rajoittaa aerodynaamista melua.

## 2.2

### Laitekohtainen melu ja runkovärähtely

Tuulivoimalaitoksen ollessa toiminnassa konehuoneen laitteet aiheuttavat huoneen sisä- ja ulkopuolelle normaalia ilman kautta leviävää käyntiääntä sekä tukirungon välityksellä ilmaan vapautuvaa runkovärähtelyä. Näistä haitallisempaa on runkovärähtely, joka vaikuttaa koko tukirungon pituudelta maahan asti. Ilmaan vapautuva melu emittoituu pääasiassa jäähdytysjärjestelmien ilmanvaihtoaukon välityksellä sekä suoraan navan runkomateriaalin läpi.

Tuulivoimalaitoksen konehuoneen äänilähteistä merkittävin on vaihteisto, joka on aina koteloitu. Vaihteisto- ja hydraulikkaöljy kuumenevat turbiniin käydessä ja öljyn jäähdytys on usein järjestetty ilmajäähdytyksellä, jossa sekä otto- että lähtöilman virtauksesta syntyy normaalia virtausmelua, johon on sekoittunut ilmapuhaltimen moottorimelua. Kolmas merkittävä äänilähde on sähkögeneraattori, joka on aina myös koteloitu. Generaattori voi olla ilma- tai vesijäähdytteinen. Generaattorin muuntaja emittoi matalataajuisia ja kapeakaista melua (50 Hz verkossa siis 100 Hz ja sen kerrannaiset), mutta voimakkuudeltaan se on yleensä alhaisista. Muuttuvanopeuksisella tuulivoimalaitoksella on käytössä taajuusmuunnin eli invertteri, joka emittoi korkeataajuisista kapeakaistaista melu, mutta on häiritsevää lähinnä voimalan välittömässä läheisyydessä.



Kuva 4. Kuvassa on vaihteistolla varustettu tuulivoimalaitos sekä meluntuoton kannalta keskeiset laitteet ja niiden keskimääräinen osuus äänitehostasosta. /2/, /4/

## 3 Modernit tuulivoimalat

Tuulivoimalaitoksia on kehitetty laajamittaisen sähköntuotannon tarpeisiin jo noin 30 vuotta. Kehityksen ja teknisten ratkaisujen vakiintumisen tuloksena nykyisin lähes poikkeuksetta kaikki suuret sähköntuotantoon tarkoitetut tuulivoimalaitokset ovat kolmilapaisia ylätuulilaitoksia (roottori on konehuoneeseen nähden tornin yläpuolella), joissa tehonsäätö hoidetaan joko sakkaus- tai lapakulmasäädöllä.

### 3.1

#### Maalle rakennettavat tuulivoimalaitokset

Maalle rakennettavien ("onshore") -laitosten perustus- ja rakentamiskustannukset ovat huomattavasti pienemmät ja huollettavuus helpompaa ja edullisempaa kuin merituulivoimalaitosten, mistä johtuen niitä toistaiseksi rakennetaan selvästi enemmän kuin merituulivoimalaitoksia. Laitoksia on mm. Euroopassa sijoitettu rannikolle, avoimeen maalaismaastoon ja vuoristoon. Maalle rakennettavat laitokset ovat paikoin yhtä suuria kuin merituulivoimalaitokset ("offshore"), joiden napakorkeudet ja lapojen kärkivälit yltyvät jo noin 100 metriin asti. Käytännön syistä offshore -laitoksia testataan aina ensin kuivalla maalla ennen kuin niiden sarjatuotanto meriolosuhteisiin aloitetaan.

Suomessa tuulivoimapuistot on sijoitettu rannikolle tai tuntureille siten, että maalle rakentamisen edut huollettavuuden ja rakentamisen osalta säilyisivät ja tuuliolot olisivat samalla riittävän edulliset tuotannon kannalta. Rannikolle sijoitettujen tuulipuistojen ympäristössä veden yli tapahtuva melun leviäminen vastaa osin offshore -tilannetta (veden yli mantereelta saareen tai lahden yli vastarannalle) ja osin puhtaasti onshore tilannetta, jossa maan vaimennusvaikutus on suuresti riippuvainen alueen topografiasta sekä vuodenajasta (jääpinta/pehmeä maakerros). Tuntureille sijoitettaessa keskeisiä me-

lun etenemiseen vaikuttavia tekijöitä ovat maaston korkeuserot ja pinnanmuodot sekä säätilanteet (tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 5.4).

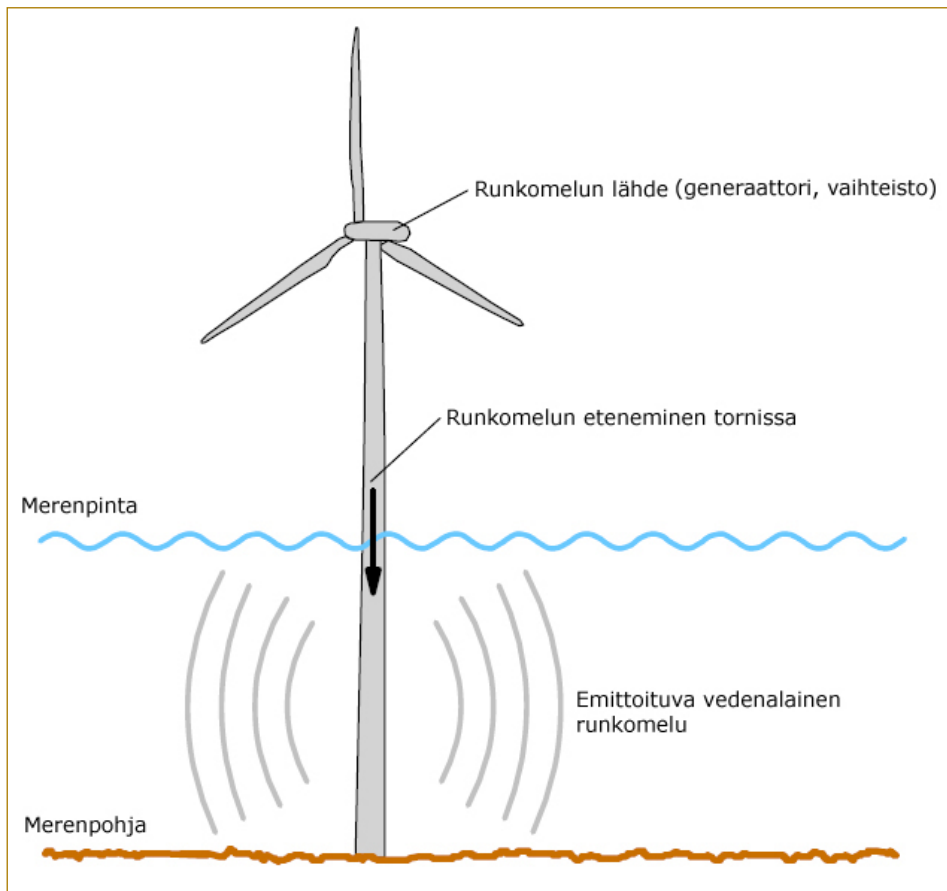
### 3.2

#### Merituulivoimalaitokset

Suuremmat tavoitteet energiantuotannossa ja kokonaistuotannon kannalta erittäin otolliset sääolosuhteet merellä ovat lisänneet maailmalla investointeja offshore-tuulivoimalaitoksiin, jotka ovat yleisesti mitoitukseltaan suurempia kuin maalla toimivat laitokset. Offshore -laitokset muodostavat käytännössä poikkeuksetta tuulipuistoja, jotka ovat usean (jopa kymmenen tai sadan) voimalan muodostamia kokonaisuuksia.

Offshore -tuulipuistot on sijoitettu 1–20 km:n etäisyydelle rannikolta, jolloin lähimmät tuulipuistot ovat jo melun kannalta vaikutusetäisyyden sisällä. Merelle sijoitetun tuulivoimalaitoksen käyntiäänien leviäminen tapahtuu veden yli. Veden pinta luokitellaan yleisesti akustisesti kovaksi pinnaksi. Tyynen veden pinnalta äänisäteet heijastuvat lähes vaimentumatta, mutta tuulisen sään aallokko aiheuttaa jonkin verran äänen sirontaa sekä merkittävää taustamelua riippuen aallokon koosta. Tämä vaikuttaa osaltaan voimalasta lähtevän äänen etenemisvaimentumiseen, joka veden yli on pienempää kuin vastaavan matkan pituudella maanpinnalla, jossa kasvillisuus tai pehmeä maa absorboi ääntä paikoin merkittävästi. Melun havainnointi kuitenkin vaikeutuu tuuli- ja aaltokohinan aiheuttaman melun peittovaikutuksen vuoksi. Veden yli tapahtuvan äänen etenemistä on tarkemmin käsitelty kappaleessa 4.5. ja taustamelun vaikutuksia kappaleessa 5.1.

Offshore -laitosten käynninaikaisen runkomelun tai rakennusvaiheen aikaisen melun vedenalaista värähtelyä ja sen vaikutusta erityisesti vesinisäkäisiin on tutkittu mm. Saksassa ja Pohjoismaissa,



Kuva 5. Tuulivoimalaitoksen käyntiäänien kanavoituminen veden alaisiin osiin tapahtuu runkoputken välityksellä. /5/

jossa on havaittu rakennusvaiheen aikaisen melun (mm. perustuksen junnitusoperoinnit) olevan huomattavan voimakasta ja kuuluvan erittäin kauas (mitattu jopa 190 dB re 1 $\mu$ Pa 400 m:n päässä junnitusoperoinnista, /33/). Ääni liikkuu nesteessä yli neljä kertaa nopeammin kuin ilmassa, ja myös vähemmän vaimentuen, jolloin junnituksen aiheuttama voimakas melu on kuuluvaa vielä kymmenien kilometrien etäisyydellä.

Tanskassa on tutkittu mm. merituulivoimalaitosten matalataajuuksista käyntiääntä, eikä sen ole todettu aiheuttavan haittaa esim. kirjohylkeille eikä pyöriäisille. Normaali toiminnan aikainen käyntiääni kanavoituu runkoputkea pitkin perustuksen vedenalaisiin osiin ja vapautuu runkoputken alaosan ja mahdollisen tukirungon välityksellä.

Vedenalainen käyntiääni- tai rakentamisen aikainen vedenalainen melu voi vaikuttaa vesinisäkkäiden keskinäiseen käyttäytymiseen mm. äänen avulla tapahtuvan kommunikoinnin häiriintymiseen käyntiäänien peittovaikutuksena. Voimakas vedenalainen ääniaalto voi johtaa myös fyysiseen kuulovaurioon voimakkaiden äänilähteiden läheisyydessä.

Offshore -tuulivoimaloiden vedenalaisia meluvaikutuksia arvioitaessa on luonnollisesti otettava huomioon myös alueen luonnollinen taustamelutaso (aaltojen kohina aiheuttaa veden pinnan alapuolella huomattavan korkeita melutasoja etenkin suurilla tuulenopeuksilla) ja mahdolliset muut äänilähteet. Esimerkiksi 600 m:n etäisyydellä laivaväylältä on rahtilaivan aiheuttamaksi vedenalaiseksi melutasoksi mitattu 115–141 dB (re 1  $\mu$ Pa).



## 4 Melun vaimennusmahdollisuudet

Tuulivoimalaitosten käyntiäänien vaimennus on ollut keskeinen puheenaihe viimeaikaisessa tuulivoimateknologiakeskustelussa. Tähän ovat osaltaan vaikuttaneet laitoskoon kasvaminen sekä laitojen rakentaminen yhä lähemmäksi loma- ja asuinalueita.

Generaattorikoneiston ja vaihteiston vaimennus perustuu pitkälti laitteiden kotelointiin sekä käyntivärähtelyn vaimentamiseen erottamalla laitteen kiinnityspinta mastorungosta. Vaihteiston vaimennuksessa voidaan lisäksi suunnitteluvaiheessa optimoida hammasväliet vaihteistotaajuuden muuttamiseksi. Jäähdytysilman vaimennus voidaan hoitaa perinteisillä ilmakehävaimentimilla tai valitsemalla jäähdytysmoottori, jossa ilman virtausnopeutta on pienennetty.

Aerodynaamisen melun vaimennus on osoittautunut hankalammaksi toteuttaa, sillä melua pienentävät tekijät vaikuttavat myös suoraan heikentävästi lavan hyötysuhteeseen. Yksikerkaisia suunnittelutoimenpiteitä ovat olleet lavan kärkinopeuden asettaminen tiettyyn maksiminopeuteen, joka voimalan suunnittelussa on muilta osin huomioitu. Pienikin nopeuden lisääntyminen nostaa melua merkittävästi, sillä on osoitettu, että ilman turbulenssin vaikutus lavan yli nostaa melua

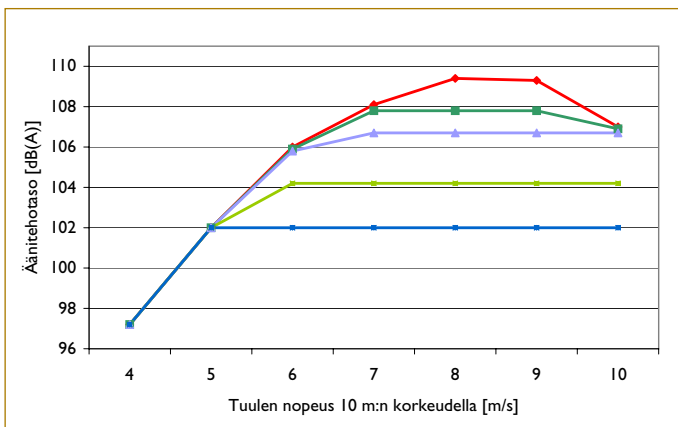
Machin luvun (virtausnopeuden suhde vallitsevaan ääninopeuteen) viidennessä potenssissa.

Lapakulmaa voidaan muuttaa lapakulmasääteisissä laitoksissa, jolloin tuulivirtauksen kohtauskulmaa loiventamalla lasketaan kuitenkin aerodynaamisen melun ohella myös tuotantotehoa. Kuvassa 6 on esimerkki suuren kokoluokan tuulivoimalaitoksesta, pystyakselilla on äänitehotason muutos eri lapakulmilla suhteessa vastaavan tuulen nopeuden muutokseen, kun nopeus on mitattu 10 m:n korkeudella.

Lapakulmaa muuttamalla saadaan siis väliaikaisesti melua vaimennettua 1–10 dB esimerkiksi silloin, kun olosuhteet ovat suotuisat melun kuuluvuuden kannalta.

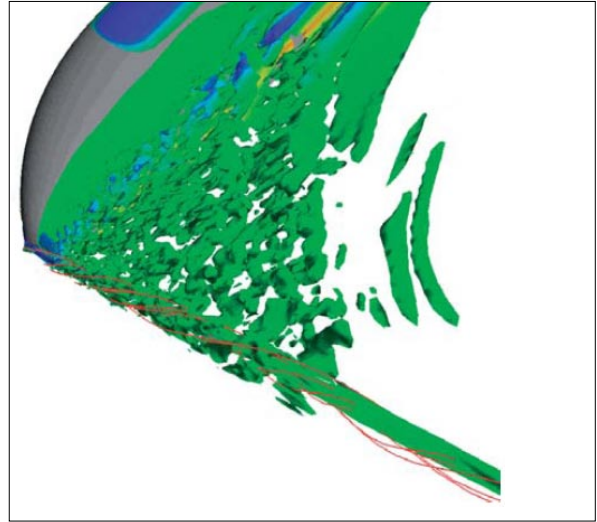
Lapaprofiilin suunnittelussa on jättöreunan ja lavan kärjen geometriaa pyritty parantamaan mm. uusilla tietokoneavusteisilla laskentamalleilla, joista on ollut lapasuunnittelussa suurta hyötyä (kuva 7). Myös EU-tasolla asiaan on kiinnitetty huomiota; uusi teollisuuden ja tutkimuslaitosten yhteinen teknologiaohjelma SIROCCO (Silent Rotors by Acoustic Optimisation) käynnistettiin vuonna 2003 juuri lavan jättöreunan geometrian optimoimiseksi suurissa voimalaitoksissa tuotantotehoa menettämättä. Ohjelma jatkuu edelleen ja merkittäviä tuloksia odotetaan syntyvän tämän tai ensi vuoden aikana. /3/

Kärkipyörteen vaikutusta on lentokoneiteollisuudessa vähennetty jo pitkään nk. ”winglet” -siivekkeellä siiven kärjessä, jolloin pääsiiven pintaa nähden kohtisuoralla siivekkeellä ohjataan kärkipyörrevirtaus normaalivirtauksen suuntaiseksi. Tuuliturbiineissa vastaava siiveke on pyritty korvaamaan kärkigeometriaa muuttamalla. Ensimmäiset suuren voimalakoon lavat, joissa lavan kärkeä on jatkettu siivekkeellä, ovat olleet markkinoilla jo muutamia vuosia. /7/



Kuva 6. Esimerkki suurikokoisen lapakulmasääteisen tuulivoimalaitoksen äänitehotasoista eri lapakulma-asennoilla.





Kuva 7. Tietokoneavusteisella virtauslaskennalla (CFD +LES) voidaan tutkia eri lapaprofilien vaikutuksia ilmassan turbulenssiin ja siten melun määrään siiven yli. /6/



Kuva 8. Siiveke tuuliturbiinin lavan kärjessä. Profili on muotoiltu osana komposiittilapaa. /7/

## 5 Melun leviäminen ympäristöön

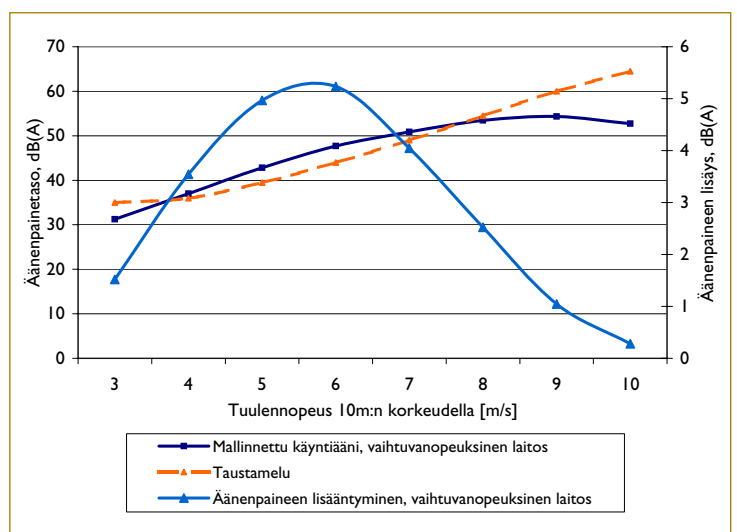
Tuulivoimalan käyntiäänien leviäminen ympäristöön on suuresti sidoksissa alailmakehän senhetkiseen tilaan tuulisuuden, lämpötilan ja sen pysytjakauden sekä ilmakerroksen termisen stabiiliisuuden suhteen. Nämä paikoin monimutkaiset ja tosistaan riippuvat ilmiöt vaikeuttavat oleellisesti melun leviämisen hetkellistä ennustettavuutta sekä ovat olleet usein edesauttamassa häiriötilanteiden syntyä, jolloin asukas on kokenut tuulivoimalan melun epätavallisen voimakkaana ja häiritsevänä. Tästä syystä ympäristötekijöiden huomioonottaminen riittävän aikaisessa vaiheessa tuulivoimaloiden tarkkoja sijoituspaikkoja määrittäessä on tärkeää, jotta kyetään parempaan ennustettavuuteen mahdollisten häiriötilanteiden ennakoimiseksi.

### 5.1

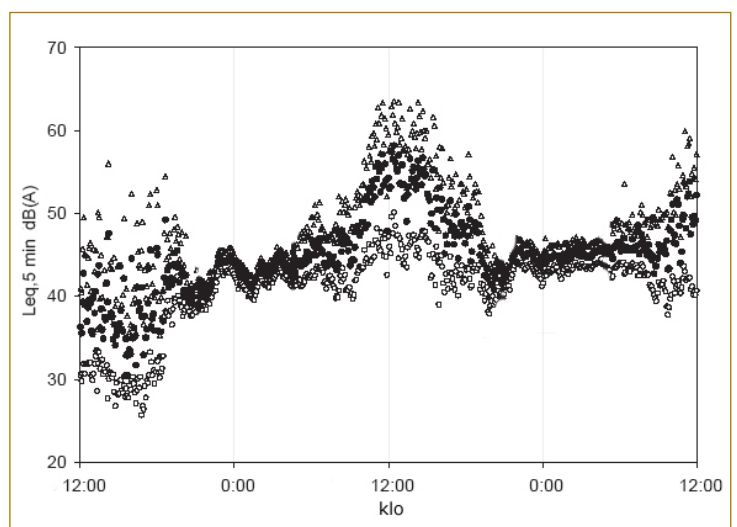
#### Taustamelu

Taustamelulla tarkoitetaan tarkastelupisteessä havaittua, olemassa olevaa luonnollista tai teollista ääntä, joka ei liity tarkasteltavan kohteen tuottamaan meluun. Luonnolliseksi taustameluksi luetaan kasvillisuuden, tuulen ja aallokon aiheuttama ”kohina”, joka on sidoksissa vallitsevaan maastoon, säätilaan sekä vuoden- tai vuorokauden aikaan.

Tuulivoimalaitosten melun kuuluvuuden kannalta merkittävät luonnollista taustamelua lisäävät tekijät ovat ajallisesti vaihteleva tuulikohina (tuulisuus ja puiden humina) sekä rannikko- ja saaristoalueiden aaltokohina. Aaltokohinan vaikutus riippuu taas tuulisuudesta sekä tarkastelupisteen sijainnista suhteessa taustamelulähteeseen. Suomessa tuulen vuotuinen keskinopeus on sisämaassa 3–5 m/s ja rannikolla 5–7 m/s. Tällöin erään tutkimuksen mukaiset meluarvot puhtaasti tuulen taustakohinalle ovat  $L_{A,95\%}$ -tason mukaan noin 34–39 dB(A) ja noin 39–42 dB(A). Tuulikohinan ja puiden kahinan vastaavat arvot ovat 39–48 dB(A) ja 48–56 dB(A)./28/ Luonnollinen taustamelu on yleensä laajakaistaista ja tasovaihtelun suuruus ajan suhteen paikoin huomattavaa.



Kuva 9. Kuvassa on suuren muuttuvanopeuksisen 3 MW:n laitoksen teoreettisia melukäyriä 500 m:n etäisyydellä suhteessa oletettuun taustamelukäyrään (punainen käyrä, tuulikohina ja puiden kahina). Melun kokonaismäärän lisääntyminen on aina epälineaarinen (siniset käyrät, y-akseli oikealla).



Kuva 10. Taustamelun vuorokautista vaihtelua mittausten mukaan urbaanissa Eurooppalaisessa ympäristössä. //

Teollinen taustamelu syntyy ihmisen aiheuttamista toiminnoista, joista merkittävimmät ovat tie-, rautatie ja lentoliikennemelu sekä teollisuuslaitosten impulsiivinen ja/tai staattinen melu. Liikenteen melu on yleisesti suurempaa päiväaikaa, kun taas teollisen kohteen aiheuttama melu saattaa olla ympärivuorokautista. Teollisessa taustamelussa saattaa esiintyä lisäksi kapeakaistaisia komponentteja, joita voidaan havaita mm. tarkoissa äänimitauksissa.

Valtateiltä, joissa nopeudet ja rekkaliikenteen suhteelliset osuudet ovat suurimmat, voi tieliikenteen melu olla kuuluvaa useiden kilometrien etäisyydellä tiestä, etenkin paikassa jossa ei ole muuta melua aiheuttavaa teollista toimintaa. Teollisuusmelulähteiden aiheuttama melu vaimenee yleensä nopeasti ja on yleensä kilometrin etäisyydellä lähteestä jo alle 45 dB(A):n rajan. Vesistöjen äärellä myös teollisuuslaitoksen melu saattaa kuitenkin olla kuuluvaa pidemmällä etäisyyksillä säätilasta ja vuorokauden ajasta riippuen.

Taustamelulla on merkittävä melun peittovaikutus. Se milloin kohteen melu on kuuluvaa, määrää pitkälti myös häiriövaikutuksen suuruuden. Yleisesti kohteen melu voidaan kuulla taustamelun läpi, kun tarkastelupisteessä kohteen aiheuttama melu on jonkin verran taustamelua alhaisempaa (enimmillään 5–10 dB vaikutuskaistalla), mikä puolestaan riippuu paljolti kohteen melun ajallisesta vaihtelusta, kestosta ja melun luonteesta. Se kuinka hyvin havaitsija voi tietoisesti havaita äänilähteen melun peittoäänien alta, on kuitenkin sidoksissa havaitsijan omaan havainnointikykyyn sekä peittoäänien määrään ja laatuun. LA -tyypiset äänitasot ja niiden enimmäistasot ovat sen sijaan huonoja taustamelun peittovaikutuksen mitareita. /28/

## 5.2

### Melun etenemisvaimentuminen

Melun vaimeneminen koostuu geometrisesta etäisyysvaimentumisesta (joka siis nimensä mukaisesti on riippuvainen äänilähteen ja tarkastelupisteen etäisyydestä ja äänilähteen geometriasta), ääniaallon heijastumista eri objekteista tai maanpinnasta, sekä ilman omasta kyvystä absorboida ääntä. Yleinen yhtälö pistemäisen ja pallomaisesti leviävän äänilähteen etenemisvaimentumiselle ilman heijastusilmiöitä on muotoa:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log(2 \cdot \pi \cdot r^2) - \Delta L_a, \quad (1)$$

missä  $L_p$  on äänenpaineen tulos äänilähteen äänitehotasosta  $L_w$  etäisyydellä  $r$ .  $\Delta L_a$  on ilmavaimentumisen termi etäisyyden funktiona [dB/m]. Yksinkertaisessa laskennassa tähän voidaan olettaa  $\Delta L_a = 0,005 \cdot r$  [m]. Tästä yhtälöstä siis nähdään, että mitä kauemmaksi mennään äänilähteestä, sitä suurempi on myös ilman vaimennus väliin jäävän ilmassan vuoksi. Samalla matkalla ilma vaimentaa korkeita taajuuksia enemmän kuin matalia, eli äänen taajuus muuttuu etäisyyden mukaan. Laboratoriokokeissa on pystytty ilman äänivaimennus todentamaan tarkasti lämpötilan, ilmanpaineen ja suhteellisen kosteuden funktiona kullekin terssi-kaistataajuudelle, jolloin tiydessä ja homogeenisessä säätilassa (teoreettinen vapaakenttä) voidaan yksinkertaisen äänilähteen vaimennus laskea melko tarkasti mille tahansa etäisyydelle.

## 5.3

### Maanpinnan heijastusvaikutukset

Maanpinta vaikuttaa äänen etenemiseen joko vahvistavasti tai vaimentavasti. Vaikutuksen laatu on paljolti riippuvainen maanpinnan muodosta, säätilasta sekä maanpinnan absorptiokyvystä äänilähteen ja tarkastelupisteen välillä. Veden pinta ja kallioinen, jäinen tai muutoin kova maakerros aiheuttaa äänilähteen heijastumista. Heijastunut ääni on voimakkuudeltaan sitä lähempänä alkuperäistä ääntä mitä kovempaa maakerros on. Tietyissä säätilanteissa äänialto taipuu edetessään alaspäin, jolloin osa maanpinnasta heijastuneesta äänestä palaa takaisin maanpinnalle heijastuakseen taas uudelleen. Äänen tunneloituminen alailmakeroksen lämpötilainversiotilanteissa on varsin tuttu esim. suomalaisille kesämökkiasukkaille: näissä tilanteissa voidaan tiyellä säällä vastarannalta jopa usean kilometrin etäisyydeltä erottaa selkeästi mm. puhetta.

Maanpinnan heijastus (ja samalla geometrinen vaimentuminen) on Tanskalaisessa tuulivoimamelumallissa otettu huomioon termillä  $-8$  dB kovalle maanpinnalle, jolloin etenemisvaimentumisen yhtälö on nyt muotoa:

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - (10 \cdot \log 4 \cdot \pi + 3) - \Delta L_a, \quad (2)$$

missä yhtälön kolmas termi antaa siis tulokseksi 8 dB ja r on suora etäisyys tornin navasta tarkastelupisteeseen. /8/ Termi +3 [dB] kuvaa tässä maanpinnan heijastumista, mutta äänenpaineen kokonaistulos on kuitenkin jokseenkin sama kuin yhtälön (1) mukaan. Yhtälöä (2) on nyt kuitenkin helppo muuttaa pehmeämmälle maanpinnalle ja suurille maanpinnan etäisyyksille (immissiopiste yli 1000m:n etäisyydellä maanpinnalla) on heijastuskorjauksen arvoksi asetettu +1 [dB]. Tällöin yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 10 - \Delta L_a, \quad (3)$$

Yllä esitetyt yhtälöt ovat kuitenkin huomattavan yksinkertaisia, sillä heijastumisen voimakkuuteen vaikuttaa merkittävästi myös maanpinnan muoto äänilähteen ja tarkastelupisteen välillä, jossa äänelle tapahtuu taipumis-, heijastumis- että sironnailmiöitä. Monimutkaisempia maastoja ja niiden vaikutuksia voidaan kohtuullisella tarkkuudella mallintaa myös tietokoneavusteisesti (kappale 4.6).

#### 5.4

### Säätilan vaikutus melun leviämiseen

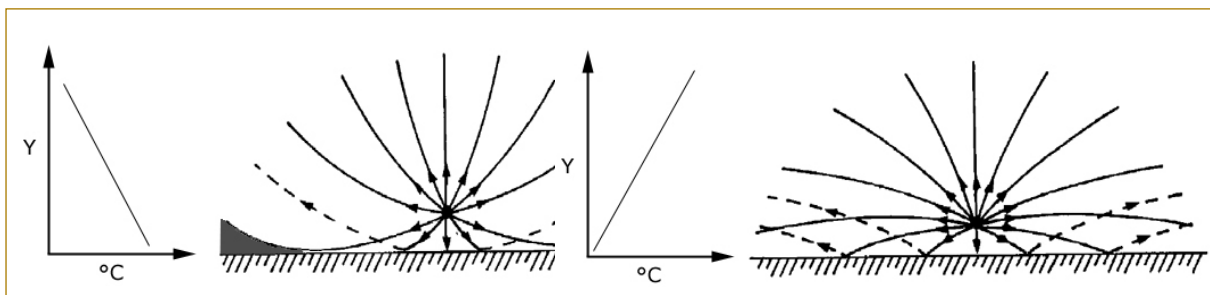
Maapallon ilmakehä on jatkuvassa dynamisessa liikkeessä ja ilmakerroksen pystyjakauma lähes poikkeuksetta epähomogeeninen, jolloin melun etenemisvaimentumisen laskennallinen tulos on harvoin täysin sama kuin vastaava äänenpaineen mittaustulos kaukana äänilähteestä. Tämä on seu-

rausta sekä ilman lämpötilan, tiheyden, paineen että tuulenopeuden muutoksista sekä vaaka- että pystysuunnassa. Tuulivoimalaitoksen käyntiäänien etenemisen kannalta merkittävin muutos on juuri lämpötilan ja tuulenopeuden pystyprofiilin muutokset eri säätilojen ja vuorokaudenaikojen mukaan.

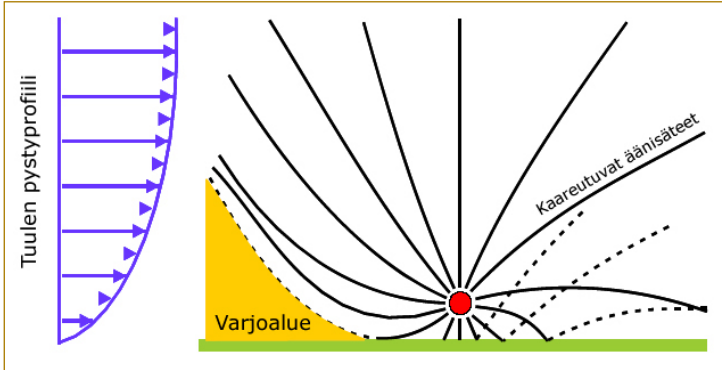
Alla on kuvattu lämpötilan vaikutus äänen etenemiseen, jonka kaareutuminen aiheutuu maanpinnan ja ylemmän ilmakerroksen lämpötilaeroista. Neutraali-ilmakehässä lämpötila laskee ylöspäin mentäessä. Koska äänen nopeus on sidoksissa vallitsevaan lämpötilaan, ohjaa alempi lämpötila ääniaaltoja tällöin ylöspäin. Vastaavasti jos lämpötila nousee ylöspäin mentäessä maanpinnan viileissä yläkerroksia nopeammin (inversiotilanne), alkaa ääni kaareutua alaspäin. Kaareutuminen on kuitenkin sekä äänen taajuudesta että mittauspisteen etäisyydestä riippuvainen. Kaareutumisen seurauksena alemmat taajuudet vahvistavat ääntä enemmän ja vahvistus on sitä voimakkaampaa mitä suurempi on etäisyys äänilähteestä. Kokonaisvaikutus kaukana äänilähteestä jää kuitenkin pienemmäksi geometrisen- ja ilmavaimennuksen vastaavasti lisääntyessä. /9/

Tuuli vaikuttaa vastaavalla tavalla ja myötätuuleen ääni kaareutuu alaspäin, koska tuulen nopeus on maanpintarajakerroksen yläosissa suurempi kuin alhaalla. Ylätuuleen muodostuu taas varjoalue, jolla on melua vähentävä vaikutus kauempana äänilähteestä.

Alatuulen positiivista vaikutusta on tuulivoimalaitosten melun leviämislaskentoihin käytetty arvoa + 1–1,5 dB/(m/s) referenssipisteestä. Koska tuulisuus kasvattaa myös taustamelun määrää, jää kokonaisvaikutus kuitenkin pienemmäksi kovemilla tuulenopeuksilla.



Kuva 11. Ilman pystysuuntaisen lämpötilamuutoksen vaikutus äänen kaareutumiseen. /10/



Kuva 12. Tuulen pystyprofiilin vaikutus äänen kaareutumiseen. /11/

Tuulen pystyprofiilin määrittäminen eri sää- ja vuorokauden tilanteissa on noussut merkittäväksi tutkimuskohteeksi tuulivoimalaitosten napakorkeuden kasvun myötä. Tuulen pystyprofiilia on nykyisin arvioitu paikallismittauksin sekä logaritmisin arvioyhtälön mukaan turbulentsissa rajakerroksessa neutraali-ilmakehässä, ja profiilin vaikutus melulaskentaan on huomioitu äänitehotason korjausyhtälöllä:

$$L_{Wref} = L_W + k \cdot \Delta v_h, \quad (4)$$

Yhtälössä (4) on

$L_{Wref}$  = Korjattu äänitehotaso annetulla korkeudella ja  $k = 1,0 - 1,5$  dB/(m/s). Lisäksi

$$\Delta v_h = v \cdot \left( \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{v_{ref}}{z_{0,ref}}\right)} - 1 \right), \quad (5)$$

missä

$\Delta v_h$  = logaritmisin tuulennopeusprofiilin mukainen tuulisusero referenssituulennopeuteen nähden

$v$  = tuulen nopeus napakorkeudella

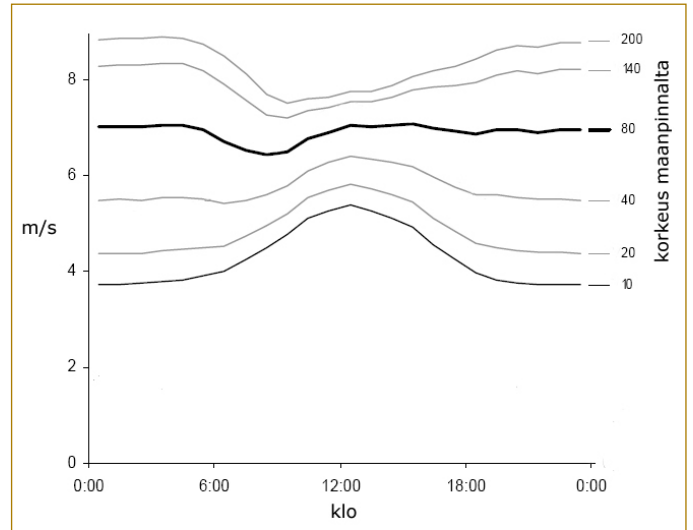
$H$  = tuuliturbiinin napakorkeus

$z_0$  = maanpinnan karheusermi

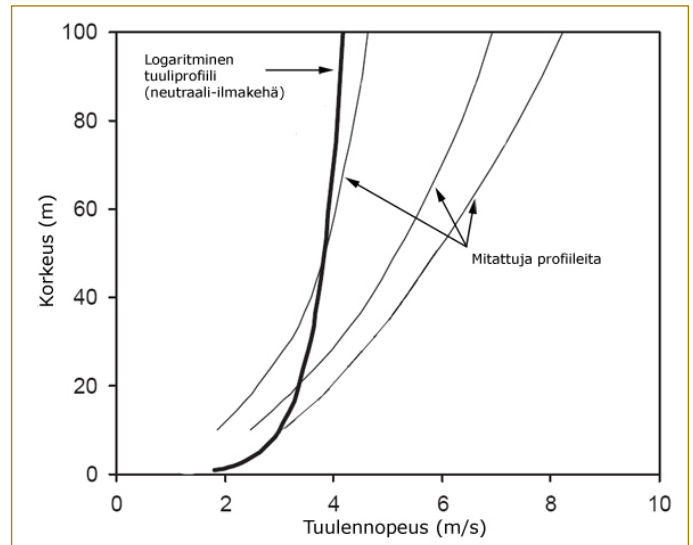
$v_{ref}$  = referenssituulennopeus äänitehotasomittauksessa (normaalisti 8 m/s)

$z_{0,ref}$  = referenssi maanpinnan karheusermi (normaalisti 0,05)

Eurooppalaisissa tuulisuuden mastomittauksissa 200 m:n korkeuteen asti on kuitenkin havaittu, että jo vuorokauden sisällä tuulen pystyprofiili vaihtelee siten että yöllä maanpinnan ja napakorkeuden välinen tuulisusero on suurimmillaan. Vuorokautinen muutos perustuu pitkälti auringon vaikutukseen (ilmavirtausten sekoittuminen ja turbulenssi). Napakorkeudella tapahtuvien tuulisuusmuutosten onkin tutkimuksissa osoitettu olevan yksi merkittävä syy suurempaan yöajan tarkastelupisteen äänenpainetasoon kuin mitä ennustemallit ovat yleisesti laskeneet.



Kuva 13. Erään melumittauksen aikainen tuulisuustaso eri korkeuksilla vuorokauden ajan mukaan. /12/



Kuva 14. Mitattuja tuulen pystyprofiilimuutoksia suhteessa logaritmisin yhtälön antamaan profiiliin. /13/



5.5

## Melun eteneminen veden yli

Melun leviämisen erikoistapauksena voidaan pitää äänen etenemistä veden yli tilanteessa, jossa vallitsee alailmakehän lämpötilainversio. Alla on kuvattu alas taipuneen ja tyynen ja pinnaltaan kovan vesimassan pinnalta heijastuneen äänisäteiden eteneminen äänisäteinä (osittain vääristetty, sillä tuulivoimalan toimiessa on aina myös aallokkoa). Kuvitteelliset äänisäteet lähtevät eri suuntiin, mutta taipuvat alas säteiden suunnan, lähtöpisteen korkeuden ja äänentaajuuden määräämän kaarevuussäteen pituudella. Kohdissa, joissa säteet kohtaavat, havaitaan äänenpaineen kasvu ja vastaavasti kohdissa, joissa ääniaallot kohtaavat vastakkaisvaiheisina, havaitaan äänenpaineen pienentyminen.

Veden yli tapahtuvan äänen etenemistä on tutkittu sekä Suomessa /9/ että Ruotsissa /14/, /15/ jossa on tutkittu mm. offshore-laitosten melun leviämistä Itämerellä käyttäen apuna kattavia meteorologisia ja akustisia laskentamalleja. Tutkimusten aineistoa on pyritty hyödyntämään myös voimalaitosprojektitasolla yleisen laskentayhtälön turvin.

Yksinkertaistettu laskentayhtälö veden yli tapahtuvalle melun leviämiselle on muotoa

$$L_{pA} = L_{W,ref} - 20 \cdot \log(r) - 8 - \Delta L_a + 10 \cdot \log\left(\frac{r}{200}\right), \quad (6)$$

kun tarkastelupiste sijaitsee yli 200 m:n päässä veden äärellä. /10/ Viimeinen termi antaa siis seuraavat tulokset etäisyyden funktiona:

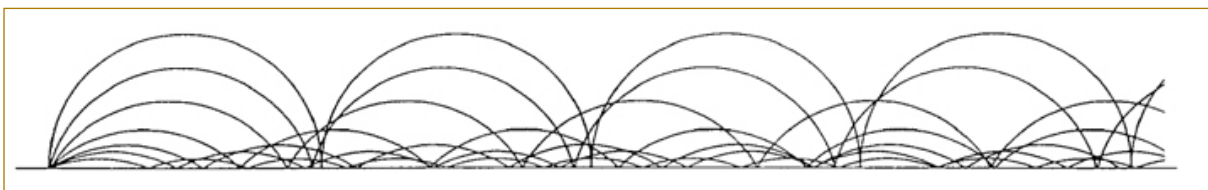
Matka [m]	Tulos [+ dB]
200	0
400	3
600	4,8
800	6
1000	7
2000	10

Yhtälö on johdettu tutkimustuloksista, jonka mukaan äänen geometrinen etenemisvaimennus muuttuisi pistemäisestä pintalähteen vastaavaan, jolloin käytännössä etäisyyden kaksinkertaistuessa äänen geometrinen vaimentuminen olisi vain 3 dB tornin navasta lasketun etäisyyden ollessa yli 200 m. /14/ Yhtälön tuloksia on kuitenkin arvosteltu mm. Tanskalaisissa julkaisuissa siitä, että se antaa todellisuuteen verrattuna liian suuria tuloksia laskennalliselle äänenpaineelle. /16/ Koska äänen kaareutuminen on voimakkaasti sidoksissa ilmakehän inversiotilanteeseen ja heijastuminen taas aallokon voimakkuuteen, voidaan hyvällä syyllä olettaa, että yhtälöä on syytä käyttää vain erikoistilanteiden mallintamiseen riskianalyysin avulla siten, että muukin tarkastelualueen tuulisuus- ja säädata on kattavasti huomioitu.

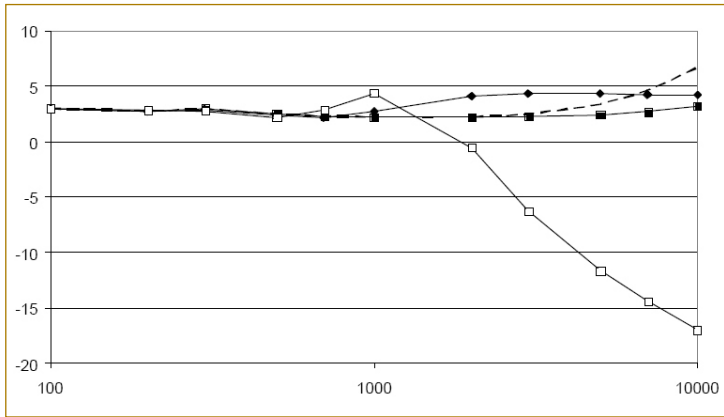
5.6

## Tuulivoimalaitoksen melun mallintaminen tietokoneavusteisesti

Moderneilla melumallinnusohjelmilla on mahdollista laskea tuulivoimalaitoksen melun leviäminen kohtalaisen tarkasti ja ohjelmistot ovat hyödyllisiä etenkin monimutkaisten maastogeometrioiden (tunturialueet, mäkit ja maastot sekä paljon rakennuksia sisältävät alueet) mallinnuksessa, jolloin GIS-karttatieto (GIS = Geographic Information System) voidaan implementoida malliin vaivattomasti. Mallinnusohjelmat ovat kuitenkin usein fyysikaalisten parametrien suhteen yksinkertaistettuja ja perustuvat pääasiassa standardisoituihin (mm. ISO-mallit, /17/, /18/) laskentarutiineihin, jotka eivät täysin huomioi säätilan aiheuttamia muutoksia melun etenemisessä. Erityisesti säätilan ja maaefektin aiheuttamia termejä on pyritty optimoimaan uudessa yhteispohjoismaisessa Nord2000 laskentarutiinissa, jota on käytetty mm. Tanskassa offshore -laitosten veden yli tapahtuvan melun arvioimisessa hyvin tuloksin (kuva 16).



Kuva 15. Äänisäteiden kaareutuminen ja heijastuminen kovalta pinnalta. /10/



Kuva 16. Maaheijastuksen mallinnus veden pinnalta NORD2000 mukaan 100 m:n napakorkeudella toimivalle suurelle offshore-tuuliturbiinille. Kuvassa mustat pisteet viivat vastaavat ala- ja sivutuulen suuntaista maavaimen- tumista eri etäisyyksillä tornin juurelta. Valkoisen pisteen viiva on ylätuulen vastaava käyrä. Y-akselilla vaimennus/ vahvistus desibeleinä. /16/

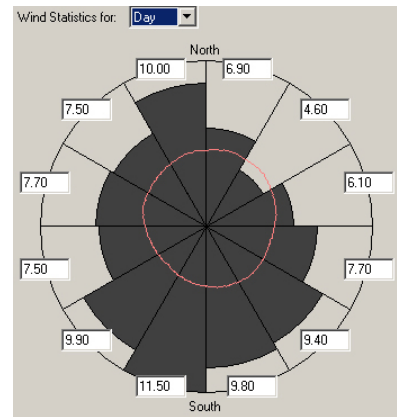
Yksinkertaisten maastojen kohdalla (rannikkoalueet, offshore-laitokset, tasaiset maa-alueet) voidaan kuitenkin käyttää yllä mainittuja laskentayhtälöitä varsin suurella luotettavuudella. Laskennan tulosta saadaan tarkennettua iteratiivisesti, kun otetaan huomioon vuotuiset sääkorjaukset erityisesti alueen tuulitilastoista.

### 5.7

## Tuulistatistiikka ja melun sääkorjaukset

Melulaskentaa tarkennettaessa voidaan käyttää apuna alueen tuulisuustilastoja esim. tuuliruususta tai tuuliatlaksesta. Tuulisuustilaston pohjalta saadut keskimääräiset vuotuiset tuulennopeudet ja -suunnat voidaan koota riskitarkasteluksi esiintymistodennäköisyytenä meluherkkiin kohteisiin (jos sellaisia ilmenee).

Tuuliatlaksen tiedot ovat kuitenkin vain noin 50 m:n korkeudelle asti päteviä, joten suurten ja napakorkeudeltaan yli 70 m:n laitosten todellisissa tuulisuusarvoissa saattaa ilmetä merkittäviä poikkeamia. Hankekohtaisesti on saatavilla tuulisuusarvoja lyhyeltä ajanjaksolta myös napakorkeudelle asti, jolloin voidaan tehdä vertailua pitkän ajan tilastoihin nähden.

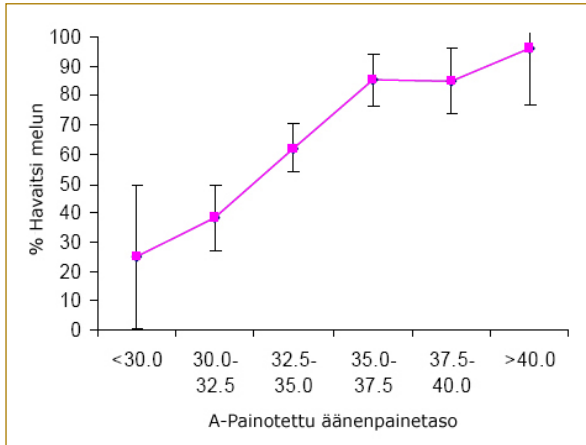


Kuva 17. Erään melumallinnusohjelmiston ISO 9613 -mukainen sääkorjaus tarkennettuna tuuliruusun avulla. Punainen viiva kertoo vuotuisen sääkorjauksen melulaskentaan pistelähteen keskipisteestä.

### 5.8

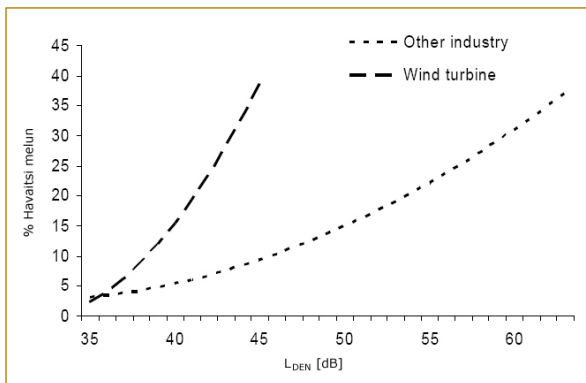
## Tuulivoimalaitosten melun häiritsevyyt

Melun häiritsevyyt eli epämiellyttävän äänitapahtuman kokeminen on paljon riippuvainen havaitsijan omasta melun havainnointikyvystä, melun tasosta ja ominaisuuksista sekä myös havaitsijan asenteesta tarkasteltavaa melulähdettä kohtaan (yleinen asennoituminen sekä huoli ympäristöstä). Melun häiritsevyyttä ja haittavaikutuksia on tutkittu kattavasti mm. teollisuusmelun ja tieliikennemelun puolella, mutta vain muutamia kattavia tutkimuksia on tehty tuulivoimalaitoksen melun haittavaikutuksista erityisesti hiljaisilla alueilla. Näistä tuorein on tehty Ruotsissa, jossa kaksiosaisella aihealueeltaan peitetyllä kyselytutkimuksella on kartoitettu tuulivoimalaitosten lähellä asuvien ihmisten tuntemuksia tuulivoimalaitoksen melun vaikutuksista. Ruotsissa tehdyn tutkimuksen tulokset viittaavat selkeästi siihen, että melun häiritsevyyt hiljaisilla alueilla lisääntyy voimakkaasti melun äänenpaineen ylittäessä 35 dB(A):ä. Häiritsevyyttä lisäävät lisäksi melun ulkopuoliset tekijät, esimerkkinä maisemavaikutus sekä havaitsijan yleisasenne tuulivoimalaitoksia kohtaan. /19/



Kuva 18. Äänenpainetaso vaikutus tuulivoimalaitoksen melun häiritsevyyteen hiljaisilla alueilla ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan. /19/

Negatiiviset tuntemukset liittyivät erityisesti jatkuvaan aerodynaamiseen meluun (jaksollinen viuhuna) sekä tunteeseen kotirauhan ja yksityisyyden häirinnästä. Kaiken kaikkiaan tuulivoimalaitosten melun havaittavuus sekä häiritsevyyden koettiin tutkimuksen mukaan suurempana kuin saman äänenpainetaso muu teollinen melu (kuva 19).



Kuva 19. Tuulivoimalaitoksen melun havaittavuus painotetun  $L_{DEN}$  äänenpainetaso mukaan. /19/

## 5.9

### Suojaetäisyyksien määrittäminen

Suojaetäisyydellä tarkoitetaan sitä etäisyyttä, jolloin tuulivoimaloista kantautuvan äänenpaineen ekvivalenttisarvo ei enää ylitä kyseisen ajankohdan ympäristömelun ohjearvoja. Suomessa on valtioneuvoston päätöksellä annettu melun (suunnittelun) ohjearvon ulkona päivä- (klo 07–22) ja yöaikaan (klo 22–07). Suojaetäisyys ei siis huomioi muiden melulähteiden aiheuttamaa lisäystä tai peittovaiikutusta ja yleisesti äänenpainetaso on laskettu yksinkertaisella menetelmällä, jossa vuotuiset ympäristötekijät on jätetty huomioimatta. Yllä esitetyillä yhtälöillä voidaan kuitenkin päästä kohtalaiseen tarkuutteen (luotettavuuteen) suojaetäisyyden määrittämisessä ottamalla lisäksi huomioon alueen vuotuiset tuulisuus- ja säävaikutukset esimerkiksi lisämarginaalin avulla. Alla on laskettuna mallien (1), (2) ja (6) avulla määritettyjä suojaetäisyyksiä (maston alaosasta immisiopisteeseen) eri turbiinityypin äänitehotason mukaan (napakorkeudet 60–100 m, rosoisuusluokalla 0,055/0,0002, tuulisuus 5 m/s 10 m:n korkeudella) ja 3 dB:n epävarmuusmarginaalilla:

Suojaetäisyydet [m]	Tuuliturbiinin äänitehotaso LWA, dB				
	90	95	100	105	110
Ohjearvo	90	95	100	105	110
50 dB(A), korjaamaton*	-	-	86 m	177 m	313 m
50 dB(A), onshore < 1000 m	-	84 m	173 m	317 m	557 m
40 dB(A), korjaamaton*	101 m	186 m	319 m	515 m	788 m
40 dB(A), onshore < 1000 m	175 m	314 m	548 m	941 m	1591 m

\* = ilman marginaalia ja tuulisuuskorjauksia äänitehotasoon.

Laskennassa on otettu huomioon yöohjearvot asuin- ja virkistysalueille, jolloin ohjearvot ovat 5 dB päiväohjearvoja alhaisempia. Oleellista suojaetäisyyden laskennassa on kuitenkin määrittää



sellainen etäisyys, jonka avulla saadaan karkea tuntuma riskialueista ennen kuin melumallia tarkennetaan esisuunnittelu- tai toteutusprojektin yhteydessä.

5.10

## Yhteenveto melun leviämislaskennoista

Tuulivoimalaitoksista kantautuvan melun todellinen (mitattu) voimakkuus immissiopisteessä on suuresti sidoksissa ympäristön sen hetkiseen tilaan erityisesti alueen tuulisuuden, taustamelun sekä sääilmiöiden vuoksi. Jo pelkästään tuulen voimakkuus vaikuttaa itse melun tuottoon, sen leviämiseen sekä sen havainnointikykyyn tuuli- tai aaltokohinan vastaavasti lisääntyessä. Leviämislaskennoissa oleellista on käyttää kaikkea olemassa olevaa aineistoa hyväksi (tuulisuusdata, alueen topografia, vuotuinen säädädata sekä alueen luonnollinen ja teollinen taustamelu), jolloin päädytään yhden laskenta-arvotuloksen sijasta usein tilastolliseen lopputulokseen melun määrästä vuotuisesti tarkasteltuna kussakin tarkastelupisteessä. Tämän perusteella numeeriset laskentatulokset edustavat luotettavampaa tapaa lähestyä epävarmuuksiltaan pienempää lopputulosta kuin meluvärikartat, joita on mahdollista tuottaa moderneilla laskentaohjelmilla varsin vaivattomasti.

Pohjoismaissa kehitettyjen yksinkertaistettujen tuulivoimamelumallinnusyhtälöiden käyttö voidaan rajata seuraavasti:

- Yhtälö (2), kun etäisyys < 200 m veden äärellä tai < 1000 m maalla.
- Yhtälö (6), kun etäisyys veden äärellä on > 200 m.
- Yhtälö (3), kun etäisyys maalla on > 1000 m.
- Kaikissa malleissa olisi lisäksi mahdollisuuksien mukaan otettava huomioon alueen tuulisuustiedot ja siitä aiheutuvat sääkorjaukset, tuulen pystyprofiilikorjaus lähtömelutasoon, mikäli annettu data on mitattu napakorkeutta alemmalla tasolla.
- Yhtälöt ovat sellaisenaan päteviä tarkastelupisteissä, joista on suora näköyhteys tuulivoimalaitoksiin. Monimutkaisemmat maastot on hyvä mallintaa paikkatietoaineistona digitaaliskarttapohjalle tietokoneavusteisesti.

- Suojaetäisyyden määrittämisessä voidaan käyttää annettuja yhtälöitä sen mukaan, minkä tyyppinen on maasto tuuliturbiinin ja tarkastelupisteen välillä. Taustamelun karkea huomioiminen on tässä yhteydessä myös oleellista.

## 6 Melun verifiointi ja laitetoimittajien melutakuut

Tuulivoimalaitoshankkeen aikana laitetoimittajan on annettava äänitakuuarvo laitoksen meluntuotosta, joka yleensä annetaan tuulennopeuden funktiona. Takuukokeissa melun vaikutus ja laatu pyritään verifioimaan sopimukseen kirjattujen standardien mukaan kun laitos on jo toiminnassa. Laitetakuut ja niiden mittausohjeet ovat nykyään kansainvälisesti standardisoituja, jolloin päästään äänitehotasoarvojen määrittämisessä yhtenäisempään tapaan. Ympäristömeluselvitysten melumittausohjeet ovat kuitenkin kansallisia, jolloin eri maissa voidaan saada hyvinkin erilaisia tuloksia ohjearvon ylittämisestä tai alittamisesta, vaikka emittoiva laite olisi täysin sama. Tähän vaikuttaa osaltaan erilainen taustamelun huomioonottaminen (tuuli- ja aaltokohinan vaikutus) sekä ohjearvojen soveltaminen.

### 6.1

#### Äänitehotason määrittäminen

Tuulivoimalaitoksen äänitehotason määrittämisessä on nykyään käytössä kansainvälinen IEC-standardi (IEC 61400-11), jonka nykyversio on julkaistu vuonna 2002, /20/. Se sisältää menetelmäohjeet A-painotetun äänitehotason, äänispektrin ja tonaalisuuden määrittämiseksi 6–10 m/s tuulennopeuksilla. Määrittäminen perustuu pitkälti mitattuihin suureisiin sekä tuulivoimalasta että ympäristön tilasta. Tuulisuus voidaan kuitenkin mitata kahdella eri menetelmällä: 1) sähkötehon tai tehokäyrän avulla tai 2) mittaamalla mittauksen aikainen todellinen tuulennopeus. Näistä ensimmäinen on kuitenkin pakollinen laitesertifiointi- sekä takuumittauksissa. Referenssikorkeutena käytetään 10 m eli tuulisuus korjataan logaritmisella korjauksella tähän korkeuteen mittauskorkeudesta (huomio eri yhtälö kuin (5)). Voimalan äänispektri nauhoitetaan ja tonaalisuus selvitetään kapeakaistaspektristä kriittisen kaistanleveyden menetelmällä./21/

Äänitehotaso määritellään seuraavasti:

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_1^2}{S_0}\right), \quad (7)$$

missä:

- $L_{Aeq,c,k}$  = taustamelukorjattu A-painotettu äänenpaine mitatuilla tuulennopeuksilla
- $R_1$  = Mikrofonin ja navan välinen suora etäisyys
- $S_0$  = Referenssipinta-ala (1 m<sup>2</sup>)

Tuulen pystyprofiilimuutosten vuoksi on tehotasoa kuitenkin leviämislaskentoihin korjattava uudelleen yhtälön (5) mukaan, jolloin lähtötaso nousee tapauksesta riippuen noin 1–5 dB. Jos tuulen pystyprofiili voidaan mitata eri korkeuksilta ennen laitoksen pystytystä, on alkuperäinen tehotaso syytä korjata todellisen profiilin mukaisilla käyrillä, etenkin yöajan meluarvoja määritettäessä.

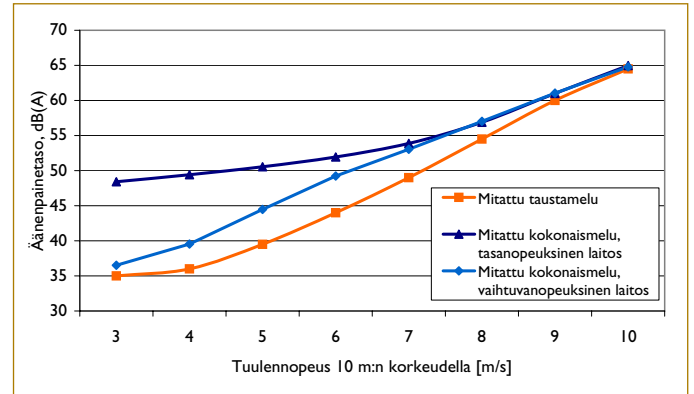
### 6.2

#### Melumittaukset

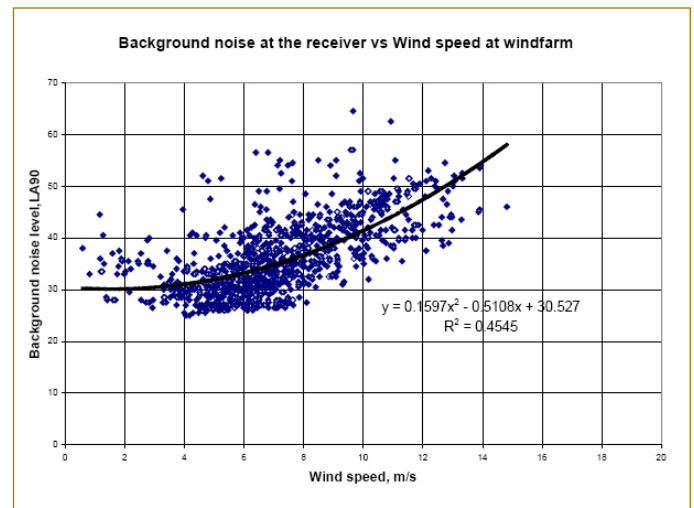
Tuulivoimahankkeen takuumittaukset tai ympäristöluvan mukaiset melumittaukset voidaan suorittaa ennalta sovituissa pisteissä (yleensä meluherkkien kohteiden luona) kahdella lähestymistavalla: 1) normaalilla melumittauskalustolla kuitenkin siten, että tuulisuus mitataan tarkasti mittausetäisyydeltä sekä 10 m:n korkeudelta (tai lasketaan referenssikorkeudelle). Lisäksi melumittausmikrofoni on suojattava kattavalla tuulisuojalla tulosta vääristävän kohinan vähentämiseksi. 2) IEC:n mukaisella mittaustavalla lähellä laitosta siten, että melu mitataan maahan asetetun tasopinnan päältä, ja lasketaan lopuksi yhtälöitä käyttämällä haluttuun tarkastelupisteeseen.

Koska taustamelulla on merkittävä osuus tuulikohinan ja/tai aaltokohinan vuoksi, on samoissa pisteissä suoritettava kattavat taustamelumittaukset päivä- ja yöaikaan eri tuulisuusolosuhteissa. Tästä saadaan taustamelun äänikäyrä tuulennopeuden suhteessa kussakin pisteessä. Vastaava proseduurin voidaan suorittaa tuulivoimalaitoksen käynnin aikana, jolloin saadaan vastaava funktioikäyrä samaan kuvaajaan (kuva 20).

Käytännössä tuulisuusolosuhteet ovat kuitenkin aina alttiita voimakkailla hetkellisillä vaihteluille, minkä vuoksi mittausajan on oltava riittävä. Jotta saadaan luotettava kuva tuulisuuden vaikutuksesta melun määrään (tausta- ja kokonaismelun), on mittaustavan tuloslaskennassa käytettävä regressioanalyysia yhden vaikutuskäyrän laskennassa (kuva 21) mm. Australialaisen tuulivoimalan mittausohjeen mukaan (EPA, Wind Farms, Environmental noise guidelines, /22/) mittauspistepelejä on oltava vähintään 2000 siten että äärimmäiset tulokset poistetaan.



Kuva 20. Mittausten avulla johdettu melun vaikutuskäyrä (kaksi eri laitostapausta) tuulisuuden funktiona.



Kuva 21. Taustamelumittaustuloksia tuulisuuden funktiona sekä regressiokäyrä. /22/

## 7 Katsaus eri maiden tuulivoimalaitomelun ohjearvoihin

Tuulivoimatuotannon kannalta maailman johtavissa maissa on edelleen varsin kirjava säännöstö ohjearvojen sekä melun määritysten suhteen. Suurin ongelma on ollut luotettavan mittaus- ja vertailuohjeen määrittäminen erityisesti taustamelun osalta. Kattavia selvityksiä on tehty Isossa-Britanniassa, Tanskassa ja Ruotsissa. Näistä Ison-Britannian selvitys tuulivoimalaitosten melusta (The Assessment & Rating of Noise from Wind Farms, 1997/24/) on varsin kattava katsaus, jossa käydään läpi tekniikka, mittaaminen ja ehdotukset säädösten tarkentamiseksi tuulivoimalaitosten melun arvioinnissa. Raportissa päädyttiin seuraavaan ehdotukseen ohjearvon osalta (kuva 22).

Kuvassa 22 melun (yö)ohjearvo seuraa siis mitattua taustamelua 5 dB korotuksella tuulennopeuden suhteessa yli 8m/s tuulisuudella. Tämä kuitenkin tarkoittaa kattavaa ja luotettavaa taustamelun vuotuista tutkimusta kussakin immisiopisteessä, mikä lienee vaikea tai mahdoton toteuttaa kohtuullisella aikataululla ja kustannuksilla. Tanskassa (kansalliset ohjeet annettu ensimmäisen kerran jo vuonna 1991) ja Ruotsissa on sen sijaan turvauduttu yksinkertaisempaan tapaan lähestyä ongelmaa siten, että 8m/s tuulella (10 m korkeudelta mitattuna) mitataan melu lähes IEC:n ohjeen mukaisesti lähellä turbiinia sekä lasketaan yksinkertaistetuilla yhtälöillä äänenpainetaso kussakin

immisiopisteessä. Menetelmä on sinänsä helppo toteuttaa, mutta vaatii luotettavan laskentarutiinin, jotta vuotuinen äänenpainetaso epävarmuuksineen saadaan mahdollisimman oikeaksi kussakin immisiopisteessä.

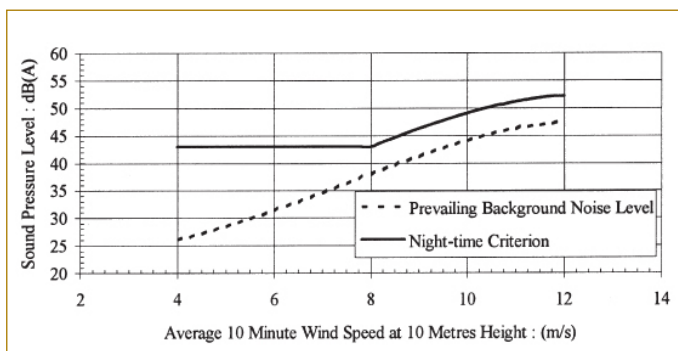
Alla on lueteltu eri maiden tuulivoimatuotannon kannalta merkitykselliset ohjearvot:

**Isossa-Britanniassa** siis käytetään 5 dB:n marginaalia kuvan 22 mukaisesti päivä ja yöajan melulle. Taustamelu määritellään L90 arvon mukaisesti pitkän ajan mittauksena. Maaseudulla ohjearvo on rajattu 45 dB(A):iin kovalla tuulella (L50 mittausarvo) sekä 40 dB(A):ä heikolla tuulella. Skotlannissa on oma PAN 45 (Assessment of wind farm noise, 2001) ohje tuulivoimamelulle. /25/

**Tanskassa** pätee 45 dB(A):n ohjearvo päiväajan melulle asuinalueilla sekä 40 dB(A) loma-asutus- ja vapaa-ajan alueilla. Tuulivoimalaitosten melun mittausohjeet on määritelty raportissa: "Statutory order from the ministry of the environment no. 304 of May 14, 1991, on noise from windmills" /8/.

**Ruotsissa** seurataan pitkälti Tanskalaisia ohjeita ja melun ohjearvot ovat määritelty päivä, ilta ja yöaikoihin kuhunkin erikseen. Yöajan ohjearvot ovat 35–40 dB(A) sekä päiväajan ohjearvot 60–40 dB(A):n välillä. Ruotsissa tuulivoimatuotannon melun yleisohjeet on kirjattu raporttiin: "Ljud från vindkraftverk, rapport 6241, Naturvårdsverket 2001". /10/

**Saksassa** melun ohjearvot ovat välillä 35–70 dB(A) riippuen kohteesta ja kellonajasta. VDI sekä DIN ohjaavat teknistä todentamista mittausten ja tonaalisuusanalyysien osalta (DIN 45 681).



Kuva 22. Eräs ehdotus melun ohjearvon muuttamisesta taustamelua seuraavaksi yli 8m/s tuulisuudella. /24/

## VIITELUETTELO

- /1/ van den Berg, G.P. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. Elsevier Science Direct, University of Groningen, Netherlands 2003. <http://www.nowap.co.uk/docs/windnoise.pdf>
- /2/ Rogers, A.L., Manwell, J.F. Wind Turbine Acoustic Noise. A white paper prepared by renewable energy research laboratory. University of Massachusetts, MA, US, 2002. [http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind\\_Turbine\\_Acoustic\\_Noise\\_Rev2006.pdf](http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev2006.pdf)
- /3/ Schepers, J.G. SIROCCO, Silent rotors by acoustic optimisation. First international conference on wind turbine noise: Perspectives for control. Conference proceedings. Berlin 17 th and 18 October, 2005.
- /4/ Medici, Davide. Wind Turbine Wakes, Control and Vortex Shedding. Technical reports from KTH Mechanics. Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden, March 2004. [http://www.vindenergi.org/Vindforskrappporter/Medici\\_2004\\_Wakes.pdf](http://www.vindenergi.org/Vindforskrappporter/Medici_2004_Wakes.pdf)
- /5/ Betke, K. Underwater noise emissions of offshore wind turbines. First international conference on wind turbine noise. Conference proceedings. Berlin 17 th and 18 October, 2005.
- /6/ Arakava, Chuichi. Numerical approach for noise reduction of wind turbine blade tip with earth simulation. Journal of Earth Simulator, Volume 2, March 2005, pages 11–33.
- /7/ Enecon GmbH, E-33, 330kW specifications.
- /8/ Statutory order from the ministry of the environment, no 304 of May 14, 1991 on noise from windmills. Ministry of the environment, Denmark. <http://www.mst.dk/rules/Ministerial%20Orders%20in%20force/Transport,%20air%20and%20noise%20in%20force/02060200.doc>
- /9/ BJÖRK E.A. Simple Statistical Curved Ray Model for Noise Under Downward Refracting Conditions. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 91 (2005) 389–391.
- /10/ Ljud från vindkraftverk, rapport 6241. Naturvårdsverket, Sverige, december 2001.
- /11/ Kragh, Jørgen; Plovsin, Birger; Søndergaard, Bo. Prediction of Wind Turbine Noise Propagation over Complex Terrain in All Kinds of Weather with Nord2000. First international conference on wind turbine noise. Conference proceedings. Berlin 17 th and 18 October, 2005.
- /12/ van den Berg, G.P. Wind gradient statistics up to 200 m altitude over flat ground. First international conference on wind turbine noise. Conference proceedings. Berlin 17 th and 18 October, 2005.
- /13/ A.A.M. Holtslag, Estimates of diabatic wind speed profiles from near-surface weather observations, Boundary-Layer Meteorology 29 (1984) 225–250.
- /14/ Johansson, Lisa. Sound Propagation Around Offshore Wind Turbines. Licentiate Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Building Technology. Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden, 2003.
- /15/ Törnblom, Karin. Numerical simulations of wind fields over the Baltic Sea with applications to sound propagation. First international conference on wind turbine noise. Conference proceedings. Berlin 17 th and 18 October, 2005.
- /16/ Søndergaard, Bo; Plovsing, Birger. Noise from offshore wind turbines. Environmental Project No. 1016 2005. Danish Ministry of the Environment, The Danish Environmental Protection Agency, 2005.
- /17/ ISO 9613-1: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the air absorption of sound by the atmosphere, 1993
- /18/ ISO 9613-2: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation, 1993
- /19/ Pedersen, Eja. Noise annoyance from wind turbines – a review. Rapport 5308, Naturvårdsverket, Sweden, August 2003.
- /20/ IEC 61400-11:2002 Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
- /21/ Danish National Agency of Environmental Protection, Guideline no 6. Measurement of Environmental noise from industry, The Joint Nordic Method for the evaluation of tones in broad band noise. 1984.
- /22/ Environmental Noise Guidelines: Wind Farms. Environment Protection Authority, Government of South Australia, February 2003.
- /23/ Pesonen, Kari. Ympäristömelun haittojen arvioinnin perusteita. Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskus 2005:14. Helsinki 2005. <http://www.stm.fi/Resource.phx/publishing/store/2005/11/pr1131096014245/passthru.pdf>
- /24/ The working group on noise from wind turbines. The assessment and rating on noise from wind farms. ETSU-R-97. Final Report, September 1997.
- /25/ PAN 45 (revised 2002): Renewable Energy Technologies. The Scottish Executive, 2002. <http://www.scotland.gov.uk/Publications/2002/02/pan45/pan-45>

## **Kotimaisia julkaisuja**

- /26/ Meluntorjunnan valtakunnalliset linjaukset ja toimintaohjelma. Suomen ympäristö, julkaisu 696. Helsinki 2004
- /27/ Ympäristöhallinnon meluntorjunnan yleiset linjaukset, Ympäristöhallinnon meluverkko. Ympäristöministeriön moniste 102. Helsinki 2002.
- /28/ Pesonen, Kari. Hiljaiset alueet. Hiljaisuuteen vaikuttavat tekijät ja hiljaisuuden kriteerit. Suomen ympäristö, julkaisu 738. Helsinki 2004.
- /29/ Teollisuuslaitoksen ympäristömelu. Suomen ympäristö, julkaisu 142, Ympäristöministeriö, Helsinki 1997.
- /30/ Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriön ohje 1/1995.
- /31/ Ympäristölainsäädännön soveltaminen tuulivoimarakentamisessa. Työryhmän mietintö. Suomen ympäristö, julkaisu 584. Ympäristöministeriö, Helsinki 2002.
- /32/ Eskelinen, Sakari. Ympäristövaikutusten arviointimenettelyn soveltaminen Suomen tuulivoimahankkeisiin. Lapin Yliopisto, Oikeustieteiden tiedekunta. 2005.

## **Uusimmat julkaisut**

- /33/ Thomsen F., Lüdenmann K., Kafemann R., Piper W., Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. Cowrie Ltd, 2006.

## KUVAILEHTI

<i>Julkaisija</i>	Ympäristöministeriö Alueidenkäytön osasto			<i>Julkaisu-aika</i> Maaliskuu 2007
<i>Tekijä(t)</i>	Carlo Di Napoli			
<i>Julkaisun nimi</i>	<b>Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen</b>			
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Suomen ympäristö 4/2007			
<i>Julkaisun teema</i>	Rakennettu ympäristö			
<i>Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut</i>				
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Tämän selvityksen tarkoituksena on antaa yleisluontoista tietoa tuulivoimalaitosten käyntiäänen syntytaivoista, vaimentamismahdollisuuksista sekä äänen (melun) leviämisestä ympäristöön.</p> <p>Tuulivoimaloiden käyntiääni muodostuu tuulivoimalan lapojen pyörimisestä (aerodynaaminen melu) sekä voimalan koneistosta (vaihteisto, generaattori, jäähdytysjärjestelmä) lähtevästä äänestä. Näistä aerodynaaminen melu on hallitsevin. Tuulivoimalan melua voidaan vaimentaa muun muassa rajoittamalla lapojen pyörimisnopeutta, muuttamalla lapakulmaa sekä kehittämällä tuulivoimaloiden lapojen geometriaa. Sään vaikutus on merkittävä tekijä sekä melun leviämiseen että sen kokemiseen. Tuulivoimalan käyntiäänen leviäminen ympäristöön on sidoksissa alailmakehän tilaan; tuulisuuteen, lämpötilaan ja sen pystyjakaumaan sekä ilmakerroksen termiseen stabiilisuuteen. Nämä paikoin monimutkaiset ja toisistaan riippuvat ilmiöt vaikeuttavat oleellisesti melun leviämisen hetkellistä ennustettavuutta. Taustamelu vaikuttaa huomattavasti tuulivoimaloiden melun kuuluvuuteen. Taustamelua lisäävät tekijät ovat ajallisesti vaihteleva tuulikohina (tuulisuus ja puiden humina) sekä aaltojen aiheuttama kohina.</p>			
<i>Asiasanat</i>	tuulivoima, tuulivoimala, tuulivoimarakentaminen, melu, meluvaikutukset, vaikutusten arviointi			
<i>Rahoittaja/ toimeksiantaja</i>	Ympäristöministeriö			
	ISBN 978-952-11-2585-0 (PDF)	ISBN	ISSN 1796-1637 (verkkokj.)	ISSN
	<i>Sivuja</i> 32	<i>Kieli</i> suomi	<i>Luottamuksellisuus</i> julkinen	<i>Hinta (sis.alv 8 %)</i>
<i>Julkaisun myynti/ jakaja</i>	www.ymparisto.fi/julkaisut			
<i>Julkaisun kustantaja</i>	Ympäristöministeriö			
<i>Painopaikka ja -aika</i>	Helsinki 2007			

## PRESENTATIONSBLAD

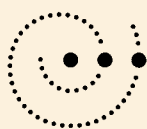
Utgivare	Miljöministeriet Markanvändningsavdelningen	Datum Mars 2007		
Författare	Carlo Di Napoli			
Publikationens titel	<b>Tuulivoimaloiden melun syntyväv ja leviäminen</b> (Uppstående och spridning av buller från vindkraftverk)			
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 4/2007			
Publikationens tema	Byggd miljö			
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt				
Sammandrag	<p>Denna utredning syftar till att ge allmänna upplysningar om hur vindkraftverk alstrar buller, hur bullret kan dämpas och hur ljudet (bullret) sprids i miljön.</p> <p>Det ljud som vindkraftverk alstrar består av ljudet av bladens passage genom luften (aerodynamiskt buller) och ljudet av kraftverkets maskineri (växellåda, generator, nedkylningssystem). Av dessa två är det aerodynamiska bullret det som dominerar. Vindkraftverksbuller kan dämpas bl.a. genom att begränsa bladens roteringshastighet, ändra bladens vinkel eller utveckla deras geometriska egenskaper. Vädret är en betydande faktor när det gäller hur bullret sprids och upplevs. Spridningen av ljudet från ett vindkraftverk i miljön påverkas av vilka förhållanden som råder i den nedre atmosfären, vindstyrkan, temperaturen och dess vertikala variation samt av luftlagrets termiska stabilitet. Dessa på sina håll komplicerade och ömsesidigt beroende fenomen har en avsevärd inverkan på hur bullrets spridning kan förutspås momentant. Bakgrundsbuller har en betydande inverkan på hur buller från vindkraftverk hörs. Bakgrundsbullret kan göras starkare av tidsmässigt varierande vindljud (vind och susande träd) och vägbrus.</p>			
Nyckelord	vindkraft, vindkraftverk, bygge av vindkraftverk, buller, bullereffekter, bedömning av effekter			
Finansiär/ uppgivare	Miljöministeriet			
	ISBN 978-952-11-2585-0 (PDF)	ISBN	ISSN 1796-1637 (online)	ISSN
	Sidantal 32	Språk Finska	Offentlighet Offentlig	Pris (inneh. moms 8 %)
Beställningar/ distribution	<a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a>			
Förläggare	Miljöministeriet			
Tryckeri/tryckningsort och -år	Helsingfors 2007			



## DOCUMENTATION PAGE

<i>Publisher</i>	Ministry of the Environment Land Use Department			<i>Date</i> March 2007
<i>Author(s)</i>	Carlo Di Napoli			
<i>Title of publication</i>	<b>Tuulivoimailoiden melun syntytavat ja leviäminen</b> (Sources and spread of wind turbine noise)			
<i>Publication series and number</i>	The Finnish Environment 4/2007			
<i>Theme of publication</i>	Built Environment			
<i>Parts of publication/ other project publications</i>				
<i>Abstract</i>	<p>The purpose of this report is to give information of a general nature on the ways in which sound is generated by the operation of wind turbines, the possibilities for noise abatement and the dissemination of sound (noise) into the environment.</p> <p>The sound generated by the operation of wind turbines consists of the sound from the rotation of the rotor blades (aerodynamic noise) and from the machinery of the turbine (transmission, generator, cooling system). Of these the aerodynamic noise is predominant. The noise from a wind turbine can be abated for example by restricting the rotational speed of the blades, by modifying the blade angle and by developing the blade geometry. The effect of weather is an important factor both in the dissemination of the noise and in the way people experience it. The dissemination into the environment of the sound generated by the operation of a wind turbine depends on the state of the lower atmosphere; level of wind, temperature, and its vertical distribution, thermal stability of the atmospheric layer. These at times complex and interdependent phenomena make it significantly more difficult to predict noise dissemination from moment to moment. Background noise has a considerable influence on the audibility of wind turbine noise. Factors increasing background noise are wind noise which varies with time (wind and the sighing of trees) and the roar of waves.</p>			
<i>Keywords</i>	wind power, wind turbine, wind turbine construction, noise, noise impacts, impact assessment			
<i>Financier/ commissioner</i>	Ministry of the Environment			
	ISBN 978-952-11-2585-0 (PDF)	ISBN	ISSN 1796-1637 (online)	ISSN
	<i>No. of pages</i> 32	<i>Language</i> Finnish	<i>Restrictions</i> For public use	<i>Price (incl. tax 8 %)</i>
<i>For sale at/ distributor</i>	www.ymparisto.fi/julkaisut			
<i>Financier of publication</i>	Ministry of the Environment			
<i>Printing place and year</i>	Helsinki 2007			

Tässä selvityksessä käsitellään tuulivoimalaitosten käyntiäänien syntytapoja, vaimentamismahdollisuuksia sekä tekijöitä, jotka vaikuttavat äänen leviämiseen ympäristöön. Tuulivoimaloiden käyntiääni muodostuu tuulivoimalan lapojen pyörimisestä ja voimalan koneistosta lähtevästä äänestä. Tuulivoimalan melua voidaan vaimentaa muun muassa rajoittamalla lapojen pyörimisnopeutta, muuttamalla lapakulmaa sekä kehittämällä tuulivoimaloiden lapojen geometriaa. Sään vaikutus on merkittävä tekijä sekä melun leviämiseen että sen kokemiseen. Tuulivoimalan käyntiäänien leviäminen ympäristöön on sidoksissa alailmakehän tilaan; tuulisuuteen, lämpötilaan ja sen pystyjakaumaan sekä ilmakerroksen termiseen stabiilisuuteen. Nämä paikoin monimutkaiset ja toisistaan riippuvat ilmiöt vaikeuttavat oleellisesti melun leviämisen hetkellistä ennustettavuutta. Taustamelu vaikuttaa huomattavasti tuulivoimaloiden melun kuuluvuuteen. Taustamelua lisääviä tekijöitä ovat tuulikohina sekä aaltojen aiheuttama kohina.



YMPÄRISTÖMINISTERIÖ  
MILJÖMINISTERIET  
MINISTRY OF THE ENVIRONMENT

ISBN 978-952-11-2585-0 (PDF)

ISSN 1796-1637 (verkkokj.)