

Tuulivoimaloiden meluhaitat

Sampo Pihlainen

Pro gradu -tutkielma
Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos
Uusiutuvan energian maisteriohjelma
1.11.2009
Ohjaaja: Jussi Maunuksela

Tiivistelmä

Melu on epämiellyttäväksi koettua ääntä, jonka määrittämiseksi on selvitettävä äänen fysikaalisten tekijöiden lisäksi myös sen aiheuttamat fysiologiset vaikutukset ja koetut häiritsevyyssiirteet. Fysikaalisista tekijöistä tärkein on äänenpaine, joka voidaan mitata melumittarilla melulähteestä jonnekin kantautuneesta immissioäänestä. Tämä tulee erottaa äänitehosta, joka tarkoittaa melulähteessä syntyvän emissioäänen tehoa. Yleisin vaihtelevan ympäristömelun voimakkuutta kuvaava suure on keskiäänitaso (L_{Aeq}), joka ilmoittaa keskimääräisen äänitason tarvittavan aikaikkunan osalta. Melun vaimeneminen riippuu suurelta osin ympäristön rakenteesta, mutta myös väliaineen koostumuksesta, meluäänien taajuudesta ja melulähteen muodosta.

Elinympäristön äänet vaikuttavat ihmisen elimistön toimintoihin joko kuuloaistin kautta tai suoraan. Osa vaikutuksista on haitallisia ja ne voivat aiheuttaa pysyviä muutoksia, toiminnanvajausta ja haittaa. Melun häiritsevyyteen vaikuttavat muun muassa melun akustiset ominaisuudet, tilanteeseen ja olosuhteeseen liittyvät tekijät, yksilön oma mahdollisuus vaikuttaa melulähteeseen sekä meluun liittyvät psykologiset tekijät. Melun äänenpaine yksin selittää vain viidenneksen häiritsevyydestä, joten melun häiritsevyyttä voidaan arvioida vain psykoakustisesti yksilö- tai väestötutkimuksilla. Häiritsevyyttä voidaan ennaltaehkäistä muun muassa huolellisella kaavoituksella sekä rakennusten äänieristystä ja suunnittelua parantamalla. Melulle altistuneet voivat pienentää melun häiritsevyyttä esimerkiksi peiteäänellä sekä pyrkimällä vaikuttamaan melulähteeseen tai omaan asenteeseen sitä kohtaan.

Tuulivoimaloiden melu on joko mekaanista tai aerodynaamista. Näistä jälkimmäinen on isompi haaste. Tuulivoimamelun häiritsevyyttä lisää kaksi seikkaa: äänen pulssimainen luonne ja melulähteen selvä visuaalinen havaittavuus. Tulevan tuuliprojektin melua etukäteen arvioitaessa käytetään yleisesti mittausteknisistä ongelmista johtuen mieluummin laskukaavoja, jotka voivat kuitenkin tuottaa vääriä tuloksia puutteellisilla lähtötiedoilla tai harhaanjohtavilla oletuksilla esimerkiksi tuuliprofiilin suhteen. Olisi joka tapauksessa oikeudenmukaista kompensoida paikalliselle väestölle tuulivoiman rakentamisesta koituvia melu-, maisema- ja muita ympäristöhaittoja esimerkiksi kiinteistöverotulojen ja maanvuokratulojen muodossa.

Esipuhe

Tutkimusaihe täsmentyi graduprosessin aikana huomattavasti. Tarkoitukseni oli alun perin jatkaa jo kandidaatin työssä aloittamaani tietä ja tutkia tarkemmin tuulivoiman lähihistoriaa. Mukaan olivat tulossa katsaukset tuuliteknologian nykytasoon, tuulivoimaloiden ympäristöhaittoihin ja Suomen tuulipotentialiin. Tällainen tehtävänasettelu osoittautui kuitenkin liian laajaksi, ja muutaman välivaiheen kautta se tarkentui tuulivoimaloiden meluhaittoihin. Tämä aihe valikoitui suuresta massasta eri viestimien tuulivoimakirjoituksiin perehtymällä.

Graduprosessini oli pitkä eikä erityisen suoraviivainen. Viivästystä aiheuttivat muut opinnot ja leivänsyrjässä pysymiseksi tehdyt palkkatyöt. Kiitokset kärsivällisyydestä kuuluvat hienoa ohjausta ja tukea antaneelle ohjaajalleni Jussi Maunukselalle. Suuret kiitokset myös vaimolleni Jepa Pihlaiselle, joka kannustuksellaan ja vinkeillään piti yllä toivoani gradun vähittäisestä valmistumisesta. Kiitoksia myös Aura Neuvoselle mielenkiintoisista keskusteluista ja hyvistä lähdeehdotuksista.

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	1
2. Ääni ja melu.....	2
2.1 Mikä ääni on melua?.....	2
2.2 Äänen fysikaaliset ominaisuudet.....	2
2.3 Äänen elämyspiirteet.....	9
2.4 Äänen mittaaminen.....	10
2.5 Äänilähteet ja äänen vaimeneminen.....	12
2.6 Melun häiritsevyys.....	14
2.7 Melun häiritsevyyden mittaaminen ja arviointi.....	15
2.8 Melun häiritsevyydestä johtuva haitta.....	16
2.9 Toimenpiteet häiritsevyyden vähentämiseksi.....	17
2.10 Melulainsäädäntö.....	18
3. Tuulivoimaloiden melu.....	20
3.1 Mekaaninen melu.....	24
3.2 Vastamelun käyttö meluhaittojen vähentämisessä.....	26
3.3 Aerodynaaminen melu.....	27
3.4 Melun impulsiivinen luonne.....	29
3.5 Tuuliturbiinimelun mittaaminen.....	30
3.5.1 Ääniemissiotasojen mittaaminen.....	31
3.5.2 Ääni-immissiotasojen mittaaminen.....	31
3.5.3 Vertailua emissio- ja immissioäänitasojen välillä.....	32
3.6 Tuuliturbiinimelun laskeminen.....	33
3.7 Tuuliprofiilin vaikutus melun kuulumiseen.....	34
3.8 Tuuliturbiinimelun havaitseminen ja häiritsevyys.....	36
3.9 Tuulivoimamelun vaikutukset merinisäkkäisiin.....	43
3.10 Tuulivoimaprojektin toteutustavan vaikutus häiritsevyyteen.....	43
3.11 Meluhaittojen kompensointi.....	44
4. Johtopäätökset.....	46
Lähteet.....	47
Liitteet.....	55

1. Johdanto

Käsittelen työssäni mahdollisimman laajasti tuulivoimaloiden meluhaittoja, joiden merkitys korostuu koko ajan tuulivoimasta keskusteltaessa ja päätettäessä. Ympäristöhaitat ylipäänsä ovat suuren keskustelun kohteena ja niitä käytetään usein lyömäaseena tuulivoimaa vastaan. Niistä eniten huolta aiheuttavat maisema-, linnusto-, ja meluhaitat. Valitsin näistä aiheekseni melun sen ilmeisen fysikaalisen luonteen vuoksi. Lisäksi meluhaitoissa on mielestäni vielä paljon tutkimista, erityisesti niiden vähentämiseen ja kompensatioon liittyen. Haluaisin tutkimuksellani edistää tietämystä tästä tuulivoiman osa-alueesta ja näin edesauttaa tuulivoiman toimivaa ja yleisesti hyväksyttävää käyttöönottoa.

Tutkielman toisessa luvussa esittelen äänen ja melun peruskäsitteet. Kolmas luku keskittyy tuulivoimaloiden meluun, sen eri osa-alueisiin, mittaamiseen, laskemiseen ja vähentämiseen, sekä erilaisen kokemisen syihin. Lopuksi neljännessä luvussa pohdin tekemäni tutkielman sisältöä ja osoitan jatkotutkimusten tarpeen.

2. Ääni ja melu

2.1 Mikä ääni on melua?

Varsin moni on ärsyyntynyt naapurin radion äänestä, vaikka äänitaso voi olla samojen ihmisten miellyttävänä kokemaan merenrannan laineen liplatukseen verrattuna huomattavasti matalampi. Naapurin musiikkimaun lisäksi eroavaisuuden aiheuttaa äänien informaatioisisällön erilaisuus. Meren aaltojen ääni on satunnaista kohinaa, kun taas naapurin radio kuuluttaa systemaattista sisältöä, jota aivot eivät voi olla prosessoimatta. Jos yleiset tuntemukset naapuria kohtaan vielä sattuvat olemaan negatiiviset, radion äänestä on todennäköisesti entistäkin ärtyneempi. [1]

Jauhiainen ym. [2] määrittelevät Ympäristöministeriön julkaisussa *Ympäristömelun vaikutukset melun tarkoittavan ”ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä tai joka on muulla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista taikka hänen muulle hyvinvoinnilleen haitallista”*. Vaikka melu onkin tilapäisenä ja satunnaisena vain viihtyisyyskysymys, se aiheuttaa pitkään jatkuessaan terveysvaikutuksia. Melu on myös muilla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista. Äänen määrittäminen meluksi ja sen meluisuuden asteen arviointi riippuvat siis joko sen subjektiivisesti aistituista tai koetuista kielteisistä piirteistä, joihin kuuluu myös melun merkitysisältö, tai sen aiheuttamista fysiologisista muutoksista tai kudonvaurioista. [2]

Melua ei siis voida kokonaan määrittää fysikaalisesti, sillä se määräytyy myös fysiologisten vaikutusten ja koettujen häiritsevyyksiä perusteella. Vaikka melun äänenpainetaso on tärkeä melutason määrittämisen mittari, on lisäksi otettava huomioon muun muassa melun esiintymisaika ja -kesto sekä kokijan melulle antama merkitysisältö [2]. Melu on pitkälti subjektiivinen käsite, jossa kuulijan omilla tuntemuksilla ja äänenenerotuskyvyllä on ratkaiseva merkitys. Melu koostuu yleensä useiden kohteiden yhtäaikaista äänistä, joiden taajuudet ja aallonpituudet muuttuvat jatkuvasti. On kuitenkin mahdollista erotella melun hetkellisiä osatekijöitä esimerkiksi mittaamalla melun eri taajuuksia [3].

2.2 Äänen fysikaaliset ominaisuudet

Äänen fysikaalisia perusominaisuuksia ovat äänen taajuus, äänenpaine ja äänen ajalliset piirteet, kuten kesto. Kun ääni on jaksollista, sen taajuus ilmoittaa värähtelyjen tai jaksojen lukumäärän

aikayksikössä. Äänen taajuuden yksikkö on Hz (hertsi, $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$). Värähtelyn laajuutta eli voimakkuutta mitataan paineen muutoksina. Äänenpaineen yksikkö on pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$). [2]

Ääni on mekaanista aaltoliikettä, joka tarvitsee edetäkseen väliaineen. Ääniaallon nopeus väliaineessa riippuu väliaineen ominaisuuksista, erityisesti tiheydestä [3]. Äänen etenemisnopeus ilmassa on noin 340 m/s, vedessä noin 1500 m/s ja teräksessä noin 5000 m/s [4] eli mitä tiheämpi väliaine on, sitä suurempi on ääniaallon etenemisnopeus. Aineen tiheys riippuu myös sen lämpötilasta, joten sama väliaine eri lämpötiloissa välittää aaltoa eri tavalla. Esimerkiksi ääni etenee kylmässä ilmassa nopeammin kuin kuumassa [3].

Samantaajuiset äänet eivät välttämättä kuulosta samalta. Äänivärähtelyt koostuvat usein monista osavärähtelyistä. Esimerkiksi musikaalinen ääni sisältää äänenkorkeuden määräävän perusaallon lisäksi joukon yliaaltoja, joiden taajuudet ovat perustaajuuden monikertoja. Yliaallot antavat äänelle sille ominaisen värin. [4]

Äänen aallonpituus on laskettavissa yhtälöstä [4]:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

missä

- λ on äänen aallonpituus, yksikkö: [m]
- v on äänen etenemisnopeus, yksikkö: [m/s]
- f on äänen taajuus, yksikkö [Hz] (= 1/s).

Ääni etenee väliaineessa paineaaltona, jossa väliaine vuoroin puristuu kasaan paineen ja tiheyden saavuttaessa maksiminsa ja vuoroin harventuu paineen ja tiheyden saavuttaessa miniminsä.

Puhutaan siis *äänepaineesta*, joka muuttuu ajan funktiona jossain kiinteässä kohdassa yhtälön [5]

$$p = \hat{p} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

mukaisesti. Tässä \hat{p} on äänenpaineen vaihteluiden huippuarvo eli aallon *amplitudi*, ω on

kulmataajuus $\omega = 2\pi f$, f on äänen taajuus, ja ϕ on alkuvaihekulma. Voimakkaissa äänissä \hat{p} voi olla esimerkiksi 100 Pa. Huippuarvon lisäksi käytetään tehollista arvoa p_{ef} , joka saadaan helposti tehollisesta arvosta yhtälöllä [5]

$$p_{ef} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

Ääni kuljettaa muiden aaltoliikkeiden tavoin energiaa. Voidaan siis määrittellä *äänien intensiteetti* jollekin ääntä vastaan kohtisuoralle tasolle yhtälöllä [5]

$$I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A}, \quad (4)$$

missä A on äänen etenemissuuntaa vastaan kohtisuorassa oleva poikkipinta-ala ja E pinnan A läpi ajassa t siirtyvä energia. Lisäksi $P = E/t$ on äänen mukanaan kuljettama teho. [5]

Äänen voimakkuuden mittaaminen ei ole aivan suoraviivaista, sillä siinä täytyy ottaa huomioon ihmisen korvan tapa toimia [5]. Ihmisen kuuloalueen rajat riippuvat sekä taajuudesta että intensiteetistä [6]. Ihmiskorva kuulee eri taajuuksia eri tavoin, herkimmin kuullaan 2-3 kHz:n taajuisia ääntä ja huonoiten matalia ja korkeita taajuuksia [5]. Ihminen pystyy aistimaan jopa 270 000 hertsin taajuuden, jos se on tarpeeksi voimakas. Yleisesti ottaen kuuloalueeksi kuitenkin määritellään n. 20 Hz – 20000 Hz [6]. Taajuuden ollessa yksi kilohertsi ihmisen kuulokynnys ylittyy, kun ääniaallon ilmassa aiheuttamien painevaihteluiden tehollinen arvo on

$p_{ef} = p_0 = 20 \mu Pa$. Kipua tällä taajuudella aiheuttaa ääni, jonka $p_{ef} = 20-40 Pa$ [5]. Nämä arvot ovat keskimääräisiä arvoja, sillä korvien toiminnassa on yksilöllisiä eroja [5]. Tämän taajuuden kuulokynnystä ja kipurajaa vastaavat äänen intensiteetit voidaan laskea yhtälöllä [5]

$$I = \frac{\hat{p}^2}{2\rho v} = \frac{p_{ef}^2}{\rho v}, \quad (5)$$

missä ρ on ilman tiheys, joka $0^\circ C$:n lämpötilassa on $1,3 kg / m^3$ ja v on äänen nopeus, joka kyseisissä oloissa on 332 m/s. Kuulokynnystä vastaavaksi intensiteetiksi saadaan noin

$I_0 = 10^{-12} W / m^2$ ja kipurajan intensiteetiksi $I = 1-3 W / m^2$. Kuuloalueen äänenpaine vaihtelee siis monimiljoonakertaisesti, joten on tarpeen määrittellä äänen voimakkuutta kuvaamaan logaritmiset suureet, jotka sopivat hyvin korvan kuulokäyttämisen ominaisuuksiin [5]. *Äänen intensiteettitaso* määritellään siis logaritmiyhtälöllä [5]:

$$L_I = 10 \lg(I / I_0) \text{ dB}. \quad (6)$$

Vakiokerroin yhtälön (6) edessä johtuu siitä, että yksikkönä käytetään desibeliä liian suureksi mielletyn belin sijaan. Äänen voimakkuutta laskettaessa voidaan käyttää myös äänen painetta, jolloin yhtälöiden (5) ja (6) avulla saadaan *äänienpaine* määritelmäksi [5]

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{p_0} \text{ dB}, \quad (7)$$

missä p on paineen tehollinen arvo pascaleina ja $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ on kuulokynnystä vastaava äänenpaineen tehollinen arvo, jota vastaava äänenpainetaso on 0 dB. Huomattavaa on, että molemmilla yhtälöillä (6) ja (7) saadaan samalle äänelle (suunnilleen [4]) sama tulos desibeleinä [5]. Yhtälöt pitävät likimäärin paikkansa kun referenssitaset ovat seuraavat: $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ja $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 (= \text{Pa})$. Äänenpainetasoa käytetään yleisimmin, koska se on helppo mitata melumittarilla [7]. Intensiteettiä käyttäen on kuitenkin helpompi laskea esimerkiksi usean samanaikaisen äänilähteen kokonaismelu [5]. Liitteessä 1 on taulukoitu tyypillisiä äänen intensiteettejä, tehollisia paineita ja äänenpainetasoja eri tilanteissa.

Äänitehotasolla mitataan äänilähteen kokonaismelua kaikkiin suuntiin [7], eli se on äänilähteen emittoima akustinen energia. Se on absoluuttinen arvo, eikä ympäristö tai etäisyys äänilähteestä vaikuta siihen. Ääniteho ja äänenpaine ovat siis äänen kaksi eri ominaisuutta, jotka kuitenkin usein sekoitetaan keskenään. Molemmista käytetään yleisesti termiä äänitaso [8], jolla tutkielmassani tarkoitan äänenpainetta.

Ääniteho mitataan wateissa tai pikowateissa ja äänitehotasot mitataan desibeleissä, jolloin 0 dB äänitehotaso vastaa yhden pikowatin äänitehoa. Nykyään äänitehotasot annetaan yleisesti beleinä (1 B = 10 dB), jottei tulisi sekaannuksia äänitehotasojen ja äänenpainetasojen välillä [7]. Äänitehotaso on siis vakio, mutta äänenpainetaso pienenee äänilähteestä etäännyttäessä. Tavallisesti äänitehotaso L_w on lukuarvoltaan suurempi kuin äänenpainetaso L_p . Tämä on nähtävissä seuraavista yhtälöistä [4]:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = L_p + 10 \cdot \log \frac{A}{A_0} = L_p + 8 + 20 \log \frac{r}{m}, \quad (8)$$

missä referenssisuureet ovat $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$, mikä on matalin ääni, jonka loistavakuuloiset ihmiset voivat havaita, ja $A_0 = 1 \text{ m}^2$. Viimeinen yhtälö pätee r-säteisen puolipallon pinnalla ja $L_w \approx L_p + 18 \text{ dB}$, kun $r = 3 \text{ m}$ [4].

Äänitehotasot oktaavialoittain mahdollistavat ympäröivän tilan äänenpainetasojen laskemisen. Äänenpainetasot voidaan laskea, kun on riittävästi tietoa äänilähteen äänitehotasoista ja tilan akustisista piirteistä. Kunnollinen akustinen laskelma vaatii äänitehotietojen saamista erikseen

kaikista kahdeksasta oktaavialasta. Jokainen oktaaviala on yleensä erilainen ja tilan akustiset piirteet vaihtelevat myös taajuuden mukaan. Äänenpainetasot vaihtelevat huomattavasti äänilähde-etäisyyden mukaan, ja vähenevät myös välissä olevien häiritsevien esteiden, tuulen ja ilmanvastuksen (*engl. air absorbtion*) vaikutuksesta. [8]

Laitteen äänitehotasot määritetään akustiikan laboratoriossa, useimmiten valmistajan toimesta. Äänenpainetasot voidaan mitata melumittarilla tai ennustaa etukäteen akustisella analyysillä. Koska ainoa tarkka äänidata, jonka valmistaja voi antaa, on ääniteho, haasteena onkin selvittää ympäristötekijät. Esimerkiksi moottorivalmistajat ilmoittavat tuotteidensa äänenpainetasot dB(A):na. Suluissa oleva "A" viittaa käytettyyn taajuuspainotukseen, josta enemmän luvussa 2.4. Moottorivalmistajien ilmoittamat luvut viittaavat äänenpainetasoihin, jotka voi havaita tietyllä etäisyydellä moottorista tietyssä ympäristössä, joka on yleensä oletettu avoimeksi kentäksi. Näitä arvoja pitäisi verrata samantyyppisten, yhtä kaukana olevien, samassa ympäristössä olevien moottorien melutasoihin. Ei pidä olettaa, että dB(A)-tasot esittelytekstissä (*engl. performance data*) olisivat ollenkaan samanlaiset kuin tasot käytännössä. Olosuhteista riippuen ne voivat ylittyä huomattavasti. Moottorista etäännyttäessä äänenpaine laskee, joten dB(A)-luokituksen yhteydessä on tärkeää kertoa etäisyys moottorista. [8]

Useimmat äänet ovat monimutkaisia, eivätkä niiden amplitudi ja taajuussisältö pysy vakiona [9]. Tarkempi kuva mitattavan äänen laadusta saadaan taajuusanalyysillä [4], jossa määritetään riippuvuussuhteet äänen energiatason ja taajuuden välillä. Näiden tietojen perusteella piirretty kuvaaja on nimeltään *äänispektri* tai *taajuusspektri* (*engl. sound spectrum*). Useimmiten suurin mielenkiinto kohdistuu ihmisen kuuloalueelle 20-20 000 Hz. Vaikka lähde olisi mahdollista analysoida taajuus taajuudelta, tämä olisi epäkäytännöllistä ja aikaavieppää. Siksi on kehitetty oktaavialojen ja kolmannesoktaavialojen (terssialojen) skaala. Jokainen ala kattaa tietyn verran taajuuksia ja jättää kaikki muut pois. Sana "oktaavi" on lainattu musiikin sanastosta, jossa se viittaa kahdeksan nuotin intervalliin. Oktaavissa korkeamman nuotin ja matalemmän nuotin taajuuksien välinen suhde on 2:1 [9].

Ihmiskorva kuulee toisia taajuuksia paremmin kuin toisia. Kuulokynnys kilohertsin taajuiselle äänelle on 0 dB, kun taas muutaman kymmenen hertsin taajuisille matalille äänille se on jo 50-60 dB [5]. Myös hyvin suurilla taajuuksilla kuulokynnys on korkeampi kuin 1 kHz:n taajuudella [2]. Täten on tarpeellista määritellä käsite *kuuluvuustaso* L_N (yksikkö phon eli fooni), jonka avulla

eritaajuisia ääniä voidaan verrata toisiinsa. Vertailutaajuutena käytetään yhtä kilohertsiä, 1 kHz, jolla kuuluvuustason lukuarvo on sama kuin äänenpainetason lukuarvo. Esimerkiksi äänenpainetason L_p ollessa 50 desibeliä, kuuluvuustaso L_N on 50 foonia. Muilla taajuuksilla äänenpainetason on oltava joko pienempi tai suurempi, jotta ääni kuuluttaisiin yhtä voimakkaana kuin yhden kilohertsin ääni. Esimerkiksi sadan hertsin ääni, jonka äänenpainetaso on 76 desibeliä, aistitaan keskimäärin yhtä voimakkaaksi kuin 70-desibelinen yhden kilohertsin ääni. Tällöin siis kyseessä olevan sadan hertsin äänen kuuluvuustaso on 70 foonia [5].

Kuuluvuustaso ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen äänen voimakkuuden aistimiseen. Esimerkiksi 60-foonista ääntä ei aistita kaksi kertaa voimakkaampana kuin 30-foonista. Siksi on määritelty äänen voimakkuuden aistimista paremmin kuvaava suure *kuuluvuus* N (yksikkö soone eli sooni). Äänen kuuluvuus on yksi sooni, jos äänen intensiteettitaso (äänenpainetaso) on 40 desibeliä ja taajuus yksi kilohertsi (kuuluvuustaso 40 foonia). Kuuluvuus on suoraan verrannollinen aistittuun äänen voimakkuuteen [5]. Kuuluvuustason ollessa yhtä suuri tai suurempi kuin 40 foonia kuuluvuus voidaan laskea yhtälöstä [5]:

$$N = 2^{(L_N - 40)/10} \text{ soonia.} \quad (9)$$

Pienillä kuuluvuustasoilla tämä yhtälö ei kuitenkaan päde. Soveltaen tietoa, että yhden kilohertsin äänelle kuuluvuustason lukuarvo on sama kuin äänenpainetason lukuarvo, voidaan yhtälöistä (7) ja (9) muodostaa korrelaatio kuuluvuudelle ja äänenpainetasolle [5]:

$$N = \frac{1}{16} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,6} \text{ soonia.} \quad (10)$$

Tämä yhtälö on voimassa tarkasti vain äänen taajuuden ollessa yksi kilohertsi, mutta sitä voidaan soveltaa likimääräisesti myös muilla taajuuksilla [5].

Yleisin vaihtelevan ympäristömelun voimakkuutta kuvaava suure on keskiäänitaso (samanarvoinen jatkuva äänitaso, ekvivalenttitaso, L_{Aeq} tai joskus L_{Ceq}). Se ilmoittaa keskimääräisen äänitason tarvittavan aikaikkunan osalta [2], ja se saadaan korvaamalla kuvaannollisesti mittausaikana muuttuva melu sellaisella vakioäänellä, jonka äänienergia on sama kuin todellisella muuttuvalla melulla. Käytännössä L_{eq} lasketaan yhtälön (7) avulla käyttämällä äänenpaineiden suhteelle aikakeskiarvoa. Seurauksena on integraali [5]:

$$L_{eq} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right] dB, \quad (11)$$

missä T on mittausaika.

Keskiäänitaso on käyttökelpoinen eritoten verrattaessa meluja, jotka ovat taajuussisällöltään samanlaisia, mutta joiden ajalliset vaihtelut ovat erilaisia. Se ei sovi pienitaajuisten melun eikä hyvin kapeakaistaisen melun vertailuun muiden melutyyppeiden kanssa. Keskiäänitasa vastaava suure on äänialtistustaso (L_{AE} tai L_{CE}), joka kuvaa Jauhiainen ym. [2] mukaan ”aikarajoitetun äänitapahtuman tuottaman meluannoksen tasoa”. Äänialtistustaso siis yhdistää yhdeksi mittaluvuksi lyhyiden tapahtumien enimmäisäänitason, keston ja lukumäärän. [2]

Äänenpainetasojen yhteenlasku ei ole aivan suoraviivaista. Esimerkiksi kahden äänilähteen aiheuttaessa 100 desibelin melun kokonaisäänenpainetaso ei ole 200 desibeliä vaan huomattavasti vähemmän. Oletetaan seuraavassa tarkastelussa, että äänilähteet lähettävät ääntä toisistaan riippumatta siten, etteivät ääniaallot ole samanlaisia eivätkä samanvaiheisia. Olkoon 1. äänilähteen lähettämän äänen intensiteetti I_1 ja 2. äänilähteen vastaavasti I_2 . Intensiteettitasot olkoot vastaavasti L_1 ja L_2 . Kokonaisintensiteetti on $I_{kok} = I_1 + I_2$, sillä tehot ja energiat lasketaan suoraan yhteen. Kokonaisintensiteettitaso L_{kok} ei kuitenkaan ole $L_1 + L_2$, vaan [5]:

$$L_{kok} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_1}{10dB}} + 10^{\frac{L_2}{10dB}} \right) dB. \quad (12)$$

Saatu tulos voidaan yleistää N äänilähteelle [5]:

$$L_{kok} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10dB}} \right) dB. \quad (13)$$

Yllä olevista yhtälöistä voidaan päätellä, että $L_1 + L_2 = L_1 + 3$ dB, jos $L_1 = L_2$ [5]. Jos siis jonkin pisteen ympäristössä on kaksi yhtä voimakasta äänilähdettä samalla etäisyydellä, niiden yhdessä synnyttämä äänenpainetaso on 3 dB korkeampi kuin toisen yksinään ja vastaavasti 10 dB korkeampi, jos äänilähteitä on kymmenen. Kaavasta (13) voidaan myös laskea, että äänenpainetaso nousee vain noin desibelin, jos voimakkaan äänilähteen rinnalle asetetaan toinen 5-6 desibeliä heikompi äänilähde [4]. Ihmiskorva pystyy erottamaan noin desibeliä suuremmat erot äänen voimakkuudessa. Tällöin L_1 saa olla korkeintaan 6 desibeliä pienempi kuin L_2 , muutoin L_1 peittyy, eikä eroa pelkkään L_2 :een havaita [5].

Äänen vaimeneminen etäisyyden funktiona voidaan laskea äänen intensiteetin avulla. Ääni lähtee etenemään pistemäisestä äänilähteestä palloaaltona ja sylinterimäisestä äänilähteestä sylinteriaaltona. Palloaallon intensiteetille etäisyydellä r saadaan lauseke [5]:

$$I = \frac{r_0^2 I_0}{r^2} \quad (14)$$

ja sylinteriaallon intensiteetille lauseke [5]:

$$I = \frac{r_0 I_0}{r} \quad (15)$$

2.3 Äänen elämyspiirteet

Ihmisellä on taipumus tulkita kuulemiaan ääniä niiden luonteen ja sisällön ohjaamina. Jauhiainen ym. puhuvatkin äänen monenlaisista *elämys- ja sisältöpiirteistä*, joiden moninaisuutena ympäristön äänet käsitetään. Kaikkiin ääniin liittyy yhtenä aistimuksen peruspiirteenä *elämysvoimakkuus*. Toinen ryhmä elämysmuuttujia liittyy äänen soinnillisuuteen, kuten sen selkeys (*engl. pitch strength*) ja sävelkorkeus (*engl. pitch*). Soinnillisuuden suhteen äänet voivat olla kohinatyyppisiä tai soivia. Äänet koetaan myös sointiväriältään (*engl. timbre*) erilaisiksi. Muita aistimuspiirteitä ovat esimerkiksi äänen karheus (*engl. roughness*) ja terävyys (*engl. sharpness*). [2]

Äänten elämyspiirteisiin kuuluu myös tunneperäisesti ladattuja ominaisuuksia. Voimakkaisiin ääniin liittyy äänekkyydestä johtuvaa epämiellyttävyyttä (*engl. discomfort*). Tämä tapahtuu normaalisti äänitason ylittäessä laajakaistaisilla äänillä noin 90 dB ja ääneksillä noin 110 dB. Äänet voivat kuitenkin olla hiljaisempinakin meluisia, epämiellyttävän häiritseviä, uhkaavia, outoja, pelottavia, vääristyneitä, säröytyneitä, epäsointuisia ja epävireisiä. [2]

Äänten elämysvoimakkuuteen vaikuttaa myös taajuusspektri, sekä lyhytkestoisten äänten (alle 200 ms) kohdalla kesto. Sävelkorkeus on riippuvainen ensisijaisesti taajuudesta, mutta myös äänenpainetasosta ja kestosta (lyhytkestoisilla ääniärsykkeillä). Äänen karheus riippuu ääniärsykkeen nopeista äänenpainetason ja taajuuden vaihteluista. Äänen terävyys on riippuvainen taajuusspektrin muodosta. Äänen meluisuus (*engl. noisiness*) ja häiritsevyys (*engl. annoyance*) ovat riippuvaisia äänenpainetason, mutta myös taajuussisällöstä ja ajallisista vaihteluista, osin äänilähteen laadusta ja myös äänen merkityssisällöstä. [2]

Sisällöllisesti äänet voidaan ryhmitellä esimerkiksi puheeksi ja musiikiksi. Ympäristön äänet opitaan tunnistamaan tutuiksi ääniksi, kuten luonnon (eläinten äänet, tuulen suhina), koneiden (auton moottori, kodinkoneet), hälytinlaitteiden (puhelimien soitto, herätyskello), asuinympäristön (askeleet, oven sulkeutuminen), työympäristön (tietokoneen tuuletin, koneet) ja vapaa-ajan ympäristön (pallopelin äänet, uimahallin äänimaisema) ääniksi. Äänet, joita emme pysty tunnistamaan ja joiden lähteestä emme ole varmoja, herättävät meissä luonnostaan epäluuloa, epävarmuutta ja jopa pelkoa. [2]

Ihmisen kuulojärjestelmä on Jauhiainen ym. [2] mukaan kolmella tavoin erotteleva. Ensimmäinen kuulojärjestelmämme äänen havaitsemisen herkkyys liittyy ympäristön äänitasoon. Kuuloherkkyys paranee muutaman desibelin hiljaisuudessa, kun ympäristön äänitaso on heikko. Jos ympäristön äänitaso on voimakas, kuuloherkkyys huononee. Toisaalta kuulojärjestelmä on selektiivisesti herkkä. Sen erotuskyky perustuu mahdollisuuteen erotella ääniä niiden elämyspiirteiden, kuten sävelkorkeuden ja äänekkyyden, perusteella ja kykyyn tunnistaa ääniä oppimiemme äänihahmotyyppien perusteella. Erottelemme esimerkiksi eri vokaali- ja konsonanttiäänteitä kieleemme ääneryhmien mukaisesti, tunnistamme tuttujen ihmisten ääniä ja tyyppillisiä ympäristön ääniä, kuten ovikellon ja puhelimen, koneiden, luonnon ja soittimien ääniä. Kolmas kuulojärjestelmän erottelukyky perustuu äänilähteen suunnan ja paikan erotteluun, mikä edellyttää riittävää kuulokykyä kummassakin korvassa. [2]

2.4 Äänen mittaaminen

Äänen/melun mittauksessa joudutaan Jauhiainen ym. [2] mukaan huomioimaan useita tekijöitä, muun muassa ääni-/melulähteen laatu, kuulijan/kohteen/mittauspisteen etäisyys äänilähteestä, mittauspisteen sijainti heijastaviin pintoihin nähden, mittausajankohta ja mittauksen kesto, mittauksessa käytetyt taajuus- ja aikapainotukset, sekä mittauksen määrä ja niiden edustavuus melulähteen ja tutkittavan vaikutuksen kannalta. [2]

Äänen voimakkuutta mitataan äänitasomittarilla (melumittarilla), jonka ohella saatetaan tarvita myös muita mittalaitteita esimerkiksi taajuusanalyysin ja –spektrin sekä jälkikaiunta-ajan mittausta varten [2]. Melumittarilla saadaan selville äänenpainetaso mittauspaikalla. Mittaukset suoritetaan laitteistolla, jossa mikrofoni muuntaa paineenvaihtelut sähköjännitteiksi. Vahvistettu jännite vaikuttaa suodattimen kautta mittariin, joka voi olla joko osoittava tai piirtävä. Mittarin asteikko laaditaan osoittamaan äänenpainetasoa [4].

Äänen/melun *äänekkyy*s riippuu äänen taajuussisällöstä, joten eritaajuisten äänien suhteellinen painoarvo otetaan mittauksessa huomioon. Jos kaikki taajuuskaistat huomioidaan samanarvoisina, on kyseessä lineaarinen äänenpainetaso mittausta. Koska kuulojärjestelmän herkkyys vähenee (kuulokynnyksen arvo äänenpainetasona kasvaa) taajuuden pienentyessä, painottamaton äänenpainetaso mittausta ei anna äänen voimakkuudesta sellaista käsitystä, joka vastaisi äänen äänekkyyttä/kuuluvuutta. Tämän takia eri taajuuksia painotetaan eri tavalla ja käytetään standardisoituja painotuskäyriä [2]. Mittareissa tämä tapahtuu käyttämällä suodatimia, joiden tarkoituksena on korjata mittarin lukema mahdollisimman lähelle korvan aistimaa äänen voimakkuutta. Kuuloaistimus riippuu sekä äänen taajuudesta että äänenpainetasosta. Täten melumittarin suodatuksenkin pitäisi muuttua äänen voimakkuuden ja taajuuden muuttuessa. Riittävä tarkkuus saavutetaan kuitenkin käyttämällä muutamia suodatinta, esimerkiksi kansainvälisen standardointijärjestön (ISO) määrittelemiä A-, B- ja C-suodatimia [5]. Painotuskäyrä A mallintaa normaalikuuloisen taajuudesta riippuvia herkkyyseroja noin 60 foonin äänekkyytasolla. Painotuskäyrä C on suurin piirtein taajuudesta riippumaton keskitaajuuksilla noin sadan foonin tasolla. Jälkimmäistä voidaan käyttää mm. voimakkaiden impulssiäänten mittauksissa [2]. Alun perin A-suodatusta käytettiin, kun äänen kuuluvuustaso oli alle 55 foonia, B-suodatusta välillä 55-85 foonia ja C-suodatusta yli 85 foonin äänille. Nykyisin A-suodatin on yleisimmin käytetty ja sitä käytetään riippumatta äänen voimakkuudesta. Käytetty suodatin merkitään yleisesti äänenpainetaso yksikköön, esimerkiksi dB(A) tarkoittaa A-suodatuksella mitattua melutasoa [5].

Taajuusanalyysiä tehtäessä painotussuodatin korvataan kaistasuodattimella [4], jonka kaistanleveys (*engl. bandwidth*) on murtolukuinen (*engl. fractional*) osamäärä suodattimen keskitaajuudesta. Esimerkiksi 1/3-oktaavisella suodattimella (terssisuodattimella), jonka keskus on 1000 hertsiä, on 260 hertsin kaistanleveys. Kaistanleveys (suhteessa normalisoituun keskitaajuuteen eli ykköseen) on laskettu käyttäen yhtälöä $2^{1/N} - 1$. Tyypillisesti käytetyt kaistanleveydet ovat (pääasiassa akustisiin ja värähtelyanalyysiin) 1/1-, 1/3-, 1/12- ja 1/24-oktaavit [10]. Tavallisimmat suodattimet ovat oktaavi- ja terssisuodattimet. Edellisen kaistanleveys on oktaavi ja jälkimmäisen 1/3-oktaavia. Erikoistutkimuksissa käytetään myös ns. kapeakaistasuodatimia [4].

Taajuuspainotuksen lisäksi joudutaan valitsemaan aikapainotus melulähteen mukaisesti. Standardin mukaan aikapainotus S (slow) antaa äänitaso (esimerkiksi L_{AS}) keskiarvona kahden sekunnin kestoiselta aikajaksolta. F (fast) vastaavasti kuvaa äänitasoa (esimerkiksi L_{AF}) 250 ms ajalta.

Kolmas, aikaisemmin käytetty aikapainotus on I (impulse), jonka aikavakio on 35 ms. Hetkellinen huippuäänitaso (L_{Apeak} tai L_{Cpeak}) voidaan myös mitata, mutta se ei varsinaisesti ole aikapainotus. Jos A-äänitason kanssa käytetään aikapainotusta, se soveltuu tasaisen melun mittaukseen. Silloin voidaan mitata myös enimmäistaso (L_{Amax}), joka on mittausaikana vallinnut suurin A-äänitaso. [2]

Edellä mainitun mukaisesti melumittauksissa on otettava huomioon myös muun muassa melualtistuksen kesto, vuorokaudenaika, yksittäisten melutapahtumien lukumäärä ja ajallinen jakauma. Jauhiainen ym. [2] mukaan tarvittaessa on huomioitava myös laajakaistaiseen meluun liittyvät impulssiäänet, voimakkaat matalat äänet, voimakkaat äänekset tai kapeakaistaiset äänet. Melualtistuksen erikoispiirteiden huomioimista ja painottamista varten onkin kehitetty useita tunnuslukuja. Lukuisten erilaisten mittalukujen käyttö kuitenkin vaikeuttaa melututkimusten vertailua keskenään. Jauhiainen ym. [2] mukaan on suositeltavaa pitäytyä tavanomaisissa tunnusluvuissa eli taajuuspainotetussa keskiäänitasossa ja aikapainotetuissa äänitasoissa [2]. Melun haittoja ei voida mallintaa tyhjentävästi monipuolisellakaan mittausjärjestelyllä ja analysoinnilla, sillä melun vaikutuksia arvioitaessa on otettava huomioon muitakin kuin melun fysikaalisia tekijöitä. Tästä lisää luvussa 2.7, jossa käsittelen melun häiritsevyyttä.

Tanskan tuulivoimateollisuuden kotisivujen [1] mukaan nykyisin suositellaan, että melutasot mieluummin laskettaisiin kuin mitattaisiin. Yleisesti ottaen on paljon helpompaa laskea mahdollinen ääni kuin mitata sitä käytännössä. Ääntä on vaikeaa mitata, koska mitattavan äänitason on oltava noin 10 dB(A) taustamelua voimakkaampi, jotta ääni voitaisiin mitata kunnolla. Taustamelun äänitaso kasvillisuudesta, linnuista ja liikenteestä on kuitenkin usein yli 30 dB(A). Useimmiten paikalliset viranomaiset luottavatkin mieluummin laskuihin kuin mittauksiin myöntäessään suunnittelulupia tuulivoimaloille [1].

2.5 Äänilähteet ja äänen vaimeneminen

Ympäristön äänet voidaan karkeasti luokitella laaja- ja kapeakaistaisiin. Laajakaistaisen äänen äänenpainetaso on vakio kaikilla taajuuksilla. Esimerkiksi ns. valkoinen kohina on laajakaistaista ääntä, jonka äänispektrissä kaikki taajuudet ovat suunnilleen yhtä voimakkaita [11].

Kapeakaistaisessa äänessä äänienergia sen sijaan keskittyy jollekin rajoitetulle taajuuskaistalle. Äänes on ääriesimerkki kapeakaistaisesta äänestä – se koostuu vain yhdestä taajuudesta. Ääneksiä lukuun ottamatta kaikki äänet ovat seosääniä. Ne koostuvat useista eri taajuuksista, joiden

äänepainetasot usein vaihtelevat hetkestä toiseen [2].

Ympäristön äänet voidaan toisaalta luokitella myös lyhyt- ja pitkäkestoisiin. Lyhytkestoista ääntä sanotaan myös impulssiääneksi. Sen kesto on määritelmällisesti alle sekunnin. Esimerkiksi isku, paukahdus ja räjähdys voivat aiheuttaa impulssiääniä. [2]

Tuulivoimalaa käsitellään melumalleissa yleisesti pistelähteenä. Konehuone onkin lähes pallomainen säteilijä eli pistelähde, mutta lapapinnat ovat pyöriviä sylinteriäänilähteitä ja tornirunko staattinen sylinteriäänilähde [3]. Tämä erottelu on merkittävä, sillä se vaikuttaa äänen vaimentumiseen etäisyyden funktiona. Yhtälöstä (14) havaitaan, että pistemäisen äänilähteen intensiteetti pienenee neljäsosaan etäisyyden kaksinkertaistuessa. Tämä vastaa kuuden desibelin muutosta intensiteettitasossa. Sylinteriäänilähteen intensiteetti vaimenee lineaarisesti etäisyyden mukaan, eli intensiteettitaso pienenee vain kolme desibeliä etäisyyden kaksinkertaistuessa.

Ääniaalto vaimenee myös muista syistä kuin yllä esitellystä aallon leviämisestä. Ensinnäkin on otettava huomioon kasvillisuuden, esteiden, rakennusten ja maan aiheuttamat vaimennukset [3]. Ääniaallon vaimenemista aiheuttaa myös ääniaallon *taittuminen*, joka liittyy äänen nopeuden riippuvuuteen ilman eri kerrosten lämpötilasta. Ääni taittuu sen saapuessa toisenlämpöiseen ilmaan, jossa äänen nopeus on eri. Samoin vaikuttaa tuuli, jonka nopeus kasvaa maanpinnasta ylöspäin mentäessä [5]. Tuuli myös kantaa melua mukanaan, jolloin tuuliruusu (kompassimuodossa esitetty todennäköisyysjakauma tuulensuunnalle) on merkittävä meluennustetyökalu tuulivoimaloita suunniteltaessa [1]. Ääni vaimenee myös ns. *viskositeettivaimennuksessa*, joka tarkoittaa ääniaallon energian muuntumista lämpöenergiaksi väliaineen kitkan vuoksi. Syntyvä lämpöenergia leviää väliaineessa eteenpäin johtumalla, kuljettumalla tai säteilemällä. Näin ääniaallon energia pienenee edelleen *lämmönsiirtymisestä johtuvan vaimennuksen* vuoksi. Merkittävin syy äänen vaimenemiseen on kuitenkin ilmassa olevien happi- ja vesimolekyylien vuorovaikutuksesta johtuva *molekyylivaimennus*, joka riippuu ilman kosteudesta. Kuiva ilma vaimentaa ääntä melko vähän, kun taas 20-30 prosentin suhteellisilla kosteuksilla saavutetaan maksimivaimennus. Suhteellisen kosteuden siitä kasvaessa vaimennus heikkenee lineaarisesti. Mitä korkeampi äänen taajuus on, sitä suurempi on äänen vaimennus. Tämä havaitaan esimerkiksi vertailtaessa lähellä ja kaukana iskevää salamaa. Ensin mainittu on varsin voimakas räjähdys, kun taas jälkimmäinen kuullaan matalana kuminana [5].

Äänilähteestä lähtevää ääntä kutsutaan *emissioääneksi*, ja jonnekin kantautunutta ääntä

immissioääneksi. Jälkimmäinen voidaan laskea edellisestä, kun tiedetään äänen kantautumisolosuhteista tarpeeksi. Tätä käsitellään lisää luvussa 3.6 (Tuuliturbiinimelun laskeminen).

2.6 Melun häiritsevyys

Jauhiainen ym. [2] mukaan ympäristömelun yleisin haittavaikutus on sen *häiritsevyys* (engl. *annoyance*), jolla tarkoitetaan ”*tekijää, jonka yksilö tai ryhmä kokee kielteisenä, epämiellyttävänä ja ei-toivottuna*”. Häiritsevyyden aste on siis yksilöllinen kokemus, joka saattaa ilmetä paitsi altistuksen aikana, myös sen jälkeen tai odotettavissa olevaa melua ennen. [2]

Häiritsevyyden suhdetta äänen fysikaalisiin muuttujiin käsitellään *psykoakustiikassa*.

Häiritsevyyteen vaikuttavat äänen äänitason lisäksi Jauhiainen ym. [2] mukaan ”*äänen fysikaalinen taajuussisältö ja ajalliset muuttujat, joita vastaavia elämyksellisiä piirteitä ovat mm. äänen terävyys, vaihteluvoimakkuus ja karheus, äänen koetut kielteiset ja epämiellyttävät elämyspiirteet sekä äänen merkityssisältö*”. Häiritsevyyttä ei voida mitata akustisin menetelmin, vaan on kuultava melulle altistuneen henkilön oma kokemus melun häiritsevyydestä. [2]

Häiritsevyyteen vaikuttavat täten Jauhiainen ym. [2] mukaan

1. ”*melun akustiset ominaisuudet*
2. *tilanteeseen ja olosuhteeseen liittyvät tekijät, kuten altistuneen asuinolot ja sosioekonomiset tekijät,*
3. *yksilön oma mahdollisuus vaikuttaa melulähteeseen (vertaa itse aiheutettu melu ja naapurin aiheuttama melu) ja altistetun meneillään oleva toiminta, sekä*
4. *meluun liittyvät psykologiset tekijät, esimerkiksi melulähteen tunnistamismahdollisuus ja suhtautuminen melulähteeseen sekä siihen liittyvät ennakoasenteet ja pelot.*” [2]

Häiritsevyyteen vaikuttavia muita kuin fysikaalisia muuttujia kutsutaan *modifioiviksi tekijöiksi*.

Niiden vuoksi on vaikea määrittää yleispätevää annos-vastesuhdetta melun äänitasolle ja häiritsevyyden asteelle. Suurissa väestötöksissä erilaisten modifioivien tekijöiden vaikutus kuitenkin tasaantuu, minkä vuoksi voidaan käyttää määrätyillä ehdoilla tiedeyhteisön todentamia annos-vastesuhteiden keskiarvoja ympäristömelun haittavaikutuksia arvioitaessa [2].

2.7 Melun häiritsevyyden mittaus ja arviointi

Melun häiritsevyyttä voidaan arvioida vain psykoakustisesti yksilö- tai väestötutkimuksilla, joiden tavoitteena on määrittää annos-vastesuhde ilmoittamaan häiritsevyysoimakkuuden suhdetta (lähinnä) melun äänitasoon. Luodaan siis häiritsevyyttä kuvaava funktio, jonka muuttujana on melun äänitaso. Tutkimukset osoittavat, että häiritsevyyttä esiintyy vähäisissä määrin jo noin 20 dB:n tasolla ja äänitason kasvaessa häiritsevyys kasvaa monotonisesti ilman epälineaarisia taitekohtia. Täten ei ole mahdollista määrittää ympäristömelulle selkeitä raja-arvoja annos-vastesuhteiden perusteella. [2]

Yksilölliset erot häiritsevyydessä ovat suuria. Erot selittyvät osaksi ihmisten erilaisella *meluherkkyydellä*. Meluherkkyys on psykofysiologinen ominaisuus, jonka ominaispiirteitä on viime aikoina alettu ymmärtää paremmin. Muutoin erot häiritsevyydessä selittyvät edellisessä luvussa listattujen melualtistettujen olosuhteisiin, tilanteeseen ja sen hetkiseen toimintaan liittyvien tekijöiden eroilla. Jauhiainen ym. [2] kertoo, että selvitysten mukaan melun äänitaso selittää yksin vain viidenneksen häiritsevyydestä. Tämän vuoksi häiritsevyyden kartoitus melualtistettujen omien vastausten perusteella on välttämätöntä. [2]

Ympäristömelun häiritsevyyсарvioinneissa melun fysikaalinen voimakkuus annetaan yleensä keskiäänitasona (L_{Aeq}), joka Jauhiainen ym. [2] mukaan sopii hyvin esimerkiksi melko tasaisen ja laajakaistaisen liikennemelun mittaamiseen. Tuulipuistojen tapauksessa melulähteitä on useita, jolloin voidaan käyttää Zwickerin [12] esittämää usean äänilähteen aiheuttaman kokonaisäänekkyuden arviointimenetelmää (ISO 532B). Jauhiainen ym. [2] mukaan käytännössä usein voimakkaimman (dominoivan) melun äänitaso on määräävä kokonaisaltistusta arvioitaessa. Jälleen on paikallaan huomauttaa, että pelkän äänitason huomioiminen ei anna oikeaa kuvaa häiritsevyydestä, joka riippuu myös muun muassa melun lähteestä ja luonteesta. Tästä mielenkiintoisen esimerkin tarjoavat eri liikennemelujen häiritsevyyden erot. Nimittäin vaikka lentomelulle, tieliikennemelulle ja raideliikennemelulle oletetaan sama keskiäänitaso, lentomelu aiheuttaa kolmikosta voimakkaimman häiritsevyyden ja raideliikennemelu vähäisimmän [2].

Keskiäänitasojen lisäksi käytetään muun muassa meluhuippujen enimmäistasoja (L_{max}) impulssimaisten melualtistusten tapauksissa [2]. Impulssimelussa on huomionarvoista myös se, ettei korva sopeudu siihen niin kuin tasaiseen ja hillittyyn taustameluun [13].

Melun taajuusspektriin liittyvät muuttujat vaikuttavat myös häiritsevyyteen. Aina ei kuitenkaan ole yksinkertaista mallia niiden mittaamiseksi, arvioimiseksi ja huomioimiseksi. Melun kapeakaistaisuus lisää usein häiritsevyyttä, jolloin keskiäänitasoon lisätään korjausarvona esimerkiksi 5 dB. Jauhiainen ym. [2] mukaan voimakas pienitaajuinen melu ja tärinä aiheuttavat häiritsevyyttä, jota voi pahentaa paineen tunne korvassa ja puheen erotuskyvyn huonontuminen. C-painotetun äänitason mittaus on usein tarpeen pienitaajuisen melun todentamiseksi. [2]

Melun esiintymisaika ja melutapahtumien lukumäärä voivat myös olla huomionarvoisia melun häiritsevyyttä arvioitaessa. Yöllä melu koetaan häiritsevämpänä kuin päivällä. Melutapahtumien lukumäärä vaikuttaa häiritsevyyteen etenkin silloin, kun lukumäärä on pieni. [2]

2.8 Melun häiritsevyydestä johtuva haitta

Melu on merkittävä ympäristöongelma. Se on Jauhiainen ym. [2] mukaan yleisin ympäristön laatua heikentävä ja terveyshaittoja aiheuttava tekijä. Myös viranomaisten saamista ympäristöä koskevista yhteydenotoista ja valituksista melu aiheuttaa suurimman osan. Ihmiset reagoivat meluun eri tavalla. Melun vaikutukset ovat erilaisia eri ikäluokissa sekä ilmenevät erilaisina naisilla ja miehillä. Melun torjuntaa ei ole Jauhiainen ym. [2] mukaan tähän saakka arvostettu riittävästi. Melun vaikutukset ovat olleet päätöksentekijöille tuntemattomia tai niitä on vähätelty. Melun pitkäaikaisvaikutuksista tiedetään vähän, ja niinpä meluhaitat usein mielletään vain altistusajan kestäviksi ja tilapäisiksi [2].

Elinympäristön äänet vaikuttavat ihmisen elimistön toimintoihin joko kuuloaistin kautta tai suoraan. Osa vaikutuksista on haitallisia ja ne voivat aiheuttaa pysyviä muutoksia, toiminnanvajausta ja haittaa. Melun häiritsevyys on kielteisenä kokemuksena toiminnanvajauksen kaltainen tekijä ja siitä seuraa sairauden aiheuttaman toiminnanvajauksen tavoin haittoja. Vaikutukset ulottuvat melualtistetun elämänlaatuun ja suoritus-, työ- ja toimintakykyyn, jonka aleneminen voi pahimmillaan huonontaa toimeentuloa ja elintasoja sekä edesauttaa syrjäytymistä. Vaikutus voi olla myös välillinen melun mahdollisesti aiheuttaman asuinkiinteistön arvonlaskun myötä. Häiritsevyyden on useissa tutkimuksissa todettu lisäävän aggressiivisuutta sekä vähentävän toisten huomioon ottamista ja auttamishalua. Täten häiritsevä melu voi haitata ja kärjittää ihmissuhteita. [2]

Häiritsevä melu muuttaa elintoimintoja. Se häiritsee nukahtamista ja unta, rentoutumista, keskittymistä ja muita kognitiivisia toimintoja, kuulemista ja viestintää, sekä vegetatiivisia elintoimintoja, kuten sydän- ja verenkiertoelimistön toimintaa. Häiritsevyydestä voidaan puhua myös silloin, kun kokija itse ei havaitse edellä mainittuja muutoksia elintoiminnoissaan. Häiritsevä melu voi vaikuttaa myös epäsuorasti esimerkiksi lisäämällä stressiä, joka puolestaan pitkään jatkuessaan huonontaa terveyttä. Toisaalta elintoimintojen muutoksilla saattaa olla häiritsevyyttä lisäävä vaikutus, jolloin ollaan noidankehässä. [2]

Yhdysvaltalainen pediatri Nina Pierpont esittää syksyllä 2009 ilmestyvässä kirjassaan *Wind Turbine Syndrome*, että tuuliturbiinien värähtely ja melu infraäänistä ultraääniin aiheuttavat turbiinien lähiseutujen asukkaissa noin 12 eri oiretta, muun muassa rytmihäiriöitä, unen häiriintymistä, päänsärkyä, tinnitusta, pahoinvointia, näkökentän hämärtymistä, paniikkikohtauksia ja yleistä ärtyneisyyttä. Hän kutsuu tätä ilmiötä nimellä *tuuliturbiinisyndrooma* (engl. *wind turbine syndrome*) [14]. Hän selittää syndrooman erääksi päätekijäksi tuuliturbiineista tulevat matalataajuiset infraäänit, jotka hänen mukaansa vaikuttavat ihmisen tasapainoelimiin. Seurauksena ihmiskeho luulee olevansa liikkeessä, jolloin infraäänistä aiheutuva oireilu muistuttaa merisairautta [15]. Britannian tuulivoimayhdistys BWEA on jo kuitenkin tyrmännyt Pierpontin väitteet huomauttamalla, että ne perustuvat kymmenen määrittelemättömässä paikoissa asuvan perheen eli 38 henkilön haastatteluun [14].

2.9 Toimenpiteet häiritsevyyden vähentämiseksi

Melulle altistuneet ihmiset voivat vähentää kokemaansa häiriötä monella tavalla. He voivat esimerkiksi sulkea ikkunoita tai käyttää miellyttävänä koettua peiteääntä, vaikka musiikkia. Melusta voi myös valittaa viranomaisille ja pyrkiä täten vaikuttamaan melun alkulähteeseen. Eräs äärimmäinen keino on alueelta pois muuttaminen, mikä on Jauhiainen ym. [2] mukaan meluisilla alueilla yleistä. [2]

Melun häiritsevyyttä voidaan ennaltaehkäistä viranomaisten toimesta huolellisella kaavoituksella, tie- ja raideliikennemeluestein sekä rakennusten äänieristystä ja suunnittelua parantamalla. Rakennusten äänieristys ei kuitenkaan Jauhiainen ym. [2] mukaan aina tuota toivottua tehoa, koska osa asukkaista pitää ikkunoita auki eikä rakentamisen laatu vähennä melun äänitasoa eikä häiritsevyyttä parvekkeilla, terasseilla ja piha-alueilla. [2]

2.10 Melulainsäädäntö

Korkeatasoisten tuulivoimaloiden melu ulkotiloissa on yleensä yli kolmensadan metrin etäisyydellä merkittävästi alle 45 dB(A). Se on asetettu Tanskan lainsäädännössä melun sallituksi ylärajaksi avoimella maaseudulla. Tanskassa rakennetuilla alueilla, joilla on paljon taloja, yläraja on 40 dB(A). Tähän melurajaan on todistetusti päästy markkinoilta löytyvillä turbiineilla. Melulainsäädäntö vaihtelee maittain, mutta käytännössä samaa tuulivoimalakonemallia voidaan käyttää kaikkialla. [1]

Taustamelu vaihtelee paikallisten olosuhteiden mukaan, mikä otetaan huomioon määritettäessä etäisyyttä turbiinien ja lähimmän asutuksen välillä. Taustamelu suhteutetaan tuulennopeuteen, tuulen vuorovaikutukseen rakennusten, puiden ja aitojen kanssa sekä muihin tekijöihin, kuten tieliikennemeluun ja maataloustyöääniin [17].

Suomessa Valtioneuvosto on antanut päätöksen melutason ohjearvoista (993/1992). Se koskee myös tuulivoimaloista syntyvää melua. Ohjearvot löytyvät liitteestä 2. Jos melu on impulssimelua eli luonteeltaan iskumaista tai kapeakaistaista, mittaus- tai laskentatulokseen lisätään 5 dB ennen vertaamista ohjearvoon [18]. Päätöstä ei sovelleta teollisuus-, katu- ja liikennealueilla eikä melusuoja-alueiksi tarkoitetuilla alueilla [19]. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö julkaisi terveysuojelulain (734/94) nojalla alkuvuodesta 1997 uudet sisätilojen melutasojen ohjearvot [20].

Vuonna 2000 voimaan tulleeseen ympäristönsuojelulakiin tehtiin vuonna 2004 lisäyksiä, jotka määräävät, että meluselvityksessä tulee kuvata melun tunnuslukuja käyttäen yleisesti alueen nykyinen ja tuleva melutilanne, mukaan lukien hiljaiset alueet. Lisäksi tulee esittää melulle altistuvien henkilöiden määrä ja alueella olevien asuinrakennusten määrä. Laissa tosin vaaditaan meluselvityksen laatimista vain isoista väestökeskittymistä, vilkkaasti liikennöidyistä teistä, rautateistä ja siviililentoasemista [21]. Maankäyttö- ja rakennusasetuksen (10.9.1999/895) [22] mukaan melu, jolle rakennuksessa tai sen lähellä ovat altistuvat, tulee rajoittaa tasolle, joka ei vaaranna terveyttä ja antaa mahdollisuuden nukkua, levätä ja työskennellä hyväksyttävissä olosuhteissa.

Suomessa on myös asetettu työryhmä miettimään mahdollisuuksia vähentää ympäristömelun syntyä ja melulle altistumista. Työryhmän työhön ovat kuuluneet muun muassa suositukset hiljaisten

alueiden yleistutkimuksesta sekä kartoitusohjelmista eri paikkakunnilla. Hiljaisten alueiden kriteerit täyttyvät monessa tärkeässä tuulivoimatuotannon kannalta potentiaalisessa kohteessa, mikä on lisännyt kiinnostusta myös tuulivoimameluselvityksiä kohtaan. [3]

Lainsäädännöstä mainittakoon vielä laki eräistä naapuruussuhteista (13.2.1920/26), ja sen toinen pykälä (16.8.1958/371), jossa kielletään tuulimyllyn sijoittaminen maaseudulla ilman naapurin lupaa viittätoista metriä lähemmäksi hänen maataan tai kolmeakymmentä metriä lähemmäksi hänen puutarhaansa, pihamaataan, vuokratonttiaan tahi omalla maalla olevaa rakennustaan. Kuitenkin, jos naapuruussuhde on syntynyt vasta tuulimyllyn valmistumisen jälkeen, ei naapurilla ole oikeutta vaatia tuulimyllyä purettavaksi tai siirrettäväksi. [23]

3. Tuulivoimaloiden melu

Tuulivoimaloiden ääni johtuu pääasiallisesti kahdesta syystä. Koneiston käyntiäänet muodostavat *mekaanisen melun* ja ilmavirran vuorovaikutus lapojen kanssa muodostaa *aerodynaamisen melun* [16]. Aerodynaaminen melu kattaa melun voimakkuudesta noin 65 prosenttia ja mekaaninen melu 35 prosenttia, mistä noin 30 prosenttiyksikköä johtuu vaihteistosta. Aerodynaaminen melu on hallitsevin lapojen suuren vaikutuspinta-alan ja melun jaksollisen vaihtelevuuden vuoksi. Aerodynaaminen melu on laajakaistaista (noin 60–4000 Hz) ja mekaaninen melu hieman kapeakaistaista [3].

Tuuliturbiinien mekaanista melua voidaan kuvata huminaksi (*engl. hum*) tai ininäksi (*engl. whine*) yhdellä taajuudella (*engl. steady pitch*). Tuuliturbiinimallista ja tuulen nopeudesta riippuen aerodynaamista melua voidaan kuvata surisevaksi (*engl. buzzing*), humahtavaksi (*engl. whooshing*), pulssinomaiseksi (*engl. pulsing*) tai jopa sihiseväksi (*engl. sizzling*). Alatuuleen (*engl. downwind*) sijoitettujen turbiinien tiedetään aiheuttavan humahtavan (*engl. thumping*) äänen, kun lavat ohittavat tornin. Uudenaikaisissa isoissa tuuliturbiineissa lapa ohittaa tornin taajuudella 1 krt/s. [24]

Melun taso on yleisesti ottaen verrannollinen voimalan kokoon [17]. Valmistajat ilmoittavat tuulivoimaloilleen kansainvälisten standardien mukaiset teoreettiset dB(A)-äänepainetasot, jotka perustuvat oletukseen, että kaikki melu lähtee tuulivoimalan keskipisteestä, vaikka käytännössä se lähtee koneen, tornin ja roottorin koko pinnasta. Äänesten syntyminen on yleensä saatu täysin estettyä uudenaikaisissa tuulivoimaloissa [1].

Uudenaikaisten tuulivoimaloiden melutasot ovat tyypillisesti 98–104 dB(A) tuulen nopeuden ollessa 8 m/s [25] tai ”yleensä välillä 90 ja 100 dB(A)” [24] (tuulen nopeutta ei mainita). Tämä luku ei sinänsä ole kiinnostava, sillä se kertoo vain lähtevän äänenpaineen. On siis hyödyllistä ilmoittaa äänenpaineet erilaisilla etäisyyksillä voimalasta. 40 metrin päässä turbiinista lähtömelutaso 90-100 dB(A) on vaimentunut arvoihin 50–60 dB(A), mikä vastaa keskustelun melutasoa. Etäisyydellä 500 m alatuuleen ekvivalenttiäänepainetaso on 25–35 dB(A) [24]. Meteorologiset ja maasto-olot vaikuttavat vaimentumiseen, joten melutaso voi saada muitakin kuin yllä esitettyjä arvoja [25]. Yleisesti ottaen turbiinin aiheuttamaa ääntä ei voi enää normaalissa maastossa (*engl. landscape*) ja ympäristön taustamelun vallitessa kuulla 300-400 metrin päässä tuuliturbiinista [24].

Tuulivoimaloiden melun äänenpainetasot ovatkin suhteellisesti tarkasteltuna vaihteita. Näin matalia äänenpainetasoja ei pidetä ongelmana, kun melulähteinä ovat tieliikenteen ja lentokoneiden kaltaiset melulähteet. Silti kaksi seikkaa lisää tuulivoimamelun häiritsevyyttä: äänen luonne ja melulähteen selvä visuaalinen havaittavuus. Ääni on amplitudimoduloitunutta (*engl. amplitude modulated*) roottorin lapojen tahdin mukaan, mikä aiheuttaa rytmikkään suhahtavan äänen. Tällaisten äänien on todettu olevan helpommin havaittavissa tasaisiin ääniin verrattuna. Tällaiset äänet ovat myös mahdollisesti häiritsevämpiä. Maalaismaisemassa turbiinit ovat huomiota herättäviä jo kokonsa puolesta ja lapojen pyörimisen tuodessa liikettä muutoin varsin staattiseen ympäristöön. [25]

Aistihavaintojen synestesia tarkoittaa sitä, miten eri aistien välittämät aistimukset sekoittuvat havainnossa. On hyvin harvinaista, että ihmiset osaavat kysyttäessä eritellä eri aistien havainnot. Jos puutarha-aitojen valintakriteerinä käytettäisiin pelkästään näköaistihavaintojen miellyttävyyttä, valinta olisi varmaankin piikkilanka-aita sen hyvän toimivuuden kannalta. Piikkilangan kuitenkin sanotaan näyttävän pahalta, koska se *tuntuu* pahalta kosketusaistin perusteella. Äänimaisema on myös hyvin erilainen silmät kiinni kuin silmät auki, sillä ilman visuaalista havaintoa ei voi samalla tavoin paikantaa äänilähdettä ja äänilähteen kokee eri tavalla. Tuulivoimalan visuaalisen ilmeen häiritsevänä kokeminen vaikuttaa myös äänen negatiivisena kokemiseen.

Tuulivoimaloiden aerodynaamisen melun vähentämiseen on kiinnitetty paljon huomiota. Tästä kertoo esimerkiksi se, että Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy:n vuonna 2000 toteuttamassa Kokkolan edustalle suunnitellun tuulivoimalan meluselvityksessä pidettiin lähtöoletuksena, ettei lähtömelutaso nouse suoraan samassa suhteessa voimalan tehon kasvaessa vaan jossakin määrin loivemmin. Täten oletettiin, ettei toteutusvaiheessa 5 MW voimaloiden tuottama lähtömelutaso olennaisesti eroaisi silloisista 1-3 MW voimaloista [20]. Hyödyllinen yleiskatsaus melun vähentämiseen on Legertonin kirjassa [26]. Mittausmenetelmien ja äänen etenemisen mallintamisen parantamisesta kertovat Kragh ym. [27].

On mielenkiintoista havaita, että kaikkien uusien tanskalaisten turbiinimallien ääniemissiotasot osuvat samojen arvojen ympärille. Tämä tuntuisi viittaavan siihen, että uusissa malleissa on saatu kasvatettua lavan kärjen pyörimisnopeutta (mikä kasvattaa turbiinien sähköntuottoa) ja nopeuden kasvamisen aiheuttama melun kasvu on kompensoitu käyttämällä hiljaisempia lavan kärkiä. [1]

Meluongelmaan on pureuduttu jo 1990-luvun alussa, jolloin esimerkiksi Tanskassa tehtiin

selvityksiä ja kattavia ohjeistuksia. Englannissa tehtiin vuonna 1997 suuri tuulivoimameluselvitys, jonka pohjalta on yhtenäistetty muun muassa mittausstandardeja (IEC) tuulivoimalaitoksen meluarvon määrittämiseksi. Pohjoismaissa on 2000-luvun alun tutkimusten perusteella johdettu yksinkertaisia laskentayhtälöitä melutason ja suojaetäisyyksien arvioimiseksi. Maailmanlaajuisesti tutkimukset melun vaimentamisen mahdollisuuksista ovat keskittyneet etenkin edellä mainittuun lavankärkiprofiilin optimointiin hyötysuhdetta heikentämättä. [3]

Taustamelutasot ovat tärkeä tekijä arvioitaessa, havaitaanko tuuliturbiinien äänitaso meluna [24]. Mikään maasto ei ole koskaan täysin hiljainen. Linnut ja ihmisten toiminnot aiheuttavat ääntä ja tuulen äänet lehdistä, pensaikoissa, puissa, mastoissa jne. todennäköisesti tukahduttavat alleen kaiken potentiaalisen äänen tuuliturbiineista tuulen nopeuksilla 4-7 m/s ja enemmän. Tämä tekee tuuliturbiinien äänen tarkan mittaamisen erittäin vaikeaksi. Tuulen nopeuksilla 8 m/s ja enemmän uudenaikaisten tuuliturbiinien ääni-immissiosta puhuminen muuttuu yleensä mielettömäksi, sillä taustamelu useimmiten peittää täysin alleen turbiinin äänen [1]. Maaseudulla ja haja-asutusalueilla tuuliturbiinien äänet ärsyttävät matalilla äänitehotasoilla, koska siellä on vähemmän taustamelua kuin urbaaneilla alueilla. Kun tuuli heikkenee, usein öisin, tuuliturbiinien melu tulee selvemmäksi [24].

Yleisesti ottaen ylätuulen puolella kuullaan hyvin vähän tuuliturbiinien ääntä. Tuuliruuus on siis tärkeä melun mahdollisten vaikutussuuntien kartoittamiseksi [1]. Björkmanin tutkimuksissa [28] (joista lisää luvussa 3.5.) suurimmat melutasot saavutettiin, kun tuuli tulee tuulivoimalan takaa kohti havaintopistettä. Mittaukset kuitenkin osoittivat, että urbaani taustamelu tieliikenteen kaltaisista lähteistä dominoi usein äänimaisemaa, kun etäisyys tuulivoimalasta on yli 300 metriä. Tuulen nopeudella ja tuulivoimalan kunnolla on monimutkainen vaikutus äänimaisemaan eikä sitä voida yleensä kuvata yksinkertaisella A-painotetulla äänenpainetasolla [28]. Äänen heijastuminen maastosta ja rakennusten pinnoista voi tehdä äänikokonaisuudesta erilaisen eri paikoissa [1].

Useimmat kaupalliset tuulivoimalat läpikäyvät melutestit Kansainvälisen energiayhdistyksen (IEA) suosittelemien toimien mukaisesti. Testien tulokset auttavat sijoittamaan turbiinit riittävän kauaksi asutuksesta meluhaittojen estämiseksi. Tämä vakiotoimenpide myös auttaa valmistajia paikallistamaan meluongelmat ja tekemään korjauksia ennen laitteen kaupallista julkaisemista. [16]

Vaikka tuuliturbiinien meluongelmat voidaan periaatteessa ratkaista varmistamalla tarpeeksi iso etäisyys tuuliturbiinien ja asukkaiden välillä, raportoituja valituksia on tullut vuosien varrella.

Näyttäisi siltä, että pahimmat meluongelmat koetaan öisin, jolloin maanpinnalla tuulee vain vähän ja taustamelutaso on vähäinen, mutta tuulta on kuitenkin tarpeeksi hubin eli roottorin navan korkeudella ja turbiini pysyy käynnissä. Näissä erityisissä olosuhteissa tuuliturbiinimelu voidaan selvästi kuulla. Hyvin dokumentoitu alankomaalainen tapaus (van den Bergin tutkimus 2003 [29], mistä lisää tuonnempana) osoittaa, että 300–400 metrin etäisyys tuuliturbiinista ei välttämättä riitä varmistamaan äänitasojen pysymistä melukynnyksen alapuolella. Hiljaisen taustamelun ja korkeiden hubin korkeuksisten tuulen nopeuksien yhdistelmä aiheutti sen, että tuulipuiston melu kuului 500–1000 m päähän. Menneet kokemukset viittaavat siihen, että meluongelmat riippuvat lukuisista paikallisista muuttujista, jotka voivat muuttua ajan mittaan. [24]

Meluongelmien todennäköisyyden vähentämiseksi tehdään myös meluanalyysyjä. Näissä tutkimuksissa otetaan huomioon tuuliturbiinien ja projektin sijoituspaikan luonteenpiirteet. Tällaisten tutkimusten perusteella etäisyys muihin objekteihin voidaan määrittää. Tutkimukset on syytä tehdä huolella, sillä valituksia melusta tulee etenkin meluennusteiden mennessä mönkään. Van den Berg havaitsi tutkimuksessaan [29], että tuuliturbiinisuunnittelijoiden siihen aikaan käyttämät metodit aliarvioivat tuulen nopeudet hubin korkeudella. Tämän suorana seurauksena myös melutasot voivat olla aliarvioituja. Varsinkin matalilla tuulen nopeuksilla aina 4 m/s:iin asti tuulen nopeus hubin korkeudella voi olla 2,6 kertaa korkeampi kuin logaritmisen tuuliprofiilin perusteella voisi olettaa. Tästä syystä asukkaat joutuivat tässä tapauksessa kokemaan jopa 15 dB odotettua korkeampia melutasoja. [24]

Meluselvitykset saattavat paljastaa suunnitelmien muutostarpeita. Niin kävi Kokkolan meluselvityksessä, jossa pyrittiin ennustamaan Tankarin-Djupörenin alueelle alustavasti suunniteltujen 20 viiden MW:n tuulivoimalaitosyksikön mahdollisia meluvaikutuksia. Laskennan tulokset viittasivat siihen, että Djupörenissä 45 dB(A):n ohjearvo virkistysalueille saattaa ylittyä tietyissä sääolosuhteissa. Tilanne oli selvityksen mukaan korjattavissa muuttamalla muutaman voimalan sijoituspaikkaa hieman kauemmaksi. Vallitsevat melutasot voidaan myös varmentaa rakennusvaiheessa toteuttamalla ensin kauempana sijaitsevat tuulivoimalat ja rakentamalla lähemmät vasta tarkistusmittauksien ja laskennan jälkeen, jos haittoja ei ilmene. [20]

YVA-konsultti Ramboll Finland Oy:n toimenpiteisiin kuuluu melun vaikutuksien tarkastelu noin kilometrin säteellä ja maisemavaikutuksien tarkastelu noin 15 kilometrin säteellä tuulivoimaloiden sijoituspaikoista. Koska tuulipuistoprojekti vaikuttaa kohdealueen virkistyskäyttöön, alueen alkuperäistä virkistyskäyttöarvoa selvitetään haastattelujen ja kyselyjen avulla. Tietoja alueen

metsästyskäytöstä kerätään paikallisilta metsästysyhdistyksiltä [30]. Kalastoon ja sitä kautta kalastukseen kohdistuvia vaikutuksia arvioidaan nykytilan tietojen sekä kirjallisuuden perusteella. Tärkeille talouskaloille soveltuvista lisääntymisalueista saadaan tietoja kalastajilta sekä osittain myös merialueen tutkimuksista [31].

On tärkeää ottaa huomioon myös tuulivoimaloiden rakentamisen aikaiset meluvaikutukset, jotka koostuvat lähinnä tuulivoimaloiden ja niiden komponenttien kuljetuksen ja asentamisen aikaisesta melusta, perustan peittämisestä ja suojaamisesta sekä sähköjohtojen ja kaapelien vetämisestä aiheutuvasta melusta. Meluvaikutuksia voi aiheutua mm. räjäytystöistä kaapeleiden asennusvaiheessa sekä tuulivoimaloiden kallioperään perustamiseen liittyvistä töistä. Vaikutuksia arvioitaessa tarkastellaan lähemmin, mitkä työvaiheet voivat aiheuttaa laajemmalle alueelle leviävää meluhaittaa. Lisäksi tarkastellaan meluhaitan luonnetta, kestoa ja ajoittumista sekä mahdollisesti häiriintyviä kohteita ympäristössä. Tarvittaessa tiettyjen rakennusvaiheiden aiheuttamat melutasot suunnittelualueen ympäristössä voidaan selvittää mallintamalla. Meluvaikutuksia arvioidaan tuulivoimaloista saatujen aiempien kokemusten, mittaustulosten ja mallilaskelmien perusteella. Suunnittelutietojen perusteella mallinnetaan tuulivoimalaitosten aiheuttamat melutasot suunnittelualueen ympäristössä. [30]

3.1 Mekaaninen melu

Mekaanisesta melusta puhutaan, kun äänilähde on mekaaninen tai sähköinen laite [16]. Tuulivoimalan ollessa toiminnassa sen konehuoneen laitteet aiheuttavat normaalia käyntiääntä sekä tukirungon värähtelyääntä. Näistä kahdesta jälkimmäinen on haitallisempaa, sillä sen äänilähteenä on koko tukirunko aina maahan asti [3].

Mekaaninen melu on hallitseva pienillä turbiineilla (roottorin halkaisija korkeintaan 20 metriä). Vaihdelaatikon ja generaattorin melu on minimoitu tehokkaalla tuotekehittelyllä ja jäljelle jäänyt melu konehuoneen eli nasellin (*engl. nacelle*) sisällä saadaan hallittua äänieristysmateriaaleja käyttämällä. Toisiaan hankaavien pyörivien osien poistaminen on myös vähentänyt merkittävästi mekaanista melua, jonka poistaminen on ylipäätään helpompaa kuin aerodynaamisen melun. Turbiinin koon kasvaessa myös suhteellinen aerodynaaminen kontribuutio kasvaa. [17]

Melu pääsee konehuoneesta ulkoilmaan lähinnä jäähdytysjärjestelmien ilmanvaihtoaukon välityksellä ja suoraan potkurin navan läpi. Konehuoneen laitteista meluaa eniten vaihteisto, joka on

aina koteloitu eli ympäröity äänieristävällä aineella. Melua tuottaa lisäksi vaihteisto- ja hydraulikkaöljyn ilmajähdytys, jossa äänilähteenä on normaalin ilmanvirtauksen lisäksi ilmapuhaltimen moottori. Kolmas merkittävä melunlähde on sähkögeneraattori, joka on myös aina koteloitu. Lisäksi generaattorin muuntaja tuottaa matalataajuista ja kapeakaistaista melua, joka on kuitenkin varsin vaimeaa. Lopuksi mainittakoon taajuusmuuntimet (*engl. inverter*), joita käytetään muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa, joissa lapojen pyörimisnopeus muuttuu tuulen nopeuden mukaan. Taajuusmuuntaja säätää tuulivoimalan tuottaman sähköön oikeaan taajuuteen sähköverkkoa varten ja aiheuttaa samalla korkeataajuista ja kapeakaistaista melua, joka on kuitenkin häiritsevää vain voimalan välittömässä läheisyydessä. [3]

Mittausvaikeuksien vuoksi kaikki nykyiset kansalliset standardit määrittelevät koneen mittaustilaksi kuormitustilan sijaan tyhjäkäynnin ja myös mahdolliset melurajat koskevat sitä. [4]

Mekaanisen melun vähentämisessä on otettu suuria edistysaskeleita. Jo vuonna 1995 tanskalaiset tuulivoimalavalmistajat lopettivat mekaanisen äänen tutkimisen, sillä edellisen kolmen vuoden aikana äänitaso oli pudonnut puoleen tuotekehityksen ansiosta. [1]

Mekaanista melua voidaan torjua kahdella tavalla. Tehokkaimpia ovat melulähteen rakennetta muokkaavat melua vähentävät muutokset, jotka ovat kuitenkin usein vaikeaa toteuttaa. Toisaalta melun leviäminen ympäristöön voidaan estää eristämällä ja/tai vaimentamalla melulähde [4]. Äänieristyksellä ei ole suurta roolia useimmissa nykymarkkinoiden moderneissa turbiineissa, vaikka se voi olla hyödyllinen keino minimoida keski- ja korkeataajuista melua [1].

Tuulivoimaloiden mekaanista melua voidaan vaimentaa varsin helposti muun muassa hiljaisempien vaihteiden käytöllä, vaihteiden joustavalla kytkemisellä runkoon ja käyttämällä äänieristystä. Mekaanista melua voidaan vähentää merkittävimmin jättämällä vaihdelaatikko kokonaan pois tuulivoimalasta. Ainakin yksi valmistaja on kehittänyt suoravetotuuliturbiinin matalanopeusgeneraattorilla, joka on mahdollista kytkeä suoraan roottoriin ilman vaihdelaatikkoa. Nämä turbiinit ovat erittäin hiljaisia ja ne voidaan sijoittaa melko lähelle asutusta. [16]

Tuuliturbiinien vaihdelaatikot eivät ole enää teollisuuden standardivaihteistoja vaan ne on suunniteltu erityisesti tuuliturbiinien hiljaista toimintaa silmälläpitäen. Vaihteistojen suunnittelussa muun muassa varmistetaan, että vaihteiston teräsrattailla (*engl. steel wheels*) on keskipehmeä ja joustava sisus (*engl. core*) mutta kova pinta pitkäaikaisen kestävyuden varmistamiseksi. [1]

Nykyään tutkitaan paljon lapojen meluisaa värähtelyä resonanssissa nasellin ja tornin tahtiin. Turbiinivalmistajat varmistavat nykyään tietokonesimulaatioilla jo ennen koneiden rakentamista, ettei koneen eri osien välistä resonanssia pääsisi tapahtumaan. Lisäksi nykyisten suurten tuuliturbiinien nasellin alustaan (*engl. chassis*) on porattu reikiä, jottei se resonoisi muiden turbiinin komponenttien värähtelyn mukana. [1]

3.2 Vastamelun käyttö meluhaittojen vähentämisessä

Saksalaisen Fraunhofer-instituutin tutkijat ovat selvittäneet vastamelun käyttöä tuulivoimaloiden meluhaittojen vähentämisessä. Tämä lähestymistapa on kiinnostava, sillä sen myötä voitaisiin hillitä tuulivoimaloiden melua sähköntuotannosta tinkimättä. Perinteisesti melua on hallittu hidastamalla roottoreiden pyörimistä, kun melu on uhannut käydä liian suureksi tuulen nopeuden kasvaessa tietyn rajan yli. Tämä ratkaisu on kuitenkin vähentänyt tuotetun sähkömäärää. Nykyisin on käytössä myös niin sanottuja *passiivisia vaimennusmenetelmiä* (mm. laitteiden kotelointi), jotka eivät kuitenkaan ole kovin tehokkaita, koska ne vaimentavat melua vain tietyillä taajuuksilla. [32]

Fraunhofer-instituutin tutkijat ovat kertoneet [32] kehittäneensä järjestelmän, joka vaimentaa melua aktiivisesti ilman että tuulivoimalan pyörimisnopeutta tarvitsisi pienentää. Järjestelmä vaimentaa erityisesti vaihdelaatikon hammasrattaiden synnyttämää värähtelyä. Keksintö perustuu pietsosähköiseen ilmiöön, jossa kiteet polarisoituvat sähköisesti (syntyy sähköjännite vastakkaisten pintojen välille) mekaanisen puristuksen, kierron tai taivutuksen seurauksena [33]. Tutkijoiden keksinnössä ilmiö toimii kääntäen, jolloin ulkoinen jännite saa kiteessä aikaan mekaanisen muutoksen, joka aiheuttaa ääntä. Tutkijat puhuvat ”*negatiivisesta värähtelystä*”, joka vaimentaa vaihdelaatikon melua, kun pietsovärähtely on vaiheistettu oikein [32].

Vastamelun periaate on yksinkertainen. Sen täytyy koostua samankokoisista, vastakkaissuuntaisista aalloista kuin melun. Vastameluun liittyviä patenteja on julkaistu jo 1930-luvulla. Vastamelun toteuttaminen käytännössä onkin ollut Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikan tutkija Mika Oinosen mukaan yllättävän vaikeaa [13]. Vastamelun toteuttaminen asuinhuoneistoissakin olisi periaatteessa mahdollista, mutta hankalaa: ”*Mitä suurempi tila, sen hankalampaa ja monimutkaisempaa melun vaimennus on. Tarvitaan monikanavaisia laitteita, useita antureita ja kaiuttimia ja paljon mutkikkaampaa signaalinkäsittelyä*” [13].

3.3 Aerodynaaminen melu

Tuulivoimaloiden aerodynaaminen melu johtuu turbiinin lapojen ja ilman vuorovaikutuksesta roottorin pyöriessä. Melun taso vaihtelee jaksollisesti, koska lavat pyörivät ja täten äänilähteen etäisyys ja liikesuunta havaitsijaan nähden muuttuu. Doppler-ilmiön mukaan äänen taajuus on äänilähteen havaitsijaa lähestyessä pienempi kuin päinvastaisessa tilanteessa. Melua voidaan kenties kuvata parhaiten suhahtavana tai humahtavana äänenä. Melu on puhtailla lapapinnoilla vaimeampaa, sillä likaisen pinnan rosoisuus lisää meluavaa turbulenssia. Lavan ohittaessa tornin ääni heijastuu ja lisäksi syntyy uusi ääni lavan ja tornin väliin jäävän ilmakerroksen puristuessa. Tämä ohitusmelu on sitä voimakkaampaa, mitä lähempää lapa tornin ohittaa. Melun taso voi vaihdella jaksollisesti jopa 6 dB:n verran. Useassa tutkimuksessa jaksollisuuden on havaittu olevan merkittävän häiritsevä melutason ollessa alhainen. [3]

Aerodynaaminen melu johtuu roottorin normaalitoiminnassa tapahtuvasta turbulenssista. Turbulenssia syntyy ilmavirtausten kulkiessa lähellä lavan pintaa kohti lavan jättöreunaa (*engl. trailing edge*). Roottorin pyöriessä ilmavirtaus osuu lavan johtoreunaan (*engl. leading edge*) ja jatkaa matkaansa lavan yli jättöreunalle, jossa virtaus lopulta irtaana. Kitkan vaikutuksesta ilmavirtaus on hitaampaa lähellä lavan pintaa ja näin syntyy rajakerros, jossa ilman nopeus kasvaa etääntyessään lavan pinnalta. Lapaprofiili on huomattavasti terävämpi jättöreunan puolella, jossa myös rajakerros on täten paksumpi (Kuva 1). Profiilin muodosta riippuu ilmanpaine lavan eri pinnoilla (yli- ja alipainepuoli). Paine-ero on roottorin toimintaedellytys, sillä se synnyttää lapaan aerodynaamisen nosteen. Lavan eri puolien ilmavirtaukset kohtaavat lopulta lavan jättöreunalla, jolloin syntyy pyörteinen virtausvana. Turbulenttisuus on sitä voimakkaampaa, mitä enemmän lavan profiili kapenee johtoreunasta jättöreunaa kohti mentäessä. Turbulenssiin vaikuttavat lisäksi jättöreunan muoto (tylppä vai terävä) sekä lapaan törmäävän ilman alkuperäinen turbulenssi ja nopeus [3]. Voimalalle saapuva ilmassa on sitä turbulenttisempaa, mitä epätasaisempi voimalaa ympäröivä maasto on [17].



Kuva 1: Tuulivoimalan roottorin lavan profiili eli poikkileikkaus

Turbulenssin määrä korreloi lineaarisesti roottorin kohinamaisen melun kanssa, joten turbulenssin kokonaishallinnalla on merkittävä rooli lapojen profiilin suunnittelussa ja melun vähentämisessä. Lavan kärkinopeus (*engl. tip speed*), joka nykyvoimaloissa on noin 60-80 m/s, kasvaa lavan pituuden ja pyörimisnopeuden mukana. Tällöin myös turbulenssi lavan jättöreunalla lisääntyy ja kasvattaa samalla melutasoa. Suurin meluntuotto tapahtuu lähellä lavan kärkeä, esimerkiksi teoreettisessa 100 metrin lavassa etäisyysvälillä 75-95 metriä roottorin navasta mitaten. [3]

Aerodynaamista melua on saatu vähennettyä lavan muotoilua parantamalla ja tutkimalla kantopinnan (*engl. airfoil*) paksuuden vaikutusta meluun. Nämä toimet muiden muassa saivat aikaan melun vähentymisen 10 dB (A) :llä vuosien 1989 ja 1995 välillä. [17]

Melu riippuu myös tuulesta, sen nopeudesta ja laadusta. Kovalla tuulella varsinkin tehontuottoaan sakkaamalla säätelevien voimaloiden lavat menettävät nostovoimaansa (*engl. lift force*) [16]. Tällöin lavan pinnan rajakerros kasvaa suureksi ja kuullaan voimistunut aerodynaaminen kohinamelu [3]. Samoin käy turbulenteissa tuulioloissa [16]. Tehoa lapakulmaa säätämällä rajoittavissa voimaloissa vältetään kaikissa tilanteissa lapojen sakkaaminen ja siihen liittyvä melun voimistuminen [3].

Aerodynaamisen melun äänenpaine lisääntyy lapojen pyöriessä nopeammin, peräti suhteessa lavankärkinopeuden viidenteen potenssiin [1]. Uusissa lapakulmasäätöisissä voimaloissa voidaan muuttaa lapakulman lisäksi myös pyörimisnopeutta, joten ne asennetaan pyörimään hitaammin heikolla tuulella, jonka vallitessa meluhaitat ovat todennäköisimpiä. Sakkaussäätöiset voimalat ovat yleensä kaksinopeuksisia ja toimivat alhaisilla tuulennopeuksilla (alle 7-8 m/s) alennetulla pyörimisnopeudella [3]. Kovien tuulten aikaan tuulen taustamelu muun muassa puista ja pensaista peittää helposti turbiinin äänen alleen. Matalien pyörimisnopeuksien käyttämisen lisäksi melua pienentää myös lapojen määrän lisääminen [16].

On selvästi kuultava ero yö- ja päiväaikaisella tuuliturbiiniäänellä joillain etäisyyksillä turbiineista. Kesäpäivänä kohtalaisella tai jopa vahvalla tuulella turbiinit voi kuulla vain muutaman sadan metrin säteellä ja joku saattaisi kummastella, miksi asukkaat valittavat tuulipuiston äänestä. Hiljaisina öinä tuulipuiston voi kuitenkin kuulla jopa useiden kilometrien päähän turbiinien pyöriessä suurella nopeudella. Silloin 500-1000 metrin päässä tuulipuistosta voi kuulla helposti matalataajuisen (*engl. low pitched*) humautavan äänen, joka toistuu noin sekunnin välein (tahdissa, jolla lavat ohittavat

turbiinin tornin). Tämä ääni muistuttaa kaukaa kuuluvaa junttausta (*engl. pile driving*), jonka päälle on vielä lisätty jatkuva laajakaistainen ”meluisa” ääni. 1,5 km päässä tuulipuistosta asuva ihminen on kuvailut ääntä ”loputtomaksi junaksi”. Päiväsaikaan näitä pulsseja ei selvästi kuule ja ääni on vähemmän tungetteleva tai sitä ei voi edes kuulla (etenkään voimakkailla tuulilla suuren taustamelun vuoksi). Tuulipuistoissa turbiinit ovat kuultavissa suurimman osan (päivä- ja yö-) aikaa, mutta humautaminen ei ole selvää, vaikkakin suhahtava (*engl. swishing*) ääni on helposti havaittavissa. Joskus jyrisevä (*engl. rumbling*) ääni on kuultavissa, mutta sitä on vaikeaa paikallistaa johonkin tiettyyn turbiiniin tai tulosuuntaan [29].

3.4 Melun impulsiivinen luonne

Öisin tuulipuistojen ääni sisältää toistuvia pulsseja, joita ei ole päiväsaikaan. Tuulivoimaloiden lähellä asuvien ihmisten pitkäaikaisen kokemuksen mukaan tämä pulssimainen luonne tai humautelu on selkeämpää ja ärsyttävämpää korkeilla pyörimisnopeuksilla. Van den Berg on tutkinut [29] saksalaisen Alankomaiden rajan lähellä sijaitsevan Rhede Wind Parkin (17 muuttuvapyörimisnopeuksista tuuliturbiinia, joiden hubin korkeus oli 98 m) melua Alankomaiden puolella. Tutkimuksessa mm. nauhoitettiin tallenne äänenpainetasoista kesäyönä 750 m länteen tuuliturbiinien läntisimmästä rivistä sijaitsevan asunnon terassilla. Tallenteen dynaamisella alueella on variaatiota: pieni ero peräkkäisten maksimi- ja minimitasojen välillä on vähemmän kuin 2 dB, mutta välillä ero on suurempi. Osassa tallennetta löytyy kuvio, jossa 3–4 tai 5–6 dB korkeuksinen pulssi toistuu joka sekunti. Tämä kuvio on yhteensopiva monimutkaisen kolmen pulssin yhdistelmän (*engl. a complex of three pulse trains*) kanssa. Yhdistelmän pulssien korkeus on noin 1 dB ja niillä on hieman erilaiset 1 Hz:n toistotaajuudet. Kun pulssit ovat eri vaiheissa, on vain 1 dB:n variaatioita. Kun kaksi niistä on samassa vaiheessa, pulssin korkeus kaksinkertaistuu (+3 dB), ja se kolminkertaistuu (+5 dB), kun kaikki kolme ovat samassa vaiheessa. Turbiinien pyörimisnopeus sillä hetkellä oli 20 rpm, joten lapojen maston ohitusten toistotaajuus oli 1 Hz. Pulssiyhdistelmien pienempi lukumäärä, verrattuna 17 turbiiniin, sopii yhteen sen kanssa, että vain muutama turbiini hallitsi ääni-immissiota tällä paikalla. Laskettu immissiotaso oli etupäässä kahden turbiinin aiheuttamaa ja vähemmän kahden muun aiheuttamaa, eli vain neljä turbiinia seitsemästätoista aiheutti yli puolet ääni-immissioenergiasta. Äänen pulssimaisuutta ei ollut osattu odottaa; Kerkers ym. vuoden 2002 [34] raportissa todettiin, etteivät tuuliturbiinit tuota impulsiivista ääntä. Kun mittauksia tehdään yksittäisellä turbiinilla, kuten on tavallista, ei pulsseja kuulla ylläesitetyn selityksen mukaisesti [29].

3.5 Tuuliturbiinimelun mittaaminen

On tärkeää saada hyviä meluennustemalleja uusille voimaloille sekä luotettavia metodeja melun hallintaan jo valmiissa tuulipuistoissa. Nykyään käytössä olevat ennustemallit perustuvat usein jollekin tietylle säätilalle. Ennustemallit eivät aina voikaan kuvata monimutkaisia tilanteita täsmällisesti ja siksi on usein tarpeen tehdä mittauksia. On kuitenkin vaikeaa ja aikaavieppää tehdä mittauksia valmiin tuulivoimalan melusta, varsinkin jos halutaan ottaa huomioon monenlaiset meteorologiset tilanteet ja pinnanmuotojen vaihtelu [28]. Tuulivoimalamelun mittaamiseksi on olemassa kansainvälinen standardi (IEC 61400-11), joka antaa tarkat ohjeet mittauksen suorittamiseksi [20].

Eräs merkittävä ongelma on tuulen aiheuttaman häiriöäänien poistaminen melumittausta häiritsemästä. Insinööritoimisto Paavo Ristolan meluselvityksessä Kokkolan edustalle suunnitellusta tuulivoimalasta [20] käytettiin joitakin keinoja, jotka vähensivät tuulen aiheuttamaa häiriöääntä mittalaitteen mikrofoniin. Koska tuulen nopeus on alhaisempi lähellä maanpintaa, mittaus tapahtui maahan asetetun tasaisen levyn päältä. Mikrofonin peitettiin puolitetulla tuulisuojalla siten, että mikrofoni oli hiukan taustalevyn yläpuolella. Tarvittaessa käytettiin toista isompaa tuulisuojaa suojana. Mittauksen aikana tulisi rekisteröidä tuulen nopeus mieluummin paikan päällä olevalla tuulimittarilla, jonka tulisi sijaita maanpinnan ja tuulivoimalan roottorin puolivälissä tai ylempänä. [20]

Kokkolan melumittausten [20] haasteena oli löytää kohde, jossa taustamelu, kuten liikenne tai teollisuus, ei vaikuttaisi mittaustuloksiin. Sopivaksi kohteeksi osoittautui Porin Reposaaressa sijaitseva tuulivoimala. Ainoana häiriötekijänä oli meren läheisyydestä johtuva aaltojen kohina, jonka haitat minimoitiin sijoittamalla mittari sopivaan paikkaan [20].

Martin Björkman Göteborgin yliopistosta [28] on kehittänyt mittausaseman melun pitkäaikaisiin mittauksiin eri sääoloissa. Asema on kauko-ohjattu, automaattinen ja jatkuvakäyttöinen. Se mittaa tuulen suuntaa, nopeutta, ilman lämpötilaa, kosteutta ja kastepistettä (*engl. precipitation*) sekä tietysti melutasoa. Koko laitteisto on liikuteltavassa asuntovaunussa ja tuulen nopeutta mittaava anemometri vaunun katolla kymmenmetrisen tolpan päässä. Tällainen joustava järjestely helpottaa erilaisten ääniprofiiliin vaikuttavien tekijöiden, kuten maasto-olojen (*engl. ground attenuation*), tuulen suunnan ja muiden meteorologisten parametrien, vaikutuksen arvioimista. Taustamelun vaikutusta pystytään myös systemaattisesti arvioimaan. [28]

Björkmanin järjestelmää on käytetty kaksi vuotta eri sijainneissa ja se on tuottanut arvokasta tietoa useiden eteläruotsalaisten tuulivoimaloiden melutilanteesta ja melun etenemisestä. Mitattua tietoa on verrattu teoreettisesti laskettuihin malleihin ja erilaisten meteorologisten tilanteiden vaikutusta on myös tutkittu. [28]

Seuraavaksi käsittelen äänitasojen mittaamista käyttäen esimerkkinä Van den Bergin tutkimusta [29].

3.5.1 Ääniemissiotasojen mittaaminen

Van den Bergin tutkimuksessa [29] turbiinin emissiotaso L_{eq} mitattiin etäisyyden R päässä turbiinin hubista. Näin saadut emissiotasot voitiin konvertoida äänitehotasoksi L_w seuraavasti [29]:

$$L_w = L_{eq} - 6 + 10 \log(4\pi R^2). \quad (16)$$

Aiempien mittausten perusteella muodostettiin L_w :n tuulennopeusriippuvuus. Tuulen nopeutta kymmenen metrin korkeudessa ei pidetä luotettavana yksittäisenä mittarina turbiinin äänitasolle. Roottorin pyörimisnopeus antaa paremman kuvan äänitasosta. Emissiotasot mitattiin yhdeksällä turbiinilla seitsemänä eri päivänä erilaisissa tuulioloissa. Pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen hubin korkeudella, ja se voitiin määrittää laskemalla, kuinka monta kertaa roottorin lapa ohitti turbiinin tornin yhden minuutin aikana. Jos esimerkiksi havaittiin minuutissa 100 ohitusta, pyörimisnopeus oli noin 33 rpm. Tämä laskentametodi ei ole kovin tarkka (virheraja per mittausta on $\pm 2/3$ rpm) [29]. Relaatiosta äänitehotason L_w ja turbiinin pyörimisnopeuden N välillä kerrotaan luvussa 3.5.3.

3.5.2 Ääni-immissiotasojen mittaaminen

Van den Bergin tutkimuksen [29] ääni-immissiomittaukset tehtiin neljän kuukauden aikana kahdessa eri paikassa. Laitteistona oli miehittämätön SWMS (Sound and Weather Measurement System), joka koostui äänitasomittarista ja tuulisuojuksellisesta mikrofoniasta 4,5 metrin korkeudessa sekä tuulennopeusmittareista kymmenen ja kahden metrin korkeuksissa. [29]

Molemmilla korkeuksilla mitattiin sekunnin välein tuulen nopeus ja suunta, sekä A-painotettu äänitaso. Mitattu data varastoitettiin tilastollisina jakaumina viiden minuutin jaksoissa. Näistä jakaumista voitiin laskea 5 minuutin jaksoissa tai niiden monikerroissa kaikki tarvittava tuulidata, kuten keskituulennopeus, mediaanituulensuunta tai mikä tahansa prosentuaalinen tuulen nopeus (5 % askelin) ja tuulen suunta. Myös tarvittavat äänitasot voitiin laskea kyseisistä jakaumista. Myös spektrianalysaattorilla tehtiin täydentäviä mittauksia. Oikeaa tuulen nopeutta ja suuntaa ei voitu mitata puuston takia jälkimmäisessä kohteessa, joten niiden selvittämiseksi käytettiin läheisen meteorologisen mittausaseman toimittamaa tuulimittausdataa. [29]

Joskus tuuliturbiiniäänien ollessa hallitseva äänitaso oli suhteellisen vakio viiden minuutin mittausjakson aikana. Tällaiset mittausjaksot voitiin siis etsiä mittausdatasta, kun kriteerinä oli pieni vaihtelu äänitasossa: $L_5 - L_{95} \leq 4dB$, missä L_5 ja L_{95} ovat 5- ja 95-prosenttisia äänitasoja maksimiäänitasosta (*engl. 5 and 95 percentile sound level*). Normaalissa (Gaussisessa) jakaumassa tämä olisi yhtä kuin $\sigma \leq 1,2dB$, missä σ on keskihajonta. Näin saatiin selville tuuliturbiiniäänien dominoimien mittausjaksojen osuus koko mitatusta ajasta. [29]

3.5.3 Vertailua emissio- ja immissioäänitasojen välillä

Van den Bergin tutkimuksessa [29] kolmestakymmenestä ekvivalenttiäänitaso $L_{eq,T}$:n (missä T on mittausaika, tyypillisesti 5 min) mittauksesta, jotka mitattiin etäisyydellä R turbiinin hubista (R on tyypillisesti $100\sqrt{2}$ m), voitiin määrittää relaatio äänitehotason L_w ja turbiinin pyörimisnopeuden N välille [29]:

$$L_w = 67,1 \log(N) + 15,4 \text{ dB(A)}. \quad (17)$$

Tätä relaatiota voitiin verrata mitattuun immissioäänitasoon $L_{i,T}$ (T=5 min) ensimmäisessä sijaintipaikassa, 400m tuulipuistosta (lähin turbiini), 22 tapauksessa, joissa pyörimisnopeus oli tunnettu. Nämä mittaukset tehtiin eri aikaan kuin emissiomittaukset. Paras logaritminen sovitus immissioäänitasojen L_{imm} datapisteille pyörimisnopeuden N funktiona oli [29]:

$$L_{imm} = 57,6 \log(N) - 30,6 \text{ dB(A)}. \quad (18)$$

Relaatioiden välinen ero on [29]:

$$L_W - L_{imm} = 9,5 \log(N) + 46,0 \text{ dB}. \quad (19)$$

Yhtälö (19) kuvaa siis äänen vaimenemista matkallaan äänilähteeltä mittauspaiikalle.

3.6 Tuuliturbiinimelun laskeminen

Alankomaissa ja Saksassa meluvaikutus tuuliturbiinien lähellä sijaitseviin asumuksiin lasketaan äänen etenemismallilla (*engl. sound propagation model*). Tuuliturbiinien mitattuja tai arvioituja äänitehotasoja L_W käytetään mallin lähtötietoina. Saksassa yksittäisen ´maksimi´äänitehotason arvoa (95 prosenttia maksimiäänitasosta) käytetään meluvaikutuksen arvioinnissa. Alankomaissa käytetään tuulen nopeuksiin 10 metrin korkeudessa verrattuja äänitehotasoja; tuloksena saatuja melutasoja verrataan tuulen nopeudesta riippuvaisiin meluylärajoihin. Implisiittisesti tämä menetelmä perustuu päiväaikaisiin mittauksiin eikä ota huomioon varsinkaan ilmakehän öisten olojen vaikutusta tuuliprofiiliin [29]. Alankomaissa käytetään äänivaikutuksen arvioimiseen kansallista laskentamallia [35], samoin Saksassa [36]. Kerkersin vuoden 1999 tutkimuksen [37] mukaan ei yleensä ole merkittäviä eroja näiden kahden kansallisen mallin välillä. Molemmissa äänen etenemismalleissa äänen immissiotaso L_{imm} tietyssä havaintopisteessä on summa k :sta lähteestä (turbiinista) tulevista j :stä oktaaviaääntehtotasosta (*engl. sound power octave band levels*) L_{Wj} . Summasta on vielä vähennettävä vaimennustekijät (*engl. attenuation factors*) $D_{j,k}$ [29]:

$$L_{imm} = 10 \log \left[\sum_j \sum_k 10^{(L_{Wj} - D_{j,k})/10} \right], \quad (20)$$

missä L_{Wj} , joka oletetaan identtiseksi kaikille k :lle turbiinille, on pyörimisnopeuden funktio,

$D_{j,k}$ on vaimeneminen, joka muodostuu äänen geometrisestä leviämisestä (D_{geo}), ilman

absorptiosta (D_{air}) ja maan absorptiosta (D_{ground}) seuraavaan tapaan: $D_{j,k} = D_{geo} + D_{air} + D_{ground}$.

Yhtälö (20) pätee tilanteissa, joissa ollaan tuulen alla. (*engl. downwind situations*).

Pitkäaikaisarvioinneissa tähän yhtälöön käytetään meteorologista korjauskerrointa, jolla pyritään simuloimaan ´keskimääräistä ilmakehää´. Vaihtoehtoisesti voidaan verrata laskettuja ja mitattuja ääni-immissiotasoa, jolloin meteorologista korjausta ei käytetä [29].

Van den Bergin tutkimus [29] kuitenkin osoitti, että tällä kaavalla lasketut äänitasot johtivat Rhede Wind Parkin tapauksessa harhaan. Toteutuneet äänitasot olivat öisin usein vallitsevilla tuulen

nopeuksilla 3 ja 4 m/s jopa 15 dB odotettua korkeammat. Tämä johtui laskentamallin puutteista pitkillä etäisyyksillä ja ainakin öisissä olosuhteissa: pitkäaikaismittaukset jälkimmäisestä mittauspaiikasta ja lyhytaikaiset mittaukset (yksi yö) muissa paikoissa osoittivat, että Alankomaissa käytetyn standardimallin avulla lasketut ääni-immissiotasot aliarvioivat öisin mitatut tasot noin yhdellä desibelillä etäisyyksillä 550–1000 m lisääntyen noin 3 dB:iin, joka oli mallin ja mitattujen tasojen välinen ero 1900 metrin etäisyydellä. Mittauksista kävi myös ilmi, että turbiini voi pyöriä suurella teholla silloinkin kun maan pinnassa on vain vieno tuuli. Tämä viittaa siihen, että hiljaisella alueella matalan kasvillisuuden maastossa taustamelu voi jäädä hyvin vähäiseksi. Tuulen nopeus on pienempi öisin kuin päivisin, joten öisin myös kontrasti turbiinimelun ja taustamelun välillä on korkeampi. [29]

Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy on selvittänyt tuulivoimalaitosten tuottamaa melua keräämällä taustatietoa kirjallisuudesta sekä tekemällä koemittauksia kenttäolosuhteissa. Kokkolan edustan merialueelle tutkittavan merituulivoimalaitoksen melualueet laskettiin käyttäen B&K Predictor 2.11 -ohjelmaa. Ohjelma on erityyppisten melulähteiden melualueiden laskentaan kehitetty ohjelma, joka mallintaa melun leviämistä kolmiulotteisessa maastossa. Ohjelma ottaa laskennassa huomioon maaston, kasvillisuuden, maaperän tai veden heijastavuuden, mahdolliset esteet ja rakennukset sekä muut laskentaan vaikuttavat seikat. Ohjelmaan voidaan antaa lähtötietoina myös ilman lämpötila, kosteus ja ilmanpaine. Jos voimaloita on ryhmässä useita, tulee melutasot arvioida tapauskohtaisesti. [20]

YVA-konsultti Ramboll Finland Oy käyttää *SoundPlan 6.5* -melumallinnusohjelmaa. Malli huomioi kolmiulotteisessa laskennassa mm. rakennukset, maaston muodot, heijastukset ja vai menemiset sekä sääolosuhteiden vaikutuksen melun leviämiseen. Tulokset esitetään ohjearvoihin verrannollisina pitkän ajan keskiäänitasoina (L_{Aeq} -meluvyöhykkeet karttapohjalla). Näiden perusteella pystytään varsin luotettavasti tarkastelemaan, onko vaikutusalueella häiriintyviä kohteita. [30]

3.7 Tuuliprofiilin vaikutus melun kuulumiseen

Yleensä oletetaan tietty muuttumaton suhde kahden nopeuden välillä: tuulen nopeuden v_h korkeudella h ja tuulen nopeuden v_{ref} referenssikorkeudessa h_{ref} (h_{ref} on yleensä 10 m, jolloin $v_{ref} = v_{10}$). Tämä suhde saadaan laajalti käytetystä logaritmisesta *tuuliprofiilista*, jossa maanpinnan

karheus (*engl. surface roughness*) z on ainoa parametri. Tämä löytyy esimerkiksi kansainvälisistä suosituksista tuuliturbiiniäänimittauksiin [38][39]. Tuuliprofiili tarkoittaa kokonaiskuvaa tuulen nopeuksista eri korkeuksissa. Korkeudella h tuulen nopeus v_h lasketaan seuraavasti [29]:

$$v_h = v_{ref} \log(h/z) / \log(h_{ref}/z). \quad (21)$$

Tämä yhtälö on approksimaatio tuuliprofiilista neutraalin ilmakehän turbulentissa rajakerroksessa, kun maan pinnan kitkasta johtuva turbulenssi sekoittaa ilmaa. Päiväsaikaan otetaan huomioon myös lämpöturbulenssi, varsinkin kun aurinko lämmittää merkittävästi maan pintaa. Öisin neutraali ilmakehä ilmenee kattavalla pilvisyydellä ja/tai suhteellisen korkeilla tuulen nopeuksilla. Kun on jonkin verran kirkasta taivasta eikä voimakkaita tuulia ole, ilmakehästä tulee stabiili maan pinnan säteilystä johtuvan viilenemisen vuoksi. Tällöin tuuliprofiili muuttuu ja sitä ei voida enää kuvata yhtälöllä (21) riittävän hyvin. [29]

Ilmakehän muuttuminen yöllä stabiiliksi aiheuttaa sen, että päiväsaikaan mitattu tuulen nopeus kymmenen metrin korkeudessa johtaa harhaan. Öisin hubin korkeudella vallitsevat odotettua voimakkaammat tuulet ja siten isompi turbiinin äänitehotaso. Lisäksi alle kymmenen metrin korkeudessa vallitsevat odotettua heikommat tuulet, ja siten on vähemmän tuulen aiheuttamaa ääntä kasvillisuudessa [29]. Holtslagin [40] mittausten mukaan epäneutraalissa ilmakehässä (joko stabiilissa tai epästabiilissa) täytyy yhtälön (21) mukaisen tuuliprofiilin logaritmissiin termeihin lisätä korjaus [29]:

$$v_h = v_{ref} [\log(h/z) - \psi_m] / \log[(h_{ref}/z) - \psi_m], \quad (22)$$

missä $\psi_m = \psi_m(h/L)$ on varsin hienostunut funktio korkeudesta h ja Moninin–Obukhovin pituudesta L , joka on stabiliteetin mitta ja on positiivinen stabiilille ja negatiivinen epästabiilille ilmakehälle. Neutraalille ilmakehälle L on iso numero, joko positiivinen tai negatiivinen. Äänen ilmakehässä etenemisen laskemiseksi Kühner [41] ehdottaa yksinkertaista yhtälöä, jota on käytetty Saksan ilmanlaadun ohjekirjassa [42] [29]:

$$v_h = v_{ref} (h/h_{ref})^m, \quad (23)$$

missä m on numero, joka riippuu stabiiliudesta.

Ilmakehän stabiilius ilmaistaan Pasquill-luokissa, jotka riippuvat tuulen nopeudesta ja pilvipeitosta. Niihin yleensä viitataan luokka-asteikolla A:sta (hyvin epästabiili) F:ään (hyvin stabiili). Tarvittavat tiedot ilmakehän stabiiliudesta voidaan saada tuulipuiston lähimmästä meteorologisesta mittausasemasta. Vaikka stabiiliuden aste ei ole aina sama tuulipuistossa ja mittausasemassa, arvot ovat riittävän oikeita, jos etäisyys on riittävän pieni. [29]

Eelden ja Leeuwardenin [43] kahdesta KNMI:n (Alankomaiden kuninkaallinen meteorologinen instituutti, *Royal Dutch Meteorological Institute*) meteorologisesta mittausasemasta Alankomaiden pohjoisosassa saaman pitkäaikaisdatan mukaan stabiilin ilmakehän (Pasquillin luokkien E ja F) vallitsevuus on yöaikaan huomattava (luokka E: 34 % ja luokka F: 32 %) [29].

Van den Bergin tutkimuksessa [29] öisissä olosuhteissa ”stabiili” viittasi joko Pasquillin luokkaan E (melko stabiili, tuulen nopeus kymmenen metrin korkeudella $v_{10} \leq 5$ m/s ja pilvipeittoa $C \leq 50$ %) tai luokkaan F (hyvin stabiili, $v_{10} \leq 3,5$ m/s ja $C \leq 75$ %). ‘Neutraali’ (luokka D) vastasi kaikkia muita tilanteita. Kaikkein voimakkaimmat äänitasot ilmenivät nimenomaan stabiileissa olosuhteissa. Neutraaleissakin oloissa äänitaso oli odotettua korkeampi suurimman osan ajasta. Tämän tutkimuksen mukaan äänentuotanto ja siis myös tuulen nopeus sadan metrin korkeudessa oli usein odotettua korkeampi öisin stabiilissa, mutta myös neutraalissa ilmakehässä. Toisaalta jopa stabiileissa olosuhteissa äänitasot voivat olla odotettua matalampia, vaikka tätä tapahtuukin harvoin. Näistä mittauksista voitiin päätellä, että pelkkään maanpinnan karheuteen perustuva logaritminen tuuliprofiili ei pätenyt öiseen stabiiliin ilmakehään eikä aina neutraaliinkaan öiseen ilmakehään. [29]

Myös Rudolphin mittauksissa [44] havaittiin, ettei tuulen nopeus kymmenen metrin korkeudella ole välttämättä hyvä ennuste hubin korkeuden tuulen nopeuksille. Hänen mittauksissaan tuuliturbiinin, jonka hubi oli 58 metrin korkeudella, läheisyydessä turbiinin äänitaso oli öisin 5 dB korkeampi kuin v_{10} :n perusteella laskettu ennuste olisi antanut ymmärtää [29].

3.8 Tuuliturbiinimelun havaitseminen ja häiritsevyys

Emme tiedä tuuliturbiinimelun havaitsemisen ja mahdollisten vaikutusten yleisyyttä yleisellä tasolla, koska siitä on tehty vain muutamia tutkimuksia. Pedersen ym. [25] viittaa omaan aikaisempaan tuuliturbiinien vaikutuksia niiden lähellä tasaaisessa maastossa asuviin luotaavaan

tutkimukseen [45], jossa löydettiin annos-vaste-suhde A-painotettujen äänenpainetasojen ja tuuliturbiinimelun häiritsevyyden välillä. Yhteys oli kuitenkin riippuvainen vastaajien asenteesta tuuliturbiinien maisemavaikutuksiin. Tanskalaisessa tutkimuksessa [46], joka tehtiin niin ikään tasaisessa maastossa, kuulijan kulma tuuliturbiinin hubiin korreloi äänenpainetasoja enemmän melun havaitsemiseen. On siis syytä uskoa, että meluhäiritsevyyden yleisyyteen voi vaikuttaa variaatio tuuliturbiinien näkyvyydessä eri maastojen välillä, esimerkiksi tasaisen maaston ja mäkitien maaston välillä. Eräissä Pedersen ym. [25] viittamassa tutkimuksessa [47] haastattelut paljastivat vielä lisää mahdollisia yhteyksiä maaston ja tuuliturbiinimelun havaitsemisen välillä. Tutkimushenkilöiden henkilökohtaiset arvot asuinympäristöstään näyttivät vaikuttavan siihen, kuinka tuuliturbiinimelu havaittiin. Niille, jotka pitivät maaseutua taloudellisen kasvun ja teknisten saavutusten paikkana, tuuliturbiinimelu oli samantekevää. Toiset, jotka korostivat, että maaseudun tulee olla hiljainen ja rauhallinen paikka rentoutumiseen, tunsivat melun tunkeutuvan yksityisyyteensä ja siten vaikuttavan negatiivisesti elämänlaatuun. Voidaan siis tehdä hypoteesi, että tuuliturbiinien vaikutus koetaan kielteisempänä turmeltumattomaksi koetussa paikassa kuin alueella, joissa tapahtuu paljon ihmisen toimintoja [25].

Pedersen ym. ovat tutkineet [25] Etelä-Ruotsissa erilaisissa elinympäristöissä tuuliturbiinimelua, sen häiritsevyyttä ja itseraportoitua terveyttä ja hyvinvointia. Heidän tutkimuksensa tavoitteena oli selvittää tuuliturbiinimelun havaitsemisen ja siitä häiriintymisen yleisyyttä turbiinien lähellä asuvien ihmisten keskuudessa. Lisäksi he tutkivat melun ja havaitsemisen/häiritsevyyden välisiä yhteyksiä, tarkastelupisteenä elinympäristöjen väliset erot. [25]

Pedersen ym. [25] käyttivät metodinaan läpileikkaustutkimusta (*engl. cross sectional study*), johon valittiin Ruotsista seitsemän tuuliturbiinialuetta, jotka edustivat erilaisia maisematyyppejä erilaisine maastoineen ja urbanisaation asteineen. Tuuliturbiinimelun havaitsemisen ja häiritsevyyden yleisyyden tutkimiseksi lähetettiin kyselytutkimus otokselle ihmisiä, jotka asuivat tuuliturbiinien lähellä. Kyselylomake oli naamioitu niin, että siinä ilmoitettiin tutkimuksen käsittelevän yleisiä asuinolosuhteita maaseudulla. Lomakkeessa kyllä kysyttiin asumisolosuhteita, mutta niihin sisältyi responsseja tuuliturbiinimeluun. Asunnon ulkopuoliset A-painotetut äänenpainetasot laskettiin jokaiselle vastaajalle asuntojen ulkopuoliselle tuuliturbiinimelulle altistumisen arvioimiseksi. Tuuliturbiinimelun havaittavuutta ja häiritsevyyttä analysoitiin suhteessa altistukseen ja ottaen huomioon mahdolliset suhteeseen vaikuttavat muuttujat. Kyselylomake postitettiin 1309 henkilölle ja heistä 57,6 prosenttia palautti sen. [25]

Pedersen ym. [25] saivat jokaiselle tuuliturbiinille valmistajilta äänitehotasot oktaavialoittain. Sen jälkeen käytettiin Ruotsin ympäristönsuojeluviraston ehdottamaa äänen etenemisen standardimallia [48] jokaisen vastaajan asumuksen ulkopuolisen ääni-immission arvioimiseen ekvivalentteina jatkuvina A-painotteisina äänenpainetasoina. Malli perustuu alatuuliolosuhteisiin (*engl. downwind conditions*). Vastaajan ja lähimmän tuuliturbiinin välinen etäisyys laskettiin käyttämällä maantieteellisiä koordinaatteja. Eräällä alueella sellaisten vastaajien, jotka asuivat pienen poukaman kaukaisemmalla puolella tuuliturbiinista nähden, A-painotettuihin äänenpainetasoihin lisättiin 1.5 dB(A). Samoin tehtiin vastaajille, jotka asuivat alueella, jossa oli suuria korkeuseroja tuuliturbiinien ja vastaajien välillä, minkä tiedetään edistävän äänen etenemistä. Alueilla, joissa oli useita tuuliturbiineja, vastaajan vastaanottamat A-painotetut äänenpainetasot summattiin logaritmisesti [25].

Pedersen ym. [25] laskivat *vertikaalisen visuaalisen kulman* jokaiselle vastaajalle asumuksen lähellä sijaitsevan korkean objektin vaikutuksen arvioimiseksi. Tässä tutkimuksessa vertikaalinen visuaalinen kulma määriteltiin asteilla mitatuksi kulmaksi horisontaalisen tason sekä vastaajan talon ja lähimmän tuuliturbiinin hubin välisen kuvitellun viivan välillä. Laajimmat keskimääräiset vertikaaliset visuaaliset kulmat löydettiin sellaisilta alueilta, missä tuuliturbiinit oli sijoitettu kukkulan laelle. Suurin osuus vastaajista, jotka pystyivät asunnostaan näkemään ainakin yhden tuuliturbiinin, löytyi tasaisilta maaseutualueilta. [25]

Pedersen ym. [25] tutkimuksen tulokseksi saatiin, että todennäköisyys tuuliturbiinimelun havaitsemiseen ja myös siitä häiriintymiseen lisääntyi äänenpainetasojen kasvaessa. Kaikista vastaajista 39 % (n=307) huomasi tuulivoimaloiden äänen asumustensa ulkopuolella. Äänen huomanneiden vastaajien osuus kasvoi liki lineaarisesti äänenpainetasojen kasvaessa. Äänen huomaamisen todennäköisyys lisääntyi 30 % jokaisella tuuliturbiinimelun 1 dB(A) nousulla. Vastaajat, jotka nukkuivat kesäisin tai talvisin ikkuna auki, eivät havainneet melua enemmän kuin muut vastaajat samassa äänenpainekategoriassa. Havaitseminen ei liittynyt sukupuoleen tai ikään. Työssäkäynti, omakotitalossa asuminen, omasta mielestä heikon taustamelun alueella asuminen ja vähintään yhden tuuliturbiinin näkeminen asumuksesta lisäsivät äänen huomaamisen todennäköisyyttä. [25]

Häiritsevyyden kannalta tärkein fyysikaalinen tekijä on melun äänenpainetaso, joka saattaa olla yllätyksellinen. Van den Bergin tutkimuksessa [29] immissioäänitaso ensimmäisessä tutkimuspaikassa oli suurimman osan ajasta (vähintään 72 % öisistä tunteista) odotettua korkeampi.

Yleisimmillä öisillä tuulen nopeuksilla (v_{10}), jotka olivat 3 ja 4 m/s, äänitaso saattoi olla jopa 15 dB odotettua korkeampi. Myös jälkimmäisessä tutkimuspaikassa, huomattavan etäisyyden päässä (1500 m) tuulipuistosta, immissiotaso oli huomattavan osan ajasta (vähintään 38 % öisistä tunneista) odotettua korkeampi. Tässä sijainnissa ja tuulen nopeuksilla 2–4 m/s toteutunut äänitaso oli joskus jopa 18 dB odotettua korkeampi. Näistä 3 dB johtuvat laskentamallin rajoituksista ja 15 dB hubin korkeuden tuulen nopeuden aliarvioimisesta. Näillä korkeammilla äänitasoilla, höystettynä äänen impulsiivisella luonteella varsinkin korkeilla pyörimisnopeuksilla, voidaan myös odottaa ennustettua enemmän häiritsevyyttä. Pedersen ym. [25] löysivät todella ärsyyntyneitä asukkaita alueilta, joiden (lasketut) äänitasot olivat niinkin alhaisia kuin 32.5–35 dB(A), mikä on selitettävissä van den Bergin tutkimuksella [29], jossa korkeat tuuliturbiinit saattoivat olla jopa 18 dB meluisampia kuin lasketut arvot ennustavat.

Pedersen ym. [25] tutkimuksessa tuuliturbiinimelun havaitseminen ja häiritsevyys liittyi maastoon ja urbaanisuuden asteeseen: ensinnäkin maaseutualueilla oli lisääntynyt riski havaitsemiseen ja häiriintyvyyteen esikaupunkialueeseen verrattuna, ja toiseksi maaseudulla monimutkainen (mäkinen tai kivinen) maasto lisäsi riskiä tasamaastoon verrattuna. Häiritsevyys yhdistettiin tuuliturbiinien näkyvyyden sekä objektiivisiin että subjektiivisiin tekijöihin ja liitettiin lisäksi huonompaan unen laatuun ja kielteisiin tunteisiin. Tutkimuksen päätelminä mainittiin, että ainutlaatuinen ympäristö on tarpeen ottaa huomioon uutta tuulipuistoa suunniteltaessa. Näin haitalliset terveysvaikutukset voidaan välttää. Alueesta riippuvien tekijöiden vaikutus pitäisi myös ottaa huomioon tulevaisuuden yhteisömelututkimuksessa (*engl. community noise research*). [25]

Pedersen ym. [25] tutkimuksen löydökset saattavat osittain olla selitettävissä maaseudun ja kaupunkimaisten alueiden erilaisissa taustamelutasoissa. Havaitsemisen lisäksi kuitenkin myös häiriintyvyyttä oli yhteydessä maastotyyppiin. Tämä osoittaa, että tuuliturbiinimelu oli vähemmän henkilökohtaisten odotusten vastaista kaupunkimaisilla alueilla. Asumukseen tehty remontti oli toinen muuttaja, joka kasvatti suorassa suhteessa häiritsevyyttä. Tämä viittaa elinympäristön henkilökohtaiseen tekijään, joka vaikuttaa ympäristön stressinaiheuttajaan suhtautumiseen. Asuinalue tutkimuksissa [49] käytetyt teoriat paljastavat, että ihmiset suosivat ympäristöjä, jotka ovat sopusoinnussa heidän minäkuvansa ja tarpeidensa kanssa. Ihmiset myös pysyvät paikoissa, jotka tarjoavat jatkuvuuden tunteen. Kun uusi stressinaiheuttaja tulee elinympäristöön, suhde asuinpaikkaan häiriintyy Tognolin [50] mukaan. Tällainen vääristymä voi mahdollisesti altistaa isommalle häiriintyvyyksriskille [25].

Maaseudulla tuulivoimamelu havaitaan herkemmin epätasaisessa maastossa kuin tasaisessa maastossa. Tämä voi Pedersen ym. [25] mukaan johtua esimerkiksi siitä, että laaksoon rakennetut talot ovat suojassa tuulelta ja sen aiheuttamalta taustamelulta samalla kun mäen päällä vapaasti puhaltava tuuli pyörittää tuuliturbiinia melua aiheuttaen. Ei voida myöskään poissulkea sitä, että Pedersen ym. [25] tutkimuksessa äänen etenemiseen käytetty laskentamalli aliarvioi A-painotettuja äänenpainetasoja vastaajan asumuksella tapauksissa, joissa lähteen ja havaitsijan välillä on suuria korkeuseroja. [25]

Yhden tai useamman tuuliturbiinin näkeminen ei Pedersen ym. [25] tutkimuksessa lisännyt vain äänen havaitsemisen todennäköisyyttä vaan myös häiriintyvyyden todennäköisyyttä. Tämä viittaa saman lähteen auditiivisen ja visuaalisen altistuksen yhteisvaikutukseen, joka saa aikaan äänestä häiriintymisen visuaalisen ärsytyksen vuoksi [25]. Tätä vaikutusta on aiemmin tutkittu Bangjun ym. kenttätutkimuksessa [51], missä liikenteen melu havaittiin häiritsevämmäksi, jos melulähde (tieliikenne) oli nähtävissä. Toisaalta häiriintyvyyden suurempi todennäköisyys niillä vastaajilla, joilla oli kielteinen käsitys tuuliturbiinien maisemavaikutuksista, viittaa esteettiseen kokemukseen liittyvään selitykseen: vastaajat, jotka pitävät tuuliturbiineja rumina, pitävät niitä myös todennäköisemmin maisemaan sopimattomina ja tuntevat täten häiriintyvänsä myös melusta. Viollon ym. kokeellinen tutkimus [52] on osoittanut, että liikenteen sama melutaso aiheuttaa suuremman meluhäiriintyvyyden, kun koehenkilöille näytetään kuvia ei-miellyttäväksi arvioidusta kaupunkimaisemasta verrattuna kuviin miellyttävämmästä alueesta.

Häiritsevyydellä on haitallisia terveysvaikutuksia. Yhteisömelu on joissain tutkimuksissa liitetty myös muihin ei-auditiivisiin (*engl. non-auditory*) terveysvaikutuksiin, esimerkiksi hiljattain julkistetussa tutkimuksessa lentokonemelusta ja verenpainetaudista [53]. Nämä tutkimukset ovat kuitenkin tutkineet lähinnä yli 50 dB(A) äänitasoja, eivätkä tulokset siten ole relevantteja tuuliturbiinimelun vaikutuksien kannalta. Pedersen ym. [25] tutkimuksessa tuuliturbiinimeluun ei voitu suoraan yhdistää mitään haitallisia terveysvaikutuksia häiritsevyyden lisäksi. Raportoidut äänihäirintään liitetyt univaikeudet ja epämukavuuden tunteet voivat olla altistuksen aiheuttamia, mutta voivat toisaalta johtua aivan yhtä hyvin siitä, että univaikeuksista kärsivät vastaajat pitävät helpommin melua häiritsevänä. Tuuliturbiinimelua psykofysiologisen palautumisen esteenä ei voi kuitenkaan jättää huomiotta. Työllistettynä oleminen liittyi hypoteesin vastaisesti korkeampaan tuuliturbiinimelun havaitsemistodennäköisyyteen. Tämä johtui mahdollisesti siitä, että kotinsa töihin mennessään jättävät yksilöt ovat herkempiä stressitekijöille, jotka voivat häiritä heidän

psykofysiologisen palautumisen tarvettaan kotona. Lisäksi vastaajat, jotka häiriintyivät melusta, eivät ajatelleet asuinympäristöään paikkana, jossa kerätä voimia. Palautumisen mahdollistavien ympäristöjen tarve terveyden ja hyvinvoinnin ylläpitämiseksi, varsinkin haavoittuvilla ryhmillä, on tuotu esiin muun muassa Kaplanin [54] toimesta. Maalaismainen ympäristö yhdistyy palauttaviin ominaisuuksiin, mikä viittaa siihen, että tuuliturbiinien aiheuttama audiaallinen ja visuaalinen häiriö voi muuttaa maaseutu ympäristön palauttavasta ei-palauttavaksi [25].

Melualtistuneiden selviytymisstrategioista keskustelu ja tiedon etsiminen vaikuttivat menestyksekkäimmiltä, koska nämä korreloivat pienemmän rasituksen kanssa. Tämä löytö pitäisi tiedostaa tuuliturbiinien suunnittelemisen yhteydessä. Aiotuilla tuulipuistoalueilla asuville ihmisille tulisi antaa oleellista informaatiota ja mahdollisuus kommunikoida suunnittelijoiden ja viranomaisten kanssa. [25]

Maarten Wolsink esittää artikkelissaan vuodelta 2007 [55], että melu on vain toissijainen tekijä asenteiden kannalta huolimatta sen selvittämisen tärkeydestä, ja viittaa vuonna 1993 tehtyyn kansainväliseen tutkimukseen [56], jossa 16 sijainnissa kolmessa eri maassa havaittiin, että yhteys ääniärsytyksen ja äänentason välillä ei ollut voimakas. Myöhempi ruotsalainen tutkimus [57] keskikokoisten turbiinien (~600 kW) lähellä asuvista vahvisti tätä tulosta. Alun perin Persson-Waye ja Öhrström [57] saivat selvän yhteyden turbiinin melun ja koetun ärsyttävyyden välillä. Heidän tutkimusryhmänsä sai myöhemmin kuitenkin uusia tuloksia kenttäkokeissa, joissa vastaajat asuivat lähellä tuuliturbiineja. Wolsink ym. tutkimuksen [56] tulosten perusteella he sisällyttivät useita asenneskaaloja tutkimukseensa [45] ja saivat selville, että annos-vaste-suhde A-painotettujen äänenpainetasojen ja tuuliturbiinimelun häiritsevyyden välillä riippui vastaajien asenteesta tuuliturbiinien maisemavaikutuksiin.

Isossa-Britanniassa tehtiin 1980- ja 1990-luvuilla kaksitoista itsenäistä tutkimusta kansalaisten tuulivoimanäkemyksen kartoittamiseksi [16]. Nämä tutkimukset tavoittivat 3000 ihmistä, joista suurin osa asui suunniteltujen tai jo rakennettujen tuulipuistojen vieressä. Jokainen tutkimuksista osoitti, että huomattava enemmistö tuulipuistojen läheisyydessä asuvista vastaajista suhtautui tuulivoimaan myönteisesti. He kannattivat tuulivoimaa uusiutuvana energianlähteenä, mutta myös sen rakentamista heidän alueelleen. Vastanneista 80 prosenttia tuki paikallista tuulipuistoa; tuulivoimaloiden lähellä asuvat olivat myönteisempiä tuulivoimalle kuin kauempana asuvat. Kaksivaiheisissa tutkimuksissa kyseltiin ihmisten mielipiteitä ennen tuulivoimaloiden asentamista ja toisen kerran asennuksen jälkeen. Vastaukset olivat myönteisempiä toisella kerralla, minkä

oletetaan johtuvan siitä, että ihmisillä on ollut mahdollisuus kokea itse, millaisia tuuliturbiinit ovat käytössä. [16]

Epäonnistuneista tuulivoimaprojekteista koituneita haittoja on kuitenkin vaikea kiistää. Esimerkkinä mainittakoon Inkoon Bärosundin kolmen voimalan tuulipuisto, jonka lähellä asunut Antero Topp kirjoitti Helsingin Sanomien Mielipidesivustolla 21.8.05 seuraavasti:

”Kun Bärolandetin kulttuurimaisemaan suunniteltiin tuulivoimaloita, paikallisille kerrottiin, että tuulimyllyt ovat niin pieniä, etteivät ne näy, ja niin hiljaisia, ettei kukaan voi niitä kuulla. Todellisuus on kuitenkin jotain aivan muuta. Tuulivoimalat näkyvät yli kymmenen kilometrin päähän, sietämätön melu kantautuu yli kilometrin etäisyydelle ja lisäksi siipien vilkkuminen aiheuttaa ajoittain epämiellyttäviä liikkuvia varjoja ympäristöön. Lyhyesti sanottuna, elämänlaatu on ajoittain sietämätöntä voimaloiden läheisyydessä. Kun uusia tuulivoimaloita rakennetaan, tärkeintä on valita rakennuspaikka siten, etteivät ne aiheuta ihmisille ja muulle ympäristölle ongelmia. Ei voi kuin ihmetellä, kuinka Inkoon kunta on voinut myöntää rakennusluvan kolmelle tuulivoimalalle keskelle ihmisasutusta. Lisäksi nämä laitokset on pystytetty kulttuurimaisemaan, minne ei edes saisi rakentaa teollista toimintaa. On todella häiritsevää, kun aamulla tai illalla menee omalle terassilleen nauttimaan luonnon rauhasta, niin taustalla kuuluu jatkuva hirvittävä humina ja sekunnin välein terassin yli pyyhkäisee voimalan roottorin varjo – olo on kuin huonossa nuorisodiskossa. Toisaalta kun tuulee tietystä suunnasta kolmen voimalan ollessa linjassa, ne alkavat resonoida ja meteli on täysin uskomaton – kuin tavarajuna puuskuttaisi ympäri omaa pihaa! Näissä tapauksissa on mitattu lähes 60 dB:n arvoja, mikä ylittää sallitut normit monella kymmenellä prosentilla. Tällaisessa ympäristössä eläminen ei ole minkään arvoista. Kuka korvaa ihmisille menetetyt luonnonrauhan, ja toisaalta maan arvon tuntuva romahtamisen? On helppoa hurskastella lehtien palstoilla vihreästä energiasta, mutta voiko väärään paikkaan sijoitettu valtaisa melu- ja vilkkukone tuottaa vihreää sähköä? Mielestäni ei. Kun vielä tiedetään, että voimalat tuottivat huhtikuussa vain kahdeksan prosenttia nimellistehosta (vastaa noin 250 omakotitalon sähköntarvetta), ja että paikallisia ihmisiä on harhautettu virheellisillä taustatiedoilla, niin tuulivoimalan oikeutusta Bärolandetissa voidaan pitää arveluttavana. Tuulivoima on varmasti hyvä asia, jos se toteutetaan oikein, mutta Inkoossa asiat on toteutettu niin amatöörimäisesti, että näistä tuulivoimaloista on tullut tuulivoiman vastustajien valttikortti.”

3.9 Tuulivoimamelun vaikutukset merinisäkkäisiin

Meri- ja rannikotuulipuistot voivat vaikuttaa myös merinisäkkäisiin (hylkeisiin ja valaisiin) monin tavoin. Asiaa on tutkittu ainakin vuodesta 1997, jolloin Tanskan hallituksen sitouduttua kehittämään offshore-tuulivoimaa rakennettiin pilottituulipuistoja ja havainnoitiin niiden vaikutuksia vesilintuihin ja merinisäkkäisiin. Kyseisten vaikutusten tutkimisesta vastanneen Tanskan kansallisen ympäristöntutkimusinstituutin (National Environment Research Institute, NERI) metodeja ovat hyödyntäneet offshore-tuulipuistoja suunnittelevat naapurimaat. [58]

Tuulivoimaloiden rakennusvaiheessa juntauksen ja muiden töiden melu ja värähtely karkottavat eläimet laajalta alueelta. Juntauksen emittoima energia on varmasti tarpeeksi suuri aiheuttamaan kuulovaurioita lähialueen pyöriäisille ja hylkeille [59]. Käytön aikanakin melua ja värähtelyä emittoituu vesimassaan, mikä saattaa häiritä eläinten kommunikaatiota ja ruoan hankintaa. Satamapyöriäiset ja muut valaat luottavat navigaatioissa ja ruoan hankinnassa kaikuluotaukseen, mutta ne käyttävät taajuuksia, jotka ovat paljon korkeampia kuin tuuliturbiinien emittoimat taajuudet, joten kaikuluotauksen häiriintyminen on epätodennäköistä [24].

Merinisäkkäiden häiriintymisen minimoimiseksi rakennustyöt tulisi ajoittaa huolellisesti ja herkät kaudet (esim. lisääntyminen ja nahanluonti) välttää. Tarkat ajanjaksot riippuvat mahdollisesti vaikutuksen alle joutuvista lajeista. Työskentelykäytännöt pitäisi suunnitella siten, että ne ottavat huomioon herkkien elinympäristöjen ja lajien suojelemisen. Esimerkiksi juntaus tulisi aloittaa hellästi, jotta pyöriäiset ehtivät liikkua pois äänilähteen luota. Valmiiden voimaloiden käytön aikana häiriöt voidaan minimoida huoltoalusten huolellisella ajoituksella ja reitityksellä. [24]

3.10 Tuulivoimaprojektin toteutustavan vaikutus häiritsevyyteen

Yleistä osallistumista tuulivoimaprojekteihin on Tanskassa ja Saksassa edistetty menestyksekkäästi käyttäen yhteisötuuli-konseptia [24]. Tanskalaiset yhteisötuuliprojektit ovat muodoltaan yleisiä kumppanuuksia [60]. Tällaisten yleisten kumppanuuksien rakenne on hyvin yksinkertainen: yksityishenkilöt yhdistävät (*engl. pool*) säästönsä voidakseen investoida tuuliturbiiniin ja myyvät valmiin voimalan sähkön paikalliselle sähkölaitokselle. Yhteisötuulen rooli on selvästi ollut ratkaiseva tuulivoiman globaalissa kehittämisessä [61]. Yleisillä kumppanuuksilla on ollut tärkeä rooli Tanskassa, varsinkin yleisen hyväksynnän lisäämisessä, kun vastustus voi muutoin olla kovaa visuaalisten ja meluhaittojen vuoksi [62]. Muut yhteisötuulta käyttävät maat ovat Ruotsi ja Iso-

Britannia [24].

Suomen Tuulivoimayhdistyksen (STY) silloinen puheenjohtaja Jari Ihonen kirjoitti *Tuulienergia-*lehden numeron 1/09 pääkirjoituksessa Suomen lähivuosien tuulivoimarakentamisen ympäristöhaittoihin liittyvistä haasteista [63]. Kirjoituksen taustalla oli näköpiirissä siintävä mittavan tuulivoimarakentamisen käynnistyminen nopealla aikataululla, mikä ei Ihosen mukaan tule tapahtumaan ilman ristiriitoja. Suomesta puuttuu Ihosen mukaan toimintakulttuuri ja yhteisten pelisääntöjen puute maanvuokraukseen ja tiedottamiseen liittyvissä asioissa, minkä hän mieltää huonontavan tuulivoiman mainetta ja vaikeuttavan projektien suunnittelua ja toteuttamista jatkossa. Ihosen mukaan on harrastettava avoimuutta, vaikka yksittäisen tuulivoimaprojektin alkuvalmistelun ja maanvuokrauksen voikin tehdä parhaiten vähäisellä tiedottamisella. Avoimuuden puutteesta ja varsinkin hankkeiden lopullisesta toteuttamisesta vastoin paikallisen väestön päämielipidettä voi Ihosen mukaan seurata projektin toteuttajan ja kenties koko alan maineen tahraantuminen. [63]

3.11 Meluhaittojen kompensointi

Jari Ihosen [63] mukaan olisi oikeudenmukaista kompensoida paikalliselle väestölle tuulivoiman rakentamisesta koituvia melu-, maisema- ja muita ympäristöhaittoja niiden paikallisen luonteen vuoksi. Kompensaation kaksi perusmuotoa voisivat olla vuokratulot ja kiinteistöverotulot. Vuokratuloja voitaisiin maksaa joko voimaloiden pystytysmaille tai koko tuulipuiston peittoalueelle. Edellisessä vaihtoehdossa saattaa Ihosen mukaan tosin pahimmillaan käydä niin, että ulkopaikkakuntalaiset maanomistajat saavat vuokratulot eivätkä paikalliset asukkaat saa kokemistaan haitoista huolimatta mitään. Kiinteistöverosta hyötyisivät Ihosen mukaan kaikki alueen asukkaat, mikä parantaisi tuulivoiman hyväksyttävyyttä. Toisaalta alhainen kiinteistövero parantaa tuulivoimahankkeiden kannattavuutta. Ihosen mukaan Suomeen kaavailtavan tuulivoiman syöttötariffin olisi syytä olla sen verran korkea, että myös kiinteistöveron taso voisi olla korkea ilman tuulivoiman investointihalukkuuden merkittävää huonontumista. [63]

Suomessa on säädetty laki ympäristövahinkojen korvaamisesta (19.8.1994/737) [64]. Se velvoittaa korvaamaan muun muassa melusta aiheutuneen ympäristövahingon. Korvausta ei tosin vaadita, jos häiriötä voidaan pitää kohtuullisena ottaen huomioon paikalliset olosuhteet ja häiriön syntymiseen johtanut tilanne kokonaisuudessaan sekä häiriön yleisyys vastaavissa olosuhteissa muutoin. Tämän lain nojalla korvataan myös kustannukset niistä tarpeellisista toimenpiteistä, joihin yksityishenkilö tai viranomainen on ryhtynyt ympäristövahingon uhan torjumiseksi tai vahingoittuneen ympäristön

palauttamiseksi ennalleen. Lain mukainen korvausvelvollisuus on voimassa silloinkin, kun vahinkoa ei ole aiheutettu tahallisesti tai huolimattomuudesta. [64]

Ympäristövahinkolain [64] mukaan on suoritettava etukäteiskorvaus, jos häiriöstä tulevaisuudessa aiheutuva ympäristövahinko voidaan arvioida etukäteen. Vahingonkorvauksen määrää voidaan myös oikaista jälkikäteen olosuhteiden muuttuessa. Korvausvelvollisen on omistajan vaatimuksesta lunastettava kiinteistö tai sen osa, jos kiinteistö käy omistajalle joko kokonaan tai osittain hyödyttömäksi ympäristövahingon takia tai kiinteistön käyttö tarkoitukseensa vaikeutuu olennaisesti. [64]

4. Johtopäätökset

Meluselvitykset on syytä tehdä huolella. Niissä on otettava mahdollisimman kattavasti huomioon meluhäirintään vaikuttavat seikat. Koska melun häiritsevyydestä vain viidennes riippuu melun äänenpainetasosta, olisi muita tekijöitä kartoitettava paljon nykyistä tarkemmin. Myös projektikohtaiset olosuhteet olisi otettava huomioon pelkän melulaskukaavojen orjallisen toteuttamisen sijaan, muutoin melutodellisuus saattaa tuulivoimaloiden käynnistymisen jälkeen yllättää. Melu on ylipäätään otettava vakavasti eikä ylimielisyydelle saisi antaa sijaa. On omaan nilkkaan ampumista vähätellä meluselvityksiä ja lähiasukkaiden pelkoja melua kohtaan. Varoittavana esimerkkinä voidaan pitää van den Bergin tutkimuksessa [29] käsiteltyä tuulipuiston rakentajayhtiötä, joka ei suostunut yhteistyöhön meluselvitysten tekemisessä, vaikka paikalliset asukkaat olivat jo vieneet asian oikeuteen.

Melu vaikuttaa ihmiseen kuuloaistin kautta tai suoraan ja sen vaikutus elämään voi olla dramaattinen. Meluhäiriintyminen voi johtaa ihmisten palautumisen vaikeutumiseen ja jopa toiminnanvajaukseen. Toimivien keino meluntorjuntaan on ennaltaehkäisy taitavan kaavoituksen ja projektisuunnittelun keinoin. Myös projektin toteuttamisen jälkeen meluhäiriintymistä voi vähentää varsinkin psykologisin välinein: Pedersen ym. [25] havaitsivat, että tiedon etsiminen ja tuuliturbiineista keskusteleminen olivat toimivia keinoja vähentää haitallisia terveysvaikutuksia.

Suomessa on näköpiirissä tuulivoiman teollisen rakentamisen merkittävä lisääntyminen, josta aiheutuvat ympäristöhaitat tulevat myös aiheuttamaan vastustusta. Varsinkin tässä herkässä kasvuvaiheessa olisi tuulivoimatoimijoiden otettava pääperiaatteikseen avoimuus ja vastuullisuus, jottei tuulivoiman kehittyminen Suomessa vaikeutuisi. Toimintaan tulisi kuulua meluselvitysten tunnollinen tekeminen projektialueen luonteenpiirteet huomioiden sekä projektialueen asukkaiden kuuleminen ja huomioon ottaminen.

Erialaisten ympäristöjen vaikutus tuuliturbiinimelun havaitsemiseen ja siitä ärsyyntymiseen on selkeä lisätutkimuksen kohde. Lisäksi tuulivoimaloiden aiheuttamien infraäänien vaikutuksista olisi erittäin tarpeellista saada lisää luotettavaa tutkimustietoa.

Lähteet

- [1] Tanskan tuulivoimateollisuuden kotisivut, *Guided tour on wind energy*, osoitteessa www.windpower.org
Haettu 29.6.2009.
- [2] T. Jauhiainen, H. Vuorinen, M. Heinonen-Guzejev, *Ympäristömelun vaikutukset* (Suomen Ympäristö 3/2007, Ympäristöministeriö, Edita Prima Oy, Helsinki, 2007), osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=64456&lan=fi>
Haettu 11.10.2009.
- [3] C. Di Napoli, *Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen* (Suomen ympäristö 4/2007, Ympäristöministeriö, Helsinki, 2007), osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=64260>
Haettu 11.10.2009.
- [4] ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, *Melu ja sen torjunta*, osoitteessa [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/99ad595c32e0c2d9c12566e1000a4540/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/\\$FILE/220_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/99ad595c32e0c2d9c12566e1000a4540/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/$FILE/220_0007.pdf)
Haettu 29.6.2009.
- [5] H. Peltonen, J. Perkkiö, K. Vierinen, *Insinöörin (AMK) fysiikka osa II* (Lahden Teho-Opetus Oy, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2002)
- [6] Sibelius-Akatemia, *Peruskäsitteitä: Kuuloalue, oktaavin käsite, diatonisuus*, osoitteessa <http://www2.siba.fi/akustiikka/index.php?id=12&la=fi>
Haettu 17.7.2009.
- [7] University of Southampton, ISVR Consulting, Noise, Vibration and Acoustics Consultancy from the Institute of Sound and Vibration Research, *Sound Power Measurement*, osoitteessa <http://www.isvr.co.uk/labtests/swl.htm>
Haettu 29.6.2009.
- [8] US Motors, *Sound Power and Sound Pressure* (Emerson Electric Co 2005), osoitteessa

http://www.usmotors.com/products/ProFacts/sound_power_and_sound_pressure.htm
Haettu 30.6.2009.

[9] L.S.A Chan, *BST2522 Building Environmental Science 2*, osoitteessa
<http://moscow.cityu.edu.hk/~bsapplec/spectrum.htm>
Haettu 30.6.2009.

[10] National instruments, *1/N octave analysis*, osoitteessa
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/101>
Haettu 30.6.2009.

[11] A. Iivonen, M. Horppila, M. Heikkonen, O. Rissanen, E-P Keskitalo, *Fonetiikan perusanasto* (Helsingin yliopisto, Fonetiikan laitos, Opiskelijakirjasto, 2000), osoitteessa
<http://www.opiskelijakirjasto.lib.helsinki.fi/fonterm/007.htm>
Haettu 10.10.2009.

[12] Jauhiainen ym. [2] mukaan: E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics – Facts and Models* (Springer, Heidelberg, 1990)

[13] R. Leino, *Vastamelu on hankala hallita*, Tekniikka ja Talous 12.10.2006, osoitteessa
<http://www.tekniikkatalous.fi/tk/article31329.ece>.
Haettu 18.6.09.

[14] J. Murray, *Industry slams the reports of “Wind Turbine Syndrome”*, BusinessGreen, 4.8.2009, osoitteessa
<http://www.businessgreen.com/business-green/news/2247190/wind-industry-slams-reports>
Haettu 27.9.2009.

[15] N. Pierpont, *Wind Turbine Syndrome – A Report on a Natural Experiment – pre-publication draft* (NM: K-Selected Books, Santa-Fe, 2009), osoitteessa
<http://www.windturbinesyndrome.com/wp-content/uploads/2009/03/ms-ready-for-posting-on-wtscom-3-7-09.pdf>
Haettu 27.9.2009.

[16] G. Taylor, Boylen kirjassa *Renewable energy, power for a sustainable future, second edition* (Bath Press, Open University, Iso-Britannia, 2004)

[17] P. Magoha, *Footprints in the wind – Environmental impacts of wind power development*, Refocus September/October (2002).

[18] Valtion Ympäristöhallinto, *Melutason ohjeavot*, osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=587&lan=fi>
Haettu 21.7.2009.

[19] Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista (993/1992), osoitteessa <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993>
Haettu 21.7.2009.

[20] E. Poikolainen, J. Ristolainen, Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy, *Kokkolan edustan merituulivoimalaitos, käytön aikaiset meluvaikutukset* (Pohjolan voima Oy, Hollola, 2001)

[21] Ympäristönsuojelulaki 4.2.2000/86, 25 a § (4.6.2004/459), osoitteessa <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000086>
Haettu 22.7.2009.

[22] Maankäyttö- ja rakennusasetus (10.9.1999/895), osoitteessa <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990895>
Haettu 22.7.2009.

[23] Laki eräistä naapuruussuhteista (13.2.1920/26), osoitteessa <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1920/19200026>
Haettu 24.7.2009.

[24] European Environment Agency, *Europe's onshore and offshore wind energy potential, An assessment of environmental and economic constraints* (EEA Technical report 6/2009, EEA, Kööpenhamina, 2009)

[25] E. Pedersen, K. Persson Wayne, *Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and*

well-being in different living environments, Occupational and Environmental Medicine **64**, 480–486 (2007).

[26] Taylorin [16] mukaan: M. Legertonin toimittama *Wind turbine noise workshop Proceedings*, ETSU-N-123 (Department of Trade and Industry, British Wind Energy Association, 1992)

[27] Taylorin [16] mukaan: J. Kragh ym. *Noise emission from wind turbines*, (National Engineering Laboratory for the Energy Technology Support Unit (ETSU), ETSU W/13/00503/REP, February, 1999).

[28] M. Björkman, *Long time measurements of noise from wind turbines*, Journal of Sound and Vibration **277**, 567–572 (2004).

[29] G.P. van den Berg, *Effects of the wind profile at night on wind turbine sound*, Journal of Sound and Vibration **277**, 955–970 (2004).

[30] A. Lepola, J. Hokkanen, *Teuvan tuulipuisto, ympäristövaikutusten arviointiohjelma* (Ramboll Finland Oy, EPV Tuulivoima Oy, Hollola, 2009)

[31] J. Hokkanen, V-M. Hilla, *Kristiinankaupungin Siipyyn edustantuulivoimapuisto,, ympäristövaikutusten arviointiohjelma* (Ramboll Finland Oy, Suomen Merituuli Oy, Hollola, 2009)

[32] T. Laatikainen, *Hiljene, sinä hermoja raastava tuulivoimala*, Tekniikka ja Talous 14.8.2008, osoitteessa <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article118829.ece?s=1&wtm=-18082008>
Haettu 18.6.09.

[33] Tekniikka.info, osoitteessa
<http://www.tekniikka.info/?page=selite&word=61580&criteria=1&ID=pkcwaalks>
Haettu 28.6.09.

[34] van den Bergin [29] mukaan: A.J. Kerkers, A.I. Koffeman, *Beoordeling van windturbinegeluid: technische rapportage—Continu, fluctuerend of impulsachtig* (Assessment of wind turbine sound: technical report—continuous, fluctuating or impulsive) (Lichtveld, Buis & Partners bv, 2002).

- [35] van den Bergin [29] mukaan: Handleidingmeten en rekenen industrielawaai (Manual for measuring and calculating industrial noise)(Haag, 1999).
- [36] van den Bergin [29] mukaan: TA-Lärm: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (Technical guideline for noise protection)(1998).
- [37] van den Bergin [29] mukaan: A.J. Kerkers, *Windpark Rheder Moor; prognose geluidsimmissie vanwege 17 Enercon 66 windturbines* (Wind park Rheder Moor; prognosis of sound immission from 17 Enercon 66 wind turbines) (Lichtveld Buis & Partners bv raadgevende ingenieurs, 1999).
- [38] van den Bergin [29] mukaan: S. Ljunggren, *Expert group study on 'Recommended practices for wind turbine testing and evaluation', part 10. Measurement of noise immersion from wind turbines at noise receptor locations* (Department of Building Science, The Royal Institute of Technology, Ruotsi, 1994/1997).
- [39] van den Bergin [29] mukaan: IEC International Standard 61400-11, *Wind turbine generator systems—Part 11: Acoustic noise measurement techniques*, IEC 61400-11:1998(E).
- [40] van den Bergin [29] mukaan: A.A.M. Holtslag, *Estimates of diabatic wind speed profiles from near-surface weather observations*, *Boundary-Layer Meteorology* **29**, 225–250 (1984).
- [41] van den Bergin [29] mukaan: D. Kühner, *Excess attenuation due to meteorological influences and ground impedance*, *Acustica—Acta Acustica* **84**, 870–883 (1998).
- [42] van den Bergin [29] mukaan: TA-Luft, *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz –Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft* (First general directive to the federal immission protection act—Technical guideline for clean air)(1986).
- [43] van den Bergin [29] mukaan: Climatological data from Dutch stations no. 8: Frequency tables of atmospheric stability (KNMI, De Bilt, 1972).
- [44] van den Bergin [29] mukaan: E. Rudolphi, *Wind turbine noise emission. Wind speed measurements below hub height give poor accuracy* (Proceedings of the Nordic Acoustical Meeting, Stockholm, 1998).

- [45] Pedersen ym. [25] mukaan: E. Pedersen, K. Persson-Waye, *Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship*, J Acoust Soc Am **116**, 3460–3470 (2004).
- [46] Pedersen ym. [25] mukaan: T. H. Pedersen, K. S. Nielsen, *Genvirkning af støj fra vindmøller* (Annoyance due to noise from wind turbines)(Report 150, DELTA Acoustic & Vibration, Kööpenhamina, 1994)
- [47] Pedersen ym. [25] mukaan: E. Pedersen, L. R-M. Hallberg, K. Persson Waye, *Living in the vicinity of wind turbines – a grounded theory study* (Qual Research Psych (toimituksessa)).
- [48] Pedersen ym. [25] mukaan: Swedish Environmental Protection Agency, *Ljud från vindkraftverk* (Noise from wind turbines)(Report 6241, Tukholma, 2001).
- [49] Pedersen ym. [25] mukaan: L. C. Manzo, *Beyond house and haven: toward a revisioning of emotional relationships with places*. J Environ Psychol **23**, 47-61 (2003).
- [50] Pedersen ym. [25] mukaan: J. Tognoli, *Residential environments*, D. Stokolsin ja I. Altmanin kirjassa “Handbook of environmental psychology” (NY: Wiley, New York, 1987).
- [51] Pedersen ym. [25] mukaan: Z. Bangjun, S. Lili, D. Guoqing, *The influence of the visibility of the source on the subjective annoyance due to its noise*, Appl Acoust **64**, 1205-1215 (2003).
- [52] Pedersen ym. [25] mukaan: S. Viollon, C. Lavandier, C. Drake, *Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment*, Appl Acoust **63**, 493-511 (2002).
- [53] Pedersen ym. [25] mukaan: M. Rosenlund, N. Berglind, G. Pershagen, *et al. Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise*, Occup Environ Med **58**, 769-773 (2001).
- [54] Pedersen ym. [25] mukaan: S. Kaplan, *The restorative benefits of nature: toward an integrative framework*, J Environ Psychol **15**, 169-182 (1995).
- [55] M. Wolsink, *Wind power implementation: The nature of public attitudes: Equity and fairness*

instead of 'backyard motives', Renewable and Sustainable Energy Reviews **11**, 1188–1207 (2007)

[56] Wolsinkin [55] mukaan: M. Wolsink, M. Sprengers, *Windturbine noise: a new environmental threat?* M. Valletin toimittamassa kirjassa “Noise as a public health problem, vol. 2.” (Bron (F): INRETS, 1993).

[57] Wolsinkin [55] mukaan: K. Persson-Waye, E. Öhrström, *Psycho-acoustical characters of relevance for annoyance of wind turbine noise*, J Sound Vib **250**, 65-71 (2002).

[58] Danish Environment Newsletter, *Offshore wind farms: Impact on seabirds and marine mammals*, no. 20 (Miljöministeriet, Tanska, 2002) osoitteessa:
http://www.mex.dk/uk/vis_nyhed_uk.asp?id=4658&nyhedsbrev_id=616
Haettu 12.10.2009.

[59] EEA:n [24] mukaan: OSPAR (= Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic), *Problems and benefits associated with the development of offshore wind-farms*, (Biodiversity Series, OSPAR Commission, 2004).

[60] EEA:n [24] mukaan: M. Bolinger, *Community wind power ownership schemes in Europe and their relevance to the United States* (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001).

[61] EEA:n [24] mukaan: A. Kildegaard, J. Myers-Kuykindall, *Community vs. corporate wind: Does it matter, who develops the wind in Big Stone County* (Research Report Prepared in Fulfillment of IREE Grant No. SG P4c 2004) osoitteessa <http://cda.morris.umn.edu/~kildegac/CV/Papers/IREE.pdf>
Haettu vuonna 2008.

[62] EEA:n [24] mukaan: H. C. Soerensen, L. K. Hansen, K. Hammarlund, J. H. Larsen, *Experience with and strategies for public involvement in offshore wind*, International Journal of Environment and Sustainable Development (IJESD), Vol 1 no. 4 (2002).

[63] J. Ihonen, *Teollinen tuulivoima alkaa Suomessa*, Tuulienergia Vol 20 no. 1 (2009).

[64] Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta (19.8.1994/737) osoitteessa

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19940737>

Haettu 24.7.2009.

Liitteet

Liite 1: Tyypillisiä äänen intensiteettejä, tehollisia paineita ja äänenpainetasoja eri tilanteissa [5].

I (W/m^2)	p (Pa)	L_p (dB)	Esimerkki
10^{10}	$2,0 \cdot 10^6$	220	Ydinpommi 500 metrin päässä
10^2	$2,0 \cdot 10^2$	140	Rock-konsertti (huippuarvo)
3,2	$3,6 \cdot 10^1$	125	Kipuraja
10^0	$2,0 \cdot 10^1$	120	Suihkukone noin 100 metrin päässä
10^{-1}	$6,3 \cdot 10^0$	110	Disko tai hyvin voimakas ukkosenjyrinä
10^{-2}	$2,0 \cdot 10^0$	100	Paineilmapora
10^{-3}	$6,3 \cdot 10^{-1}$	90	Päiväkoti
10^{-4}	$2,0 \cdot 10^{-1}$	80	Katumelu tai korvalappustereot
10^{-5}	$6,3 \cdot 10^{-2}$	70	Meluisa luokka
10^{-6}	$2,0 \cdot 10^{-2}$	60	Tavallinen puhe
10^{-7}	$6,3 \cdot 10^{-3}$	50	Toimisto
10^{-8}	$2,0 \cdot 10^{-3}$	40	Hiljainen toimisto
10^{-9}	$6,3 \cdot 10^{-4}$	30	Hiljainen asunto
10^{-10}	$2,0 \cdot 10^{-4}$	20	Puiden suhina
10^{-11}	$6,3 \cdot 10^{-5}$	10	Rannekellon tikitys
10^{-12}	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0	Kuulokynnys

Liite 2: Yleiset melutason ohjearvot. Melun A-painotettu keskiäänitaso (ekvivalenttitaso), L_{Aeq} , saa olla enintään oikealla olevissa sarakkeissa mainitun verran [18][20].

	Päivällä klo 7-22 [dB]	Yöllä klo 22-7 [dB]
Ulkona		
Asumiseen käytettävät alueet, virkistysalueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- tai oppilaitoksia palvelevat alueet	55	45-50 ¹⁾²⁾
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnonsuojelualueet	45	40 ³⁾
Sisällä		
Asuinhuoneet, paitsi keittiö	35	30
Asunnon muut tilat ja keittiö	40	40
Hoito- ja sosiaalihuollon laitokset, majoitustilat ja potilashuoneet	35	30
Päiväkodit, lastentarhat, lasten ja henkilökunnan oleskeluun tarkoitetut alueet	40	30
Kokoontumis- ja opetushuoneistot, luokkahuoneet, luentosalit, kirkot ja muut huonetilat, joissa edellytetään yleisön saavan puheesta hyvin selvän ilman äänenvahvistuslaitteiden käyttöä.	35	-
Muut kokoontumistilat	40	-
Työhuoneistot (yleisön vastaanottotilat ja toimistohuoneet)	35	-

¹⁾ Uusilla alueilla melutason yöohjearvo on 45 dB.

²⁾ Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoa.

³⁾ Yöohjearvoa ei sovelleta sellaisilla luonnonsuojelualueilla, joita ei yleisesti käytetä oleskeluun tai luonnon havainnointiin yöllä.