

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Tuulivoimaloiden meluhaitat

The noise impacts of wind farms

Työn tarkastaja: Kari Luostarinen

Työn ohjaaja: Kari Luostarinen

Lappeenranta 17.02.2016

Satu Tolvanen

# TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Satu Tolvanen

Opinnäytteen nimi: Tuulivoimaloiden meluhaitat

Ohjaaja: Kari Luostarinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2016

26 sivua, 3 kuvaa, 6 taulukkoa

Hakusanat: tuulivoima, melu, infraääni

Tuulivoiman tuotanto yleistyy nopeasti ja vaikka tuotannosta on monia hyötyjä, myös haittoja löytyy, yksi niistä voimaloista aiheutuva melu. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on aikaisempien kotimaisten ja kansainvälisten tutkimusten avulla kertoa tuulivoimalamelun syntymisestä ja siihen liittyvästä ohjeistuksesta sekä siitä, mikä melussa häiritsee, aiheuttaako se terveyshaittoja ja miten melua ehkäistään.

Melu on epämiellyttäväksi koettavaa ääntä, joka voi olla myös kuulolle haitallista. Tuulivoiman tuotannosta syntyvä melu on joko aerodynaamista, mekaanista, matalataajuisista tai infraääntä. Melua syntyy turbiinin pyörimisestä sekä sähköosien toiminnasta.

Suomessa Ympäristönsuojelulaissa on annettu ohjeistus tuulivoimalamelun mittaamiseen käytettävistä mittalaitteista, niiden sijoittamisesta sekä mittaamisen toteuttamisesta eri olosuhteissa. Myös melun suurimmat sallitut arvot ulkona ja sisällä sekä päivällä, että yöllä on valtioneuvosto määritellyt Suomessa tarkasti. Näitä raja-arvoja melu ei saa ylittää kuin poikkeustapauksissa lyhytaikaisesti.

Tuulivoimalamelun aiheuttamia terveyshaittoja on tutkittu laajasti ja joitain johtopäätöksiä on voitu tehdä. Tuulivoiman tuotannosta syntyvä melu voi häiritä unta ja unen laatua sekä vaikeuttaa nukahtamista ja lisätä stressiä. Se, kuinka voimakkaasti henkilö ärsyyntyy tuulivoimalasta, riippuu paljon olosuhteista, hyötyykö henkilö taloudellisesti voimalasta, kuinka paljon henkilö luottaa alueensa virkamiehiin, näkeekö hän voimalan tai asuuko henkilö maaseudulla vai kaupungissa. Jatkotutkimuksia tarvitaan siitä, aiheutuvatko terveyshaitat tuulivoimalamelun synnyttämästä stressistä, vai yhdistetäänkö muusta syystä syntynyt stressi tuulivoimalaan. Lisäksi lisätutkimuksia tarvitaan matalataajuisen ja infraäänien aiheuttamista terveyshaitoista.

Melun ehkäisemiseen on monia eri keinoja, joista tärkeimmät ovat oikeanlaisen tuulivoimalatyypin ja tehonsäätötavan valitseminen sekä oikeanlainen rakennustekniikka. Nykyaikaiset tuulivoimalat ovat jo melko hyvin suunniteltuja ennaltaehkäisemään voimalan toiminnasta syntyvää melua.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>3</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Melu</b>	<b>6</b>
<b>3 Tuulivoimaloiden melu</b>	<b>8</b>
3.1 Aerodynaaminen melu .....	8
3.2 Mekaaninen melu .....	10
3.3 Matalataajuinen ja infraäänestä syntyvä melu.....	10
<b>4 Tuulivoimalan melun mittaaminen</b>	<b>14</b>
4.1 Mittalaitteet .....	14
4.2 Mittaaminen.....	15
<b>5 Asetukset ja säädökset</b>	<b>18</b>
<b>6 Tuulivoimalamelun häiritsevyys ja terveyshaitat</b>	<b>20</b>
<b>7 Tuulivoimalamelun ehkäiseminen</b>	<b>22</b>
<b>8 Yhteenveto</b>	<b>23</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>25</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$h$	napakorkeus	[m]
$v$	nopeus	[m/s]
$z_0$	maan karheus	[ - ]
$L$	melutaso	[dB]
$t$	aika	[s]

### Alaindeksit

10	mittaus 10 metrin korkeudella
h	mittaus napakorkeudella
ref	referenssi
Aeq	A-painotettu ekvivalentti
Aeq,corr	A-painotettu ekvivalentti korjattu
Aeq,free	A-painotettu ekvivalentti mitattu
Aeq,t	A-painotettu ekvivalentti tietyllä mittausajalla
n	keskimääräinen
Aeq,1h	A-painotettu tunnin keskiarvo

### Lyhenteet

TBL	turbulenssi lavan jättöreunalla
-----	---------------------------------

## 1 JOHDANTO

Tuulivoima yleistyy todella nopeasti ja yleistymisen mukana energiantuotanto siirtyy kohti ympäristöystävällistä tuotantotapaa. Joitain ongelmia kuitenkin nousee esiin jarruttamaan tuulivoiman rakentamista, kuten lähistöllä asuvien asukkaiden vastustus, jota aiheuttavat muun muassa voimaloiden ulkonäkö ja niiden toiminnasta syntyvä melu. Melu kulkeutuu lähistön asukkaiden koteihin, jolloin asukkaat voivat kokea epämukavuutta ja ärsyyntyä äänestä. Lisäksi korkeuteen kohoavat tuulipuistot muuttavat maisemaa ja näkyvät lähiseudun asukkaille, jolloin niiden synnyttämään ääneen voidaan kiinnittää enemmän huomiota.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kertoa lukijalle tuulivoimalamelusta olemassa olevien suomalaisten ja kansainvälisten tutkimusten avulla. Työssä paneudutaan tuulivoimalamelun syntymekanismiin, sen eri muotoihin, kuten aerodynaamiseen ja mekaaniseen meluun sekä infraääneen, sekä kerrotaan melun mittauksesta ja sääntelystä. Lisäksi syvennytään tarkemmin siihen, mikä tuulivoimalamelussa häiritsee, mistä ärsyyntyminen voi johtua ja aiheutuuko melusta terveyshaittoja sekä kerrotaan sen ehkäisytaidoista.

## 2 MELU

Melu on ääntä, joka koetaan epämiellyttäväksi, häiritseväksi, odottamattomaksi tai ääntä, joka on kuulolle haitallista. Äänen kokemiseen meluna vaikuttavat henkilön subjektiivinen kokemus sekä yksilölliset ominaisuudet kuten meluherkkyys tai asenne äänilähdettä kohtaan. Yksilön kokemuksen lisäksi meluaistimukseen vaikuttavat äänen fyysiset ominaisuudet kuten äänen voimakkuus, taajuus, kapeakaistaisuus ja impulssimaisuus eli iskumaisuus sekä melulle altistumisen aika ja paikka. (Terveystieteiden tutkimuskeskus 2014.) Valtioneuvosto on säätänyt yleiset ohjeet melutasolle, jotta turvataan ympäristön viihtyisyys ja ehkäistään meluhaittoja (993/1992). Yleiset ohjeet melutasolle on esitetty taulukossa **Taulukko 1**. Ohjeet noudattavat melun keskiäänitason eli A-painotettua ekvivalenttitasoa  $L_{Aeq}$ , päiväohje on voimassa klo 7-22 ja yöohje klo 22-7. Uusien ulkoalueiden yöohje poikkeaa vanhasta siten, että vanhan arvon ollessa 50 dB on uusien alueiden ohje 45 dB. Lisäksi oppilaitosten alueilla noudatetaan vain päiväohjeälyä. Sisätiloille poikkeuksia on määritetty opetus- ja kokoontumistiloille sekä liike- ja toimistohuoneille, joissa noudatetaan vain annettuja päiväohjeälyä.

**Taulukko 1.** Yleiset ohjearvot melutasolle (993/1992)

		Päivä (dB)	Yö (dB)
Ulkona:			
alue	Asuminen, virkistysalue taajamassa, hoito- ja oppilaitokset	55	50*
	Loma-asuminen, leirintä-, virkistys- ja luonnonsuojelualueet	45	40
Sisällä:			
huone/tila	Asuin-, potilas- ja majoitustilat	35	30
	Opetus- ja kokoontumistilat	35	-
	Liike- ja toimistotilat	45	-

\* uudella asuinalueella 45 dB, oppilaitoksille vain päivällä

### 3 TUULIVOIMALOIDEN MELU

Tuulivoimaloissa melua syntyy lapojen pyörimisestä sekä sähköntuottojärjestelmästä, kuten vaihteistosta, generaattorista ja jäähdytysjärjestelmä. Lapojen pyörimisestä aiheutuva melu on aerodynaamista ja jaksollista ja täten lavat ovat hallitseva melunlähde tuulivoimaloissa. (Napoli 2007, 9.) Sähköntuottojärjestelmän melu on mekaanista melua, joka aiheutuu suurimmalta osin vaihteistosta (Kaltschmitt et al. 2013, 1849).

#### 3.1 Aerodynaaminen melu

Tuulivoimalan lapojen pyörimisestä aiheutuvan aerodynaamisen melun jaksollisuus syntyy doppler -ilmiöstä. Havaittajan ja äänilähteen, eli lavan siiven, välinen etäisyys muuttuu lavan pyörimisnopeuden mukaan ajan funktiona. Voimakkain ääni aiheutuu, kun siipi ohittaa maston, jolloin melua syntyy sekä äänen heijastumisesta että lavan ja tornin välisen ilmakerroksen puristumisesta. (Napoli 2007, 9.)

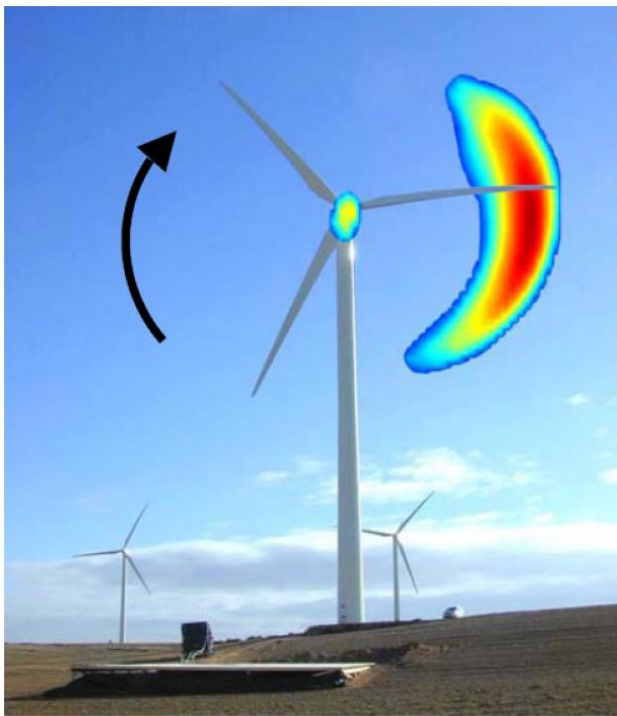
Aerodynaamisen melun kolme eri osa-aluetta ovat matalataajuinen melu, sisään virtauksen turbulentsisuuden aiheuttama melu ja siivekkeen ominaismelu. Matalataajuisista melua syntyy turbiinin siiven ohittaessa maston aiheuttaen ilman turbulentsista virtausta vanavedessään. Lisäksi, jos tuulivoimalat on sijoitettu liian lähelle toisiaan, voivat pyörivät turbiinit synnyttää ilman turbulentsista virtausta ja näin matalataajuisista melua. (Kaltschmitt et al. 2013, 1849.)

Sisään virtauksen turbulentsisuus liittyy siiven profiilin muutoksen aiheuttamaan aerodynaamiseen nosteeseen. Aerodynaaminen noste syntyy ilmanpaineen vaihtelusta lavan eri pinnoilla. Yli- ja alipaine vaikuttavat ilman virtaukseen siivellä. Ilmavirtaus on aluksi laminaarista siiven pinnalla, mutta muuttuu turbulentsiseksi terävemmän jättöreunan alueella. (Napoli 2007, 10.) Sisään virtaukseen vaikuttavat siipiprofiilin lisäksi myös ympäristöolosuhteet, kuten vallitsevat sääolosuhteet ja maanmuodot (Kaltschmitt et al. 2013, 1849).

Siivekkeen ominaismelu on ääntä, jonka tuulivoimala vähintään aiheuttaa olosuhteiden ollessa optimaaliset. Siiven aiheuttaman äänen syntymiseen vaikuttavat turbulenssi lavan jättöreunalla (TBL), jättöreunan profiilin tylppyytensä sekä siiven kärjen pinta-alan ka-

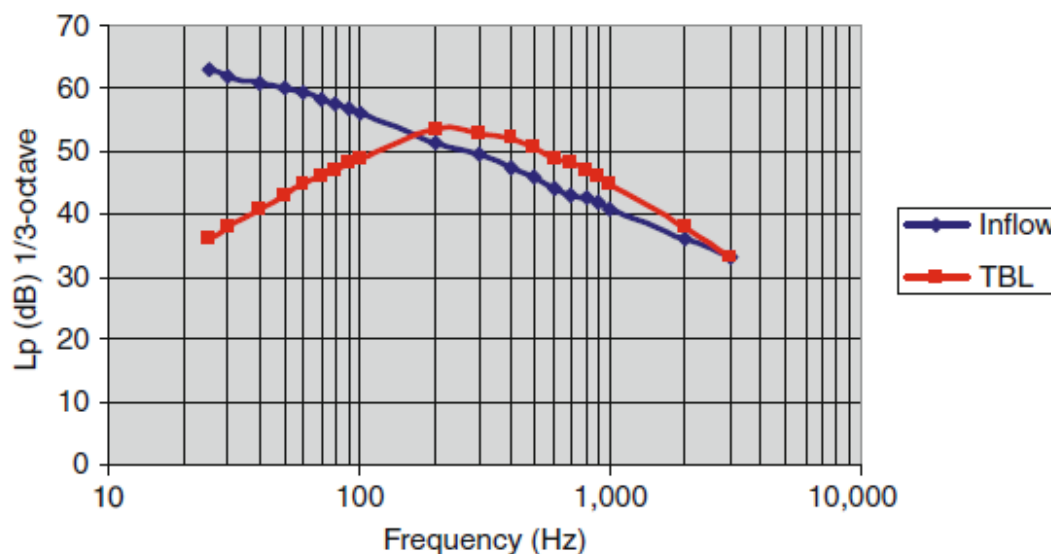


peneminen (Kaltschmitt et al. 2013, 1849). Näistä kolmesta äänen lähteestä dominoiva tekijä on turbulenssi lavan jättöreunalla, joka kasvaa lavan pituuden ja pyörimisnopeuden kasvaessa (Napoli 2007, 10). Siiven melu on siis voimakkainta siiven kärjessä. Melun voimakkuus siiven kärjessä on voitu paikantaa akustisella paikannuksella horisontaaliselle mittauspinnalle. Esimerkkinä akustisesta mittauksesta on kuvassa **Kuva 1** esitetty tuuliturbiinin melulähteet 2,3 MW tehoisessa tuulivoimalassa. Voimalan roottorin halkaisija on 94 metriä ja maston korkeus 100 metriä. Kuvassa punaisella värillä näkyy alue, jossa akustinen ääni on voimakkain.



**Kuva 1.** Tuuliturbiinin melulähteet akustisella mittauksella (Napoli 2007, 10).

Tuulivoimalan synnyttämä aerodynaaminen melu johtuu suurimmalta osin turbulentsista sisään virtauksesta sekä turbulenssista lavan jättöreunalla (Kaltschmitt et al. 2013, 1850). Kuvassa **Kuva 2** on esitetty aerodynaamisen melun päälähteiden jakautuminen eri taajuuksille. Kuvasta nähdään, että turbulentsinen sisään virtaus aiheuttaa suurimman osan melusta taajuuksilla 100-200 Hz ja lavan jättöreunan turbulenssi (TBL) dominoi melulähteenä taajuuksilla 200-3000 Hz.



**Kuva 2.** Tuuliturbiinin aerodynaaminen melun lähteiden jakautuminen eri taajuuksille (Kaltschmitt et al. 2013, 1850).

### 3.2 Mekaaninen melu

Tuulivoimalan mekaaninen melu aiheutuu suurimmalta osin vaihteistosta, mutta myös generaattori ja jäähdytysjärjestelmät tuottavat melua. Mekaaninen melu kulkeutuu rungon kautta värähtelynä maahan sekä jäähdytysjärjestelmän ilmanvaihtoaukkojen kautta suoraan ilmaan. Vaihteiston melu syntyy vaihteiston jäähdyttämisestä ilmalla, jolloin ilmavirtauksen virtausmeluun on sekoittunut moottorimelua, joka kulkeutuu ilmaan ilmanvaihtoaukkojen kautta. Mekaaninen melu ei uusimmissa tuulivoimaloissa ole niin häiritsevää kuin aerodynaaminen melu, sillä mekaniikan synnyttämä melu saadaan tehokkaasti pienennettyä koteloimalla vaihteisto ja generaattori. Lisäksi melu on yleensä matalataajuisista sekä kapeakaistaista ja voimakkuudeltaan alhaista, joten se on häiritsevää vain voimalan välittömässä läheisyydessä. (Napoli 2007, 11.)

### 3.3 Matalataajuinen ja infraäänestä syntyvä melu

Tuulivoimaloissa syntyy matalataajuisista ja infraäänimelua, kun tornin eteen kertyy painekasauma tai kun roottorin siivekkeet ohittavat tuulivoimalan maston, jolloin aerodynaamisen kuorman suuruus muuttuu. (Jakobsen 2005, 146). Mataliksi taajuuksiksi mää-

ritellään yleisesti 20...200 Hz ja infraääneksi alle 20 Hz (Møller et al. 2011, 3727). Infraääntä ei ihmisen tulisi pystyä kuulemaan, sillä ihmisen kuuloalueen ymmärretään päättyvän 20 Hz, mutta kuuloalueen rajat vaihtelevat yksilöittäin, joten infraäänien taaajuuden määrittely on hankalaa ja äänen yläraja on liikkuva (Ibid).

Toisin kuin normaalin tuulivoimalamelun mittauksella A-painotetulla äänitasolla infraääntä mitataan G-painotetulla äänitasolla (Ibid). G-painotus kattaa alle 20 Hz taajuudet, joten se sopii hyvin infraäänien mittaamiseen. G-painotettu infraääni, joka on juuri ja juuri kuultavaa on noin 100 dB(G) ja infraääni, joka on jo kovaa ja häiritsevää on noin 120 dB(G), joten infraäänissä on erittäin pieni vaihteluväli hiljaisen ja kovan melun välillä (Jakobsen 2005, 150).

Tuulivoimaloiden synnyttämästä matalataajuisesta äänestä ja infraäänestä on tehty monia tutkimuksia ja mittauksia varsinkin Tanskassa, jossa tuulivoima on tärkeä energiantuotantomuoto. Infraääntä ja matalia taajuuksia on mitattu sekä läheltä tuulivoimaloita, 100 m, että kaukaakin, jopa 1000 m, niin ulkona kuin talojen sisällä. Mitattujen äänten G-painotetut melutasot jäivät tutkimuksissa alle normaalin kuulokynnyksen, suurin mitattu melutaso G-painotuksessa sisätiloissa on noin 70 dB(G), joka on reilusti alle kuultavan 100 dB(G) tason. (Møller et al. 2011, 3729.)

Tanskassa suoritetuissa tutkimuksissa vertaillaan upwind - ja downwind -tuuliturbiinien tuottamia infra- ja matalataajuisia ääniä. Upwind -tuulivoimalassa turbiini on mastossa kiinni siten, että se altistuu tuulelle tuulen virtauksen suunnasta. Downwind -tuulivoimalassa taas turbiini on sijoitettu tuulen suojapuolelle. Tutkimusten tuloksissa todetaan, että moderneissa upwind -turbiineissa syntyvä infraääni niin lähellä kuin kaukanakin turbiinista on alle infraääniraja-arvon, joka esimerkiksi Tanskassa on 85 dB(G). Vanhemmat downwind -turbiinit taas tuottavat infraääntä, joka ylittää raja-arvon sekä sisällä, että ulkona jopa satojen metrien päässä turbiinista. (Jakobsen 2005, 152.) Saksassa ja Yhdysvalloissa tehtyjen tuuliturbiinien infraäänimittausten yhteenveto on esitetty taulukossa **Taulukko 2**. Taulukossa esitetyt tulokset eivät ole suoraan verrattavissa keskenään eri olosuhteiden vuoksi, mutta tuloksen antavat suuntaa, millaisia infraäänitasoja erisuuruista tuulivoimaloista syntyy.

**Taulukko 2.** Tuuliturbiinien infraäänimittausten tuloksia (Jakobsen 2005, 150).

Tuuliturbiini	Teho [kW]	Mittausetäisyys [m]	Infraäänitaso [dB(G)]	Olosuhteet
Monopteros 50	640	200	84	11 m/s (Saksa)
Enercon E-40	500	200	56-54	8 m/s (Saksa)
Vestas V66	1650	100	70	(Saksa)
Bonus	450	80	65	9 m/s (4 turb.) (Saksa)
-	-	100	74	8 m/s (1 turb.) (Saksa)
-	-	200	63	10 m/s (1 turb.) (Saksa)
-	-	100-200	70	9 m/s (4 turb.) (Saksa)
MOD-1	2000	105	107	(USA)
-	-	1000	73-75	(USA)
WTS-4	4200	150	92	(USA)
-	-	250	83-85	(USA)
MOD-5B	3200	68	71	(USA)
USWP-50	50	500	67-79	(14 turb.) (USA)
WTS-3	3000	750	68	(USA)
-	-	2100	60	(USA)

Infraäänien leviäminen ja äänen voimakkuuden pieneneminen etäisyyden kasvaessa äänilähteestä eroaa oleellisesti korkeampien taajuuksien leviämisestä ja vaimenemisesta. Korkeataajuiset äänet vaimenevat 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa johtuen ilmakehän absorptiosta, maanpinnan heijastusvaikutuksesta, säätilasta sekä erilaisten objektien, kuten rakennusten, vaikutuksesta (Napoli 2007, 16). Infraääni taas vaimenee vain 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa, koska edellä mainituilla ympäristökiteijöillä ei ole

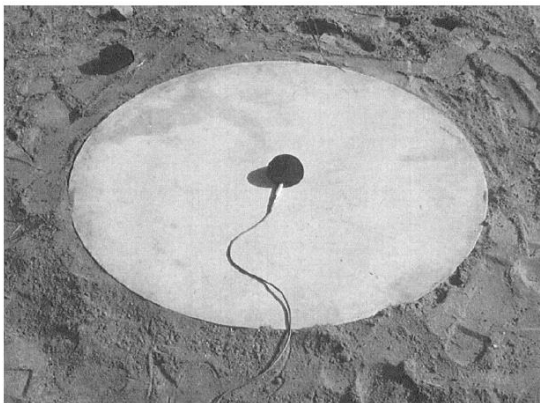
suurta vaikutusta matalien taajuuksien taajuusjakaumaan ja aallonpituuteen (Jakobsen 2005, 151).

## 4 TUULIVOIMALAN MELUN MITTAAMINEN

Ympäristöhallinto on antanut yksityiskohtaiset ohjeet tuulivoimalan melun mittaamiseen altistuvassa kohteessa ohjeistuksella 4/2014. Ohjeissa kerrotaan tarkasti mittauksessa käytettävistä mittalaitteista, mittaamisen suorittamisesta sekä mittauksen raportoinnista.

### 4.1 Mittalaitteet

Äänitekniset mittalaitteet tulee kalibroida ennen jokaista mittaussarjaa sekä mittausten jälkeen ja kalibraattori tulee tarkastaa kahden vuoden välein. Mikrofonin ympärillä tulee käyttää vähintään yhtä tuulisuojaa ja suojan vaikutus mikrofonin taajuusvasteeseen on huomioitava mittausraportissa. Jos tuuli aiheuttaa merkittävää kohinaa mikrofonissa, tulee mikrofoni asettaa maahan mittauslevyn päälle, kuten kuvassa **Kuva 3** on esitetty. Äänen mittaamisen lisäksi tulee mitata ympäröiviä olosuhteita, kuten tuulen nopeutta ja suuntaa sekä ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Ohjeistuksessa on annettu tarkuusraja-arvot ympäristöolosuhteiden mittaamiseen tarkoitetuille mittalaitteille. (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, 12-15.)



**Kuva 3.** Mikrofonin asettelu mittauslevyn päälle (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, 13).

## 4.2 Mittaaminen

Mittauksessa tulee huomioida taustamelu, joka voi johtua tuulikohinasta mikrofonissa, tuulen virtauksesta kasvustossa ja rakenteissa, veden virtauksesta, liikenteestä, teollisuudesta tai ihmisen toiminnasta. Taustamelun huomioimiseksi tulee tehdä taustamelukorjaus. Mitattava suure on A painotettu keskiäänitaso  $L_{Aeq}$  tuulen nopeuden funktiona ajanhetkellä  $t$ . Oletuksena on, että myös taustamelu on tuulen nopeuden funktiona. (Ibid.)

Mittausmenettelyihin on annettu ohjeistukseksi kolme eri menettelytapaa riippuen tilanteista. Menettelytavat ovat tuulivoimalan melutason mittaaminen, tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä tuottaman melutason mittaaminen tuulen nopeuden tavoitearvolla sekä tuulivoimalan tuulen nopeuden tavoitearvolla tuottaman melutason mittaaminen. Menetelmät eroavat toisistaan monimutkaisuuden sekä tarkoituksen mukaan. Ensimmäinen menetelmä on yksinkertainen ja sen avulla voidaan verrata tuulivoimalan tuottamaa melutasoa suunnittelu- tai tunnusarvoon. Toisen menetelmän etuna on se, että sen avulla saadaan määritettyä tuulivoimalan tuottaman melutason yläraja tuulen nopeuden tavoitearvolla. Tulosta voidaan hyödyntää todentamaan se, että tuulivoimalan tuottama melutaso on melun suunnittelu- tai tunnusarvoa pienempi. Kolmas menetelmä on samanlainen kuin toinen menetelmä, mutta hieman laajennettuna. Viimeisen menetelmän avulla voidaan verrata tuulivoimalan tuottamaa melua suunnittelu- tai tunnusarvoon tilanteessa, jossa tuulivoimalan lähellä vallitsevaa tuulen nopeutta on käytetty melutason määrittämiseen. (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, 16.)

Tuulen nopeus mitataan anemometrillä joko tuulivoimalan napakorkeudella tai vähintään 10 m korkeudella tuulen puolella voimalaan nähden. Jos tuulen nopeuksia on mitattu eri korkeuksilla, tulee ne normalisoida samaa korkeutta vastaaviksi, jotta niitä voidaan vertailla keskenään. (Ibid.)

$$v_{10} = v_h \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (1)$$

missä  $h$  on tuulivoimalan napakorkeus [m]

$v_{10}$  on mitattu tuulen nopeus 10 m korkeudella [m/s]

$v_h$  on mitattu tuulen nopeus napakorkeudella [m/s]

$z_0$  on maan karheus [ - ]

$h_{\text{ref}}$  on referenssikorkeus 10 m [m]

Eri korkeudella mitatut tuulen nopeudet normalisoidaan samaan korkeuteen yhtälön (1) avulla. Yhtälössä esiintyvä maan karheus  $z_0$  saadaan taulukosta **Taulukko 3**.

**Taulukko 3.** Maanpintojen karheuksia (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, 18).

Maanpinnan tyyppi	Karheus $z_0$ [m]
Vesi, lumi, hiekka	0,0001
Avoin tasainen maa, paljas maanpinta, leikattu nurmi	0,01
Viljelysmaa, jossa hieman kasvillisuutta	0,05
Asuinalue, pienet kaupungit, alueet, joilla on tiheää korkeaa puustoa	0,3

Tuulen nopeuden lisäksi mitataan tuulen suunta samalla kohdalla kuin tuulen nopeus sekä vähintään 10 metrin korkeudella maan pinnasta. Tuulen suunnan mittauspisteeseen tulee olla vähintään  $\pm 45^\circ$ , jotta voimaloista aiheutuvat häiritsevyyttä lisäävät amplitudimodulaatiot saadaan huomioitua mittauksissa. (Ibid.)

Mittauksia suoritettaessa tulee tuulivoimalan toimiessa mitata keskiäänitaso  $L_{\text{Aeq},t}$  ja tuulen nopeus usealla eri mittauksella mittausajan  $t$  ollessa yksi minuutti kullakin kerralla. Mittauksia suoritetaan vähintään kymmenen ja kokonaismittausajan on oltava vähintään puoli tuntia. Mittaustavan valinnasta riippuen mitataan myös taustamelutaso. Taustamelutason mittaus tapahtuu tuulivoimalan ollessa pysäytettynä joko ennen tuulivoimalan melutason mittaamista tai heti melutason mittauksen jälkeen. Taustamelu mitataan, jotta voidaan korjata tuulivoimalan mitatut äänenpainetasot  $L_{\text{Aeq,free}}$ . (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, 21.)

$$L_{\text{Aeq,corr}} = 10 \cdot \lg \left( 10^{\frac{L_{\text{Aeq,free}}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (2)$$



missä	$L_{Aeq,corr}$ on tuulivoimalan tuottaman melutason korjattu arvo [dB]
	$L_{Aeq,free}$ on tuulivoimalan tuottaman melutason mitattu arvo [dB]
	$L_n$ on keskimääräinen melutaso kullakin tuulen nopeusalueella [dB]

Yhtälön (2) avulla poistetaan taustamelun aiheuttama melutaso tuulivoimalan aiheuttaman melutason mitatuista arvoista. Mikäli taustamelutaso vaikuttaa liikaa mittaustuloksiin, voidaan taustamelutason määrään vaikuttaa mittauksen ajankohdan siirtämisellä, esimerkiksi yöaikaan, muuttamalla mikrofoniin sijaintia, käyttämällä kaksiosaista tuulisuojaa tai mittauslevyä tai suorittamalla mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa tai lähempänä tuulivoimalaa. (Ibid.)

Tuulivoimalan melutason sekä taustamelun mittaamisen lisäksi tulee vielä määrittää melun kapeakaistaisuus, melun impulssimaisuus sekä melun amplitudimodulaatio. Melun ollessa kapeakaistaista lisätään mittaustulokseen 5 dB ennen tuloksen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon. Myös melun impulssimaisuudesta sekä amplitudimodulaatiosta lisätään tuulivoimalan mittaustulokseen 5 dB kussakin tapauksessa ennen melun vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon. (Ibid.)

## 5 ASETUKSET JA SÄÄDÖKSET

Ympäristönsuojelulaissa annetaan tarkat rajat tuulivoimalan toiminnasta aiheutuvaan ulkomelutasoon päivällä ja yöllä. Raja-arvot on määritetty A-painotetulle keskiäänitasolle  $L_{Aeq}$  melupäästön takuuarvon perusteella. Melupäästön takuuarvolla tarkoitetaan tuulivoimalan valmistajan ilmoittamaa melutasoa. (1107/2015.) Ulkomelutason ohje-arvot on esitetty taulukossa **Taulukko 4**. Kuten yleisestikin melulle, oppilaitoksissa ja virkistysalueilla noudatetaan vain päiväohje-arvoa.

**Taulukko 4.** Tuulivoimalamelun ohje-arvot ulkomelutasolle (1107/2015).

	Ulkomelutaso $L_{Aeq}$ päivälä klo 7-22 [dB]	Ulkomelutaso $L_{Aeq}$ yöllä klo 22-7 [dB]
pysyvä asutus	45	40
loma-asutus	45	40
hoitolaitokset	45	40
oppilaitokset	45	-
virkistysalueet	45	-
leirintäalueet	45	40
kansallispuistot	40	40

Yleisiä melutason ohje-arvoja taulukosta **Taulukko 1** ja tuulivoimalamelun ohje-arvoja verrattaessa nähdään, että pysyvälle asutukselle, virkistysalueille sekä hoito- ja oppilaitoksille tuulivoimalamelun ulkomelutason ohje-arvot ovat 10 dB pienemmän kuin yleisen melun ohje-arvot. Loma-asutukselle sekä leirintä- ja virkistysalueille ohje-arvot ovat samansuuruiset.

Tuulivoimalan toiminnasta aiheutuvan sisämelun ohje-arvot on annettu Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeissa. Ohjeet pohjautuvat terveydensuojelulain (763/94) vaatimukseen siitä, että asunnon olosuhteiden tulee olla sellaiset, että niistä ei koidu terveydellistä haittaa siellä oleskeleville. Sisämelun ohje-arvot on esitetty pienitajuiselle melulle terssikaistoittain taulukossa **Taulukko 5**.

**Taulukko 5.** Pienitaajuisten sisämelun ohjearvot terssikaistoittain (Asumisterveysohje 2003, 36)

Kaista/Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
$L_{Aeq,1h}/dB$	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

Melun mittaustuloksiin tehdään 5 dB suuruinen korjaus ylöspäin ennen tuloksen vertaamista taulukon **Taulukko 4** ohjearvoihin, mikäli melu on impulssimaista tai kapeakaistaista (1107/2015). Taulukon **Taulukko 5** arvoihin verrattaessa mittaustuloksiin ei tehdä kapeakaistaisuus- tai impulssimaisuuskorjausta (Asumisterveysohje 2003, 36).

Vertailun vuoksi tuulivoiman suurtuotantomaaissa Tanskassa annetut tuulivoimalan aiheuttaman ulkomelun A-painotetut ohjearvot on esitetty taulukossa **Taulukko 6**. Taulukosta nähdään, että Tanskassa ulkomelutasoraja-arvot ovat pienemmät kuin Suomessa ja ohjearvot on annettu tuulennopeuden mukaan eikä vuorokauden ajan mukaan kuten Suomessa. Poiketen Suomesta myös matalataajuiselle melulle on annettu ulko- ja sisämelutason raja-arvot Tanskassa.

**Taulukko 6.** Tanskan tuulivoimalamelun ulkomelutasoraja-arvot (Danish Wind Industry Association).

	Melutaso $L_{Aeq}$ [dB]	Tuulennopeus [m/s]
Asuinalueet	39	8
	37	6
Maalaisalue	44	8
	42	6
Matalataajuinen melu (ulko- ja sisämelu)	20	8 ja 6

## 6 TUULIVOIMALAMELUN HÄIRITSEVYYS JA TERVEYSHAITAT

Tuulivoimaloiden häiritsevyyttä ja niiden melusta aiheutuvia terveyshaittoja on tutkittu paljon. Tutkiminen on hankalaa, sillä pelkästään melumittauksilla terveyshaittojen ja tuulivoimalamelun yhteyttä ei voida todistaa. Henkilön asenne tuulivoimaa kohtaan, luottamus virkamiehiin, mahdollinen taloudellinen hyötyminen voimalasta, tuulivoimalan näkeminen asuinkohteesta ja mahdollinen muu taustamelu vaikuttavat henkilön kokemukseen tuulivoimalamelun häiritsevyydestä ja siihen yhdistetyistä mahdollisista terveyshaitoista.

Euroopan unionin rahoittamassa tutkimuksessa WINDFARMperception tutkitaan, kuinka tuulivoimaloiden ääni ja näkyvyys vaikuttavat asukkaiden asenteisiin tuulivoimaa kohtaan Alankomaissa. Tuloksista käy ilmi, että tuulivoimaloiden synnyttämä melu aiheuttaa eniten ärsyyntymistä asukkaiden joukossa. Kuitenkin, jos asukas hyötyy taloudellisesti tuulivoimalasta, hän ei näe voimalaa asunnoltaan tai asuu maalaisalueella päätien lähellä, hän todennäköisesti ärsyyntyy vähemmän tuulivoimalan melusta kuin jos hän ei saisi taloudellista hyötyä voimalasta, näkisi voimalan asunnoltaan tai eläisi taajamassa. Taloudellista hyötyä saavat henkilöt kokevat tuulivoimalan positiiviseksi asiaksi ja voivat vaikuttaa tuulivoimalasta tehtäviin päätöksiin enemmän kuin ilman taloudellista hyötyä jäävät asukkaat. Tuulivoimalan näkeminen lisää häiritsevyyden kokemusta, sillä siipien pyörimisen näkeminen kiinnittää huomion voimalaan ja sen synnyttämään ääneen ja meluun, jolloin ärsyyntymisen syntyminen on todennäköisempää. Lisäksi, jos voimalan näkee vapaasti ilman näköesteitä, ei myöskään äänellä ole esteitä, jotka vaimentaisivat sitä äänen kulkiessa ilmassa. Myös mahdollinen taustamelu vaikuttaa tuulivoimalan melun häiritsevyyteen. Jos lähellä asumusta sijaitsee vilkasliikenteinen päätie, on taustamelun taso varsinkin päivällä korkea, jolloin on epätodennäköisempää kuulla tuulivoimalasta syntyvää ääntä. (Pedersen et al. 2008, 60.)

Asenteiden ja tuulivoimaloiden näkymisen lisäksi myös henkilön luottamus virkamiehiin ja toimijoihin voi vaikuttaa tuulivoimalamelun häiritsevyyden kokemiseen. Suomalaisessa tutkimuksessa vertaillaan kahden eri tuulivoimala-alueen asukkaiden kokemuksia voimalasta aiheutuvan melun häiritsevyydestä. Tuloksista käy ilmi, että mikäli asuk-

kaat eivät luota alueen virkamiehiin ja toimijoihin, kokevat he tuulivoimalamelun enemmän häiritsevänä kuin asukkaat, joiden luottamus virkamiehiin on korkea. Luottamus virkamiehiin syntyy pitkän ajan kuluessa ja siihen vaikuttavat myös tapahtumat ennen tuulivoimalan rakentamista. Alueella, jossa luottamus virkamiehiin on vähäistä, tuulivoimalan rakentaminen on ollut jatkoa monille muutoksille yhteisössä, jotka asukkaat ovat kokeneet negatiivisina. Jo valmis negatiivinen asenne muutoksiin sekä vähäinen luottamus virkamiehiin johtavat helposti myös negatiiviseen suhtautumiseen tuulivoimalaan ja edelleen voimalan melun häiritseväksi kokemiseen. (Hongisto et al. 2015, 58.) Jatkotutkimuksia tarvitaan, sillä Hongiston tutkimus koski vain kahta eri tuulivoimala-alueita, joten sitä ei voida yleistää. Tutkimus kuitenkin antaa viitteitä siitä, että asukkaiden asenteisiin tuulivoimaa kohtaan ja tuulivoimalamelun häiritsevyyden kokemukseen vaikuttavat kokemukset jopa vuosia ennen tuulivoimalan rakentamista alueelle.

Tuulivoimalamelun terveyshaitat liittyvät useimmiten uniongelmiin. Mitä voimakkaampi äänen taso, sitä todennäköisemmin henkilön uni häiriintyy. Esimerkiksi tuulivoimalan melun ollessa 45 dB henkilön uni häiriintyy todennäköisemmin kuin melun ollessa alle 30 dB. Uniongelmiin lisäksi ärsyynys tuulivoimalan ääniä kohtaan lisää stressin määrää, mikä voi johtaa muihin terveyshaittoihin, kuten diabetekseen. Lisätutkimuksia kuitenkin tarvitaan, sillä on vaikeaa todentaa johtuvatko vakavat terveyshaitat ärsyyntymisestä tuulivoimalamelua kohtaan vai johtuuko ärsyyntyminen taustalla piilevistä terveyshaitoista. (Pedersen et al. 2008, 57-58.)

Matalista taajuuksista ja infraäänestä aiheutuvat terveyshaitat eivät ole helposti todennettavissa, mutta väitteitä on esitetty siitä, että matalat taajuudet ja infraääni voisivat aiheuttaa esimerkiksi unettomuutta, tinnitusta, pahoinvointia ja jopa korkeaa verenpainetta. Tutkimuksia ei kuitenkaan ole tehty riittävällä tarkkuudella ja riittävän suurella otannalla, joten mitään johtopäätöksiä ei voida tehdä siitä, että infraääni aiheuttaisi vakavia oireita. (Bolin et al. 2011, 5.)

## 7 TUULIVOIMALAMELUN EHKÄISEMINEN

Tuulivoimaloiden toiminnasta aiheutuvaa melua voidaan ehkäistä rakenteellisilla ratkaisuilla. Aerodynaamista melua ehkäistään parhaiten käyttämällä oikeanlaista säätötapaa. Sakkaussäätöisessä tuulivoimalassa turbiinin lavat on asennettu kiinteään kulmaan (Suomen Tuulienergia), jolloin tuulennopeuden kasvaessa virtaus alkaa sakata ja aerodynaaminen melu lisääntyy (Napoli 2007, 11). Uusimmissa tuulivoimaloissa ei käytetä enää sakkaussäätöä, vaan lapakulmasäätöä, jossa turbiinin lapojen kulmaa voidaan säätää. Lapojen asetuskulmaa säätämällä vältetään virtauksen sakkaus ja vähennetään syntyvää aerodynaamista melua. Lisäksi uusimmissa voimaloissa voidaan käyttää pyörimisnopeussäätöä, joka osaltaan vähentää syntyvää aerodynaamista melua. Mekaanisen melun ehkäiseminen tapahtuu yksinkertaisesti koteloimalla äänilähteet. (Ibid.)

Matalataajuisen melun ja infraäänen ehkäiseminen onnistuu parhaiten rakentamalla upwind -turbiineja vanhempien downwind -turbiinien sijaan. Uusimmat tuulivoimalat ovatkin upwind -turbiinimallisia ja näin niillä ennaltaehkäistään infraäänen ja matalien taajuuksien aiheuttamia haittoja tuulivoimalan lähistön asukkaille.

## 8 YHTEENVETO

Tuulivoiman tuotannon yleistyessä myös niiden vastustus lisääntyy johtuen pääosin voimaloiden toiminnasta syntyvästä melusta. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on ole-massa oleviin tutkimuksiin perehtymällä tutkia tuulivoimaloiden melun syntymistä, sen mittaamista ja sääntelyä sekä siitä aiheutuvaa ärsyyntymistä ja terveyshaittoja.

Tuulivoimaloiden aiheuttama melu on aerodynaamista melua, joka syntyy turbiinin la-pojen pyörimisestä, mekaanista melua, joka aiheutuu sähköisten osien toiminnasta, sekä matalataajuista melua ja infraääntä, joita on vaikea kuulla ihmiskorvin. Melun mittaa-miseen on annettu yksityiskohtaiset ohjeet niin mittalaitteiden kuin mittausmenettelyn-kin osalta. Ohjeiden avulla mittaus tapahtuu aina samalla tavalla, jolloin saadaan vertai-lukelpoisia tuloksia ja voidaan tehdä faktoihin perustuvia päätelmiä voimaloiden ympä-ristövaikutuksista.

Useissa maissa on annettu raja-arvoja tuulivoimalamelulle, joita melu ei saa ylittää muuta kuin poikkeustapauksissa lyhyen ajan. Suomen ohje-arvot on uusittu vastoittain, vuoden 2015 syksyllä, joten ne ovat ajan tasalla. Tuulivoiman suurtuottajamaahan Tanskaan verrattuna Suomen raja-arvot ovat hieman suuremmat eikä Suomessa ole tar-kasti määritetty ohjeistusta tuulivoimaloiden tuottaman matalataajuisen melun ja infra-äänen suurimmiksi sallituiksi arvoiksi.

Tuulivoimaloiden toiminnasta aiheutuva melu koetaan usein häiritseväksi ja siihen liite-tään myös terveyshaittoja. Melun aiheuttamia terveyshaittoja ja melun häiritsevyyttä on tutkittu runsaasti sekä kansainvälisesti että kotimaisesti ja syy-seuraussuhteita pystytään jonkin verran muodostamaan tuulivoimaloiden aiheuttaman äänen ja sen häiritsevyyden sekä terveyshaittojen välille. Lähteinä käytettyjen tutkimusten mukaan häiritsevyyden kokemukseen vaikuttavat kuitenkin itse tuulivoimalamelua enemmän esimerkiksi henki-lön asenne tuulivoimaa kohtaan, voimalan näkeminen sekä jopa se, luottaako henkilö alueensa virkamiehiin. Avoimia kysymyksiä vielä on, ovatko vakavimmat ja haitalli-simmat terveyshaitat seurausta tuulivoimaloiden melun aiheuttamasta stressistä, vai seuraako terveyshaitoista stressiä, joka sitten yhdistetään tuulivoimalaan. Avoinna on

myös matalataajuisen ja infraäänen synnyttämien terveyshaittojen todenmukaisuus. Lisätutkimuksia tarvitaan, jotta avoimet kysymykset saadaan ratkaistua.

Tuulivoimalamelun ehkäiseminen onnistuu parhaiten teknisin ja rakenteellisin keinoin. Nykyaikaiset voimalat ovat jo melko hyvin suunniteltuja ennaltaehkäisemään melun syntymistä.



## LÄHDELUETTELO

A 1.1.1993/993. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista.

A 1.9.2015/1107. Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista.

A 19.8.1994/763. Terveysturvallisuuslaki.

Asumisterveysohje: Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. 2003. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö. 93 s. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. ISBN 952-00-1301-6

Bolin, K. et al. 2011. Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. Teoksessa: Environmental Research Letters, 6/3. 1-6.

Danish Wind Industry Association. Planning and Regulation [verkkosivu]. [Viitattu 1.1.2016]. Saatavilla [http://www.windpower.org/en/policy/planning\\_and\\_regulation.html](http://www.windpower.org/en/policy/planning_and_regulation.html)

Hongisto, V. et al. 2015. Tuulivoimalamelun häiritsevyys kahdella tuulivoima-alueella. Ympäristö ja Terveys, 46/6. 54-59.

Jakobsen, J. 2005. Infrasound Emission from Wind Turbines. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 24/3. 145-155.

Kaltschmitt, M. et al. 2013. Renewable Energy Systems edited by Martin Kaltschmitt, Nickolas J. Themelis, Lucien Y. Bronicki, Lennart Söder, Luis A.Vega. New York. Springer New York. 1923 s. ISBN 978-1-4614-5820-3 (eBook).

Møller, H. Pedersen, C. S. 2011. Low-frequency noise from large wind turbines. Journal of Acoustical Society of America, 129/6. 3727-3744.

Napoli, C. 2007. Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen. Helsinki: Ympäristöministeriö. 31s. Suomen ympäristö 4. ISBN 978-952-11-2585-0.

Pedersen, E. et al. 2008. WINDFARMperception: Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents. 64 s. FP6-2005-Science-and-Society-20, Specific Support Action, EU project no. 044628.

Suomen Tuulienergia [verkkosivu]. [Viitattu 2.1.2016]. Saataavilla [http://www.suomentuulienergia.fi/perustietoa\\_1.html](http://www.suomentuulienergia.fi/perustietoa_1.html)

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. Melu [verkkosivu]. [Viitattu 20.12.2015]. Päivitetty 29.12.2014. Saatavilla <https://www.thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/melu>

Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. 2014. Helsinki: Ympäristöministeriö. 66 s. Ympäristöhallinnon ohjeita 4. ISBN 978-952-4277-2.