

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU  
Energiatekniikka / Automaatio- ja prosessitekniikka

Karri Kauppila

TUULIVOIMALOIDEN MELUMITTAUKSET IEC 61400-11 -STANDARDIN

MUKAISESTI

Opinnäytetyö 2013

## TIIVISTELMÄ

### KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

#### Energiatekniikka

KAUPPILA, KARRI

Tuulivoimaloiden melumittaukset IEC 61400-11 -  
standardin mukaisesti

Opinnäytetyö

41 sivua + 22 liitesivua

Työn ohjaaja

Jouni-Juhani Häkkinen, Tutkimusinsinööri

Toimeksiantaja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

Lokakuu 2013

Avainsanat

tuulienergia, melu, mittaus, ääni

Tämä opinnäytetyö on laadittu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energialaboratoriolle. Työ aloitettiin tilanteesta, jossa oli tieto, että Renewtech-hankkeessa tutkitaan tuulivoimaloiden melua. Työn aikana nuo suunnitelmat tarkentuivat. Laboratorio hankki uuden äänenpainetasomittarin tuulivoimaloiden melupäästöjen mittaamiseen, ja työnä oli näitä mittauksia varten laatia ohje, jonka mukaan mittaukset suoritetaan. Ohjeen pohjaksi valittiin IEC:n tekemä standardi 61400-11, joka antaa yksityiskohtaiset kuvaukset, kuinka tuulivoimaloiden melupäästöt mitataan.

Tämä työ aloitettiin perehtymällä standardiin ja muihin virallisiin melumittausohjeisiin. Standardi piti ensiksi kääntää suomen kielelle, jotta sitä pystyi käyttämään. Myöhemmin ilmestyneen VTT:n suomenkielisen luonnoksen avulla tarkistettiin käännöksen tarkkuus. Työhön haluttiin lisätä myös äänen perusteoriaa ja selostus siitä kuinka, tuulivoimalat aiheuttavat melua.

Kun koulun hankkima melumittari saapui, alkoi tutustuminen mittariin ja sen mukana tulleeseen äänen analysointiohjelmaan. Mittaria ja samalla standardia käytiin kokeilemassa Haminan ja Kotkan tuulivoimaloiden luona. Mittauksista tehtiin raportti, johon kirjattiin ylös sekä mittauksen tulokset että mittauspöytäkirja. Matkalta kerätty käytännön kokemus auttoi ymmärtämään, miten standardin monet vaatimukset pystyisi toteuttamaan käytännössä. Tuloksena saatiin ohje, joka käy yksityiskohtaisesti standardin läpi ja antaa samalla ohjeita ja kommentteja standardin käyttöön.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

KAUPPILA, KARRI

Acoustic Noise Measurements of Wind Turbines according to the IEC 61400-11 Standard

Bachelor's Thesis

41 pages + 22 pages of appendices

Supervisor

Jouni-Juhani Häkkinen, Research Engineer

Commissioned by

Kymenlaakso University of Applied Sciences

October 2013

Keywords

wind energy, noise, sound, measurement

This thesis was written for the emission measurement laboratory of Kymenlaakso University of Applied Sciences. The laboratory has acquired a new sound level meter to measure acoustic noise made by wind turbines. To make these measurements accurate, a detailed guide for noise measurement of wind turbines was needed. The IEC Standard 61400-11 was used as a basis for the guide.

The work was started by studying the standard. Other official noise measurement materials were also used. Standard 61400-11 needed to be translated first before it could be used. After the translation was complete, Technical Research Centre of Finland released their own translated version of the standard, which was used as reference to correct any mistakes our translation may have had. Thesis also includes parts of the theories of sound, and wind turbine noise.

When the sound level meter arrived, it was tested in practice. Acoustic noise measurements were taken from wind turbines located in Hamina and Kotka. The measurements were reported, and the acquired practical experience helped to understand how to utilize the instructions of the standard. The result is a guide that explains the IEC 61400-11 in detail and also gives tips and comments on how to implement the standard in practice.

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyön toimeksi antaja on Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energia-laboratorio.

Kiitän työnohjaajaani Jouni-Juhani Häkkistä hänen tuestaan ja neuvoistaan. Kiitän myös Merja Mäkelää hänen hyvistä neuvoistaan. Lisäksi kiitän Renewtech-hanketta, jonka ansiosta pääsin tekemään testimittauksia.

Kiitän myös perhettäni taustatuesta. Varsinkin kiitän äitiäni, Tuija Kauppilaa, joka luki tekstini läpi.

Kotkassa 2.10.2013

Karri Kauppila

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
2	ÄÄNI JA MELU	10
2.1	Äänen synty ja nopeus	10
2.2	Äänenpaine ja intensiteetti	11
2.3	Äänitehotaso	13
2.4	Äänenpainetasojen yhteenlasku	14
2.5	Äänilähteet ja äänen vaimeneminen	15
2.6	Melu	18
3	TUULIVOIMALOIDEN MELUN SYNTY	19
3.1	Aerodynaaminen melun synty	20
3.2	Mekaanisen melun synty	22
3.3	Tuulivoimaloiden melun leviäminen ja häiritsevyys	23
4	MITTAUSOHJEET	24
4.1	Mittauslaitteistot	24
4.2	Toimet ennen mittauksia	25
4.3	Mittauspaikan valinta	26
4.4	Mittauksen suorittaminen	28
4.5	Tuulen nopeuden mittaaminen	30
4.6	Tulosten tarkastelu ja korjaus	31
4.7	Tonaalisuuden todentaminen	32
5	MITTAUKSEN RAPORTOINTI	37
5.1	Turbiinin tiedot	37
5.2	Turbiinia ympäröivä ympäristö	37
5.3	Kalusto ja välineet	37
5.4	Akustiset tiedot	38
5.5	Muut tiedot	38
6	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	40

## LIITTEET

Liite 1. RION NL-52 –melumittarin pikaohje

Liite 2. Kotkan ja Haminan tuulivoimaloiden melumittaukset 21.8.2013

## SYMBOLIT JA LYHENTEET

$v$	Äänen nopeus väliaineessa [m/s]
$\lambda$	Äänen aallonpituus [m]
$f$	Äänen taajuus [Hz]
$\rho$	Aineen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$Y$	Aineen kimmokerroin [Pa]
$K$	Kaasun tai nesteen puristuvuuskerroin [Pa]
$T$	Ilmanlämpötila [K]
$p$	Äänenpaine eli aineen aiheuttaman paineen ja staattisen ilmanpaineen ero. [Pa]
$\omega$	Kulmataajuus [rad/s]
$I$	Äänen intensiteetti [W/m <sup>2</sup> ]
$E$	Pinnan A läpi kulkeva energia [J]
$A$	Pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$P$	Äänen mukana kulkeva teho [W]
$L_p$	Äänenpainetaso [dB]
$L_w$	Äänentehotaso [dB]
$L_{eq}$	Keskiäänitaso [dB]
$L_{kok}$	Kokonaisintensiteetti [dB]
$L_p(r)$	Äänenpainetaso etäisyydellä r [dB]
$\Delta L_a(r)$	Ilmakehän aiheuttama vaimennus [dB]
$D$	Roottorin halkaisija [m]
$H$	Turbiinin napakorkeus [m]

$L_{Aeq}$	A-painotetun äänenpaineen keskiarvotettu tehollisarvo tietyllä aikavälillä [dB]
$L_n$	Taustamelun tehollinen keskiarvo [dB]
$L_{pn}$	Peiteäänän äänenpainetaso kriittisessä [dB]
$L_{pt}$	Äänksen äänenpainetaso [dB]
$L_s$	Turbiinin äänenpainetaso ilman taustamelua [dB]
$L_{s+n}$	Turbiinin ja taustamelun aiheuttama äänenpainetaso [dB]
$L_{WA,k}$	Turbiinin näennäinen äänenpainetaso jossa $k = 6, 7, 8, 9, 10$ [dB]
$R_0$	Referenssietäisyys [m]
$S_0$	Referenssiala $S_0 = 1 \text{ m}^2$ [m <sup>2</sup> ]
$v_h$	Turbiinin navan korkeudella $H$ vallitseva tuulen nopeus [m/s]
$v_{ref}$	Tuulen nopeus referenssikorkeudella $z_{ref}$ [m/s]
$f_c$	Keskitaajuus kriittisessä kaistassa [Hz]
$z_0$	Maan karheuden arvo [m]
$z_{0ref}$	Maan karheuden referenssiarvo [m]
$z$	Anemometrin korkeus maanpinnasta [m]
$z_{ref}$	Tuulennopeuden referenssikorkeus, 10 m [m]
$\Delta L_{tn}$	Tonaalisuus [dB]



## 1 JOHDANTO

Suomessa tuulivoimaloita pyritään lisäämään, mikä on aiheuttanut lisääntyneen kiinnostuksen tuulivoimaloiden melupäästöihin. Jotkut ihmiset kokevat tuulivoimaloiden melun häiritseväksi, ja jotkut eivät havaitse näiden aiheuttamaa melua lainkaan, siksi on pystyttävä luotettavasti mittaamaan tuulivoimaloiden melupäästöt.

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorio on suorittanut vuodesta 1992 lähtien savukaasujen päästömittauksia voimalaitoksille. Tuulivoimaloiden lisääntyminen sai laboratorion suunnittelemaan tekevänsä tuulivoimaloiden melumittauksia, ja tämän takia laboratorio hankki uuden melumittarin. Laboratoriolta kuitenkin puuttui ohje melumittausten suorittamisesta.

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu tekee yhteistyötä Renewtech-hankeen kanssa. Renewtech on Etelä-Suomen EAKR-ohjelman rahoittama hanke, jonka tavoite on kehittää tuulivoimaloihin uusia teknologiasovelluksia ja menetelmiä, joiden avulla parannetaan tuulivoimaloiden käyttöönottoa ja tuotannon kaupallista puolta. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun logistiikan asiantuntijaryhmä NELI kehittää tuulivoimateollisuudelle logistisia ratkaisuja. (1, 21.)

Tämän opinnäytetyön päätavoitteeksi tuli ohjeiden laatiminen tuulivoimaloiden melumittauksiin. Tehtävä oli tutustua IEC:n julkaisemaan 61400-11-standardiin, joka valittiin ohjeen pohjaksi, ja laatia tuulivoimaloiden melumittausohje. Jotta työ olisi mahdollisimman kattava, tutustuttiin työtä varten äänen synnyn teoriaan ja siihen, kuinka tuulivoimalat aiheuttavat melua. Teorian tutustumisen lisäksi piti opetella käyttämään koulun hankkimaa uutta melumittaria.

Työn tavoitteeksi asetettiin tehdä vähintään yksi koemittaus, jossa testataan ohjetta ja mittaria käytännössä. Mittaus tehtiin Renewtech-hankeelle, koska työn aloitustilanteessa oli tiedossa, että Renewtech-hankkeessa suunniteltiin tuulivoimaloiden melun tutkimista.

## 2 ÄÄNI JA MELU

### 2.1 Äänen synty ja nopeus

Ääni on mekaanista aaltoliikettä, joka syntyy, kun ääntä päästävä kappale värähtelee (2). Ääni tarvitsee väliaineen edetäkseen, joka voi olla kiinteää, nestettä tai kaasua, eli tyhjiössä väliaine ei kykene etenemään. Kun ääni liikkuu väliaineessa se etenee paineaaltona vuoroin puristaen ja harventaen väliainetta aiheuttaen väliaineessa painevaihtelua (3, 133). Korva kuulee painevaihtelun äänenä (4, 4). Väliaineen puristuminen ja harventuminen sekunnissa on äänen taajuus, joka ilmoitetaan hertseinä (Hz). Äänen taajuus  $f$  voidaan laskea käyttämällä kaavaa (1) (3, 132):

$$v = \lambda f \quad (1)$$

$v$	äänen nopeus väliaineessa [m/s]
$\lambda$	äänen aallonpituus [m]
$f$	äänen taajuus [Hz].

Äänen nopeus riippuu väliaineesta. Mitä tiheämpi väliaine on, sitä nopeammin ääni siinä liikkuu (5, 3). Tästä syystä kiinteissä aineissa ääni kulkee nopeammin kuin nesteissä tai kaasuissa, koska kiinteän aineen molekyylit ovat vahvemmassa vuorovaikutuksessa keskenään. Kaavalla (2) voi laskea äänen nopeuden  $v$  kiinteässä väliaineessa (6, 53). Äänen nopeus ilmassa normaaliolosuhteissa on noin 340 m/s (5, 3):

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (2)$$

$Y$	aineen kimmokerroin [Pa]
$\rho$	aineen tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ].

Kaasuissa ja nesteissä käytetään kaavaa (3) (6, 53):

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

$K$	kaasun tai nesteen puristuvuuskerroin [Pa].
-----	---

Aineen tiheys riippuu lämpötilasta, joten lämpötila myös vaikuttaa äänen nopeuteen. Kylmässä ääni liikkuu siis nopeammin kuin lämpimässä, koska kylmät aineet ovat tiheämpiä kuin lämpimät (5, 3). Äänen nopeuden  $v$  lämpötilassa  $T$  pystyy laskemaan kaavalla (4) (7, 22):

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (4)$$

$T$	ilmanlämpötila [K]
$v_0$	äänien nopeus lämpötilassa $T_0$ [m/s].

## 2.2 Äänenpaine ja intensiteetti

Äänen voimakkuutta mitataan äänenpaineena. Äänen paine on hetkellinen paineen vaihtelu, jonka ääniaalto aiheuttaa staattisessa paineessa. Äänenpaine  $p$  muistuttaa siniaaltoja, joka muuttuu ajan funktiona kiinteässä kohdassa kaavan (5) mukaisesti. (3, 138):

$$p = \hat{p} \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

$p$	äänienpaine [Pa]
$\hat{p}$	äänienpaineen vaihteluiden huippuarvo eli amplitudi [Pa]
$\omega$	kulmataajuus [rad/s]
$t$	aika [s]
$\phi$	alkuvaihekulma [rad].

Huippuarvon lisäksi voidaan käyttää tehollista arvoa  $p_{ef}$ , joka saadaan kaavan (6) avulla (3, 138):

$$p_{ef} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Koska ääni liikkuu aaltoliikkeenä, ääni kuljettaa mukanaan energiaa. Äänen intensiteetti voidaan siis laskea kaavalla (7) (3, 139):

$$I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A} \quad (7)$$

$A$	etenemissuuntaa vastaan kohtisuorassa oleva poikkipinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$E$	pinnan $A$ läpi kulkeva energia [J]
$t$	missä ajassa $E$ siirtyy $A$ :n läpi [s]
$P$	äänen mukana kulkeva teho $E/t$ .

Ihmisen kuuloalueeksi on määritetty n. 20 - 20 000 Hz. Ihmiskorva kuulee parhaiten 2 - 3 kHz:n taajuisia ääniä ja huomattavasti matala- ja korkeataajuuksia ääniä. Ihmisen kuulokynnys on noin 1 kHz, jossa ihmisen korva havaitsee ääniä juuri ja juuri. Äänen painevaihteluiden tehollinen arvo on noin  $p_{ef} = p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ . Ihmisen kipukynnys vaihtelee ihmisittäin, mutta yleensä kipualue on välillä  $p_{ef} = 20 - 40 \text{ Pa}$ . Kuulokynnyksen ja kipurajan intensiteetti voidaan laskea kaavalla (8):

$$I = \frac{\hat{p}^2}{2\rho v} = \frac{p_{ef}^2}{\rho v} \quad (8)$$

$\rho$	ilman tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	äänen nopeus [m/s].

Jos oletetaan että ilman tiheys 0 °C:ssa on 1,3 kg/m<sup>3</sup> ja äänen nopeus on 332 m/s ilmassa, voidaan kaavaa (8) käyttämällä todeta että kuulokynnyksen intensiteetti  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  ja kipurajaksi  $I = 1-3 \text{ W/m}^2$ . Kuulokynnyksen ja kipurajan intensiteettien suhde on siis  $10^{12}$ . Koska näiden ero on monimiljoonakertainen, äänen voimakkuutta on määritelty kuvaamaan logaritmiset suureet. Käyttämällä kaavaa (9) ja aiemmin mainittuja arvoja voidaan laskea äänen intensiteettitaso  $L_I$ . (3, 143)

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (9)$$

Kerroin 10 logaritmin edessä on tarkoitus muuttaa yksikkö desibeliksi, koska muuten yksiköksi tulee beli, jota pidetään liian suurena yksikkönä. Tarvittaessa voidaan laskea äänen voimakkuus käyttämällä äänen painetta, jolloin kaavojen (8) ja (9) avulla saadaan kaava (10) (3, 143):

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (10)$$

$L_p$	äänenpainetaso [dB]
$p$	paineen tehollinen arvo [Pa]
$p_0$	kuulokynnystä vastaava äänenpaineen tehollinen arvo [Pa].

Paine  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ , jonka vastaava äänenpainetaso on 0 dB. Kaavalla (9) ja (10) saadaan suunnilleen samanlaiset tulokset desibeleinä. Näistä kahdesta yksiköstä käytetään useammin äänenpainetasoa, koska sitä on helpompi mitata melumittarilla. (5, 5)

### 2.3 Äänitehotaso

Ääntä voidaan mitata myös äänitehotasona. Äänitehotaso kuvastaa äänilähteen emittoimaa akustista energiaa, toisin sanoen mitataan äänilähteen kokonaismelua kaikkiin suuntiin. Äänitehotasoa mitataan desibeleissä mutta joissain tapauksissa se annetaan beleinä, jotta vältetään sekaannuksia äänitehotasojen ja äänenpainetasojen välillä. Äänitehoa mitataan watteina tai pikowatteina, 1 pW ääniteho vastaa 0 dB:n äänitehotasoa. Äänitehotaso on absoluuttinen arvo, eli ympäristö ja etäisyys eivät vaikuta siihen toisin kuin äänenpainetasossa, joka pienenee sitä enemmän, mitä kauemmas äänilähteestä mennään. Äänitehotason voi laskea kaavasta (11): (5, 5)

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dB} \quad (11)$$

$L_W$	äänentehotaso [dB]
$P$	äänien mukana kulkeva teho [W].

Kaavassa referenssisuure  $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$  (3, 144).

Yleensä vaihtelevaa ympäristömelun voimakkuutta kuvataan suurella keskiäänitaso. Keskiäänitasoa kutsutaan myös ekvivalenttitasoksi. Keskiäänitasolla kuvataan äänitason keskiarvoa tietyltä aikaväliltä. Tällä korvataan mittausaikana muuttuva melu vakioäänellä mutta pidetään molempien äänienergia samana. Keskiäänitaso  $L_{eq}$  lasketaan käyttämällä kaavaa (12):

$$L_{eq} = 10 \lg \left[ \frac{1}{t} \int_0^t \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right] dB, \quad (12)$$

jossa  $t$  on mittausaika. Keskiäänitason avulla on helppo verrata meluja keskenään, kunhan niitten taajuussisältö on samanlainen, mutta ajalliset vaihtelut ovat erilaisia. (5, 7.)

## 2.4 Äänenpainetasojen yhteenlasku

Kun ääniä tulee useasta eri äänilähteestä, niiden kokonaisäänepainetasoa ei lasketa yhteen normaalilla yhteenlaskulla. Usean äänilähteen äänenpainetasot ovat huomattavasti pienemmät kuin aluksi olettaisi. Kahden 100 dB:n yhteinen äänipainetaso ei ole 200 dB:tä vaan äänenpainetaso nousee noin 3 dB:n verran. Tämä näkyy, kun tarkastellaan kahta äänilähdettä, jotka lähettävät ääntä toisistaan riippumatta ja joiden ääniaallot eivät muistuta toisiaan eivätkä ole samanvaiheisia. (3, 150)

Äänilähde 1 lähettää ääntä intensiteettinä  $I_1$  ja äänilähde 2 lähettää ääntä intensiteettinä  $I_2$ . Intensiteettitasot ovat vastaavasti  $L_1$  ja  $L_2$ . Koska energia ja teho voidaan laskea suoraan yhteen, kokonaisintensiteetti on  $I = I_1 + I_2$ . Kokonaisintensiteettitaso lasketaan kaavalla (13): (3, 150)

$$L_{kok} = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right) dB \quad (13)$$

Yhtälöstä voi päätellä, että jos kaksi yhtä voimakasta äänilähdettä lähettävät samanaikaisesti ääntä, äänenpainetaso on 3 dB korkeampi kuin toisen äänenlähteen yksinään lähettämä äänipainetaso (5, 8).

Kyseistä kaavaa voidaan muuttaa kattamaan useamman äänilähteen. Kun äänilähteitä on  $N$  kappaletta, lasketaan kokonaisintensiteettitaso kaavalla (14): (3, 150)

$$L_{kok} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) dB \quad (14)$$

## 2.5 Äänilähteet ja äänen vaimeneminen

Äänet voidaan jakaa kahteen luokkaan, laajakaistaisiin ja kapeakaistaisiin ääniin. Laajakaistaisen äänen äänenpainetaso on vakio kaikilla taajuuksilla, kun taas kapeakaistaisessa äänessä äänenpainetaso on rajoittunut pienelle taajuuskaistalle. Esimerkki laajakaistaisesta äänestä on valkoinen kohina, jonka kaikki taajuudet ovat äänispektrissä suunnilleen yhtä voimakkaita. Kapeakaistaisista äänistä äänes on hyvä esimerkki, koska se koostuu vain yhdestä taajuudesta. Suurin osa ympäristön äänistä ovat seosääniä eli ääniä, jotka koostuvat useista eri taajuudesta. Näiden äänenpainetasot vaihtelevat jatkuvasti. (5, 12)

Ympäristön päästämät äänet voidaan myös jakaa lyhytkestoisiin eli impulssiääniin ja pitkäkestoisiin ääniin. Impulssiääni on alle sekunnin kestävä ääni, esimerkiksi ukkosen isku tai räjähdys voivat aiheuttaa impulssiäänen. (5, 13)

Äänilähteen tyyppi vaikuttaa äänen vaimenemiseen. Äänilähde voi säteillä ääntä eritavoin: tasomaisesti (pintalähde), pallomaisesti (pistelähde), sylinterimäisesti (viivalähde) tai puolipallomaisesti. Tämä vaikuttaa äänen vaimenemiseen. Pistelähteen ääni vaimenee nopeammin kuin sylinteri- tai pintaäänilähde. (8, 8)

Kaavasta (15) voidaan laskea palloaallon intensiteetti etäisyydellä  $r$ :

$$I = \frac{r_0^2 I_0}{r^2}, \quad (15)$$

$I$  äänen intensiteetti etäisyydellä  $r$  [W/m<sup>2</sup>]

$I_0$  äänen intensiteetti etäisyydellä  $r_0$  [W/m<sup>2</sup>].

Kaavalla (16) voidaan laskea sylinteriaallon intensiteetti etäisyydellä  $r$ : (3, 139)

$$I = \frac{r_0 I_0}{r} \quad (16)$$

Kaavasta (15) voi huomata, että pallomaisen säteilijän äänen intensiteetti laskee neljännesosaan alkuperäisestä etäisyyden kaksinkertaistuessa. Tämä on noin 6 dB:n muutos. Sylinterilähteen intensiteetti vaimenee lineaarisesti etäisyyden mukaan, eli etäisyyden kaksinkertaistuessa intensiteetti laskee 3 dB. (5, 13)

Kaavoilla (15) ja (16) oletetaan, että ääni vaimenee pelkästään leviämisen takia, mutta todellisuudessa tämä ei kuitenkaan ole ainoa asia, joka ääntä vaimentaa (3, 152). Äänen vaimenemiseen vaikuttaa myös äänilähteen ympäristö. Ilmakehä, kasvillisuus, maanpinta, rakennukset ja muut mahdolliset esteet vaimentavat ääntä. Ilmakehän aiheuttama äänen vaimennus voidaan laskea kaavalla (17): (8, 17)

$$L_p(r) = L_w + \log(2\pi r^2) - \Delta L_a(r) \quad (17)$$

$L_p(r)$	äänenpainetaso etäisyydellä $r$ äänilähteestä [dB]
$L_w$	äänitehotaso [dB]
$\Delta L_a(r)$	ilmakehän aiheuttama vaimennus [dB] (7, 18).

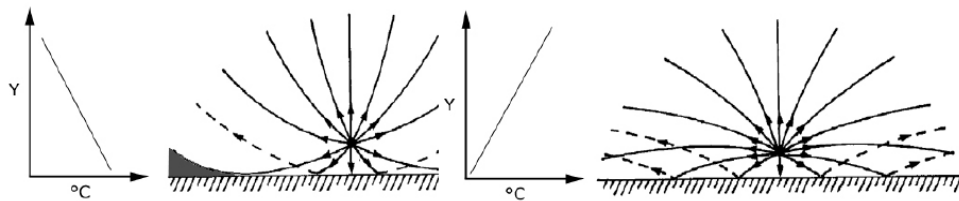
Kaava koskee äänilähteitä, jotka säteilevät pallomaisesti (7, 18). Kaavasta huomaa, että mitä kauempana äänilähde on, sitä suurempi on ilman vaikutus äänen vaimenemiseen. Ilma vaimentaa korkeita taajuuksia paremmin kuin matalia, joten myös äänen taajuus muuttuu etäisyyden kasvaessa. (8, 17)

Myös maanpinta vaikuttaa ääneen etenemiseen. Riippuen maanpinnan ominaisuuksista äänen eteneminen joko vaimenee tai vahvistuu osuessaan maahan. Pehmeä maa absorboi ääntä, kun taas kova maanpinta, esimerkiksi veden pinta tai kallio, aiheuttaa heijastumista (8, 17). Mitä kovempi pinta on, sitä enemmän ääntä heijastuu (8, 17). Maanpinnan muoto määrää heijastuksen suunnan, joten heijastunut ääni vaikuttaa suoraan havaitsijalle tulevan äänen kovuuteen. Äänit summataan yhteen, ja niiden vaiheero määrää vähentääkö vai lisääkö heijastunut ääni äänen kovuutta (7, 21). Otollisissa sääolosuhteissa voi heijastumista tapahtua useammin ja ääni voi kantautua esim. vettä pitkin hyvinkin pitkälle. (8, 17)

Säätilat ja vuorokauden ajat vaikuttavat äänen vaimenemiseen. Kuten aikaisemmin on mainittu, lämpötila vaikuttaa äänen nopeuteen. Äänen nopeuksien muutokset taas vaikuttavat ääniaallon taittumiseen, joka taas vaikuttaa äänen vaimenemiseen. Ääni taittuu kun se saapuu toisen lämpöiseen ilmatilaan, jossa äänen nopeus on eri. (5, 13)

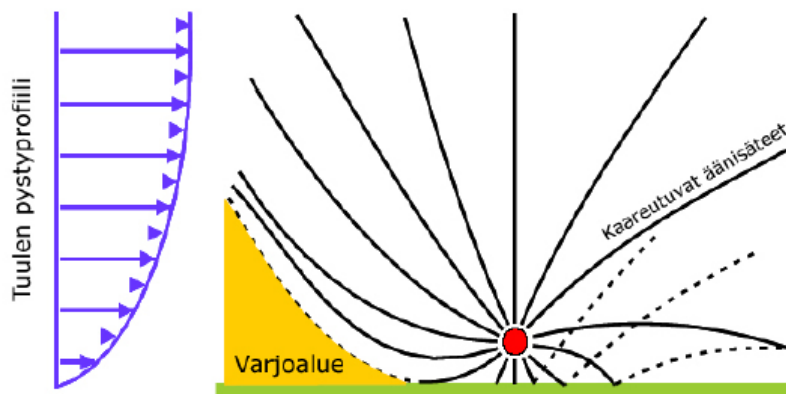
Lämpötilan laskiessa ylöspäin mentäessä ääni taittuu ylöspäin. Jos kuitenkin lämpötila nousee ylöspäin mentäessä, ääni taittuu alaspäin, mitä kutsutaan inversioksi, sitä esiintyy, kun maa jäähtyy ilmaa nopeammin. Kuvassa 1 näkyy lämpötilan vaikutus äänen taittumiseen. (8, 18)





Kuva 1. Lämpötilan vaikutus äänen taittumiseen (8, 18)

Tuuli vaikuttaa äänen taittumiseen: myötätuuli taittaa ääntä alaspäin ja vastatuuli ylöspäin. Syynä tähän on se, että tuulen nopeus on sitä suurempi, mitä ylemmäs mennään (8, 18). Tuuli myös kuljettaa ääntä kauemmaksi, eli ääni kulkee nopeammin myötätuuleen kuin vastatuuleen (7, 22). Kun ääni taittuu alaspäin, sen etenemisvaimennus on vähäisempää, sillä ääniaalto jää ”loukkuun”. Tämä tarkoittaa, että alaspäin taittunut ääniaalto heijastuu maanpinnasta takaisin ylös, kunnes se taas taittuu alas ja osuu maahan uudestaan. Näin voi käydä varsinkin kovassa maastossa tai vedenpinnan yläpuolella. Taittuessaan ylöspäin ääni synnyttää varjoalueita. Varjoalueissa ääni ei kulje, joten äänen vaimennus on suurempi. Kuvassa 2 on esitetty tuulen vaikutusta äänen taittumiseen. (7, 25)



Kuva 2. Tuulen vaikutus äänen taittumiseen (8, 19)

Muita ääntä vaimentavia tekijöitä on viskositeettivaimennus. Edetessään väliaineessa ääniaalto siirtää väliaineen atomeja ja molekyyliä. Väliaineen sisäinen kitka eli viskositeetti vastustaa liikettä, ja ääniaallon energia muuttuu lämpöenergiaksi. Tästä syntynyt lämpöenergia sitten siirtyy väliaineesta eteenpäin ja ääniaallon energia vähenee lisää aiheuttaen lämmönsiirtymisestä johtuvan vaimennuksen. (3, 152)

Kuitenkin merkittävin äänen vaimenemistekijä on happi- ja vesimolekyylien aiheuttama molekyyli- vaimennus, joka riippuu ilman kosteudesta. Kuivalla ilmalla äänen vaimennusta ei ole juuri lainkaan. Maksimivaimennus saadaan noin 20 - 30 %:n kosteudella. Tätä suuremmat kosteudet eivät vaimenna ääntä yhtä hyvin, eli mitä kosteampi ilma on, sitä huonompi äänen vaimennus. (3, 153)

## 2.6 Melu

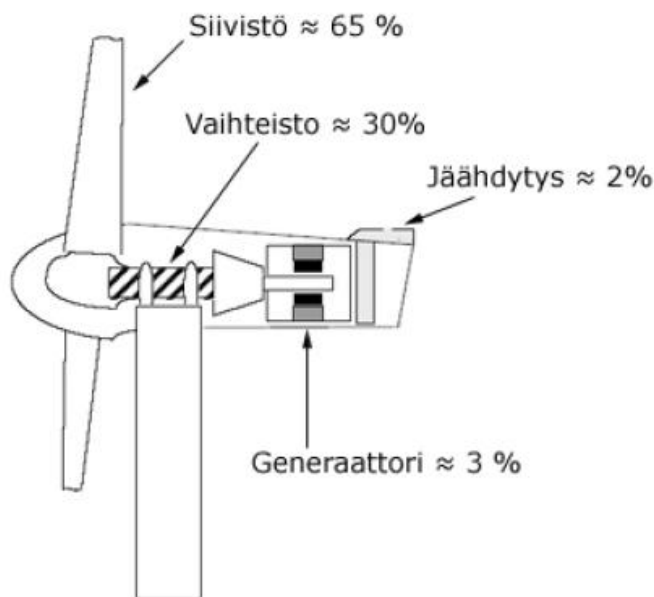
Melu on ääntä, jonka ihminen kokee ärsyttäväksi tai epämiellyttäväksi. Riippuu äänen intensiteetistä, taajuudesta, taustamelusta, maastosta kuuntelijan ja äänilähteen välillä tai kuuntelijan mielipiteestä äänen lähteeseen, mitä ääniä ihminen pitää meluna (4, 3). Häiritsevyyden lisäksi melu haittaa ihmisen terveyttä. Unenpuutteen lisäksi pitkällä aikavälillä melu voi aiheuttaa kuuroutumista tai tinnitusta (4, 3). Melua ei kuitenkaan pystytä määrittämään kokonaan fysikaalisesti, koska eri ihmiset kokevat eri ääniä meluna. Meluun vaikuttavat sen äänenpainetaso, esiintymisaika ja -kesto sekä mahdollisesti melun sisältö. (5, 2)

### 3 TUULIVOIMALOIDEN MELUN SYNTY

Tuulivoimalat synnyttävät neljää erilaista ääntä:

- laajakaistaista ääntä, joka on yli 100 Hz:n taajuisia jatkuvaa ääntä.
- matalataajuisia ääntä, joka on 20 – 100 Hz taajuisia ääntä
- impulsiivista ääntä, joka on lyhyttä tykyttävää ääntä
- tonaalista ääntä, joka on selvästi kuultava yksitaajuinen ääni. (4, 10)

Nämä äänet voidaan jakaa kahteen kategoriaan, mekaaniseen ja aerodynaamiseen meluun. Tuulivoimalan roottorit tuottavat aerodynaamista melua, kun taas mekaanista melua tuottavat tuulivoimalan vaihteisto, generaattori, muuntajat, jäähdytysjärjestelmät ja taajuusmuuntaja. Koska nykytekniikka kykenee hyvin vähentämään tuulivoimaloiden mekaanista melua esim. koteloinnilla, tuulivoimalat pääosin päästävät aerodynaamista melua ympäristöön. Kuvassa 3 on esitetty tyypillisen tuulivoimalan komponenttien päästämät äänitehotasot. (7, 8)



Kuva 3. Tuulivoimalan melun lähteet (8, 11)

Tuulivoimalat äänenlähdeä pidetään yleensä pistemäisenä. Todellisuudessa tosin vain konehuoneen äänilähde on pistelähde. Tuulivoimalan roottorin lapapinnat ovat pyöriä sylinteriäänilähteitä ja tornin runko toimii staattisena sylinteriäänilähteenä. (5, 13)

Tuulivoimalaa voidaan pitää pistelähteenä, kun ollaan tarpeeksi kaukana tuulivoimalasta. Kaavan (18) avulla voidaan laskea etäisyys  $r$ , jossa tuulivoimala on pistelähde.

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (18)$$

$D$	lähteen suurin dimenssio [m]
$\lambda$	äänen aallonpituus [m]
$r$	etäisyys [m].

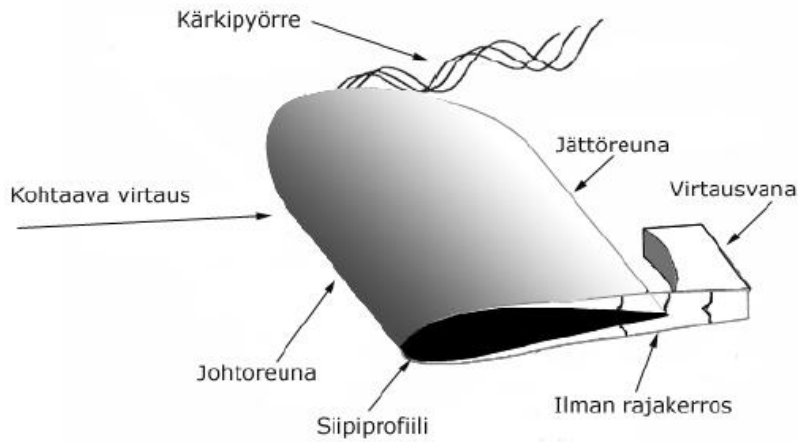
Esim. jos roottorinlavan dimenssio on 56 m, tuulivoimala lasketaan pistelähteeksi 183 m:n päässä rungosta, kun melun taajuus on 10 Hz. Siksi tuulivoimalat lasketaan pistelähteeksi vain infraäänialueella. (9, 14)

### 3.1 Aerodynaaminen melun synty

Aerodynaaminen melu kuullaan usein viuhuvana tai viheltävänä, joskus myös kohinamaisena meluna. Melua syntyy, kun tuuliturbiinin roottorilapa osuu ilmavirtaan aiheuttaen turbulenssia, joka taas aiheuttaa melua. Turbulenssin aiheuttama melu on noin 60 – 4 000 Hz:n taajuuskaistalla. Turbulenssia aiheuttaa lavan kitka, jonka takia lavan pinnalla liikkuvan ilmanvirtauksen nopeus on pienempi kuin kauempana lapaa olevan ilmavirtauksen nopeus. Tämä synnyttää rajakerroksen ilmavirtausten välille. Virtaukset kulkevat aluksi laminaarisesti, kunnes lapa muuttuu teräväksi jättöreunalla. Tällöin rajakerros kasvaa ja virtaukset muuttuvat turbulenttiseksi. Kuvassa 4 on esitetty lapaprofiili ja siihen vaikuttavat ilmavirrat. Lapaprofiili saattaa myös synnyttää lapojen pinnalle paine-eroja, jotka taas aiheuttavat aerodynaamista nostetta. Kun lavasta irronneet ilmavirrat kohtaavat lapaa ympäröineet ilmavirrat, ne aiheuttavat pyörteisen virtausvanan, joka taas aiheuttaa lisää melua. (7, 10; 8, 9)

Turbulenssin määrä on suoraan verrannollinen melun määrään, mikä on yritetty ottaa huomioon tuulivoimaloiden lapojen suunnittelussa. Lavan profiilin muutos, puhtaus ja jättöreunan terävyys vaikuttavat turbulenssiin: mitä isompi muutos, likaisempi (rosoisempi) pinta ja tylpempi lapa on, sitä enemmän turbulenssia se aiheuttaa. Myös lapakulma ja pyörimisnopeus vaikuttavat meluun, ja näitä säätämällä voidaan vaikuttaa melun kovuuteen. Lapojen pinta-ala kärjessä on moderneissa lapaprofiileissa pienempi, joten meluntuotto keskittyy lapaprofiilin kohtaan 0,75 - 0,95 kärjestä katsottuna.

Kärjessä kohtaa kolme ilmavirtaa, lavan molemmilta puolilta tuleva ilmavirta ja kärjen yli menevä ilmavirta. Nämä ilmavirrat synnyttävät kärkipyörteen. (7, 10; 8, 9)



Kuva 4. Lapaprofiili ja siihen vaikuttavat ilmavirrat (8, 10)

Aerodynaaminen melu koetaan häiritseväksi, koska se aiheuttaa amplitudimodulaatiota eli melun vaihtelevuutta lavakierrosten aikana (10). Tarkkaa syytä kuinka amplitudimodulaatio syntyy tuulivoimalan lavoissa ei tiedetä. Yhden teorian mukaan amplitudimodulaatio syntyy, kun lavat ohittavat maston. Niitten virtaukset osuvat maston aiheuttamaan tuulivarjoon, joka aiheuttaa vaihtelevaa melua. Tuulivarjo on alue, jossa tuulen voima on heikentynyt. Toinen teoria ehdottaa, että lavan ja maston vuorovaikutus aiheuttaa amplitudimodulaatiota. Tämän teorian mukaan kyseessä on maston aiheuttaman paineen pudotus, kun lapa ohittaa maston alimmassa kohdassa. Kolmannen teorian mukaan amplitudimodulaatio syntyy lavan liikkeestä ja äänensäteilystä. Lapa lähettää ääntä kohtisuorassa tasossa lavan akselista, ja taso muuttuu jatkuvasti lavan pyörimisen takia. Tähän lisätään Doppler-ilmiö, jolloin lavan ja äänen havaitsijan etäisyys muuttuu pyörimisen takia jatkuvasti. Tämä aiheuttaa taajuuksien nousua ja laskea havaitsijaa kohden: kun lapa lähestyy, taajuus nousee, ja kun lapa kaikonnee, taajuus laskee. Neljäs teoria perustuu stabiilin ilmakehän aiheuttamiin ilmavirtojen virtausnopeusmuutoksiin. Stabiilissa ilmakehässä ilman virtausnopeus kasvaa sitä enemmän, mitä korkeammalla ollaan: lavan ollessa korkealla siitä syntyvä turbulenssi on suurempi kuin alhaalla, mikä taas aiheuttaa amplitudimodulaatiota. (7, 12)

Modulaatiotaajuus  $f$  saadaan laskettua käyttämällä kaavaa (19):

$$f = \frac{n\omega}{60} [\text{Hz}] \quad (19)$$

$f$	modulaatiotaajuus [Hz]
$n$	lapojen lukumäärä
$\omega$	roottorin pyörimisnopeus [rpm]. (7, 11.)

Vanhemmat tuulivoimalat saattavat aiheuttaa pienitaajuisia melua (20 - 100 Hz) ja infraääntä (alle 20 Hz). Varsinkin tämä huomataan voimaloissa, joissa roottori on asennettu maston alavirtapuolelle. Melua syntyy, kun lapa osuu mastoa kiertävään ilmavirtaan tai kun ilmaa puristuu maston ja lavan väliin. Näin syntyy jaksollinen ääni, joka toistuu samalla taajuudella kuin aerodynaamisen melun modulaatiotaajuus (ks. kaava (19)). Nykyiset voimalat kuitenkin rakennetaan siten, että roottori on maston ylävirtapuolella, jolloin pienitaajuisen melun ja infraäänien päästöt ovat huomattavasti pienemmät. (7, 13)

### 3.2 Mekaanisen melun synty

Mekaanista ääntä syntyy pääosin tuulivoimalan konehuoneesta ja rungon värähtelystä. Näistä tukirungon värähtelyä pidetään merkittävämpänä melunlähteenä, koska se aiheuttaa melua koko rungon pituudelta maahan asti. Rungon värähtelyn aiheuttamaa melua on pyritty vähentämään tärinäneristimillä ja äänen siirtoteiden katkaisulla ääntä säteileville pinnoille. (7, 13; 8, 11)

Konehuoneen suurin melunlähde on vaihteisto, noin 30 % tuulivoimalan melusta, tulee tästä komponentista. Vaihteiston lisäksi melua konehuoneessa aiheuttaa generaattori. Molemmissa löytyy pyöriviä ja toisiaan hankaavia osia, jotka aiheuttavat paljon melua turbiinin ollessa käynnissä. Näiden päästämä melu on pääosin tonaalista (4, 10). Näitä liikkuvia osia on pyritty vähentämään. Melua vähennetään myös koteloinnilla. Pääosin konehuoneesta ulos pääsevä melu tulee vaihteisto- ja hydraulikkaöljyn jäähdytysilmanvaihdon kautta. Jäähdytysjärjestelmien melu koostuu valtaosin ilmaäänestä, kun ilmavirta kiertää liikkuvien ja paikallaan olevien osien läpi. (5, 24; 7, 14; 8, 11)

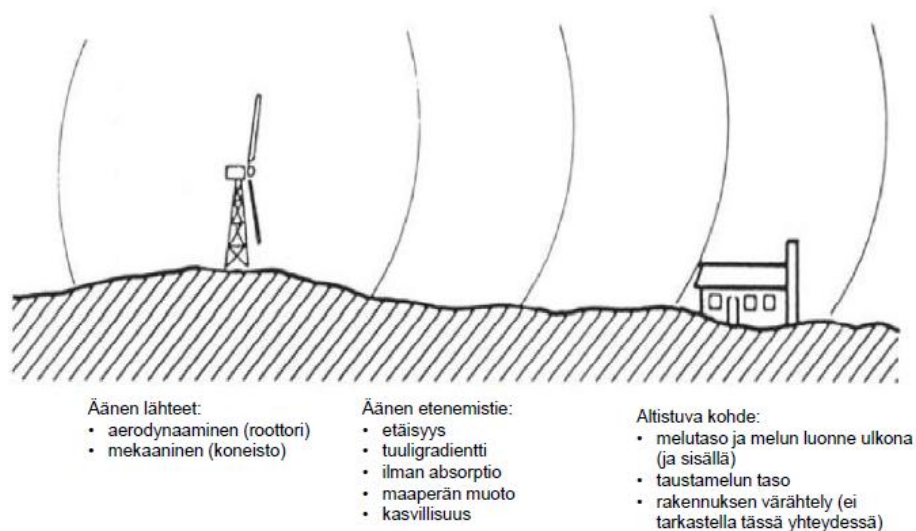
Viimeiset konehuoneen melun aiheuttajat ovat muuntajat ja taajuusmuuntaja. Molempien aiheuttama melu on pientä. Muuntajat tuottavat kapeakaistaista melua, tämä on yleensä verkkovirran toisella kerrannaisella ja sen monikerrannaisilla, esimerkiksi kun

50 Hz:n on verkossa, niin melu on 100 Hz ja sen kerrannaisilla. Joissain tuulivoimaloissa on taajuusmuuntaja eli invertteri, joka saattaa vaikuttaa turbiinin meluun. Taajuusmuuntajan tuottama korkeataajuinen kapeakaistainen melu on huomattavissa tuulivoimalan läheisyydessä, ja sen takia se ei merkittävästi vaikuta tuulivoimalan muihin melupäästöihin. (7, 14; 8, 11)

### 3.3 Tuulivoimaloiden melun leviäminen ja häiritsevyys

Vaikka tuulivoimaloiden melua on onnistuttu vähentämään, se on suurin este uusien voimaloiden rakentamisessa. Suuri osa ihmisistä pitää tuulivoimaloiden melua häiritsevänä. Tuulivoimaloiden melu ei tutkitusti aiheuta terveyshaittoja. Tuulivoimaloiden melu koskeekin ennen kaikkea sen lähellä asuvia, koska kauempana tuulivoimalan melu peittyy tuulen alle. Tuulivoimaloiden äänen eteneminen kuulijalle ja siihen vaikuttavat tekijät kuvataan kuvassa 5. (4, 2)

Taustamelu vaikuttaa myös tuulivoimalan aiheuttaman melun kuulemiseen. Jos taustamelu ja tuulivoimalan melu ovat saman suuruisia, turbiinin melu katoaa taustameluun. Taustameluun sisältyy sellaisia melulähteitä kuin tieliikenne, tehdasalueen metalli, metsät ja rakennukset. Riippuu tuulen nopeudesta ylittääkö tuulivoimalan melu taustamelun. Tuulen nopeus vaikuttaa niin tuulivoimalan kuin ympäristön meluun, varsinkin kasvillisuuden aiheuttamaan meluun. Kun tuulennopeus on pieni, tuulivoimalan melu kuuluu selvemmin, minkä takia melumittauksia suositellaan tehtävän hitaissa, noin 8 m/s, tuulen nopeuksissa. (4, 18)



Kuva 5. Esimerkki melun lähteestä, etenemisestä ja kohteesta (11, 5)

## 4 MITTAUSOHJEET

Tässä kappaleessa on esitetty, kuinka tuulivoimalan melu mitataan standardin IEC 61400-11 (12) mukaisesti. VTT:n julkaisema käännös standardista (14) on myös käytetty. Luvussa käydään läpi mittauslaitteistot, mittauspaikan valinta ja mittauksen teko.

### 4.1 Mittauslaitteistot

Mittauksiin tarvitaan mukaan seuraavat varusteet:

- Mittauksiin tarvitaan luonnollisesti äänenpainetasomittari eli melumittari. Mittauslaitteiston on täytettävä IEC 61672-1 -standardin luokan 1 vaatimukset. Tiedot yleensä esitetään valmistajan internet-sivuilla.
- Melumittarin mikrofonin halkaisija ei saa olla suurempi kuin 13 mm. Mikrofonin on suojattava tuulisuojuksella. Tuulisuojuksen on muodoltaan puolipallo, jonka halkaisija on noin 90,0 mm. Tarvittaessa voidaan käyttää päällä toista tuulisuojuksia.
- Melumittarille tarvitaan mittausalusta, jonka päälle mikrofonin asetetaan. Alustan tarkoitus on varmistaa, että mittaus olisi mahdollisimman samanlainen maastosta riippumatta. Alusta on valmistettava akustisen kovasta materiaalista, esimerkiksi vanerista tai lastulevystä. Alusta on oltava pyöreän muotoinen ja halkaisijaltaan vähintään 1 m. Tosin isompaa alustaa suositellaan käytettävän pehmeässä maastossa. Alustan paksuuden on oltava ainakin 12,0 mm, tai jos levy on tehty metallista, paksuudeksi riittää 2,5 mm.
- Tuulimittari tarvitaan, jos mittauksia tehdessä ei luotettavia tuuliarvoja saada mistään muualta. Mittauksessa käytettävän tuulimittarin tarkkuuden on oltava  $\pm 0,2$  m/s alueella 4 – 12 m/s. Tuulensuuntamittarin tarkkuuden on oltava  $\pm 6^\circ$ . Tuulennopeus ja suuntamittari eivät ole pakollisia, jos alueella on muita käytettäviä mittareita, jotka täyttävät vaaditun tarkkuuden. Jos tuulitiedot saadaan tuulivoimalasta, mittaria ei myöskään tarvitse.
- Tarvitaan lämpötilamittari, joka pystyy mittaamaan lämpötilan tarkkuudella  $\pm 1$  °C. Tarvitaan myös ilmanpainemittari, joka pystyy mittaamaan ilmanpaineen tarkkuudella  $\pm 1$  kPa ja etäisyysmittari.
- Dokumentointia varten on myös hyvä ottaa mukaan kamera, kartta ja muistiinpanovälineet. Myös hiekkaa kannattaa ottaa matkalle mukaan, varsinkin jos



maasto on epätasainen tai maastossa ei ole hiekkaa alustan alle jäävien rakojen peittämiseen.

- Mittauksiin tekoon liittyy paljon paikallaan oloa, sillä mittarin mitatessa ei saisi mittaaja aiheuttaa ylimäärästä taustamelua liikkumalla. Tätä varten jonkinlainen istuin on hyvä olla mukana, esim. retkijakkara.

Normaalisti melumittarin tuulisuoja on pallon muotoinen, koska suurinta osaa melumittauksista ei tehdä maanpintatasolla. Tämän työn tekohetkellä käytössä ei ollut puolipallon muotoista tuulisuojaa, joten ei pystytty testaamaan väärän muotoisen tuulisuojan vaikutusta mittaustuloksiin. Jotkut tuulisuojavalmistajat tarjoavat puolipallon muotoisia tuulisuojia, mikä on todennäköisesti turvallisempi vaihtoehto kuin leikata pallon muotoinen tuulisuoja kahtia.

## 4.2 Toimet ennen mittauksia

Jotta mittauksen tulokset ovat mahdollisimman tarkat, seuraavia toimenpiteitä suositellaan tehtävän:

- Selvitetään, minkälaista mittausta ollaan tekemässä (perusmelumittaus, taustamelu jne.) ja kuinka monta mittausta aiotaan suorittaa. Tiedot turbiinista ja sen ympäristöstä kannattaa etsiä valmiiksi. Turbiinin napakorkeus ja roottorin halkaisija ovat tärkeitä tietoja, sillä niitä tarvitaan mittaustaikojen tai paikkojen selvittämiseksi. Mittauspaikkojen etäisyydet kannattaa laskea etukäteen ja merkitä karttaan valmiiksi (ks. luku 4.3.1). Tuulivoimalan tiedot saadaan tuulivoimalan operaattorilta.
- Mittauslaitteet pitää testata ja kalibroida ennen ja jälkeen mittauksien. Kalibroinnissa pitää ottaa huomioon kaikki mittauksiin vaikuttavat asiat kuten mikrofonin jatkojohdot yms. Liitteessä 1 on esitetty ohjeet, kuinka mittari RION 52 kalibroidaan.
- Jos tuulimittaukset aiotaan kerätä käyttämällä esim. tuulivoimalaa, on varmistettava, että operaattori on tietoinen tiedon keräämisestä. Operaattorin on varmistettava, että tiedot tulevat talteen. Operaattorin on luovutettava tuulivoimalan tehokäyrä, jos sitä ei entuudestaan ole käytössä.
- Ennen mittaustaikalle menoa täytyy varmistaa, että sää on otollinen mittaustilanteisiin. Tavallista melumittausta ei saa suorittaa, jos sataa tai tuulee to-

della voimakkaasti (13, 11). Tuulen nopeus on suositeltu olevan 10 metrissä 8 m/s, mutta mittauksen voi suorittaa myös nopeuksilla 6 - 10 m/s. Ennen mittausta paikalle menoa kannattaa siis tarkistaa tuulen nopeus soittamalla esimerkiksi lähellä olevaan ilmatieteenlaitoksen mittausta paikalle. Lämpötila ei myöskään saa ylittää tai alittaa mittauskalustojen sallittuja rajoja (13, 11).

### 4.3 Mittauspaikan valinta

Mittauspaikan etäisyys turbiinista määräytyy kaavan (20) mukaan:

$$R_0 = H + \frac{D}{2} \quad (20)$$

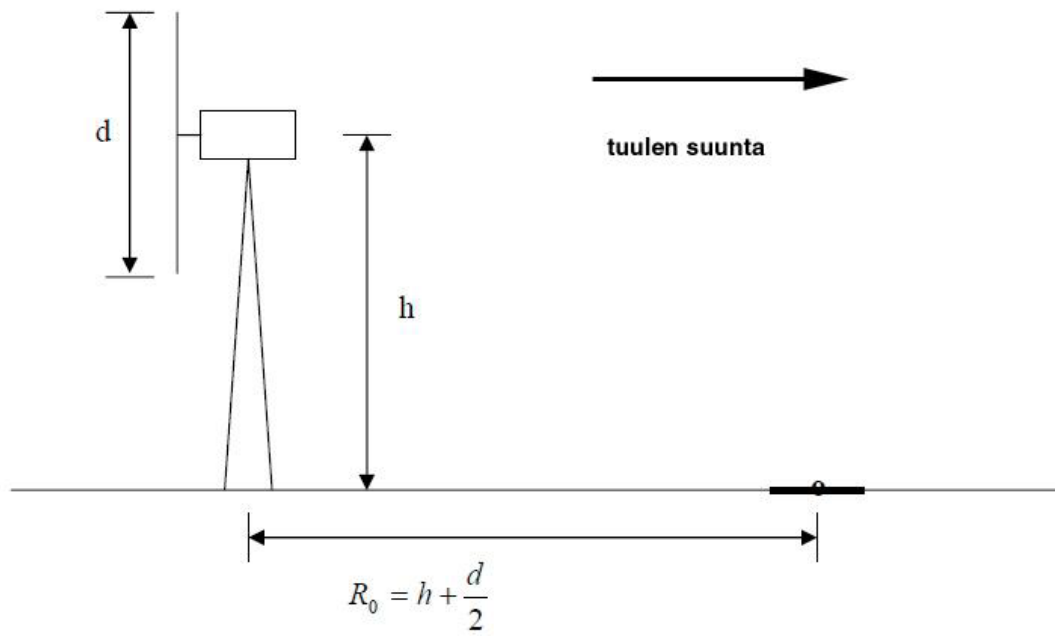
$R_0$	referenssipiste [m]
$H$	turbiinin napakorkeus [m]
$D$	roottorin halkaisija [m].

$R_0$  on referenssipiste, josta mittauspiste  $R$  ei saa poiketa 20 % tai  $\pm 30$  m. Kyseistä kaavaa käytetään vaaka-akselisissa tuulivoimaloissa. Tämän työn kirjoitushetkellä ei Suomesta löydy pystyakselisiä tuulivoimaloita, mutta jos on tarkoitus mitata pystyakselisen tuulivoimalan äänenpainetasoa, etäisyys määräytyy kaavan (21) mukaan:

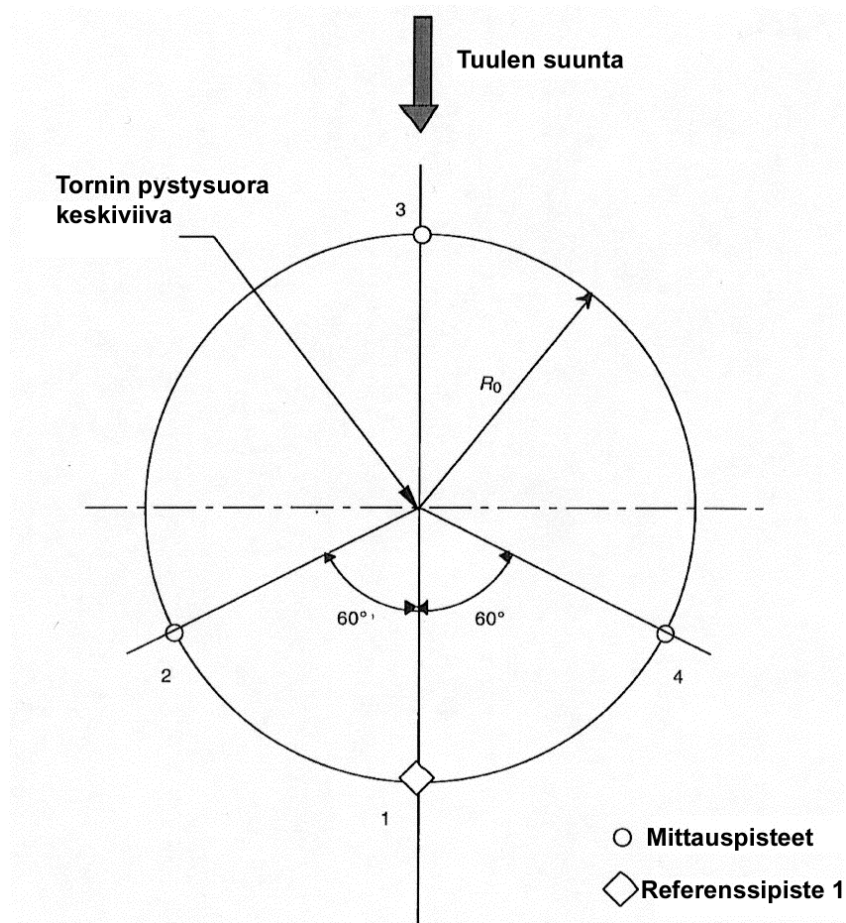
$$R_0 = H + D \quad (21)$$

$H$	etäisyys maasta roottorin keskusta [m]
$D$	ekvatoriaalisen akselin halkaisija [m].

Kun etäisyys on selvillä, asetetaan mikrofoni niin, että se osoittaa tuuliturbiinia ja tuulen suuntaan ja on  $\pm 15^\circ$  sisällä tuulen suunnasta. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty mittausta paikkojen etäisyydet ja sijainnit tuulivoimalaan nähden. Jos suoritetaan myös kolme vaihtoehtoista mittausta, näiden paikat määräytyvät kuvan 7 mukaan. Kaikkien mittausten etäisyys on sama eli  $R$ . (12, 14)



Kuva 6. Mittauspisteiden sijainnit (14; Liite 1, 6)



Kuva 7. Mittauspisteiden sijainnit (14, 8)

Jotta mittaus olisi mahdollisimman tarkka, mittausalusta on laitettava tasaiseen maahan. Mahdolliset raot ja välit olisi täytettävä maalla tai hiekalla, jotta alusta olisi tasainen. Mittauksen kaltevuuskulman pitää olla välillä  $25^{\circ}$  -  $40^{\circ}$ .

Alueessa, jossa on rakennuksia tai muita isoja rakennelmia, mittauspaikka pitää valita sen mukaan, etteivät taloista heijastuvat äänet pääse häiritsemään mittausta. Mittaus voidaan suorittaa 2 m rakennuksen julkisivusta, jos tarpeeksi avointa mittauspaikkaa ei löydy (13, 14). Mikrofonin sijoitetaan keskelle mittausalustaa ja suojataan tuulisuojujalla. Tarvittaessa voidaan käyttää toista tuulisuojujaa, mutta se pitää ottaa huomioon mittaustulosten korjauksessa. Kuvassa 8 näkyy esimerkki mikrofonin asettamisesta.

Kun mittauspaikka valitaan, kannattaa katsoa kartasta mahdollisia maamerkkejä, joista voi päätellä mittauspaikan etäisyys tuulivoimalasta. Tästä on hyötyä, jos etäisyysmittari ei toimi tai se ei anna luotettavia arvoja, ja etäisyydet on arvioitava.



Kuva 8. Mikrofonin ja mittausalusta (12, 30.)

#### 4.4 Mittauksen suorittaminen

Mittauksia tehdään vähintään 30 kappaletta referenssipistettä kohden jokaiselle mitattavalle tuulennopeudelle. Jokainen mittaus kestää 1 min. Samanaikaisesti mittauksen

aikana mitataan tuulen nopeus ja tuuliturbiinin sähköteho. Jos paikalla ei ole omaa tuulimittaria, tuulen nopeuden saa laskettua turbiinin tehosta (tarkemmin kappaleessa 4.5). Tulokset suositellaan tallennettavan analysointia varten.

Useasta mittauspisteestä mitattaessa käytetään jompaakumpaa seuraavista tavoista:

- Suositeltu tapa on mitata samanaikaisesti referenssipisteen mittauksen kanssa. Tämä tosin vaatii ylimääräisen mittarin, joka täyttää kaikki standardin vaatimukset. Vähintään 5 mittausta per mittauspiste on tehtävä. Äänenpainetaso mittauspisteellä on 5:n mittauksen keskiarvo, ja jos mittauksia on enemmän kuin 5, valitaan näistä mittauksista ne 5, joiden tuulen nopeus on lähinnä 8 m/s.
- Toinen tapa on mitata jokainen mittauspiste erikseen, jolloin toista mittaria ei tarvitse. Nämä toteutetaan samalla tavalla kuin referenssipisteen mittaus. Mittauksia tehdään 10 kappaletta per mittauspiste. Sääolosuhteiden pitää olla samanlaiset.

Mittaukset on suoritettava taajuudella 20 Hz – 10 kHz, A-painotteisena ja 1/3-oktaavisena. Ennen mittausten aloitusta on tarkistettava, että mittarin asetukset ovat kohdallaan. Jos mitataan melua useilla eri tuulennopeuksilla, tuulennopeudet kannattaa jakaa kokonaislukuihin  $\pm 0.5$  tarkkuudella, eli 7 m/s on 6,5 m/s – 7,5 m/s.

Jotta saadaan selville turbiinin todellinen melu, pitää mitata turbiinin ympärillä oleva taustamelu. Taustamelumittaus toteutetaan silloin, kun tuuliturbiini on pysäytetty. Mittauksia suoritetaan 30 kappaletta, ja mittausolosuhteiden pitää olla samanlaiset kuin turbiinin ollessa päällä.

Mittauksen aikana on hyvä olla muistiinpanovälineet mukana. Analysointivaiheessa muistiinpanot auttavat muistamaan mittausten aikaisia tapahtumia, esim. häiriötekijöitä. Muistiinpanoihin kannattaa siis laittaa ylös mittausten kellonaika, monesko mittaus on menossa, mittauspaikka ja mahdolliset häiriötekijät tai säämuutokset. Mittausten jälkeen ennen analysointia poistetaan ne mittaukset, joiden aikana ilmeni häiritsevää taustamelua, kuten lentokoneen aiheuttamaa melua.

#### 4.5 Tuulen nopeuden mittaaminen

Tuulen nopeuden mittaamiseen voidaan käyttää kahta tapaa: määrittämällä tuulen nopeus turbiinin sähkötehosta tai mitata tuulen nopeus anemometrillä.

Tuulen nopeus voidaan määrittää sähkötehosta vertaamalla sähkötehoa turbiinin tehokäyrään. Menetelmää voidaan käyttää, jos turbiinin sähköteho on alle 0,95 kertaa turbiinin nimellistehosta. Turbiinin teho on voitu säätää pienemmälle, kuin tuulenopeus sallisi, joten on hyvä tarkistaa tuulenopeus ylimääräisellä mittarilla tai soittamalla lähimpään sääasemaan. Näin mittauksesta tulee mahdollisimman tarkka. Tuulen nopeus referenssikorkeudella voidaan selvittää käyttämällä kaavaa (22):

$$v_{ref} = v_h * \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_{0ref}}}{\ln \frac{h}{z_{0ref}}} \quad (22)$$

$v_{ref}$	tuulen nopeus referenssikorkeudella $z_{ref}$ [m/s]
$v_h$	turbiinin navan korkeudella $H$ vallitseva tuulen nopeus [m/s]
$z_{ref}$	tuulenopeuden referenssikorkeus, 10 m [m]
$z_{0ref}$	maan karheuden referenssiarvo [m]
$h$	turbiinin navankorkeus [m].

Turbiinin navan korkeudella vallitseva tuulen nopeus  $v_h$  saadaan tehokäyrän avulla. (14; Liite 1, 8)

Taulukko 1. Maanpinnan tyypit (12, 30)

<b>Maanpinnan tyyppi</b>	<b>Karheus <math>Z_{ref0}</math> (m)</b>
Vesi, lumi, hiekka	0,0001
Avoin tasainen maa, leikattu nurmi	0,01
Viljelysmaa	0,05
Asuinalue, alueet joilla on tiheää korkeaa puustoa	0,3

Anemometrillä mitataan tuulen nopeus sijoittamalla mittari paikkaan, missä turbiini tai rakennukset eivät häiritse tuulen kulkua. Mittari pitää sijoittaa vähintään 10 m:n korkeuteen. Mittaukset suoritetaan samanaikaisesti melumittauksen kanssa. Kun mitaus on tehty, tuulen nopeus referenssikorkeudella selvitetään käyttämällä kaavaa (23):

$$v_{ref} = v_h * \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_{0ref}} * \ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_{0ref}} * \ln \frac{z}{z_0}}, \quad (23)$$

$z_0$	maan karheuden arvo [m]
$z$	anemometrin korkeus maanpinnasta [m]. (14; Liite 1, 9.)

#### 4.6 Tulosten tarkastelu ja korjaus

Tuuliturbiinin todellinen melu selviää erottamalla taustamelun äänenpainetaso tuuliturbiinin mitatusta äänenpainetasosta kaavan (24) mukaan. Kyseistä kaavaa voi käyttää, jos taustamelun keskiarvo on 6 dB pienempi kuin turbiinin ja taustan melu yhteensä.

$$L_s = 10 \log [10^{(0,1L_{s+n})} - 10^{(0,1L_n)}] \quad (24)$$

$L_s$	turbiinin äänenpainetaso ilman taustamelua [dB]
$L_{s+n}$	turbiinin aiheuttama melu ja taustamelu yhdessä [dB]
$L_n$	taustamelun keskiarvo [dB]. (12, 21.)

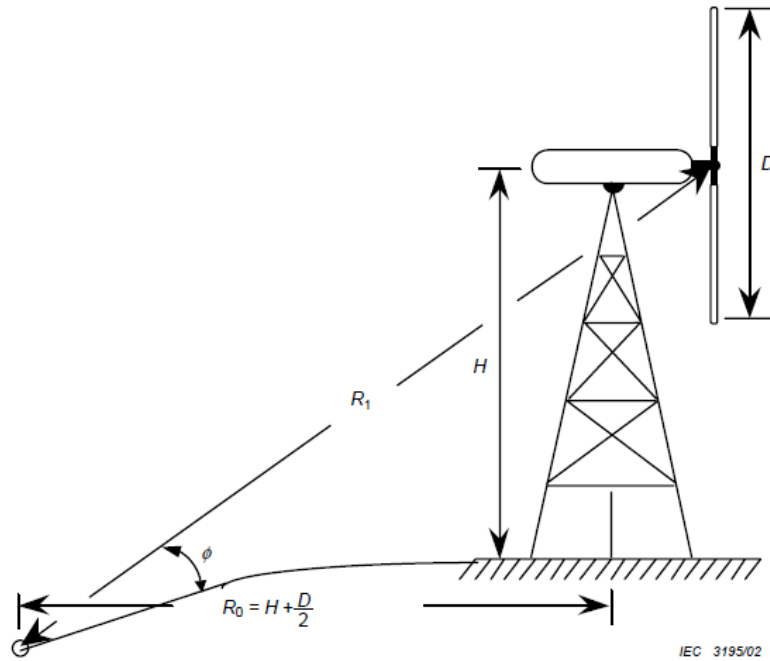
Jos turbiinin ja taustamelun aiheuttama melu on pienempi kuin 6 dB mutta suurempi kuin 3 dB verrattaessa taustameluun, korjataan kaavaa vähentämällä 1,3 dB  $L_{s+n}$ :stä. Asia mainitaan raportissa, ja korjattu arvo pitää merkitä kaavaan. Jos mittauksen erotus on alle 3 dB, kaavaa ei käytetä, ja mainitaan että tuulivoimalan melu on pienempi kuin taustamelu.

Turbiinin äänitehotaso määritetään käyttämällä kaavaa (25):

$$L_{WA,i,k} = L_{Aeq,c,i,k} - 6 + 10 \log \left[ \frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right] \quad (25)$$

$L_{WA,i,k}$	turbiinin näennäinen äänitehotaso [dB]
$L_{Aeq,c,i,k}$	taustamelukorjattu äänenpainetaso [dB]
$R_1$	turbiinin roottorin etäisyys mikrofonista [m]
$S_0$	referenssiala 1 [m <sup>2</sup> ].

Kuvassa 9 on esitetty mikrofonin etäisyys turbiinin roottorista. Mittausalustan pinta otetaan huomioon kaavassa 6 dB:n korjauksena. (12, 21)



Kuva 9. Mikrofonin etäisyys roottorista (12, 32)

#### 4.7 Tonaalisuuden todentaminen

Tuulivoimalat, varsinkin vanhemmat mallit, tulee tutkia tonaalisuuden varalta. Tonaalisuusanalyysi toteutetaan samoilla tuulen arvoilla kuin äänentehon mittaus. Jokaista tuulikaistaa kohden tehdään kaksi minuutin kestävä mittaussjakso, jotka jaetaan 12:een 10 sekunnin jaksoon. Näistä jaksoista otetaan keskiarvot. Taulukossa 2 näkyy taajuuksien resoluutiot.

Taulukko 2. Taajuuksien resoluutiot (12, 22)

Taajuus (Hz)	< 2 000	2 000 – 5 000
Taajuusresoluutio (Hz)	2 – 5	2 – 12,5

Jokaisesta 10 sekunnin spektristä ( $j = 1 \dots 12$ ) ja tuulen nopeusalueesta ( $k = 6, 7, 8, 9, 10$ ) selvitetään äänenpainetaso  $L_{pt,j,k}$  ja peiteäänäen äänenpainetaso  $L_{pn,j,k}$ . Tonaalisuus  $\Delta L_{tn,j,k}$  määritetään näiden kahden erotuksella. Kokonaistonaalisuus  $\Delta L_k$  määritetään kahdentoista  $\Delta L_{tn,j,k}$ -arvon energiakeskiarvona.



Selvitetään kaistanleveyden kriittinen kaista kaavan (26) avulla:

$$\text{Kriittinen kaista} = 25 + 75 \left( 1 + 1,4 \left[ \frac{f_c}{1000} \right]^2 \right)^{0,69} \quad (26)$$

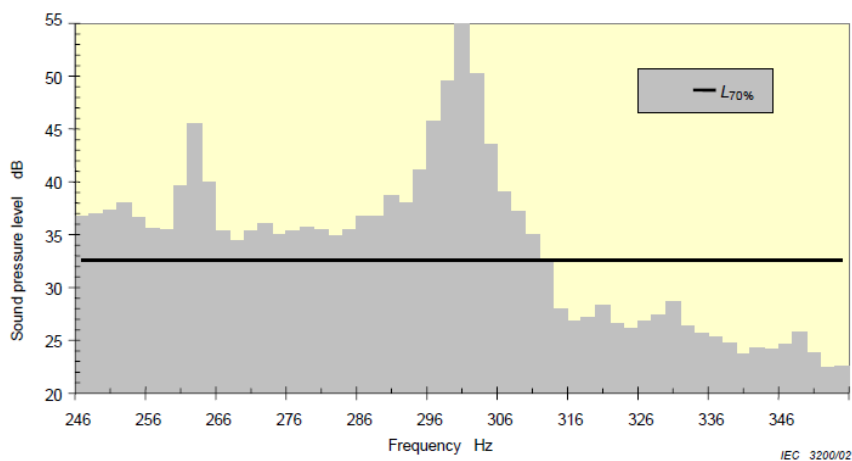
$f_c$  keskitaajuus [Hz] (12, 22).

Poikkeustapauksissa, jossa menettelytapa ei anna oikeita tuloksia, voidaan tarvittaessa muokata kuvailtua metodologiaa. Mahdolliset muutokset on mainittava raportissa.

Tämän jälkeen etsitään mahdollista tonaalisuutta spektristä. Ensimmäiseksi etsitään spektrin paikallinen maksimi. Tämän jälkeen lasketaan spektrin energian keskiarvo ilman paikallista maksimia ja kahta sen vieressä olevaa viivaa. Jos paikallinen maksimi on enemmän kuin 6 dB energian keskiarvosta, se on mahdollinen äänes.

Kriittinen kaista asetetaan mahdolliseen ääneeseen niin, että keskitaajuus on samassa kohtaa kuin mahdollinen äänes. Ääneksillä, joiden mahdolliset taajuudet ovat välillä 20 Hz - 70 Hz, kriittinen kaista laitetaan 20 Hz – 120 Hz. Kriittisen kaistan avulla luokitellaan jokainen spektriviiva joko ääneeksi, peiteääneksi tai ei kummaksikaan.

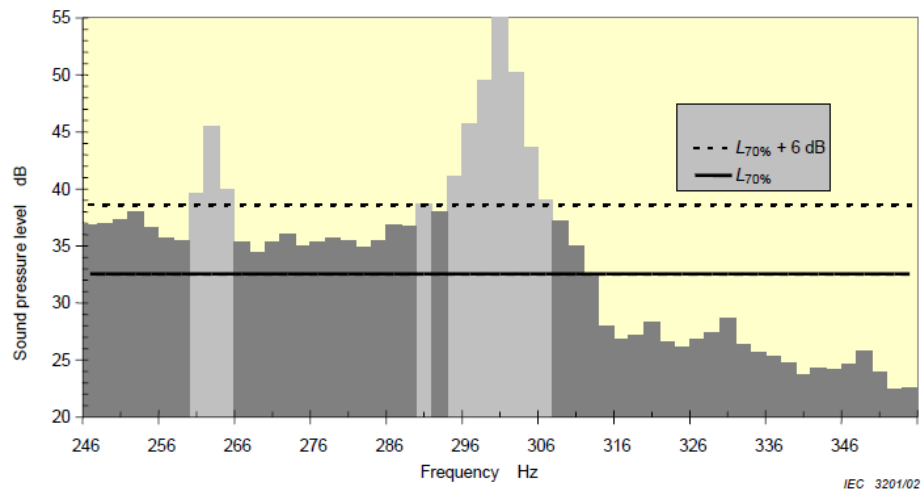
Ensiksi lasketaan äänenpainetaso  $L_{70\%}$ , jossa äänenpainetaso on spektriviivojen energian keskiarvosta 70 %. Kuvassa 10 on esimerkki.



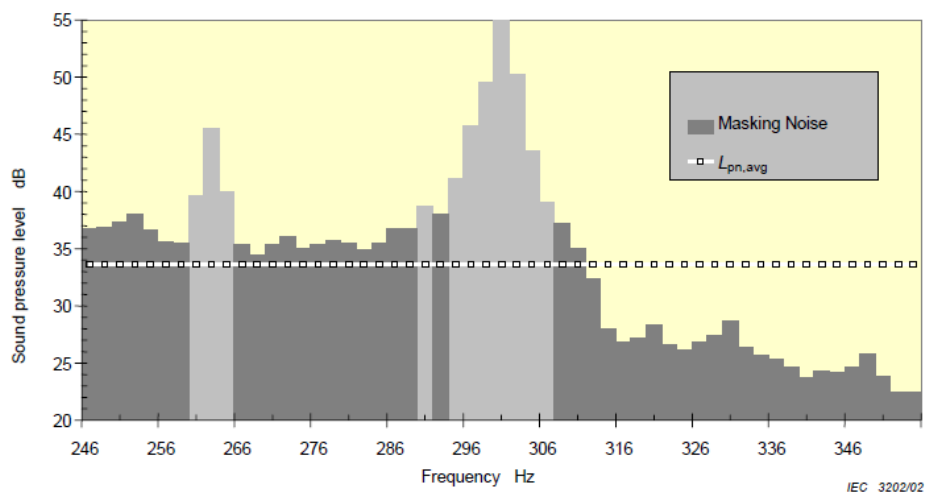
Kuva 10.  $L_{70\%}$  raja kriittisessä kaistassa (12, 36)

Kun lisää  $L_{70\%}$ :iin 6 dB:ä, tämä luo uuden rajan, joka erottaa peiteäänien ja äänien toisistaan. Viivat, jotka jäävät tämän rajan alle, luokitellaan peiteääniksi. Kuvassa 11 on esimerkki rajauksesta. Tämän jälkeen lasketaan kaikkien peiteääniksi luokiteltujen

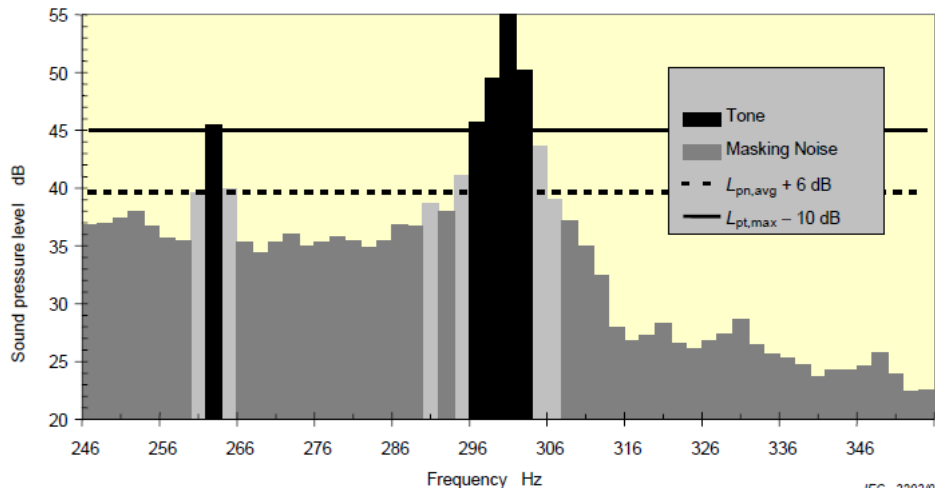
viivojen energiakeskiarvo  $L_{pn,avg}$  ja rajataan kuvan 12 mukaan. Viivat, jotka ylittävät  $L_{pn,avg} + 6$  dB:n asettaman rajan, lasketaan äänekseksi. Jos ääneksiä on useampia, tunnistetaan korkein viiva. Viereiset viivat luokitellaan ääneksiksi, jos niiden taso on 10 dB:n sisällä korkeimmasta viivasta. Spektrin viiva, joka ei sovi äänekseksi tai peiteääneksi, luokitellaan ”ei kumpikaan”, näitä ei enää oteta huomioon myöhemmissä analyyseissä. Kuvassa 13 näkyy viivojen luokittelun lopputulos.



Kuva 11.  $L_{70\%} + 6$  dB rajaus. Kaikki tämän viivan alla on peiteääniä (12, 36)



Kuva 12.  $L_{pn,avg}$  rajaus (12, 37)



Kuva 13. Spektrin viivojen luokitus (12, 37)

Äänksen äänenpainetaso  $L_{pt,j,k}$  määritetään summaamalla kaikki kriittisen kaistan spektriviivat, jotka luokiteltiin äänekseksi. Jos kaksi tai enemmän ääneksiä on vierekkäin, korjataan tulosta jakamalla se 1,5:llä.

Tämän jälkeen tehdään taustamelukorjaus. Ensiksi tehdään kahden minuutin pituinen kapeakaistainen spektri kahdesta 1 minuutin taustamelumittauksesta. Nämä taustamelumittaukset pitää olla mahdollisimman lähellä samaa tuulennopeutta. Jotta tuuliturbiinin analyysia voidaan verrata, varmistetaan, että äänekset eivät tule valituista taustameluista. Peiteäänien energiakeskiarvo  $L_{pn,avg,j,k}$  korjataan käyttämällä kaavaa (24), jossa taustamelun taso käyttää samaa kriittisen kaistan aluetta ja tuulennopeutta, mitä käytettiin ääneksien analysoinnissa. Taustamelu on kriittisen kaistan kaikkien viivojen energiasumma. Taustamelun taso pitäisi olla 6 dB:ä pienempi kuin tuuliturbiinin vastaava kriittinen kaista. Jos näin ei ole, mainitaan raportissa, että taustamelu vaikuttaa peiteääneen.

Käyttämällä kaavaa (27) voidaan laskea peiteäänien taso  $L_{pn,j,k}$ :

$$L_{pn,j,k} = L_{pn,avg,j,k} + 10 \lg \left[ \frac{\text{Kriittinen kaista}}{\text{Vaikuttavan äänen kaistanleveys}} \right] \quad (27)$$

$L_{pn,j,k}$  peiteäänien taso [dB]

$L_{pn,avg,j,k}$  taustamelulla korjattu energiakeskiarvo [dB].

Vaikuttavan äänen kaistanleveys on 1,5 kertaa taajuuden resoluutio (12, 24). Kun tämä on laskettu, käytetään  $L_{pn,j,k}$ -tulosta selvittämään kriittisen kaistan tonaalisuus käyttämällä kaavaa (28):

$$L_{tn,j,k} = L_{pt,j,k} - L_{pn,j,k} \quad (28)$$

Jos joistain 12:sta spektristä puuttuu äänes ja  $L_{tn,j,k}$  jää ilman tulosta, korvataan tulos kaavan (29) avulla:

$$\Delta L_{tn,j,k} = -10 \lg \left[ \frac{\text{Kriittinen kaista}}{\text{Vaikuttavan äänen kaistanleveys}} \right] \quad (29)$$

12  $\Delta L_{tn,j,k}$  tulosta ovat energiakeskiarvo yhdelle  $\Delta L_k$ :lle. Eri spektrin äänekset, joiden taajuudet ovat 10 %:n sisällä kriittisestä kaistaleveydestä, oletetaan samaksi ääneksi. Tässä tapauksessa keskimääräistä taajuutta käytetään, kun selvitetään kuuluvuutta. Kuuluvuus selvitetään käyttämällä selvitettyjä  $\Delta L_k$  arvoja.  $\Delta L_k$  arvot korjataan, jotta ne vastaisivat paremmin ihmisen korvan kuuloa. Äänksen kuuluvuus  $\Delta L_{a,k}$  selvitetään kaavalla (30):

$$\Delta L_{a,k} = \Delta L_k - L_a, \quad (30)$$

josta  $L_a$  on taajuusriippuvainen kuuluvuuskriteeri, joka määritetään kaavalla (31):

$$L_a = -2 - \lg \left[ 1 + \left( \frac{f}{502} \right)^{2,5} \right] \quad (31)$$

$f$  äänksen taajuus [Hz]. (12, 24)

$\Delta L_{a,k}$  pitää laskea kaikille  $\Delta L_k$  arvoille. Jos äänksen kuuluvuus täyttää kaavan (32) ehdon, se lisätään raporttiin. Jos tätä ehtoa ei täytetä, arvoa ei tarvitse mainita raportissa.

$$\Delta L_{a,k} \geq -3,0 \text{ dB} \quad (32)$$

## 5 MITTAUKSEN RAPORTOINTI

Raportista on löydyttävä standardin IEC 61400-11 (12, 25) mukaiset tiedot. Näihin vaadittaviin tietoihin kuuluvat mm. tiedot turbiinista, ympäristöstä, mittausvälineistä jne. Standardin vaatimat tiedot ovat seuraavat:

### 5.1 Turbiinin tiedot

Tuuliturbiinista kerrotaan seuraavat tiedot:

- valmistaja, sarja- ja mallinumero
- turbiinin ohjaustapa (jos on), pyörimisnopeus, lapakulma jne.
- roottorin halkaisija, siipien malli ja lukumäärä
- nimellisteho ja tehokäyrä
- navan korkeus
- generaattorin valmistaja, malli ja pyörimisnopeus
- vaihteiston valmistaja, malli.

### 5.2 Turbiinia ympäröivä ympäristö

Tuuliturbiinin ja mittausalueen ympäristöstä kerrotaan seuraavat tiedot:

- sijainnin tiedot, kuten paikka, kartta ja koordinaatit
- valokuvia paikasta ja mittauksesta
- maasto noin 1 km alueelta (tasainen maasto, vesistöä, vuoristoinen jne.)
- maanpinnan tyyppi kuten ruoho, hiekka, puut jne.
- heijastavat pinnat kuten talot tai muut rakennukset, puut, vesi
- muut mahdolliset äänilähteet, jotka vaikuttavat taustameluun (lentokentät, toiset turbiinit, tiet jne.).

### 5.3 Kalusto ja välineet

Seuraavat tiedot kerrotaan mittausvälineistöstä:

- valmistaja, laitteen nimi, sarjanumero ja malli
- viimeisin kalibrointipäivä

- mittarien sijainti ja korkeus (anemometrillä)
- sekundäärisen tuulisuojan tiedot, jos sellaista käytettiin.

#### 5.4 Akustiset tiedot

Seuraavat tiedot kerrotaan äänenmittauksiin liittyen:

- jokaisen mittauspisteen sijainti
- jokaisen mitatun tuulennopeuden näennäinen äänenteho  $L_{WA,k}$
- jokaisen mitatun tuulennopeuden näennäinen äänenteho  $L_{WA,k}$  vastaten 10 metrin korkeutta
- taustamelu
- tonaalisuus.

#### 5.5 Muut tiedot

Seuraavat tiedot on myös kirjoitettava muistiin:

- tuulennopeus ja sen mittaustapa
- lämpötila
- ilmanpaine
- vallitseva sää (auringon korkeus, pilvisyys kahdeksasosina jne.)
- mittaajan nimi ja organisaatio
- mittauksen suoritus aika
- mahdolliset epävarmuustekijät on ilmoitettava raportissa.

Liitteessä 2 on esitetty esimerkkiraportti, joka tehtiin Haminan ja Kotkan tuulivoimaloiden koemittauksista.

## 6 YHTEENVETO

Työn tarkoitus oli tutkia standardia IEC 61400-11 ja tehdä sen pohjalta mittausohje. Työssä käydään kaikki standardin askeleet läpi yksityiskohtaisesti ja esitetään kommentteja niihin. Huomiota kiinnitettiin erikseen seuraaviin asioihin:

Standardi ei ota kantaa merituulivoimalaitosten melumittaamiseen, ja tätä ohjetta ei todennäköisesti voi soveltaa näihin mittauksiin. Kuitenkin, jos merituulivoimaloihin tehdään melumittauksia tavallisella melumittarilla, suosittelen mittaukset tehtäksi rannalla mahdollisimman lähellä tuulivoimalaa. Ääni voi kulkea veden pinnalla pitkiäkin matkoja, kuten luvussa 2.5 mainitaan. Mittaus voi kuitenkin olla haastava, koska taustamelun ja tuulen takia tuulivoiman aiheuttamaa melua voi olla vaikea havaita.

Standardissa ei myöskään anneta ohjeita impulssiäänen tai amplitudimodulaation (jaksollisen vaihtelun) mittaamiseen. Työterveyden laitos (15) ehdottaa mittaamaan impulssimeluja taajuuspainotuksella C. VTT ehdottaa (9, 11), että impulssin laskentaan käytetään vanhempien standardien (SFS-EN ISO 3744:2009) menettelytapoja. Tässä mitataan äänitasomittarin impulssi-aikavakion A-painotettuna keskiäänitaso ( $L_{pA_{1eq}}$ ) ja erotetaan siitä vastaavasta aikavälistä määritetty A-painotettu keskiäänitaso ( $L_{pA_{eq}}$ ). Jos erotus on suurempi kuin 3 dB, lasketaan melu impulssimaiseksi (9, 11). Vanhoja standardeja ei löytynyt, joten kaavoja ei voitu tarkistaa.

Ohjetta tehtäessä ei pystytty kaikkia mittauksia ja laskuja testaamaan käytännössä. Varsinkin tonaalisuuden mittaaminen ja laskeminen oli asia, jossa oli ongelmia. Asiaa hankaloitti se, että VTT:n luonnoksessa (14) tonaalisuudesta mainitaan vain ohimennen. Työhön tehtyjä käännöksiä ei voitu verrata VTT:n käännöksiin.

Muuten tietoa löytyi vaivatta. Teorioita ja selostuksia tuulivoimaloiden melusta löytyi helposti eri lähteistä. Äänen teoriasta löytyi myös hyvin materiaalia. VTT:n luonnokset auttoivat käännösten tarkistamisessa. Suosittelen jatkokehitysehdotuksena rakentamaan laskentaohjelman jälkianalysointia varten. Melunmittauskaavoja laskemiseen on tässä työssä paljon, joten laskentaohjelma säästäisi paljon aikaa.

## LÄHTEET

1. Jouni-Juhani Häkkinen. 2013. Tuulienergia 02/13.  
[http://www.tuulivoimayhdistys.fi/sites/www.tuulivoimayhdistys.fi/files/4923\\_tuulienergia\\_0213\\_pieni.pdf](http://www.tuulivoimayhdistys.fi/sites/www.tuulivoimayhdistys.fi/files/4923_tuulienergia_0213_pieni.pdf) [viitattu 2.10.2013].
2. Pertti Korpinen. 2005. Äänen taajuus. [http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuu\\_1.htm](http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuu_1.htm) [viitattu 25.9.2013].
3. Hannu Peltonen, Juha Prekkiö, Kari Vierinen. 1998. Insinöörin (AMK) FYSIIKKA OSA II. 2. painos. Lahti: N-Paino.
4. Anthony I. Rogers, James f. Manwell, Sally Wright. 2002 (korjattu 2006). Wind Turbine Acoustic Noise. Renewable Energy Research Laboratory Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Massachusetts at Amhers.  
<http://www.minutemanwind.com/pdf/Understanding%20Wind%20Turbine%20Acoustic%20Noise.pdf> [viitattu 25.9.2013].
5. Sampo Pihlainen. 2009. Tuulivoimaloiden meluhaitat. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos.
6. Jussi Peltonen. 2009. Biofysiikan luentomoniste. Jyväskylän yliopiston liikuntabiologian laitos. Moniste on osoitteessa  
[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CdwQFjAC&url=https%3A%2F%2Fstaff.jyu.fi%2FMembers%2Fpeltsi%2Fopetus%2FBMEP003%2Fdokumentit%2Fluennot\\_osa2\\_2%2Fat\\_download%2Ffile&ei=AYtGUs6RKYqR4ATYvYFo&usg=AFQjCNGCXuvPjvdEu4u1H9kBAoLN3o-8pQ&sig2=SamAuA7seyrwWfY2NVTfPQ](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CdwQFjAC&url=https%3A%2F%2Fstaff.jyu.fi%2FMembers%2Fpeltsi%2Fopetus%2FBMEP003%2Fdokumentit%2Fluennot_osa2_2%2Fat_download%2Ffile&ei=AYtGUs6RKYqR4ATYvYFo&usg=AFQjCNGCXuvPjvdEu4u1H9kBAoLN3o-8pQ&sig2=SamAuA7seyrwWfY2NVTfPQ) [viitattu 25.9.2013].
7. Seppo Uosukainen. 2010. Tuulivoimaloiden melon synty, eteneminen ja häiritsevyys. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
8. Carlo Di Napoli. 2007. Tuulivoimaloiden melon syntytavat ja leviäminen. Suomen Ympäristö 4/2007. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38415>.



9. Hannu Nykänen, Seppo Uosukainen, Denis Siponen, Carlo Di Napoli, Veli-Matti Yli-Kätkä, Janne Ristolainen. 2013. Ehdotus tuulivoimamelun mallinnuksen laskenta-  
logiikkaan ja parametrien valintaan. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
10. Denis Siponen. 2013. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus Tuulivoimamelu.  
[http://www.kemionsaari.net/wp-content/uploads/2013/09/2013\\_Kemionsaari\\_WTMelu\\_siponen.pdf](http://www.kemionsaari.net/wp-content/uploads/2013/09/2013_Kemionsaari_WTMelu_siponen.pdf) [viitattu 24.9.2013].
11. Hannu Nykänen. 2012. Tuulivoimaloiden meluvaikutukset - Miten mallinnetaan, mitataan ja minimoidaan. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.  
[https://syke.etapahtuma.fi/eTaika\\_Tiedostot/2/TapahtumanTiedostot/689/Tuulivoimaloiden%20meluvaikutukset%20.pdf](https://syke.etapahtuma.fi/eTaika_Tiedostot/2/TapahtumanTiedostot/689/Tuulivoimaloiden%20meluvaikutukset%20.pdf) [viitattu 24.9.2013].
12. IEC 61400-11 Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques, edition 2.1 2006-11. International Electrotechnical Commission.
13. Ympäristöministeriö. 1995. Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriö, ympäristösuojeluosasto.
14. Raimo Eurasto, Hannu Nykänen. 2013. Tuulivoimamelun mittausmetodiikan kehittäminen. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
15. Työterveyslaitos. 2011. Melun mittaaminen.  
[http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/melu/melun\\_mittaaminen/sivut/default.aspx](http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/melu/melun_mittaaminen/sivut/default.aspx) [viitattu 28.9.2013].

## 1 ASETUKSET

Tässä ohjeessa käydään läpi tärkeimmät asetukset, jotka kannattaa asettaa ennen mittauksen aloittamista. Tarkemmat ohjeet löytyvät melumittarin valmistajan kotisivuilta. Kuvassa 1 näkyy valikko joka aukeaa kun painetaan MENU-näppäintä. Valikot sisältävät seuraavia asioita:

- System (Language) sisältää asetukset kielen ja kellonajan vaihtamiseksi. Se näyttää myös kuinka paljon vapaata tilaa muistikortilla on.
- Display sisältää asetukset jossa voi valita mitä arvoja mittauksen aikana ruudulla näkyy.
- I/O sisältää asetukset mm. ulostulon signaalien säätämiseksi jne.
- Store sisältää asetukset mittausten tallentamiseen, kuten tallennusmoodit, tallennusaika jne.
- Measure sisältää asetukset mittausrvojen korjaamiseen kuten painotukset (A/C/Z), tuulisuojakorjaus jne.
- Save/Print sisältää asetukset mittausten tallentamiseen, ruudun kuvakaappaukseen ja mittausten tulostamiseen.
- Option sisältää asetukset mittarin ohjelman vaihtamiseen. Myös ohjelmien asentaminen tapahtuu täältä. Ohjeen kirjoittamishetkellä mittarissa on kolme ohjelmaa: normaali-, FFT- tai 1/3 oktaavimittaus.
- Recall listaa kaikki mitatut mittaukset ja näitä voi tarkkailla recall-toiminnolla.
- WR sisältää asetukset ääninauhoitusten tekoon mittauksen aikana.

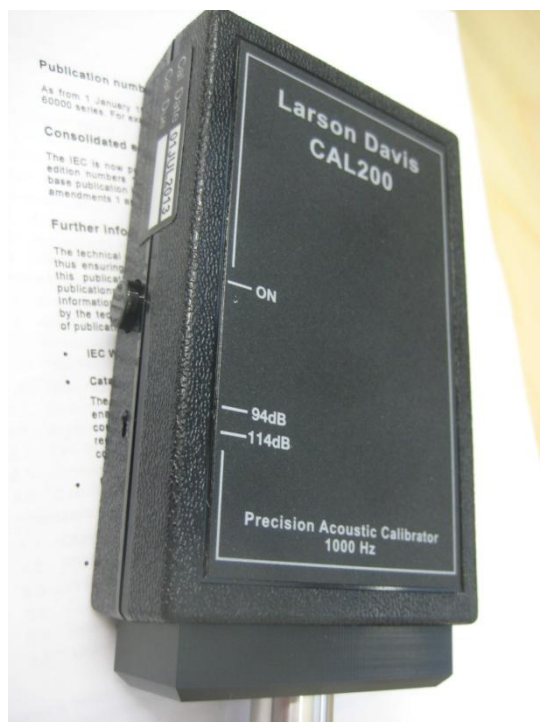
Tärkeimmät valikot näistä ovat Store ja Measure-valikot. Näistä asetetaan kaikki tärkeimmät asetukset mittauksiin liittyen. Ennen mittausta kannattaa katsoa nämä asetukset:

1. Tarkista että Option-valikosta on valittu haluttu mittausohjelma. Normaali- mittaus on NX-52RT, FFT on NX-52FT ja 1/3 oktaavi on NX-52WR.

2. Tarkista, että Store-valikossa Store Mode on valittu Auto eikä Manual. Auto tekee mittauksen säädetyn ajan verran, kun Play on painettu, ja tallentaa sen valitulle nimelle (4 numeroinen luku). Manual tekee saman, mutta mittaukset on tallennettava erikseen, ja tämä saattaa unohtua tehdä, varsinkin useassa lyhyessä mittauksessa.
3. Tarkista, että Measure-valikossa painotus (Frequency Weighting) on valittu halutulle alueelle (yleensä tämä on A). Jos on tarkoitus tehdä 1/3 oktaavimittaus, varmista että se on valittu tästä valikosta.

## 2 KALIBROINTI

Ennen mittausten aloitusta melumittari on kalibroitava. Tässä ohjeessa käydään läpi NL-52 melumittarin kalibrointi kuvan 1 CAL200-äänikalibraattorin avulla.



Kuva 1. Kalibraattori

Kalibrointi suoritetaan seuraavasti:

1. Käynnistä NL-52 melumittari, mittarin pitäisi olla käynnistyessään mittausvalmiudessa. Jos mittari on mittaamassa FFT tai 1/3 oktaavimittausta, voi mittauksen vaihtaa normaaliin mittaukseen, mutta tämä ei ole pakollista.

2. Laita mikrofoni varovaisesti kalibraattorin reikään (kts. Kuva 2). Älä käytä voimaa ettei mikrofoni hajoa.



Kuva 2. Mittarin kalibrointi

3. Aseta kalibraattorissa ääni joko 94 dB tai 114 dB ja paina ON. Kalibraattori lähettää valitun dB kovuuden noin 1 minuutin ajan (aika lyhenee kun patterit alkavat loppua mutta dB on aina sama). Tarkista mittarin lukema.
4. Jos arvo poikkeaa, paina mittarissa näppäintä CAL. Kuvan 5 ruutu ilmestyy siihen. Katso, että ”Acoustic Calibration” lukee ruudun yläpuolella, jos näin ei lue, paina näppäintä DISPLAY vaihtaaksesi kalibrointi moodin.
5. Paina nuolinäppäimiä ▲ ▼ muuttaaksesi mittarin lukemaa. Säädä mittarin lukema näyttämään kalibraattorin lähettämää ääntä (94/114 dB).
6. Paina CAL näppäintä. Mittari on nyt kalibroitu.
7. Tarkista lukema. Jos arvo on sama, toista vaiheet 3-6 toisella dB arvolla, muuten toista vaiheet 4 - 6 uudestaan.
8. Sammuta mittari ja ota kalibraattori pois mikrofoniasta.

### 3 MITTAAMINEN JA TULOSTEN SIIRTO

Mittaaminen NL-52 on helppoa. Osoita haluttua mittauskohdetta ja paina PLAY näppäintä. Mittari mittaa asetetun ajan verran tai kunnes PLAY näppäintä painetaan uudestaan. Mittauksen jälkeen, jos Auto on valittu, mittari tallentaa mittaustuloksen valitulle nimelle. Jos nimi on varattu, mittari kysyy tallennetaanko mittaus eri nimellä vai vanhan mittauksen päälle.

Kun mittaukset on tehty, voi mittaukset siirtää tietokoneelle joko USB-johdon avulla tai siirtämällä muistikortista. Tietokone lukee mittaria kuin muistitikkoa. Mittaukset voi analysoida Rion Data Management -ohjelmalla siirtämällä mittaustulokset sinne.



Karri Kauppila

KOTKAN JA HAMINAN TUULIVOIMALOIDEN MELUMITTAUKSET

21.8.2013

Melumittausraportti 2013

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	3
2	LÄHTÖTIEDOT JA MENETELMÄT	4
	2.1 Summan mittauspisteet	4
	2.2 Mäkelänkankaan mittauspisteet	6
	2.3 Mussalon sataman mittauspisteet	7
	2.4 Mittauskalusto	9
	2.5 Sääolosuhteet mittauksen aikana	9
	2.6 Muita huomioitavia asioita	10
3	TULOKSET	10
	3.1 Summan mittausten tulokset	10
	3.2 Mäkelänkankaan mittausten tulokset	13
	3.3 Mussalon sataman mittausten tulokset	16
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	18

## 1 JOHDANTO

Tämä raportti käsittelee 21.08.2013 tehtyjä melumittauksia. Mittauksia suoritettiin Summassa, Mäkelänkankaassa ja Mussalon satamassa. Mittausten tarkoitus oli kerätä tietoa Kotkan ja Haminan tuulivoimaloiden melupäästöjä Renewtech-hanketta varten ja samalla testata Kymenlaakson Ammattikorkeakoulun uutta melumittaria.

Mittauksissa kerättiin myös tietoa IEC 61400-11 standardin käytännön toteuttamisesta. Standardi on tuulivoimaloiden melumittausten mittausohje. Kaikkia standardin vaatimuksia ei voitu täyttää varusteiden ja ajan puutteen takia. Nämä seikat voivat vaikuttaa mittaustuloksiin.

Mittaukset teki Karri Kauppila, Mikko Mylläri ja Jouni-Juhani Häkkinen olivat mukana mittauksissa. Karri Kauppila teki tulosten käsittelyn ja raportin kirjoittamisen, raportin kirjoittamiseen osallistuivat myös Mikko Mylläri ja Jouni-Juhani Häkkinen.

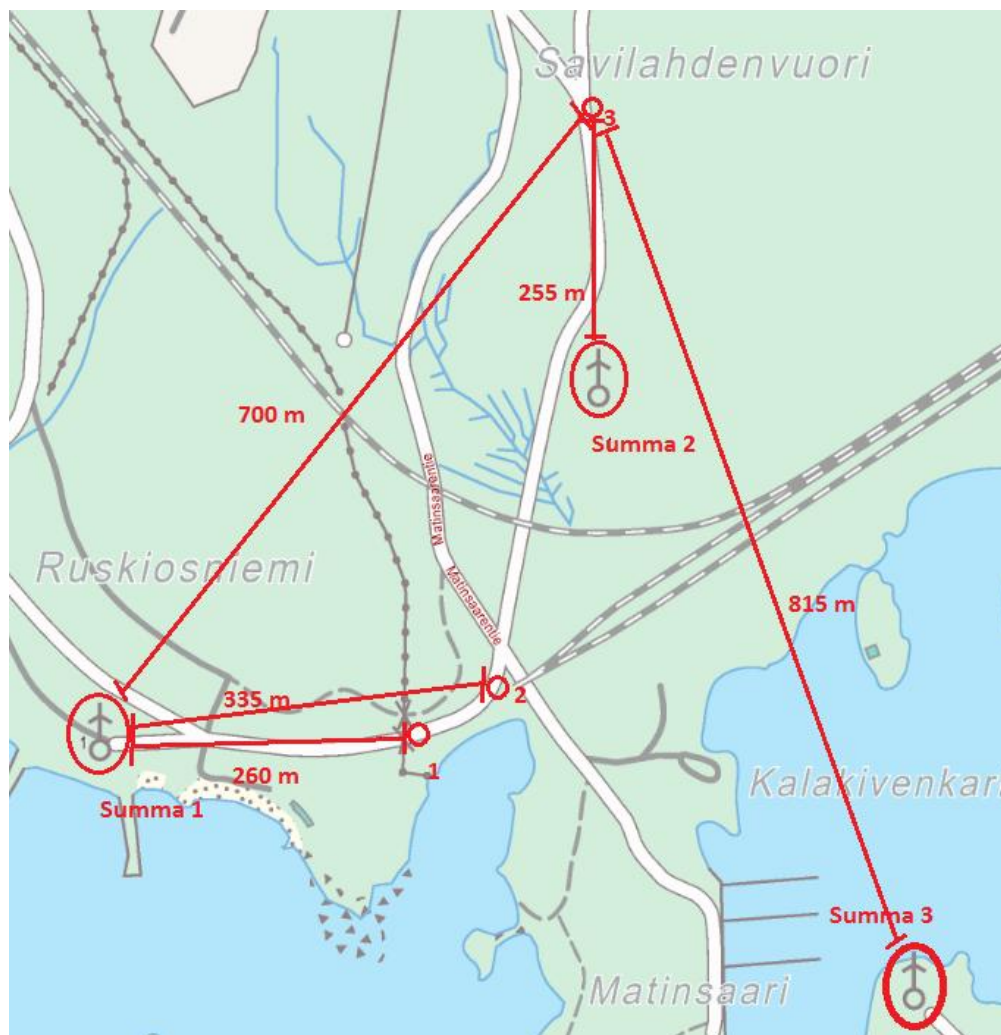


## 2 LÄHTÖTIEDOT JA MENETELMÄT

### 2.1 Summan mittauspisteet

5 eri tuulivoimalaa mitattiin päivän aikana, 2 Summan tuulivoimalaa, 2 Mäkelänkaan tuulivoimalaa ja 1 Mussalon sataman tuulivoimala. Mittauksia tehtiin yhteensä 8 kappaletta.

Summassa mitattiin 3 mittausta, 2 melumittausta ja 1 taustamelumittaus. Summan tuulivoimalat ovat WinWindin valmistamat 3 MW tuulivoimaloita, joiden korkeus on 100 m ja roottorin halkaisija 100 m. Melumittaukset mitattiin tuulivoimalasta Summa 1, joka oli käynnissä mittaushetkellä. Kuvassa 1 näkee mittauspikat kartalla.



Kuva 1. Summan mittauspisteiden ja tuulivoimaloiden sijainnit

Summa 1:n melumittaukset otettiin Mittauspiste 1, joka sijaitsee 260 m voimalasta ja Mittauspiste 2, joka on 335 m voimalasta. IEC 61400-11 standardin mukaan mittaus olisi pitänyt toteuttaa 150 m päästä voimalasta mutta portin takia emme päässeet lähemmäksi. Toisen mittauksen tarkoitus oli katsoa tuulivoimaloiden Summa 1 ja 3 yhteismelupäästö. Mittauspaikasta 1 mitattiin 10 kappaletta 1 minuutin kestävästä mittauksesta. Mittauspaikasta 2 mitattiin 5 kappaletta 1 minuutin kestävästä mittauksesta.

Taustamelumittaus tehtiin Mittauspaikalla 3, 255 m päästä tuulivoimalasta Summa 2. Mittaushetkellä Summa 2 oli pysähtynyt, mikä mahdollisti taustamelumittauksen. Paikalta mitattiin 5 kappaletta 1 minuutin mittauksesta.

Mittauspaikkojen maasto oli metsän ympäröimä hiekkatie, kuva 2 esittää mittauspaikkaa. Kaikki mittaukset suoritettiin tiellä. Maasto ei ollut tasaista.



Kuva 2. Summan mittausympäristö.

## 2.2 Mäkelänkankaan mittauspisteet

Mäkelänkankaalla mitattiin 3 mittausta. Tuulivoimalat ovat Hyundain 2 MW voimaloita, korkeus 100 m ja roottorin halkaisija 93 m. Kuvassa 3 näkee mittauspisteet ja voimaloiden sijainnit. Teimme 10 kappaletta 1 minuutin melumittauksia kummallekin tuulivoimalalle. Kolmannen mittauksen suoritimme Seppälässä 825 m päästä Mäkelänkangas 1 voimalasta. Mittasimme 10 kappaletta 1 minuutin mittausta. Mittauksen tarkoitus oli mitata voimalan mahdollinen melupäästö asuinalueelle. Kaikki tuulivoimalat olivat käynnissä, joten taustamelumittausta ei voinut suorittaa.



Kuva 3. Mäkelänkankaan mittauspisteiden ja tuulivoimaloiden sijainnit.



Mäkelänkankaan tuulivoimalat sijaitsevat tehdasalueella ja siellä löytyy useampia rakennuksia. Rakennukset eivät kuitenkaan ole lähellä mittauspaikkoja tai tuulivoimaloita. Mittauspaikkaa 1 ja 3 ympäröi pelto ja kauempana alkoi metsä, maasto näkyy tarkemmin kuvassa 4. Maasto oli tasaista. Mittauspaikka 2:n lähellä oli työmaa, joka vaikutti mittaukseen. Kaikki mittaukset suoritettiin hiekkatiellä.



Kuva 4. Mäkelänkankaan mittauspisteen ympäristö.

### 2.3 Mussalon sataman mittauspisteet

Mussalon satamassa mittasimme 2 mittausta. Molemmissa mittauksissa otimme 5 kappaletta 1 minuutin mittausta. Kuvassa 5 näkyy mittauspaikkojen sijainnit kartalla. Voimala on Bonus Energyn valmistama 1 MW tuulivoimala, jonka korkeus on 60 m ja roottorin halkaisija 54 m. Tuulivoimala ei pyörinyt mittaushetkellä.



Kuva 5. Mussalon sataman mittauspisteiden ja tuulivoimaloiden sijainnit

Mittauspaikkaa 1 ympäröi metsä ja mittaus suoritettiin hiekkatiellä. Mittauspaikka 2 mitattiin satama-alueella rakennusten luona. Kuvassa 6 näkyy molemmat mittauspaikkojen ympäristöt.



Kuva 6. Mussalon sataman mittauspisteiden ympäristö.

## 2.4 Mittauskalusto

Tuulivoimalan aiheuttamaa melua mitattiin kuvan 7 Rion NL-52 -äänitasomittarilla, joka täyttää IEC 61672-1 standardin luokka 1 vaatimuksen. Mittauksissa käytettiin mittarin mukana tullutta tuulensuojaa. Mittari kalibroitiin ennen ja jälkeen mittausten. Mukana oli myös etäisyysmittari mutta mittari ei antanut luotettavaa tietoa, joten kaikki etäisyydet on laskettu Maamittauslaitoksen karttojen avulla.



Kuva 7. Melumittari Rion NL-52

## 2.5 Sääolosuhteet mittauksen aikana

Mittaukset suoritettiin IEC 61400-11 standardin vaatimissa sääolosuhteissa. Summas-  
sa tehtyjen mittausten aikana, klo 10:45 – 11:15, tuuli puhalsi lounaasta, tuulennopeus  
vaihteli 5,5 – 6,0 m/s välillä. Mittausten ajan lämpötila oli 19,0 – 20,0 °C, ilmanpaine  
1015 hPa ja kosteus 55 - 66 %. Sää tiedot saatiin Haminan Energia Oy:ltä.

Mäkelänkankaan mittausten aikana, klo 11:35 – 12:35, koillistuuli puhalsi tuulennopeudella 5,0 – 6,0 m/s. Lämpötila mittauspaikalla oli 20,0 °C, ilmanpaine 1015 hPa ja kosteus 64 – 67 %. Sää tiedot saatiin Suomen Voima Oy:ltä.

Mussalon satamassa tehdyissä mittauksissa, 14:05 – 14:25 lämpötila oli 21,0 °C, ilmanpaine 1019 hPa ja kosteus 82 %.

Pilvisyys oli 3/8 kaikkien mittausten aikana.

## 2.6 Muita huomioitavia asioita

Mittaukset on pyritty suorittamaan mahdollisimman lähellä IEC 61400-11 standardin suosituksia. Rajallisen mittausajan ja varustepuutteiden takia jouduimme tekemään kompromisseja, jotka ovat voineet vaikuttaa mittaustuloksiin.

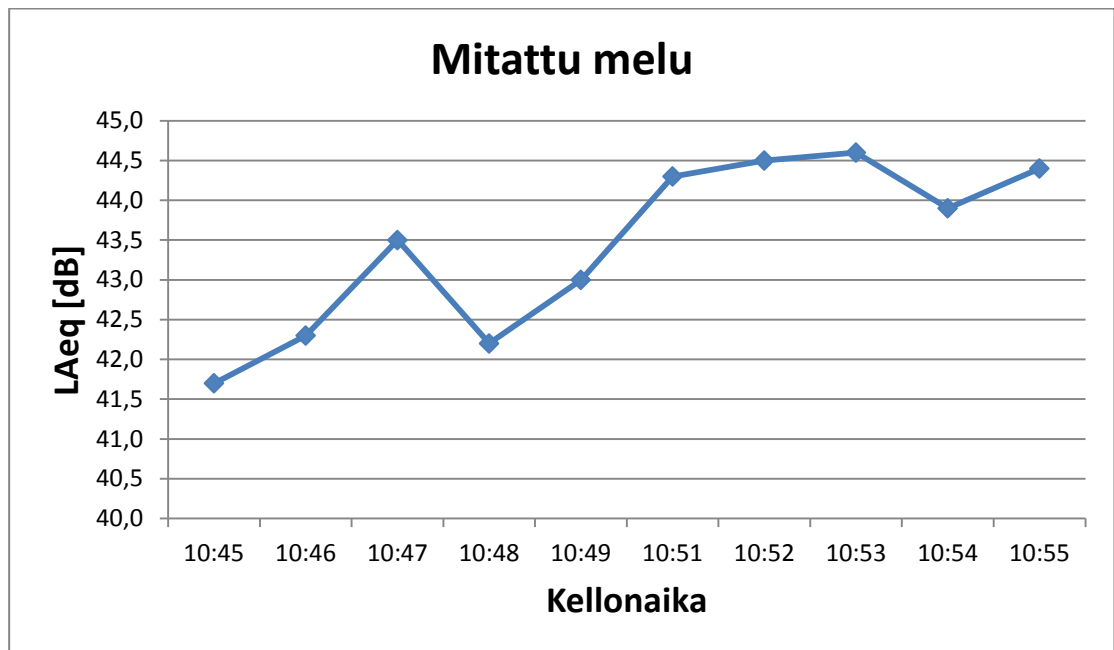
Standardin suosittelema mittausalusta puuttui. Mittauspaikan etäisyyttä ei kyetty paikantaa mittaamaan ja tuulivoimaloiden tiedot saatiin mittausten jälkeen, josta johdetaan että mittaukset tehtiin joko liian lähellä tai kaukana tuulivoimalaa kuin mitä standardi suositteli.

## 3 TULOKSET

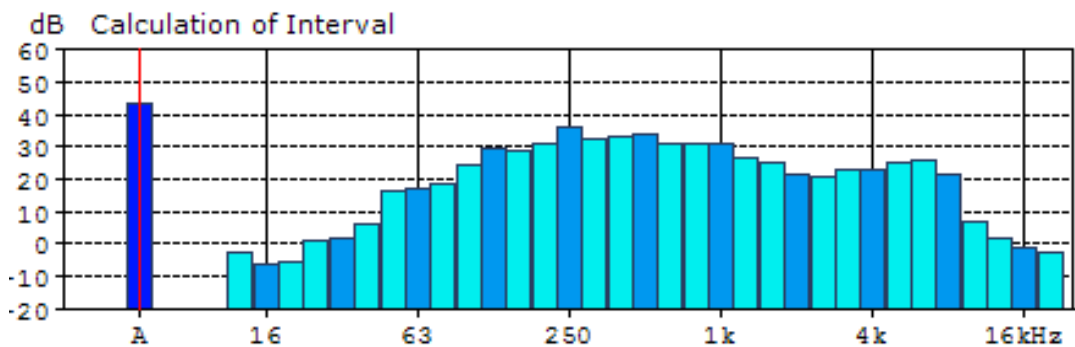
### 3.1 Summan mittausten tulokset

Mittauspaikalta 1 mitattiin melua kello 11:45 – 11:55 välillä. Tuulivoimalasta kuului moottorin huminaa ja satunnaisesti Summa 3:n tuulivoimala kääntyi ja aiheutti lisämelua. Keskimääräinen melu  $L_{Aeq}$  oli 43,4 dB 10 minuutin aikana. Mittauksista on poistettu häiriöt joita ei normaaliolosuhteissa esiinny. Mittaustulokset näkyvät kuvissa 8 ja 9.





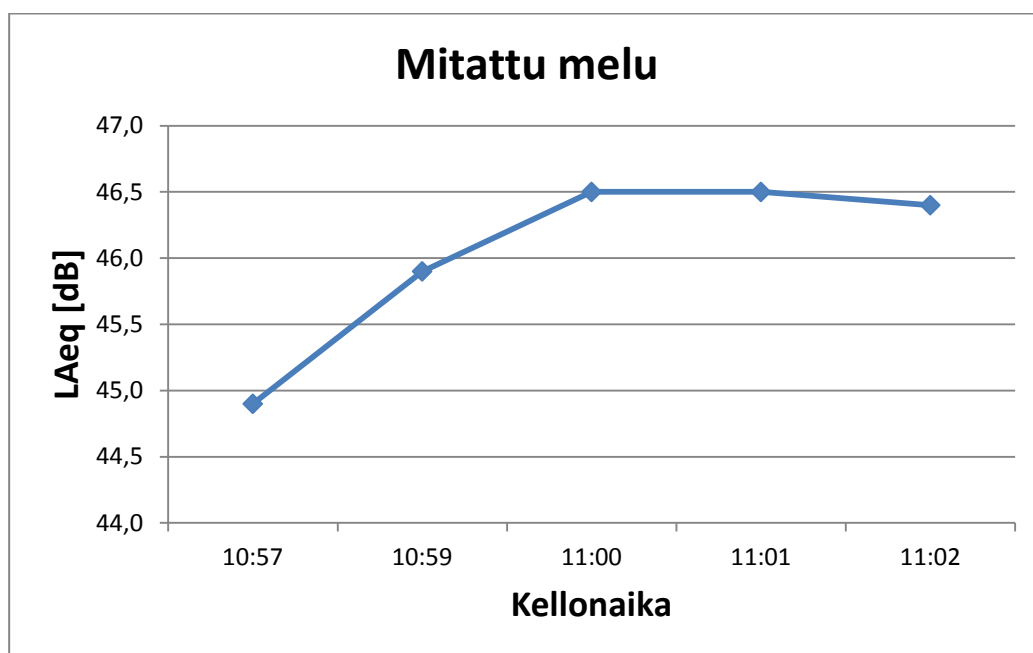
Kuva 8. Summa 1:n mittaustulokset.



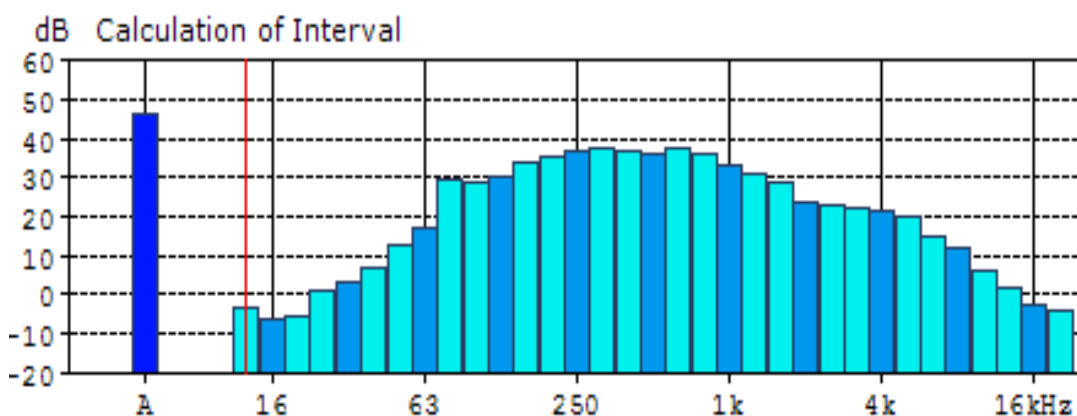
Kuva 9. Summa 1:n taajuusjakauma.

Kello 10:57 – 11:02 välillä mitattiin mittauspaikalta 2 kuuluvaa melua. Maastossa oli vähemmän puita haittaamassa äänen kulkua ja siksi päätimme mitata Summa 1:n ja 3:n aiheuttama yhteismelu. Keskimääräinen melu  $L_{Aeq}$  oli 46,0 dB 5 minuutin aikana. Mittauksista on poistettu häiriöt, joita ei normaaliolosuhteissa esiinny. Kuvissa 10 ja 11 näkyvät mittaustulokset.



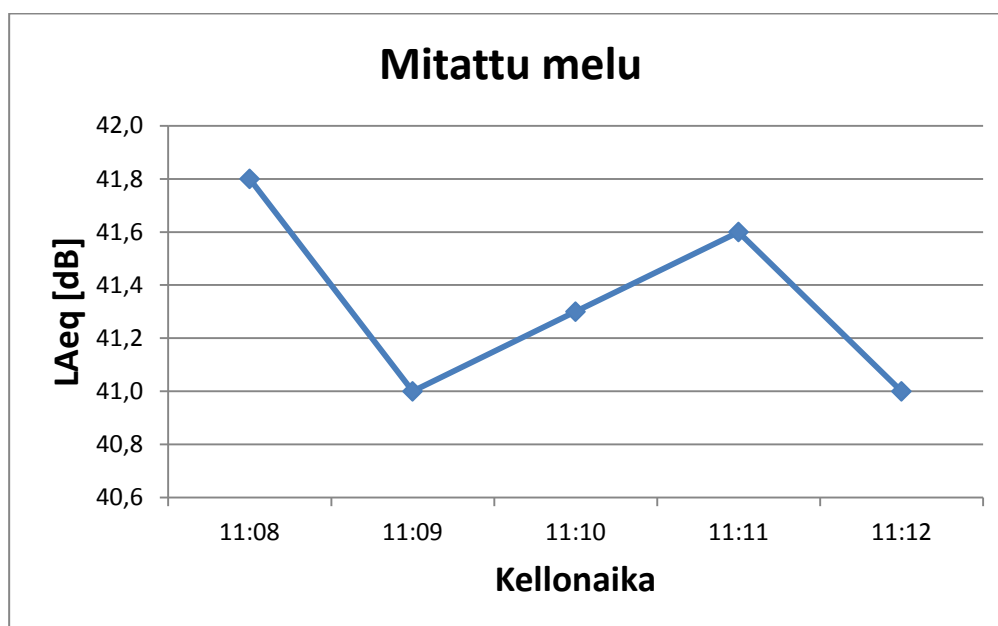


Kuva 10. Summa 2:n mittaustulokset

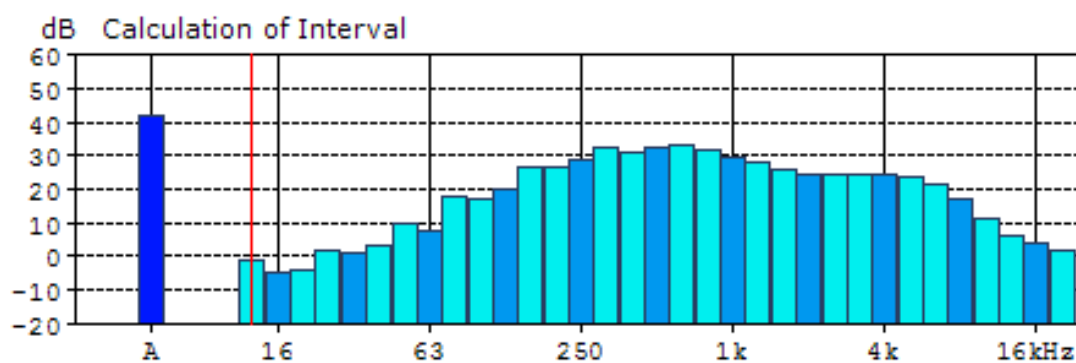


Kuva 11. Summa 2:n taajuusjakauma.

Mittauspaikalla 3 mitattiin taustamelumittaus kello 11:08 – 11:13. Summa 2 oli pysäytetty ja muita melun lähteitä ei ollut häiritsemässä mittausta. Keskimääräinen melu  $L_{Aeq}$  oli 41,3 dB. Mittauksista on poistettu häiriöt, joita ei normaaliolosuhteissa esiinny. Kuvissa 12 ja 13 näkyvät mittaustulokset.



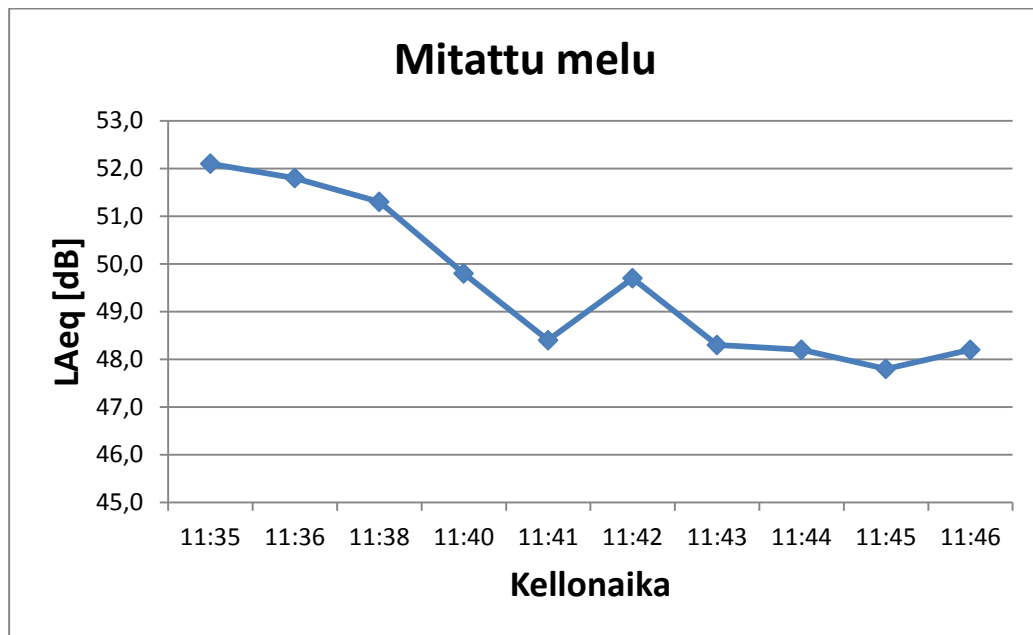
Kuva 12. Summa 3:n mittaustulokset



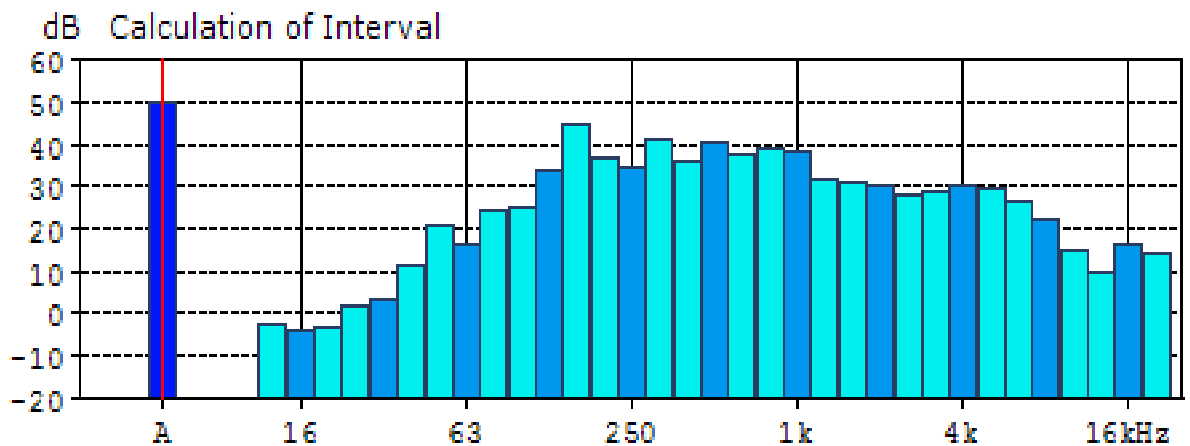
Kuva 13. Summa 3:n taajuusjakauma.

### 3.2 Mäkelänkankaan mittausten tulokset

Mittauspaikalla 1 tehtiin melumittaus klo 11:35 – 11:47 välillä. Tuulivoimalan ja ympäröivän tehdasalueen lisäksi muita melulähteitä ei ollut. Tuulivoimalasta kuului selvästi melua. Keskimääräinen melu oli  $L_{Aeq}$  49,6 dB. Mittauksista on poistettu häiriöt, joita ei normaaliolosuhteissa esiinny. Kuvissa 14 ja 15 näkyvät mittaustulokset.

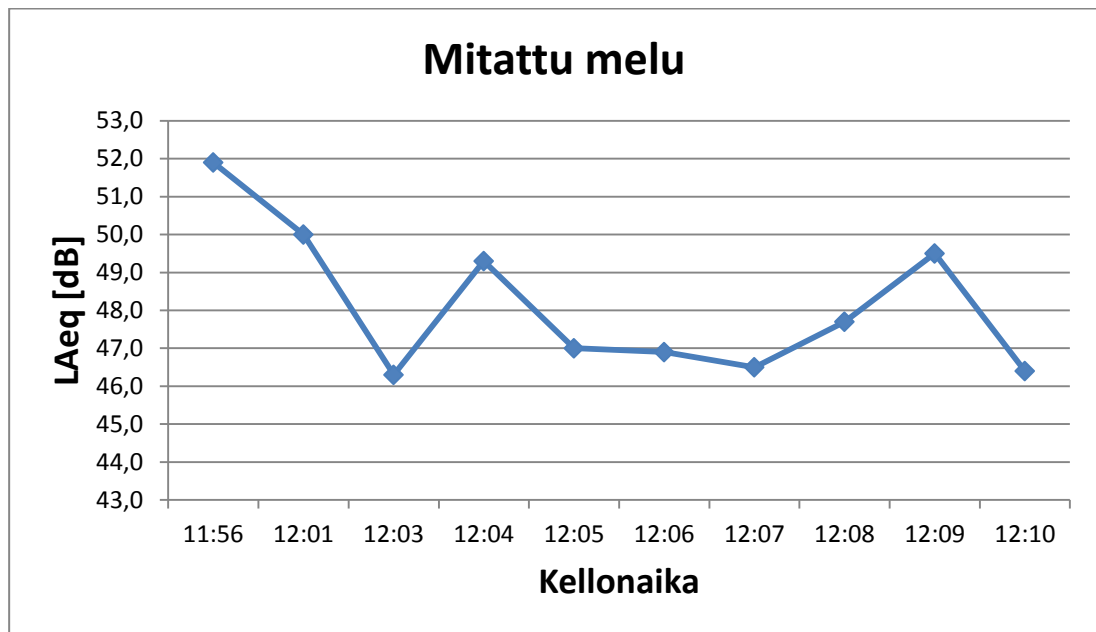


Kuva 14. Mäkelänkangas 1:n mittaustulokset

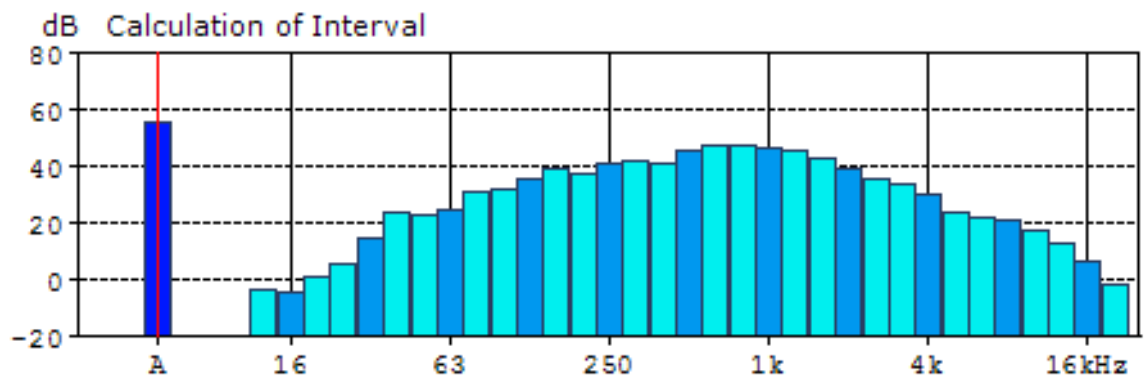


Kuva 15. Mäkelänkangas 1:n taajuusjakauma.

Mittauspaikalla 2 tehtiin melumittaus klo 11:56 – 12:10 välillä. Mäkelänkangas 2:n vieressä oli mittaushetkellä työmaa, joka häiritsi mittausa. Keskimääräinen melu oli  $L_{Aeq}$  48,2 dB. Mittauksista on poistettu pahimmat häiriöt, kuten kaivurien aiheuttamaa melu, mutta kaikkea työmaan aiheuttamaa melua ei pystytty poistamaan. Kuvissa 16 ja 17 näkyvät mittaustulokset.

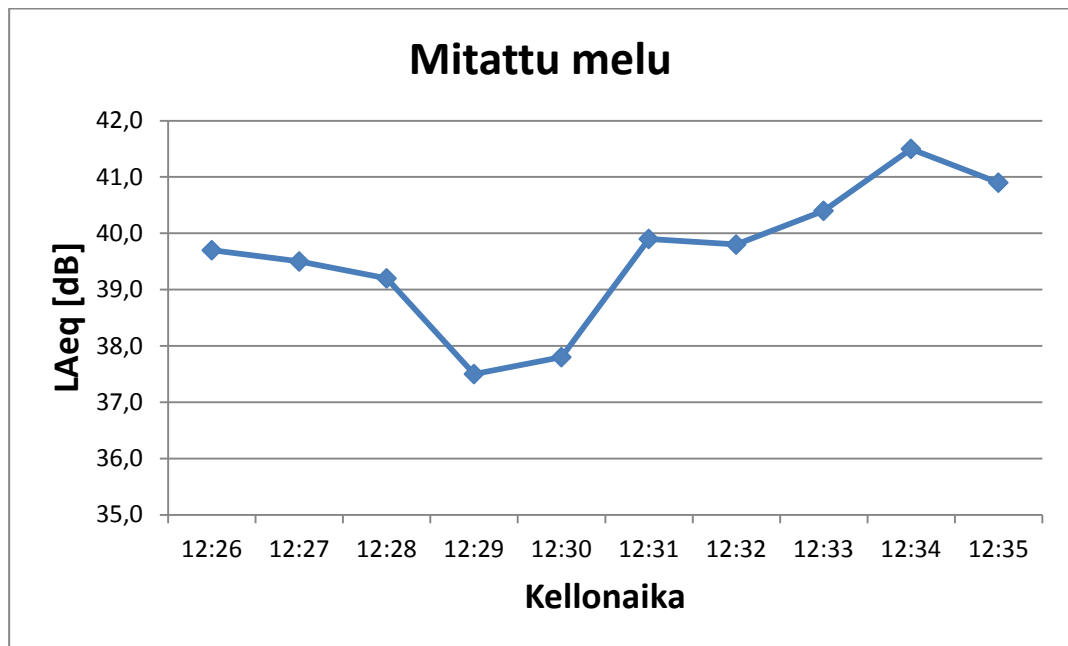


Kuva 16. Mäkelänkangas 2:n mittau tulokset

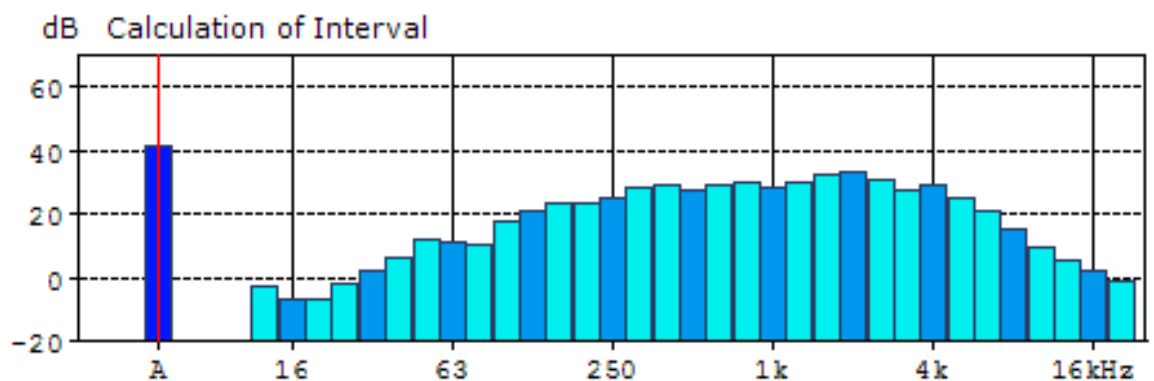


Kuva 17. Mäkelänkangas 2:n taajuusjakauma.

Mittauspaikalla 3 tehtiin melumittaus klo 12:26 – 12:36 välillä. Keskimääräinen melu oli  $L_{Aeq}$  39,6 dB. Mäkelänkangas 1:stä ei kuulunut mittauspaikalta. Tehdasalueen ja sataman aiheuttama taustamelu kuului mittauspaikalle. Mittauksista on poistettu pahimmat häiriöt, mutta teollisuuden aiheuttama ääni jäi. Kuvissa 18 ja 19 näkyvät mitau tulokset.



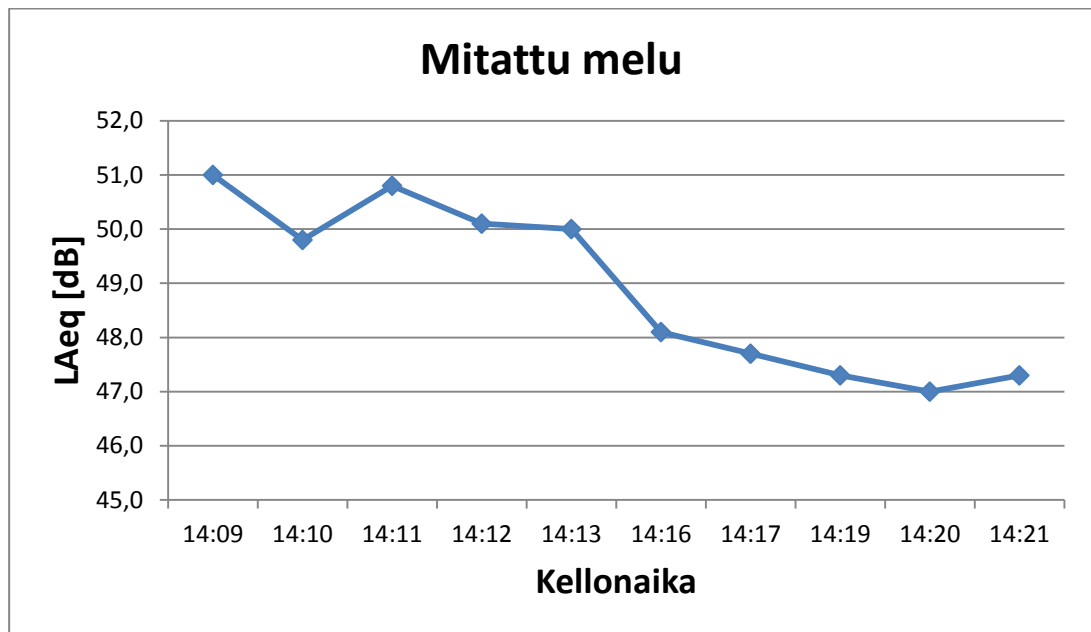
Kuva 18. Mäkelänkangas 3:n mittaustulokset



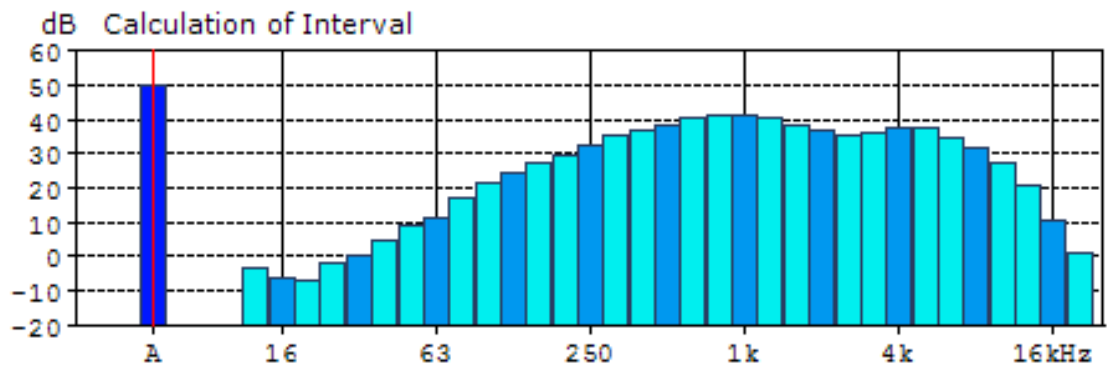
Kuva 19. Mäkelänkangas 3:n taajuusjakauma.

### 3.3 Mussalon sataman mittauksen tulokset

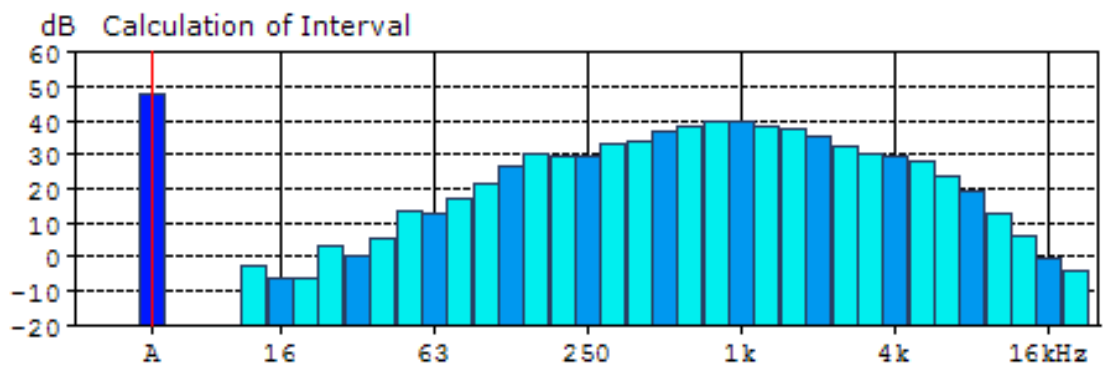
Mittauspaikalla 1 tehtiin taustamelumittaus klo 14:09 – 14:14 välillä. Keskimääräinen melu oli  $L_{Aeq}$  50,3 dB. Melu on pääosin tuulen ja metsän aiheuttamaa melua. Mittauksista on poistettu pahimmat häiriöt. Mittauspaikalla 3 tehtiin taustamelumittaus klo 14:16 – 14:21 välillä. Keskimääräinen melu oli  $L_{Aeq}$  47,5 dB. Mittauksista on poistettu pahimmat häiriöt. Kuvissa 20, 21 ja 22 näkyvät mittaustulokset.



Kuva 20. Mussalo 1 ja 2 mittaukselokset



Kuva 21. Mussalo 1:n taajuusjakauma.



Kuva 22. Mussalo 2:n taajuusjakauma.

#### 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Summan alueella tehdyissä mittauksissa tuulivoimalat kuuluivat selvästi mittauspai-koilla 1 ja 2. Mittauspaikalla 3 ei kuulunut pyörivien tuulivoimaloiden melua. Paikalla tehdyssä taustamelumittauksessa havaittiin hyvin pieni ero, alle 3 dB, voimalan ja taustamelun välillä. Tällä perusteella voi todeta, että Summan tuulivoimaloiden melupäästöt ovat pieniä.

Mäkelänkankaalla tehdyissä mittauksissa oli selvästi havaittavissa eroa pohjoisen ja etelän tuulivoimaloiden välillä. Mittaustulokset eivät sitä näytä, syynä Mäkelänkangas 2:n vieressä oleva työmaa joka vaikutti mittaukseen. Mittaus pitäisi uusia hiljaisempana aikana. Koska taustamelumittausta ei kyetty tekemään, tarkkaa tuulivoimaloiden melupäästöä ei saada. Seppälässä tehty mittauksessa ei ollut havaittavissa Mäkelänkangas 1:n aiheuttamaa melua syynä tehdasalueen taustamelu, joka kuului selvästi mittauksen aikana.

Koska Mussalossa ei tuulivoimala pyörinyt mittaushetkellä, ei sen mahdollisista melupäästöistä voi tehdä minkäänlaisia päätelmiä. Kovan tuulen takia taustamelu oli kuitenkin korkeampi kuin Summan ja Mäkelänkankaan voimaloiden aiheuttamat melupäästöt.