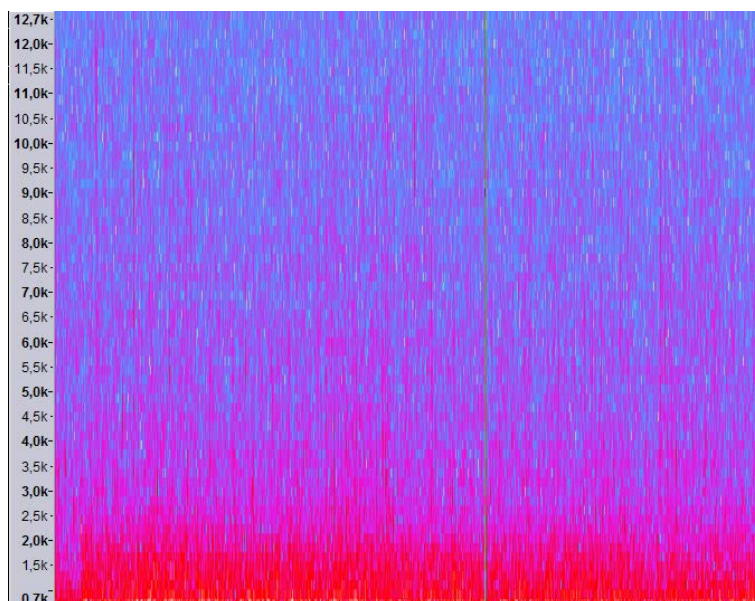




# TUULIVOIMALAN MELUVAIKUTUKSET: Häiritsevyydsmittaristo ja sen käyttö

Kirjoittajat: Hannu Nykänen, Seppo Uosukainen, Marko Antila, Denis Siponen

Luottamuksellisuus: Julkinen

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                   |                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Raportin nimi</b><br>Tuulivoimalan meluvaikutukset: Häiritsevyysmittaristo ja sen käyttö                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                   |                                          |
| <b>Projektin nimi</b><br>Tuulivoimalan meluvaikutukset                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Projektin numero/lyhytnimi</b><br>87503/TUMEVA |                                          |
| <b>Tiivistelmä</b><br><p>Tässä raportissa on määritetty tuulivoimalan äänen erityispiirteiden mittaristoa ja sen käyttöä, mukaan lukien mahdolliset sanktiot. Olemme ottaneet huomioon kolme erityispiirrettä (impulssimaisuus, tonaalisuus ja sykintä), määritelleet kullekin laskentamenetelmän, laskeneet erilliset sanktiot ja yhdistäneet sanktiot tietyllä tavalla (ei suoraan yhteenlaskemalla). Lisäksi on määritetty olosuhteet mittauksia ja tallennuksia varten, sekä kuvattu mahdollisuus mitata, tallentaa ja ennakoida pienitaajuisia melua rakennuksen ulkopuolella.</p> <p>Olemme myös pyrkineet yksinkertaistamaan menettelyä mahdollisimman paljon, esimerkiksi määrittelemällä samanlaiset tai -kaltaiset tallennus- ja laskentajaksot signaaleille. Koska sykkinnän sanktion laskenta on ainoa, jolle ei ole valmista menetelmää tai standardia olemme pyrkineet määrittelemään käyttämämme menetelmän mahdollisimman yksityiskohtaisesti.</p> |                                                   |                                          |
| Tampere 30.9.2014                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                   |                                          |
| <b>Laatija</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Tarkastaja</b>                                 | <b>Hyväksyjä</b>                         |
| Hannu Nykänen,<br>johtava tutkija                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Lasse Lamula<br>erikoistutkija                    | Johannes Hyrynen,<br>teknologiapäällikkö |
| <b>VTT:n yhteystiedot</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                                          |
| <b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b><br>Ympäristöministeriö, Ari Saarinen, 1 kpl<br>Suomen tuulivoimayhdistys ry, Anni Mikkonen, 1 kpl<br>Energiateollisuus, ympäristöpooli, Heidi Lettojärvi, 1 kpl<br>Työ- ja elinkeinoministeriö, Anja Liukko 1 kpl<br>Työterveyslaitos, Valtteri Hongisto, 1 kpl<br>Vaasan yliopisto, Petri Välisuo, 1 kpl<br>Yrkeshögskolan Novia, Kristian Blomqvist, 1 kpl<br>VTT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                   |                                          |
| VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                   |                                          |

## Sisällysluettelo

---

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sisällysluettelo .....                                                               | 2  |
| 1. Johdanto .....                                                                    | 3  |
| 2. Häiritsevyysmittariston taustaa .....                                             | 3  |
| 2.1 Yleistä .....                                                                    | 3  |
| 2.2 Määritelmiä .....                                                                | 4  |
| 2.3 Yleiset ohjeet melumittausten ja äänitallennusten olosuhteista .....             | 5  |
| 2.3.1 Yleistä .....                                                                  | 5  |
| 2.3.2 Tuuli- ja sääolosuhteet melumittausten ja äänitallennusten aikana .....        | 5  |
| 2.3.3 Täsmennykset ääninäytteiden tallennusolosuhteisiin .....                       | 6  |
| 3. Tuulivoimalan tuottaman äänen erityispiirteet .....                               | 7  |
| 3.1 Tuulivoimalan melun impulssimaisuus .....                                        | 7  |
| 3.1.1 Impulssimaisuuden merkittävyys ja sanktio .....                                | 7  |
| 3.1.2 Impulssimaisen melun merkittävyyden ja sanktion suuruuden määrittäminen .....  | 7  |
| 3.2 Tuulivoimalan melun kapeakaistaisuus (tonaalisuus) .....                         | 9  |
| 3.2.1 Kapeakaistaisuuden merkittävyys ja sanktio .....                               | 9  |
| 3.2.2 Kapeakaistaisen melun merkittävyyden ja sanktion suuruuden määrittäminen ..... | 9  |
| 3.3 Tuulivoimalan melun merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio) .....         | 11 |
| 3.3.1 Merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio) ja sanktio .....                | 11 |
| 3.3.2 Amplitudimodulaation määritelmä .....                                          | 12 |
| 3.3.3 Tallenteiden teko ja niiden arviointi .....                                    | 14 |
| 3.3.4 Merkityksellisen sykinän asteen ja sanktion suuruuden määrittäminen .....      | 14 |
| 3.4 Sanktioiden yhteisvaikutuksen huomioiminen .....                                 | 16 |
| 4. Tuulivoimalan pienitaajuinen melu .....                                           | 17 |
| 5. Johtopäätökset ja yhteenveto .....                                                | 19 |
| Liitteet /Lähdeviitteet .....                                                        | 19 |

## 1. Johdanto

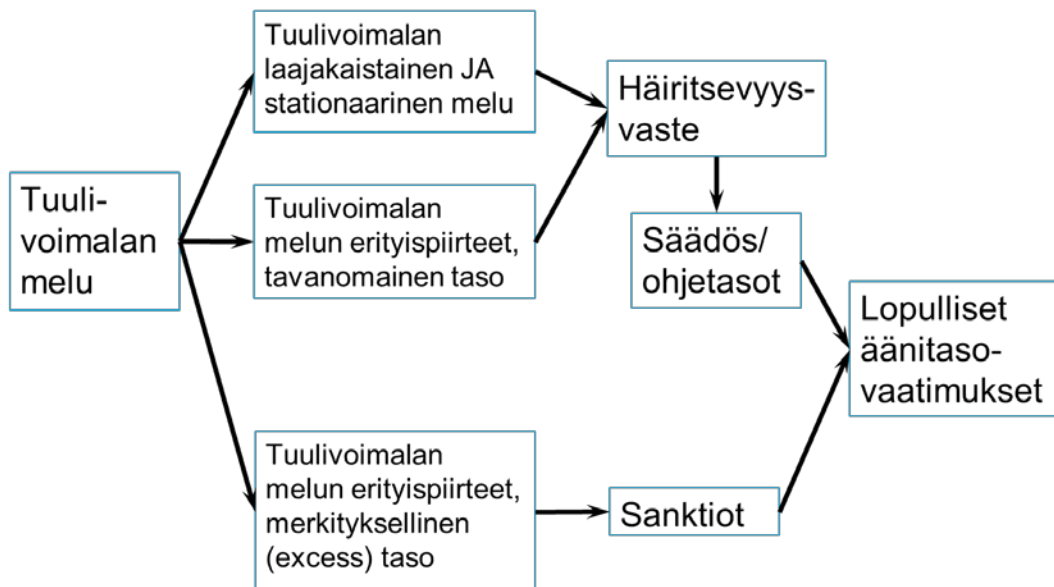
Tuulivoimalan meluvaikutukset projektin päätavoitteena oli selkeyttää tuulivoima-alan tilannetta äänen suhteen. Projektin puitteissa Työterveyslaitos (TTL) laati kirjallisuusselvityksen tuulivoimaloiden terveys- ja muista vaikutuksista elin- ja asuinympäristössä. Teknologian tutkimuskeskus (VTT) laati puolestaan yhteistyössä Vaasan Energiainstituutin (VEI) kanssa tuulivoimaloiden meluun liittyvän häiritsevyyssmittariston ja arvioi tuulivoimaloiden häiritsevyyttä kuunneltavien mallien avulla.

Tässä raportissa kuvataan ehdotettu häiritsevyyssmittaristo ja sen käyttöä tuulivoimaloiden melun häiritsevyyden arviointiin.

## 2. Häiritsevyyssmittariston taustaa

### 2.1 Yleistä

Tuulivoimalat tuottavat ääntä, joka voidaan kokea häiritseväksi meluksi ja asuinympäristön viihtyisyyttä vähentäväksi tekijäksi. Tuulivoimaloiden äänessä on tiettyjä erityispiirteitä, joiden perusteella ympäristöministeriö on antanut melutasen ohjeavrot tuulivoimaloiden suunnitteluun (Ympäristöministeriö, 2012). Tietyissä sääolosuhteissa erityispiirteet voivat korostua tuulivoimalan melulle altistuvassa kohteessa, ja melu koetaan poikkeuksellisen häiritseväksi. Tuulivoimalan melun häiritsevien erityispiirteiden todetaan tällöin saavuttavan merkityksellisen (excess) tason, ja altistuvan kohteen mitattuun melutasoon edellytetään lisättäväksi sanktio (Kuva 1).



Kuva 1. Periaatekuva tuulivoimalan tuottaman melun suhteesta äänitasovaatimukseen.

TUMEVA-tutkimushankkeen puitteissa on laadittu ehdotus mittaristoksi tuulivoimaloiden tuottaman melun häiritsevyyden arviointiin. Mittariston avulla voidaan arvioida ja ottaa huomioon sanktiomenettelyllä tuulivoimaloiden melun häiritsevyyttä (mahdollisesti) lisäävät seuraavat erityispiirteet altistuvassa kohteessa:

- tuulivoimalan melun impulssimaisuus
- tuulivoimalan melun kapeakaistaisuus (tonaalisuus)
- tuulivoimalan melun merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio).

Ehdotuksessa on lisäksi tarkasteltu pienitaajuisten melun huomioonottamista melumallinnuksessa ja pienitaajuisten melun altistuvassa kohteessa tapahtuvaan mittaamiseen liittyviä erityispiirteitä.

Kutakin erityispiirrettä tarkastellaan erikseen kaikkia erityispiirteitä koskevan yhteisen, mittauksia ja äänitallenteita koskevan osuuden jälkeen.

On myös huomattava, että säätöperiaatteeltaan erilaiset tuulivoimalat käyttäytyvät eri tavoin melupäästön suhteen. Vanhemmat tuulivoimalat, joiden pyörimisnopeus perustuu sakkaussäätöön tai aktiiviseen sakkaussäätöön, tuottavat huomattavasti suuremman melupäästön tuulen nopeuden kasvaessa navan korkeudella kuin modernit lapakulmasäätöiset voimalat. Lapakulmasäätöisten voimaloiden melupäästö (ääniteho) ei lisäännä olennaisesti tuulen nopeuden noustessa arvosta 8 m/s arvoon 10 m/s, mutta voi lisääntyä sakkaussäätöisillä voimaloilla 3 dB(A) - 8 dB(A) säätöperiaatteesta riippuen. (Søndergaard, 2014)

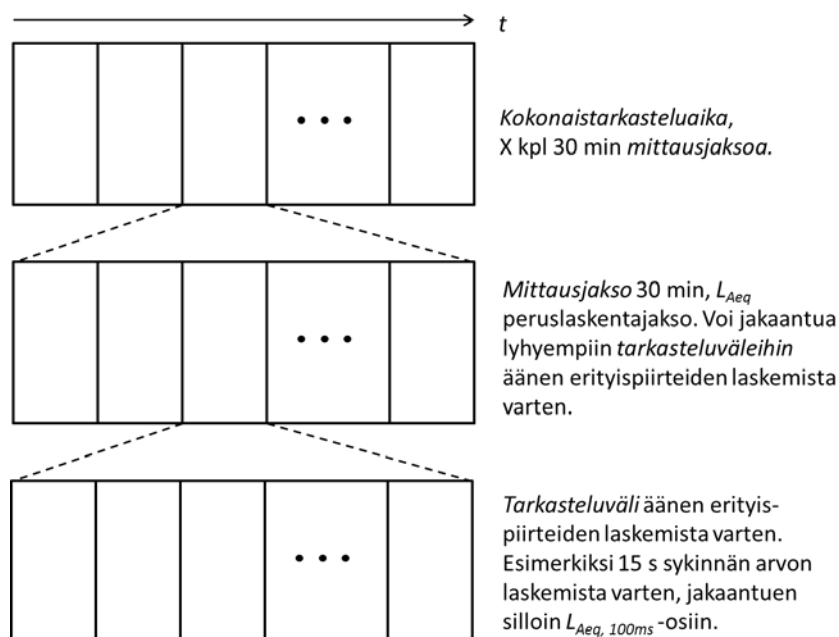
## 2.2 Määritelmiä

**Kokonaistarkastelu-aika:** Aikaväli, joka koostuu useasta mittausjaksosta. Päiväaikainen kokonaistarkastelu-aika on klo 07 - 22 (15 tuntia) ja yöaikainen kokonaistarkastelu-aika klo 22 - 07 (9 tuntia).

**Mittausjakso:** yhden mittaus- ja laskenta-ajan kesto, tyypillisesti 30 minuuttia.

**Tarkasteluväli:** Mittausjakson tarkoituksenmukainen osa. Esimerkiksi sykintää arvioitaessa tarkasteluväli vastaa tyypillistä moduloitua aikajaksoa, ja on 15 s. Jos yhden mittausjakson aika on 30 min, tarkasteluvälejä on 120 kpl.

**Sanktio:** Arvo, joka lisätään tarkasteltavan melun 30 minuutin mittausjakson  $L_{Aeq}$ -tasoon äänen erityispiirteiden takia verrattaessa sitä päivä- tai yöaikaisen kokonaistarkasteluajan ohjearvoon.



Kuva 2. Mittaus- ja tallennusaikojen termistöä ja määritelmiä.

## 2.3 Yleiset ohjeet melumittausten ja äänitallennusten olosuhteista

### 2.3.1 Yleistä

Tuulivoimalan melun häiritsevyyteen altistuvassa kohteessa vaikuttavat sääolosuhteet, ja ennen kaikkea:

- tuulen nopeus tuuliturbiinin napakorkeudella
- tuulen suunta tuulivoimalan (tai tuulivoima-alueen kyseessä ollessa lähimmän tuuliturbiinin) ja altistuvan kohteen suhteen
- alailmakehän stabiilisuustilanne

Kun melumittauksia ja -analyyskejä tehdään altistuvassa kohteessa, mittausten tavoitteena voi olla kaksi eri asiaa (Ympäristöministeriö, 2014, s. 19 - 20):

1. Melutaso mitataan altistuvassa kohteessa, kun tarkoituksena on verrata mittaustuloksia mallinnuksen tulokseen. Perusajatus on tällöin se, että mittaaminen tehdään mallinnusta vastaavissa tuuli- ja sääolosuhteissa eli myötätuulen suunnassa ja päiväaikaan neutraalissa tai yöaikaan neutraalissa tai hieman stabiilissa alailmakehän olosuhteissa. Keskeisenä vaatimuksena on tällöin alailmakehän vertikaalinen lämpötilagradientti ( $- 0,05 \text{ °C/m} \dots + 0,05 \text{ °C/m}$ ) enintään 10 m korkeudelta mitattuna (käytännössä lämpötilan mittauspisteet, joista lämpötilagradientti lasketaan ovat 1,5 m - 2 m ja 10 m korkeudella) (Ljunggren, 1998). Lämpötilagradienttivaatimus täyttyy yleensä, jos mittaus tehdään myöhäisiltana, yöaikaan tai aikaisin aamulla (tunti ennen auringonlaskua - tunti auringonnousun jälkeen) tai päiväaikaan (tunti auringonnousun jälkeen - tunti ennen auringonlaskua). Päiväaikaan tehtävässä mittauksessa pilvisyyden on oltava vähintään 4/8 eli sään on oltava vähintään puolipilvinen.
2. Muissa kuin vertailutapauksissa melutason mittaaminen tehdään niissä sääolosuhteissa, joissa melun aiheuttama häiriö on havaittavissa melulle altistuvassa kohteessa. Pääsääntöisesti mittaus on tällöin tehtävä myöhäisiltana, yöaikaan tai aikaisin aamulla. (Maijala, 2014) Lämpötilagradienttivaatimus alailmakehässä on tällöin  $> 0,05 \text{ °C/m}$ , tuulen nopeus ei saa ylittää alailmakehässä arvoa 3 m/s, eikä tuulen suunta vaihdella enempää kuin  $5^\circ$  (ARL - Air Resources Laboratory, 2009).

Tämän raportin menetelmäkehityksessä tarkastellaan vain tapausta 2, jolloin sääolosuhdevaatimus asettuu siten, että ko. sääolosuhteissa tuulivoimala tai tuulivoima-alue tuottaa erityisen häiritsevää melua altistuvaan kohteeseen. Luvun 2.3.3 tuuli- ja sääolosuhdevaatimuksissa nämä erityistä häiritsevyyttä todennäköisimmin tuottavat olosuhteet on otettu huomioon.

Mikäli epäillään, että sääolosuhde ei edusta häiritsevintä melutilannetta (myötätuuli, lämpötilainversio), on lämpötilagradientin lisäksi tarkasteltava tuulennopeusgradienttia samoilla korkeuksilla, joilla lämpötilagradientti mitataan ja määritettävä näistä arvoista äänennopeusgradientti. Lisäksi on tarkasteltava maanpinnan karheuden vaikutus äänennopeusgradienttiin, jotta sää- ja ympäristöolosuhde voidaan todeta vaatimuksen mukaiseksi.

### 2.3.2 Tuuli- ja sääolosuhteet melumittausten ja äänitallennusten aikana

Kun melumittauksia ja äänitallennuksia tehdään altistuvassa kohteessa mahdollisesti esiintyvien erityistä häiritsevyyttä aiheuttavien tekijöiden selvittämiseksi, tuuli- ja sääolosuhteet tulisi valita ympäristöhallinnon ohjeita (Ympäristöministeriö, 2014) noudattaen seuraavasti:

Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2014 (Ympäristöministeriö, 2014, s. 11 ja 19) mukaan:

- **Tuulen nopeuden tavoitearvo** vastaa mittauksessa sitä tuulivoimalan napakorkeudella vallitsevaa tuulen nopeutta, joka tuottaa tuulivoimalan nimellisteholla enimmäismelupäästön.
- **Tuulen suunta** lähimmästä tuulivoimalasta mittauspisteeseen (melulle altistuva alue) päin tulee olla  $\pm 45^\circ$ . Mittausten aikainen tuulen suunta valitaan siten, että mahdollisimman moni tuulivoima-alueen tuulivoimaloista on kulman  $\pm 45^\circ$  sisäpuolella.
- Perustelluista syistä mittauksia voidaan tehdä myös muissa tuulen suunnissa. Lisämittaukset tulisi tehdä melulle altistuvassa kohteessa siinä tullen suunnassa, jossa melun häiritsevyys on todettu merkittäväksi.
- **Tuulivoimalan melun häiritsevyyttä lisäävä pienitaajuinen merkityksellinen sykintä** ("jyminä-tyyppinen" amplitudimodulaatio) esiintyy yleensä myötätuulen puolella tuulivoimalasta. "Suhina-tyyppinen" amplitudimodulaatio esiintyy yleensä voimakkaimmin  $90^\circ$  myötätuulen suunnasta. Useiden tuulivoimaloiden synkroninen pyöriminen voi aiheuttaa merkityksellistä sykintää myös muissa suunnissa.

### 2.3.3 Täsmennykset ääninäytteiden tallennusolosuhteisiin

Käytännössä erityisesti ääninäytteiden tallennusolosuhteita joudutaan rajaamaan, kun ääninäytteitä tallennetaan erityistä häiritsevyyttä aiheuttavien tekijöiden (melun mahdollinen impulssimaisuus, kapeakaistaisuus, merkityksellinen sykintä, pienitaajuiset komponentit) arviointeja varten. Näitä arviointeja varten mittaus- ja tallennuspisteet sekä mittaus- ja tallennusolosuhteet tulisi valita seuraavin täsmennyksin:

- **Tuulen nopeuden** arvo vastaa häiritsevyysanalyysissä sitä tuulivoimalan napakorkeudella vallitsevaa tuulen nopeutta, joka tuottaa tuulivoimalan nimellisteholla enimmäismelupäästön. Analyysiin otetaan mukaan tuulen nopeuden arvot, jotka ovat  $\pm 2$  m/s tavoitearvon ylä- ja alapuolella, yhtä monta tavoitearvon ylä- ja alapuolelta.
- **Tuulen suunta** lähimmästä tuulivoimalasta äänitallennuspisteeseen (melulle altistuva alue) päin tulee olla  $\pm 45^\circ$ . Äänitallennusten aikainen tuulen suunta valitaan siten, että mahdollisimman moni tuulivoima-alueen tuulivoimaloista on kulman  $\pm 45^\circ$  sisäpuolella.
- **Sääolosuhdevaatimus** täyttyy useimmin kun mittaukset ja äänitallennukset tehdään myöhäisiltana, yöaikaan tai aikaisin aamulla (tunti ennen auringonlaskua - tunti auringonnousun jälkeen). Yöaikaan sääolosuhde on todennäköisimmin lähes stabiili - hyvin stabiili (pystysuuntainen lämpötilagradientti on tällöin positiivinen ja  $> 0,05^\circ\text{C/m}$ ), jolloin tuulivoimalan häiritsevin melukomponentti, pienitaajuinen amplitudimodulaatio syntyy todennäköisimmin ja etenee lämpötilainversion takia pisimmälle. Tuulen nopeus 1,5 m - 2 m korkeudella tulee olla pienempi kuin 3 m/s, eikä tuulen suunta saa vaihdella enempää kuin  $5^\circ$ . Tuulen nopeus- ja suuntavaihtelurajoitukset yhdessä yöaikaisen tallennuksen kanssa takaavat ilmakehän stabiilisuusvaatimuksen täyttymisen noin 80 %:n todennäköisyydellä (ARL - Air Resources Laboratory, 2009).
- **Merkityksellisen sykinän (amplitudimodulaation)** häiritsevyyden arvioimiseksi äänitallennuksia tulee tarvittaessa tehdä myös muissa tuulen suunnissa. Lisätallennukset tehdään melulle altistuvassa kohteessa siinä tuulen suunnassa, jossa melun häiritsevyys on todettu merkittäväksi.

### 3. Tuulivoimalan tuottaman äänen erityispiirteet

---

#### 3.1 Tuulivoimalan melun impulssimaisuus

##### 3.1.1 Impulssimaisuuden merkittävyys ja sanktio

Tuulivoimalan tuottama melu voi poikkeustapauksissa olla impulssimaista tai ainakin kuulostaa impulssimaiselta. Esimerkiksi van den Berg (2004) on joissain aikaisimmissa tutkimuksissaan ja myöhemmin Tonin (2012) pitänyt yöaikana esiintyvää ”thumping” tyyppistä tuulivoimalan melua impulssimaisena.

Kun äänitallennuksia tehdään altistuvassa kohteessa mahdollisesti esiintyvän melun impulssimaisuuden ja sen merkittävyyden arviointia varten, tallennukset tulisi arvioida ympäristöhallinnon ohjeita (Ympäristöministeriö, 2014, s. 24) noudattaen.

Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2014 (Ympäristöministeriö, 2014, s. 25) mukaan:

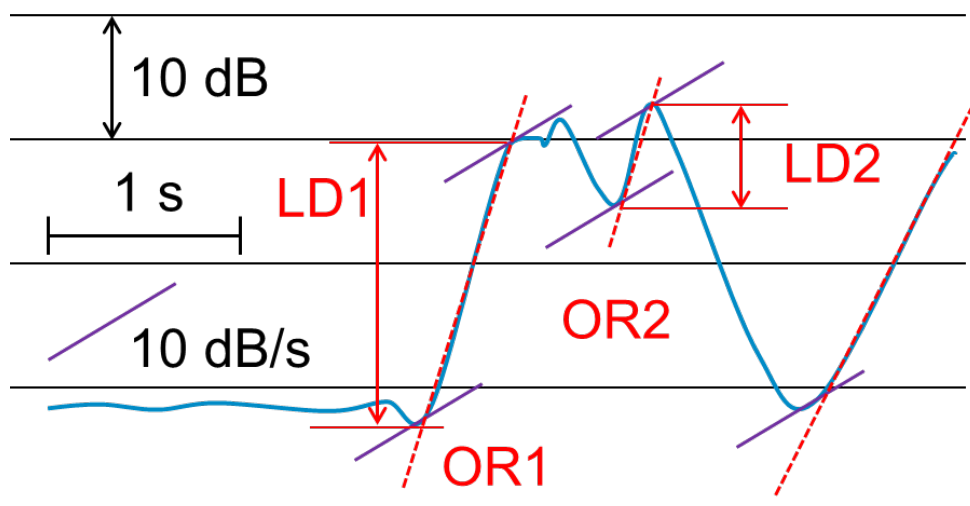
- **Melun impulssimaisuus ja merkittävyys** määritetään Nordtest-menetelmän NT ACOU 112 (Nordtest, 2002) mukaisesti. Melu on impulssimaista, jos arvioitu korjaus  $K_i$  on suurempi kuin 3 dB.
- Melun ollessa impulssimaista mittaustulokseen kohdistetaan sanktio. Tulokseen lisätään säädöksessä määritetty lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon.

NT ACOU 112 määrittelee liukuvan sanktion impulssimaisuuden merkittävyyden mukaan ja tämän mukainen liukuva sanktiomenettely tulisi ottaa käyttöön myös Suomessa.

##### 3.1.2 Impulssimaisen melun merkittävyyden ja sanktion suuruuden määrittäminen

###### Impulssin nousunopeus

Impulssin nousunopeus (onset rate, OR) on sen suoran kulmakerroin (dB/s), joka antaa parhaan approksimaation impulssin alku- ja loppupisteiden välille (Kuva 3). Äänenpainetason aikasignaali on A-taajuus- ja Fast-aikapainotettu.



Kuva 3. A-taajuuspainotettu äänenpainetason aikaisignaali  $F$  (Fast) aikavakiolla aikapainotettuna (Pedersen et al., 2000). Kuvasta selviävät käsitteet impulssin nousunopeus (onset rate, OR) ja tasoero (level difference, LD) kahdelle kuvassa esiintyvälle impulssille. Impulssilta edellytetään nousunopeuden (nousuajan gradientin) olevan suurempi kuin 10 dB/s (kuvassa lyhyet vinoviivat).

#### Impulssimaisuuden merkittävyys

Impulssimaisuuden ennakoitu merkittävyys (predicted prominence,  $P$ ) määritetään kullekin 30 minuutin mittausjaksolle suurimman nousuajan ja tasoeron mukaisen impulssin perusteella. Lyhyemmiltä mittausjaksoilta valitaan koko mittausjakson aika. Mittausjakson impulssimaisuuden merkittävyys määritetään valitun impulssin perusteella seuraavasti (Nordtest, 2002)

$$P = 3 \cdot \lg(\text{nousuaika} / [\text{dB/s}]) + 2 \cdot \lg(\text{tasoero} / [\text{dB}]) \quad (1)$$

Kaava perustuu kuuntelukokeilla saatuun tulokseen (Pedersen, 2001; Pedersen, 2001). Kuuntelukokeiden mukaan kaava selittää 73 % kuuntelukokeissa saatujen tulosten hajonnasta.

#### Sanktion suuruuden määrittäminen

Jos 30 minuutin mittausjakson merkittävimmän impulssin nousunopeus on suurempi kuin 10 dB/s, liukuva sanktio  $K_i$  mittausjaksolle määritetään mittausjakson impulssimaisuuden merkittävyyden perusteella seuraavasti (Nordtest, 2002, s. 4):

$$K_i = 1,8 \cdot (P - 5) \text{ dB, kun } P > 5$$

$$K_i = 0 \text{ dB, kun } P \leq 5 \quad (2)$$

Liukuva sanktio ehdotetaan lähteessä (Nordtest, 2002) tehtäväksi kuhunkin 30 minuutin mittausjaksoon jakson voimakkaimman impulssin merkittävyyden perusteella. Pidemmän aikavälin (kokonaistarkasteluajan) tarkastelussa 30 minuutin mittausjaksot summataan yhteen energiaperiaatetta noudattaen ottaen huomioon kunkin 30 minuutin mittausjakson sanktio.

Suomalaiseen käytäntöön ehdotetaan kuitenkin lievennyksenä sanktion määrittämistä 30 minuutin mittausjakson kymmenen merkittävimmän impulssin (tai mikäli mittausjaksolla on vähemmän kuin kymmenen impulssia näiden impulssien) merkittävyyden keskiarvon perusteella.

## 3.2 Tuulivoimalan melun kapeakaistaisuus (tonaalisuus)

### 3.2.1 Kapeakaistaisuuden merkittävyys ja sanktio

Tuulivoimalan tuottama melu voi poikkeustapauksissa sisältää kapeakaistaisia (tonaalisia) komponentteja. Erityisesti vanhemmissa tuuliturbiineissa, joissa koneiston ääni on lähellä lapojen tuottaman aerodynaamisen äänen tasoa, tonaaliset komponentit voivat olla merkittävin häiritsevän melun tyyppi. Vielä 2002 Klug esitti, että tonaalinen melu on kriittinen tekijä tuuliturbiinien hyväksyttävyydelle (Klug, 2002). Myös prototyyppivaiheessa olevat tuuliturbiinit ovat joskus tuottaneet merkittäviä tonaalisia komponentteja. Tonin (2012) toteaa kuitenkin vuonna 2012 julkaistussa artikkelissaan, että tonaaliset komponentit eivät ole ongelma moderneissa turbiineissa ja perustaa näkemyksensä moderneiden tuuliturbiinien valmistajien valmistajanvakuutuksiin ("numerous test certificates").

Kun äänitallennuksia tehdään altistuvassa kohteessa mahdollisesti esiintyvän melun kapeakaistaisuuden merkittävyyden arviointia varten, tallennukset tulisi arvioida ympäristöhallinnon ohjeita (Ympäristöministeriö, 2014, s. 24) noudattaen.

Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2014 (Ympäristöministeriö, 2014, s. 25) mukaan:

- **Melun kapeakaistaisuus** määritetään ensisijaisesti tallennetuista mittaussignaaleista standardin IEC 61400-11, edition 3.0 2012-11 (IEC, 2012) mukaisesti.
- Melun ollessa kapeakaistaista mittaustulokseen kohdistetaan sanktio. Tulokseen lisätään säädöksessä määritetty lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon.

IEC 61400-11 ei määrittele sanktiota, mutta standardin pohjana olevassa menetelmän kehittämisraportissa (Pedersen et al., 2000) kapeakaistaisuuden aste määrittelee sanktion ja tämän mukainen liukuva sanktiomenettely tulisi ottaa käyttöön myös Suomessa.

### 3.2.2 Kapeakaistaisen melun merkittävyyden ja sanktion suuruuden määrittäminen

Lähteissä (Nordtest, 1993; IEC, 2006; IEC, 2012; Pedersen et al., 2000) esitetään samankaltainen menettely kuultavien (ja merkittävien) kapeakaistaisen komponenttien määrittämiseksi äänisignaalista. Erona menettelyissä on analyysissä käytettävän taajuusanalyysin resoluutiovaatimus, mutta analyysit johtanevat likimain samoihin tuloksiin. Lähteessä (Nordtest, 1993) esitetään lisäksi menettely, jolla voidaan määrittää milloin kapeakaistainen signaali on niin merkittävä, että mitattuun A-painotettuun ekvivalenttitasoon tulee tehdä +5 dB lisäys kapeakaistais(t)en komponent(tie)n esiintymisen takia. Lähteessä (Pedersen et al., 2000) on puolestaan esitetty menettely, jolla voidaan määrittää liukuva sanktio välillä 0 dB ... 6 dB mitattuun A-painotettuun ekvivalenttitasoon.

#### Analyysin vaiheet

Analyysin vaiheet ovat Pedersenin tutkimuksesta (Pedersen et al., 2000), mutta esityksessä on ehdotettu FFT-analyysin käyttämisestä taajuusanalyysiin sekä FFT-analyysi taajuusresoluutiota, joka poikkeaa lähteen (Pedersen et al., 2000) analyysikuvauksesta.

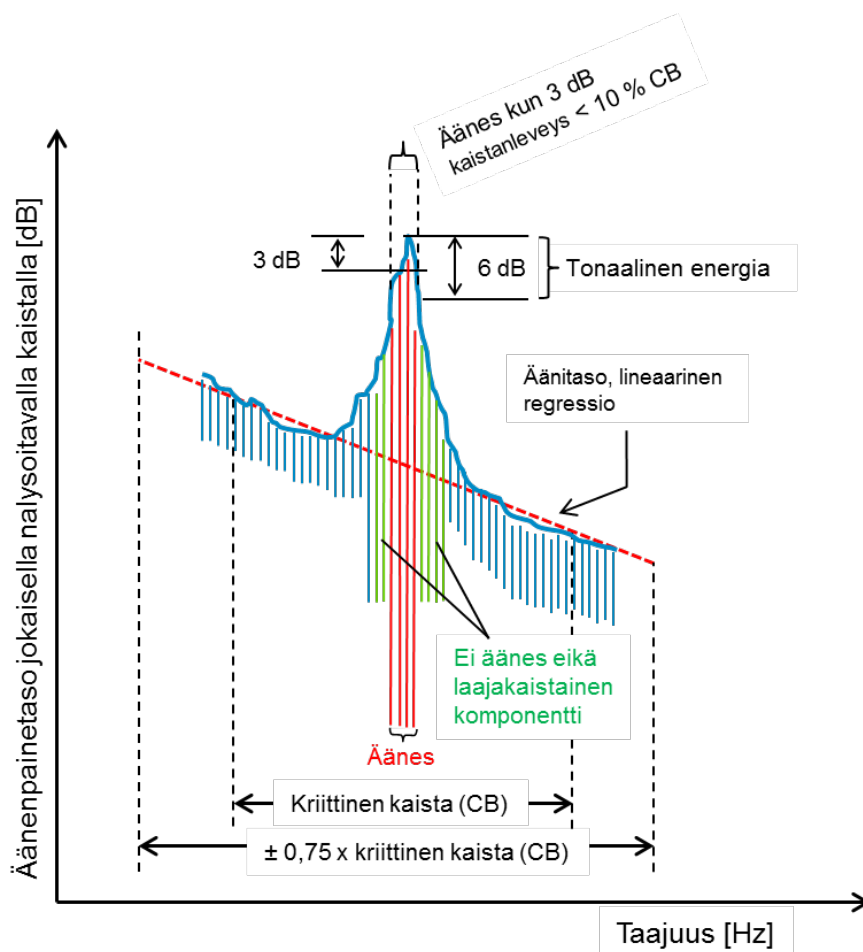
Kapeakaistaisuus analysoidaan kolmessa vaiheessa (Pedersen et al., 2000, soveltaen):

1. Äänisignaalin FFT-analyysi taajuusresoluutiolla 1 Hz - 2 Hz
2. Ääneksen tai kapeakaistaisen äänikomponentin (äänikomponenttien) keskimääräisen äänenpainetason ja peittoäänien tason määrittäminen sillä kriittisellä kaistalla, joka sisältää ääneksen tai kapeakaistaisen komponentin
3. Ääneksen tai kapeakaistaisen äänikomponentin kuultavuuden ( $\Delta L_{ta}$ ) ja sanktion ( $k$ ) määrittäminen

### Analyysin periaate

Vähintään yhden minuutin lineaarisesti keskiarvotetulle A-taajuuspainotetulle aikasignaalille tehdään FFT-analyysi 1 Hz - 2 Hz taajuusresoluutiolla. Spektristä analysoidaan kaikkien lokaalien taajuusmaksimien mahdollinen kapeakaistaisuus. Analyysitapa on esitetty skemaattisesti seuraavassa kuvassa (Kuva 4) ja yksityiskohtaisesti lähteissä (IEC, 2012; Pedersen et al., 2000). Analyysin tuloksena saadaan  $L_{pt}$  (ääneksen tai kapeakaistaisen komponentin äänenpainetaso kriittisellä kaistalla),  $L_{pn}$  (peittoäänen äänenpainetaso samalla kriittisellä kaistalla) ja  $f_c$  (kriittisen kaistan keskitaajuus).

Analyysimenetelmää on myös kritisoitu monimutkaiseksi, ja useassa maassa ympäristömelun kapeakaistaisuuden analysoinnissa käytetään yksinkertaisempaa menettelyä, joka perustuu 1/3-oktaavianalyysiin ja vierekkäisten kaistojen välisen eron määrittämiseen. Liu et al. (2012) ovat puolestaan kritisoineet analyysimenetelmää siitä, että epästationaarisille signaaleille (esim. kun tuulivoimalan pyörimisnopeus vaihtelee äänisignaalin tallennuksen aikana) tehdyssä analyysissä tonaaliset komponentit saattavat jäädä havaitsematta, ja he ovat ehdottaneet menetelmän kehittämistä.



Kuva 4. Kapeakaistaisten komponenttien analysointi äänitallenteesta (Pedersen et al., 2000).

### Sanktion suuruuden määräytyminen

Sanktion suuruus määräytyy seuraavan menettelyn mukaan:

1. Äänekseen tai kapeakaistaisten äänikomponenttien ( $\Delta L_{ta}$ ) kuultavuus lasketaan kaavalla:

$$\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log \left( 1 + \left( \frac{f_c}{502} \right)^{2,5} \right), \text{ dB re MT} \quad (3)$$

Missä  $L_{pt}$  on tonaalisten komponenttien kokonaistaso kriittisellä kaistalla

$L_{pn}$  on peittoäänien taso kriittisellä kaistalla

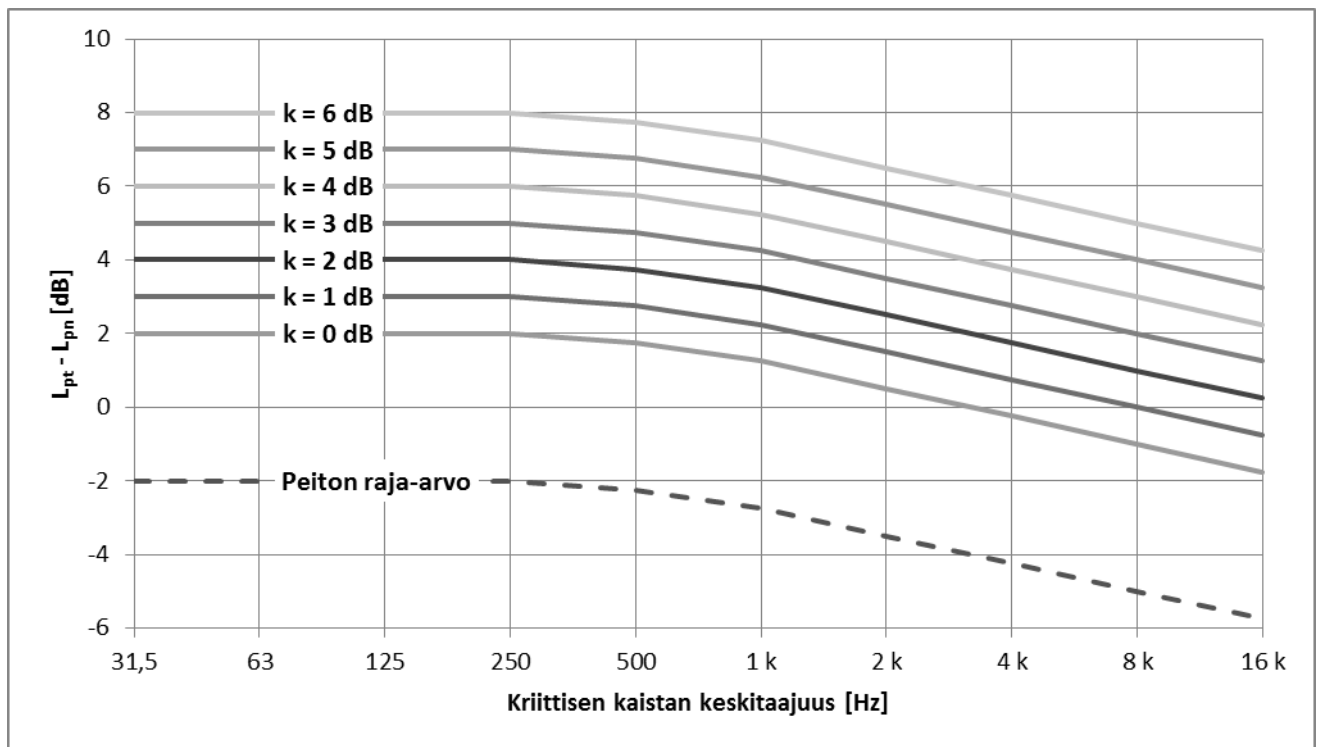
$f_c$  on kriittisen kaistan keskitaajuus

MT on peittoäänien (masking threshold) taso.

2. Sanktio,  $k$ , [dB] määräytyy suurimman tonaalisen komponentin  $\Delta L_{ta}$  tason perustella seuraavasti:

$$\begin{aligned} \Delta L_{ta} < 4 \text{ dB} : & \quad k = 0 \text{ dB} \\ 4 \text{ dB} \leq \Delta L_{ta} \leq 10 \text{ dB} : & \quad k = \Delta L_{ta} - 4 \text{ dB} \\ \Delta L_{ta} > 10 \text{ dB} : & \quad k = 6 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4)$$

Sanktion suuruutta voidaan hahmottaa suhteessa tonaalisen komponentin kuultavuuteen ja peittoäänien tasoon seuraavalla kaaviolla (Kuva 5).



Kuva 5. Peittoäänien kynnysarvo ja käyrät sanktion  $k$  määrittämiseksi.  $L_{pt}$  on äänekseen tai kapeakaistaisen komponentin äänenpainetaso kriittisellä kaistalla,  $L_{pn}$  on peittoäänien äänenpainetaso samalla kriittisellä kaistalla. Kriittisen kaistan keskitaajuus ( $f_c$ ) on vaakakselilla. (Pedersen et al., 2000)

### 3.3 Tuulivoimalan melun merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio)

#### 3.3.1 Merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio) ja sanktio

Tuulivoimalan tuottama melu sisältää lähes poikkeuksetta pyörivien lapojen aerodynaamisista ominaisuuksista johtuvaa "suhina-tyyppistä" ("swishing") amplitudimodulaatiota, jossa amplitudimodulaation kantoaaltotaajuus on keskitaajuuksilla [500 Hz - 1 kHz, (Hünerbein et al., 2013)]. Tämä amplitudimodulaatiotyyppi etenee tuulivoimalan lähelle kaikkiin suuntiin, mutta jo muutaman roottorihalkaisijan etäisyydellä tuulivoimalasta amplitudimodulaatio etenee pääasiassa lapojen pyörimistason suunnassa

(tuulen suuntaan nähden 90° kulmassa), eikä sitä kuulla myötä- tai vastatuulen suunnassa. Suhina-tyyppinen amplitudimodulaatio vaimenee myös lapojen pyörimistason suunnassa suhteellisen nopeasti. (Oerlemans, 2013; Smith, 2013)

Tietyissä sääolosuhteissa (stabiili tai hyvin stabiili ilmakehä, turbulenssi) lapakulmasäätoiset (pitch controlled) tuulivoimalat tuottavat yleensä myös ”jyminä-tyyppistä” (”thumping” tai ”swooshing”) amplitudimoduloitunutta ääntä, jonka kantoaaltotaajuus on olennaisesti pienemmällä taajuuksilla [200 Hz - 600 Hz, (Hünerbein et al., 2013)] verrattuna suhina-tyyppiseen amplitudimodulaatioon. Jyminä-tyyppinen amplitudimoduloitunut ääni etenee tuuliturbiinista pääasiassa myötätuulen suuntaan, eikä sen kaikkia syntymekanismia tai syntymisen edellytyksiä tunneta tarkkaan. Jyminä-tyyppisestä, merkityksellisestä amplitudimodulaatiosta käytetään nimityksiä ”excess (tai enhanced) amplitude modulation (EAM)” ja ”other amplitude modulation (OAM)” ja sen on todettu olevan erityisen häiritsevää altistuvassa kohteessa. (Oerlemans, 2013; Smith, 2013)

Edellä kuvattujen kahden eri tyyppisen yksittäisessä tuuliturbiinissa syntyvän amplitudimodulaation lisäksi tuulivoima-alueen usean tuuliturbiinin synkroninen pyöriminen voi aiheuttaa merkityksellistä sykintää myös muissa suunnissa.

### 3.3.2 Amplitudimodulaation määritelmä

Amplitudimodulaation modulaatioindeksi  $m$  (modulation index) on moduloivan signaalin amplitudi suhteessa kantoaallon amplitudiin  $A$ . Jos kantoaallon kulmataajuus on  $\omega_c$  ja modulaatiokulmataajuus on  $\omega_m$ , niin kokonaissignaali  $p$  on muotoa

$$p = A[1 + m \cos \omega_m t] \cos \omega_c t. \quad (5)$$

Modulaatioindeksi annetaan joskus myös prosenteissa.

Modulaatiosyvyys  $\Delta L$  (modulation depth) [dB] saadaan modulaatioindeksistä lausekkeella

$$\Delta L = 20 \log_{10} \left( \frac{1+m}{1-m} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1+m}{1-m} \right)^2. \quad (6)$$

Modulaatiosyvyys kuvaa moduloidun signaalin amplitudivaihteluita dB-asteikolla (maksimin ja minimin ero). Lausekkeen (6) käänteinen muoto on

$$m = \frac{10^{\Delta L / 20} - 1}{10^{\Delta L / 20} + 1}. \quad (7)$$

Taustamelu pienentää havaittavaa modulaatiosyvyyttä. Merkitään suureella  $b$  taustamelun keskimääräistä amplitudia (RMS) suhteessa kantoaallon amplitudiin. Tällöin havaittava modulaatiosyvyys saadaan lausekkeesta

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left[ \frac{(1+m)^2 + b^2}{(1-m)^2 + b^2} \right]. \quad (8)$$

Taustamelun läsnä olleessa lausekkeet (6) ja (7) eivät siis ole voimassa. Tällöin voidaan kuitenkin käyttää näennäistä modulaatioindeksiä ja havaittavaa modulaatiosyvyyttä kyseisten lausekkeiden mukaisesti.

Lineaaristen arvojen  $x_i$  RMS-keskiarvo  $x$  lasketaan lausekkeesta

$$x = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2}, \quad (9)$$

missä  $M$  on keskiarvotettavien arvojen lukumäärä.

Äänitasojen  $L_i$  energiakeskiarvo)  $L$  saadaan lausekkeella

$$L = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{L_i / 10} \right), \quad (10)$$

missä  $M$  on keskiarvotettavien äänitasojen lukumäärä.

*Taulukko 1. Modulaatioindeksin ja modulaatiosyvyyden välinen riippuvuus ilman taustamelua lausekkeen (6) mukaisesti joillakin arvoilla.*

| Modulaatio-aste [%] | Modulaatio-syvyys [dB] | Modulaatio-syvyys [dB] | Modulaatio-aste [%] |
|---------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| 1 %                 | 0,2                    | 0,1                    | 0,6 %               |
| 2 %                 | 0,3                    | 0,2                    | 1,2 %               |
| 5 %                 | 0,9                    | 0,5                    | 2,9 %               |
| 10 %                | 1,7                    | 1,0                    | 5,8 %               |
| 20 %                | 3,5                    | 2,0                    | 11,5 %              |
| 30 %                | 5,4                    | 3,0                    | 17,1 %              |
| 40 %                | 7,4                    | 4,0                    | 22,6 %              |
| 50 %                | 9,5                    | 5,0                    | 28,0 %              |
| 60 %                | 12,0                   | 10,0                   | 51,9 %              |
| 70 %                | 15,1                   | 15,0                   | 69,8 %              |
| 80 %                | 19,1                   | 20,0                   | 81,8 %              |
| 90 %                | 25,6                   | 25,0                   | 89,4 %              |
| 100 %               | $\infty$               | 30,0                   | 93,9 %              |

### 3.3.3 Tallenteiden teko ja niiden arviointi

Kun äänitallennuksia tehdään altistuvassa kohteessa mahdollisesti esiintyvän melun merkityksellisen sykinän arviointia varten, tallennukset tulisi arvioida ympäristöhallinnon ohjeita (Ympäristöministeriö, 2014, s. 25 - 26) noudattaen.

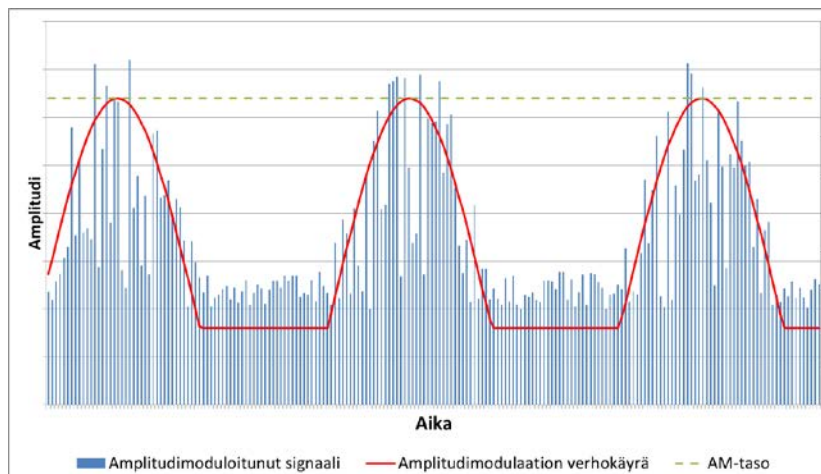
Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2014 (Ympäristöministeriö, 2014, s. 25) mukaan:

- **Melun merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio) ja sen aste** määritetään mittausten aikana tallennetuista signaaleista.
- Tuulivoimalan amplitudimodulaation määrittämiseen ei tällä hetkellä ole käytettävissä standardoitua menetelmää tai vertailuarvoa merkityksellisen sykinän (excess amplitude modulation) todentamiseksi. Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tuulivoimaloiden tuottaman melutason merkityksellisen sykinän aste voidaan kuitenkin määrittää viitteen (Karjalainen, 1999) mukaisella menettelyllä (Modulaatioiden ja alukkeiden havaitseminen).
- Tuulivoimalan melulle altistuvassa kohteessa tuottaman melutason merkityksellisen sykinän asteen ja sen häiritsevyyden välillä ei ole tiedeyhteisön yleisesti hyväksymää arviointi-asteikkoa. Amplitudimodulaatio on selvästi kuultavissa äänisignaalin, jos äänisignaalin modulaatioaste on yli 20 % (modulaatiosyvyys on tällöin yli 3 dB) vaihtelutaajuuden ollessa välillä 0,5 Hz - 30 Hz. Kuultavuus edellyttää, että äänisignaalin kokonaistaso on riittävän korkea.
- Varovaisuusperiaate huomioiden voidaan arvioida, että tuulivoimalan tuottaman äänen modulaatiosyvyyden ollessa yli 3 dB ja modulaation vaihtelutaajuuden ollessa 0,5 Hz - 30 Hz, melu on luonteeltaan merkityksellisesti sykkivää (amplitudimoduloitunutta) ja sanktio on tarkoituksenmukaista huomioida mittaustuloksessa.
- Melun ollessa merkityksellisesti sykkivää mittaustulokseen kohdistetaan sanktio. Tulokseen lisätään säädöksessä määritelty lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon.

### 3.3.4 Merkityksellisen sykinän asteen ja sanktion suuruuden määrittäminen

#### Modulaatiosyvyys

Amplitudimodulaation häiritsevyyteen keskeisesti vaikuttava tekijä on modulaation syvyys. Seuraavassa esitetyn yksinkertaistetun skemaattisen kuvan (Kuva 6) mukaisesti voidaan määrittää taustamelun (tai amplitudimoduloitumattoman melun) taso, amplitudimodulaation syvyys ja modulaatiotaajuus.



Kuva 6. Yksinkertaistettu skemaattinen kuva amplitudimoduloituneen signaalin määrittelyyn (Hünerbein et al., 2013).

Lähteen (Hünerbein et al., 2013) menettelyä soveltaen modulaatiosyvyys tulisi määrittää tallennetusta aikasignaalista 100 ms pituisten  $L_{A,eq}$ -arvojen avulla seuraavasti:

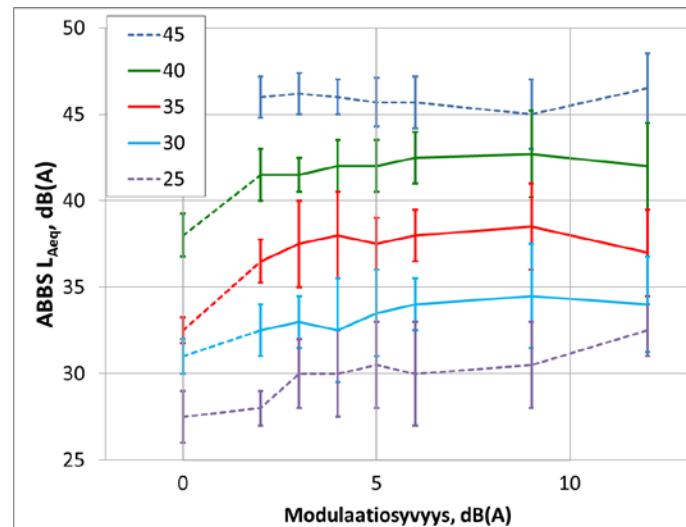
1. Mittausjakson pituudeksi suositellaan 30 minuuttia, joka vastaa esimerkiksi NT ACOU 112 impulssimelun mittausjakson pituutta. Tällöin samoja aikasignaaleja voidaan hyödyntää sekä impulssimaisuuden että modulaatiosyvyyden määrittämiseen.
2. Mittausjakso jaetaan 15 s mittaisiin tarkasteluväleihin. Tarkasteluvälin pituus on valittu viitteen (Larsson and Öhlund, 2014) mukaisesti. Tarkasteluväli vastaa tyypillistä moduloitua aikajaksoa. Jos yksittäisen mittausjakson pituus on 30 min, tarkasteluvälejä on 120.
3. Kukin tarkasteluväli koostuu 100 ms aikaikkunoilla mitatuista peräkkäisistä  $L_{A,eq}$ -arvoista (aikasarja). Taustamelun vaikutusta ei vähennetä  $L_{A,eq,100ms}$ -aikasarjan arvoista. Tällöin taustamelun peittovaikutus tulee huomioiduksi.
4. Lasketaan kunkin tarkasteluvälin ajalta maksimi- ja minimiarvojen energiakeskiarvot  $L_{A,max}$  ja  $L_{A,min}$   $L_{A,eq,100ms}$ -arvoista lausekkeen (10) mukaisesti. Joissain tapauksissa voi olla tarpeen erottaa moduloivan signaalin vaikutus muusta signaalista, esimerkiksi taustamelun aiheuttaessa signaalissa lokaaleja minimejä ja maksimeja. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi ali- tai kaistanpäästösuodatuksella.
5. Kunkin tarkasteluvälin modulaatiosyvyys määritetään maksimi- ja minimiarvojen energiakeskiarvojen erotuksena, ja tulokset muunnetaan kunkin tarkasteluvälin näennäisiksi modulaatioindekseiksi lausekkeen (7) mukaisesti.
6. Yksittäistä mittausjaksoa (suositus 30 min) edustava modulaatioindeksi on kymmenen suurimman näennäisen modulaatioindeksin tuottavan tarkasteluvälin indeksien RMS-keskiarvo kaavan (9) mukaisesti.
7. Mittausjakson modulaatiosyvyys saadaan mittausjakson modulaatioindeksistä kaavan (6) mukaisesti.
8. Kullekin mittausjaksolle lasketaan  $L_{A,eq,30min}$ .
9. Kullekin mittausjaksolle lasketaan siihen lisättävä sanktioarvo sen modulaatiosyvyyden perusteella. Jos modulaatiosyvyys ylittää 3 dB, sanktioksi tulee 5 dB.

Mittausten taajuusalue rajataan välille 20 Hz - 600 Hz. Viitteen (Hünerbein et al., 2013) mukaan taajuusalue on 200 Hz - 600 Hz, mutta myös välillä 20 Hz - 200 Hz voi esiintyä merkittäviä taajuuskomponentteja.

Edellä kuvatun menetelmän mukaisesti voidaan määrittää amplitudimodulaation syvyys modulaatiotaajuuden 10 Hz alapuolella. Tämä on riittävä modulaatiotaajuusalue tuulivoimalamelulle, jonka modulaatiotaajuus on tyypillisesti välillä 0,5 Hz - 2 Hz.

### Sanktion suuruuden määräytyminen

Viitteen (Hünerbein et al., 2013) kuuntelukokeiden tulosten nojalla on pääteltävissä, että amplitudimodulaation vaikutuksesta melun häiritsevyyteen syntyy hyppäyksellinen kasvu modulaatiosyvyyden ylittäessä 3 dB - 4 dB (Kuva 7), minkä jälkeen modulaatiosyvyyden lisääntyminen ei olennaisesti lisää häiritsevyyttä.



Kuva 7. Kuuntelutestien havaittu yhteys modulaatiosyvyyden ja amplitudimoduloitumattoman äänen tason välillä (Hünerbein et al., 2013). Vaaka-akselilla modulaatiosyvyys, pystyakselilla amplitudimoduloitumattoman taustäänen taso, parametrina kuunnellun signaalin ekvivalenttitaso.

## 3.4 Sanktioiden yhteisvaikutuksen huomioiminen

Kullekin mittausjaksolle määritetään  $L_{A,eq,30min}$  ja mahdolliset yksittäiset sanktiot.

Kunkin mittausjakson kokonaissanktio  $\Delta L$  lasketaan yksittäisistä sanktioista  $\Delta L_i$  lausekkeella

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left[ 1 + \sum_{i=1}^N (10^{\Delta L_i / 10} - 1) \right]. \quad (11)$$

missä  $N$  on sanktioiden lukumäärä. Näin määritelty kokonaissanktio mahdollistaa sen, että kukin sanktio nostaa sanktion verran äänenpainetta vain alkuperäiseen äänitasoon nähden eikä useamman sanktion kerrannaisvaikutuksia synny.

Edellä kuvattu kokonaissanktion määrittely rajaa käytännössä kokonaissanktiolle enimmäisarvon, joka rajaa suurimman mahdollisen sanktiotason (esimerkiksi 3 x 5 dB erillissanktioiden summaksi tulee 8,7 dB:n kokonaissanktio).

Pidemmän aikavälin tarkastelussa mittausjaksojen  $L_{A,eq,30min}$  -arvot mahdollisine sanktioineen keskiarvotetaan energiaperiaatetta noudattaen lausekkeen (10) mukaisesti päiväajalle (klo 07 - 22) tai yöajalle (22 - 07).

## 4. Tuulivoimalan pienitaajuinen melu

Tuulivoimalan tuottama melu sisältää aina myös pienitaajuisia komponentteja (1/3-oktaavikaistat 20 Hz - 200 Hz), jotka joissain tapauksissa voivat olla kapeakaistaisia. Vaikka suuret, yli 2 MW - 3 MW tuuliturbiinit eivät yleisesti ottaen näytä tuottavan voimalan tehoon suhteutettuna enempää pienitaajuisia melua kuin pienemmät tuuliturbiinit (Søndergaard, 2014), voi niiden melun absoluuttinen taso altistuvassa kohteessa ylittää kuultavan pienitaajuisen äänen tason ja se voidaan kokea häiritseväksi, erityisesti jos se on kapeakaistaista tai tonaalista. Søndergaard tosin toteaa, että modernit sarjatuotannossa olevat vuoden 2010 jälkeen valmistuneet tuuliturbiinit eivät tuota pienitaajuisia kapeakaistaisia äänikomponentteja, mikä oli aiemmissa tutkimuksissa todettu merkittäväksi ongelmaksi (Søndergaard, 2014). Koska pienitaajuisen äänikomponenttien äänekkyyttä lisäntyy olennaisesti nopeammin kuin keskitaajuisen äänikomponenttien äänekkyyttä, mm. Tanskassa on asetettu enimmäisarvot ja kuvattu mallinnusmenetelmä rakennusten sisään kuuluville tuulivoimalan pienitaajuisille äänille (The Danish Ministry of Environment, 2011).

Kun äänitallennuksia tehdään altistuvassa kohteessa mahdollisesti esiintyvän pienitaajuisen melun arviointia varten, tallennukset tulisi arvioida ympäristöhallinnon ohjeita (Ympäristöministeriö, 2014, s. 24 ja 27) noudattaen.

Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2014 (Ympäristöministeriö, 2014, s. 24 ja 27) mukaan:

- **Pienitaajuisen melutason mittaaminen** tehdään vastaavalla tavalla kuin tuulivoimalan tuottaman suurempitaajuisen melun mittaaminen. Mittauksessa on käytettävä erityisesti pienitaajuisen melun mittaukseen tarkoitettua sekundaarista tuulisuojaa, jonka aiheuttama vaimennus mitattavaan meluun on otettava huomioon. Tämän lisäksi mittauksessa käytettävän laitteiston taajuusvasteen tulee olla lineaarinen 4 Hz asti.
- Mittaukset tehdään 1/3-osaoktaaveittain taajuusalueella 20 Hz - 200 Hz ilman A-painotusta (lineaarisella alueella).
- Pienitaajuinen melu mitataan sisätiloissa kolmessa 1,5 m korkeudella lattian pinnasta sijaitsevassa pisteessä. Kaksi niistä sijaitsee oleskelualueella, joissa pienitaajuisen melun arvioidaan olevan voimakkaimmillaan ja yksi huoneen nurkassa (0,5 m - 1 m etäisyydellä seinistä). Mittaukset tehdään taajuusalueella 20 Hz - 200 Hz ja raportoitava tulos on kolmen mittauspisteen tulosten energiakeskiarvo.

Suomessa pienitaajuisen melun aiheuttamille melutasoille rakennusten ulkopuolella ei ole annettu ohjearvoja, mutta ohjearvot voidaan johtaa asumisterveysohjeessa annetuista rakennusten sisäpuolella esiintyvän pienitaajuisen melun ohjearvoista.

Suomessa voitaisiin ottaa käyttöön pienitaajuisen melun ohjearvot rakennuksen ulkopuolella, jolloin jo mallinnusvaiheessa voitaisiin tarkastella pienitaajuisen melun voimakkuutta ohjearvoihin verrattuna. Ensimmäisessä vaiheessa menettely tulisi olla seuraava:

- Enimmäisarvot rakennusten **sisällä** perustuen asumisterveysohjeeseen (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003, s. 40). On huomattavaa, että viitteessä Taulukon 3 ohjearvot on esitetty lineaarisina, vaikka taulukossa mainitaan, että ne ovat A-taajuuspainotettuja.
- **Ääneneristys** tanskalaisten ohjeistuksen (The Danish Ministry of Environment, 2011, s. 11) mukaisena.
- Saadaan arvot terssikaistoittain rakennusten **ulkopuolella**.

Mikäli Suomesta on saatavissa luotettavaa tietoa rakennusten ulkovaipan ääneneristyksestä, tanskalaisten ohjeistuksen arvoja voitaisiin täsmentää kansalliseksi ohjeistukseksi. Edellä

esitetyn menettelyn mukaiset ohjearvot ja määrittäisperusteet on esitetty taulukossa 1 ja kaaviossa (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003; The Danish Ministry of Environment, 2011).

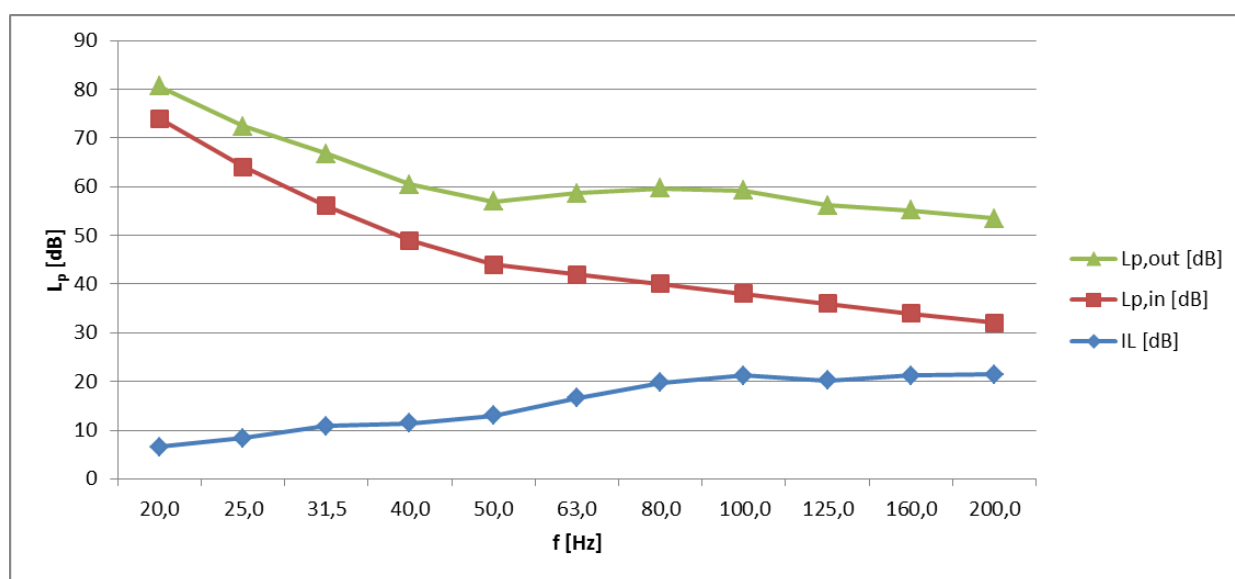
*Taulukko 2. Tanskalaisten ohjeiden (The Danish Ministry of Environment, 2011) mukaan laskettu rakennuksen ääneneristykseen vaikutus pienitaajuisten melun tasoihin rakennuksen ulkopuolella käyttäen rakennuksen sisällä melutason ohjearvona Asumisterveysohjeen (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003) pienitaajuisten melun ohjearvoja.*

| Terssikaistan keskitaajuus, Hz | Enimmäistaso rakennuksen sisällä, dB(lin) | Rakennuksen ääneneristävyys (IL), dB | Tuulivoimalan aiheuttaman melutason ohjearvo rakennuksen ulkopuolella, dB(lin) |
|--------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 10                             | - <sup>1)</sup>                           | 4,9                                  | - <sup>2)</sup>                                                                |
| 12,5                           | - <sup>1)</sup>                           | 5,9                                  | - <sup>2)</sup>                                                                |
| 16                             | - <sup>1)</sup>                           | 4,6                                  | - <sup>2)</sup>                                                                |
| 20                             | 74                                        | 6,6                                  | <b>80,6</b>                                                                    |
| 25                             | 64                                        | 8,4                                  | <b>72,4</b>                                                                    |
| 31,5                           | 56                                        | 10,8                                 | <b>66,8</b>                                                                    |
| 40                             | 49                                        | 11,4                                 | <b>60,4</b>                                                                    |
| 50                             | 44                                        | 13,0                                 | <b>57,0</b>                                                                    |
| 63                             | 42                                        | 16,6                                 | <b>58,6</b>                                                                    |
| 80                             | 40                                        | 19,7                                 | <b>59,7</b>                                                                    |
| 100                            | 38                                        | 21,2                                 | <b>59,2</b>                                                                    |
| 125                            | 36                                        | 20,2                                 | <b>56,2</b>                                                                    |
| 160                            | 34                                        | 21,2                                 | <b>55,2</b>                                                                    |
| 200                            | 32                                        | 21,5 <sup>3)</sup>                   | <b>53,5 <sup>3)</sup></b>                                                      |

<sup>1)</sup> Ei määritelty asumisterveysohjeessa.

<sup>2)</sup> Ei voida määrittellä asumisterveysohjeen perusteella.

<sup>3)</sup> Ekstrapoloitu tanskalaisen ohjeen arvojen perusteella, ks. Kuva 8.



Kuva 8. Pienitaajuisten melun ohjearvot (vihreä kuvaaja,  $L_{p,out}$ ) rakennusten ulkopuolella perustuen asumisterveysohjeen ohjearvoihin (punainen kuvaaja,  $L_{p,in}$ ) ja tanskalaisten ääneneristysmääräyksiin (sininen kuvaaja, IL).

## 5. Johtopäätökset ja yhteenveto

---

Tässä raportissa on määritetty tuulivoimalan äänen erityispiirteiden mittaristoa ja sen käyttöä, mukaan lukien mahdolliset sanktiot. Tämän raportin menetelmäkehityksessä tarkasteltiin vain tapausta, jolloin tuulivoimala tai tuulivoima-alue tuottaa erityisen häiritsevää (excess) melua altistuvaan kohteeseen.

Olemme ottaneet huomioon kolme erityispiirrettä (impulssimaisuus, tonaalisuus ja sykintä), määritelleet kullekin laskentamenetelmän, laskeneet erilliset sanktiot ja yhdistäneet sanktiot tietyllä tavalla (ei suoraan yhteenlaskemalla). Lisäksi on määritetty olosuhteet mittauksia ja tallennuksia varten, sekä kuvattu mahdollisuus mitata, tallentaa ja ennakoida pienitaajuisia melua rakennuksen ulkopuolella.

Olemme myös pyrkineet yksinkertaistamaan menettelyä mahdollisimman paljon, esimerkiksi määrittelemällä samanlaiset tai -kaltaiset tallennus- ja laskentajaksot signaaleille. Koska sykinän sanktion laskenta on ainoa, jolle ei ole valmista menetelmää tai standardia olemme pyrkineet määrittelemään käyttämämme menetelmän mahdollisimman yksityiskohtaisesti.

## Liitteet /Lähdeviitteet

---

Ympäristöministeriö (2014). *Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2014*. Helsinki.

IEC (2012). *IEC 61400-11: Wind turbines - Part 11 ed. 3.0: Acoustic noise measurement techniques*. Switzerland.

Ympäristöministeriö (2012). *Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2012*. Helsinki.

The Danish Ministry of Environment (2011). *Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011*. Copenhagen, Denmark.

IEC (2006). *IEC 61400-11: Wind turbine generator systems–Part 11 ed. 2.1: Acoustic noise measurement techniques*. Switzerland.

Sosiaali- ja terveysministeriö (2003). *Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1*. Helsinki.

Nordtest (2002). *Nordtest Method NT ACOU 112, Acoustics: prominence of impulsive sounds and for adjustment of  $L_{Aeq}$* . Espoo, Finland.

Nordtest (1993). *Nordtest Method NT ACOU 089, Wind turbines - noise: performance*. Espoo, Finland.

ARL - Air Resources Laboratory : *Pasquill Stability Classes*. Available: <https://ready.arl.noaa.gov/READYpgclass.php>. Accessed 06/19, 2014.

Hünerbein Sv, King A, Piper B and Cand M (2013) Development of an AM Dose-Response Relationship. Work Package B(2) report. In: RenewableUK (ed) *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect*. London, UK: RenewableUK.

Karjalainen M. (1999) *Kommunikaatioakustiikka*. Espoo: Helsinki University of Technology.

- Klug H. (2002) Noise from wind turbines standards and noise reduction procedures. *Proceedings of Forum Acusticum*: 7. 16 - 20 September 2002. Sevilla, Spain.
- Larsson C. and Öhlund O. (2014) Amplitude modulation of sound from wind turbines under various meteorological conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 135(1): 67-73.
- Liu X., Bo L. and Veidt M. (2012) Tonality evaluation of wind turbine noise by filter-segmentation. *Measurement* 45(4): 711-718.
- Ljunggren S. (1998) Elforsk rapport 98:24 *Mätning av bullerimmission från vindkraftverk*. Stockholm: Energimyndigheten.
- Maijala P. (2014) *A measurement-based statistical model to evaluate uncertainty in long-range noise assessments*. Doctoral dissertation, Tampere University of Technology: Tampere, Finland.
- Oerlemans S. (2013) NLR-CR-2011-071 *An explanation for enhanced amplitude modulation of wind turbine noise (in Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect)*. London, UK: RenewableUK.
- Pedersen T. H. (2001) Working report No 1 (in Danish with expanded English summary) *Impulsive noise. An objective measuring method for the prominence of impulsive sounds and for the adjustment of  $L_{Aeq}$* . Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency.
- (2001) Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen 1/2001 *Impulsstøj: Objektiv målemetode for impulsers tydelighed og for tildeling af impulstillæg*. Copenhagen: Miljøstyrelsen.
- Pedersen T. H., Søndergaard M. and Andersen B. (2000) 2000 *Objective method for assessing the audibility of tones in Noise Joint Nordic Method-Version 2*. Denmark: Delta Acoustics and Vibration.
- Smith MG (2013) Fundamental research into possible causes of amplitude modulation. University of Southampton, ISVR Consulting, Consultancy, Ref: 8630-R01 / Work Package A2 report. In: RenewableUK (ed) *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect*. London, UK: RenewableUK.
- Søndergaard B. (2014) 35.6418.03 *Low frequency noise from wind turbines: Do the Danish regulations have any impact? An analysis of noise measurements*. Aarhus, Denmark: Danish wind industry association.
- (2014) 35.6418.03 *Low frequency noise from wind turbines: Do the Danish regulations have any impact? An analysis of noise measurements*. Aarhus, Denmark: Danish wind industry association.
- Tonin R. (2012) Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoustics Australia* 40(1): 20 - 27.
- Van den Berg G. (2004) Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration* 277(4): 955-970.

