

TUULIVOIMALAMELUN ERITYISPIIRTEET JA NIIDEN HUOMIOIMINEN YMPÄRISTÖMELUARVIOINNISSA

Denis Siponen

VTT
PL 1000, 02044 VTT
etunimi.sukunimi@vtt.fi

1 JOHDANTO

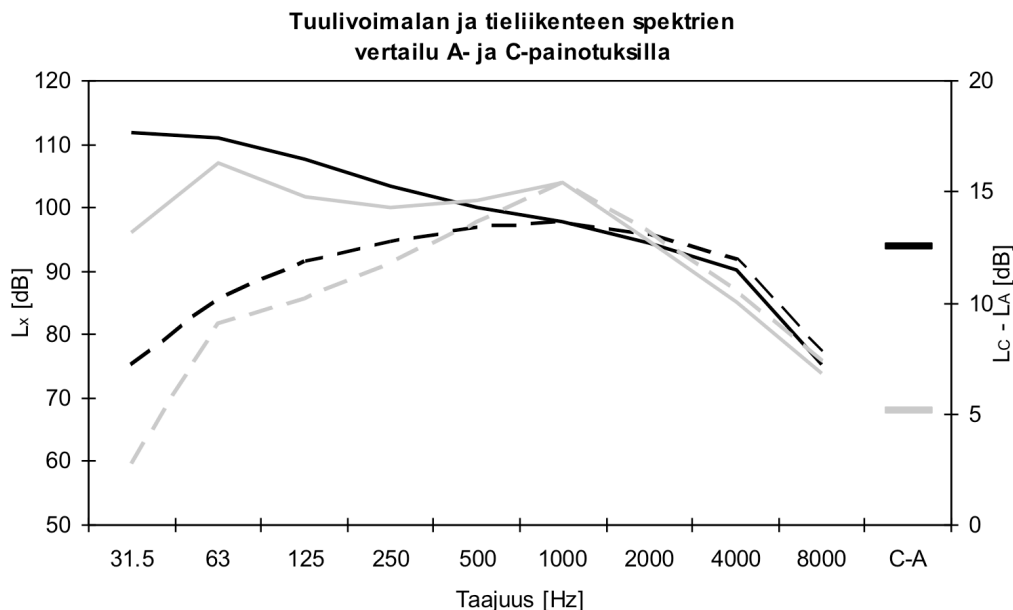
Viime vuosien aikana tapahtunut tuulivoimaloiden tehon ja koon kasvun myötä myös valitukset tuulivoimalamelusta ovat lisääntyneet. Erityispiirre näillä valituksilla on niiden kohdistuminen amplitudimodulaatioon eli vaihteluvoimakkuuteen ja pientaajuiseen meluun [1,2]. Näissä valituksissa tuulivoimalamelua kuvaillaan usein termeillä ”swishing”, ”thumping” ja ”low-frequency hum”. Nämä melun kuvaukset johtuvat tuulivoimalamelun spektraalisesta ja temporaalisesta luonteesta. Amplitudimodulaatio ja pientaajuinen melu ovat suoraan yhteydessä näihin melun erityispiirteisiin. Tässä artikkelissa esitetään tuulivoimaloiden melun karakteristisia ominaisuuksia sekä pohditaan niiden vaikutusta olemassa oleviin melun ohjearvoihin. Lopuksi ehdotetaan tuulivoimalamelun erityispiirteitä paremmin kuvaavia meluindikaattoreita ja korjaustermejä.

2 TUULIVOIMALAMELUN ERITYISPIIRTEET

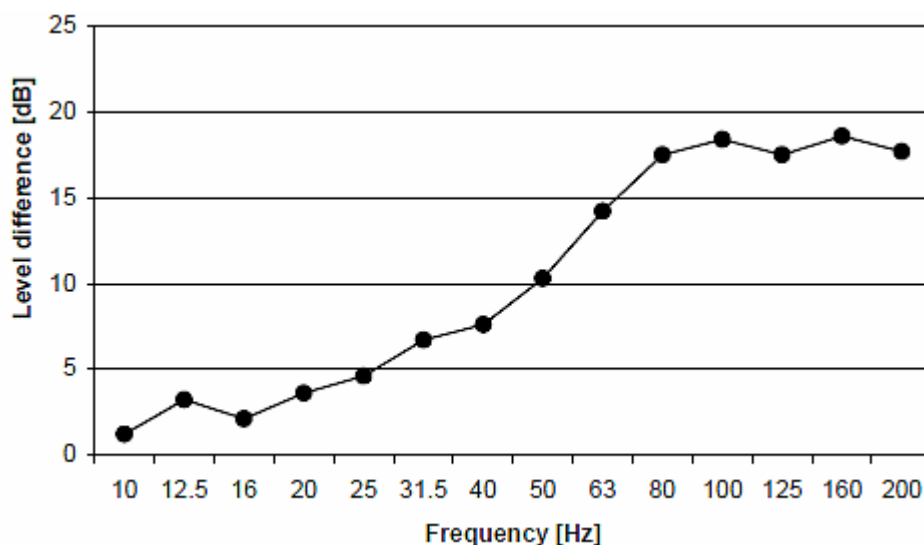
2.1 Amplitudimodulaatio

Amplitudimodulaatio on häiritsevyyden kannalta merkittävin tuulivoimalamelun erityispiirre. Se on aerodynaamista melua, jonka syntymekanismi ei kuitenkaan tunneta vielä riittävän hyvin. Näyttää kuitenkin siltä, että se on usean osatekijän summa, joista merkittävin osatekijä on tuulen tuulivoimaroottorin lapaan kohdistuneen kohtauskulman muutos lavan eri asennoissa [3]. Koska merkittävin osa tuulivoimalan aerodynaamisesta melusta johtuu tuulen osumisesta tuulivoimalan roottorin lapaan, on kohtauskulmalla suuri merkitys aerodynaamisen melun syntyyn. Lapaprofiilista riippuen lavan kohtauskulmalla on optimiarvo sekä voimalan tehon- että aerodynaamisen melun tuoton kannalta; jo muutaman asteen muutos kohtauskulmaan aiheuttaa tuotetun tehon alenemista ja äänitason nousua.

Viime vuosina on ehdotettu, että amplitudimodulaatio on voimakasta kun tuulen nopeus roottorin lavan ala- ja yläasennon välillä on useita metrejä sekunnissa [3]. Käytännössä tällaisia olosuhteita esiintyy kun ilmakehä maanpinnan läheisyydessä on stabiilissa tilassa. Tyypillisesti tällaiset olosuhteet muodostuvat pilvettöminä iltoina auringon laskettua kun lämpötila kasvaa maanpinnasta ylöspäin mentäessä. Lisäksi nykyisissä suurien tuulivoimaloiden melussa esiintyy voimakkaampaa amplitudimodulaatiota, koska niiden roottorin lapojen pituudet voivat olla jopa 60 metriä ja pyyhkäisyalan halkaisija yli 120 metriä. Tuulen nopeuden ero ala- ja yläpäässä on tällä pyyhkäisyalalla suurempi kuin pienempien tuulivoimaloiden pyyhkäisyaloilla. Uusimmat mittaus- sekä mallinnustulokset kuitenkin viittaavat siihen, ettei tuulipro-



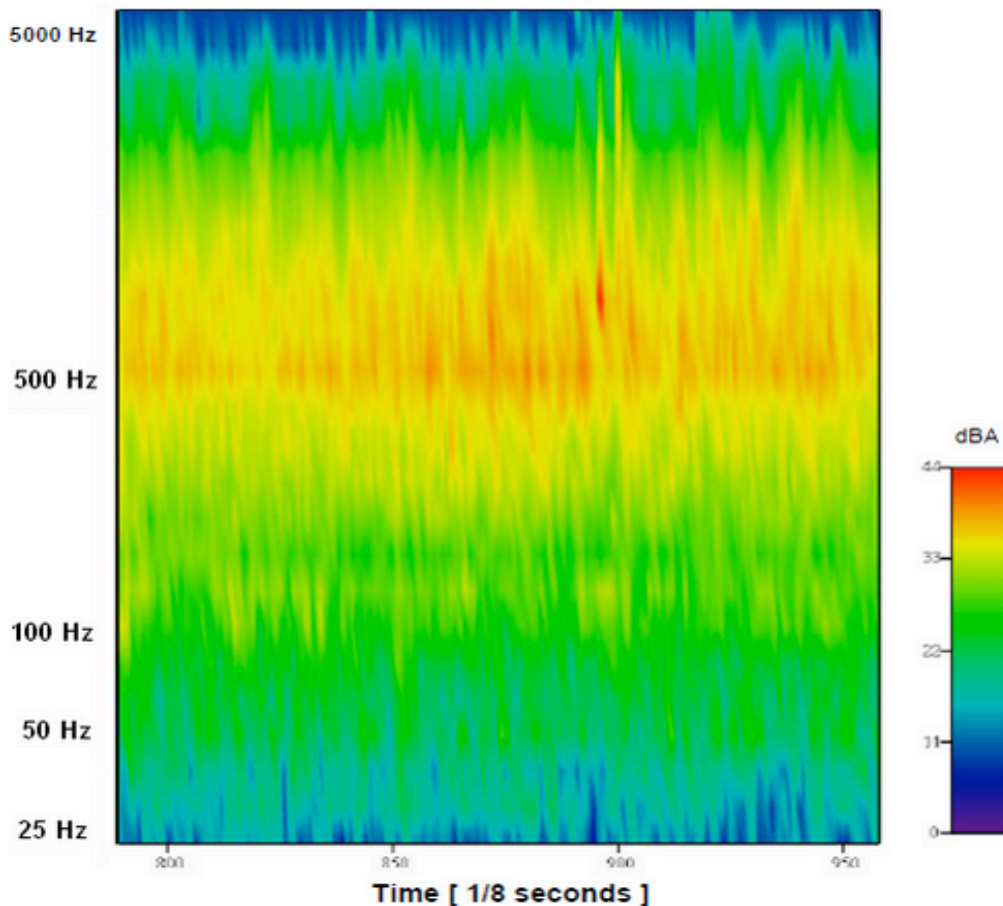
Kuva 1. Musta: Uudenaikaisen 2MW tuulivoimalan näennäinen äänitehotaso A- ja C-painotettuna, Harmaa: Tieliikennemelun (60km/h) äänenpainetaso A- ja C-painotettuna.



Kuva 2. Tyypillisen Tanskalaisen asuintalon ulkoseinän äänieristys taajuusalueella 10 – 200 Hz [10].

fiilillä olisi juurikaan merkitystä amplitudimodulaation syntyyn [4]. Onkin ehdotettu, että amplitudimodulaatiota esiintyy jatkuvasti, mutta riittävän suurilla etäisyyksillä sen havaitsemista vaikeuttaa huomattavasti maanpinnan tasolla olevan tuulen aiheuttama heikko signaali-kohina-suhde.

On huomattava, että ellei amplitudimodulaatiota oteta suunnitteluteknisesti huomioon tulevaisuuden nykyistä suurempia tuulivoimaloita suunniteltaessa, niissä esiintyvä amplitudimodulaatio tulee todennäköisesti olemaan nykyisiä voimakkaampaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että niiden melu koetaan samalla kokonaisäänepainetasolla nykyistä tuulivoimaloita häiritsevämmäksi.



Kuva 3. 330m etäisyydestä mitattu tuulivoimalan melun spektrogrammi [5].

2.2 Pientaajuinen melu

Melu on pientaajuista kun sen taajuusalue on välillä 20 – 150 Hz [10]. Tuulivoimalan äänitehotaso ilmoitetaan näennäisenä äänitehotasona, joka on likimääräinen arvio tuulivoimalan todellisesta äänitehotasosta. Kuvassa 1 on esitetty nykyaikaisen tuulivoimalan näennäinen äänitehotaso ja liikennemelun äänenpainetaso sekä C- että A-painotettuna. Esitetyt spektrit eivät ole absoluuttisella skaalalla, vaan ne on siirretty lähekkäin itse spektrisisällön vertailun vuoksi. Lisäksi kuvassa on esitetty näiden tasojen C- ja A-painotettujen kokonaistasojen ero L_C-L_A . Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, tyypillisen nykyaikaisen tuulivoimalan näennäinen äänitehotaso painottuu selvästi pienille taajuuksille.

Tuulivoimalan pientaajuisen melun häiritsevyys ulkotiloissa johtuu pääosin ilmakehän äänen absorptiosta [6]. Ilmakehän absorptioon ominaisuuksista johtuen etenevän äänen pienet taajuudet vaimenevat ilmakehässä huomattavasti vähemmän kuin suuret taajuudet. Esimerkiksi ilmakehässä yhden kilometrin edennyt ääni on tämän aikana vaimentunut 2000 Hz:n taajuudella noin 9 dB, mutta 100 Hz:n taajuudella vaimentuma on lähes 0 dB [6].

Sisätiloissa ilmakehän äänen absorptioon lisäksi tähän vaikuttaa myös asuintalojen ulkoseinien äänieristys sekä huonemoodit [7, 8]. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen tanskalaisen asuintalon ulkoseinän äänieristys pienillä taajuuksilla. Kuten kuvasta 2 voidaan nähdä, ulkoseinän äänieristys 10 – 40 Hz:n taajuusalueella verrattuna sitä

suurempiin taajuuksiin. Erilaisesta ilmaston asettamista vaatimuksista johtuen tyyppillisen Suomalaisen asuintalon ulkoseinän äänieristys saattaa olla Tanskalaista parempi, mutta esimerkiksi kesämökin tapauksessa voidaan olettaa äänieristystason olevan vertailukelpoinen kuvan 2 suhteen.

2.3 Pientaajuisen melun amplitudimodulaatio

Kirjallisuudessa on esitetty laajalti kiistelyä siitä onko tuulivoimalan pientaajuinen melu kuultavissa asuintalon sisätiloissa. Viime vuosien aikana ilmaantuneista asukkaiden valituksista tuulivoimalamelusta huomattava osa koskee pientaajuisia melua sisätiloissa. Toisaalta useat mittaukset näissä tiloissa näyttäisi osoittavan, että nämä pientaajuisen melun tasot eivät ylitä ihmisen kuulokynnystä. Koska ihminen kokee ajallisesti vaihtelevan pientaajuisen melun häiritsevämmäksi kuin staattisen melun, yksi selitys tuulivoimalan pientaajuisen melun häiritsevyydelle saattaa olla pientaajuisen melun amplitudimodulaatio [5]. Kuten kuvan 3 spektogrammista voidaan nähdä, amplitudimodulaatio näyttäisi ulottuvan huomattavan pienille taajuuksille, aina 25 Hz:n asti. Näin pienet taajuudet läpäisevät asuintalojen ulkoseinät tehokkaammin kuin suuremmat taajuudet, joten näin pienillä taajuuksilla oleva amplitudimodulaatio saattaa olla kuultavissa asuintalojen sisätiloissa. On kuitenkin huomattava, että lisätutkimuksia on tehtävä tämän asian varmistamiseksi.

3 TUULIVOIMALAMELUN ERITYISPIIRTEET JA NIIDEN HUOMIOIMINEN YMPÄRISTÖMELUARVIOINNISSA

3.1 Tuulivoimalamelu ja A-painotettu kokonaisäänitaso

Lähes kaikissa maailmalla käytetyissä tuulivoimalamelun immissiotasojen raja-arvoissa käytetään lähtötasona tuulivoimalavalmistajan tarjoamaa A-painotettua taakuaäänitehotasoa. Vaihtoehtoisesti lähtötasona voidaan myös käyttää mitattua näennäistä A-painotettua äänitehotasoa. Vastaavasti laskennassa immissiotasot esitetään A-painotettuina äänenpainetasoina. Tämä on ongelmallista, koska A-painotettu äänenpainetaso ei näyttäisi kuvaavan tuulivoimalamelun erityisominaisuuksia riittävästi. Lisäksi kuuntelukokeissa on havaittu, että äänen spektraaliset ja temporaaliset komponentit voivat olla kuultavissa, vaikka äänen A-painotettu kokonaistaso olisi pienempi kuin taustamelun kokonaistaso [7,9].

On myös huomattava, että suurempien tuulivoimaloiden pientaajuisen melun osuus kokonaismelusta on jonkin verran suurempi verrattuna pienempiin tuulivoimaloihin [10]. Tulevaisuudessa tämä lisää todennäköisesti valituksia tuulivoimalamelusta, koska pienimpien taajuuksien äänitason nousun vaikutus A-painotettuun kokonaistasoon on häviävän pieni [11]. Esimerkiksi lisättäessä 3 dB kuvassa 2 esitettyyn tuulivoimalan spektrin taajuuksille 31.5, 63 ja 125 Hz, vaikutus A-taajuuspainotettuun kokonaistasoon on merkityksetön, mutta C-taajuuspainotettuun kokonaistasoon vaikutus on noin 3dB. Jos samalla edellisen esimerkin lähtöarvoilla lasketaan 40 dB:n immissiotaso tuulivoimalan ja lähimmän asutuksen välillä, saadaan A-taajuuspainotusta käyttäen 3 dB korotukselle minimietäisyyden kasvuksi 443 metristä 470 metriin. Tämä on vain 27 metrin minimietäisyyden kasvu, joka vastaa 9 % kasvua kokonaistaisyydestä. Jos vastaava tarkastelu suoritetaan C-taajuuspainotusta käyttäen, kasvaa minimietäisyys 443 metristä 610 metriin. Tämä on 170 metrin mi-

nimietäisyyden kasvu, joka vastaa 38 % kasvua kokonaisetäisyydestä. Laskenta on suoritettu ISO 9613-2 standardia käyttäen, jossa ilmakehän absorptio on otettu huomioon ISO 9613-1 standardia noudattaen. Esimerkissä käytetty korotus pienimpien taajuuskaistoihin äänitasoihin on perusteltu, koska tulevaisuuden suurissa tuulivoimaloissa tällaista korostusta voidaan pitää realistisena. On kuitenkin huomattava, että nykyisienkin tuulivoimaloiden äänitehospektreissä on eroja pienten taajuuksien suhteen [10], joten tuulivoimalan merkin ja mallin valinnalla on mahdollista vaikuttaa pientaajuuksista melun komponenteista koettavaan häiritsevyyteen.

3.2 Tuulivoimalamelua paremmin kuvaavat meluindikaattorit ja korjaustermit

A-taajuuspainotusta käytettäessä melun immissiotasojen laskennassa tuulivoimalamelun amplitudimodulaatio ja pientaajuinen melu saattaa jäädä huomioimatta. Tulevaisuudessa onkin odotettavissa kasvava määrä valituksia tuulivoimalamelusta. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimaloiden koon kasvaessa niiden pientaajuinen melu ja amplitudimodulaatio tulevat kasvamaan suuremman tehon ja pidempien roottorilapojen myötä. A-taajuuspainoksen rajoituksista johtuen näille tuulivoimaloille tehtävissä melun raja-arvotarkasteluissa nämä raja-arvot voidaan laskea alimitoitettusti. Tästä johtuen käyttöön tulisi ottaa tuulivoimalamelun erityispiirteitä paremmin kuvaavia meluindikaattoreita tai korjaustermejä. Näiden meluindikaattoreiden ja korjaustermien on kuitenkin täytettävä joitain reunaehtoja, jotta ne niiden käyttöönotto tulisi helpommaksi:

- Riittävän yksinkertainen, jotta nykyisten tuulivoimalamelua mittaavien laitteiden päivitys ei ole tarpeellista
- Nykyisten ympäristömelun ohje- tai raja-arvojen ei ole tarpeellista muokata oleellisesti
- Ei ole väärinkäytettävissä

Meluindikaattori, joka näyttäisi ottavan tuulivoimalamelun erityispiirteet A-taajuuspainotettua kokonaisäänepainotusoa $L_{A,eq}$ paremmin huomioon on C-taajuuspainotettu kokonaisäänepainetaso $L_{C,eq}$. Koska kuitenkin lähes kaikissa maissa tuulivoimalamelun ohje- tai raja-arvot ovat A-taajuuspainotetulle kokonaisäänepainetasolle $L_{A,eq}$, C- ja A-taajuuspainotetun kokonaisäänepainetason erotukseen perustuva tuulivoimalamelun häiritsevyysskorjaustermi olisi kenties sopivin tähän tarkoitukseen. Tällainen korjaustermi olisi esimerkiksi:

$$C_{LF} = L_{C,eq} - L_{A,eq} - 15 \text{ dB}, \text{ jos } L_{C,eq} - L_{A,eq} \text{ on vähintään } 15 \text{ dB}$$

Toisin sanoen pientaajuisen melun häiritsevyysskorjausta ei sovelleta, jos tuulivoimalan äänitehotasospektrin C- ja A-taajuuspainotuksien ero alle 15 dB. Tämän tason ylittyessä häiritsevyysskorjaus on 1 dB per jokaista 15 dB:n ylittävää dB:tä kohden. On kuitenkin huomattava, että tämä häiritsevyysskorjaustermi on laskettava immisiopisteessä eikä emissiopisteessä.

4 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvat kokevat tuulivoimalamelun häiritsevänä. Tämä johtuu tuulivoimalamelun spektraalisesta ja ajallisesta vaihtelusta. Nämä johtuvat pääosin tuulivoimalamelun erityispiirteistä, joita ovat amplitudimodulaatio ja pientaajuinen melu.

Tuulivoimalamelun äänitehotaso kuvataan A-taajuuspainotetulla kokonaistasolla. Tuulivoimalamelun erityispiirteistä johtuen tämä indikaattori näyttäisi olevan riittämätön kuvaamaan tuulivoimalamelun häiritsevyyttä. Lisäksi tuulivoimaloiden koon kasvaessa on todennäköistä, että myös valituksen tuulivoimalamelusta tulevat lisääntymään. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimaloiden ympäristömeluarvoineissa tuulivoimalamelun leviäminen ympäristöön mallinnetaan käyttäen tuulivoimalan näennäistä tai takuuäänitehotasoa $L_{WA,k}$ ja pientaajuisen melun tai amplitudimodulaation häiritsevyysvaikutuslaskentoja ei suoriteta. Siksi tulisikin pohtia, olisiko syytä ottaa käyttöön tuulivoimalamelun erityispiirteitä paremmin kuvaavia meluindikaattoreita tai korjaustermejä.

VIITTEET

- [1] Kampermann, G. & James, R., Guidelines for Selecting Wind Turbine Sites, Sound
- [2] Punch, J. et. al. Wind-Turbine Noise, What Audiologists Should Know. Audiology Today, Jul-aug 2010.
- [3] Palmer, W. K. G., A new explanation for wind turbine whoosh – wind shear. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, proceedings. Aalborg, 2009
- [4] Boorsma, K. & Shepers, J.G. Enhanced wind turbine noise prediction tool SILANT. Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, proceedings. Rome, 2011
- [5] Howe Gastmeier Chapnik Ltd. Evinromental Noise Assessment Pubnico Point Wind Farm, Nova Scotia, Contract NRCAN-06-00046, August 2006
- [6] ISO 9613-1, Attenuation of sound during propagation outdoors – Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993
- [7] Colby, WD. et. al. Wind-Turbine Sound and Health Effects: An Expert Panel Review. Prepared for the American Wind Energy Association and Canadian Wind Energy Association. 2009
- [8] Dickinson, J. Nonsense on stilts. Proceedings of ACOUSTICS 2009
- [9] G.P. van den Berg, “The sounds of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise”, Doctoral Thesis, Groningen, Netherlands, 2006
- [10] DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, EFP-06 Project, Low Frequency Noise from Large Wind Turbines – Final Report. November 2010
- [11] IEC 61672-1, Electroacoustics – Sound level meters, 2002