

## HUOMIOITA TUULIVOIMAMELUN MALLINNUSOHJEESTA JA SEN SOVELTAMISESTA

Hannu Nykänen <sup>1</sup>, Denis Siponen <sup>2</sup>, Vesa Viljanen <sup>3</sup>, Tapio Lahti <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Rantamäentie 14  
37550 LEMPÄÄLÄ  
hannu.j.nykanen@outlook.com

<sup>2</sup> AkustiikkaSiponen  
Kivirannantie 19  
40270 PALOKKA  
denis.siponen@akustiikkasiponen.fi

<sup>3</sup> Noisere/Noisecontrol  
Betanankatu 1 B  
20810 TURKU  
vesa.viljanen@noisecontrol.fi

<sup>4</sup> TL Akustiikka  
Hiomotie 19  
00380 HELSINKI  
tapio.lahti@tlakustiikka.fi

### Tiivistelmä

Ympäristöministeriön laatima ohje □Tuulivoimaloiden melun mallintaminen□ (Ympäristöhallinnon ohjeita 2 | 2014) on ollut käytettävissä vuoden 2014 helmikuusta. Tuulivoima-alueiden suunnitteluun erikoistuneet konsultit ovat soveltaneet ohjetta lukuisten tuulivoima-alueiden suunnitteluun. Runsaan kolmen vuoden kokemuksen perusteella voidaan arvioida ohjeen käyttökelpoisuutta tuulivoima-alueiden suunnitteluun hyvine ja huonoine puolineen sekä puutteineen ja virheineen. Lisäksi voidaan arvioida sitä, miten konsultit ovat ohjetta soveltaneet.

Mallinnusohje on yhtenäistänyt tuulivoima-alueiden suunnittelua mm. lähtötietojen ilmoittamisen, mallinnuslaskennan parametrien valinnan ja pienitaajuisten melun vaikutusten arvioinnissa. Raportoiduissa melumallinnuksissa ei ole kuitenkaan ilmoitettu mallinnetun tuuliturbiinityypin melupäästötietoja ohjeen edellyttämällä tavalla. Näin ollen melupäästötiedoista ei ole yksiselitteisesti laskettavissa mallinnuksissa käytettävää melupäästön takuuarvoa. Mallinnusohjeistus vaatii lisäksi tarkennuksia. Ohjeesta puuttuu esimerkiksi äänen etenemisen epävarmuuden arvioinnin kuvaus, joten äänen etenemiseen liittyvää epävarmuutta ei mallinnuksissa ole yleensä huomioitu lainkaan. Äänen etenemisen arviointiin on ohjeessa lisäksi jäänyt epätarkkuutta maavaimennuksen huomioon ottamisessa.

Merkittävä puute ohjeistuksessa on tuulivoimaloiden häiritsevyyttä lisäävän tärkeimmän tekijän, merkityksellisen sykinnän (amplitudimodulaation) vaikutusten huomiotta jättäminen. Ohjeen ilmestymisen jälkeen on kuitenkin osoitettu Ruotsissa tehdyin mittauksin, että Suomeen verrattavissa ympäristöolosuhteissa merkitykselliset sykintää esiintyy jopa 30 % tuulivoimaloiden toiminta-ajasta. Merkityksellinen sykintä lisää olennaisesti tuulivoimamelun häiritsevyyttä ja sen esiintymisaikana häiritsevyyttä arvioitaessa laskettuun tai mitattuun melutasoon tulisi lisätä asianmukaiseksi katsottava korjaus (sanktio).

## 1 JOHDANTO

Ympäristöministeriön laatima ohje □Tuulivoimaloiden melun mallintaminen□ (Ympäristöhallinnon ohjeita 2 | 2014 [1]) on ollut käytettävissä vuoden 2014 helmikuusta. Ympäristöministeriön ohje perustuu VTT:n johtaman Tuulivoimamelu-projektin raporttiin □Ehdotus tuulivoimamelun mallinnuksen laskentalogiikkaan ja parametrien valintaan□ [2]. Tuulivoima-alueiden suunnitteluun erikoistuneet konsultit ovat soveltaneet ohjetta lukuisten tuulivoima-alueiden suunnitteluun. Runsaan kolmen vuoden kokemuksen perusteella voidaan arvioida ohjeen käyttökelpoisuutta tuulivoima-alueiden suunnitteluun hyvine ja huonoine puolineen sekä puutteineen ja virheineen. Lisäksi voidaan arvioida sitä, miten konsultit ovat ohjetta soveltaneet.

Huomattakoon, että tässä esitelmässä ei tarkastella lainkaan tuulivoimaloiden aiheuttamaa asuinrakennusten sisään syntyvää melutasoa eikä tuulivoimaloiden synnyttämän pienitaajuisen melun erityisproblematiikka rakennusten ulkopuolellakaan.

## 2 MALLINNUKSEN MELUPÄÄSTÖTIETOJEN JA ÄÄNEN ETENEMISEN EPÄVARMUUDEN HUOMIOIMINEN

Ympäristöministeriön mallinnusohjeessa todetaan [1, s. 8]:

□Melumallinnuksen epävarmuus sisällytetään laskennan lähtöarvona käytettyyn tuulivoimaloiden melupäästön lukuarvoon. Mallinnuksessa tuulivoimaloiden melupäästölle käytetään riittävän suurta varmuutta huomioiden melun mahdolliset erityispiirteet, jotta mallinnuksessa voidaan käyttää tähtäysarvona suunnittelu- tai tunnusarvoa ja äänen etenemisen ja ympäristöolosuhteiden mallinnukseen vakioituja sää- ja ympäristöolosuhdelukuarvoja. □

### 2.1 Mallinnettavien tuuliturbiinien melupäästö ja muut lähtötiedot

Ympäristöministeriön mallinnusohjeessa [1, s. 9] todetaan lisäksi (korostus lihavoimalla kirjoittajien):

□*Ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä* (YVA-menettely) ja *yksityiskohtaisessa kaavoituksessa* tuulivoimaloiden/tuulivoimalan koolle on ohjeen mukaisessa melumallinnuksessa ilmoitettava yksityiskohtaiset ja vaihtoehtoiset tiedot, kuten tuulivoimaloiden lukumäärä ja paikat, nimellisteho, korkeus, roottorin halkaisija, melupäästötiedot, joita voidaan käyttää tuulivoimaloiden melutason arviointiin mallintamalla. Arvioinnissa voidaan tarkastella useita tuulivoimalatyyppejä, lukumäärä- ja sijoitusvaihtoehtoja ja mallintaa eri vaihtoehtojen tuottamia melualueita. **Melumallinnustarkastelu perustuu tuulivoimaloiden melupäästön ylärajatarkasteluun.** Suunniteltujen tuulivoimaloiden melupäästölle on käytettävä valmistajan ilmoittamaa takuarvoa. □

Ja kuten edellä todettiin, ohjeen mukaan melupäästön lukuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus, jolloin äänen etenemislaskennassa voidaan käyttää ISO 9613-2 standardiin perustuvia vakioituja etenemiseen liittyviä sää- ja ympäristöolosuhdearvoja.

## 2.2 Äänen etenemisen epävarmuuden huomioiminen

Ympäristöministeriön mallinnusohjeen 2 | 2014 mukaan melupäästön lukuarvoon sisällytetään siis koko laskennan epävarmuus [1, s. 9] eli saman tuuliturbiinimallin yksittäisten turbiinien melupäästön vaihtelusta aiheutuva epävarmuus, melun mahdolliset erityispiirteet ja ISO 9613-2 standardin mukaan tehdyn äänen etenemislaskennan epävarmuus. Mallinnusohjeessa 2 | 2014 ei ole kuitenkaan kuvattu, miten etenemislaskennan epävarmuus määritetään eikä sitä, miten toisistaan riippumattomat epävarmuustekijät yhdistetään melupäästön lukuarvoon kokonaisepävarmuudeksi.

## 2.3 Melumallintajien käytäntö melupäästön takuuarvon ja äänen etenemisen epävarmuuden huomioimisessa

Ympäristöministeriön melumallinnusohje 2 | 2014 edellyttää, että jo kaavoitusvaiheessa tuuliturbiinityypin melupäästö (äänitehotaso) ilmoitetaan oktaavi- ja terssikaistoittain eriteltynä kahteen taulukkoon, joista toisessa ilmoitetaan melupäästön takuuarvon määrittämisen keskiarvo kaistoittain ja toisessa takuuarvon määrittämisen varmuusluku kaistoittain [1, s. 24]. Näistä tiedoista voidaan laskea tuuliturbiinin melupäästön (äänitehotason) kokonaisarvot eli keskiarvo ja takuuarvo. Raportoiduissa melumallinuksissa, esim. [3, 4, 5] ei kuitenkaan ole ilmoitettu mallinnetun tuuliturbiinityypin melupäästötietoja Ympäristöministeriön mallinnusohjeen edellyttämällä tavalla. Näin ollen melupäästötiedoista ei ole yksiselitteisesti laskettavissa mallinuksissa käytettävää melupäästön takuuarvoa.

Käytäntö on osoittanut, että tuulivoimalavalmistajat eivät ilmoita melupäästöasiakirjoissaan melupäästön takuuarvoa oktaavi- tai terssikaistoittain vaan kokonaistasona. Melumallinnukset tehdään kuitenkin joko oktaavi- tai terssikaistoittaisella laskennalla, joten mallintajat käyttävät mallinuksissaan joka tapauksessa jollain tavalla turbiinivalmistajien tiedoista johdettuja oktaavi- tai terssikaistoittaisia takuuarvoja. Takuuarvo lasketaan yhtälöllä  $L_{WA,d} = L_{WA} + K$ , jossa  $L_{WA}$  edustaa tuuliturbiinien melupäästön keskiarvoa ja  $K$  varmuuslukua. Joskus tuulivoimalavalmistajat kuitenkin ilmoittavat ainoastaan äänitehotason ilman takuu- tai varmuusarvoa. Tällöin tulisi soveltaa Ympäristöministeriön suositusta ja luodaan takuuarvo keinotekoisesti lisäämällä äänitehotasoon 2 dB varmuusarvo.

Äänen etenemisen liittyvää epävarmuutta ei mallinuksissa ole yleensä tarkasteltu lainkaan, joten on vähintäänkin epäselvää, mikä olisi Ympäristöministeriön mallinnusohjeen mukainen kokonaisepävarmuus ja miten se tulkitaan tuuliturbiinityypin melupäästön lukuarvoksi mallinlaskennassa.

## 2.4 Melupäästön ilmoittamiseen ja äänen etenemiseen liittyvien seikkojen korjaaminen

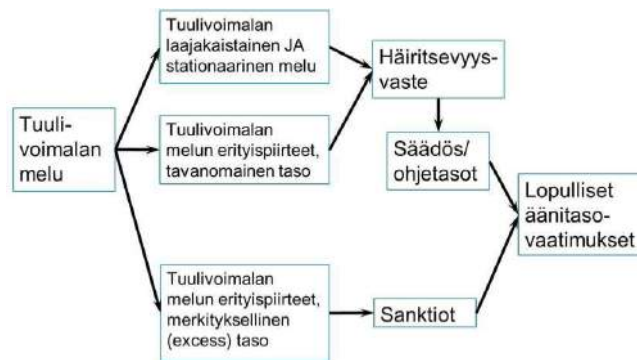
Mallinnusohje on yhtenäistänyt tuulivoima-alueiden suunnittelua mm. lähtötietojen ilmoittamisen, mallinlaskennan parametrien valinnan ja pienitaajuuden melun vaikutusten arvioinnissa. Mallintajilta tulisi kuitenkin selkeästi edellyttää tuuliturbiinien melupäästötietojen ilmoittamista ohjeen edellyttämällä tavalla, jotta melupäästötiedoista olisi yksiselitteisesti laskettavissa mallinuksissa käytettävä melupäästön lukuarvo.

Mm. Denis Siponen ([6]) ja Vesa Viljanen (esim. [7]) ovat tuoneet esiin äänen etenemisen epävarmuuden puuttumisen ja ehdottaneet +2 dB lisäystä melupäästön

takuuarvoon etenemisen epävarmuuden huomioimiseksi. Kokonaisepävarmuuden määrittäminen pitäisikin lisätä mallinnusohjeeseen ohjeen päivittämisen ja korjaamisen yhteydessä. Äänen etenemisen arviointiin on ohjeessa jäänyt myös epätarkkuutta maavaimennuksen huomioon ottamisessa.

### 3 TUULIVOIMALOIDEN MELUN HÄIRITSEVYYTTÄ LISÄÄVIEN TEKIJÖIDEN HUOMIOIMINEN

Tuulivoimalat tuottavat ääntä, joka voidaan kokea häiritseväksi meluksi ja asuin ympäristön viihtyisyyttä vähentäväksi tekijäksi. Tuulivoimalan melun erityispiirteiden todetaan tällöin saavuttavan merkityksellisen tason, ja altistuvan kohteen mitattuun melutasoon tulisi lisätä sanktio (Kuva 1).



Kuva 1. Periaatekuva tuulivoimalan tuottaman melun suhteesta äänitasovaatimuksiin [8, s. 4].

#### 3.1 Tuulivoimamelun impulssimaisuus ja äänestäisyys

Esimerkiksi Van den Berg on joissain aikaisimmissa tutkimuksissaan (esim. [9]) kutsunut yöaikana esiintyvää "thumping"-tyyppistä tuulivoimalan sykintää impulssimaiseksi. On kuitenkin huomattava, että tuulivoimaloiden tuottama melu ei mallinnusohjeen [1] mukaan ole käytännössä koskaan impulssimaista. Sykintä eli amplitudimodulaatio ei liipaise Nordtest NT ACOU 112 -menetelmässä [10] määriteltyä impulssimaisuuden kynnystä ja mallinnusohjeen mukaan tuulivoimamelun impulssimaisuutta pitää arvioida viime kädessä NT ACOU 112 menetelmän mukaisesti.

Tuulivoimalan tuottama melu voi poikkeustapauksissa sisältää äänestäisiä (tonaalisia) komponentteja. Erityisesti vanhemmissa tuuliturbiineissa, joissa koneiston ääni on lähellä lapojen tuottaman aerodynaamisen äänen tasoa, äänestäiset komponentit voivat olla merkittävin häiritsevän melun tyyppi. Myös prototyypivaiheessa olevat tuuliturbiinit ovat joskus tuottaneet merkittäviä äänestäisiä komponentteja. Tonin toteaa kuitenkin vuonna 2012 julkaistussa artikkelissaan [11], että äänestäiset komponentit eivät ole ongelma moderneissa turbiineissa ja perustaa näkemyksensä modernien tuuliturbiinien valmistajien valmistajanvakuutuksiin ("numerous test certificates").

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että konsulttien melumallinnuksissa lähtötiedoissa ei yleensä esiinny mainintoja melun häiritsevyyttä lisäävistä tekijöistä. Tai jos turbiinivalmistaja on ilmoittanut melupäästön sisältävän mahdollisen äänesmäisen komponentin, päivitetyn mallinnuksen lähtötiedoissa melupäästön terssikaistatiedot on muutettu siten, että äänesmäisyyttä ei ole enää syytä epäillä, esim, [4].

### 3.2 Tuulivoimamelun amplitudimodulaatio (sykkivä luonne)

Merkittävä puute Ympäristöministeriön meluohjeistuksessa on tuulivoimaloiden häiritsevyyttä lisäävän tärkeimmän tekijän, merkityksellisen sykkinnän (amplitudimodulaation) vaikutusten huomiotta jättäminen. Ohjeen ilmestymisen jälkeen on kuitenkin osoitettu Ruotsissa tehdyin mittauksin [12], että Suomeen verrattavissa ympäristöolosuhteissa merkityksellisetä sykintää esiintyy jopa 30 % tuulivoimaloiden toiminta-ajasta. Merkityksellinen sykintä lisää olennaisesti tuulivoimamelun häiritsevyyttä ja sen esiintymisaikana häiritsevyyttä arvioitaessa laskettuun tai mitattuun melutasoon tulisi lisätä sopivaksi katsottava korjaus (sanktio).

Tuulivoimalan tuottama amplitudimodulaatio voidaan jakaa kahteen (tai oikeastaan kolmeen) eri tyyppiin [8, s. 11-12, 13]:

□Swishing□-tyyppinen amplitudimodulaatio syntyy lapojen □normaalista□pyörimisestä ja se esiintyy kaikissa voimaloissa koko ajan. Tämän modulaatiotyypin suuntaavuus on pääasiassa pyörimistason suuntainen eli se esiintyy voimakkaimmin tuulen suuntaan nähden 90 asteen kulmassa. Tuulivoimaloiden melusta annetun asetuksen enimmäisarvoissa olevan 5 dB tiukennuksen muuhun ympäristömeluun nähden voidaan katsoa huomioivan tämän modulaatiotyypin, joten tämän modulaation tapauksessa korjausta ei käytetä.

□Thumping□-tyyppinen amplitudimodulaatio on erityisen häiritsevä, se syntyy tietyissä sääolosuhteissa (stabiili alailmakehä illalla ja yöllä) yksittäisen lavan voimakkaan kuormitusvaihtelun ja yläasennossa tapahtuvan lavan sakkauksen takia yhden kierroksen aikana kussakin lavassa ja etenee ala- ja ylävirtaan (myötä- ja vastatuuleen). Mikäli lavan taipumista ja sakkausta yhden kierroksen aikana ei ole estetty yksittäisen lavan lapakulman säädöllä, merkityksellinen sykintä syntyy hyvin todennäköisesti lapakulmasäätöisissä turbiinityypeissä, ja sitä voitaisiin pitää syynä mahdolliseen, esim. +5 dB suuruiseen korjaukseen.

Kolmas amplitudimodulaation aiheuttaja voi olla tuulivoima-alueen turbiinien synkroninen pyöriminen. Tästä amplitudimodulaatiotyypistä on vähän tieteellistä näyttöä, mutta kenttäkokemusten mukaan turbiinien keskinäisvaikutus saattaa edellä kuvatun mekanismin ohella olla osasy merkitykselliseen sykintään.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaikka Ympäristöministeriön tuulivoimaloiden melun mallinnusohje on yhtenäistänyt tuulivoima-alueiden suunnittelua mm. lähtötietojen ilmoittamisen, mallinnuslaskennan parametrien valinnan ja pienitaajuisen melun vaikutusten arvioinnissa, on tärkein johtopäätös mallinnusohjeen runsaan kolmen vuoden soveltamisen jälkeen se, että mallinnusohje tulisi mitä pikaisemmin päivittää. Mallinnusohjeistukseen on jäänyt epämääräisyyksiä ja puutteita, jotka tulisi selvittää ja korjata päivitettyyn versioon. Mallinnuskonsulteilta tulisi lisäksi edellyttää tuuliturbiinien melupäästötietojen selkeää

ilmoittamista ohjeen edellyttämällä tavalla, jotta melupäästötiedoista olisi yksiselitteisesti laskettavissa mallinuksissa käytettävä melupäästön takuarvo. Päivitettävään ohjeeseen tulisi lisätä äänen etenemisen epävarmuuden kuvaus ja ohjeet sen sisällyttämiseksi joko melupäästöön tai mallilaskentaan sekä korjata maavaimennuksen huomioon ottamista.

### VIITTEET

- [1] Ympäristöministeriö. Helsinki 2014. Tuulivoimaloiden melun mallintaminen. Ympäristöhallinnon ohjeita 2 | 2014. 53 s.
- [2] Nykänen, H., Uosukainen, S., Siponen, D., Di Napoli, C., Yli-Kätkä, V-M. & Ristolainen, J.: Ehdotus tuulivoimamelun mallinuksen laskentalogiikkaan ja parametrien valintaan. Tampere 2013. Teknologian tutkimuskeskus VTT, Tutkimusraportti VTT-R-04565-13. 52 s. + liitteet 16 s.
- [3] FCG SUUNNITTELU JA TEKNIikka OY. Helsinki 2016. Merkkikallion tuulivoimapuisto. Melu- ja varjostusmallinnukset V136 x 15 x HH172. Raportti P22555. 13 s. + liitteet 95 s.
- [4] Etha Wind Oy Ab. Espoo 2014. Meluraportti, Honkamäki. Honkamäki\_CG140320-Rev1.3-meluraportti. 9 s.
- [5] RAMBOLL. Lahti 2016. Louhun ja Möksyn tuulivoimapuistot, Alajärvi. Melumallinnus tuulivoimaloiden rakennusluvahakemuksia varten. Raportti 1510026613-001. 9 s. + liitteet 8 s.
- [6] Siponen, D.: Vastaus Ympäristöministeriön kyselyyn tuulivoimaloiden melupäästön takuarvon käyttämisestä meluselvityksissä, 27.6.2016. 5 s.
- [7] Viljanen, V.: Melumallinnustuloksien vertailu ja käytönajan mittaustuloksia, 15.11.2015, Salon Märnynummen tuulivoimalat 3 kpl Gamesa 5 MW, raportti NC/2015/61-S2. 10 s.
- [8] Nykänen, H., Uosukainen, S., Antila, M. & Siponen, D.: Tuulivoimalan meluvaikutukset: Häiritsevyysmittaristo ja sen käyttö. Tampere 2014. Teknologian tutkimuskeskus VTT, Tutkimusraportti VTT-R-04392-14. 21 s.
- [9] 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.
- [10] *Nordtest (2002)*. Nordtest Method NT ACOU 112, Acoustics: prominence of impulsive sounds and for adjustment of  $L_{Aeq}$ . *Espoo, Finland*.
- [11] Tonin, R.: (2012) Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoustics Australia* 40(1): 20 - 27.
- [12] Larsson, C. & 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.
- [13] Temple Group Ltd.: (2013) Summary of Research into Amplitude Modulation of Aerodynamic Noise from Wind Turbine. Report for RenewableUK. 17 p.