



## METSÄHALLITUS LAATUMAA

Kivivaara-Peuravaaran tuulivoimahankkeen meluselvitys kaavaa varten

16UEC0144

Copyright © Pöyry Finland Oy

Kaikki oikeudet pidätetään Tätä asiakirjaa tai osaa siitä ei saa kopioida tai jäljentää missään muodossa ilman Pöyry Finland Oy:n antamaa kirjallista lupaa.

Copyright © Pöyry Finland Oy

**Sisältö**

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>YLEISTÄ</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1      | Ympäristömelu  | 4         |
| 1.2      | Tuulivoimamelu   | 4         |
| <b>2</b> | <b>LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT</b>                           | <b>6</b>  |
| 2.1      | Digitaalikärtta-aineisto                               | 6         |
| 2.2      | Mallinnetut turbiinityypit                             | 6         |
| 2.3      | Melumallinnus ja laskentaparametrit                    | 6         |
| 2.4      | Sovellettavat vertailuohjeet                           | 7         |
| <b>3</b> | <b>LASKENTATULOKSET</b>                                | <b>7</b>  |
| 3.1      | Pientaajuinen melu                                     | 8         |
| <b>4</b> | <b>MELUVAIKUTUKSET</b>                                 | <b>9</b>  |
| 4.1      | Melun vaikutukset alueen äänimaisemaan                 | 9         |
| 4.2      | Haitallisten vaikutusten ehkäiseminen ja lieventäminen | 10        |
| 4.3      | Vaikutusten seuranta                                   | 10        |
| <b>5</b> | <b>YHTEENVETO</b>                                      | <b>10</b> |
|          | <b>VIITTEET</b>  | <b>11</b> |

**Liitteet**

Liite 1 Melumallinnuskartta

**Lyhenteet**

|           |  |
|-----------|--|
| $L_{Aeq}$ | A-taajuuspainotettu ekvivalenttinen äänitaso             |
| $L_{WA}$  | A-taajuuspainotettu äänilähteen äänitehotaso             |
| $L_{WAd}$ | A-taajuuspainotettu äänilähteen äänitehotason tunnusarvo |

## 1 YLEISTÄ

Metsähallitus Laatumaa suunnittelee Hyrynsalmella ja Suomussalmella sijaitsevalle Kivivaara–Peuravaaran alueelle tuulivoimapuistoa. Tuulivoimapuistoa suunnitellaan 42:lle noin 3 MW:n yksikkötehoiselle tuulivoimalaitokselle, joiden nimellisteho on yhteensä noin 126 MW. Tässä raportissa käsitellään yhden hankevaihtoehdon aiheuttaman melun laskennallista leviämistä alueen ympäristöön. Vertailuarvoina käytetään Ympäristöministeriön tuulivoiman suunnitteluoppaan ympäristömelun ohjearvoja./1/

### 1.1 Ympäristömelu

Ääni on aaltoliikettä, joka tarvitsee väliaineen välittyäkseen eteenpäin. Ilmassa äänellä on nopeus, joka on riippuvainen ilman lämpötilasta. Eri väliaineissa ääniaalto kulkee eri nopeuksilla väliaineen ominaisuuksista riippuen. Normaali ympäristömelu sisältää useista kohteista peräisin olevaa yhtäaikaista ääntä, jossa äänen taajuudet ja aallonpituudet ovat jatkuvassa muutoksessa.

Melu on subjektiivinen käsite, jolla viitataan äänen negatiivisiin vaikutuksiin. Sitä käytetään puhuttaessa ei toivotusta äänestä, josta seuraa ihmisille haittaa ja jonka havaitsemisessa kuulijan omilla tuntemuksilla ja äänenerotuskyvyllä on suuri merkitys. Melua voidaan mitata sen fysikaalisten ominaisuuksien perusteella.

Ympäristömelu koostuu ihmisen toiminnan aiheuttamasta melusta, joka vaihtelee ajan ja paikan mukaan. Äänen (melun) voimakkuutta mitataan käyttäen logaritmisista desibeliasteikkoa (dB), jossa äänenpaineelle (eli hyvin pienelle paineenmuutokselle ilmassa) käytetään referenssipainetta 20 µPa ilmalle sekä 1 µPa muille aineille. Tällöin 1 Pa paineenmuutos ilmassa vastaa noin 94 dB:ä.

Kuuloaistin herkkyys vaihtelee eri taajuisille äänille, jolloin vaihtelevat myös melun haitallisuus, häiritsevyyttä sekä kiusallisuus. Nämä tekijät on otettu huomioon äänen taajuuskomponentteja painottamalla. Yleisin käytetty taajuuspainotus on A-painotus, joka perustuu kuuloaistin taajuusvasteen mallintamiseen ja ilmaistaan usein A-kirjaimella dimension perässä, esimerkiksi dB(A).

Melun ekvivalenttitaso (symboli Leq) tarkoittaa samanarvoista jatkuvaa äänitasoa kuin vastaavan äänienergian omaava vaihteleva äänitaso. Koska ääni käsitellään logaritmisena suureena, on hetkellisesti korkeammilla äänitasoilla suhteellisen suuri vaikutus ekvivalenttiseen melutasoon. Teollisuusmelussa hetkellisvaihtelut ovat usein varsin lähellä myös ekvivalenttista arvoa, mikäli toiminnasta ei aiheudu impulssimaisia melutapahtumia.

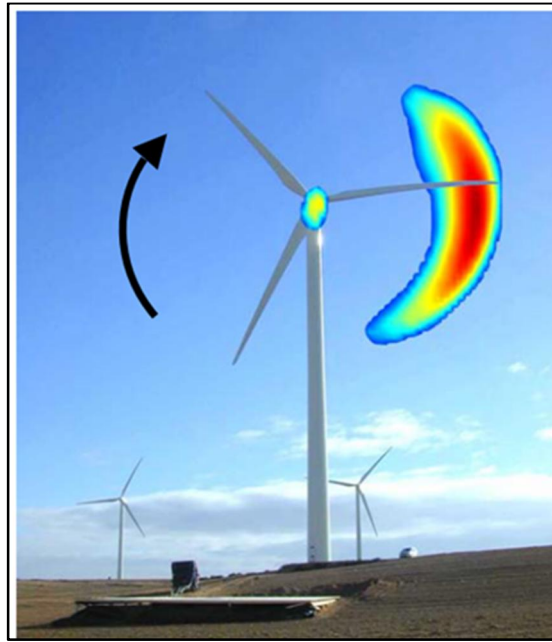
### 1.2 Tuulivoimamelu

Tuulivoimalaitosten käyntiäänäni koostuu pääosin laajakaistaisesta lapojen aerodynaamisesta melusta sekä hieman kapeakaistaisemmasta sähköntuotantokoneiston yksittäisten osien aiheuttamasta melusta (muun muassa vaihteisto, generaattori sekä jäähdytysjärjestelmät). Aerodynaaminen melu on hallitsevin (noin 60–70 prosenttia kokonaisäänienergiasta) lapojen suuren vaikutuspinta-alan ja jaksollisen niin sanotun amplitudimoduloituneen äänen vuoksi, jossa äänen voimakkuus vaihtelee ajallisesti lapojen pyörimistaajuuden mukaan.

Amplitudimodulaatio (myöhemmin ”AM”) voidaan havaita sekä aerodynaamiselle virtausmelulle että myös koneiston kapeakaistaisille komponenteille. Yleisesti tuuli-

voimalan melun taajuusjakauma on painottunut pientaajuisen melun alueelle 50–500 Hz, mutta A-taajuuspainotuksen jälkeen merkittävimmät taajuudet ovat 500–1500 Hz:n välissä.

Aerodynaaminen melu kuullaan usein kohinamaisena äänenä, jossa on jaksollinen rytmii. Likainen lavanpinta lisää rosoisuutta, mistä seuraa turbulenssin ja siten myös äänitason nousua. Pientaajuisen melun osuutta aerodynaamisessa melussa lisäävät tulovirtauksen turbulenssi-ilmiiöt, siipivirtauksen irtoamistilanteet (sakkaus) sekä ilmakehän äänen leviämisiilmiiöt (ilmamassan impedanssi etäisyyden kasvaessa). Aerodynaaminen melu voi myös aiheuttaa viheltävää ääntä esimerkiksi siipivaurioiden yhteydessä.



**Kuva 1. Tuulivoimalan lavan suhahtavan äänen (amplitudimodulaatio) emittoituminen alhaalla olevaan kuuntelijaan nähden. /3/**

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen etupuolella suhteessa voimalan torniin. Pyörivän siivistön äänitason on ylä- ja alatuulen puolilla suurempi kuin sivusta käsin katsottuna samalla etäisyydellä /3/. Lisäksi voimalan lähtöäänitaso on suoraan tuulennopeudesta riippuvainen siten, että alhaisilla tuulilla ja lähellä käyntiinlähtönnopeutta lähtöäänitaso on usein noin 10–15 dB alhaisempi kuin nimellisteholla. Maksimi äänitehotaso (Lw) saavutetaan nimellistehon tuulinopeuksilla (yleisesti nopeus napakorkeudella > yhdeksän metriä sekunnissa) ennen siipikulmasäädön käynnistymistä, mikä yleensä tasoittaa äänitehotason nousun tuulen nopeuden edelleen kasvaessa. Siiven kärkinopeus on moderneissa voimaloissa maksimissaan noin 75 m/s. Tulovirtauksen turbulenssi sekä viereisten tuulivoimalaitosten virtausvana voivat lisätä aerodynaamista melua epäedullisen tulovirtauksen kohtauskulman vuoksi.

Taustamelu ja tuulen aiheuttama aallokko- ja puustokohina peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänet ovat ajallisesti vaihtelevia. Niiden voimakkuus on sitä parempi, mitä lähempänä peittoäänen taajuusjakauma on vastaavaa tuuliturbiinin äänijakaumaa /4/. Vastaavasti tuulivoimamelun mahdollinen amplitudimodulaatio voi heikentää taustamelun peittovaikutusta ja siten kuulua myös taustakohinan läpi. Näin erityisesti tilanteissa, joissa alailmakehän stabiilisuus kasvaa, joka osaltaan vähentää kasvillisuuden ja aallokon kohinaa./5/

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasoa voidaan kontrolloida erillisellä optimointisäädöllä, jonka avulla kellonajan, tuulensuunnan ja tuulennopeuden mukaan säädetään lapakulmaa haluttuun pyörimisnopeuteen ja melutasoon. Tällä säädöllä on kuitenkin vaikutuksia voimalan sen hetkiseen tuotantotehoon.

## 2 LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT

Laskennan lähtötiedot on koottu asiakkaan lähettämästä datasta, digitaaliaineistosta, sekä kirjallisuudesta.

### 2.1 Digitaalikartta-aineisto

Melumallinnus on suoritettu digitaalikartalle, jonka topografian korkeusväli on 2.5 metriä. Kartassa on kuvattu tuulivoimaloiden lisäksi maaston muodot, rakennusten ja teiden paikkatiedot, sekä vesiraja.

### 2.2 Mallinnetut turbiinityypit

Melumallinnuksessa käytettiin yhtä turbiinityyppiä, jonka oletetaan vastaavan 3MW:n voimalan äänitehotasoa. Tuulipuiston toteutusvaihtoehtoja on yksi, joka sisältää neljäkymmentäkaksi voimalaa tornikorkeudella 150 metriä.

Turbiinien äänispektri terssikaistalla (1/3 oktaavikaistalla) on saatu käyttäen valmistajan arvioimaa melupäästön takuuarvoa  $L_{WA}$  /7/. Tiedossa ei ole, että mallinnuksessa käytettävälle turbiinille olisi taattu melun amplitudimodulaatiota. Mallinnetulle voimalalle ei ole myöskään annettu takuuna erityisiä melun kapeakaistaisia ominaisuuksia ( $> +5$  dB). Alla on esitetty mallinnuksessa käytettyjen voimalamallien oktaavikaistan painottamattomia taajuusarvoja.

**Taulukko 1. Mallinnettujen tuulivoimalaitosten äänitehotaso,  $L_{WA}$**

| Voimalatyyppi                       | Oktaavikaistat, Hz |     |     |     |     |      |      |      |      |              |
|-------------------------------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|--------------|
|                                     | 31,5               | 63  | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | $L_{WA}$     |
| <b>V112, 3 MW, <math>L_w</math></b> | 116                | 113 | 110 | 106 | 104 | 103  | 96   | 85   | 82   | <b>106.5</b> |

### 2.3 Melumallinnus ja laskentaparametrit

Melun leviäminen maastoon on havainnollistettu käyttäen tietokoneavusteista melulaskentaohjelmistoa CadnaA 4.3, missä äänilähteestä lähtevä ääniaalto lasketaan digitaaliseen karttapohjaan äänenpaineeksi immissio- eli vastaanottopisteessä ray-tracing -menetelmällä. Mallissa otetaan huomioon äänen geometrinen leviämismuutuminen, maaston korkeuserot, rakennukset sekä maanpinnan ja ilmakehän melun vaimennusvaikutukset. Melumallinnus piirtää keskiäänitasokäyrät 5 dB:n välein valituilla lähtöarvoparametreilla. Laskentaparametrit on esitetty taulukossa 2 ja ne vastaavat Ympäristöministeriön meluhankkeen teknisen ryhmän ehdotusta tuulivoimahankkeiden melumallinnusparametreiksi (laskentavaihe 1) /2/. Laskennan epävarmuus on nyt sisällytetty tuulivoimalan äänen melupäästöarvoon, sillä laskennassa on hyödynnetty voimalavalmistajan arvioimaa takuuarvoa.

Alueen topografia on hyvin kumpuilevaa ja ohjeen mukaan yli 40 m:n korkeuserot tuulivoimalan ja immissiopisteiden maanpinnan korkeuden välillä katsotaan sellaiseksi, että sillä olisi vaikutusta laskentaparametreihin.

**Taulukko 2. Laskentamallien parametrit**

| Lähtötieto                        | Parametrit   |
|-----------------------------------|--|
| Mallinnusalgoritmit               | Peruslaskennat: Teollisuusmelun laskentamalli ISO 9613-2<br>Pientaajuinen melulaskenta: DSO 1284               |
| Sääolosuhteet                     | Ilman lämpötila 15 °C, ilmanpaine 101,325 kPa, ilman suhteellinen kosteus 70 prosenttia                        |
| Laskentaverkko                    | Laskentapiste viisi kertaa viiden metrin välein laskentaverkolla neljän metrin korkeudella seuraten maanpintaa |
| Maanpinnan akustinen kovuus       | ISO 9613-2, G = 0 maa-alueet, G = 0 vesialueet sekä laajat kallioalueet  |
| Objektien heijastuvuus            | Reseptorilaskennat: arvolla 0 (ei heijastusta)   |
| Jaksollisuus, amplitudimodulaatio | Ei huomioida   |
| Kapeakaistaisuus                  | Ei huomioida   |

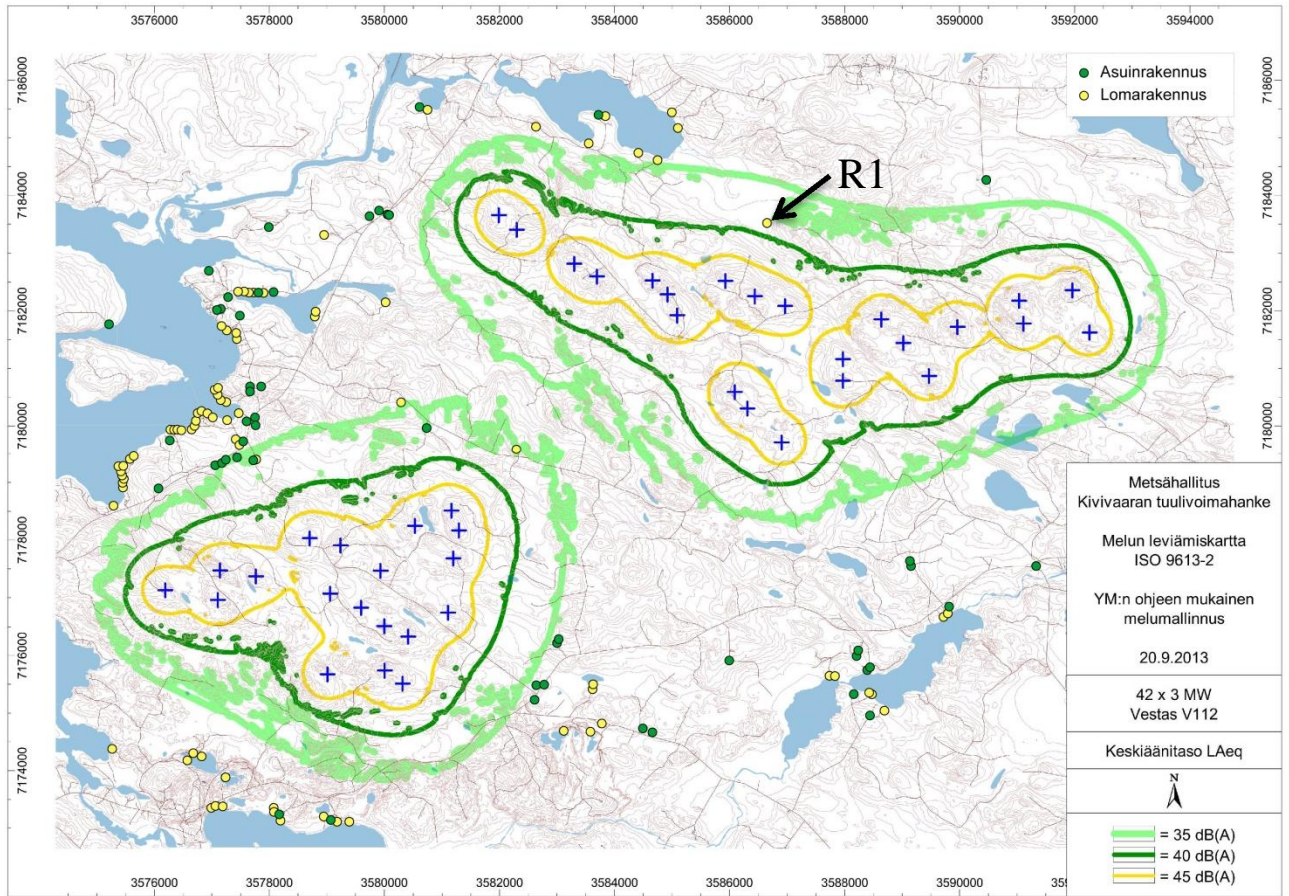
**2.4 Sovellettavat vertailuohjeet**

Ympäristöministeriö on esittänyt Tuulivoiman suunnittelua koskevassa dokumentissa tuulipuistoja koskeviksi suositusohjeiksi 45 dB(A) klo 07–22 ja 40 dB(A) klo 22–07 ja taajaman ulkopuolisille loma-asuinrakennuksille 40 dB(A) päivällä ja 35 dB(A) yöllä. /1/ Esitetyistä ohjeista jälkimmäiset ovat määrääviä vertailuarvoja yöajan tyypillisesti korkeamman tuulisuuden vuoksi (muun muassa usein esiintyvä stabiili ilmakehä). Lisäksi ohjeessa viitataan asumisterveysohjeen Leq, 1h ohjearvoihin pientaajuiselle melulle sisätiloissa terssikaistoittain taajuuksilla 20–200 Hz.

**3 LASKENTATULOKSET**

Topografiakartalle laskettu melun leviäminen esitetään värillisillä käyrillä yhdelle hankesuunnitelmalle alla olevassa kartassa. Erillinen pientaajuisen melun laskenta tuloksineen lähimmälle loma-asuinkohteelle on esitetty kaaviokuvin kappaleessa 3.1.

Hankevaihtoehdossa on mallinnettu neljäkymmentäkaksi kolmen megawatin tuulivoimalaa hankkeen kaavasunnitelman mukaisille paikoille.



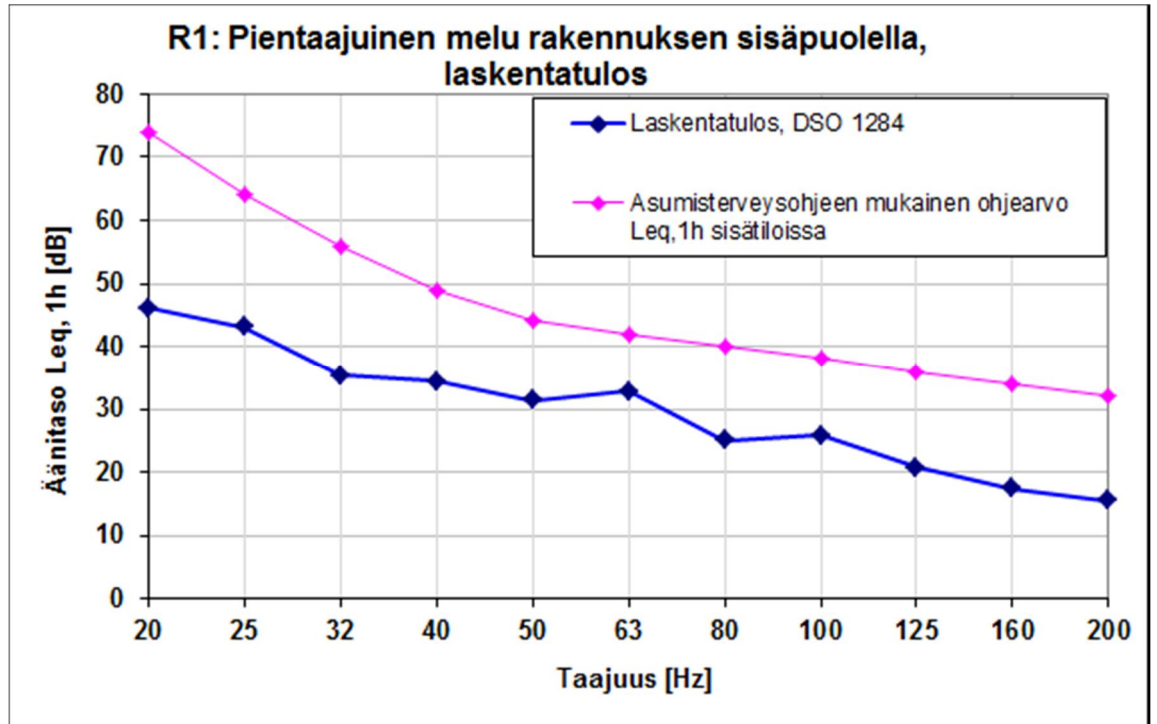
**Kuva 2. Melun leviäminen Vestas V112 3MW:n hankevaihtoehdossa**

Melumallinnuslaskennan mukaan Vestas V112 3MW:n tuulivoimalavaihtoehdolla asuinkiinteistöjen osalta 40 dB(A):n yöajan ohjearvo ei ylity missään kohteessa. 35 dB(A):n yöajan ohjearvo loma-asuinkiinteistöille ylittyy kolmessa kohteessa sekä on ohjearvolla kahdessa kohteessa. Lähimmässä kohteessa, joka on karttaan merkitty nuolella ”R1”, laskennallinen keskiäänitaso on noin 39 dB(A). Muiden loma-asuinkiinteistöjen kohdalla, jossa melu ylittää ko. kohteen yöajan ohjearvon, on laskennallinen melutaso 36 dB(A).

### 3.1 Pientaajuinen melu

Tuulivoimalaitosten pientaajuisen melun laskenta suoritettiin käyttäen laitevalmistajan (Vestas V112) painottamattomia äänitehotason 1/3 oktaavikaistatietoja. /6/ Laskenta suoritettiin Pöyryn kehittämällä ohjelmalla ohjeen DSO 1284 laskentarutiinin mukaisesti /1/, /2/, /6/. Tulokuvaaja Vestaksen hankevaihtoehdon osalta lähimmässä loma-asuinkohteessa R1 on esitetty alla.





**Kuva 3. Pientaajuisen melun taso lähimmän loma-asuinrakennuksen sisätiloissa hankevaihtoehdossa Vestas V112 3 MW DSO 1284 mukaan laskettuna**

Vestaksen V112 hankevaihtoehdon osalta laskentatulokset viittaavat siihen, että pientaajuinen sisämelutaso on annettujen ohjearvojen alapuolella. Pienin ero on taajuuskaistalla 63 Hz (9 dB). Jonkin verran epävarmuutta tuloksiin aiheuttaa kohteen ilmastieristävyyden todellinen arvo, joka voi myös vaihdella sisätilan paikan mukaan huoneen huonetilan resonanssitaajuuksien vuoksi. Ilman DSO:n ohjeen mukaista ilmastieristävyyden arvoa, pientaajuinen melu voi olla kuuluvaa ulkona alkaen taajuudesta  $\approx 50$  Hz.

## 4 MELUVAIKUTUKSET

### 4.1 Melun vaikutukset alueen äänimaisemaan

Tuulivoimalaitosten melu voi muuttaa alueen äänimaisemaa, mutta muutokset ovat ajallisesti ja paikallisesti vaihtelevia. Ajallisesti suurin muutos voidaan havaita melulle altistuvien kohteiden luona tilastollisen myötätuulen puolella eli hankealueen pohjois- ja itäosissa sekä lähempänä voimaloita meluvyöhykkeiden sisällä. Melun erottuminen on hyvin pitkälti säätilasta riippuvaista. Melun erottumista lisääviä säättekijöitä ovat stabiili ilta- ja yöajan alailmakehä, kostea säätila ja voimakas alailmakehän inversio. Melu voidaan havaita paremmin myötätuuliolosuhteissa ja heikommin (tai ei lainkaan) vastatuuliolosuhteissa. Mitä kauempana laitoksista ollaan, sitä enemmän ilmakehän absorptio vaimentaa korkeita taajuuksia jättäen jäljelle vain matalimpia tuulivoimamelun taajuuksia. Lisäksi tuulivoimamelun amplitudimodulaatio (jaksoittainen äänitason vaihtelu) voi erottua taustakohinan läpi ulkona kuunneltaessa. Uudet voimalat ovat kuitenkin hitaasti pyöriviä siipien kärkivälin merkittävän pituuden vuoksi, mistä syystä modulaation erottuminen voi kohdistua enemmän vain kovemmille tuulenopeuksille. Tällöin etenkin aerodynaaminen melu voi kuulostaa matalataajuiselta lentomelulta ("kuminaa"), jolla on jatkuvasti vaihteleva, mutta yleisesti varsin matala äänitaso.

#### 4.2 Haitallisten vaikutusten ehkäiseminen ja lieventäminen

Tuulivoimalaitoksia on mahdollista ajaa meluoptimoidulla ajolla, jolloin esimerkiksi roottorin pyörimisnopeutta rajoitetaan kovemmilla tuulennopeuksilla siiven lapakulmaa säätämällä. Säätöparametreiksi voidaan tyypillisesti valita tuulennopeus, tuulensuunta ja kellonaika. Meluoptimoitu ajo rajoittaa vastaavasti voimalan äänen tuottoa eli äänitehotasoa. Muuta merkittävää meluntorjuntaa ei voida laitoksille suorittaa, ellei sitten voimalaa pysäytetä kokonaan. Esimerkiksi tässä selvityksessä käytettyjen turbiinien laitevalmistajien meluoptimointiajo vähentää äänitasoa korkeimman taatun äänitason osalta noin 2-6 dB yhden voimalan osalta.

#### 4.3 Vaikutusten seuranta

Rakentamisen jälkeen meluvaikutusten seuranta voidaan suorittaa melumittauksin, joista ohjeistetaan myös ympäristöministeriön tulevassa oppaassa. Mittauksin voidaan varsin luotettavasti todeta melutasot, melun luonne sekä tehdä vertailuja mallinnettuihin melutasoihin ja annettuihin melun suunnittelun ohjearvoihin.

### 5 YHTEENVETO

Hankesuunnitelmien mukaiset tuulivoimamelun leviämisyöhykkeet mallinnettiin tietokoneavusteisesti digitaalikartta-aineistoon noudattaen YM:n melumallinnushankkeen teknisen työryhmän suosituksia (VTT raportti, /2/). Laskentatulosten perusteella voimalamallin takuuarvon mukaisilla äänipäästöarvoilla laskettu 40 dB(A):n keskiäänitaso asuinrakennuksille ei ylitä kaavas suunnitelman vaihtoehdossa. 35 dB(A):n yöhyke leviää sen sijaan kolmen loma-asuinkiinteistön yli hankealueen pohjois- ja länsipuolilla sekä on kahdessa kohteessa ohjearvolla. Lähimmässä loma-asuinkiinteistössä laskennallinen keskiäänitaso on noin 39 dB(A). Muiden loma-asuinkiinteistöjen kohdalla, jossa melu ylittää ko. kohteen yöajan ohjearvon 35 dB(A), on laskennallinen melutaso 36 dB(A).

Laskennassa käytetyn yhden tuulivoimalamallin osalta pientaajuinen melu ei ylitä asumisterveysohjeen mukaisia sisätilojen melun ohjearvoja. Pientaajuinen melu voi olla kuuluvaa ulkotiloissa alkaen taajuudesta  $\approx 50$  Hz. Tuulivoimalaitosten melu voi muuttaa alueen äänimaisemaa, mutta muutokset ovat ajallisesti ja paikallisesti vaihtelevia. Ajallisesti suurin muutos voidaan havaita melulle altistuvien kohteiden luona tilastollisen myötätuulen puolella eli hankealueen pohjois- ja itäosissa.

Tuulivoimalaitoksia on mahdollista ajaa meluoptimoidulla ajolla, jolloin esimerkiksi roottorin pyörimisnopeutta rajoitetaan kovemmilla tuulennopeuksilla siiven lapakulmaa säätämällä. Rakentamisen jälkeen meluvaikutusten seuranta voidaan suorittaa melumittauksin, joista ohjeistetaan myös ympäristöministeriön tulevassa oppaassa.

Pöyry Finland Oy, Energia, Tehokkuus- ja mittauspalvelut



Ilkka Heikkilä

Johtaja

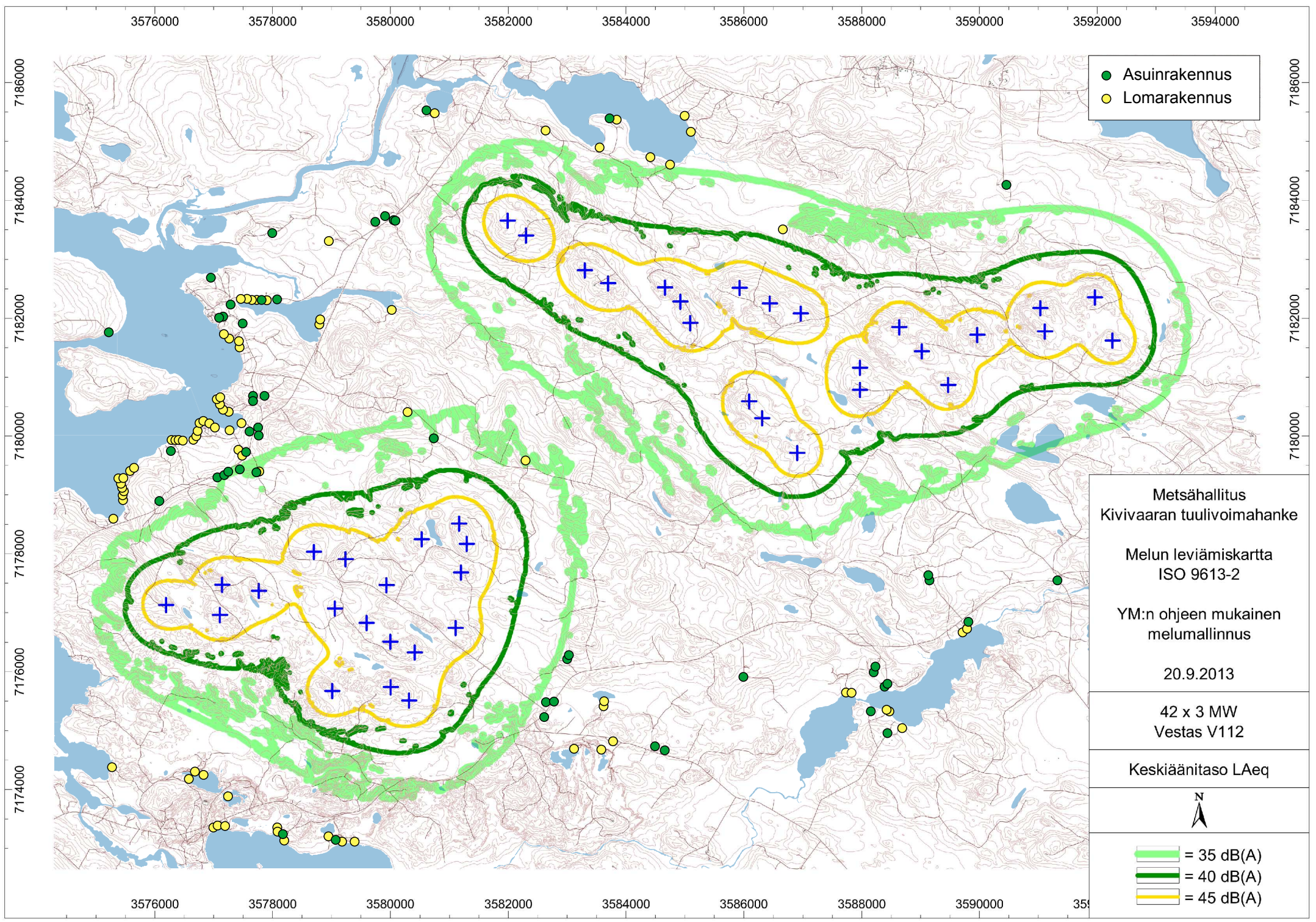


Carlo Di Napoli

Johtava asiantuntija, teollisuusmelu

**VIITTEET**

- /1/ Tuulivoimarakentamisen ohjeita. Ympäristöhallinnon ohjoita 4/2012. Helsinki 2012.
- /2/ Nykänen, H. Ehdotus tuulivoimamelun mallinnuksenlaskentalogiikkaan ja parametrien valintaan. VTT tutkimusraportti, VTT-R-04565-13. Tampere 2013.
- /3/ Oerlemans, S. Schepers, J.G. “Prediction of wind turbine noise directivity and swish”, *Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise*, Aalborg, Denmark, (2009)
- /4/ Nelson, D.A. Perceived loudness of wind turbine noise in the presence of ambient sound
- /5/ Uosukainen, S. Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys. VTT tiedotteita 2529, Helsinki 2010
- /6/ Moller, C. Pedersen, C.S. Low frequency noise from large wind turbines. *Acoustical Society of America* Vol 129, No 6, June 2010
- /7/ IEC 61400-11, v2.1. Wind turbine generator systems, Part 11: Acoustic noise measurement techniques.



- Asuinrakennus
- Lomarakennus

**Metsähallitus  
Kivivaaran tuulivoimahanke**

Melun leviämiskartta  
ISO 9613-2

YM:n ohjeen mukainen  
melumallinnus

20.9.2013

42 x 3 MW  
Vestas V112

Keskiäänitaso LAeq



- ▬ = 35 dB(A)
- ▬ = 40 dB(A)
- ▬ = 45 dB(A)