



Sitowise Oy

**Nikaran tuulivoimapuiston meluselvitys**

101025627-001, 21.05.2024

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Juulianna Lähteinen

E-mail  
[juulianna.lahteinen@afry.com](mailto:juulianna.lahteinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
001

Asiakas  
Sitowise Oy  
Ville Alasalmi, Timo Huhtinen

Päivämäärä  
21/05/2024

Projektinumero  
101025627-001

Raportin tila  
LUONNOS

## Nikaran tuulivoimapuiston meluselvitys

## Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laatiija                                                | Pvm/Tarkastaja                                     | Merkinnät/Muutokset                           |
|--------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 000    | 29.09.2023/<br>Helmi Uusitalo,<br>Technical Consultant      | 28.09.2023/<br>Mika Laitinen,<br>Senior Consultant | Alkuperäinen<br>(101023118-001.000)           |
| 001    | 21.05.2024/<br>Juulianna Lähteinen,<br>Technical Consultant | 21.05.2024/<br>Mika Laitinen,<br>Senior Consultant | Voimalasijoittelu ja<br>napakorkeus muuttunut |

## Aineistojen käyttöoikeudet

Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Suomen ympäristökeskuksen avoimien aineistojen käyttöluvien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

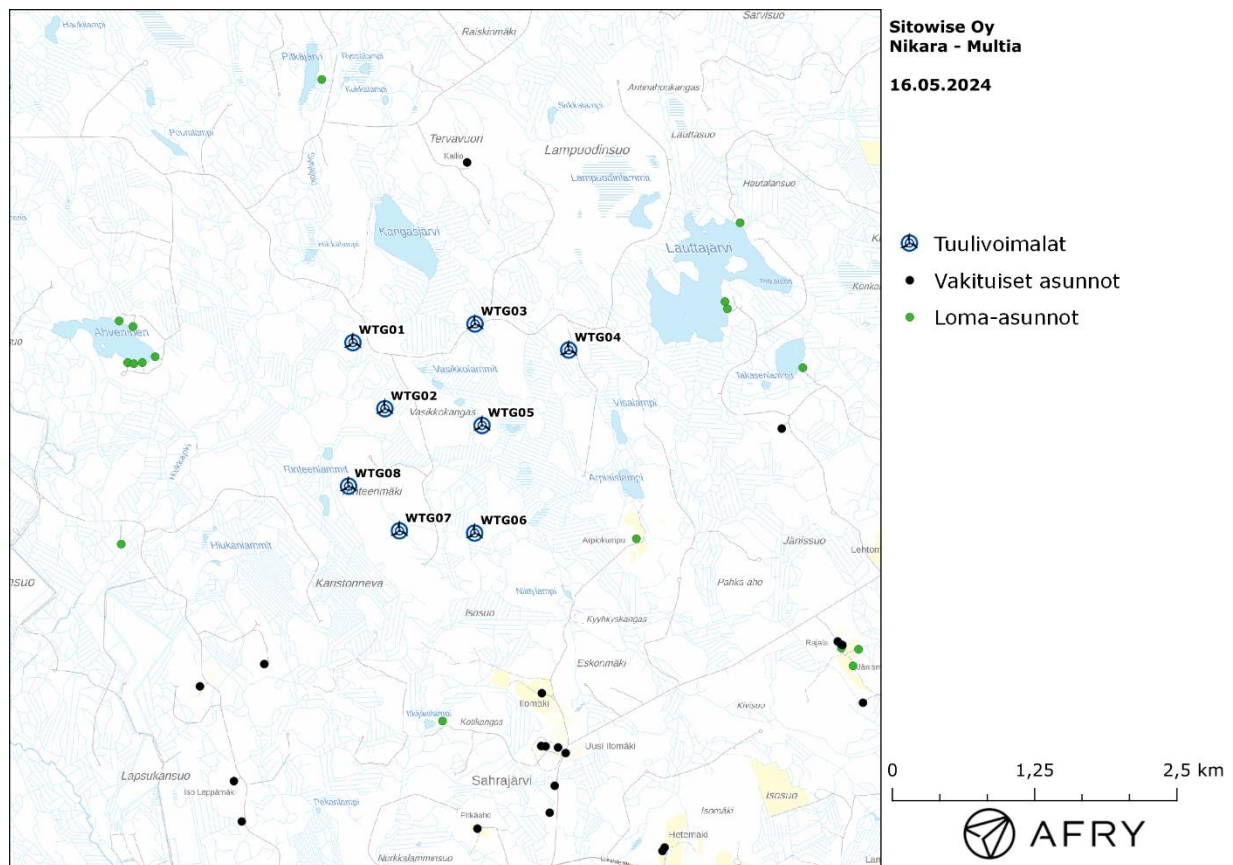
## Sisällysluettelo

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1   | Johdanto .....                        | 4  |
| 2   | Tuulivoimaloiden melu .....           | 6  |
| 2.1 | Yleistä tuulivoimamelusta .....       | 6  |
| 2.2 | Melumallinnusohjeistus.....           | 7  |
| 2.3 | Ohjearvot .....                       | 8  |
| 2.4 | Sisämelutasojen arviointi.....        | 9  |
| 3   | Tuulivoimakohteen melumallinnus ..... | 10 |
| 3.1 | Keskiäänitasojen LAeq mallinnus ..... | 10 |
| 3.2 | Matalataajuisen melun mallinnus ..... | 14 |
| 4   | Yhteenveto .....                      | 16 |
| 5   | Viitteet.....                         | 17 |
| 6   | Melumallinnuksen tiedot.....          | 18 |

# 1 Johdanto

Selityksessä arvioidaan Multian kunnan alueelle suunnitellun Nikaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty kahdeksan voimalan sijoitus-suunnitelmalla. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 160 m ja tuulivoimalatyyppin V162 5.6 MW Mode 0 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasoilla 106 dB(A) ja 108 dB(A). Turbiini-valmistajan ilmoittama maksimiäänitetahotaso on 104 dB(A), josta saadaan ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukainen melupäästön tunnusarvo lisäämällä äänitehotasoon 2 dB:n varmuusarvo. Lähtömelutaso 106 dB(A) on siis ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukainen melupäästön tunnusarvo ja lähtömelutaso 108 dB(A) sisältää ylimääräisen varmuusarvon.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Nikaran hankealueella.

*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (8 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.*

| Tuulivoimalat | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|---------------|--------|---------|---------------------|
| WTG01         | 399643 | 6930682 | 207                 |
| WTG02         | 399924 | 6930102 | 210                 |
| WTG03         | 400716 | 6930846 | 213                 |
| WTG04         | 401540 | 6930617 | 231                 |
| WTG05         | 400778 | 6929955 | 218                 |
| WTG06         | 400713 | 6929010 | 222                 |
| WTG07         | 400052 | 6929030 | 241                 |
| WTG08         | 399605 | 6929422 | 225                 |

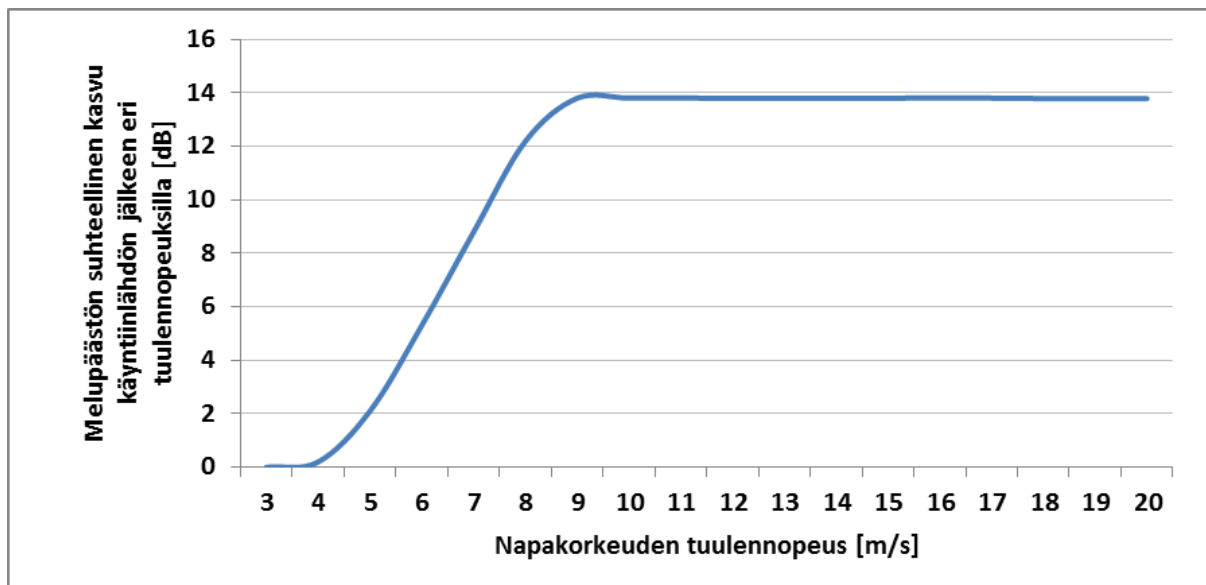
## 2 Tuulivoimaloiden melu

### 2.1 Yleistä tuulivoimamelusta

Tuulivoimalaitosten käyntiääni koostuu pääosin laajakaistaisesta lapojen aerodynaamisesta melusta sekä hieman kapeakaistaisemmasta sähköntuotantokoneiston yksittäisten osien aiheuttamasta melusta johon kuuluvat muun muassa vaihteisto, generaattori sekä jäähdytysjärjestelmät. Tuulivoimaloiden aerodynaaminen melu on hallitsevin äänilähde, joka kattaa noin 90 prosenttia kokonaisäänienenergiasta lapojen suuren vaikutuspinta-alan vuoksi [14]. Tuulivoimamelu on A-taajuusjakaumaltaan painottunut tyypillisesti 200–1000 Hz:n väliin.

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen etupuolessa suhteessa voimalan torniin. Katsottaessa aerodynaamisen melun suuntaavuutta ylhäältä käsin on siivistön äänitaso sivutuulen puolelta noin 4–6 dB alhaisempi kuin tuulen ylä- ja alapuolilla samalla etäisyydellä [17].

Vaihtuvanopeuksisen tuulivoimalan äänipäästö on suoraan verrannollinen tuulennopeuteen siten, että alhaisilla tuulilla eli hitaalla roottorin pyörimisnopeudella ja lähellä käyntiinlähönnopeutta lähtöäänitaso on usein noin 10–15 dB alhaisempi kuin voimalan nimellisteholla, jossa roottori saavuttaa suurimman kierrosnopeuden (Kuva 2).



Kuva 2: Esimerkkikuva äänipäästön kasvusta napakorkeuden tuulennopeuden mukaan. Äänitason nousu tasoittuu n. 10 m/s voimalan napakorkeudella mitatun tuulennopeuden jälkeen.

Äänipäästön  $L_{WA}$  huipputaso saavutetaan tyypillisesti voimalan nimellistehotasolla, joka tarkoittaa tyypillisesti yli 10 m/s tuulennopeutta napakorkeudella voimalamallista ja etenkin tornikorkeudesta riippuen. Tuulennopeuden edelleen kasvaessa tuulivoimalan siipikulmasäätö tasoittaa äänitehotason nousun roottorin pyörimisnopeuden pysyessä ennallaan.

Taustamelu, kuten liikennemelu ja teollisuusmelu sekä tuulen tuottama aallokko- ja puustokohina, peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänet ovat ajallisesti ja tasoltaan vaihtelevia. Tuulikohina esimerkiksi puustossa on taajuuskaistaltaan laajakaistaista ja tuulensuunnasta,

puulajeista, vuodenaajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1,5 m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemuseräisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [16].

Ilmakehän pystysuuntaisen stabiilisuuden ja ilmavirran turbulenssin vaihtelut vuorokauden eri aikoina voivat vaikuttaa tuulisuuden tasoon eri korkeuksilla [15]. Ilmakehän neutraalin stabiilisuuden vallitessa 8 m/s tuulennopeus 10 metrin korkeudella vastaa korkeudella 100 m nopeutta 12 m/s, korkeudella 160 m nopeutta 14 m/s ja korkeudella 200 m nopeutta 15 m/s.

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasa 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 tuotantototehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahailoituksen, joka vähentää melupäästöä nimellisteholla tällä hetkellä noin 2–3 dB ja tulevaisuudessa vieläkin enemmän serraatioiden tuotekehityksen johdosta [13].

Tarkempia taustatietoja tuulivoimaloiden aiheuttaman melun syntymekanismeista, luonteesta ja vaikutuksista on koottuna julkaisuihin [1], [2] ja [5].

## 2.2 Melumallinnusohjeistus

Ympäristöministeriö on julkaissut 28.2.2014 ohjeen tuulivoimaloiden melun mallintamiseen [7]. Ohjeessa on annettu tietoja mallinnusmenettelyistä arvioitaessa tuulivoimaloiden aiheuttamaa melukuormitusta ympäristönsuojelulain täytäntöönpanossa ja soveltamisessa sekä maankäyttö- ja rakennuslain mukaisissa menettelyissä. Ohjeissa määritellään yksityiskohtaisesti käytettävät mallit, niiden parametrit ja lähtötiedot sekä tulosten esittämistavat. Yksityiskohtainen ohjeistus on koettu tarpeelliseksi, jotta mallinnustulokset olisivat aina tekijöistä riippumatta vertailukelpoisia keskenään. Tämän raportin melumallinnus on toteutettu ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisesti.

Melumallinnuksen lähtötietona tulisi käyttää teknisen spesifikaation IEC TS 61400-14 mukaista tuulivoimalan melupäästön tunnusarvoa (declared value)  $L_{WAd}$ . Se määritellään standardin IEC 61400-11 mukaisissa mittauksissa äänitehotasoksi, jonka varmuus melupäästön mahdollisessa verifiointissa on 95 %. Tunnusarvo koostuu mitatusta keskimääräisestä äänitehotasosta  $L_{WA}$  sekä varmuusarvosta K, joka vastaa voimalatyyppien melutason vaihteluväliä 95 %:n varmuudella.

Äänitehotasot on ilmoitettava 1/3-oktaaveittain keskitäajuuksilla 20–10000 Hz ja oktaaveittain keskitäajuuksilla 31,5–8000 Hz, ja ne tulee olla saatavilla 10 m:n referenssikorkeutta vastaavilla tuulen nopeuksilla 8 m/s ja 10 m/s. Melumallinnuksen epävarmuus on tarkastelussa ja ohjeistuksessa sisällytetty laskennassa käytettyyn tuulivoimaloiden melupäästön arvoon, jolloin mallinnustuloksia voidaan suoraan verrata suunnitteluohjeistuksiin ilman erillistä epävarmuus-tarkastelua, ja äänen etenemisen ja ympäristöolosuhteiden mallinnukseen voidaan käyttää vakioituja sää- ja ympäristöolosuhdearvoja.

Melun häiritsevyyteen vaikuttaa äänitasojen lisäksi melupäästöön mahdollisesti liittyvät erityisen häiritsevät melukomponentit: melun kapeakaistaisuus, melun impulssimaisuus ja merkityksellinen sykintä (nk. amplitudimodulaatio). Melun impulssimaisuuden ja merkityksellisen sykinän vaikutukset oletetaan sisältyvän valmistajan ilmoittamiin melupäästön tunnusarvoihin, eikä mallinnusohjeistuksessa edellytetä niiden erillistä tarkastelua.

Äänen etenemislaskennassa käytetään ohjeen mukaisia standardiin ISO 9613-2 perustuvia sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Maaston pinnan laatu ja muoto otetaan mallinnuksessa erillisinä huomioon. Lisäksi matalataajuisten äänen eteneminen tulee mallintaa erikseen ohjeistuksessa määritellyn erillislaskennan avulla, joka perustuu Tanskassa annettuun ohjeistukseen, jonka



parametreja on mukautettu Suomen olosuhteisiin [3]. Laskennassa otetaan huomioon geometrinen etäisyysvaimennus sekä ohjeistuksen mukaiset ilmakehän absorption ja maastovaikutuksen parametrit. Matalataajuisen äänen tarkastelu tehdään erikseen 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20–200 Hz melulle merkittävimmin altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella. Laskennan tarkoituksena on tuottaa tieto ulkomelutasoista terssikaistoittain, ja niiden perusteella voidaan arvioida rakennuksen sisämelutaso oletetulla ääneneristävyydellä.

## 2.3 Ohjearvot

Valtioneuvoston 1.9.2015 voimaan astunut asetus 1107/2015 määrittää tuulivoimaloiden aiheuttaman ulkomelutason ohjearvot [9]. Päätöstä sovelletaan meluhaittojen ehkäisemiseksi ja ympäristön viihtyisyyden turvaamiseksi maankäytön, liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa sekä rakentamisen lupamenettelyissä. Ohjearvot määritetään melun A-painotettuina päivä- (klo 07–22) ja yöajan (klo 22–07) ekvivalenttimelutasoina ulkoalueille asumiseen käytettävillä alueilla. Valtioneuvoston asetus korvaa aiemmat ympäristöministeriön suosittelemat suunnitteluarvot tuulivoimaloiden ulkomelutasoille [8].

Kun laskennallisia melutasoja verrataan valtioneuvoston asetuksen ohjearvoihin, laskettuun melutasoon ei tehdä korjausta melun impulssimaisuuden tai kapeakaistaisuuden vuoksi. Ympäristöministeriön melumallinnusohjeistuksen [7] mukaan näiden vaikutusten oletetaan lähtökohtaisesti sisältyvän valmistajan ilmoittamiin melupäästön tunnusarvoihin, joita käytetään laskennan lähtötietoina. Sen sijaan valvonnan yhteydessä tehtäviin mittaustuloksiin lisätään 5 dB ennen valtioneuvoston ohjearvoon vertaamista, mikäli tuulivoimalan ääni sisältää kapeakaistaisia tai impulssimaisia komponentteja. Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2).

*Taulukko 2: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.*

| Tuulivoimamelun ohjearvot                                  | LA <sub>eq</sub> päiväajalle (klo 7–22) | LA <sub>eq</sub> yöajalle (klo 22–7) |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Pysyvä asutus, Loma-asutus, Hoitolaitokset, Leirintäalueet | 45 dB                                   | 40 dB                                |
| Oppilaitokset, Virkistysalueet                             | 45 dB                                   | -                                    |
| Kansallispuistot                                           | 40 dB                                   | 40 dB                                |

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa toimenpiderajat matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Melun toimenpiderajat on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 3). Ohjeistuksen mukaiset mallinnustulokset vastaavat matalataajuisen melun tasoa ulkotiloissa, joten ne eivät ole suoraan verrannollisia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Ulkomelutasojen avulla voidaan kuitenkin arvioida sisämelutasoja, kun rakennuksen vaipan ääneneristävyys tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

*Taulukko 3: Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat taajuus-painottamattomia.*

| Taajuus [Hz]              | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
|---------------------------|----|----|------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Äänitaso $L_{eq,1h}$ [dB] | 74 | 64 | 56   | 49 | 44 | 42 | 40 | 38  | 36  | 34  | 32  |

## 2.4 Sisämelutasojen arviointi

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 3) lisäksi toimenpiderajat päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Päiväaikainen (klo 07–22) keskiäänitaso ei saa ylittää 35 dB(A) ja yöaikainen (klo 22–07) keskiäänitaso 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unihäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona  $L_{eq,1h}$  mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen.

Ympäristöministeriön melumallinnusohjeet eivät sisällä erillisiä ohjeita sisämelun kokonaisäänitason mallintamiseksi. Yöajan sisämelun toimenpiderajojen oletetaan kuitenkin alittuvan, mikäli melumallinnuksen antamat ulkomelutasot sekä matalataajuisen sisämelun tasot alittavat valtioneuvoston asetuksen ohjearvot ja asumisterveysasetuksen toimenpidearvot. Ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 mukaan uudisrakennusten ulkovaipan ääneneristyksen on oltava vähintään 30 dB. Jos tuulivoimaloiden aiheuttama ulkomelutaso alittaa 40 dB(A), niin sisämelutaso pysyy uudisrakennuksilla selkeästi toimenpiderajan alapuolella. Vanhemmat rakennukset eivät kuitenkaan välttämättä toteuta uuden asetuksen vaatimustasoa.

Suomalaisten asuinrakennusten ääneneristävyttä on tutkittu artikkelissa [4], jossa on esitetty taajuuskohtaiset äänitasoerot matalille taajuuskaistoille 20–200 Hz. Artikkelin arvot (Taulukko 6) on määritetty tilastollisesti niin, että ne ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja niitä on käytetty tässä selvityksessä matalataajuisen sisämelutasojen arviointiin. Rakennusten ilmaäänieristyksen keskimääräinen profiili kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä, jonka perusteella mallinnusohjeistuksen mukainen sisämelujen arviointi tehdään vain matalille taajuuksille. Jos matalataajuisen sisämelun tasojen todetaan pysyvän annetuissa toimenpiderajoissa, myös kokonaismelun tasot pysyvät todennäköisesti raja-arvojen alapuolella.

## 3 Tuulivoimakohteen melumallinnus

### 3.1 Keskiäänitasojen LAeq mallinnus

Tuulivoimaloiden aiheuttaman keskiäänitason mallinnus on suoritettu laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. Mallinnuksessa on käytetty V162 5.6 MW Mode 0 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumia. Taajuusjakaumat on saatu seuraavista tuulivoimalavalmistajan dokumenteista:

- V162-5.6 MW, Third octave noise emission, DMS 0079-5298\_01, 2019-01-23.

Dokumenttia varten tuulivoimalatyypin V162 testimittauksia ei ollut saatavilla. Esitetyt melutasot perustuvat tuulivoimalatyypillä V136 tehtyihin mittauksiin, joiden perusteella V162:n melutasoja on arvioitu dokumentissa esitetyllä tavalla. Dokumentissa ilmoitettuihin melutasoihin on lisätty ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeistuksen mukainen 2 dB:n varmuusarvo [10]:

”Takuuarvoa ei ole aina esitetty dokumentissa IEC 61400-14 standardin määrittämällä tavalla ja takuuarvo joudutaan tällöin arvioimaan hankekehittäjän tai meluselvitystä tekevän konsultin toimesta. Tässä tapauksessa laskeminen tulee suorittaa IEC 61400-14 mukaisesti. Mikäli takuuarvoa ei ole mahdollista määrittää standardin IEC 61400-14 mukaisesti, tulee tuulivoimalan melupäästön lukuarvoon lisätä varmuusarvona 2 dB takuuarvon saamiseksi.”

Tuulivoimalatyypin V162 5,6 MW Mode 0 äänitehotaso on 104,0 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoja 106,0 dB(A) ja 108,0 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulennopeutta 14 m/s napakorkeudella 160 m, jonka arvioidaan vastaavan melumallinnusohjeistuksen mukaista referenssinopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Mallinuksissa voimaloiden napakorkeus oli 160 m. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksissa.

Tuulivoimalatyyppien melupäästön kapeakaistaisuuden arvioinnissa on käytetty ympäristöministeriön raportissa Ympäristömelun mittaaminen [11] esitettyä yksinkertaista menetelmää, joka perustuu äänitehotasojen vertailuun terssikaistoittain (1/3-oktaaveittain). Melun tulkitaan olevan kapeakaistaista, mikäli ainakin yhden terssikaistan äänitehotaso on vähintään 5 dB suurempi kuin välittömästi kyseisen kaistan ala- ja yläpuolella olevien terssikaistojen tasot. Luvussa 6 esitettyjen melun taajuusjakaumien mukaan tämä ehto ei toteudu, joten melun kapeakaistaisuuteen liittyvää sanktiota ei ole käytetty.

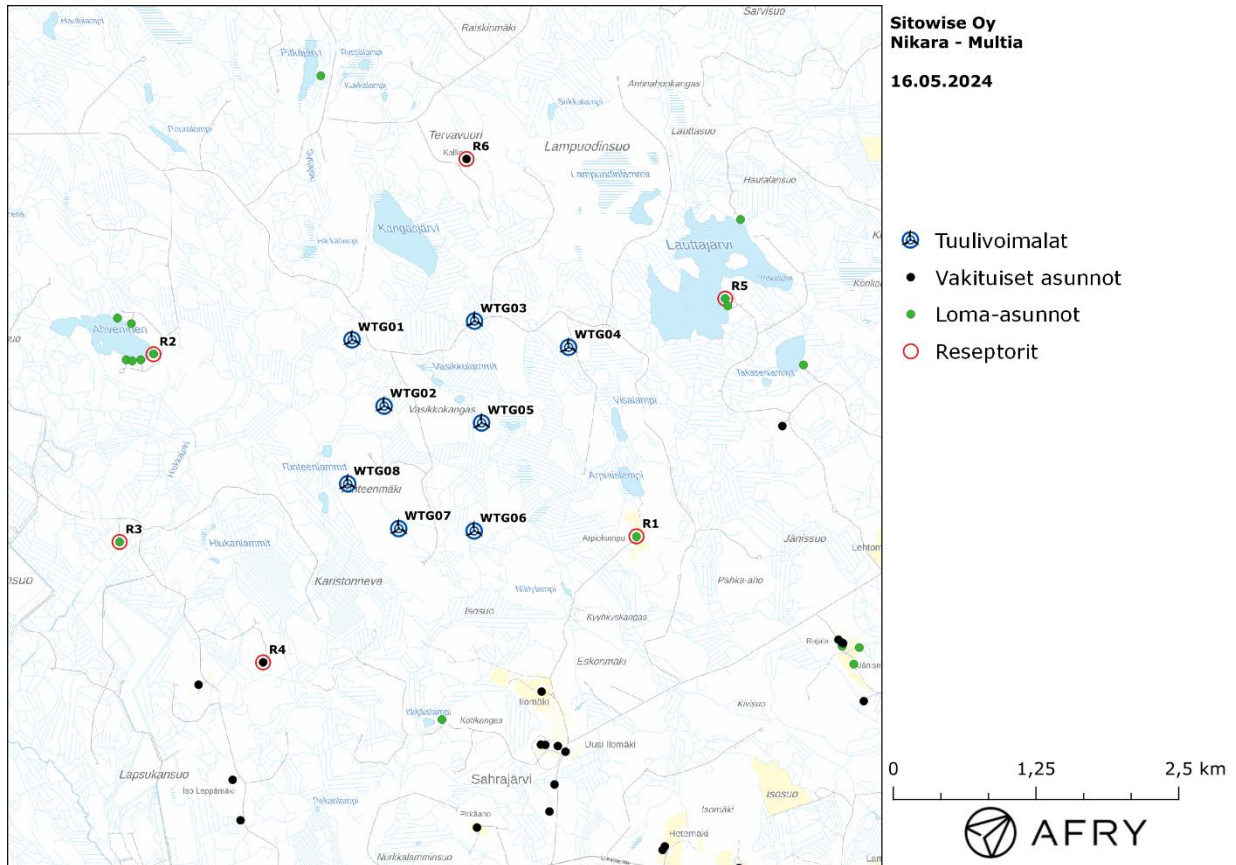
Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 10 m. Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus, äänen suuntaavuus ja sääolosuhteiden vaikutus äänen etenemiseen on määritetty ympäristöministeriön ohjeistusten mukaisesti. Tuulivoimalan sijoituspaikan ympäristössä maaston vaikutuskerroin on ollut maa-alueilla 0,4 ja vesialueilla 0,0. Mallinnusohjeistuksen mukaisesti tuulivoimalan melupäästöön lisätään 2 dB, mikäli voimalan ja melulle altistuvan kohteen välinen korkeusero ylittää 60 m. Akustisen laskennan lähtötiedoista ja parametreista on tehty yhteenveto lukuun 6.

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä kuusi vertailurakennusta, joiden kohdilla keskiäänitason LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Rakennusten sijaitsevat noin 1,4-2,0 km etäisyydellä voimaloista. Maanmittauslaitoksen maastotietokannan mukaan voimalan WTG08 länsipuolella noin 100 metrin

etäisyydellä sijaitsee lomarakennus. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan kyseessä on kuitenkin muu rakennus. Lomarakennus on poistettu kartoilta, sillä melun ohjearvot koskevat ainoastaan asuin- ja lomarakennuksia.

*Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.*

| Reseptori | E      | N       | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus         |
|-----------|--------|---------|---------------------|--------------------------|
| R1        | 402135 | 6928961 | 242                 | lomarakennus             |
| R2        | 397905 | 6930554 | 204                 | lomarakennus             |
| R3        | 397608 | 6928912 | 193                 | lomarakennus             |
| R4        | 398865 | 6927858 | 205                 | vakituinen asuinrakennus |
| R5        | 402913 | 6931041 | 232                 | lomarakennus             |
| R6        | 400647 | 6932263 | 247                 | vakituinen asuinrakennus |

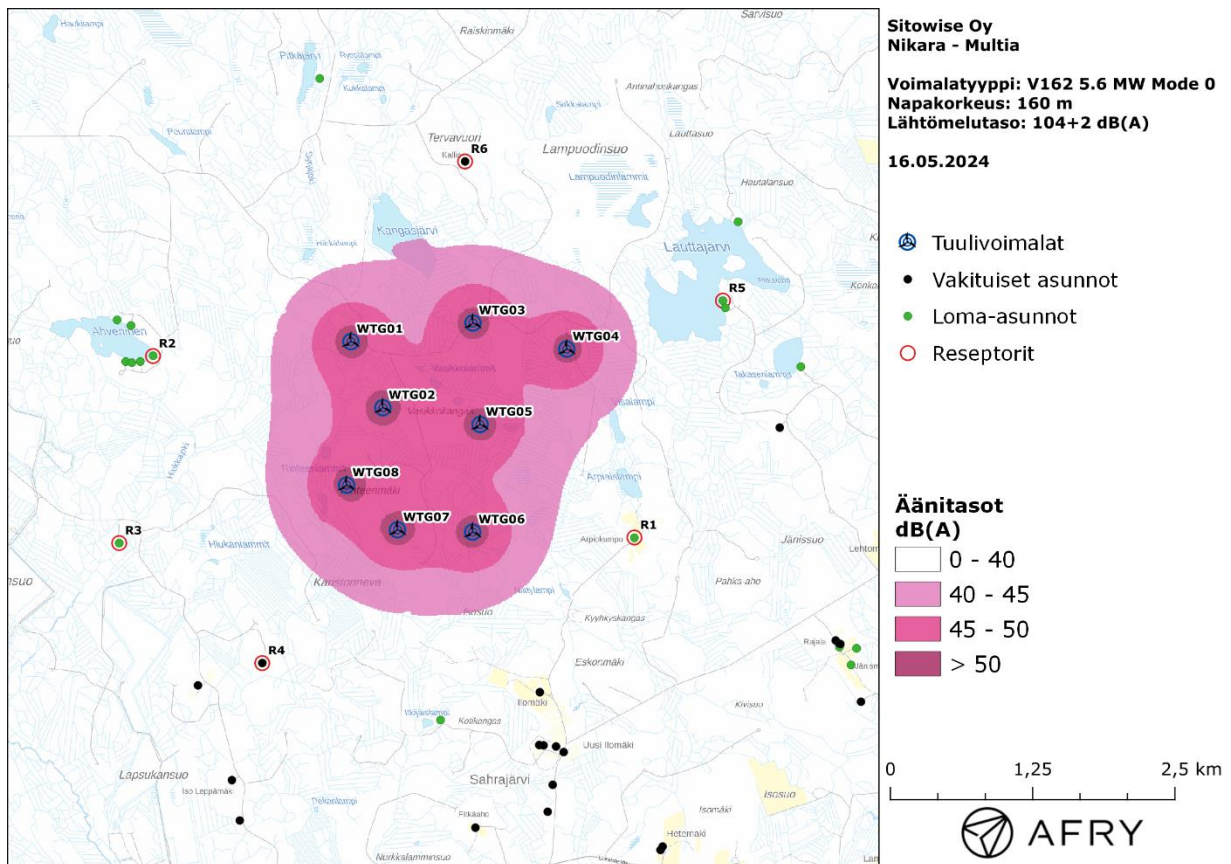


*Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.*

## Meluvaikutus

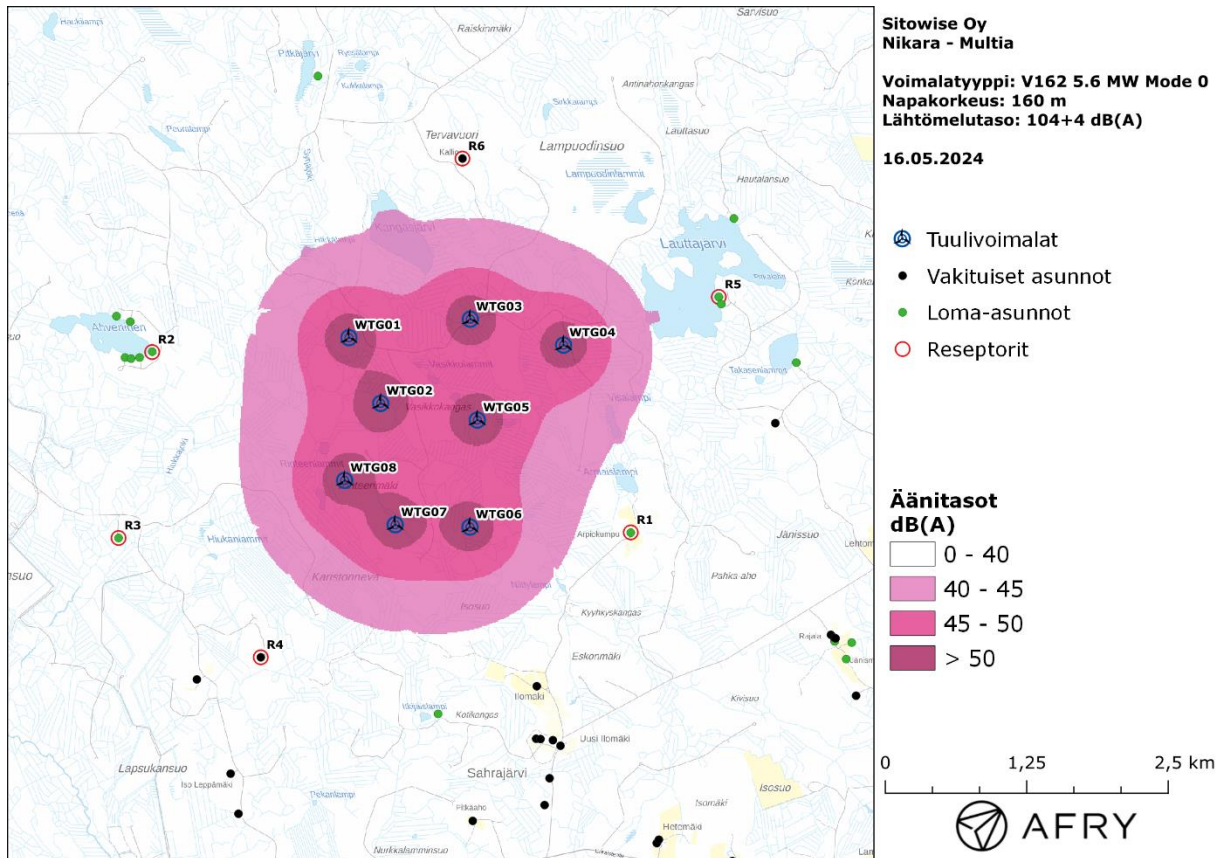
Tuulivoimaloiden aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso  $L_{Aeq}$  on esitetty karttakuvina 4-5. Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuinrakennukset ja loma-asunnot. Karttakuvaan on merkitty keskiäänitasojen 40 dB(A), 45 dB(A) ja 50 dB(A) mukaiset vyöhykkeet, joita käytetään apuna tulosten arvioinnissa.

Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5). Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot jäävät valtioneuvoston asetuksen 40 dB(A):n ohjearvon alapuolelle kaikkien alueen asuin- ja lomarakennusten kohdilla molemmilla mallinnetuilla äänitehotasoilla.



Kuva 4: Keskiäänitasot  $L_{Aeq}$  tuulivoimapaiston hankealueella äänitehotasolle 106 dB(A).





Kuva 5: Keskiäänitasot  $L_{Aeq}$  tuulivoimapaiston hankealueella äänitehotasolle 108 dB(A).

Taulukko 5: Keskiäänitasot  $L_{Aeq}$  reseptoripisteiden kohdilla.

| Reseptori | Äänitaso dB(A)<br>(104 + 2 dB(A)) | Äänitaso dB(A)<br>(104 + 4 dB(A)) |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| R1        | 34,9                              | 36,9                              |
| R2        | 32,5                              | 34,5                              |
| R3        | 30,5                              | 32,5                              |
| R4        | 33,0                              | 35,0                              |
| R5        | 33,8                              | 35,8                              |
| R6        | 34,2                              | 36,2                              |

### 3.2 Matalataajuisten melun mallinnus

Matalataajuisten melun laskenta on suoritettu ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisesti [7]. Laskennan lähtötietona on käytetty samoja valmistajan ilmoittamia melun taajuusjakaumia kuin keskiäänitasojen mallinnuksessa, mutta rajoittuen 1/3-oktaaveittain taajuuksille 20–200 Hz. Matalataajuisten melun laskenta suoritetaan taajuuspainottamattomilla melutasoilla.

#### Meluvaikutus

Matalataajuisten melun arvioinnissa käytetään Suomen asumisterveysasetuksessa määriteltyjä taajuuskohtaisia arvoja, jotka antavat toimenpiderajat matalataajuisten melun yöaikaisille sisämelutasoille (Taulukko 3). Ympäristöministeriön ohjeistuksen mukainen mallinnus antaa matalataajuisten ulkomelun tasot voimaloita lähimpien rakennusten kohdilla. Tulokset eivät siis ole suoraan vertailukelpoisia asumisterveysasetuksen arvoihin, vaan tulokinnassa pitää huomioida myös rakennusten ulkovaipan ääneneristävyys.

Ympäristöministeriön ohjeiden mukainen matalataajuisten melun laskenta perustuu Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa esitettyyn menetelmään [3], jonka parametreihin on tehty joitakin Suomen olosuhteisiin perustuvia tarkennuksia. Tanskan menetelmässä on määritelty rakennuksesta aiheutuva äänitasoero ( $\Delta L_o$ ) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja toimenpiderajoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten parametrit perustuvat tutkimukseen suomalaisten pientalojen äänieristävyiden arvoista [4]. Turun ammattikorkeakoulussa tehdyssä tutkimuksessa esitetyt arvot perustuvat suomalaisissa pientaloissa tehtyihin mittauksiin, joiden avulla on johdettu tilastollinen estimaatti talojen ääneneristävyyksille eri taajuuksilla. Artikkelin [4] äänitasoerot ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia äänitasoeroja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut äänitasoerot.

Taulukko 6: Rakennuksen äänitasoerot taajuuskaistoittain.

| Taajuus [Hz]                            | 20  | 25  | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|-----------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Äänitasoero [dB]<br>(Tanskan ohjeistus) | 6,6 | 8,4 | 10,8 | 11,4 | 13,0 | 16,6 | 19,7 | 21,2 | 20,2 | 21,2 | -    |
| Äänitasoero [dB]<br>(viite [4])         | 7,6 | 8,3 | 9,2  | 10,3 | 11,5 | 13,0 | 14,8 | 16,8 | 18,8 | 21,1 | 22,8 |

Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia äänitasoeroja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Tuulivoimaloiden aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukoissa 7-8. Taulukoihin on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot äänitehotasoilla 106 dB(A) ja 108 dB(A).

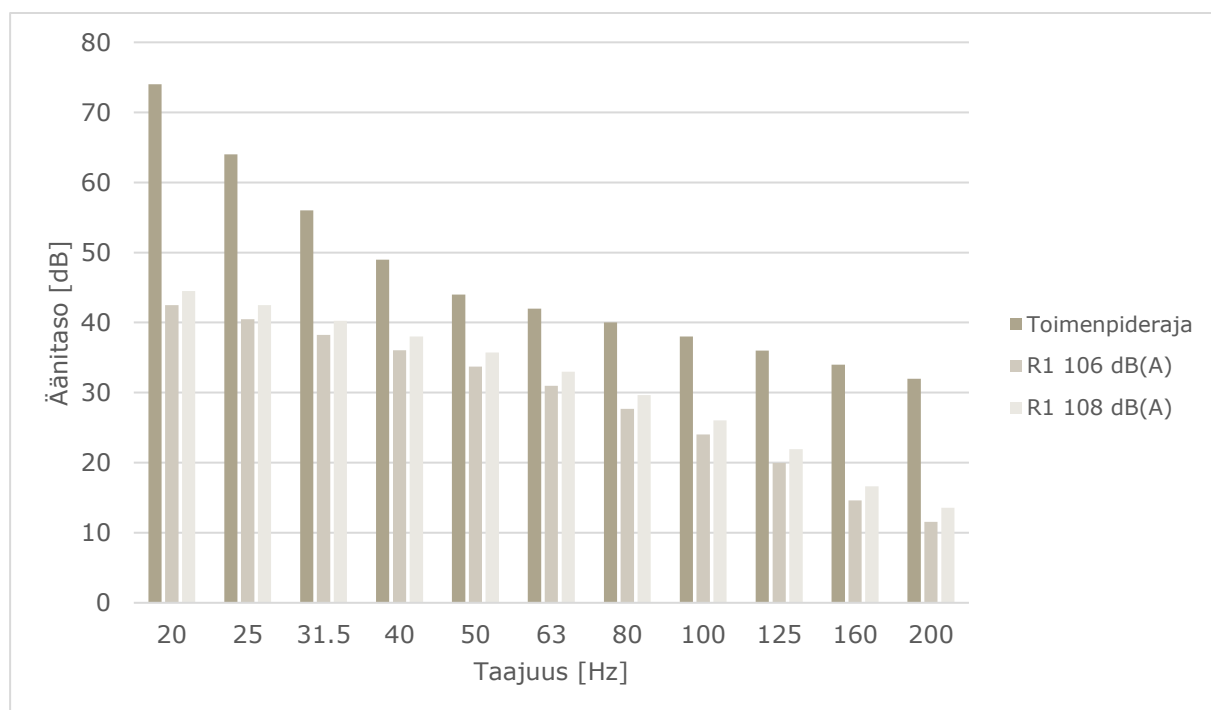
Korkeimmat matalataajuisten melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R1, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 6). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät toimenpiderajojen alapuolelle koko taajuusvälillä, molemmilla äänitehotasoilla.

Taulukko 7: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla äänitehotasolla 106 dB(A).

| taajuus | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1      | 50,1 | 48,8 | 47,5 | 46,3 | 45,2 | 44,0 | 42,5 | 40,8 | 38,7 | 35,7 | 34,4 |
| R2      | 48,4 | 47,1 | 45,8 | 44,6 | 43,5 | 42,3 | 40,7 | 39,1 | 36,9 | 33,8 | 32,3 |
| R3      | 47,1 | 45,8 | 44,5 | 43,3 | 42,2 | 40,9 | 39,4 | 37,7 | 35,5 | 32,3 | 30,7 |
| R4      | 48,7 | 47,4 | 46,0 | 44,9 | 43,8 | 42,6 | 41,0 | 39,4 | 37,2 | 34,2 | 32,7 |
| R5      | 48,3 | 47,0 | 45,6 | 44,5 | 43,4 | 42,2 | 40,6 | 39,0 | 36,8 | 33,7 | 32,3 |
| R6      | 49,5 | 48,2 | 46,9 | 45,7 | 44,6 | 43,4 | 41,9 | 40,2 | 38,1 | 35,1 | 33,7 |

Taulukko 8: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla äänitehotasolla 108 dB(A).

| taajuus | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1      | 52,1 | 50,8 | 49,5 | 48,3 | 47,2 | 46,0 | 44,5 | 42,8 | 40,7 | 37,7 | 36,4 |
| R2      | 50,4 | 49,1 | 47,8 | 46,6 | 45,5 | 44,3 | 42,7 | 41,1 | 38,9 | 35,8 | 34,3 |
| R3      | 49,1 | 47,8 | 46,5 | 45,3 | 44,2 | 42,9 | 41,4 | 39,7 | 37,5 | 34,3 | 32,7 |
| R4      | 50,7 | 49,4 | 48,0 | 46,9 | 45,8 | 44,6 | 43,0 | 41,4 | 39,2 | 36,2 | 34,7 |
| R5      | 50,3 | 49,0 | 47,6 | 46,5 | 45,4 | 44,2 | 42,6 | 41,0 | 38,8 | 35,7 | 34,3 |
| R6      | 51,5 | 50,2 | 48,9 | 47,7 | 46,6 | 45,4 | 43,9 | 42,2 | 40,1 | 37,1 | 35,7 |



Kuva 6: Matalataajuisen sisämelun tasot reseptorin R1 kohdalla äänitehotasoilla 106 dB(A) ja 108 dB(A).



## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Multian kunnan alueelle suunnitellun kahdeksan tuulivoimalan Nikaran tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty tuulivoimalatyypillä V162 5.6 MW, napakorkeudella 160 m ja kahdella eri äänitehotasolla – 106 dB(A) ja 108 dB(A).

Mallinnusten perustella melutasot alueen loma- ja asuinrakennusten kohdilla jäävät alle valtioneuvoston ohjearvojen molemmilla mallinnetuilla äänitehotasoilla. Myös matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien rakennusten kohdalla asumisterveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella molemmilla äänitehotasoilla.

## 5 Viitteet

- [1] C. Di Napoli: Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen, Suomen Ympäristö 4, 2007.
- [2] D. Siponen: Noise Annoyance of Wind Turbines, VTT Research Report VTTR-00951-11, 2011.
- [3] J. Jakobsen: Danish regulation for low frequency noise from wind turbines, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 31(4), 2012.
- [4] J. Keränen, J. Hakala, V. Hongisto: The sound insulation of façades at frequencies 5–5000Hz, Building and Environment 156, 2019.
- [5] S. Uosukainen: Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys, VTT Tiedotteita 2529, 2010.
- [6] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.
- [7] Tuulivoimaloiden melun mallintaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2014. Ympäristöministeriö.
- [8] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [9] Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Astui voimaan 1.9.2015.
- [10] Yhteenveto tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvon käyttämisestä meluselvityksissä liittyvästä kyselystä. Ympäristöministeriö, 14.9.2016.
- [11] Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriö, Ohje I 1995.
- [12] IECRE - IEC System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Renewable Energy Applications. IECRE.WE.TC.21.0091-R1, EnVentus V162. 20.8.2021, DNV Renewables Certification.
- [13] C. A. León: Trailing Edge Serrations, Effect of Their Flap Angle on Flow and Acoustics. 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, 2nd to 5th May 2017.
- [14] M. Gupta, K. Madsen: Advancements in continuous learning for tonality free turbine design. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [15] K. Bolin: The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise. Acta Acustica united with Acustica, Vol 98 (2012) pages 741-748.
- [16] D. Halstead, N. Tam: A study of background noise levels measured during far-field receptor testing of wind turbine facilities. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [17] S. Oerlemans, J.G. Schepers: Prediction of wind turbine noise directivity and swish, Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark, 2009.

## 6 Melumallinnuksen tiedot

|                                                                                          |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|------|----------------|------|
| RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT                                                           |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Mallinnusraportin numero/tunniste: <b>101025627-001.001</b>                              |                    |                              |                    | Raportin hyväksyntäpäivämäärä: <b>21.05.2024</b>                        |      |                |      |
| Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: <b>AFRY Finland Oy</b>                                |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Vastuhenkilöt: <b>Juulianna Lähteinen ja Mika Laitinen</b>                               |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Laatija: <b>Juulianna Lähteinen</b>                                                      |                    |                              |                    | Tarkastaja/hyväksyjä: <b>Mika Laitinen</b>                              |      |                |      |
| MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT                                                                 |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Mallinnusohjelma ja versio:<br><b>AFRY Numerola -mallinnusohjelmisto</b>                 |                    |                              |                    | Mallinnusmenetelmä:<br><b>ISO 9613-2</b>                                |      |                |      |
| TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN) TIEDOT                                                  |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Tuulivoimalan valmistaja:<br><b>Vestas</b>                                               |                    |                              |                    | Tyyppi:<br><b>V162 5.6 MW Mode 0<br/>(with serrated trailing edges)</b> |      | Sarjanumero/t: |      |
| Nimellisteho:<br><b>5.6 MW</b>                                                           |                    | Napakorkeus:<br><b>160 m</b> |                    | Roottorin halkaisija:<br><b>162 m</b>                                   |      | Tornin tyyppi: |      |
| Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön käytön aikana ja sen vaikutus meluun |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Lapakulman säätö                                                                         |                    | Pyörimisnopeus               |                    | Muu, mikä                                                               |      |                |      |
| Kyllä                                                                                    | dB                 | Kyllä                        | dB                 |                                                                         |      | dB             |      |
| Ei                                                                                       | <b>Ei tiedossa</b> | Ei                           | <b>Ei tiedossa</b> |                                                                         |      | dB             |      |
| AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT                                                   |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| V162-5.6 MW, Third octave noise emission, DMS 0079-5298_01, 2019-01-23.                  |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Alla esitettyihin arvoihin on lisätty 2 dB:n varmuusarvo.                                |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)                       |                    |                              |                    |                                                                         |      |                |      |
| Oktaaveittain [Hz]                                                                       |                    | 1/3-oktaaveittain [Hz]       |                    |                                                                         |      |                |      |
| 31,5                                                                                     |                    | 20                           | 62,1               | 200                                                                     | 93,1 | 2000           | 91,4 |
| 63                                                                                       | 87,1               | 25                           | 66,6               | 250                                                                     | 94,4 | 2500           | 89,5 |
| 125                                                                                      | 94,6               | 31,5                         | 70,8               | 315                                                                     | 95,4 | 3150           | 87,1 |
| 250                                                                                      | 99,2               | 40                           | 74,9               | 400                                                                     | 96,1 | 4000           | 84,4 |
| 500                                                                                      | 101,1              | 50                           | 78,4               | 500                                                                     | 96,4 | 5000           | 81,5 |
| 1000                                                                                     | 100,1              | 63                           | 81,7               | 630                                                                     | 96,4 | 6300           | 78,2 |
| 2000                                                                                     | 96,3               | 80                           | 84,7               | 800                                                                     | 96,0 | 8000           | 74,5 |
| 4000                                                                                     | 89,7               | 100                          | 87,2               | 1000                                                                    | 95,4 | 10000          | 70,7 |
| 8000                                                                                     | 80,3               | 125                          | 89,5               | 1250                                                                    | 94,4 |                |      |
|                                                                                          |                    | 160                          | 91,6               | 1600                                                                    | 93,0 |                |      |

|                                                                                                          |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------|------------|------------|
| Melun erityispiirteiden mittaust ja havainnot:                                                           |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Kapeakaistaisuus/<br>tonaalisuus                                                                         |           |           | Impulssimaisuus |                                      |           | Merkityksellinen<br>sykintä (amplitudi-<br>modulaatio) |           |                                       | Muu, mikä:                    |            |            |
| kyllä                                                                                                    | ei        |           | kyllä           | ei                                   |           | kyllä                                                  | ei        |                                       | kyllä                         | ei         |            |
| Laskentakorkeus                                                                                          |           |           |                 |                                      |           | Laskentaruudun koko [m x m]                            |           |                                       |                               |            |            |
| 4 m                                                                                                      |           |           |                 |                                      |           | 10 m x 10 m                                            |           |                                       |                               |            |            |
| Suhteellinen kosteus                                                                                     |           |           |                 |                                      |           | Lämpötila                                              |           |                                       |                               |            |            |
| 70 %                                                                                                     |           |           |                 |                                      |           | 15 C°                                                  |           |                                       |                               |            |            |
| Maastomallin lähde ja tarkkuus                                                                           |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Maastomallin lähde: <b>Maanmittauslaitos</b>                                                             |           |           |                 |                                      |           | Vaakaresoluutio: <b>2 m</b>                            |           |                                       | Pystyresoluutio: <b>0,3 m</b> |            |            |
| Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet                          |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| <b>ISO 9613-2</b>                                                                                        |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Vesialueet, (0) / (G)                                                                                    |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F)                                                                            |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Maa-alueet (0) / (G)                                                                                     |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus                                                  |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| <b>Neutraali</b>                                                                                         |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen                                                              |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| <b>Vapaa avaruus</b>                                                                                     |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)                     |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Asukkaat: <b>0 kpl</b>                                                                                   |           |           |                 | Vapaa-ajan rakennukset: <b>0 kpl</b> |           |                                                        |           | Hoito- ja oppilaitokset: <b>0 kpl</b> |                               |            |            |
| Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)                   |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Asukkaat: <b>0 kpl</b>                                                                                   |           |           |                 | Vapaa-ajan rakennukset: <b>0 kpl</b> |           |                                                        |           | Hoito- ja oppilaitokset: <b>0 kpl</b> |                               |            |            |
| Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille                                                   |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| Virkistysalueet: <b>0 kpl</b>                                                                            |           |           |                 |                                      |           | Luonnonsuojelualueet: <b>0 kpl</b>                     |           |                                       |                               |            |            |
| Lineaariset melutasot [dB] altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella (lähtömelutaso 104+2 dB(A)): |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| <b>Hz</b>                                                                                                | <b>20</b> | <b>25</b> | <b>31,5</b>     | <b>40</b>                            | <b>50</b> | <b>63</b>                                              | <b>80</b> | <b>100</b>                            | <b>125</b>                    | <b>160</b> | <b>200</b> |
| <b>R1</b>                                                                                                | 50,1      | 48,8      | 47,5            | 46,3                                 | 45,2      | 44,0                                                   | 42,5      | 40,8                                  | 38,7                          | 35,7       | 34,4       |
| <b>R2</b>                                                                                                | 48,4      | 47,1      | 45,8            | 44,6                                 | 43,5      | 42,3                                                   | 40,7      | 39,1                                  | 36,9                          | 33,8       | 32,3       |
| <b>R3</b>                                                                                                | 47,1      | 45,8      | 44,5            | 43,3                                 | 42,2      | 40,9                                                   | 39,4      | 37,7                                  | 35,5                          | 32,3       | 30,7       |
| <b>R4</b>                                                                                                | 48,7      | 47,4      | 46,0            | 44,9                                 | 43,8      | 42,6                                                   | 41,0      | 39,4                                  | 37,2                          | 34,2       | 32,7       |
| <b>R5</b>                                                                                                | 48,3      | 47,0      | 45,6            | 44,5                                 | 43,4      | 42,2                                                   | 40,6      | 39,0                                  | 36,8                          | 33,7       | 32,3       |
| <b>R6</b>                                                                                                | 49,5      | 48,2      | 46,9            | 45,7                                 | 44,6      | 43,4                                                   | 41,9      | 40,2                                  | 38,1                          | 35,1       | 33,7       |
| Lineaariset melutasot [dB] altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella (lähtömelutaso 104+4 dB(A)): |           |           |                 |                                      |           |                                                        |           |                                       |                               |            |            |
| <b>Hz</b>                                                                                                | <b>20</b> | <b>25</b> | <b>31,5</b>     | <b>40</b>                            | <b>50</b> | <b>63</b>                                              | <b>80</b> | <b>100</b>                            | <b>125</b>                    | <b>160</b> | <b>200</b> |
| <b>R1</b>                                                                                                | 52,1      | 50,8      | 49,5            | 48,3                                 | 47,2      | 46,0                                                   | 44,5      | 42,8                                  | 40,7                          | 37,7       | 36,4       |
| <b>R2</b>                                                                                                | 50,4      | 49,1      | 47,8            | 46,6                                 | 45,5      | 44,3                                                   | 42,7      | 41,1                                  | 38,9                          | 35,8       | 34,3       |
| <b>R3</b>                                                                                                | 49,1      | 47,8      | 46,5            | 45,3                                 | 44,2      | 42,9                                                   | 41,4      | 39,7                                  | 37,5                          | 34,3       | 32,7       |
| <b>R4</b>                                                                                                | 50,7      | 49,4      | 48,0            | 46,9                                 | 45,8      | 44,6                                                   | 43,0      | 41,4                                  | 39,2                          | 36,2       | 34,7       |
| <b>R5</b>                                                                                                | 50,3      | 49,0      | 47,6            | 46,5                                 | 45,4      | 44,2                                                   | 42,6      | 41,0                                  | 38,8                          | 35,7       | 34,3       |
| <b>R6</b>                                                                                                | 51,5      | 50,2      | 48,9            | 47,7                                 | 46,6      | 45,4                                                   | 43,9      | 42,2                                  | 40,1                          | 37,1       | 35,7       |