



Sitowise

Valkiavaaran tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE2)

101020250-001, 21.09.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Pinja Tikka

E-mail
pinja.tikka@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
001

Asiakas
Sitowise
Anna-Maria Kujala

Päivämäärä
21/09/2023

Projektinumero
101020250-001

Raportin tila
LUONNOS

Valkiavaaran tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE2)

Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laattija | Pvm/Tarkastaja | Merkinnät/Muutokset |
|--------|---|--|---------------------|
| 001 | 21.09.2023/ Pinja Tikka, Technical Consultant | 21.09.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant | Alkuperäinen |

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 | Ohjeavot | 8 |
| 3 | Tuulivoimakohteen melumallinnus | 10 |
| 3.1 | Keskiäänitasojen LAeq mallinnus | 10 |
| 3.2 | Matalataajuisen melun mallinnus | 15 |
| 4 | Yhteenveto..... | 20 |
| 5 | Viitteet | 21 |
| 6 | Melumallinnuksen tiedot | 22 |

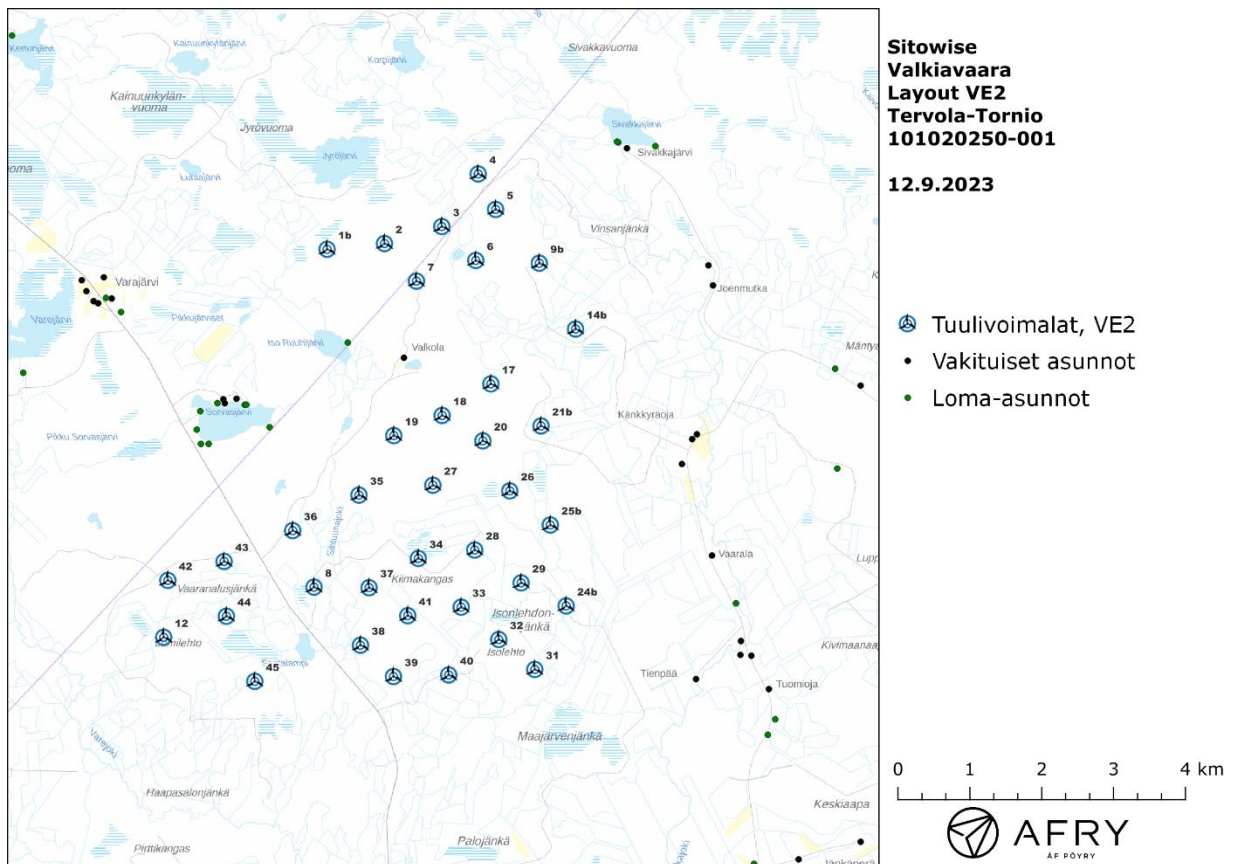
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Tervolan kuntaan ja Tornion kaupunkiin suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Meluvaikutusten arviointi tehdään 37 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Suunnitelluista tuulivoimaloista neljä voimalaa sijaitsee Tornion puolella ja 33 voimalaa Tervolan puolella. Voimaloiden sijainnit on esitetty kartta-pohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja turbiinityypin V162 5,6 MW Mode 0 (with serrated trailing edges) taajuusjakamaa. Mallinnukset on tehty kahdella äänitehotasolla:

- 106 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 104 dB(A) + varmuusarvo 2 dB(A).
- 108 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 104 dB(A) + varmuusarvo 4 dB(A)

Turbiinityypin melupäästön tunnusarvoa ei pystytä tässä yhteydessä määrittämään standardin IEC TS 61400-14 mukaisesti, joten ilmoitettuun melupäästön lukuarvoon lisätään 2 dB tunnusarvon saamiseksi. Näin määriteltynä selvityksessä käytetyt lähtömelutasot ovat ympäristöministeriön mallin-
 nusohjeistuksen mukaisia melupäästön tunnusarvoja. Toisessa mallinnuksessa käytetyllä 4 dB:n varmuusarvolla halutaan varautua tulevaisuuden suurempiin ja meluisampiin voimalatyyppeihin, joiden lähtötietoja ei ole vielä käytössä.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (37 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

| Turbiinit | E | N | Maaston korkeus [m] |
|-----------|----------|-----------|---------------------|
| 1b | 393589,2 | 7351458,7 | 147 |
| 2 | 394387,3 | 7351538,2 | 168 |
| 3 | 395185,2 | 7351775,0 | 154 |
| 4 | 395691,2 | 7352505,9 | 143 |
| 5 | 395933,6 | 7352012,2 | 153 |
| 6 | 395657,6 | 7351303,1 | 142 |
| 7 | 394832,1 | 7351015,7 | 142 |
| 8 | 393407,2 | 7346761,1 | 96 |
| 9b | 396541,6 | 7351265,2 | 119 |
| 12 | 391315,5 | 7346063,3 | 107 |
| 14b | 397046,2 | 7350349,9 | 100 |
| 17 | 395867,5 | 7349586,8 | 139 |
| 18 | 395189,4 | 7349147,9 | 165 |
| 19 | 394517,3 | 7348867,8 | 180 |
| 20 | 395756,4 | 7348794,9 | 121 |
| 21b | 396565,8 | 7349002,1 | 94 |
| 24b | 396915,0 | 7346499,8 | 79 |
| 25b | 396694,6 | 7347625,1 | 95 |
| 26 | 396130,6 | 7348099,1 | 102 |
| 27 | 395061,0 | 7348178,1 | 120 |
| 28 | 395643,1 | 7347276,9 | 97 |
| 29 | 396288,7 | 7346820,1 | 88 |
| 31 | 396479,1 | 7345616,8 | 77 |
| 32 | 395977,8 | 7346033,0 | 93 |
| 33 | 395454,2 | 7346482,8 | 89 |
| 34 | 394858,2 | 7347160,1 | 104 |
| 35 | 394032,5 | 7348040,7 | 117 |
| 36 | 393110,7 | 7347547,2 | 108 |
| 37 | 394173,3 | 7346753,1 | 99 |
| 38 | 394053,6 | 7345953,8 | 92 |
| 39 | 394512,5 | 7345518,1 | 83 |
| 40 | 395281,3 | 7345540,1 | 75 |
| 41 | 394711,0 | 7346363,7 | 98 |
| 42 | 391373,2 | 7346855,0 | 110 |
| 43 | 392156,3 | 7347118,2 | 109 |
| 44 | 392188,2 | 7346356,3 | 100 |
| 45 | 392583,6 | 7345451,4 | 99 |

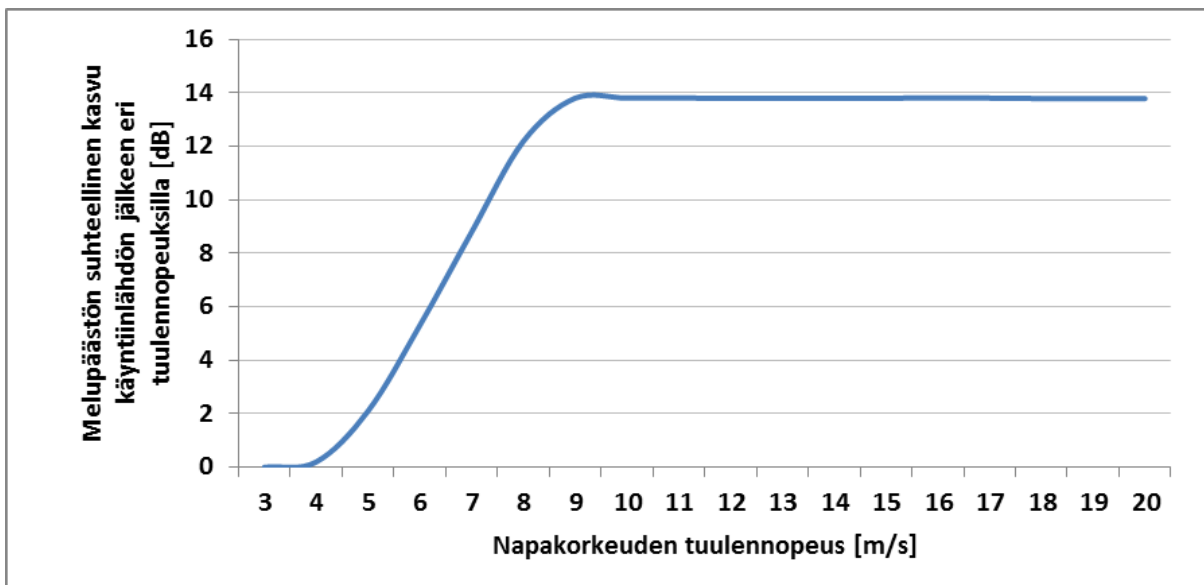
2 Tuulivoimaloiden melu

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 kokonaisäänienergiasta 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 etupuolella 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 [18].

Vaihtuvanopeuksisen tuulivoimalan äänipäästö on suoraan verrannollinen tuulennopeuteen siten, että alhaisilla tuulilla eli hitaalla roottorin pyörimisnopeudella ja lähellä käyntiinlähtönopeutta 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, vuodenajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1,5 m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemuseräisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [17].

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 noin 12 m/s modernin voimalan napakorkeudella 139–149 m [16].

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 tuotantotehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahalaudoituksen, 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 turbiinin 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 turbiinityyppien melutason vaihteluväliä 95 %:n varmuudella.

Äänitehotasot on ilmoitettava 1/3-oktaaveittain keskitaajuuksilla 20–10000 Hz ja oktaaveittain keskitaajuuksilla 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 tuuliturbiinien melupäästön arvoon, jolloin mallinnustuloksia voidaan suoraan verrata suunnitteluohjearvoihin 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 mallinnus-ohjeistuksessa 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 huo-

mioon. Lisäksi matalataajuisen 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 _{eq} päiväajalle (klo 7–22) | LA _{eq} 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 enimmäisarvot matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Ohjearvot 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 ääneneristävyyden tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

Taulukko 3: Asumisterveysasetuksen ylärajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat taajuuspainotamattomia.

| 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 |

3 Tuulivoimakohteen melumallinnus

3.1 Keskiäänitasojen LAeq mallinnus

Tuulivoimaloiden aiheuttaman keskiäänitason mallinnus on suoritettu laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. Mallinuksissa on käytetty V162 5,6 MW Mode 0 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumia. Taajuusjakaumat on saatu seuraavista turbiini-valmistajan dokumenteista:

- V162-5.6MW Third octave noise emission. DMS no: 0079-5298_01. 2019-01-23.

Dokumenttia varten turbiinityypin V162 testimittauksia ei ollut saatavilla. Esitetyt melutasot perustuvat turbiinityypillä 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.”

Turbiinityypin V162 5,6 MW äänitehotaso on 104 dB(A). Mallinnukset on tehty kahdella eri äänitehotasolla, 106 dB(A) sekä 108 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulen nopeutta 15 m/s napakorkeudella 200 m, jonka arvioidaan vastaavan melumallinnusohjeistuksen mukaista referenssinopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksissa.

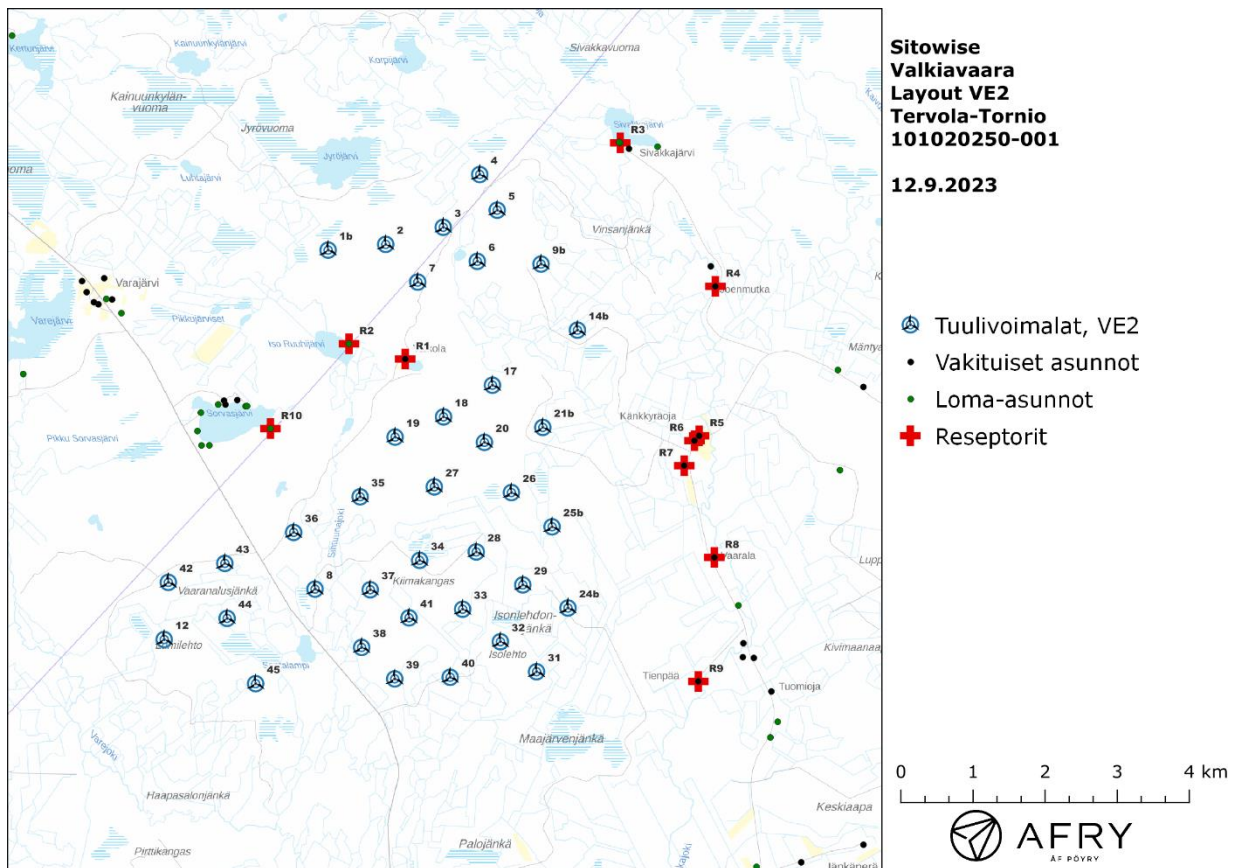
Turbiinityyppien melupäästön kapeakaistaisuuden arvioinnissa on käytetty ympäristöministeriön raportissa Ympäristömelun mittaaminen [11] esitettyä yksinkertaista menetelmää, joka perustuu äänitehotasojen vertailuun terssikaistoittain (1/3-oktaaveittain). Melun tulkitaan olevan kapeakaistaista, mikäli 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 absorptioon 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 10 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Kiinteistöjen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Reseptoripisteet sijaitsevat noin 1,0–2,2 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

| Reseptori | E | N | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus |
|-----------|--------|---------|---------------------|--------------------------|
| R1 | 394659 | 7349948 | 141 | vakituinen asuinrakennus |
| R2 | 393879 | 7350159 | 118 | lomarakennus |
| R3 | 397641 | 7352942 | 101 | lomarakennus |
| R4 | 398960 | 7350955 | 79 | vakituinen asuinrakennus |
| R5 | 398736 | 7348884 | 69 | vakituinen asuinrakennus |
| R6 | 398670 | 7348816 | 70 | vakituinen asuinrakennus |
| R7 | 398528 | 7348470 | 75 | vakituinen asuinrakennus |
| R8 | 398946 | 7347198 | 72 | vakituinen asuinrakennus |
| R9 | 398723 | 7345480 | 61 | vakituinen asuinrakennus |
| R10 | 392791 | 7348983 | 123 | lomarakennus |

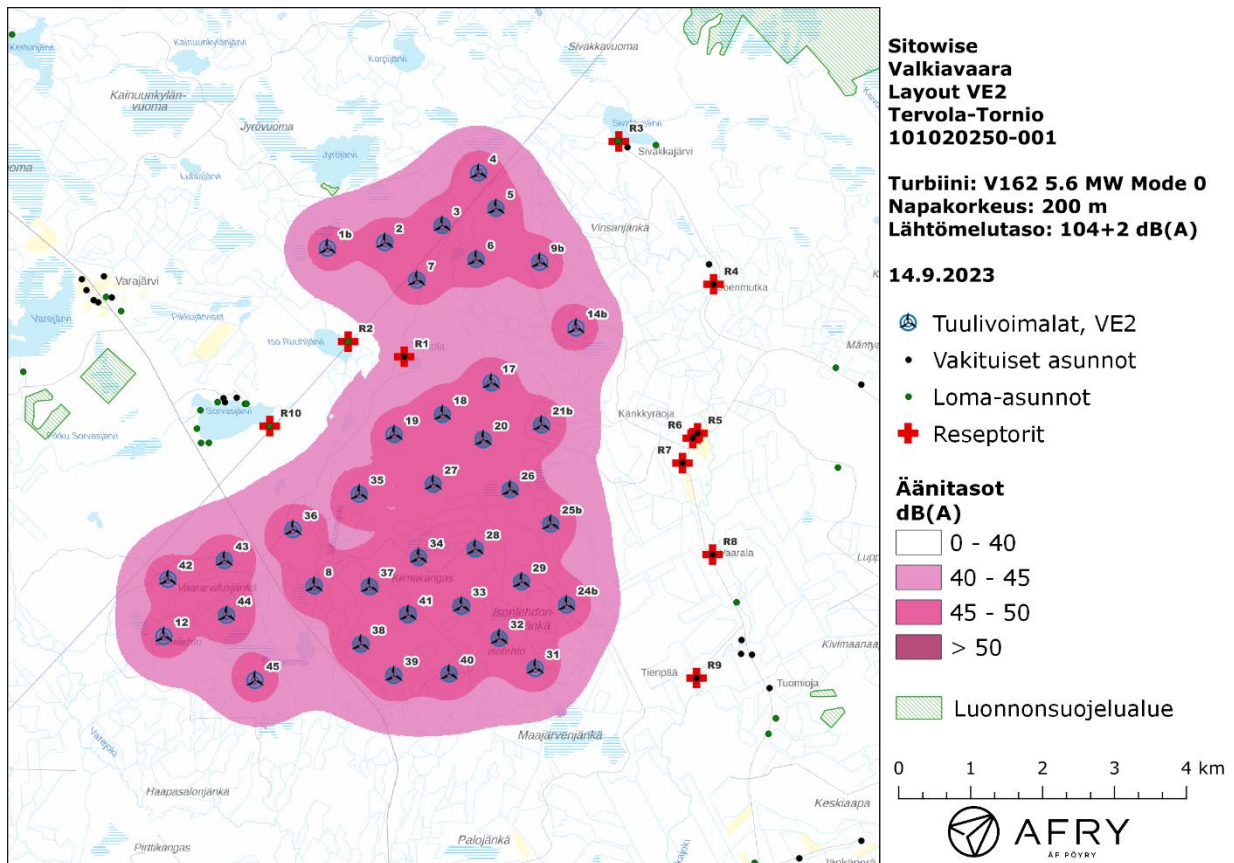


Kuva 3: Vertailukiinteistöjen paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

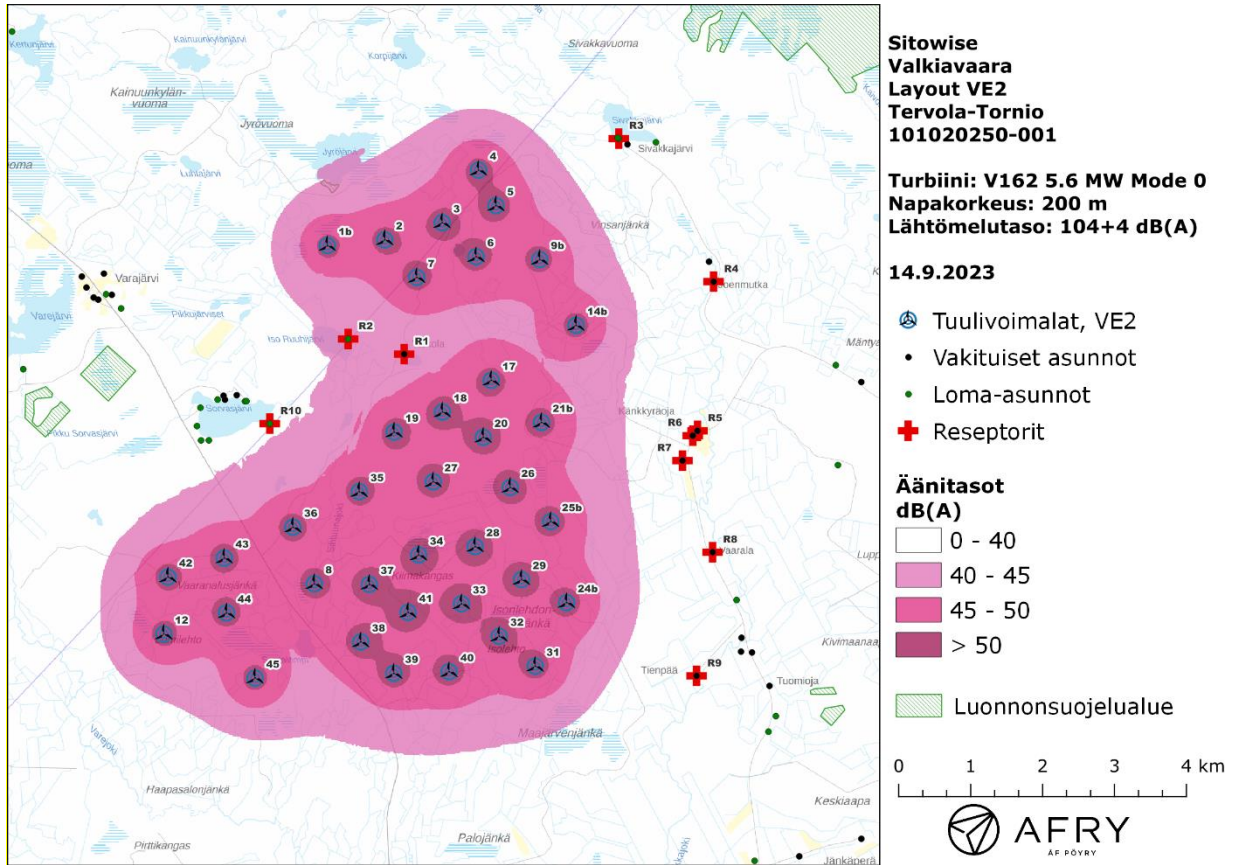
Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso L_{Aeq} on esitetty karttakuvana (Kuva 4 ja Kuva 5). Karttakuvaan on merkitty keskiäänitasojen 40 dB(A), 45 dB(A) ja 50 dB(A) mukaiset vyöhykkeet, joita käytetään apuna tulosten arvioinnissa. Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuin- ja lomarakennukset. Karttakuvaan on merkitty myös hankkeen ympäristössä sijaitsevat luonnonsuojelualueet, joista yksi altistuu tuulivoimaloiden melulle kun turbiinien äänitehotaso on 108 dB(A). Melu ei kuitenkaan ylitä virkistysalueiden 45 dB(A) ohjearvoa luonnonsuojelualueella.

Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukoissa (Taulukko 5 ja Taulukko 6). Mallinustulosten perusteella keskiäänitasot ylittävät valtioneuvoston asetuksen ohjearvon yhden rakennuksen kohdalla kun äänitehotaso on 106 dB(A), ja kahden rakennuksen kohdalla kun äänitehotaso on 108 dB(A). Muiden loma- ja asuinrakennusten kohdalla meluvaikutukset jäävät 40 dB:n ohjearvon.



Kuva 4: Keskiäänitasot L_{Aeq} tuulivoimapaiston hankealueella kun turbiinien äänitehotaso on 106 dB(A).



Kuva 5: Keskiäänitasot LAeq tuulivoimapaiston hankealueella kun turbiinien äänitehotaso on 108 dB(A).

Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla kun turbiinien äänitehotaso on 106 dB(A).

| Reseptori | Äänitaso dB(A) |
|-----------|----------------|
| R1 | 41,2 |
| R2 | 39,2 |
| R3 | 33,3 |
| R4 | 32,5 |
| R5 | 33,7 |
| R6 | 34,0 |
| R7 | 34,5 |
| R8 | 33,0 |
| R9 | 32,5 |
| R10 | 36,4 |

Taulukko 6: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla kun turbiinien äänitehotaso on 108 dB(A).

| Reseptori | Äänitaso dB(A) |
|-----------|----------------|
| R1 | 43,2 |
| R2 | 41,2 |
| R3 | 35,3 |
| R4 | 34,5 |
| R5 | 35,7 |
| R6 | 36,0 |
| R7 | 36,5 |
| R8 | 35,0 |
| R9 | 34,5 |
| R10 | 38,4 |

3.2 Matalataajuisen melun mallinnus

Matalataajuisen 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. Matalataajuisen melun laskenta suoritetaan taajuuspainottamattomilla melutasoilla.

Meluvaikutus

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

Ympäristöministeriön ohjeiden mukainen matalataajuisen melun laskenta perustuu Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa esitettyyn menetelmään [3], jonka parametreihin on tehty joitakin Suomen olosuhteisiin perustuvia tarkennuksia. Tanskan menetelmässä on määritelty rakennuksen ääneneristävyysparametri (ΔL_G) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja ohjearvoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyysparametrit perustuvat sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeisiin että 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] eristävyysarvot 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 vertailukiinteistöjen matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä molempia ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 7) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyiden arvot.

Taulukko 7: Rakennuksen äänieristävyiden arvoja taajuuskaistoittain.

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

Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen molempia ääneneristysarvoja (Taulukko 7) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 8). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot.

Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailukiinteistöihin R1 ja R2, joiden kohdalla on laskettu myös sisämelutasot käyttäen molempia ääneneristävyyssarjoja ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 6-Kuva 9). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä ja molemmilla ääneneristävyyssarjoilla.

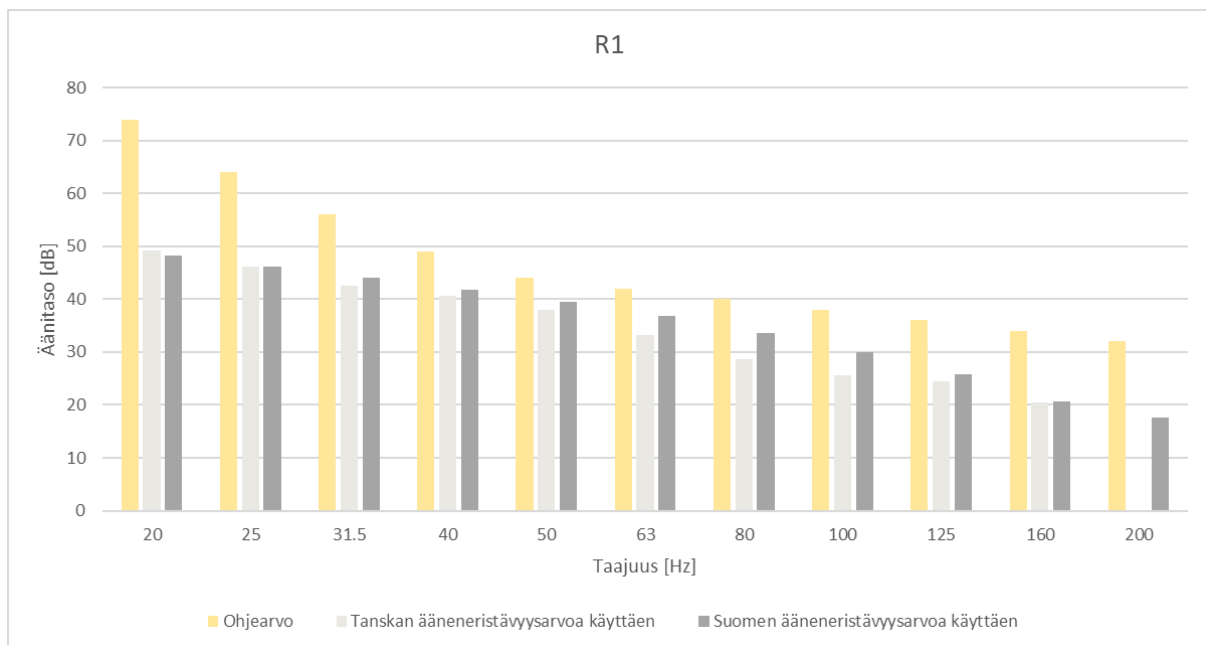
Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 3) lisäksi ohjearvot päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Yöaikainen (klo 22–7) keskiäänitaso ei saa ylittää 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti 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. Lähtökohtaisesti näiden yöajan ohjearvojen oletetaan alittuvan, mikäli melumallinnuksen tulos ulkona sekä matalataajuisen melun tulokset alittavat valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot. Raportin mallinnusten perusteella voimaloiden aiheuttamat ulkomelutasot ylittävät 40 dB(A):n ohjearvon yhden rakennuksen kohdalla kun äänitehotaso on 106 dB(A), ja kahden rakennuksen kohdalla kun äänitehotaso on 108 dB(A). On mahdollista, että kyseisten rakennusten kohdalla myös asumisterveysasetuksen 30 dB(A):n ohjearvo yöajan sisämelutasolle ylittyy.

Taulukko 8: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla kun turbiinien äänitehotaso on 106 dB(A).

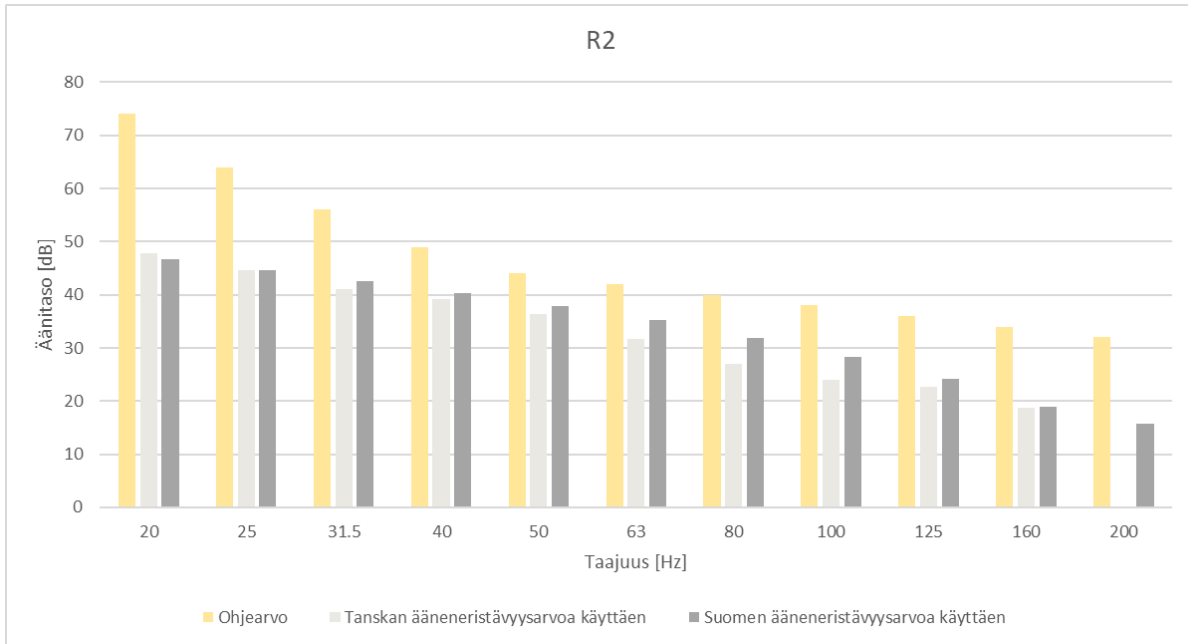
| taajuus | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1 | 55,8 | 54,5 | 53,3 | 52,1 | 51,0 | 49,8 | 48,3 | 46,7 | 44,6 | 41,6 | 40,4 |
| R2 | 54,3 | 53,0 | 51,8 | 50,6 | 49,5 | 48,2 | 46,8 | 45,1 | 43,0 | 39,9 | 38,5 |
| R3 | 50,1 | 48,8 | 47,5 | 46,3 | 45,1 | 43,8 | 42,3 | 40,6 | 38,3 | 35,0 | 33,4 |
| R4 | 49,6 | 48,2 | 47,0 | 45,7 | 44,6 | 43,3 | 41,8 | 39,9 | 37,6 | 34,2 | 32,5 |
| R5 | 50,8 | 49,4 | 48,2 | 46,9 | 45,8 | 44,5 | 43,0 | 41,2 | 38,9 | 35,6 | 33,9 |
| R6 | 50,9 | 49,6 | 48,4 | 47,1 | 46,0 | 44,7 | 43,2 | 41,4 | 39,1 | 35,8 | 34,2 |
| R7 | 51,3 | 50,0 | 48,7 | 47,5 | 46,4 | 45,1 | 43,6 | 41,8 | 39,5 | 36,3 | 34,7 |
| R8 | 50,4 | 49,0 | 47,8 | 46,5 | 45,4 | 44,1 | 42,6 | 40,8 | 38,4 | 35,1 | 33,4 |
| R9 | 49,9 | 48,6 | 47,3 | 46,1 | 44,9 | 43,6 | 42,1 | 40,3 | 37,9 | 34,6 | 32,9 |
| R10 | 53,4 | 52,0 | 50,8 | 49,6 | 48,4 | 47,2 | 45,7 | 44,0 | 41,8 | 38,7 | 37,3 |

Taulukko 9: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla kun turbiinien äänitehotaso on 108 dB(A).

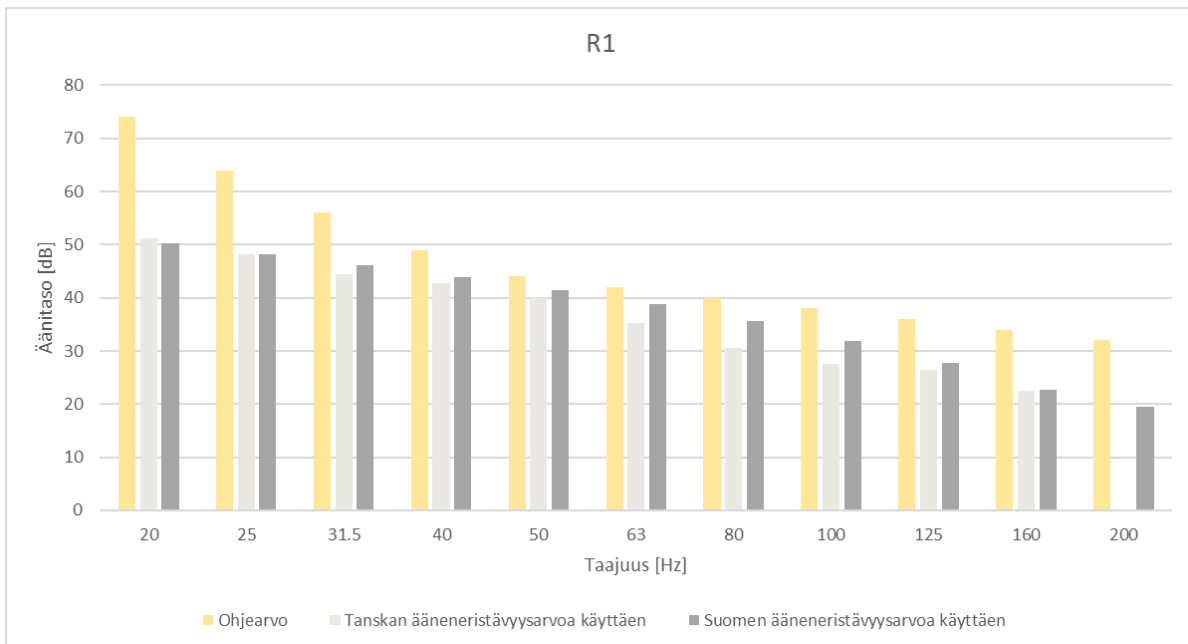
| taajuus | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1 | 57,8 | 56,5 | 55,3 | 54,1 | 53,0 | 51,8 | 50,3 | 48,7 | 46,6 | 43,6 | 42,4 |
| R2 | 56,3 | 55,0 | 53,8 | 52,6 | 51,5 | 50,2 | 48,8 | 47,1 | 45,0 | 41,9 | 40,5 |
| R3 | 52,1 | 50,8 | 49,5 | 48,3 | 47,1 | 45,8 | 44,3 | 42,6 | 40,3 | 37,0 | 35,4 |
| R4 | 51,6 | 50,2 | 49,0 | 47,7 | 46,6 | 45,3 | 43,8 | 41,9 | 39,6 | 36,2 | 34,5 |
| R5 | 52,8 | 51,4 | 50,2 | 48,9 | 47,8 | 46,5 | 45,0 | 43,2 | 40,9 | 37,6 | 35,9 |
| R6 | 52,9 | 51,6 | 50,4 | 49,1 | 48,0 | 46,7 | 45,2 | 43,4 | 41,1 | 37,8 | 36,2 |
| R7 | 53,3 | 52,0 | 50,7 | 49,5 | 48,4 | 47,1 | 45,6 | 43,8 | 41,5 | 38,3 | 36,7 |
| R8 | 52,4 | 51,0 | 49,8 | 48,5 | 47,4 | 46,1 | 44,6 | 42,8 | 40,4 | 37,1 | 35,4 |
| R9 | 51,9 | 50,6 | 49,3 | 48,1 | 46,9 | 45,6 | 44,1 | 42,3 | 39,9 | 36,6 | 34,9 |
| R10 | 55,4 | 54,0 | 52,8 | 51,6 | 50,4 | 49,2 | 47,7 | 46,0 | 43,8 | 40,7 | 39,3 |



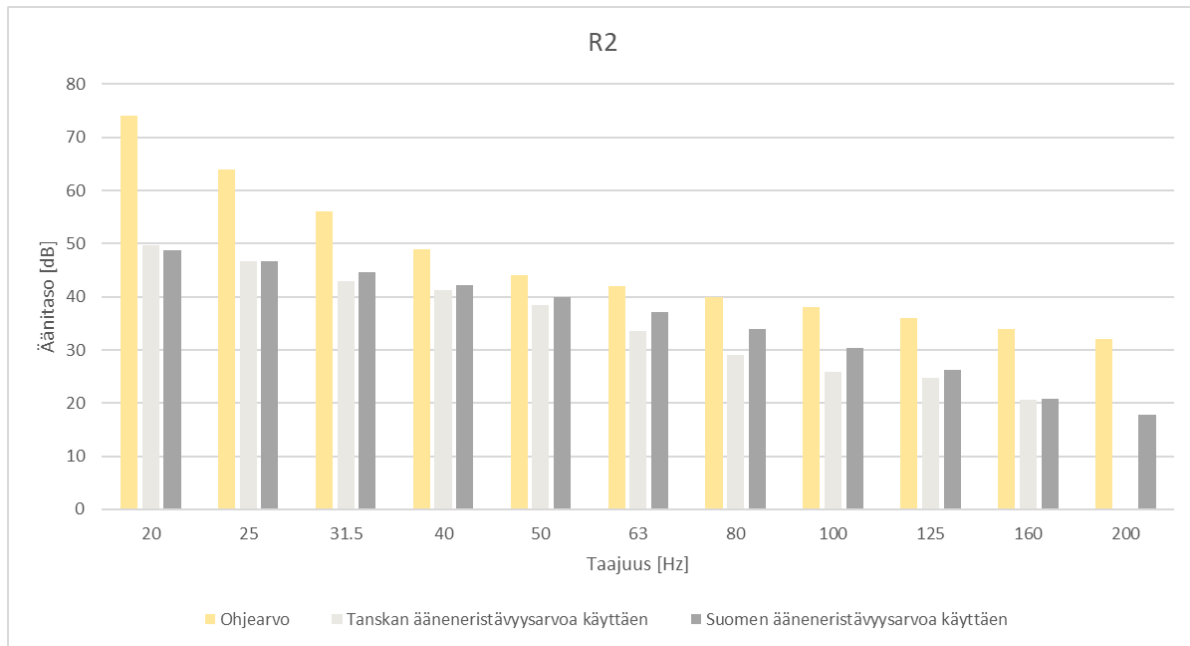
Kuva 6: Matalataajuisen sisämelun tasot vertailukiinteistön R1 kohdalla kun turbiinien äänitehotaso on 106 dB(A).



Kuva 7: Matalataajuisten sisämelun tasot vertailukiinteistön R2 kohdalla kun turbiinien äänitehotaso on 106 dB(A).



Kuva 8: Matalataajuisten sisämelun tasot vertailukiinteistön R1 kohdalla kun turbiinien äänitehotaso on 108 dB(A).



Kuva 9: Matalataajuisen sisämelun tasot vertailukiinteistön R2 kohdalla kun turbiinien äänitehotaso on 108 dB(A).

4 Yhteenveto

Selvityksessä arvioidaan Tervolan kuntaan ja Tornion kaupunkiin suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Meluvaikutusten arviointi tehdään 37 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Arvioinnissa on käytetty napakorkeutta 200 m ja voimalatyyppin V162 5,6 MW (mode 0) taajuusjakaumia.

Mallinnusten perusteella keskiäänitasot ylittävät valtioneuvoston asetuksen ohjearvon yhden rakennuksen kohdalla kun äänitehotaso on 106 dB(A), ja kahden rakennuksen kohdalla kun äänitehotaso on 108 dB(A). Muiden asuin- ja lomarakennusten kohdalla keskiäänitasot jäävät alle valtioneuvoston ohjearvon. Matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla asumisterveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella.

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 ohjeista. 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] G.P. van den Berg: The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral Thesis, University of Groningen, Holland, 2006.
- [17] 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.
- [18] 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: 101020250-001 | | | | Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 21.09.2023 | | | |
| Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: AFRY Finland Oy | | | | | | | |
| Vastuhenkilöt: Pinja Tikka ja Mika Laitinen | | | | | | | |
| Laatija: Pinja Tikka | | | | Tarkastaja/hyväksyjä: Mika Laitinen | | | |
| MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT | | | | | | | |
| Mallinnusohjelma ja versio: AFRY Numerola -mallinnusohjelmisto | | | | Mallinnusmenetelmä: ISO 9613-2 | | | |
| TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN) TIEDOT | | | | | | | |
| Tuulivoimalan valmistaja: Vestas | | | | Tyyppi: V162 5.6 MW Mode 0 (with serrated trailing edges) | | Sarjanumero/t: | |
| Nimellisteho: 5.6 MW | | Napakorkeus: 200 m | | Roottorin halkaisija: 200 m | | Tornin tyyppi: | |
| Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön käytön aikana ja sen vaikutus meluun | | | | | | | |
| Lapakulman säätö | | Pyörimisnopeus | | Muu, mikä | | | |
| Kyllä | dB | Kyllä | dB | | | dB | |
| Ei | Ei tiedossa | Ei | Ei tiedossa | | | dB | |
| AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT | | | | | | | |
| V162-5.6MW Third octave noise emission. DMS no: 0079-5298_01. 2019-01-23. | | | | | | | |
| Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot): | | | | | | | |
| Oktaaveittain [Hz] | | | | 1/3-oktaaveittain [Hz] | | | |
| 31,5 | 74,5 | 20 | 59,8 | 200 | 91 | 2000 | 89,6 |
| 63 | 84,9 | 25 | 64,3 | 250 | 92,3 | 2500 | 87,7 |
| 125 | 92,4 | 31,5 | 68,6 | 315 | 93,3 | 3150 | 85,4 |
| 250 | 97,1 | 40 | 72,6 | 400 | 94 | 4000 | 82,7 |
| 500 | 99,0 | 50 | 76,1 | 500 | 94,3 | 5000 | 79,9 |
| 1000 | 98,1 | 63 | 79,4 | 630 | 94,4 | 6300 | 76,7 |
| 2000 | 94,5 | 80 | 82,5 | 800 | 94 | 8000 | 72,9 |
| 4000 | 88,0 | 100 | 85 | 1000 | 93,4 | 10000 | 69,2 |
| 8000 | 78,7 | 125 | 87,3 | 1250 | 92,5 | | |
| | | 160 | 89,4 | 1600 | 91,1 | | |

| | | | | | | |
|--|-----------|--------------------------------------|-----------|--|-------------------------------|------------|
| Melun erityispiirteiden mittaustulos ja havainnot: | | | | | | |
| Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus | | Impulssimaisuus | | Merkityksellinen sykintä (amplitudi- 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: Maanmittauslaitos | | | | Vaakaresoluutio: 2 m | Pystyresoluutio: 0,3 m | |
| Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet | | | | | | |
| ISO 9613-2 | | | | | | |
| Vesialueet, (0) / (G) | | | | | | |
| Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F) | | | | | | |
| Maa-alueet (0) / (G) | | | | | | |
| Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus | | | | | | |
| Neutraali | | | | | | |
| Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen | | | | | | |
| Vapaa avaruus | | | | | | |
| Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta) | | | | | | |
| Asuinrakennukset: 0 kpl | | Vapaa-ajan rakennukset: 1 kpl | | Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl | | |
| Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden) | | | | | | |
| Asuinrakennukset: 0 kpl | | Vapaa-ajan rakennukset: 1 kpl | | Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl | | |
| Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille | | | | | | |
| Virkistysalueet: 0 kpl | | | | Luonnonsuojelualueet: 2 kpl | | |
| Turbiinien äänitehotaso 106 dB(A) | | | | | | |
| Hz | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| 20 | 55,8 | 54,3 | 50,1 | 49,6 | 50,8 | 50,9 |
| 25 | 54,5 | 53,0 | 48,8 | 48,2 | 49,4 | 49,6 |
| 31,5 | 53,3 | 51,8 | 47,5 | 47,0 | 48,2 | 48,4 |
| 40 | 52,1 | 50,6 | 46,3 | 45,7 | 46,9 | 47,1 |
| 50 | 51,0 | 49,5 | 45,1 | 44,6 | 45,8 | 46,0 |
| 63 | 49,8 | 48,2 | 43,8 | 43,3 | 44,5 | 44,7 |
| 80 | 48,3 | 46,8 | 42,3 | 41,8 | 43,0 | 43,2 |
| 100 | 46,7 | 45,1 | 40,6 | 39,9 | 41,2 | 41,4 |
| 125 | 44,6 | 43,0 | 38,3 | 37,6 | 38,9 | 39,1 |
| 160 | 41,6 | 39,9 | 35,0 | 34,2 | 35,6 | 35,8 |
| 200 | 40,4 | 38,5 | 33,4 | 32,5 | 33,9 | 34,2 |

| Hz | R7 | R8 | R9 | R10 | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| 20 | 51,3 | 50,4 | 49,9 | 53,4 | | |
| 25 | 50,0 | 49,0 | 48,6 | 52,0 | | |
| 31,5 | 48,7 | 47,8 | 47,3 | 50,8 | | |
| 40 | 47,5 | 46,5 | 46,1 | 49,6 | | |
| 50 | 46,4 | 45,4 | 44,9 | 48,4 | | |
| 63 | 45,1 | 44,1 | 43,6 | 47,2 | | |
| 80 | 43,6 | 42,6 | 42,1 | 45,7 | | |
| 100 | 41,8 | 40,8 | 40,3 | 44,0 | | |
| 125 | 39,5 | 38,4 | 37,9 | 41,8 | | |
| 160 | 36,3 | 35,1 | 34,6 | 38,7 | | |
| 200 | 34,7 | 33,4 | 32,9 | 37,3 | | |
| Turbiinien äänitehotaso 108 dB(A) | | | | | | |
| Hz | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| 20 | 57,8 | 56,3 | 52,1 | 51,6 | 52,8 | 52,9 |
| 25 | 56,5 | 55,0 | 50,8 | 50,2 | 51,4 | 51,6 |
| 31,5 | 55,3 | 53,8 | 49,5 | 49,0 | 50,2 | 50,4 |
| 40 | 54,1 | 52,6 | 48,3 | 47,7 | 48,9 | 49,1 |
| 50 | 53,0 | 51,5 | 47,1 | 46,6 | 47,8 | 48,0 |
| 63 | 51,8 | 50,2 | 45,8 | 45,3 | 46,5 | 46,7 |
| 80 | 50,3 | 48,8 | 44,3 | 43,8 | 45,0 | 45,2 |
| 100 | 48,7 | 47,1 | 42,6 | 41,9 | 43,2 | 43,4 |
| 125 | 46,6 | 45,0 | 40,3 | 39,6 | 40,9 | 41,1 |
| 160 | 43,6 | 41,9 | 37,0 | 36,2 | 37,6 | 37,8 |
| 200 | 42,4 | 40,5 | 35,4 | 34,5 | 35,9 | 36,2 |
| Hz | R7 | R8 | R9 | R10 | | |
| 20 | 53,3 | 52,4 | 51,9 | 55,4 | | |
| 25 | 52,0 | 51,0 | 50,6 | 54,0 | | |
| 31,5 | 50,7 | 49,8 | 49,3 | 52,8 | | |
| 40 | 49,5 | 48,5 | 48,1 | 51,6 | | |
| 50 | 48,4 | 47,4 | 46,9 | 50,4 | | |
| 63 | 47,1 | 46,1 | 45,6 | 49,2 | | |
| 80 | 45,6 | 44,6 | 44,1 | 47,7 | | |
| 100 | 43,8 | 42,8 | 42,3 | 46,0 | | |
| 125 | 41,5 | 40,4 | 39,9 | 43,8 | | |
| 160 | 38,3 | 37,1 | 36,6 | 40,7 | | |
| 200 | 36,7 | 35,4 | 34,9 | 39,3 | | |