



Pohjan Voima Oy

**Moskuankankaan tuulivoimahankkeen meluselvitys, VE1**

101021203-006

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Kalle Auvinen

E-mail  
[kalle.auvinen@afry.com](mailto:kalle.auvinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
002

Asiakas  
Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

Päivämäärä  
15/03/2024

Projektinumero  
101021203-006

Raportin tila  
VALMIS

## Moskuankankaan tuulivoimahankkeen meluseelvitys, VE1

## Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laatiija  | Pvm/Tarkastaja                                      | Merkinnät/Muutokset   |
|--------|---|---|---|
| 001    | 11.10.2023/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 11.10.2023/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Alkuperäinen<br>(Raportti 101021203-006.001)  |
| 002    | 15.03.2024/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 15.03.2024/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Hallakallion<br>voimalakoordinaatit lisätty<br>raporttiin<br>(Raportti 101021203-006.002) |

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

## Sisällysluettelo

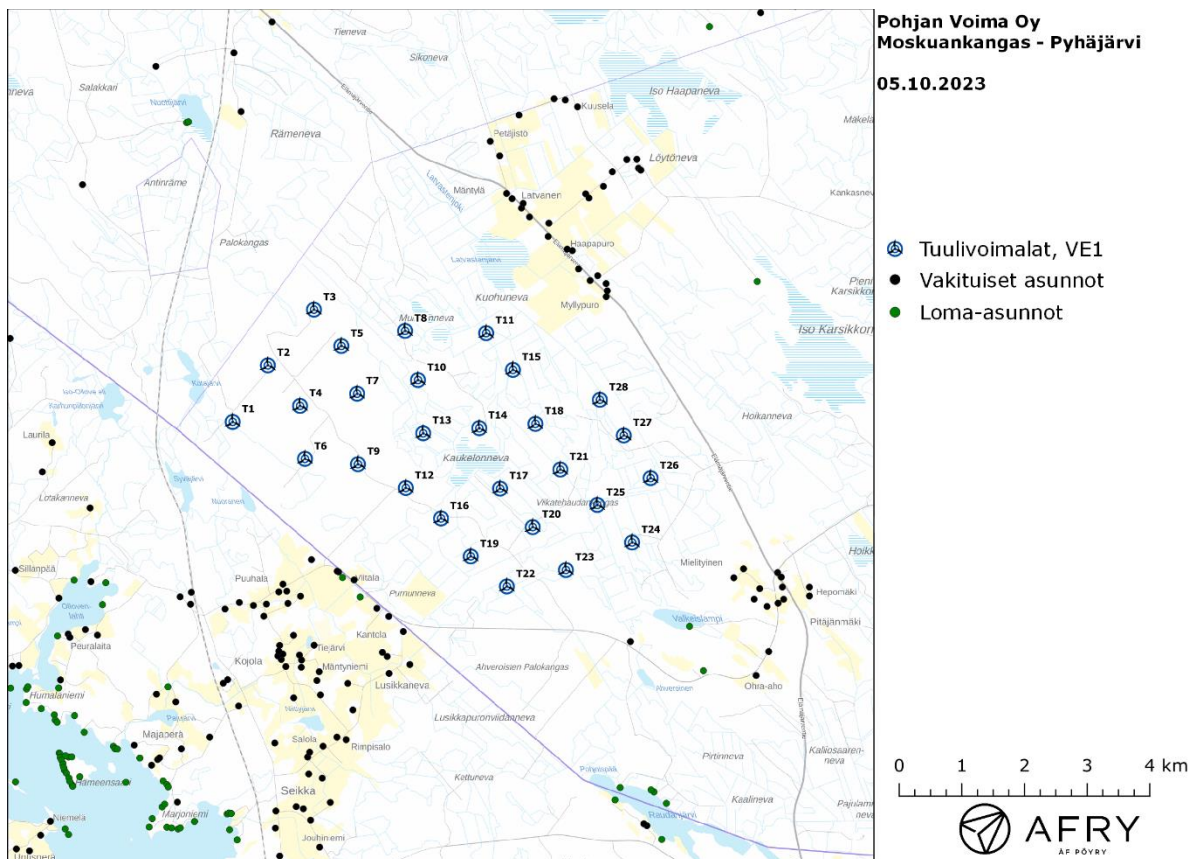
|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Johdanto .....  | 4  |
| 2   | Tuulivoimaloiden melu .....   | 6  |
| 2.1 | Yleistä tuulivoimamelusta .....                                       | 6  |
| 2.2 | Melumallinnusohjeistus.....   | 7  |
| 2.3 | Ohjearvot .....   | 8  |
| 3   | Tuulivoimakohteen melumallinnus .....                                 | 9  |
| 3.1 | Keskiäänitasojen LAeq mallinnus .....                                 | 9  |
| 3.2 | Matalataajuisen melun mallinnus .....                                 | 13 |
| 3.3 | Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus ..... | 16 |
| 4   | Yhteenveto .....  | 21 |
| 5   | Viitteet .....  | 22 |
| 6   | Melumallinnuksen tiedot .....   | 23 |

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kunnan alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 28 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE1. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttaphojalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja turbiinityypin V172-7.2 MW PO7200 (blades with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasolla 108,9 dB(A) (turbiini valmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 106,9 dB(A) + varmuusarvo 2 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 mallinnusohjeistuksen mukaisia melupäästön tunnusarvoja.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan sekä läheisten Pajuperänkankaan (rakenteilla) ja Hallakallion (suunnitteilla) tuulivoimapuistojen melun yhteisvaikutuksia.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiini-paikalla.*

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| T1        | 418894 | 7051545 | 128                 |
| T2        | 419455 | 7052445 | 155                 |
| T3        | 420191 | 7053333 | 156                 |
| T4        | 419969 | 7051800 | 159                 |
| T5        | 420628 | 7052755 | 158                 |
| T6        | 420048 | 7050957 | 144                 |
| T7        | 420880 | 7051994 | 156                 |
| T8        | 421645 | 7052995 | 145                 |
| T9        | 420893 | 7050871 | 144                 |
| T10       | 421851 | 7052212 | 150                 |
| T11       | 422939 | 7052959 | 140                 |
| T12       | 421657 | 7050493 | 143                 |
| T13       | 421934 | 7051364 | 147                 |
| T14       | 422829 | 7051445 | 145                 |
| T15       | 423366 | 7052374 | 140                 |
| T16       | 422219 | 7050007 | 138                 |
| T17       | 423161 | 7050483 | 145                 |
| T18       | 423725 | 7051514 | 143                 |
| T19       | 422693 | 7049403 | 138                 |
| T20       | 423682 | 7049869 | 148                 |
| T21       | 424123 | 7050786 | 146                 |
| T22       | 423269 | 7048924 | 142                 |
| T23       | 424212 | 7049186 | 156                 |
| T24       | 425268 | 7049625 | 155                 |
| T25       | 424712 | 7050222 | 153                 |
| T26       | 425563 | 7050650 | 150                 |
| T27       | 425135 | 7051329 | 145                 |
| T28       | 424754 | 7051897 | 141                 |

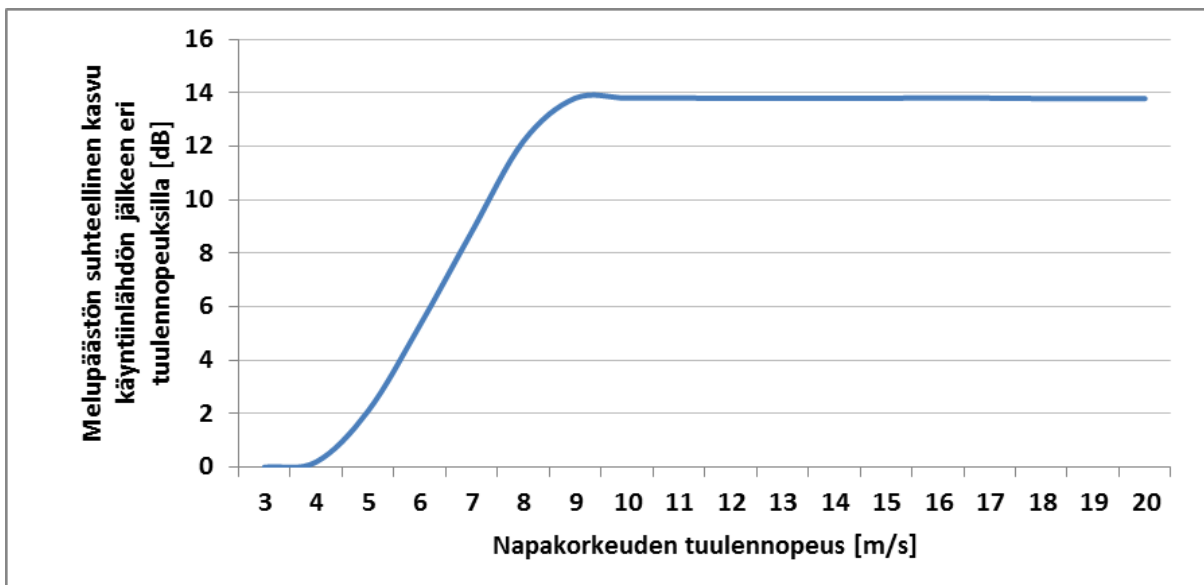
## 2 Tuulivoimaloiden melu

### 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 siipikulmasäättö 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 kokemusperäisesti 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 tuotantototeeseen. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahailoidituksen, 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 suunnitteluohjeisiin ilman erillistä epävarmuustarkastelua, 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 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 <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 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 ääneneristävyys tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

*Taulukko 3: Asumisterveysasetuksen ylärajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat taajuuspainottamattomia.*

| Taajuus [Hz]                     | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
|----------------------------------|----|----|------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Äänitaso L <sub>eq,1h</sub> [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. Mallinnuksessa on käytetty turbiinityypin V172-7.2 MW PO7200 (blades with serrated trailing edges) taajuusjakaumia. Taajuusjakaumat on saatu seuraavista turbiinivalmistajan dokumenteista:

- Third octave noise emission, EnVentus™, V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0128-4336\_00, 2022-06-30.

Dokumenttia varten turbiinityypin V172 testimittauksia ei ollut saatavilla. Esitetyt melutasot perustuvat turbiinityypillä V136 tehtyihin mittauksiin, joiden perusteella V172: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 V172-7.2 MW PO7200 äänitehotaso on 106,9 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoa 108,9 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulennopeutta 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.

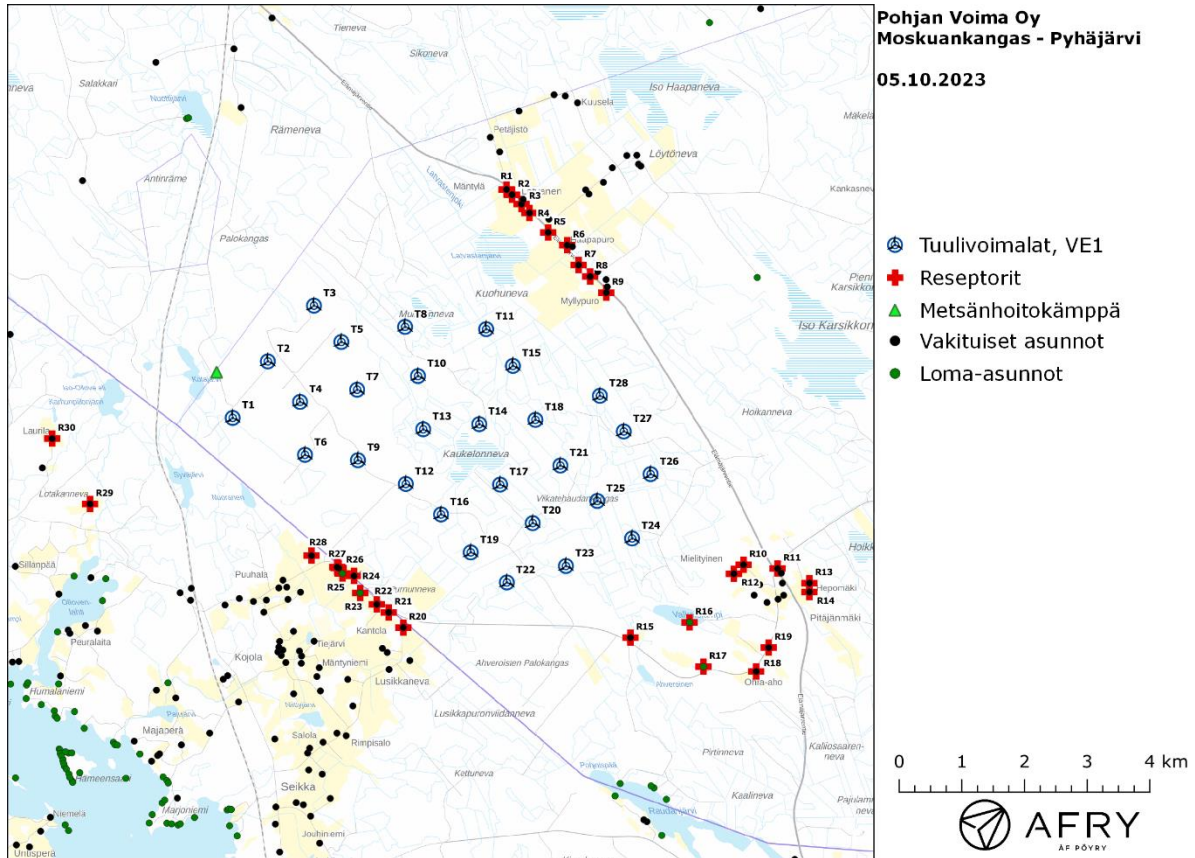
Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 10 m. Ilmakehän 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 30 vertailurakennusta, joiden kohdilla keskiäänitason LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttaphojalla (Kuva 3). Rakennusten sijaitsevat noin 1,5–3,0 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 800 m voimalan T1 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan, kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä melu-vaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 4: Reseptoripisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

| Reseptori | E      | N       | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus  |
|-----------|--------|---------|---------------------|-------------------|
| R1        | 423266 | 7055182 | 140                 | vakituinen asunto |
| R2        | 423354 | 7055098 | 139                 | vakituinen asunto |
| R3        | 423504 | 7054949 | 139                 | vakituinen asunto |
| R4        | 423632 | 7054807 | 140                 | vakituinen asunto |
| R5        | 423929 | 7054496 | 139                 | vakituinen asunto |
| R6        | 424233 | 7054294 | 139                 | vakituinen asunto |
| R7        | 424415 | 7053979 | 140                 | vakituinen asunto |
| R8        | 424599 | 7053795 | 141                 | vakituinen asunto |
| R9        | 424857 | 7053538 | 143                 | vakituinen asunto |
| R10       | 427048 | 7049203 | 216                 | vakituinen asunto |
| R11       | 427591 | 7049143 | 192                 | vakituinen asunto |
| R12       | 426892 | 7049059 | 210                 | vakituinen asunto |
| R13       | 428099 | 7048911 | 198                 | vakituinen asunto |
| R14       | 428099 | 7048770 | 194                 | vakituinen asunto |
| R15       | 425243 | 7048043 | 162                 | vakituinen asunto |
| R16       | 426186 | 7048286 | 162                 | loma-asunto       |
| R17       | 426407 | 7047580 | 199                 | loma-asunto       |
| R18       | 427249 | 7047503 | 189                 | vakituinen asunto |
| R19       | 427450 | 7047884 | 191                 | vakituinen asunto |
| R20       | 421618 | 7048203 | 131                 | vakituinen asunto |
| R21       | 421386 | 7048444 | 133                 | vakituinen asunto |
| R22       | 421195 | 7048572 | 131                 | vakituinen asunto |
| R23       | 420929 | 7048754 | 128                 | loma-asunto       |
| R24       | 420833 | 7049026 | 126                 | vakituinen asunto |
| R25       | 420648 | 7049063 | 125                 | loma-asunto       |
| R26       | 420585 | 7049153 | 127                 | vakituinen asunto |
| R27       | 420563 | 7049165 | 127                 | vakituinen asunto |
| R28       | 420153 | 7049349 | 128                 | vakituinen asunto |
| R29       | 416620 | 7050172 | 128                 | vakituinen asunto |
| R30       | 416015 | 7051213 | 128                 | vakituinen asunto |



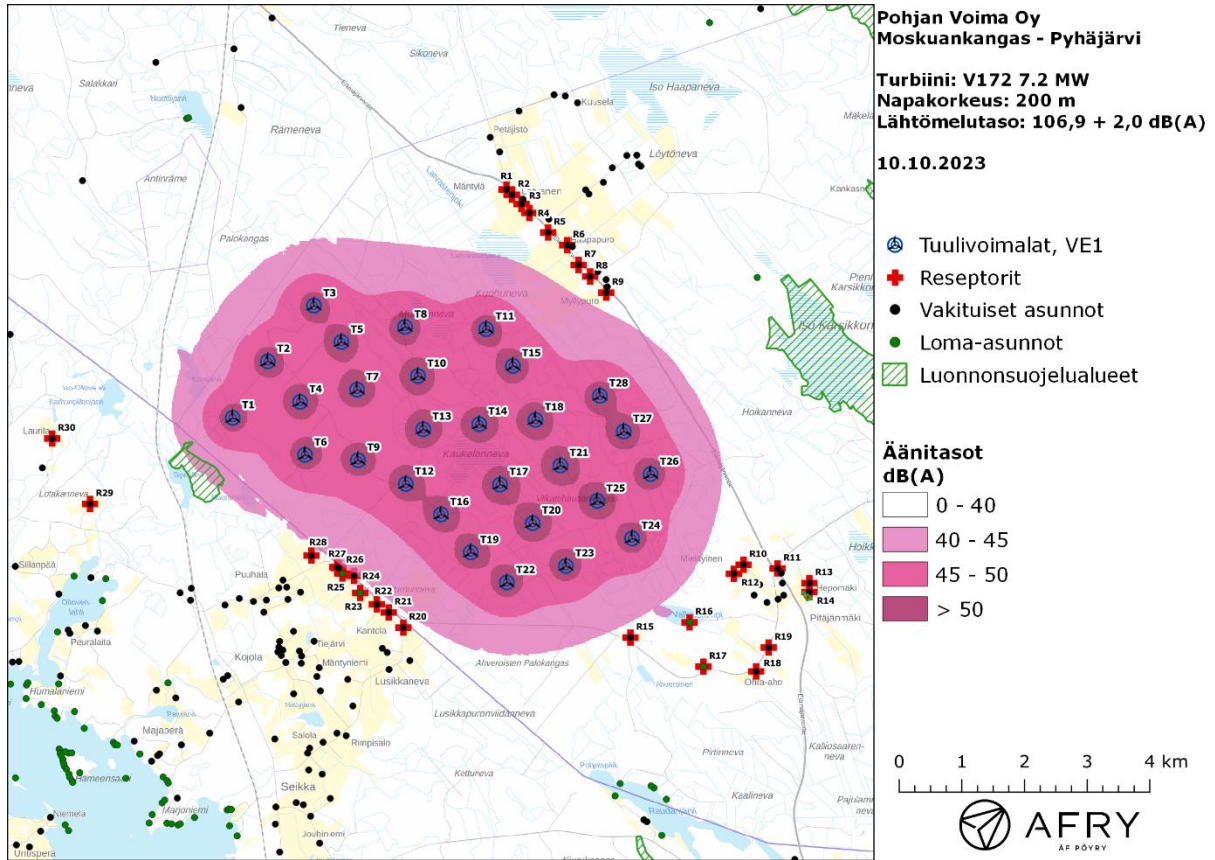
Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

## Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso Laeq on esitetty karttakuvana (Kuva 4). 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 ohjearvojen alapuolelle kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla.

Karttakuvassa on lisäksi esitetty hankkeen ympäristössä sijaitsevat luonnonsuojelualueet. Luonnonsuojelualueisiin sovelletaan virkistysalueiden 45 dB(A) melun ohjearvoa. Myös luonnonsuojelualueilla melutasot pysyvät ohjearvoissa.



Kuva 4: Keskiäänitasot LAeq tuulivoimapaiston hankealueella.

Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.

| Reseptori | Äänitaso dB(A) |
|-----------|----------------|
| R1        | 35,5           |
| R2        | 35,7           |
| R3        | 36,0           |
| R4        | 36,4           |
| R5        | 37,1           |
| R6        | 37,2           |
| R7        | 38,1           |
| R8        | 38,3           |
| R9        | 38,8           |
| R10       | 36,5           |
| R11       | 33,0           |
| R12       | 36,9           |
| R13       | 32,1           |



|     |      |
|-----|------|
| R14 | 31,5 |
| R15 | 38,8 |
| R16 | 38,2 |
| R17 | 33,7 |
| R18 | 28,5 |
| R19 | 31,1 |
| R20 | 38,9 |
| R21 | 39,2 |
| R22 | 39,2 |
| R23 | 39,2 |
| R24 | 39,9 |
| R25 | 39,5 |
| R26 | 39,7 |
| R27 | 39,7 |
| R28 | 39,3 |
| R29 | 32,4 |
| R30 | 31,4 |

### 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 rakennusten kohdilla. Tulokset eivät siis ole suoraan vertailukelpoisia ohjearvojen kanssa, vaan tulkinnassa pitää huomioida myös rakennusten ulkovaipan ääneneristävyyys.

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 ääneneristävyyssparametri ( $\Delta L_{\sigma}$ ) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja ohjearvoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyyssparametrit perustuvat tutkimukseen suomalaisten pientalojen äänieristävyyden 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 vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyyden arvot.

Taulukko 6: Rakennuksen äänieristävyyden arvoja taajuuskaistoittain.

| Taajuus [Hz]                                | 20  | 25  | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ääneneristävyys [dB]<br>(Tanskan ohjeistus) | 6,6 | 8,4 | 10,8 | 11,4 | 13,0 | 16,6 | 19,7 | 21,2 | 20,2 | 21,2 | -    |
| Ääneneristävyys [dB]<br>(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 alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 7). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot.

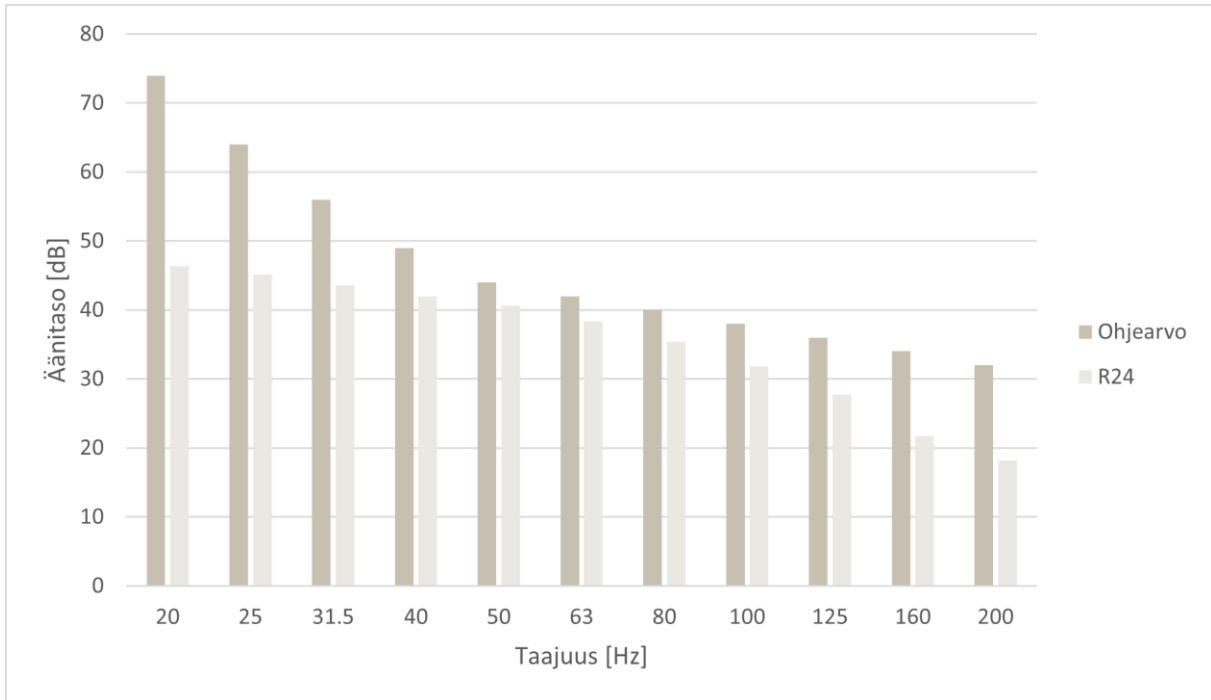
Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R24, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 5). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

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. Näin tapahtuu tämän raportin mallinnusten perusteella (lukujen 3.1 ja 3.2 tulokset), eikä sisätilojen kokonaismelutasojen tarkistus edellytä erillisiä mallinnuksia. Tätä johtopäätöstä tukevat tehdyt tuulivoimamelun sisätilamittaukset Suomessa sekä ilmaäänieristykseen keskimääräinen profiili, joka kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä.

Taulukko 7: Matalataajuisten ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla.

| Taajuus | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1      | 51,0 | 50,3 | 49,7 | 49,2 | 49,0 | 48,2 | 47,0 | 45,4 | 43,0 | 39,1 | 37,0 |
| R2      | 51,1 | 50,5 | 49,8 | 49,4 | 49,1 | 48,3 | 47,1 | 45,5 | 43,2 | 39,3 | 37,2 |
| R3      | 51,3 | 50,7 | 50,1 | 49,6 | 49,4 | 48,6 | 47,4 | 45,8 | 43,4 | 39,6 | 37,5 |
| R4      | 51,6 | 50,9 | 50,3 | 49,8 | 49,6 | 48,8 | 47,6 | 46,0 | 43,7 | 39,9 | 37,8 |
| R5      | 52,0 | 51,4 | 50,8 | 50,3 | 50,1 | 49,3 | 48,1 | 46,5 | 44,2 | 40,5 | 38,5 |
| R6      | 52,2 | 51,5 | 50,9 | 50,4 | 50,2 | 49,4 | 48,2 | 46,7 | 44,4 | 40,6 | 38,7 |
| R7      | 52,7 | 52,0 | 51,4 | 51,0 | 50,7 | 50,0 | 48,8 | 47,2 | 45,0 | 41,3 | 39,3 |
| R8      | 52,9 | 52,2 | 51,6 | 51,1 | 50,9 | 50,2 | 49,0 | 47,4 | 45,2 | 41,5 | 39,6 |
| R9      | 53,1 | 52,5 | 51,8 | 51,4 | 51,2 | 50,4 | 49,2 | 47,7 | 45,5 | 41,8 | 39,9 |
| R10     | 51,4 | 50,7 | 50,1 | 49,6 | 49,4 | 48,6 | 47,4 | 45,8 | 43,6 | 39,8 | 37,8 |
| R11     | 50,0 | 49,4 | 48,7 | 48,3 | 48,0 | 47,2 | 46,0 | 44,3 | 42,0 | 38,1 | 35,9 |
| R12     | 51,6 | 50,9 | 50,3 | 49,9 | 49,6 | 48,8 | 47,6 | 46,1 | 43,8 | 40,1 | 38,1 |
| R13     | 48,9 | 48,2 | 47,5 | 47,1 | 46,8 | 46,0 | 44,7 | 43,0 | 40,5 | 36,5 | 34,2 |
| R14     | 48,7 | 48,1 | 47,4 | 46,9 | 46,7 | 45,8 | 44,6 | 42,9 | 40,4 | 36,4 | 34,0 |
| R15     | 52,9 | 52,3 | 51,7 | 51,2 | 51,0 | 50,3 | 49,1 | 47,6 | 45,4 | 41,7 | 39,9 |
| R16     | 51,9 | 51,2 | 50,6 | 50,1 | 49,9 | 49,1 | 47,9 | 46,4 | 44,1 | 40,4 | 38,4 |
| R17     | 50,1 | 49,5 | 48,8 | 48,4 | 48,1 | 47,3 | 46,1 | 44,4 | 42,1 | 38,2 | 36,0 |
| R18     | 48,8 | 48,1 | 47,5 | 47,0 | 46,7 | 45,9 | 44,6 | 42,9 | 40,4 | 36,4 | 34,1 |
| R19     | 49,0 | 48,3 | 47,7 | 47,2 | 46,9 | 46,1 | 44,8 | 43,1 | 40,7 | 36,7 | 34,3 |
| R20     | 53,3 | 52,7 | 52,0 | 51,6 | 51,4 | 50,6 | 49,4 | 47,9 | 45,7 | 42,0 | 40,1 |
| R21     | 53,5 | 52,9 | 52,3 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,2 | 45,9 | 42,3 | 40,4 |
| R22     | 53,5 | 52,9 | 52,3 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,2 | 45,9 | 42,3 | 40,4 |
| R23     | 53,5 | 52,9 | 52,3 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,1 | 45,9 | 42,3 | 40,4 |
| R24     | 54,0 | 53,4 | 52,7 | 52,3 | 52,1 | 51,3 | 50,2 | 48,7 | 46,5 | 42,8 | 41,0 |
| R25     | 53,8 | 53,2 | 52,5 | 52,1 | 51,9 | 51,1 | 49,9 | 48,4 | 46,2 | 42,6 | 40,7 |
| R26     | 53,9 | 53,3 | 52,6 | 52,2 | 52,0 | 51,2 | 50,1 | 48,6 | 46,4 | 42,7 | 40,9 |
| R27     | 53,9 | 53,3 | 52,6 | 52,2 | 52,0 | 51,2 | 50,1 | 48,6 | 46,4 | 42,7 | 40,9 |
| R28     | 53,7 | 53,1 | 52,5 | 52,0 | 51,8 | 51,0 | 49,9 | 48,4 | 46,2 | 42,5 | 40,7 |
| R29     | 48,7 | 48,0 | 47,4 | 46,9 | 46,6 | 45,8 | 44,5 | 42,8 | 40,4 | 36,3 | 34,0 |
| R30     | 48,1 | 47,4 | 46,8 | 46,3 | 46,0 | 45,1 | 43,8 | 42,1 | 39,6 | 35,5 | 33,1 |





Kuva 5: Matalataajuisen sisämelun tasot reseptorin R24 kohdalla.

### 3.3 Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden ja läheisyyteen suunnitellun Hallakallion ja rakenteilla olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutuksia. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 28 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 4,7 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulivoimapuistoon on rakenteilla 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

Moskuankankaan sekä Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan sekä Hallakallion voimaloiden melun yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (YIT Suomi Oy) verkkosivuillaan jakamien tietojen mukaan, Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Melumallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty napakorkeutta 210 m sekä samaa turbiinityyppiä ja äänitehotasoa kuin Moskuankankaan voimaloilla (V172-7.2 MW, 106,9 + 2,0 dB(A)). Hallakallion voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 8).

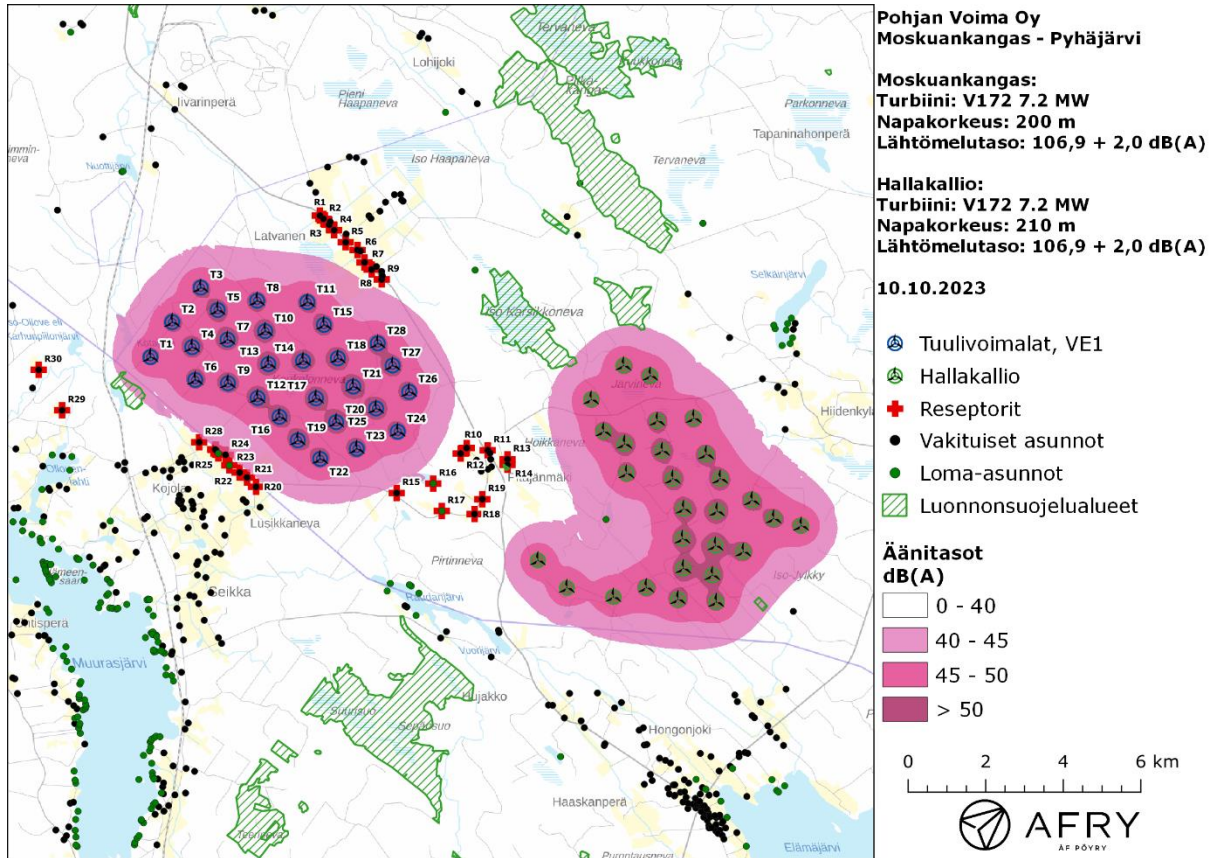
Taulukko 8: Hallakallion voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| H01       | 431088 | 7051329 | 168                 |
| H02       | 431779 | 7051064 | 168                 |
| H03       | 432899 | 7049975 | 165                 |

|     |        |         |     |
|-----|--------|---------|-----|
| H04 | 433219 | 7049043 | 158 |
| H05 | 433583 | 7048416 | 163 |
| H06 | 434401 | 7047858 | 178 |
| H07 | 434959 | 7047391 | 166 |
| H08 | 431960 | 7049903 | 172 |
| H09 | 432087 | 7049133 | 173 |
| H10 | 432357 | 7048412 | 162 |
| H11 | 432637 | 7047640 | 154 |
| H12 | 433498 | 7047578 | 152 |
| H13 | 430574 | 7049631 | 186 |
| H14 | 431115 | 7049309 | 180 |
| H15 | 432609 | 7046872 | 166 |
| H16 | 433458 | 7046695 | 151 |
| H17 | 434177 | 7046539 | 156 |
| H18 | 432629 | 7046106 | 162 |
| H19 | 433379 | 7045931 | 149 |
| H20 | 431674 | 7045617 | 155 |
| H21 | 432492 | 7045311 | 146 |
| H22 | 433480 | 7045242 | 150 |
| H23 | 429630 | 7045604 | 153 |
| H24 | 430826 | 7045372 | 160 |
| H25 | 435671 | 7047205 | 165 |
| H26 | 430255 | 7050454 | 185 |
| H27 | 431166 | 7048552 | 188 |
| H28 | 428881 | 7046314 | 155 |

Moskuankankaan ja Hallakallion mallinnettu keskiäänitaso LAeq on esitetty karttakuvana (Kuva 6). Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnustulosten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion melun yhteisvaikutuksissa keskiäänitasot jäävä valtioneuvoston asetuksen ohjearvojen alapuolelle kaikkien loma-asuntojen, vakituisten asuinrakennusten ja luonnonsuojelualueiden kohdilla. Asutuksen kohdalla yhteisvaikutukset nostavat keskiäänitasoa enimmillään 6,3 dB(A) reseptorin R18 kohdalla.

Moskuankankaan ja Hallakallion aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 10). Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R24, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 7). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloiden aiheuttamat melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.



Kuva 6: Keskiäänitasot LAeq, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

Taulukko 9: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

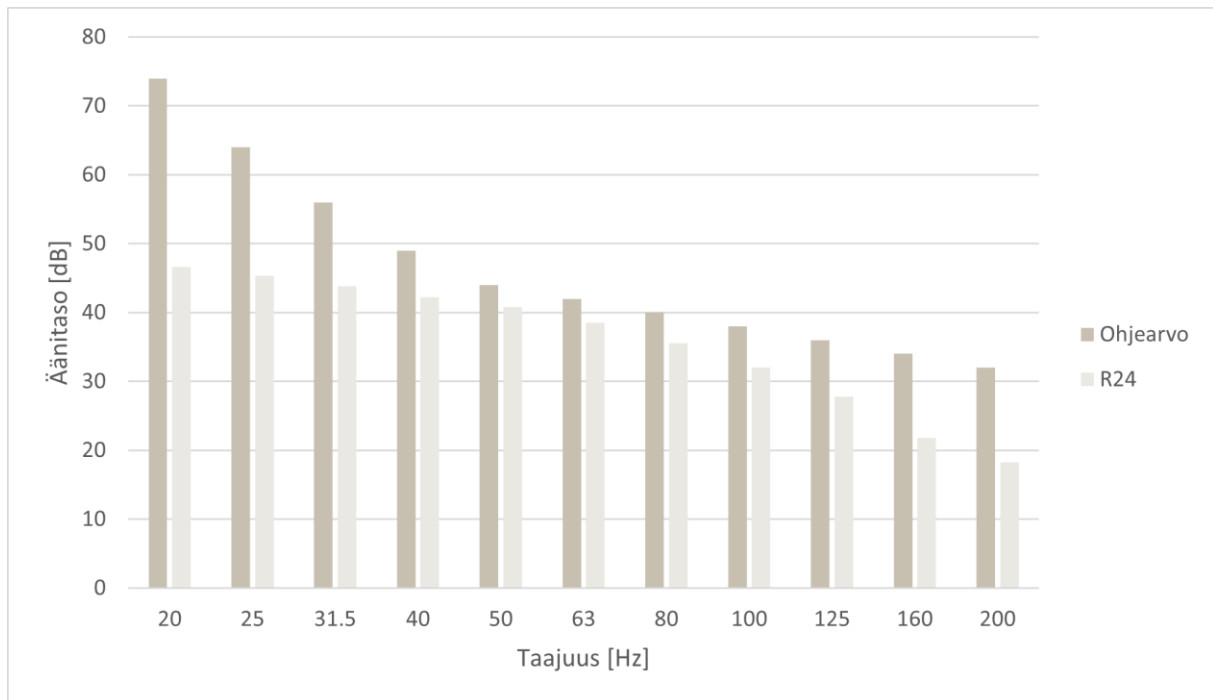
| Reseptori | Äänitaso dB(A) |
|-----------|----------------|
| R1        | 35,6           |
| R2        | 35,8           |
| R3        | 36,1           |
| R4        | 36,5           |
| R5        | 37,3           |
| R6        | 37,4           |
| R7        | 38,2           |
| R8        | 38,4           |
| R9        | 38,9           |
| R10       | 37,8           |
| R11       | 36,1           |
| R12       | 37,7           |
| R13       | 36,8           |

|     |      |
|-----|------|
| R14 | 36,5 |
| R15 | 39,0 |
| R16 | 38,5 |
| R17 | 35,5 |
| R18 | 34,9 |
| R19 | 35,5 |
| R20 | 39,0 |
| R21 | 39,3 |
| R22 | 39,3 |
| R23 | 39,2 |
| R24 | 39,9 |
| R25 | 39,6 |
| R26 | 39,7 |
| R27 | 39,7 |
| R28 | 39,4 |
| R29 | 32,5 |
| R30 | 31,5 |

Taulukko 10: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimat.

| Taajuus | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1      | 51,5 | 50,8 | 50,2 | 49,7 | 49,5 | 48,6 | 47,4 | 45,7 | 43,3 | 39,4 | 37,2 |
| R2      | 51,6 | 51,0 | 50,3 | 49,8 | 49,6 | 48,8 | 47,5 | 45,9 | 43,4 | 39,5 | 37,3 |
| R3      | 51,9 | 51,2 | 50,6 | 50,1 | 49,8 | 49,0 | 47,7 | 46,1 | 43,7 | 39,8 | 37,7 |
| R4      | 52,1 | 51,4 | 50,8 | 50,3 | 50,0 | 49,2 | 48,0 | 46,4 | 44,0 | 40,1 | 38,0 |
| R5      | 52,5 | 51,9 | 51,2 | 50,8 | 50,5 | 49,7 | 48,5 | 46,9 | 44,5 | 40,7 | 38,6 |
| R6      | 52,7 | 52,0 | 51,4 | 50,9 | 50,7 | 49,9 | 48,6 | 47,0 | 44,7 | 40,9 | 38,8 |
| R7      | 53,2 | 52,5 | 51,9 | 51,4 | 51,2 | 50,4 | 49,2 | 47,6 | 45,3 | 41,5 | 39,5 |
| R8      | 53,4 | 52,7 | 52,1 | 51,6 | 51,4 | 50,6 | 49,4 | 47,8 | 45,5 | 41,7 | 39,7 |
| R9      | 53,6 | 53,0 | 52,3 | 51,9 | 51,6 | 50,8 | 49,6 | 48,1 | 45,8 | 42,0 | 40,1 |
| R10     | 53,3 | 52,6 | 52,0 | 51,5 | 51,2 | 50,4 | 49,2 | 47,6 | 45,2 | 41,4 | 39,3 |
| R11     | 52,9 | 52,2 | 51,6 | 51,1 | 50,8 | 50,0 | 48,8 | 47,1 | 44,7 | 40,8 | 38,6 |
| R12     | 53,3 | 52,7 | 52,0 | 51,6 | 51,3 | 50,5 | 49,3 | 47,7 | 45,3 | 41,5 | 39,4 |
| R13     | 52,9 | 52,2 | 51,6 | 51,1 | 50,8 | 50,0 | 48,8 | 47,1 | 44,7 | 40,8 | 38,6 |
| R14     | 52,8 | 52,2 | 51,5 | 51,1 | 50,8 | 50,0 | 48,7 | 47,1 | 44,7 | 40,8 | 38,6 |
| R15     | 53,8 | 53,2 | 52,5 | 52,1 | 51,8 | 51,1 | 49,9 | 48,3 | 46,0 | 42,3 | 40,3 |
| R16     | 53,3 | 52,6 | 52,0 | 51,5 | 51,3 | 50,4 | 49,2 | 47,6 | 45,3 | 41,4 | 39,4 |

|     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R17 | 52,2 | 51,6 | 50,9 | 50,5 | 50,2 | 49,4 | 48,1 | 46,4 | 44,0 | 40,0 | 37,8 |
| R18 | 52,2 | 51,6 | 50,9 | 50,5 | 50,2 | 49,4 | 48,1 | 46,4 | 44,0 | 40,0 | 37,8 |
| R19 | 52,4 | 51,8 | 51,1 | 50,6 | 50,4 | 49,6 | 48,3 | 46,7 | 44,2 | 40,3 | 38,0 |
| R20 | 53,6 | 53,0 | 52,4 | 51,9 | 51,7 | 50,9 | 49,7 | 48,1 | 45,9 | 42,1 | 40,2 |
| R21 | 53,8 | 53,2 | 52,6 | 52,1 | 51,9 | 51,1 | 49,9 | 48,4 | 46,1 | 42,4 | 40,5 |
| R22 | 53,8 | 53,2 | 52,6 | 52,1 | 51,9 | 51,1 | 49,9 | 48,4 | 46,1 | 42,4 | 40,5 |
| R23 | 53,8 | 53,2 | 52,5 | 52,1 | 51,9 | 51,1 | 49,9 | 48,3 | 46,1 | 42,4 | 40,4 |
| R24 | 54,3 | 53,6 | 53,0 | 52,5 | 52,3 | 51,5 | 50,4 | 48,8 | 46,6 | 42,9 | 41,0 |
| R25 | 54,1 | 53,4 | 52,8 | 52,3 | 52,1 | 51,3 | 50,1 | 48,6 | 46,4 | 42,7 | 40,8 |
| R26 | 54,2 | 53,5 | 52,9 | 52,4 | 52,2 | 51,4 | 50,3 | 48,7 | 46,5 | 42,8 | 40,9 |
| R27 | 54,2 | 53,5 | 52,9 | 52,4 | 52,2 | 51,4 | 50,2 | 48,7 | 46,5 | 42,8 | 40,9 |
| R28 | 54,0 | 53,3 | 52,7 | 52,2 | 52,0 | 51,2 | 50,1 | 48,5 | 46,3 | 42,6 | 40,7 |
| R29 | 49,2 | 48,5 | 47,8 | 47,3 | 47,0 | 46,1 | 44,8 | 43,1 | 40,5 | 36,4 | 34,0 |
| R30 | 48,6 | 47,9 | 47,2 | 46,7 | 46,4 | 45,5 | 44,2 | 42,4 | 39,8 | 35,6 | 33,1 |



Kuva 7: Matalataajuisten sisämelun tasot reseptorin R24 kohdalla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kunnan alueella suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle on käytetty 28 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE1. Arviointi on tehty turbiinityypillä V172-7.2 MW ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen rakenteilla olevan Pajuperänkankaan sekä suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen melun yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten perusteella melutasot alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla jäävät alle valtioneuvoston ohjearvojen. Myös matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla asumisterveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella.

Moskuankankaan, Pajuperänkankaan ja Hallakallion yhteisvaikutuksista ei aiheudu melun ohjearvojen ylityksiä

## 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] 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:<br><b>101021203-006.002</b>                                      |                    |                              |                    | Raportin hyväksyntäpäivämäärä: <b>15.13.2024</b>                               |      |                |      |
| Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: <b>AFRY Finland Oy</b>   |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Vastuuhenkilöt: <b>Kalle Auvinen ja Erkki Heikkola</b>  |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Laatija: <b>Kalle Auvinen</b>   |                    |                              |                    | Tarkastaja/hyväksyjä: <b>Erkki Heikkola</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>V172-7.2 MW PO7200<br/>(blades with serrated trailing edges)</b> |      | Sarjanumero/t: |      |
| Nimellisteho:<br><b>7,2 MW</b>  |                    | Napakorkeus:<br><b>200 m</b> |                    | Roottorin halkaisija:<br><b>172 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  |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Third octave noise emission, EnVentus™, V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0128-4336_00, 2022-06-30. |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Melupäästötiedot: V172-7.2MW PO7200 (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)               |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Oktaaveittain [Hz]  |                    | 1/3-oktaaveittain [Hz]       |                    |  |      |                |      |
| 31,5  |                    | 20                           | 63,7               | 200  | 98,0 | 2000           | 92,4 |
| 63  | 92,4               | 25                           | 68,9               | 250  | 98,6 | 2500           | 90,1 |
| 125   | 100,0              | 31,5                         | 73,8               | 315  | 98,8 | 3150           | 87,5 |
| 250   | 103,3              | 40                           | 78,6               | 400  | 98,9 | 4000           | 84,5 |
| 500   | 103,5              | 50                           | 83,0               | 500  | 98,7 | 5000           | 81,1 |
| 1000  | 101,9              | 63                           | 86,8               | 630  | 98,6 | 6300           | 77,4 |
| 2000  | 97,4               | 80                           | 90,2               | 800  | 98,1 | 8000           | 73,3 |
| 4000  | 89,9               | 100                          | 92,9               | 1000   | 97,2 | 10000          | 68,9 |
| 8000  | 79,2               | 125                          | 95,2               | 1250   | 95,9 |                |      |
|   |                    | 160                          | 96,8               | 1600   | 94,4 |                |      |



|   |           |           |                 |                                      |           |  |           |                                       |                               |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------------|--------------------------------------|-----------|--|-----------|---------------------------------------|-------------------------------|------------|------------|
| Melun erityispiirteiden mittauss 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]                            |           |                                       |                               |            |            |
| <b>4 m</b>  |           |           |                 |                                      |           | <b>10 m x 10 m</b>                                     |           |                                       |                               |            |            |
| Suhteellinen kosteus  |           |           |                 |                                      |           | Lämpötila  |           |                                       |                               |            |            |
| <b>70 %</b>   |           |           |                 |                                      |           | <b>15 C°</b>   |           |                                       |                               |            |            |
| 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>                     |           |                                       |                               |            |            |
| Matalataajuiset ulkomelun tasot [dB] reseptoreiden kohdilla (lähtömelutaso 106,9 + 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>   | 51,0      | 50,3      | 49,7            | 49,2                                 | 49,0      | 48,2   | 47,0      | 45,4                                  | 43,0                          | 39,1       | 37,0       |
| <b>R2</b>   | 51,1      | 50,5      | 49,8            | 49,4                                 | 49,1      | 48,3   | 47,1      | 45,5                                  | 43,2                          | 39,3       | 37,2       |
| <b>R3</b>   | 51,3      | 50,7      | 50,1            | 49,6                                 | 49,4      | 48,6   | 47,4      | 45,8                                  | 43,4                          | 39,6       | 37,5       |
| <b>R4</b>   | 51,6      | 50,9      | 50,3            | 49,8                                 | 49,6      | 48,8   | 47,6      | 46,0                                  | 43,7                          | 39,9       | 37,8       |
| <b>R5</b>   | 52,0      | 51,4      | 50,8            | 50,3                                 | 50,1      | 49,3   | 48,1      | 46,5                                  | 44,2                          | 40,5       | 38,5       |
| <b>R6</b>   | 52,2      | 51,5      | 50,9            | 50,4                                 | 50,2      | 49,4   | 48,2      | 46,7                                  | 44,4                          | 40,6       | 38,7       |
| <b>R7</b>   | 52,7      | 52,0      | 51,4            | 51,0                                 | 50,7      | 50,0   | 48,8      | 47,2                                  | 45,0                          | 41,3       | 39,3       |
| <b>R8</b>   | 52,9      | 52,2      | 51,6            | 51,1                                 | 50,9      | 50,2   | 49,0      | 47,4                                  | 45,2                          | 41,5       | 39,6       |
| <b>R9</b>   | 53,1      | 52,5      | 51,8            | 51,4                                 | 51,2      | 50,4   | 49,2      | 47,7                                  | 45,5                          | 41,8       | 39,9       |
| <b>R10</b>  | 51,4      | 50,7      | 50,1            | 49,6                                 | 49,4      | 48,6   | 47,4      | 45,8                                  | 43,6                          | 39,8       | 37,8       |
| <b>R11</b>  | 50,0      | 49,4      | 48,7            | 48,3                                 | 48,0      | 47,2   | 46,0      | 44,3                                  | 42,0                          | 38,1       | 35,9       |

| Matalataajuiset ulkomelun tasot [dB] reseptoreiden kohdilla (lähtömelutaso 106,9 + 2 dB(A)) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hz  | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
| <b>R12</b>  | 51,6 | 50,9 | 50,3 | 49,9 | 49,6 | 48,8 | 47,6 | 46,1 | 43,8 | 40,1 | 38,1 |
| <b>R13</b>  | 48,9 | 48,2 | 47,5 | 47,1 | 46,8 | 46,0 | 44,7 | 43,0 | 40,5 | 36,5 | 34,2 |
| <b>R14</b>  | 48,7 | 48,1 | 47,4 | 46,9 | 46,7 | 45,8 | 44,6 | 42,9 | 40,4 | 36,4 | 34,0 |
| <b>R15</b>  | 52,9 | 52,3 | 51,7 | 51,2 | 51,0 | 50,3 | 49,1 | 47,6 | 45,4 | 41,7 | 39,9 |
| <b>R16</b>  | 51,9 | 51,2 | 50,6 | 50,1 | 49,9 | 49,1 | 47,9 | 46,4 | 44,1 | 40,4 | 38,4 |
| <b>R17</b>  | 50,1 | 49,5 | 48,8 | 48,4 | 48,1 | 47,3 | 46,1 | 44,4 | 42,1 | 38,2 | 36,0 |
| <b>R18</b>  | 48,8 | 48,1 | 47,5 | 47,0 | 46,7 | 45,9 | 44,6 | 42,9 | 40,4 | 36,4 | 34,1 |
| <b>R19</b>  | 49,0 | 48,3 | 47,7 | 47,2 | 46,9 | 46,1 | 44,8 | 43,1 | 40,7 | 36,7 | 34,3 |
| <b>R20</b>  | 53,3 | 52,7 | 52,0 | 51,6 | 51,4 | 50,6 | 49,4 | 47,9 | 45,7 | 42,0 | 40,1 |
| <b>R21</b>  | 53,5 | 52,9 | 52,3 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,2 | 45,9 | 42,3 | 40,4 |
| <b>R22</b>  | 53,5 | 52,9 | 52,3 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,2 | 45,9 | 42,3 | 40,4 |
| <b>R23</b>  | 53,5 | 52,9 | 52,3 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,1 | 45,9 | 42,3 | 40,4 |
| <b>R24</b>  | 54,0 | 53,4 | 52,7 | 52,3 | 52,1 | 51,3 | 50,2 | 48,7 | 46,5 | 42,8 | 41,0 |
| <b>R25</b>  | 53,8 | 53,2 | 52,5 | 52,1 | 51,9 | 51,1 | 49,9 | 48,4 | 46,2 | 42,6 | 40,7 |
| <b>R26</b>  | 53,9 | 53,3 | 52,6 | 52,2 | 52,0 | 51,2 | 50,1 | 48,6 | 46,4 | 42,7 | 40,9 |
| <b>R27</b>  | 53,9 | 53,3 | 52,6 | 52,2 | 52,0 | 51,2 | 50,1 | 48,6 | 46,4 | 42,7 | 40,9 |
| <b>R28</b>  | 53,7 | 53,1 | 52,5 | 52,0 | 51,8 | 51,0 | 49,9 | 48,4 | 46,2 | 42,5 | 40,7 |
| <b>R29</b>  | 48,7 | 48,0 | 47,4 | 46,9 | 46,6 | 45,8 | 44,5 | 42,8 | 40,4 | 36,3 | 34,0 |
| <b>R30</b>  | 48,1 | 47,4 | 46,8 | 46,3 | 46,0 | 45,1 | 43,8 | 42,1 | 39,6 | 35,5 | 33,1 |



Pohjan Voima Oy

**Moskuankankaan tuulivoimahankkeen meluselvitys, VE2**

101021203-006

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Kalle Auvinen

E-mail  
[kalle.auvinen@afry.com](mailto:kalle.auvinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
002

Asiakas  
Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

Päivämäärä  
15/03/2024

Projektinumero  
101021203-006

Raportin tila  
VALMIS

## Moskuankankaan tuulivoimahankkeen meluseelvitys, VE2

## Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laatiija  | Pvm/Tarkastaja                                      | Merkinnät/Muutokset   |
|--------|---|---|---|
| 001    | 11.10.2023/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 11.10.2023/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Alkuperäinen<br>(Raportti 101021203-006.001)  |
| 002    | 15.03.2024/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 15.03.2024/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Hallakallion<br>voimalakoordinaatit lisätty<br>raporttiin<br>(Raportti 101021203-006.002) |

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

## Sisällysluettelo

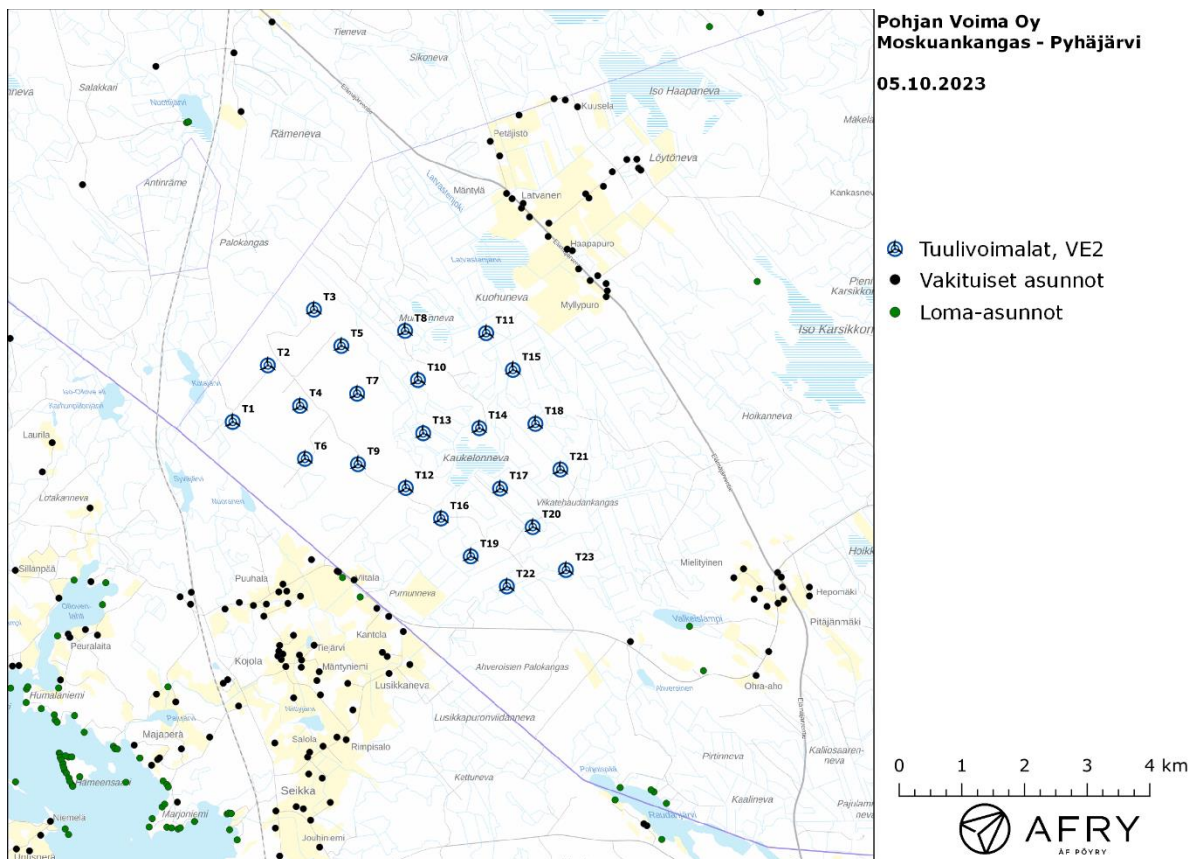
|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Johdanto .....  | 4  |
| 2   | Tuulivoimaloiden melu .....   | 6  |
| 2.1 | Yleistä tuulivoimamelusta .....                                       | 6  |
| 2.2 | Melumallinnusohjeistus.....   | 7  |
| 2.3 | Ohjearvot .....   | 8  |
| 3   | Tuulivoimakohteen melumallinnus .....                                 | 9  |
| 3.1 | Keskiäänitasojen LAeq mallinnus .....                                 | 9  |
| 3.2 | Matalataajuisen melun mallinnus .....                                 | 13 |
| 3.3 | Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus ..... | 16 |
| 4   | Yhteenveto .....  | 21 |
| 5   | Viitteet.....   | 22 |
| 6   | Melumallinnuksen tiedot.....  | 23 |

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kunnan alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 23 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttaphojalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja turbiinityypin V172-7.2 MW PO7200 (blades with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasolla 108,9 dB(A) (turbiini valmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 106,9 dB(A) + varmuusarvo 2 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 mallinnusohjeistuksen mukaisia melupäästön tunnusarvoja.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan sekä läheisten Pajuperänkankaan (rakenteilla) ja Hallakallion (suunnitteilla) tuulivoimapuistojen melun yhteisvaikutuksia.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiini-paikalla.*

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| T1        | 418894 | 7051545 | 128                 |
| T2        | 419455 | 7052445 | 155                 |
| T3        | 420191 | 7053333 | 156                 |
| T4        | 419969 | 7051800 | 159                 |
| T5        | 420628 | 7052755 | 158                 |
| T6        | 420048 | 7050957 | 144                 |
| T7        | 420880 | 7051994 | 156                 |
| T8        | 421645 | 7052995 | 145                 |
| T9        | 420893 | 7050871 | 144                 |
| T10       | 421851 | 7052212 | 150                 |
| T11       | 422939 | 7052959 | 140                 |
| T12       | 421657 | 7050493 | 143                 |
| T13       | 421934 | 7051364 | 147                 |
| T14       | 422829 | 7051445 | 145                 |
| T15       | 423366 | 7052374 | 140                 |
| T16       | 422219 | 7050007 | 138                 |
| T17       | 423161 | 7050483 | 145                 |
| T18       | 423725 | 7051514 | 143                 |
| T19       | 422693 | 7049403 | 138                 |
| T20       | 423682 | 7049869 | 148                 |
| T21       | 424123 | 7050786 | 146                 |
| T22       | 423269 | 7048924 | 142                 |
| T23       | 424212 | 7049186 | 156                 |



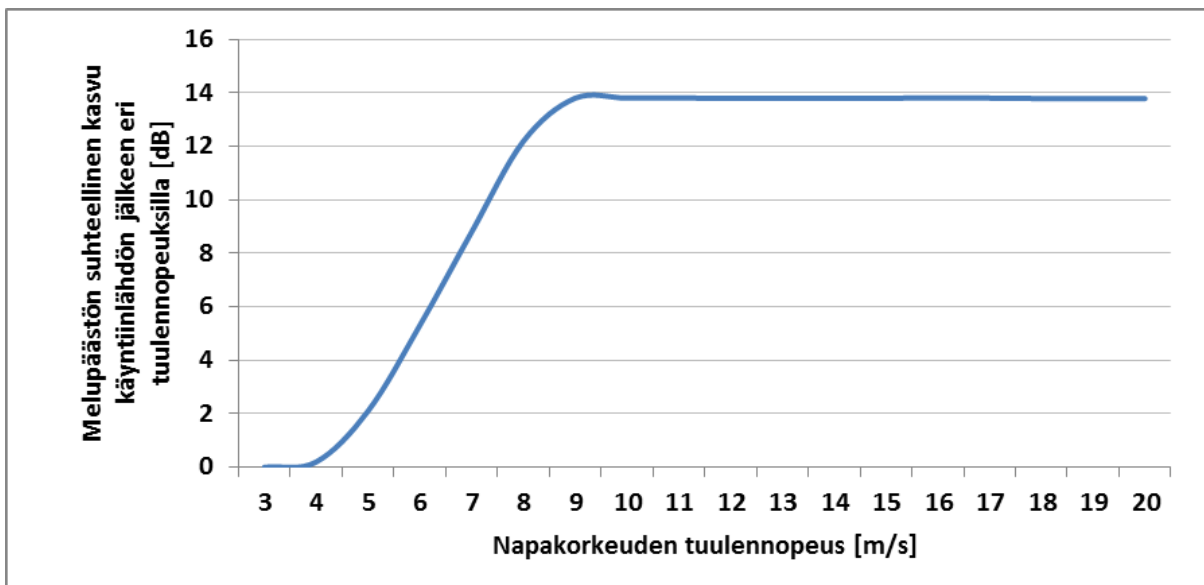
## 2 Tuulivoimaloiden melu

### 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 tuotantototehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahailoidituksen, 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 epävarmuustarkastelua, 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 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 ääneneristävyys tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

*Taulukko 3: Asumisterveysasetuksen ylärajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat taajuuspainottamattomia.*

| Taajuus [Hz]                     | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
|----------------------------------|----|----|------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Äänitaso L <sub>eq,1h</sub> [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. Mallinnuksessa on käytetty turbiinityypin V172-7.2 MW PO7200 (blades with serrated trailing edges) taajuusjakaumia. Taajuusjakaumat on saatu seuraavista turbiinivalmistajan dokumenteista:

- Third octave noise emission, EnVentus™, V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0128-4336\_00, 2022-06-30.

Dokumenttia varten turbiinityypin V172 testimittauksia ei ollut saatavilla. Esitetyt melutasot perustuvat turbiinityypillä V136 tehtyihin mittauksiin, joiden perusteella V172: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 V172-7.2 MW PO7200 äänitehotaso on 106,9 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoa 108,9 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulennopeutta 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.

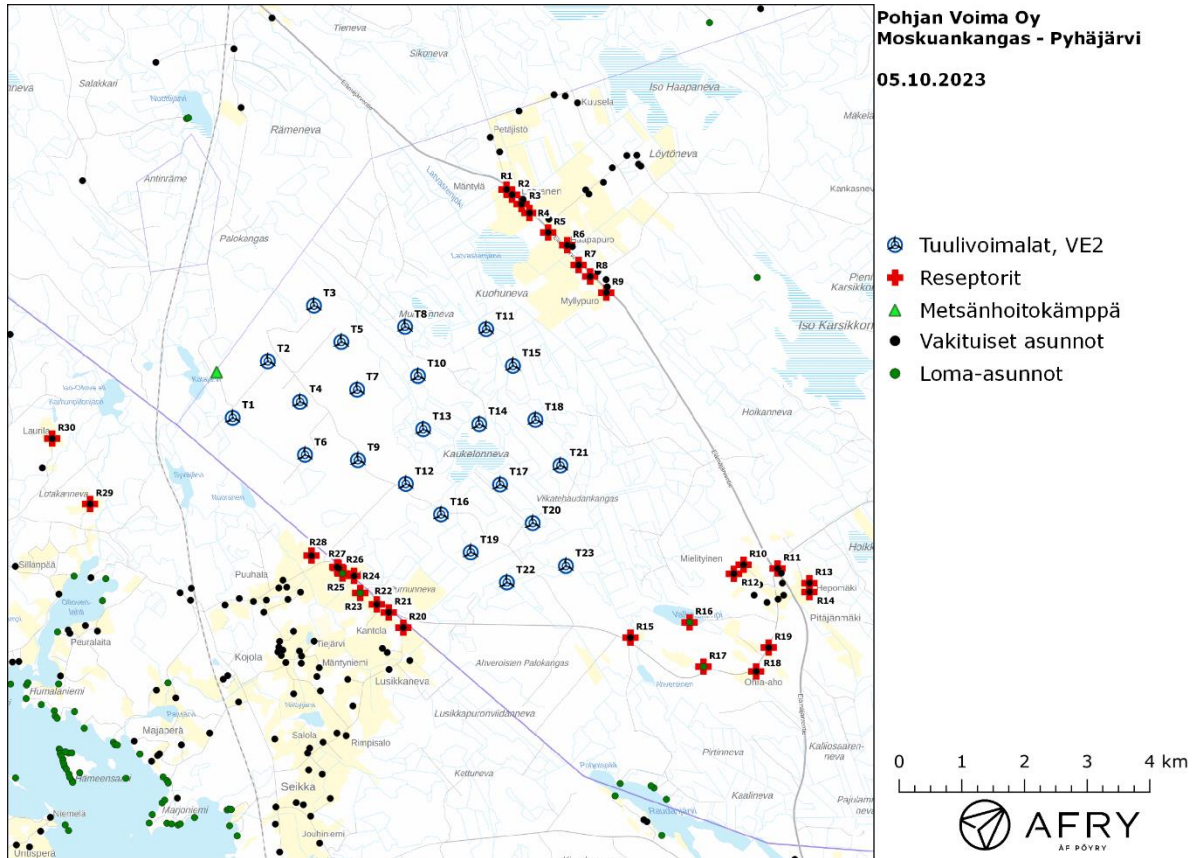
Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 10 m. Ilmakehän absorptio 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 30 vertailurakennusta, joiden kohdilla keskiäänitason LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttaphjalla (Kuva 3). Rakennusten sijaitsevat noin 1,5–3,9 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 800 m voimalan T1 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan, kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä melu-vaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 4: Reseptoripisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

| Reseptori | E      | N       | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus  |
|-----------|--------|---------|---------------------|-------------------|
| R1        | 423266 | 7055182 | 140                 | vakituinen asunto |
| R2        | 423354 | 7055098 | 139                 | vakituinen asunto |
| R3        | 423504 | 7054949 | 139                 | vakituinen asunto |
| R4        | 423632 | 7054807 | 140                 | vakituinen asunto |
| R5        | 423929 | 7054496 | 139                 | vakituinen asunto |
| R6        | 424233 | 7054294 | 139                 | vakituinen asunto |
| R7        | 424415 | 7053979 | 140                 | vakituinen asunto |
| R8        | 424599 | 7053795 | 141                 | vakituinen asunto |
| R9        | 424857 | 7053538 | 143                 | vakituinen asunto |
| R10       | 427048 | 7049203 | 216                 | vakituinen asunto |
| R11       | 427591 | 7049143 | 192                 | vakituinen asunto |
| R12       | 426892 | 7049059 | 210                 | vakituinen asunto |
| R13       | 428099 | 7048911 | 198                 | vakituinen asunto |
| R14       | 428099 | 7048770 | 194                 | vakituinen asunto |
| R15       | 425243 | 7048043 | 162                 | vakituinen asunto |
| R16       | 426186 | 7048286 | 162                 | loma-asunto       |
| R17       | 426407 | 7047580 | 199                 | loma-asunto       |
| R18       | 427249 | 7047503 | 189                 | vakituinen asunto |
| R19       | 427450 | 7047884 | 191                 | vakituinen asunto |
| R20       | 421618 | 7048203 | 131                 | vakituinen asunto |
| R21       | 421386 | 7048444 | 133                 | vakituinen asunto |
| R22       | 421195 | 7048572 | 131                 | vakituinen asunto |
| R23       | 420929 | 7048754 | 128                 | loma-asunto       |
| R24       | 420833 | 7049026 | 126                 | vakituinen asunto |
| R25       | 420648 | 7049063 | 125                 | loma-asunto       |
| R26       | 420585 | 7049153 | 127                 | vakituinen asunto |
| R27       | 420563 | 7049165 | 127                 | vakituinen asunto |
| R28       | 420153 | 7049349 | 128                 | vakituinen asunto |
| R29       | 416620 | 7050172 | 128                 | vakituinen asunto |
| R30       | 416015 | 7051213 | 128                 | vakituinen asunto |



Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

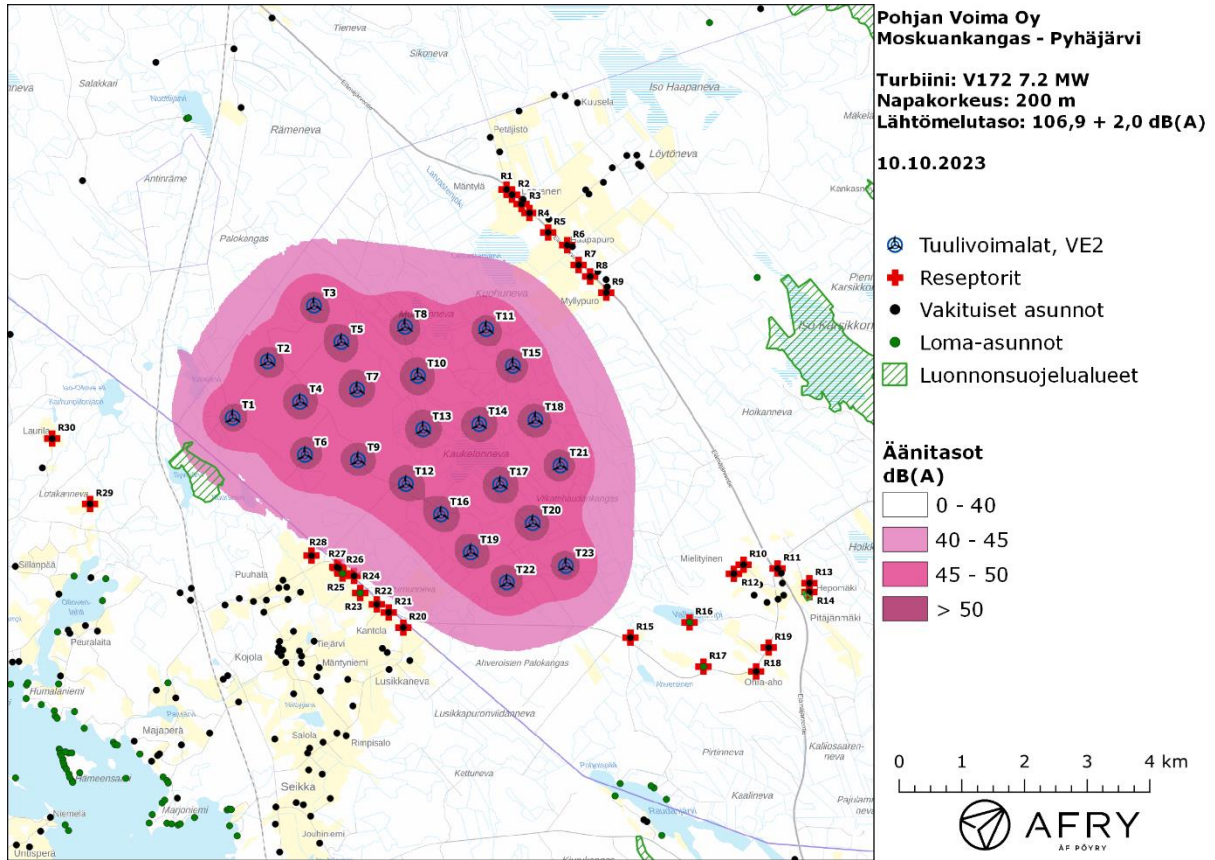
## Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso Laeq on esitetty karttakuvana (Kuva 4). 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 ohjearvojen alapuolelle kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla.

Karttakuvassa on lisäksi esitetty hankkeen ympäristössä sijaitsevat luonnonsuojelualueet. Luonnonsuojelualueisiin sovelletaan virkistysalueiden 45 dB(A) melun ohjearvoa. Myös luonnonsuojelualueilla melutasot pysyvät ohjearvoissa.





Kuva 4: Keskiäänitasot LAeq tuulivoimapaiston hankealueella.

Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.

| Reseptori | Äänitaso dB(A) |
|-----------|----------------|
| R1        | 34,9           |
| R2        | 35,1           |
| R3        | 35,4           |
| R4        | 35,8           |
| R5        | 36,4           |
| R6        | 36,3           |
| R7        | 36,9           |
| R8        | 36,9           |
| R9        | 36,9           |
| R10       | 32,4           |
| R11       | 27,5           |
| R12       | 32,8           |
| R13       | 28,4           |

|     |      |
|-----|------|
| R14 | 27,1 |
| R15 | 36,7 |
| R16 | 35,0 |
| R17 | 30,9 |
| R18 | 26,4 |
| R19 | 28,4 |
| R20 | 38,7 |
| R21 | 39,0 |
| R22 | 39,0 |
| R23 | 39,0 |
| R24 | 39,7 |
| R25 | 39,4 |
| R26 | 39,5 |
| R27 | 39,5 |
| R28 | 39,2 |
| R29 | 32,2 |
| R30 | 31,3 |

### 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 rakennusten kohdilla. Tulokset eivät siis ole suoraan vertailukelpoisia ohjearvojen kanssa, vaan tulkinnassa 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 ( $\Delta L_{\sigma}$ ) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja ohjearvoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyysparametrit 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]



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 vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyyden arvot.

Taulukko 6: Rakennuksen äänieristävyyden arvoja taajuuskaistoittain.

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

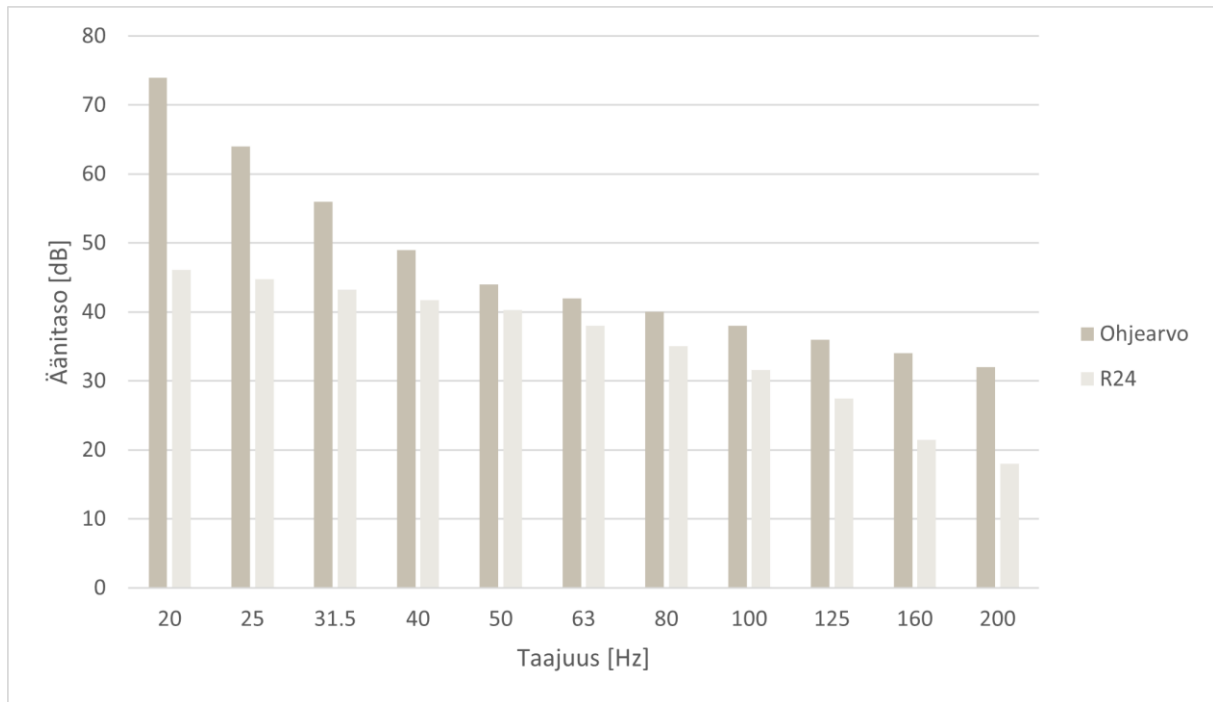
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 7). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot.

Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R24, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 5). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

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. Näin tapahtuu tämän raportin mallinnusten perusteella (lukujen 3.1 ja 3.2 tulokset), eikä sisätilojen kokonaismelutasojen tarkistus edellytä erillisiä mallinnuksia. Tätä johtopäätöstä tukevat tehdyt tuulivoimamelun sisätilamittaukset Suomessa sekä ilmaäänieristysten keskimääräinen profiili, joka kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä.

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

| Taajuus | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1      | 50,3 | 49,7 | 49,1 | 48,6 | 48,3 | 47,5 | 46,3 | 44,7 | 42,4 | 38,6 | 36,5 |
| R2      | 50,4 | 49,8 | 49,2 | 48,7 | 48,5 | 47,7 | 46,5 | 44,9 | 42,5 | 38,7 | 36,6 |
| R3      | 50,6 | 50,0 | 49,4 | 48,9 | 48,7 | 47,9 | 46,7 | 45,1 | 42,8 | 39,0 | 36,9 |
| R4      | 50,8 | 50,2 | 49,6 | 49,1 | 48,9 | 48,1 | 46,9 | 45,3 | 43,0 | 39,2 | 37,2 |
| R5      | 51,2 | 50,6 | 49,9 | 49,5 | 49,3 | 48,5 | 47,3 | 45,7 | 43,4 | 39,7 | 37,7 |
| R6      | 51,2 | 50,6 | 49,9 | 49,5 | 49,3 | 48,5 | 47,3 | 45,7 | 43,4 | 39,7 | 37,7 |
| R7      | 51,6 | 50,9 | 50,3 | 49,9 | 49,6 | 48,9 | 47,7 | 46,1 | 43,9 | 40,1 | 38,2 |
| R8      | 51,6 | 51,0 | 50,3 | 49,9 | 49,7 | 48,9 | 47,7 | 46,2 | 43,9 | 40,2 | 38,2 |
| R9      | 51,5 | 50,9 | 50,3 | 49,8 | 49,6 | 48,8 | 47,6 | 46,1 | 43,8 | 40,1 | 38,1 |
| R10     | 48,5 | 47,9 | 47,2 | 46,7 | 46,5 | 45,7 | 44,4 | 42,7 | 40,3 | 36,3 | 34,0 |
| R11     | 47,5 | 46,9 | 46,2 | 45,7 | 45,4 | 44,6 | 43,3 | 41,6 | 39,1 | 35,0 | 32,5 |
| R12     | 48,8 | 48,1 | 47,5 | 47,0 | 46,7 | 45,9 | 44,6 | 43,0 | 40,6 | 36,6 | 34,4 |
| R13     | 46,6 | 45,9 | 45,3 | 44,8 | 44,5 | 43,6 | 42,3 | 40,5 | 37,9 | 33,7 | 31,1 |
| R14     | 46,6 | 45,9 | 45,2 | 44,7 | 44,4 | 43,5 | 42,2 | 40,5 | 37,8 | 33,6 | 31,0 |
| R15     | 51,2 | 50,5 | 49,9 | 49,5 | 49,2 | 48,5 | 47,3 | 45,7 | 43,5 | 39,8 | 37,9 |
| R16     | 49,5 | 48,8 | 48,2 | 47,7 | 47,5 | 46,7 | 45,4 | 43,8 | 41,5 | 37,6 | 35,5 |
| R17     | 48,2 | 47,5 | 46,9 | 46,4 | 46,2 | 45,3 | 44,1 | 42,4 | 39,9 | 35,9 | 33,6 |
| R18     | 46,9 | 46,2 | 45,6 | 45,1 | 44,8 | 43,9 | 42,6 | 40,9 | 38,3 | 34,1 | 31,6 |
| R19     | 46,9 | 46,3 | 45,6 | 45,1 | 44,8 | 44,0 | 42,7 | 40,9 | 38,3 | 34,2 | 31,7 |
| R20     | 52,9 | 52,2 | 51,6 | 51,2 | 50,9 | 50,2 | 49,0 | 47,5 | 45,3 | 41,7 | 39,8 |
| R21     | 53,1 | 52,5 | 51,9 | 51,4 | 51,2 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,6 | 42,0 | 40,1 |
| R22     | 53,1 | 52,5 | 51,9 | 51,4 | 51,2 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,6 | 42,0 | 40,1 |
| R23     | 53,2 | 52,5 | 51,9 | 51,5 | 51,3 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,6 | 42,0 | 40,1 |
| R24     | 53,7 | 53,1 | 52,4 | 52,0 | 51,8 | 51,0 | 49,9 | 48,4 | 46,2 | 42,6 | 40,8 |
| R25     | 53,5 | 52,9 | 52,2 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,2 | 46,0 | 42,3 | 40,5 |
| R26     | 53,6 | 53,0 | 52,4 | 51,9 | 51,7 | 50,9 | 49,8 | 48,3 | 46,1 | 42,5 | 40,7 |
| R27     | 53,6 | 53,0 | 52,4 | 51,9 | 51,7 | 50,9 | 49,8 | 48,3 | 46,1 | 42,5 | 40,7 |
| R28     | 53,4 | 52,8 | 52,2 | 51,8 | 51,5 | 50,8 | 49,6 | 48,1 | 46,0 | 42,3 | 40,5 |
| R29     | 48,4 | 47,7 | 47,1 | 46,6 | 46,3 | 45,5 | 44,3 | 42,6 | 40,1 | 36,1 | 33,8 |
| R30     | 47,8 | 47,1 | 46,4 | 46,0 | 45,7 | 44,8 | 43,6 | 41,9 | 39,4 | 35,3 | 32,9 |



Kuva 5: Matalataajuisen sisämelun tasot reseptorin R24 kohdalla.

### 3.3 Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden ja läheisyyteen suunnitellun Hallakallion ja rakenteilla olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutuksia. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 28 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 5,5 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulivoimapuistoon on rakenteilla 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

Moskuankankaan sekä Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan sekä Hallakallion voimaloiden melun yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (YIT Suomi Oy) verkkosivuillaan jakamien tietojen mukaan, Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Melumallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty napakorkeutta 210 m sekä samaa turbiinityyppiä ja äänitehotasoa kuin Moskuankankaan voimaloilla (V172-7.2 MW, 106,9 + 2,0 dB(A)). Hallakallion voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 8).

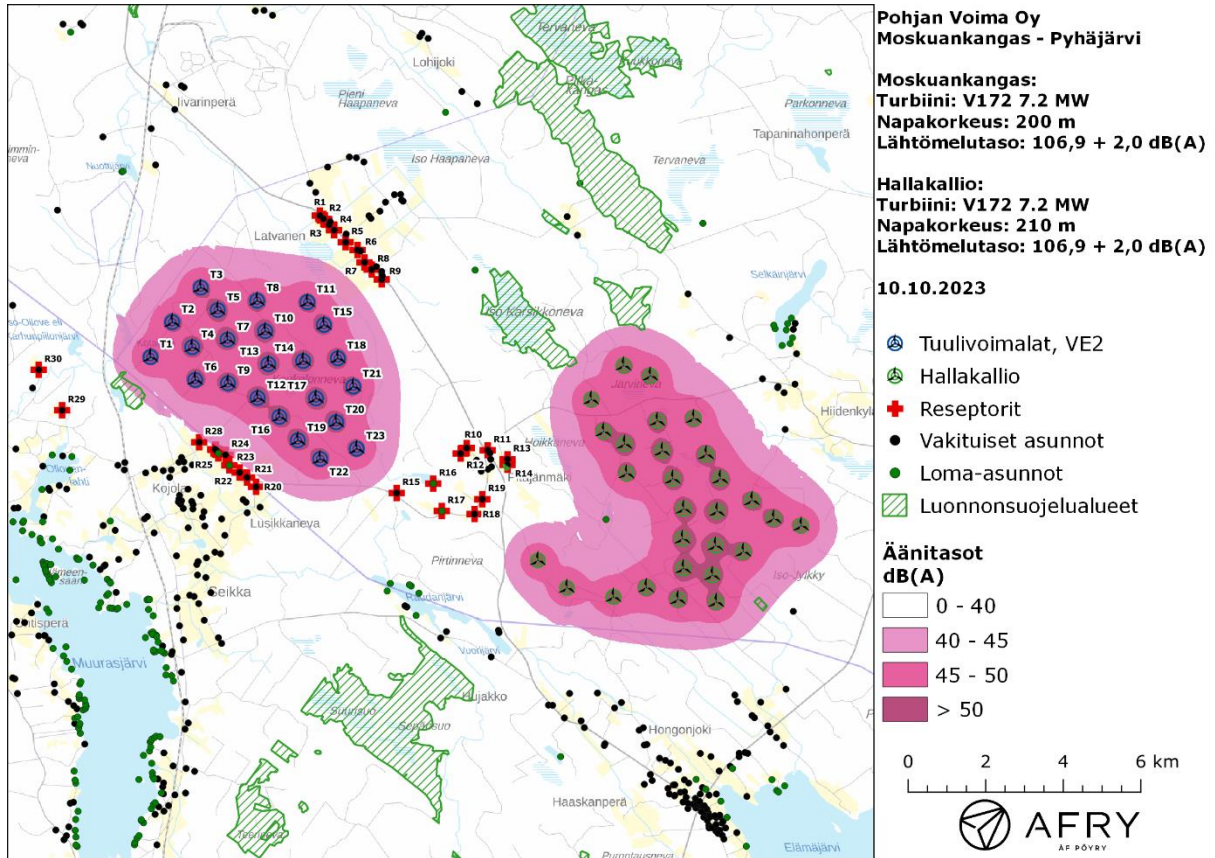
Taulukko 8: Hallakallion voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| H01       | 431088 | 7051329 | 168                 |
| H02       | 431779 | 7051064 | 168                 |
| H03       | 432899 | 7049975 | 165                 |

|     |        |         |     |
|-----|--------|---------|-----|
| H04 | 433219 | 7049043 | 158 |
| H05 | 433583 | 7048416 | 163 |
| H06 | 434401 | 7047858 | 178 |
| H07 | 434959 | 7047391 | 166 |
| H08 | 431960 | 7049903 | 172 |
| H09 | 432087 | 7049133 | 173 |
| H10 | 432357 | 7048412 | 162 |
| H11 | 432637 | 7047640 | 154 |
| H12 | 433498 | 7047578 | 152 |
| H13 | 430574 | 7049631 | 186 |
| H14 | 431115 | 7049309 | 180 |
| H15 | 432609 | 7046872 | 166 |
| H16 | 433458 | 7046695 | 151 |
| H17 | 434177 | 7046539 | 156 |
| H18 | 432629 | 7046106 | 162 |
| H19 | 433379 | 7045931 | 149 |
| H20 | 431674 | 7045617 | 155 |
| H21 | 432492 | 7045311 | 146 |
| H22 | 433480 | 7045242 | 150 |
| H23 | 429630 | 7045604 | 153 |
| H24 | 430826 | 7045372 | 160 |
| H25 | 435671 | 7047205 | 165 |
| H26 | 430255 | 7050454 | 185 |
| H27 | 431166 | 7048552 | 188 |
| H28 | 428881 | 7046314 | 155 |

Moskuankankaan ja Hallakallion mallinnettu keskiäänitaso LAeq on esitetty karttakuvana (Kuva 6). Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnustulosten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion melun yhteisvaikutuksissa keskiäänitasot jäävä valtioneuvoston asetuksen ohjearvojen alapuolelle kaikkien loma-asuntojen, vakituisten asuinrakennusten ja luonnonsuojelualueiden kohdilla. Asutuksen kohdalla yhteisvaikutukset nostavat keskiäänitasoa enimmillään 8,4 dB(A) reseptorin R14 kohdalla.

Moskuankankaan ja Hallakallion aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 10). Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R24, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 7). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloiden aiheuttamat melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.



Kuva 6: Keskiäänitasot LAeq, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

Taulukko 9: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

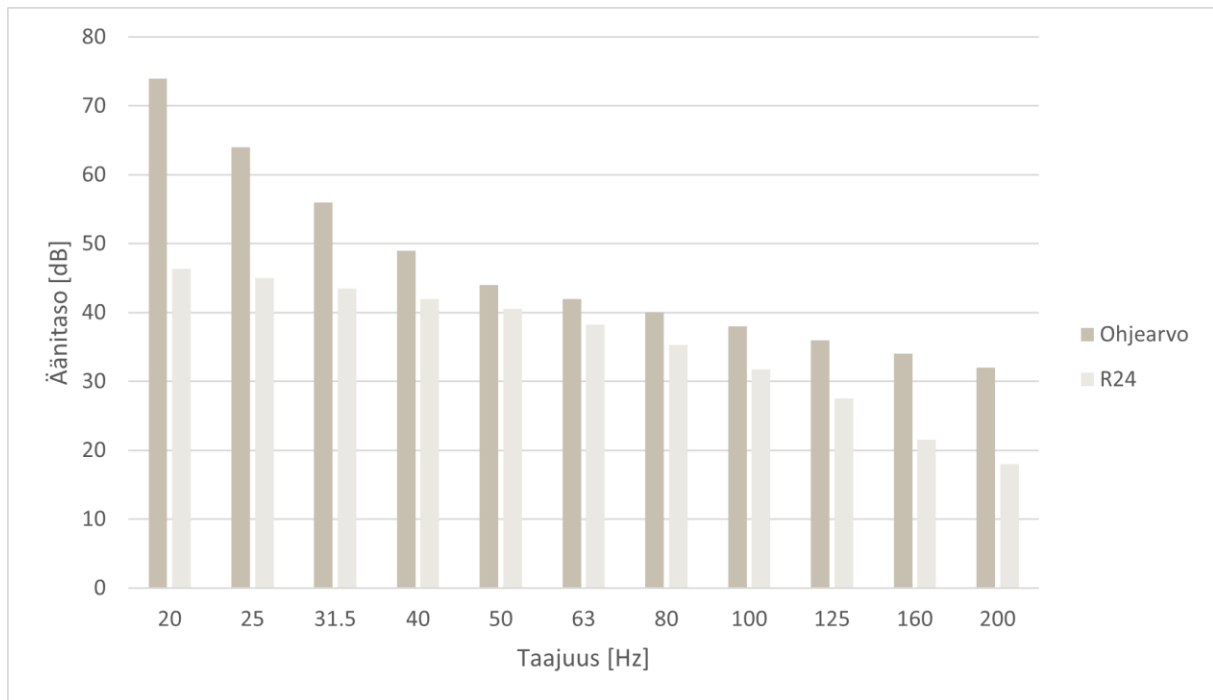
| Reseptori | Äänitaso dB(A) |
|-----------|----------------|
| R1        | 35,1           |
| R2        | 35,3           |
| R3        | 35,6           |
| R4        | 35,9           |
| R5        | 36,5           |
| R6        | 36,5           |
| R7        | 37,1           |
| R8        | 37,1           |
| R9        | 37,0           |
| R10       | 35,2           |
| R11       | 34,2           |
| R12       | 34,5           |
| R13       | 35,9           |

|     |      |
|-----|------|
| R14 | 35,5 |
| R15 | 37,0 |
| R16 | 35,6 |
| R17 | 33,9 |
| R18 | 34,4 |
| R19 | 34,7 |
| R20 | 38,8 |
| R21 | 39,1 |
| R22 | 39,0 |
| R23 | 39,1 |
| R24 | 39,8 |
| R25 | 39,4 |
| R26 | 39,6 |
| R27 | 39,6 |
| R28 | 39,3 |
| R29 | 32,3 |
| R30 | 31,4 |

Taulukko 10: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimat.

| Taajuus | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R1      | 50,9 | 50,3 | 49,6 | 49,1 | 48,9 | 48,0 | 46,8 | 45,1 | 42,7 | 38,8 | 36,6 |
| R2      | 51,0 | 50,4 | 49,7 | 49,3 | 49,0 | 48,2 | 46,9 | 45,3 | 42,9 | 38,9 | 36,8 |
| R3      | 51,2 | 50,6 | 49,9 | 49,5 | 49,2 | 48,4 | 47,1 | 45,5 | 43,1 | 39,2 | 37,1 |
| R4      | 51,4 | 50,8 | 50,1 | 49,7 | 49,4 | 48,6 | 47,3 | 45,7 | 43,3 | 39,5 | 37,3 |
| R5      | 51,8 | 51,1 | 50,5 | 50,0 | 49,8 | 49,0 | 47,7 | 46,1 | 43,8 | 39,9 | 37,9 |
| R6      | 51,8 | 51,2 | 50,5 | 50,1 | 49,8 | 49,0 | 47,8 | 46,2 | 43,8 | 40,0 | 37,9 |
| R7      | 52,2 | 51,5 | 50,9 | 50,4 | 50,2 | 49,4 | 48,2 | 46,6 | 44,2 | 40,4 | 38,4 |
| R8      | 52,2 | 51,6 | 51,0 | 50,5 | 50,2 | 49,4 | 48,2 | 46,6 | 44,3 | 40,5 | 38,4 |
| R9      | 52,2 | 51,6 | 51,0 | 50,5 | 50,2 | 49,4 | 48,2 | 46,6 | 44,3 | 40,4 | 38,4 |
| R10     | 51,6 | 51,0 | 50,3 | 49,8 | 49,6 | 48,7 | 47,5 | 45,8 | 43,3 | 39,3 | 37,0 |
| R11     | 51,7 | 51,1 | 50,4 | 49,9 | 49,7 | 48,8 | 47,6 | 45,9 | 43,4 | 39,4 | 37,1 |
| R12     | 51,6 | 51,0 | 50,3 | 49,9 | 49,6 | 48,7 | 47,5 | 45,8 | 43,3 | 39,3 | 37,0 |
| R13     | 52,1 | 51,4 | 50,8 | 50,3 | 50,1 | 49,2 | 48,0 | 46,3 | 43,9 | 39,9 | 37,7 |
| R14     | 52,1 | 51,4 | 50,8 | 50,3 | 50,1 | 49,2 | 48,0 | 46,3 | 43,9 | 40,0 | 37,7 |
| R15     | 52,4 | 51,8 | 51,1 | 50,7 | 50,4 | 49,6 | 48,4 | 46,8 | 44,4 | 40,6 | 38,5 |
| R16     | 51,7 | 51,0 | 50,4 | 49,9 | 49,6 | 48,8 | 47,5 | 45,9 | 43,4 | 39,4 | 37,2 |

|     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R17 | 51,2 | 50,5 | 49,9 | 49,4 | 49,1 | 48,2 | 47,0 | 45,3 | 42,8 | 38,7 | 36,3 |
| R18 | 51,5 | 50,8 | 50,2 | 49,7 | 49,4 | 48,6 | 47,3 | 45,6 | 43,2 | 39,2 | 36,9 |
| R19 | 51,6 | 51,0 | 50,3 | 49,8 | 49,6 | 48,7 | 47,5 | 45,8 | 43,3 | 39,3 | 37,0 |
| R20 | 53,2 | 52,6 | 52,0 | 51,5 | 51,3 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,5 | 41,8 | 39,9 |
| R21 | 53,5 | 52,8 | 52,2 | 51,8 | 51,5 | 50,7 | 49,6 | 48,0 | 45,8 | 42,1 | 40,2 |
| R22 | 53,5 | 52,8 | 52,2 | 51,8 | 51,5 | 50,8 | 49,6 | 48,0 | 45,8 | 42,1 | 40,2 |
| R23 | 53,5 | 52,8 | 52,2 | 51,8 | 51,5 | 50,8 | 49,6 | 48,0 | 45,8 | 42,1 | 40,2 |
| R24 | 54,0 | 53,3 | 52,7 | 52,3 | 52,0 | 51,3 | 50,1 | 48,6 | 46,3 | 42,7 | 40,8 |
| R25 | 53,8 | 53,1 | 52,5 | 52,1 | 51,8 | 51,0 | 49,9 | 48,3 | 46,1 | 42,4 | 40,6 |
| R26 | 53,9 | 53,2 | 52,6 | 52,2 | 51,9 | 51,2 | 50,0 | 48,5 | 46,3 | 42,6 | 40,7 |
| R27 | 53,9 | 53,2 | 52,6 | 52,2 | 51,9 | 51,2 | 50,0 | 48,5 | 46,2 | 42,6 | 40,7 |
| R28 | 53,7 | 53,1 | 52,5 | 52,0 | 51,8 | 51,0 | 49,8 | 48,3 | 46,1 | 42,4 | 40,5 |
| R29 | 48,9 | 48,2 | 47,5 | 47,0 | 46,8 | 45,9 | 44,6 | 42,8 | 40,3 | 36,2 | 33,9 |
| R30 | 48,3 | 47,6 | 46,9 | 46,4 | 46,1 | 45,2 | 43,9 | 42,1 | 39,6 | 35,4 | 33,0 |



Kuva 7: Matalataajuisten sisämelun tasot reseptorin R24 kohdalla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kunnan alueella suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle on käytetty 23 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE2. Arviointi on tehty turbiinityypillä V172-7.2 MW ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen rakenteilla olevan Pajuperänkankaan sekä suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen melun yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten perusteella melutasot alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla jäävät alle valtioneuvoston ohjearvojen. Myös matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla asumisterveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella.

Moskuankankaan, Pajuperänkankaan ja Hallakallion yhteisvaikutuksista ei aiheudu melun ohjearvojen ylityksiä



## 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] 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:<br><b>101021203-006.002</b>                                      |                    |                              |                    | Raportin hyväksyntäpäivämäärä: <b>15.03.2024</b>                               |      |                |      |
| Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: <b>AFRY Finland Oy</b>   |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Vastuuhenkilöt: <b>Kalle Auvinen ja Erkki Heikkola</b>  |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Laatija: <b>Kalle Auvinen</b>   |                    |                              |                    | Tarkastaja/hyväksyjä: <b>Erkki Heikkola</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>V172-7.2 MW PO7200<br/>(blades with serrated trailing edges)</b> |      | Sarjanumero/t: |      |
| Nimellisteho:<br><b>7,2 MW</b>  |                    | Napakorkeus:<br><b>200 m</b> |                    | Roottorin halkaisija:<br><b>172 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  |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Third octave noise emission, EnVentus™, V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0128-4336_00, 2022-06-30. |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Melupäästötiedot: V172-7.2MW PO7200 (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)               |                    |                              |                    |  |      |                |      |
| Oktaaveittain [Hz]  |                    | 1/3-oktaaveittain [Hz]       |                    |  |      |                |      |
| 31,5  |                    | 20                           | 63,7               | 200  | 98,0 | 2000           | 92,4 |
| 63  | 92,4               | 25                           | 68,9               | 250  | 98,6 | 2500           | 90,1 |
| 125   | 100,0              | 31,5                         | 73,8               | 315  | 98,8 | 3150           | 87,5 |
| 250   | 103,3              | 40                           | 78,6               | 400  | 98,9 | 4000           | 84,5 |
| 500   | 103,5              | 50                           | 83,0               | 500  | 98,7 | 5000           | 81,1 |
| 1000  | 101,9              | 63                           | 86,8               | 630  | 98,6 | 6300           | 77,4 |
| 2000  | 97,4               | 80                           | 90,2               | 800  | 98,1 | 8000           | 73,3 |
| 4000  | 89,9               | 100                          | 92,9               | 1000   | 97,2 | 10000          | 68,9 |
| 8000  | 79,2               | 125                          | 95,2               | 1250   | 95,9 |                |      |
|   |                    | 160                          | 96,8               | 1600   | 94,4 |                |      |

| Melun erityispiirteiden mittaustulos ja havainnot:  |      |                 |      |  |      |                                    |            |                                       |                               |      |      |
|---|------|-----------------|------|--|------|------------------------------------|------------|---------------------------------------|-------------------------------|------|------|
| Kapeakaistaisuus/<br>tonaalisuus  |      | Impulssimaisuus |      | Merkityksellinen<br>sykintä (amplitudi-<br>modulaatio) |      |                                    | Muu, mikä: |                                       |                               |      |      |
| kyllä   | ei   | kyllä           | ei   | kyllä  | ei   | kyllä                              | ei         | kyllä                                 | ei                            |      |      |
| Laskentakorkeus   |      |                 |      |  |      | Laskentaruudun koko [m x m]        |            |                                       |                               |      |      |
| <b>4 m</b>  |      |                 |      |  |      | <b>10 m x 10 m</b>                 |            |                                       |                               |      |      |
| Suhteellinen kosteus  |      |                 |      |  |      | Lämpötila                          |            |                                       |                               |      |      |
| <b>70 %</b>   |      |                 |      |  |      | <b>15 C°</b>                       |            |                                       |                               |      |      |
| 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> |            |                                       |                               |      |      |
| Matalataajuiset ulkomelun tasot [dB] reseptoreiden kohdilla (lähtömelutaso 106,9 + 2 dB(A)) |      |                 |      |  |      |                                    |            |                                       |                               |      |      |
| Hz  | 20   | 25              | 31,5 | 40   | 50   | 63                                 | 80         | 100                                   | 125                           | 160  | 200  |
| <b>R1</b>   | 50,3 | 49,7            | 49,1 | 48,6   | 48,3 | 47,5                               | 46,3       | 44,7                                  | 42,4                          | 38,6 | 36,5 |
| <b>R2</b>   | 50,4 | 49,8            | 49,2 | 48,7   | 48,5 | 47,7                               | 46,5       | 44,9                                  | 42,5                          | 38,7 | 36,6 |
| <b>R3</b>   | 50,6 | 50,0            | 49,4 | 48,9   | 48,7 | 47,9                               | 46,7       | 45,1                                  | 42,8                          | 39,0 | 36,9 |
| <b>R4</b>   | 50,8 | 50,2            | 49,6 | 49,1   | 48,9 | 48,1                               | 46,9       | 45,3                                  | 43,0                          | 39,2 | 37,2 |
| <b>R5</b>   | 51,2 | 50,6            | 49,9 | 49,5   | 49,3 | 48,5                               | 47,3       | 45,7                                  | 43,4                          | 39,7 | 37,7 |
| <b>R6</b>   | 51,2 | 50,6            | 49,9 | 49,5   | 49,3 | 48,5                               | 47,3       | 45,7                                  | 43,4                          | 39,7 | 37,7 |
| <b>R7</b>   | 51,6 | 50,9            | 50,3 | 49,9   | 49,6 | 48,9                               | 47,7       | 46,1                                  | 43,9                          | 40,1 | 38,2 |
| <b>R8</b>   | 51,6 | 51,0            | 50,3 | 49,9   | 49,7 | 48,9                               | 47,7       | 46,2                                  | 43,9                          | 40,2 | 38,2 |
| <b>R9</b>   | 51,5 | 50,9            | 50,3 | 49,8   | 49,6 | 48,8                               | 47,6       | 46,1                                  | 43,8                          | 40,1 | 38,1 |
| <b>R10</b>  | 48,5 | 47,9            | 47,2 | 46,7   | 46,5 | 45,7                               | 44,4       | 42,7                                  | 40,3                          | 36,3 | 34,0 |
| <b>R11</b>  | 47,5 | 46,9            | 46,2 | 45,7   | 45,4 | 44,6                               | 43,3       | 41,6                                  | 39,1                          | 35,0 | 32,5 |

| Matalataajuiset ulkomelun tasot [dB] reseptoreiden kohdilla (lähtömelutaso 106,9 + 2 dB(A)) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hz  | 20   | 25   | 31,5 | 40   | 50   | 63   | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
| <b>R12</b>  | 48,8 | 48,1 | 47,5 | 47,0 | 46,7 | 45,9 | 44,6 | 43,0 | 40,6 | 36,6 | 34,4 |
| <b>R13</b>  | 46,6 | 45,9 | 45,3 | 44,8 | 44,5 | 43,6 | 42,3 | 40,5 | 37,9 | 33,7 | 31,1 |
| <b>R14</b>  | 46,6 | 45,9 | 45,2 | 44,7 | 44,4 | 43,5 | 42,2 | 40,5 | 37,8 | 33,6 | 31,0 |
| <b>R15</b>  | 51,2 | 50,5 | 49,9 | 49,5 | 49,2 | 48,5 | 47,3 | 45,7 | 43,5 | 39,8 | 37,9 |
| <b>R16</b>  | 49,5 | 48,8 | 48,2 | 47,7 | 47,5 | 46,7 | 45,4 | 43,8 | 41,5 | 37,6 | 35,5 |
| <b>R17</b>  | 48,2 | 47,5 | 46,9 | 46,4 | 46,2 | 45,3 | 44,1 | 42,4 | 39,9 | 35,9 | 33,6 |
| <b>R18</b>  | 46,9 | 46,2 | 45,6 | 45,1 | 44,8 | 43,9 | 42,6 | 40,9 | 38,3 | 34,1 | 31,6 |
| <b>R19</b>  | 46,9 | 46,3 | 45,6 | 45,1 | 44,8 | 44,0 | 42,7 | 40,9 | 38,3 | 34,2 | 31,7 |
| <b>R20</b>  | 52,9 | 52,2 | 51,6 | 51,2 | 50,9 | 50,2 | 49,0 | 47,5 | 45,3 | 41,7 | 39,8 |
| <b>R21</b>  | 53,1 | 52,5 | 51,9 | 51,4 | 51,2 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,6 | 42,0 | 40,1 |
| <b>R22</b>  | 53,1 | 52,5 | 51,9 | 51,4 | 51,2 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,6 | 42,0 | 40,1 |
| <b>R23</b>  | 53,2 | 52,5 | 51,9 | 51,5 | 51,3 | 50,5 | 49,3 | 47,8 | 45,6 | 42,0 | 40,1 |
| <b>R24</b>  | 53,7 | 53,1 | 52,4 | 52,0 | 51,8 | 51,0 | 49,9 | 48,4 | 46,2 | 42,6 | 40,8 |
| <b>R25</b>  | 53,5 | 52,9 | 52,2 | 51,8 | 51,6 | 50,8 | 49,7 | 48,2 | 46,0 | 42,3 | 40,5 |
| <b>R26</b>  | 53,6 | 53,0 | 52,4 | 51,9 | 51,7 | 50,9 | 49,8 | 48,3 | 46,1 | 42,5 | 40,7 |
| <b>R27</b>  | 53,6 | 53,0 | 52,4 | 51,9 | 51,7 | 50,9 | 49,8 | 48,3 | 46,1 | 42,5 | 40,7 |
| <b>R28</b>  | 53,4 | 52,8 | 52,2 | 51,8 | 51,5 | 50,8 | 49,6 | 48,1 | 46,0 | 42,3 | 40,5 |
| <b>R29</b>  | 48,4 | 47,7 | 47,1 | 46,6 | 46,3 | 45,5 | 44,3 | 42,6 | 40,1 | 36,1 | 33,8 |
| <b>R30</b>  | 47,8 | 47,1 | 46,4 | 46,0 | 45,7 | 44,8 | 43,6 | 41,9 | 39,4 | 35,3 | 32,9 |



Pohjan Voima Oy

**Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE1**

101021203-006

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Kalle Auvinen

E-mail  
[kalle.auvinen@afry.com](mailto:kalle.auvinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
002

Asiakas  
Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

Päivämäärä  
15/03/2024

Projektinumero  
101021203-006

Raportin tila  
VALMIS

## Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeseelvitys, VE1

## Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laatija   | Pvm/Tarkastaja                                      | Merkinnät/Muutokset   |
|--------|---|---|---|
| 001    | 11.10.2023/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 11.10.2023/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Alkuperäinen<br>(Raportti 101021203-006.001)  |
| 002    | 15.03.2024/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 15.03.2024/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Hallakallion<br>voimalakoordinaatit lisätty<br>raporttiin<br>(Raportti 101021203-006.002) |

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

## Sisällysluettelo

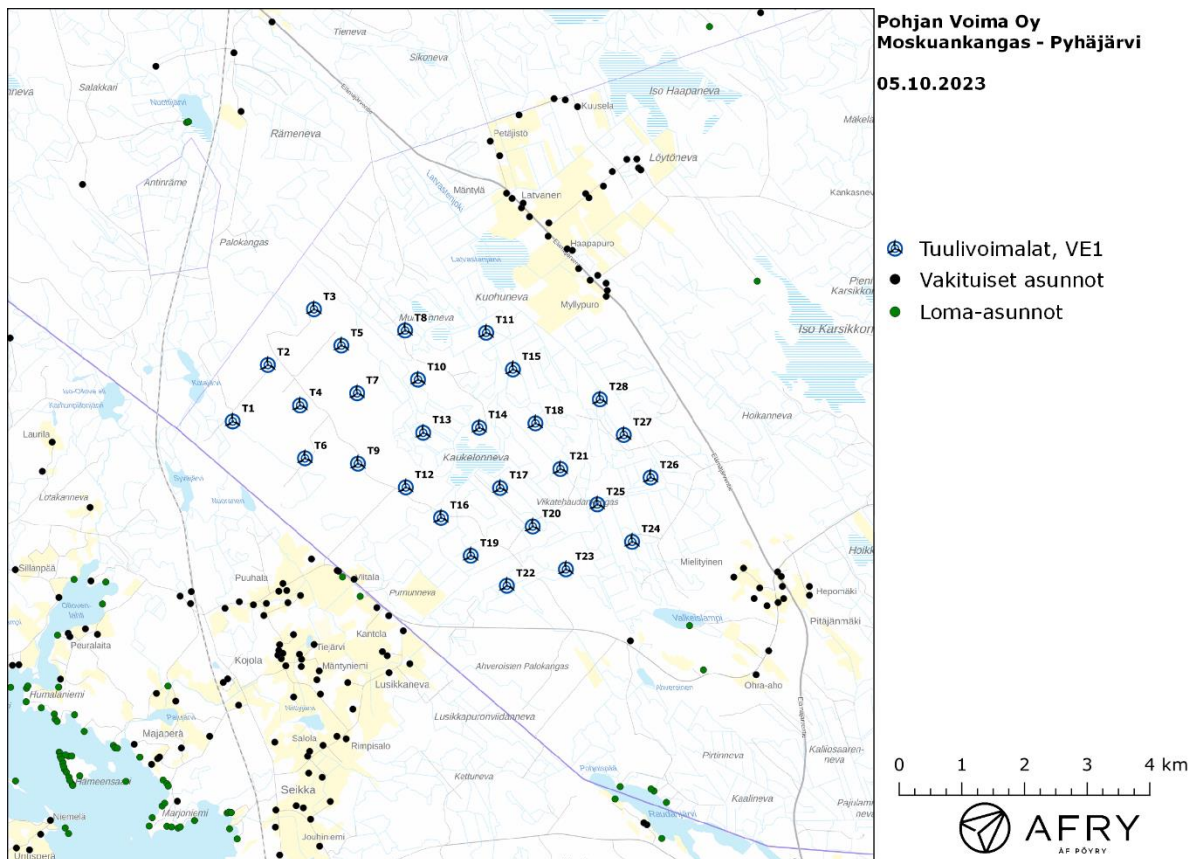
|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Johdanto .....  | 4  |
| 2   | Tuulivoimaloiden välke .....  | 6  |
| 2.1 | Välkevaikutus.....  | 6  |
| 2.2 | Välkkeen rajoittaminen.....   | 6  |
| 2.3 | Arvioinnin epävarmuudet.....  | 6  |
| 2.4 | Ohjeavot .....  | 7  |
| 3   | Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....                                 | 8  |
| 3.1 | Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....                             | 8  |
| 3.2 | Välkevaikutus.....  | 12 |
| 3.3 | Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus ..... | 14 |
| 4   | Yhteenveto .....  | 18 |
| 5   | Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....                              | 19 |
| 6   | Viitteet .....  | 21 |



# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kunnan alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 28 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE1. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan sekä läheisten Pajuperänkankaan (rakenteilla) ja Hallakallion (suunnitteilla) tuulivoimapuistojen välkkeiden yhteisvaikutuksia



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiini-paikalla.*

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| T1        | 418894 | 7051545 | 128                 |
| T2        | 419455 | 7052445 | 155                 |
| T3        | 420191 | 7053333 | 156                 |
| T4        | 419969 | 7051800 | 159                 |
| T5        | 420628 | 7052755 | 158                 |
| T6        | 420048 | 7050957 | 144                 |
| T7        | 420880 | 7051994 | 156                 |
| T8        | 421645 | 7052995 | 145                 |
| T9        | 420893 | 7050871 | 144                 |
| T10       | 421851 | 7052212 | 150                 |
| T11       | 422939 | 7052959 | 140                 |
| T12       | 421657 | 7050493 | 143                 |
| T13       | 421934 | 7051364 | 147                 |
| T14       | 422829 | 7051445 | 145                 |
| T15       | 423366 | 7052374 | 140                 |
| T16       | 422219 | 7050007 | 138                 |
| T17       | 423161 | 7050483 | 145                 |
| T18       | 423725 | 7051514 | 143                 |
| T19       | 422693 | 7049403 | 138                 |
| T20       | 423682 | 7049869 | 148                 |
| T21       | 424123 | 7050786 | 146                 |
| T22       | 423269 | 7048924 | 142                 |
| T23       | 424212 | 7049186 | 156                 |
| T24       | 425268 | 7049625 | 155                 |
| T25       | 424712 | 7050222 | 153                 |
| T26       | 425563 | 7050650 | 150                 |
| T27       | 425135 | 7051329 | 145                 |
| T28       | 424754 | 7051897 | 141                 |

## 2 Tuulivoimaloiden välke

### 2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja keston vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltatimet). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen välkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellonaikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

### 2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

## 2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [4].

Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa.

Tässä selvityksessä välkeajoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

## 3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tietoa siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-arvokäyrästä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos Auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa, ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta. Tässä selvityksessä väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Moskuankankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiilina on käytetty voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamaa tarkkaa lavan profiilitietoa skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,6 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Siilinjärven sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntaakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

*Taulukko 2: Suuntasektoriokohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulenopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.*

| Suuntasektori   | 0/180 | 30/210 | 60/240 | 90/270 | 120/300 | 150/330 |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Yli 3 m/s osuus | 0,174 | 0,167  | 0,157  | 0,147  | 0,129   | 0,168   |

*Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.*

| Kuukausi  | Auringonpaisteen todennäköisyys |
|-----------|---------------------------------|
| Tammikuu  | 0,154                           |
| Helmikuu  | 0,262                           |
| Maaliskuu | 0,332                           |
| Huhtikuu  | 0,432                           |
| Toukokuu  | 0,454                           |
| Kesäkuu   | 0,424                           |
| Heinäkuu  | 0,456                           |
| Elokuu    | 0,406                           |
| Syyskuu   | 0,299                           |
| Lokakuu   | 0,186                           |
| Marraskuu | 0,108                           |
| Joulukuu  | 0,082                           |

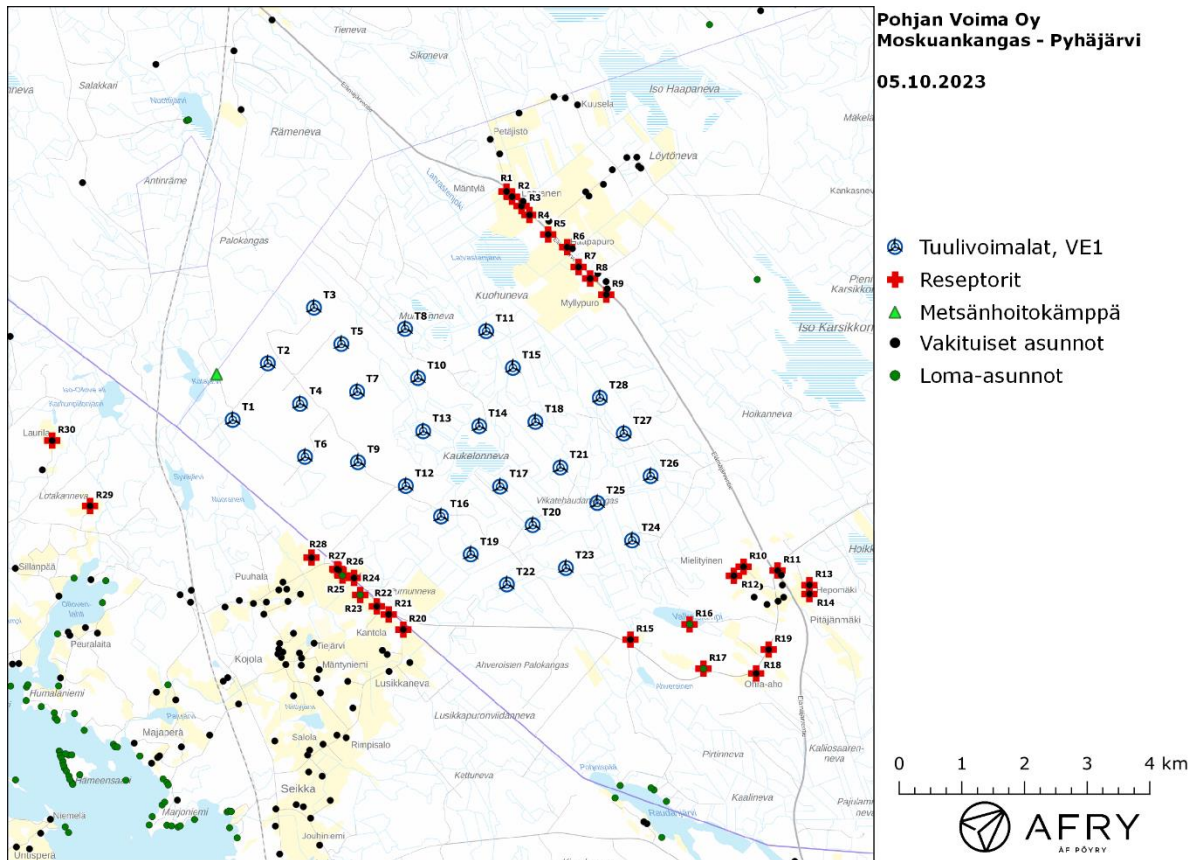
Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 30 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevat noin 1,5–3,0 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 800 m voimalan T1 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan, kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä välkevaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 4: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

| Reseptori | E      | N       | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus  |
|-----------|--------|---------|---------------------|-------------------|
| R1        | 423266 | 7055182 | 140                 | vakituinen asunto |
| R2        | 423354 | 7055098 | 139                 | vakituinen asunto |
| R3        | 423504 | 7054949 | 139                 | vakituinen asunto |
| R4        | 423632 | 7054807 | 140                 | vakituinen asunto |
| R5        | 423929 | 7054496 | 139                 | vakituinen asunto |
| R6        | 424233 | 7054294 | 139                 | vakituinen asunto |
| R7        | 424415 | 7053979 | 140                 | vakituinen asunto |
| R8        | 424599 | 7053795 | 141                 | vakituinen asunto |
| R9        | 424857 | 7053538 | 143                 | vakituinen asunto |
| R10       | 427048 | 7049203 | 216                 | vakituinen asunto |
| R11       | 427591 | 7049143 | 192                 | vakituinen asunto |
| R12       | 426892 | 7049059 | 210                 | vakituinen asunto |
| R13       | 428099 | 7048911 | 198                 | vakituinen asunto |
| R14       | 428099 | 7048770 | 194                 | vakituinen asunto |
| R15       | 425243 | 7048043 | 162                 | vakituinen asunto |
| R16       | 426186 | 7048286 | 162                 | loma-asunto       |
| R17       | 426407 | 7047580 | 199                 | loma-asunto       |
| R18       | 427249 | 7047503 | 189                 | vakituinen asunto |
| R19       | 427450 | 7047884 | 191                 | vakituinen asunto |
| R20       | 421618 | 7048203 | 131                 | vakituinen asunto |
| R21       | 421386 | 7048444 | 133                 | vakituinen asunto |
| R22       | 421195 | 7048572 | 131                 | vakituinen asunto |
| R23       | 420929 | 7048754 | 128                 | loma-asunto       |
| R24       | 420833 | 7049026 | 126                 | vakituinen asunto |
| R25       | 420648 | 7049063 | 125                 | loma-asunto       |
| R26       | 420585 | 7049153 | 127                 | vakituinen asunto |
| R27       | 420563 | 7049165 | 127                 | vakituinen asunto |
| R28       | 420153 | 7049349 | 128                 | vakituinen asunto |
| R29       | 416620 | 7050172 | 128                 | vakituinen asunto |
| R30       | 416015 | 7051213 | 128                 | vakituinen asunto |





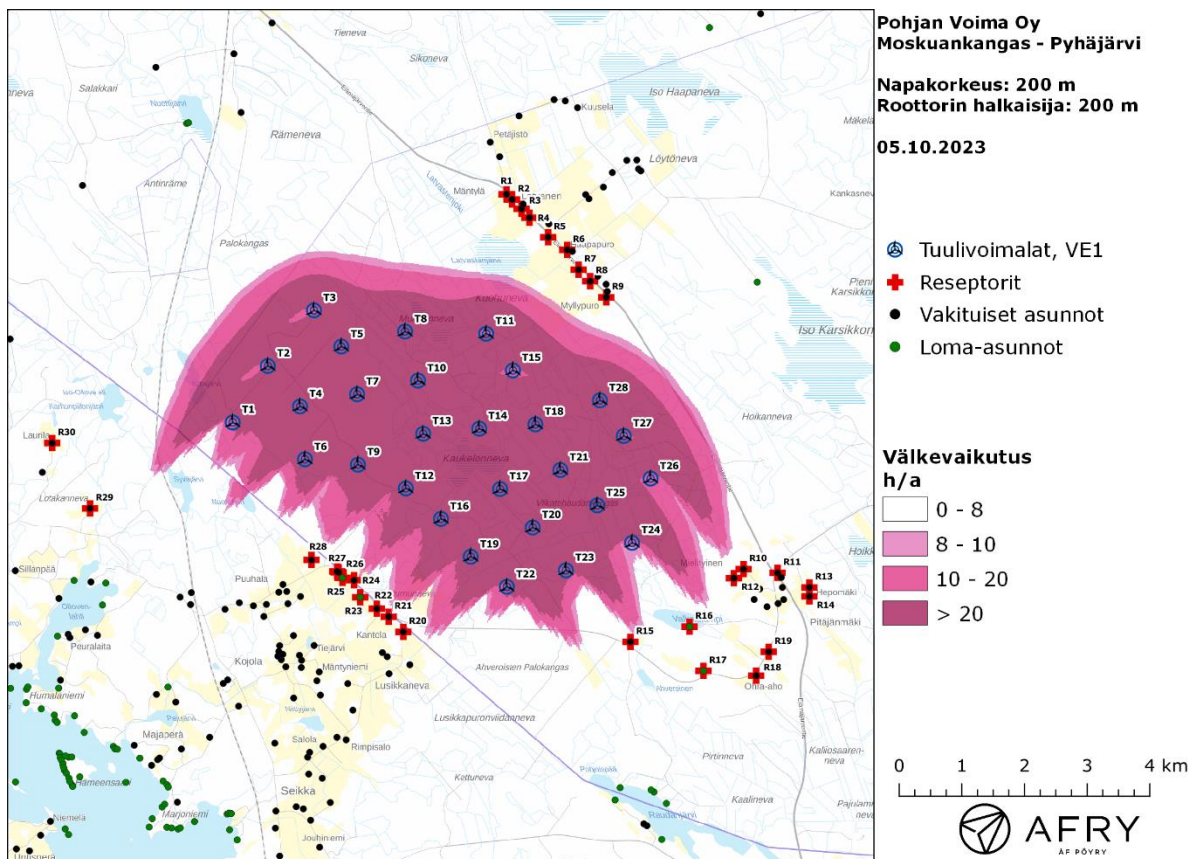
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

### 3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon, ja todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon, kaikkien lähialueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Vuotuinen teoreettinen maksimivälke alittaa Saksan 30 tunnin raja-arvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke aika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 3 vakituksen asuinrakennuksen kohdalla.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Todennäköisen välkevaikutuksen tarkempi ajoittuminen reseptorien R21 ja R24 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6) ja (Taulukko 7). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 5: Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

| Reseptori | Todennäköinen vuotuinen välkeaja<br>[h:min] | Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] | Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaja<br>[h:min] | Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] |
|-----------|---|--|---|---|
| R1        | 0:24  | 1  | 4:56  | 12  |
| R2        | 0:26  | 1  | 5:22  | 14  |
| R3        | 0:30  | 2  | 5:57  | 15  |
| R4        | 0:49  | 2  | 9:59  | 19  |
| R5        | 1:09  | 3  | 11:41   | 20  |
| R6        | 1:22  | 3  | 13:01   | 17  |
| R7        | 1:51  | 3  | 17:03   | 20  |
| R8        | 2:19  | 3  | 21:24   | 29  |
| R9        | 2:57  | 3  | 28:01   | 33  |
| R10       | 2:28  | 5  | 9:38  | 18  |
| R11       | 0:19  | 2  | 1:26  | 9   |
| R12       | 3:53  | 6  | 15:20   | 23  |
| R13       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R14       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R15       | 3:46  | 8  | 15:05   | 32  |
| R16       | 0:52  | 3  | 3:32  | 13  |
| R17       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R18       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R19       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R20       | 1:57  | 6  | 7:37  | 22  |
| R21       | 6:24  | 9  | 24:12   | 32  |
| R22       | 3:49  | 7  | 14:45   | 24  |
| R23       | 2:42  | 5  | 10:57   | 18  |
| R24       | 6:21  | 7  | 24:17   | 26  |
| R25       | 3:24  | 5  | 13:02   | 20  |
| R26       | 2:44  | 6  | 10:42   | 22  |
| R27       | 2:34  | 5  | 10:06   | 19  |
| R28       | 4:21  | 6  | 16:29   | 22  |
| R29       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R30       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R21 kohdalla.

| Kellonaika | 0-2  | 2-4  | 4-6  | 6-8  | 8-10 | 10-12 | 12-14 | 14-16 | 16-18 | 18-20 | 20-22 | 22-24 |      |
|------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Tammikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Helmikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Maaliskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Huhtikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:34 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:34 |
| Toukokuu   | 0:00 | 0:11 | 0:41 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:52 |
| Kesäkuu    | 0:00 | 0:13 | 2:04 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 2:17 |
| Heinäkuu   | 0:00 | 0:00 | 2:09 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 2:09 |
| Elokuu     | 0:00 | 0:00 | 0:32 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:32 |
| Syyskuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Lokakuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Marraskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Joulukuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Yhteensä   | 0:00 | 0:23 | 6:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 6:24 |

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R24 kohdalla.

| Kellonaika | 0-2  | 2-4  | 4-6  | 6-8  | 8-10 | 10-12 | 12-14 | 14-16 | 16-18 | 18-20 | 20-22 | 22-24 |      |
|------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Tammikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Helmikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Maaliskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:02 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:02 |
| Huhtikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:36 | 0:07 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:43 |
| Toukokuu   | 0:00 | 0:01 | 0:54 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:55 |
| Kesäkuu    | 0:00 | 0:00 | 1:57 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 1:57 |
| Heinäkuu   | 0:00 | 0:00 | 2:04 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 2:04 |
| Elokuu     | 0:00 | 0:00 | 0:34 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:34 |
| Syyskuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:06 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:06 |
| Lokakuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Marraskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Joulukuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Yhteensä   | 0:00 | 0:01 | 6:04 | 0:15 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 6:21 |

### 3.3 Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden ja läheisyyteen suunnitellun Hallakallion ja rakenteilla olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutuksia. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 28 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 4,7 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulivoimapuistoon on rakenteilla 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

Moskuankankaan sekä Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan sekä Hallakallion voimaloiden välkkeen yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (YIT Suomi Oy) verkkosivuillaan jakamien tietojen mukaan, Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Välkemallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 210 m. Hallakallion voimaloilla on käytetty samaa lapaprofiilia ja roottorin halkaisijaa kuin Moskuankankaan voimaloilla. Hallakallion voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 8).

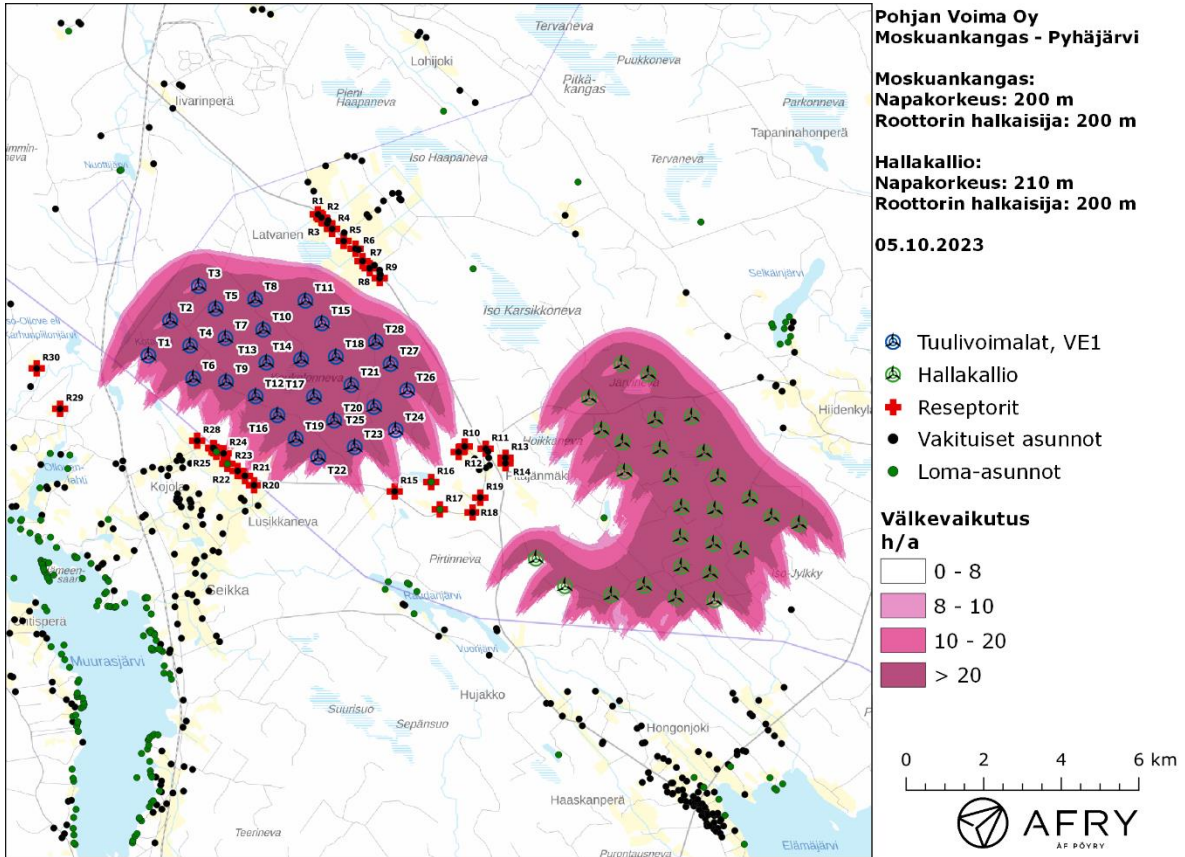
Taulukko 8: Hallakallion voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| H01       | 431088 | 7051329 | 168                 |
| H02       | 431779 | 7051064 | 168                 |
| H03       | 432899 | 7049975 | 165                 |
| H04       | 433219 | 7049043 | 158                 |
| H05       | 433583 | 7048416 | 163                 |
| H06       | 434401 | 7047858 | 178                 |
| H07       | 434959 | 7047391 | 166                 |
| H08       | 431960 | 7049903 | 172                 |
| H09       | 432087 | 7049133 | 173                 |
| H10       | 432357 | 7048412 | 162                 |
| H11       | 432637 | 7047640 | 154                 |
| H12       | 433498 | 7047578 | 152                 |
| H13       | 430574 | 7049631 | 186                 |
| H14       | 431115 | 7049309 | 180                 |
| H15       | 432609 | 7046872 | 166                 |
| H16       | 433458 | 7046695 | 151                 |
| H17       | 434177 | 7046539 | 156                 |
| H18       | 432629 | 7046106 | 162                 |
| H19       | 433379 | 7045931 | 149                 |
| H20       | 431674 | 7045617 | 155                 |
| H21       | 432492 | 7045311 | 146                 |
| H22       | 433480 | 7045242 | 150                 |
| H23       | 429630 | 7045604 | 153                 |
| H24       | 430826 | 7045372 | 160                 |
| H25       | 435671 | 7047205 | 165                 |
| H26       | 430255 | 7050454 | 185                 |
| H27       | 431166 | 7048552 | 188                 |
| H28       | 428881 | 7046314 | 155                 |

Moskuankankaan ja Hallakallion todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset välkeajat ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnusten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Ainoat muutokset todennäköisessä välkevaikutuksessa sekä teoreettisessa maksimivälkevaikutuksessa kohdistuvat



reseptoreihin R18 ja R19, joissa vuotuinen todennäköinen välkevaikutus kasvaa 28 minuutilla ja 25 minuutilla. Moskuankankaan voimalat eivät aiheuta välkevaikutuksia kyseisiin reseptoripisteisiin, ja välkeajat aiheutuvat pelkästään Hallakallion voimaloista. Moskuankankaan ja Hallakallion yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat.

Taulukko 9: Välkeajat reseptoripisteissä, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

| Reseptori | Todennäköinen vuotuinen välkeaja<br>[h:min] | Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] | Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaja<br>[h:min] | Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] |
|-----------|---|--|---|---|
| R1        | 0:24  | 1  | 4:56  | 12  |
| R2        | 0:26  | 1  | 5:22  | 14  |
| R3        | 0:30  | 2  | 5:57  | 15  |
| R4        | 0:49  | 2  | 9:59  | 19  |
| R5        | 1:09  | 3  | 11:41   | 20  |
| R6        | 1:22  | 3  | 13:01   | 17  |
| R7        | 1:51  | 3  | 17:03   | 20  |
| R8        | 2:19  | 3  | 21:24   | 29  |
| R9        | 2:57  | 3  | 28:01   | 33  |
| R10       | 2:28  | 5  | 9:38  | 18  |
| R11       | 0:19  | 2  | 1:26  | 9   |
| R12       | 3:53  | 6  | 15:20   | 23  |
| R13       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R14       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R15       | 3:46  | 8  | 15:05   | 32  |
| R16       | 0:52  | 3  | 3:32  | 13  |
| R17       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R18       | 0:28  | 2  | 3:29  | 14  |
| R19       | 0:25  | 2  | 3:13  | 14  |
| R20       | 1:57  | 6  | 7:37  | 22  |
| R21       | 6:24  | 9  | 24:12   | 32  |
| R22       | 3:49  | 7  | 14:45   | 24  |
| R23       | 2:42  | 5  | 10:57   | 18  |
| R24       | 6:21  | 7  | 24:17   | 26  |
| R25       | 3:24  | 5  | 13:02   | 20  |
| R26       | 2:44  | 6  | 10:42   | 22  |
| R27       | 2:34  | 5  | 10:06   | 19  |
| R28       | 4:21  | 6  | 16:29   | 22  |
| R29       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R30       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kunnan alueella suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle on käytetty 28 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE1. Välkevaikutusten arviointi on tehty roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen rakenteilla olevan Pajuperänkankaan sekä suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin, ja Tanskan 10 tunnin, ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen maksimivälkeä alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälkeä ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 3 vakituisten asuinrakennuksen kohdalla.



## 5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsitettä, joka on maapallon maantieteellistä koordinaatistoa vastaava kuvitteellinen kuori katsottaessa maapallolta taivaalle. Samalla tavoin kuin paikan sijainti maapallolla voidaan ilmoittaa pituus- ja leveyspiirien avulla, voidaan taivaankappaleiden paikat taivaanpallolla ilmoittaa kahden koordinaatin (rektaskensio ja deklinaatio) avulla. Aurinko kulkee vuoden aikana taivaanpallolla kääntöpiirien väliin asettuvalla nauhalla, ja Auringon esiintymistiheys kyseisellä nauhalla voidaan esittää tiheysfunktiona.

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita turbiinin roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulusuusosuuksilla.

Huomioitaessa kuukausittaista (tai muuta lyhytaikaista) vaihtelua auringonpaisteen todennäköisyydessä, taivaanpallon nauha jaetaan vastaaviin osiin Auringon deklinaation mukaan. Tiheysfunktio määritellään näissä osissa erikseen, ja integroinnin tuloksia skaalataan kuukausikohtaisilla todennäköisyyksillä.

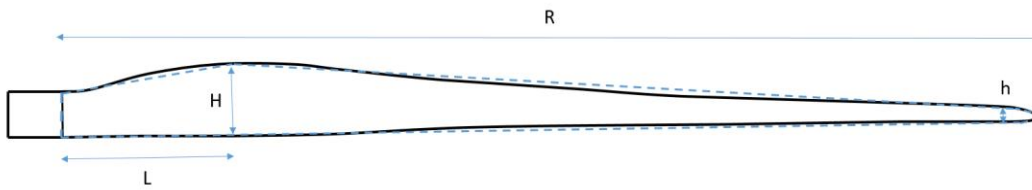
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Kun lavan leveys on  $w$  metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

missä  $d$  on etäisyys Aurinkoon (150'000'000 km). Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta.

Seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 5) on esitetty malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on  $H$  etäisyydellä  $L$  lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on  $R$  ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on  $h$ . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta  $H$  arvoon  $h$  liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona.



*Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.*

Tämän raportin välkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä  $[0, R]$  riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

## 6 Viitteet

- [1] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [2] Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.



Pohjan Voima Oy

**Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE2**

101021203-006

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Kalle Auvinen

E-mail  
[kalle.auvinen@afry.com](mailto:kalle.auvinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
002

Asiakas  
Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

Päivämäärä  
15/03/2024

Projektinumero  
101021203-006

Raportin tila  
VALMIS

## Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE2

## Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laatija   | Pvm/Tarkastaja                                      | Merkinnät/Muutokset   |
|--------|---|---|---|
| 001    | 11.10.2023/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 11.10.2023/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Alkuperäinen<br>(Raportti 101021203-006.001)  |
| 002    | 15.03.2024/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 15.03.2024/<br>Erkki Heikkola,<br>Senior Consultant | Hallakallion<br>voimalakoordinaatit lisätty<br>raporttiin<br>(Raportti 101021203-006.002) |

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

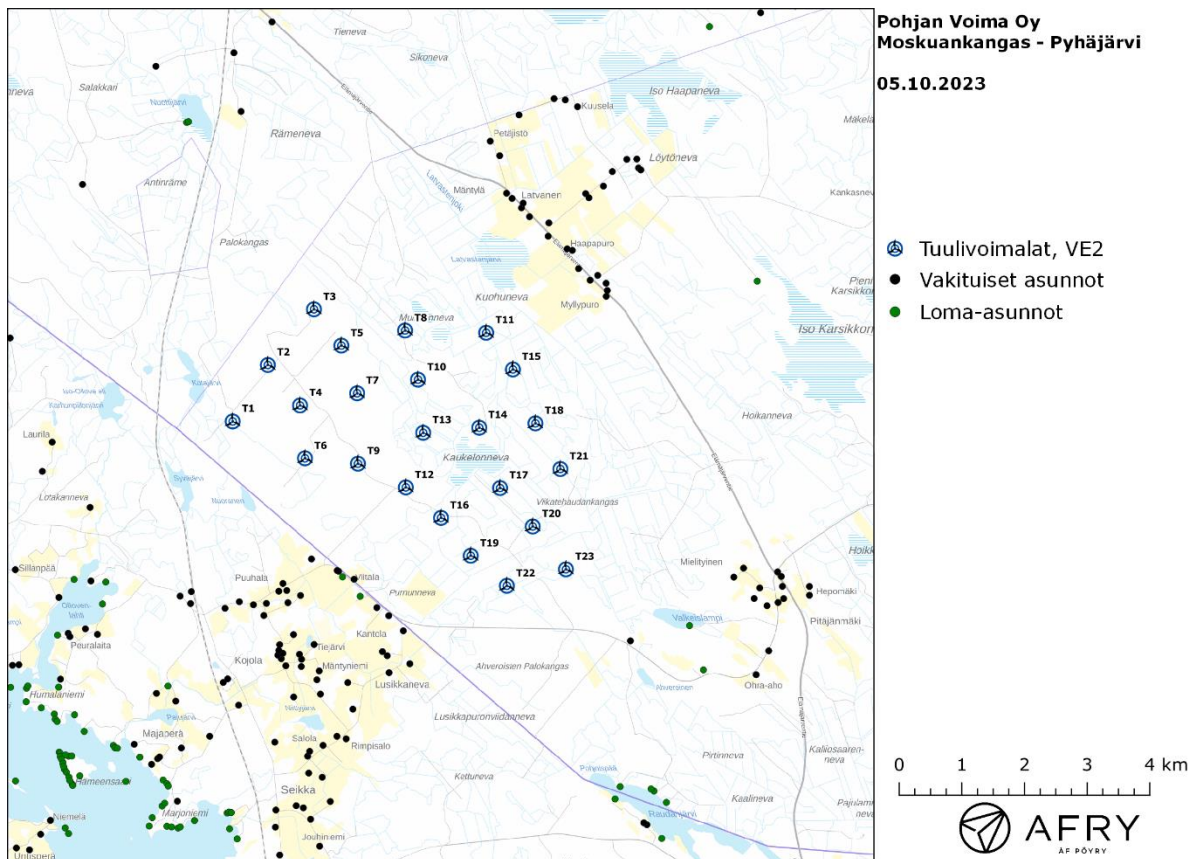
## Sisällysluettelo

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Johdanto .....  | 4  |
| 2   | Tuulivoimaloiden välke .....  | 6  |
| 2.1 | Välkevaikutus.....  | 6  |
| 2.2 | Välkkeen rajoittaminen.....   | 6  |
| 2.3 | Arvioinnin epävarmuudet.....  | 6  |
| 2.4 | Ohjeavot .....  | 7  |
| 3   | Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....                                 | 8  |
| 3.1 | Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....                             | 8  |
| 3.2 | Välkevaikutus.....  | 12 |
| 3.3 | Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus ..... | 14 |
| 4   | Yhteenveto .....  | 18 |
| 5   | Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....                              | 19 |
| 6   | Viitteet .....  | 21 |

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kunnan alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 23 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan sekä läheisten Pajuperänkankaan (rakenteilla) ja Hallakallion (suunnitteilla) tuulivoimapuistojen välkkeiden yhteisvaikutuksia



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.



*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiini-paikalla.*

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| T1        | 418894 | 7051545 | 128                 |
| T2        | 419455 | 7052445 | 155                 |
| T3        | 420191 | 7053333 | 156                 |
| T4        | 419969 | 7051800 | 159                 |
| T5        | 420628 | 7052755 | 158                 |
| T6        | 420048 | 7050957 | 144                 |
| T7        | 420880 | 7051994 | 156                 |
| T8        | 421645 | 7052995 | 145                 |
| T9        | 420893 | 7050871 | 144                 |
| T10       | 421851 | 7052212 | 150                 |
| T11       | 422939 | 7052959 | 140                 |
| T12       | 421657 | 7050493 | 143                 |
| T13       | 421934 | 7051364 | 147                 |
| T14       | 422829 | 7051445 | 145                 |
| T15       | 423366 | 7052374 | 140                 |
| T16       | 422219 | 7050007 | 138                 |
| T17       | 423161 | 7050483 | 145                 |
| T18       | 423725 | 7051514 | 143                 |
| T19       | 422693 | 7049403 | 138                 |
| T20       | 423682 | 7049869 | 148                 |
| T21       | 424123 | 7050786 | 146                 |
| T22       | 423269 | 7048924 | 142                 |
| T23       | 424212 | 7049186 | 156                 |

## 2 Tuulivoimaloiden välke

### 2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja keston vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltatimet). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen välkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellonaikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

### 2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

## 2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [4].

Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa.

Tässä selvityksessä välkeaikoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

## 3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tietoa siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-arvokäyrästä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos Auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa, ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta. Tässä selvityksessä väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Moskuankankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiilina on käytetty voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamaa tarkkaa lavan profiilitietoa skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,6 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätö (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Siilinjärven sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntaakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: Suuntasektori-kohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulenopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

| Suuntasektori   | 0/180 | 30/210 | 60/240 | 90/270 | 120/300 | 150/330 |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Yli 3 m/s osuus | 0,174 | 0,167  | 0,157  | 0,147  | 0,129   | 0,168   |

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

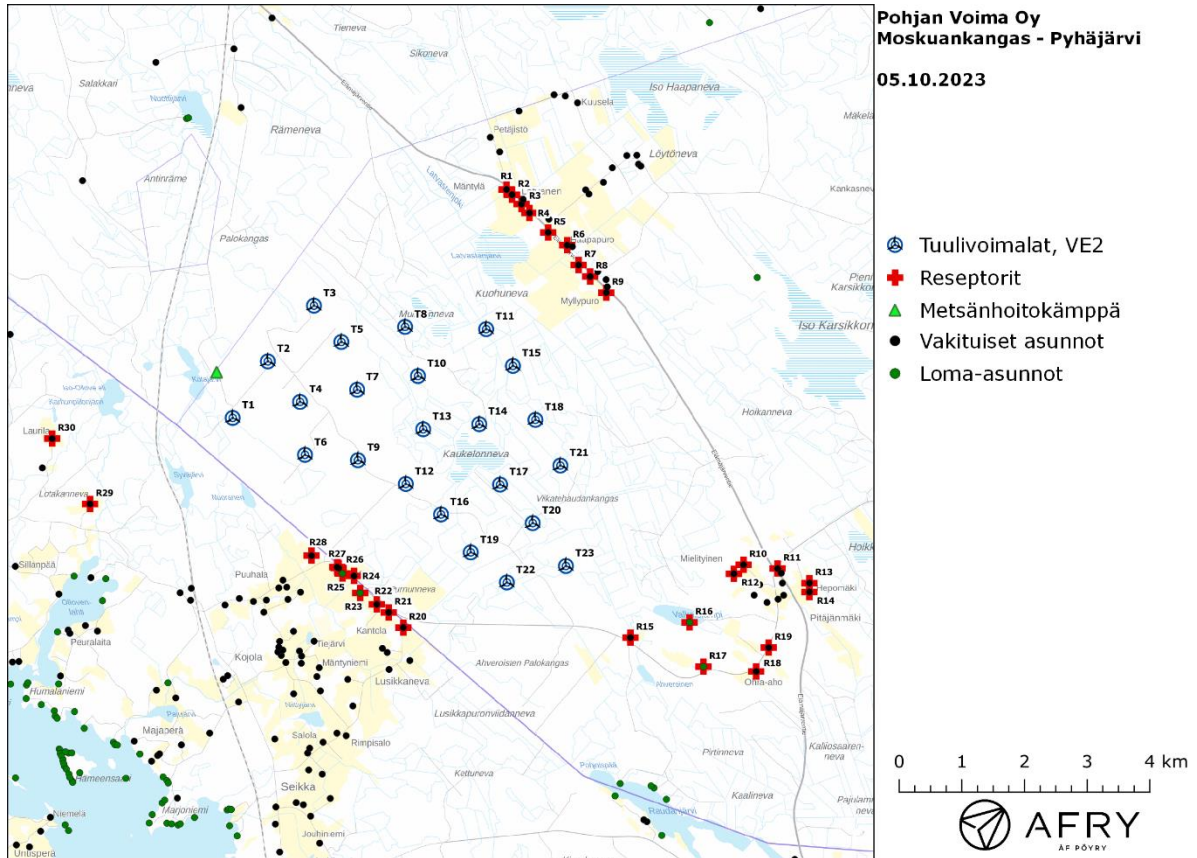
| Kuukausi  | Auringonpaisteen todennäköisyys |
|-----------|---------------------------------|
| Tammikuu  | 0,154                           |
| Helmikuu  | 0,262                           |
| Maaliskuu | 0,332                           |
| Huhtikuu  | 0,432                           |
| Toukokuu  | 0,454                           |
| Kesäkuu   | 0,424                           |
| Heinäkuu  | 0,456                           |
| Elokuu    | 0,406                           |
| Syyskuu   | 0,299                           |
| Lokakuu   | 0,186                           |
| Marraskuu | 0,108                           |
| Joulukuu  | 0,082                           |

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 30 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevat noin 1,5–3,9 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 800 m voimalan T1 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan, kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä välkevaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 4: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

| Reseptori | E      | N       | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus  |
|-----------|--------|---------|---------------------|-------------------|
| R1        | 423266 | 7055182 | 140                 | vakituinen asunto |
| R2        | 423354 | 7055098 | 139                 | vakituinen asunto |
| R3        | 423504 | 7054949 | 139                 | vakituinen asunto |
| R4        | 423632 | 7054807 | 140                 | vakituinen asunto |
| R5        | 423929 | 7054496 | 139                 | vakituinen asunto |
| R6        | 424233 | 7054294 | 139                 | vakituinen asunto |
| R7        | 424415 | 7053979 | 140                 | vakituinen asunto |
| R8        | 424599 | 7053795 | 141                 | vakituinen asunto |
| R9        | 424857 | 7053538 | 143                 | vakituinen asunto |
| R10       | 427048 | 7049203 | 216                 | vakituinen asunto |
| R11       | 427591 | 7049143 | 192                 | vakituinen asunto |
| R12       | 426892 | 7049059 | 210                 | vakituinen asunto |
| R13       | 428099 | 7048911 | 198                 | vakituinen asunto |
| R14       | 428099 | 7048770 | 194                 | vakituinen asunto |
| R15       | 425243 | 7048043 | 162                 | vakituinen asunto |
| R16       | 426186 | 7048286 | 162                 | loma-asunto       |
| R17       | 426407 | 7047580 | 199                 | loma-asunto       |
| R18       | 427249 | 7047503 | 189                 | vakituinen asunto |
| R19       | 427450 | 7047884 | 191                 | vakituinen asunto |
| R20       | 421618 | 7048203 | 131                 | vakituinen asunto |
| R21       | 421386 | 7048444 | 133                 | vakituinen asunto |
| R22       | 421195 | 7048572 | 131                 | vakituinen asunto |
| R23       | 420929 | 7048754 | 128                 | loma-asunto       |
| R24       | 420833 | 7049026 | 126                 | vakituinen asunto |
| R25       | 420648 | 7049063 | 125                 | loma-asunto       |
| R26       | 420585 | 7049153 | 127                 | vakituinen asunto |
| R27       | 420563 | 7049165 | 127                 | vakituinen asunto |
| R28       | 420153 | 7049349 | 128                 | vakituinen asunto |
| R29       | 416620 | 7050172 | 128                 | vakituinen asunto |
| R30       | 416015 | 7051213 | 128                 | vakituinen asunto |



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

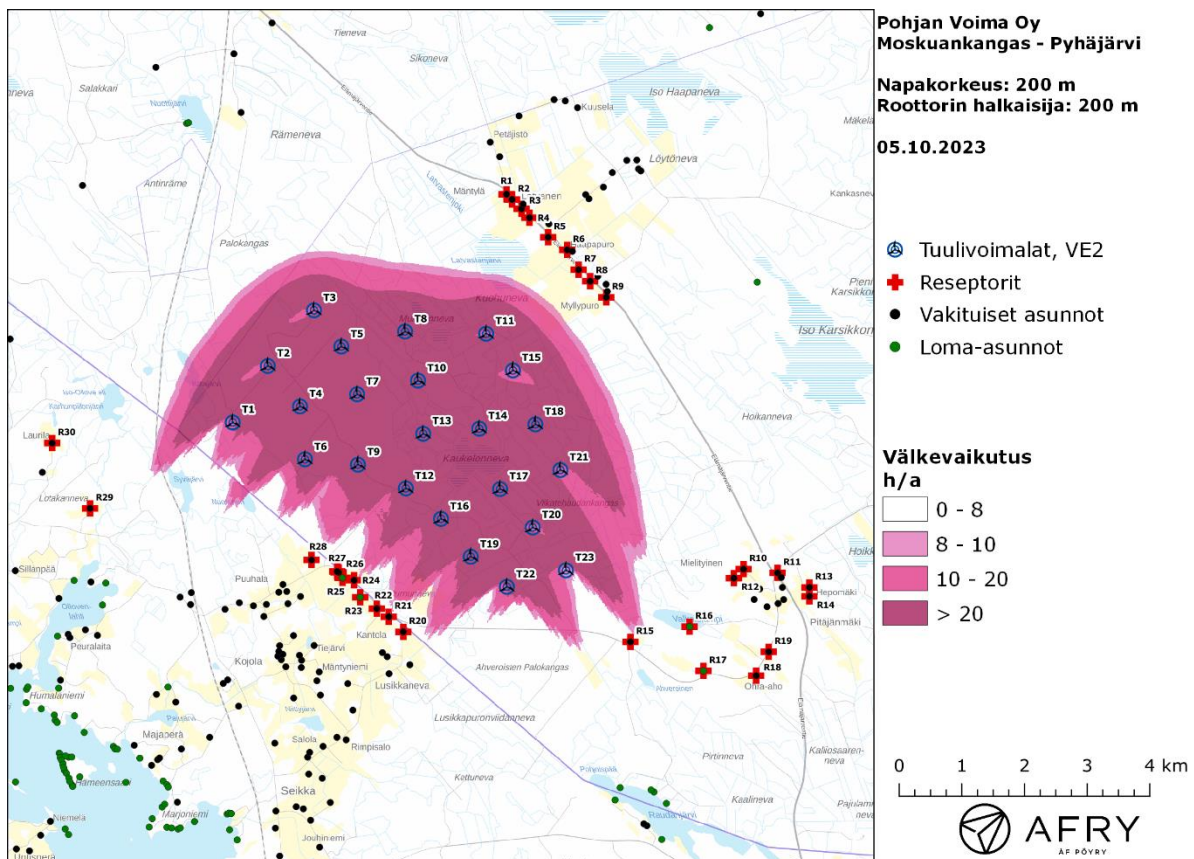


### 3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon, ja todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien lähialueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Vuotuinen teoreettinen maksimivälke alittaa Saksan 30 tunnin raja-arvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke aika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 2 vakituksen asuinrakennuksen kohdalla.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Todennäköisen välkevaikutuksen tarkempi ajoittuminen reseptorien R21 ja R24 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6) ja (Taulukko 7). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.



Taulukko 5: Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

| Reseptori | Todennäköinen vuotuinen välkeaja<br>[h:min] | Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] | Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaja<br>[h:min] | Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] |
|-----------|---|--|---|---|
| R1        | 0:24  | 1  | 4:56  | 12  |
| R2        | 0:26  | 1  | 5:22  | 14  |
| R3        | 0:30  | 2  | 5:57  | 15  |
| R4        | 0:49  | 2  | 9:59  | 19  |
| R5        | 1:09  | 3  | 11:41   | 20  |
| R6        | 1:08  | 3  | 10:12   | 17  |
| R7        | 1:23  | 3  | 11:19   | 20  |
| R8        | 1:37  | 3  | 12:41   | 17  |
| R9        | 1:26  | 3  | 10:46   | 16  |
| R10       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R11       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R12       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R13       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R14       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R15       | 3:46  | 8  | 15:05   | 32  |
| R16       | 0:43  | 3  | 2:56  | 13  |
| R17       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R18       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R19       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R20       | 1:57  | 6  | 7:37  | 22  |
| R21       | 6:24  | 9  | 24:12   | 32  |
| R22       | 3:49  | 7  | 14:45   | 24  |
| R23       | 2:42  | 5  | 10:57   | 18  |
| R24       | 6:21  | 7  | 24:17   | 26  |
| R25       | 3:24  | 5  | 13:02   | 20  |
| R26       | 2:44  | 6  | 10:42   | 22  |
| R27       | 2:34  | 5  | 10:06   | 19  |
| R28       | 4:21  | 6  | 16:29   | 22  |
| R29       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R30       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R21 kohdalla.

| Kellonaika | 0-2  | 2-4  | 4-6  | 6-8  | 8-10 | 10-12 | 12-14 | 14-16 | 16-18 | 18-20 | 20-22 | 22-24 |      |
|------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Tammikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Helmikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Maaliskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Huhtikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:34 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:34 |
| Toukokuu   | 0:00 | 0:11 | 0:41 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:52 |
| Kesäkuu    | 0:00 | 0:13 | 2:04 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 2:17 |
| Heinäkuu   | 0:00 | 0:00 | 2:09 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 2:09 |
| Elokuu     | 0:00 | 0:00 | 0:32 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:32 |
| Syyskuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Lokakuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Marraskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Joulukuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Yhteensä   | 0:00 | 0:23 | 6:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 6:24 |

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R24 kohdalla.

| Kellonaika | 0-2  | 2-4  | 4-6  | 6-8  | 8-10 | 10-12 | 12-14 | 14-16 | 16-18 | 18-20 | 20-22 | 22-24 |      |
|------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Tammikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Helmikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Maaliskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:02 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:02 |
| Huhtikuu   | 0:00 | 0:00 | 0:36 | 0:07 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:43 |
| Toukokuu   | 0:00 | 0:01 | 0:54 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:55 |
| Kesäkuu    | 0:00 | 0:00 | 1:57 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 1:57 |
| Heinäkuu   | 0:00 | 0:00 | 2:04 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 2:04 |
| Elokuu     | 0:00 | 0:00 | 0:34 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:34 |
| Syyskuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:06 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:06 |
| Lokakuu    | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Marraskuu  | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Joulukuu   | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00 |
| Yhteensä   | 0:00 | 0:01 | 6:04 | 0:15 | 0:00 | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 0:00  | 6:21 |

### 3.3 Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden ja läheisyyteen suunnitellun Hallakallion ja rakenteilla olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutuksia. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 28 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 5,5 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulivoimapuistoon on rakenteilla 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

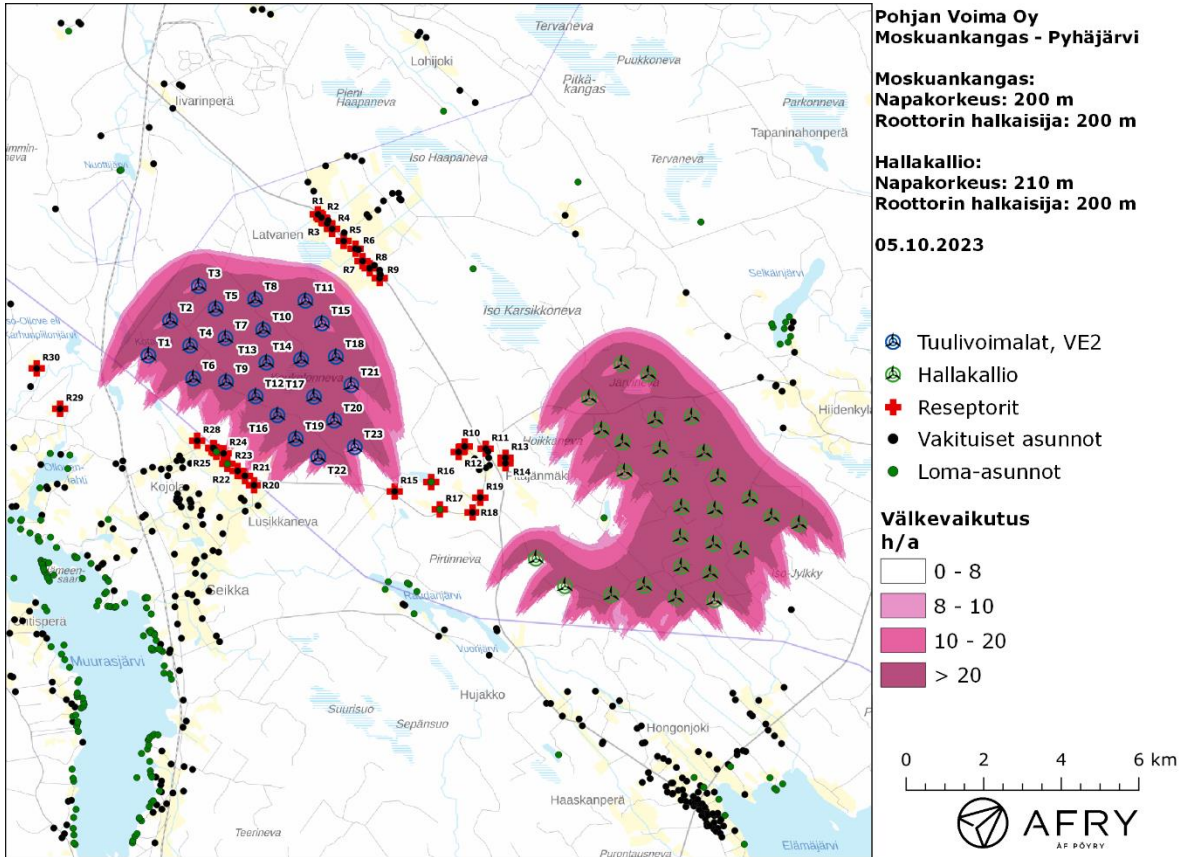
Moskuankankaan sekä Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan sekä Hallakallion voimaloiden välkkkeen yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (YIT Suomi Oy) verkkosivuillaan jakamien tietojen mukaan, Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Välkemallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 210 m. Hallakallion voimaloilla on käytetty samaa lapaprofiilia ja roottorin halkaisijaa kuin Moskuankankaan voimaloilla. Hallakallion voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 8).

Taulukko 8: Hallakallion voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

| Turbiinit | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| H01       | 431088 | 7051329 | 168                 |
| H02       | 431779 | 7051064 | 168                 |
| H03       | 432899 | 7049975 | 165                 |
| H04       | 433219 | 7049043 | 158                 |
| H05       | 433583 | 7048416 | 163                 |
| H06       | 434401 | 7047858 | 178                 |
| H07       | 434959 | 7047391 | 166                 |
| H08       | 431960 | 7049903 | 172                 |
| H09       | 432087 | 7049133 | 173                 |
| H10       | 432357 | 7048412 | 162                 |
| H11       | 432637 | 7047640 | 154                 |
| H12       | 433498 | 7047578 | 152                 |
| H13       | 430574 | 7049631 | 186                 |
| H14       | 431115 | 7049309 | 180                 |
| H15       | 432609 | 7046872 | 166                 |
| H16       | 433458 | 7046695 | 151                 |
| H17       | 434177 | 7046539 | 156                 |
| H18       | 432629 | 7046106 | 162                 |
| H19       | 433379 | 7045931 | 149                 |
| H20       | 431674 | 7045617 | 155                 |
| H21       | 432492 | 7045311 | 146                 |
| H22       | 433480 | 7045242 | 150                 |
| H23       | 429630 | 7045604 | 153                 |
| H24       | 430826 | 7045372 | 160                 |
| H25       | 435671 | 7047205 | 165                 |
| H26       | 430255 | 7050454 | 185                 |
| H27       | 431166 | 7048552 | 188                 |
| H28       | 428881 | 7046314 | 155                 |

Moskuankankaan ja Hallakallion todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset välkeajat ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnusten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Ainoat muutokset todennäköisessä välkevaikutuksessa sekä teoreettisessa maksimivälkevaikutuksessa kohdistuvat

reseptoreihin R18 ja R19, joissa vuotuinen todennäköinen välkevaikutus kasvaa 28 minuutilla ja 25 minuutilla. Moskuankankaan voimalat eivät aiheuta välkevaikutuksia kyseisiin reseptoripisteisiin, ja välkeajat aiheutuvat pelkästään Hallakallion voimaloista. Moskuankankaan ja Hallakallion yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat.

Taulukko 9: Välkeajat reseptoripisteissä, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

| Reseptori | Todennäköinen vuotuinen välkeaja<br>[h:min] | Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] | Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaja<br>[h:min] | Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja<br>[min] |
|-----------|---|--|---|---|
| R1        | 0:24  | 1  | 4:56  | 12  |
| R2        | 0:26  | 1  | 5:22  | 14  |
| R3        | 0:30  | 2  | 5:57  | 15  |
| R4        | 0:49  | 2  | 9:59  | 19  |
| R5        | 1:09  | 3  | 11:41   | 20  |
| R6        | 1:08  | 3  | 10:12   | 17  |
| R7        | 1:23  | 3  | 11:19   | 20  |
| R8        | 1:37  | 3  | 12:41   | 17  |
| R9        | 1:26  | 3  | 10:46   | 16  |
| R10       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R11       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R12       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R13       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R14       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R15       | 3:46  | 8  | 15:05   | 32  |
| R16       | 0:43  | 3  | 2:56  | 13  |
| R17       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R18       | 0:28  | 2  | 3:29  | 14  |
| R19       | 0:25  | 2  | 3:13  | 14  |
| R20       | 1:57  | 6  | 7:37  | 22  |
| R21       | 6:24  | 9  | 24:12   | 32  |
| R22       | 3:49  | 7  | 14:45   | 24  |
| R23       | 2:42  | 5  | 10:57   | 18  |
| R24       | 6:21  | 7  | 24:17   | 26  |
| R25       | 3:24  | 5  | 13:02   | 20  |
| R26       | 2:44  | 6  | 10:42   | 22  |
| R27       | 2:34  | 5  | 10:06   | 19  |
| R28       | 4:21  | 6  | 16:29   | 22  |
| R29       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |
| R30       | 0:00  | 0  | 0:00  | 0   |

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kunnan alueella suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle on käytetty 23 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE2. Välkevaikutusten arviointi on tehty roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen rakenteilla olevan Pajuperänkankaan sekä suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin, ja Tanskan 10 tunnin, ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke aika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 2 vakituisten asuinrakennuksen kohdalla.

## 5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsitettä, joka on maapallon maantieteellistä koordinaatistoa vastaava kuvitteellinen kuori katsottaessa maapalloa taivaalle. Samalla tavoin kuin paikan sijainti maapallolla voidaan ilmoittaa pituus- ja leveyspiirien avulla, voidaan taivaankappaleiden paikat taivaanpallolla ilmoittaa kahden koordinaatin (rektaskensio ja deklinaatio) avulla. Aurinko kulkee vuoden aikana taivaanpallolla kääntöpiirien väliin asettuvalla nauhalla, ja Auringon esiintymistiheys kyseisellä nauhalla voidaan esittää tiheysfunktiona.

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita turbiinin roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulusuusosuuksilla.

Huomioitaessa kuukausittaista (tai muuta lyhytaikaista) vaihtelua auringonpaisteen todennäköisyydessä, taivaanpallon nauha jaetaan vastaaviin osiin Auringon deklinaation mukaan. Tiheysfunktio määritellään näissä osissa erikseen, ja integroinnin tuloksia skaalataan kuukausikohtaisilla todennäköisyyksillä.

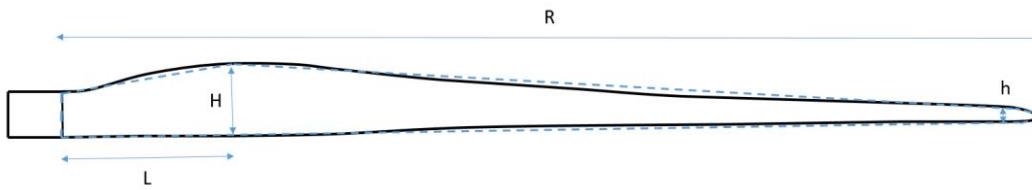
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Kun lavan leveys on  $w$  metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

missä  $d$  on etäisyys Aurinkoon (150'000'000 km). Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta.

Seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 5) on esitetty malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on  $H$  etäisyydellä  $L$  lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on  $R$  ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on  $h$ . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta  $H$  arvoon  $h$  liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona.



*Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.*

Tämän raportin välkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä  $[0, R]$  riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.



## 6 Viitteet

- [1] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [2] Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.