



Pohjan Voima Oy

Moskuankangas, Pyhäjärvi

Tuulivoimapuiston meluselvitys

1.4.2025

Copyright © AFRY Finland Oy

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

AFRY Finland Oy:n projektinumero on 101024341-006.

Kannen kuva: © AFRY

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

YHTEYSTIEDOT

Hankkeesta vastaava:

Pohjan Voima Oy

Mira Talonen

mira.talonen@pohjanvoima.fi

Tekijä:

AFRY Finland Oy

Veera Hatulainen

veera.hatulainen@afry.com

Wind and Solar Finland

www.afry.com

Raportin tiedot:

Projektinumero: 101024341-006

Raporttiversio: 001

Raportin tila: VALMIS

Raporttihistoria:

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	01.04.2025/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	01.04.2025/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

SISÄLLYS

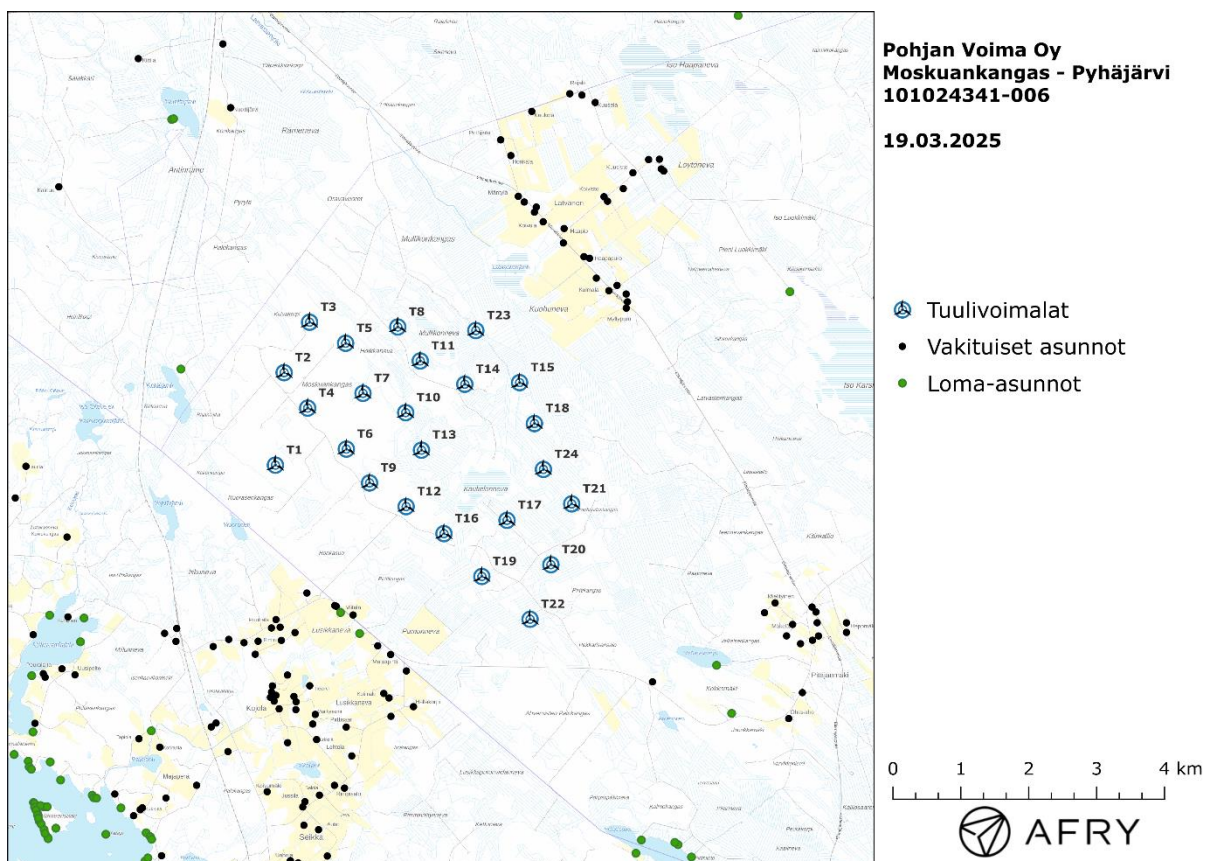
1	JOHDANTO.....	5
2	TUULIVOIMALOIDEN MELU.....	7
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta	7
2.2	Melumallinnusohjeistus.....	8
2.3	Ohjearvot	9
2.4	Sisämelutasojen arviointi.....	10
3	TUULIVOIMAKOHTTEEN MELUMALLINNUS.....	11
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus	11
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus	16
3.3	Melun yhteisvaikutukset	19
4	YHTEENVETO.....	24
5	VIITTEET	25
6	MELUMALLINNUKSEN TIEDOT.....	26

1 JOHDANTO

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kaupungin alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 24 voimalan suunnitelmaa. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1-1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1-1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 207,5 m ja tuulivoimalatyyppin V172-7.2MW PO7200 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasolla 109,8 dB(A) (tuulivoimalavalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 107,8 dB(A) + varmuusarvo 2 dB(A)). Tuulivoimalatyyppin 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 lisäksi tuulivoimapuistojen Moskuankangas, Hallakallio ja Pajupetränselkä melun yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään kappaleessa 3.3.



Kuva 1-1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

Taulukko 1-1: Tuulivoimaloiden (24 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	419688	7051232	152
T2	419816	7052592	159
T3	420191	7053333	156
T4	420163	7052070	160
T5	420722	7053023	153
T6	420732	7051468	151
T7	420977	7052288	155
T8	421490	7053263	144
T9	421074	7050970	146
T10	421606	7052004	149
T11	421820	7052764	145
T12	421613	7050622	141
T13	421839	7051452	147
T14	422477	7052421	143
T15	423284	7052445	141
T16	422170	7050224	139
T17	423098	7050420	144
T18	423503	7051843	142
T19	422728	7049595	138
T20	423745	7049768	149
T21	424051	7050662	150
T22	423438	7048965	145
T23	422639	7053211	139
T24	423635	7051169	144

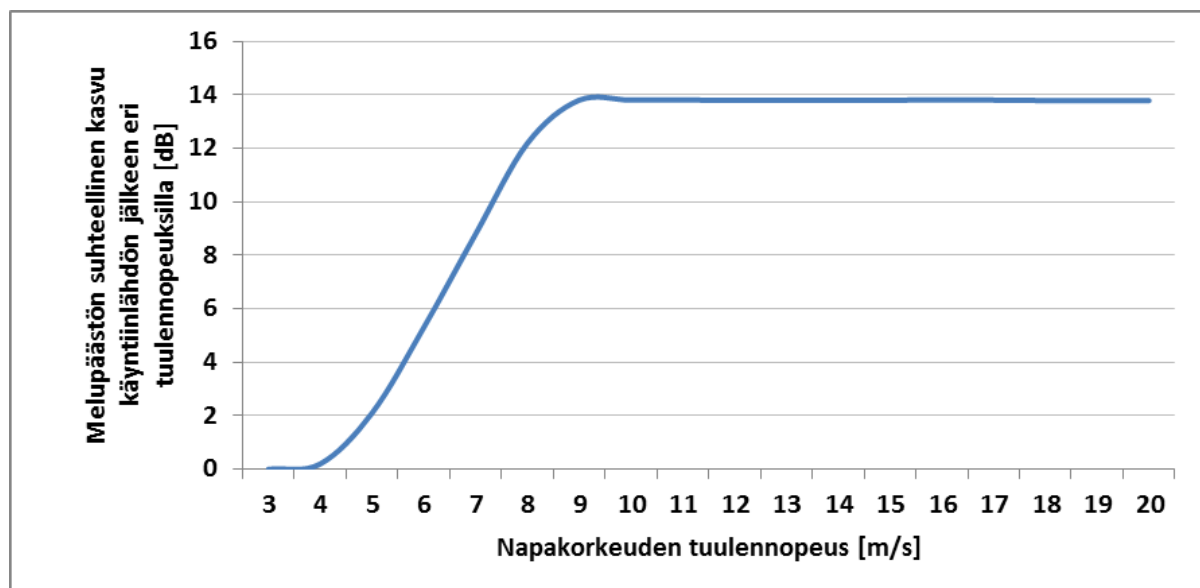
2 TUULIVOIMALOIDEN MELU

2.1 Yleistä tuulivoimamelusta

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

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen 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 [17].

Vaihtuvanopeuksisen tuulivoimalan äänipäästö on suoraan verrannollinen tuulennopeuteen siten, että alhaisilla tuulilla eli hitaalla roottorin pyörimisnopeudella ja lähellä käyntiinlähön nopeutta lähtöäänitaso on usein noin 10–15 dB alhaisempi kuin voimalan nimellisteholla, jossa roottori saavuttaa suurimman kierrosnopeuden (Kuva 2-1).



Kuva 2-1: 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 kokemuksperäisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [16].

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

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasoa voidaan kontrolloida erillisellä optimointisäädöllä, jonka avulla kellonajan, tuulensuunnan ja tuulennopeuden mukaan säädetään lapakulmaa haluttuun pyörimisnopeuteen ja melutasoon. Tällä säädöllä on kuitenkin vaikutuksia voimalan sen hetkiseen tuotantotehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahalaoidituksen, joka vähentää melupäästöä nimellisteholla tällä hetkellä noin 2–3 dB ja tulevaisuudessa vieläkin enemmän serraatioiden tuotekehityksen johdosta [13].

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

2.2 Melumallinnusohjeistus

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

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

Valtioneuvoston aiemmassa melutasoihin liittyvässä päätöksessä 993/1992 on annettu luonnonsuojelualueille päiväajan ohjearvo 45 dB(A) ja yöajan ohjearvo 40 dB(A) [10]. Tuulivoimameluasetuksen 1107/1/2015 perustelumuistion mukaan asetusta ei sovelleta kaikilla luonnonsuojelualueilla, vaan ainoastaan yleiselle virkistyskäytölle tärkeillä luonnonsuojelualueilla, joille on rakennettu käyttöä palvelevia polkuja ja muita rakenteita. Aieman melupäätöksen 993/1992 luonnonsuojelualueiden ohjearvoja ei siis tuulivoimamelun osalta sovellettaisi.

Kun laskennallisia melutasoja verrataan valtioneuvoston asetuksen ohjearvoihin, lasketuun 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 mitaustuloksiin lisätään 5 dB ennen valtioneuvoston ohjearvoon vertaamista, mikäli tuulivoimalan ääni sisältää kapeakaistaisia tai impulssimaisia komponentteja. Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2-1).

Taulukko 2-1: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.

Tuulivoimamelun ohjearvot	LA _{eq} päiväajalle (klo 7–22)	LA _{eq} yöajalle (klo 22–7)
Pysyvä asutus, Loma-asutus, Hoitolaitokset, Leirintäalueet	45 dB	40 dB
Oppilaitokset, Virkistysalueet	45 dB	-
Kansallispuistot	40 dB	40 dB

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa toimenpiderajat matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Melun toimenpiderajat on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 2-2). 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 2-2: Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat taajuuspainottamattomia.

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

2.4 Sisämelutasojen arviointi

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 2-2) lisäksi toimenpiderajat päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Päiväaikainen (klo 07-22) keskiäänitaso ei saa ylittää 35 dB(A) ja yöaikainen (klo 22-07) keskiäänitaso 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unihäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona $L_{eq,1h}$ mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen.

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

Suomalaisten asuinrakennusten ääneneristävyyttä on tutkittu artikkelissa [4], jossa on esitetty taajuuskohtaiset äänitasoerot matalille taajuuskaistoille 20-200 Hz. Artikkelin arvot (Taulukko 3-3) on määritetty tilastollisesti niin, että ne ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja niitä on käytetty tässä selvityksessä matalataajuisen sisämelutasojen arviointiin. Rakennusten ilmaäänieristyksen keskimääräinen profiili kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä, jonka perusteella mallinnusohjeistuksen mukainen sisämelujen arviointi tehdään vain matalille taajuuksille. Jos matalataajuisen sisämelun tasojen todetaan pysyvän annetuissa toimenpiderajoissa, myös kokonaismelun tasot pysyvät todennäköisesti raja-arvojen alapuolella.

3 TUULIVOIMAKOHTTEEN MELUMALLINNUS

3.1 Keskiäänitasojen LAeq mallinnus

Tuulivoimaloiden aiheuttaman keskiäänitason mallinnus on suoritettu laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. Mallinnuksessa on käytetty V172 7.2 MW PO7200 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumia. Taajuusjakaumat on saatu seuraavasta tuulivoimalavalmistajan dokumentista:

- Third octave noise emission EnVentus™ 172-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0128-4336_01. 2024-11-29.

Dokumentissa esitetyt melutiedot perustuvat tuulivoimalatyypillä V172 tehtyihin testimitauksiin. Dokumentissa ilmoitettuihin melutasoihin on lisätty ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeistuksen mukainen 2 dB:n varmuusarvo [11]:

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

Tuulivoimalatyypin V172 7.2 MW PO7200 äänitehotaso on 107,8 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoa 109,8 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulennopeutta 15 m/s napakorkeudella 207,5 m, jonka arvioidaan vastaavan melumallinnusohjeistuksen mukaista referenssinopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Tuulivoimaloiden melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksessa.

Tuulivoimalatyypien melupäästön kapeakaistaisuuden arvioinnissa on käytetty ympäristöministeriön raportissa Ympäristömelun mittaaminen [12] 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.

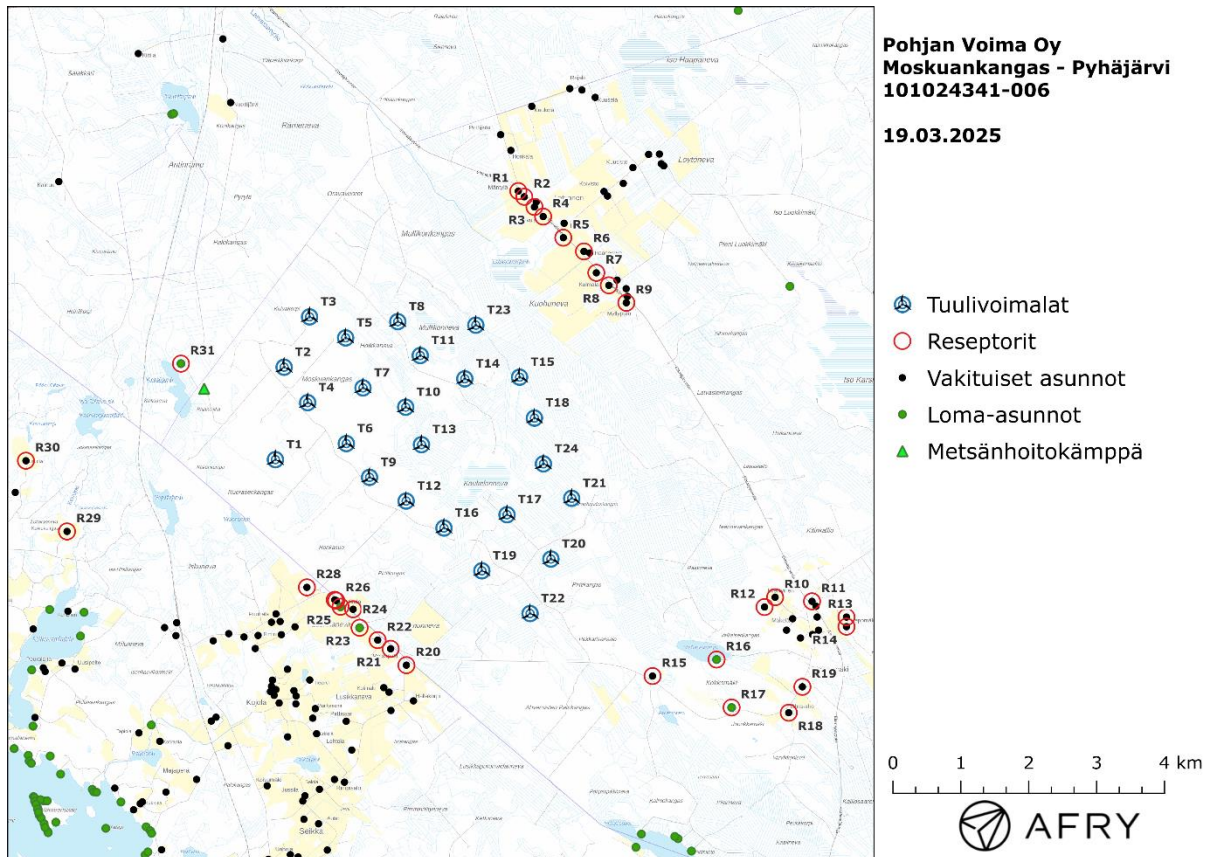
Taulukossa (Taulukko 3-1) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 31 pistettä, joiden kohdilla keskiäänitason LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Pisteet on valittu asuntojen kohdilta, joihin kohdistuu suurin meluvaikutus. Näitä pisteitä

kutsutaan reseptoreiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3-1). Reseptorit sijaitsevat noin 1,5-3,6 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 1,2 km voimalasta T2 länteen, sijaitsee rakennus, joka näkyy MML:n maastokartalla lomarakennuksena. Pyhäjärven kaupungin rakennusrekisterin mukaan kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämppä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä meluvaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 3-1: Reseptorien 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
R31	418298	7052642	127	loma-asunto



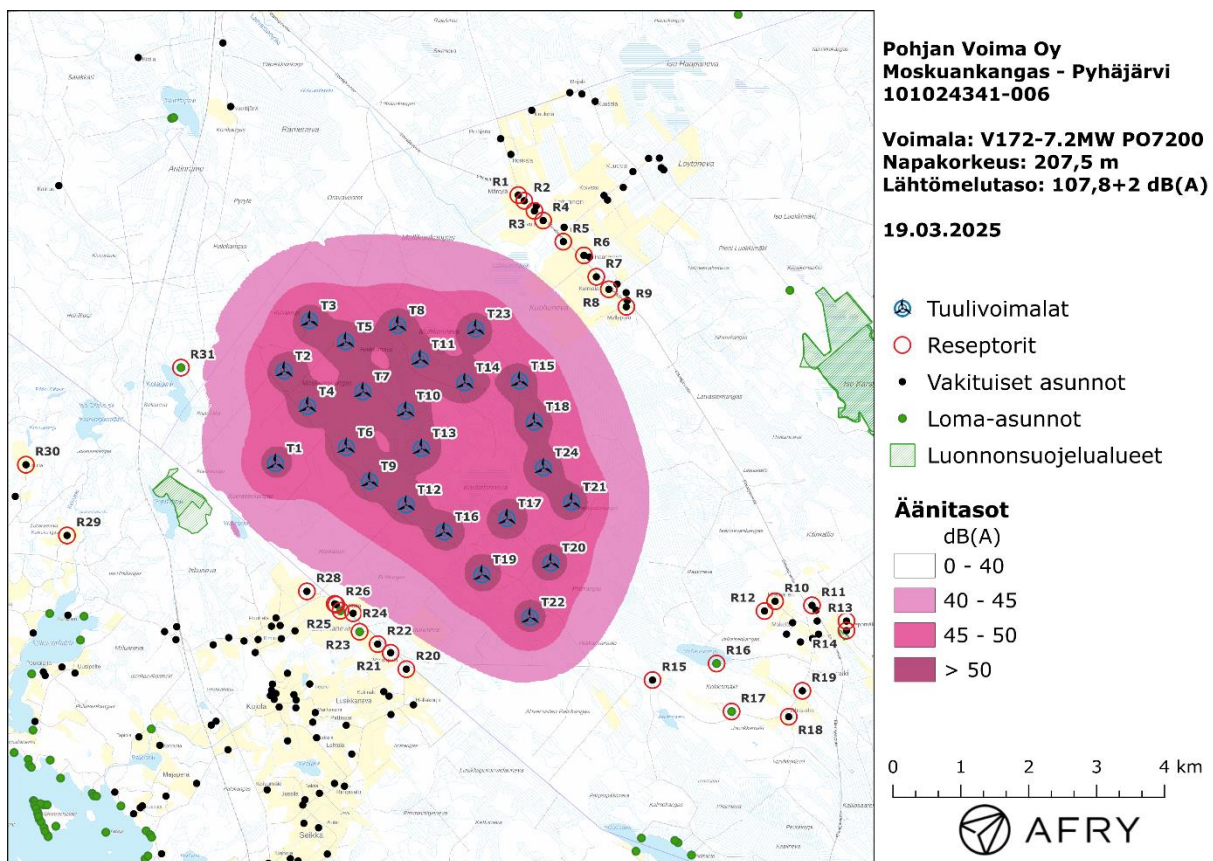
Kuva 3-1: Reseptoreiden paikat Moskuankankaan tuulivoimapuiston hankealueella.

Meluvaikutus

Tuulivoimaloiden aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso L_{Aeq} on esitetty karttakuvana (Kuva 3-2). 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 3-2). Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot jäävät valtioneuvoston asetuksen 40 dB(A):n ohjearvon alapuolelle kaikkien alueen asuin- ja lomarakennusten kohdilla.

Karttakuvassa on lisäksi esitetty hankkeen ympäristössä sijaitsevat luonnonsuojelualueet. Mallinnuksen perusteella luonnonsuojelualueilla ei saavuteta yli 40 dB:n melutasoa. 45 dB(A):n päiväajan ja 40 dB(A):n yöajan ohjearvoa sovelletaan ainoastaan yleiselle virkistyskäytölle tärkeillä luonnonsuojelualueilla, joille on rakennettu käyttöä palvelevia polkuja tai muita rakenteita.



Kuva 3-2: Keskiäänitasot L_{Aeq} Moskuankankaan tuulivoimapaiston hankealueella.

Taulukko 3-2: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	35,7
R2	35,9
R3	36,1
R4	36,4
R5	36,8
R6	36,6
R7	37,1
R8	37,0
R9	36,8
R10	31,3
R11	27,0
R12	31,7
R13	27,6
R14	26,5
R15	34,8
R16	33,4
R17	29,6
R18	24,9
R19	27,2
R20	37,6
R21	38,0
R22	38,1
R23	38,1
R24	38,9
R25	38,6
R26	38,7
R27	38,7
R28	38,3
R29	30,8
R30	30,0
R31	38,1

3.2 Matalataajuisen melun mallinnus

Matalataajuisen melun laskenta on suoritettu ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisesti [7]. Laskennan lähtötietona on käytetty samoja valmistajan ilmoittamia melun taajuusjakauksia 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 määritellyjä taajuuskohtaisia arvoja, jotka antavat toimenpiderajat matalataajuisen melun yöaikaisille *sisämelutasoille* (Taulukko 2-2). Ympäristöministeriön ohjeistuksen mukainen mallinnus antaa matalataajuisen *ulkomelun* tasot voimaloita lähimpien rakennusten kohdilla. Tulokset eivät siis ole suoraan vertailukelpoisia asumisterveysasetuksen arvoihin, 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 määritetty rakennuksesta aiheutuva äänitasoero (ΔL_o) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja toimenpiderajoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten parametrit perustuvat tutkimukseen suomalaisten pientalojen äänieristävyiden arvoista [4]. Turun ammattikorkeakoulussa tehdyssä tutkimuksessa esitetyt arvot perustuvat suomalaisissa pientaloissa tehtyihin mittauksiin, joiden avulla on johdettu tilastollinen estimaatti talojen ääneneristävyyksille eri taajuuksilla. Artikkelin [4] äänitasoerot ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia äänitasoeroja. Taulukossa (Taulukko 3-3) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut äänitasoerot.

Taulukko 3-3: Rakennuksen äänitasoerot taajuuskaistoittain.

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

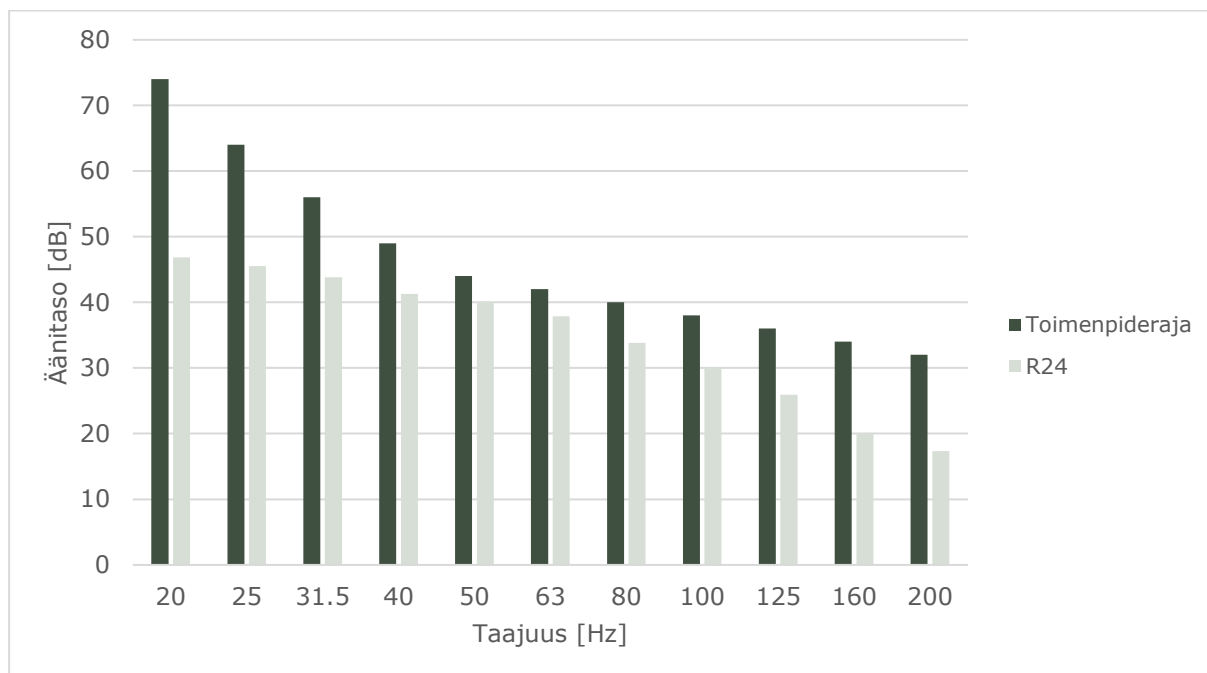
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia äänitasoeroja (Taulukko 3-3) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Tuulivoimaloiden aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-4). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot.

Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat reseptoripisteeseen R24, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin

(Kuva 3-3). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät toimenpiderajojen alapuolelle koko taajuuksvälillä.

Taulukko 3-4: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla.

Taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	52,2	51,6	50,7	49,3	49,2	48,6	46,3	44,5	42,2	38,4	37,3
R2	52,3	51,7	50,8	49,4	49,4	48,7	46,4	44,6	42,3	38,5	37,4
R3	52,5	51,9	51,0	49,6	49,5	48,8	46,6	44,8	42,5	38,7	37,6
R4	52,7	52,0	51,2	49,7	49,7	49,0	46,7	45,0	42,7	39,0	37,9
R5	52,9	52,3	51,5	50,0	50,0	49,3	47,0	45,3	43,0	39,3	38,2
R6	52,8	52,2	51,4	49,9	49,9	49,2	46,9	45,2	42,9	39,2	38,1
R7	53,1	52,5	51,7	50,2	50,2	49,5	47,2	45,5	43,2	39,5	38,5
R8	53,1	52,5	51,6	50,2	50,2	49,5	47,2	45,5	43,2	39,5	38,4
R9	53,0	52,3	51,5	50,1	50,0	49,3	47,1	45,3	43,1	39,3	38,3
R10	49,3	48,6	47,8	46,3	46,2	45,5	43,1	41,2	38,8	34,7	33,3
R11	48,4	47,7	46,8	45,3	45,3	44,5	42,1	40,2	37,6	33,4	31,8
R12	49,5	48,8	48,0	46,5	46,4	45,7	43,3	41,4	39,0	34,9	33,5
R13	47,5	46,8	46,0	44,5	44,4	43,6	41,1	39,1	36,5	32,2	30,5
R14	47,4	46,7	45,9	44,4	44,3	43,5	41,1	39,1	36,4	32,1	30,4
R15	51,4	50,7	49,9	48,4	48,4	47,7	45,4	43,6	41,3	37,5	36,3
R16	50,0	49,3	48,5	47,0	47,0	46,2	43,9	42,0	39,6	35,7	34,3
R17	48,8	48,2	47,3	45,8	45,8	45,0	42,6	40,7	38,2	34,1	32,6
R18	47,7	47,0	46,1	44,6	44,5	43,7	41,3	39,3	36,7	32,5	30,8
R19	47,7	47,0	46,2	44,7	44,6	43,8	41,4	39,4	36,8	32,6	30,9
R20	53,5	52,8	52,0	50,6	50,5	49,9	47,6	45,9	43,6	39,9	38,9
R21	53,8	53,2	52,3	50,9	50,9	50,2	47,9	46,2	44,0	40,3	39,3
R22	53,8	53,2	52,4	51,0	50,9	50,3	48,0	46,3	44,1	40,4	39,4
R23	53,9	53,3	52,5	51,0	51,0	50,3	48,1	46,4	44,1	40,5	39,5
R24	54,5	53,8	53,0	51,6	51,6	50,9	48,6	46,9	44,7	41,1	40,2
R25	54,3	53,6	52,8	51,4	51,4	50,7	48,4	46,7	44,5	40,9	39,9
R26	54,4	53,8	53,0	51,5	51,5	50,8	48,6	46,9	44,7	41,0	40,1
R27	54,4	53,8	53,0	51,5	51,5	50,8	48,6	46,9	44,7	41,0	40,1
R28	54,2	53,6	52,8	51,3	51,3	50,6	48,4	46,7	44,4	40,8	39,8
R29	49,1	48,4	47,5	46,1	46,0	45,2	42,9	40,9	38,4	34,3	32,8
R30	48,5	47,8	47,0	45,5	45,4	44,6	42,2	40,3	37,7	33,6	32,0
R31	53,7	53,1	52,3	50,8	50,8	50,1	47,9	46,2	44,0	40,3	39,4



Kuva 3-3: Matalataajuisen sisämelun tasot reseptorin R24 kohdalla.

3.3 Melun yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden sekä läheisten suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuiston ja toiminnassa olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa melun yhteisvaikutusta. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 23 voimalaa, joista lähimmät ovat 6,3 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulipuistossa on 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Moskuankankaan ja Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloiden melun yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (Eolus Finland Oy) jakamien tietojen mukaan Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Melumallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty napakorkeutta 217,5 m ja voimalatyyppiä V162-7.2MW, 105,5 + 2 dB(A). Tuulivoimatyyppin melun taajuusjakaumat on saatu dokumentista:

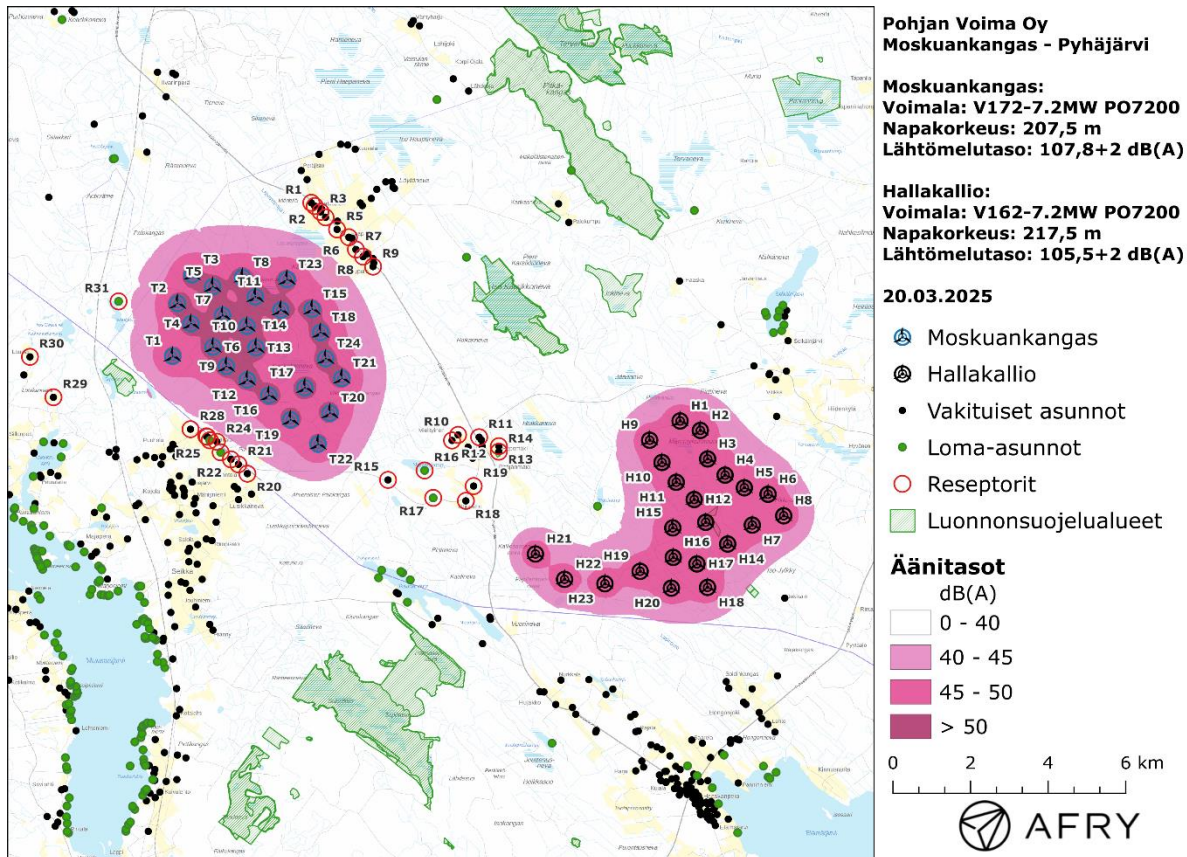
- Third octave noise emission EnVentus™ V162-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0116-1715_00. 2022-01-07.

Naapuripuistojen voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 3-5).

Taulukko 3-5: Hallakallion (23 kpl) tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
H1	432767	7049566	165
H2	433289	7049322	160
H3	433477	7048587	159
H4	433927	7048170	167
H5	434424	7047845	177
H6	435034	7047677	164
H7	434628	7046883	153
H8	435438	7047123	164
H9	431983	7049070	172
H10	432301	7048497	162
H11	432668	7047987	156
H12	433131	7047542	153
H13	433427	7046956	154
H14	433994	7046396	150
H15	432579	7046811	167
H16	432590	7046050	161
H17	433202	7045882	153
H18	433475	7045278	148
H19	431737	7045691	154
H20	432543	7045259	147
H21	429039	7046138	154
H22	429790	7045485	152
H23	430831	7045372	160

Moskuankankaan ja Hallakallion mallinnettu keskiäänitaso LAeq on esitetty karttakuvana (Kuva 3-4). Keskiäänitasot reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-6). Mallinnustulosten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion aiheuttamat melun yhteisvaikutukset jäävät alle valtioneuvoston 40 dB(A):n ohjearvon kaikkien ympäristön asuin- ja lomarakennusten kohdilla. Asutuksen kohdalla yhteisvaikutukset nostavat keskiäänitasoa 0,1-5,7 dB(A). Melutaso nousee eniten reseptorin R18 kohdalla.



Kuva 3-4: Keskiäänitasot LAeq, kun mallinnoissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

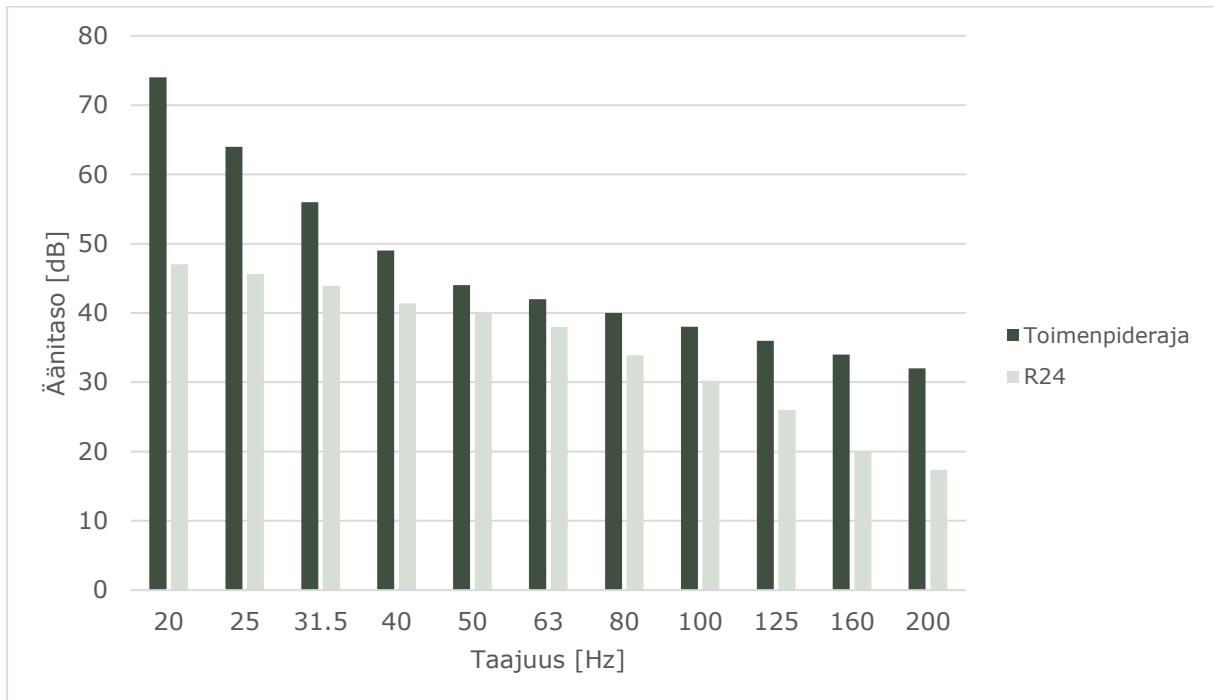
Taulukko 3-6: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	35,7
R2	35,9
R3	36,1
R4	36,4
R5	36,9
R6	36,6
R7	37,1
R8	37,0
R9	36,9
R10	32,4
R11	29,8
R12	32,3
R13	31,2
R14	30,8
R15	34,9
R16	33,6
R17	31,2
R18	30,6
R19	31,2
R20	37,6
R21	38,0
R22	38,1
R23	38,2
R24	38,9
R25	38,6
R26	38,8
R27	38,8
R28	38,3
R29	30,9
R30	30,0
R31	38,1

Moskuankankaan ja Hallakallion aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-7). Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat reseptoripisteeseen R24, jonka kohdalla on myös laskettu sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 3-5). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, yhteisvaikutusten melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

Taulukko 3-7: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla, kun mallinnuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

Taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	52,4	51,7	50,9	49,4	49,4	48,7	46,4	44,6	42,3	38,4	37,3
R2	52,5	51,9	51,0	49,6	49,5	48,8	46,5	44,7	42,4	38,6	37,4
R3	52,7	52,0	51,2	49,7	49,7	49,0	46,7	44,9	42,6	38,8	37,7
R4	52,9	52,2	51,4	49,9	49,8	49,1	46,9	45,1	42,8	39,0	37,9
R5	53,2	52,5	51,6	50,2	50,1	49,4	47,1	45,4	43,1	39,4	38,3
R6	53,1	52,4	51,6	50,1	50,0	49,3	47,1	45,3	43,0	39,2	38,1
R7	53,4	52,7	51,8	50,4	50,3	49,6	47,4	45,6	43,3	39,6	38,5
R8	53,3	52,7	51,8	50,4	50,3	49,6	47,3	45,6	43,3	39,6	38,5
R9	53,2	52,6	51,7	50,3	50,2	49,5	47,2	45,5	43,2	39,4	38,3
R10	50,9	50,0	49,1	47,7	47,3	46,5	44,3	42,4	39,8	35,9	34,3
R11	50,6	49,6	48,6	47,2	46,8	45,9	43,7	41,8	39,2	35,3	33,5
R12	51,0	50,1	49,2	47,8	47,4	46,6	44,4	42,5	40,0	36,0	34,4
R13	50,5	49,5	48,4	47,1	46,5	45,6	43,5	41,6	39,0	35,1	33,2
R14	50,5	49,5	48,5	47,1	46,5	45,6	43,5	41,6	39,0	35,1	33,3
R15	52,1	51,3	50,5	49,0	48,9	48,1	45,8	44,0	41,7	37,9	36,6
R16	51,2	50,4	49,5	48,1	47,8	47,0	44,7	42,9	40,4	36,5	35,0
R17	50,6	49,7	48,7	47,3	47,0	46,1	43,9	42,0	39,4	35,5	33,8
R18	50,5	49,5	48,5	47,1	46,6	45,6	43,5	41,6	39,1	35,2	33,4
R19	50,6	49,6	48,5	47,2	46,6	45,7	43,6	41,7	39,1	35,2	33,5
R20	53,7	53,0	52,2	50,7	50,7	50,0	47,7	46,0	43,7	40,0	39,0
R21	54,0	53,3	52,5	51,0	51,0	50,3	48,0	46,3	44,1	40,4	39,4
R22	54,0	53,4	52,5	51,1	51,0	50,3	48,1	46,4	44,1	40,4	39,4
R23	54,1	53,4	52,6	51,2	51,1	50,4	48,2	46,4	44,2	40,5	39,5
R24	54,6	54,0	53,1	51,7	51,6	51,0	48,7	47,0	44,8	41,1	40,2
R25	54,4	53,8	52,9	51,5	51,4	50,8	48,5	46,8	44,6	40,9	39,9
R26	54,5	53,9	53,1	51,6	51,6	50,9	48,6	46,9	44,7	41,1	40,1
R27	54,5	53,9	53,1	51,6	51,6	50,9	48,6	46,9	44,7	41,0	40,1
R28	54,3	53,7	52,9	51,4	51,4	50,7	48,4	46,7	44,5	40,8	39,8
R29	49,3	48,6	47,7	46,2	46,1	45,3	43,0	41,0	38,5	34,4	32,8
R30	48,8	48,0	47,2	45,7	45,5	44,7	42,4	40,4	37,8	33,6	32,0
R31	53,8	53,2	52,3	50,9	50,9	50,2	47,9	46,2	44,0	40,3	39,4



Kuva 3-5: Matalataajuisen sisämelun tasot reseptorin R24 kohdalla, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat.

4 YHTEENVETO

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kaupungin alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 24 voimalan suunnitelmalla käyttäen tuulivoimalatyyppin V172 7,2 MW PO7200 taajuusjakaumia ja napakorkeutta 207,5 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen melun yhteisvaikutuksia.

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

Moskuankankaan 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 1107/2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Astui voimaan 1.9.2015.
- [10] Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista. Astui voimaan 1.1.1993.
- [11] Yhteenveto tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvon käyttämisestä meluselvityksissä liittyvästä kyselystä. Ympäristöministeriö, 14.9.2016.
- [12] Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriö, Ohje I 1995.
- [13] C. A. León: Trailing Edge Serrations, Effect of Their Flap Angle on Flow and Acoustics. 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, 2nd to 5th May 2017.
- [14] M. Gupta, K. Madsen: Advancements in continuous learning for tonality free turbine design. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [15] K. Bolin: The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise. Acta Acustica united with Acustica, Vol 98 (2012) pages 741-748.
- [16] D. Halstead, N. Tam: A study of background noise levels measured during far-field receptor testing of wind turbine facilities. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [17] S. Oerlemans, J.G. Schepers: Prediction of wind turbine noise directivity and swish, Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark, 2009.

6 MELUMALLINNUKSEN TIEDOT

Raportin ja raportioijan tiedot							
Mallinnusraportin numero/tunniste: 101024341-006.001				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 01.04.2025			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: AFRY Finland Oy							
Vastuuhenkilöt: Veera Hatulainen ja Erkki Heikkola							
Laatija: Veera Hatulainen				Tarkastaja/hyväksyjä: Erkki Heikkola			
Mallinnusohjelman tiedot							
Mallinnusohjelma ja versio: AFRY Numerola -mallinnusohjelmisto				Mallinnusmenetelmä: ISO 9613-2			
Tuulivoimalan/Tuulivoimaloiden tiedot							
Tuulivoimalan valmistaja: Vestas				Tyyppi: V172 7.2 MW PO7200 (with ser- rated trailing edges)		Sarjanumero/t:	
Nimellisteho: 7.2 MW		Napakorkeus: 207,5 m		Roottorin halkaisija: 172 m		Tornin tyyppi:	
Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön käytön aikana ja sen vaikutus meluun							
Lapakulman säätö		Pyörimisnopeus		Muu, mikä			
Kyllä	dB	Kyllä	dB				dB
Ei	Ei tiedossa	Ei	Ei tiedossa				dB
Akustiset tiedot/Laskennan lähtötiedot							
Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Third octave noise emission EnVentus™ 172-7.2MW 50/60 Hz. Document no. 0128-4336_01. 2024-11-29.							
Alla oleviin arvoihin on jo lisätty 2 dB:n varmuusarvo.							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	64,7	200	97,7	2000	97,2
63	91,8	25	69,9	250	99,2	2500	96,6
125	98,8	31,5	74,6	315	98,9	3150	96,8
250	103,4	40	78,4	400	97,8	4000	96,3
500	102,4	50	83,0	500	97,4	5000	92,0
1000	103,0	63	86,9	630	97,6	6300	85,7
2000	101,9	80	89,2	800	98,2	8000	81,4
4000	100,3	100	91,7	1000	98,4	10000	77,2
8000	87,5	125	94,0	1250	98,0		
		160	95,6	1600	97,5		

Melun erityispiirteiden mittaussuunnitelma ja havainnot:

Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus		Impulssimaisuus		Merkityksellinen sykintä (amplitudi- modulaatio)		Muu, mikä:					
kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei				
Laskentakorkeus						Laskentaruudun koko [m x m]					
4 m						10 m x 10 m					
Suhteellinen kosteus						Lämpötila					
70 %						15 C°					
Maastomallin lähde ja tarkkuus											
Maastomallin lähde: Maanmittauslaitos						Vaakaresoluutio: 2 m		Pystyresoluutio: 0,3 m			
Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet											
ISO 9613-2											
Vesialueet, (0) / (G)											
Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F)											
Maa-alueet (0) / (G)											
Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus											
Neutraali											
Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen											
Vapaa avaruus											
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)											
Asukkaat: 0 kpl				Vapaa-ajan rakennukset: 0 kpl				Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl			
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)											
Asukkaat: 0 kpl				Vapaa-ajan rakennukset: 0 kpl				Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl			
Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille											
Virkistysalueet: 0 kpl						Luonnonsuojelualueet: 0 kpl					
Lineaariset melutasot [dB] altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella:											
Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	52,2	51,6	50,7	49,3	49,2	48,6	46,3	44,5	42,2	38,4	37,3
R2	52,3	51,7	50,8	49,4	49,4	48,7	46,4	44,6	42,3	38,5	37,4
R3	52,5	51,9	51,0	49,6	49,5	48,8	46,6	44,8	42,5	38,7	37,6
R4	52,7	52,0	51,2	49,7	49,7	49,0	46,7	45,0	42,7	39,0	37,9
R5	52,9	52,3	51,5	50,0	50,0	49,3	47,0	45,3	43,0	39,3	38,2
R6	52,8	52,2	51,4	49,9	49,9	49,2	46,9	45,2	42,9	39,2	38,1
R7	53,1	52,5	51,7	50,2	50,2	49,5	47,2	45,5	43,2	39,5	38,5
R8	53,1	52,5	51,6	50,2	50,2	49,5	47,2	45,5	43,2	39,5	38,4
R9	53,0	52,3	51,5	50,1	50,0	49,3	47,1	45,3	43,1	39,3	38,3
R10	49,3	48,6	47,8	46,3	46,2	45,5	43,1	41,2	38,8	34,7	33,3
R11	48,4	47,7	46,8	45,3	45,3	44,5	42,1	40,2	37,6	33,4	31,8
R12	49,5	48,8	48,0	46,5	46,4	45,7	43,3	41,4	39,0	34,9	33,5
R13	47,5	46,8	46,0	44,5	44,4	43,6	41,1	39,1	36,5	32,2	30,5
R14	47,4	46,7	45,9	44,4	44,3	43,5	41,1	39,1	36,4	32,1	30,4

R15	51,4	50,7	49,9	48,4	48,4	47,7	45,4	43,6	41,3	37,5	36,3
R16	50,0	49,3	48,5	47,0	47,0	46,2	43,9	42,0	39,6	35,7	34,3
R17	48,8	48,2	47,3	45,8	45,8	45,0	42,6	40,7	38,2	34,1	32,6
R18	47,7	47,0	46,1	44,6	44,5	43,7	41,3	39,3	36,7	32,5	30,8
R19	47,7	47,0	46,2	44,7	44,6	43,8	41,4	39,4	36,8	32,6	30,9
R20	53,5	52,8	52,0	50,6	50,5	49,9	47,6	45,9	43,6	39,9	38,9
R21	53,8	53,2	52,3	50,9	50,9	50,2	47,9	46,2	44,0	40,3	39,3
R22	53,8	53,2	52,4	51,0	50,9	50,3	48,0	46,3	44,1	40,4	39,4
R23	53,9	53,3	52,5	51,0	51,0	50,3	48,1	46,4	44,1	40,5	39,5
R24	54,5	53,8	53,0	51,6	51,6	50,9	48,6	46,9	44,7	41,1	40,2
R25	54,3	53,6	52,8	51,4	51,4	50,7	48,4	46,7	44,5	40,9	39,9
R26	54,4	53,8	53,0	51,5	51,5	50,8	48,6	46,9	44,7	41,0	40,1
R27	54,4	53,8	53,0	51,5	51,5	50,8	48,6	46,9	44,7	41,0	40,1
R28	54,2	53,6	52,8	51,3	51,3	50,6	48,4	46,7	44,4	40,8	39,8
R29	49,1	48,4	47,5	46,1	46,0	45,2	42,9	40,9	38,4	34,3	32,8
R30	48,5	47,8	47,0	45,5	45,4	44,6	42,2	40,3	37,7	33,6	32,0
R31	53,7	53,1	52,3	50,8	50,8	50,1	47,9	46,2	44,0	40,3	39,4



Pohjan Voima Oy

Moskuankangas, Pyhäjärvi

Tuulivoimapuiston väikeselvitys

1.4.2025

Copyright © AFRY Finland Oy

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

AFRY Finland Oy:n projektinumero on 101024341-006

Kannen kuva: © AFRY

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

YHTEYSTIEDOT

Hankkeesta vastaava:

Pohjan Voima Oy

Mira Talonen

mira.talonen@pohjanvoima.fi

Tekijä:

AFRY Finland Oy

Veera Hatulainen

veera.hatulainen@afry.com

Wind and Solar Finland

www.afry.com

Raportin tiedot:

Projektinumero: 101024341-006

Raporttiversio: 001

Raportin tila: VALMIS

Raporttihistoria:

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	01.04.2025/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	01.04.2025/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

SISÄLLYS

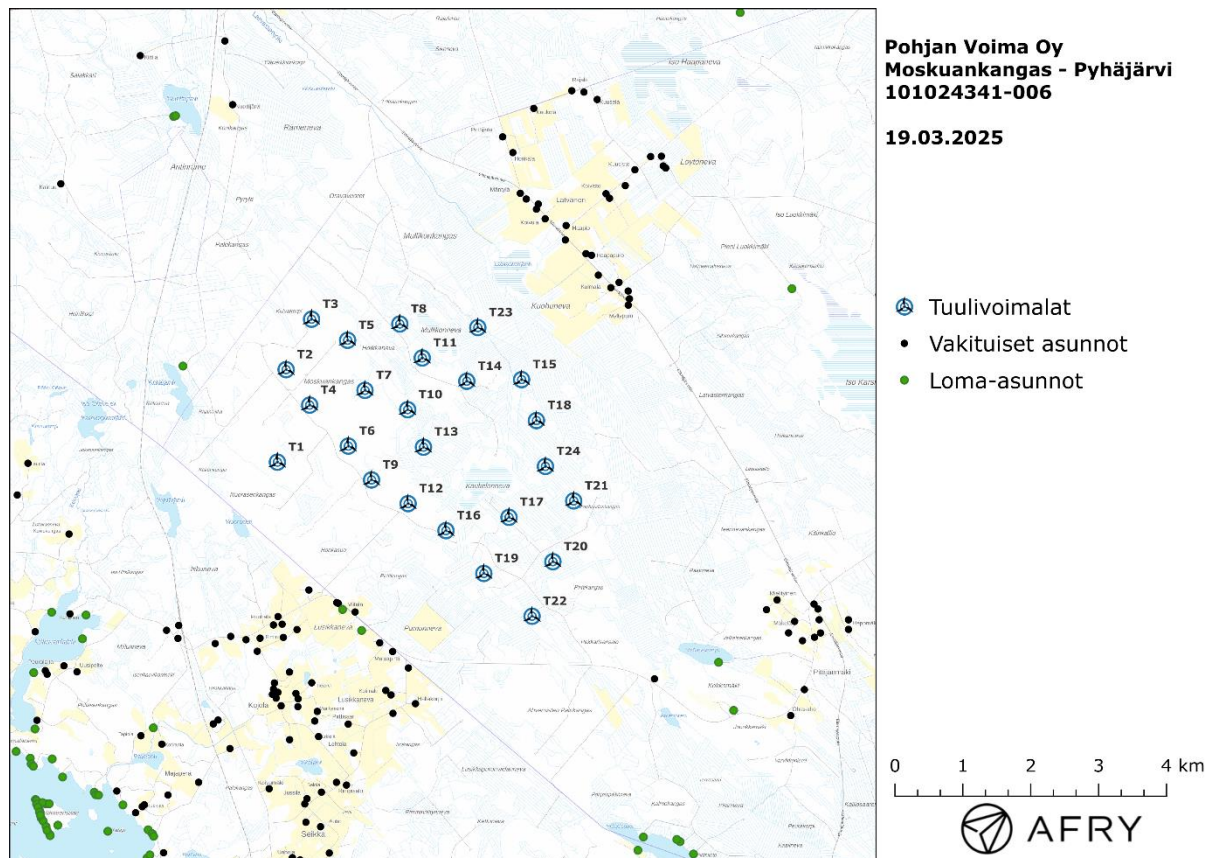
1	JOHDANTO	5
2	TUULIVOIMALOIDEN VÄLKE	7
2.1	Välkevaikutus.....	7
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	7
2.4	Ohjeavot	8
3	TUULIVOIMAKOHTTEEN VÄLKEMALLINNUS	9
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	9
3.2	Todennäköinen välkevaikutus.....	13
3.3	Teoreettinen välkevaikutus	16
3.4	Puuston välkettä vähentävä vaikutus	18
3.5	Välkkeen yhteisvaikutukset.....	21
4	YHTEENVETO.....	26
5	VÄLKEVAIKUTUKSEN LASKENTAMENETELMÄ	27
6	VIITTEET	29

1 JOHDANTO

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kaupungin alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapaiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 24 voimalan suunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1-1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1-1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 207,5 m ja roottorin halkaisijaa 175 m. Voimalan lavan muoto on skaalattu voimalatyypistä V162 (roottorin halkaisija 162 m), jota on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Roottorin halkaisijan koko on merkittävämpi välkeikaan vaikuttava tekijä kuin lavan muoto, mutta myös voimalatyypin lavan leveys vaikuttaa välkkeen suuruuteen. Voimalatyypin V162 lapa on muodoltaan leveä ja tällä pyritään turvalliseen arvioon, joka ei aliarvioi voimaloiden välkevaikutusta.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan ja läheisten tuulivoimapaistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään kappaleessa 3.5.



Kuva 1-1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

Taulukko 1-1: Tuulivoimaloiden (24 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	419688	7051232	152
T2	419816	7052592	159
T3	420191	7053333	156
T4	420163	7052070	160
T5	420722	7053023	153
T6	420732	7051468	151
T7	420977	7052288	155
T8	421490	7053263	144
T9	421074	7050970	146
T10	421606	7052004	149
T11	421820	7052764	145
T12	421613	7050622	141
T13	421839	7051452	147
T14	422477	7052421	143
T15	423284	7052445	141
T16	422170	7050224	139
T17	423098	7050420	144
T18	423503	7051843	142
T19	422728	7049595	138
T20	423745	7049768	149
T21	424051	7050662	150
T22	423438	7048965	145
T23	422639	7053211	139
T24	423635	7051169	144

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 tuuli-voimalan 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 iltajat). 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 väkelaskenta on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

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 todennäköinen välkevaikutus perustuu auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta. Auringonpaisteen aineisto on saatu Siilinjärven sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 120 km.

Todennäköisen ja teoreettisen välkkeen mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta voimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Puuston välkettä vähentävä vaikutus on mallinnettu erikseen. Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, minkä vuoksi puuston välkettä vähentävää vaikutusta ei pystytä arvioimaan tarkasti.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Välkevaikutuksen laskennallinen arvio kuvaa siis välkevaikutusta ulkona. Rakennusten sisätiloissa

välkevaikutus on yleensä vähäisempi, koska 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]. Tässä selvityksessä mallinnettuja välkeajoja verrataan vakiintuneen käytännön mukaan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin. Välkkeen ohjearvoja sovelletaan asutuksen kohdalla, eikä esimerkiksi eläimiin tai luontoon kohdistuvasta välkevaikutuksesta ole ohjearvoja tai arviointikriteerejä.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot ovat korkeintaan 30 tuntia vuodessa ja 30 minuuttia päivässä. Saksassa todellinen vuotuisen välkevaikutus ohjeistetaan rajoittamaan 8 tuntiin, jos voimalaan asennetaan välkkeen hallintatyökalu.

3 TUULIVOIMAKOHTTEEN 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 tuulivoimaloiden dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tieto 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, tuulivoimalan 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.

Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan 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 tuulivoimalan aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä tuulivoimalan lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä tuulivoimalan 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 välkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu tuulivoimalan muuttuva lapaprofiili.

Välkelaskennassa Moskuankankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 207,5 m ja roottorin halkaisijaa 175 m. Välkemallinnuksissa voimaloiden lavan muoto on skaalattu voimalatyypistä V162 (roottorin halkaisija 162 m). Samalla kun lavan pituus on skaalattu 87,5 metriin, lapaa on skaalattu 2 % leveämmäksi kuin voimalatyypissä V162. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat tuulivoimaloiden 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 tuulivoimalan orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri tuulivoimalan 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 suuntaakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn tuulivoimalan käyntinopeuksien ajallisuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa tuulissa tuulivoimalat 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 tuulivoimalan käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-1).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Siilinjärven sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3-2). Suuntakohtaisesti skaalatut väketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta väketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3-1: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulennopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,177	0,173	0,155	0,138	0,124	0,170

Taulukko 3-2: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

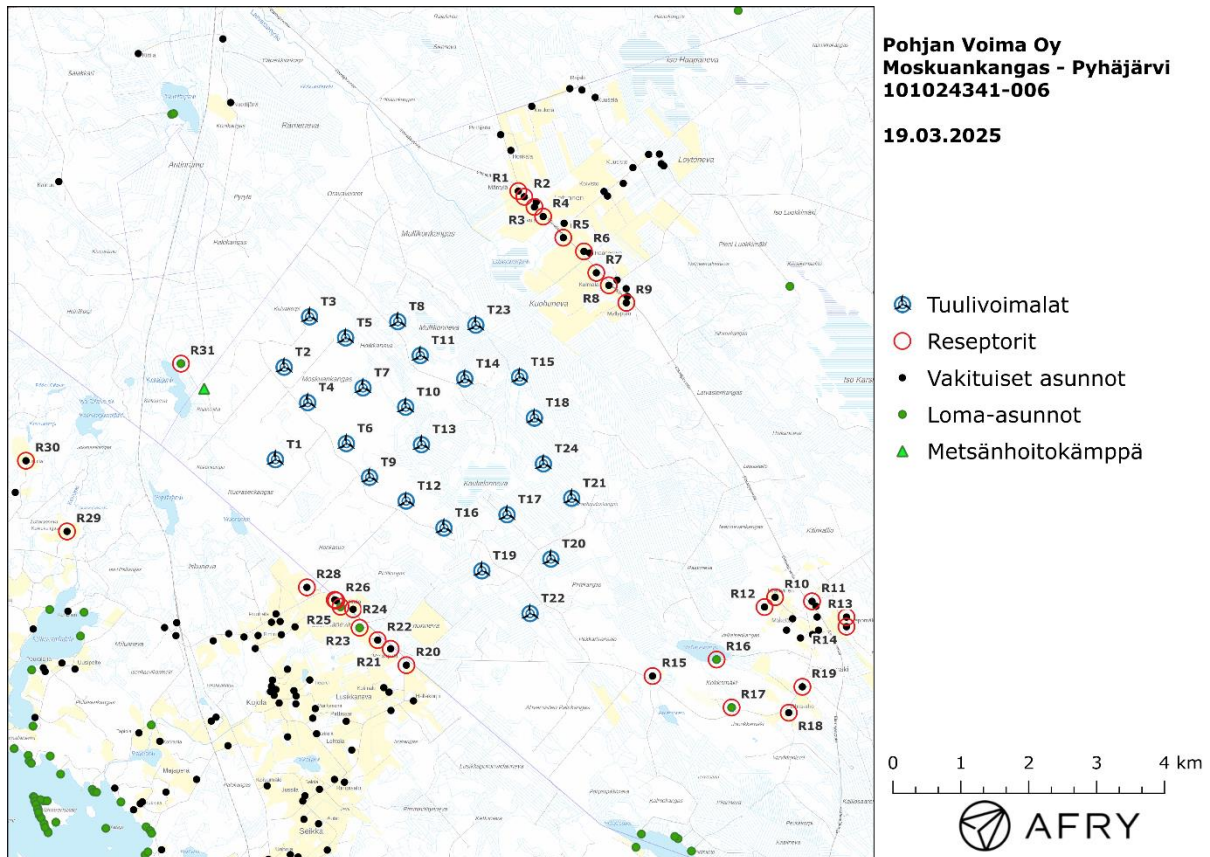
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,154
Helmikuu	0,262
Maaliskuu	0,332
Huhtikuu	0,432
Toukokuu	0,454
Kesäkuu	0,424
Heinäkuu	0,456
Elokuu	0,406
Syyskuu	0,299
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 3-3) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 31 pistettä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Pisteet on valittu asuntojen kohdilta, joihin kohdistuu suurin välkevaikutus. Näitä pisteitä kutsutaan reseptoreiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3-1). Reseptorit sijaitsevat noin 1,5-3,6 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 1,2 km voimalasta T2 länteen, sijaitsee rakennus, joka näkyy MML:n maastokartalla lomarakennuksena. Pyhäjärven kaupungin rakennusrekisterin mukaan kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä välkevaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 3-3: Reseptorien 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
R31	418298	7052642	127	loma-asunto



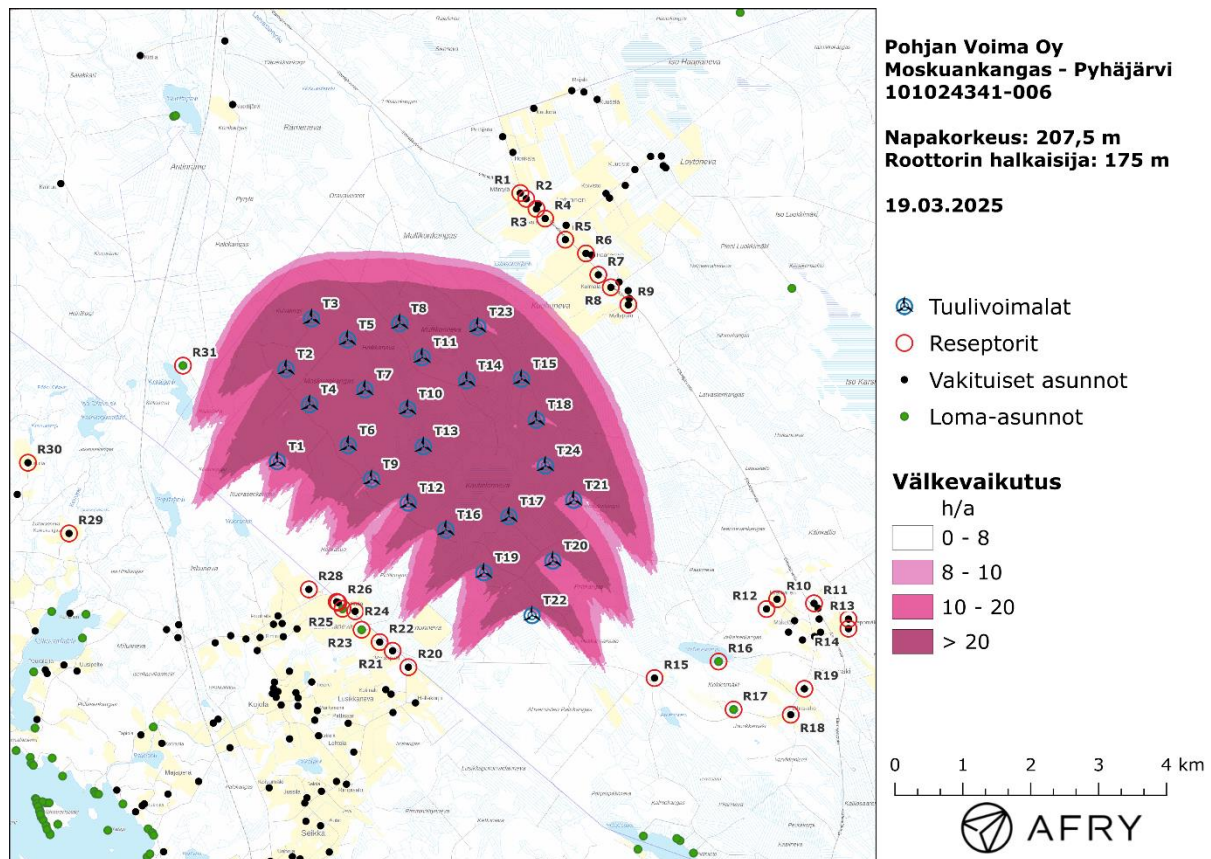
Kuva 3-1: Reseptoreiden paikat Moskuankankaan tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3-2). Tässä mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta tuulivoimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen, mutta puuston vaikutusta arvioidaan myöhemmin luvussa 3.4. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien lähialueen asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös päiväkohtainen todennäköinen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-4).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R31 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 3-5). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3-2: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 3-4: Todennäköinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi
R1	0:22	0:01
R2	0:22	0:01
R3	0:26	0:02
R4	0:45	0:03
R5	0:55	0:03
R6	0:45	0:02
R7	1:18	0:03
R8	1:10	0:03
R9	1:00	0:02
R10	0:00	0:00
R11	0:00	0:00
R12	0:00	0:00
R13	0:00	0:00
R14	0:00	0:00
R15	1:54	0:04
R16	0:00	0:00
R17	0:00	0:00
R18	0:00	0:00
R19	0:00	0:00
R20	0:59	0:04
R21	2:32	0:05
R22	2:55	0:05
R23	1:01	0:04
R24	1:53	0:04
R25	3:20	0:05
R26	2:39	0:05
R27	2:24	0:05
R28	2:13	0:04
R29	0:00	0:00
R30	0:00	0:00
R31	3:29	0:06

Taulukko 3-5: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R31 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	0:14	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:14
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
Huhtikuu	0:00	0:00	0:12	0:49	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:00
Toukokuu	0:00	0:00	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24
Kesäkuu	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
Heinäkuu	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
Elokuu	0:00	0:00	0:31	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:54
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
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	0:00	1:07	1:59	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:29

3.3 Teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-6). Mallinnusten perusteella teoreettinen vuotuinen ja päiväkohtainen maksimivälkeaika pysyy alle raja-arvojen kaikkien rakennusten kohdalla, kun välkeaikoja verrataan Saksan raja-arvoihin. Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptorin R31 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 3-7). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 3-6: Teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välkeaika	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimi
R1	4:19	0:14
R2	4:29	0:13
R3	4:38	0:14
R4	7:34	0:16
R5	8:10	0:16
R6	6:46	0:15
R7	10:39	0:15
R8	8:46	0:15
R9	7:16	0:14
R10	0:00	0:00
R11	0:00	0:00
R12	0:00	0:00
R13	0:00	0:00
R14	0:00	0:00
R15	7:41	0:13
R16	0:00	0:00
R17	0:00	0:00
R18	0:00	0:00
R19	0:00	0:00
R20	3:54	0:14
R21	9:51	0:18
R22	11:11	0:18
R23	4:03	0:14
R24	7:26	0:13
R25	12:40	0:17
R26	10:13	0:17
R27	9:15	0:17
R28	8:31	0:17
R29	0:00	0:00
R30	0:00	0:00
R31	17:03	0:24

Taulukko 3-7: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R31 kohdalla.

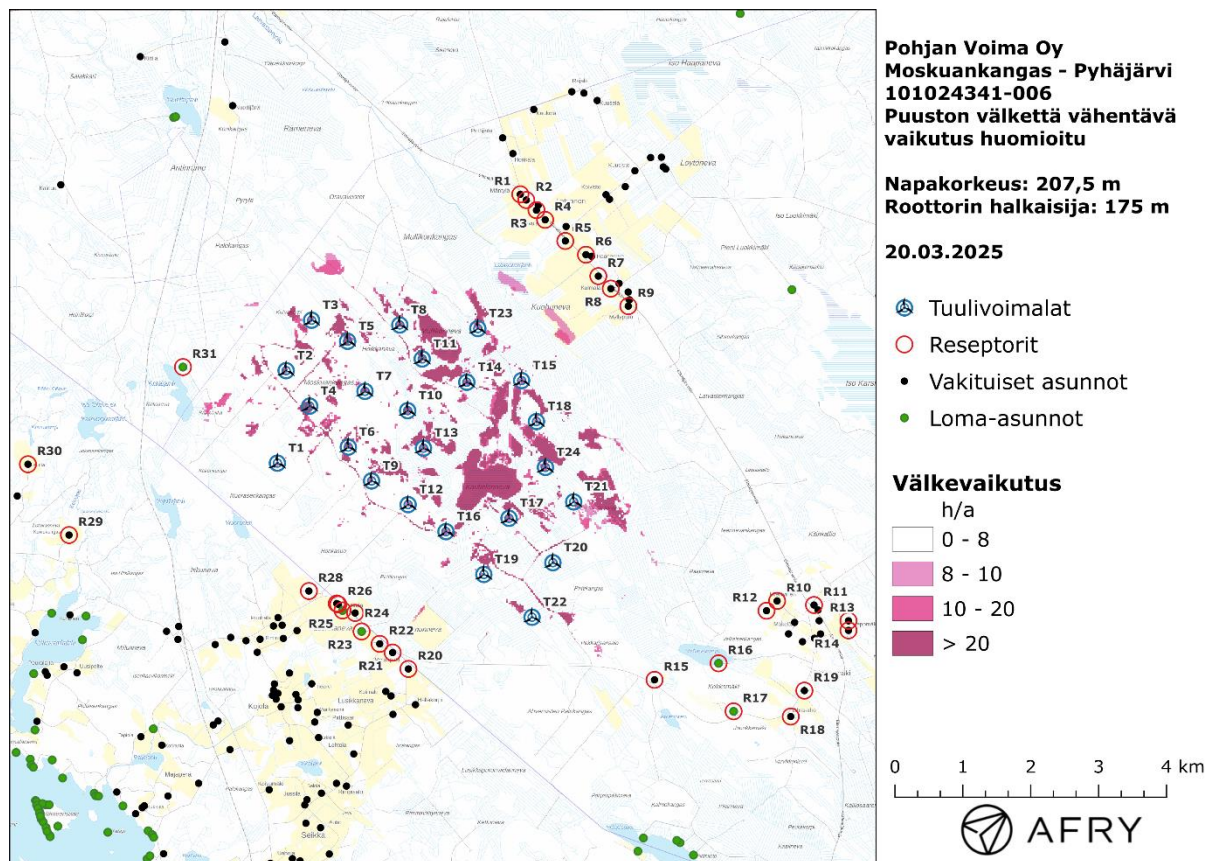
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:22	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:22
Huhtikuu	0:00	0:00	0:46	3:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:10
Toukokuu	0:00	0:00	1:29	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:29
Kesäkuu	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
Heinäkuu	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
Elokuu	0:00	0:00	2:12	1:41	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:53
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	3:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:08
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31
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	0:00	4:28	9:34	3:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	17:03

3.4 Puuston välkettä vähentävä vaikutus

Karttakuvassa (Kuva 3-3) on esitetty todennäköisen vuotuisen välkkeen mallinnus, kun puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioidaan. Laskennassa puustodatana on käytetty Luonnonvarakeskuksen tuottamaa monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin puunkorkeus-aineistoa vuodelta 2021 [5]. Mallinnuksen perusteella puusto rajoittaa merkittävästi Moskuankankaan voimaloiden näkyvyyttä ja siten vähentää välkevaikutusta.

Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus alittaa Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien lähialueen asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös päiväkohtainen todennäköinen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Puuston huomioivat vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-8).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R25 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 3-9). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3-3: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioiden.

Taulukko 3-8: Todennäköinen välkevaikutus puuston vaikutus huomioiden tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus puuston vaikutus huomioiden	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi puuston vaikutus huomioiden
R1	0:22	0:01
R2	0:22	0:01
R3	0:26	0:02
R4	0:45	0:03
R5	0:00	0:00
R6	0:45	0:02
R7	1:18	0:03
R8	0:34	0:02
R9	1:00	0:02
R10	0:00	0:00
R11	0:00	0:00
R12	0:00	0:00
R13	0:00	0:00
R14	0:00	0:00
R15	0:00	0:00
R16	0:00	0:00
R17	0:00	0:00
R18	0:00	0:00
R19	0:00	0:00
R20	0:47	0:04
R21	1:44	0:05
R22	2:55	0:05
R23	0:00	0:00
R24	1:53	0:04
R25	3:20	0:05
R26	0:00	0:00
R27	0:00	0:00
R28	0:00	0:00
R29	0:00	0:00
R30	0:00	0:00
R31	0:00	0:00

Taulukko 3-9: Todennäköisen välkevaikutuksen (puuston vaikutus huomioiden) ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R25 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	0:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:17
Toukokuu	0:00	0:12	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:19
Kesäkuu	0:00	0:23	0:59	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:22
Heinäkuu	0:00	0:01	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07
Elokuu	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
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	0:36	2:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:20

3.5 Välkkeen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden sekä läheisten suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuiston ja toiminnassa olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkkeen yhteisvaikutusta. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 23 voimalaa, joista lähimmät ovat 6,3 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulipuistossa on 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

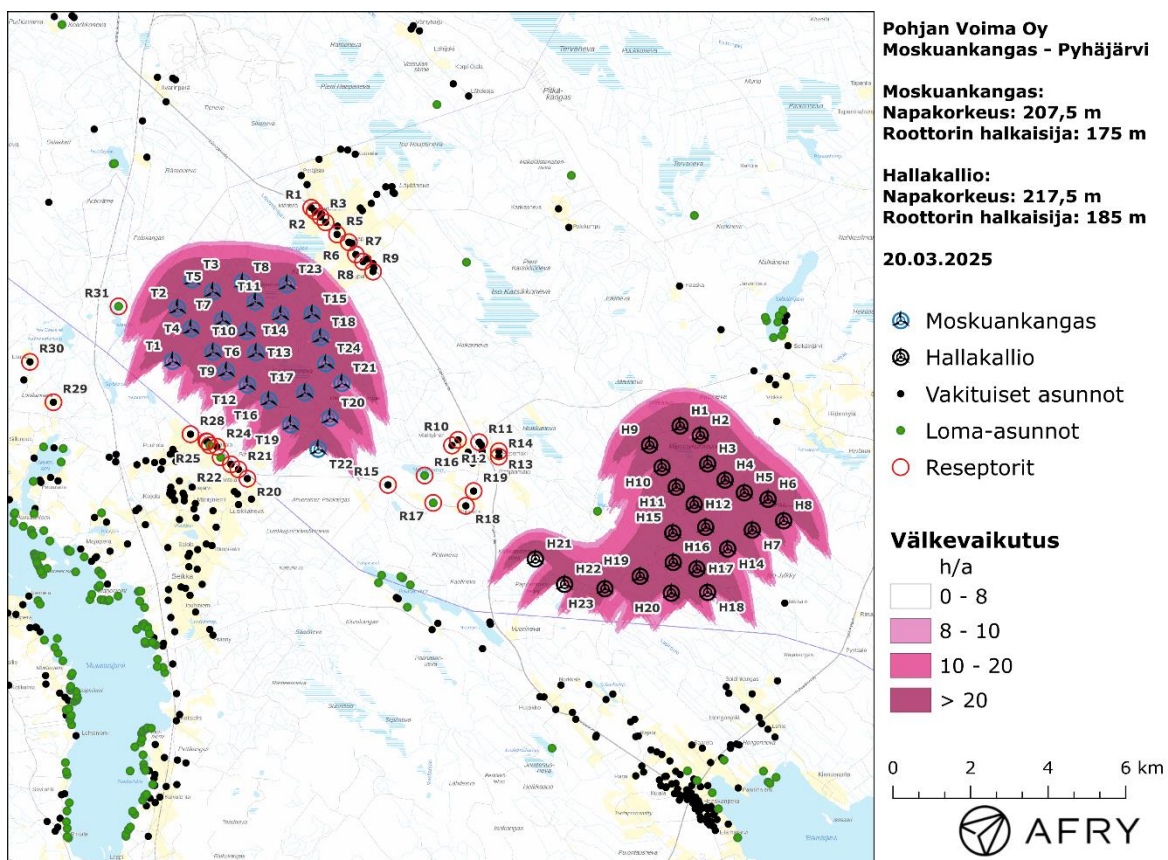
Moskuankankaan ja Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloiden melun yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (Eolus Finland Oy) jakamien tietojen mukaan Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Välkemallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty rottorin halkaisijaa 185 m ja napakorkeutta 217,5 m. Hallakallion voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyypin Vestas V162 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 185 metrin rottorin halkaisijaa.

Naapuripuistojen voimaloiden koordinaatit on annettu taulukoissa (Taulukko 3-10).

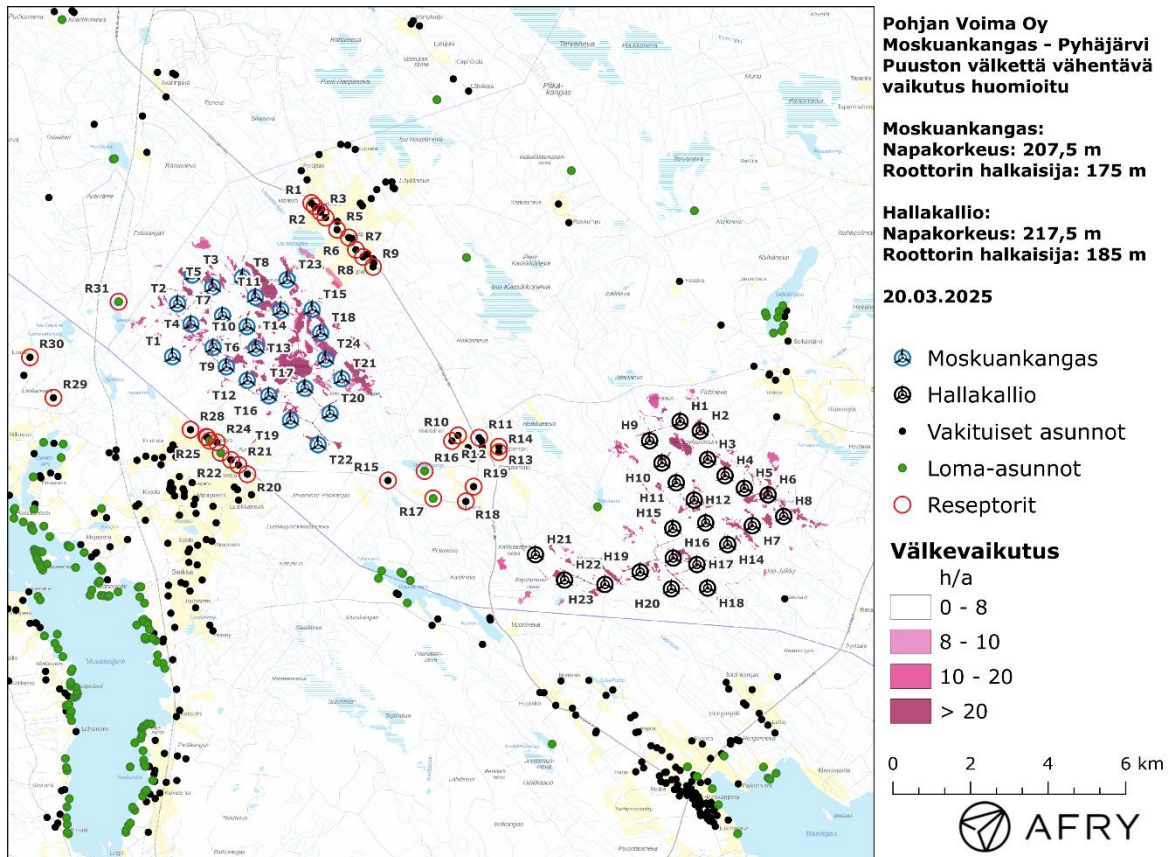
Taulukko 3-10: Hallakallion (23 kpl) tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
H1	432767	7049566	165
H2	433289	7049322	160
H3	433477	7048587	159
H4	433927	7048170	167
H5	434424	7047845	177
H6	435034	7047677	164
H7	434628	7046883	153
H8	435438	7047123	164
H9	431983	7049070	172
H10	432301	7048497	162
H11	432668	7047987	156
H12	433131	7047542	153
H13	433427	7046956	154
H14	433994	7046396	150
H15	432579	7046811	167
H16	432590	7046050	161
H17	433202	7045882	153
H18	433475	7045278	148
H19	431737	7045691	154
H20	432543	7045259	147
H21	429039	7046138	154
H22	429790	7045485	152
H23	430831	7045372	160

Moskuankankaan ja Hallakallion todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 3-4) ja vastaava mallinnus puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioiden on esitetty karttakuvana (Kuva 3-5). Todennäköiset välkeajat ja teoreettinen maksimivälke reseptoripisteiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 3-11) ja todennäköinen välke puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioiden on listattu taulukossa (Taulukko 3-12). Mallinnusten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloista aiheutuu vähäistä välkkeen yhteisvaikutusta asutukselle. Ainoat muutokset todennäköisessä välkevaikutuksessa tapahtuvat reseptoripisteiden R18 ja R19 kohdalla, joissa vuotuinen todennäköinen välkevaikutus kasvaa 15 ja 14 minuuttia, kun puuston välkettä vähentävää vaikutusta ei huomioida. Yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvon ylityksiä minkään asuin- tai lomarakennuksen kohdilla.



Kuva 3-4: Moskuankankaan ja Hallakallion tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.



Kuva 3-5: Moskuankankaan ja Hallakallion tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioiden.

Taulukko 3-11: Välkeajat tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorien kohdilla, kun mallinnuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimalat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Resep-tori	Todennäköinen vuotuinen välke aika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen välke aika	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimi
R1	0:22	0:01	4:19	0:14
R2	0:22	0:01	4:29	0:13
R3	0:26	0:02	4:38	0:14
R4	0:45	0:03	7:34	0:16
R5	0:55	0:03	8:10	0:16
R6	0:45	0:02	6:46	0:15
R7	1:18	0:03	10:39	0:15
R8	1:10	0:03	8:46	0:15
R9	1:00	0:02	7:16	0:14
R10	0:00	0:00	0:00	0:00
R11	0:00	0:00	0:00	0:00
R12	0:00	0:00	0:00	0:00
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	0:00	0:00	0:00	0:00
R15	1:54	0:04	7:41	0:13
R16	0:00	0:00	0:00	0:00
R17	0:00	0:00	0:00	0:00
R18	0:15	0:02	1:57	0:10
R19	0:14	0:01	1:47	0:09
R20	0:59	0:04	3:54	0:14
R21	2:32	0:05	9:51	0:18
R22	2:55	0:05	11:11	0:18
R23	1:01	0:04	4:03	0:14
R24	1:53	0:04	7:26	0:13
R25	3:20	0:05	12:40	0:17
R26	2:39	0:05	10:13	0:17
R27	2:24	0:05	9:15	0:17
R28	2:13	0:04	8:31	0:17
R29	0:00	0:00	0:00	0:00
R30	0:00	0:00	0:00	0:00
R31	3:29	0:06	17:03	0:24

Taulukko 3-12: Välkeajat tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorien kohdilla, kun mallinnuksissa huomioidaan Moskuankankaan ja Hallakallion voimat. Taulukossa on esitetty todennäköisen välkkeen vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, kun puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioidaan.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaja puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioiden	Todennäköisen välkkeen päivakohtainen puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioiden
R1	0:22	0:01
R2	0:22	0:01
R3	0:26	0:02
R4	0:45	0:03
R5	0:00	0:00
R6	0:45	0:02
R7	1:18	0:03
R8	0:34	0:02
R9	1:00	0:02
R10	0:00	0:00
R11	0:00	0:00
R12	0:00	0:00
R13	0:00	0:00
R14	0:00	0:00
R15	0:00	0:00
R16	0:00	0:00
R17	0:00	0:00
R18	0:00	0:00
R19	0:10	0:01
R20	0:47	0:04
R21	1:44	0:05
R22	2:55	0:05
R23	0:00	0:00
R24	1:53	0:04
R25	3:20	0:05
R26	0:00	0:00
R27	0:00	0:00
R28	0:00	0:00
R29	0:00	0:00
R30	0:00	0:00
R31	0:00	0:00

4 YHTEENVETO

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kaupungin alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty 24 voimalan suunnitelmalle, roottorin halkaisijalla 175 m ja napakorkeudella 207,5 m. Todennäköinen välkevaikutus on laskettu sekä ilman puuston välkettä vähentävää vaikutusta että sen kanssa. Selvityksessä on lisäksi arvioitu Moskuankankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja päiväkohtainen välkeaika alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös vuotuinen teoreettinen maksimivälke sekä teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke alittaa Saksan raja-arvot.

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 tuulivoimalan aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktiota tuulivoimalan roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Tuulivoimaloiden yhteisvaikutus saadaan summaamalla tuulivoimalakohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen tuulivoimaloiden eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulisuusosuuksilla.

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.

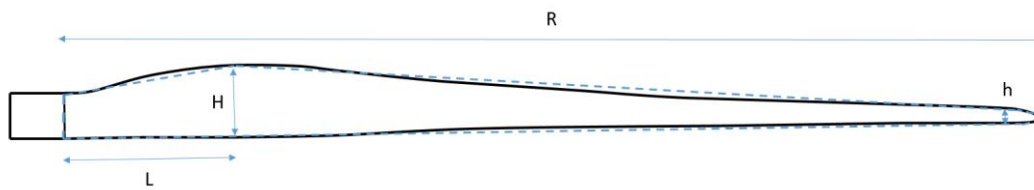
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen tuulivoimalan 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 tuulivoimalan lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä tuulivoimalan 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 5-1) 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 tuulivoimalan keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 5-1: Tuulivoimalan lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkелaskennassa käytetään tuulivoimavalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $[0, R]$ riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkелaskennassa huomioidaan tuulivoimalan 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 kust-nära 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.
- [5] Luonnonvarakeskus: Monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin (MVMi) kartta-aineisto 2021, 2023.