



Pohjan Voima Oy

Tukkimäen tuulivoimahankkeen meluselvitys

101024341-005, 10.01.2025

Tekijä
AFRY Finland Oy
Veera Hatulainen

E-mail
veera.hatulainen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
004

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
10/01/2025

Projektinumero
101024341-005

Raportin tila
VALMIS

Tukkimäen tuulivoimahankkeen meluselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	29.05.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	29.05.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	27.09.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	27.09.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalakoordinaattien muutokset. Rakentamattomien rakennuspaikkojen ja Sammakokankaan jätekeskuksen lisääminen reseptoreiksi. Yhteisvaikutukset Haapalamminkankaan kanssa.
003	08.08.2024/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	08.08.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalakoordinaattien muutokset. Reseptorien päivitykset (Purettu rakennus, rakentamaton rakennuspaikka).
004	10.01.2025/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	10.01.2025/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	V172 melun taajuusjakauman päivitys.

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

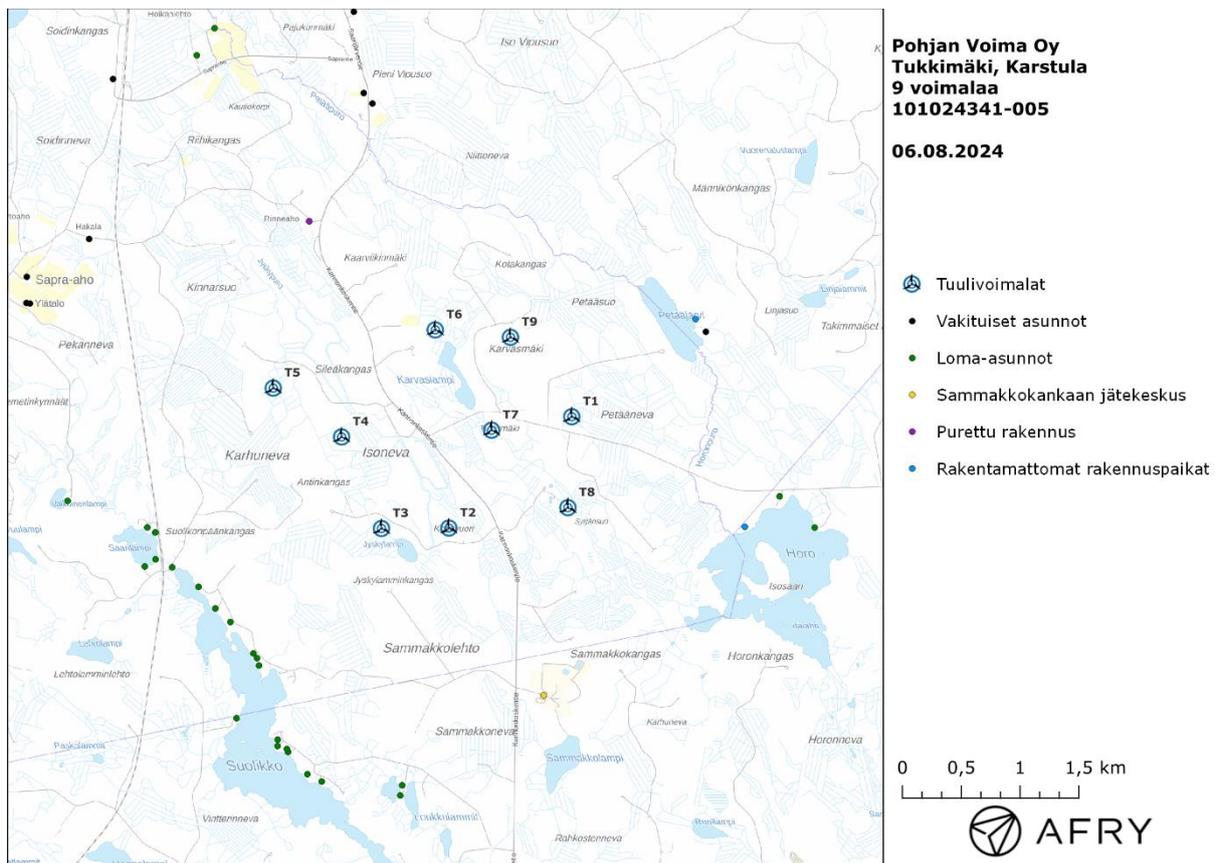
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden melu	6
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta	6
2.2	Melumallinnusohjeistus	7
2.3	Ohjeavot	8
2.4	Sisämelutasojen arviointi.....	9
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus	10
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus	10
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus.....	15
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset	17
4	Yhteenveto	20
5	Viitteet	21
6	Melumallinnuksen tiedot.....	22

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitussuunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja turbiinityypin V172 7.2 MW PO7200 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasolla 109,8 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 107,8 dB(A) + varmuusarvo 2,0 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 myös Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston melun yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään erillisessä luvussa 3.3.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (9 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	412016	6967514	178
T2	410971	6966562	182
T3	410399	6966558	176
T4	410059	6967341	171
T5	409479	6967758	167
T6	410855	6968256	168
T7	411335	6967398	172
T8	411983	6966736	185
T9	411495	6968193	185

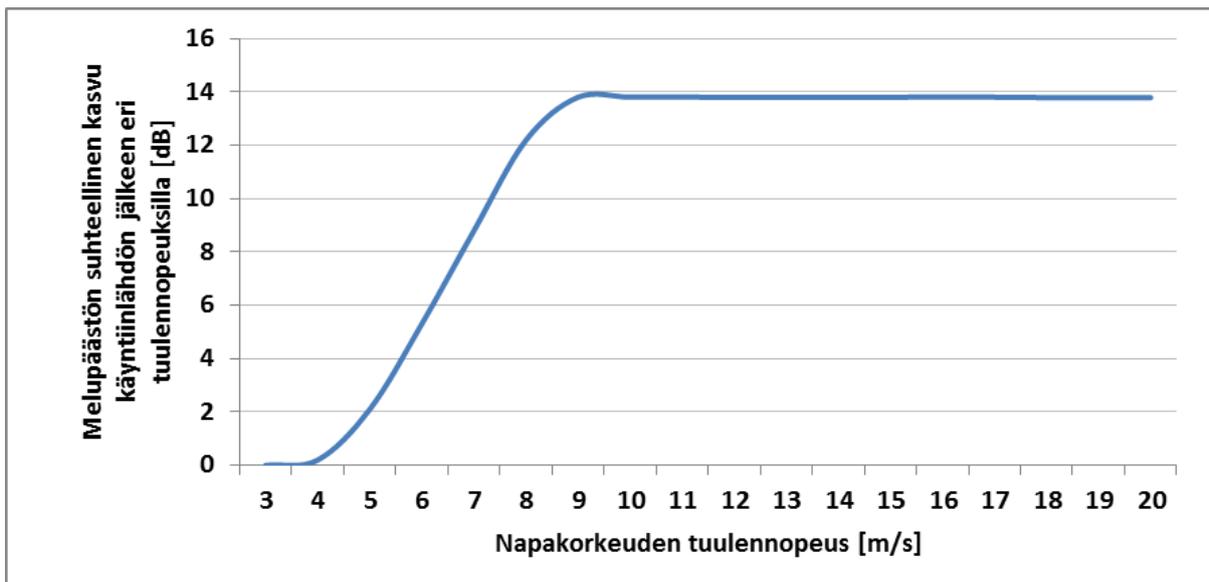
2 Tuulivoimaloiden melu

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 [15]. 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 [19].

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 [18].

Ilmakehän pystysuuntaisen stabiilisuuden ja ilmavirran turbulenssin vaihtelut vuorokauden eri aikoina voivat vaikuttaa tuulisuuden tasoon eri korkeuksilla [16]. Ilmakehän neutraalin stabiilisuuden vallitessa 8 m/s tuulennopeus 10 metrin korkeudella vastaa noin 12 m/s modernin voimalan napakorkeudella 139–149 m [17].

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasa voidaan kontrolloida erillisellä optimointisäädöllä, jonka avulla kellonajan, tuulensuunnan ja tuulennopeuden mukaan säädetään lapakulmaa haluttuun pyörimisnopeuteen ja melutasoon. Tällä säädöllä on kuitenkin vaikutuksia voimalan sen hetkiseen tuotantotehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahalaoidituksen, joka vähentää melupäästöä nimellisteholla tällä hetkellä noin 2–3 dB ja tulevaisuudessa vieläkin enemmän serraatioiden tuotekehityksen johdosta [14].

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

2.2 Melumallinnusohjeistus

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

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

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

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

Äänen etenemislaskennassa käytetään ohjeen mukaisia standardiin ISO 9613-2 perustuvia sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Maaston pinnan laatu ja muoto otetaan mallinnuksessa erillisinä huo-

mioon. Lisäksi 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 absorptio ja maastovaikutuksen parametrit. Matalataajuisten 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 suosittamat 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 perustelumaston mukaan asetusta ei sovelleta kaikilla luonnonsuojelualueilla, vaan ainoastaan yleiselle virkistyskäytölle tärkeillä luonnonsuojelualueilla, joille on rakennettu käyttöä palvelevia polkuja ja muita rakenteita. Aiemman melupäätöksen 993/1992 luonnonsuojelualueiden ohjearvoja ei siis tuulivoimamelun osalta sovellettaisi.

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

Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2).

Taulukko 2: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.

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

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa toimenpiderajat matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Melun toimenpiderajat on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 3). Ohjeistuksen mukaiset mallinnustulokset vastaavat

matalataajuisen melun tasoa ulkotiloissa, joten ne eivät ole suoraan verrannollisia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Ulkomelutasojen avulla voidaan kuitenkin arvioida sisämelutasoja, kun rakennuksen vaipan ääneneristävyys tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

Taulukko 3: Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat 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 3) lisäksi toimenpiderajat päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Päiväaikainen (klo 07–22) keskiäänitaso ei saa ylittää 35 dB(A) ja yöaikainen (klo 22–07) keskiäänitaso 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unihäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona $L_{eq,1h}$ mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen.

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

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

3 Tuulivoimakohteen melumallinnus

3.1 Keskiäänitasojen LAeq mallinnus

Tuulivoimaloiden aiheuttaman keskiäänitason mallinnus on suoritettu laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. Mallinnuksessa on käytetty V172 7.2 MW PO7200 (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_01. 2024-11-29.

Dokumentissa esitetyt melutiedot perustuvat tuulivoimalatyypillä V172 tehtyihin testimittauksiin. 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.”

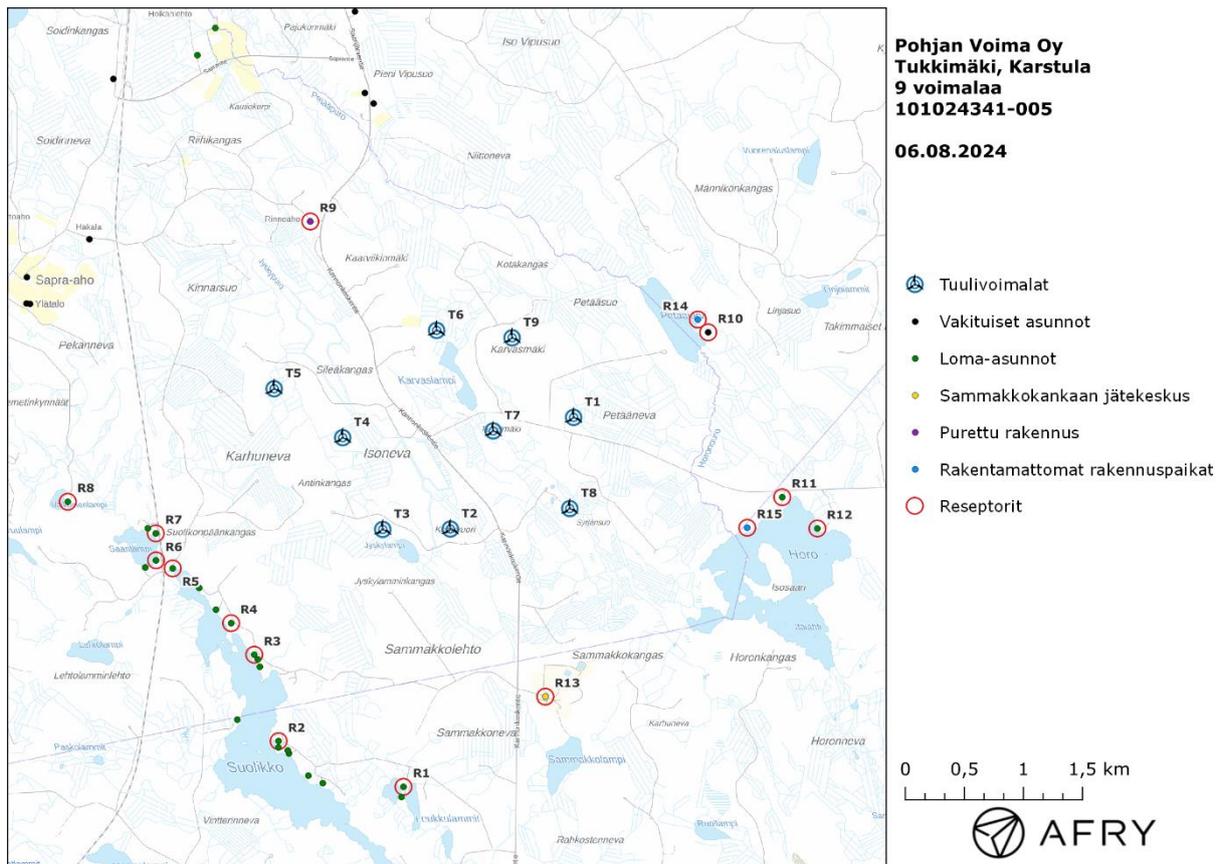
Turbiinityypin V172 7.2 MW PO7200 äänitehotaso on 107,8 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoa 109,8 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulen nopeutta 15 m/s napakorkeudella 200 m, jonka arvioidaan vastaavan melumallinnusohjeistuksen mukaista referenssinopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksissa.

Turbiinityyppien melupäästön kapeakaistaisuuden arvioinnissa on käytetty ympäristöministeriön raportissa Ympäristömelun mittaaminen [12] esitettyä yksinkertaista menetelmää, joka perustuu äänitehtasojen 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 11 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto, yksi purettu rakennus sekä kaksi kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnot rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 15 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla tarkastellaan tarkemmin LAeq ja matalataajuisen melun tasoja.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat noin 1,3 km etäisyydellä voimaloista. Reseptoripisteiden sijainnit suhteessa voimaloihin on esitetty karttakuvassa (Kuva 3).



Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

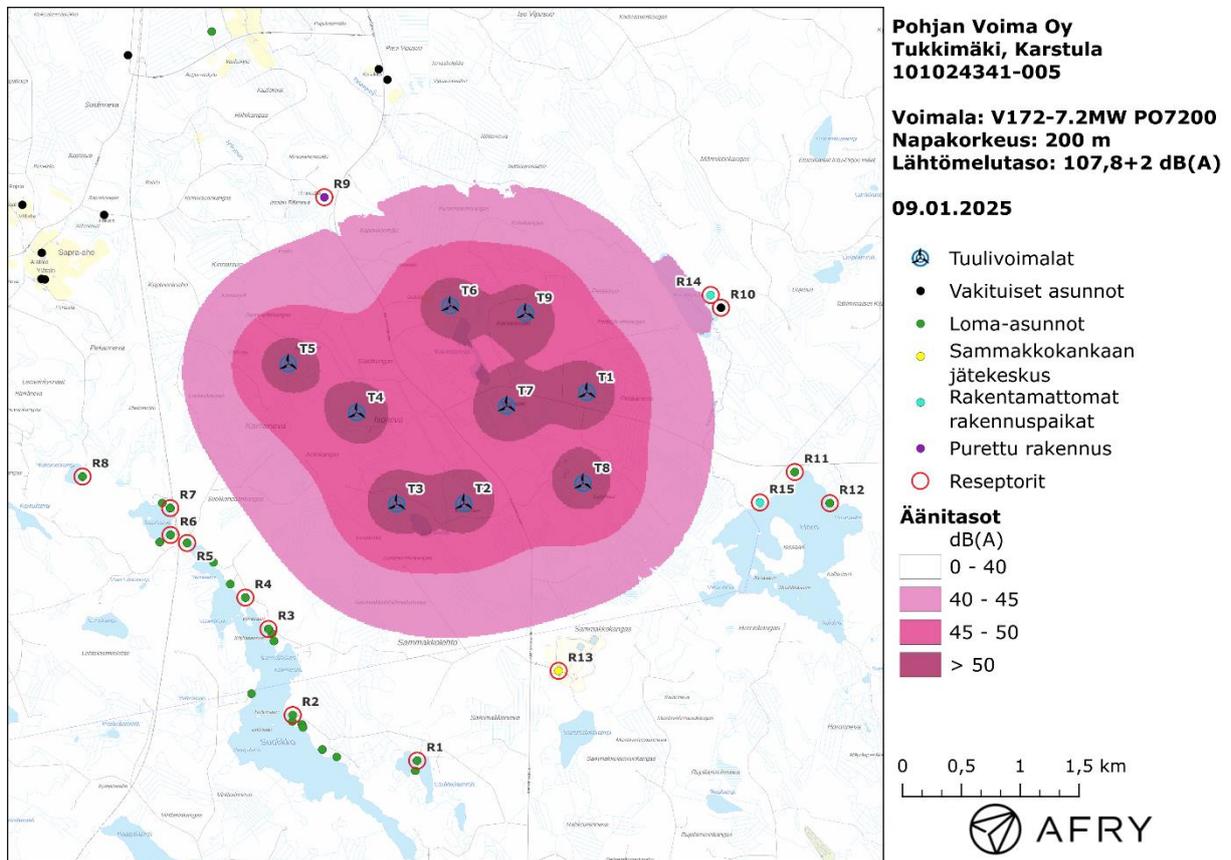
Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus	Lisätietoja
R1	410575	6964361	186	lomarakennus	-
R2	409517	6964751	188	lomarakennus	-
R3	409311	6965488	185	lomarakennus	-
R4	409115	6965757	190	lomarakennus	-
R5	408620	6966224	186	lomarakennus	-
R6	408479	6966293	186	lomarakennus	-
R7	408476	6966523	187	lomarakennus	-
R8	407731	6966793	198	lomarakennus	-
R9	409786	6969184	169	lomarakennus	Rakennus purettu.
R10	413157	6968238	171	vakituinen asuinrakennus	Käyttötarkoituksen muuttaminen erämajaksi on käynnissä.
R11	413784	6966832	179	lomarakennus	Metsähallituksen omistama. Käyttötarkoitus muutetaan tarvittaessa erämajaksi.
R12	414082	6966565	176	lomarakennus	-
R13	411777	6965130	200	teollinen rakennus	Piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.
R14	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R15	413488	6966571	177	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka neljälle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.

Meluvaikutus

Tukkimäen turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso LAeq on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Karttakuvaan on merkitty keskiäänitasojen 40 dB(A), 45 dB(A) ja 50 dB(A) mukaiset vyöhykkeet, joita käytetään apuna tulosten arvioinnissa. Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuin- ja lomarakennukset. Tämän lisäksi karttakuvaan on merkitty rakentamattomat rakennuspaikat, yksi purettu rakennus sekä piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.

Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5). Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot pysyvät alle 40 dB(A):n kaikkien loma- ja asuinrakennusten sekä rakentamattomien rakennuspaikkojen kohdalla. Myös Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edessä ohjearvot alittuvat. Valtioneuvoston asetuksen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja, purettuja rakennuksia eikä teollisia rakennuksia. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat kiinteistöjen omistajien kanssa sopimuksellisesti.



Kuva 4: Keskiäänitasot LAeq tuulivoimapaiston hankealueella.

Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	34,0
R2	33,9
R3	36,7
R4	35,8
R5	36,6
R6	36,1
R7	36,6
R8	33,7
R9	38,4
R10	38,5
R11	35,5
R12	34,8
R13	37,1
R14	39,0
R15	36,8

3.2 Matalataajuisen melun mallinnus

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

Meluvaikutus

Matalataajuisen melun arvioinnissa käytetään Suomen asumisterveysasetuksessa määriteltyjä taajuuskohtaisia arvoja, jotka antavat toimenpiderajat matalataajuisen melun yöaikaisille *sisämelutasoille* (Taulukko 3). Ympäristöministeriön ohjeistuksen mukainen mallinnus antaa matalataajuisen *ulkomelun* tasot voimaloita lähimpien kiinteistöjen kohdilla. Tulokset eivät siis ole suoraan vertailukelpoisia asumisterveysasetuksen arvojen 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 rakennuksesta aiheutuva äänitasoero (ΔL_o) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja toimenpidearvoihin 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] eristävyysarvot ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa vertailukiinteistöjen matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia äänitasoeroja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut äänitasoerot.

Taulukko 6: Rakennuksen äänitasoerot taajuuskaistoittain.

Taajuus [Hz]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Äänitasoero [dB] (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	21,0	22,8

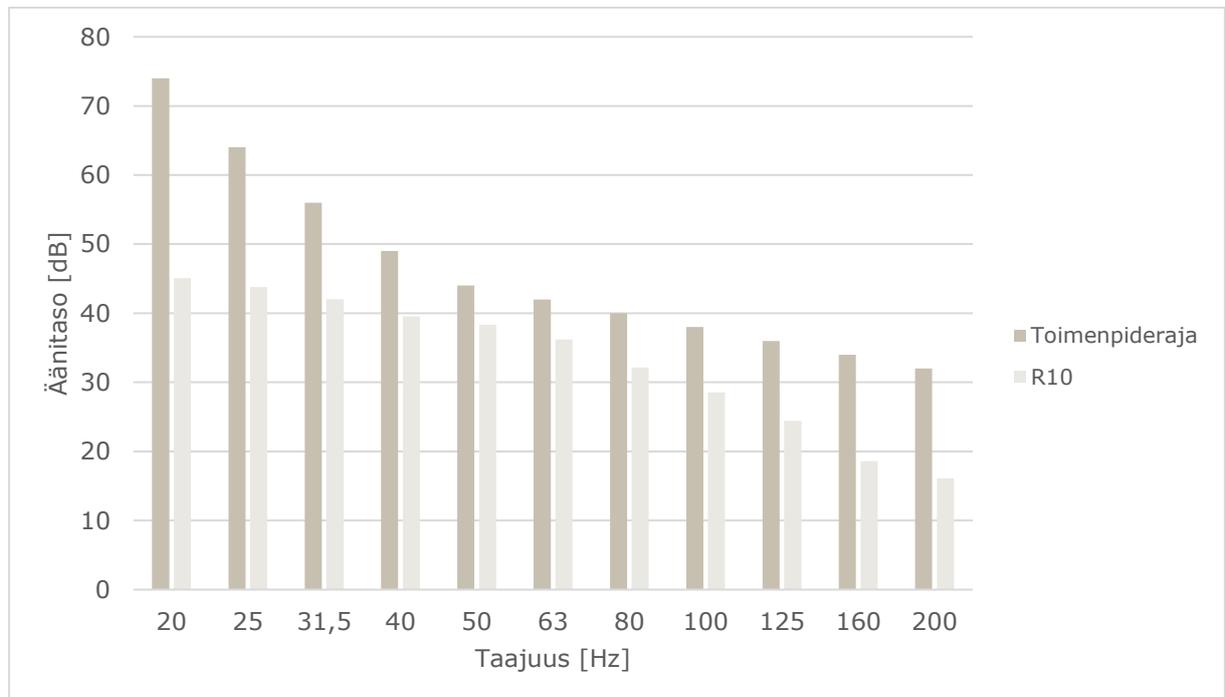
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso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

Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat reseptoripisteeseen R9. Koska kyseessä on purettu rakennus, jota toimenpidearvot eivät koske, lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvaan olemassa olevaan rakennukseen R10 ja verrataan niitä asumisterveysasetuksen arvoihin.

Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

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

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	49,8	49,2	48,4	46,9	46,9	46,3	44,0	42,3	40,1	36,4	35,4
R2	50,0	49,4	48,6	47,1	47,1	46,5	44,2	42,5	40,3	36,6	35,6
R3	51,8	51,2	50,4	48,9	48,9	48,3	46,1	44,4	42,3	38,7	37,8
R4	52,1	51,4	50,6	49,2	49,2	48,5	46,3	44,7	42,5	39,0	38,1
R5	51,6	51,0	50,2	48,8	48,8	48,1	45,9	44,2	42,1	38,5	37,6
R6	51,3	50,7	49,9	48,4	48,4	47,8	45,5	43,9	41,7	38,1	37,2
R7	51,7	51,1	50,3	48,9	48,8	48,2	46,0	44,3	42,2	38,6	37,8
R8	49,6	49,0	48,2	46,7	46,7	46,0	43,8	42,1	39,8	36,1	35,1
R9	53,0	52,4	51,6	50,2	50,2	49,5	47,3	45,7	43,6	40,1	39,3
R10	52,7	52,1	51,3	49,8	49,8	49,2	47,0	45,3	43,2	39,7	38,9
R11	50,8	50,2	49,4	48,0	48,0	47,3	45,0	43,4	41,2	37,6	36,7
R12	49,7	49,1	48,2	46,8	46,8	46,1	43,8	42,1	39,9	36,2	35,2
R13	52,2	51,5	50,7	49,3	49,3	48,6	46,4	44,8	42,6	39,1	38,3
R14	52,8	52,2	51,4	50,0	50,0	49,3	47,1	45,5	43,4	39,9	39,1
R15	51,7	51,1	50,3	48,8	48,8	48,2	46,0	44,3	42,2	38,6	37,7



Kuva 5: Matalataajuisen sisämelun tasot vertailukiinteistön R10 kohdalla.

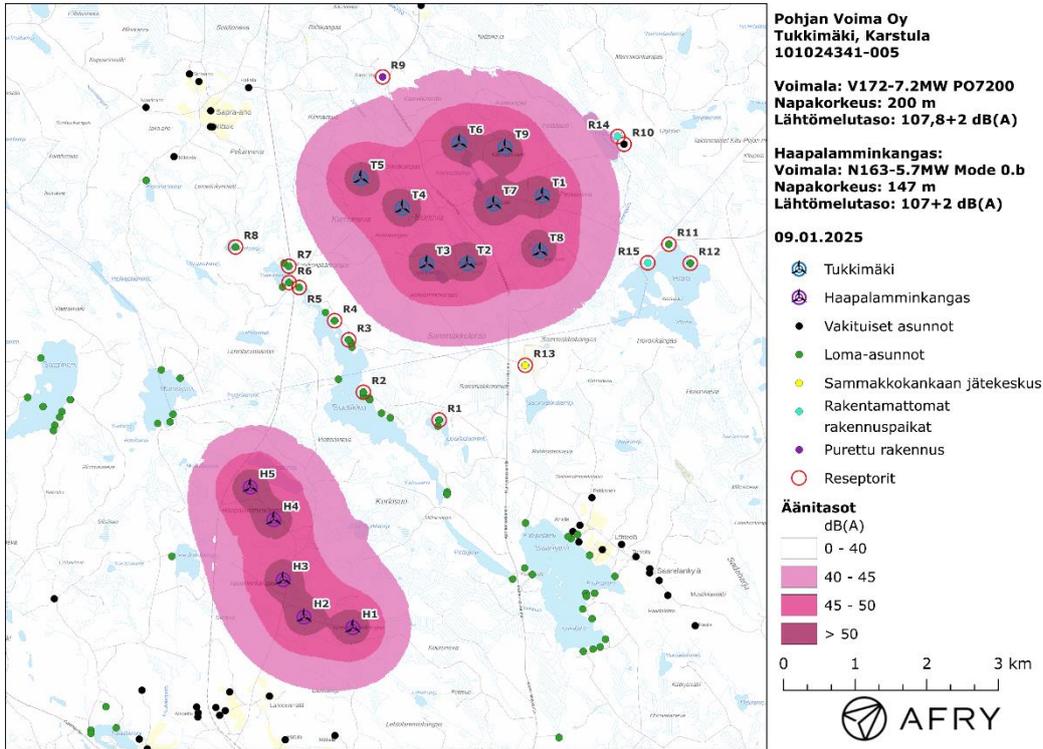
3.3 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Tukkimäen voimaloiden ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston melun yhteisvaikutuksia. Haapalamminkankaan viiden voimalan napakorkeus on 147 m ja turbiinityyppi N163 5.7 MW. Mallinuksissa turbiineille on käytetty melumoodia Mode 0.b (with serrated trailing edges), jonka äänitehotaso on 107,2 dB(A). Tähän äänitehotasoon on lisätty 2 dB:n varmuusarvo, joten Haapalamminkankaan voimaloille on käytetty äänitehotasoa 109,2 dB(A). Tätä äänitehotasoa voidaan pitää melumallinnusohjeistuksen mukaisena melupäästön tunnusarvona. Turbiinityypin melun taajuusjakaumat on saatu seuraavasta turbiinivalmistajan dokumentista:

- Third octave sound power level. Nordex N163/5.X VPC. F008_276a_A17_EN. Revision 03, 2021-09-13.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan keskiäänitaso L_{Aeq} on esitetty karttakuvana (Kuva 6). Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 8). Mallinnustulosten perusteella yhteisvaikutukset nostavat keskiäänitasoa enimmillään 2,4 dB(A) reseptorin R2 kohdalla. Muuten keskiäänitasojen nousu on yhteisvaikutuksissa 0–1,6 dB(A) välillä. Yhteisvaikutukset eivät aiheuta ohjearvon ylityksiä.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 9). Korkeimmat matalataajuisten melun tasot kohdistuvat reseptoripisteeseen R9. Koska kyseessä on purettu rakennus, jota toimenpidearvot eivät koske, lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvaan olemassa olevaan rakennukseen R4 ja verrataan niitä asumisterveysasetuksen arvoihin. Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.



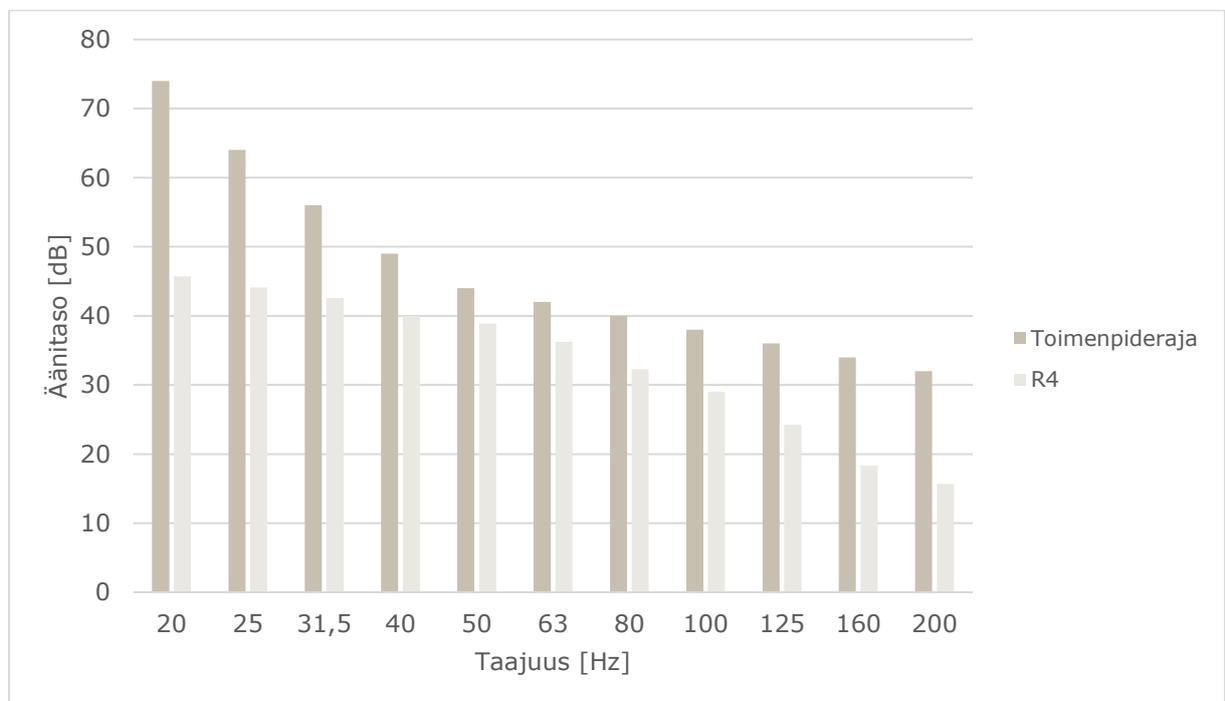
Kuva 6: Keskiäänitasot L_{Aeq} , kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen voimalat ja Haapalamminkankaan voimalat.

Taulukko 8: Keskiäänitasot L_{Aeq} reseptoripisteiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimalat.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	35,6
R2	36,3
R3	37,6
R4	36,6
R5	37,0
R6	36,6
R7	37,0
R8	33,9
R9	38,4
R10	38,5
R11	35,5
R12	34,9
R13	37,3
R14	39,1
R15	36,9

Taulukko 9: Matalataajuisten ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimat.

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	52,2	51,0	50,5	49,0	49,2	47,6	45,5	44,5	41,1	37,4	36,2
R2	52,8	51,6	51,2	49,6	49,8	48,2	46,1	45,3	41,7	37,9	36,8
R3	53,3	52,3	51,7	50,2	50,3	49,1	47,0	45,8	42,9	39,3	38,3
R4	53,3	52,4	51,8	50,3	50,4	49,2	47,1	45,8	43,0	39,4	38,5
R5	52,8	51,9	51,2	49,7	49,8	48,7	46,6	45,3	42,5	38,9	37,9
R6	52,5	51,6	51,0	49,5	49,6	48,4	46,3	45,0	42,2	38,5	37,6
R7	52,7	51,8	51,2	49,7	49,8	48,7	46,5	45,2	42,5	38,9	38,0
R8	51,0	50,0	49,4	47,9	48,0	46,8	44,6	43,3	40,4	36,6	35,5
R9	53,3	52,6	51,8	50,4	50,4	49,6	47,4	45,9	43,6	40,1	39,3
R10	52,9	52,2	51,5	50,0	50,0	49,3	47,1	45,5	43,3	39,7	38,9
R11	51,3	50,5	49,8	48,3	48,3	47,5	45,3	43,7	41,3	37,7	36,7
R12	50,2	49,5	48,7	47,2	47,3	46,4	44,1	42,5	40,0	36,3	35,3
R13	52,9	52,1	51,4	49,9	50,0	49,0	46,8	45,4	42,9	39,3	38,4
R14	53,1	52,4	51,6	50,2	50,2	49,4	47,2	45,6	43,4	39,9	39,1
R15	52,1	51,4	50,6	49,2	49,2	48,4	46,2	44,6	42,3	38,7	37,8



Kuva 7: Matalataajuisten sisämelun tasot vertailukiinteistön R4 kohdalla, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimat.

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitussuunnitelmalle. Vaikutusten arviointi on tehty napakorkeudella 200 m, voimalatyypin V172 7.2 MW taajuusjakaumilla ja käyttäen 2,0 dB(A):n varmuusarvoa valmistajan ilmoittamalle melupäästölle.

Mallinnusten perusteella melutasot jäävät alle valtioneuvoston asetuksessa esitetyn 40 dB(A):n ohje-arvon kaikkien loma- ja asuinrakennusten kohdalla. Myös matalataajuisen melun tasot pysyvät asumisterveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella. Meluvaikutuksia arvioitiin lisäksi kahden rakentamattoman rakennuspaikan, yhden puretun rakennuksen sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston kohdalla. Melun ohjearvo alittuu kaikilla rakentamattomilla rakennuspaikoilla sekä Sammakkokankaan toimiston edessä. Valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eivätkä teollisia rakennuksia.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistoista aiheutuu melko vähäistä melun yhteisvaikutusta asutuksen kohdalla. 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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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: 101024341-005.004				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 10.01.2025			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: AFRY Finland Oy							
Vastuhenkilöt: 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 serrated trailing edges)		Sarjanumero/t:	
Nimellisteho: 7.2 MW		Napakorkeus: 200 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							
Third octave noise emission EnVentus™ V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no 0128-4336_01. 2024-11-29.							
Alla oleviin arvoihin on jo lisätty 2 dB:n varmuusarvo							
Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
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 mittaustulos ja havainnot:											
Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus			Impulssimaisuus			Merkityksellinen sykintä (amplitudi- modulaatio)			Muu, mikä:		
kyllä	ei		kyllä	ei		kyllä	ei		kyllä	ei	
Laskentakorkeus						Laskentaruudun koko [m x m]					
4 m						10 m x 10 m					
Suhteellinen kosteus						Lämpötila					
70 %						15 C°					
Maastomallin lähde ja tarkkuus											
Maastomallin lähde: Maanmittauslaitos						Vaakaresoluutio: 2 m			Pystyresoluutio: 0,3 m		
Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet											
ISO 9613-2											
Vesialueet, (0) / (G)											
Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F)											
Maa-alueet (0) / (G)											
Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus											
Neutraali											
Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen											
Vapaa avaruus											
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)											
Asuinrakennukset: 0 kpl				Vapaa-ajan rakennukset: 0 kpl				Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl			
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)											
Asuinrakennukset: 0 kpl				Vapaa-ajan rakennukset: 0 kpl				Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl			
Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille											
Virkistysalueet: 0 kpl						Luonnonsuojelualueet: 0 kpl					
Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	49,8	49,2	48,4	46,9	46,9	46,3	44,0	42,3	40,1	36,4	35,4
R2	50,0	49,4	48,6	47,1	47,1	46,5	44,2	42,5	40,3	36,6	35,6
R3	51,8	51,2	50,4	48,9	48,9	48,3	46,1	44,4	42,3	38,7	37,8
R4	52,1	51,4	50,6	49,2	49,2	48,5	46,3	44,7	42,5	39,0	38,1
R5	51,6	51,0	50,2	48,8	48,8	48,1	45,9	44,2	42,1	38,5	37,6
R6	51,3	50,7	49,9	48,4	48,4	47,8	45,5	43,9	41,7	38,1	37,2
R7	51,7	51,1	50,3	48,9	48,8	48,2	46,0	44,3	42,2	38,6	37,8
R8	49,6	49,0	48,2	46,7	46,7	46,0	43,8	42,1	39,8	36,1	35,1
R9	53,0	52,4	51,6	50,2	50,2	49,5	47,3	45,7	43,6	40,1	39,3
R10	52,7	52,1	51,3	49,8	49,8	49,2	47,0	45,3	43,2	39,7	38,9
R11	50,8	50,2	49,4	48,0	48,0	47,3	45,0	43,4	41,2	37,6	36,7
R12	49,7	49,1	48,2	46,8	46,8	46,1	43,8	42,1	39,9	36,2	35,2
R13	52,2	51,5	50,7	49,3	49,3	48,6	46,4	44,8	42,6	39,1	38,3

Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R14	52,8	52,2	51,4	50,0	50,0	49,3	47,1	45,5	43,4	39,9	39,1
R15	51,7	51,1	50,3	48,8	48,8	48,2	46,0	44,3	42,2	38,6	37,7



Pohjan Voima Oy

Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys

101024341-005, 8.8.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Veera Hatulainen

E-mail
veera.hatulainen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
003

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
08/08/2024

Projektinumero
101024341-005

Raportin tila
VALMIS

Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	29.05.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	29.05.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	27.09.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	27.09.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalakoordinaattien muutokset. Rakentamattomien rakennuspaikkojen ja Sammakkokankaan jätekeskuksen lisääminen reseptoreiksi. Yhteisvaikutukset Haapalaminkankaan kanssa.
003	08.08.2024/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	08.08.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalakoordinaattien muutokset. Reseptorien päivitykset (Purettu rakennus, rakentamaton rakennuspaikka).

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

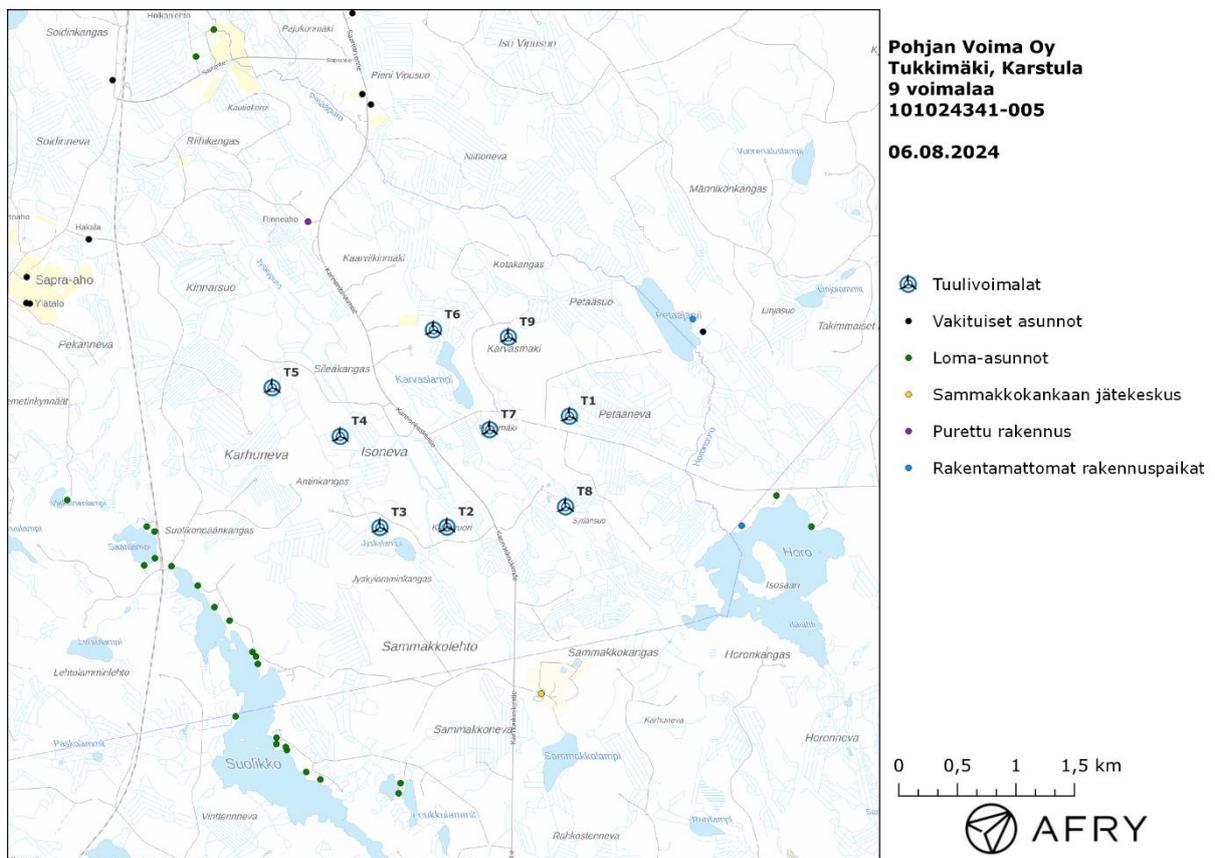
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjeavot	6
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus	12
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus	14
4	Yhteenveto	16
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	17
6	Viitteet.....	19

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitussuunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloilla on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyyppin V162 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levein kohta on 4,6 m (V162:n lapaprofiilin levein kohta on 4,3 m).

Selvityksessä arvioidaan myös Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään erillisessä luvussa 3.3.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (9 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	412016	6967514	178
T2	410971	6966562	182
T3	410399	6966558	176
T4	410059	6967341	171
T5	409479	6967758	167
T6	410855	6968256	168
T7	411335	6967398	172
T8	411983	6966736	185
T9	411495	6968193	185

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 iltajajat). 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 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 [3]. 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 raportissa mallinnettujen välketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.

3 Tuulivoimakohteen väkemannus

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 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, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 1,5 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 väkkelaskennan 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 väkkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 200 m roottorin halkaisijaa. 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. Toden näköisen 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 tuulisuusestimähti 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 Jyväskylän sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: 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	0,164	0,168	0,161	0,148	0,137	0,158

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jyväskylän sääasemalla.

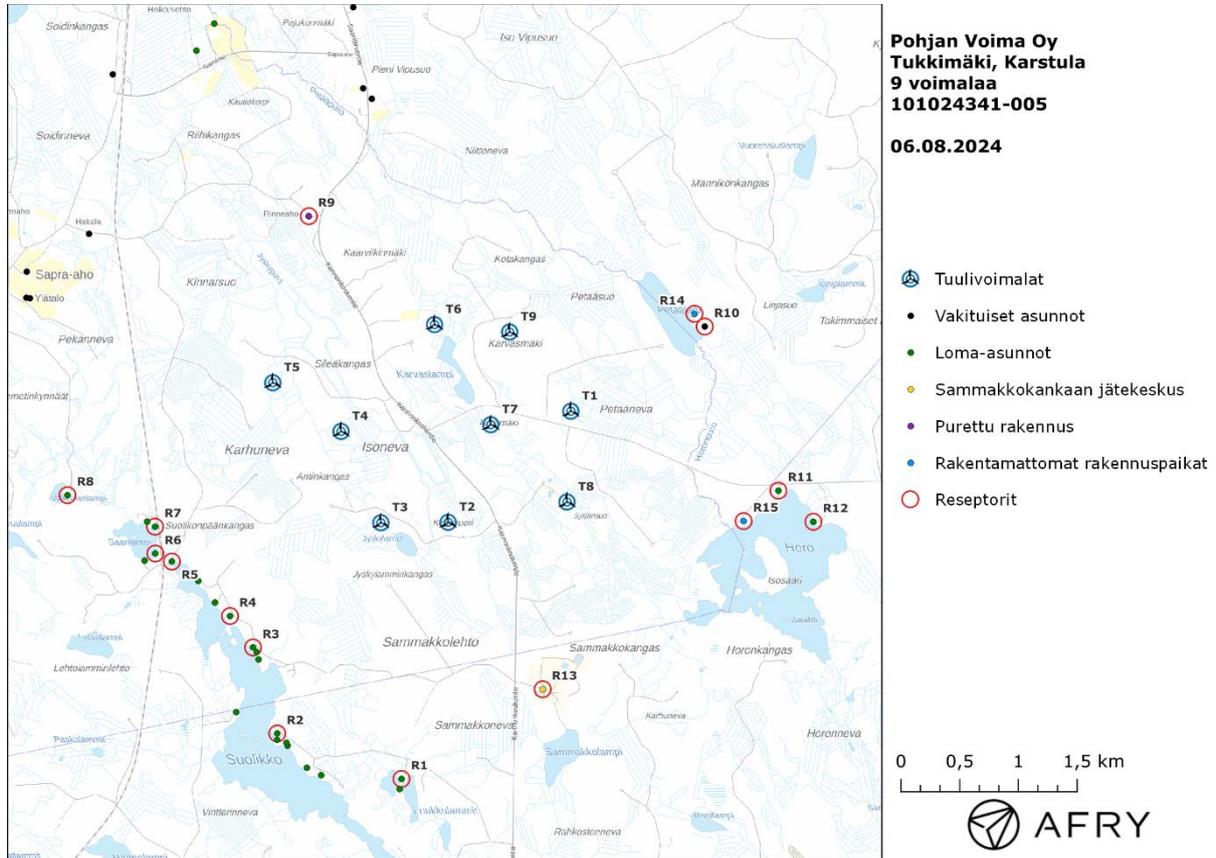
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,131
Helmikuu	0,256
Maaliskuu	0,373
Huhtikuu	0,402
Toukokuu	0,456
Kesäkuu	0,412
Heinäkuu	0,447
Elokuu	0,419
Syyskuu	0,315
Lokakuu	0,191
Marraskuu	0,095
Joulukuu	0,062

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 11 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto, yksi purettu rakennus sekä kaksi kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnot rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 15 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat noin 1,3 km etäisyydellä voimaloista. Reseptoripisteiden sijainnit suhteessa voimaloihin on esitetty karttakuvassa (Kuva 2).

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus	
R1	410575	6964361	186	lomarakennus	-
R2	409517	6964751	188	lomarakennus	-
R3	409311	6965488	185	lomarakennus	-
R4	409115	6965757	190	lomarakennus	-
R5	408620	6966224	186	lomarakennus	-
R6	408479	6966293	186	lomarakennus	-
R7	408476	6966523	187	lomarakennus	-
R8	407731	6966793	198	lomarakennus	-
R9	409786	6969184	169	lomarakennus	Purettu rakennus
R10	413157	6968238	171	vakituinen asuinrakennus	Käyttötarkoituksen muuttaminen erämajaksi on käynnissä.
R11	413784	6966832	179	lomarakennus	Metsähallituksen omistama. Käyttötarkoitus muutetaan tarvittaessa erämajaksi.
R12	414082	6966565	176	lomarakennus	-
R13	411777	6965130	200	teollinen rakennus	Piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.
R14	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R15	413488	6966571	177	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka neljälle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.



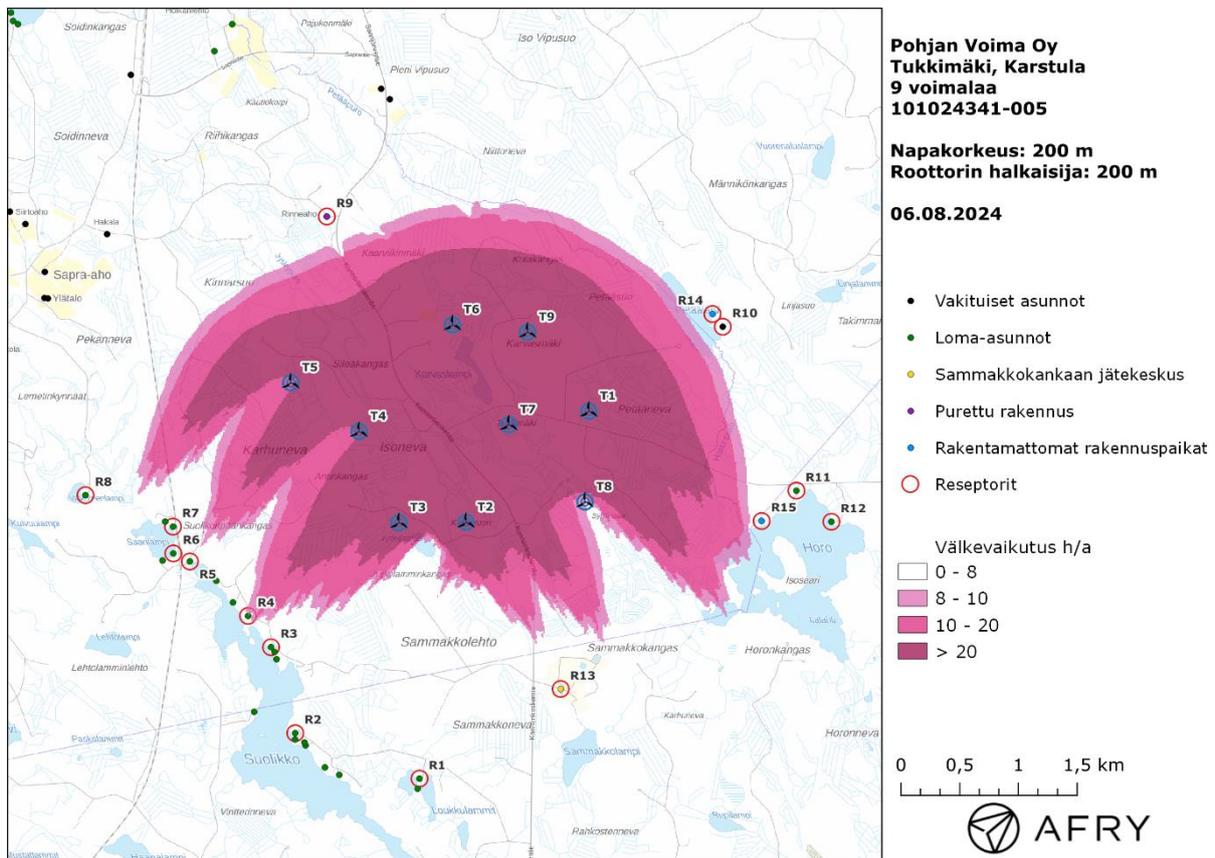
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

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. Tämän lisäksi karttakuvaan on merkitty rakentamattomat rakennuspaikat sekä piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu vuotuiset välkevaikutusajat sekä suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla. Vuotuinen välkevaikutus alittaa Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten, rakentamattomien rakennuspaikkojen, puretun rakennuksen sekä Sammakkokankaan jätekeskuksen kohdilla. Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eivätkä purettua rakennusta. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat omistajien kanssa sopimuksellisesti.

Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R4 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 6). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 5: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:00	0
R2	0:00	0
R3	2:13	5
R4	7:58	9
R5	5:25	7
R6	3:47	6
R7	3:32	6
R8	1:53	5
R9	4:48	8
R10	5:03	10
R11	2:13	4
R12	1:06	3
R13	2:55	5
R14	5:14	9
R15	5:14	7

Taulukko 6: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R4 kohdalla.

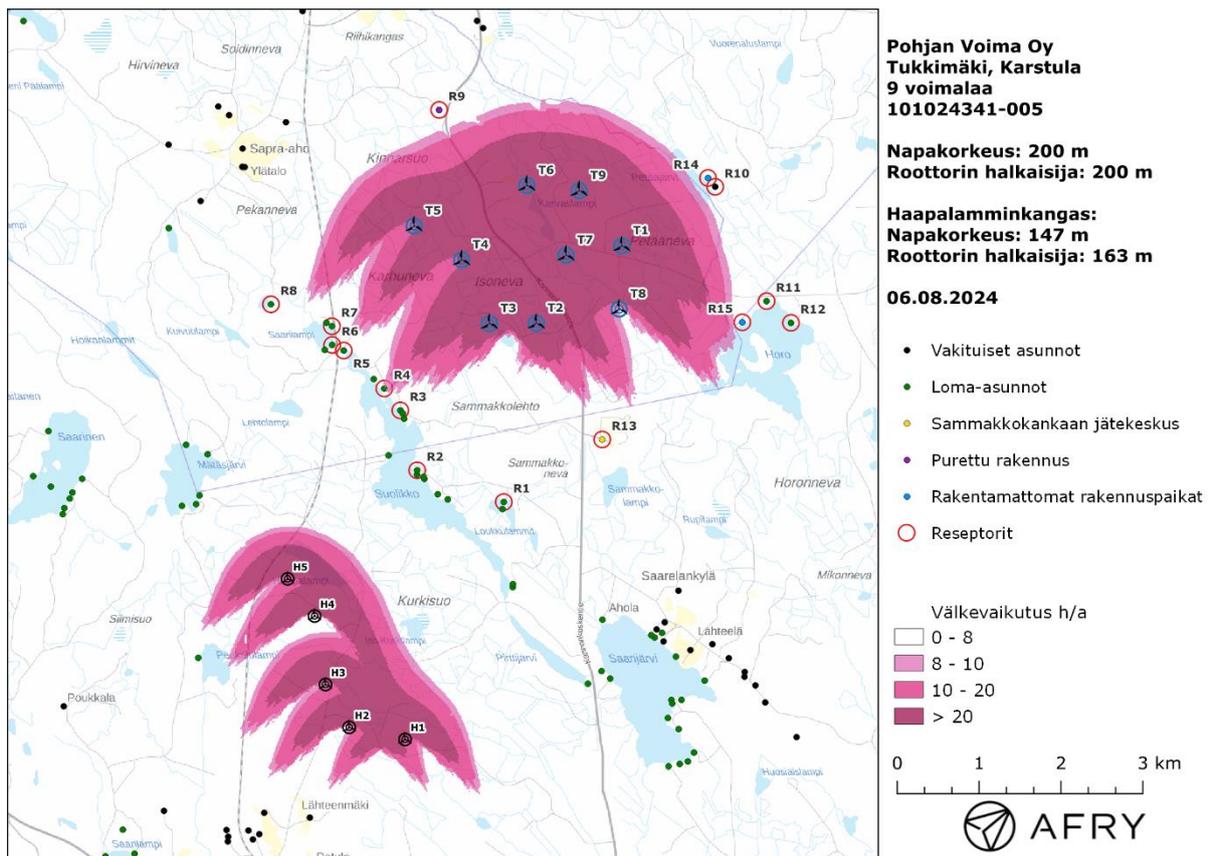
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Toukokuu	0:00	0:00	2:19	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:19
Kesäkuu	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
Heinäkuu	0:00	0:00	2:56	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:56
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	0:00	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	0:00	7:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:58

3.3 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Tukkimäen voimaloiden ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Haapalamminkankaan tuulivoimapuistossa on viisi voimalaa, joista lähimmät sijaitsevat noin neljän kilometrin etäisyydellä Tukkimäen voimaloista.

Haapalamminkankaan voimaloiden napakorkeus on 147 m ja voimalatyyppi N163 5.7 MW. Voimaloille on käytetty turbiinityypin N163 teknisten tietojen pohjalta arvioitua lapaprofiilia, jonka levein kohta on 4,15 m ja leveys 90 % etäisyydellä lavan tyvestä 1,11 m.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan todennäköinen välkkeen yhteisvaikutuksen mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Taulukossa (Taulukko 7) on lueteltu vuotuiset välkevaikutusajat sekä suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla. Mallinnusten perusteella Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Haapalamminkankaan voimalat lisäävät todennäköistä vuotuista välkevaikutusta reseptorin R2 kohdalla 12 minuutilla ja reseptorin R3 kohdalla yhdellä minuutilla. Muiden reseptoreiden kohdilla välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole eikä yhteisvaikutuksista aiheudu ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinnoissa huomioidaan Tukkimäen sekä Haapalamminkankaan voimalat.

Taulukko 7: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Haapalamminkankaan voimat.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:00	0
R2	0:12	1
R3	2:14	5
R4	7:58	9
R5	5:25	7
R6	3:47	6
R7	3:32	6
R8	1:53	5
R9	4:48	8
R10	5:03	10
R11	2:13	4
R12	1:06	3
R13	2:55	5
R14	5:14	9
R15	5:14	7

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitus-suunnitelmalle. Selvityksessä on myös arvioitu Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus alittaa 8 tunnin ohjearvon asuin- ja lomarakennuksilla, puretulla rakennuksella, rakentamattomilla rakennuspaikoilla sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen kohdalla. Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja, purettuja rakennuksia eikä teollisia rakennuksia.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistoista aiheutuu vain vähäistä välkkeen yhteisvaikutusta asutuksen kohdalla. Yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.

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 tiheysfunktiota turbiinin roottorikehien 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 tuulusuusuksilla.

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.

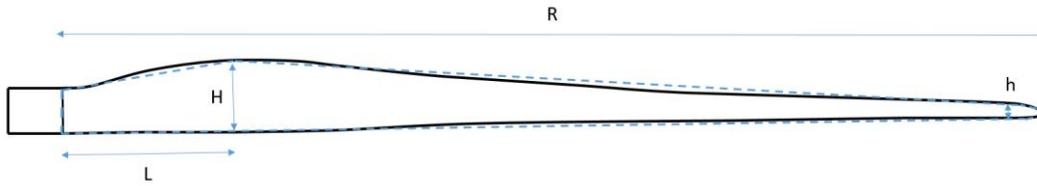
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 väkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan 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 väkelaskennassa 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. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.