



Pohjan Voima Oy

Tukkimäen tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE1)

101021203-003, 27.09.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Juulianna Lähteinen

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
27/09/2023

Projektinumero
101021203-003

Raportin tila
VALMIS

Tukkimäen tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE1)

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 Haapalamminkankaan kanssa.

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

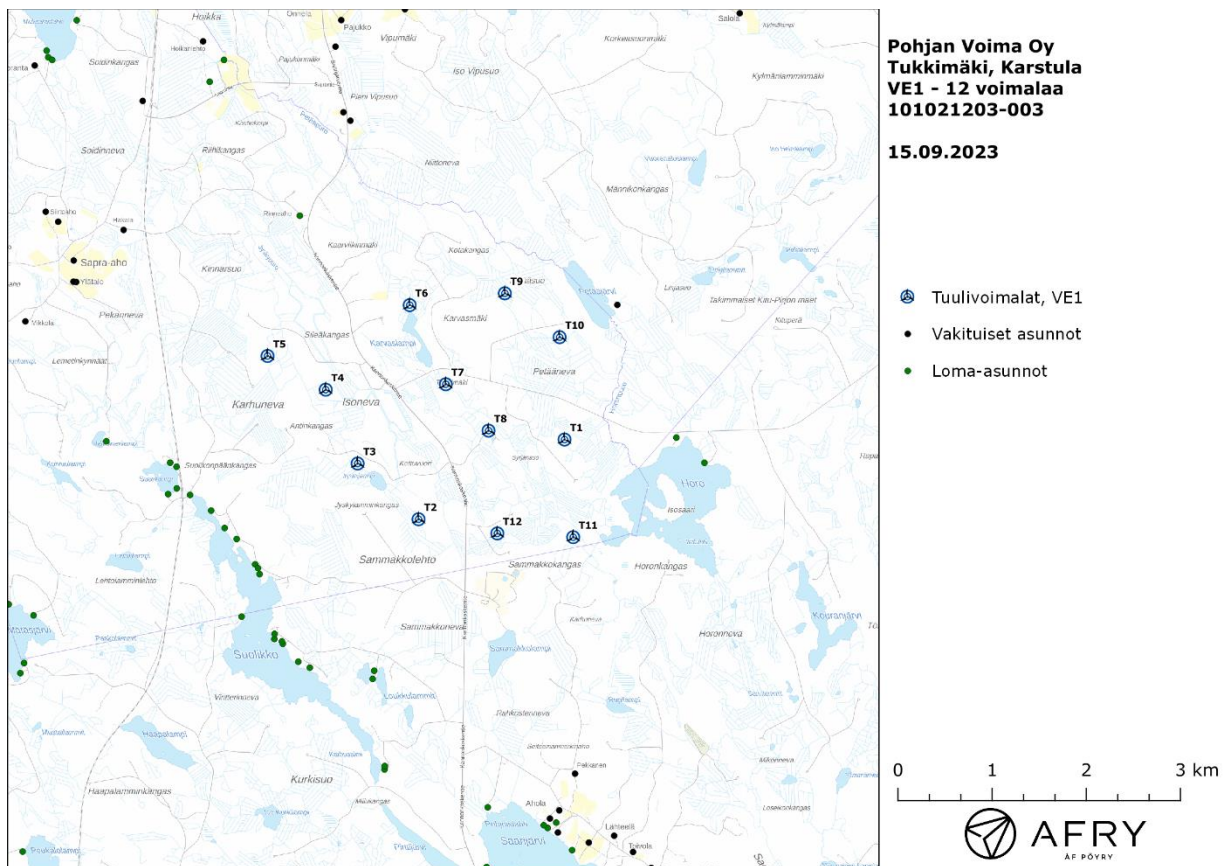
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden melu	6
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta	6
2.2	Melumallinnusohjeistus.....	7
2.3	Ohjearvot	8
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus	10
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus	10
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus	14
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus.....	17
4	Yhteenveto	21
5	Viitteet	22
6	Melumallinnuksen tiedot	23

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 12 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. 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 109,4 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 106,9 dB(A) + varmuusarvo 2,5 dB(A)). Valmistajan ilmoittamaan melupäästön lukuarvoon lisätään siis 2,5 dB varmuusarvo, joka on korkeampi kuin ympäristöministeriön ohjeistama 2 dB ohjeistuksen mukaisen tunnusarvon saavuttamiseksi. Tällä tavoin otetaan kohteen suunnittelussa huomioon myös turbiinityypit, joiden melupäästö on korkeampi kuin tässä selvityksessä käytetty V172.

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



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.

Taulukko 1: Tukkimäen tuulivoimaloiden (12 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	412595	6966812	177
T2	411045	6965968	182
T3	410399	6966558	176
T4	410059	6967341	172
T5	409442	6967698	170
T6	410951	6968237	166
T7	411335	6967399	174
T8	411789	6966907	176
T9	411961	6968362	163
T10	412543	6967897	173
T11	412687	6965777	183
T12	411882	6965817	185

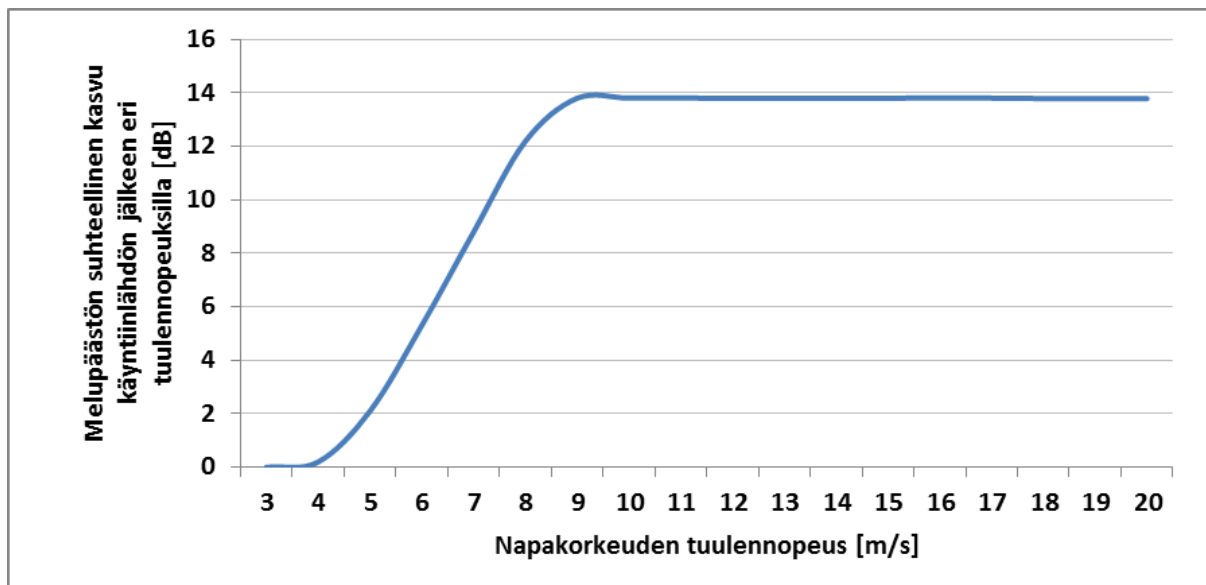
2 Tuulivoimaloiden melu

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 [14]. Tuulivoimamelu on A-taajuusjakaumaltaan painottunut tyypillisesti 200–1000 Hz:n väliin.

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen etupuolella suhteessa voimalan torniin. Katsottaessa aerodynaamisen melun suuntaavuutta ylhäältä käsin on siivistön äänitaso sivutuulen puolelta noin 4–6 dB alhaisempi kuin tuulen ylä- ja alapuolilla samalla etäisyydellä [18].

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



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

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

Taustamelu, kuten liikennemelu ja teollisuusmelu sekä tuulen tuottama aallokko- ja puustokohina, peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänet ovat ajallisesti ja tasoltaan vaihtelevia.

Tuulikohina esimerkiksi puustossa on taajuuskaistaltaan laajakaistaista ja tuulensuunnasta, puulajeista, vuodenajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1,5 m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemusperäisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [17].

Ilmakehän pystysuuntaisen stabiilisuuden ja ilmavirran turbulenssin vaihtelut vuorokauden eri aikoina voivat vaikuttaa tuulisuuden tasoon eri korkeuksilla [15]. Ilmakehän neutraalin stabiilisuuden vallitessa 8 m/s tuulennopeus 10 metrin korkeudella vastaa noin 12 m/s modernin voimalan napakorkeudella 139–149 m [16].

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

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

2.2 Melumallinnusohjeistus

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

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

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

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

mioon. Lisäksi matalataajuisen äänen eteneminen tulee mallintaa erikseen ohjeistuksessa määritellyn erillislaskennan avulla, joka perustuu Tanskassa annettuun ohjeistukseen, jonka parametreja on mukautettu Suomen olosuhteisiin [3]. Laskennassa otetaan huomioon geometrinen etäisyysvaimennus sekä ohjeistuksen mukaiset ilmakehän absorptio 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 suosittamat suunnitteluarvot tuulivoimaloiden ulkomelutasoille [8].

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

Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2).

Taulukko 2: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.

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

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

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

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

3 Tuulivoimakohteen melumallinnus

3.1 Keskiäänitasojen LAeq mallinnus

Tuulivoimaloiden aiheuttaman keskiäänitason mallinnus on suoritettu laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. 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_00. 2022-06-30.

Dokumenttia varten turbiinityypin V172 testimittauksia ei ollut saatavilla. Esitetyt melutasot perustuvat turbiinityypillä V136 tehtyihin mittauksiin, joiden perusteella V172:n melutasoja on arvioitu dokumentissa esitetyllä tavalla. Dokumentissa ilmoitettuihin melutasoihin on lisätty 2,5 dB:n varmuusarvo, joka on korkeampi kuin ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeistuksen mukainen 2 dB [10]:

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

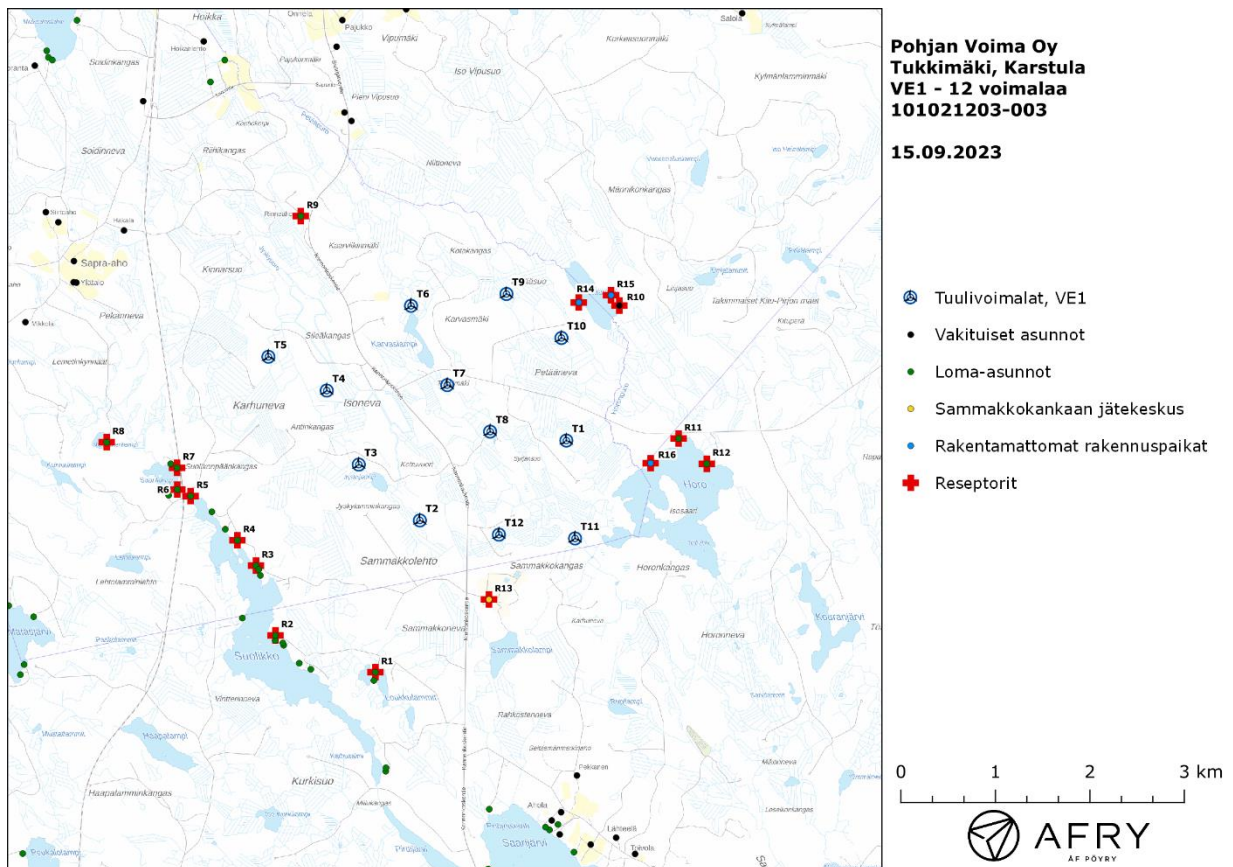
Turbiinityypin V172 7.2 MW PO7200 äänitehotaso on 106,9 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoa 109,4 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulen nopeutta 15 m/s napakorkeudella 200 m, jonka arvioidaan vastaavan melumallinnusohjeistuksen mukaista referenssinopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksissa.

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

Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 10 m. Ilmakehän 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 12 vertailurakennusta, Sammakokankaan jätekeskuksen toimisto sekä kolme kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnot rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 16 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi ja niiden kohdilla tarkastellaan tarkemmin LAeq ja matalataajuisen melun tasoja.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat n. 400-900 metrin etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Muut reseptoripisteet sijaitsevat yli 1,2 km etäisyydellä voimaloista. Reseptoripisteiden sijainnit suhteessa voimaloihin on esitetty karttakuvassa (Kuva 3).



Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

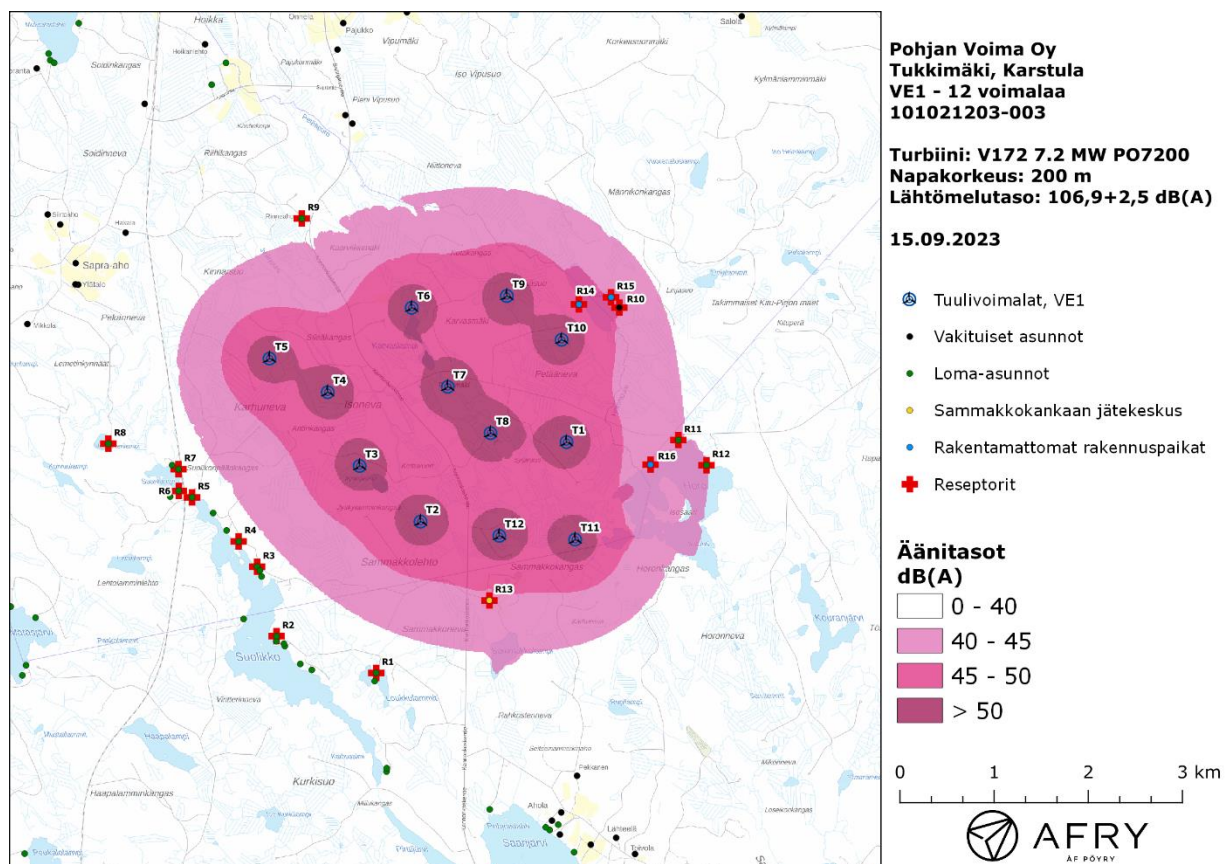
Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus	Lisätietoja
R1	410575	6964361	186	lomarakennus	-
R2	409517	6964751	188	lomarakennus	-
R3	409311	6965488	185	lomarakennus	-
R4	409115	6965757	190	lomarakennus	-
R5	408620	6966224	186	lomarakennus	-
R6	408479	6966293	186	lomarakennus	-
R7	408476	6966523	187	lomarakennus	-
R8	407731	6966793	198	lomarakennus	-
R9	409786	6969184	169	lomarakennus	-
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	412728	6968271	170	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka kolmelle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.
R15	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R16	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 sekä piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.

Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5). Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot ylittävät valtioneuvoston asetuksen 40 dB(A):n ohjearvon yhden vakituisen asuinrakennuksen (R10) ja yhden lomarakennuksen (R11) kohdalla. Kyseisen vakituisen asuinrakennuksen käyttötarkoituksen muutos erämajaksi on käynnissä. Lomarakennus on puolestaan Metsähallituksen omistuksessa ja sen käyttötarkoitus tullaan muuttamaan tarvittaessa erämajaksi. Valtioneuvoston asetuksen ohjearvot eivät koske erämajoja. Muiden asuin- ja lomarakennusten kohdilla meluvaikutukset jäävät alle ohjearvon.

Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot ylittyvät kahden rakennuksen lisäksi kolmella rakentamattomalla rakennuspaikalla sekä Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edessä. Valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot eivät kuitenkaan koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eivätkä teollisia rakennuksia. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat kiinteistöjen omistajien kanssa sopimuksellisesti.



Kuva 4: Keskiäänitasot LAeq tuulivoimapaiston hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.

Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	37,4
R2	36,1
R3	38,3
R4	36,9
R5	37,8
R6	37,3
R7	37,7
R8	34,9
R9	38,7
R10	43,9
R11	40,4
R12	39,8
R13	44,0
R14	47,3
R15	44,5
R16	42,6

3.2 Matalataajuisen melun mallinnus

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

Meluvaikutus

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

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

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyysparametrit perustuvat tutkimukseen suomalaisten pientalojen äänieristävyden 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 ylittivät 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 ääneneristävyyssarvoja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyyden arvot.

Taulukko 6: Rakennuksen äänieristävyyden arvoja taajuuskaistoittain.

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

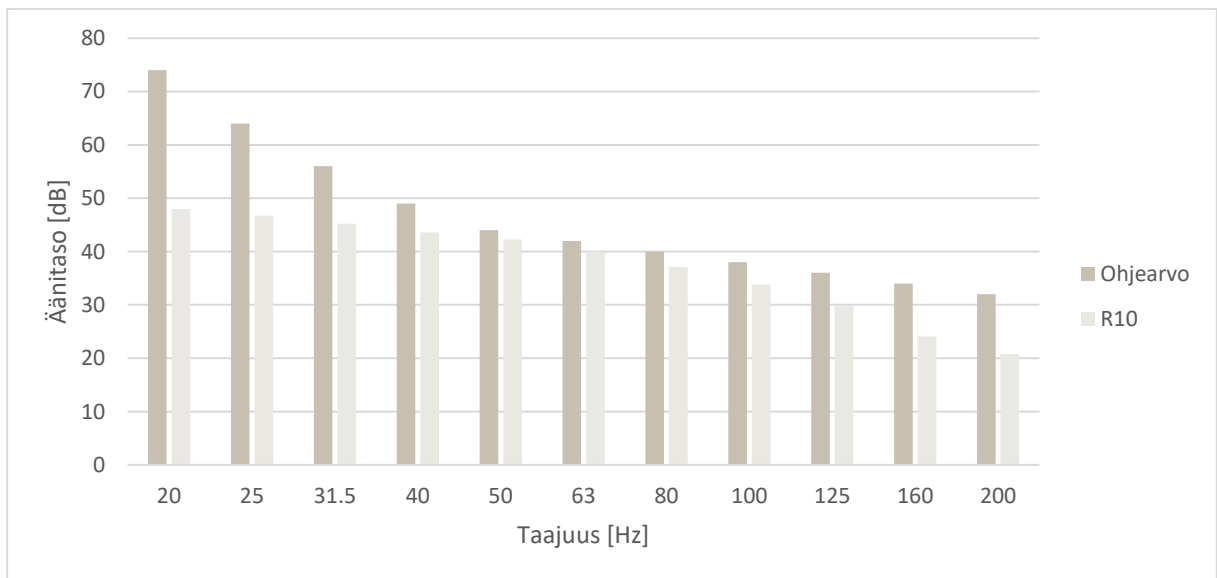
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso 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 R14. Koska kyseessä on rakentamaton rakennuspaikka, jota ohjearvot eivät koske, lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvaan olemassa olevaan rakennukseen R10 ja verrataan niitä asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 5). Kun otetaan huomioon rakennuksen ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 3) lisäksi ohjearvot päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Yöaikainen (klo 22–7) keskiäänitaso ei saa ylittää 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unhäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona $L_{eq,1h}$ mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen. Lähtökohtaisesti näiden yöajan ohjearvojen oletetaan alittuvan, mikäli melumallinnuksen tulos ulkona sekä matalataajuisen melun tulokset alittavat valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot. Raportin mallinnusten perusteella voimaloiden aiheuttamat ulkomelutasot ylittävät 40 dB(A):n ohjearvon kahden rakennuksen, kolmen rakentamattoman rakennuspaikan sekä Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston kohdalla. On mahdollista, että kyseisten reseptoreiden kohdalla myös asumisterveysasetuksen 30 dB(A):n ohjearvo yöajan sisämelutasolle ylittyy. Valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eivätkä teollisia rakennuksia.

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

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	51,4	50,8	50,2	49,7	49,5	48,8	47,6	46,1	43,9	40,3	38,5
R2	50,8	50,2	49,5	49,1	48,9	48,1	47,0	45,5	43,2	39,6	37,7
R3	52,1	51,5	50,9	50,5	50,2	49,5	48,4	46,9	44,7	41,2	39,4
R4	52,2	51,6	51,0	50,5	50,3	49,6	48,5	47,0	44,8	41,3	39,5
R5	51,6	51,0	50,4	50,0	49,8	49,0	47,9	46,4	44,2	40,6	38,8
R6	51,3	50,7	50,1	49,6	49,4	48,7	47,5	46,0	43,9	40,2	38,4
R7	51,7	51,1	50,4	50,0	49,8	49,0	47,9	46,4	44,3	40,7	38,9
R8	49,6	49,0	48,4	47,9	47,7	46,9	45,7	44,2	42,0	38,2	36,3
R9	52,5	51,9	51,2	50,8	50,6	49,9	48,7	47,3	45,1	41,6	39,8
R10	55,6	55,0	54,4	53,9	53,8	53,0	51,9	50,6	48,5	45,1	43,6
R11	53,5	52,9	52,3	51,9	51,6	50,9	49,8	48,4	46,3	42,8	41,1
R12	52,3	51,6	51,0	50,6	50,4	49,6	48,5	47,1	44,9	41,3	39,6
R13	56,2	55,6	55,0	54,6	54,4	53,7	52,6	51,2	49,2	45,8	44,3
R14	58,5	57,9	57,3	56,9	56,7	56,0	54,9	53,6	51,6	48,3	46,9
R15	55,7	55,1	54,5	54,1	53,9	53,2	52,1	50,7	48,7	45,3	43,8
R16	55,0	54,3	53,7	53,3	53,1	52,4	51,3	49,9	47,8	44,4	42,8



Kuva 5: Matalataajuisen sisämelun tasot vertailukiinteistön R10 kohdalla.

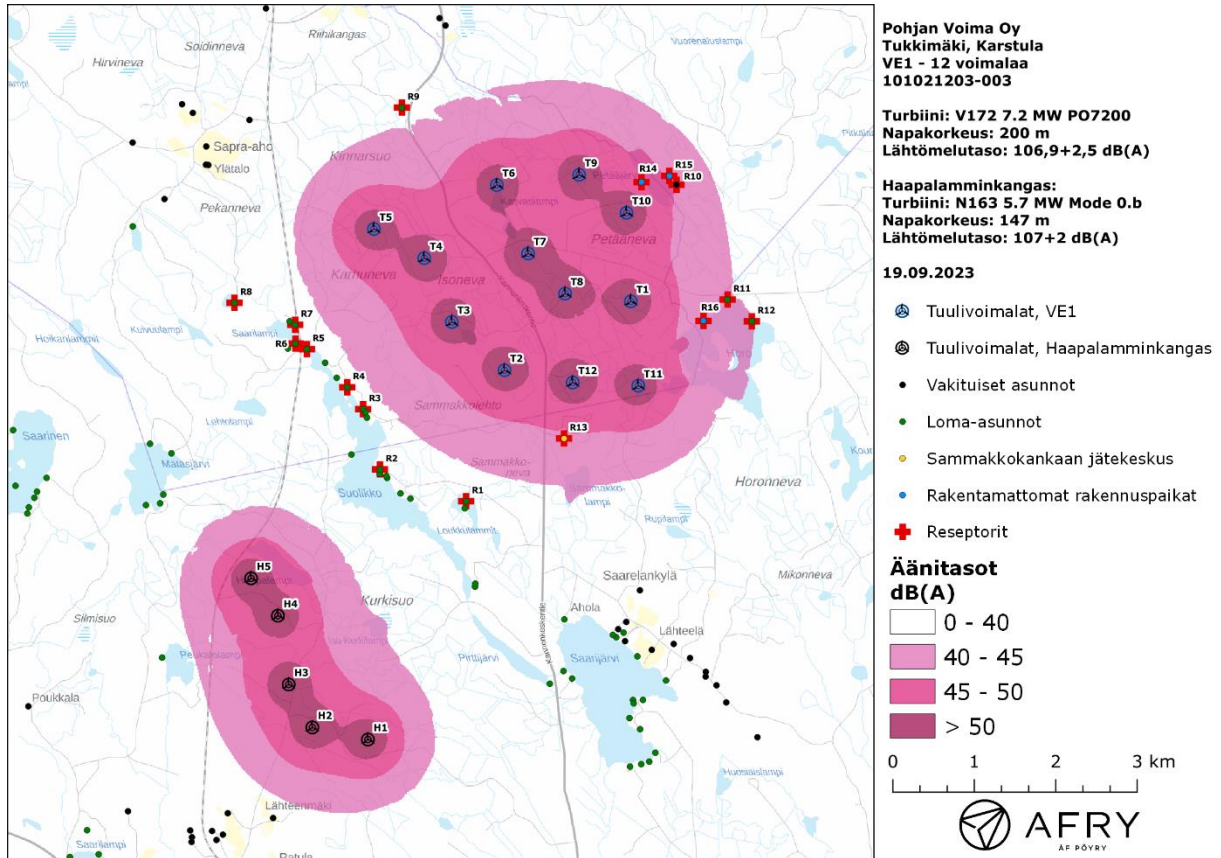
3.3 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus

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(A):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 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan melun yhteisvaikutuksissa keskiäänitasot ylittyvät reseptoripisteissä R10, R11 sekä R13-R16, jotka ovat samat kuin melumallinnuksessa, jossa on huomioitu pelkästään Tukkimäen voimalat. Melun ohjearvojen ylitykset aiheutuvat siis Tukkimäen voimaloista. Yhteisvaikutukset nostavat keskiäänitasoa enimmillään 1,6 dB(A) reseptorin R2 kohdalla. Muuten keskiäänitasojen nousu on yhteisvaikutuksissa 0–0,8 dB(A) välillä.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 9). Korkeimmat matalataajuisten melun tasot kohdistuvat reseptoriin R14. Koska kyseessä on rakentamaton rakennuspaikka, joita ohjearvot eivät koske, lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvaan olemassa olevaan rakennukseen R10 ja verrataan niitä asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 7). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.



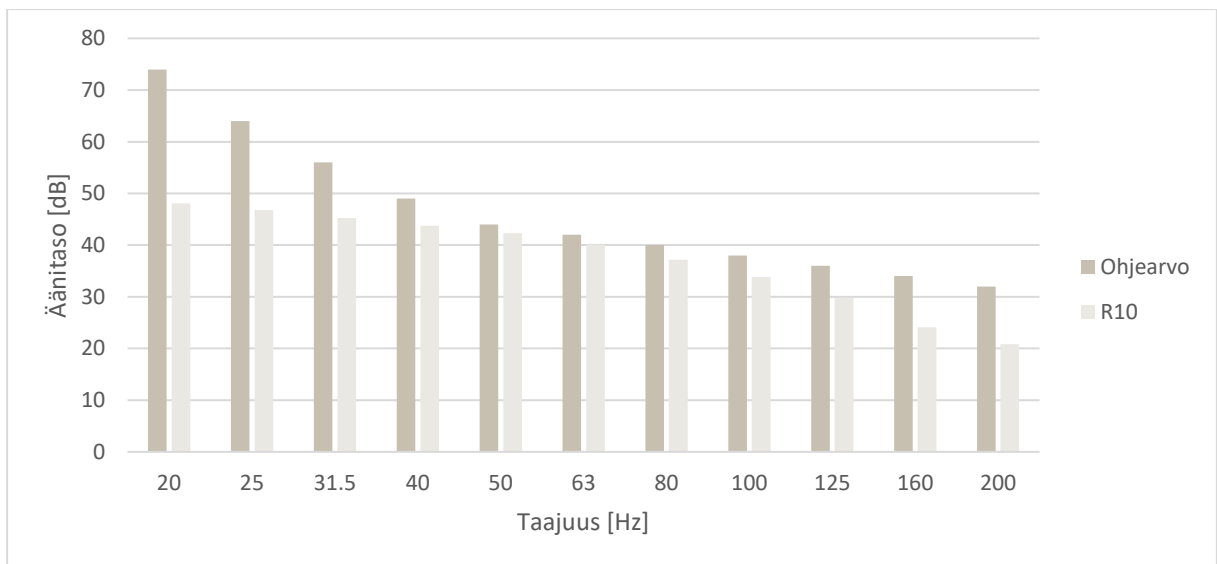
Kuva 6: Keskiäänitasot L_{Aeq} , kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen (VE1) voimalat ja Haapalamminkankaan voimalat.

Taulukko 8: Keskiäänitasot Laeq reseptoripisteiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimat.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	38,2
R2	37,7
R3	38,9
R4	37,6
R5	38,1
R6	37,7
R7	38,0
R8	35,1
R9	38,8
R10	43,9
R11	40,5
R12	39,9
R13	44,1
R14	47,3
R15	44,5
R16	42,6

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	53,1	52,1	51,7	50,9	50,9	49,6	48,3	47,2	44,4	40,8	38,9
R2	53,2	52,1	51,7	50,8	50,9	49,3	48,0	47,1	44,0	40,3	38,4
R3	53,5	52,6	52,1	51,4	51,3	50,1	48,9	47,7	45,1	41,5	39,7
R4	53,4	52,5	52,0	51,4	51,3	50,1	48,9	47,7	45,1	41,5	39,8
R5	52,8	51,9	51,4	50,7	50,6	49,5	48,3	47,0	44,5	40,9	39,1
R6	52,5	51,6	51,1	50,4	50,4	49,2	48,0	46,7	44,2	40,5	38,7
R7	52,7	51,8	51,3	50,7	50,5	49,5	48,3	47,0	44,5	40,9	39,1
R8	51,0	50,0	49,5	48,8	48,7	47,5	46,2	45,0	42,3	38,5	36,6
R9	52,8	52,1	51,5	51,0	50,8	50,0	48,8	47,4	45,2	41,6	39,9
R10	55,7	55,1	54,5	54,0	53,8	53,1	52,0	50,6	48,5	45,1	43,6
R11	53,8	53,1	52,5	52,0	51,8	51,0	49,9	48,5	46,3	42,8	41,1
R12	52,6	51,9	51,3	50,8	50,6	49,8	48,6	47,2	45,0	41,4	39,6
R13	56,5	55,9	55,3	54,8	54,6	53,8	52,7	51,4	49,3	45,9	44,4
R14	58,5	57,9	57,3	56,9	56,7	56,0	55,0	53,6	51,6	48,3	46,9
R15	55,8	55,2	54,6	54,1	54,0	53,2	52,1	50,8	48,7	45,3	43,8
R16	55,1	54,5	53,9	53,4	53,2	52,5	51,4	50,0	47,9	44,4	42,8



Kuva 7: Matalataajuisten sisämelun tasot vertailukiinteistön R10 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 12 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Vaikutusten arviointi on tehty napakorkeudella 200 m, voimalatyypin V172 7.2 MW taajuusjakaumilla ja käyttäen 2,5 dB(A):n varmuusarvoja valmistajan ilmoittamalle melupäästölle. Selvityksessä on arvioitu myös Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston melun yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten perusteella melutasot ylittävät 40 dB(A):n ohjearvon yhdellä asuinrakennuksella ja yhdellä lomarakennuksella. Asuinrakennuksen käyttötarkoituksen muutos erämajaksi on prosessissa ja lomarakennuksen käyttötarkoitus tullaan muuttamaan tarvittaessa erämajaksi. Melun ohjearvot koskevat pelkästään asuin- ja lomarakennuksia.

Meluvaikutuksia arvioitiin lisäksi kolmen rakentamattoman rakennuspaikan sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston kohdalla. Melun ohjearvo ylittyy kaikissa edellä mainituissa paikoissa. Valtioneuvoston asetukset 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 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Astui voimaan 1.9.2015.
- [10] Yhteenveto tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvon käyttämisestä meluselvityksissä liittyvästä kyselystä. Ympäristöministeriö, 14.9.2016.
- [11] Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriö, Ohje I 1995.
- [12] IECRE - IEC System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Renewable Energy Applications. IECRE.WE.TC.21.0091-R1, EnVentus V162. 20.8.2021, DNV Renewables Certification.
- [13] C. A. León: Trailing Edge Serrations, Effect of Their Flap Angle on Flow and Acoustics. 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, 2nd to 5th May 2017.
- [14] M. Gupta, K. Madsen: Advancements in continuous learning for tonality free turbine design. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [15] K. Bolin: The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise. Acta Acustica united with Acustica, Vol 98 (2012) pages 741-748.
- [16] G.P. van den Berg: The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral Thesis, University of Groningen, Holland, 2006.
- [17] D. Halstead, N. Tam: A study of background noise levels measured during far-field receptor testing of wind turbine facilities. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [18] S. Oerlemans, J.G. Schepers: Prediction of wind turbine noise directivity and swish, Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark, 2009.

6 Melumallinnuksen tiedot

RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT							
Mallinnusraportin numero/tunniste: 101021203-003.002				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 27.09.2023			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: AFRY Finland Oy							
Vastuhenkilöt: Juulianna Lähteinen ja Erkki Heikkola							
Laatija: Juulianna Lähteinen				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_00. 2022-06-30.							
Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	63,7	200	98,0	2000	92,4
63	92,4	25	68,9	250	98,6	2500	90,1
125	100,0	31,5	73,8	315	98,8	3150	87,5
250	103,3	40	78,6	400	98,9	4000	84,5
500	103,5	50	83,0	500	98,7	5000	81,1
1000	101,9	63	86,8	630	98,6	6300	77,4
2000	97,4	80	90,2	800	98,1	8000	73,3
4000	89,9	100	92,9	1000	97,2	10000	68,9
8000	79,2	125	95,2	1250	95,9		
		160	96,8	1600	94,4		

Melun erityispiirteiden mittausta 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: 1 kpl			Vapaa-ajan rakennukset: 1 kpl			Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl		
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)								
Asuinrakennukset: 1 kpl			Vapaa-ajan rakennukset: 1 kpl			Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl		
Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille								
Virkistysalueet: 0 kpl				Luonnonsuojelualueet: 0 kpl				
Hz	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
20	51,4	50,8	52,1	52,2	51,6	51,3	51,7	49,6
25	50,8	50,2	51,5	51,6	51,0	50,7	51,1	49,0
31,5	50,2	49,5	50,9	51,0	50,4	50,1	50,4	48,4
40	49,7	49,1	50,5	50,5	50,0	49,6	50,0	47,9
50	49,5	48,9	50,2	50,3	49,8	49,4	49,8	47,7
63	48,8	48,1	49,5	49,6	49,0	48,7	49,0	46,9
80	47,6	47,0	48,4	48,5	47,9	47,5	47,9	45,7
100	46,1	45,5	46,9	47,0	46,4	46,0	46,4	44,2
125	43,9	43,2	44,7	44,8	44,2	43,9	44,3	42,0
160	40,3	39,6	41,2	41,3	40,6	40,2	40,7	38,2
200	38,5	37,7	39,4	39,5	38,8	38,4	38,9	36,3

Hz	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16
20	52,5	55,6	53,5	52,3	56,2	58,5	55,7	55,0
25	51,9	55,0	52,9	51,6	55,6	57,9	55,1	54,3
31,5	51,2	54,4	52,3	51,0	55,0	57,3	54,5	53,7
40	50,8	53,9	51,9	50,6	54,6	56,9	54,1	53,3
50	50,6	53,8	51,6	50,4	54,4	56,7	53,9	53,1
63	49,9	53,0	50,9	49,6	53,7	56,0	53,2	52,4
80	48,7	51,9	49,8	48,5	52,6	54,9	52,1	51,3
100	47,3	50,6	48,4	47,1	51,2	53,6	50,7	49,9
125	45,1	48,5	46,3	44,9	49,2	51,6	48,7	47,8
160	41,6	45,1	42,8	41,3	45,8	48,3	45,3	44,4
200	39,8	43,6	41,1	39,6	44,3	46,9	43,8	42,8



Pohjan Voima Oy

Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE1)

101021203-003, 27.09.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Juulianna Lähteinen

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
27/09/2023

Projektinumero
101021203-003

Raportin tila
VALMIS

Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkesselvitys (VE1)

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	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 muutos. Rakentamattomien rakennuspaikkojen ja Sammakkokankaan jätekeskuksen lisääminen reseptoreiksi. Yhteisvaikutukset Haapalamminkankaan kanssa.

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

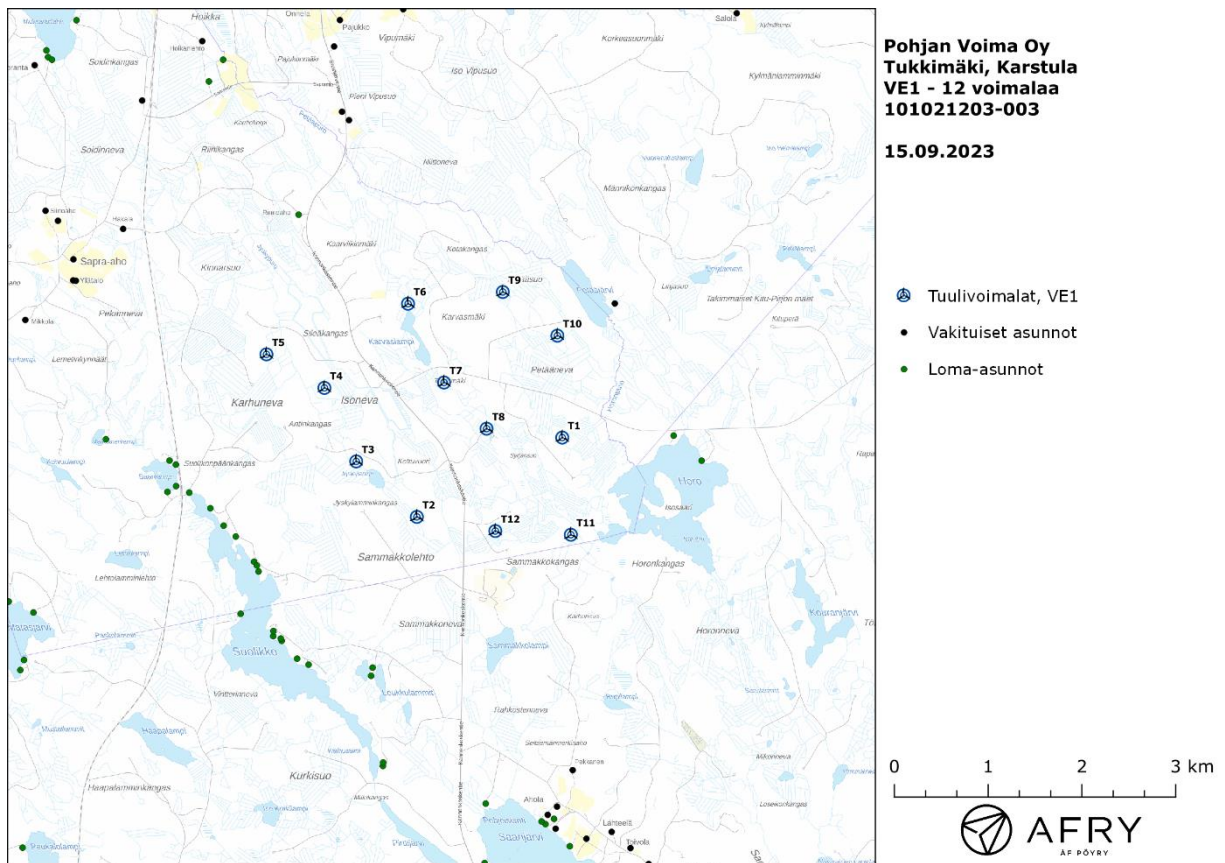
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjearvot	6
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus.....	12
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus.....	15
4	Yhteenveto	17
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	18
6	Viitteet.....	20

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 12 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. 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 sijoitussuunnitelmalla VE1.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (12 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	412595	6966812	177
T2	411045	6965968	182
T3	410399	6966558	176
T4	410059	6967341	172
T5	409442	6967698	170
T6	410951	6968237	166
T7	411335	6967399	174
T8	411789	6966907	176
T9	411961	6968362	163
T10	412543	6967897	173
T11	412687	6965777	183
T12	411882	6965817	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 iltat). 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 väkellaskennan 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 väkellaskennassa 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 säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Toden näköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen 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 tuulisuusestimäätti 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 mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntaakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: 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.

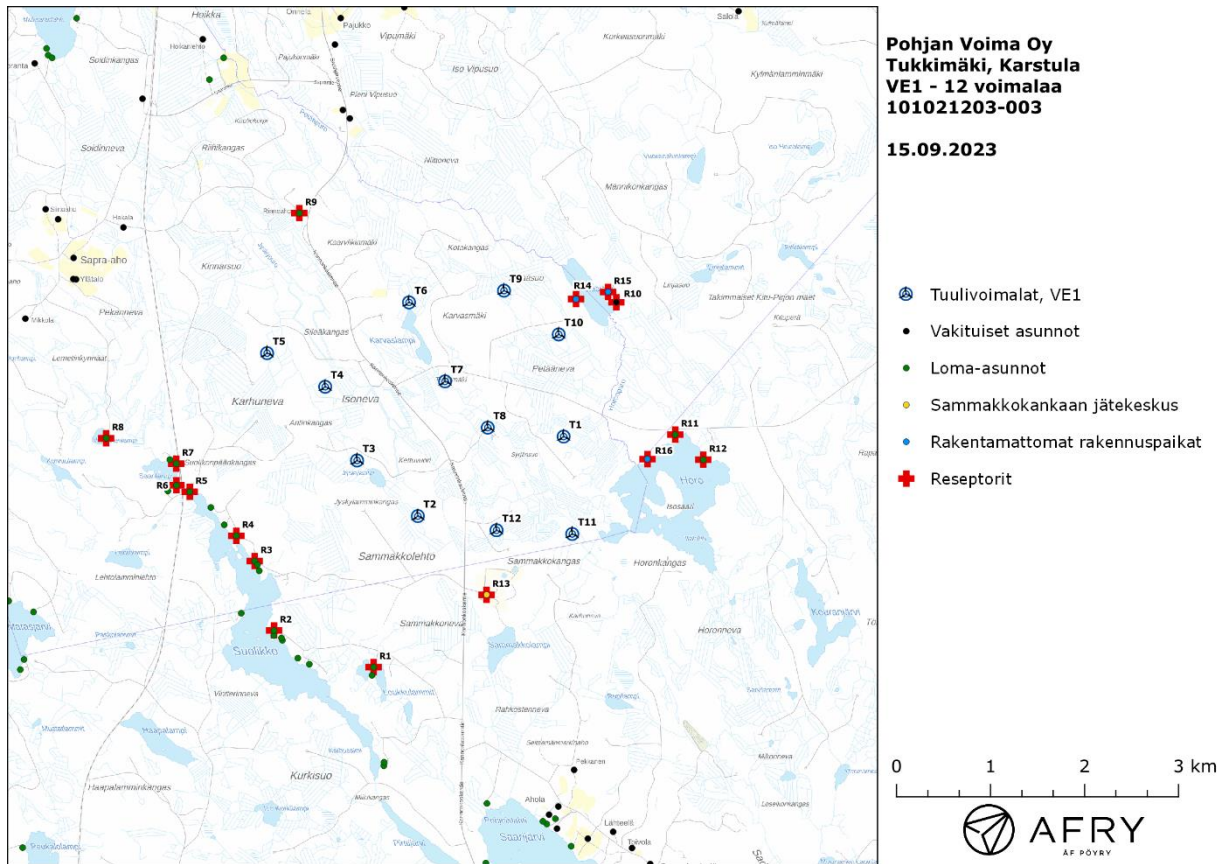
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,131
Helmikuu	0,256
Maaliskuu	0,373
Huhtikuu	0,402
Toukokuu	0,456
Kesäkuu	0,412
Heinäkuu	0,447
Elokuu	0,419
Syyskuu	0,315
Lokakuu	0,191
Marraskuu	0,095
Joulukuu	0,062

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 12 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto sekä kolme kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnot rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 16 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat n. 400-900 metrin etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Muut reseptoripisteet sijaitsevat yli 1,2 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	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	-
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	412728	6968271	170	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka kolmelle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.
R15	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R16	413488	6966571	177	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka neljälle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

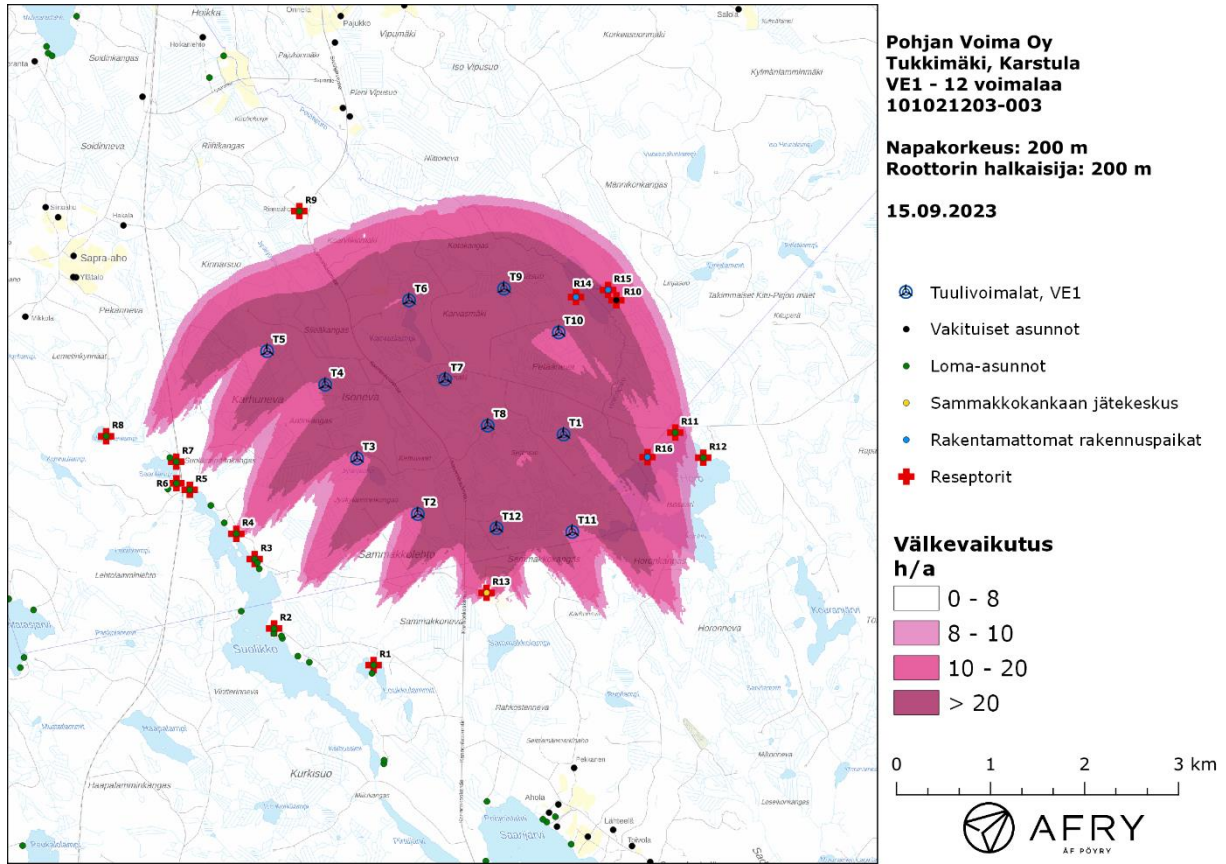
3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten väketuntien 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. Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon yhden vakituisen asuinrakennuksen (R10) ja yhden lomarakennuksen (R11) kohdalla. Kyseisen vakituisen asuinrakennuksen käyttötarkoituksen muutos erämajaksi on käynnissä. Lomarakennus on puolestaan Metsähallituksen omistuksessa ja sen käyttötarkoitus tullaan muuttamaan tarvittaessa erämajaksi. Välkevaikutuksille annetut ohjearvot eivät koske erämajoja. Muiden asuin- ja lomarakennusten kohdilla välkevaikutukset jäävät alle 8 tunnin. Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R10 ja R11 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6-Taulukko 7). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talvi-aika).

Välkemallinnuksen mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittyy kahden rakennuksen lisäksi kolmella rakentamattomalla rakennuspaikalla, joita välkkeen ohjearvot eivät kuitenkaan koske. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat omistajien kanssa sopimuksellisesti.

Sammakkokankaan jätekeskuksen vuotuinen välkevaikutus on mallinnuksen mukaan 9 h 46 min. Koska jätekeskus on avoinna arkisin klo. 07.00-17.00, huomioidaan välkkeet vain tältä ajalta. Sammakkokankaan jätekeskuksen ajoittumistaulukosta (Taulukko 8) nähdään, että välkevaikutuksen esiintyminen ajoittuu väleille 02.00-06.00 sekä 20.00-22.00 eikä välkettä synny aikavälillä 06.00-20.00 ollenkaan. Jätekeskuksen aukioloaikojen puitteissa ei siis synny välkettä. Välkevaikutuksen ohjearvot eivät koske teollisia rakennuksia.



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta sijoitussuunnitelmalla VE1.

Taulukko 5: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:00	0
R2	2:54	6
R3	1:36	5
R4	7:32	8
R5	5:17	8
R6	3:47	6
R7	3:18	6
R8	2:03	5
R9	4:01	5
R10	18:39	17
R11	12:46	11
R12	6:21	7
R13	9:46	18
R14	48:30	32
R15	18:50	18
R16	19:50	14

Taulukko 6: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R10 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	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:25
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22	0:24	0:01	0:00	0:00	0:00	0:47
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48	3:33	0:10	0:00	0:00	5:31
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:46	0:35	2:20	0:00	0:00	3:40
Toukokuu	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
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	1:35	0:00	0:00	1:40
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:21	1:14	0:35	0:00	0:00	5:10
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:42	0:14	0:00	0:00	0:00	0:56
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:28
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	0:00	0:00	0:00	0:00	1:14	7:02	5:42	4:40	0:00	0:00	18:39

Taulukko 7: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R11 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	0:51	0:08	0:00	0:00	0:00	0:59
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21	0:09	0:00	0:00	0:30
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48	0:25	0:00	0:00	2:13
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:26	0:00	1:26
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:03	0:00	2:03
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:35	0:00	2:35
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:32
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31	0:10	0:00	0:00	1:41
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:40	0:06	0:00	0:00	0:00	0:46
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:32	4:26	0:44	6:04	0:00	12:46

Taulukko 8: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R13 (Sammakkokankaan jätekeskus) kohdalla.

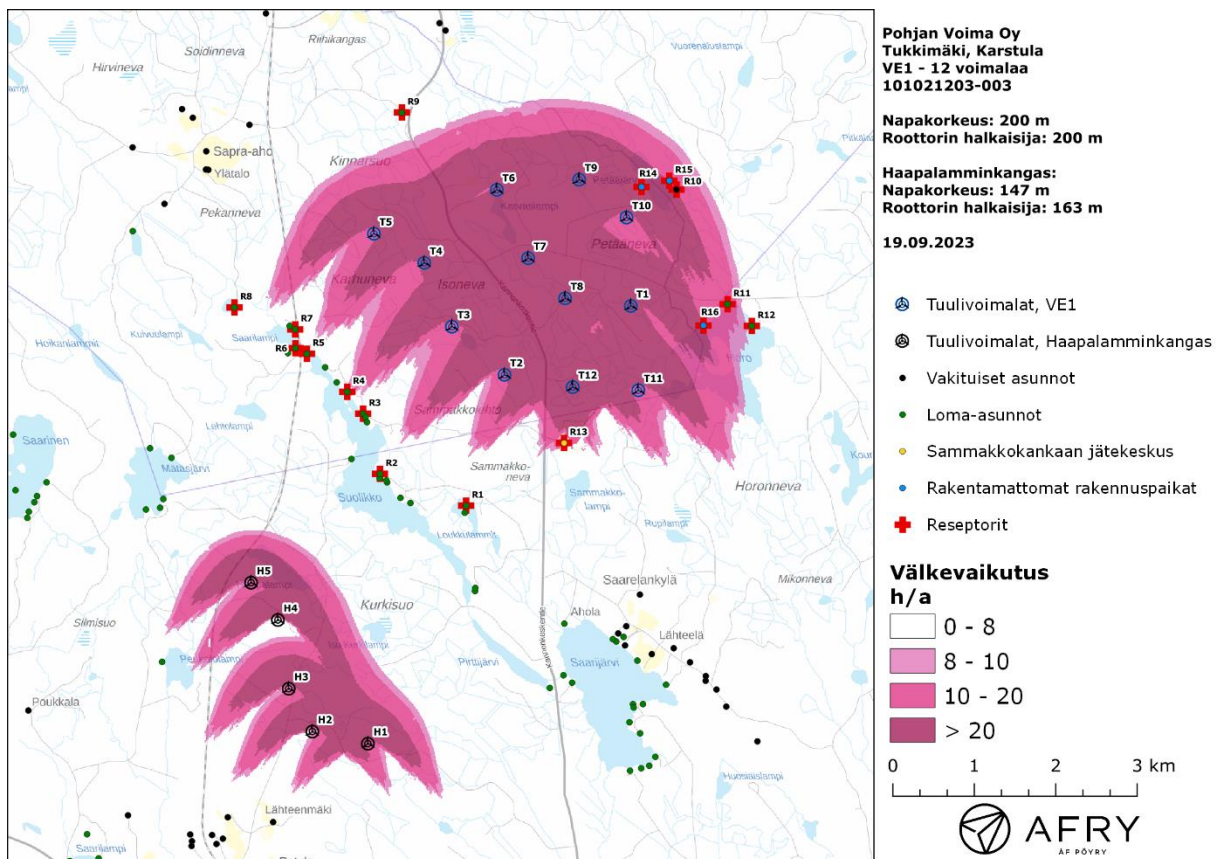
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	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	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:00	0:45
Kesäkuu	0:00	0:22	3:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:12	0:00	5:39
Heinäkuu	0:00	0:02	2:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:15	0:00	3:22
Elokuu	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
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	0:24	5:35	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:47	0:00	9:46

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 yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Taulukossa (Taulukko 9) 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 minuutilla. Muiden reseptoreiden kohdilla välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole eikä yhteisvaikutuksista aiheudu ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen (VE1) sekä Haapalamminkankaan voimalat.

Taulukko 9: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Haapalamminkankaan voimalat.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:00	0
R2	3:06	6
R3	1:37	5
R4	7:32	8
R5	5:17	8
R6	3:47	6
R7	3:18	6
R8	2:03	5
R9	4:01	5
R10	18:39	17
R11	12:46	11
R12	6:21	7
R13	9:46	18
R14	48:30	32
R15	18:50	18
R16	19:50	14

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston ympäristölle aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 12 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Selvityksessä on myös arvioitu Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon yhden asuinrakennuksen ja yhden lomarakennuksen kohdilla. Asuinrakennuksen käyttötarkoituksen muutos erämajaksi on prosessissa ja lomarakennuksen käyttötarkoitus tullaan muuttamaan tarvittaessa erämajaksi. Välkkeen ohjearvot koskevat pelkästään asuin- ja lomarakennuksia.

Välkevaikutuksia arvioitiin lisäksi kolmen rakentamattoman rakennuspaikan sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston kohdalla. Välkkeen 8 tunnin ohjearvo ylittyy kaikilla rakentamattomilla rakennuspaikoilla sekä jätekeskuksella. Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja 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 tiheysfunktioita 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.

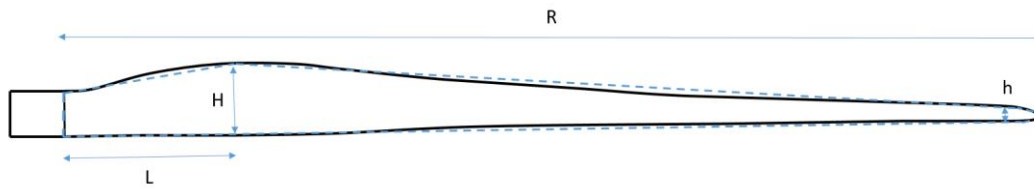
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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.



Pohjan Voima Oy

Tukkimäen tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE2)

101021203-003, 27.09.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Juulianna Lähteinen

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
27/09/2023

Projektinumero
101021203-003

Raportin tila
VALMIS

Tukkimäen tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE2)

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	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 Sammakokokankaan jätekeskuksen lisääminen reseptoreiksi. Yhteisvaikutukset Haapalamminkankaan kanssa.

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

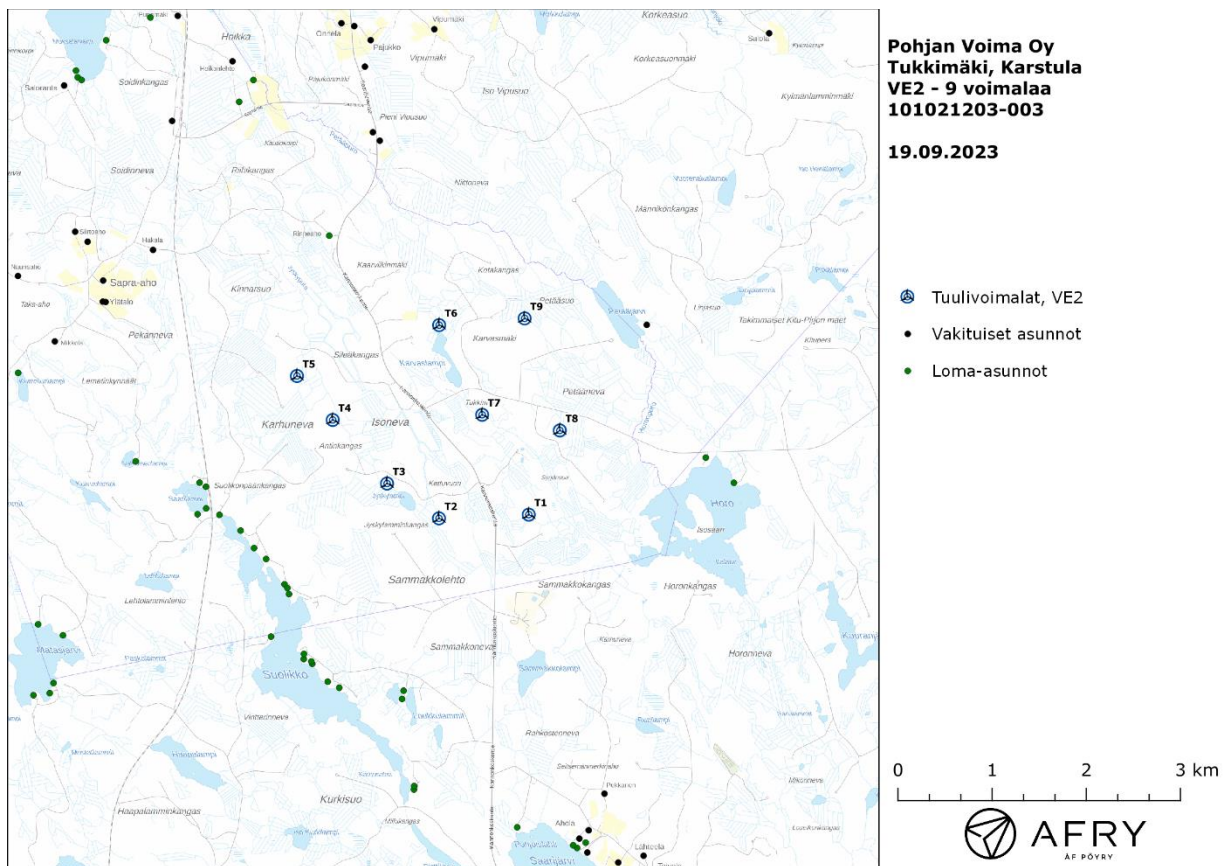
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden melu	6
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta	6
2.2	Melumallinnusohjeistus.....	7
2.3	Ohjearvot	8
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus	10
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus	10
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus	15
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset	18
4	Yhteenveto	22
5	Viitteet	23
6	Melumallinnuksen tiedot	24

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. 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 109,4 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 106,9 dB(A) + varmuusarvo 2,5 dB(A)). Valmistajan ilmoittamaan melupäästön lukuarvoon lisätään siis 2,5 dB varmuusarvo, joka on korkeampi kuin ympäristöministeriön ohjeistama 2 dB ohjeistuksen mukaisen tunnusarvon saavuttamiseksi. Tällä tavoin otetaan kohteen suunnittelussa huomioon myös turbiinityypit, joiden melupäästö on korkeampi kuin tässä selvityksessä käytetty V172.

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



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE2.

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

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	411903	6966228	182
T2	410949	6966189	180
T3	410399	6966558	176
T4	409821	6967232	171
T5	409442	6967698	170
T6	410951	6968237	166
T7	411408	6967287	178
T8	412233	6967121	176
T9	411859	6968308	166

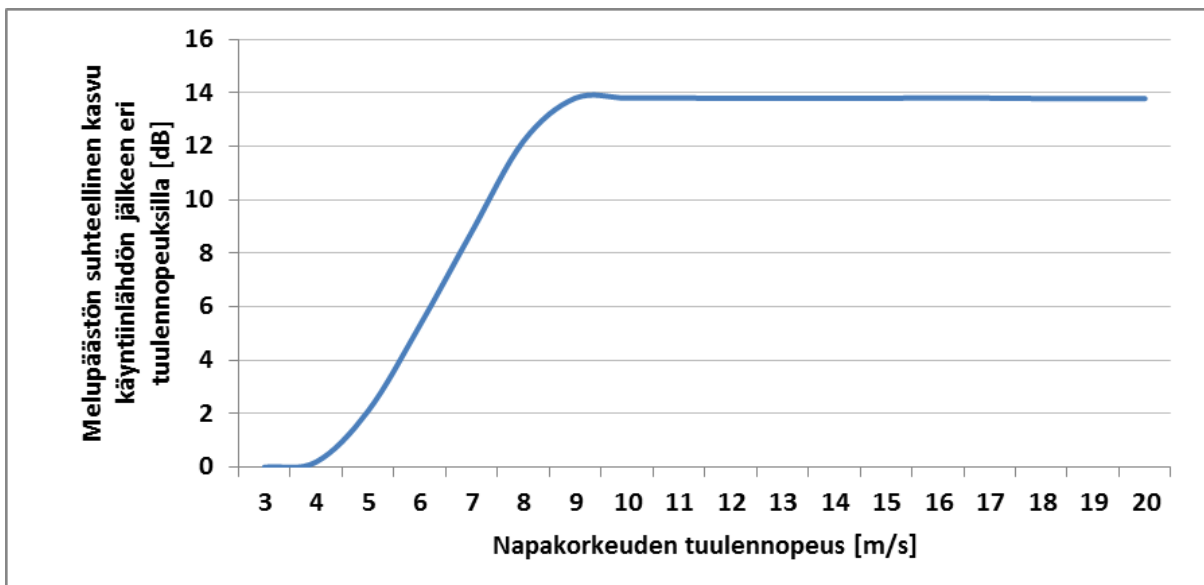
2 Tuulivoimaloiden melu

2.1 Yleistä tuulivoimamelusta

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

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen etupuolella suhteessa voimalan torniin. Katsottaessa aerodynaamisen melun suuntaavuutta ylhäältä käsin on siivistön äänitaso sivutuulen puolelta noin 4–6 dB alhaisempi kuin tuulen ylä- ja alapuolilla samalla etäisyydellä [18].

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



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

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

Taustamelu, kuten liikennemelu ja teollisuusmelu sekä tuulen tuottama aallokko- ja puustokohina, peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänet ovat ajallisesti ja tasoltaan vaihtelevia.

Tuulikohina esimerkiksi puustossa on taajuuskaistaltaan laajakaistaista ja tuulensuunnasta, puulajeista, vuodenajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1,5 m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemuseräisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [17].

Ilmakehän pystysuuntaisen stabiilisuuden ja ilmavirran turbulenssin vaihtelut vuorokauden eri aikoina voivat vaikuttaa tuulisuuden tasoon eri korkeuksilla [15]. Ilmakehän neutraalin stabiilisuuden vallitessa 8 m/s tuulennopeus 10 metrin korkeudella vastaa noin 12 m/s modernin voimalan napakorkeudella 139–149 m [16].

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

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

2.2 Melumallinnusohjeistus

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

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

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

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

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

mioon. Lisäksi matalataajuisen äänen eteneminen tulee mallintaa erikseen ohjeistuksessa määritellyn erillislaskennan avulla, joka perustuu Tanskassa annettuun ohjeistukseen, jonka parametreja on mukautettu Suomen olosuhteisiin [3]. Laskennassa otetaan huomioon geometrinen etäisyysvaimennus sekä ohjeistuksen mukaiset ilmakehän absorptio 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 suosittamat suunnitteluarvot tuulivoimaloiden ulkomelutasoille [8].

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

Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2).

Taulukko 2: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.

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

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

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

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

3 Tuulivoimakohteen melumallinnus

3.1 Keskiäänitasojen LAeq mallinnus

Tuulivoimaloiden aiheuttaman keskiäänitason mallinnus on suoritettu laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. 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_00. 2022-06-30.

Dokumenttia varten turbiinityypin V172 testimittauksia ei ollut saatavilla. Esitetyt melutasot perustuvat turbiinityypillä V136 tehtyihin mittauksiin, joiden perusteella V172:n melutasoja on arvioitu dokumentissa esitetyllä tavalla. Dokumentissa ilmoitettuihin melutasoihin on lisätty 2,5 dB:n varmuusarvo, joka on korkeampi kuin ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeistuksen mukainen 2 dB [10]:

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

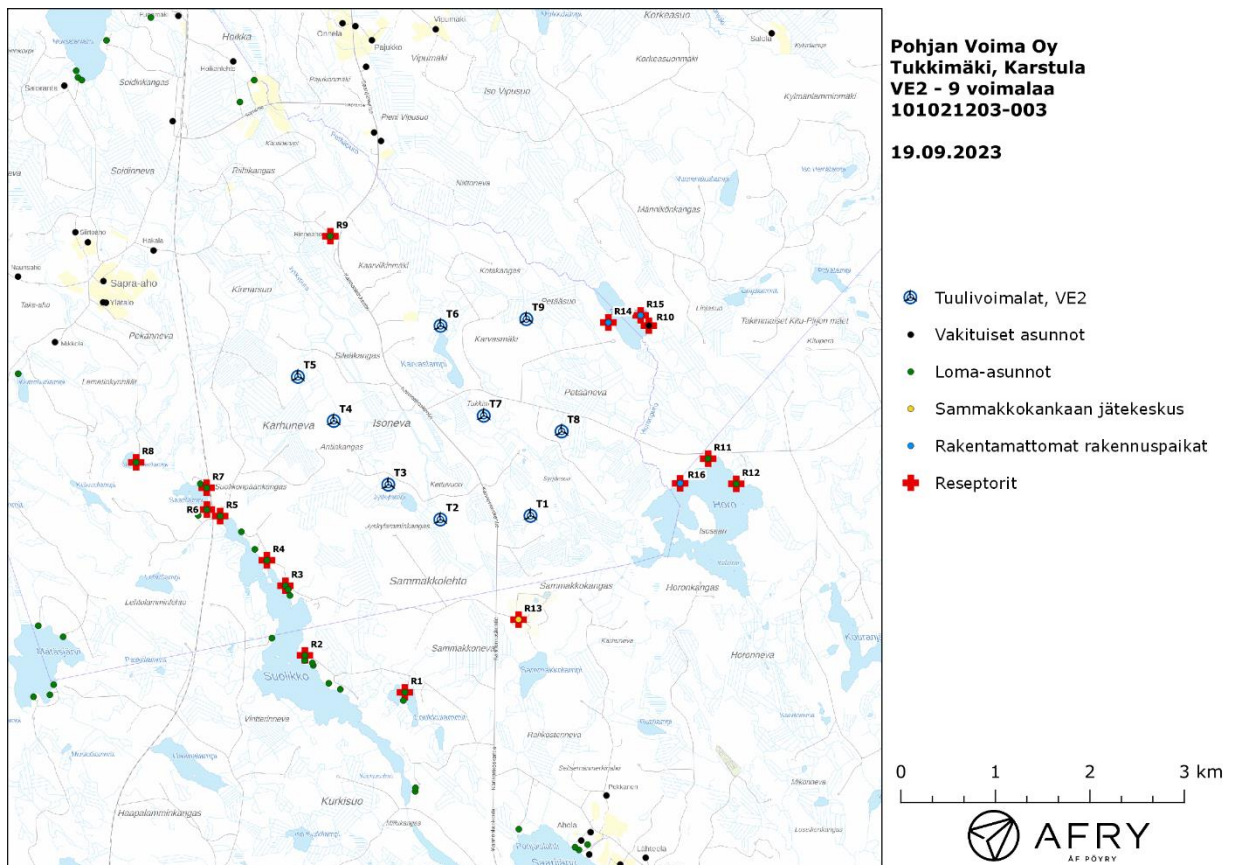
Turbiinityypin V172 7.2 MW PO7200 äänitehotaso on 106,9 dB(A). Mallinuksissa voimaloille on käytetty äänitehotasoa 109,4 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulen nopeutta 15 m/s napakorkeudella 200 m, jonka arvioidaan vastaavan melumallinnusohjeistuksen mukaista referenssinopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksissa.

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

Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 10 m. Ilmakehän 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 12 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto sekä kolme kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnot rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 16 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla tarkastellaan tarkemmin LAeq ja matalataajuisen melun tasoja.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat n. 800 metrin etäisyydellä lähimmästä voimaloista. Muut reseptoripisteet sijaitsevat 1,1 km etäisyydellä voimaloista. Reseptoripisteiden sijainnit suhteessa voimaloihin on esitetty karttakuvassa (Kuva 3).



Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

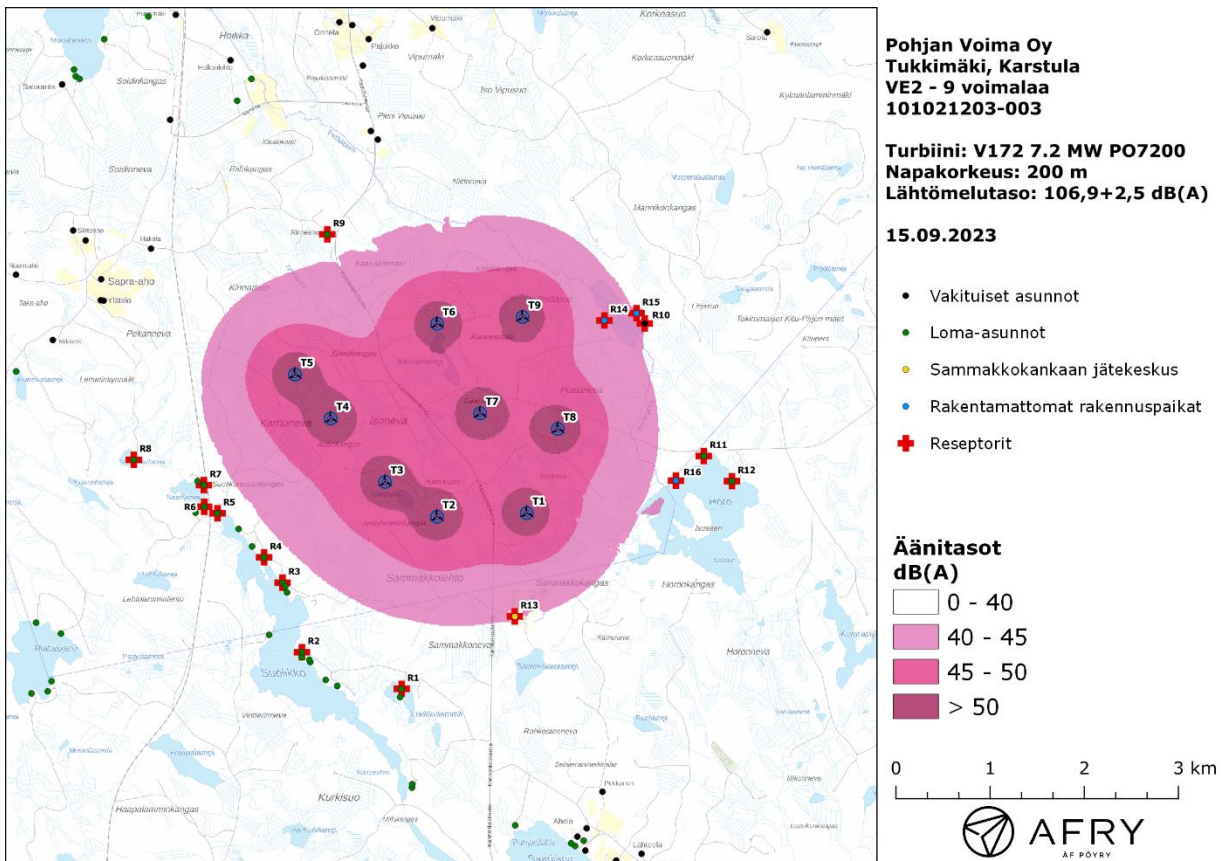
Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

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	-
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	412728	6968271	170	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka kolmelle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.
R15	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R16	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 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 yhden rakentamattoman rakennuspaikan kohdalla. Melutasot ylittyvät kahdella rakentamattomalla rakennuspaikalla sekä Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edessä. Valtioneuvoston asetuksen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eikä teollisia rakennuksia. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat kiinteistöjen omistajien kanssa sopimuksellisesti.



Kuva 4: Keskiäänitasot LAeq tuulivoimapaiston hankealueella sijoitus suunnitelmalla VE2.

Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	35,9
R2	35,5
R3	38,1
R4	37,2
R5	38,0
R6	37,5
R7	38,0
R8	34,9
R9	38,4
R10	39,5
R11	36,9
R12	36,4
R13	40,0
R14	41,9
R15	40,2
R16	38,3

3.2 Matalataajuisen melun mallinnus

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

Meluvaikutus

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

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

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyysparametrit perustuvat 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 ylittivät 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 ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyiden arvot.

Taulukko 6: Rakennuksen äänieristävyiden arvoja taajuuskaistoittain.

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

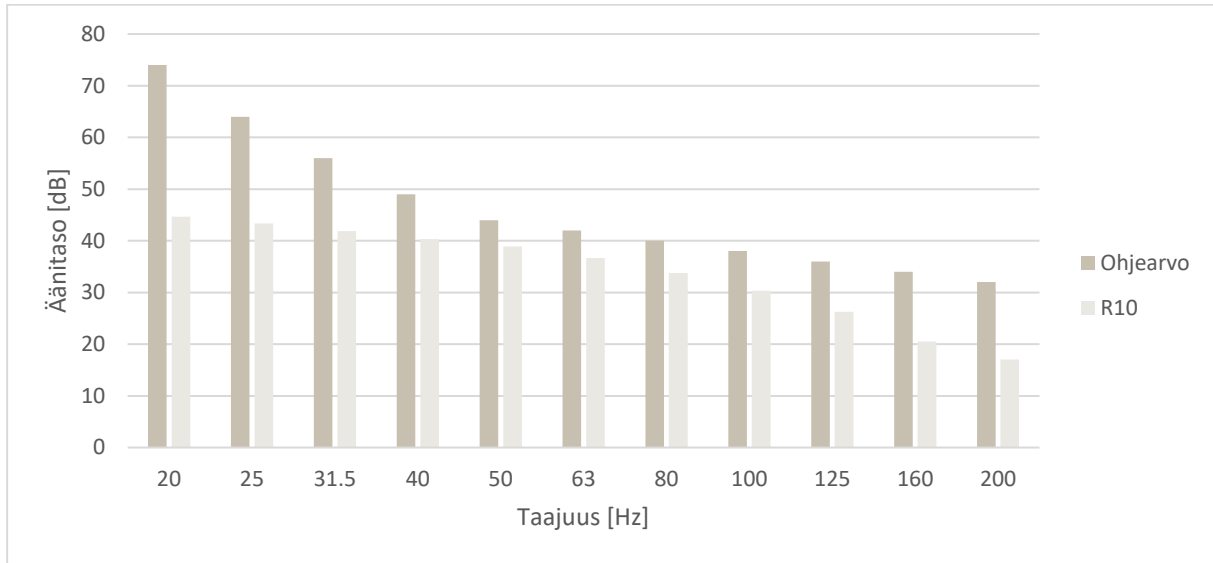
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso 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 R14. Koska kyseessä on rakentamaton rakennuspaikka, jota ohjearvot 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.

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 3) lisäksi ohjearvot päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Yöaikainen (klo 22–7) keskiäänitaso ei saa ylittää 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unihäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona $L_{eq,1h}$ mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen. Lähtökohtaisesti näiden yöajan ohjearvojen oletetaan alittuvan, mikäli melumallinnuksen tulos ulkona sekä matalataajuisen melun tulokset alittavat valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot. Raportin mallinnusten perusteella voimaloiden aiheuttamat ulkomelutasot ylittävät 40 dB(A):n ohjearvon kahdella rakennuspaikalla sekä Sammakkokankaan toimiston kohdalla, joten on mahdollista, että kyseisten reseptoreiden kohdalla myös asumisterveysasetuksen 30 dB(A):n ohjearvo yöajan sisämelutasolle ylittyy. Valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eivätkä teollisia rakennuksia.

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

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	50,0	49,4	48,7	48,3	48,1	47,3	46,2	44,7	42,5	38,8	37,0
R2	49,9	49,3	48,7	48,2	48,0	47,3	46,1	44,6	42,4	38,8	36,9
R3	51,6	51,0	50,4	50,0	49,8	49,0	47,9	46,5	44,3	40,8	39,1
R4	51,9	51,2	50,6	50,2	50,0	49,3	48,1	46,7	44,6	41,0	39,3
R5	51,5	50,8	50,2	49,8	49,6	48,8	47,7	46,3	44,1	40,6	38,8
R6	51,1	50,5	49,9	49,5	49,2	48,5	47,4	45,9	43,8	40,2	38,4
R7	51,5	50,9	50,3	49,9	49,7	48,9	47,8	46,4	44,2	40,7	39,0
R8	49,3	48,7	48,0	47,6	47,4	46,6	45,5	43,9	41,7	38,1	36,2
R9	51,9	51,3	50,7	50,3	50,1	49,3	48,2	46,8	44,6	41,1	39,4
R10	52,3	51,7	51,0	50,6	50,4	49,7	48,6	47,1	45,0	41,5	39,9
R11	50,7	50,0	49,4	49,0	48,8	48,0	46,9	45,4	43,3	39,7	37,9
R12	49,5	48,9	48,2	47,8	47,6	46,8	45,7	44,2	42,0	38,3	36,4
R13	53,1	52,5	51,8	51,4	51,2	50,5	49,4	48,0	45,9	42,4	40,8
R14	54,2	53,6	53,0	52,6	52,4	51,7	50,6	49,2	47,2	43,8	42,2
R15	52,5	51,8	51,2	50,8	50,6	49,9	48,8	47,3	45,2	41,7	40,1
R16	51,7	51,0	50,4	50,0	49,8	49,1	47,9	46,5	44,4	40,8	39,1



Kuva 5: Matalataajuisen sisämelun tasot vertailukiinteistön R10 kohdalla.

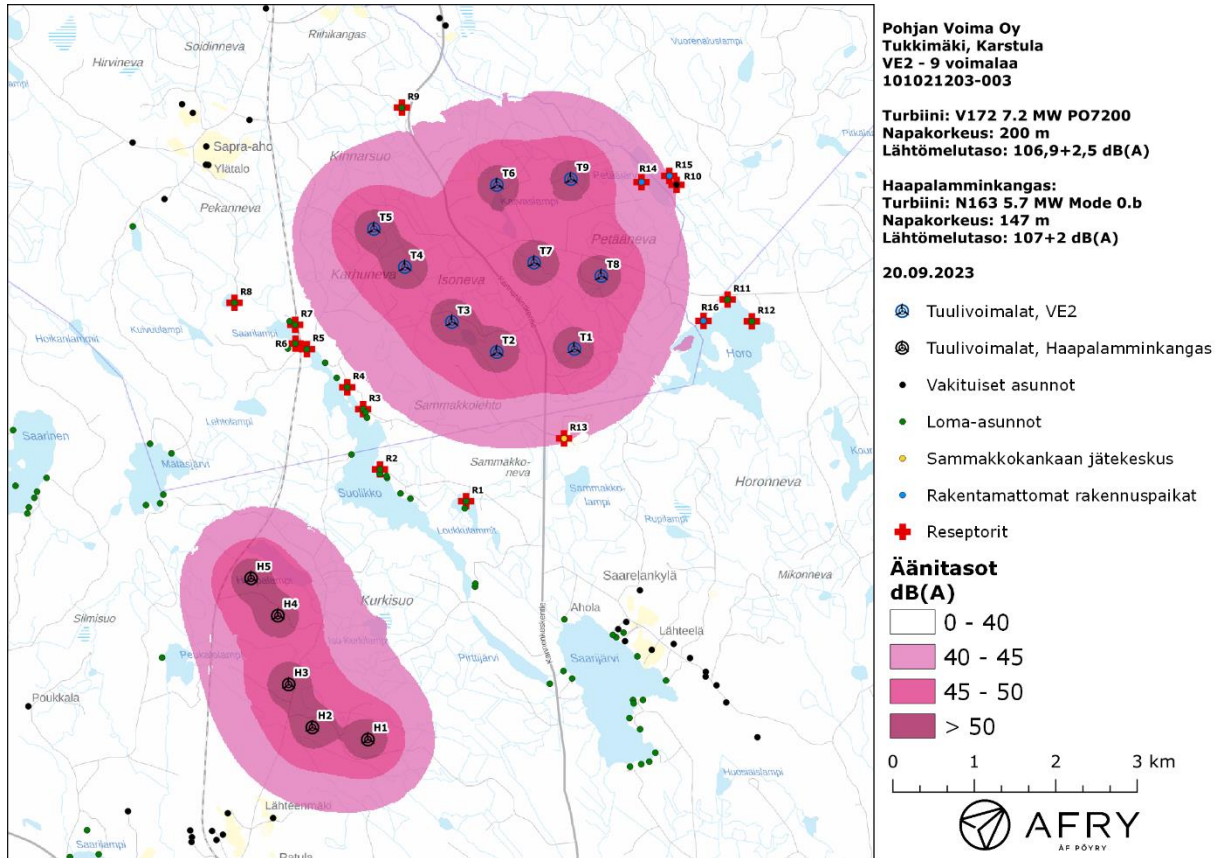
3.3 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset

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 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan melun yhteisvaikutuksissa keskiäänitasot ylittyvät reseptoripisteissä R13-R15, jotka ovat samat kuin melumallinnuksessa, jossa on huomioitu pelkästään Tukkimäen voimalat. Yhteisvaikutukset nostavat keskiäänitasoa enimmillään 1,8 dB(A) reseptorin R2 kohdalla. Muuten keskiäänitasojen nousu on yhteisvaikutuksissa 0–1,1 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 R14. Koska kyseessä on rakentamaton rakennuspaikka, jota ohjearvot 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.



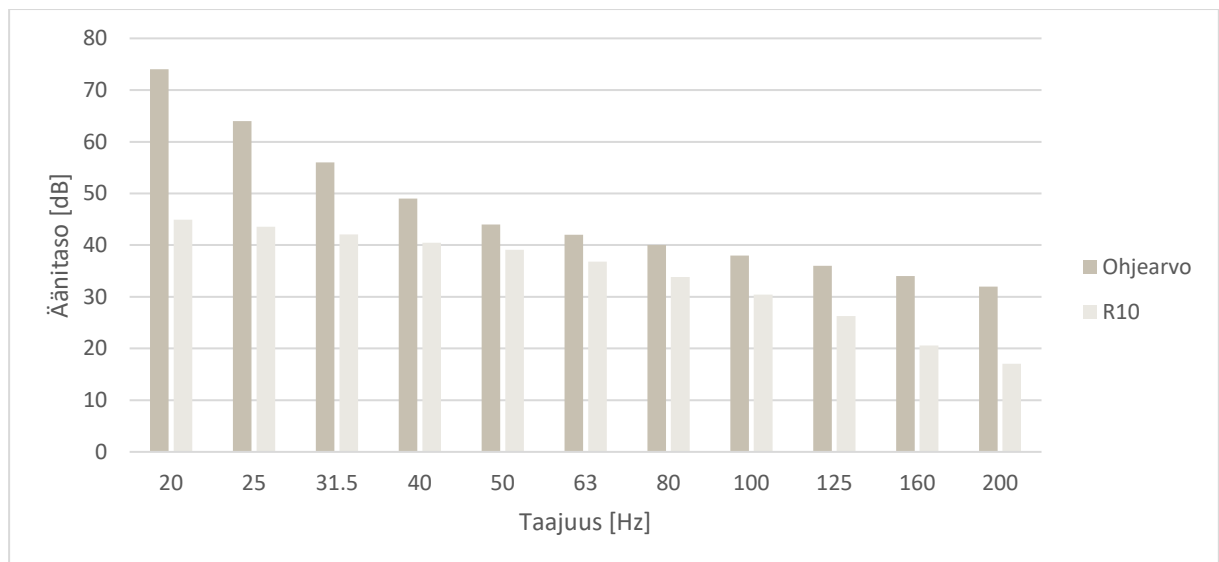
Kuva 6: Keskiäänitasot LAeq, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen (VE2) voimalat ja Haapalammin-kankaan voimalat.

Taulukko 8: Keskiäänitasot Laeq reseptoripisteiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimalat.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	37,0
R2	37,3
R3	38,7
R4	37,8
R5	38,3
R6	37,8
R7	38,3
R8	35,1
R9	38,5
R10	39,6
R11	36,9
R12	36,4
R13	40,1
R14	41,9
R15	40,2
R16	38,4

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	51,1	50,7	49,9	49,9	48,4	47,1	46,1	43,1	39,4	37,6
R2	52,8	51,6	51,2	50,3	50,4	48,7	47,4	46,5	43,3	39,6	37,8
R3	53,2	52,2	51,7	51,0	51,0	49,7	48,5	47,4	44,7	41,1	39,4
R4	53,2	52,3	51,8	51,1	51,0	49,9	48,6	47,5	44,9	41,3	39,6
R5	52,6	51,7	51,2	50,6	50,5	49,4	48,2	46,9	44,4	40,8	39,1
R6	52,4	51,4	51,0	50,3	50,2	49,0	47,8	46,6	44,1	40,5	38,7
R7	52,6	51,7	51,2	50,6	50,5	49,4	48,2	46,9	44,5	40,9	39,2
R8	50,7	49,8	49,3	48,5	48,5	47,2	46,0	44,8	42,1	38,4	36,5
R9	52,3	51,6	51,0	50,5	50,3	49,5	48,3	46,9	44,7	41,1	39,4
R10	52,5	51,9	51,3	50,8	50,6	49,8	48,6	47,2	45,1	41,5	39,9
R11	51,1	50,4	49,8	49,3	49,1	48,2	47,0	45,6	43,3	39,7	37,9
R12	50,1	49,3	48,7	48,2	48,0	47,0	45,9	44,4	42,0	38,4	36,5
R13	53,7	52,9	52,4	51,8	51,7	50,8	49,6	48,3	46,0	42,5	40,9
R14	54,4	53,8	53,2	52,7	52,5	51,8	50,7	49,3	47,2	43,8	42,2
R15	52,7	52,0	51,4	51,0	50,8	50,0	48,8	47,4	45,3	41,8	40,1
R16	52,1	51,3	50,8	50,2	50,1	49,2	48,1	46,7	44,4	40,9	39,2



Kuva 7: Matalataajuisten sisämelun tasot vertailukiinteistön R10 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 VE2. Vaikutusten arviointi on tehty napakorkeudella 200 m, voimalatyypin V172 7.2 MW taajuusjakaumilla ja käyttäen 2,5 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 kolmen rakentamattoman rakennuspaikan sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston kohdalla. Melun ohjearvo ylittyy kahdella rakentamattomalla rakennuspaikalla 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 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Astui voimaan 1.9.2015.
- [10] Yhteenveto tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvon käyttämisestä meluselvityksissä liittyvästä kyselystä. Ympäristöministeriö, 14.9.2016.
- [11] Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriö, Ohje I 1995.
- [12] IECRE - IEC System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Renewable Energy Applications. IECRE.WE.TC.21.0091-R1, EnVentus V162. 20.8.2021, DNV Renewables Certification.
- [13] C. A. León: Trailing Edge Serrations, Effect of Their Flap Angle on Flow and Acoustics. 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, 2nd to 5th May 2017.
- [14] M. Gupta, K. Madsen: Advancements in continuous learning for tonality free turbine design. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [15] K. Bolin: The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise. Acta Acustica united with Acustica, Vol 98 (2012) pages 741-748.
- [16] G.P. van den Berg: The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral Thesis, University of Groningen, Holland, 2006.
- [17] D. Halstead, N. Tam: A study of background noise levels measured during far-field receptor testing of wind turbine facilities. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lissabon, June 12-14, 2019.
- [18] S. Oerlemans, J.G. Schepers: Prediction of wind turbine noise directivity and swish, Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark, 2009.

6 Melumallinnuksen tiedot

RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT							
Mallinnusraportin numero/tunniste: 101021203-003.002				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 27.09.2023			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: AFRY Finland Oy							
Vastuhenkilöt: Juulianna Lähteinen ja Erkki Heikkola							
Laatija: Juulianna Lähteinen				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_00. 2022-06-30.							
Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	63,7	200	98,0	2000	92,4
63	92,4	25	68,9	250	98,6	2500	90,1
125	100,0	31,5	73,8	315	98,8	3150	87,5
250	103,3	40	78,6	400	98,9	4000	84,5
500	103,5	50	83,0	500	98,7	5000	81,1
1000	101,9	63	86,8	630	98,6	6300	77,4
2000	97,4	80	90,2	800	98,1	8000	73,3
4000	89,9	100	92,9	1000	97,2	10000	68,9
8000	79,2	125	95,2	1250	95,9		
		160	96,8	1600	94,4		

Melun erityispiirteiden mittausta 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	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
20	50,0	49,9	51,6	51,9	51,5	51,1	51,5	49,3
25	49,4	49,3	51,0	51,2	50,8	50,5	50,9	48,7
31,5	48,7	48,7	50,4	50,6	50,2	49,9	50,3	48,0
40	48,3	48,2	50,0	50,2	49,8	49,5	49,9	47,6
50	48,1	48,0	49,8	50,0	49,6	49,2	49,7	47,4
63	47,3	47,3	49,0	49,3	48,8	48,5	48,9	46,6
80	46,2	46,1	47,9	48,1	47,7	47,4	47,8	45,5
100	44,7	44,6	46,5	46,7	46,3	45,9	46,4	43,9
125	42,5	42,4	44,3	44,6	44,1	43,8	44,2	41,7
160	38,8	38,8	40,8	41,0	40,6	40,2	40,7	38,1
200	37,0	36,9	39,1	39,3	38,8	38,4	39,0	36,2

Hz	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16
20	51,9	52,3	50,7	49,5	53,1	54,2	52,5	51,7
25	51,3	51,7	50,0	48,9	52,5	53,6	51,8	51,0
31,5	50,7	51,0	49,4	48,2	51,8	53,0	51,2	50,4
40	50,3	50,6	49,0	47,8	51,4	52,6	50,8	50,0
50	50,1	50,4	48,8	47,6	51,2	52,4	50,6	49,8
63	49,3	49,7	48,0	46,8	50,5	51,7	49,9	49,1
80	48,2	48,6	46,9	45,7	49,4	50,6	48,8	47,9
100	46,8	47,1	45,4	44,2	48,0	49,2	47,3	46,5
125	44,6	45,0	43,3	42,0	45,9	47,2	45,2	44,4
160	41,1	41,5	39,7	38,3	42,4	43,8	41,7	40,8
200	39,4	39,9	37,9	36,4	40,8	42,2	40,1	39,1



Pohjan Voima Oy

Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE2)

101021203-003, 27.09.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Juulianna Lähteinen

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
27/09/2023

Projektinumero
101021203-003

Raportin tila
VALMIS

Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE2)

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.

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

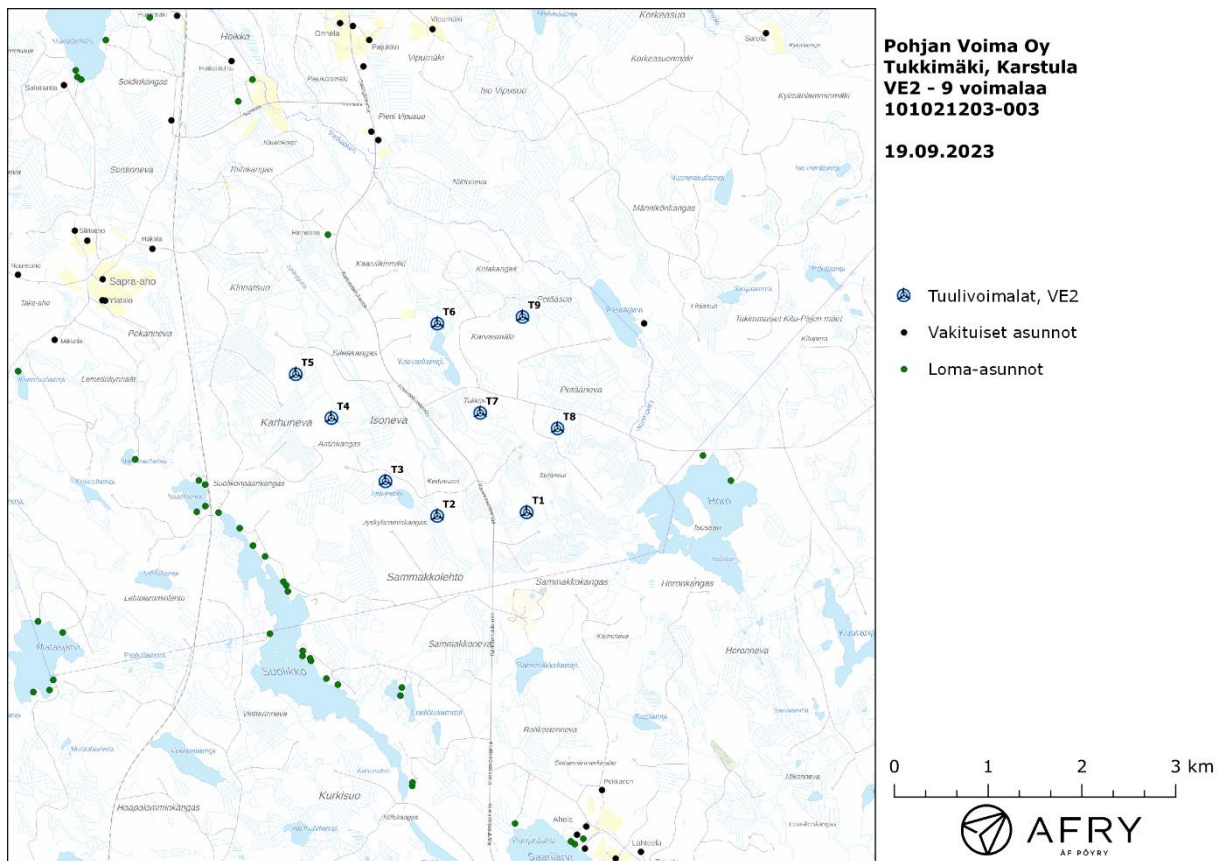
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjearvot	6
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus.....	12
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen 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 VE2. 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 sijoitussuunnitelmalla VE2.

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

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	411903	6966228	182
T2	410949	6966189	180
T3	410399	6966558	176
T4	409821	6967232	171
T5	409442	6967698	170
T6	410951	6968237	166
T7	411408	6967287	178
T8	412233	6967121	176
T9	411859	6968308	166

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 iltat). 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 säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Toden näköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen 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 tuulisuusestimäätti 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 mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntaakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: 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.

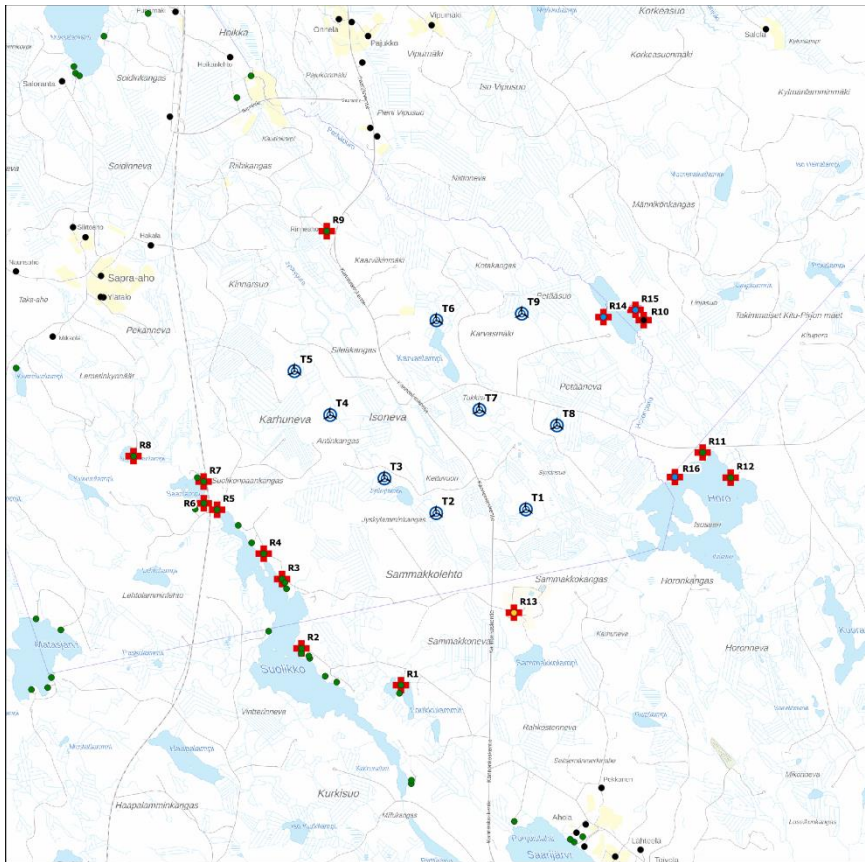
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,131
Helmikuu	0,256
Maaliskuu	0,373
Huhtikuu	0,402
Toukokuu	0,456
Kesäkuu	0,412
Heinäkuu	0,447
Elokuu	0,419
Syyskuu	0,315
Lokakuu	0,191
Marraskuu	0,095
Joulukuu	0,062

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 12 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto sekä kolme kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnät rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 16 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat n. 800 metrin etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Muut reseptoripisteet sijaitsevat 1,1 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	-
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	412728	6968271	170	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka kolmelle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.
R15	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R16	413488	6966571	177	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka neljälle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.



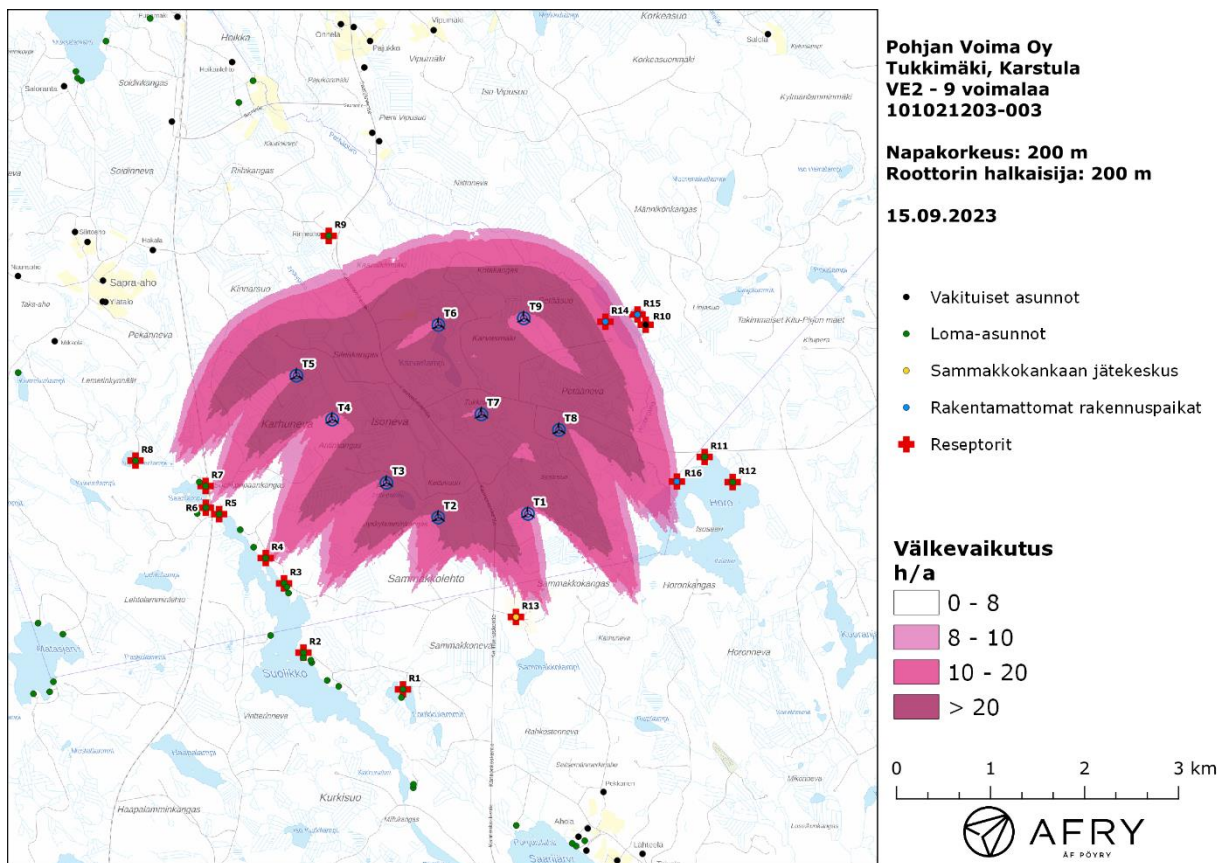
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

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. Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus alittaa Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten sekä Sammakkokankaan jätekeskuksen kohdilla. Välkemallinnuksen mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittyy kahdella rakentamattomalla rakennuspaikalla (R14 ja R16). Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja. 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 sijoitussuunnitelmalla VE2.

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	0:02	0
R3	2:08	6
R4	7:52	8
R5	4:52	6
R6	6:36	8
R7	6:12	8
R8	2:21	5
R9	3:52	5
R10	6:17	8
R11	3:35	7
R12	1:28	4
R13	2:55	5
R14	14:45	15
R15	6:40	9
R16	8:21	9

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

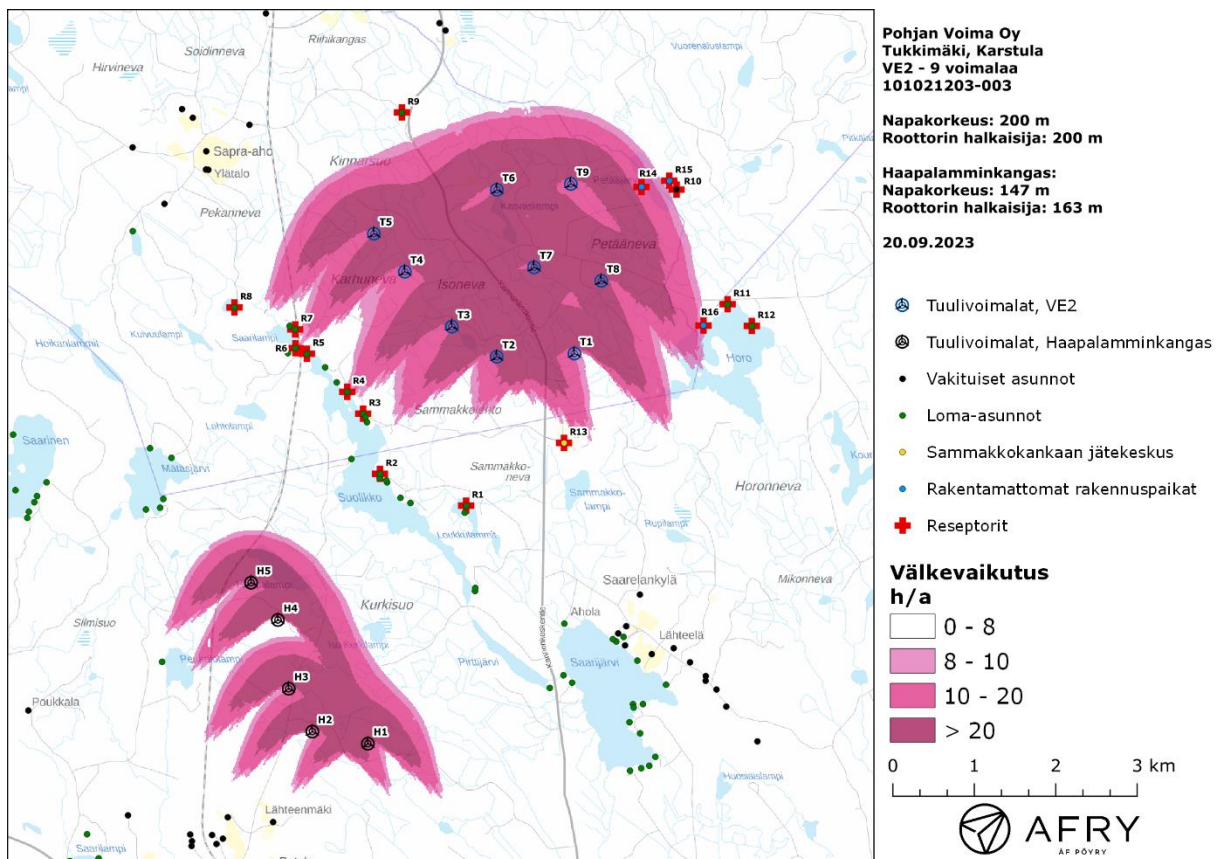
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
Toukokuu	0:00	0:00	1:41	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:41
Kesäkuu	0:00	0:00	2:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:10
Heinäkuu	0:00	0:00	2:55	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:55
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	7:52	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:52

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 kahdella minuutilla. Muiden reseptoreiden kohdilla välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole eikä yhteisvaikutuksista aiheudu ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen (VE2) sekä Haapalamminkankaan voimalat.

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

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:00	0
R2	0:14	1
R3	2:10	6
R4	7:52	8
R5	4:52	6
R6	6:36	8
R7	6:12	8
R8	2:21	5
R9	3:52	5
R10	6:17	8
R11	3:35	7
R12	1:28	4
R13	2:55	5
R14	14:45	15
R15	6:40	9
R16	8:21	9

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitus-suunnitelmalle VE2. Selvityksessä on myös arvioitu Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen kohdalla. Välkevaikutukset ylittyvät kahdella rakentamattomalla rakennuspaikalla. Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja 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 tiheysfunktioita 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.

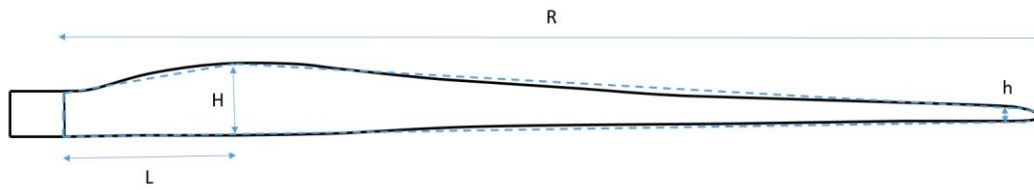
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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.