



Pohjan Voima Oy

**Santakankaan tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE1)**

101021203-004

Tekijä  
Erkki Heikkola

pvm  
02/10/2023

Osasto  
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinumero  
101021203-004

E-mail  
[erkki.heikkola@afry.com](mailto:erkki.heikkola@afry.com)

Raporttiversio  
002

Raportin tila  
LOPULLINEN

Asiakas

Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

## Santakankaan tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE1)

## Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laattija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	07.08.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	07.08.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	02.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	02.10.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Esitetty Santakankaan vaikutukset ja yhteisvaikutukset erikseen

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

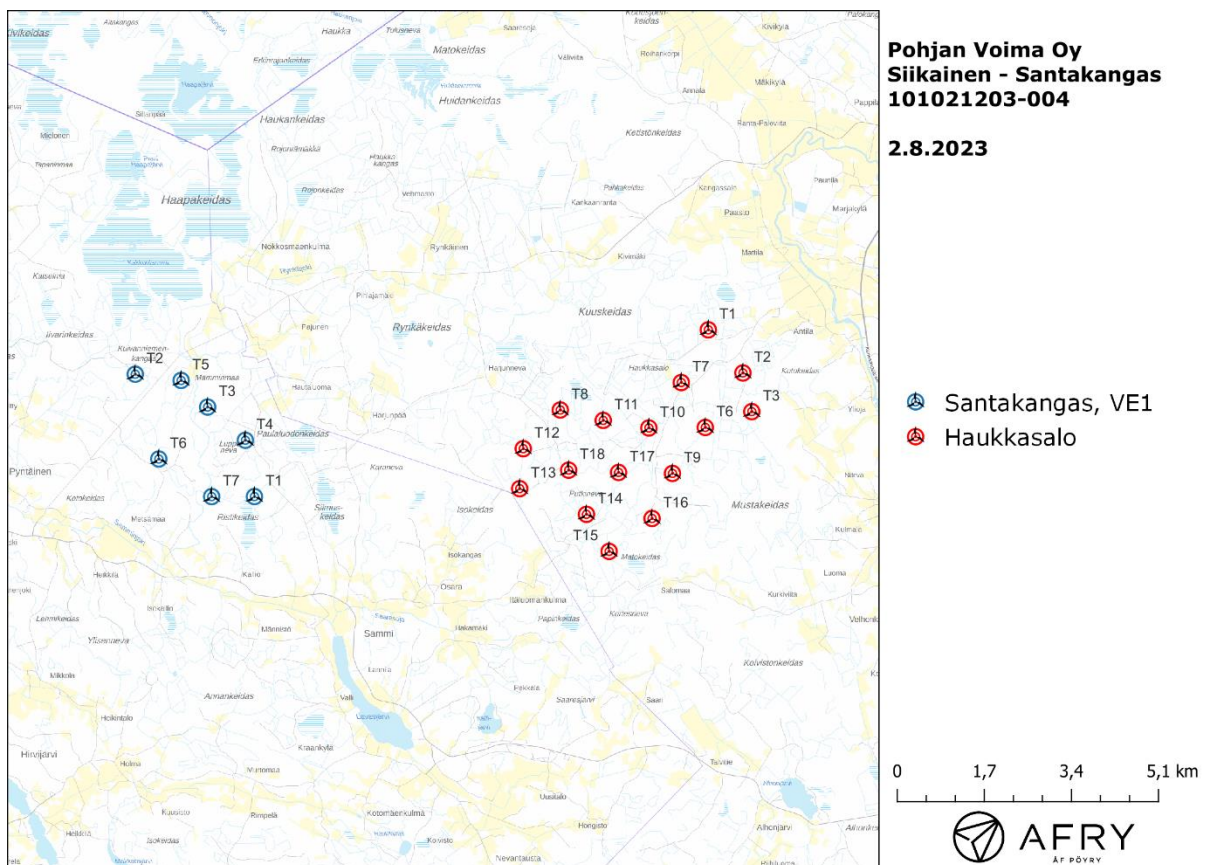
## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden melu .....	6
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta .....	6
2.2	Melumallinnusohjeistus.....	7
2.3	Ohjearvot .....	8
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus .....	10
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus .....	10
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus .....	14
4	Yhteenveto .....	18
5	Viitteet .....	19
6	Melumallinnuksen tiedot.....	20

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Siikaisten kuntaan suunnitellun Santakankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 7 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Arvioinnissa huomioidaan myös lähelle suunniteltu Kankaanpään Haukkasalon tuulipuisto (16 voimalaa). Selvityksessä huomioitujen voimaloiden sijainnit on esitetty karttaphojalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Mallinnuksissa molempien tuulipuistojen voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja turbiinityypin V172 7.2 MW PO7200 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasolla 109,9 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 106,9 dB(A) + varmuusarvo 3 dB(A)). Valmistajan ilmoittamaan melupäästön lukuarvoon lisätään siis 3 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.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.

Taulukko 1: Santakankaan VE1 turbiinipaikkojen (7 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeudet.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	237718,8	6875364,9	75,7
T2	235391,1	6877752,4	79,5
T3	236804,8	6877111,5	79,8
T4	237541,4	6876463,1	80,4
T5	236287,4	6877631,4	77,8
T6	235851,0	6876098,0	78,0
T7	236883,6	6875364,3	75,7

Taulukko 2: Haukkasalon turbiinien sijaintikoordinaatit ja maaston korkeudet.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	246581,9	6878618,7	95,7
T2	247257,4	6877777,1	98,1
T3	247430,2	6877022,4	96,0
T6	246522,8	6876714,0	95,3
T7	246053,8	6877590,2	93,6
T8	243691,2	6877054,4	94,4
T9	245881,6	6875816,8	90,3
T10	245420,6	6876703,7	92,9
T11	244529,8	6876851,6	91,1
T12	242967,8	6876299,3	90,4
T13	242898,4	6875519,6	87,2
T14	244202,0	6875018,5	87,0
T15	244644,8	6874294,8	83,8
T16	245483,1	6874937,6	87,9
T17	244829,3	6875835,4	90,4
T18	243854,8	6875880,5	87,2

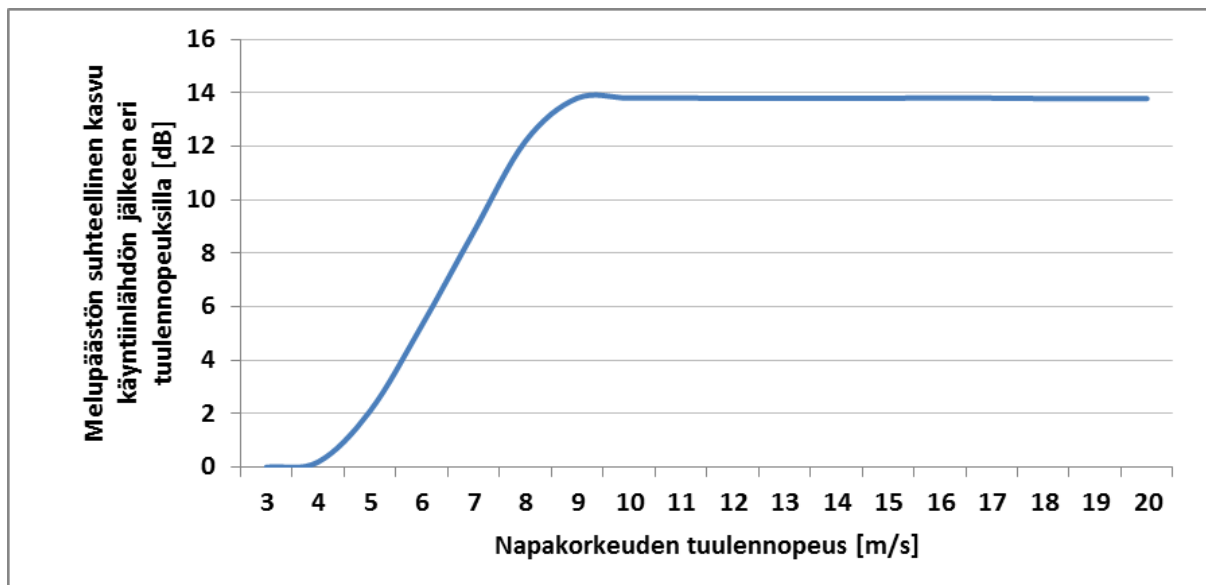
## 2 Tuulivoimaloiden melu

### 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 sahailoidituksen, joka vähentää melupäästöä nimellisteholla tällä hetkellä noin 2–3 dB ja tulevaisuudessa vieläkin enemmän serraatioiden tuotekehityksen johdosta [13].

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

## 2.2 Melumallinnusohjeistus

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

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

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

*Taulukko 3: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.*

Tuulivoimamelun ohjearvot	LA <sub>eq</sub> päiväajalle (klo 7–22)	LA <sub>eq</sub> yöajalle (klo 22–7)
Pysyvä asutus, Loma-asutus, Hoitolaitokset, Leirintäalueet	45 dB	40 dB
Oppilaitokset, Virkistysalueet	45 dB	-
Kansallispuistot	40 dB	40 dB

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa enimmäisarvot matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Ohjearvot on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 4). 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 4: 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 3 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 109,9 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulen nopeutta 12 m/s napakorkeudella. Mallinuksissa voimaloiden napakorkeus oli 200 m. 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.

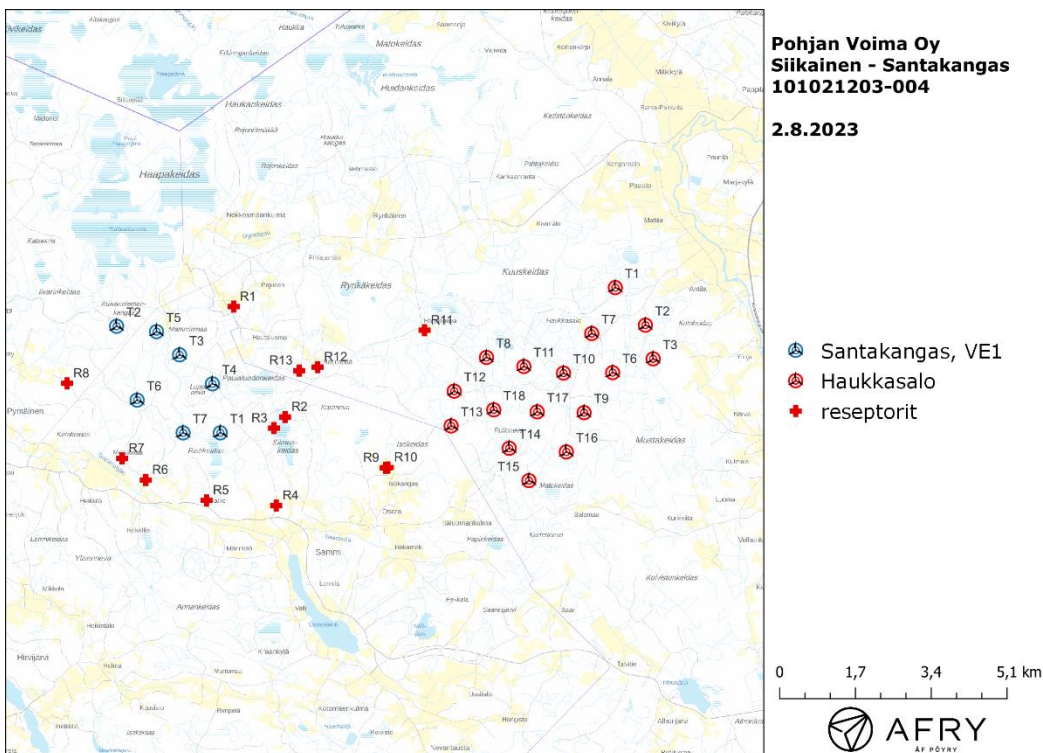
Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 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 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 13 vertailurakennusta, joiden kohdilla LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla

(Kuva 3). Reseptoripisteet sijaitsevat lähimmillään noin 1,2 km etäisyydellä Santakankaan voimaloista.

Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	238022	6878190	78,8	lomarakennus
R2	239174	6875717	84,8	lomarakennus
R3	238925	6875467	83,9	rakenteilla oleva lomarakennus
R4	238975	6873732	77,8	vakituinen asuinrakennus
R5	237411	6873848	67,2	lomarakennus
R6	236048	6874305	65,8	lomarakennus
R7	235518	6874788	68,0	lomarakennus
R8	234283	6876471	73,0	vakituinen asuinrakennus
R9	241432	6874577	81,6	vakituinen asuinrakennus
R10	241478	6874585	81,5	vakituinen asuinrakennus
R11	242303	6877661	90,0	vakituinen asuinrakennus
R12	239905	6876834	90,9	vakituinen asuinrakennus
R13	239490	6876755	90,9	vakituinen asuinrakennus

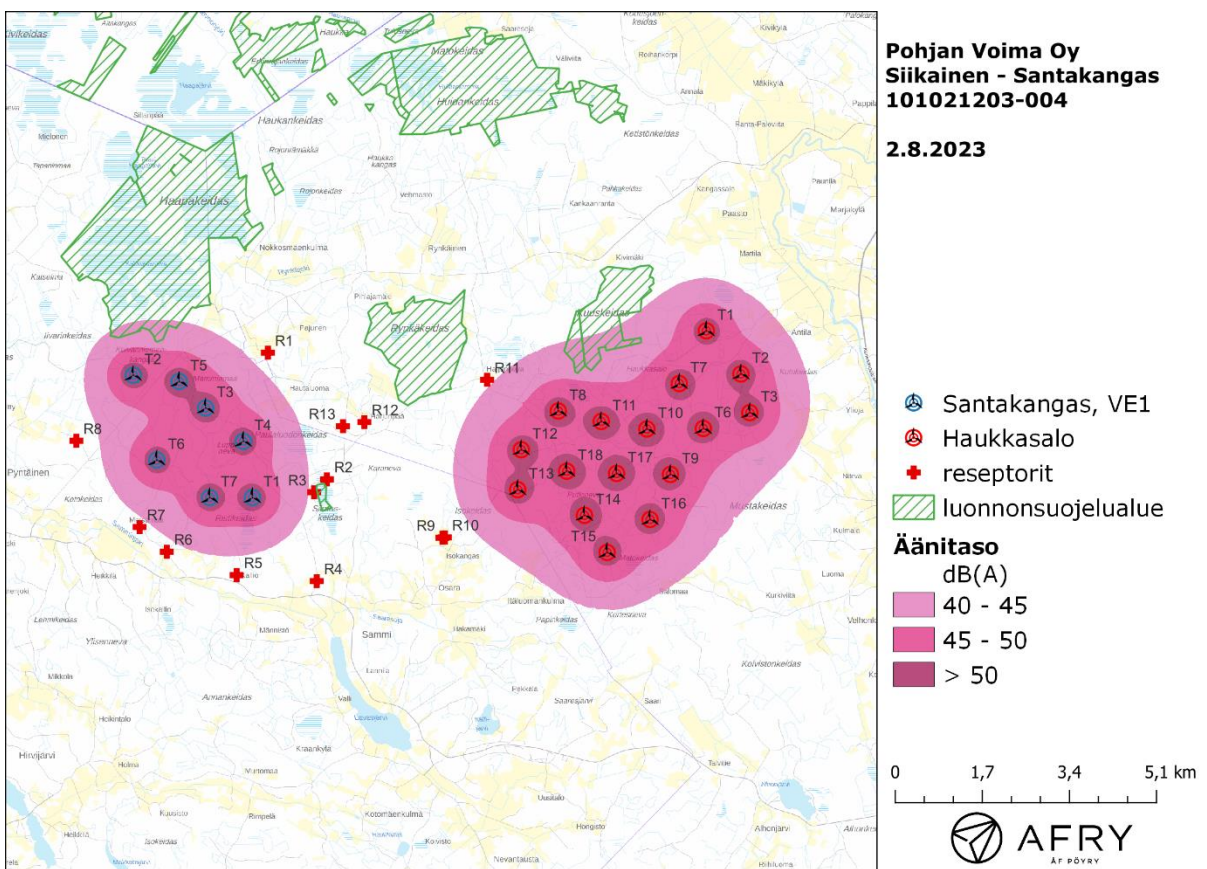


Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

## Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso  $L_{Aeq}$  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, ja melutasoja arvioidaan tarkemmin karttaan merkityissä reseptoripisteissä. Karttakuvaan on lisäksi merkitty hankkeen ympäristössä sijaitsevat luonnonsuojelualueet, joista yksi altistuu Santakankaan tuulivoimaloiden melulle.

Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6), jossa on eroteltuna pelkästään Santakankaan voimaloista aiheutuvat melutasot sekä Haukkasalon yhteisvaikutuksesta aiheutuvat tasot. Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot eivät ylitä valtioneuvoston asetuksen 40 dB:n ohjearvoa kummassakaan tapauksessa.



Kuva 4: Keskiäänitasot  $L_{Aeq}$  tuulivoimapaiston hankealueella sijoitusuunnitelmalla VE1.

Taulukko 6: Santakankaan voimaloiden aiheuttamat keskiäänitasot LAeq sekä yhteisvaikutuksista aiheutuvat tasot reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A) Santakangas	Äänitaso dB(A) Santakangas + Haukkasalo
R1	38,1	38,3
R2	37,4	38,1
R3	38,9	39,3
R4	33,6	34,7
R5	37,3	37,4
R6	38,4	38,5
R7	38,9	39,0
R8	37,6	37,6
R9	27,4	37,1
R10	27,3	37,3
R11	25,1	39,4
R12	33,3	35,6
R13	35,2	36,5



### 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 4). Ympäristöministeriön ohjeistuksen mukainen mallinnus antaa matalataajuisen *ulkomelun* tasot voimaloita lähimpien rakennusten 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 ( $\Delta L_G$ ) 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 ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 7) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyiden arvot.

Taulukko 7: Rakennuksen äänieristävyiden arvoja taajuuskaistoittain.

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

Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 7) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Pelkästään Santakankaan turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 8). Kun otetaan huomioon yhteisvaikutukset Haukkasalon voimaloiden kanssa saadaan taulukossa (Taulukko 9) esitetyt matalataajuiset äänitasot.

Korkeimmat Santakankaan aiheuttamat matalataajuisten melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R7, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 5). Kun otetaan huomioon yhteisvaikutukset Haukkasalon kanssa, korkeimmat matalataajuiset melutasot Santakankaan lähellä saavutetaan rakennuksen R3 kohdalla (Kuva 6). Korkeimmat melutasot saavutetaan pisteen R11 kohdalla, mutta nämä aiheutuvat pääosin Haukkasalon voimaloista. Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät kaikissa pisteissä asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 4) 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 matalataajuisten melun tulokset alittavat valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot.

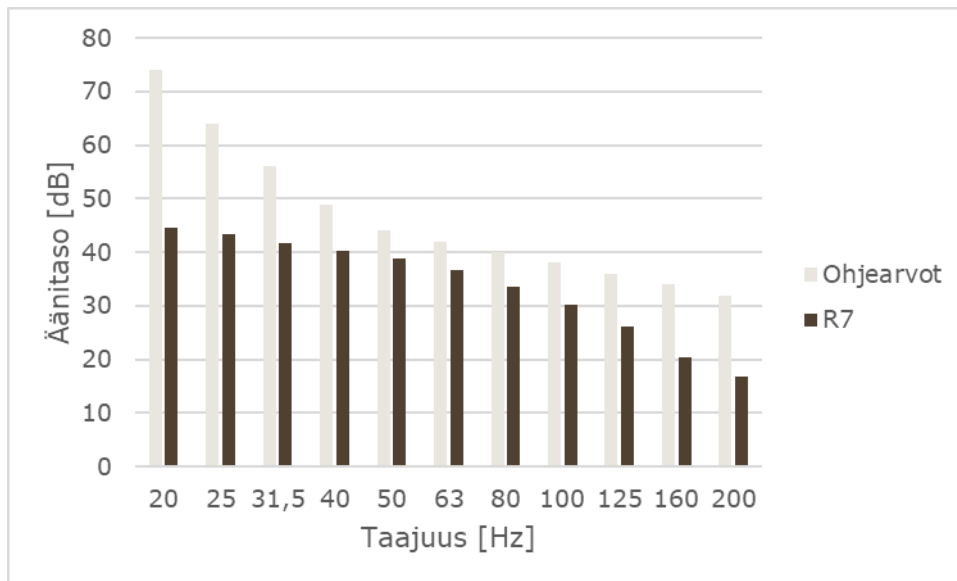
*Taulukko 8: Santakankaan voimaloiden aiheuttamat matalataajuisten ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla.*

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	51,6	51,0	50,3	49,9	49,7	48,9	47,7	46,4	44,1	40,7	38,9
R2	51,1	50,5	49,8	49,3	49,1	48,4	47,2	45,8	43,6	40,1	38,3
R3	52,1	51,5	50,8	50,4	50,1	49,4	48,2	46,9	44,7	41,3	39,5
R4	48,4	47,7	47,0	46,5	46,3	45,5	44,3	42,9	40,5	36,9	34,9
R5	51,1	50,4	49,7	49,3	49,1	48,3	47,1	45,8	43,5	40,1	38,3
R6	51,8	51,2	50,5	50,1	49,9	49,1	47,9	46,6	44,4	40,9	39,2
R7	52,3	51,6	50,9	50,5	50,3	49,6	48,4	47,0	44,8	41,4	39,7
R8	51,3	50,7	50,0	49,5	49,3	48,6	47,4	46,0	43,8	40,3	38,5
R9	44,5	43,9	43,1	42,6	42,4	41,5	40,2	38,6	36,0	32,0	29,6
R10	44,5	43,8	43,0	42,6	42,3	41,5	40,1	38,5	35,9	31,9	29,5
R11	43,3	42,6	41,8	41,3	41,0	40,2	38,8	37,1	34,4	30,3	27,6
R12	48,4	47,7	47,0	46,6	46,3	45,5	44,3	42,8	40,5	36,9	34,8
R13	49,6	49,0	48,3	47,8	47,6	46,9	45,6	44,2	41,9	38,4	36,4

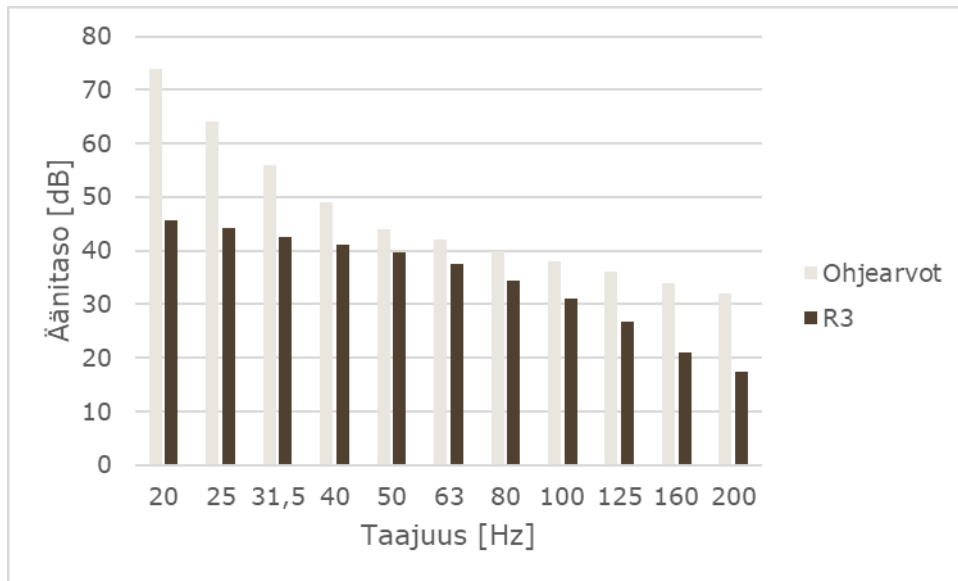


Taulukko 9: Santakankaan ja Haukkasalön aiheuttamat matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB).

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



Kuva 5: Santakankaan voimalöiden aiheuttamat matalataajuisen sisämelun tasot vertailurakennuksen R7 kohdalla.



Kuva 6: Santakankaan ja Haukkasalon voimaloiden aiheuttamat matalataajuisen sisämelun tasot vertailurakennuksen R3 kohdalla.

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Siikaisten kuntaan suunnitellun Santakankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 7 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Vaikutusten arviointi on tehty napakorkeudella 200 m, voimalatyyppin V172 7.2 MW taajuusjakaumilla ja käyttäen 3 dB:n varmuusarvoa valmistajan ilmoittamalle melupäästölle.

Mallinnusten perusteella melutasot eivät ylitä valtioneuvoston ohjearvoja alueen rakennusten kohdilla. Matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla Asumis-terveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella.

## 5 Viitteet

- [1] C. Di Napoli: Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen, Suomen Ympäristö 4, 2007.
- [2] D. Siponen: Noise Annoyance of Wind Turbines, VTT Research Report VTTR-00951-11, 2011.
- [3] J. Jakobsen: Danish regulation for low frequency noise from wind turbines, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 31(4), 2012.
- [4] J. Keränen, J. Hakala, V. Hongisto: The sound insulation of façades at frequencies 5–5000Hz, Building and Environment 156, 2019.
- [5] S. Uosukainen: Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys, VTT Tiedotteita 2529, 2010.
- [6] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.
- [7] Tuulivoimaloiden melun mallintaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2014. Ympäristöministeriö.
- [8] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [9] Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason 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: <b>101021203-004.001</b>				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: <b>2.10.2023</b>			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: <b>AFRY Finland Oy</b>							
Vastuhenkilöt: <b>Erkki Heikkola</b>							
Laatija: <b>Erkki Heikkola</b>				Tarkastaja/hyväksyjä: <b>Riku Suutari</b>			
MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT							
Mallinnusohjelma ja versio: <b>AFRY Numerola -mallinnusohjelmisto</b>				Mallinnusmenetelmä: <b>ISO 9613-2</b>			
TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN) TIEDOT							
Tuulivoimalan valmistaja: <b>Vestas</b>				Tyyppi: <b>V172 7.2 MW PO7200 (with serrated trailing edges)</b>		Sarjanumero/t:	
Nimellisteho: <b>7.2 MW</b>		Napakorkeus: <b>200 m</b>		Roottorin halkaisija: <b>172 m</b>		Tornin tyyppi:	
Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön käytön aikana ja sen vaikutus meluun							
Lapakulman säätö		Pyörimisnopeus		Muu, mikä			
Kyllä	dB	Kyllä	dB			dB	
Ei	<b>Ei tiedossa</b>	Ei	<b>Ei tiedossa</b>			dB	
AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT							
Third octave noise emission EnVentus™ V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no 0128-4336_00. 2022-06-30.							
Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	64,0	200	98,1	2000	92,2
63	92,5	25	69,2	250	98,7	2500	89,8
125	100,2	31,5	74,0	315	98,8	3150	87,1
250	103,3	40	78,8	400	99,0	4000	84,1
500	103,5	50	83,2	500	98,7	5000	80,7
1000	101,8	63	87,0	630	98,5	6300	76,9
2000	97,2	80	90,3	800	98,0	8000	72,8
4000	89,5	100	93,1	1000	97,1	10000	68,3
8000	78,7	125	95,3	1250	95,8		
		160	97,0	1600	94,2		

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

<b>Hz</b>	<b>R7</b>	<b>R8</b>	<b>R9</b>	<b>R10</b>	<b>R11</b>	<b>R12</b>	<b>R13</b>
<b>20</b>	52,7	51,7	52,2	52,3	53,7	51,4	51,8
<b>25</b>	52,1	51,1	51,6	51,7	53,1	50,7	51,1
<b>31,5</b>	51,4	50,4	50,9	51,0	52,3	50,0	50,4
<b>40</b>	50,9	49,9	50,4	50,5	51,9	49,5	49,9
<b>50</b>	50,7	49,7	50,2	50,3	51,7	49,3	49,7
<b>63</b>	49,9	48,9	49,4	49,5	50,9	48,5	48,9
<b>80</b>	48,7	47,7	48,1	48,2	49,7	47,2	47,6
<b>100</b>	47,3	46,3	46,6	46,7	48,3	45,7	46,1
<b>125</b>	45,1	44,0	44,3	44,4	46,0	43,2	43,7
<b>160</b>	41,6	40,5	40,6	40,7	42,4	39,5	40,0
<b>200</b>	39,8	38,6	38,5	38,6	40,5	37,3	37,9



Pohjan Voima Oy

**Santakankaan tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE2)**

101021203-004



Tekijä  
Erkki Heikkola

pvm  
02/10/2023

Osasto  
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinumero  
101021203-004

E-mail  
[erkki.heikkola@afry.com](mailto:erkki.heikkola@afry.com)

Raporttiversio  
002

Raportin tila  
LOPULLINEN

Asiakas

Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

## Santakankaan tuulivoimahankkeen meluselvitys (VE2)

## Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laattija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	07.08.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	07.08.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	02.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	02.10.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Esitetty Santakankaan vaikutukset ja yhteisvaikutukset erikseen

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

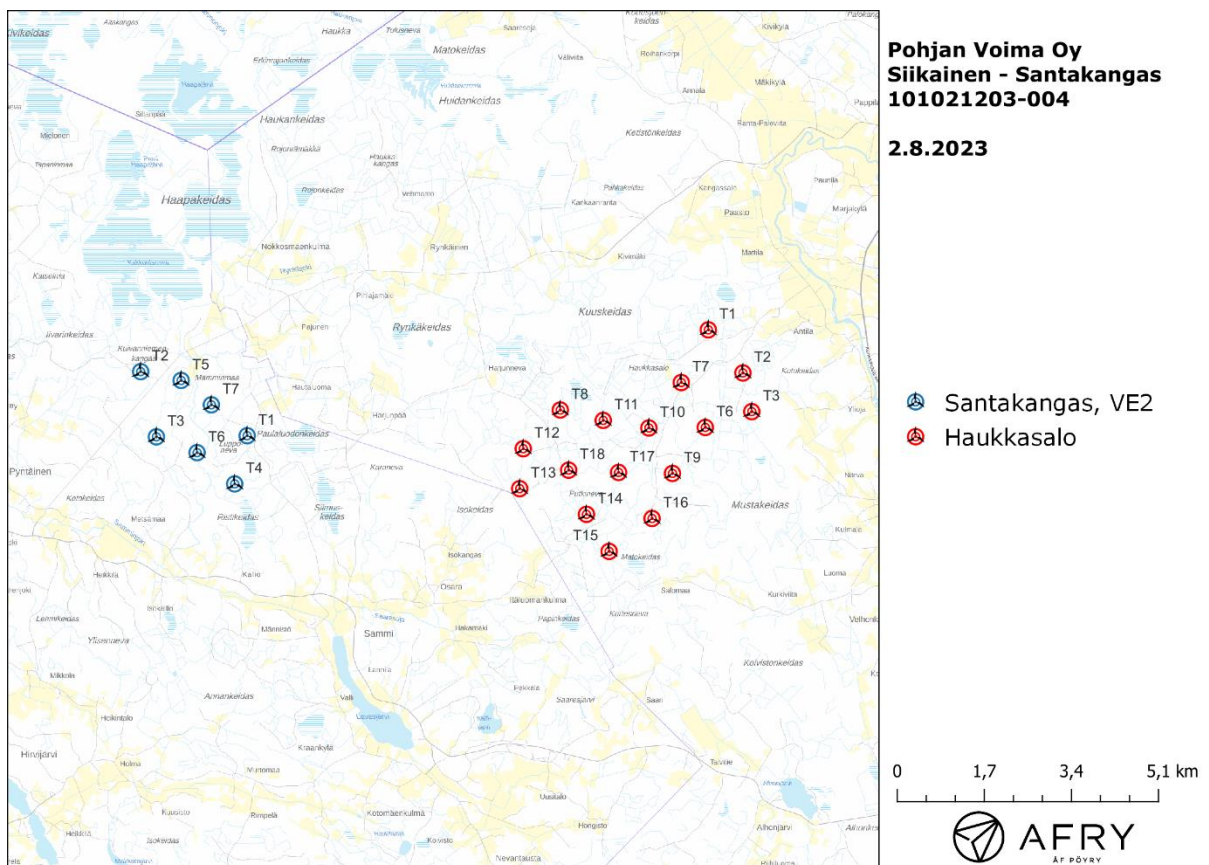
## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden melu .....	6
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta .....	6
2.2	Melumallinnusohjeistus.....	7
2.3	Ohjearvot .....	8
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus .....	10
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus .....	10
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus .....	14
4	Yhteenveto .....	18
5	Viitteet .....	19
6	Melumallinnuksen tiedot.....	20

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Siikaisten kuntaan suunnitellun Santakankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa meluvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 7 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Arvioinnissa huomioidaan myös lähelle suunniteltu Kankaanpään Haukkasalon tuulipuisto (16 voimalaa). Selvityksessä huomioitujen voimaloiden sijainnit on esitetty karttaphojalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Mallinnuksissa molempien tuulipuistojen voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja turbiinityypin V172 7.2 MW PO7200 (with serrated trailing edges) taajuusjakaumaa äänitehotasolla 109,9 dB(A) (turbiinivalmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso 106,9 dB(A) + varmuusarvo 3 dB(A)). Valmistajan ilmoittamaan melupäästön lukuarvoon lisätään siis 3 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.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE2.

*Taulukko 1: Santakankaan VE2 turbiinipaikkojen (7 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeudet.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	237576,5	6876552,4	80,8
T2	235497,0	6877803,0	80,2
T3	235804,0	6876530,4	77,1
T4	237332,8	6875611,6	76,8
T5	236287,4	6877631,4	77,8
T6	236598,8	6876222,0	74,1
T7	236877,4	6877155,4	80,5

*Taulukko 2: Haukkasalon turbiinien sijaintikoordinaatit ja maaston korkeudet.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	246581,9	6878618,7	95,7
T2	247257,4	6877777,1	98,1
T3	247430,2	6877022,4	96,0
T6	246522,8	6876714,0	95,3
T7	246053,8	6877590,2	93,6
T8	243691,2	6877054,4	94,4
T9	245881,6	6875816,8	90,3
T10	245420,6	6876703,7	92,9
T11	244529,8	6876851,6	91,1
T12	242967,8	6876299,3	90,4
T13	242898,4	6875519,6	87,2
T14	244202,0	6875018,5	87,0
T15	244644,8	6874294,8	83,8
T16	245483,1	6874937,6	87,9
T17	244829,3	6875835,4	90,4
T18	243854,8	6875880,5	87,2

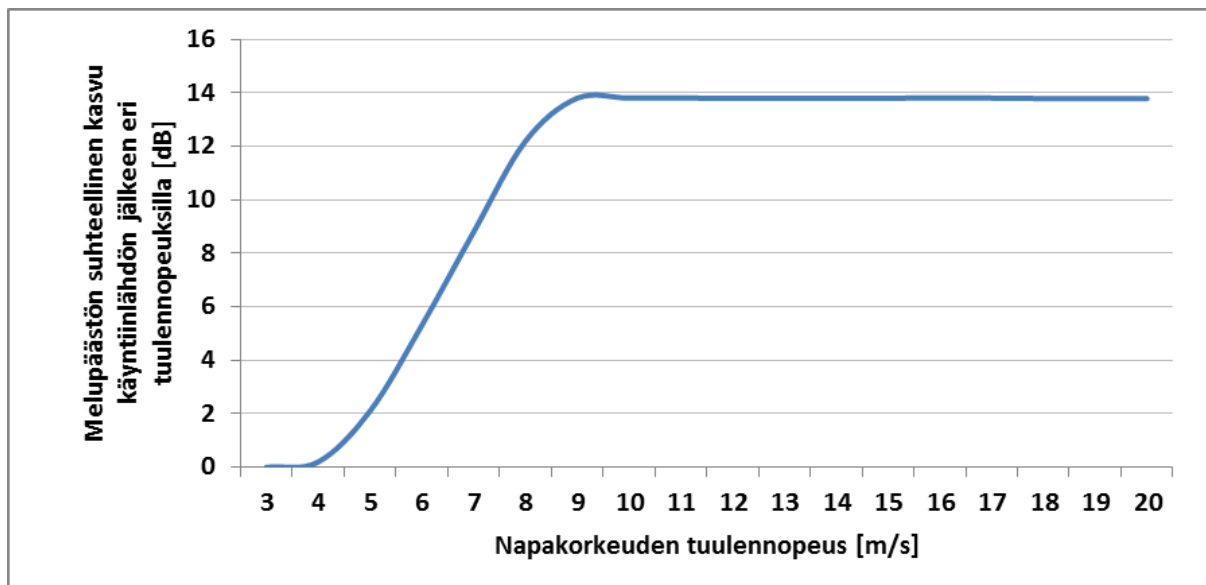
## 2 Tuulivoimaloiden melu

### 2.1 Yleistä tuulivoimamelusta

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

## 2.2 Melumallinnusohjeistus

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

Melumallinnuksen lähtötietona tulisi käyttää teknisen spesifikaation IEC TS 61400-14 mukaista turbiinin melupäästön tunnusarvoa (declared value)  $L_{WA,d}$ . 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 3).

*Taulukko 3: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.*

Tuulivoimamelun ohjearvot	LA <sub>eq</sub> päiväajalle (klo 7–22)	LA <sub>eq</sub> yöajalle (klo 22–7)
Pysyvä asutus, Loma-asutus, Hoitolaitokset, Leirintäalueet	45 dB	40 dB
Oppilaitokset, Virkistysalueet	45 dB	-
Kansallispuistot	40 dB	40 dB

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa enimmäisarvot matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Ohjearvot on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 4). 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 4: Asumisterveysasetuksen ylärajat sisämelulle terssikaistoittain. Desibeliarvot ovat taajuuspainotettuja.

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 3 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 109,9 dB(A). Mallinuksissa käytetyt taajuusjakaumat vastaavat tuulen nopeutta 12 m/s napakorkeudella. Mallinuksissa voimaloiden napakorkeus oli 200 m. 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.

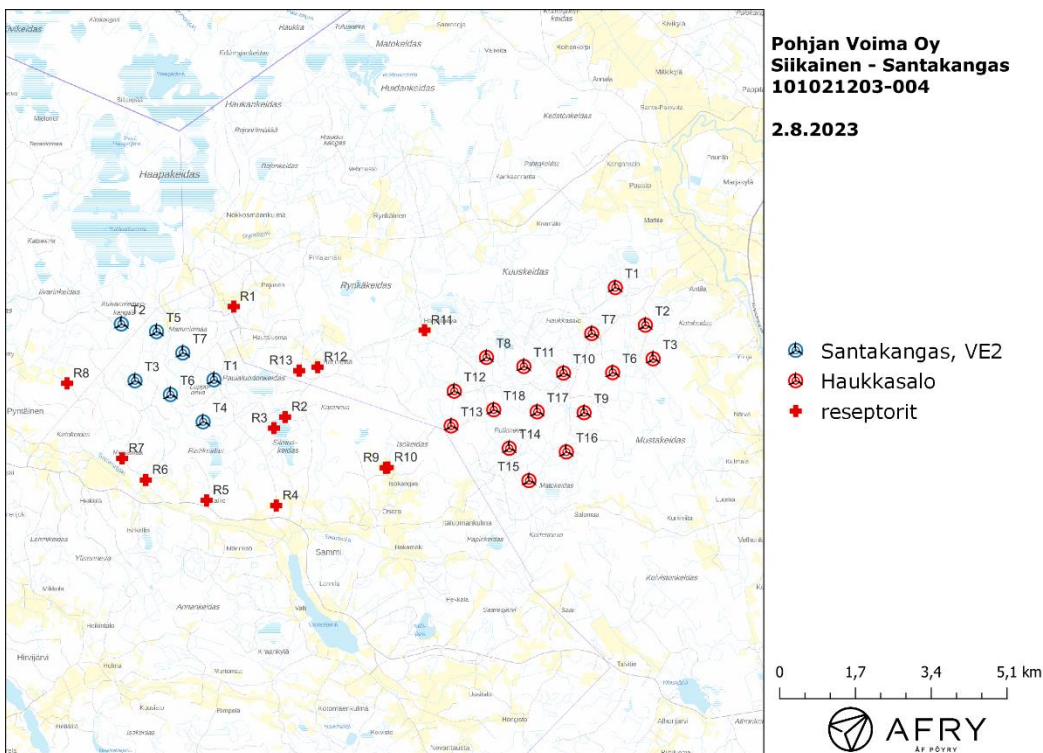
Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 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 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 13 vertailurakennusta, joiden kohdilla LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla

(Kuva 3). Reseptoripisteet sijaitsevat lähimmillään noin 1,2 km etäisyydellä Santakankaan voimaloista.

Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	238022	6878190	78,8	lomarakennus
R2	239174	6875717	84,8	lomarakennus
R3	238925	6875467	83,9	rakenteilla oleva lomarakennus
R4	238975	6873732	77,8	vakituinen asuinrakennus
R5	237411	6873848	67,2	lomarakennus
R6	236048	6874305	65,8	lomarakennus
R7	235518	6874788	68,0	lomarakennus
R8	234283	6876471	73,0	vakituinen asuinrakennus
R9	241432	6874577	81,6	vakituinen asuinrakennus
R10	241478	6874585	81,5	vakituinen asuinrakennus
R11	242303	6877661	90,0	vakituinen asuinrakennus
R12	239905	6876834	90,9	vakituinen asuinrakennus
R13	239490	6876755	90,9	vakituinen asuinrakennus

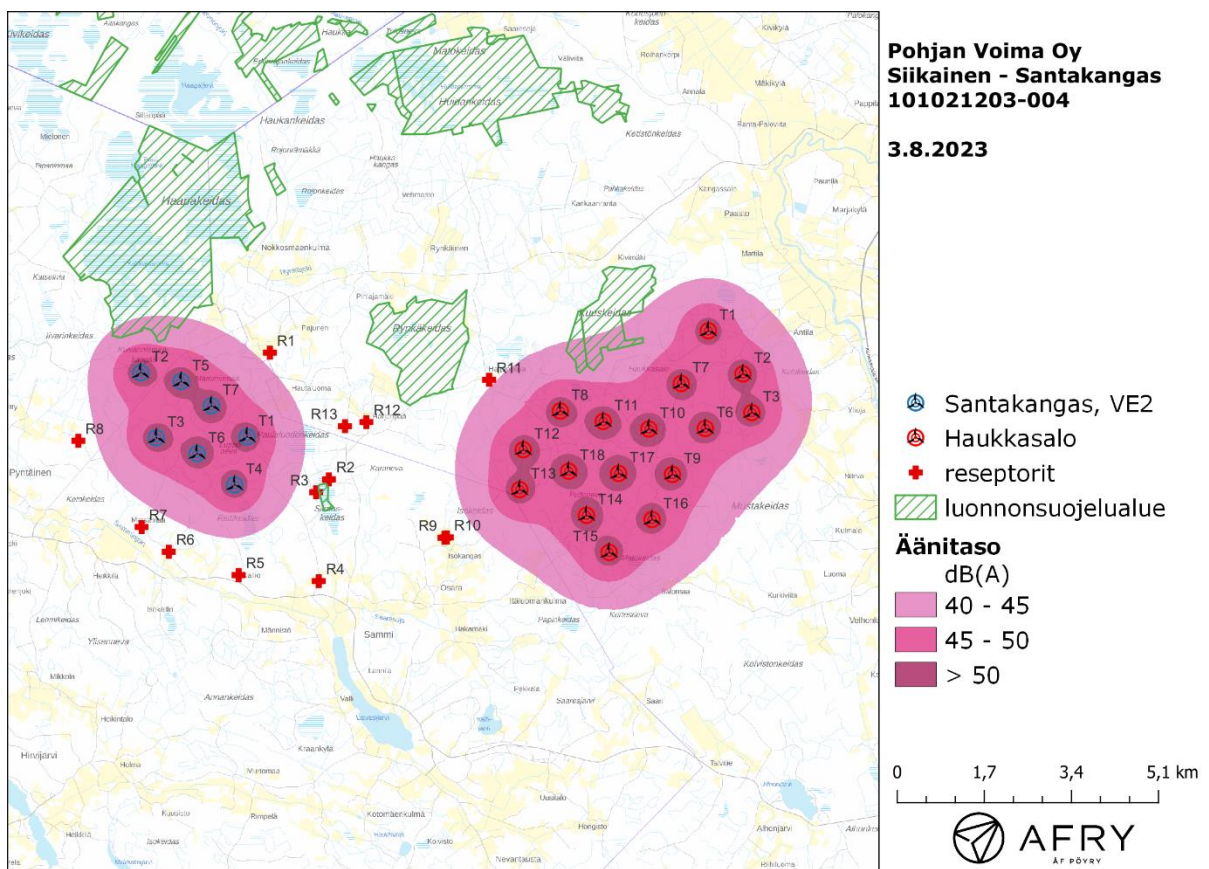


Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

## Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso  $L_{Aeq}$  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, ja melutasoja arvioidaan tarkemmin karttaan merkityissä reseptoripisteissä. Karttakuvaan on lisäksi merkitty hankkeen ympäristössä sijaitsevat luonnonsuojelualueet, joista yksi altistuu Santakankaan tuulivoimaloiden melulle.

Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6), jossa on eroteltuna pelkästään Santakankaan voimaloista aiheutuvat melutasot sekä Haukkasalon yhteisvaikutuksesta aiheutuvat tasot. Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot eivät ylitä valtioneuvoston asetuksen 40 dB:n ohjearvoa kummassakaan tapauksessa.



Kuva 4: Keskiäänitasot  $L_{Aeq}$  tuulivoimapaiston hankealueella sijoitusuunnitelmalla VE2.

Taulukko 6: Santakankaan voimaloiden aiheuttamat keskiäänitasot LAeq sekä yhteisvaikutuksista aiheutuvat tasot reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A) Santakangas	Äänitaso dB(A) Santakangas + Haukkasalo
R1	38,8	38,9
R2	36,4	37,2
R3	37,2	37,9
R4	32,0	33,4
R5	35,2	35,3
R6	36,6	36,8
R7	37,5	37,7
R8	37,9	37,9
R9	26,7	37,0
R10	26,6	37,2
R11	25,1	39,4
R12	33,2	35,5
R13	35,2	36,5

## 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 4). Ympäristöministeriön ohjeistuksen mukainen mallinnus antaa matalataajuisen *ulkomelun* tasot voimaloita lähimpien rakennusten 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 ( $\Delta L_G$ ) 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 ylittyvät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 7) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyiden arvot.

Taulukko 7: Rakennuksen äänieristävyiden arvoja taajuuskaistoittain.

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

Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 7) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Pelkästään Santakankaan turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 8). Kun otetaan huomioon yhteisvaikutukset Haukkasalon voimaloiden kanssa saadaan taulukossa (Taulukko 9) esitetyt matalataajuiset äänitasot.



Korkeimmat Santakankaan aiheuttamat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailurakennukseen R1, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 5). Kun otetaan huomioon yhteisvaikutukset Haukkasalon kanssa, saman pisteen sisämelutasot on esitetty kuvassa (Kuva 6). Korkeimmat melutasot saavutetaan pisteen R11 kohdalla, mutta nämä aiheutuvat pääosin Haukkasalon voimaloista. Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät kaikissa pisteissä asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

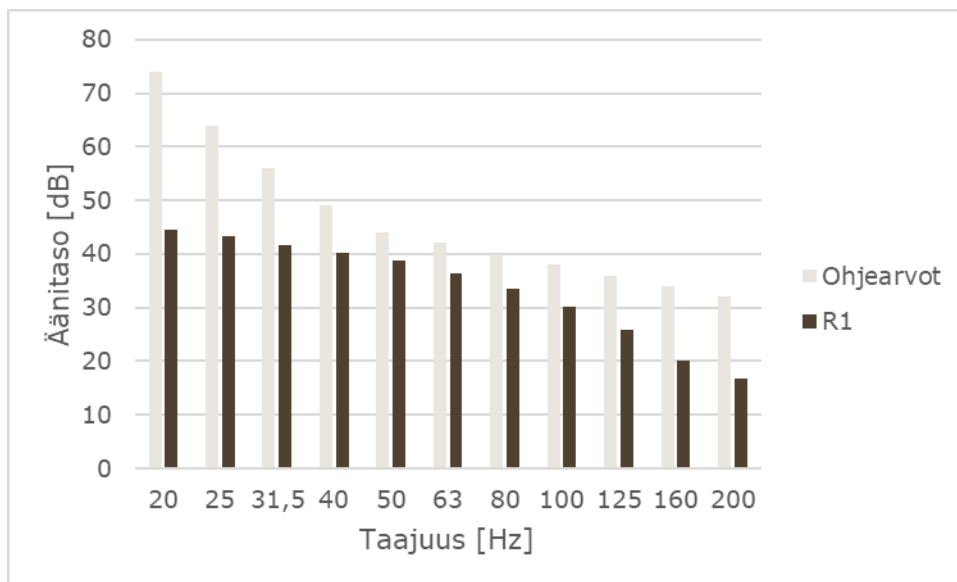
Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 4) lisäksi ohjearvot päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Yöaikainen (klo 22–7) keskiäänitaso ei saa ylittää 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti 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.

*Taulukko 8: Santakankaan voimaloiden aiheuttamat matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla.*

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	52,2	51,5	50,8	50,4	50,2	49,5	48,2	46,9	44,7	41,3	39,5
R2	50,4	49,8	49,1	48,6	48,4	47,7	46,4	45,0	42,8	39,3	37,4
R3	51,0	50,4	49,7	49,2	49,0	48,3	47,0	45,7	43,4	40,0	38,2
R4	47,3	46,7	46,0	45,5	45,3	44,5	43,2	41,7	39,3	35,6	33,5
R5	49,6	49,0	48,3	47,8	47,6	46,9	45,6	44,2	41,9	38,4	36,4
R6	50,6	50,0	49,3	48,9	48,6	47,9	46,7	45,3	43,0	39,5	37,6
R7	51,3	50,7	50,0	49,6	49,4	48,6	47,4	46,0	43,8	40,3	38,5
R8	51,5	50,9	50,2	49,8	49,6	48,8	47,6	46,3	44,0	40,6	38,8
R9	44,2	43,5	42,8	42,3	42,0	41,1	39,8	38,2	35,5	31,5	29,0
R10	44,1	43,4	42,7	42,2	41,9	41,1	39,7	38,1	35,5	31,4	28,9
R11	43,2	42,6	41,8	41,3	41,0	40,2	38,7	37,1	34,4	30,3	27,5
R12	48,3	47,7	47,0	46,5	46,3	45,5	44,2	42,8	40,4	36,8	34,7
R13	49,6	49,0	48,3	47,8	47,6	46,8	45,6	44,2	41,9	38,3	36,4

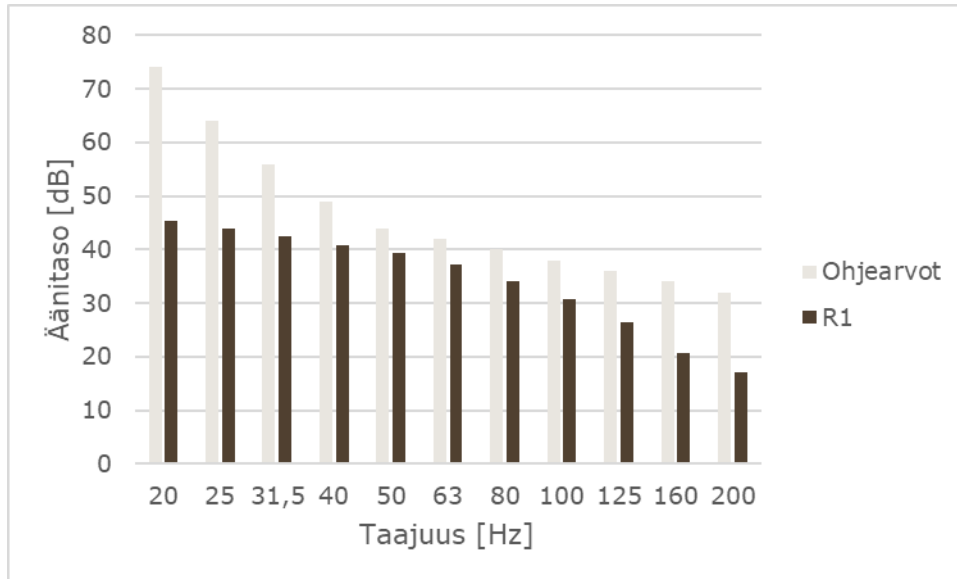
Taulukko 9: Santakankaan ja Haukkasalon aiheuttamat matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB).

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



Kuva 5: Santakankaan voimaloiden aiheuttamat matalataajuisen sisämelun tasot vertailurakennuksen R1 kohdalla.





Kuva 6: Santakankaan ja Haukkasalon voimaloiden aiheuttamat matalataajuisen sisämelun tasot vertailurakennuksen R1 kohdalla.

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Siikaisten kuntaan suunnitellun Santakankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman meluvaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 7 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Vaikutusten arviointi on tehty napakorkeudella 200 m, voimalatyyppin V172 7.2 MW taajuusjakaumilla ja käyttäen 3 dB:n varmuusarvoa valmistajan ilmoittamalle melupäästölle.

Mallinnusten perusteella melutasot eivät ylitä valtioneuvoston ohjearvoja alueen rakennusten kohdilla. Matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla Asumis-terveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella.

## 5 Viitteet

- [1] C. Di Napoli: Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen, Suomen Ympäristö 4, 2007.
- [2] D. Siponen: Noise Annoyance of Wind Turbines, VTT Research Report VTTR-00951-11, 2011.
- [3] J. Jakobsen: Danish regulation for low frequency noise from wind turbines, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 31(4), 2012.
- [4] J. Keränen, J. Hakala, V. Hongisto: The sound insulation of façades at frequencies 5–5000Hz, Building and Environment 156, 2019.
- [5] S. Uosukainen: Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys, VTT Tiedotteita 2529, 2010.
- [6] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.
- [7] Tuulivoimaloiden melun mallintaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2014. Ympäristöministeriö.
- [8] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [9] Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason 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: <b>101021203-004.002</b>				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: <b>2.10.2023</b>			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: <b>AFRY Finland Oy</b>							
Vastuhenkilöt: <b>Erkki Heikkola</b>							
Laatija: <b>Erkki Heikkola</b>				Tarkastaja/hyväksyjä: <b>Riku Suutari</b>			
MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT							
Mallinnusohjelma ja versio: <b>AFRY Numerola -mallinnusohjelmisto</b>				Mallinnusmenetelmä: <b>ISO 9613-2</b>			
TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN) TIEDOT							
Tuulivoimalan valmistaja: <b>Vestas</b>				Tyyppi: <b>V172 7.2 MW PO7200 (with serrated trailing edges)</b>		Sarjanumero/t:	
Nimellisteho: <b>7.2 MW</b>		Napakorkeus: <b>200 m</b>		Roottorin halkaisija: <b>172 m</b>		Tornin tyyppi:	
Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön käytön aikana ja sen vaikutus meluun							
Lapakulman säätö		Pyörimisnopeus		Muu, mikä			
Kyllä	dB	Kyllä	dB			dB	
Ei	<b>Ei tiedossa</b>	Ei	<b>Ei tiedossa</b>			dB	
AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT							
Third octave noise emission EnVentus™ V172-7.2MW 50/60 Hz. Document no 0128-4336_00. 2022-06-30.							
Melupäästötiedot (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	64,0	200	98,1	2000	92,2
63	92,5	25	69,2	250	98,7	2500	89,8
125	100,2	31,5	74,0	315	98,8	3150	87,1
250	103,3	40	78,8	400	99,0	4000	84,1
500	103,5	50	83,2	500	98,7	5000	80,7
1000	101,8	63	87,0	630	98,5	6300	76,9
2000	97,2	80	90,3	800	98,0	8000	72,8
4000	89,5	100	93,1	1000	97,1	10000	68,3
8000	78,7	125	95,3	1250	95,8		
		160	97,0	1600	94,2		

Melun erityispiirteiden mittaustulos ja havainnot:						
Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus		Impulssimaisuus		Merkityksellinen sykintä (amplitudi- modulaatio)		Muu, mikä:
kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä ei
Laskentakorkeus				Laskentaruudun koko [m x m]		
<b>4 m</b>				<b>10 m x 10 m</b>		
Suhteellinen kosteus				Lämpötila		
<b>70 %</b>				<b>15 C°</b>		
Maastomallin lähde ja tarkkuus						
Maastomallin lähde: <b>Maanmittauslaitos</b>				Vaakaresoluutio: <b>2 m</b>	Pystyresoluutio: <b>0,3 m</b>	
Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet						
<b>ISO 9613-2</b>						
Vesialueet, (0) / (G)						
Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F)						
Maa-alueet (0) / (G)						
Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus						
<b>Neutraali</b>						
Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen						
<b>Vapaa avaruus</b>						
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)						
Asuinrakennukset: <b>0 kpl</b>		Vapaa-ajan rakennukset: <b>0 kpl</b>		Hoito- ja oppilaitokset: <b>0 kpl</b>		
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)						
Asuinrakennukset: <b>0 kpl</b>		Vapaa-ajan rakennukset: <b>0 kpl</b>		Hoito- ja oppilaitokset: <b>0 kpl</b>		
Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille						
Virkistysalueet: <b>0 kpl</b>				Luonnonsuojelualueet: <b>1 kpl</b>		
Hz	R1	R2	R3	R4	R5	R6
<b>20</b>	52,9	52,1	52,4	49,8	50,7	51,3
<b>25</b>	52,3	51,4	51,7	49,1	50,1	50,7
<b>31,5</b>	51,6	50,7	51,0	48,4	49,3	49,9
<b>40</b>	51,1	50,3	50,6	47,9	48,9	49,5
<b>50</b>	50,9	50,0	50,3	47,6	48,6	49,3
<b>63</b>	50,1	49,2	49,6	46,8	47,8	48,5
<b>80</b>	48,9	48,0	48,3	45,4	46,5	47,2
<b>100</b>	47,5	46,5	46,8	43,9	45,1	45,8
<b>125</b>	45,2	44,1	44,5	41,4	42,7	43,4
<b>160</b>	41,7	40,5	40,9	37,5	39,0	39,8
<b>200</b>	39,8	38,5	38,9	35,1	36,9	37,9

<b>Hz</b>	<b>R7</b>	<b>R8</b>	<b>R9</b>	<b>R10</b>	<b>R11</b>	<b>R12</b>	<b>R13</b>
<b>20</b>	51,9	51,9	52,2	52,3	53,7	51,4	51,7
<b>25</b>	51,2	51,3	51,5	51,6	53,1	50,7	51,1
<b>31,5</b>	50,5	50,6	50,8	50,9	52,3	50,0	50,4
<b>40</b>	50,1	50,1	50,3	50,4	51,9	49,5	49,9
<b>50</b>	49,8	49,9	50,1	50,2	51,7	49,3	49,7
<b>63</b>	49,1	49,2	49,3	49,4	50,9	48,5	48,9
<b>80</b>	47,8	47,9	48,0	48,1	49,7	47,1	47,6
<b>100</b>	46,4	46,5	46,6	46,7	48,3	45,6	46,1
<b>125</b>	44,1	44,2	44,2	44,3	46,0	43,2	43,7
<b>160</b>	40,6	40,7	40,5	40,7	42,4	39,4	40,0
<b>200</b>	38,7	38,8	38,4	38,6	40,5	37,2	37,9



Pohjan Voima Oy

**Santakankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE1)**

101021203-004

Tekijä  
Erkki Heikkola

pvm  
02/10/2023

Osasto  
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinumero  
101021203-004

E-mail  
[erkki.heikkola@afry.com](mailto:erkki.heikkola@afry.com)

Raporttiversio  
002

Raportin tila  
LOPULLINEN

Asiakas

Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

## Santakankaan tuulivoimapaiston välkeseelvitys (VE1)



## Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	08.08.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	08.08.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	02.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	02.10.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Esitetty Santakankaan vaikutukset ja yhteisvaikutukset erikseen

## Aineistojen käyttöoikeudet

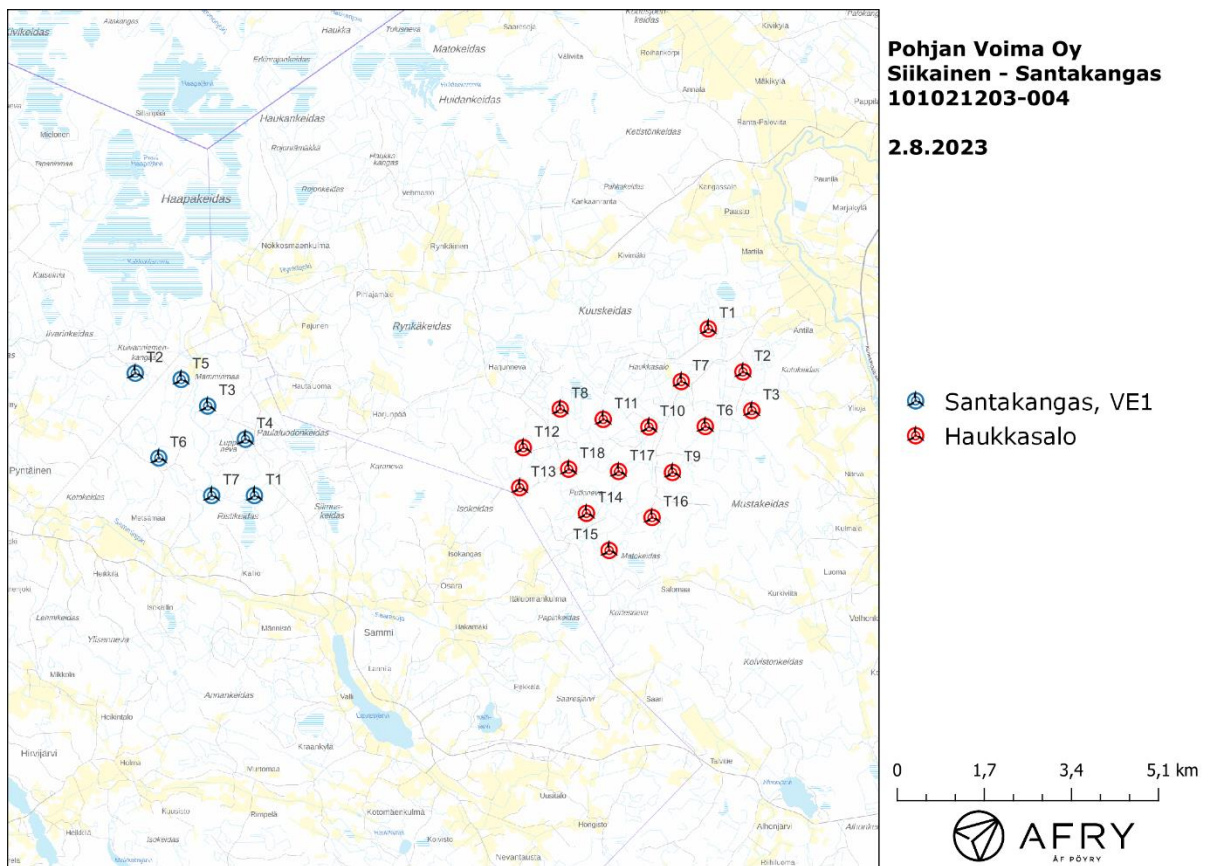
Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Ilmatieteen laitoksen avoimien aineistojen käyttöilupien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden välke .....	6
2.1	Välkevaikutus .....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen .....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet .....	6
2.4	Ohjearvot .....	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus .....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....	8
3.2	Todennäköinen välkevaikutus .....	11
4	Yhteenveto .....	14
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....	15
6	Viitteet .....	17

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Siikaisten kunnan alueelle suunnitellun Santakankaan tuulivoimapaiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään 7 voimalan suunnitelmalle VE1. Arvioinnissa huomioidaan myös lähelle suunniteltu Kankaanpään Haukkasalon tuulipuisto (16 voimalaa). Selvityksessä huomioitujen voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2). Mallinuksissa kaikille voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella tuulivoimaloiden sijoitussuunnitelmalla VE1.

*Taulukko 1: Santakankaan VE1 turbiinipaikkojen sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	237718,8	6875364,9	75,7
T2	235391,1	6877752,4	79,5
T3	236804,8	6877111,5	79,8
T4	237541,4	6876463,1	80,4
T5	236287,4	6877631,4	77,8
T6	235851,0	6876098,0	78,0
T7	236883,6	6875364,3	75,7

*Taulukko 2: Haukkasalon turbiinien sijaintikoordinaatit ja maaston korkeudet.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	246581,9	6878618,7	95,7
T2	247257,4	6877777,1	98,1
T3	247430,2	6877022,4	96,0
T6	246522,8	6876714,0	95,3
T7	246053,8	6877590,2	93,6
T8	243691,2	6877054,4	94,4
T9	245881,6	6875816,8	90,3
T10	245420,6	6876703,7	92,9
T11	244529,8	6876851,6	91,1
T12	242967,8	6876299,3	90,4
T13	242898,4	6875519,6	87,2
T14	244202,0	6875018,5	87,0
T15	244644,8	6874294,8	83,8
T16	245483,1	6874937,6	87,9
T17	244829,3	6875835,4	90,4
T18	243854,8	6875880,5	87,2

## 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 ilta-ajat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

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

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

Tämän selvityksen välkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 2.2 Välkkeen rajoittaminen

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

### 2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen 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 [1]. Tässä selvityksessä välkeaikoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa todennäköisen vuotuisen välkkeen raja-arvo on 8 tuntia. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.

## 3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen 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 2,0 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 ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

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

Väkelaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 n, roottorin halkaisijaa 200 m ja turbiinityypin SG170 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi siten, että skaalatun lavan maksimileveys on 4,7 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätö (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väkkeituntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksista [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny.

Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Seinäjoen Pelmaan sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [4]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 4). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3: 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	0,167	0,201	0,171	0,116	0,137	0,139

Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

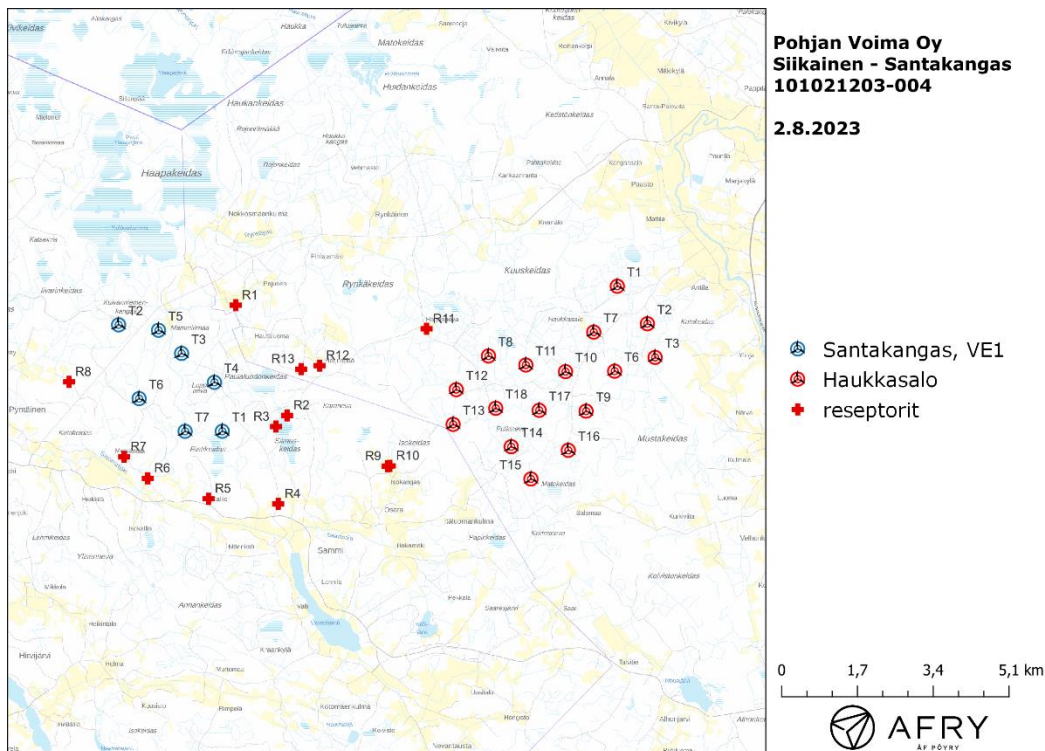
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,162
Helmikuu	0,291
Maaliskuu	0,398
Huhtikuu	0,423
Toukokuu	0,479
Kesäkuu	0,459
Heinäkuu	0,454
Elokuu	0,414
Syyskuu	0,358
Lokakuu	0,260
Marraskuu	0,150
Joulukuu	0,110

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 13 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Reseptoripisteet sijaitsevat lähimmillään noin 1,2 km etäisyydellä Santakankaan voimaloista.



Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	238022	6878190	78,8	lomarakennus
R2	239174	6875717	84,8	lomarakennus
R3	238925	6875467	83,9	rakenteilla oleva lomarakennus
R4	238975	6873732	77,8	vakituihin asuinrakennus
R5	237411	6873848	67,2	lomarakennus
R6	236048	6874305	65,8	lomarakennus
R7	235518	6874788	68,0	lomarakennus
R8	234283	6876471	73,0	vakituihin asuinrakennus
R9	241432	6874577	81,6	vakituihin asuinrakennus
R10	241478	6874585	81,5	vakituihin asuinrakennus
R11	242303	6877661	90,0	vakituihin asuinrakennus
R12	239905	6876834	90,9	vakituihin asuinrakennus
R13	239490	6876755	90,9	vakituihin asuinrakennus



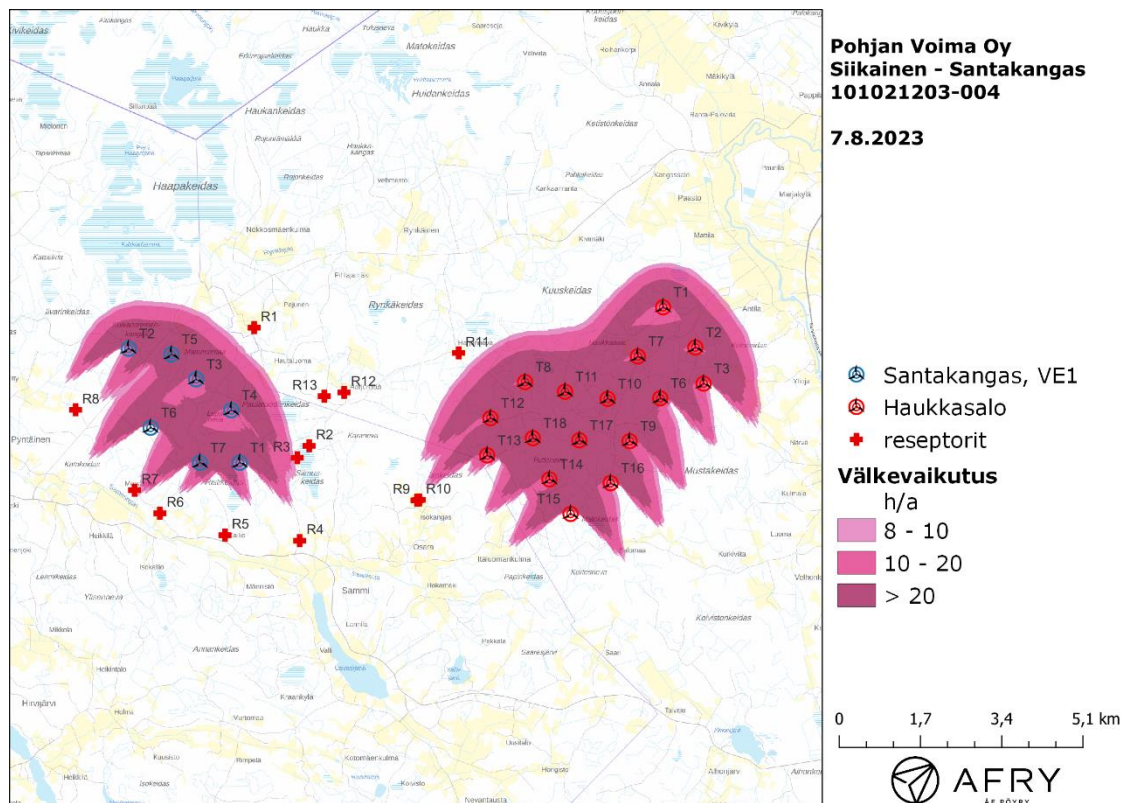
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

### 3.2 Todennäköinen välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisen välkeajan vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty välkevaikutusten arvioinnissa käytettävät reseptoripisteet. Mallinnuksessa on otettu huomioon Santakankaan itäpuolella reilun 5 km etäisyydellä sijaitseva Haukkasalon tuulipuisto. Kun voimaloiden roottorin halkaisija on 200 m, välkevaikutuksen maksimietäisyytenä voidaan pitää 2500 metriä. Tämän vuoksi naapuripuistojen voimaloista ei aiheudu välkkeen yhteisvaikutuksia.

Todennäköiset vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6). Koska yhteisvaikutuksia ei ole, pisteiden R9, R10 ja R11 välkkeet aiheutuvat pelkästään Haukkasalon voimaloista ja muiden pisteiden välkkeet pelkästään Santakankaan voimaloista. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kaikkien alueen reseptoripisteiden kohdilla. Suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla jäävät alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon.

Suurin välkevaikutus kohdistuu reseptoreihin R3 ja R7. Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen näiden pisteiden kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 7 ja Taulukko 8). Esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen vuotuinen määrä ja suurin päiväkohtainen välkeaika reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika (h:min) Santakangas	Todennäköinen vuotuinen välkeaika (h:min) Santakangas+Haukkasalo	Todennäköinen suurin päiväkohtainen välkeaika (min)
R1	3:11	3:11	4
R2	3:19	3:19	8
R3	6:31	6:31	9
R4	0:00	0:00	0
R5	0:00	0:00	0
R6	2:58	2:58	5
R7	5:34	5:34	9
R8	2:19	2:19	5
R9	0:00	3:43	7
R10	0:00	3:21	8
R11	0:00	3:55	7
R12	0:18	0:18	2
R13	1:02	1:02	3

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R3 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	1:24	0:06	0:00	0:00	1:30
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38	0:00	0:00	0:00	0:38
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10	1:07	0:00	1:17
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	1:04	0:00	1:04
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:00	0:08
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:54	0:00	0:00	0:00	1:54
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:56	0:16	2:19	0:00	6:31

*Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R7 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	0:14	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:14
Toukokuu	0:00	0:00	2:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:15
Kesäkuu	0:00	0:00	0:22	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22
Heinäkuu	0:00	0:00	2:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:17
Elokuu	0:00	0:00	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
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	5:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:34

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Siikaisten kunnan alueelle suunnitellun Santakankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 7 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Vaikutusten arvioinnissa on huomioitu Santakankaan itäpuolelle suunniteltu Haukkasalon tuulivoimapuisto.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon alueen kaikkien vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla.

## 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.

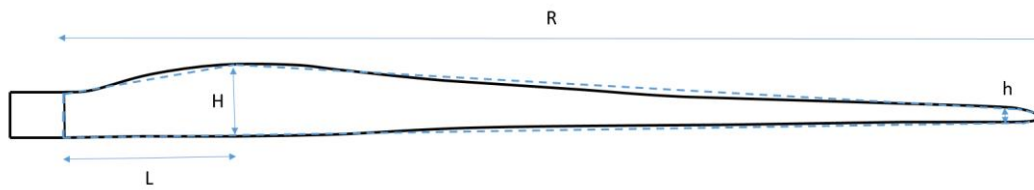
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 4) on esitetty yksinkertaistettu 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 4: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon  $H$  ja  $h$  perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. Tällä tavoin välkkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.



## 6 Viitteet

- [1] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.





Pohjan Voima Oy

**Santakankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)**

101021203-004

Tekijä  
Erkki Heikkola

pvm  
02/10/2023

Osasto  
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinumero  
101021203-004

E-mail  
[erkki.heikkola@afry.com](mailto:erkki.heikkola@afry.com)

Raporttiversio  
002

Raportin tila  
LOPULLINEN

Asiakas

Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

## Santakankaan tuulivoimapuiston välkeseelvitys (VE2)

## Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	08.08.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	08.08.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	02.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	02.10.2023/ Riku Suutari, Senior Consultant	Esitetty Santakankaan vaikutukset ja yhteisvaikutukset erikseen

## Aineistojen käyttöoikeudet

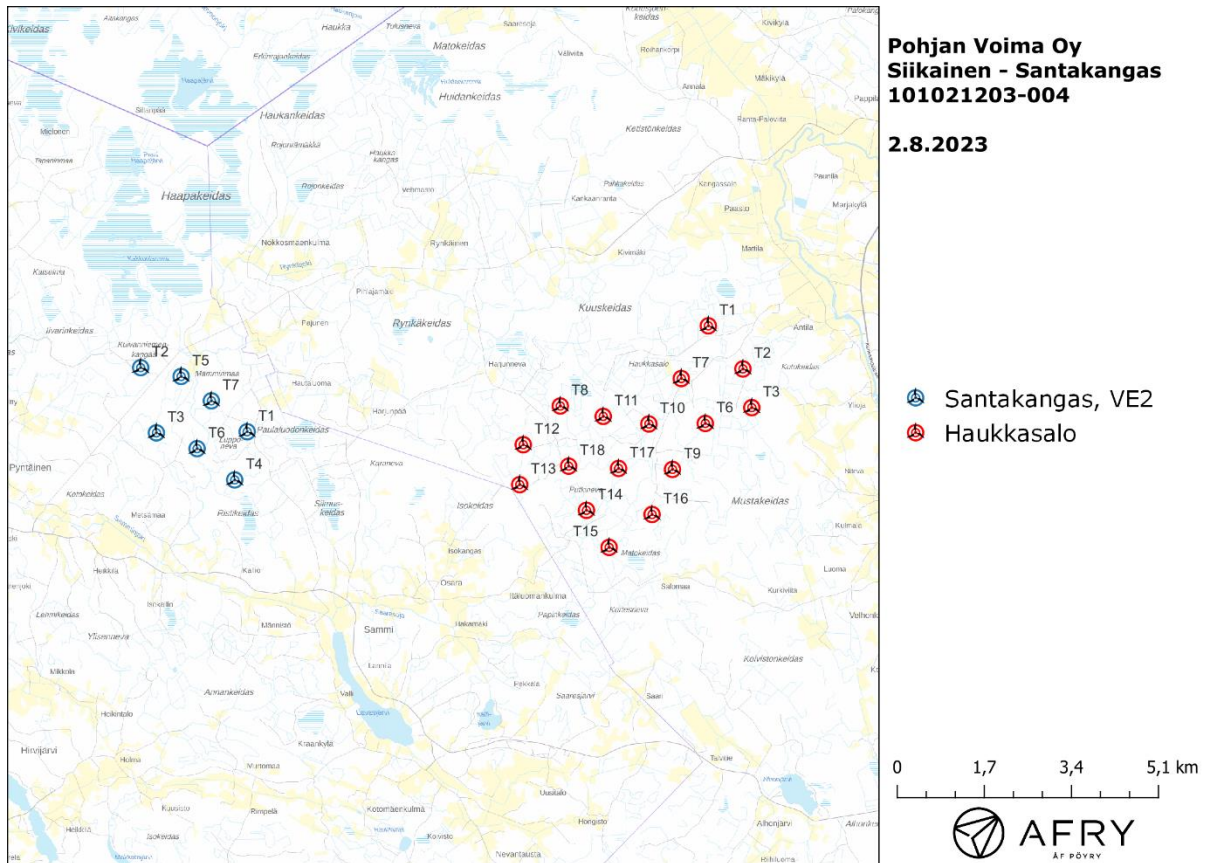
Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Ilmatieteen laitoksen avoimien aineistojen käyttöluvien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden välke .....	6
2.1	Välkevaikutus .....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen .....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet .....	6
2.4	Ohjeavot .....	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus .....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....	8
3.2	Todennäköinen välkevaikutus .....	11
4	Yhteenveto .....	14
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....	15
6	Viitteet .....	17

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Siikaisten kunnan alueelle suunnitellun Santakankaan tuulivoimapaiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään 7 voimalan suunnitelmalle VE2. Arvioinnissa huomioidaan myös lähelle suunniteltu Kankaanpään Haukkasalon tuulipuisto (16 voimalaa). Selvityksessä huomioitujen voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2). Mallinuksissa kaikille voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella tuulivoimaloiden sijoitussuunnitelmalla VE2.

*Taulukko 1: Santakankaan VE2 turbiinipaikkojen sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	237576,5	6876552,4	80,8
T2	235497,0	6877803,0	80,2
T3	235804,0	6876530,4	77,1
T4	237332,8	6875611,6	76,8
T5	236287,4	6877631,4	77,8
T6	236598,8	6876222,0	74,1
T7	236877,4	6877155,4	80,5

*Taulukko 2: Haukkasalon turbiinien sijaintikoordinaatit ja maaston korkeudet.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	246581,9	6878618,7	95,7
T2	247257,4	6877777,1	98,1
T3	247430,2	6877022,4	96,0
T6	246522,8	6876714,0	95,3
T7	246053,8	6877590,2	93,6
T8	243691,2	6877054,4	94,4
T9	245881,6	6875816,8	90,3
T10	245420,6	6876703,7	92,9
T11	244529,8	6876851,6	91,1
T12	242967,8	6876299,3	90,4
T13	242898,4	6875519,6	87,2
T14	244202,0	6875018,5	87,0
T15	244644,8	6874294,8	83,8
T16	245483,1	6874937,6	87,9
T17	244829,3	6875835,4	90,4
T18	243854,8	6875880,5	87,2

## 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 ilta-ajat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

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

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

Tämän selvityksen välkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 2.2 Välkkeen rajoittaminen

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

### 2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen 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 [1]. Tässä selvityksessä välkeajoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa todennäköisen vuotuisen välkkeen raja-arvo on 8 tuntia. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.



## 3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen 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 2,0 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 ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

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

Väkelaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 n, roottorin halkaisijaa 200 m ja turbiinityypin SG170 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi siten, että skaalatun lavan maksimileveys on 4,7 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätö (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väkkeituntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny.

Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Seinäjoen Pelmaan sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [4]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 4). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3: 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	0,167	0,201	0,171	0,116	0,137	0,139

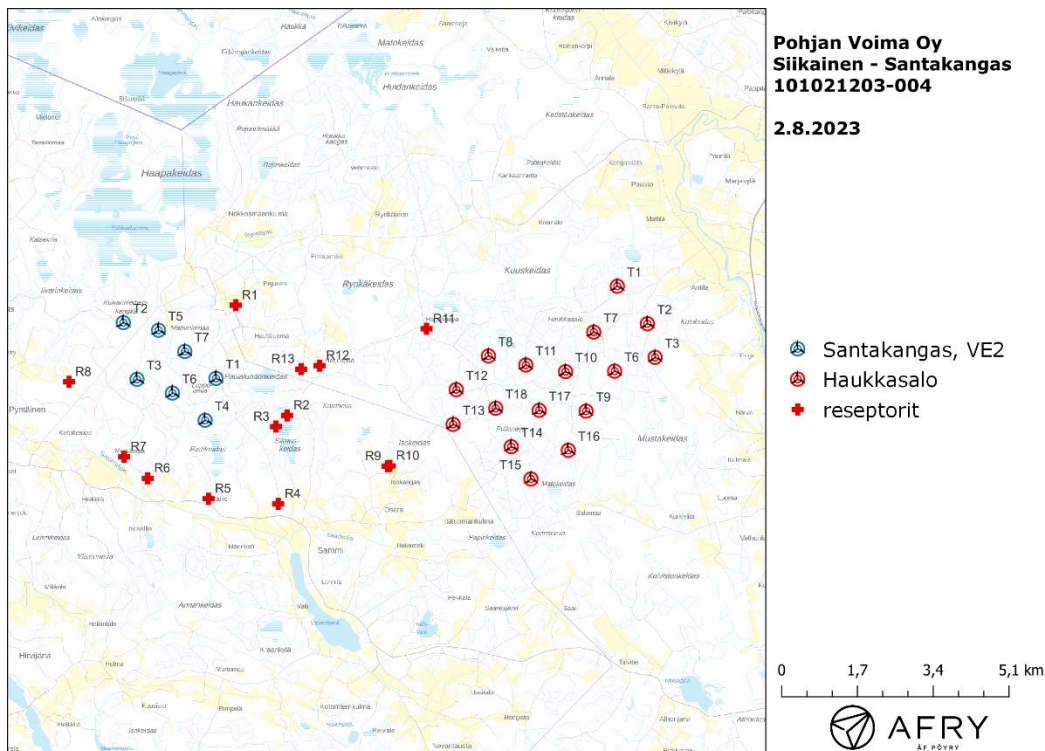
Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,162
Helmikuu	0,291
Maaliskuu	0,398
Huhtikuu	0,423
Toukokuu	0,479
Kesäkuu	0,459
Heinäkuu	0,454
Elokuu	0,414
Syyskuu	0,358
Lokakuu	0,260
Marraskuu	0,150
Joulukuu	0,110

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 13 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Reseptoripisteet sijaitsevat lähimmillään noin 1,2 km etäisyydellä Santakankaan voimaloista.

Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	238022	6878190	78,8	lomarakennus
R2	239174	6875717	84,8	lomarakennus
R3	238925	6875467	83,9	rakenteilla oleva lomarakennus
R4	238975	6873732	77,8	vakituihin asuinrakennus
R5	237411	6873848	67,2	lomarakennus
R6	236048	6874305	65,8	lomarakennus
R7	235518	6874788	68,0	lomarakennus
R8	234283	6876471	73,0	vakituihin asuinrakennus
R9	241432	6874577	81,6	vakituihin asuinrakennus
R10	241478	6874585	81,5	vakituihin asuinrakennus
R11	242303	6877661	90,0	vakituihin asuinrakennus
R12	239905	6876834	90,9	vakituihin asuinrakennus
R13	239490	6876755	90,9	vakituihin asuinrakennus



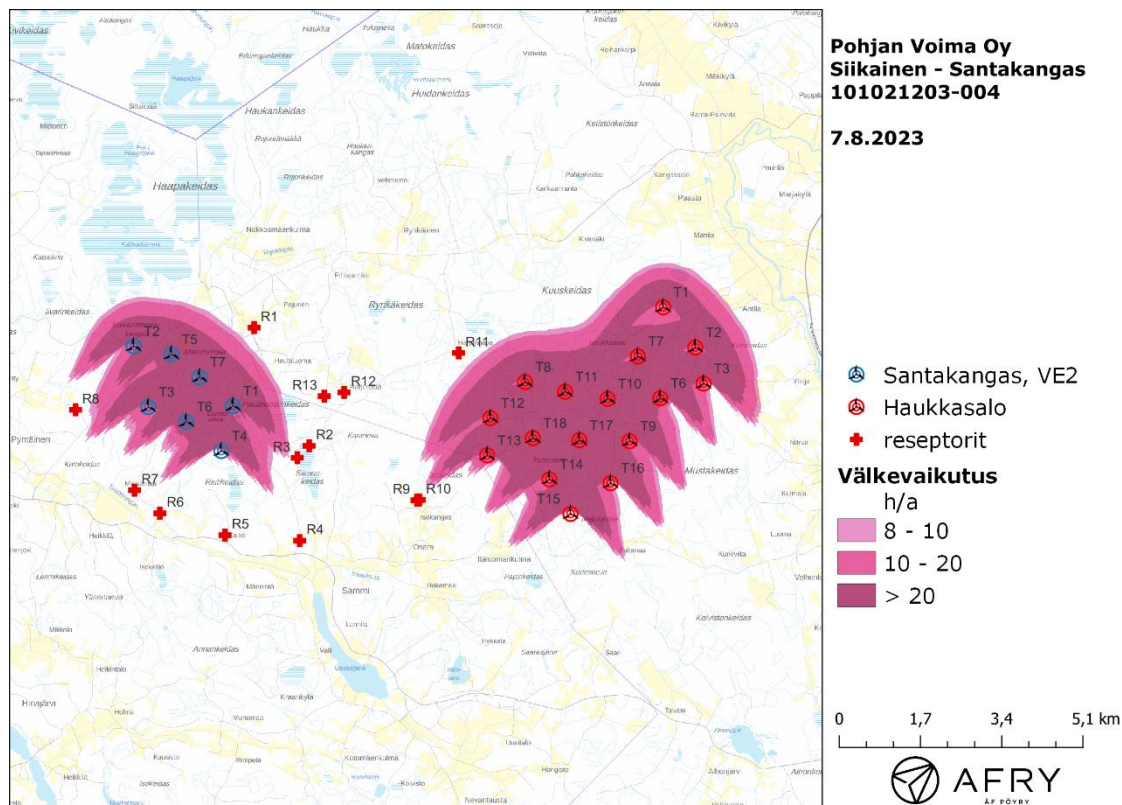
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

### 3.2 Todennäköinen välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisen välkeajan vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty välkevaikutusten arvioinnissa käytettävät reseptoripisteet. Mallinnuksessa on otettu huomioon Santakankaan itäpuolella reilun 5 km etäisyydellä sijaitseva Haukkasalon tuulipuisto. Kun voimaloiden roottorin halkaisija on 200 m, välkevaikutuksen maksimietäisyytenä voidaan pitää 2500 metriä. Tämän vuoksi naapuripuistojen voimaloista ei aiheudu välkkeen yhteisvaikutuksia.

Todennäköiset vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6). Koska yhteisvaikutuksia ei ole, pisteiden R9, R10 ja R11 välkkeet aiheutuvat pelkästään Haukkasalon voimaloista ja muiden pisteiden välkkeet pelkästään Santakankaan voimaloista. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kaikkien alueen reseptoripisteiden kohdilla. Suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla jäävät alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon.

Suurin välkevaikutus kohdistuu reseptoreihin R3 ja R8. Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen näiden pisteiden kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 7 ja Taulukko 8). Esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen vuotuinen määrä ja suurin päiväkohtainen välkeaika reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika (h:min) Santakangas	Todennäköinen vuotuinen välkeaika (h:min) Santakangas+Haukkasalo	Todennäköinen suurin päiväkohtainen välkeaika (min)
R1	3:49	3:49	4
R2	2:09	2:09	4
R3	4:41	4:41	5
R4	0:00	0:00	0
R5	0:00	0:00	0
R6	0:00	0:00	0
R7	1:27	1:27	4
R8	3:18	3:18	6
R9	0:00	3:43	7
R10	0:00	3:21	8
R11	0:00	3:55	7
R12	0:20	0:20	2
R13	0:57	0:57	3

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R3 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	0:03	0:00	0:00	0:03
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:53	0:00	0:00	0:53
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:14	0:00	1:14
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16	0:00	0:16
Heinäkuu	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
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:10
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:39	0:00	0:00	0:39
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:45	2:56	0:00	4:41

*Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R8 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	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:06
Toukokuu	0:00	0:00	0:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
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	0:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:30
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:56	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:56
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
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
<b>Yhteensä</b>	0:00	0:00	1:01	2:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:18

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Siikaisten kunnan alueelle suunnitellun Santakankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 7 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Vaikutusten arvioinnissa on huomioitu Santakankaan itäpuolelle suunniteltu Haukkasalon tuulivoimapuisto.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon alueen kaikkien vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla.



## 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 tuulisuusosuuksilla.

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

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.

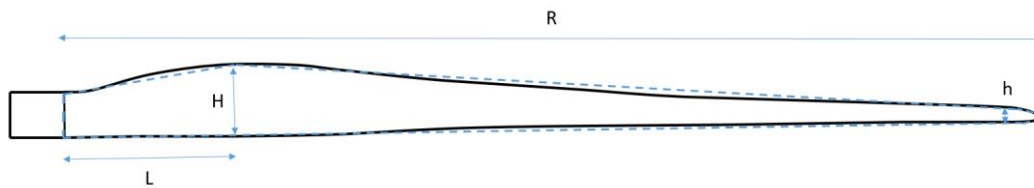
Kun lavan leveys on  $w$  metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

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

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 4) on esitetty yksinkertaistettu 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 4: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon  $H$  ja  $h$  perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

## 6 Viitteet

- [1] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.