

# Tuulivoimahankkeen melu- ja välkeselvitys

HUSO-PÖYLÄN TUULIVOIMAPUISTO – PAIMIO JA SALO

MIKA LAITINEN

11.04.2022

## Raportin nimi ja tunnus

Tuulivoimahankkeen melu- ja välkeselvitys: Huso-Pöylän tuulivoimapuisto – Paimio ja Salo  
TV-2022-709-1, 11.04.2022

## Asiakas

Erik Trast  
CPC Finland Oy

## Raportin tekijät

Mika Laitinen, Numerola Oy  
[mika.laitinen@numerola.fi](mailto:mika.laitinen@numerola.fi)

## Asiatarkastus

Erkki Heikkola ja Pasi Tarvainen

## Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Paimion ja Salon kaupunkien alueille suunnitellun 8 voimalan Huso-Pöylän tuulivoimapuiston aiheuttamista melu- ja välkevaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten menetelmien avulla. Tuulivoimaloiden aiheuttamat äänitasot ja välkevaikutus lasketaan käyttäen turbiinityypin V162 5,6 MW teknisiä tietoja. Melumallinnuksessa ja raportoinnissa noudatetaan ympäristöministeriön julkaisemaa mallinnusohjeistusta. Tulosten arvioinnissa käytetään valtioneuvoston, sosiaali- ja terveysministeriön sekä ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

## Aineistojen käyttöoikeudet

Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen, Suomen ympäristökeskuksen ja Luonnonvarakeskuksen avoimien aineistojen käyttö lupien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>

## Versiohistoria

Revisio	Päiväys	Muutokset	Muutoksen tekijä
00	14.02.2022		Mika Laitinen
01	11.04.2022	Äänitehotasoon lisätty 2 dB:n varmuusarvo	Mika Laitinen

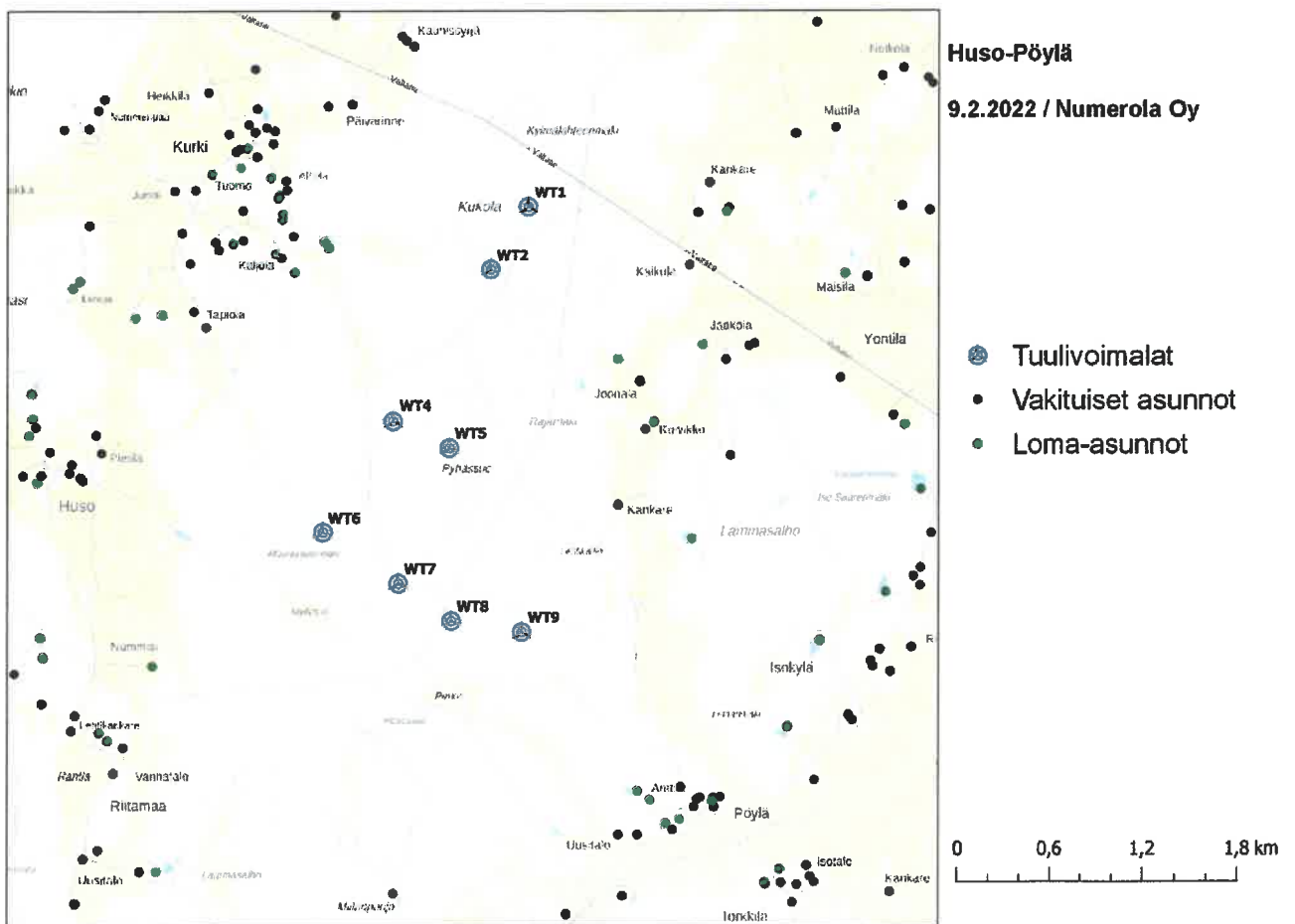
## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	3
2	Tuulivoimaloiden melu .....	5
2.1	Melumallinnusohjeistus .....	6
2.2	Ohjearvot.....	7
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus .....	9
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus .....	9
3.2	Vertailu kaavavaiheen melumallinnukseen.....	12
3.3	Matalataajuisen melun mallinnus .....	13
4	Tuulivoimaloiden välke.....	16
4.1	Välkevaikutus.....	16
4.2	Välkkeen rajoittaminen .....	16
4.3	Ohjearvot.....	17
5	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	18
5.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto.....	18
5.2	Välkevaikutus.....	19
5.3	Puuston välkettä vähentävä vaikutus.....	23
6	Yhteenveto .....	25
7	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä.....	26
8	Viitteet .....	28
9	Melumallinnuksen tiedot .....	30

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Paimion ja Salon kaupunkien alueille suunnitellun 8 voimalan Huso-Pöylän tuulivoimapuiston aiheuttamaa melu- ja välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Kohteeseen suunniteltujen turbiinien paikat on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa on käytetty turbiinityypin Vestas V162 5,6 MW valmistajan ilmoittamia teknisiä tietoja ja napakorkeutta 119 m (kokonaiskorkeus 200 m). Voimalatyyppin valmistajan ilmoittama maksimiäänitehotaso on 104 dB(A) ja melumallinnuksessa käytettiin valmistajan 1/3-oktaaveittain ilmoittamaa taajuusjakaumaa. Valmistajan ilmoittamiin melupäästöarvoihin on lisätty ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeituksen mukainen 2 dB:n varmuusarvo [12]. Välkevaikutusten mallinnuksissa on käytetty roottorin halkaisijaa 162 m ja turbiinityypin V162 lapaprofiilia.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Huso-Pöylän alueella.

**Taulukko 1: Huso-Pöylän voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla. Voimala WT3 on poistettu suunnitelmasta.**

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
<b>WT1</b>	270223,0	6703146,0	66,9
<b>WT2</b>	269980,0	6702742,0	57,4
<b>WT4</b>	269353,0	6701768,0	68,6
<b>WT5</b>	269714,2	6701594,3	62,4
<b>WT6</b>	268906,0	6701049,3	54,7
<b>WT7</b>	269387,8	6700722,4	50,2
<b>WT8</b>	269728,7	6700481,2	58,5
<b>WT9</b>	270183,7	6700408,4	60,1

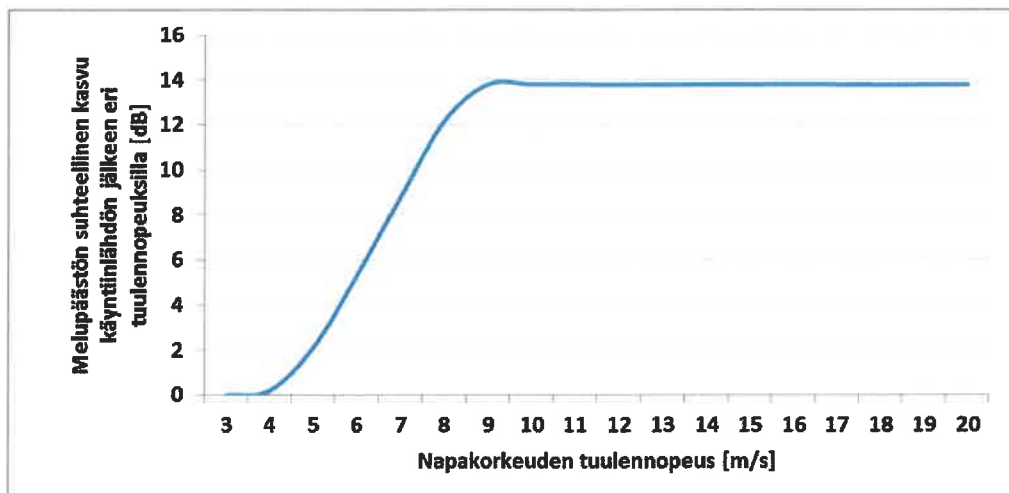
## 2 Tuulivoimaloiden melu

### 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 [16]. 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 [20].

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, vuodenaajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1,5 m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemuseräisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [19].

Ilmakehän pystysuuntaisen stabiilisuuden ja ilmapirran turbulenssin vaihtelut vuorokauden eri aikoina voivat vaikuttaa tuulisuuden tasoon eri korkeuksilla [17]. Ilmakehän neutraalin stabiilisuuden vallitessa 8 m/s tuulennopeus 10 metrin korkeudella vastaa noin 11,7 m/s modernin voimalan napakorkeudella 119 m [18].

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasa voidaan kontrolloida erillisellä optimointisäädöllä, jonka avulla kellonajan, tuulensuunnan ja tuulennopeuden mukaan säädetään lapakulmaa haluttuun pyörimisnopeuteen ja melutasoon. Tällä säädöllä on kuitenkin vaikutuksia voimalan sen hetkiseen tuotantotehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahalaidoituksen, joka vähentää melupäästöä nimelisteholla tällä hetkellä noin 2–3 dB ja tulevaisuudessa vieläkin enemmän serraatioiden tuotekehityksen johdosta [15].

Tarkempia taustatietoja tuulivoimaloiden aiheuttaman melun syntymekanismeista, luonteesta ja vaikutuksista on koottuna julkaisuihin [2], [3] ja [7].

## 2.2 Melumallinnusohjeistus

Ympäristöministeriö on julkaissut 28.2.2014 ohjeen tuulivoimaloiden melun mallintamiseen [9]. Ohjeessa on annettu tietoja mallinnusmenettelyistä arvioitaessa tuulivoimaloiden aiheuttamaa melukuormitusta ympäristönsuojelulain täytäntöönpanossa ja soveltamisessa sekä maankäyttö- ja rakennuslain mukaisissa menettelyissä. Ohjeissa määritellään yksityiskohtaisesti käytettävät mallit, niiden parametrit ja lähtötiedot sekä tulosten esittämistavat. Yksityiskohtainen ohjeistus on koettu tarpeelliseksi, jotta mallinnustulokset olisivat aina tekijöistä riippumatta vertailukelpoisia keskenään. Tämän raportin melumallinnus on toteutettu ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisesti.

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

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

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



Äänen etenemislaskennassa käytetään ohjeen mukaisia ISO 9613-2 -standardiin perustuvia sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Maaston pinnan laatu ja muoto otetaan mallinnuksessa erillisinä huomioon. Lisäksi matalataajuisen äänen eteneminen tulee mallintaa erikseen ohjeistuksessa määritellyn erillislaskennan avulla, joka perustuu Tanskassa annettuun ohjeistukseen, jonka parametreja on mukautettu Suomen olosuhteisiin [4]. Laskennassa otetaan huomioon geometrinen etäisyysvaimennus sekä ohjeistuksen mukaiset ilmakehän absorption ja maastovaikutuksen parametrit. Matalataajuisen äänen tarkastelu tehdään erikseen 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20–200 Hz melulle merkittävimmin altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella. Laskennan tarkoituksena on tuottaa tieto ulkomelutasoista terssikaistoittain, ja niiden perusteella voidaan arvioida rakennuksen sisämelutaso oletetulla ääneneristävyydellä.

### 2.3 Ohjearvot

Valtioneuvoston 1.9.2015 voimaan astunut asetus 1107/2015 määrittää tuulivoimaloiden aiheuttaman ulkomelutason ohjearvot [11]. Päätöstä sovelletaan meluhaittojen ehkäisemiseksi ja ympäristön viihtyisyyden turvaamiseksi maankäytön, liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa sekä rakentamisen lupamenettelyissä. Ohjearvot määritetään melun A-painotettuina päivä- (klo 07–22) ja yöajan (klo 22–07) ekvivalenttimelutasoina ulkoalueille asumiseen käytettävillä alueilla. Valtioneuvoston asetus korvaa aiemmat ympäristöministeriön suosittelemat suunnitteluarvot tuulivoimaloiden ulkomelutasoille [10].

Kun laskennallisia melutasoja verrataan valtioneuvoston asetuksen ohjearvoihin, laskettuun melutasoon ei tehdä korjausta melun impulssimaisuuden tai kapeakaistaisuuden vuoksi. Ympäristöministeriön melumallinnusohjeistuksen [9] mukaan näiden vaikutusten oletetaan lähtökohtaisesti sisältyvän valmistajan ilmoittamiin melupäästön tunnusarvoihin, joita käytetään laskennan lähtötietoina. Sen sijaan valvonnan yhteydessä tehtäviin mittaustuloksiin lisätään 5 dB ennen valtioneuvoston ohjearvoon vertaamista, mikäli tuulivoimalan ääni sisältää kapeakaistaisia tai impulssimaisia komponentteja.

Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2).

**Taulukko 2: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.**

	Päivä 07-22 L <sub>Aeq</sub> [dB]	Yö 22-07 L <sub>Aeq</sub> [dB]
Pysyvä asutus, loma-asutus, hoitolaitokset, leirintäalueet	45	40
Kansallispuistot	40	40
Oppilaitokset, virkistysalueet	45	-

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa enimmäisarvot matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [8]. Ohjearvot on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 3). Ohjeistuksen mukaiset mallinnustulokset vastaavat matalataajuisen melun tasoa ulkotiloissa, joten ne eivät ole suoraan verrannollisia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Ulkomelutasojen avulla voidaan kuitenkin arvioida sisämelutasoja, kun rakennuksen vaipan ääneneristävyys tunnetaan riittävällä tarkkuudella.



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

Taajuus [Hz]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Äänitaso $L_{eq,1h}$ [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 ISO 9613-2 -laskentastandardin mukaisesti Numerola Oy:n implementoimalla ohjelmistolla. Mallinnuksessa on käytetty turbiinityypin Vestas V162 5,6 MW Mode 0 taajuusjakaamaa. Taajuusjakauma on saatu seuraavasta turbiinivalmistajan dokumentista:

- V162-5.6MW Third octave noise emission. Document no DMS 0079-5298\_01, 2019-01-23.

Dokumentissa ilmoitettuihin melutasoihin on lisätty ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeistuksen mukainen 2 dB:n varmuusarvo [12]:

"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 Vestas V162 5,6 MW valmistajan ilmoittama äänitehotaso on 104,0 dB(A), joten mallinuksissa tälle turbiinityypille käytettiin äänitehotasoa 106,0 dB(A). Tätä äänitehotasoa voidaan pitää melumallinnusohjeistuksen mukaisena melupäästön tunnusarvona. Mallinuksessa käytetty taajuusjakauma vastaa tuulennopeutta 12 m/s napakorkeudella. Mallinuksessa voimaloiden napakorkeus oli 119 m. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksessa.

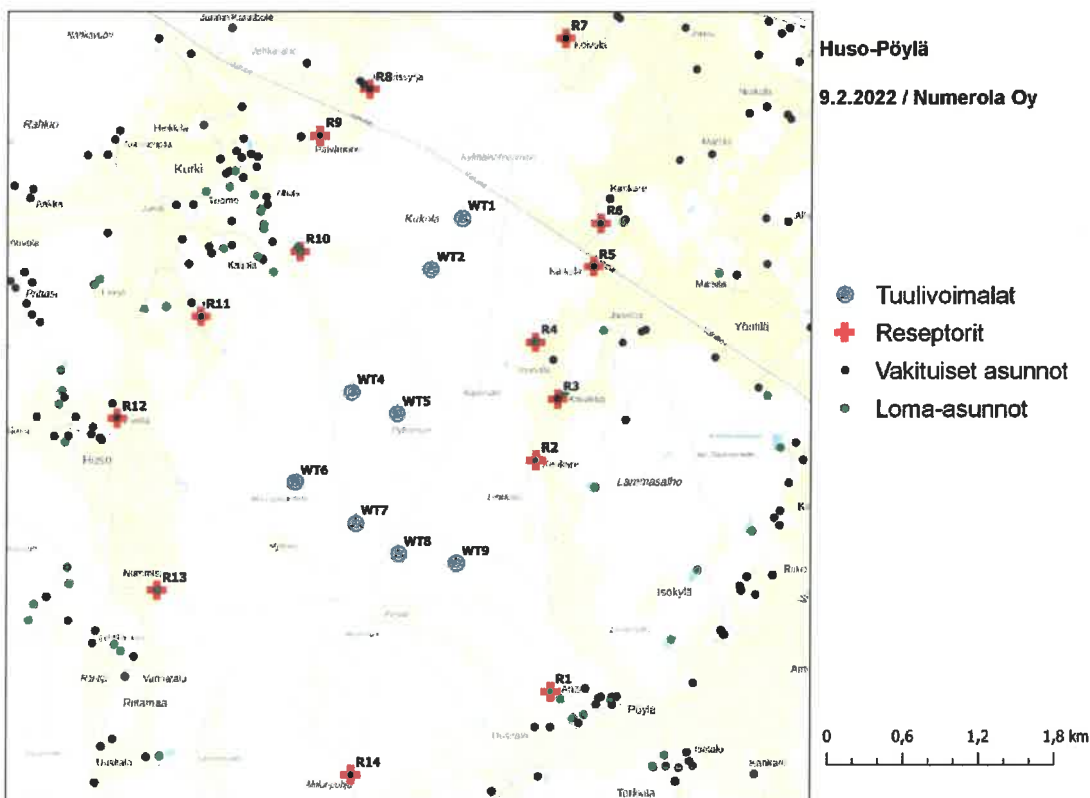
Turbiinityypin melupäästön kapeakaistaisuuden arvioinnissa on käytetty ympäristöministeriön raportissa Ympäristömelun mittaaminen [13] esitettyä yksinkertaista menetelmää, joka perustuu äänitehotasojen vertailuun terssikaistoittain (1/3-oktaaveittain). Melun tulkitaan olevan kapeakaistaista, mikäli ainakin yhden terssikaistan äänitehotaso on vähintään 5 dB suurempi kuin välittömästi kyseisen kaistan ala- ja yläpuolella olevien terssikaistojen tasot. Luvussa 9 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 9.

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 14 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla keskiäänitason LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Pisteet sijaitsevat lähimmillään 1,0–1,8 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

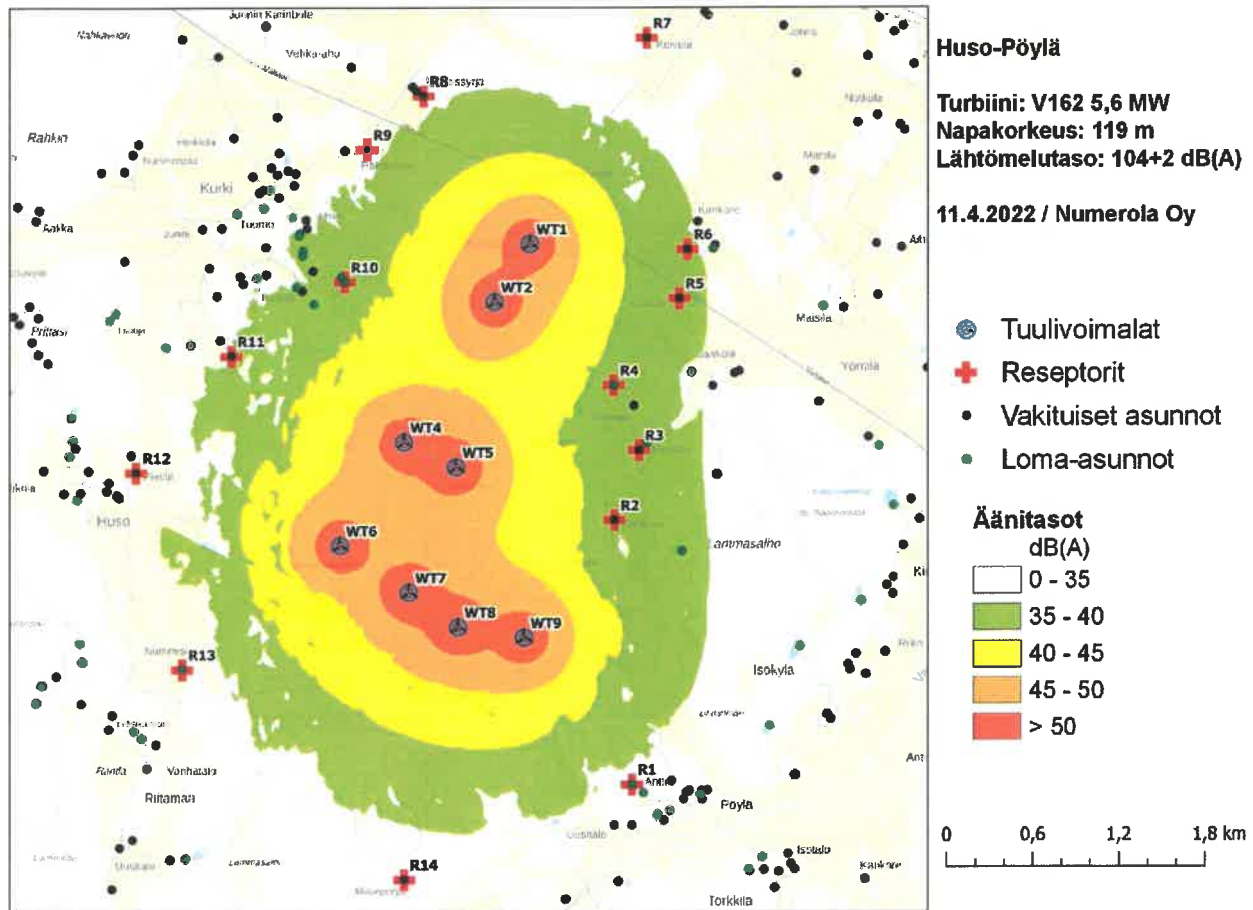
Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	270932,3	6699384,3	42,3	loma-asuinrakennus
R2	270809,1	6701225,5	31,9	vakituinen asuinrakennus
R3	270979,7	6701712,1	35,7	vakituinen asuinrakennus
R4	270804,5	6702163,3	36,7	loma-asuinrakennus
R5	271262,2	6702766,1	37,0	vakituinen asuinrakennus
R6	271320,0	6703107,5	41,5	vakituinen asuinrakennus
R7	271034,5	6704576,0	36,9	vakituinen asuinrakennus
R8	269487,1	6704172,9	39,4	vakituinen asuinrakennus
R9	269095,3	6703803,2	41,2	vakituinen asuinrakennus
R10	268941,0	6702882,3	39,0	loma-asuinrakennus
R11	268153,8	6702367,5	37,3	vakituinen asuinrakennus
R12	267489,1	6701557,7	31,9	vakituinen asuinrakennus
R13	267810,2	6700190,0	26,9	loma-asuinrakennus
R14	269355,2	6698722,8	52,4	vakituinen asuinrakennus



Kuva 3: Vertailupisteiden paikat Huso-Pöylän alueella.

Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu keskiäänitaso LAeq on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuinrakennukset ja loma-asunnot. Karttakuvaan on merkitty keskiäänitasojen 35 dB(A), 40 dB(A), 45 dB(A) ja 50 dB(A) mukaiset vyöhykkeet, joita käytetään apuna tulosten arvioinnissa. Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot jäävät valtioneuvoston asetuksen ohjearvojen alapuolelle kaikkien alueen rakennusten kohdilla. Keskiäänitasot vertailupisteiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5).



Kuva 4: Keskiäänitasot LAeq Huso-Pöylän alueella.

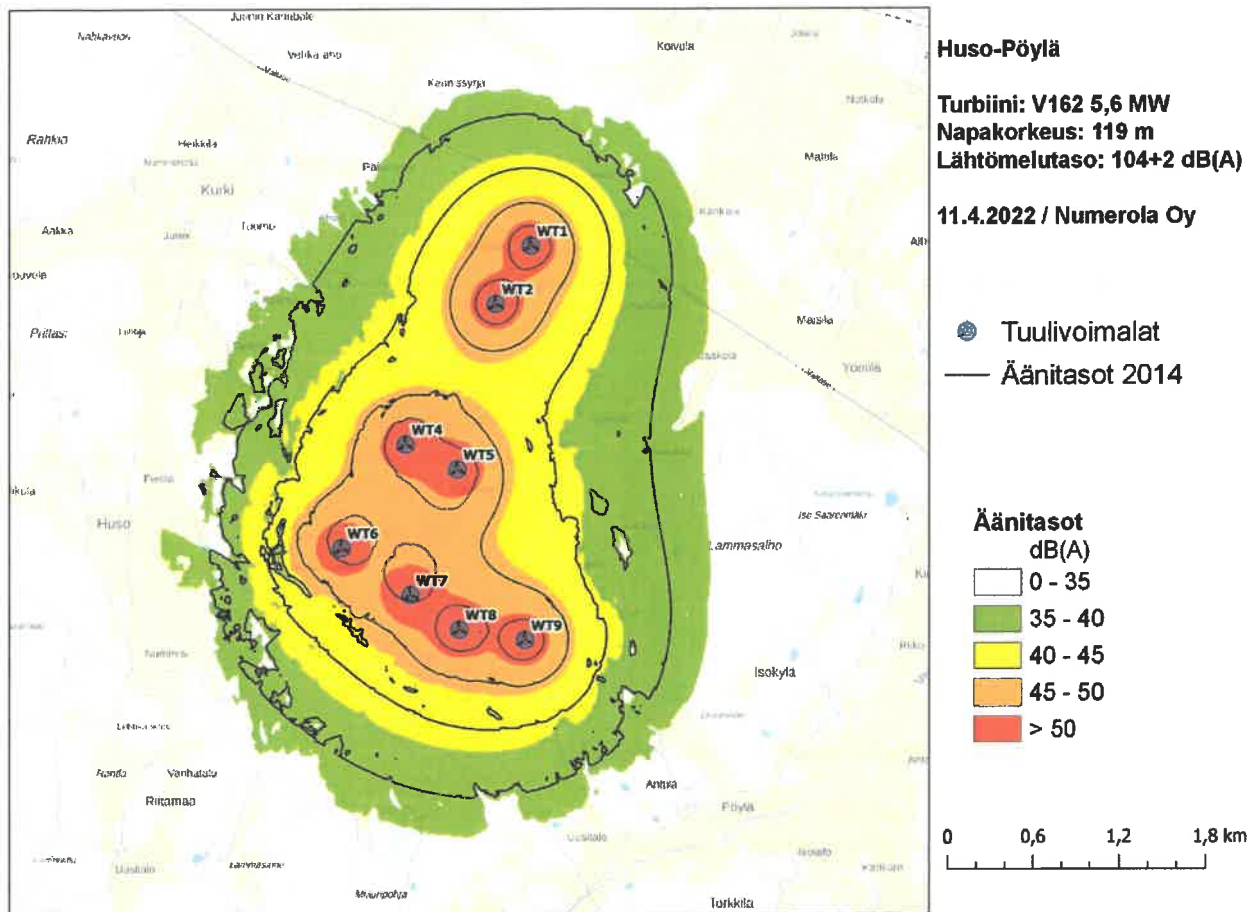
**Taulukko 5: Keskiäänitasot LAeq reseptoripisteiden kohdilla.**

Reseptori	Äänitaso dB(A)
<b>R1</b>	32,6
<b>R2</b>	37,9
<b>R3</b>	37,5
<b>R4</b>	38,7
<b>R5</b>	36,0
<b>R6</b>	35,8
<b>R7</b>	30,5
<b>R8</b>	34,3
<b>R9</b>	34,2
<b>R10</b>	38,2
<b>R11</b>	35,8
<b>R12</b>	33,8
<b>R13</b>	34,3
<b>R14</b>	32,7

### 3.2 Vertailu kaavavaiheen melumallinnukseen

Kuvassa (Kuva 5) tämän raportin melumallinnusta on verrattu vuonna 2014 tehtyyn kaavavaiheen melumallinnukseen. Vuoden 2014 mallinnus perustui napakorkeuteen 140,6 m, turbiinityypin Nordex N117 3,0 MW melun taajuusjakaumaan ja äänitehotasoon 106,0 dB(A). Kuvasta nähdään, että tämän raportin mallinnuksessa 40 dB(A):n vyöhyke ulottuu noin 200 metriä kauemmas kuin vuoden 2014 mallinnuksessa. Erot johtuvat erilaisista äänipäästön taajuusjakaumista, napakorkeuksista ja voimalapaikoista.





Kuva 5: Vuoden 2022 ja 2014 melumallinnukset. Vuoden 2014 melumallinnuksista on piirretty melurajat 35, 40, 45 ja 50 dB(A).

### 3.3 Matalataajuisen melun mallinnus

Matalataajuisen melun laskenta on suoritettu ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisesti [9]. Laskennan lähtötietona on käytetty samoja valmistajan ilmoittamia melun taajuusjakaumia kuin keskiäänitasojen mallinnuksessa, mutta rajoittuen 1/3-oktaaveittain taajuuksille 20–200 Hz. Matalataajuisen melun laskenta suoritetaan taajuuspainottamattomilla melutasoilla.

#### Meluvaikutus

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

Ympäristöministeriön ohjeiden mukainen matalataajuisen melun laskenta perustuu Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa esitettyyn menetelmään [4], jonka parametreihin on tehty joitakin Suomen olosuhteisiin



perustuvia tarkennuksia. Tanskan menetelmässä on määritelty rakennuksen ääneneristävyysparametri ( $\Delta L_{\sigma}$ ) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja ohjearvoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyysparametrit perustuvat tutkimukseen suomalaisten pientalojen äänieristävyyden arvoista [5]. Turun ammattikorkeakoulussa tehdyssä tutkimuksessa esitetyt arvot perustuvat suomalaisissa pientaloissa tehtyihin mittauksiin, joiden avulla on johdettu tilastollinen estimaatti talojen ääneneristävyysille eri taajuuksilla. Mittaustuloksista johdetut eristävyysarvot ylittivät 90 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa vertailukiinteistöjen matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia ääneneristävyysarvoja. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [5] annetut ääneneristävyyden arvot.

Taulukko 6: Rakennuksen ääneneristävyyden arvoja taajuuskaistoittain.

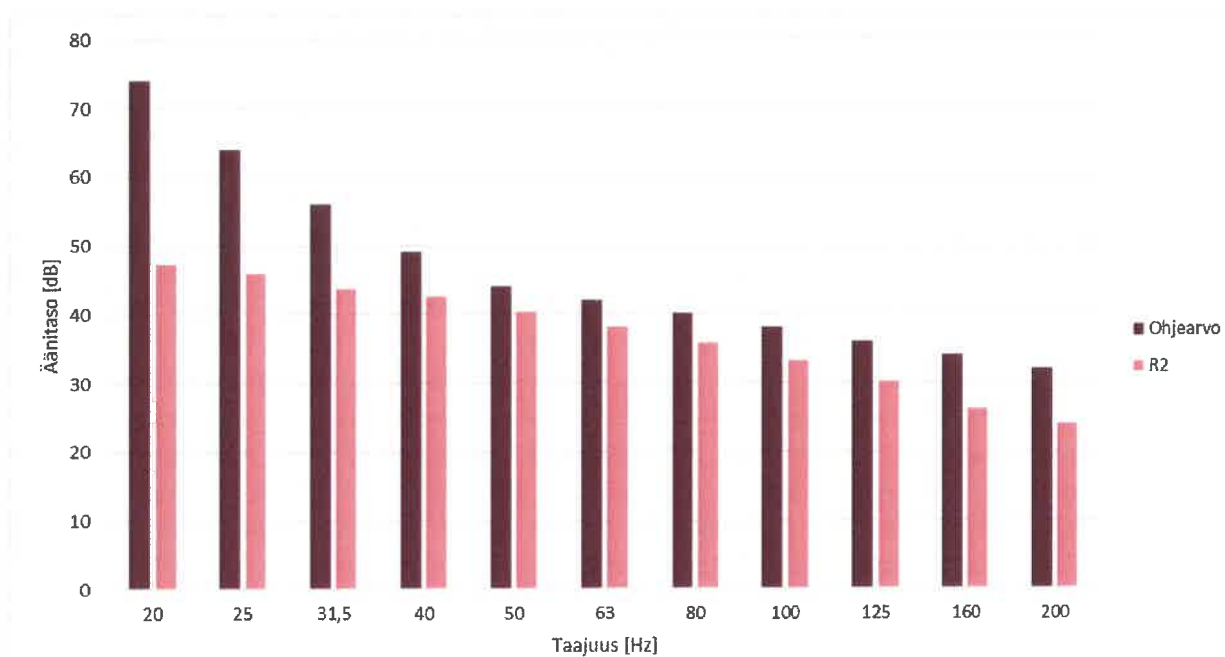
Taajuus [Hz]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Ääneneristävyys [dB] (Tanskan ohjeistus)	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2	-
Ääneneristävyys [dB] (viite [5])	6,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0

Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen vertailupisteiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 7). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot. Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat vertailukiinteistöön R2, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 6). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 3) lisäksi ohjearvot päivä- ja yöajan kokonaismelutasoille sisätiloissa. Yöaikainen (klo 22–7) keskiäänitaso ei saa ylittää 30 dB(A). Lisäksi yöaikainen musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unihäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona  $L_{eq,1h}$  mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen. Lähtökohtaisesti näiden yöajan ohjearvojen oletetaan alittuvan, mikäli melumallinnuksen tulos ulkona sekä matalataajuisen melun tulokset alittavat valtioneuvoston asetuksen ja asumisterveysasetuksen ohjearvot. Näin tapahtuu tämän raportin mallinnusten perusteella (luku 3.1 ja 3.3 tulokset), eikä sisätilojen kokonaismelutasojen tarkistus edellytä erillisiä mallinnuksia. Tätä johtopäätöstä tukevat tehdyt tuulivoimamelun sisätilamittaukset Suomessa sekä ilmaäänieristysten keskimääräinen profiili, joka kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä.

**Taulukko 7: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) vertailukiinteistöjen kohdilla.**

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
<b>R1</b>	49,9	48,4	47,2	46,1	45,0	43,8	42,3	40,7	38,5	35,5	34,1
<b>R2</b>	53,3	51,9	50,7	49,5	48,4	47,2	45,8	44,3	42,1	39,2	38,0
<b>R3</b>	52,2	50,8	49,6	48,5	47,4	46,1	44,7	43,1	41,0	38,0	36,8
<b>R4</b>	53,1	51,7	50,5	49,4	48,3	47,1	45,7	44,1	42,0	39,1	37,8
<b>R5</b>	51,1	49,7	48,5	47,4	46,3	45,1	43,7	42,1	39,9	36,9	35,6
<b>R6</b>	50,6	49,2	48,0	46,9	45,8	44,5	43,1	41,5	39,3	36,4	35,0
<b>R7</b>	47,3	45,9	44,7	43,5	42,4	41,1	39,7	38,0	35,7	32,6	31,1
<b>R8</b>	49,6	48,2	47,0	45,8	44,7	43,5	42,1	40,5	38,2	35,2	33,9
<b>R9</b>	50,1	48,7	47,5	46,4	45,3	44,1	42,6	41,0	38,8	35,8	34,5
<b>R10</b>	52,6	51,2	50,0	48,9	47,8	46,6	45,2	43,6	41,5	38,5	37,3
<b>R11</b>	51,0	49,6	48,3	47,2	46,1	44,9	43,5	41,9	39,7	36,7	35,3
<b>R12</b>	49,5	48,1	46,9	45,7	44,6	43,4	42,0	40,3	38,1	35,0	33,6
<b>R13</b>	50,0	48,6	47,3	46,2	45,1	43,9	42,5	40,8	38,6	35,6	34,2
<b>R14</b>	48,6	47,2	46,0	44,8	43,7	42,5	41,0	39,4	37,1	34,1	32,6


**Kuva 6: Matalataajuisen sisämelun tasot vertailukiinteistön R2 kohdalla.**

## 4 Tuulivoimaloiden välke

### 4.1 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 iltajat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

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

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

Tämän selvityksen välkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 4.2 Välkkeen rajoittaminen

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

### 4.3 Arvioinnin epävarmuudet

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

Välkemallinnukset on tehty sekä ilman puuston vaikutusta että huomioiden paikallisen puuston vaikutus turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. 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.

#### 4.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [10]. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [1]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välke-tilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan välkevaikutuksien ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa analysoitu välkevaikutus vastaa todellista odotettavissa olevaa välketuntimäärää, ja näin ollen suunnitteluohjearvona käytetään 8 tai 10 tuntia.

## 5 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

### 5.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

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

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 1,5 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää 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 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. Tässä selvityksessä välkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Välkeaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 119 m ja roottorin halkaisijaa 162 m. Turbiinityypin V162 5,6 MW lapaprofiili on mallinnettu turbiinivalmistajan toimittamien tietojen perusteella. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 7.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta 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 125 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 8).



Paikallinen pilvisyys on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Jokioisten sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [6]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 9). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

**Taulukko 8: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulenopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.**

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
<b>Yli 3 m/s osuus</b>	0,168	0,157	0,182	0,145	0,138	0,128

**Taulukko 9: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jokioisten sääasemalla.**

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
<b>Tammikuu</b>	0,177
<b>Helmikuu</b>	0,284
<b>Maaliskuu</b>	0,356
<b>Huhtikuu</b>	0,437
<b>Toukokuu</b>	0,484
<b>Kesäkuu</b>	0,444
<b>Heinäkuu</b>	0,469
<b>Elokuu</b>	0,426
<b>Syyskuu</b>	0,355
<b>Lokakuu</b>	0,250
<b>Marraskuu</b>	0,150
<b>Joulukuu</b>	0,143

## 5.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 7). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

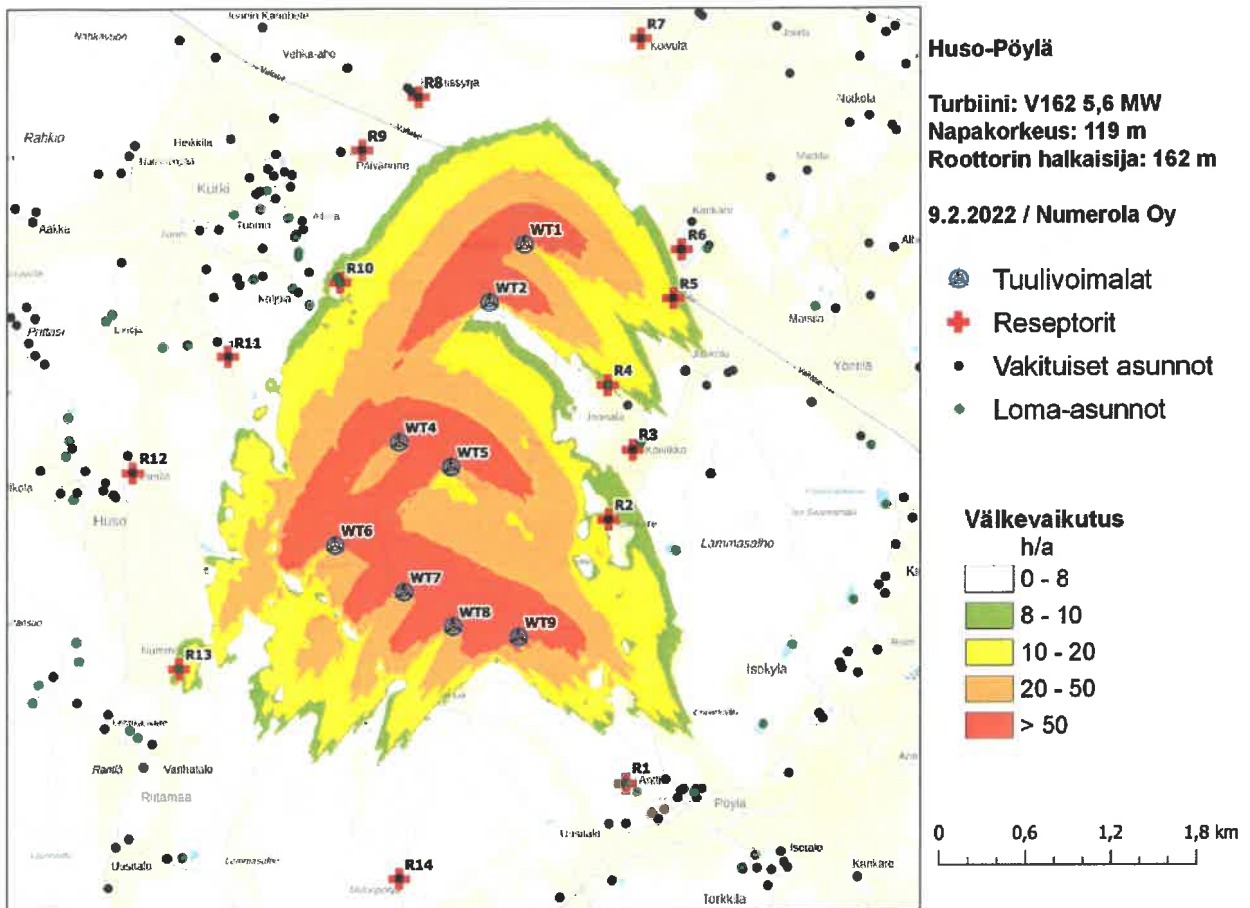
Vuotuinen välkevaikutus taulukossa (Taulukko 4) esitettyjen vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 10). Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon kuuden asunnon kohdalla (reseptorit R2, R4, R5, R10, R13 sekä reseptorin R10 vieressä oleva loma-asunto). Näistä asunnoista kahden kohdalla (reseptorit R5 ja R10) myös 10 tunnin ohjearvo ylittyy. Päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.



Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden kohdilla joissa 8 tunnin ohjearvo ylittyy on esitetty taulukoissa (Taulukko 11–Taulukko 15). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 10: Vuotuinen välkevaikutus ja päiväkohtainen maksimivälke reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Välkevaikutus [h:min]	Päiväkohtainen maksimivälke [min]
R1	0:00	0
R2	9:06	14
R3	5:48	9
R4	8:57	13
R5	10:44	12
R6	6:03	10
R7	1:04	3
R8	2:51	4
R9	2:53	4
R10	10:12	8
R11	4:59	6
R12	2:13	4
R13	9:26	10
R14	0:00	0



Kuva 7: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 11: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minutteina kiinteistön R2 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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	90	1	0	0	0	1:31
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0:33
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	164	0	0	2:44
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118	1	0	1:59
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0:37
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0:06
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	69	20	0	0	0	1:29
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0:06
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
<b>Yhteensä</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>2:45</b>	<b>1:01</b>	<b>5:19</b>	<b>0:01</b>	<b>0:00</b>	<b>9:06</b>

**Taulukko 12: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minutteina kiinteistön R4 kohdalla.**

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0:34
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0:14
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	109	0	0	0	1:49
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0:04
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	148	0	2:28
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	0	1:18
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0:56
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	5	41	0	0	0	0:46
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0:18
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0:29
<b>Yhteensä</b>	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:26	3:40	0:00	3:50	0:00	8:57

**Taulukko 13: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minutteina kiinteistön R5 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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0:13
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0:09
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	1:16
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	220	0	0	3:40
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0:17
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	155	14	0	2:49
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	6	0	1:24
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0:39
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0:17
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
<b>Yhteensä</b>	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:39	9:45	0:20	0:00	10:44



**Taulukko 14: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina kiinteistön R10 kohdalla.**

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0	0	0	0	0	117	0	0	0	0	0	0	1:57
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Maaliskuu	0	0	0	105	0	0	0	0	0	0	0	0	1:45
Huhtikuu	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	1:16
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Elokuu	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0:42
Syyskuu	0	0	0	130	0	0	0	0	0	0	0	0	2:10
Lokakuu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0:01
Marraskuu	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	1:01
Joulukuu	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	1:21
<b>Yhteensä</b>	0:00	0:00	0:00	5:54	0:00	4:19	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	10:12

**Taulukko 15: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina kiinteistön R13 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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Maaliskuu	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0:05
Huhtikuu	0	0	37	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0:56
Toukokuu	0	0	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2:20
Kesäkuu	0	0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1:34
Heinäkuu	0	0	208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3:28
Elokuu	0	0	41	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0:44
Syyskuu	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0:20
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
<b>Yhteensä</b>	0:00	0:00	8:40	0:46	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:26

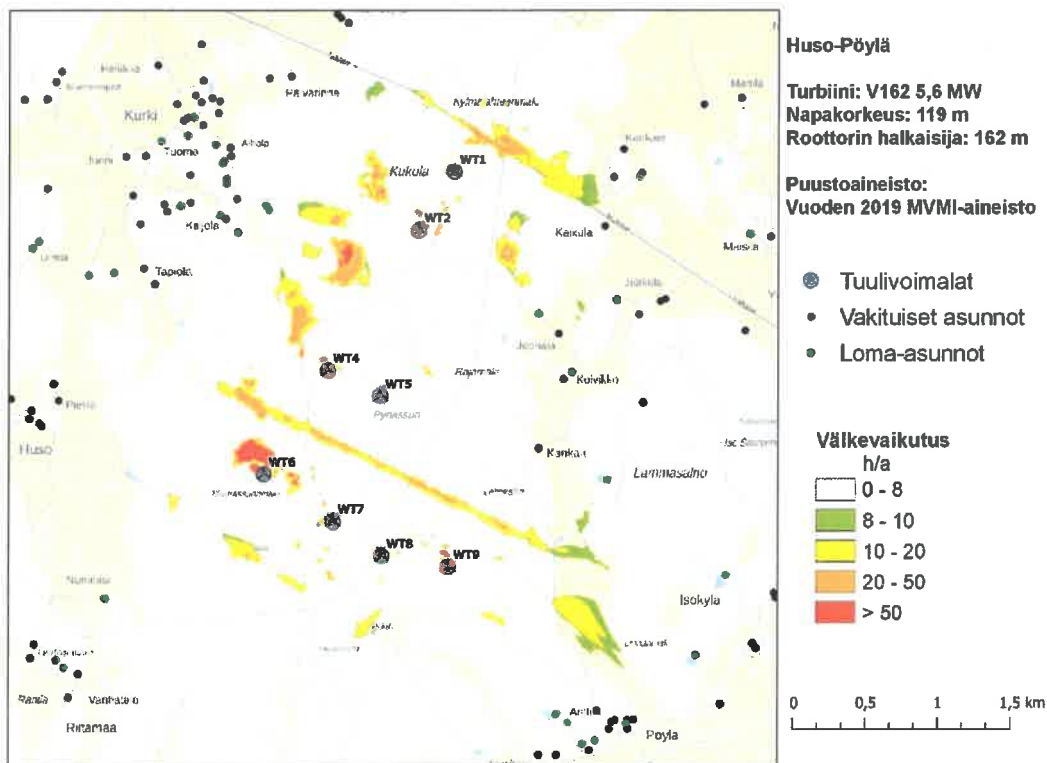
### 5.3 Puuston välkettä vähentävä vaikutus

Karttakuvassa (Kuva 8) on esitetty todennäköisen vuotuisen välkkeen mallinnus, kun puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioidaan. Laskennassa puustodatana on käytetty Luonnonvarakeskuksen tuottamaa monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin puunkorkeus-aineistoa vuodelta 2019 (© Luonnonvarakeskus, 2021). Mallinnusten perusteella puusto rajoittaa merkittävästi Huso-Pöylän voimaloiden näkyvyyttä ja siten vähentää välkevaikutusta.

Puuston huomioivat vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 16). Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus asuntojen kohdilla jää alle 8 tunnin, kun puusto huomioidaan.

**Taulukko 16: Vuotuinen välkevaikutus ja päiväkohtainen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, kun puusto huomioidaan.**

Reseptori	Välkevaikutus [h:min]	Päiväkohtainen maksimivälke [min]
R1	0:00	0
R2	0:00	0
R3	3:07	6
R4	3:16	7
R5	5:56	12
R6	6:01	10
R7	0:00	0
R8	0:00	0
R9	0:00	0
R10	0:00	0
R11	2:21	4
R12	2:00	4
R13	0:24	2
R14	0:00	0



**Kuva 8: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä, kun puusto huomioidaan.**

## 6 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Paimion ja Salon kaupunkien alueilla suunnitellun Huso-Pöylän tuulivoimaston ympäristölleen aiheuttaman melu- ja välkevaikutuksen laskennalliset arviot. Vaikutusten arviot on tehty turbiinityypin V162 5,6 MW teknisillä tiedoilla. Mallinnusten perusteella melutasot alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdilla jäävät alle valtioneuvoston ohjearvojen. Myös matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien rakennusten kohdalla asumisterveysasetuksessa asetettujen arvojen alapuolella. Välkemallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon kuuden vakituisen tai vapaa-ajan asunnon kohdalla. Näistä kahden asunnon kohdalla myös 10 tunnin ohjearvo ylittyy. Puuston huomioivan välkemallinnuksen perusteella puusto rajoittaa Huso-Pöylän voimaloiden välkevaikutusta merkittävästi. Kun puusto huomioidaan, vuotuinen välkevaikutus asuntojen kohdilla jää alle 8 tunnin.



## 7 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 läpi näkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntaakohtaisilla 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.

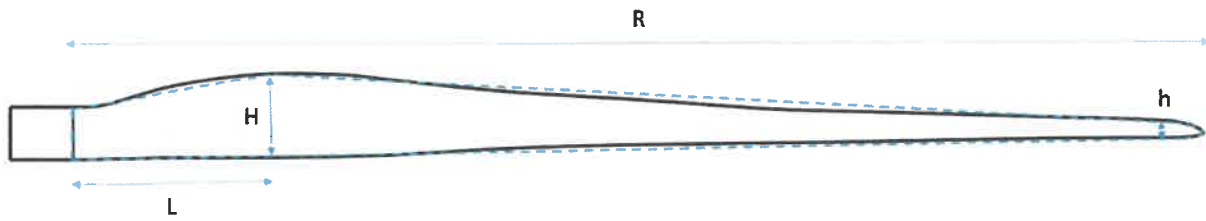
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään,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

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

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

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

Seuraavassa kaaviokuvassa 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 määritetään parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona (esim. WindPRO Shadow).



Kuva 9: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

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

## 8 Viitteet

- [1] Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [2] C. Di Napoli: Tuulivoimaloiden melun syntyvät ja leviäminen, Suomen Ympäristö 4, 2007.
- [3] D. Sipiläinen: Noise Annoyance of Wind Turbines, VTT Research Report VTTR-00951-11, 2011.
- [4] J. Jakobsen: Danish regulation for low frequency noise from wind turbines, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 31(4), 2012.
- [5] J. Keränen, J. Hakala, V. Hongisto: Pientalojen äänieristävyys ympäristömelua vastaan taajuuksilla 5 – 5000 Hz – infraäänitutkimus. Turun ammattikorkeakoulu, sisäympäristön tutkimusryhmä, Turku 2017. Akustiikkapäivät 2017.
- [6] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [7] S. Uosukainen: Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys, VTT Tiedotteita 2529, 2010.
- [8] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.
- [9] Tuulivoimaloiden melun mallintaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2014. Ympäristöministeriö.
- [10] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [11] Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjeista. Astui voimaan 1.9.2015.
- [12] Yhteenveto tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvon käyttämisestä meluselvityksissä liittyvästä kyselystä. Ympäristöministeriö, 14.9.2016.
- [13] Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriö, Ohje I 1995.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- 
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] S. Oerlemans, J.G. Schepers: Prediction of wind turbine noise directivity and swish, Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark, 2009.

## 9 Melumallinnuksen tiedot

RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT							
Mallinnusraportin numero/tunniste: <b>TV-2022-709-1</b>				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: <b>11.04.2022</b>			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: <b>Numerola Oy, PL 126, 40101 Jyväskylä</b>							
Vastuuhenkilöt: <b>Mika Laitinen ja Erkki Heikkola</b>							
Laatija: <b>Mika Laitinen</b>				Tarkastaja/hyväksyjä: <b>Pasi Tarvainen</b>			
MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT							
Mallinnusohjelma ja versio: <b>Numerrin, versio 4 (Numerola Oy)</b>				Mallinnusmenetelmä: <b>ISO 9613-2</b>			
TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN) TIEDOT							
Tuulivoimalan valmistaja: <b>Vestas</b>				Tyyppi: <b>V162 5,6 MW Mode 0</b>		Sarjanumero/t:	
Nimellisteho: <b>5,6 MW</b>		Napakorkeus: <b>119 m</b>		Roottorin halkaisija: <b>162 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							
V162-5.6MW Third octave noise emission. Document no DMS 0079-5298_01, 2019-01-23							
Melupäästötiedot, turbiini V162 5,6 MW Mode 0 (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	62,3	200	93,3	2000	91,0
63	87,4	25	66,7	250	94,6	2500	89,1
125	94,8	31,5	71,0	315	95,5	3150	86,7
250	99,3	40	75,1	400	96,2	4000	83,8
500	101,1	50	78,6	500	96,4	5000	80,9
1000	100,0	63	81,9	630	96,4	6300	77,5
2000	95,9	80	85,0	800	96,0	8000	73,6
4000	89,2	100	87,5	1000	95,2	10000	69,6
8000	79,5	125	89,7	1250	94,2		
		160	91,8	1600	92,7		
Melun erityispiirteiden mittaus ja havainnot:							
Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus		Impulssimaisuus		Merkityksellinen sykintä (amplitudi-modulaatio)		Muu, mikä:	
kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei
Laskentakorkeus				Laskentaruudun koko [m x m]			
4 m				10 m x 10 m			
Suhteellinen kosteus				Lämpötila			
70 %				15 C°			
Maastomallin lähde ja tarkkuus							
Maastomallin lähde: <b>Maanmittauslaitos</b>				Vaakaresoluutio: <b>2 m</b>		Pystyresoluutio: <b>0,3 m</b>	

Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet										
<b>ISO 9613-2</b>										
Vesialueet, (0) / (G)										
Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F)										
Maa-alueet (0) / (G)										
Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus										
<b>Neutraali</b>										
Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen										
<b>Vapaa avaruus</b>										
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)										
Asukkaat: <b>0 kpl</b> Vapaa-ajan rakennukset: <b>0 kpl</b> Hoito- ja oppilaitokset: <b>0 kpl</b>										
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)										
Asukkaat: <b>0 kpl</b> Vapaa-ajan rakennukset: <b>0 kpl</b> Hoito- ja oppilaitokset: <b>0 kpl</b>										
Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille										
Virkistysalueet: <b>0 kpl</b> Luonnonsuojelualueet: <b>0 kpl</b>										
Matalataajuisen melun laskentamenetelmä:										
Lineaariset melutasot [dB] altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella:										
Hz	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
20	49,9	53,3	52,2	53,1	51,1	50,6	47,3	49,6	50,1	52,6
25	48,4	51,9	50,8	51,7	49,7	49,2	45,9	48,2	48,7	51,2
31,5	47,2	50,7	49,6	50,5	48,5	48,0	44,7	47,0	47,5	50,0
40	46,1	49,5	48,5	49,4	47,4	46,9	43,5	45,8	46,4	48,9
50	45,0	48,4	47,4	48,3	46,3	45,8	42,4	44,7	45,3	47,8
63	43,8	47,2	46,1	47,1	45,1	44,5	41,1	43,5	44,1	46,6
80	42,3	45,8	44,7	45,7	43,7	43,1	39,7	42,1	42,6	45,2
100	40,7	44,3	43,1	44,1	42,1	41,5	38,0	40,5	41,0	43,6
125	38,5	42,1	41,0	42,0	39,9	39,3	35,7	38,2	38,8	41,5
160	35,5	39,2	38,0	39,1	36,9	36,4	32,6	35,2	35,8	38,5
200	34,1	38,0	36,8	37,8	35,6	35,0	31,1	33,9	34,5	37,3
Hz	R11	R12	R13	R14						
20	51,0	49,5	50,0	48,6						
25	49,6	48,1	48,6	47,2						
31,5	48,3	46,9	47,3	46,0						
40	47,2	45,7	46,2	44,8						
50	46,1	44,6	45,1	43,7						
63	44,9	43,4	43,9	42,5						
80	43,5	42,0	42,5	41,0						
100	41,9	40,3	40,8	39,4						
125	39,7	38,1	38,6	37,1						
160	36,7	35,0	35,6	34,1						
200	35,3	33,6	34,2	32,6						