



YIT Suomi Oy

Murtomäki 2 -tuulivoimapuiston melu- ja välkeselvitys:

Yhteisvaikutukset lähialueen hankkeiden kanssa

101022132-003

Tekijä
Erkki Heikkola

pvm
17/10/2023

Osasto
Wind and Solar Finland

Projektinumero
101022132-003

E-mail
erkki.heikkola@afry.com

Raporttiversio
004

Raportin tila
VALMIS

Asiakas

YIT Suomi Oy
Jarno Hautamäki

Murtomäki 2 -tuulivoimapuiston melu- ja välkeselvitys: Yhteisvaikutukset lähialueen hankkeiden kanssa

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	23.06.2022/ Mika Laitinen, Senior Consultant	23.06.2022/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	28.06.2022/ Mika Laitinen, Senior Consultant	28.06.2022/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Raportin nimen tarkennus
003	15.09.2022/ Mika Laitinen, Senior Consultant	15.09.2022/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalasijainnit muuttuneet
004	17.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	17.10.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Kaavaehdotuksen mukainen layout, muutoksia naapurikohteiden tiedoissa

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

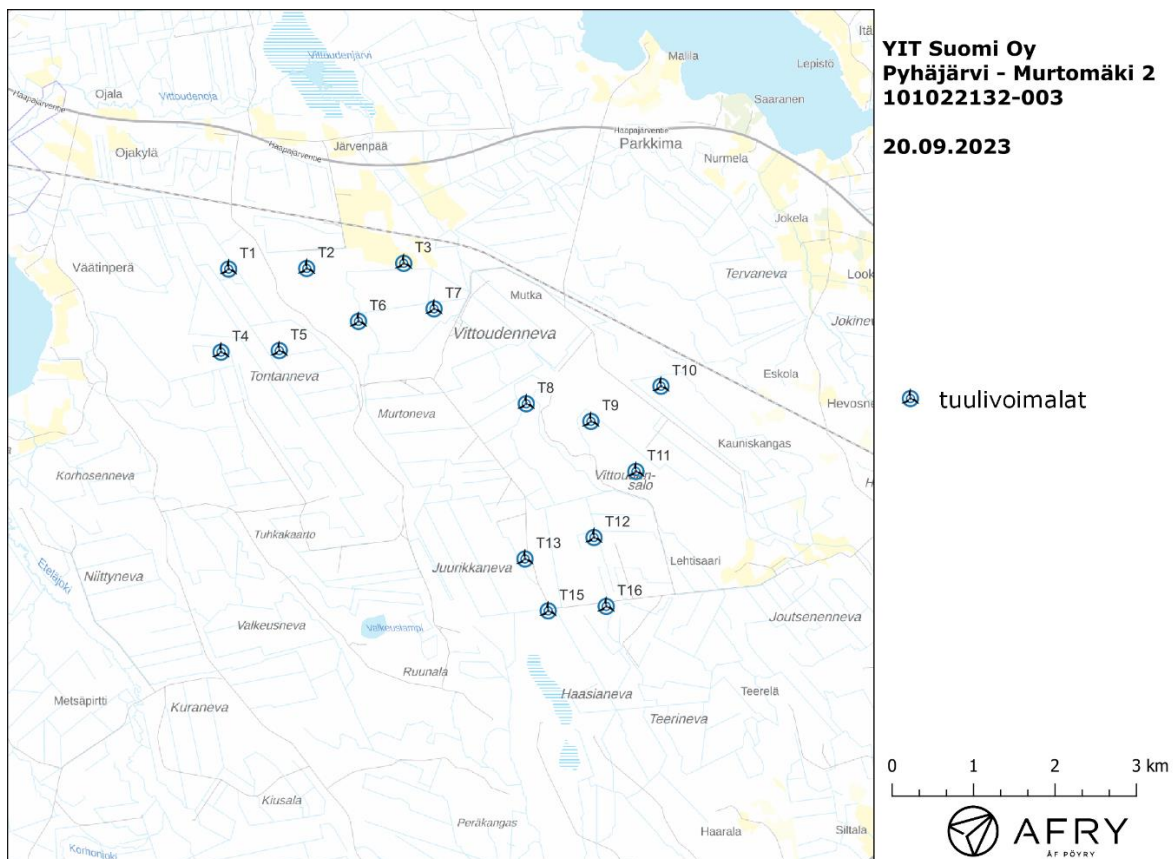
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden melu	8
2.1	Yleistä tuulivoimamelusta	8
2.2	Melumallinnusohjeistus.....	9
2.3	Ohjearvot	10
3	Tuulivoimakohteen melumallinnus	12
3.1	Keskiäänitasojen LAeq mallinnus	12
3.2	Matalataajuisen melun mallinnus	16
4	Tuulivoimaloiden välke	19
4.1	Välkevaikutus.....	19
4.2	Välkkeen rajoittaminen.....	19
4.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	19
4.4	Ohjearvot	20
5	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	21
5.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	21
5.2	Välkevaikutus.....	23
6	Yhteenveto	26
7	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	27
8	Viitteet.....	29
9	Melumallinnuksen tiedot.....	30

1 Johdanto

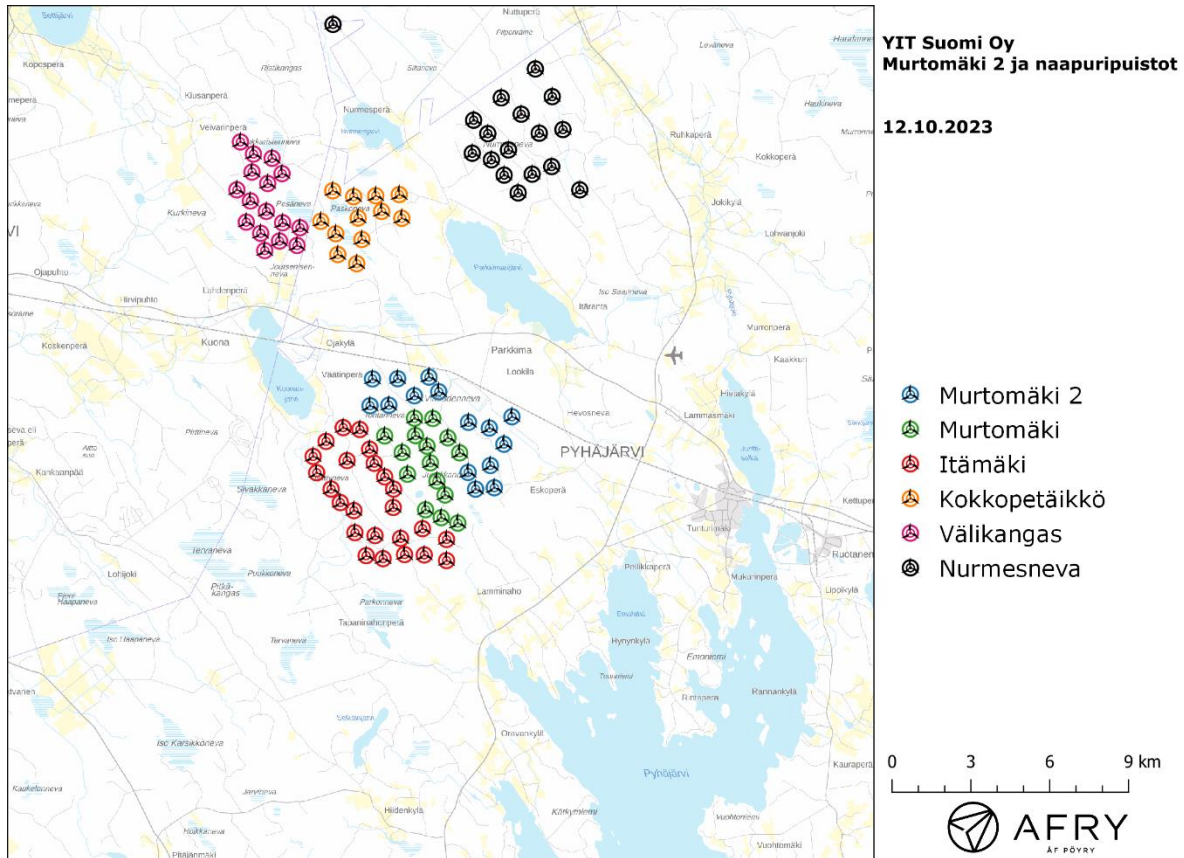
Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kaupungin alueelle suunnitellun MurtoMäki 2:n tuulivoimapuiston aiheuttamaa melu- ja välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään kaavaehdotuksen mukaiselle sijoitus suunnitelmalle (15 voimalaa). Arvioinnissa huomioidaan myös näiden voimaloiden lähellä sijaitsevat ja suunnitellut tuulivoimapuistot MurtoMäki (15 voimalaa), Itämäki (vaihe 1, 24 voimalaa), Nurmesneva (17 voimalaa), Kokkopetäikkö (12 voimalaa) ja Välikangas (16 voimalaa). Kaikkien selvityksessä huomioitujen voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 3 ja Taulukko 4).

Melumallinnuksissa käytetyt turbiinityypit, napakorkeudet ja turbiinien äänitehotasot on lueteltu taulukossa (Taulukko 1). Turbiinityyppien melupäästön tunnusarvoa ei pystytä tässä yhteydessä määrittämään standardin IEC TS 61400-14 mukaisesti, joten turbiinivalmistajan ilmoittamiin melupäästön lukuarvoihin on lisätty 2-3 dB varmuusarvo asiakkaan toimittamien tietojen mukaisesti. Näin määriteltynä selvityksessä käytettyjä lähtömelutasoja voidaan pitää ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisina melupäästön tunnusarvoina.

Välkevaikutuksen mallintamiseen käytetyt napakorkeudet ja roottorien halkaisijat on esitetty taulukossa (Taulukko 2).



Kuva 1: MurtoMäki 2:n tuulivoimaloiden sijainnit kaavaehdotuksen mukaisella sijoitus suunnitelmalla.



Kuva 2: MurtoMäki 2:n ja yhteisvaikutuksissa huomioitujen kohteiden voimalasijainnit.

Taulukko 1: Melumallinuksissa käytetyt turbiinityypit, napakorkeudet ja lähtömelutasot.

Tuulivoimapuisto	Turbiinityyppi	Napakorkeus [m]	Lähtömelutaso [dB(A)]
MurtoMäki 2	SG170 6,2 MW	181	106+2
MurtoMäki	V162 6,2 MW	166	104,8+2
Itämäki	V172 7,2 MW	214	106,9+2
Kokkopetäikkö	V172 7,2 MW	200	106,9+3
Nurmesneva	V172 7,2 MW	200	106,9+2,1
Välikangas	V150 4,3 MW	145	104,9+2

Taulukko 2: Välkemallinuksissa käytetyt napakorkeudet ja roottorin halkaisijat.

Tuulivoimapuisto	Napakorkeus [m]	Roottorin halkaisija [m]
MurtoMäki 2	181	200
MurtoMäki	166	162
Itämäki	214	172
Kokkopetäikkö	200	240
Nurmesneva	200	200
Välikangas	145	150

Taulukko 3: MurtoMäki 2:n tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	435720,8	7066553,2	163,3
T2	436679,3	7066560,4	165,4
T3	437870,1	7066623,4	156,4
T4	435627,6	7065534,1	163,8
T5	436342,8	7065553,3	166,5
T6	437314,8	7065911,4	166,0
T7	438242,2	7066065,2	158,6
T8	439374,3	7064900,9	159,8
T9	440168,0	7064685,0	158,3
T10	441027,6	7065115,9	160,0
T11	440720,2	7064070,4	159,7
T12	440205,3	7063260,3	160,4
T13	439358,8	7062996,5	161,0
T15	439643,7	7062360,2	160,6
T16	440355,6	7062415,0	160,4

Taulukko 4: MurtoMäki 2:n naapurikohteiden voimalakoordinaatit.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus	Turbiinit	E	N	Maaston korkeus
MurtoMäki							
M01	437320	7065056	161,9	V16	430695	7075566	167,3
M03	437355	7064398	167,8	ItäMäki, vaihe 1			
M04	437794	7063995	156,9	I01	438539	7059645	151,7
M05	437923	7063362	163,8	I02	435240	7064629	158,2
M07	438174	7062672	165,1	I03	436124	7059718	154,6
M09	437739	7061577	168,3	I04	435480	7059833	154,7
M10	438017	7065048	157,9	I05	437691	7059860	153,3
M12	438590	7064311	159,4	I06	436941	7059873	157,5
M13	439038	7063740	160,3	I07	434606	7064701	151,0
M14	438967	7061069	160,4	I08	438539	7060447	160,6
M16	437054	7062928	161,1	I09	436790	7060488	161,4
M18	438483	7062139	161,4	I10	435817	7060595	152,9
M19	436849	7063756	161,0	I11	435051	7060707	148,9
M20	436184	7064384	160,3	I12	437624	7060857	162,8
M25	438336	7061277	160,3	I13	435013	7061545	147,1
Kokkopenäikkö				I14	436510	7061666	160,2
K1	434208	7073709	157,4	I15	434496	7061850	146,7
K2	435004	7073483	155,5	I16	436524	7062363	161,4
K3	435846	7073518	154,5	I17	434146	7062365	145,3
K4	436739	7073563	154,7	I18	436185	7062827	161,0
K5	435175	7072670	156,0	I19	433597	7062985	145,1
K6	433756	7072547	160,5	I20	435786	7063345	159,9
K7	434322	7072074	156,1	I21	434753	7063448	155,9
K8	434401	7071282	159,7	I22	433461	7063604	138,5
K9	435123	7070935	155,6	I23	435611	7063879	162,6
K10	435319	7071856	153,5	I24	433953	7064177	141,1
K11	436069	7072925	155,7	Nurmesneva			
K12	436836	7072662	157,3	N01	434218	7080036	151,0
Välikangas				N02	441919	7078341	135,5
V01	431191	7075105	169,1	N03	442561	7077288	135,7
V02	431136	7074420	175,5	N04	440620	7077241	152,4
V03	430560	7073744	178,1	N05	441379	7076620	151,2
V04	431076	7073321	174,9	N06	439569	7076392	147,3
V05	431681	7072925	168,6	N07	442067	7075898	149,2
V06	432300	7072493	167,5	N08	442968	7076036	141,4
V07	431620	7071434	148,4	N09	440108	7075881	144,7
V08	432183	7071797	156,2	N10	439518	7075136	150,7
V09	432850	7071628	161,8	N11	440895	7075261	148,3
V10	431901	7074942	169,1	N12	440247	7074886	150,7
V11	432279	7074361	169,3	N13	442541	7074629	144,9
V12	430918	7072517	156,5	N14	441798	7074339	149,0
V13	431734	7073984	173,3	N15	440730	7074304	152,9
V14	431467	7072090	156,4	N16	441263	7073627	156,5
V15	432963	7072303	165,3	N17	443609	7073744	147,9

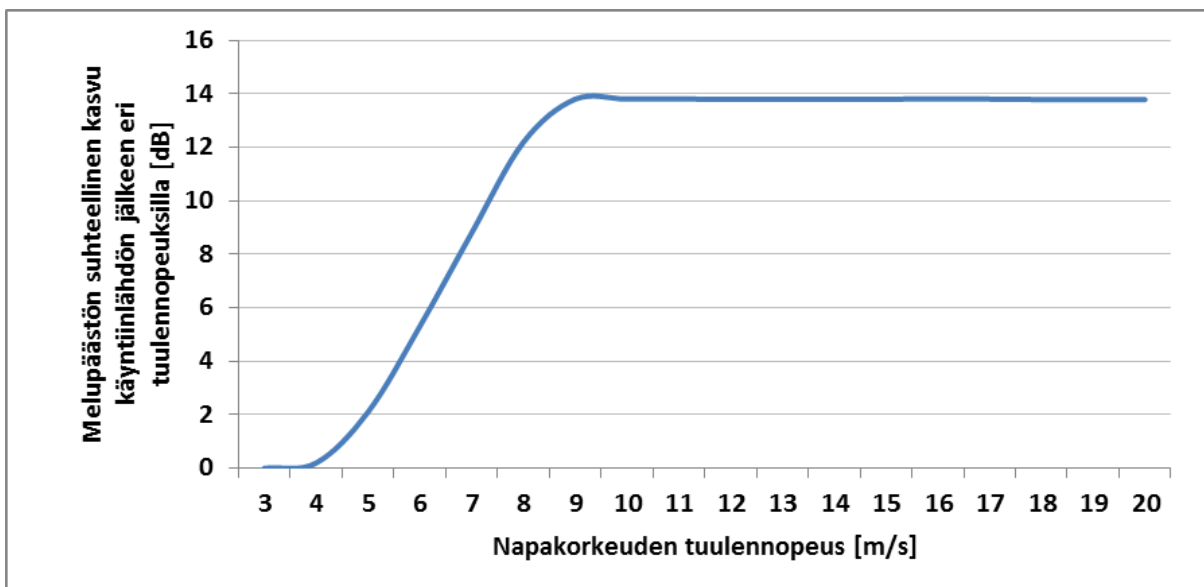
2 Tuulivoimaloiden melu

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 kokonaisäänienenergiasta lapojen suuren vaikutuspinta-alan vuoksi [14]. Tuulivoimamelu on A-taajuusjakaumaltaan painottunut tyypillisesti 200–1000 Hz:n väliin.

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen etupuolella suhteessa voimalan torniin. Katsottaessa aerodynaamisen melun suuntaavuutta ylhäältä käsin on siivistön äänitaso sivutuulen puolelta noin 4–6 dB alhaisempi kuin tuulen ylä- ja alapuolilla samalla etäisyydellä [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 3).



Kuva 3: Esimerkkikuva äänipäästön kasvusta napakorkeuden tuulennopeuden mukaan. Äänitason nousu tasoittuu n. 10 m/s voimalan napakorkeudella mitatun tuulennopeuden jälkeen.

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

Taustamelu, kuten liikennemelu ja teollisuusmelu sekä tuulen tuottama aallokko- ja puustokohina, peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänet ovat ajallisesti ja tasoltaan vaihtelevia. Tuulikohina esimerkiksi puustossa on taajuuskaistaltaan laajakaistaista ja tuulensuunnasta, puulajeista, vuodenajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1,5 m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemuseräisesti jopa yli 60 dB:n tasolle [17].

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

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasa voidaan kontrolloida erillisellä optimointisäädöllä, jonka avulla kellonajan, tuulensuunnan ja tuulennopeuden mukaan säädetään lapakulmaa haluttuun pyörimisnopeuteen ja melutasoon. Tällä säädöllä on kuitenkin vaikutuksia voimalan sen hetkiseen tuotantotehoon. Modernit voimalamallit sisältävät usein myös siiven jättöreunan sahalaidoituksen, 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 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 sykinnän

vaikutukset oletetaan sisältyvän valmistajan ilmoittamiin melupäästön tunnusarvoihin, eikä mallinnusohjeistuksessa edellytetä niiden erillistä tarkastelua.

Äänen etenemislaskennassa käytetään ohjeen mukaisia standardiin ISO 9613-2 perustuvia sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Maaston pinnan laatu ja muoto otetaan mallinnuksessa erillisinä huomioon. Lisäksi matalataajuisen äänen eteneminen tulee mallintaa erikseen ohjeistuksessa määritellyn erillislaskennan avulla, joka perustuu Tanskassa annettuun ohjeistukseen, jonka parametreja on mukautettu Suomen olosuhteisiin [3]. Laskennassa otetaan huomioon geometrinen etäisyysvaimennus sekä ohjeistuksen mukaiset ilmankäytön 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 terssikaistoitain, ja niiden perusteella voidaan arvioida rakennuksen sisämelutaso oletetulla ääneneristävyydellä.

2.3 Ohjearvot

Valtioneuvoston 1.9.2015 voimaan astunut asetus 1107/2015 määrittää tuulivoimaloiden aiheuttaman ulkomelutason ohjearvot [9]. Päätöstä sovelletaan meluhaittojen ehkäisemiseksi ja ympäristön viihtyisyyden turvaamiseksi maankäytön, liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa sekä rakentamisen lupamenettelyissä. Ohjearvot määritetään melun A-painotettuina päivä- (klo 07–22) ja yöajan (klo 22–07) ekvivalenttimelutasoina ulkoalueille asumiseen käytettävillä alueilla. Valtioneuvoston asetus korvaa aiemmat ympäristöministeriön suosittelemat suunnitteluarvot tuulivoimaloiden ulkomelutasoille [8].

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 5).

Taulukko 5: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.

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

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa enimmäisarvot matalataajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa [6]. Ohjearvot on annettu terssikaistoitain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 6). 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 6: 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 laskentastandardin ISO 9613-2 mukaisesti AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla. Melumallinuksissa on käytetty taulukossa (Taulukko 1) ilmoitettuja napakorkeuksia, turbiinityyppejä ja äänitehotasoja. Turbiinityyppejä vastaavat taajuusjakaumat on saatu seuraavista turbiinivalmistajien dokumenteista:

- Standard Acoustic Emission, SG 6.0-170, Rev. 0, Hub Height 135 m. Document ID: SGRE ON NE&ME TE SAS N-40-0000-046AC30-00 2020-05-26.
- V150-4.3 MW Third octave noise emission. Document no 0080-4413_02, 2020-04-03.
- Third octave noise emission EnVentus™ V162-6.2MW. Document no 0105-5200_00, 2021-04-21.
- Third octave noise emission EnVentus™ V172-7.2MW. Document no 0128-4336_00, 2022-06-30.

Turbiinityypeille ilmoitetut melutasot ovat laskennallisia ja perustuvat kokonaismelutason odotusarvoon. Ilmoitetuihin melutasoihin on lisätty ympäristöministeriön 14.9.2016 antaman lisäohjeistuksen mukainen 2-3 dB:n varmuusarvo [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.”

Mallinuksissa käytettyjä äänitehotasoja voidaan pitää melumallinnusohjeistuksen mukaisina melupäästön tunnusarvoina. Melupäästön taajuusjakaumat on valittu napakorkeuden mukaisesti siten, että ne vastaisivat referenssituulennopeutta 8 m/s 10 m korkeudella. Turbiinien melun impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinuksissa.

Turbiinityyppien melupäästön kapeakaistaisuuden arvioinnissa on käytetty ympäristöministeriön raportissa Ympäristömelun mittaaminen [11] esitettyä yksinkertaista menetelmää, joka perustuu äänitehotasojen vertailuun terssikaistoittain (1/3-oktaaveittain). Melun tulkitaan olevan kapeakaistaista, mikäli ainakin yhden terssikaistan äänitehotaso on vähintään 5 dB suurempi kuin välittömästi kyseisen kaistan ala- ja yläpuolella olevien terssikaistojen tasot. Luvussa 9 esitettyjen melun taajuusjakaumien mukaan tämä ehto ei toteudu, joten melun kapeakaistaisuuteen liittyvää sanktiota ei ole käytetty.

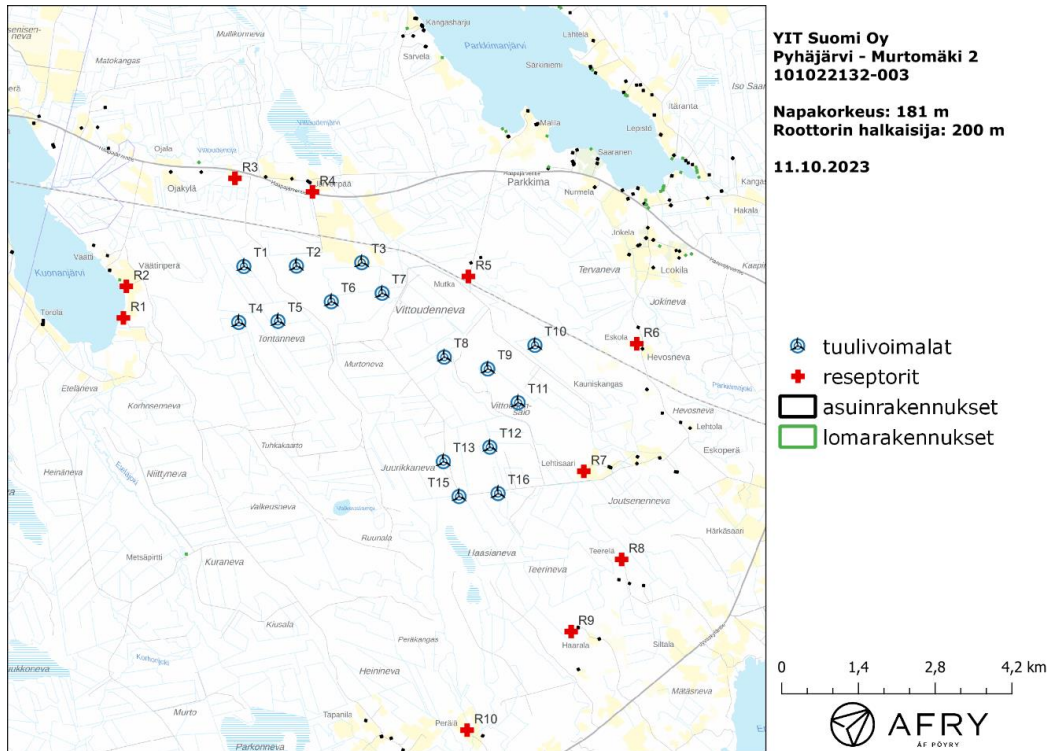
Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 2 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 0,3 m ja vaakasuuntainen resoluutio 2 m. Melutasot tuulivoimaloiden ympäristössä laskettiin hilapisteistöön, jonka korkeus on (ohjeistuksen mukaisesti) 4 m maanpinnasta ja vaakaresoluutio 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 7) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 10 vertailurakennusta, joiden kohdilla keskiäänitason LAeq ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 4). Rakennukset sijaitsevat noin 1,4–2,7 km etäisyydellä Murtomäki 2:n voimaloista.

Taulukko 7: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

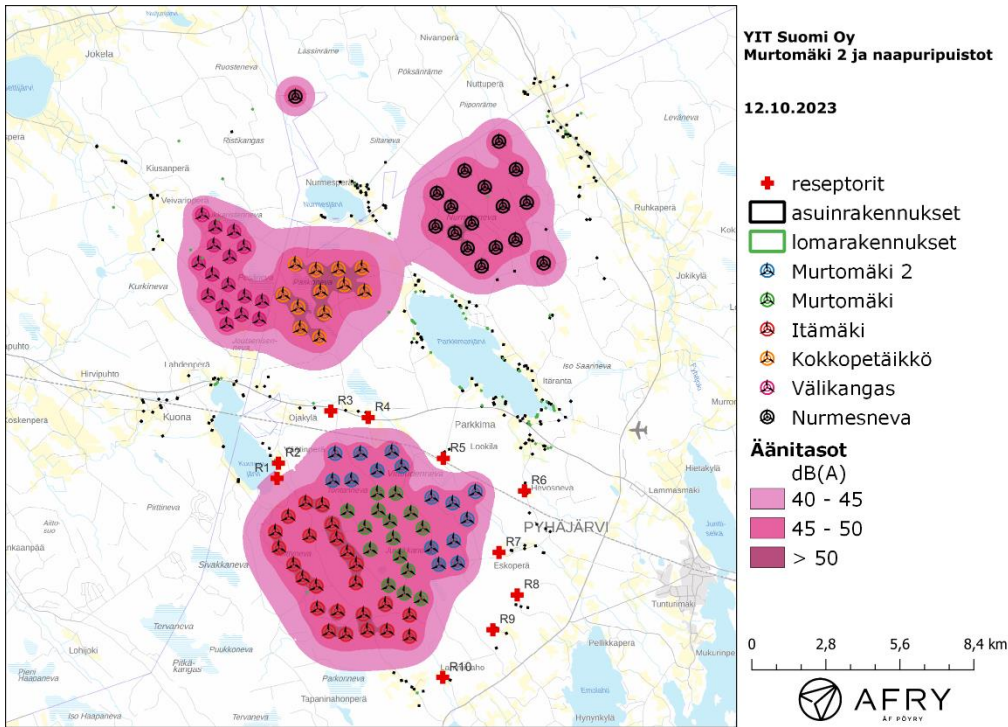
Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	433526	7065614	138	loma-asuinrakennus
R2	433579	7066188	138	vakituinen asuinrakennus
R3	435560	7068158	151	vakituinen asuinrakennus
R4	436974	7067911	153	loma-asuinrakennus
R5	439817	7066369	158	vakituinen asuinrakennus
R6	442885	7065142	157	vakituinen asuinrakennus
R7	441921	7062817	155	vakituinen asuinrakennus
R8	442609	7061212	153	vakituinen asuinrakennus
R9	441690	7059897	161	vakituinen asuinrakennus
R10	439793	7058101	149	vakituinen asuinrakennus



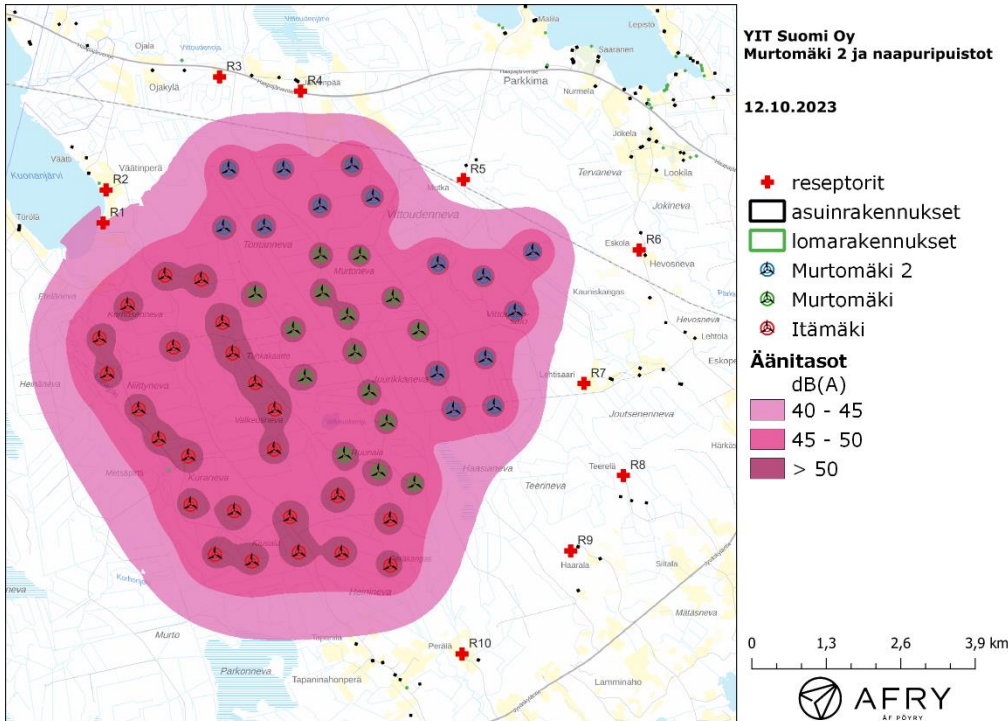
Kuva 4: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

Meluvaikutus

Tarkasteltavien tuulipuistojen yhteisvaikutuksena mallinnettu keskiäänitaso L_{aeq} on esitetty karttakuvina (Kuva 5 ja Kuva 6). Karttakuviin on merkitty keskiäänitasojen 40 dB(A), 45 dB(A) ja 50 dB(A) mukaiset vyöhykkeet, joita käytetään apuna tulosten arvioinnissa. Keskiäänitasot reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 8). Mallinnustulosten perusteella keskiäänitasot jäävät valtioneuvoston asetuksen ohjearvojen alapuolelle kaikkien alueen rakennusten kohdilla, jotka kuuluvat Murtomäki 2:n vaikutusalueelle. Reseptoripisteessä R1 mallinnettu äänitaso on aivan ohjearvon 40 dB(A) tasolla, mutta siinä merkittävin meluvaikutus aiheutuu Itämäen suunnitelluista voimaloista.



Kuva 5: Keskiäänitasot LAeq, kun otetaan huomioon kuuden tuulivoimapuiston yhteisvaikutukset.



Kuva 6: Keskiäänitasot LAeq, kun karttanäkymä on rajattu MurtoMäki 2:n vaikutusalueelle. Kaikki kuusi tuulipuistoa ovat mukana mallinnuksessa, mutta kolme jää kartan ulkopuolelle.

Taulukko 8: Keskiäänitasot reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptori	Äänitaso dB(A)
R1	40,0
R2	38,1
R3	37,2
R4	38,2
R5	38,1
R6	33,0
R7	36,6
R8	32,3
R9	33,3
R10	35,4

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 6). 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 (ΔL_G) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja ohjearvoihin verrannolliset mallinnustulokset.

Tässä raportissa käytetyt rakennusten ääneneristävyysparametrit perustuvat tutkimukseen suomalaisten pientalojen äänieristävyden arvoista [4]. Turun ammattikorkeakoulussa tehdyssä tutkimuksessa esitetyt arvot perustuvat suomalaisissa pientaloissa tehtyihin mittauksiin, joiden avulla on johdettu tilastollinen estimaatti talojen ääneneristävyyksille eri taajuuksilla. Artikkelin [4] eristävyysarvot ylittivät 84 % todennäköisyydellä suomalaisissa pientaloissa, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle, ja tässä raportissa

vertailurakennusten matalataajuisia sisämelutasoja arvioidaan käyttäen näitä alempia ääneneristävyyssarvoja. Taulukossa (Taulukko 9) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa [4] annetut ääneneristävyyden arvot.

Taulukko 9: Rakennuksen äänieristävyyden arvoja taajuuskaistoittain.

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

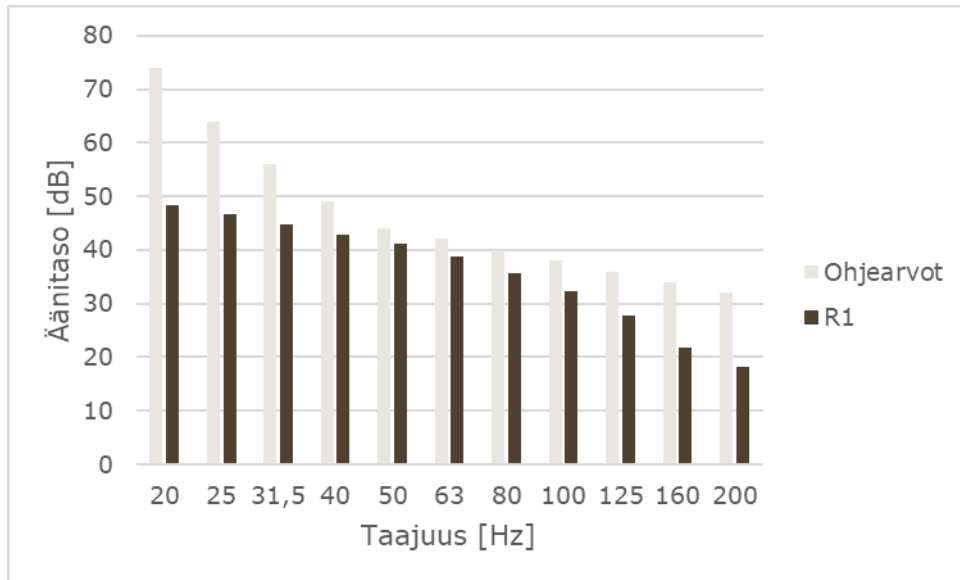
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen reseptoreiden paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 9) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso reseptoreiden kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 10). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot.

Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat reseptoriin R1, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 7). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 annetaan matalien taajuuksien 20–200 Hz tunnin keskiäänitasojen (Taulukko 6) 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. Näin tapahtuu tämän raportin mallinnusten perusteella (lukujen 3.1 ja 3.2 tulokset), eikä sisätilojen kokonaismelutasojen tarkistus edellytä erillisiä mallinnuksia. Tätä johtopäätöstä tukevat tehdyt tuulivoimamelun sisätilamittaukset Suomessa sekä ilmastuäänieristykseen keskimääräinen profiili, joka kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä.

Taulukko 10: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot (dB) reseptoreiden kohdilla.

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	55,9	54,9	53,9	53,2	52,7	51,7	50,4	49,0	46,5	42,9	40,9
R2	55,2	54,1	53,1	52,3	51,7	50,7	49,3	47,9	45,2	41,5	39,3
R3	55,5	54,2	53,1	52,2	51,3	50,2	48,7	47,4	44,5	40,6	38,1
R4	56,4	55,0	53,8	52,7	51,7	50,5	48,9	47,8	44,6	40,8	38,3
R5	56,7	55,1	53,8	52,7	51,5	50,1	48,5	47,5	44,2	40,4	37,9
R6	53,3	51,8	50,6	49,5	48,3	47,0	45,3	44,0	40,5	36,4	33,4
R7	55,3	53,8	52,5	51,4	50,2	48,8	47,2	46,1	42,8	38,9	36,3
R8	52,6	51,2	50,0	49,0	48,0	46,7	45,1	43,7	40,4	36,3	33,6
R9	52,6	51,3	50,2	49,3	48,5	47,3	45,7	44,3	41,3	37,3	34,8
R10	52,6	51,6	50,6	49,9	49,3	48,3	46,9	45,4	42,7	38,9	36,7



Kuva 7: Matalataajuisen sisämelun tasot reseptorin R1 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 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.

Tässä selvityksessä välkemallinnus tehdään todennäköiselle tilanteelle.

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 kellon-aikoina. 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.

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 [8]. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [19]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen välketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.

5 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

5.1 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 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.

Välkemallinnuksissa voimaloille on käytetty taulukossa (Taulukko 2) esitettyjä napakorkeuksia ja roottorin halkaisijoita. Roottorin halkaisijoille 150 m ja 162 m on käytetty turbiinityyppien V150 ja V162 tarkkoja lapaprofiileja turbiinivalmistajan dokumenttien pohjalta. Roottorin halkaisijalla 172 m on käytetty turbiinin V162 skaalattua profiilia, jossa lavan maksimileveyttä on kasvatettu 4,3 metristä 4,4 metriin. Roottorin halkaisijoille 200 m ja 240 m on käytetty turbiinityypin SG170 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna suuremmalle roottorin halkaisijalle. Roottorin halkaisijalla 200 m skaalatun lavan maksimileveys on ollut 4,7 m ja halkaisijalla 240 m leveys on ollut 5,64 m. 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. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua

välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [20] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa 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 osuille tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 11).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Pelmaan sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [21]. Sääaseman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 12). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 11: 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	0,176	0,167	0,152	0,146	0,140	0,157

Taulukko 12: 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

5.2 Välkevaikutus

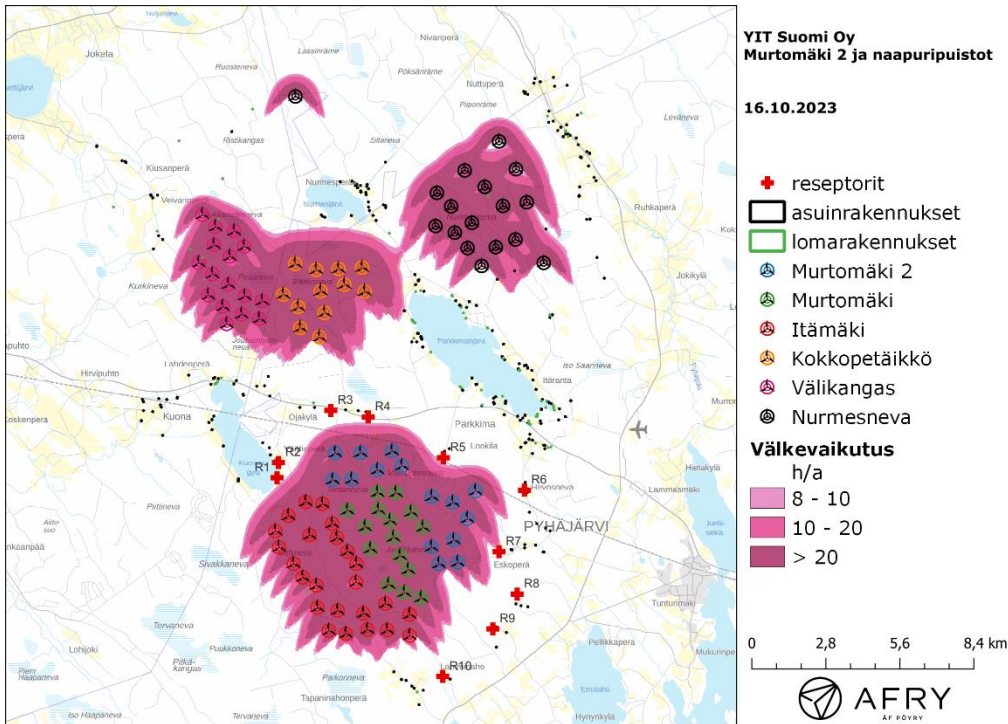
Mallinnetut arviot kohteiden yhteisvaikutuksena aiheutuvien todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvina (Kuva 8 ja Kuva 9). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat aiemmin määriteltyjen reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 13). Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdilla. Myös päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

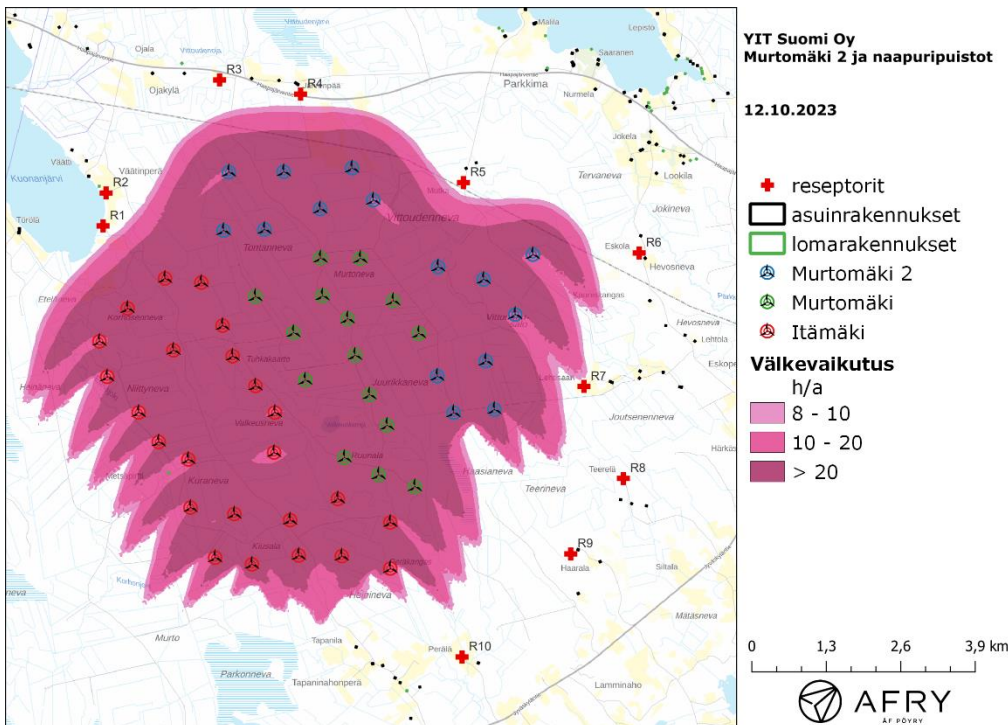
Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden kohdilla, joissa vuotuinen välkeaika ylittää viisi tuntia on esitetty taulukoissa (Taulukko 14–Taulukko 16). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 13: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina ja suurin päiväkohtainen välkeaika reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi [min]
R1	4:57	8
R2	2:26	3
R3	1:45	3
R4	5:16	9
R5	5:42	5
R6	1:05	4
R7	5:39	7
R8	0:00	0
R9	0:00	0
R10	0:00	0



Kuva 8: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun otetaan huomioon MurtoMäki 2:n yhteisvaikutukset viereisten kohteiden kanssa.



Kuva 9: Vuotuinen välkevaikutus, kun karttanäkymä on rajattu MurtoMäki 2:n vaikutusalueelle.

Taulukko 14: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R4 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0	0	0	0	0	18	42	0	0	0	0	0	1:00
Helmikuu	0	0	0	0	24	35	35	26	0	0	0	0	2:00
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
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	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Lokakuu	0	0	0	0	25	0	0	20	0	0	0	0	0:45
Marraskuu	0	0	0	0	16	16	57	2	0	0	0	0	1:31
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	1:05	1:09	2:14	0:48	0:00	0:00	0:00	0:00	5:16

Taulukko 15: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin 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	29	31	4	0	0	0	0	1:04
Helmikuu	0	0	0	0	29	0	15	0	8	0	0	0	0:52
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0:44
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0:23
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	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0:03
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	39	17	0	0	0:56
Lokakuu	0	0	0	0	27	0	0	6	0	0	0	0	0:33
Marraskuu	0	0	0	0	0	27	36	4	0	0	0	0	1:07
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:56	0:56	1:22	0:14	1:31	0:43	0:00	0:00	5:42

Taulukko 16: 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	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	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0:54
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0:37
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0:05
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101	0	1:41
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0:57
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0:37
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0:48
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
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:42	1:14	2:43	0:00	5:39

6 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kaupungin alueelle suunnitellun Murtomäki 2:n tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman melu- ja välkevaikutuksen laskennalliset arviot. Vaikutusten arviot on tehty kaavaehdotuksen mukaiselle 15 voimalan sijoitussuunnitelmalle. Vaikutusten arvioinnissa on huomioitu myös Murtomäki 2:n läheisyyteen suunnitellut ja rakennetut tuulivoimapuistot.

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 jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Suurin päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien rakennusten kohdilla.

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.

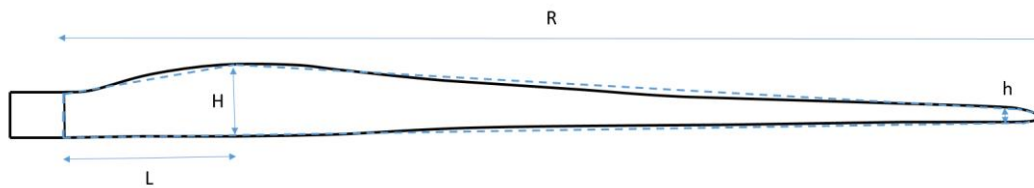
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 10) 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 10: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin väkelaskennassa 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 väkelaskennassa huomioidaan tarkemmin turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.



8 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 ohjeista. 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.
- [19] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [20] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [21] P. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990-2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.

9 Melumallinnuksen tiedot

RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT							
Mallinnusraportin numero/tunniste:				Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 16.10.2022			
Tekijä/organisaatio, yhteystiedot: AFRY Finland Oy							
Vastuuhenkilöt: Erkki Heikkola							
Laatija: Erkki Heikkola				Tarkastaja/hyväksyjä: Mika Laitinen			
MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT							
Mallinnusohjelma ja versio: AFRY Numerola -mallinnusohjelmisto				Mallinnusmenetelmä: ISO 9613-2			
TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN) TIEDOT							
Tuulivoimalan valmistaja: Siemens Gamesa Vestas Vestas Vestas				Tyyppi: SG170 6,2 MW AMO V150 4,3 MW V162 6,2 MW V172 7,2 MW		Sarjanumero/t:	
Nimellisteho: 6.2 MW 4,3 MW 6,2 MW 7,2 MW		Napakorkeus: 181 m 145 m 166 m 200 m ja 214 m		Roottorin halkaisija: 170 m 150 m 162 m 172 m		Tornin tyyppi:	
Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön käytön aikana ja sen vaikutus meluun							
Lapakulman säätö		Pyörimisnopeus		Muu, mikä			
Kyllä	dB	Kyllä	dB				dB
Ei	Ei tiedossa	Ei	Ei tiedossa				dB
AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT							
Melupäästötiedot: SG170 6,2 MW AMO (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	65,7	200	65,7	2000	96,4
63	88,5	25	69,7	250	69,7	2500	94,0
125	95,4	31,5	73,7	315	73,7	3150	92,7
250	98,1	40	77,5	400	77,5	4000	90,3
500	99,9	50	80,3	500	80,3	5000	86,8
1000	103,8	63	83,1	630	83,1	6300	82,9
2000	101,9	80	85,9	800	85,9	8000	79,2
4000	95,3	100	89,8	1000	89,8	10000	75,5
8000	85,0	125	90,2	1250	90,2		
		160	91,7	1600	91,7		

Melupäästötiedot: V162 6,2 MW (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	61,8	200	93,5	2000	
63	87,0	25	66,3	250		2500	
125	94,7	31,5	70,6	315		3150	
250	99,6	40	74,7	400		4000	
500	101,8	50	78,3	500		5000	
1000	101,1	63	81,6	630		6300	
2000	97,6	80	84,7	800		8000	
4000	91,4	100	87,3	1000		10000	
8000	82,4	125	89,6	1250			
		160	91,8	1600			
Melupäästötiedot: V172 7,2 MW (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	64,0	200	98,1	2000	
63	92,5	25	69,2	250		2500	
125	100,2	31,5	74,0	315		3150	
250	103,3	40	78,8	400		4000	
500	103,5	50	83,2	500		5000	
1000	101,8	63	87,0	630		6300	
2000	97,2	80	90,3	800		8000	
4000	89,5	100	93,1	1000		10000	
8000	78,7	125	95,3	1250			
		160	97,0	1600			
Melupäästötiedot: V150 4,3 MW (valmistajan ilmoittamat melupäästön tunnusarvot)							
Oktaaveittain [Hz]		1/3-oktaaveittain [Hz]					
31,5		20	59,8	200	92,9	2000	
63	85,9	25	64,4	250		2500	
125	94,0	31,5	68,9	315		3150	
250	99,2	40	73,2	400		4000	
500	101,7	50	76,9	500		5000	
1000	101,5	63	80,4	630		6300	
2000	98,4	80	83,6	800		8000	
4000	92,5	100	86,4	1000		10000	
8000	83,9	125	88,8	1250			
		160	91,1	1600			



Melun erityispiirteiden mittaustulos ja havainnot:									
Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus		Impulssimaisuus		Merkityksellinen sykintä (amplitudi- modulaatio)		Muu, mikä:			
kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei		
Laskentakorkeus					Laskentaruudun koko [m x m]				
4 m					10 m x 10 m				
Suhteellinen kosteus					Lämpötila				
70 %					15 C°				
Maastomallin lähde ja tarkkuus									
Maastomallin lähde: Maanmittauslaitos					Vaakaresoluutio: 2 m		Pystyresoluutio: 0,3 m		
Maan- ja vedenpinnan absorptio ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet									
ISO 9613-2									
Vesialueet, (0) / (G)									
Maa-alueet, (0,4) / (A-D/E-F)									
Maa-alueet (0) / (G)									
Ilmakehän stabiilius laskennassa/meteorologinen korjaus									
Neutraali									
Voimalan äänen suuntaavuus ja vaimentuminen									
Vapaa avaruus									
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)									
Asukkaat: 0 kpl			Vapaa-ajan rakennukset: 0 kpl			Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl			
Melulle altistuvat asukkaat ja kohteet, lkm (meluntorjunta/voimalan ohjaus huomioiden)									
Asukkaat: 0 kpl			Vapaa-ajan rakennukset: 0 kpl			Hoito- ja oppilaitokset: 0 kpl			
Melun leviäminen virkistys- tai luonnonsuojelualueille									
Virkistysalueet: 0 kpl					Luonnonsuojelualueet: 0 kpl				

Lineaariset melutasot [dB] altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella:										
Hz	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
20	55,9	55,2	55,5	56,4	56,7	53,3	55,3	52,6	52,6	52,6
25	54,9	54,1	54,2	55,0	55,1	51,8	53,8	51,2	51,3	51,6
31,5	53,9	53,1	53,1	53,8	53,8	50,6	52,5	50,0	50,2	50,6
40	53,2	52,3	52,2	52,7	52,7	49,5	51,4	49,0	49,3	49,9
50	52,7	51,7	51,3	51,7	51,5	48,3	50,2	48,0	48,5	49,3
63	51,7	50,7	50,2	50,5	50,1	47,0	48,8	46,7	47,3	48,3
80	50,4	49,3	48,7	48,9	48,5	45,3	47,2	45,1	45,7	46,9
100	49,0	47,9	47,4	47,8	47,5	44,0	46,1	43,7	44,3	45,4
125	46,5	45,2	44,5	44,6	44,2	40,5	42,8	40,4	41,3	42,7
160	42,9	41,5	40,6	40,8	40,4	36,4	38,9	36,3	37,3	38,9
200	40,9	39,3	38,1	38,3	37,9	33,4	36,3	33,6	34,8	36,7