



SUOMEN HYÖTYTUULI OY

Tahkoluodon merituulipuiston laajennus, melumallinnus

101013470-006

Tekijä
Carlo Di Napoli/Johtava asiantuntija
Osasto
Ympäristökonsultointi
Puhelin
+358 (0)20 3324 587
gsm
+358 (0)40 5857 674
E-mail
carlo.dinapoli@afry.com

pvm
18/01/2021

Projektinumero
101013470-006

Asiakas

Suomen Hyötytuuli Oy

Tahkoluodon merituulipuiston laajennus, melumallinnus

Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Ympäristömelu	6
1.2	Tuulivoimamelu	6
1.3	Vertailuohjeavot ulkona	8
1.4	Äänitason toimenpiderajat sisätiloissa	8
2	Lähtötiedot ja arviointimenetelmät	9
2.1	Digitaal kartta-aineisto	9
2.2	Mallinnetut tuulivoimalamallit	9
2.3	Tuulivoimaloiden ja reseptoripisteiden sijainnit	10
2.4	Melumallinnuksen laskentaparametrit	11
2.5	Pientaajuisten melun laskenta	12
3	Mallinnustulokset	13
3.1	Ulkomelumallinnus, hankevaihtoehto VE1	13
3.2	Ulkomelumallinnus, hankevaihtoehto VE2	14
3.3	Ulkomelumallinnus, yhteismelu + VE1	15
3.4	Ulkomelumallinnus, yhteismelu + VE2	16
3.5	Pientaajuinen melu rakennusten sisätiloissa	18
3.6	Vaikutusten ehkäiseminen ja lieventäminen	20
3.7	Vaikutusten seuranta	20
4	Lähteet	21

Liitteet

Liite 1. Tuulivoimaloiden ja reseptoripisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN koordinaatistossa

Liite 2. Melumallinnuskartta, VE1

Liite 3. Melumallinnuskartta, VE2

Liite 4. Melumallinnuskartta, Yhteismelumallinnus, Nykytila + VE1

Liite 5. Melumallinnuskartta, Yhteismelumallinnus, Nykytila + VE1

Liite 6. Pientaajuisten melun numeeriset tulokset ulkona ja sisätiloissa

Liite 7. Koostetaulukko, laskennan parametrit ja laskentatulokset

Kuvat ja taulukot

Kuva 1. Esimerkkikuva äänipäästön kasvusta napakorkeuden tuulennopeuden mukaan. Äänitason nousu tasoittuu n. 10 m/s voimalan napakorkeudella mitatun tuulennopeuden jälkeen.	7
---	---

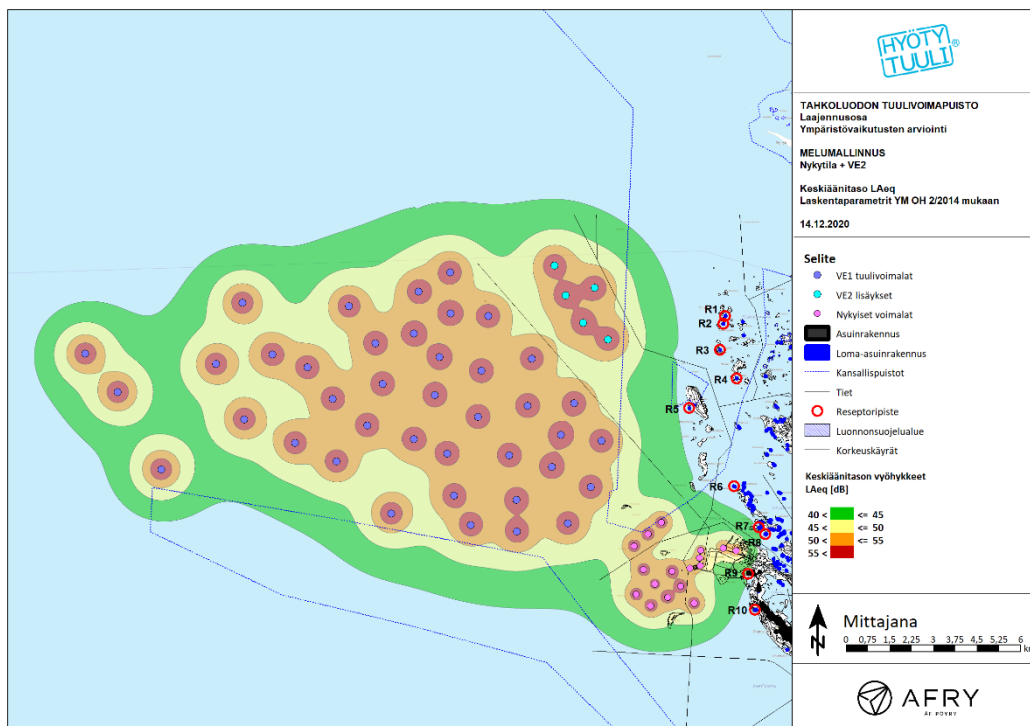
Taulukko 1. Tuulivoimamelun ohjearvot ulkona, LAeq.....	8
Taulukko 2. Melutason toimenpiderajat sisätiloissa (STM 545/2015).....	8
Taulukko 3. Pientaajuisen sisämelun tunnin keskiäänitason Leq,1h toimenpiderajat taajuusvälillä 20-200Hz nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa yöaikaan klo 22-07.....	9
Taulukko 4. Melumallinnuksen lähtötiedot.....	10
Taulukko 5. Voimalan äänipäästö lisättynä +2 dB:n epävarmuudella [dB].	10
Taulukko 6. Pientaajuisen melun äänipäästö lisättynä +2 dB:n epävarmuudella [dB].	10
Kuva 2. Tuulivoimaloiden ja lähimpien reseptoripisteiden R1-R10 sijainnit.....	11
Taulukko 7. Laskennan parametrit.....	11
Kuva 3. Melumallinnuskartta, hankevaihtoehto VE1	13
Taulukko 8. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE1.	14
Kuva 4. Melumallinnuskartta, hankevaihtoehto VE2	14
Taulukko 9. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE2.	15
Kuva 5. Melumallinnuskartta, nykytila ja hankevaihtoehto VE1	15
Taulukko 10. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE2.	16
Kuva 6. Melumallinnuskartta, nykytila ja hankevaihtoehto VE2	17
Taulukko 11. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE2.	17
Kuva 7. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, VE1	18
Kuva 8. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, VE2	19
Kuva 9. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, Nykytila + VE1.....	19
Kuva 10. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, Nykytila + VE2.....	20

Yhteenveto

Suomen Hyötytuuli Oy suunnittelee Tahkoluodon merituulipuiston laajennusta Porissa. Hankealue sijaitsee Porin edustalla merialueella, lähimmillään noin 4 kilometrin etäisyydellä Tahkoluodosta ja 30 kilometriä Porin keskustasta luoteeseen. Alue rajautuu pohjoisessa Merikarvian kunnanrajaan. Lähimmät vakituiset asuinrakennukset sijaitsevat Tahkoluodossa noin 5 kilometrin etäisyydellä hankealueesta itään ja lähimmät loma-asuinrakennukset Iso-Enskerissä noin 2,5 kilometrin etäisyydellä hankealueen itäpuolella. Tässä raportissa käsitellään vedenpäällisen melun leviämisen mallinnusmenettelyt ja tulokset ja raportti on valmisteltu Tahkoluodon merituulivoimapuiston ympäristönvaikutusarvioinnin sekä osayleiskaavan laadintaa varten.

Ympäristöministeriön ohjeiden 2/2014 mukaisesti toteutetun ylärajalaskennan mukaan 40-45 voimalan hankevaihtoehdoilla nykytilan kanssa laskennalliset ulkomelutasot eivät ylitä VNa 1107/2015 säädettyjä tuulivoimamelun keskiäänitason LAeq ohjearvoja lähimpien asuin- tai lomarakennuksen piha-alueilla hankealueen lähimmissä altistuvissa kohteissa. Reseptoripistelaskennan perusteella suurin keskiäänitason LAeq tulos laskennan mukaan reseptoripisteessä R9, jonka käyttötarkoitukseksi on merkitty asuinrakennus, on noin 39 dB, joka alittaa yöajan alimman ohjearvorajan 40 dB ulkona.

40 dB:n meluvyöhyke ei ulotu Selkämeren kansallispuistoon sisältyvään Iso-Enskerin saareen asti, jonne on rakennettu virkistyskäyttöä palvelevia polkuja ja rakenteita. 40 dB:n meluvyöhyke käsittää jo nykytilassa Hylkiriutan. Yhteismelualue ulottuu osittain Silakkariutalle asti. Näillä riutoilla ei sijaitse virkistyskäyttöä palvelevia polkuja ja muita rakenteita. Luonnonsuojelualueisiin sovellettava melutason ohjearvo 45 dB ylittyy suojelualueilla Tahkoluodon satama-alueen, meriliikenteen ja tuulivoimamelun vuoksi tälläkin hetkellä. Kysymyksessä ei siten ole erityisen hiljainen alue, jonka olosuhteisiin tai suojeluperusteisiin melu aiheuttaisi olennaisia muutoksia.



Pientaajuisen melun erillislaskennan perusteella sisätilan toimenpiderajat alittuvat. Suurin ilmaäänieristävyyden vaatimus olisi noin 12 dB taajuusalueella 200 Hz, joka voidaan saavuttaa suhteellisen kevyellä asuinrakennuksen vaipan rakenteella. Pientaajuisen melun laskennassa on nyt hyödynnetty suomalaisten pientalojen ilmaäänieristävyyden tilastollisia arvoja vuoden 2017 mittaushankkeen tuloksista.

Rakentamisen jälkeen käyttövaiheen meluvaikutuksia voidaan seurata mittauksin, joista ohjeistetaan myös ympäristöministeriön oppaassa YM OH 3-4/2014 soveltuvien osin. Vaikka tuulivoimalat sijaitsevat merellä, on mittauksin mahdollista todeta melun tasot ja luonne sekä tehdä vertailuja mallinnettuihin tasoihin ja tuulivoimamelun ohjearvoihin, missä ohjearvovertailu tehdään YM:n ohjeen 1/1995 mukaisesti. Rannikon taustamelutason peittovaikutuksesta johtuen mittausten suoritus vaatii kuitenkin huolellisen mitausjärjestelyn ja olosuhteet, jotka edesauttavat mitattavan signaalin luotettavaa tallennusta referenssituulennopeudella 8 m/s 10m:n korkeudella mahdollisimman korkealla signaali-kohinasuhteella. Tutkimuksissa on osoitettu että yli 10 dB korkeampi taustamelutaso suhteessa mitattavaan tuulivoimameluun käytännössä peittää kokonaan tuulivoimamelun signaalin tarkkuuden (Bolin, 2012). Tulokset, joissa siis esiintyy voimakasta taustamelua, ei voi siten käyttää arvioitaessa tuulivoimamelun voimakkuutta mittauspisteessä.

1 Johdanto

Suomen Hyötytuuli Oy suunnittelee Tahkoluodon merituulipuiston laajennusta Porissa. Hankealue sijaitsee Porin edustalla merialueella, lähimmillään noin 4 kilometrin etäisyydellä Tahkoluodosta ja 30 kilometriä Porin keskustasta luoteeseen. Alue rajautuu pohjoisessa Merikarvian kunnanrajaan. Lähimmät vakituiset asuinrakennukset sijaitsevat Tahkoluodossa noin 5 kilometrin etäisyydellä hankealueesta itään ja lähimmät lomaa-asuinrakennukset Iso-Enskerissä noin 2,5 kilometrin etäisyydellä hankealueen itäpuolella. Tässä raportissa käsitellään vedenpäällisen melun leviämisen mallinnusmenettelyt ja tulokset ja raportti on valmisteltu Tahkoluodon merituulivoimapuiston ympäristönvaikutusarvioinnin sekä osayleiskaavan laadintaa varten.

1.1 Ympäristömelu

Ääni on aaltoliikettä, joka tarvitsee väliaineen välittyäkseen eteenpäin. Ilmassa äänellä on nopeus, joka on riippuvainen ilman lämpötilasta. Eri väliaineissa ääniaalto kulkee eri nopeuksilla väliaineen ominaisuuksista riippuen. Normaali ympäristömelu sisältää useista kohteista peräisin olevaa yhtäaikaista ääntä, jossa äänen taajuudet ja aallonpituudet ovat jatkuvassa muutoksessa.

Melu on subjektiivinen käsite, jolla viitataan äänen negatiivisiin vaikutuksiin. Sitä käytetään puhuttaessa ei-toivotusta äänestä, josta seuraa ihmisille haittaa ja jonka havaitsemisessa kuulijan omilla tuntemuksilla ja äänenerotuskyvyllä on suuri merkitys. Melua voidaan mitata sen fysikaalisten ominaisuuksien perusteella.

Ympäristömelu koostuu ihmisen toiminnan aiheuttamasta melusta, joka vaihtelee ajan ja paikan mukaan. Äänen voimakkuutta mitataan käyttäen logaritmista desibeliasteikkoa (dB), jossa äänenpaineelle käytetään referenssipainetta 20 μPa ilmalle sekä 1 μPa vedelle. Tällöin 1 Pa:n paineenmuutos ilmassa vastaa noin 94 dB:ä ilmassa ja vastavasti vedessä 120 dB. (ISO 226:2003). Vertailun vuoksi ilmanpaineen normaaliarvo merenpinnalla on 101 325 Pa.

Ääniaallon nopeus on nopeus, jolla värähtely liikkuu väliaineen läpi. Ääni liikkuu nopeammin vedessä (1500 m/s) kuin ilmassa (noin 340 m/s), koska veden mekaaniset ominaisuudet eroavat ilmakehän vastaavista ominaisuuksista. Myös lämpötila vaikuttaa äänen nopeuteen. Ääni kulkee nopeammin lämpimässä ilmassa/vedessä kuin kylmässä.

Kuuloaistin herkkyys vaihtelee eri taajuisille äänille, jolloin vaihtelevat myös melun haitallisuus, häiritsevyys sekä kiusallisuus (engl. annoyance). Nämä tekijät on otettu huomioon äänen taajuuskomponentteja painottamalla. Yleisin käytetty taajuuspainotus on A-painotus, joka perustuu kuuloaistin taajuusvasteen mallintamiseen.

Melun ekvivalenttitaso, minkä symboli on L_{eq} ja A-taajuuspainotettuna L_{Aeq} , tarkoittaa samanarvoista jatkuvaa äänitasa kuin vastaavan äänienergian omaava vaihteleva äänitasa.

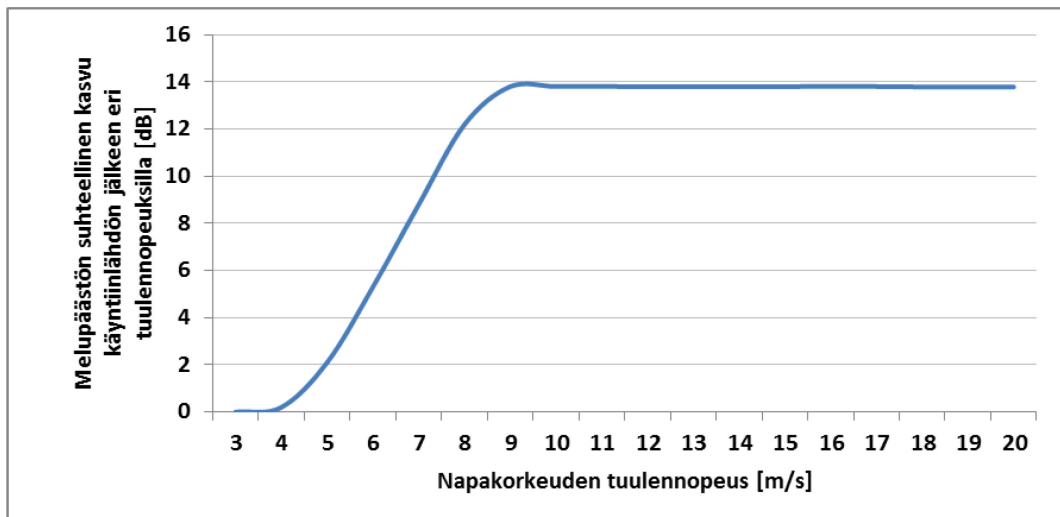
1.2 Tuulivoimamelu

Tuulivoimalaitosten käyntiääni vedenpinnan yläpuolella ilmakehässä 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 (Gupta, M. Madsen, K., 2019). 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 alaisempi kuin tuulen ylä- ja alapuolilla samalla etäisyydellä (Oerlemans, S. Schepers, J.G., 2009).

Vaihtuvanopeuksisen tuulivoimalan äänipäästö on suoraan verrannollinen tuulennopeuteen siten, että alhaisilla tuulilla eli hitaalla roottorin pyörimisnopeudella ja lähellä käyntiä nopeutta, lähtöäänitaso on usein noin 10–15 dB alaisempi kuin voimalan nimellisteholla, jossa roottori saavuttaa suurimman kierrosnopeuden (ks. kuva 1).



Kuva 1. 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 (ks. kuva 1).

Taustamelu esim. liikennemelu ja teollisuusmelu sekä tuulen tuottama aallokko- ja puustokohina peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänät ovat ajallisesti ja tasoltaan vaihtelevia. Tuulikohina esim. puustossa on taajuuskaistaltaan laajakaistaista ja tuulensuunnasta, puulajeista, vuodenajasta ja tuulennopeudesta riippuva. Puustokohinan äänitaso mittauskorkeudella 1.5m voi nousta kuitenkin tuulennopeuden mukaan kokemuseräisesti jopa yli 60 dB:n tasolle (Halstead, D. Tam, N., 2019). Vastaavasti aallokon ääni ilmassa voi aallon murtuessa tuottaa yli 75 dB:n äänitasoja lähietäisyydellä riippuen voimakkaasti aallon ja kohtaavan maanpinnan koosta ja muodosta (Bolin et al. 2010).

Ilmakehän pystysuuntaisen stabiilisuuden ja ilmvirran turbulenssin vaihtelut eri vuorokauden aikoina voivat vaikuttaa tuulisuuden tasoon eri korkeuksilla (Bolin, K, 2012.).

Ilmakehän neutraalin stabiilisuuden vallitessa 8 m/s tuulenoisuus 10 metrin korkeudella vastaa noin 12 m/s modernin voimalan napakorkeudella 150 m (G.P. van den Berg, 2006).

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasa voidaan kontrolloida erillisellä optimointisäädöllä, jonka avulla kellonajan, tuulensuunnan ja tuulenoisuuden 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 2-4 dB ja tulevaisuudessa vieläkin enemmän serraatioiden tuotekehityksen johdosta (Arce León, C., 2017).

1.3 Vertailuohjeet ulkona

Valtioneuvoston asetus 1107/2015 tuulivoimamelun ohjeista tuli voimaan 1.9.2015. Oheisessa taulukossa on esitetty uuden asetuksen mukaiset keskiäänitason ohjeet LAeq tuulivoimamelulle päivällä ja yöllä.

Taulukko 1. Tuulivoimamelun ohjeet ulkona, LAeq

Tuulivoimamelun ohjeet	LAeq päiväajalle (klo 7–22)	LAeq yöajalle (klo 22–7)
Pysyvä asutus, Loma-asutus, Hoitolaitokset, Leirintäalueet	45 dB	40 dB
Oppilaitokset, Virkistysalueet	45 dB	-
Kansallispuistot	40 dB	40 dB

Jos tuulivoimalan melu on impulssimaista tai kapeakaista melulle altistuvalla alueella, valvonnan yhteydessä saatua mittaukseen lisätään 5 dB ennen sen vertaamista asetuksen 3 §:ssä säädettyihin arvoihin.

Tuulivoimarakentamisen ulkomelutason ohjeet määritetään A-taajuuspainotettuna keskiäänitasona LAeq erikseen yhden vuorokauden päiväajan ja yöajan osalta. Kyse ei ole hetkellisistä enimmäisäänitasoista. Kunkin vuorokauden päiväajan 15 tunnin (klo 7–22) keskimääräisen ulkomelutason (LAeq) tulee pysyä annetun päiväajan ohjeen mukaisena. Vastaavasti kunkin vuorokauden yöajan osalta 9 tunnin (klo 22–7) keskimääräisen ulkomelutason (LAeq) tulee pysyä annetun yöajan ohjeen mukaisena. (Ympäristöministeriö, 2016).

Melumallinnuksessa ei erotella päivä- tai yöajan tilanteita, vaan melun leviämislaskennan tulokset tehdään vain yöajan alempana 40 dB:n ohjeeseen nähden.

1.4 Äänitason toimenpiderajat sisätiloissa

Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetus 545/2015 asettaa sisätilojen äänitasoille toimenpiderajat erityisesti yöajan äänitasoille nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa sekä pientaajuisten melulle taajuusvälillä 20–200 Hz.

Taulukko 2. Melutason toimenpiderajat sisätiloissa (STM 545/2015).

Huoneisto ja huonetila	Päivällä klo 07–22	Yöllä klo 22–07
<i>Asuinhuoneistot, palvelutalot, vanhainkodit, lasten päivähoitopaikat ja vastaavat tilat</i>		
asuinhuoneet ja oleskelutilat	35 dB	30 dB (25 dB)
muut tilat ja keittiö	40 dB	40 dB

<i>Kokoontumis- ja opetushuoneistot</i>		
huonetila, jossa edellytetään yleisön saavan hyvin puheesta selvän ilman äänenvahvistuslaitteiden käyttöä	35 dB	-
muut kokoontumistilat	40 dB	-
<i>Työhuoneistot (asiakkaiden kannalta)</i>		
asiakkaiden vastaanottotilat ja toimistohuoneet	45 dB	-

Yöaikainen (klo 22–7) musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unhäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona LAeq,1h (klo 22–7) mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen.

Taulukko 3. Pientaajuisen sisämelun tunnin keskiäänitason Leq,1h toimenpiderajat taajuvälillä 20-200Hz nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa yöaikaan klo 22-07.

Kaista/Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Leq,1h	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

2 Lähtötiedot ja arviointimenetelmät

Laskennan lähtötiedot on koottu tilaajan lähettämästä aineistosta, Maanmittauslaitoksen digitaal kartta-aineistosta sekä kirjallisuudesta. Mallinnuksen ohjeena toimii Ympäristöministeriön melumallinnusohje YM OH 2/2014.

2.1 Digitaal kartta-aineisto

Melumallinnus on suoritettu digitaal kartalle, jonka topografian korkeusväli on enintään 0,3 m. Kartassa on kuvattu topografian ja tuulivoimaloiden paikkatiedon lisäksi rakennusten, teiden, kansallispuistojen ja suojelalueiden paikkatiedot sekä asuntojen käyttötarkoitus siten kuin se on esitetty Maanmittauslaitoksen aineistossa. Maa-alueille akustinen kovuuskerroin on ohjeen mukaisesti 0,4 ja vesialueille 0.

2.2 Mallinnetut tuulivoimalamallit

Mallinnus suoritettiin hankkeen suunnitelmien mukaiselle merituulivoimalamallille (11-20 MW), jonka äänipäästön maksimiarvona käytettiin 114,6 dB, napakorkeutena 172 m ja kokonaiskorkeutena 310 m. Melun lähtöarvot arvioitiin suurimman jo rakennetun merituulivoimalan perusteella melutasoa ylöspäin skaalaamalla, josta oli saatavilla mittaus-tietoa. Voimalan kokonaiskorkeudella (siipi yläasennossa) ei ole vaikutuksia melumallinnuksessa, sillä mallinnus suoritetaan ohjeen mukaan voimalan napakorkeudelle.

Mallinnuksen äänipäästön lähtötietoina on käytetty taajuusjakaumaa oktaaveittain taajuvälillä 63 Hz – 8 000 Hz, sillä geneeriselle voimalalle ei ole muuta tietoa käytettävissä. Lisäksi laskennassa käytetään äänipäästön varmuusarvoa K = +2 dB Ympäristöministeriön ohjeen mukaisesti uusille, vielä tyyppitestaamattomille voimaloille (YM9/5511/2016). Siten laskennassa käytetty äänipäästön kokonaisarvo on 116,6 dB.

Vertailun vuoksi uusilla 6 MW:n maatuulivoimaloilla äänipäästön takuarvo on asetettu noin 105 dB:n tasolle (Vestas, 2020).

Taulukko 4. Melumallinnuksen lähtötiedot

Valmistaja	Nimellisteho [MW]	Napakorkeus [m]	Äänitehotaso LWA [dB]
Geneerinen	20	172	114,6 dB +2 dB
Siemens	4	80	107 dB
Siemens	4	90,74	110 dB
WWD3	3	90, 100	106,4 dB
Bonus	2	80	105 dB
Bonus	1	50	103 dB

Taulukko 5. Voimalan äänipäästö lisättyinä +2 dB:n epävarmuudella [dB].

Freq./Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	YHT
Lw	97,2	104,9	106,9	111,0	112,2	107,8	103,0	93,5	116,6

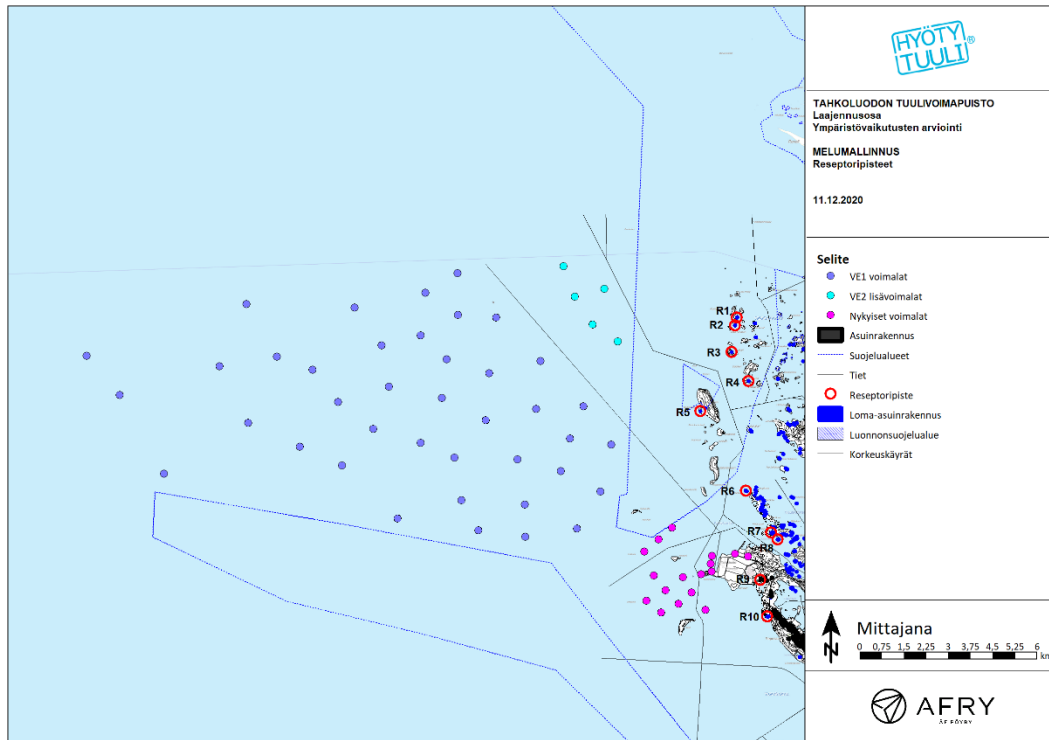
Taulukko 6. Pientaajuisten melun äänipäästö lisättyinä +2 dB:n epävarmuudella [dB].

Freq./Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Lw	120,3	119,7	118,6	117,5	116,9	116,2	115,2	114,2	114,4	111,1	112,1

2.3 Tuulivoimaloiden ja reseptoripisteiden sijainnit

Alla olevassa kuvassa sekä liitteessä 1 on esitetty mallinnettujen tuulivoimaloiden sekä lähimpien reseptoripisteiden R1-R10 sekä asuin- tai lomarakennusten sijainnit kartalla. Reseptoripisteiden kohdalla laskettiin erikseen tulokset melumallinnuskartan lisäksi. Liitteessä 1 on esitetty reseptorisijainteja vastaavat koordinaatit ETRS-TM35FIN tasokoordinaatistossa.

Melumallinnuksessa voimaloiden kokonaislukumäärä VE1 hankevaihtoehdossa on 40 voimalaa ja VE2 hankevaihtoehdossa 45 voimalaa. Lisäksi yhteismelumallinnuksessa otetaan huomioon toiminnassa olevat merituulivoimalat sekä lähimmät maatuulivoimalat, jolloin nykytila + VE1 yhteismelumallinnuksessa voimaloiden lukumäärä on 57 voimalaa ja nykytila + VE2 yhteismelumallinnuksessa 62 voimalaa.



Kuva 2. Tuulivoimaloiden ja lähimpien reseptoripisteiden R1-R10 sijainnit

2.4 Melumallinnuksen laskentaparametrit

Melun leviäminen ulkona havainnollistettiin käyttäen tietokoneavusteista melulaskentaohjelmistoa SoundPlan v8.1, missä äänilähteestä lähtevä ääniaalto lasketaan digitaaliseen karttapohjaan äänenpaineeksi vastaanottopisteessä raytracing -menetelmällä. Mallinnusalgoritmina käytettiin standardia ISO 9613-2, jonka parametrusointi on ohjeistettu Ympäristöministeriön melumallinnusohjeessa kappaleessa 4.1.

Mallissa otetaan huomioon kunkin tuulivoimalan äänipäästö oktaavikaistan resoluutiolla, äänen geometrinen leviämismuutos, maaston korkeuserot sekä maanpinnan ja ilmakehän melun vaimennusvaikutukset. Rakennusten aiheuttamaa äänen varjostusvaikutusta ei laskennassa huomioida eli melun leviäminen lasketaan nk. vapaakenttään. Melumallinnus piirtää keskiäänitasokäyrät 5 dB:n välein vakioituilla laskentaparametreilla, jotka on esitetty taulukossa 7.

Kaikkiaan tuulivoimamelun laskennan parametrit ovat konservatiivisempia kuin teollisuus- tai tieliikennemelussa yleisesti käytetyt melun leviämislaskennan parametrit (Ympäristöministeriö, 2007). Melumallinnuksessa käytetyt laskentaparametrit on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 7. Laskennan parametrit

Lähtötieto	Parametrit
Laskentalogiikka	Standardi ISO 9613-2, ylärajatarkastelu (YM OH 2/2014 kpl 4.1)
Mallinnusalgoritmit	Peruslaskennat: Teollisuusmelun laskentamalli ISO 9613-2. Pientaajuisen melun etenemismuutos, YM OH 2/2014 kpl

Lähtötieto	Parametrit
	4.1.9 sekä suomalaisten pientalojen äänitasoeron 84%:n ja 90% persentiilit (Keränen et al., 2017, 2019)
Topografiakartta	Maanmittauslaitos, laserkeilausaineisto (© MML, 2020), topografian pystyresoluutiona on 0.3m. Laskentaohjelmassa muodostetaan maanpinta erillisen kolmioverkkolaskennan kautta. (YM OH 2/2014 kpl 4.1.8)
Sääolosuhteet	Ilman lämpötila 15 °C, ilmanpaine 101,325 kPa, ilman suhteellinen kosteus 70 prosenttia (YM OH 2/2014 kpl 4.1.4)
Tuulennopeus	n.12,3 m/s 172m:n korkeudella (napakorkeus), myötätuuli joka suuntaan, joka vastaa 8 m/s 10m:n referenssikorkeudella maanpinnan karheudella 0,05m (YM OH 2/2014 kpl 4.1.1)
Äänilähde	Pistelähde (YM OH 2/2014 kpl 4.1.4)
Äänipäästön tunnusarvo	ks. kpl 2.2
Mallinnuksen äänipäästö	Kpl 2.2, oktaaveittain 63 Hz – 8 000 Hz (YM OH 2/2014 kpl 4.1.1)
Topografiakorjaus	Ei korjausta, ks. kappale 2.4 kuva 3. (YM OH 2/2014 kpl 4.1.6)
Laskentaverkko	Laskentapiste viisi kertaa viiden metrin (5x5m) välein laskentaverkolla neljän metrin (4m) korkeudella seuraten digitaalikartan maanpintaa (YM OH 2/2014 kpl 4.1.2). Laskenta-alueen kokonaispinta-ala on yhteensä noin 700 km ²
Maanpinnan akustinen kovuus	0,4 (maa-alueet), 0 (vesialueet) (YM OH 2/2014 kpl 4.1.5)
Laskentavyöhykkeet, LAeq	40 dB, 45 dB, 50 dB ja 55 dB

2.5 Pientaajuisten melun laskenta

Tuulivoimalaitosten pientaajuinen melu lasketaan erillisenä taulukkolaskentana YM:n ohjeen mukaisilla laskentaparametreilla. Pientaajuisten melun leviämismallin muuttaminen laskettiin käyttäen voimalan painottamattomia äänipäästön tunnusarvon 1/3 oktaavikaistatietoja LW taajuusvälillä 20-200Hz (YM OH 2/2014 kpl 4.1.9)

Pientaajuisten melun leviämislaskennassa on lisäksi hyödynnetty uusinta suomalaista tutkimustietoa pientalojen ilmaäänieristävyyden arvoista, jotka ovat aiempaa DSO 1284 ohjetta alhaisempia (Keränen et al., 2017, 2019). Pientalojen ilmaäänieristävyyden tutkimuksen tulokset on julkaistu julkisivurakenteiden äänitasoeron vähimmäisarvon estimaatin 84%:n ja 90 % persenttiarvoina (ks. liite 7), siten että 84%:n persenttiä käytetään asuinrakennuksiin ja 90% persenttiä loma-asuinrakennuksiin. Suomessa voimassa olevien asetusten perusteella laskentaa ei voi ulottaa infraäänitaajuuksille asti vertailuarvon puuttuessa. YM:n ohjeen mukainen taajuusalue on 20-200Hz.

Lähtökohtaisesti nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa LAeq ekvivalenttitulosten 30 dB yöaikaan tai erityistapauksissa 25 dB yöaikaan oletetaan alittuvan, mikäli melumallinnuksen tulos ulkona sekä pientaajuisten melun tulokset alittavat VNa 1107 sekä STM:n asuimisterveysasetuksen toimenpiderajat. Tätä tukevat myös tehdyt tuulivoimamelun

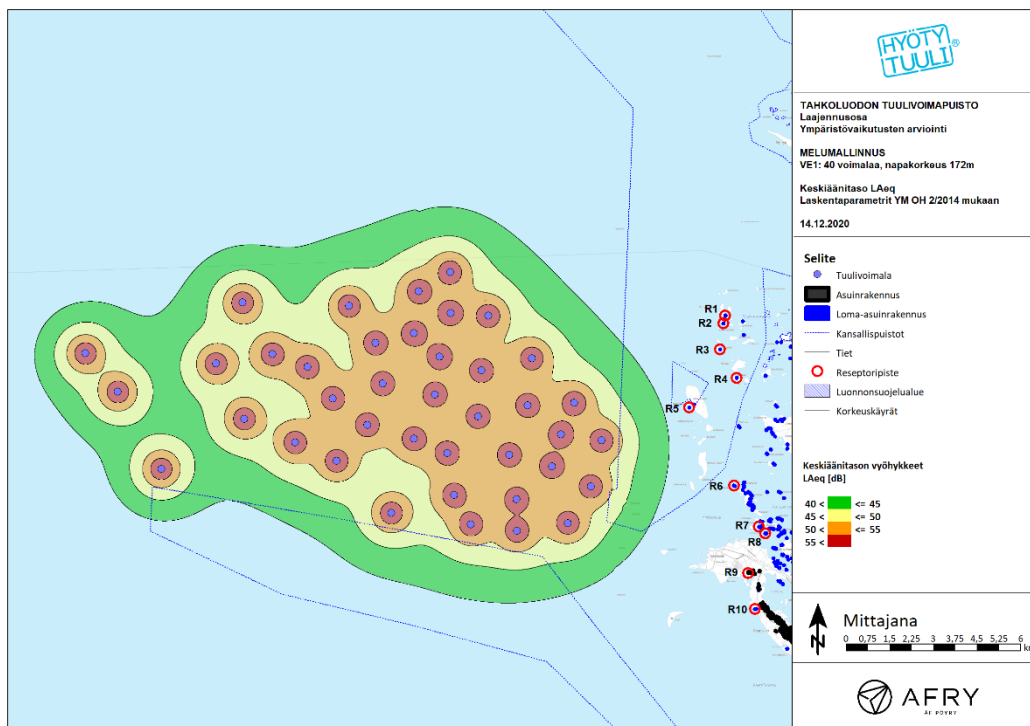
sisätilamittaukset Suomessa sekä ilmaäänieristyksen keskimääräinen profiili, joka kasvaa korkeammille taajuuksille mentäessä.

3 Mallinnustulokset

Digitaaliseen topografiakartalle laskettu melun leviäminen Tahkoluodon laajennuksen voimaloista on esitetty alla olevissa melukartoissa sekä suurempina kuvina liitteessä 2-3. Yhteismelumallinnuksen tulokset on esitetty kappaleessa 3.3 ja 3.4 ja suurempina kuvina liitteissä 4-5. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmille altistuville kohteille on esitetty kaaviokuvan avulla kappaleessa 3.5 sekä yksityiskohtaisemmin liitteessä 6.

3.1 Ulkomelumallinnus, hankevaihtoehto VE1

Melumallinnuksen LAeq keskiäänitason tulokset on laskettu 40 dB:n vyöhykkeelle asti. Alla olevassa kuvassa on esitetty melun leviämiskartta keskiäänitasolla LAeq meluvyöhykkeineen hankevaihtoehdolle VE1. Meluvyöhykkeet on esitetty 5 dB:n välein siten, että vihreän alueen raja vastaa LAeq 40 dB:n tasoa ja vaaleankeltaisen alueen raja 45 dB:n tasoa.



Kuva 3. Melumallinnuskartta, hankevaihtoehto VE1

Melun leviämislaskennan perusteella 40 dB:n LAeq melukäyrä ulkona ei ulotu lähimpiin asuin- ja loma-asuinrakennuksiin asti. Reseptoristelaskennan perusteella (ks. taulukko 5), suurin keskiäänitason LAeq tulos laskennan mukaan reseptoripisteessä R5, jonka käyttötarkoituksena on merkitty loma-asuinrakennus, on noin 37 dB, joka alittaa yöajan alimman ohjearvorajan 40 dB ulkona. 40 dB:n melualue ei ulotu Selkämeren kansallispuiston Iso-Enskerin saareen asti eikä yhdellekään luodolle.

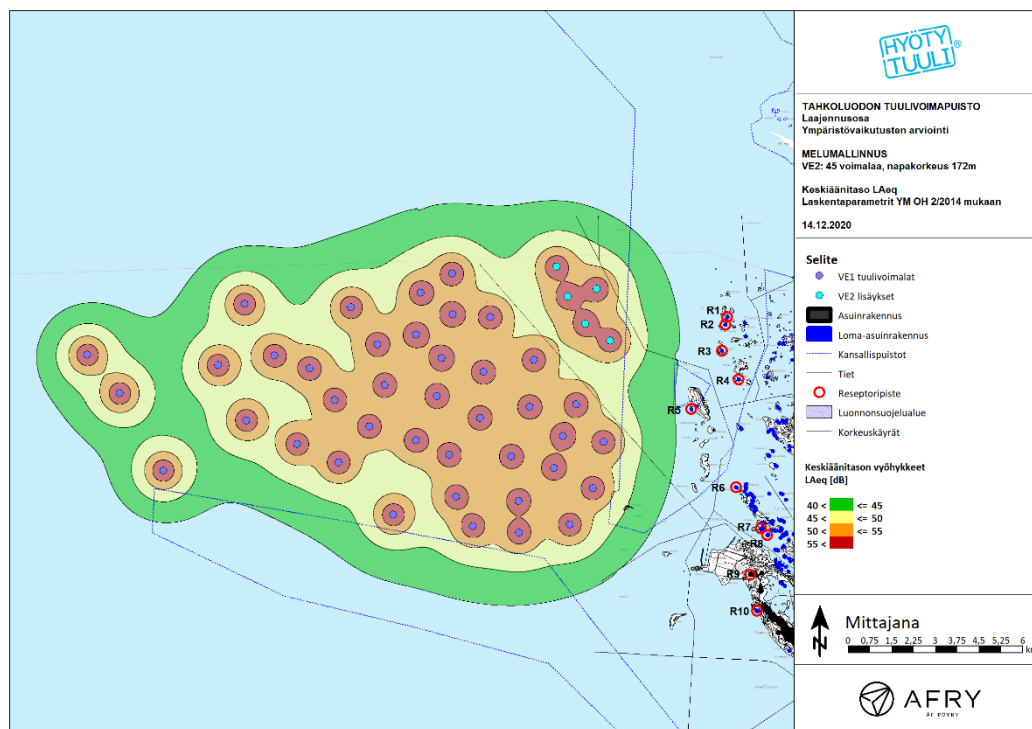
Alla olevassa taulukossa on esitetty vielä yksittäisten reseptoripisteiden laskentatulokset ulkomelun osalta.

Taulukko 8. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE1.

Reseptoripiste			Reseptoripiste		
Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiäänitaso LAeq	Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiäänitaso LAeq
R1	loma-asuinrakennus	33,0	R6	loma-asuinrakennus	32,9
R2	loma-asuinrakennus	33,2	R7	loma-asuinrakennus	27,0
R3	loma-asuinrakennus	33,7	R8	loma-asuinrakennus	30,5
R4	loma-asuinrakennus	33,0	R9	asuinrakennus	26,4
R5	loma-asuinrakennus	36,6	R10	loma-asuinrakennus	27,9

3.2 Ulkomelumallinnus, hankevaihtoehto VE2

Melumallinnuksen LAeq keskiäänitason tulokset on laskettu 40 dB:n vyöhykkeelle asti. Alla olevassa kuvassa on esitetty melun leviämiskartta keskiäänitasolla LAeq melu-vyöhykkeineen hankevaihtoehdolle VE1. Meluvyöhykkeet on esitetty 5 dB:n välein siten, että vihreän alueen raja vastaa LAeq 40 dB:n tasoa ja vaaleankeltaisen alueen raja 45 dB:n tasoa.



Kuva 4. Melumallinnuskartta, hankevaihtoehto VE2

Melun leviämislaskennan perusteella 40 dB:n LAeq meluvyöhyke ulkona ei ulotu lähimpiin asuin- ja loma-asuinrakennuksiin asti. Reseptoristelaskennan perusteella (ks. taulukko 5), suurin keskiäänitason LAeq tulos laskennan mukaan reseptoripisteessä R5,

jonka käyttötarkoitukseksi on merkitty loma-asuinrakennus, on noin 38 dB, joka alittaa yöajan alimman ohjearvorajan 40 dB ulkona. 40 dB:n melualue ei ulotu Selkämeren kansallispuiston Iso-Enskerin saareen asti eikä yhdellekään luodolle.

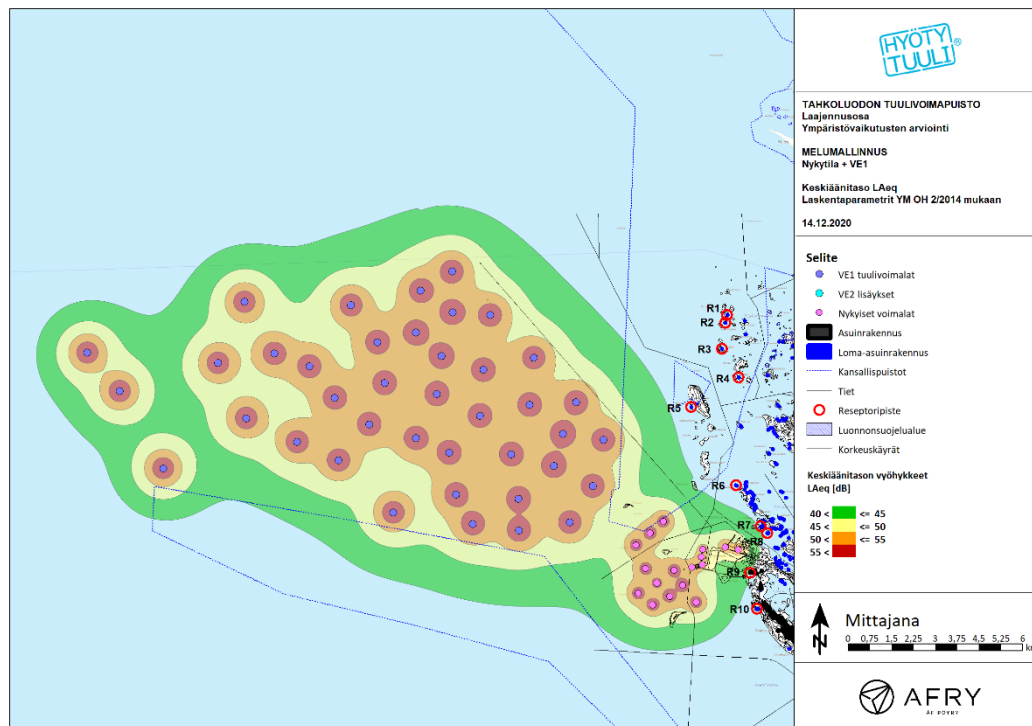
Alla olevassa taulukossa on esitetty vielä yksittäisten reseptoripisteiden laskentatulokset ulkomelun osalta.

Taulukko 9. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE2.

Reseptoripiste			Reseptoripiste		
Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiaänitaso LAeq	Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiaänitaso LAeq
R1	loma-asuinrakennus	35,7	R6	loma-asuinrakennus	33,7
R2	loma-asuinrakennus	35,9	R7	loma-asuinrakennus	28,7
R3	loma-asuinrakennus	36,1	R8	loma-asuinrakennus	31,2
R4	loma-asuinrakennus	34,8	R9	asuinrakennus	26,8
R5	loma-asuinrakennus	37,8	R10	loma-asuinrakennus	28,3

3.3 Ulkomelumallinnus, yhteismelu + VE1

Yhteismelumallinnus suoritettiin nykyisille voimaloille sekä Tahkoluodon laajennuksen osalta hankevaihto VE1:lle. Muiden alueen tuulivoimaloiden katsottiin olevan liian etäällä reseptoripisteistä, jotta niiden vaikutus nähtäisiin laskentatuloksissa.



Kuva 5. Melumallinnuskartta, nykytila ja hankevaihto VE1

Alla olevassa taulukossa on esitetty vielä yksittäisten reseptoripisteiden laskentatulokset ulkomelun osalta.

Taulukko 10. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE2.

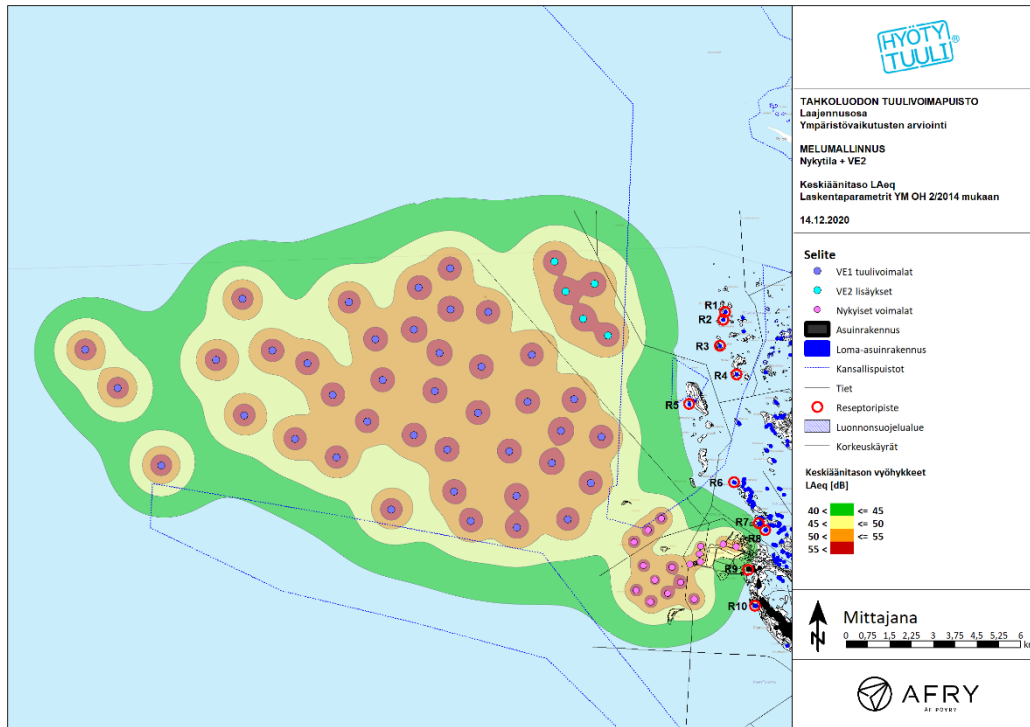
Reseptoripiste			Tulokset	Reseptoripiste			Tulokset	
Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiäänitaso LAeq	Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiäänitaso LAeq	Nimi	Rakennuksen käyttö-tarkoitus	Keskiäänitaso LAeq
R1	loma-asuinrakennus	33,4	R6	loma-asuinrakennus	37,0			
R2	loma-asuinrakennus	33,6	R7	loma-asuinrakennus	37,9			
R3	loma-asuinrakennus	34,1	R8	loma-asuinrakennus	38,5			
R4	loma-asuinrakennus	33,9	R9	asuinrakennus	39,4			
R5	loma-asuinrakennus	37,3	R10	loma-asuinrakennus	36,7			

Melun leviämislaskennan perusteella 40 dB:n LAeq meluvyöhyke ulkona ei ulotu lähimpiin asuin- ja loma-asuinrakennuksiin asti. Reseptoripistelaskennan perusteella suurin keskiäänitason LAeq tulos laskennan mukaan reseptoripisteessä R9, jonka käyttötarkoitukseksi on merkitty asuinrakennus, on noin 39 dB, joka alittaa yöajan alimman ohjearvorajan 40 dB ulkona.

40 dB:n meluvyöhyke ei ulotu Selkämeren kansallispuistoon sisältyvään Iso-Enskerin saareen asti, jonne on rakennettu virkistyskäyttöä palvelevia polkuja ja rakenteita. 40 dB:n meluvyöhyke käsittää jo nykytilassa Hylkiriutan. Yhteismelumalue ulottuu osittain Silakkariutalle asti. Näillä riutoilla ei sijaitse virkistyskäyttöä palvelevia polkuja ja muita rakenteita. Luonnonsuojelualueisiin sovellettava melutason ohjearvo 45 dB ylittyy suojelualueilla Tahkoluodon satama-alueen, meriliikenteen ja tuulivoimamelun vuoksi tälläkin hetkellä. Kysymyksessä ei siten ole erityisen hiljainen alue, jonka olosuhteisiin tai suojeluperusteisiin melu aiheuttaisi olennaisia muutoksia.

3.4 Ulkomelumallinnus, yhteismelu + VE2

Yhteismelumallinnus suoritettiin nykyisille voimaloille sekä Tahkoluodon laajennuksen osalta hankevaihto VE2:lle. Muiden alueen tuulivoimaloiden katsottiin olevan liian etäällä reseptoripisteistä, jotta niiden vaikutus nähtäisiin laskentatuloksissa.



Kuva 6. Melumallinnuskartta, nykytila ja hankevaihtoehto VE2

Alla olevassa taulukossa on esitetty vielä yksittäisten reseptoripisteiden laskentatulokset ulkomelun osalta.

Taulukko 11. Melumallinnuksen tulokset lähimmissä altistuvissa kohteissa ulkona reseptoripisteissä hankevaihtoehdossa VE2.

Reseptoripiste			Reseptoripiste		
Nimi	Rakennuksen käyttötarkoitus	Keskiäänitaso LAeq	Nimi	Rakennuksen käyttötarkoitus	Keskiäänitaso LAeq
R1	loma-asuinrakennus	35,9	R6	loma-asuinrakennus	37,3
R2	loma-asuinrakennus	36,1	R7	loma-asuinrakennus	38,1
R3	loma-asuinrakennus	36,4	R8	loma-asuinrakennus	38,6
R4	loma-asuinrakennus	35,4	R9	asuinrakennus	39,4
R5	loma-asuinrakennus	38,3	R10	loma-asuinrakennus	36,7

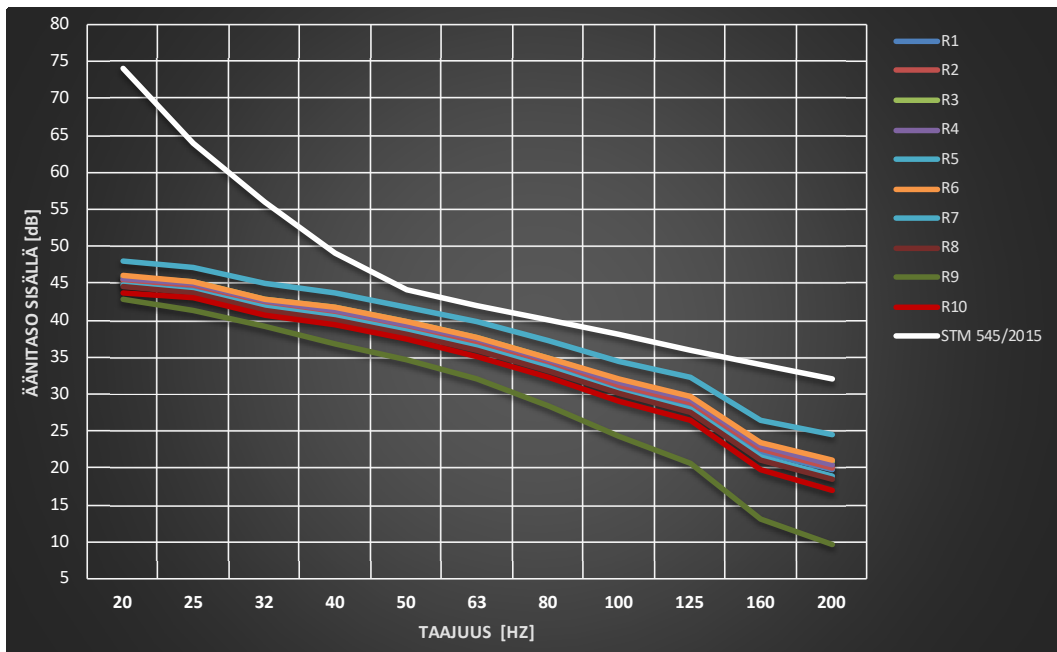
Melun leviämislaskennan perusteella 40 dB:n LAeq meluvyöhyke ulkona ei ulotu lähimpiin asuin- ja loma-asuinrakennuksiin asti. Reseptoristelaskennan perusteella suurin keskiäänitaso LAeq tulos laskennan mukaan reseptoripisteessä R9, jonka käyttötarkoitukseksi on merkitty asuinrakennus, on noin 39 dB, joka alittaa yöajan alimman ohjearvoajan 40 dB ulkona.

40 dB:n meluvyöhyke ei ulotu Selkämeren kansallispuistoon sisältyvään Iso-Enskerin saareen asti, jonne on rakennettu virkistyskäyttöä palvelevia polkuja ja rakenteita. 40 dB:n meluvyöhyke käsittää jo nykytilassa Hylkiriutan. Yhteismelualue ulottuu osittain Silakkariutalle asti. Näillä riutoilla ei sijaitse virkistyskäyttöä palvelevia polkuja ja muita rakenteita. Luonnonsuojelualueisiin sovellettava melutason ohjearvo 45 dB ylittyy

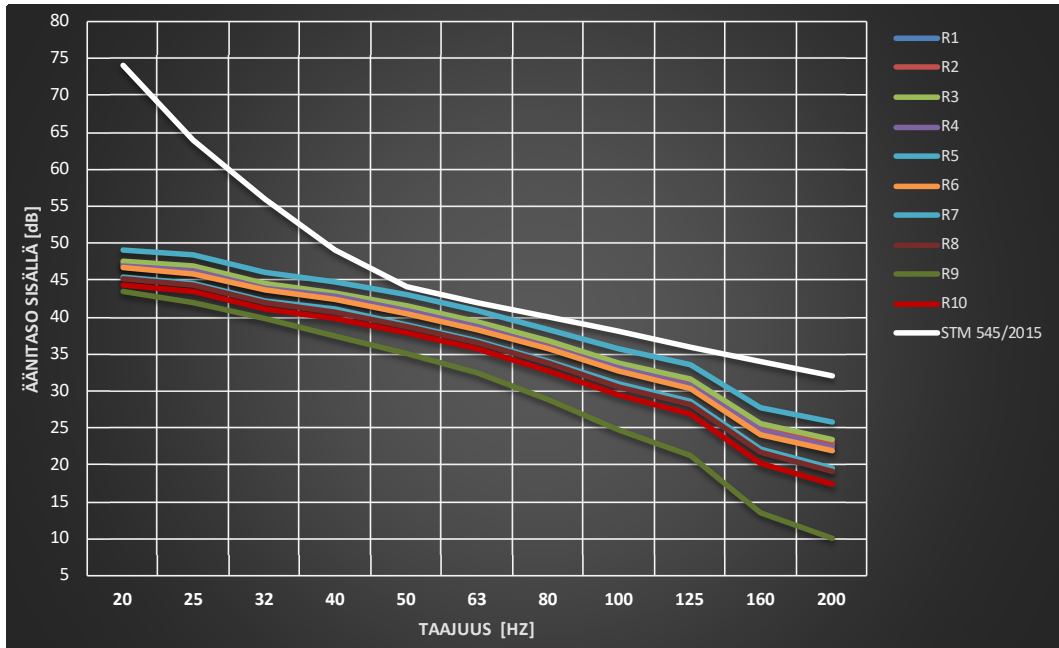
suojelualueilla Tahkoluodon satama-alueen, meriliikenteen ja tuulivoimamelun vuoksi tälläkin hetkellä. Kysymyksessä ei siten ole erityisen hiljainen alue, jonka olosuhteisiin tai suojeluperusteisiin melu aiheuttaisi olennaisia muutoksia.

3.5 Pientaajuinen melu rakennusten sisätiloissa

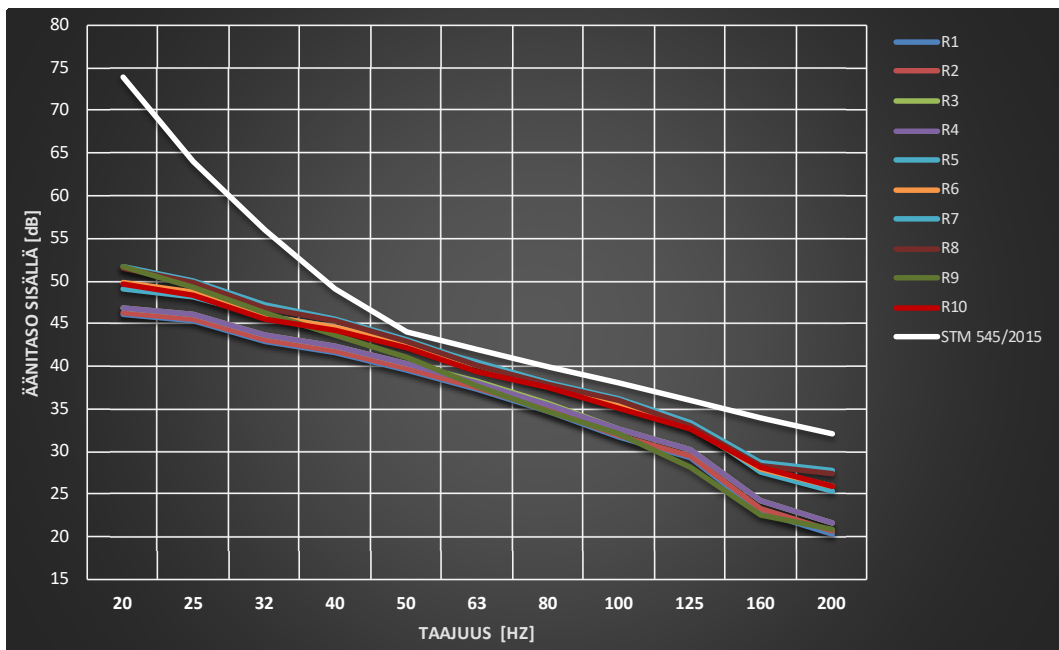
Tuulivoimalaitosten pientaajuinen melu laskettiin käyttäen painottamattomia äänitehotason 1/3 oktaavikaistatietoja taajuusvälillä 20-200Hz. Laskenta suoritettiin YM ohjeen laskentaohjeen mukaisesti käyttäen suomalaistutkimuksen antamia pientalojen julkisivurakenteiden äänitasoeron estimaattiarvoja DL84% ja DL90%, jotka ovat aiempaa DSO 1284 ohjetta alhaisempia (Keränen et al. 2017, 2019).



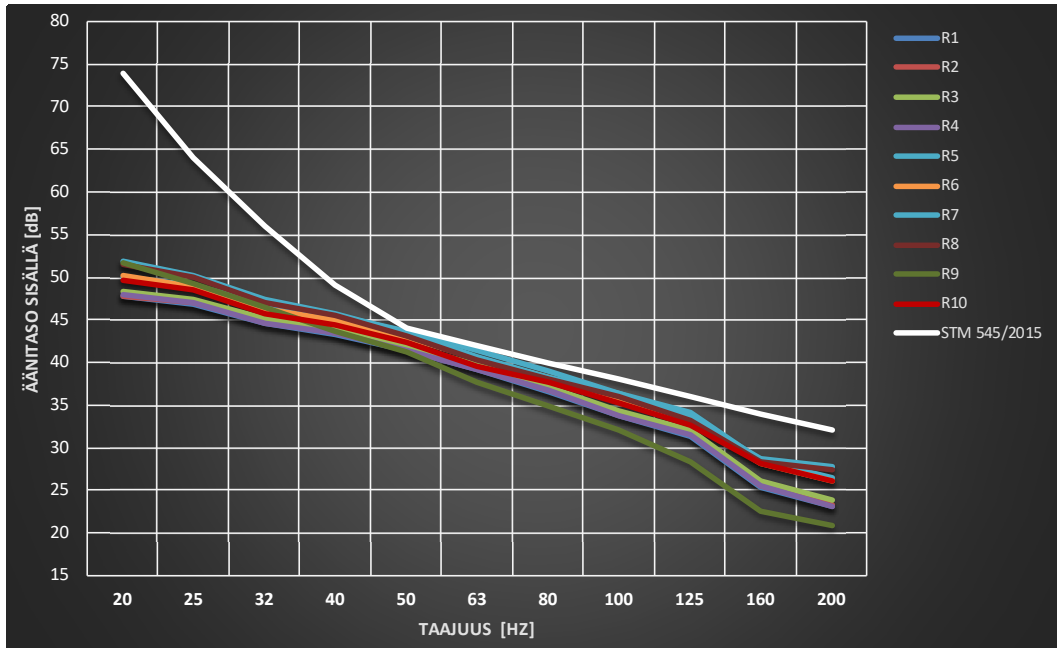
Kuva 7. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, VE1



Kuva 8. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, VE2



Kuva 9. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, Nykytila + VE1



Kuva 10. Pientaajuisen melun laskentatulokset lähimmissä reseptoripisteissä R1-R10, Nykytila + VE2

Tuloskäyrät asettuvat osin lähes päällekkäin laskentatulosten samankaltaisuuksien vuoksi. Laskennan mukaan sisätilan toimenpiderajat alittuvat huolimatta laskennassa käytetystä varsin konservatiivisesta rakennusten julkisivun äänitasoeron vähimmäisarvoista sekä emission lisäepävarmuudesta +2 dB. Ulkomelutulosten perusteella voidaan todeta että suurin ilmaäänieristävyuden vaatimus olisi noin 12 dB taajuusalueella 200 Hz (Nykytila+VE2) reseptoripisteessä R9, joka voidaan saavuttaa suhteellisen kevyellä rakennuksen vaipan rakenteella. Kirjallisuuden perusteella asuinrakennusten äänieristys 200Hz:n taajuudella on keskimäärin noin 18-26 dB (Keränen 2019, Petersen 2016).

3.6 Vaikutusten ehkäiseminen ja lieventäminen

Meluvaikutuksen laajuuteen voidaan vaikuttaa tuulivoimalamallin sekä siipityypin valinnalla. Uusimmat ja tulevaisuuden tuulivoimaloiden siipimallit sisältävät mm. jättöreunan sahalaoidituksen, jolla voidaan vähentää nimellistehon taattua melupäästöä n. 3-5 dB voimalan tuottamaa sähkötehoa vähentämättä (Arce León, 2017).

Tuulivoimalaitoksia on lisäksi mahdollista ajaa meluoptimoidulla ajolla, jolloin esimerkiksi roottorin pyörimisnopeutta rajoitetaan kovemmillä tuulennopeuksilla siiven lapakulmaa säätämällä. Näitä meluoptimointiajomoodeja on yleensä eritasoisia riippuen tarvittavasta vaimennustarpeesta. Säätöparametreiksi voidaan tyypillisesti valita tuulennopeus, -suunta ja kellonaika. Meluoptimoitu ajo rajoittaa tehontuoton lisäksi myös voimalan äänipäästöä. Muuta merkittävää meluntorjuntaa ei voida suorittaa, ellei voimalaa pysäytetä kokonaan. Melumallinnuksen perusteella tarvetta meluoptimointiajomoodin käytölle tässä hankkeessa ei kuitenkaan ole.

3.7 Vaikutusten seuranta

Rakentamisen jälkeen käyttövaiheen meluvaikutuksia voidaan seurata mittauksin, joista ohjeistetaan myös ympäristöministeriön oppaassa YM OH 3-4/2014 soveltuvin osin. Vaikka tuulivoimalat sijaitsevat merellä, on mittauksin mahdollista todeta melun tasot

ja luonne sekä tehdä vertailuja mallinnettuihin tasoihin ja tuulivoimamelun ohjearvoihin, missä ohjearvovertailu tehdään YM:n ohjeen 1/1995 mukaisesti. Rannikon taustamelutason peittovaikutuksesta johtuen mittausten suoritus vaatii kuitenkin huolellisen mitausjärjestelyn ja olosuhteet, jotka edesauttavat mitattavan signaalin luotettavaa tallennusta referenssituulenopeudella 8 m/s 10m:n korkeudella mahdollisimman korkealla signaali-kohinasuhteella. Tutkimuksissa on osoitettu että yli 10 dB korkeampi taustamelutaso suhteessa mitattavaan tuulivoimameluun käytännössä peittää kokonaan tuulivoimamelun signaalin tarkkuuden (Bolin, 2012). Tulokset, joissa siis esiintyy voimakasta taustamelua, ei voi siten käyttää arvioitaessa tuulivoimamelun voimakkuutta mittauspisteessä.

4 Lähteet

Arce León, C. 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.

Bolin, K. The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise. Acta Acustica united with Acustica, Vol 98 (2012) pages 741-748.

E.Barlas, W.J. Zhu, W.Z.Shen, O. Kaya, P. Moriarty. Consistent modelling of wind turbine noise propagation from source to receiver. Acoustical Society of America. Journal, 142, 3297 (2017).

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.

Gupta, M. Madsen, K. Advancements in continuous learning for tonality free turbine design. Conference Proceedings. 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lisbon, June 12-14, 2019.

Halstead, D. Tam, N. 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.

ISO 226:2003. Acoustics -- Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization, Geneva, 2003.

Keränen, Hakala, Hongisto. Pientalojen äänieristävyys ympäristömelua vastaan taajuuksilla 5 – 5000 Hz – infraäänitutkimus. Turun ammattikorkeakoulu, sisäympäristön tutkimusryhmä, Turku 2017. Akustiikkapäivät 2017, materiaali

Keränen, J. Hakala, J. Hongisto, V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz. Turku University of Applied Sciences. Building and Environment 156 (2019), s.12-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.061>

Melutta -hankkeen loppuraportti. Ympäristöministeriön raportteja 20/2007. Ympäristöministeriö, Helsinki, 2007.

Naturvårdsverket. 2010. Ljud från vindkraftverk; reviderad utgåva av rapport 6241 [Sound from wind power turbines; revised issue of report 6241]. Report no. 5933, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden. (In Swedish)

Oerlemans, S. Schepers, J.G. "Prediction of wind turbine noise directivity and swish", Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark, (2009)

Petersen, C.M. Sondergaard, B. Low frequency sound insulation (8-200Hz), mapping and improvement of existing houses. Sweco Denmark, 2016.

Statutory order of noise from wind turbines. Danish ministry of environment. Denmark, 2012.

STM asetus 545/2015, Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksesta. Helsinki, 2015.

Valtioneuvoston asetus 1107/2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista

https://www.vestas.com/en/products/enventus_platform/v162-6_0_mw#!technical-specifications. Vestas Wind Systems A/S, 2020.

Yhteenveto tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvon käyttämisestä meluselvityksissä liittyvästä kyselystä. YM muistio 14.9.2016 YM9/5511/2016. Ympäristöministeriön, Helsinki.

Ympäristöhallinnon ohjeita OH 2/2014. Ympäristöministeriö, Helsinki 2014.

Ympäristöhallinnon ohjeita OH 3/2014. Ympäristöministeriö, Helsinki 2014.

Ympäristöhallinnon ohjeita OH 4/2014. Ympäristöministeriö, Helsinki 2014.

Ympäristöhallinnon ohjeita 5/2016. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Ympäristöministeriö, Helsinki 2016.

Liite 1. Tuulivoimaloiden ja reseptoripisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN tasokoordinaatistossa.

Voimaloiden koordinaatit.

No	x-koordinaatti	y-koordinaatti	z-koordinaatti	Napakorkeus
01	198650	6848644	0	172m
02	199019	6850226	0	172m
03	198077	6851524	0	172m
04	196620	6853052	0	172m
05	195130	6854512	0	172m
06	193829	6854610	0	172m
07	193812	6856018	0	172m
08	192736	6855358	0	172m
09	192564	6853909	0	172m
10	193457	6853108	0	172m
11	194894	6852634	0	172m
12	193288	6851800	0	172m
13	197617	6850434	0	172m
14	196471	6851438	0	172m
15	197305	6849341	0	172m
16	196095	6848208	0	172m
17	197855	6847391	0	172m
18	196110	6847123	0	172m
19	194526	6847342	0	172m
20	191792	6847733	0	172m
21	181288	6853221	0	172m
22	182402	6851897	0	172m
23	183892	6849251	0	172m
24	189913	6849521	0	172m
25	188489	6850156	0	172m
26	193950	6848349	0	172m
27	188915	6852755	0	172m
28	189785	6851674	0	172m
29	190967	6850760	0	172m
30	192566	6850286	0	172m
31	193719	6849790	0	172m
32	194772	6851057	0	172m
33	195841	6849736	0	172m
34	186681	6854965	0	172m
35	187706	6853193	0	172m

No	x-koordinaatti	y-koordinaatti	z-koordinaatti	Napakorkeus
36	190337	6854856	0	172m
37	191243	6853582	0	172m
38	191497	6852179	0	172m
39	186742	6850971	0	172m
40	185769	6852865	0	172m
41 (VE2)	199239	6853710	0	172m
42 (VE2)	198389	6854274	0	172m
43 (VE2)	197785	6855227	0	172m
44 (VE2)	198784	6855488	0	172m
45 (VE2)	197396	6856243	0	172m

Reseptoripisteiden R1-R10 koordinaatit

No	x-koordinaatti	y-koordinaatti	z-koordinaatti	Laskentakorkeus
R1	203260	6854522	0	4m
R2	203190	6854258	0	4m
R3	203082	6853357	0	4m
R4	203652	6852378	0	4m
R5	202024	6851361	3	4m
R6	203561	6848679	2	4m
R7	204421	6847260	2	4m
R8	204630	6847035	2	4m
R9	204049	6845671	3	4m
R10	204278	6844434	3	4m

Liite 6. Pientaajuisen melun tulokset

Pientaajuisen melulaskennan tulokset ulkona, Leq, VE1 [dB]

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	51,3	50,5	49,3	48,0	47,0	45,9	44,1	42,0	40,6	35,2	33,7
R2	51,5	50,7	49,4	48,2	47,2	46,1	44,3	42,3	40,9	35,5	34,0
R3	51,9	51,2	49,9	48,6	47,7	46,6	44,9	42,9	41,5	36,3	34,9
R4	51,7	50,9	49,6	48,4	47,4	46,3	44,6	42,6	41,2	35,9	34,5
R5	53,9	53,2	52,0	50,7	49,8	48,8	47,2	45,4	44,3	39,4	38,4
R6	51,9	51,2	49,9	48,7	47,7	46,6	44,9	42,9	41,7	36,4	35,1
R7	50,7	49,9	48,7	47,4	46,4	45,3	43,5	41,3	39,9	34,4	32,9
R8	50,5	49,7	48,4	47,1	46,1	45,0	43,1	41,0	39,5	34,0	32,4
R9	50,5	49,7	48,4	47,1	46,1	45,0	43,1	41,0	39,5	34,0	32,4
R10	49,7	48,9	47,6	46,3	45,3	44,1	42,3	40,0	38,4	32,7	31,0

Pientaajuisen melulaskennan tulokset sisällä äänitasoeron jälkeen, VE1[dB]

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	45,3	44,5	42,3	41,0	39,0	36,9	34,1	31,0	28,6	22,2	19,7
R2	45,5	44,7	42,4	41,2	39,2	37,1	34,3	31,3	28,9	22,5	20,0
R3	45,9	45,2	42,9	41,6	39,7	37,6	34,9	31,9	29,5	23,3	20,9
R4	45,7	44,9	42,6	41,4	39,4	37,3	34,6	31,6	29,2	22,9	20,5
R5	47,9	47,2	45,0	43,7	41,8	39,8	37,2	34,4	32,3	26,4	24,4
R6	45,9	45,2	42,9	41,7	39,7	37,6	34,9	31,9	29,7	23,4	21,1
R7	44,7	43,9	41,7	40,4	38,4	36,3	33,5	30,3	27,9	21,4	18,9
R8	44,5	43,7	41,4	40,1	38,1	36,0	33,1	30,0	27,5	21,0	18,4
R9	42,9	41,4	39,2	36,8	34,6	32,0	28,3	24,2	20,7	13,0	9,6
R10	43,7	42,9	40,6	39,3	37,3	35,1	32,3	29,0	26,4	19,7	17,0

Pientaajuisen melulaskennan tulokset ulkona, Leq, VE2 [dB]

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	53,1	52,4	51,1	49,9	49,0	47,9	46,2	44,3	43,1	38,0	36,8
R2	53,3	52,6	51,3	50,0	49,1	48,1	46,4	44,5	43,3	38,2	37,0
R3	53,6	52,8	51,6	50,3	49,4	48,4	46,7	44,8	43,7	38,6	37,4
R4	53,0	52,2	51,0	49,7	48,8	47,7	46,0	44,1	42,8	37,6	36,4

	Taajuus [Hz]										
Reseptori	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R5	55,0	54,3	53,1	51,9	51,0	50,0	48,4	46,6	45,6	40,7	39,7
R6	52,6	51,9	50,6	49,3	48,4	47,3	45,6	43,6	42,3	37,1	35,8
R7	51,3	50,6	49,3	48,0	47,0	45,9	44,1	42,0	40,5	35,0	33,5
R8	51,1	50,3	49,0	47,7	46,7	45,6	43,8	41,6	40,1	34,6	33,0
R9	51,0	50,2	48,9	47,6	46,6	45,5	43,7	41,5	40,0	34,5	32,9
R10	50,3	49,4	48,1	46,8	45,8	44,6	42,7	40,5	38,9	33,2	31,4

Pientaajuisten melulaskennan tulokset sisällä äänitasoeron jälkeen, Leq, VE2

	Taajuus [Hz]										
Reseptori	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	47,1	46,4	44,1	42,9	41,0	38,9	36,2	33,3	31,1	25,0	22,8
R2	47,3	46,6	44,3	43,0	41,1	39,1	36,4	33,5	31,3	25,2	23,0
R3	47,6	46,8	44,6	43,3	41,4	39,4	36,7	33,8	31,7	25,6	23,4
R4	47,0	46,2	44,0	42,7	40,8	38,7	36,0	33,1	30,8	24,6	22,4
R5	49,0	48,3	46,1	44,9	43,0	41,0	38,4	35,6	33,6	27,7	25,7
R6	46,6	45,9	43,6	42,3	40,4	38,3	35,6	32,6	30,3	24,1	21,8
R7	45,3	44,6	42,3	41,0	39,0	36,9	34,1	31,0	28,5	22,0	19,5
R8	45,1	44,3	42,0	40,7	38,7	36,6	33,8	30,6	28,1	21,6	19,0
R9	43,4	41,9	39,7	37,3	35,1	32,5	28,9	24,7	21,2	13,5	10,1
R10	44,3	43,4	41,1	39,8	37,8	35,6	32,7	29,5	26,9	20,2	17,4

Pientaajuisten melulaskennan tulokset ulkona, Leq, Yhteismelu (Nykytila + VE1)

	Taajuus [Hz]										
Reseptori	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	52,1	51,3	49,9	48,6	47,6	46,4	44,7	42,7	41,2	36,0	34,3
R2	52,3	51,5	50,1	48,8	47,8	46,6	44,9	42,9	41,5	36,3	34,7
R3	52,9	52,0	50,6	49,4	48,4	47,2	45,6	43,6	42,2	37,2	35,7
R4	52,9	52,0	50,6	49,3	48,3	47,1	45,5	43,6	42,1	37,2	35,7
R5	55,1	54,2	52,8	51,6	50,6	49,5	48,1	46,3	45,1	40,5	39,4
R6	55,9	54,6	53,0	51,7	50,6	49,0	47,8	46,4	44,9	40,9	39,9
R7	57,8	56,1	54,1	52,6	51,2	49,3	48,1	47,2	45,4	41,6	41,7
R8	57,5	55,8	53,8	52,3	50,9	49,0	47,8	46,9	45,1	41,3	41,3
R9	59,2	57,5	55,5	53,9	52,6	50,6	49,5	48,8	47,0	43,5	43,7
R10	55,6	54,3	52,5	51,3	50,1	48,4	47,5	46,1	44,6	41,1	40,0

Pientaajuisen melulaskennan tulokset sisällä äänitasoeron jälkeen, Leq, Yhteismelu (Nykytila + VE1)

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	46,1	45,3	42,9	41,6	39,6	37,4	34,7	31,7	29,2	23,0	20,3
R2	46,3	45,5	43,1	41,8	39,8	37,6	34,9	31,9	29,5	23,3	20,7
R3	46,9	46,0	43,6	42,4	40,4	38,2	35,6	32,6	30,2	24,2	21,7
R4	46,9	46,0	43,6	42,3	40,3	38,1	35,5	32,6	30,1	24,2	21,7
R5	49,1	48,2	45,8	44,6	42,6	40,5	38,1	35,3	33,1	27,5	25,4
R6	49,9	48,6	46,0	44,7	42,6	40,0	37,8	35,4	32,9	27,9	25,9
R7	51,8	50,1	47,1	45,6	43,2	40,3	38,1	36,2	33,4	28,6	27,7
R8	51,5	49,8	46,8	45,3	42,9	40,0	37,8	35,9	33,1	28,3	27,3
R9	51,6	49,2	46,3	43,6	41,1	37,6	34,7	32,0	28,2	22,5	20,9
R10	49,6	48,3	45,5	44,3	42,1	39,4	37,5	35,1	32,6	28,1	26,0

Pientaajuisen melulaskennan tulokset ulkona, Leq, Yhteismelu (Nykytila + VE2)

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	53,7	52,9	51,5	50,3	49,3	48,2	46,6	44,7	43,4	38,4	37,1
R2	53,9	53,1	51,7	50,5	49,5	48,4	46,8	44,9	43,6	38,6	37,4
R3	54,2	53,4	52,1	50,8	49,9	48,8	47,2	45,3	44,1	39,1	37,9
R4	53,9	53,1	51,7	50,4	49,4	48,3	46,7	44,8	43,5	38,5	37,2
R5	55,9	55,1	53,8	52,5	51,6	50,5	49,1	47,3	46,2	41,5	40,5
R6	56,2	55,0	53,3	52,0	50,9	49,5	48,2	46,7	45,2	41,1	40,2
R7	57,9	56,3	54,3	52,8	51,4	49,6	48,3	47,4	45,6	41,8	41,8
R8	57,6	56,0	54,0	52,5	51,1	49,3	48,0	47,1	45,3	41,4	41,4
R9	59,3	57,6	55,6	54,1	52,7	50,8	49,6	48,9	47,1	43,6	43,7
R10	55,7	54,5	52,7	51,4	50,3	48,6	47,6	46,2	44,7	41,1	40,0

Pientaajuisen melulaskennan tulokset sisällä äänitasoeron jälkeen, Leq, Yhteismelu (Nykytila + VE2)

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R1	47,7	46,9	44,5	43,3	41,3	39,2	36,6	33,7	31,4	25,4	23,1

Reseptori	Taajuus [Hz]										
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
R2	47,9	47,1	44,7	43,5	41,5	39,4	36,8	33,9	31,6	25,6	23,4
R3	48,2	47,4	45,1	43,8	41,9	39,8	37,2	34,3	32,1	26,1	23,9
R4	47,9	47,1	44,7	43,4	41,4	39,3	36,7	33,8	31,5	25,5	23,2
R5	49,9	49,1	46,8	45,5	43,6	41,5	39,1	36,3	34,2	28,5	26,5
R6	50,2	49,0	46,3	45,0	42,9	40,5	38,2	35,7	33,2	28,1	26,2
R7	51,9	50,3	47,3	45,8	43,4	40,6	38,3	36,4	33,6	28,8	27,8
R8	51,6	50,0	47,0	45,5	43,1	40,3	38,0	36,1	33,3	28,4	27,4
R9	51,7	49,3	46,4	43,8	41,2	37,8	34,8	32,1	28,3	22,6	20,9
R10	49,7	48,5	45,7	44,4	42,3	39,6	37,6	35,2	32,7	28,1	26,0

Liite 7. Laskennan parametrit ja laskentatulokset

RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT										
Mallinnusraportin numero/tunniste: 101013470-006					Raportin hyväksyntäpäivämäärä: 18.01.2020					
Laatija: DI Carlo Di Napoli (Johtava asiantuntija/AFRY Finland Oy)					Hyväksyjä: Miia Nurminen-Piirainen (Johtava asiantuntija/AFRY Finland Oy)					
MALLINNUSOHJELMAN TIEDOT										
Mallinnusohjelma: SoundPlan v.8.1					Mallinnusmenetelmä: ISO 9613-2					
TUULIVOIMALAN (TUULIVOIMALOIDEN TIEDOT)										
Tuulivoimalan valmistaja: Geneerinen					Nimellisteho: 11-20 MW					
Roottorin halkaisija: 276m					Napakorkeus: 172m					
Lukumäärä: VE1: 40 kpl, VE2: 45 kpl					Siipityyppi: Normaali					
Mahdollisuudet vaikuttaa tuulivoimalan melupäästöön (alentavasti) käytön aikana: Kyllä, noin 0 dB...-8 dB										
AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT										
Melupäästötiedot (LWA): 114,6 dB					Varmuusarvo K : +2,0 dB					
Taajuusjakauma										
Ks. raportin taulukot 5-6.										
Melun erityispiirteet										
Kapeakaistaisuus: Ei			Impulssimaisuus: Ei			Korkeuserokorjaus: Ei				
AKUSTISET TIEDOT/LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT										
Laskentakorkeus: 4 m			Suhteellinen kosteus: 70%			Lämpötila: 15 °C				
Tuulensuunta: Myötätuuli joka suuntaan										
Maastomallin lähde: MML, 06/2020					Maanpinnan pystyresoluutio: 0.3 m / laserkeilausaineisto					
Maan- ja vedenpinnan absorption ja heijastuksen huomioiminen, käytetyt kertoimet										
Vesialueet:			Maa-alueet:			Muut alueet (mitkä?)				
0			0.4							
PIENTAAJUISEN MELULASKENNAN ÄÄNIERISTYSARVOT										
Julkisivurakenteen tuottaman äänitasoeron vähimmäisarvon estimaatti DL84 asuinrakennuksille ja DL90 loma-asuinrakennuksille 1/3 Oktaaveittain [Hz], 20-200Hz dB										
DL90%										
Taajuus [Hz]										
20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
6 dB	6 dB	7 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB	11 dB	12 dB	13 dB	14 dB
DL84%										
8 dB	8 dB	9 dB	10 dB	12 dB	13 dB	15 dB	17 dB	19 dB	21 dB	23 dB
LASKENTATULOKSET										
Laskentavaihtoehdot 2 kpl, Yhteismelumalleja 2 kpl										

Laskentakartat: yht 4 kpl	Laskentavyöhykkeet [dB]: 4 kpl: 40dB, 45dB, 50dB ja 55dB
Pientaajuisen melun laskentataulukot: 4 kpl	Reseptoripisteet: 10 kpl, R1-R10
Melulle altistuvat asuin- tai loma-asuinkohteet, lkm (ilman meluntorjuntaa/voimalan ohjausta)	
Yli 40 dB(A):n vyöhykkeellä: 0 kpl	Yli 45 dB(A):n vyöhykkeellä: 0 kpl
Pientaajuisen melun tulokset: Kaikki tulokset alle asumisterveysasetuksen	