



Tuulivoimakohteen melu- ja välkevarjostusmallinnus

Jalasjärvi - Rustari

Mika Laitinen
Numerola Oy

Tulosten käyttö- ja jakeluoikeudet

Tämä raportti on luottamuksellinen ja laadittu yksinomaan raportissa mainitun vastaanottajan käyttöön.

Asiakas voi kuitenkin käyttää tämän selvityksen tuloksia lähtötietoina raportissa mainitun kohteen tuulivoimaan liittyvissä jatkoselvityksissä ja suunnittelutyössä (ympäristöselvitykset, kaavoitus jne.) sekä hankkeiden toimijoiden valinnassa. Tulosten jakelu selvitysten osapuolille (esim. hankekehittäjä, kaavoittaja, viranomaiset) on myös sallittu luottamuksellisena, mutta tieto jakelusta on toimitettava Numerola Oy:lle.

Muutoin aineiston esittely ja jakaminen edellyttävät Numerolan lupaa.

Projektiraportin nimi ja kirjoittajat

Tuulivoimakohteen melu- ja välkevarjostusmallinnus: Jalasjärvi – Rustari

Mika Laitinen, Numerola Oy

Vastaanottaja

Sweco Ympäristö/Metsähallitus
Iikka Ranta

Aineiston käyttöoikeus

Sisältää Maanmittauslaitoksen avoimen tietoaineiston lisenssin (03/2015)
(<http://www.maanmittauslaitos.fi/avoimen-tietoaineiston-cc-40-lisenssi>) alaista materiaalia.

Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Jalasjärven kunnassa Rustarin alueella sijaitsevan yhdeksän tuulivoimalan tuulivoimapuiston aiheuttamista melu- ja välkevarjostusvaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten menetelmien avulla. Tuulivoimaloiden aiheuttama melutaso lasketaan lähtömelutasoa 108,3 dB(A) vastaavalla taajuusjakaumalla. Melumallinnuksessa noudatetaan ympäristöministeriön julkaisemaa mallinnusohjeistusta. Tulosten arvioinnissa käytetään ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

Paikka ja aika

Jyväskylä 21.10.2015

Projektin vastuhenkilöt

Mika Laitinen

Asiatarkastus

Pasi Tarvainen

Sisällysluettelo

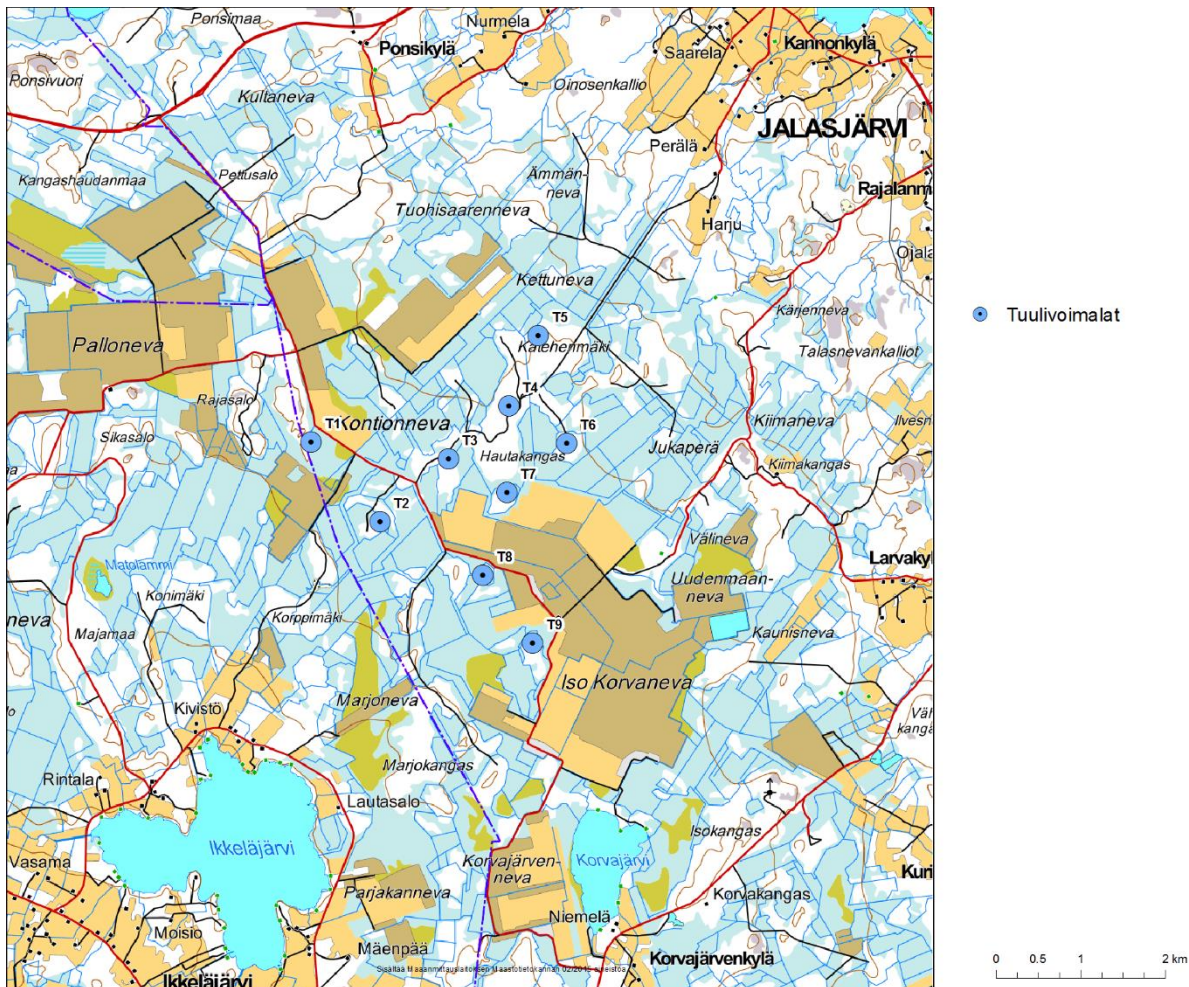
1	Johdanto	5
2	Melumallinnus	6
2.1	Melumallinnusohjeistus	7
2.2	Ohjeavot	8
2.3	Kokonaismelun mallinnus	9
2.4	Matalataajuisen melun mallinnus	11
3	Välkevarjostusmallinnus	13
3.1	Välkevarjostus	13
3.2	Ohjeavot	14
3.3	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	14
3.4	Välkevarjostusvaikutus	16
4	Johtopäätökset	17
5	Yhteenveto melumallinnuksen tiedoista	18

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Jalasjärven kunnassa Rustarin alueella sijaitsevan 9 tuulivoimalan kokonaisuuden aiheuttamaa melu- ja välkevaikutusta. Kohteeseen sijoitettavien turbiinien paikat on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 1). Analyysit perustuvat turbiinityypin Vestas V126-3.3 MW (nimellisteho 3,3 MW) teknisiin tietoihin, jolle mallinnuksessa on käytetty napakorkeutta 160 m ja valmistajan ilmoittamaa maksimiäänitehotasoa 108,3 dB(A). Turbiinin roottorin halkaisija on 126 m.

Taulukko 1: Turbiinin sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiini	E	N	korkeus [m]
T1	272704	6932367	149
T2	273518	6931427	147
T3	274328	6932173	145
T4	275047	6932798	145
T5	275397	6933631	138
T6	275735	6932351	145
T7	275025	6931770	145
T8	274740	6930787	150
T9	275330	6929984	147



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Rustarin alueella.

2 Melumallinnus

Tuulivoimalaitosten melu aiheutuu pääosin lapojen tuottamasta aerodynaamisesta laajakaistaisesta (60-4000 Hz) melusta^{1,2}. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat (esim. vaihteisto ja generaattori), jotka tuottavat pääosin mekaanista melua. Tätä on pystytty tehokkaasti vaimentamaan, kun taas lapojen aerodynaamiseen meluun on vaikeampaa vaikuttaa. Aerodynaaminen melu on hallitseva varsinkin suurilla turbiineilla, ja se on lapojen pyörimisen vuoksi jaksottaista ja sisältää myös matalataajuisia komponentteja. Tuulivoimaloiden aiheuttaman melun voimakkuuteen, taajuuteen ja ajalliseen vaihteluun vaikuttavat erityisesti voimalatyyppi, voimaloiden lukumäärä, niiden etäisyys tarkastelupisteeseen ja tuulen nopeus. Melun leviäminen ympäristöön riippuu paikallisten maasto-olosuhteiden lisäksi hetkellisistä sääoloista kuten tuulen nopeudesta ja ilmakehän tasapainotilasta. Tarkempia taustatietoja tuulivoimaloiden aiheuttaman melun syntymekanismeista, luonteesta ja vaikutuksista on koottuna julkaisuihin^{1,2,3}.

¹ C. Di Napoli: *Tuulivoimaloiden melun syntyvät ja leviäminen*, Suomen Ympäristö 4, 2007.

² S. Uosukainen: *Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys*, VTT Tiedotteita 2529, 2010.

³ D. Siponen: *Noise Annoyance of Wind Turbines*, VTT Research Report VTTR-00951-11, 2011.

Ympäristöministeriö on julkaissut 28.2.2014 ohjeen tuulivoimaloiden melun mallintamiseen⁴. 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.

2.1 Melumallinnusohjeistus

Melumallinnuksen lähtötietona käytetään standardin *IEC TS 61400-11* mukaisten mittausten perusteella määritettyjä ja valmistajan ilmoittamia äänitehotason tunnus- tai takuuarvoja (valmistajan ilmoittama ”declared value” tai ”warranted level”, jossa varmuus melupäästön mahdollisessa verifiointissa on noin 95 %). Äänitehotasot on ilmoitettava 1/3-oktaaveittain keskitaaajuuksilla 20-10000 Hz ja oktaaveittain keskitaaajuuksilla 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 suunnitteluohjeistuksiin 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 takuuarvoihin, eikä mallinnusohjeistuksessa edellytetä niiden erillistä tarkastelua.

Äänen etenemislaskennassa käytetään ohjeen mukaisia ISO 9613-2 -standardiin perustuvia sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Maaston pinnan laatu ja muoto otetaan mallinnuksessa erillisinä huomioon. Lisäksi pienitaajuuden äänen eteneminen tulee mallintaa erikseen ohjeistuksessa määritellyn erillislaskennan avulla, joka perustuu Tanskassa annettuun ohjeistukseen, jonka parametreja on mukautettu Suomen olosuhteisiin⁵. Laskennassa otetaan huomioon geometrinen etäisyysvaimennus sekä ohjeistuksen mukaiset ilmakehän absorption ja maastovaikutuksen parametrit. Pienitaajuuden äänen tarkastelu tehdään erikseen 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20–200 Hz melulle merkittävimmin altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella. Laskennan tarkoituksena on tuottaa tieto ulkomelutasoista terssikaistoittain, ja niiden perusteella voidaan arvioida rakennuksen sisämelutaso oletetulla ääneneristävyydellä.

⁴ *Tuulivoimaloiden melun mallintaminen*, Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2014, Ympäristöministeriö.

⁵ J. Jakobsen: *Danish regulation for low frequency noise from wind turbines*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 31(4), 2012.

2.2 Ohjearvot

Valtioneuvoston 1.9.2015 voimaan astunut asetus määrittää tuulivoimaloiden aiheuttaman ulkomelutason ohjearvot⁶. 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 ulkomelutasoille⁷.

Kun laskennallisia melutasoja Valtioneuvoston asetuksen ohjearvoihin, laskettuun melutasoon ei tehdä korjausta melun impulssimaisuuden tai kapeakaistaisuuden vuoksi. Ympäristöministeriön melumallinnusohjeistuksen⁴ mukaan näiden vaikutusten oletetaan lähtökohtaisesti sisältyvän valmistajan ilmoittamiin melupäästön takuuarvoihin, joita käytetään laskennan lähtötietoina. Sen sijaan valvonnan yhteydessä tehtäviin mittaustuloksiin lisätään 5 dB ennen Valtioneuvoston ohjearvoon vertaamista, mikäli tuulivoimalan ääni sisältää kapeakaistaisia tai impulssimaisia komponentteja.

Valtioneuvoston ohjearvot on koottu taulukkoon (Taulukko 2).

Taulukko 2: Mallinnustulosten arvioinnissa sovellettavat Valtioneuvoston asetuksen mukaiset ohjearvot.

	Päivä 07-22 L _{Aeq} [dB]	Yö 22-07 L _{Aeq} [dB]
Pysyvä asutus, loma-asutus, hoitolaitokset, leirintäalueet	45	40
Kansallispuistot	40	40
Oppilaitokset, virkistysalueet	45	-

Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt 15.5.2015 voimaan astuneessa asumisterveysasetuksessa enimmäisarvot pienitaajuiselle yöaikaiselle melulle sisätiloissa⁸. Ohjearvot on annettu terssikaistoittain painottamattomille tunnin keskiäänitasoille, ja ne on lueteltu taulukossa (Taulukko 3). Ohjeistuksen mukaiset mallinnustulokset vastaavat pienitaajuisen melun tasoa ulkotiloissa, joten ne eivät ole suoraan verrannollisia Asumisterveysasetuksen arvoihin. Ulkomelutasojen avulla voidaan kuitenkin arvioida sisämelutasoja, kun rakennuksen vaipan ääneneristävyys tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

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

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

⁶ Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Astui voimaan 1.9.2015.

⁷ Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2012, Ympäristöministeriö, 2012.

⁸ Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.

2.3 Kokonaismelun mallinnus

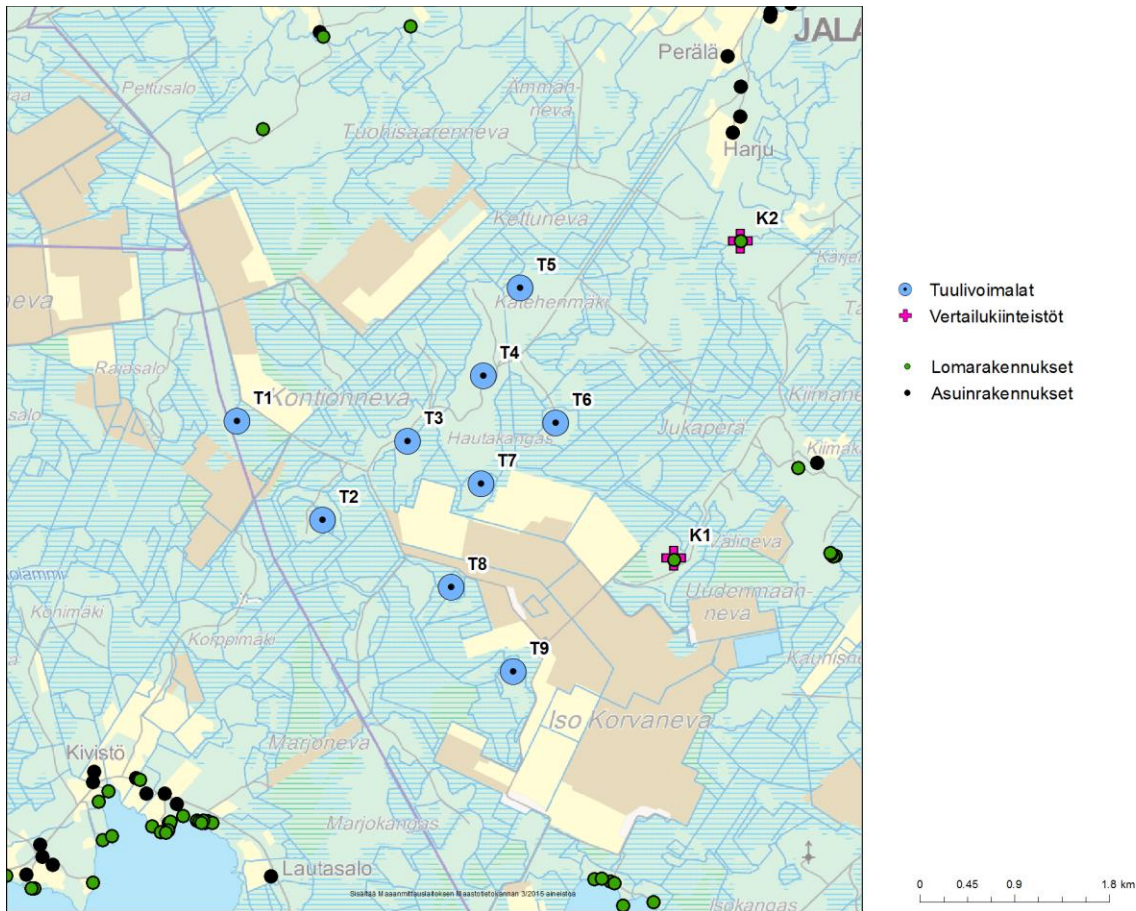
Tuulivoimaloiden kokonaismelun mallinnus on suoritettu SoundPLAN-ohjelmistolla (versio 7.2) ISO 9613-2 -laskentastandardin mukaisesti. Mallinnuksessa on käytetty turbiinityypin Vestas V126-3.3 MW maksimiäänitehotasoa 108,3 dB(A) (takuarvo) sekä valmistajan ilmoittamaa melun oktaavijakaumaa. Laskennassa käytetty maksimiäänitehotaso ja melun oktaavijakauma ovat turbiinivalmistajan ilmoittamia IEC TS 61400-11 standardin mukaisiin mittauksiin perustuvia arvoja, jotka on taulukoitu turbiinin napakorkeuden tuulennopeuden suhteen. Mallinnuksessa voimaloille on käytetty napakorkeutta 160 m ja oktaavijakaumaa tuulennopeudella 14 m/s napakorkeudella, mikä vastaa tuulen nopeutta 8-10 m/s 10 m korkeudella. Turbiinin melun kapeakaistaisuuteen, impulssimaisuuteen tai amplitudimodulaatioon liittyvää sanktiota ei ole käytetty mallinnuksessa.

Maaston korkeusaineistona on käytetty Maanmittauslaitoksen aineistoa *Korkeusmalli 25 m*, jonka pystysuuntainen tarkkuus on 2 m ja vaakasuuntainen resoluutio 25 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. Korkeuserot tuulivoimaloiden ja melulle altistuvien rakennusten välillä ovat alle 60 m, joten maanpinnan muotoon liittyvää korjausta ei ole tehty. Akustisen laskennan lähtötiedoista ja parametreista on tehty yhteenveto lukuun 5.

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä kaksi vertailukiinteistöä, joiden kohdilla kokonaismelun ja matalataajuisen melun tasoja tarkastellaan tarkemmin. Vertailukiinteistöjen paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Lähimpänä voimaloita sijaitsee K1, jonka etäisyys lähimpään voimalaan on noin 1700 m. Asuinrakennuksista ja loma-asunnoista ainoastaan K1 sijaitsee alle 2 km etäisyydellä voimaloista, jonka vuoksi vertailukiinteistöjä valittiin vain kaksi.

Taulukko 4: Vertailukiinteistöjen koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Kiinteistö	E	N	Korkeus [m]
K1	276863	6931034	145
K2	277499	6934082	125



Kuva 2: Vertailukiinteistöjen paikat Rustarin alueella.

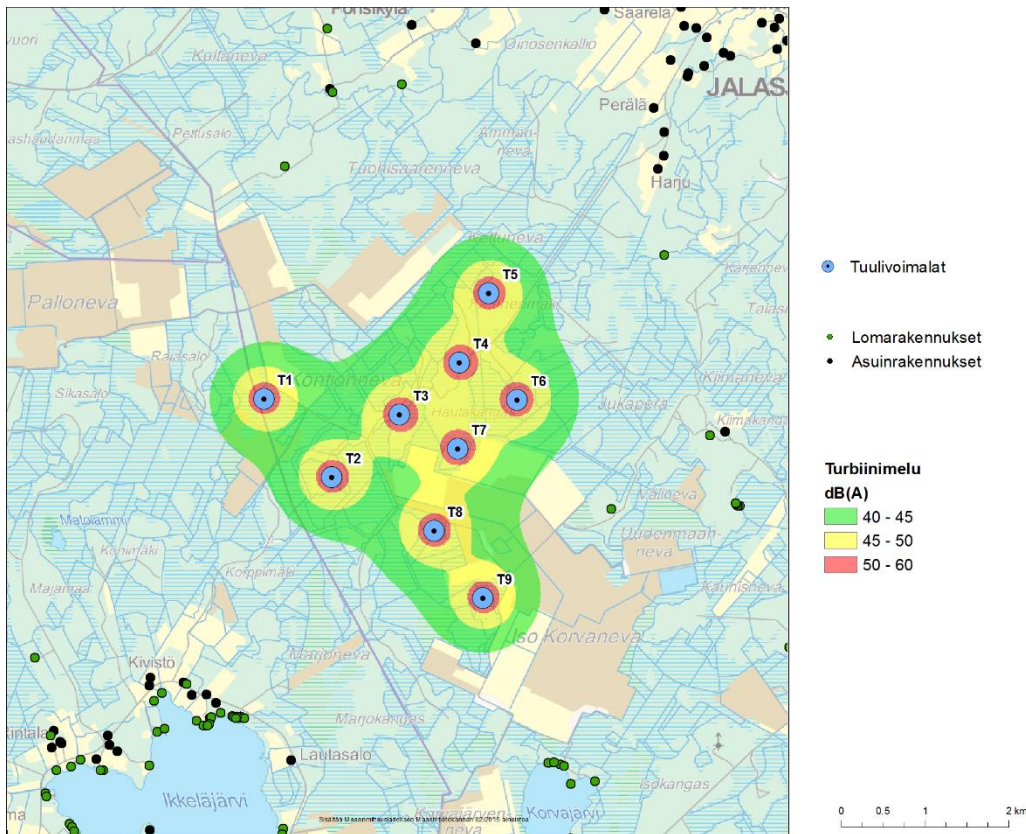
Meluvaikutus

Turbiinien aiheuttama mallinnettu A-painotettu kokonaisäänitaso on esitetty karttakuvana (Taulukko 5). Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuinrakennukset ja loma-asunnot. Karttakuviin on merkitty A-painotettujen äänitasojen 40 dB, 45 dB ja 50 dB mukaiset vyöhykkeet. Nämä ovat tulosten arvioinnissa käytettäviä ohjeellisia melutasoja.

Mallinnustulosten perusteella melutasot jäävät Valtioneuvoston asetuksen ohjearvojen alapuolelle kaikkien alueen rakennusten kohdilla. Äänitasot määriteltyjen vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5).

Taulukko 5: Kokonaismelun äänitasot vertailukiinteistöjen kohdilla.

Kiinteistö	Äänitaso dB(A)
K1	33,8
K2	29,4



Kuva 3: A-painotetut äänitasot turbiinin äänitehotasolla 108,3 dB(A).

2.4 Matalataajuisen melun mallinnus

Matalataajuisen melun laskenta on suoritettu ympäristöministeriön mallinnusohjeistuksen mukaisesti⁴. Laskennan lähtötietona on käytetty samankaltaista melun taajuusjakaumaa kuin kokonaismelun mallinnuksessa. Jakauma on otettu 1/3-oktaaveittain taajuuksille 20–200 Hz jakaumasta, joka tuottaa kokonaismeluna 106 dB(A). Mallinnuksen tuloksena saatavat A-painotetut arvot muunnetaan painottamattomiksi.

Meluvaikutus

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

Ympäristöministeriön ohjeiden mukainen matalataajuisen melun laskenta perustuu Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa esitettyyn menetelmään⁵, jonka parametreihin on tehty joitakin Suomen olosuhteisiin perustuvia tarkennuksia. Tanskan menetelmässä on määritelty rakennuksen ääneneristävyyssparametri (ΔL_D) taajuuskaistoittain, jolloin saadaan laskettua myös sisämelutasot ja ohjearvoihin verrannolliset mallinnustulokset. Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty sekä Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa että artikkelissa⁵

annetut ääneneristävyyden arvot. Artikkelissa esitetyt arvot on määritelty Tanskan ympäristön-suojelulaitoksen (Danish EPA) suorittamien mittausten ja vertailujen perusteella, ja ne ovat selkeästi alhaisempia kuin Tanskan ympäristöhallinnon ohjeissa annetut arvot. Ne antavat siten konservatiivisen arvion rakennusten aiheuttamalle ääneneristävyydelle.

Taulukko 6: Rakennuksen ääneneristävyyden arvoja taajuuskaistoittain.

Taajuus [Hz]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Ääneneristävyys [dB] (Tanskan ohjeistus)	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2	-
Ääneneristävyys [dB] (viite ⁹)	3,6	4,6	6,7	7,6	10,3	14,2	17,5	18,4	17,5	18,6	22,4

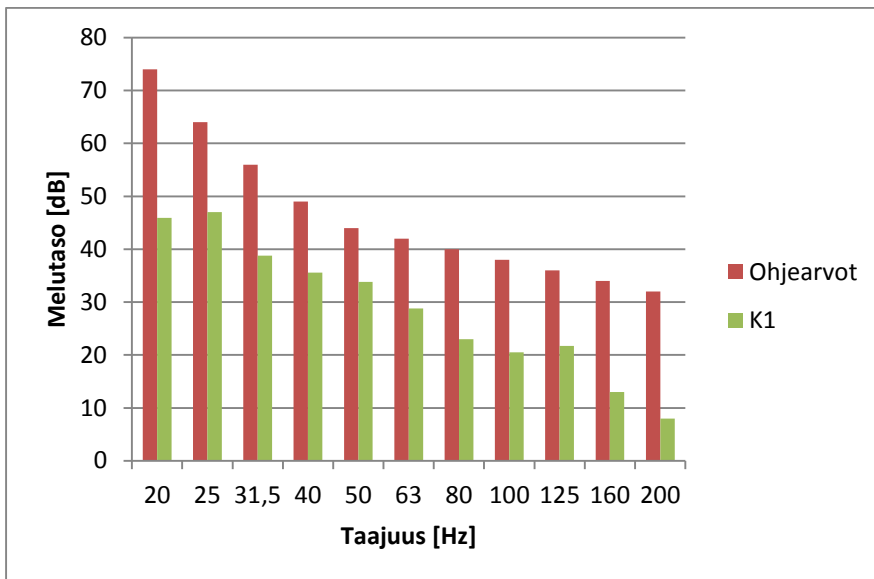
Melutasoja tarkastellaan aiemmin määriteltyjen vertailukiinteistöjen paikoilla. Lisäksi lasketaan sisämelutasot eniten melulle altistuvassa kohteessa käyttäen alempia ääneneristysarvoja (Taulukko 6) ja verrataan näitä tuloksia Asumisterveysasetuksen arvoihin.

Turbiinien aiheuttama matalataajuinen ulkomelutaso vertailukiinteistöjen kohdilla taajuuskaistoittain ja ilman taajuuspainotusta on lueteltu taulukossa (Taulukko 7). Taulukkoon on eritelty ohjeistuksen mukaisesti lasketut ulkotilojen melutasot. Korkeimmat matalataajuisen melun tasot kohdistuvat kiinteistöön K1, jonka kohdalla on laskettu myös sisämelutasot ja verrattu niitä Asumisterveysasetuksen arvoihin (Kuva 4). Kun otetaan huomioon rakennuksien ääneneristävyys, melutasot jäävät asetusarvojen alapuolelle koko taajuusvälillä.

Taulukko 7: Matalataajuisen ulkomelun äänitasot vertailukiinteistöjen kohdilla.

taajuus	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
K1	49,5	51,6	45,5	43,2	44,1	43,0	40,5	38,9	39,2	31,6	30,4
K2	46,7	48,8	42,6	40,4	41,3	40,1	37,6	35,9	36,1	28,3	27,0

⁹ D. Hoffmeyer, J. Jakobsen: *Sound insulation of dwellings at low frequencies*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 29(1), 2010.



Kuva 4: Matalataajuisten sisämelun tasot vertailukiinteistön K1 kohdalla.

3 Välkevarjostusmallinnus

3.1 Välkevarjostus

Välkevarjostuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Aurinko paistaa tarkastelupisteeseen pyörivän roottorin läpi. Tällöin katselija havaitsee välkkyvän varjon, joka 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. Välkevaikutuksen kohdistuminen tiettyyn kohteeseen voidaan ajoittaa tarkasti, joten välkevaikutusta voidaan rajoittaa ohjelmoimalla tuulivoimala pysähtymään välkkeen kannalta kriittisiksi ajoiksi.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolelle (aamu- ja iltajat). Voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain, jos voimala sijaitsee joko Kravun kääntöpiirin eteläpuolella tai pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevarjostuksen laskenta voi perustua joko ns. astronomisen maksimivälkkeen (worst case) tai todennäköisen tilanteen (real case) mallinnukseen. Astronomisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden. Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta. Tämän selvityksen väkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

3.2 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden varjostusvaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta⁷. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä¹⁰. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan välkevaikutuksien ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa analysoitu välkevaikutus vastaa todellista odotettavissa olevaa välketuntimäärää, ja näin ollen suunnitteluohjearvona käytetään 8 tai 10 tuntia.

3.3 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

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

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 25 m*. Korkeusdatan resoluutio on 25 m ja tarkkuus 2 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Varjostusvaikutus laskettiin 2 m korkeudelle maanpinnasta sekä 2000 m etäisyydelle jokaisesta turbiinista, mikä on riittävän suuri etäisyys tässä tarkasteltujen turbiinien tapauksessa. 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 ihmisisilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin 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. Käyttäen tätä 20 % -sääntöä, välkevaikutuksen maksimietäisyydelle voidaan johtaa kaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1097780,$$

missä w on lavan keskileveys ja d on etäisyys Aurinkoon (150000000 km). Tämän selvityksen laskennassa on käytetty maksimietäisyyttä 1708 m, joka on tyypillinen arvo selvityksessä käytetyille turbiinille. Tämä maksimietäisyys vastaa lavan keskileveyttä 2,5 m.

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

¹⁰ Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.

roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulusuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 150 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 8).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Pelmaan sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä¹¹. Pelmaan sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 9). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

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

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,181	0,208	0,159	0,129	0,115	0,134

¹¹ P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.

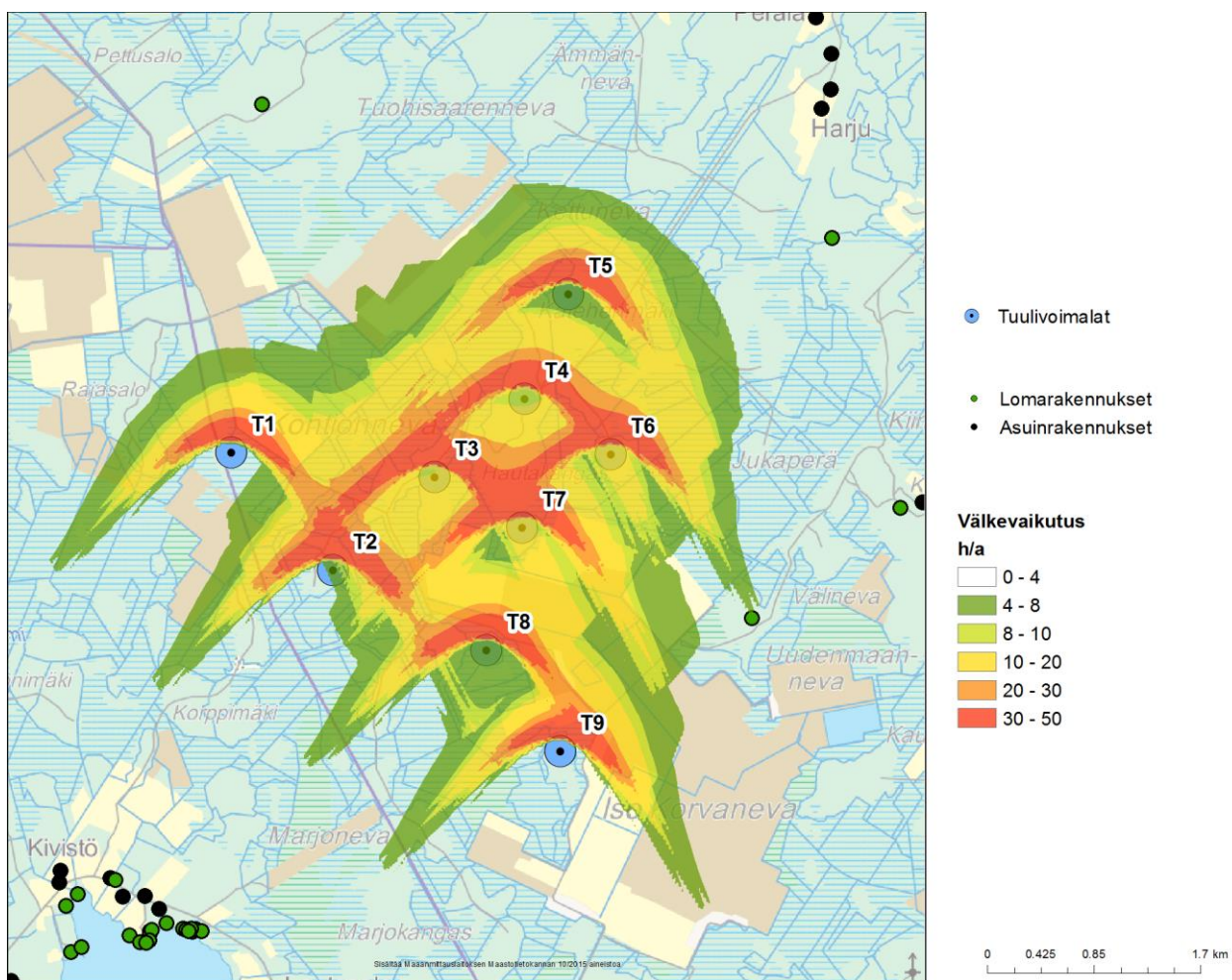
Taulukko 9: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,168
Helmikuu	0,317
Maaliskuu	0,359
Huhtikuu	0,441
Toukokuu	0,488
Kesäkuu	0,452
Heinäkuu	0,466
Elokuu	0,424
Syyskuu	0,361
Lokakuu	0,254
Marraskuu	0,171
Joulukuu	0,119

3.4 Välkevarjostusvaikutus

Mallinnetut arviot todellisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 5). Voimaloiden ja rakennusten välisestä suuresta etäisyydestä johtuen kiinteistöihin kohdistuva välkevarjostusaika on alle tunti kaikkien alueen rakennusten kohdilla. Välkevarjostusajan tiukimmatkin ohjearvot alittuvat siis selvästi.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Suomen olosuhteissa puusto rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuisia välkevaikutusta.



Kuva 5: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä.

4 Johtopäätökset

Raportissa on esitetty Jalasjärven kunnassa Rustarin alueella sijaitsevan tuulivoimapaiston ympäristölleen aiheuttaman melu- ja välkevaikutuksen laskennalliset arviot. Meluvaikutusten arvio on tehty kokonaismelutasolla 108,3 dB(A) ja tätä äänitehotasoa vastaavalla Asiakkaan toimittamalla, turbiini-valmistajalta saadulla taajuusjakaumalla. Mallinnusten perusteella melutasot alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdilla jäävät alle ympäristöhallinnon ja valtioneuvoston ohjearvojen. Myös matalataajuisen melun tasot pysyvät kaikkien rakennusten kohdalla Asumisterveysohjeessa asetettujen arvojen alapuolella. Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen välkevarjostusaika jää alle tiukimman 8 tunnin ohjearvon alueen kaikkien rakennusten kohdalla.

5 Yhteenvedo melumallinnuksen tiedoista

Tekijä: Mika Laitinen, Numerola Oy
Vastaanottaja: Iikka Ranta, Sweco Ympäristö/Metsähallitus
Kohde: Jalasjärvi, Rustari

Mallinnusohjelma: SoundPlan, versio 7.2
Mallinnusmenetelmä: ISO 9613-2

Tuulivoimalan tiedot

Napakorkeus 160 m
 Roottorin halkaisija 126 m
 Äänitehotaso 108,3 dB(A) (takuuarvo, tuulennopeudella 14 m/s napakorkeudella)

Melun erityispiirteiden mittaus ja havainnot

Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus ei
 Impulssimaisuus ei
 Merkityksellinen sykintä ei

Laskennan parametrit

Laskentakorkeus 4 m
 Laskentaruudun koko 10 m x 10 m
 Suhteellinen kosteus 70 %
 Lämpötila 15 C°
 Maastoparametri 0 (vesialueet)
 0,4 (maa-alueet)
 Meteorologinen korjaus 0

Maastomallin tiedot

Lähde *Korkeusmalli 25 m, Maanmittauslaitos*
 Vaakaresoluutio 25 m
 Pystyresoluutio 2 m

Melulle altistuvat kohteet (melutaso ylittää ohjearvon)

Lomarakennukset 0 kpl
 Asuinrakennukset 0 kpl