






Ehdotus tuulivoimamelun mallinnuksen laskentalogiikkaan ja parametrien valintaan

Kirjoittajat: Hannu Nykänen, Seppo Uosukainen, Denis Siponen, VTT
Carlo Di Napoli, Pöyry Finland Oy
Veli-Matti Yli-Kätkä, Janne Ristolainen, Ramboll Finland Oy

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Ehdotus tuulivoimamelun mallinnuksen laskentalogiikkaan ja parametrien valintaan		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ympäristöministeriö Erityisasiantuntija Nunu Pesu PL 35, 00023 Valtioneuvosto	Asiakkaan viite Dnro YM45/5511/2012	
Projektin nimi Ohjeistus tuulivoimaloiden melun mitoittamiseen ja todentamiseen	Projektin numero/lyhytnimi 80555/TUULIVOIMA-MELU	
Raportin laatija(t) Hannu Nykänen, Seppo Uosukainen, Denis Siponen, VTT Carlo Di Napoli, Pöyry Finland Oy Veli-Matti Yli-Kätkä, Janne Ristolainen, Ramboll Finland Oy	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 52/16	
Avainsanat tuulivoima, melu, ääni	Raportin numero VTT-R-04565-13	
Tiivistelmä <p>Tässä raportissa kuvataan yleisellä tasolla tuulivoimaloiden äänentuottoa, äänen leviämistä ja leviämiseen liittyviä todennäköisyyksiä eri maasto- ja sääolosuhteissa. Tarkastelun pohjalta on laadittu ehdotus ohjeistukseksi tuulivoimamelun mallinnuksen laskentalogiikkaan ja eri tilanteissa sovellettavien parametrien valintaan. Ohjeistus mahdollistaa yhtenevän ja ennakoitavan käytännön tuulivoimamelun mallinnukseen kaupallisia mallinnusohjelmistoja käytettäessä. Varsinaisessa raportiosassa (luvut 1 – 4) on kuvattu tehtävää ja tehtävään liittyviä haasteita ja niiden ratkaisuvaihtoehtoja.</p> <p>Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu yhteenvedoiksi kahteen taulukkoon lukuun 5 sekä laajennettuna varsinaiseksi ohjeistusehdotukseksi liitteeseen 1. Näissä on otettu kantaa ratkaisuvaihtoehtoksi erilaisia vaihtoehtoja sisältäviin asioihin. Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu siten, että laskenta- ja mittaustulosten epävarmuudet ovat ennakoitavissa ja hyväksyttävän pienet, tulokset ovat jäljitettäviä ja riittävällä asiantuntemuksella laajasti hyödynnettäviä. Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu ja se on testattu siten, että se mahdollistaa yleisimmin Suomessa käytettyjen kaupallisten laskentaohjelmien hyödyntämisen.</p> <p>Lukuun 6 on lisäksi koottu erilaisia hankkeen aikana keskusteluissa esiin tulleita ajatuksia hankekohtaisen suojaetäisyyden alittavan sijoituspaikan hyväksyttävyyden saavuttamiseksi häiritsevyydeltä tarkastelun avulla. Nämä ajatukset on kirjattu muistiin, jotta niitä voitaisiin tarvittaessa hyödyntää varsinaisen ympäristöministeriön tuulivoimaloiden melun mallinnus- ja mittaushjeistuksen valmistelussa tai muissa jatkotoimissa.</p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Tampere, 28.6.2013 Laatija  Hannu Nykänen, projektipäällikkö	Tarkastaja  Marko Antila erikoistutkija	Hyväksyjä  Johannes Hyryn teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot Hannu Nykänen, VTT Teolliset järjestelmät, PL 1300, 33101 Tampere		

Jakelu (asiakkaat ja VTT)

Ympäristöministeriö, Nunu Pesu: 1 kpl
Energiateollisuus ry, Heidi Lettojärvi: 1 kpl
Suomen tuulivoimayhdistys ry, Anni Mikkonen: 1 kpl
Pöyry Finland Oy, Carlo Di Napoli: 1 kpl
Ramboll Finland Oy, Janne Ristolainen: 1 kpl
VTT: 1 kpl

VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Alkusanat

Ympäristöministeriö, Energiateollisuus ry ja Suomen Tuulivoimayhdistys ry rahoittajina ovat käynnistäneet lokakuussa 2012 hankkeen, jonka tulosten pohjalta on mahdollista laatia yksityiskohtainen ohjeistus tuulivoimaloiden melun mallintamiseen ja mittaamiseen. Hankkeesta käytetään nimilyhennettä TUULIVOIMAMELU. Hankkeen ovat toteuttaneet toteuttajaosapuolet, joista päävastuullisena osapuolena on toiminut VTT. Kaksi muuta toteuttajaosapuolta ovat Pöyry Finland Oy ja Ramboll Finland Oy. Hankkeen yhteydessä on laadittu myös diplomityö Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle. Tämä diplomityö julkaistaan erikseen. Hanketta on ohjannut ympäristöministeriön johtama ohjausryhmä, joka koostui rahoittaja- ja toteuttajaosapuolten edustajista.

Tässä osaraportissa kuvataan yleisellä tasolla tuulivoimaloiden äänentuottoa, äänen leviämistä ja leviämiseen liittyviä todennäköisyyksiä eri maasto- ja sääolosuhteissa. Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu yhteenvedoiksi kahteen taulukkoon lukuun 5 sekä laajennettuna varsinaiseksi ohjeistusehdotukseksi liitteeseen 1. Näissä on annettu ohjeet mallinnuksen laskentalogiikkaan ja parametrien valintaan.

Ympäristöministeriö valmistelelee ja julkaisee varsinaisen tuulivoimaloiden melun mallinnus- ja mittausohjeen tämän hankkeen tuloksia hyödyntäen.

Espoo, 28.6.2013

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	6
2 Tavoite.....	7
3 Melumallinnusohjeistuksen perusteet.....	7
3.1 Melumallinnuksen kokonaisuus	7
3.2 Melumallinnusohjeistuksen logiikka	8
3.3 Tuulivoimalan melupäästö	10
3.3.1 Mallinnuksessa käytettävä melupäästöarvo.....	10
3.3.2 Tuulivoimalan melun impulssimaisuus ja vaihteluvoimakkuus (amplitudimodulaatio).....	11
3.3.3 Äänilähteen suuntaavuusproblematiikka.....	12
3.4 Äänen eteneminen.....	13
3.4.1 Pistelähteen tuottama äänitaso tarkastelupisteessä	13
3.4.2 Geometrinen etäisyysvaimennus	15
3.4.3 Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus.....	15
3.4.4 Maaperän vaikutus.....	15
3.4.5 Meteorologinen korjaus.....	20
3.4.6 Pientaajuisen melun etenemisvaimennus	23
4 Laskentalogiikan ja parametrivalinnan testaus eri laskentaohjelmilla	24
4.1 Mallien lähtötiedot ja immissiopisteiden lasketut A-äänitasot.....	25
4.1.1 Emissio	25
4.1.2 Immissio.....	26
4.1.3 Maasto	27
4.1.4 Sää	28
4.1.5 Oletusarvoilla lasketut immissiotasot	28
4.2 Varioidut parametrit.....	29
4.2.1 Vertailutulosten esittämistapa	30
4.2.2 Mallinnusohjelmistojen keskinäinen vertailu.....	30
4.2.3 Mallinnusparametrien ohjelma- ja algoritmikohtaiset vertailut.....	33
4.2.4 Etenemismallien keskinäinen vertailu	35
4.2.5 Variointien yhteenveto	35
4.3 Parametrien herkkyystarkastelut.....	36
4.3.1 Mallinnusten vertailu	37
4.3.2 Viivalähteiden vaikutus	38
4.3.3 Turbulenttisuuden vaikutus	38
4.3.4 Maanpinnan ominaisvirtausvastuksen vaikutus	39
4.3.5 Maanpinnan karheusermin vaikutus	41
4.3.6 Tuulensuunnan vaikutus A-äänitasoon	41
4.3.7 Muita huomioita.....	42

4.3.8 Herkkyystarkastelujen johtopäätökset.....	42
5 Melumallinnusohjeistusten yhteenveto	42
5.1 Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnus	43
5.2 Hankekohtaisen suojaetäisyyden määrittäminen	45
5.3 Hankekohtaisen suojaetäisyyden alittavan sijoituspaikan häiritsevyydestarkastelu.....	45
5.4 Ympäristölupavaiheen melumallinnus.....	45
6 Tuulivoimaloiden melun haittavaikutusten vähentäminen.....	47
6.1 Häiritsevyydestarkastelu	48
6.2 Taustamelun vaikutuksen huomioiminen	49
7 Yhteenveto	49
Lähdeviitteet	51

1 Johdanto

Suomen energia- ja ilmastostrategian mukaisena tavoitteena on lisätä tuulivoimalla tuotetun energian määrää 9 TWh:iin vuoteen 2025 mennessä. Tämä tarkoittaa tuulivoimakapasiteetin lisäämistä nykyisestä noin 220 megawattista noin 3750 megawattiin. Tuulivoimaloiden sijoittumiseen vaikuttavat keskeisesti teknistaloudelliset tekijät sekä sijaintialueiden ympäristöarvot ja muu alueiden käyttö.

Ympäristöministeriö on heinäkuussa 2012 julkaissut tuulivoimarakentamisen suunnitteluun oppaan [1], jossa tuulivoimaloiden suunnitteluun on annettu yleiset ohjeet. Opas sisältää ohjeita myös tuulivoimaloiden meluvaikutusten arviointiin sekä suunnitteluohjeet tuulivoimaloiden melulle altistuvien kohteiden ulkomelutasoille. Oppaassa todetaan lisäksi, että tuulivoimaloiden melulle altistuvien rakennusten pienitaajuisten melun sisämelutasojen suunnitteluohjeet löytyvät Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisemasta Asumisterveysohjeesta [2]. Sisämelutasojen suunnitteluohjeiden mukaisuus voidaan määrittää mittaamalla tai arvioida ulkomelutasojen perusteella ottamalla huomioon rakennusten vaipan ääneneristävyys.

Melu on ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä tai joka on muulla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista taikka hänen muulle hyvinvoinnilleen haitallista. Melu vaikuttaa ihmisten terveyteen, elinympäristön viihtyisyyteen ja kiinteistöjen sekä maan arvoon. Melun aiheuttamia haittoja säädellään melupäästöön, melutasoon ja melualtistukseen kohdistuvilla vaatimuksilla ja toimenpiteillä. Tavoitteena on toimia ennakoivasti ja suunnittelun keinoin.

Tuulivoimaloiden tuottama ääni saattaa poiketa muusta, esimerkiksi liikenteen tuottamasta, äänestä melulle altistuvassa kohteessa sekä ominaisuuksiltaan että melun koetun häiritsevyyden osalta. Tämän vuoksi tuulivoimalat edellyttävät erillistä ääniteknistä mitoitus- ja todentamishjeistusta. Tuulivoimarakentamisessa mahdollisesti syntyvän melun haittavaikutusten kustannustehokas torjunta edellyttää tätä tarkoitusta varten hyödynnettävää metodiikkaa, jolla tuetaan tuulivoimamelun suunnitteluohjeiden soveltamista [1, s. 61].

Ympäristöministeriö, Energiateollisuus ry ja Suomen Tuulivoimayhdistys ry rahoittajina käynnistivät lokakuussa 2012 hankkeen, jonka tulosten pohjalta on mahdollista laatia yksityiskohtainen ohjeistus Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaan suunnitteluohjeiden soveltamiseen. Hankkeesta käytetään nimilyhennettä TUULIVOIMAMELU. Hankkeen ovat toteuttaneet toteuttajaosapuolet, joista päävastuullisena osapuolena on toiminut VTT. Kaksi muuta toteuttajaosapuolta ovat Pöyry Finland Oy ja Ramboll Finland Oy. Hankkeen yhteydessä on laadittu myös diplomityö Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle. Tämä diplomityö julkaistaan erikseen. Hanketta on ohjannut ympäristöministeriön johtama ohjausryhmä, joka koostui rahoittaja- ja toteuttajaosapuolten edustajista.

Tässä osaraportissa kuvataan yleisellä tasolla tuulivoimaloiden äänentuottoa, äänen leviämistä ja leviämiseen liittyviä todennäköisyyksiä eri maasto- ja sääolosuhteissa. Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu yhteenvedoiksi kahteen taulukkoon lukuun 5 sekä laajennettuna varsinaiseksi ohjeistusehdotukseksi

liitteeseen 1. Ohjeistusehdotuksessa on otettu kantaa ratkaisuvaihtoehdoksi erilaisia vaihtoehtoja sisältäviin asioihin. Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu siten, että laskenta- ja mittaustulosten epävarmuudet ovat ennakoitavissa ja hyväksyttävän pienet, tulokset ovat jäljitettäviä ja riittävällä asiantuntemuksella laajasti hyödynnettäviä. Ehdotus ohjeistukseksi on laadittu ja se on testattu siten, että se mahdollistaa yleisimmin Suomessa käytettyjen kaupallisten laskentaohjelmien hyödyntämisen.

2 Tavoite

Tuulivoimamelu-hankkeen osatehtävän 1 ”Laskentalogiikka ja parametrien valinta” tavoitteena oli kehittää ehdotus ohjeistukseksi tuulivoimamelun mallinnukseen laskentalogiikkaan ja eri tilanteissa sovellettavien parametrien valintaan. Ohjeistus mahdollistaa yhtenevän ja ennakoitavan käytännön tuulivoimamelun mallinnukseen kaupallisia mallinnusohjelmistoja käytettäessä.

3 Melumallinnusohjeistuksen perusteet

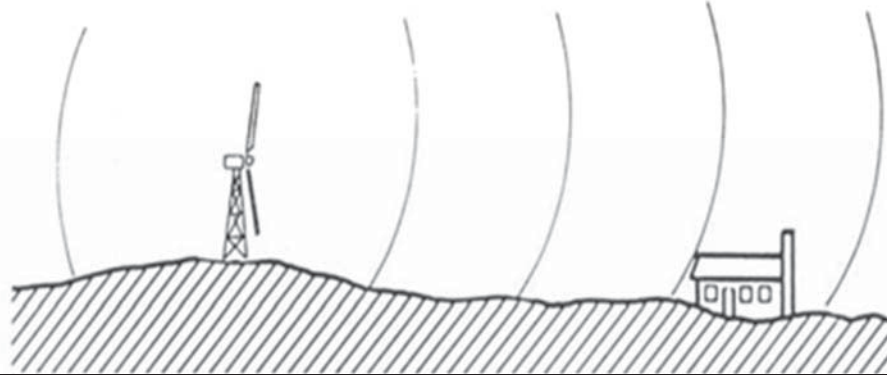
3.1 Melumallinnuksen kokonaisuus

Äänen eteneminen tuulivoimalasta altistuvaan kohteeseen ja siihen vaikuttavat tekijät voidaan kaavamaisesti kuvata lähde => etenemistie => altistuva kohde kokonaisuutena (kuva 1). Mallinnuksen kannalta tärkeimmät tekijät ovat lähteen melupäästön (äänitehon) suuruus ja melun etenemisvaimennukseen liittyvät tekijät.

Tuuliturbiini(e)n mitatun A-painotetun äänitehotason lisäksi tai sijasta tiedossa tulee olla melupäästön tunnusarvo tai valmistajan ilmoittama takuuarvo sekä melupäästöön mahdollisesti liittyvät erityisen häiritsevät melukomponentit: melun kaapeakaistaisuus, melun impulssimaisuus ja melun jaksollinen vaihtelu (amplitudi-modulaatio). Lisäksi pientaajuinen melu tulee aina tarkastella erikseen.

Äänen etenemiseen vaikuttavat ympäristö ja sääolosuhteet. Ohjeistusehdotuksessa on esitetty ne laskennassa tarvittavat parametrit, joilla päästään riittävään laskentatarkkuuteen. Lähtökohtana on ympäristömelun mallinnuksen kansainvälinen standardi ISO 9613-2 [3], mutta myös kahta muuta käytössä olevaa menetelmää Nord2000 [4] ja Concawe [5] on tarkasteltu mallinnusmenetelmävaihtoehtoina. Myös maastotietojen tarkkuuden vaikutusta (laserkeilaukseen perustuva data) ja hyödyntämistä mitoituksessa on tarkasteltu etenemisosassa.

TUULIVOIMAMELU – lähde > eteneminen > altistuva kohde



Äänen lähteet:	Äänen eteneminen:	Altistuva kohde
<ul style="list-style-type: none"> aerodynaaminen (roottori) mekaaninen (koneisto) 	<ul style="list-style-type: none"> etäisyys tuuligradietti ilman absorptio maaperän muoto pinnan laatu (vesi, maa) 	<ul style="list-style-type: none"> melutaso ja melun luonne ulkona ja sisällä taustamelun taso rakennuksen värähtely (ei tarkastella tässä yhteydessä)

Kuva 1. Tuulivoimamelun mallinnuksen kokonaisuus [6, soveltaen].

3.2 Melumallinnusohjeistuksen logiikka

Melumallinnusohjeistuksen logiikkaa lähdetään tässä raportissa tarkastelemaan tuulivoima-alueiden suunnittelulogiikan ja hyväksyntäprosessin näkökulmasta. Melumallinnuksen epävarmuus on tarkastelussa ja ohjeistuksessa sisällytetty laskennassa käytettyyn tuuliturbiinien melupäästön arvoon. Mallinnuksessa tuuliturbiinien melupäästölle on siis käytettävä riittävän suurta varmuutta (valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuuarvoa, jossa varmuus melupäästön mahdollisessa verifiointissa on noin 95 %), jotta mallinnuksessa voidaan käyttää tähtäysarvona suunnitteluohjearvoa ja äänen etenemisen ja ympäristöolosuhteiden mallinnukseen vakioituja sää- ja ympäristöolosuhdearvoja.

Yksittäisen tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen suunnittelussa meluun liittyvä suunnittelu tapahtuu kolmessa tai neljässä päävaiheessa:

Esisuunnitteluvaiheessa hankkeen käynnistäjä laatii arvion tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tulevien turbiinien maksimikoolle ja maksimilukumäärälle ottaen huomioon myös yksittäisen tuuliturbiinin tai tuulivoima-alueelle tulevien tuuliturbiinien melupäästöjen suuruuden.

Kaavoitus- ja mahdollisessa ympäristövaikutusten arviointimenettelyvaiheessa (YVA-menettely) tuuliturbiini(e)n koolle on ilmoitettava yksityiskohtaiset, vaihtoehtoiset tiedot (tuuliturbiinien lukumäärä ja paikat, teho, korkeus, roottorin halkaisija, melupäästötiedot), joita voidaan käyttää tuulivoimaloiden meluvaikutusten arviointiin mallintamalla (**kaavoitus, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnus, ks. luku 5.1**).

Rakennuslupavaiheessa on oltava tiedossa valittu vaihtoehto, ja vasta tässä vaiheessa voidaan lopullisesti arvioida valitun ratkaisun meluvaikutukset melumal-

linnuksen avulla. Mikäli valittu ratkaisu on joku jo edellisessä vaiheessa tarkastelluista suunnitteluvaihtoehdoista, uutta melumallinnusta ei kuitenkaan tarvita.

Mikäli tuulivoimalalle tai tuulivoima-alueelle käynnistetään ympäristölupaharkintaa eli edellisen suunnitteluvaiheen melumallinnus osoittaa, että tuulivoimala tai tuulivoima-alue voi aiheuttaa meluhäiriötä (melun suunnitteluohjeavot ylittyvät) jossain tai joissain altistuvista kohteista, tarvitaan tarkennettu melumallinnus ympäristölupaharkintaa ja -menettelyä varten (**ympäristölupavaiheen melumallinnus, ks. luku 5.4**).

Tässä raportissa melumallinnusta tarkastellaan kolmen viimeisen suunnitteluvaiheen osalta. Esisuunnitteluvaiheen melumallinnus on täysin hankkeen toteuttajan valittavissa, mutta kolmen viimeisen suunnitteluvaiheen osalta voidaan lupamenettelyihin liittyen edellyttää tiettyjen melumallinnuksen menettelytapojen noudattamista. Luonnollisesti hankkeen toteuttajan kannattaa jo esisuunnitteluvaiheessa noudattaa mahdollisimman pitkälti olemassa olevaa ohjeistusta, jotta melumallinnuksen tulokset ovat yhdenmukaiset koko toteutusprosessin ajan.

Tämän raportin ohjeistusehdotuksessa on päädytty kaksiosaiseen melumallinnus-tarkasteluun:

- Kaavoitus- ja mahdollisessa YVA-menettelyvaiheessa meluvaikutusten tarkastelu perustuu turbiinien melupäästön ”ylärajatarkasteluun”. Suunniteltujen tuuliturbiinien melupäästölle on käytettävä valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuarvoa. Melupäästön takuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus, jolloin etenemislaskennassa voidaan käyttää ISO 9613-2 standardiin perustuvia vakioituja äänen etenemiseen liittyviä sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Vain maaston pinnan laatu ja muoto otetaan erillisinä huomioon seuraavasti:
 - tuulivoimala sijaitsee akustisesti kovan heijastavan pinnan ympäröimänä (kuvaa tilannetta, jossa tuulivoimala on veden ympäröimä)
 - tuulivoimala sijaitsee tyypillisellä sisämaan sijoituspaikalla (kohdalaisen tasainen pelto-metsä-järvi-alue, jossa hankealueen korkeuserot ovat enintään 40 m)
 - hankealueen korkeuserot ovat yli 40 m eli tuulivoimalan perustukset sijaitsevat korkealla suhteessa melulle altistuvan kohteen maanpinnan korkeuteen (esimerkiksi korkeat kummut ja tunturit).

Kaavoitusvaiheessa ja YVA-menettelyssä voidaan tarkastella useita turbiinityyppi-, lukumäärä- ja sijoitusvaihtoehtoja ja mallintaa eri vaihtoehtojen tuottamia melualueita. Rakennuslupavaiheen melumallinnuksessa tarkastellaan vain toteutukseen valittua vaihtoehtoa. Uutta melumallinnusta ei kuitenkaan tarvita, mikäli valitun vaihtoehdon on todettu alittavan suunnitteluohjeavot.

- Ympäristölupaharkinnassa melumallinnusta tulee tarkentaa sekä valittujen turbiinityyppien melupäästön että äänen etenemiseen liittyvien parametrien osalta. Turbiinien melupäästön mallinnuksessa on kuitenkin edelleen käytettävä valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuarvoa. Äänen etenemiseen liittyvät parametrit tulee valita sijoituspaikalla vallitsevien todellisten olosuhteiden mukaiseksi. Tämä edellyttää kuitenkin ISO 9613-2 mallista poikkeavaa, tarkempaa mallinnusmenetelmää Nord2000. Ympäristö-

lupavaiheessa on tarkasteltava miten häiritsevän melun alueelle mahdollisesti jäävien asuinrakennusten, loma-asumiseen tarkoitettujen rakennusten tai muiden erityistä suojaa vaativien alueiden meluhäiriö saatetaan hyväksyttäviin rajoihin.

3.3 Tuulivoimalan melupäästö

3.3.1 Mallinnuksessa käytettävä melupäästöarvo

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen suunnitteluvaiheessa turbiinien äänitehotiedot (melupäästötiedot) ovat yleensä turbiinien suunnittelun toimittajan ilmoittamia tietoja. Mallinnuksessa on ehdottomasti käytettävä lähtötietoina standardin IEC 61400-11 [7] mukaisten mittausten perusteella määritettyjä ja valmistajan ilmoittamia tuuliturbiinien tunnus- tai takuuarvoja (valmistajan ilmoittama ”declared value” tai ”warranted level”)

Äänitehotasot ilmoitetaan 1/3-oktaaveittain keskitaajuuksilla 20 Hz - 10 000 Hz¹, ja oktaaveittain keskitaajuuksilla 31,5 Hz – 8 000 Hz. Äänitehotasot tulee olla saatavilla 10 m:n referenssikorkeutta vastaavilla tuulen nopeuksilla 8 m/s ja 10 m/s. Melupäästötietojen saamisessa haasteena on usein tietojen saaminen melupäästön mahdollisesta kapeakaistaisuudesta, melun impulssimaisuudesta ja melun jaksollisesta vaihtelusta (amplitudimodulaatiosta). Valmistajat eivät välttämättä erikseen pyytämättä toimita näitä tietoja, joten tuulivoimalan rakentajan on varmistettava, että tiedot ovat saatavilla. Oman haasteensa muodostaa se, että standardi IEC 61400-11 ei sisällä ohjeita äänen impulssimaisuuden tai jaksollisen vaihtelun (amplitudimodulaation) asteen määrittämiseen, joten näiltä osin tuulivoimalan rakentaja joutuu tyytymään turbiini(e)n valmistajan arvioon.

Laskentalogiikassa perustietona on siis tuulivoimalan valmistajan ilmoittama tuulivoimalan melupäästön tunnus- tai takuuarvo. Kansainvälisessä tuotteiden ja tuotesarjojen melupäästöä koskevassa standardisarjassa ISO 7574 [8] tilastollinen hyväksyttävyyys on määritelty siten, että tuotesarja hyväksytään markkinoille (todetaan mahdollisessa verifiointissa hyväksyttäväksi), jos valmistajan ilmoittamalla melupäästön tunnusarvolla on 95 %:n varmuus sille, että enintään 6,5 % tuotteiden melupäästöstä ylittää ilmoitetun melupäästön tunnusarvon.

Standardissa IEC TS 61400-14 [9] kuvataan ISO 7574 standardisarjaa yksinkertaisemmin, miten IEC 61400-11 mukaan tehdyistä mittauksista voidaan johtaa melupäästön tunnus- tai takuuarvo (”declared value”) siten, että mahdollisessa verifiointissa (päästöarvon oikeellisuuden mahdollisessa todentamisessa) varmuus hyväksymiselle on noin 95 %.

Tunnus- tai takuuarvomenettelyä sovelletaan tuulivoimaloihin siten, että valmistajan tuulivoimalan A-painotetulle äänitehotasolle (L_{WA}), pienitaajuisen melun päästölle sekä melupäästön kapeakaistaisuudelle, impulssimaisuudelle ja amplitudimodulaatio-ominaisuudelle antamista tunnus- tai takuuarvoista laskien määritetään melutason arvot melulle altistuvissa kohteissa. Äänen etenemislaskennassa käytetään mallinnusohjeessa vakioituja ISO 9613-2 standardiin perustuvia sää- ja ympäristöolosuhdearvoja (kaavoitus-, YVA- ja rakennuslu-

¹ Vanhemmille, ennen vuoden 2012 joulukuuta testatuille tuulivoimalatyypeille voidaan hyväksyä standardin vanhemman version [12] mukaisesti 1/3 oktaavikaistoittaisiksi taajuusalueeksi 50 Hz – 10 000 Hz. Pientaajuisen melun vaikutus immissiipisteissä on tällöin tarkastettava erikseen.

pavaiheen melumallinnus) ja mallinnusmenetelmää Nord2000 (ympäristölupavaiheen melumallinnus). Jälkimmäistä menetelmää käytettäessä äänen etenemiseen liittyvät parametrit voidaan ja tulee valita sijoituspaikalla vallitsevien todellisten olosuhteiden mukaisiksi. Melun kapeakaistaisuudelle, impulssimaisuudelle ja amplitudimodulaatio-ominaisuudelle edellytettävä + 5 dB:n korjaus tehdään vain sellaisissa tapauksissa, joissa joku tai jotkut näistä esiintyvät valmistajan ilmoittamina äänitehon määrittämissä tai altistuvassa kohteessa.

3.3.2 Tuulivoimalan melun impulssimaisuus ja vaihteluvoimakkuus (amplitudimodulaatio)

Tuulivoimalan melu voi sekä äänitehon määrittämissä että altistuvassa kohteessa kuultuna olla impulssimaista tai amplitudimoduloitunutta.

Impulssimaisuus on erityisesti vanhemmissa standardeissa määritetty usein äänitasomittarin impulssiaikavakiolla mitatun A-painotetun ekvivalenttitason ($L_{pA_{1eq}}$) ja vastaavalta aikaväliltä määritetyn A-painotetun ekvivalenttitason ($L_{pA_{eq}}$) erotuksena, esim. [10, Annex D]. Impulssimaisuuden toteaminen on suhteellisen yksinkertaista kaksikanavaisella äänitasomittauksella. Melu määritellään impulssimaiseksi, jos erotus on suurempi kuin 3 dB.

Tuulivoimalan melun jaksottaisen vaihtelun (amplitudimodulaation) synnyttää yksittäisessä tuulivoimalassa ennen kaikkea tuuliprofiilin voimakas vertikaalinen muutos ja näin ollen lapaan kohdistuvan voiman voimakas vaihtelu yksittäisen lavan yhden kierroksen aikana. Tämä amplitudimodulaation tyyppi on riippuvainen meteorologisista olosuhteista ja esiintyy voimakkaimillaan stabiilissa ilmakehässä, tyypillisesti ilta- ja yöaikaan. Modulaatiota voidaan vähentää vähentämällä tuuliprofiilin aiheuttamaa kuormitusvaihtelua lapaan pinoilla lapaan kohtauskulman säädöllä yhden kierroksen aikana (individual pitch control) tai alentamalla pyörimisnopeutta.

Tuulivoima-alueen tapauksessa myös yksittäisten tuuliturbiinien synkroninen pyöriminen voi aiheuttaa amplitudimodulaatiota, mikä tässä tapauksessa on vain altistuvassa kohteessa havaittava ilmiö. Tämän tyyppinen amplitudimodulaatio voidaan ehkäistä säätämällä (ja vaihtelemalla) tarvittaessa yksittäisten tuuliturbiinien kierrosluku toisistaan poikkeavaksi synkronisen pyörimisen estämiseksi.

Yksittäisen tuuliturbiinin tai tuulivoima-alueen synnyttämän melun vaihteluvoimakkuuden (amplitudimodulaation) määrittämiseen ei tällä hetkellä ole käytettävissä standardoitua menetelmää. Amplitudimodulaation asteen määrittämiseen on kuitenkin olemassa kansainvälisesti käytettyjä menetelmiä, esim. [11, s. 137-139], joita voidaan hyödyntää määrittäessä tuuliturbiini(e)n amplitudimodulaation astetta mahdollisissa turbiinien melupäästön ja tuulivoima-alueiden aiheuttamien immissiotasojen määrittämisissä.

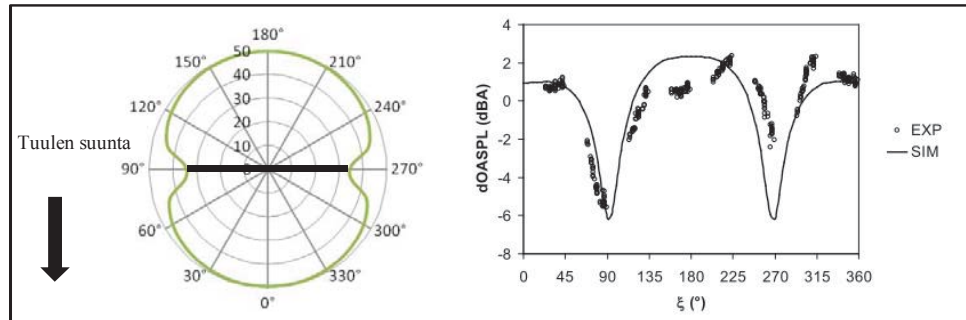
Jos tuulivoimalan melun vaihtelu on hyvin hidasta (alle 0,25 Hz), kuulo ei havaitse sitä helposti. Jos taas vaihtelu on nopeaa (yli 15 ... 20 Hz), alkaa kuulon hitaus rajoittaa vaihtelun seurantakykyä ja ääniaistimus muuttuu karheaksi. Voimakkaimmin koetaan noin 4 Hz:n taajuinen vaihteluvoimakkuus. [11]

Tuulivoimalan tuotaman melun amplitudimodulaation asteen ja tuulivoimalan melun häiritsevyyden välille ei kuitenkaan ole yksikäsitteistä arviointiasteikkoa, joten amplitudimoduloituneen melun mahdollinen häiritsevyys on selvítettävä kussakin tapauksessa erikseen.

3.3.3 Äänilähteen suuntaavuusproblematiikka

Tuulivoimalan melulähteiden suuntaavuutta aiheuttavat lavan pyörimisen synnyttämä aeroakustinen melu sekä voimalamallikohtaisesti myös koneiston melu (esim. jäähdytysilman säleikköjen suuntaus). Tutkimuksissa ja empiirisissä mittauksissa on osoitettu, että lavan yli pyyhkäisevän ilmavirran turbulenssikohina on merkittävin lavan jättöreunalla. Tällöin syntyvä ääniemissio on luonteeltaan dipoli, jossa äänienergia on puolittunut ja vastakkaisvaiheinen lavan reunan eri puolilla.

Syntyvä jättöreunamelun äänenpainetaso lähellä voimalaa on myötä- ja vastatuulen puolilla lähes yhtä voimakas ja 3 – 6 dB alhaisempi sivutuulen puolella lavan molemmilla puolilla (kuva 2). Tästä syntyvä jättöreunamelun suuntaavuus on siis voimalan hetkellisestä suunnasta riippuvainen. Tuulivoimala seuraa kuitenkin mahdollisimman tarkasti hetkellistä tuulen suuntaa, jolloin pidemmän ajanjakson tarkasteluissa voimalan navan kääntyminen muuttaa jättöreunamelun suuntaavuuden vaikutusta tuulen suuntatilaston mukaisesti. Suuntaavuuteen voivat vaikuttaa myös koneiston laitteiden melun suuntaavuudet, jotka ovat voimalamallikohtaisia. Tuulivoimalan melun suuntaavuuden mittausta on ohjeistettu mm. IEC 61400-11 standardin Ed. 2.1 versiossa [12].



Kuva 2. Tuulivoimalaitoksen todennettuja suuntaavuuksia eri puolilla voimalaa IEC 61400-11 ed. 2.1 mittausetäisyydellä (= voimalan suurin korkeus, kuva vasemmalla: ref. [13], kuva oikealla: ref. [14]). Sivutuulen suunta on kuvissa atsi-muuttiaasteilla 90° ja 270°, vastatuulen suunta on 180°.

Yleisesti suuntaavuutta ei melumalleissa huomioida mm. ohjelmistorajoitteiden vuoksi. Laskettaessa pitkän ajan teoreettista vaikutusta sellaiselle tilanteelle, jossa tuulen suunta olisi tilastollisesti yhtäläinen joka suuntaan, saadaan noin 0,5 - 1 dB:n vähennys äänipäästön tasoon. Tuulen tilastolliset reaalisuunnat ovat kuitenkin täysin paikkakohtaisia, ja aiheuttavat siten sekä suuremman äänitason laskun että myös mahdollisen nousun mm. vastatuulen puolella. Koska vastatuulen puolella havaitaan kuitenkin yleisesti äänen kaareutumista ylöspäin ja siten äänitason voimakkaamman alenemisen etäisyyden kasvaessa suoran äänisäteen kulkuun

verrattuna, olisi vastatuulen puolen korjaus todennäköisesti väärin vain suuntaavuutta tarkastelemalla. Horisontaalinen suuntaavuus onkin pääsääntöisesti vain IEC 61400-11 mukaisen äänipäästömittauksen etäisyydellä vaikuttava asia.

3.4 Äänen eteneminen

Tässä osassa tarkastellaan ympäristön sekä sään vaikutusta melutasoon ja esitetään ne laskennassa tarvittavat parametrit, joilla päästään riittävään laskentatarkkuuteen. Lähtökohtana tarkastelussa on ympäristömelun mallinnuksen kansainvälinen standardi ISO 9613-2 [3], mutta tarkastelussa on mukana myös kaksi muuta menetelmää Nord2000 [4] ja CONCAWE [5], joissa on ISO 9613-2 standardista poikkeavia lähestymistapoja ja joiltain osin ”oikeampaan” mallinnustulokseen tähtäävä mallinnuslogiikka ja/tai parametrien valintamahdollisuus.

3.4.1 Pistelähteen tuottama äänitaso tarkastelupisteessä

Pistelähteen tuottama keskiäänitaso tarkastelupisteessä lasketaan taajuuksittain kaavasta

$$L_{fT} = L_{fTd0} - A, \quad (1)$$

missä L_{fTd0} on keskiäänitaso referenssietäisyydellä d_0 ($= 1$ m).

Standardin ISO 9613-2 (kappale 6) mukaisesti

$$L_{fTd0} = L_W + D_c - 10 \log_{10}(4\pi), \quad (2)$$

missä L_W on äänitehotaso desibeleissä (re 1 pW), D_c on suuntaavuuskorjaus desibeleissä, koostuen suuntaavuusindeksin D_I ja maaheijastuksesta aiheutuvan näennäistä äänitehon kasvua kuvaavan indeksin D_Ω summasta

$$D_c = D_I + D_\Omega. \quad (3)$$

Jälkimmäinen indeksi ottaa huomioon avaruuskulman Ω , johon ääni leviää

$$D_\Omega = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right). \quad (4)$$

Jos ääni leviää vapaaseen avaruuteen, $\Omega = 4\pi$, jolloin $D_\Omega = 0$; jos puoliavaruuteen, $\Omega = 2\pi$, jolloin $D_\Omega = 3$. Korkeilla äänilähteillä pätee aina $D_\Omega = 0$.

Melumalleissa suuntaavuusparametrit voidaan syöttää ohjelmistosta riippuen joko koko suuntauympyrälle esim. 15° välein (SoundPlan) tai peilattavalle puoliympyrälle (CadnaA). Yksinkertaisemmissa laskentaohjelmissa, kuten WindPro-ohjelmistossa, suuntaavuutta ei voi huomioida suuntauympyrän avulla.

Termi A [dB] on äänen etenemiseen liittyvä vaimennustermi

$$A = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{gr}} + A_{\text{bar}} + A_{\text{misc}}, \quad (5)$$

missä A_{div} on geometrisen etenemisen aiheuttama vaimennus, A_{atm} on ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus, A_{gr} on maaperän absorption aiheuttama vaimennus, A_{bar} on äänen etenemistiellä olevien esteiden aiheuttama vaimennus ja A_{misc} on muiden sekalaisten tekijöiden aiheuttama vaimennus.

Standardissa ISO 9613-2 termi $10\log_{10}(4\pi) = 11$ on sisällytetty vaimennustermiin A_{div} .

Kaavan (5) mukainen etenemisvaimennus ei ota huomioon tuulen vaikutusta. Standardin ISO 9613-2 mukaan se pätee heikossa myötätuulessa, jossa tuulen nopeus on korkeintaan 5 m/s. Meteorologiset vaikutukset, mm. tuulen suunta, voidaan ottaa huomioon meteorologisella korjauksella C_{met} , jolloin kaava (1) tulee muotoon

$$L_{fT} = L_{fT0} - A - C_{\text{met}}. \quad (6)$$

Tuulivoimalan roottorilapojen suuresta koosta johtuen tuulivoimalaa voidaan pitää pistelähteenä vasta hyvin kaukana lähteestä. Eräs kaukokentän ehdoista etäisyydelle r lähteestä on

$$r > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (7)$$

missä D on lähteen suurin dimensio ja λ on aallonpituus. Esimerkiksi roottorilavan dimensiolla 56 m (In Olhavan tuulivoima-alueen turbiinien lavan pituus, ks. luku 4) tämä johtaa minimietäisyyksiin 183 m, 1.83 km, 18.3 km ja 183 km taa-juuksilla 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz ja 10 kHz vastaavasti. Näin ollen tuulivoimalaa voidaan pitää pistelähteenä vain infraäänialueella, joten se tulisi periaatteessa mallintaa jakaantuneena lähteenä.

Jakaantuneen lähteen tuottama äänenpaine laskee etäisyyden kasvaessa varsinkin lähteen läheisyydessä vähemmän kuin pistelähteen vastaava; lisäksi jakaantuneen lähteen suuntaavuus erityisesti lähteen läheisyydessä riippuu etäisyydestä. Pystysuora viivalähde on yksinkertaisin malli jakaantuneelle lähteelle [15]. Pistelähteen ja viivalähteen vaikutusta tuulivoimalan melumallinnustulokseen on tarkasteltu kappaleessa 4.3.2 ja yleisesti ottaen voidaan todeta, että vaikutus on vähäinen.

Ohjeistuksessa on ehdotettu kansainvälisen käytännön mukaisesti yksittäisen tuuliturbiinin melupäästön mallintamista navan kohdalle sijoitettuna pistelähteenä.

3.4.2 Geometrinen etäisyysvaimennus

Pistelähteen tuottama äänikentän geometrinen etäisyysvaimennus referenssietäisyydeltä tarkasteluetäisyydelle on

$$A_{\text{div}} = 20 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad [\text{dB}], \quad (8)$$

missä d on etäisyys lähteestä [m] ja d_0 on referenssietäisyys. Kaavan mukaan äänitaso alenee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Kaava pätee myös geometrisen etäisyysvaimennuksen aiheuttamalle minkä tahansa kahden lähteestä eri etäisyydellä olevan pisteen äänitasoerolle.

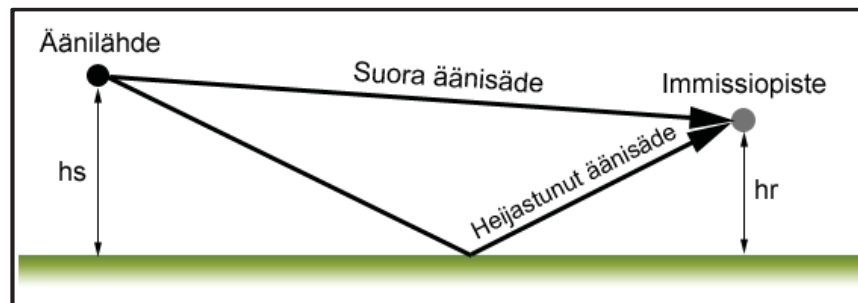
Viivalähteen tuottama äänitaso lähellä lähettä alenee 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa ja kaavassa (8) kerroin 20 korvautuu tällöin kertoimella 10.

3.4.3 Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus

Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus A_{atm} riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Se lasketaan standardin ISO 9613-1 [16] mukaisesti. Standardissa taulukoidut arvot rajoittuvat taajuusalueelle 50 - 10 000 Hz sekä diskreetteihin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoihin, mutta standardissa olevan laskentakaavan avulla esitetyt rajoitteet voidaan ohittaa.

3.4.4 Maaperän vaikutus

Äänilähteestä emittoitua ääniaalto etenee ilmakehässä suoraan vastaanottopisteeseen (immissiopiste), osa äänestä kohtaa puolestaan ensin maanpinnan ja heijastuu siitä takaisin ilmakehään (kuva 3). Lähellä maanpintaa olevassa vastaanottopisteessä havaitaan sekä suoran että heijastuneen ääniaallon yhteisvaikutus. Koska maanpinnasta heijastunut ääni kulkee pidemmän matkan suhteessa suoran säteen ääneen, syntyy samalla taajuudella olevalle suoraan vastaanottopisteeseen edenneelle ja maanpinnasta heijastuneelle äänelle äänen taajuudesta ja välimatkaerosta johtuva taso- ja vaihe-ero.



Kuva 3. Äänisäteen heijastus ja suora äänisäde.

Maanpinnasta heijastuneen äänen voimakkuus vaihtelee lisäksi maanpinnan absorptio-ominaisuuksien mukaan siten, että akustisesti kova maanpinta (esim. vesi, kallio, asfaltti) heijastaa kaiken äänienergian takaisin ja täydellisesti absorboiva maanpinta (pehmeä ja kuohkea maanpinta) imee kaiken äänienergian eikä heijastusta synny. Ideaalitapauksessa suoran ja heijastuneen ääniaallon (tässä tapaukses-

sa yksinkertaistettuna ”äänisäteen”) äänenpainetaso siis lisääntyy 6 dB, jos heijastava pinta oletetaan akustisesti kovaksi. Mikäli kohtaavien äänisäteiden välinen vaihe-ero on vastakkainen, aiheuttaa se destruktiivisen interferenssin, joka periaatteessa kumoaa äänienergian kokonaan. Todellisissa tapauksissa interferenssin suuruus on näiden kahden ääritilanteen välillä ja vaihtelee taajuuden mukaan vaikuttaen vastaanottopisteessä havaitun äänen tasoon ja taajuuteen.

Oktaavikaistaisissa melumalleissa maanpinnan vaikutus on tyypillisesti +6 ... -10 dB:n välillä. Maanpinnan heijastusenergian suuruuteen eri taajuuksilla vaikuttavat erityisesti seuraavat osatekijät:

- Äänisäteen kulkeutumismatkan välinen ero suoran ja heijastuneen äänisäteiden välillä. Tähän vaikuttavat erityisesti äänilähteen korkeus sekä äänilähteen ja vastaanottopisteen välinen etäisyys.
- Äänilähteen taajuusjakauma. Koska äänen aallonpituus on käänteisesti verrannollinen äänen taajuuteen, lisääntyy ääniaallon pituus taajuuden pienentyessä. Taajuuden pieneminen heikentää osaltaan maanpinnan absorption vaikutusta. Äänen edetessä ilmakehässä äänen taajuussisältö muuttuu myös, koska ilmakehän absorptio vaimentaa suuria taajuuksia pieniä taajuuksia enemmän etäisyyden kasvaessa.

Teorian ja mittausten perusteella on todettu, että esim. kuohkean maanpinnan (esim. nurmikko) aiheuttama destruktiivinen interferenssi äänitasoon vaikuttaa tyypillisesti taajuusalueella 140 - 400 Hz siten, että äänilähteen suurempi korkeus siirtää interferenssi-ilmiötä kohti pienempiä taajuuksia. Vastaavasti hyvin pienet taajuudet aiheuttavat konstruktivisen interferenssin ja maaheijastuksen vahvistus onkin täydet + 6 dB. Näin on esimerkiksi Tanskan ohjeistuksessa taajuuksilla 10 - 12,5 Hz onshore etenemismallissa ja taajuuksilla 10 - 25 Hz offshore etenemismallissa.

3.4.4.1 Maaperän vaikutus melumalleissa

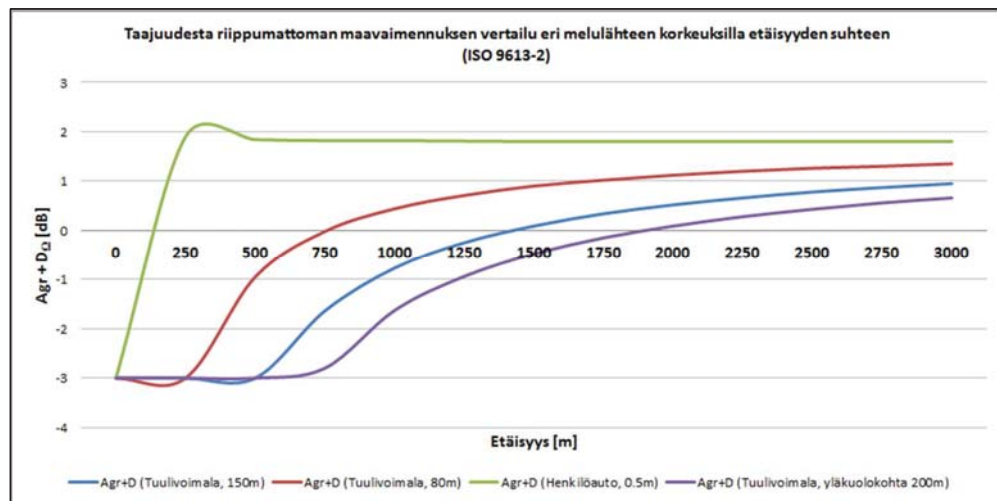
Maaperän vaikutus otetaan melumalleissa huomioon nk. ”Ground Effect” (myöhemmin ” A_{gr} ”) -kerrointa hyödyntäen. Kertoimen avulla voidaan esittää maanpinnan lokaalia tai globaalia heijastavuutta siten, että kertoimella 0 oletetaan maanpinnan olevan akustisesti kova (jää, asfaltti, veden pinta) ja kertoimella 1 pehmeä². Lisäksi melumalleissa voidaan vaikuttaa siihen, lasketaanko A_{gr} taajuuksittain vai kokonaisarvona ilman taajuuksia. Laskennassa maanpinnan vaikutus voidaan jättää myös kokonaan pois. Melumalleissa on A_{gr} kerroin esitetty yleensä ” G ”-kertoimena.

ISO 9613-2 melumallissa (standardin kappale 7.3) taajuuksittain laskettava maa-vaikutus A_{gr} jaetaan kolmeen eri ryhmään melun myötätuulen puolen kaarevuus-säteen perustella. Standardin vaihtoehtoinen malli on tarkoitettu etenkin lähellä maanpintaa tapahtuvalle äänen etenemiselle sekä lähinnä tasaisen maanpinnan tai vakiojyrkkyyden laskentoihin. Ensimmäinen on lähderyhmä A_s , jolle on määritelty rajaetäisyys siten, että se vastaa $30 \cdot h_s$ tai enintään d_s , jossa h_s on äänilähteen korkeus ja d_s kokonaisetäisyys äänilähteestä vastaanottopisteeseen. Vastaanotto-alueen A_r vastaava rajaetäisyys on $30 \cdot h_r$, jossa h_r on vastaanottopisteen korkeus

² Tästä poikkeuksena Nord2000 laskentamalli, jossa maanpinnan kovuus esitetään luokittain maanpinnan ominaisvirtausvastuksen σ [kNsm^{-4}] eri arvoilla.

eli tyypillisesi 1,5 – 4 m. Välialue A_m kattaa näiden kahden välisen alueen. Siten ISO-laskennan mukaan 150 metrin napakorkeuden tuulivoimalalle jo lähdealueen rajaetäisyys olisi yhtälöiden mukaan 4,5 km, jolloin käytännön tasolla laskenta rajautuu varsin usein lähdealueen A_s ja vastaanottoalueen A_r laskentoihin. Kullekin alueelle on omat spesifiset yhtälöt, joiden avulla voidaan laskea maavaimennus oktaaveittain. Lopuksi kunkin alueen maavaimennukset lasketaan yhteen kokonaisvaimennukseksi A_{gr} .

ISO 9613-2:ssa maavaikutus voidaan laskea myös ilman taajuuksia kokonaisarvona vaihtoehtoista menetelmää (nk. alternative method) käyttäen. Standardin yhtälöt (10) ja (11) on laskettu seuraavaan kuvaan eri äänilähteen korkeuksilla (80 metrin napakorkeuden pistelähde, 150 metrin napakorkeuden pistelähde ja siiven pyörimisen yläkohta 200 metrin korkeudella). Vertailuarvona on käytetty henkilöauton 0,5 metrin äänilähteen tyypillistä laskentakorkeutta.



Kuva 4. Taajuudesta riippumattoman maavaimennuksen vertailu eri äänilähteen korkeuksilla ja etäisyyksillä äänilähteestä standardin ISO 9613-2 mukaan. Negatiivinen arvo kuvaa äänitason nousua maaperän heijastusvaikutuksen takia.

Kuvasta nähdään, että melulähteen korkeudella on huomattava vaikutus maavaikutuksen suuruuteen. Matalalla olevien melulähteiden maavaikutus vaikuttaa välittömästi melulähteen jälkeen ja on positiivinen heti noin 125 metrin etäisyyden jälkeen. Napakorkeudeltaan 150 metrin tuulivoimalalla (siiven ylin vaihe on noin 200 metrissä) vastaava nollassa saavutetaan vasta 1300 – 1800 metrin jälkeen.

Nord2000 -laskentamallissa maanpinnan absorptiovakiot poikkeavat ISO 9613-2 mallista siten, että syöttöarvoina käytetään impedanssiluokittain arvoa $A - G$, jonka fysikaalisena perustana on maanpinnan ominaisvirtausvastus σ (kNsm^{-4}).

Taulukko 1. Maanpinnan impedanssiluokat Nord2000 -mallissa, SoundPlan -ohjelmisto 2012.

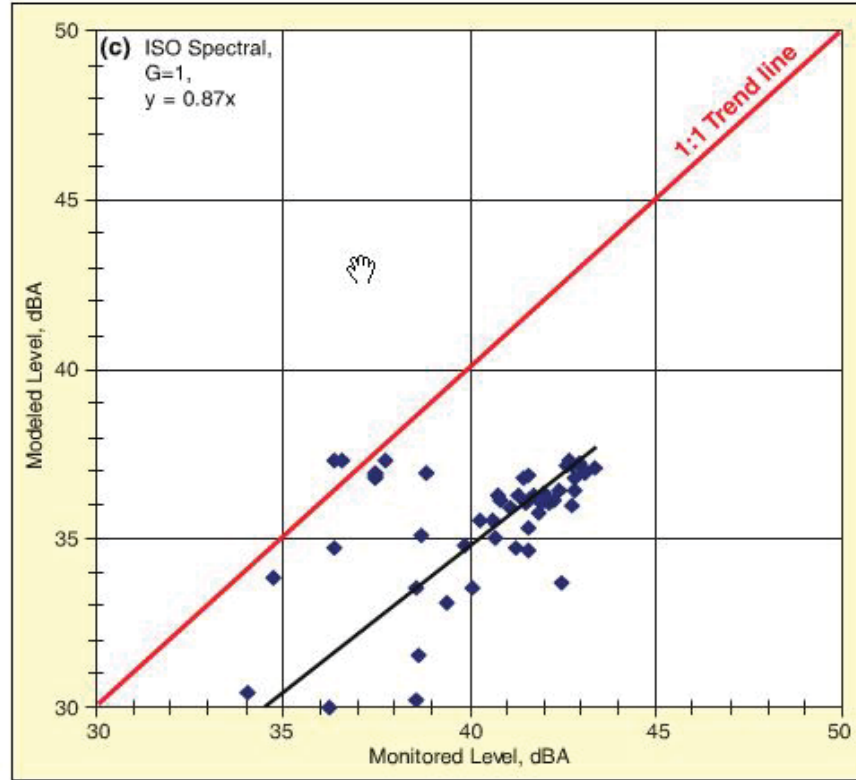
Impedance class	Representative flow resistivity σ (kNsm^{-4})	Range of Nord-test flow resistivity classes	Description
A	12.5	10, 16	Very soft (snow or moss-like)
B	31.5	25, 40	Soft forest floor (short, dense heather-like or thick moss)
C	80	63, 100	Uncompacted, loose ground (turf, grass, loose soil)
D	200	160, 250	Normal uncompacted ground (forest floors, pasture field)
E	500	400, 630	Compacted field and gravel (compacted lawns, park area)
F	2000	2000	Compacted dense ground (gravel road, parking lot)
G	20000	20000	Hard surface (dense asphalt, concrete, water)

Maaperän vaikutus melumalleissa vaihtelee sen mukaan, onko malli yksinkertaistettu (kuten ISO 9613-2), Pohjoismainen laskentamalli 1996 tai kehittynyt malli (Nord2000, Harmonoise), jossa esim. destruktiivinen interferenssi on tarkemmin huomioitu eri taajuuksilla. Esimerkiksi ISO 9613-2 mallissa vaikutus akustisesti kovasta maanpinnasta puolikovaan maanpintaan (yhellä globaalilla arvolla) $G = 0 \Rightarrow 0,5$ on noin -2,5 ... -3 dB immissiopisteen tuloksiin suurentuen etäisyyden kasvaessa.

ISO 9613-2 mallin heikkoutena on erityisesti se, että sitä ei ole suunniteltu korkeiden melulähteiden eikä maastomuodoiltaan vaihtelevan maaston melun etenemisvaimennuksen laskentaan. Näissä tapauksissa asetettaessa maavaikutus esim. akustisesti pehmeälle tai puolikovalle maanpinnalle arvolla $G = 1$ tai $G = 0,5$, validointimittauksissa on havaittu, että mallinnetut tulokset ovat usein mitattuja arvoja alhaisempia [17].

Validointimittausten perusteella on myös havaittu, että maavaikutusta $G = 1$ ei tule käyttää tuulivoimalaitoksia mallinnettaessa todellisuudessa pehmeän maanpinnan alueille, sillä mallinnettu arvo voi olla jopa yli 5 dB alhaisempi kuin mahdollisessa verifointimittauksessa tullaan toteamaan (esim. kuva 5). ISO 9613-2 mallin herkkyys taajuuksellisen maavaikutuksen laskennassa voidaan osittain korjata pienemmäksi, jos immissiopisteen tai laskentaverkon korkeus asetetaan 4 m:n tasolle, mikä vastaa tyypillistä eurooppalaista 1. asuinkerroksen tasoa.

Validointitulosta tarkasteltaessa on myös huomioitava, onko mallinnetuissa melupäästötiedoissa käytetty melupäästö mitattu äänitehoarvo vai IEC TS 61400-14 mukainen tunnusarvo.

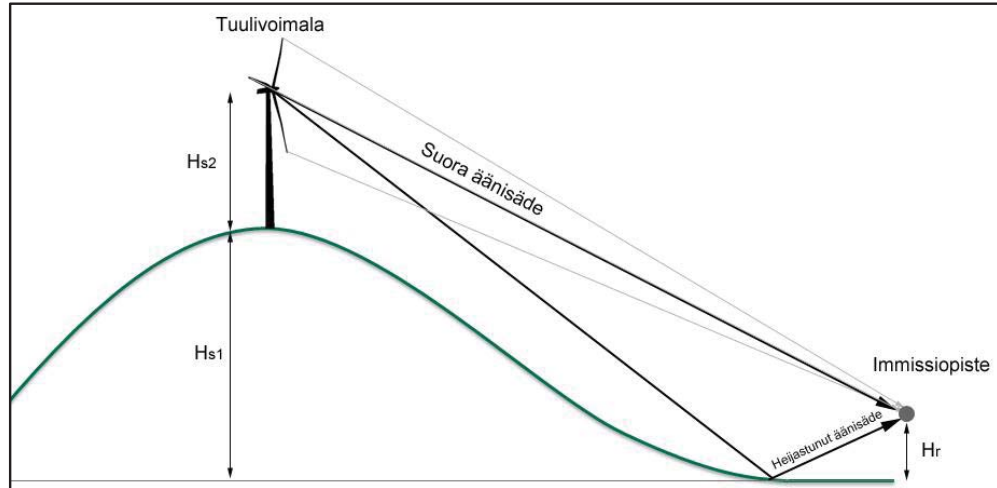


Kuva 5. Tuulivoimaloiden validointimittauksissa havaittuja eroja suhteessa vastaavan tilanteen mallinnettuun tapaukseen käytettäessä ISO 9613-2 mallia maanpinnan maavaikutuksen arvolla $G = 1$. Pystyakselilla mallinnettu melutason arvo, vaaka-akselilla validointimittauksessa todettu melutason arvo [18].

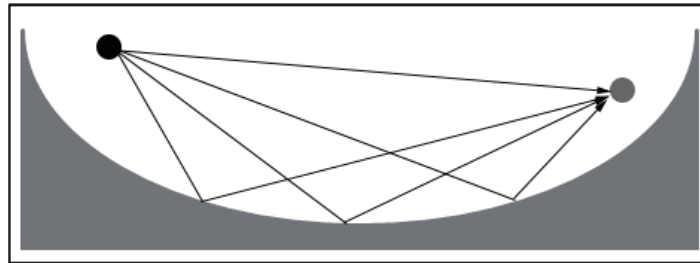
3.4.4.2 Maaperän muodon vaikutus melumalleissa

Maavaikutuksen määrittäminen kumpuilevaan maastoon muodostaa oman erikoistapauksena etenkin, jos melulähteen ja vastaanottopisteen välinen korkeusero kasvaa suureksi (kuva 6). Tällöin äänilähteen korkeus H_s suhteessa immissiopisteen korkeuteen H_r kasvaa korkeuseron suhteessa, jolloin $H_s \approx H_{s1} + H_{s2}$. Maanpinnan korkeuden muutos alhaalla olevaan immissiopisteeseen voi kuitenkin olla tasainen, vaihteleva tai kaareva. Esimerkiksi immissiopisteen sijaitessa vastakummulla äänisäteiden ”kohtaaminen” aiheuttaa äänitason kasvua heijastuneiden säteiden kohdatessa (kuva 7). Vastaavasti äänilähteen sijaitessa kummun takana, synnyttää kumpu itsessään varjoalueen äänilähteen ja immissiopisteen väliin (kuva 8).

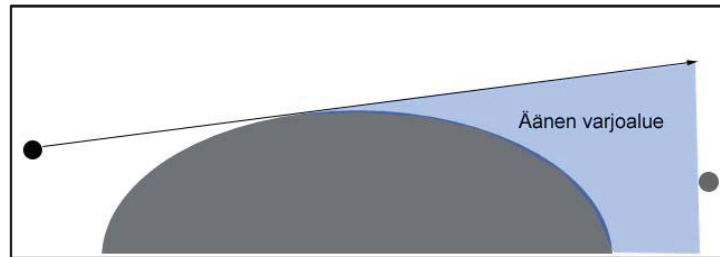
Kumpuileva maasto aiheuttaa myös tuuleen pyörteilyä sekä vertikaalisia tuulen nopeusmuutoksia, joilla on kaikilla vaikutuksia tuulivoimalan aerodynaamiseen äänilähteeseen. Kansainvälisissä validointimittauksissa on havaittu merkittäviä poikkeamia mallinnetuista arvoista, kun esim. ISO 9613-2 mallien parametreinä on käytetty tasaisen maanpinnan kertoimia esim. maavaikutuksen osalta. On siksi perusteltua käyttää konservatiivista lähestymistä ainakin maavaikutuksen osalta, kun korkeusero meluemissiolähteen ja immissiopisteen osalta kasvaa suureksi.



Kuva 6. Maanpinnan korkeuseron vaikutus äänilähteen korkeuteen maaheijastuksen kannalta.



Kuva 7. Heijastuvat äänisäteet vastakummulla.



Kuva 8. Varjoalueen synty kummun taakse.

3.4.5 Meteorologinen korjaus

Standardin ISO 9613-2 mukainen meteorologinen korjaus on

$$C_{\text{met}} = \begin{cases} 0, & d_p \leq 10(h_s + h_f) \\ C_0 \left(1 - 10 \frac{h_s + h_f}{d_p} \right), & d_p > 10(h_s + h_f), \end{cases} \quad (9)$$

missä h_s on lähteen korkeus [m], h_f on vastaanottopisteen korkeus [m], d_p on lähte- ja vastaanottopisteen etäisyyden projektio maanpinnalla [m] ja C_0 on tekijä [dB], joka riippuu tuulen nopeuden ja suunnan sekä lämpötilagradienien lokaa- lista meteorologisesta статистиikasta. Standardin mukaan C_0 :n arvot rajoittuvat vä-

lille 0 - 5 dB ja yli 2 dB suuremmat arvot ovat poikkeuksellisia. Parametrilla C_0 ei ole mitään fysikaalisia perusteita, sen riippuvuutta esimerkiksi ilmakehän stabiilisuusluokista ja tuulen nopeudesta ja suunnasta ei ole esitetty. Tarkemman tiedon puuttuessa vastatuulietenemiseen ($\pm 45^\circ$) voidaan käyttää arvoa $C_0 = 1$ ja muihin suuntiin $C_0 = 0$.

Nord2000-menetelmän lähtökohtana on esittää äänen nopeus c korkeuden funktiona kombinaationa logaritmisesta ja lineaarisesta profiilista [19]

$$c(h) = A \ln\left(1 + \frac{h}{h_0}\right) + Bh + c(0), \quad (10)$$

missä h on korkeuskoordinaatti [m], h_0 on vakio [m] (roughness length) ja $c(0)$ on äänen nopeus, kun $h = 0$. Erillistä meteorologista korjausta ei tehdä, vaan meteorologiset efektit otetaan huomioon geometrisessa vaimentumisessa äänennopeuden paikkariippuvuuden avulla.

Parametrien A ja B määrittämiseksi määritellään aluksi tuuliluokat tuulen nopeuden perusteella taulukon 2 mukaisesti ja ilmakehän stabiilisuusluokitus vuorokaudenajan ja pilvisyyden perusteella taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 2. Tuuliluokat.

Tuulen nopeus [m/s] ($h = 10$ m)	Tuuliluokka
0 ... 1	W1
1 ... 3	W2
3 ... 6	W3
6 ... 10	W4
10 ...	W5

Taulukko 3. Ilmakehän stabiilisuusluokitus.

Vuorokaudenaika	Pilvisyysaste	Stabiilisuusluokka
päivä	0/8 ... 2/8	S1
päivä	3/8 ... 5/8	S2
päivä	6/8 ... 8/8	S3
yö	5/8 ... 8/8	S4
yö	0/8 ... 4/8	S5

Tuuliluokan perusteella määrätään kitkanopeus u_* (friction velocity) sekä tuuliluokan ja stabiilisuusluokan perusteella määrätään lämpötilaskaala T_* ja Monin-Obukhov –pituus L . Näiden perusteella määritetään parametrit A ja B äänennopeuden määrittämiseksi yhtälön (10) mukaan.

CONCAWE-menetelmä käyttää ilmakehän Pasquill-stabiilisuusluokkia ja tuulen nopeutta ja suuntaa lähtökohtana meteorologisen korjauksen K_4 määrittämiseksi. Meteorologisten korjausten C_0 ja K_4 välillä ei ole mitään selkeää riippuvuutta.

Ilmakehän stabiilisuus voidaan esittää Pasquill-luokkien avulla. Pasquill-luokat riippuvat tuulen nopeudesta, tuulen nopeusprofiilista, pilvisyydestä ja auringon asennosta horisonttiin nähden. Hyvin epästabiili ilmakehä (A): pilvisyys alle 50 %, lämpötila korkea, heikko tuuli, aurinko ylhäällä. Hyvin stabiili ilmakehä (F): pilvisyys alle 75 %, heikko tai kohtalainen tuuli, aurinko alhaalla. Stabiili ilmakehä (E ja F -luokat) ovat huomattavan yleisiä yöaikaan ja syksyllä, epästabiili ilmakehä on yleisempi päivällä ja keväällä. Pasquill-luokat on esitetty taulukossa 4.

Parametri m kuvaa tuuliprofiilin jyrkkyyttä

$$\frac{V_{h_2}}{V_{h_1}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (11)$$

missä h_1 ja h_2 ovat kaksi korkeuskoordinaattia sekä V_{h_1} ja V_{h_2} ovat tuulen nopeudet vastaavilla korkeuksilla.

Taulukko 4. Ilmakehän stabiilisuusluokat Pasquill-luokituksen mukaan.

Pasquill-luokka	Kuvaus	m (shear exponent)
A	hyvin epästabiili	0.09
B	kohtalaisen epästabiili	0.20
C	neutraali	0.22
D	hieman stabiili	0.28
E	kohtalaisen stabiili	0.37
F	hyvin stabiili	0.41

Taulukossa 5 on esitetty CONCAVEN meteorologiset kategoriat Pasquill-luokkien ja tuulen nopeuden ja suunnan funktiona. Kategoriassa 4 ei ole meteorologisia vaikutuksia. Meteorologinen korjaus K_4 määräytyy meteorologisen kategorian perusteella.

Taulukko 5. CONCAWEn meteorologiset kategoriat Pasquill-luokkien ja tuulen nopeuden ja suunnan funktioina. Negatiivinen nopeus liittyy vastatuuleen etenemiseen.

Meteorologinen kategoria	Pasquill-luokka		
	A, B	C, D	E, F
1	... -3	–	–
2	-3 ... -0.5	... -3	–
3	-0.5 ... 0.5	-3 ... -0.5	... -3
4	0.5 ... 3.0	-0.5 ... 0.5	-3 ... -0.5
5	3.0 ...	0.5 ... 3.0	-0.5 ... 0.5
6	–	3.0 ...	0.5 ... 3.0

Pasquill-luokat on toisinaan esitetty myös muodossa, jossa ”kohtalaisen epästabiilin” ja ”neutraalin” välissä on luokka ”hieman epästabiili”, jota on tällöin merkitty C:llä, jolloin taulukon 4 luokat C...F muuttuvat luokiksi D...G. Luokka ”hieman epästabiili” on taulukossa 5 ”neutraalin” ja ”hieman stabiilin” kanssa samassa sarakkeessa.

3.4.6 Pienitaajuisten melun etenemisvaimennus

Tanskan ympäristöministeriö on julkaissut tuulivoimaloita koskevan ohjeen [20], jossa on myös pienitaajuisten melun (10...160 Hz) laskennan yksinkertainen periaate. Lähtökohtana on kaavojen (1), (2) ja (5) mukainen esitys, missä ei oteta huomioon suuntaavuuskorjausta D_c , estevaimennusta A_{bar} eikä sekalaisten vaikutusten korjausta A_{misc} . Taulukossa 6 on esitetty maavaikutus ja ilmakehän absorptioon aiheuttama vaimennus ohjeen mukaan. Ilmakehän absorptiovaimennusta ei ole eritelty lämpötilan ja kosteuden perusteella, vaan kaikissa tapauksissa käytetään ilman lämpötilan 10 °C ja ilman suhteellisen kosteuden 80 % mukaisia ilmakehän vaimennuksia.

Offshore-turbiinien osalta käytetään offshore-maavaikutusta, jos immission laskentapiste on rannan välittömässä läheisyydessä ja onshore-maavaikutusta, jos laskentapiste on maalla vähintään 200 m etäisyydellä rannasta. Näiden väliin jäävällä alueella voi käyttää näistä kahdesta arvosta lineaarisesti interpoloitua arvoa.

Menetelmää ei ole installoitu kaupallisiin ohjelmiin, joten ainoa tapa käyttää sitä on erillislaskenta.

Taulukko 6. Maavaikutus ja ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus pienitaajuiselle melulle [20]³.

Taajuus [Hz]	A_{gr} [dB], onshore	A_{gr} [dB], offshore	A_{atm} [dB/km]
10	6.0	6.0	0.0
12.5	6.0	6.0	0.0
16	5.8	6.0	0.0
20	5.6	6.0	0.0
25	5.4	6.0	0.02
31.5	5.2	5.9	0.03
40	5.0	5.9	0.05
50	4.7	5.8	0.07
63	4.3	5.7	0.11
80	3.7	5.5	0.17
100	3.0	5.2	0.26
125	1.8	4.7	0.38
160	0.0	4.0	0.55

4 Laskentalogiikan ja parametrivalinnan testaus eri laskentaohjelmilla

Tässä luvussa tarkastellaan VTT:n, Pöyryn ja Rambollin ympäristömelun mallinnukseen käyttämien laskentaohjelmien mahdollisiin laskentatulosten eroavaisuuksiin liittyviä seikkoja erityisesti sääolosuhteiden osalta. Tarkastelua varten laskettiin 11 erilaista referenssitapausta käytössä olevilla eri ohjelmistoilla ja malleilla. Tavoitteena oli ottaa kantaa siihen miten lähtöarvoja tulisi soveltaa mallinnuksessa ja tulosten tulkinnassa eri malleja käytettäessä. Mallinnuksen kohteena oli Tuulivatti Oy:n Iin Olhavan tuulivoimapuisto.

Vertailussa käytetyt laskentaohjelmat ja äänen etenemismallit ovat:

- CadnaA, ISO 9613-2
- WindPro, ISO 9613-2
- SoundPlan, ISO 9613-2 ja Nord2000.

³ Tanskan pienitaajuisen melun vaimennusarvot ilmakehän absorptiolle ovat lämpötilalle 10 °C ja ilman suhteelliseen kosteuteen 80 %, joten ne poikkeavat hieman liitteen 1 mallinnusohjeistusehdotuksen arvoista.

Jokaisella ohjelmalla laskettiin 11 erilaista ennalta määrättyä laskentatapausta, joiden parametreja pidettiin Suomen sääoloissa tyypillisinä ja realistisina.

4.1 Mallien lähtötiedot ja immissiopisteiden lasketut A-äänitasot

4.1.1 Emissio

Mallinnettavan tuulivoima-alueen kaikki kahdeksan tuulivoimalaa ovat tyypiltään Vestas V112. Niiden napakorkeus on 140 m ja roottorin lavan pituus 56 m. Tuulivoimalat mallinnettiin pistelähteinä, joiden korkeus maasta oli 140 m. Olhavan tuulivoima-alueen tuulivoimaloiden koordinaatit on esitetty taulukossa 7.

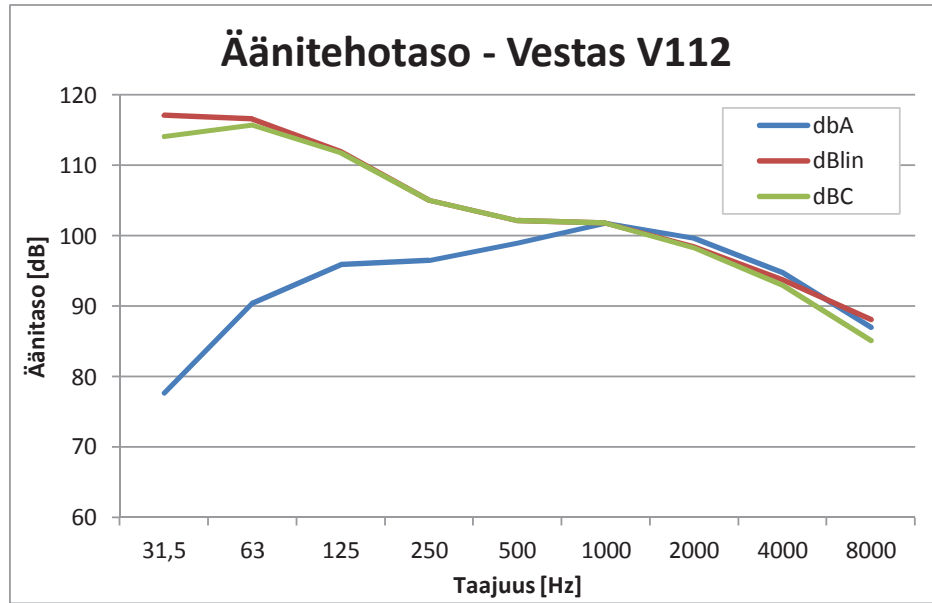
Taulukko 7. Mallinnuksessa käytettyjen lähteiden koordinaatit.

Tuulivoimalan numero	X (KKJ2)	Y (KKJ2)
1	2563437.85	7265944.63
2	2563445.69	7265405.17
3	2563992.26	7265208.99
4	2564577.17	7265385.73
5	2563593.73	7266422.44
6	2563801.29	7266798.21
7	2565347.26	7265512.91
8	2565078.02	7266373.51

Koska Vestas V112 tuulivoimalan äänitehon kokonaistaso tai spektriä ei ollut julkisesti saatavilla, käytettiin laskennassa kyseisestä tuulivoimalamallista kirjallisuudesta löydettyä terssikaistaspektriä oktaavikaistoihin muutettuna. Tämä spektri on esitetty taulukossa 8 ja kuvassa 9. Melupäästö on ilmoitettu tuulen nopeudella 8 m/s ja mitattuun arvoon on lisätty 0,5 dB:n ”varmuusmarginaali”. [21]

*Taulukko 8. Mallinnuksessa käytetyn tuulivoimalan äänitehotaso oktaavikaistoit-
tain eri taajuuspainotuksilla.*

Oktaavikaista [Hz]	dBlin	dBA	dB C
31.5	117.1	77.7	114.1
63	116.6	90.4	115.8
125	112.0	95.9	111.8
250	105.1	96.5	105.1
500	102.2	99.0	102.2
1000	101.8	101.8	101.8
2000	98.5	99.7	98.3
4000	93.8	94.8	93.0
8000	88.1	87.0	85.1
Kokonaistaso		106,5	



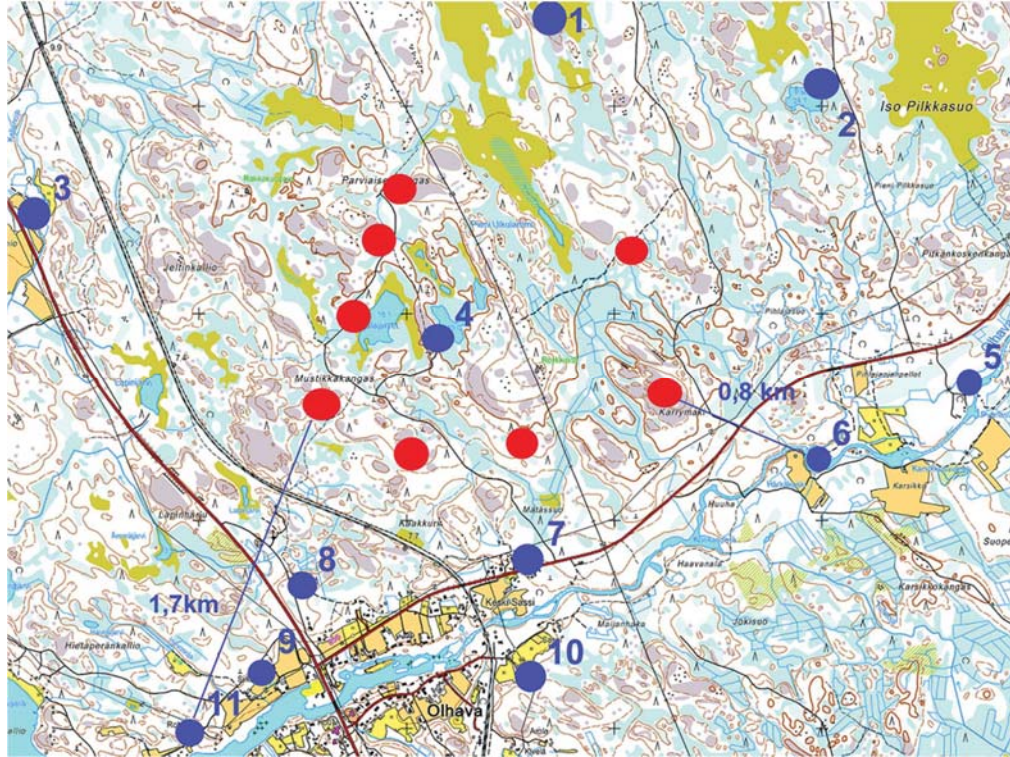
Kuva 9. Mallinnuksessa käytetyn tuulivoimalan äänitehotaso eri taajuuspainotuksilla.

4.1.2 Immissio

Immissio- eli vastaanottopisteiksi valittiin 11 pistettä eri kohdista ja suunnista alueen maastoa. Immissiopisteen lyhyin etäisyys lähimpään tuulivoimalaan eli emissiopisteeseen oli n. 430 m ja pisin etäisyys lähimpään tuulivoimalaan 1700 m. Mallinnuksessa immissiopisteiden korkeus maasta oli oletusarvoisesti 2 m. Vastaanottopisteiden koordinaatit on esitetty taulukossa 9. Kuvassa 10 on puolestaan esitetty emissio- ja immissiopisteet alueen maastokartalla.

Taulukko 9. Mallinnuksessa käytettyjen immissiopisteiden koordinaatit.

Vastaanotto- piste	X	Y
1	2564707.4	7267290.8
2	2566040.2	7267058.9
3	2562334.5	7266215.8
4	2564279.8	7265697.3
5	2566834.9	7265591.3
6	2566128.9	7265189.5
7	2564690.0	7264648.1
8	2563679.5	7264447.5
9	2563521.7	7264019.9
10	2564786.4	7264071.0
11	2563190.0	7263714.7

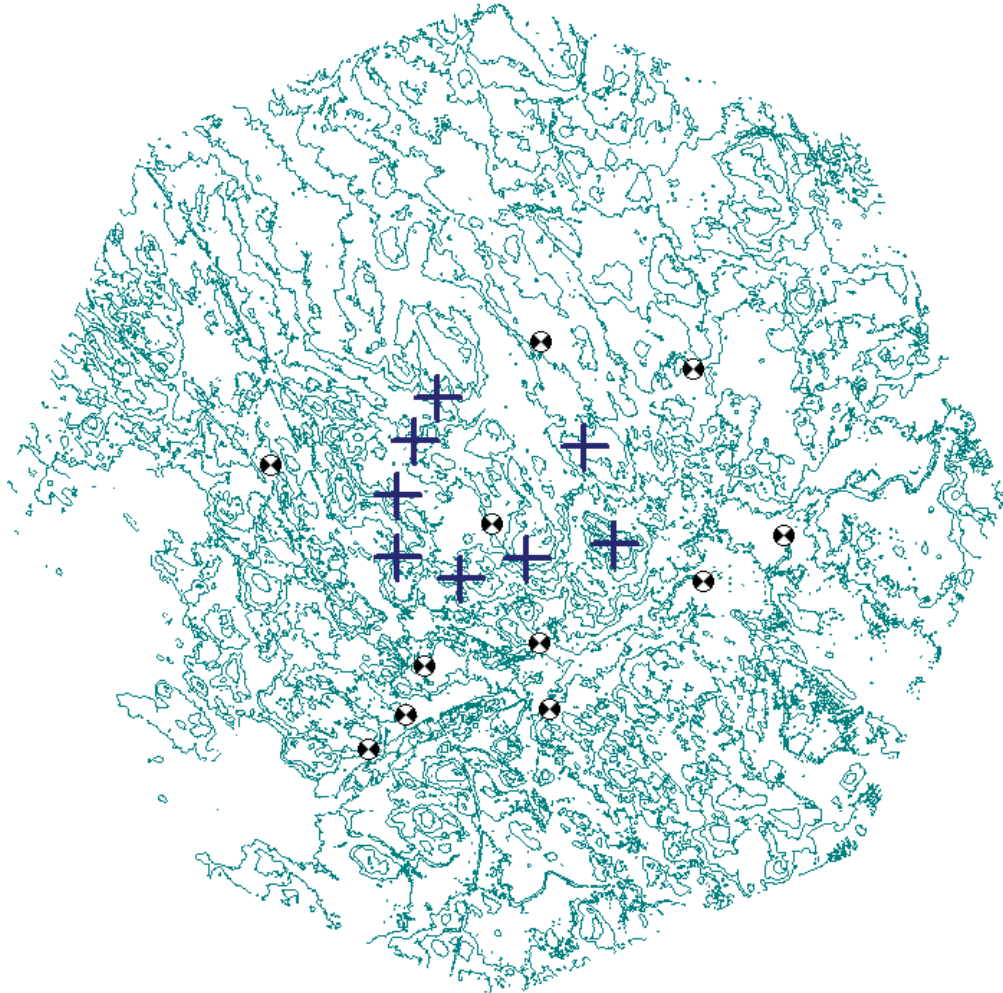


Kuva 10. Mallinnuksessa käytettyjen emissiopisteiden (punainen piste) ja immisio pisteiden (sininen piste) paikat maastokartalla.

4.1.3 Maasto

Mallinnuksissa käytettiin mallinnettavalle alueelle kolmea eri korkeusresoluutiolla olevaa maaston topografiaa. Ne olivat laserkeilattua aineistoa, joiden alkuperäiset pystyresoluutiot olivat 0,5 m, 1 m sekä 2,5 m vaakaresoluution ollessa n. 10 cm. Vaakaresoluutio yksinkertaistettiin ympäristömelulaskennassa riittävään 1 m resoluutioon. Laskenta-alue oli noin 8,8 km² kokoinen. Ennen mallinnusta päätettiin yhteisesti että metsää ja vesistöjä ei mallinneta erikseen. Lisäksi heijastusten lukumääräksi sovittiin yksi. Maaston suurin korkeusero on noin 10 m.

Kuvassa 11 on esitetty 2,5 m pystyresoluutiolla oleva laskenta-alueen topografia. Kuvassa olevat siniset ristit ovat emissiopisteitä ja valkomustat ympyrät immisio pisteitä.



Kuva 11. Laskenta-alueen topografia 2.5 m:n pystyresoluutiolla.

4.1.4 Sää

Tuulen suunnan ja nopeuden huomioonottaminen eri laskentamalleilla on hyvin toisistaan poikkeavaa. ISO 9613-2 –mallilla tuulen nopeutta tai suuntaa ei ole mahdollista ottaa huomioon. Nord2000 mallissa sekä tuulen suunta että nopeus on mahdollista huomioida laskennoissa. Poikkeavista mahdollisuuksista johtuen sekä tuulen suunta että nopeus päätettiin jättää huomioimatta, koska se oli ainoa tapa saada tuuliolosuhteet samoiksi käytettyjen ohjelmien kesken. Ilman lämpötila sekä kosteus pidettiin oletusarvoissaan eli 15 °C ja 70 %. Huomattakoon, että tuulen nopeus on tavallaan otettu huomioon jo tuulivoimalan äänitehotasoa määrittäessä. Taulukossa 8 ilmoitetut melupäästöarvot on määritetty tuulen nopeuden ollessa 8 m/s 10 m:n referenssikorkeudella maan pinnasta.

4.1.5 Oletusarvoilla lasketut immissiotasot

Eri ohjelmilla ja malleilla lasketut immissiopisteiden A-painotetut melutasot käytettäessä oletusparametreja mallinnuksessa on esitetty taulukossa 10. Oletusarvot olivat:

- Topografian pystyresoluutio 0,5 m
- Maaperän vaimennus $G = 0$ (Class G Nord2000 mallissa)
- Immissiopisteen korkeus $h = 2$ m

- Ilman lämpötila $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ilman kosteus $R_h = 70 \text{ } \%$

Taulukko 10. Mallinnuksen oletusarvoilla lasketut A-painotetut äänitasot eri ohjelmilla sekä ISO 9613-2 ja Nord2000 malleilla laskettuna.

Immissio- piste	Eri ohjelmilla ja malleilla lasketut immissiopisteiden A-painotetut äänitasot [dB]			
	CadnaA (ISO 9613-2)	WindPro (ISO 9613-2)	SoundPlan (ISO 9613-2)	SoundPlan (Nord2000)
1	39.9	39.8	39.7	40.0
2	36.2	36.2	35.8	38.6
3	38.6	38.5	38.3	38.6
4	47.3	47.2	47.3	46.1
5	34.1	34.0	33.6	34.8
6	37.8	38.8	38.4	37.9
7	42.1	42.0	42.0	42.3
8	40.9	40.9	40.8	40.2
9	37.1	37.1	36.8	37.4
10	37.3	37.2	36.8	37.1
11	34.6	34.5	33.7	34.6

Kuten taulukosta 10 voidaan havaita, CadnaA- ja WindPro-ohjelmilla (ISO 9613-2 malli) lasketut immissiopisteiden A-painotetut äänitasot ovat hyvin lähellä toisiinsa (enintään 0,1 dB:n ero) lukuun ottamatta pistettä 6, jossa ero on 1,0 dB. SoundPlan-ohjelmalla (ISO 9613-2 malli) saadaan yleisesti ottaen hieman matalampia A-äänitasoja verrattuna CadnaA:lla tai WindProlla laskettuun tasoon, maksimieron ollessa -0,8 ... -0,9 dB pisteessä 11. SoundPlan-ohjelman Nord2000 mallilla laskettuna äänitasot vaihtelevat ISO 9613-2 mallilla laskettuihin tasoihin verrattuna joiltain osin huomattavan paljon, esim. immissiopisteen 2 taso on 2,4 ... 2,8 dB korkeampi, toisaalta immissiopisteen 4 taso on 1,1 ... 1,2 dB matalampi. Eniten poikkeavat tasot ja immissiopisteet, joissa tasot esiintyvät on taulukossa 10 korostettu keltaisella värillä.

Selkeää yhteyttä vaihtelevien tasojen ja immissiopisteiden sijainnin välillä on vaikea löytää. Pistettä 11 lukuun ottamatta immissiopisteet sijaitsevat tosin veden äärellä (järvi, joki), millä voi olla vaikutusta mallinnustulokseen korkeusresoluution kautta.

4.2 Varioidut parametrit

Mallinnuksissa käytetyt oletusparametrit olivat siis:

- Topografian pystyresoluutio 0.5 m
- Maaperän vaimennus $G = 0$
- Immissiopisteen korkeus $h = 2 \text{ m}$
- Ilman lämpötila $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ilman kosteus $R_h = 70 \text{ } \%$

Taulukossa 11 on esitetty mallinnuksissa varioidut parametrit.

Taulukko 11. Mallinuksissa varioidut parametrit.

Tapaus	varioitavan parametrin arvo
1	Topografian pystyresoluutio 0.5 m
2	Topografian pystyresoluutio 1 m
3	Topografian pystyresoluutio 2.5 m
4	Maaperän vaimennus $G = 0.25$
5	Maaperän vaimennus $G = 0.5$
6	Immissiopisteen korkeus $h = 4$ m
7	Ilman lämpötila $T = 0$ °C
8	Ilman kosteus $R_h = 30$ %
9	Immissiopisteen korkeus $h = 4$ m, maaperän vaimennus $G = 0.5$

4.2.1 Vertailutulosten esittämistapa

Mallinnustulosten havainnollistamiseksi vertailutulokset on esitetty taulukkomuodossa siten että tulosten erot on ilmoitettu lukuarvon lisäksi värein. Alle 3 dB ero on esitetty käytetyn värin (punainen versus sininen) vaaleammilla sävyillä. Tätä suuremmat ero on esitetty kyseisen värin vahvimmalla sävyillä.

Kuvassa 12 on esimerkki vertailun esitystavasta. Esimerkissä on vertailtavina laskentatapauksina ”Topografia 0.5 m” sekä ”Topografia 2.5 m”. Immissiopisteiden (1 - 11) mallinnettujen kokonaisäänitasojen keskinäiset erot on kuvailtu värikoodein. Tässä tapauksessa sininen kuvaa sitä että mallinnustulos ”Topografia 2.5 m” antaa suuremman tuloksen. Samalla lailla punainen kuvaa sitä että mallinnustulos ”Topografia 0.5 m” antaa suuremman laskentatuloksen.

Immissiopiste										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.8	2.3	0.2	1.0	0.6	1.9	0.0	1.2	0.3	0.2	0.7

A: Vertailtavat mallinnustapaukset.
 B: Immissiopisteen 6 tulos on ”Topografia 2.5 m”-mallinnustapauksella 1.9 dB suurempi.
 C: Immissiopisteen 11 tulos on ”Topografia 0.5 m”-mallinnustapauksella 0.7 dB suurempi.

Kuva 12. Esimerkki käytetystä vertailun esitystavasta. A: Vertailtavat mallinnustapaukset. B: Immissiopisteen 6 tulos on ”Topografia 2.5 m”-mallinnustapauksella 1.9 dB suurempi. C: Immissiopisteen 11 tulos on ”Topografia 0.5 m”-mallinnustapauksella 0.7 dB suurempi.

4.2.2 Mallinnohjelmistojen keskinäinen vertailu

Mallinnohjelmistoissa saatavilla olevat etenemismallit vaihtelevat ohjelmistoitain eikä kaikkiin ohjelmistoihin ole saatavilla esimerkiksi Nord2000 -etenemismallia. Tämän takia mallinnohjelmien keskinäinen vertailu suoritettiin ISO 9613-2 -etenemismallia käyttäen koska se oli ainoa kaikille mallinnohjelmeille yhteinen etenemismalli.

CadnaA (ISO 9613-2)				vs.	WindPro (ISO 9613-2)						
Immissiopiste											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Topografia 0.5 m											
0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	
Topografia 1 m											
0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	
Topografia 2.5 m											
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	
Maavaimennus G = 0.25											
0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	
Maavaimennus G = 0.5											
0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	
korkeus h = 4m											
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	
Ilman lämpötila t = 0°C											
0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	1.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	
Ilman Kosteus Rh = 30%											
0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	
korkeus h=4m, Maavaimennus G = 0,5											
0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	

Kuva 13. CadnaA ja WindPro -ohjelmistojen keskinäinen vertailu ISO 9613-2-etenemismallilla.

CadnaA (ISO 9613-2)				vs.	SoundPlan (ISO 9613-2)						
Immissiopiste											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Topografia 0.5 m											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.5	0.6	0.1	0.1	0.3	0.5	0.9	
Topografia 1 m											
0.2	0.3	0.3	0.1	0.4	0.7	0.1	0.1	0.4	0.5	0.8	
Topografia 2.5 m											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.5	0.2	0.2	0.0	0.3	0.2	1.3	
Maavaimennus G = 0.25											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	
Maavaimennus G = 0.5											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.5	0.0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.8	
korkeus h = 4m											
0.2	0.4	0.2	0.0	0.4	0.8	0.1	0.0	0.2	0.2	0.6	
Ilman lämpötila t = 0°C											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.5	0.7	0.1	0.1	0.4	0.4	0.8	
Ilman Kosteus Rh = 30%											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.5	0.7	0.1	0.1	0.3	0.4	0.9	
korkeus h=4m, Maavaimennus G = 0,5											
0.2	0.4	0.2	0.0	0.4	0.2	0.0	0.1	0.3	0.2	0.5	

Kuva 14. CadnaA ja SoundPlan -ohjelmistojen keskinäinen vertailu ISO 9613-2-etenemismallilla.

WindPro (ISO 9613-2)				vs.	SoundPlan (ISO 9613-2)						
Immissiopiste											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Topografia 0.5 m											
0.1	0.4	0.2	0.1	0.4	0.4	0.0	0.1	0.3	0.4	0.8	
Topografia 1 m											
0.1	0.3	0.2	0.0	0.3	0.3	0.0	0.1	0.4	0.4	0.8	
Topografia 2.5 m											
0.1	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2	0.1	0.0	0.3	0.1	1.3	
Maavaimennus G = 0.25											
0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.4	0.0	0.1	0.3	0.4	0.8	
Maavaimennus G = 0.5											
0.2	0.4	0.3	0.0	0.4	0.4	0.1	0.1	0.3	0.4	0.8	
korkeus h = 4m											
0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.5	
Ilman lämpötila t = 0°C											
0.1	0.4	0.2	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.7	
Ilman Kosteus Rh = 30%											
0.2	0.4	0.2	0.0	0.5	0.4	0.1	0.1	0.3	0.4	0.8	
korkeus h=4m, Maavaimennus G = 0,5											
0.1	0.3	0.1	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.5	

Kuva 15. WindPro ja SoundPlan -ohjelmistojen keskinäinen vertailu ISO 9613-2 -etenemismallilla.

Yhteenvetona ohjelmistojen välisestä vertailusta ISO 9613-2 mallia käytettäessä voidaan todeta seuraavaa:

- CadnaA- ja WindPro-ohjelmilla saadaan melko yhtenevät A-äänitasot eri immissiopisteissä lukuun ottamatta immissiopistettä 6, jonka kohdalla WindPro-ohjelma antaa systemaattisesti korkeamman A-äänitason (0,3 ... 1,1 dB) kaikilla varioiduilla mallinnusparametrien arvoilla.
- SoundPlan-ohjelmalla laskien saadaan systemaattisesti CadnaA- tai WindPro-ohjelmalla laskettuja matalampia A-äänitasoja eri immissiopisteissä lukuun ottamatta immissiopistettä 6, jonka kohdalla SoundPlan antaa CadnaA:ta korkeamman tason (max 0,8 dB) lähes kaikilla varioiduilla mallinnusparametrien arvoilla.

4.2.3 Mallinnusparametrien ohjelma- ja algoritmikohtaiset vertailut

Immissiopiste										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 1 m				
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Topografia 1 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Maavaimennus G = 0.25					vs.	Maavaimennus G = 0				
1.4	1.3	1.3	1.2	1.4	1.0	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0				
2.6	2.6	2.6	2.3	2.7	1.9	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0.25				
1.2	1.3	1.3	1.1	1.3	0.9	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3
korkeus h = 4m					vs.	korkeus h = 2m				
0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ilman lämpötila t = 0°C					vs.	Ilman lämpötila t = 15°C				
0.0	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.3
Ilman Kosteus Rh = 30%					vs.	Ilman Kosteus Rh = 70%				
0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6
h=4m, G = 0,5					vs.	h=2m, G = 0				
1.9	1.9	1.9	1.8	2.0	1.2	1.9	1.8	1.9	2.0	2.1

Kuva 16. Mallinnustulosten vertailu CadnaA -ohjelmistolla ja ISO 9613-2 -laskentamallilla.

Immissiopiste										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 1 m				
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Topografia 1 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Maavaimennus G = 0.25					vs.	Maavaimennus G = 0				
1.3	1.4	1.3	1.2	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0				
2.5	2.6	2.6	2.3	2.7	2.5	2.5	2.5	2.7	2.6	2.7
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0.25				
1.2	1.3	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
korkeus h = 4m					vs.	korkeus h = 2m				
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ilman lämpötila t = 0°C					vs.	Ilman lämpötila t = 15°C				
0.0	0.2	0.1	0.2	0.3	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Ilman Kosteus Rh = 30%					vs.	Ilman Kosteus Rh = 70%				
0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
h=4m, G = 0,5					vs.	h=2m, G = 0				
1.9	2.0	1.9	1.8	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0

Kuva 17. Mallinnustulosten vertailu WindPro -ohjelmistolla ja ISO 9613-2 -laskentamallilla.

Immissiopiste										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.3	0.5
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 1 m				
0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Topografia 1 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5
Maavaimennus G = 0.25					vs.	Maavaimennus G = 0				
1.4	1.3	1.3	1.2	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0				
2.6	2.6	2.6	2.3	2.7	2.5	2.5	2.5	2.7	2.6	2.7
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0.25				
1.2	1.3	1.3	1.1	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3
korkeus h = 4m					vs.	korkeus h = 2m				
0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.3	0.3
Ilman lämpötila t = 0°C					vs.	Ilman lämpötila t = 15°C				
0.0	0.2	0.1	0.3	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.4
Ilman Kosteus Rh = 30%					vs.	Ilman Kosteus Rh = 70%				
0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
h=4m, G = 0,5					vs.	h=2m, G = 0				
1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	1.6	1.8	1.8	1.9	1.7	1.7

Kuva 18. Mallinnustulosten vertailu SoundPlan -ohjelmistolla ja ISO 9613-2 -laskentamallilla.

Immissiopiste										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 2.5 m				
0.8	2.3	0.2	1.0	0.0	1.9	0.0	1.2	0.3	0.2	0.7
Topografia 0.5 m					vs.	Topografia 1 m				
0.2	2.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.3	0.1	0.2
Topografia 1 m					vs.	Topografia 2.5 m				
1.0	0.0	0.3	0.9	0.1	1.9	0.1	0.9	0.6	0.1	0.5
Maavaimennus G = 0.25					vs.	Maavaimennus G = 0				
1.1	2.6	1.8	0.4	2.4	1.3	1.5	0.9	2.1	1.5	1.9
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0				
1.7	4.2	2.3	0.7	3.3	1.9	2.4	1.4	2.7	1.9	2.6
Maavaimennus G = 0.5					vs.	Maavaimennus G = 0.25				
0.6	1.6	0.5	0.3	0.9	0.6	0.9	0.5	0.6	0.4	0.7
korkeus h = 4m					vs.	korkeus h = 2m				
0.7	2.5	0.9	0.2	0.9	0.4	0.5	0.3	0.8	0.2	0.9
Ilman lämpötila t = 0°C					vs.	Ilman lämpötila t = 15°C				
0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
Ilman Kosteus Rh = 30%					vs.	Ilman Kosteus Rh = 70%				
0.5	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7
h=4m, G = 0,5					vs.	h=2m, G = 0				
2.1	4.2	2.2	0.5	3.5	0.9	2.0	1.8	3.0	1.8	2.8

Kuva 19. Mallinnustulosten vertailu SoundPlan -ohjelmistolla ja Nord2000 -laskentamallilla.

4.2.4 Etenemismallien keskinäinen vertailu

SoundPlan (Nord2000)			vs.	SoundPlan (ISO 9613-2)							
Immissiopiste											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Topografia 0.5 m											
0.3	2.8	0.3	1.2	1.2	0.5	0.3	0.6	0.6	0.3	0.9	
Topografia 1 m											
0.5	0.4	0.4	1.0	1.0	0.6	0.4	0.3	0.4	0.4	0.7	
Topografia 2.5 m											
0.5	0.4	0.1	0.2	1.2	1.2	0.4	0.5	0.9	0.2	0.7	
Maavaimennus G = 0.25											
0.6	1.5	0.2	0.4	0.2	0.5	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	
Maavaimennus G = 0.5											
1.2	1.2	0.6	0.4	0.6	0.1	0.4	0.5	0.6	1.0	1.0	
korkeus h = 4m											
0.4	0.2	0.7	1.0	0.2	0.4	0.2	1.0	0.3	0.2	0.3	
Ilman lämpötila t = 0°C											
0.5	2.8	0.1	1.0	0.9	0.5	0.2	0.7	0.3	0.0	0.6	
Ilman Kosteus Rh = 30%											
0.5	2.7	0.2	1.1	1.1	0.5	0.4	0.6	0.5	0.1	0.8	
korkeus h=4m, Maavaimennus G = 0,5											
0.1	0.5	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.6	0.5	0.2	0.2	

Kuva 20. SoundPlan -ohjelmistolla tehty Nord2000 ja ISO 9613-2 -etenemismallien keskinäinen vertailu.

4.2.5 Variointien yhteenveto

Mallinnuksen ja variointien kohteena oli Tuuliwatti Oy:n Iin Olhavan tuulivoimapuisto, jossa äänilähteinä oli kahdeksan 3 MW ”Vestas V112” -tuulivoimalaa. Nämä mallinnettiin maastosta 140 m korkeudella olevina pistelähteinä. Immissio- eli vastaanottopisteitä valittiin 11 pistettä eri kohdista maastoa. Lähimmän tuulivoimalan etäisyys vastaanottopisteestä oli pienimmillään n. 430 m, enimmillään etäisyyttä oli puolestaan n. 1700 m.

Varioidut parametrit edustavat ympäristömelumallinnuksessa tyypillisimpiä käytettyjä arvoja ja niiden vaihteluja. Mallinnustuloksia vertailtiin keskenään A-taajuuspainotettuina kokonaisäänitasoina. Havainnollisuuden lisäämiseksi tulokset on kuvissa 13 – 20 numeroarvon lisäksi esitetty väriskaaloilla. Värisävyjen voimakkuus korostaa tulosten merkittävyyttä. Yli 3 dB vertailutulokset on esitetty käytetyn värin vahvimmalla sävyllä.

Mallinnusparametrivertailuissa on nähtävissä, että ISO 9613-2 -etenemismallilla maaston pystyresoluutiolla ei juurikaan ole vaikutusta kokonaisäänitasoihin. Tätä etenemismallia käytettäessä 2.5 m resoluutioinen maastomalli on siis riittävä. Nord2000 -etenemismallilla tilanne oli päinvastainen, ja eroja oli eri tarkkuuksilla olevien maastomallien välillä (Kuva 20). Systemaattista muutosta A-äänitasoissa tarkemman ja heikomman resoluution välillä ei kuitenkaan voitu havaita. Nord2000-etenemismalli on ISO 9613-2 -etenemismallia huomattavasti kehittyneempi, joten voidaan olettaa, että se myös antaa oikeammat tulokset tarkemmalla resoluutiolla laskettaessa.

Maavaimennuksen vertailuissa kummallakin etenemismallilla on selvästi nähtävä vaikutus kokonaisäänitasoihin. Kovan ja puolipehmeän maan laskentatapauksien vertailussa kokonaisäänitasot ovat lähes 3 dB suuremmat kovalla maalla. Tämän mallinparametrin vastuullinen ja asiantunteva käyttö melumallinnuksessa onkin tärkeää virheellisten tulosten estämiseksi.

Ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksia vertailtaessa erot olivat odotetusti varsin pieniä. Ilman lämpötilan muutoksella ei ollut käytännön vaikutusta kokonaisäänitasoihin ja ilman suhteellisen kosteuden muutoksillakin vaikutus oli pieni.

Mallinnusohjelmistoja vertailtaessa löytyi joitain eroja. ISO 9613-2 –etenemismallilla CadnaA ja WindPro -ohjelmistojen välillä erot olivat mitättömiä, mutta SoundPlan -ohjelmisto antaa systemaattisesti pienempiä arvoja CadnaA ja WindPro -ohjelmistoihin verrattuna. Nord2000 -laskentamallia ohjelmistojen kesken ei voitu vertailla projektin suppeuden takia.

Vertailutuloksia tarkasteltaessa on hyvä pitää mielessä ettei projektin aineisto ole riittävä antamaan vastausta tuulivoimaloiden melumallinnuksen luotettavimmasta ohjelmistosta tai laskentamallista. Vaikka ISO 9613-2 näyttäisi selvästi antavan Nord2000 -etenemismalliin verrattuna yhdenmukaisempia mallinnustuloksia, ilman mittauksia ei voida sanoa mikä etenemismalli on käyttötarkoitukseen ehdottomasti sopivin. Lisäksi myös Nordic Prediction Method -laskentamalli olisi tärkeää sisällyttää laskentamallien keskinäiseen vertailuun, sillä siinä on tuulivoimalamelun äänen etenemisen kannalta tärkeitä sääparametreja. On myös tärkeä muistaa että ISO 9613-2 -etenemismallin sääparametrit ovat tuulivoimalamelun laskennan kannalta erittäin rajalliset.

4.3 Parametrien herkkyystarkastelut

Parametrien herkkyystarkastelu toteutettiin SoundPlan ohjelmalla ja Nord2000 etenemismallilla. Samalla tarkasteltiin myös maanpinnan ominaisvirtausvastuksen ja sääparametrien yhteisvaikutuksia. Tämän lisäksi selvitettiin tuottavatko piste-lähteet ja pystysuorat viivalähteet toisistaan eroavia mallinnustuloksia.

Mallinuksissa käytettiin samoja oletusparametreja, kuin eri ohjelmia vertailevassa mallinuksessa. Varioidut parametrit olivat maanpinnan ominaisvirtausvastus, tuulennopeus, lämpötilagradientti, maanpinnan karheusermi ja ilman turbulentsuus. Lisäksi tarkasteltiin tuulensuunnan vaikutusta mallinnustuloksiin. Taulukossa 12 on esitetty vertailumallinuksissa varioidut parametrit ja niiden saamat arvot.

Tuulensuuntana mallinuksissa käytettiin oletusarvoisesti suuntaa lähteestä vastaanottopisteeseen (downwind) ja erikseen esitetyissä tapauksissa myös vastaanottajasta lähteeseen päin (upwind). Lisäksi tuulennopeudelle käytettiin mallissa tuulennopeuden standardipoikkeamaa, joka oli aina 15 % kulloisestakin tuulennopeudesta.

Taulukko 12. Herkkyystarkastelussa varioidut parametrit.

Parametri	Arvot
Ominaisvirtausvastusluokka	G F E D
Lämpötilagradientti [K/m]	-0,1 0 0,1
Tuulenopeus [m/s]	0 6 8 10
Maanpinnan karheusermi [m]	0,01 0,05 0,3
Turbulenttisuus C_w^2 [m ^{3/4} /s ²]	0 0,12
C_t^2 [K/s ²]	0 0,008

4.3.1 Mallinnusten vertailu

Tarkastelun lähtökohtana oli varioida yhtä parametria kerrallaan. Vertailun tulokset on kuvattu kahtena taulukkotyypinä. Ensimmäisessä ryhmässä taulukoita (kuva 21), vertaillaan aina kahta mallinnustapausta keskenään. Toisessa ryhmässä taulukoita yksi parametrin arvo on valittu vertailuarvoksi, ja kahta tai kolmea muuta mallinnusta verrataan tähän mallinnukseen (kuva 22).

Vertailu tapahtui siten, että yhdessätoista immissiopisteessä lasketuista A-äänitasoista laskettiin mallinnustilanteiden välinen erotus. Tälle yhdentoista erotuksen joukolla laskettiin keskiarvo (kuvissa 21 ja 22, luku A) ja keskihajonta (kuvissa 21 ja 22, luku B). Saadut tulokset on merkitty tulostaulukoihin desibeleinä ja pyöristetty yhden desimaalin tarkkuuteen tulosten luettavuuden parantamiseksi. Keskiarvo kuvastaa parametrin varioinnin aiheuttamaa keskimääräistä lisäystä/vaimennusta vertailumallinnukseen nähden ja keskihajonta kuvaa tämän lisäyksen/vaimennuksen vaihtelua eri pisteiden välillä.

Class E	10	0	0,05	0,4	A	0,2	B
Class E	10	0,1	0,05	0,0		0,1	
Class E	8	-0,1	0,05	0,6		0,3	
Class E	8	0	0,05	0,4		0,2	
Class E	8	0,1	0,05	0,0		0,1	
Class E	8	0	0,05	0,1		0,2	

Kuva 21. Esimerkki turbulenttisuuden vertailutaulukosta. Taulukkoon on merkitty turbulenttisen ja ei-turbulenttisen mallinnuksen ekvivalenttitasojen erotuksen keskiarvo (A) ja keskihajonta (B).

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo[dB]	Standardipoikkeama[dB]
Class E	8	-0,1	EI	0,05	-1,0	1,6
Class E	8	0	EI	0,05	A	B
Class E	8	0,1	EI	0,05	0,8	0,3
Class C	8	0,1	EI	0,05	0,8	0,3

Kuva 22. Esimerkki vertailuarvon käytöstä mallinnustaulukossa. Kahta muuta mallinnustilannetta on verrattu keskimmäiseen ja laskettu mallinnusten ekvivalenttitasojen erotusten keskiarvot(A) ja keskihajonnat (B).

4.3.2 Viivalähteiden vaikutus

Viivalähdetarkastelussa vertailtiin napakorkeudelle (140 m) sijoitetun pistelähteen ja pystysuoran viivalähteen antamia mallinnustuloksia.. Viivalähteenä toimi lähde, jonka pituus oli 90 % roottorin halkaisijasta (100 m) ja se sijoitettiin siten, että pistelähde sijaitsee viivalähteen keskipisteessä. Kuvaan 23 on merkitty viivalähteillä ja pistelähteillä saatujen mallinnustulosten erotus. Positiivinen luku tarkoittaa, että viivalähteet antavat suurempia A-äänitasoja. Edellä kuvatulla tavalla toteutetun viivalähteen ja napakorkeudelle sijoitetun pistelähteen antamien mallinnustulosten ei todettu merkittävästi eroavan toisistaan.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class G	8	0	ON	0,05	0,0	0,2
Class F	8	0	ON	0,05	0,0	0,2
Class E	8	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class D	8	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class G	6	0	ON	0,05	0,1	0,2
Class G	8	0	ON	0,05	0,0	0,2
Class G	10	0	ON	0,05	0,0	0,2
Class E	6	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class E	8	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class E	10	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class E	8	-0,1	ON	0,05	0,0	0,1
Class E	8	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class E	8	0,1	ON	0,05	0,0	0,1
Class G	8	0	EI	0,05	0,1	0,3
Class G	8	0	ON	0,05	0,0	0,2
Class E	8	0	EI	0,05	0,0	0,2
Class E	8	0	ON	0,05	0,0	0,1

Kuva 23. Viivalähteillä ja pistelähteillä saatujen mallinnustulosten ero.

4.3.3 Turbulenttisuuden vaikutus

Turbulenttisuuteen vaikutti kaksi mallinnustermiä, jotka olivat tuulen aiheuttama turbulenttisuus (C_w^2) ja lämpötilan aiheuttama turbulenttisuus (C_t^2). Näitä turbulenttisuustermejä ei varioitu erikseen, vaan molemmat saivat arvon nolla (tulostaulukoissa EI) tai $C_w^2=0,12$ ja $C_t^2=0,008$ (tulostaulukoissa ON). Kuvaan 24 on merkitty näiden kahden mallinnustilanteen erotus varioitaessa muita parametrejä. Positiivinen keskiarvo tarkoittaa, että turbulenttisuuden nollassa eroavat arvot antavat suurempia A-äänitasoja kuin turbulenttisuuden arvo nolla.

Kuvasta nähdään, että turbulenttisuus lisää A-äänitasoa lähes kaikissa mallinneissa tilanteissa ei-turbulenttiseen tilanteeseen nähden.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class G	8	-0,1	0,05	0,1	0,3
Class G	8	0	0,05	0,2	0,3
Class G	8	0,1	0,05	0,0	0,2
Class G	8	0	0,05	0,2	0,3
Class F	8	0	0,05	0,2	0,2
Class E	8	0	0,05	0,4	0,2
Class G	6	0	0,05	-0,2	0,3
Class G	8	0	0,05	0,2	0,3
Class G	10	0	0,05	0,4	0,2
Class E	6	0	0,05	0,2	0,3
Class E	8	0	0,05	0,4	0,2
Class E	10	0	0,05	0,4	0,2
Class E	10	-0,1	0,05	0,4	0,3
Class E	10	0	0,05	0,4	0,2
Class E	10	0,1	0,05	0,0	0,1
Class E	8	-0,1	0,05	0,6	0,3
Class E	8	0	0,05	0,4	0,2
Class E	8	0,1	0,05	0,0	0,1
Class E	8	0	0,01	0,1	0,2
Class E	8	0	0,05	0,4	0,2
Class E	8	0	0,3	0,3	0,1

Kuva 24. Turbulenttisuuden vaikutus A-äänitasoon.

4.3.4 Maanpinnan ominaisvirtausvastuksen vaikutus

Ominaisvirtausvastukselle käytettiin näissä mallinuksissa pääasiassa ominaisvirtausvastusluokkia G ja E. Johtopäätös mallinuksista oli, että virtausvastusluokan G käyttö johtaa epäloogisiin muutoksiin A-äänitasossa.

Kuvasta 25 nähdään, että kun lämpötilagradientti on negatiivinen antaa virtausvastusluokka G suurempia arvoja kuin lämpötilagradientin arvolla nolla. Virtausvastusluokka E puolestaan antaa negatiivisella lämpötilagradientilla pienempiä arvoja kuin lämpötilagradientilla nolla ja positiivisella lämpötilagradientilla suurempia.

Kuvasta 26 nähdään, että virtausvastusluokalla G saadaan ilman tuulta suurempia mallinustuloksia kuin jos tuulisuus huomioidaan mallissa. Tämä pätee kuitenkin vain lämpötilagradientin arvolla nolla. Positiivisella ja negatiivisella gradientilla tulokset vaikuttavat loogisilta.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class E	8	-0,1	EI	0,05	-1,0	1,6
Class E	8	0	EI	0,05		
Class E	8	0,1	EI	0,05	0,8	0,3
Class G	8	-0,1	EI	0,05	0,8	0,9
Class G	8	0	EI	0,05		
Class G	8	0,1	EI	0,05	0,3	0,5
Class E	10	-0,1	ON	0,05	-0,6	1,2
Class E	10	0	ON	0,05		
Class E	10	0,1	ON	0,05	0,5	0,3
Class G	10	-0,1	ON	0,05	1,0	0,8
Class G	10	0	ON	0,05		
Class G	10	0,1	ON	0,05	0,5	0,3

Kuva 25. Lämpötilagradientin ja ominaisvirtausvastuksen vaikutus A-äänitasoon.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class G	0	-0,1	EI	0,05	-0,9	0,8
Class G	6	-0,1	ON	0,05	-0,2	0,3
Class G	8	-0,1	ON	0,05		
Class G	10	-0,1	ON	0,05	0,1	0,2
Class G	0	0	EI	0,05	0,8	0,8
Class G	6	0	ON	0,05	0,2	0,1
Class G	8	0	ON	0,05		
Class G	10	0	ON	0,05	-0,2	0,1
Class G	0	0,1	EI	0,05	-0,9	0,4
Class G	6	0,1	ON	0,05	-0,2	0,1
Class G	8	0,1	ON	0,05		
Class G	10	0,1	ON	0,05	0,1	0,1
Class G	0	0	EI	0,05	1,0	1,0
Class G	6	0	EI	0,05	0,6	0,3
Class G	8	0	EI	0,05		
Class G	10	0	EI	0,05	-0,5	0,3

Kuva 26. Tuulennopeuden vaikutus A-äänitasoon ominaisvirtausvastusluokalla G ja eri lämpötilagradienteilla.

Kuvasta 27 nähdään, että kun lämpötilagradientti on nolla, ominaisvirtausvastusluokka E antaa lähes yhteneviä tuloksia eri tuulennopeuksilla. Ilman tuulta luokka E antaa keskimäärin pienempiä arvoja kuin tuulen kanssa. Standardipoikkeamasta kuitenkin nähdään, että tuloksissa on hajontaa eri pisteiden välillä. Positiivisella ja negatiivisella lämpötilagradientilla puolestaan tuuli vaikuttaa enemmän A-äänitasoon ja käyttäytyminen on loogista.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class E	0	-0,1	EI	0,05	-2,0	1,4
Class E	6	-0,1	EI	0,05	-0,4	0,3
Class E	8	-0,1	EI	0,05		
Class E	10	-0,1	EI	0,05	0,4	0,3
Class E	0	0	EI	0,05	0,1	0,7
Class E	6	0	EI	0,05	0,3	0,2
Class E	8	0	EI	0,05		
Class E	10	0	EI	0,05	0,0	0,1
Class E	0	0,1	EI	0,05	-0,6	0,3
Class E	6	0,1	EI	0,05	-0,2	0,1
Class E	8	0,1	EI	0,05		
Class E	10	0,1	EI	0,05	0,1	0,1
Class E	0	0	EI	0,05	-0,3	0,6
Class E	6	0	ON	0,05	0,0	0,1
Class E	8	0	ON	0,05		
Class E	10	0	ON	0,05	0,0	0,1

Kuva 27. Tuulennopeuden vaikutus A-äänitasoon ominaisvirtausvastusluokalla E ja eri lämpötilagradienteilla.

4.3.5 Maanpinnan karheusermin vaikutus

Maanpinnan karheusermillä z₀ on vain vähäinen vaikutus A-äänitasoon, kuten nähdään kuvasta 28.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class G	8	0	ON	0,01	0,2	0,1
Class G	8	0	ON	0,05		
Class G	8	0	ON	0,3	-0,2	0,2
Class E	8	0	ON	0,01	0	0,0
Class E	8	0	ON	0,05		
Class E	8	0	ON	0,3	0,0	0,1
Class E	8	0	EI	0,01	0,3	0,2
Class E	8	0	EI	0,05		
Class E	8	0	EI	0,3	0,2	0,2

Kuva 28. Maanpinnan karheusermin vaikutus A-äänitasoon.

4.3.6 Tuulensuunnan vaikutus A-äänitasoon

Tuulensuunnan tilanteita ”downwind” ja ”upwind” tarkasteltiin sen selvittämiseksi, miten loogisesti toiminnot käyttäytyvät eri mallinnusparametreilla. Kuvaan 29 on merkitty downwind- ja upwind-laskentojen erotuksen keskiarvo ja keskihajonta. Positiivinen keskiarvo tarkoittaa, että downwind-tilanne antaa suurempia A-äänitasoja kuin upwind. Taulukosta nähdään, että lämpötilagradientin arvolla nol-la ja virtausvastusluokalla G, saadaan upwind-mallinnuksella suurempia arvoja kuin downwind-mallilla. Tämä epäloogisuus lienee jokin laskenta-algoritmeihin liittyvä ominaisuus, jonka kova heijastava maanpinta aiheuttaa. Eli jälleen ominaisvirtausvastusluokan G käyttö aiheuttaa epäloogista käyttäytymistä mallissa.

Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
Class G	8	0	EI	0,05	-1,2	0,8
Class F	8	0	EI	0,05	0,7	0,8
Class E	8	0	EI	0,05	1,6	1,3
Class G	8	-0,1	ON	0,05	2,1	1,9
Class G	8	0	ON	0,05	-1,1	0,8
Class G	8	0,1	ON	0,05	-0,3	0,4

Kuva 29. Tuulensuunnan vaikutus A-äänitasoon.

4.3.7 Muita huomioita

Sääparametreja varioivista mallinnoista ainoastaan kaksi mallinnusta antoivat suuremman A-äänitasojen keskiarvon kuin oletusparametrit (laskentaohjelmien vertailumallinnuksessa tapaus nro 1) Nämä kaksi mallinnusta olivat upwind-tilanteita ominaisvirtausvastusluokalla G. Lisäksi yksi downwind-mallinnus antoi keskiarvoltaan samoja ekvivalenttitasoja kuin oletusparametrit. Kuvaan 30 on kirjattu näissä kolmessa mallinnuksessa käytetyt parametrit. Positiivinen luku tarkoittaa, että parametrit antavat suurempia arvoja kuin oletusparametrit.

Tuulensuunta	Virtausvastus	Tuulennopeus	dT/dz	TURB	z ₀	Keskiarvo	Keskihajonta
upwind	Class G	8	0	EI	0,05	0,2	0,6
upwind	Class G	8	0	ON	0,05	0,2	0,7
downwind	Class G	10	-0,1	ON	0,05	0,0	0,7

Kuva 30. Korkeimmat A-äänitasot antaneet mallinnusparametrit.

4.3.8 Herkkyystarkastelujen johtopäätökset

Mallinnustuloksiin ei esimerkkimallinnuksessa vaikuttanut käyttikö lähteinä viivalähteitä vai pistelähteitä. Suurimmat A-äänitasot saavutetaan virtausvastusluokalla G, lämpötilagradienilla dT/dz=0 ja ilman tuulta (tapaus 1).

Virtausvastusluokkaa G käytettäessä mallinnustulokset käyttäytyvät epäloogisesti upwind-tilanteessa sekä lämpötilagradienilla dT/dz=0, kun tuulennopeus muuttuu. Lisäksi negatiivinen lämpötilagradieniti antoi suurempia A-äänitasoja kuin dT/dz=0.

Virtausvastusluokkaa E käytettäessä tulokset käyttäytyvät loogisemmin sääparametreja muunneltaessa. Pientä epäjohtonmukaisuutta on käyttäytymisessä ainakin maanpinnan karheusermiä muunneltaessa ja tuulennopeutta varioitaessa.

5 Melumallinnusohjeistusten yhteenveto

Edellä kuvattujen teoreettisten pohdintojen (luku 3), ohjelmisto- ja parametrivertailujen (luku 4.1) ja herkkyystarkastelujen (luku 4.2) yhteenvetona esitetään kaksiosaista tuulivoimaloiden melun mallinnusohjeistusta. Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheissa melumallinnuksen tulee perustua ISO 9613-2 malliin yhteisen käytännön luomiseksi. Tämä melumallinnus on pääasiallinen mallinnustarkastelu. Mikäli rakennuslupavaiheen mallinnustulos (valittu voimalaratkaisu) kuitenkin osoittaa, että tuulivoimala tai tuulivoima-alue voi aiheuttaa meluhäiriötä (suunnitteluohjeavrot ylittyvät) jossain tai joissain altistuvista kohteista, tulee ym-

päristölupaharkinnan perustaksi laatia tarkennettu malli, jossa äänen etenemiseen ja maaston vaikutuksiin liittyvät parametrit muutetaan sijoituspaikalla vallitsevia olosuhteita mahdollisimman hyvin vastaaviksi Nord2000 mallia käyttäen. Ympäristöluvan pohjaksi mahdollisesti tehtävä melumallinnus on poikkeusmenettely, jonka avulla pyritään ennen kaikkea selvittämään miten melun häiritsevyys voidaan minimoida teknisin tai voimaloiden säädön keinoin.

Amplitudimodulaatioon liittyvää korjausta ei lähtökohtaisesti tehdä kummassakaan mallinnusvaiheessa. Mikäli kuitenkin tuulivoimaloiden melun arvioidaan valmistajan ilmoittamien mittausten tai vastaavista tuulivoimaloista tehtyjen muiden mittausten perusteella olevan melulle altistuvassa kohteessa impulssimaista tai merkittävästi normaalia tuulivoimalan ääntä enemmän amplitudimoduloitunutta, lisätään laskentatulokseen asianomaisessa kohteessa 5 dB.

5.1 Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnus

Kaavoitus- ja mahdollisessa YVA-menettelyvaiheessa eri vaihtoehtojen tarkastelu sekä rakennuslupavaiheeseen valitun ratkaisun meluvaikutusten tarkastelu perustuu siis ISO 9613-2 menettelyyn ja turbiinien melupäästön ”ylärajatarkasteluun”. Suunniteltujen tuuliturbiinien melupäästölle on käytettävä valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuuarvoa, jossa valmistajan ilmoittaman melupäästön arvossa on noin 95 %:n varmuus arvon alittumiselle mahdollisessa verifioidussa. Melupäästön takuuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus, jolloin etenemislaskennassa voidaan käyttää ISO 9613-1, ISO 9613-2 ja DSO 1284 menetelmiin perustuvia vakioituja etenemiseen liittyviä sää- ja ympäristöolosuhdearvoja.

Tässä melumallinnusvaiheessa ei tarkastella melun impulssimaisuuden eikä amplitudimodulaation vaikutuksia, vaan näiden oletetaan sisältyvän valmistajan ilmoittamiin melupäästön takuuarvoihin. Kapeakaistaisuus ja pienitaajuisten melun vaikutukset sen sijaan tarkastellaan erikseen myös tässä melumallinnusvaiheessa.

Ympäröivän vesialueen tai maaston pinnan laatu ja muoto otetaan tässä melumallinnusvaiheessa huomioon erillisinä seuraavasti:

- tuulivoimala sijaitsee akustisesti kovan heijastavan pinnan ympäröimänä (kuvaava tilannetta, jossa tuulivoimala on veden ympäröimä)
- tuulivoimala sijaitsee tyypillisellä sisämaan tasaisella sijoituspaikalla (kohtalaisen tasainen pelto-metsä-järvialue, jossa hankealueen korkeuserot ovat enintään 40 m)
- hankealueen korkeuserot ovat yli 40 m eli tuulivoimalan perustukset sijaitsevat korkealla suhteessa melulle altistuvan kohteen maanpinnan korkeuteen (esimerkiksi korkeat kummut ja tunturit).

Taulukko 13. Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheiden melumallinnuksessa käytettävät laskentaparametrit.

Mallinnukseen tarvittava suure ¹⁾	Mallinnusparametrin arvo kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheiden melumallinnuksessa ²⁾	Standardi tai muu ohje, jonka mukaan parametri on määritettävä
Tuuliturbiini(e)n melupäästö tuulen nopeudella 8 m/s referenssi-korkeudella 10 m	Valmistajan ilmoittama(t): 1. Melupäästön (äänitehotason) tunnus- tai takuuarvo 2. Melupäästön tonaalisuus tai kapeakaistaisuus 3. Pienitaajuisten melun tason voimakkuus (1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 – 200 Hz)	1. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) ³⁾ IEC TS 61400-14 (2005) 2. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) 3. DSO 1284 (2011) ⁴⁾
Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus	Oletuksena ympärisäteilevä suuntaamaton pistelähde tuulen suunnasta riippumatta.	Äänen säteily vapaaseen avaruuteen, geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa.
Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus	Lämpötila: 15 °C Ilman suhteellinen kosteus: 70 %	ISO 9613-1 (1996)
Vesialueen tai maaperän laadun ja muodon vaikutus	Veden ympäröimä voimala, vedenpinnan vaikutuskerroin: 0 Metsä- ja viljelysmaan sekä mahdollisten vesialueiden ympäröimä voimala, jossa hankealueen korkeuserot enintään 40 m, maa-alueella maaperän vaikutuskerroin: 0,4; vesialueella vaikutuskerroin: 0 ⁵⁾ Hankealueen korkeuserot yli 40 m, esimerkiksi kummulla tai tunturissa sijaitseva voimala, maaperän vaikutuskerroin: 0	ISO 9613-2 (1996), 7.3.1 General method of calculation kaikissa kolmessa tapauksessa
Sääolosuhde	Neutraali - stabiili sääolosuhde, meteorologin korjaus: 0	ISO 9613-2 (1996)
Laskennan vaakaja pystyresoluutio	Vaakaresoluutio: 1,0 m Pystyresoluutio: 2,5 m	Tai tarkin käytettävissä oleva resoluutio
Pientaajuisten melun etenemisvaimennus	Geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa, maa- ja vesialuevaikutus DSO 1284:n mukaan	DSO 1284 (2011) ⁴⁾

- 1) Immissiopisteen (laskennan kohdepiste) laskentakorkeus 4 m maanpinnasta kaikissa tapauksissa, immissiopisteen 4 m:n korkeudella kompensoidaan ISO 9613-2 mallin tuottamia liian alhaisia mallinnustasoja korkean äänilähteen ja peitteisen maaston tapauksessa. Validointimittauksissa mittauskorkeutena tulee kuitenkin käyttää 1,5 ... 2 m verrattaessa mittaustuloksia mallinnustuloksiin.
- 2) Kaavoitus- ja YVA-mallinnusvaiheissa voi olla useita tarkasteluvaihtoehtoja.
- 3) Vanhemmille, ennen vuoden 2012 joulukuuta testatuille tuulivoimalatyypeille voidaan hyväksyä standardin vanhemman version [12] mukaisesti 1/3-oktaavikaistoittaiseksi taajuusalueeksi 50 Hz - 10 000 Hz.
- 4) The Danish Ministry of Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011.
- 5) Maavaikutuksen arvo tulee valita maa- tai vesialueen mukaan. Metsä- ja viljelysmaalle käytetään maavaikutuksen arvoa 0,4 ja vesialueille (lammet ja järvet) arvoa 0. Jokia ja puroja ei mallinneta vesialueina.

5.2 Hankekohtaisen suojaetäisyyden määrittäminen

Yksinkertaisin tapa vähentää tuulivoimaloiden melun haittavaikutuksia on riittävä etäisyys melulle altistuvaan kohteeseen. Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheiden melumallinnusvaiheessa tulee yksittäisen tuulivoimalan suunnittelijan määrittää kullekin tarkasteltavalle voimalatyypille etäisyys, jolla tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeavot alittuvat käytettäessä taulukon 13 mukaisia vakioituja etenemisparametreja ja vaimennusarvoja. Tuulivoima-alueen suunnittelussa on huomioitava myös yksittäisten tuuliturbiinien melutasoa kohottava yhteisvaikutus. Käytännössä tämä tarkoittaa melualueiden määrittämistä tarkasteltavan hankealueen karttapohjaan ISO 9613-2 mukaisella melumallinnuksella ja käyttäen taulukon 13 mukaisia laskentaparametreja.

Mikäli tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen rakentaja noudattaa maankäytön suunnittelussa edellä kuvatun mukaista etäisyyttä eli suunnitteluohjeavon ylittävällä melualueella ei sijaitse suojaa vaativia kohteita (tuulivoimalayksiköiden lukumäärä ja sijainti huomioon ottaen), äänen häiriövaikutusten voidaan katsoa olevan tilastollisesti merkityksettömiä, vaikka lyhyen aikavälin mitatut immisiotasot joissain harvoissa tapauksissa (sääolosuhteissa) voivatkin hetkellisesti ylittyä.

Rakennuslupa tuulivoimalalle melun suhteen voitaisiin tässä tapauksessa myöntää ilman melun häiritsevyydestarkastelua.

5.3 Hankekohtaisen suojaetäisyyden alittavan sijoituspaikan häiritsevyydestarkastelu

Mikäli yksittäinen tuulivoimala tai tuulivoima-alueen joku tai jotkut tuuliturbiineista halutaan teknistaloudellisista tai muista perustelluista syistä kuitenkin sijoittaa edellisen kohdan mukaan määritettyä etäisyyttä lähemmäksi melulta suojattavaa kohdetta, tulee tuulivoimalan rakentajan selvittää tarkemmin melun häiritsevyyttä hankealueen ympäristössä sekä saada hankkeelle niiden perusteella rakennuslupa ja mahdollinen ympäristölupa.

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen rakentaja voi laatia häiriövaikutusten arviota ja esittää teknisiä ja/tai tuulivoimalan käyttöön liittyviä rajoituksia, joilla häiriövaikutukset jäävät alle hyväksyttävyyssrajan eli alittavat käytännössä tuulivoimaloiden melun suunnitteluohjeavot. Rakennuslupa ja mahdollinen ympäristölupa tuulivoimalalle tai tuulivoima-alueelle melun suhteen voitaisiin tässä tapauksessa myöntää, jos rakentaja osoittaa melun häiriövaikutusten jäävän alle hyväksyttävyyssrajan eli alittavat käytännössä tuulivoimaloiden melun suunnitteluohjeavot.

5.4 Ympäristölupavaiheen melumallinnus

Mahdollisessa ympäristölupavaiheessa melumallinnusta tulee tarkentaa huomioidamalla sekä valittujen turbiinityyppien melupäästön erityispiirteet (impulssimaisuus, amplitudimodulaatio) että paikalliset äänen etenemiseen liittyvät parametrit. Turbiinien melupäästön mallinnuksessa on kuitenkin edelleen käytettävä valmistajan ilmoittamaa takuuarvoa. Mikäli tuulivoimaloiden melun arvioidaan valmistajan ilmoittamien mittausten tai vastaavista tuulivoimaloista tehtyjen muiden mit-

tausten perusteella olevan melulle altistuvassa kohteessa impulssimaista tai merkittävästi normaalia tuulivoimalan ääntä enemmän amplitudimoduloitunutta, lisätään melupäästön tunnus- tai takuuarvoon 5 dB.

Äänen etenemiseen liittyvät parametrit tulee valita sijoituspaikalla vallitsevien todellisten olosuhteiden mukaiseksi. Tämä edellyttää kuitenkin ISO 9613-2 menetelmää tarkemman Nord2000 melumallinnusmenetelmän käyttämistä.

Melumallinnuksessa on tällöin huomioitava myös maanpinnan ominaisuudet Nord2000 menetelmän tarkastelun mukaisina (seitsemänportainen maavaikutus maaston eri maaperätyypeille) ja korkeusresoluutio laserkeilaukseen perustuvana 0,5 m:n resoluutiona, mikäli laserkeilattu aineisto on käytettävissä. Menettely on implementoitu ainakin WindPro-ohjelmistoversioon 2.8 ja SoundPlan-ohjelmistoversioon 7.1.

Ympäristölupavaiheen tarkemman Nord2000-mallinnuksen avulla voidaan määrittellä meluhäiriön poistamisen tarve ja keinot, esim. joidenkin todennäköisesti häiritsevän melun alueelle jäävien asuinrakennusten osalta.

Taulukko 14. Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa käytettävät laskentaparametrit.

Mallinnukseen tarvittava suure ¹⁾	Mallinnusparametrin arvo ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa ²⁾	Standardi tai muu ohje, jonka mukaan parametri on määritettävä
Tuuliturbiini(e)n melupäästö tuulen nopeudella 8 m/s referenssi-korkeudella 10 m	Valmistajan ilmoittama(t): 1. Melupäästön (äänitehon) tunnus- tai takuuarvo 2. Melupäästön tonaalisuus tai kapeakaistaisuus 3. Melupäästön impulssimaisuus 4. Pientaajuisten melun tason voimakkuus (1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 – 200 Hz)	1. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) IEC TS 61400-14 (2005) 2. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) 3. SFS-EN-ISO 3744:2009, Annex D 4. DSO 1284 (2011) ³⁾
Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus, tuulen suunnan vaikutus	Tuulen suunta voidaan huomioida vallitsevien tuuliolosuhteiden mukaisena.	Nord2000 mukainen menettely tuulen suunnan huomioimiseksi.
Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus	Lämpötila: 15 °C Ilman suhteellinen kosteus: 70 %	ISO 9613-1 (1996)
Vesialueen tai maaperän laadun ja muodon vaikutus	Veden ympäröimä voimala, vaikutuskerroin: G Metsä- ja viljelysmaan sekä mahdollisten vesialueiden ympäröimä voimala, jossa hankealueen korkeuserot enintään 40 m, maa-alueella maaperän vaikutuskerroin: A ... F; vesialueella vaikutuskerroin: G ⁴⁾ Hankealueen korkeuserot yli 40 m, esimerkiksi kummulla tai tunturissa sijaitseva voimala, maaperän-vesialueen vaikutuskerroin: G	Nord2000 kaikissa kolmessa tapauksessa.
Sääolosuhde	Neutraali - stabiili sääolosuhde	Nord2000
Laskennan vaakaja pystyresoluutio	Vaakaresoluutio: 1,0 m Pystyresoluutio: 0,5 m tai tarkin mahdollinen saatavissa oleva	Käytettävä laserkeilaukseen perustuvaa 0,5 m:n korkeusresoluutiota, mikäli laserkeilattu aineisto olemassa
Pientaajuisten melun etenemisvaimennus	Geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa, maa- ja vesialuevaikutus DSO 1284:n mukaan	DSO 1284 (2011) ³⁾

- 1) Immissiopisteen (laskennan kohdepiste) laskentakorkeus 2 m maanpinnasta kaikissa tapauksissa.
- 2) Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa tarkastellaan vain sitä vaihtoehtoa, jolle haetaan ympäristölupaa.
- 3) The Danish Ministry of Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011.
- 4) Maavaikutuksen arvo tulee valita maa- tai vesialueen mukaan riittävällä tarkkuudella. Metsä- ja viljelysmaalle käytetään maavaikutuksen arvoa A ... D, kovalle heijastaville pinnoille (esim. kalliot) arvoa E ... F ja vesialueille (lammet ja järvet) arvoa G. Jokia ja puroja ei mallinneta vesialueina.

6 Tuulivoimaloiden melun haittavaikutusten vähentäminen

Tähän lukuun on koottu erilaisia hankkeen aikana keskusteluissa esiin tulleita ajatuksia ja mahdollisuuksia hankekohtaisen suojaetäisyyden alittavan sijoituspaikan hyväksyttävyyden saavuttamiseksi häiritsevyydestarkastelun avulla. Nämä ajatukset on kirjattu muistiin, jotta niitä voitaisiin tarvittaessa hyödyntää varsi-

naisen ympäristöministeriön tuulivoimaloiden melun mallinnus- ja mittausohjeistuksen valmistelussa tai muissa jatkotoimissa.

6.1 Häiritsevyystarkastelu

Mikäli yksittäinen tuulivoimala tai tuulivoima-alueen osa halutaan maankäytön tehostamiseksi siis sijoittaa kohdan 5.2 mukaan määritettyä hankekohtaista suojaetäisyyttä lähemmäksi melulta suojattavaa kohdetta, tulee tuulivoimalan rakentajan selvittää tarkemmin melun häiritsevyyttä hankealueen ympäristössä sekä saada hankkeelle niiden perusteella rakennuslupa ja mahdollinen ympäristölupa.

Mikäli tuulivoimalan tai tuulipuiston rakentaja voisi tarkennetun melumallinnuksen avulla osoittaa, että tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen synnyttämä melu alittaa suunnitteluohjearvot pahimmin häiriintyvässä kohteessa esimerkiksi tietynä ajanjaksona (esim. tärkeimpänä ulkoiluun ja lomailuun käytettävänä kautena), tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen äänen häiriövaikutuksen voitaisiin katsoa olevan tilastollisesti merkityksetön, vaikka suunnitteluohjearvot joissain tapauksissa voisivatkin ylittyä.

Esimerkkinä teknisestä keinosta, jolla tuulivoimalan häiritsevin ääniominaisuus eli amplitudimoduloitunut ääni voidaan poistaa tai sitä voidaan merkittävästi vähentää, on yksittäisen roottorilavan kulman säätö (individual pitch control) kunkin kierroksen aikana. Toinen tekninen mahdollisuus on roottorin pyörimisnopeuden alentaminen siten, että tuuliturbiinin valmistajan ilmoittama melupäästö alenee vähintään 5 dB(A). Mikäli tuulivoimalavalmistaja osoittaisi, että tuulivoimalassa on ainakin toinen näistä ominaisuuksista, joka otetaan käyttöön stabiilin sääolosuhteen vallitessa, voitaisiin amplitudimodulaation edellyttämä korjaus melutasoon jättää huomiotta. Myös kapeakaistaisuus- ja impulssimaisuuskorjaukset voitaisiin modernien tuulivoimaloiden osalta jättää pois voimalan valmistajan esittämien teknisten selvitysten perusteella.

Pientaajuisen melun häiritsevyystarkastelun tulee perustua tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen synnyttämän pientaajuisen melun vertaamiseen asumisterveysohjeen mukaisiin sisätilojen keskiäänitasoihin, jotka määritetään häiriintyvän kohteen sisätilassa taajuuskaistalla 20 – 200 Hz. Lähtökohtana on tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen synnyttämä melutaso altistuvan kohteen (rakennuksen) ulkopuolella siten, että DSO 1284 (2011) [20] mukaiset enimmäisarvot alittuvat kun rakennuksesta mahdollisesti syntyvät äänen heijastumiset eivät vaikuta altistavaan melutasoon.

Tilastollisen hyväksyttävyyden tarkastelussa voitaisiin huomioida paikalliset tuuli-, sää- ja maasto-olosuhteet sekä tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston operaattorin ilmoittamat mahdolliset hiljaiset toimintatavat ja katkokset tuulivoiman tuotannossa.

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen ympäristölupaan voidaan liittää operaattorin määrittelemät käyttörajoitukset ja/tai käyttökatkokset. Ympäristöluvassa voidaan esimerkiksi edellyttää, että tietyissä sääolosuhteissa ja/tai tiettyinä vuodenaikoina tuulivoimalaa käytetään hiljaisemmalla käyttötavalla tai se pysäytetään kokonaan.

Erityistapauksena on esitetty joustomekanismia melumallien soveltamisessa tapauksissa, joissa melumallinnus osoittaa mallinnetun melutason olevan välillä 35 - 40 dB(A). Tuuliatlaksesta saatavasta tuulisuuden Weibull-jakaumasta voitaisiin laskea tuulisuuden pysyvyyskäyrä hankealueella. Pysyvyyskäyrästä voidaan laskea kumulatiivinen todennäköisyys sille, että tuulivoimala saavuttaa nimellisen lähtömelutason, jolloin hankealueella tuulee yli 8 m/s. Tämän todennäköisyyden perusteella voitaisiin arvioida vuosittainen aika, jolloin tuulivoimalan melu ylittää tai alittaa ohjearvon. Joustomekanismia sovellettaessa voitaisiin melumallinnuksella laskettua melutasoa alentaa ohjearvon alittavan ajan perusteella ennen sen vertaamista ohjearvoon.

6.2 Taustamelun vaikutuksen huomioiminen

Liikenteen, kaivannaistoiminnan, teollisuuden tai muun tuotannollisen toiminnan aiheuttaman melun tuulivoimalan ääntä peittävän vaikutuksen tarkastelussa on huomioitava eri lähteiden synnyttämän melun spektrien erilaisuus ja ajallinen vaihtelu. Tarkastelu tulee tehdä 1/3-oktaavikaistoittain 20 - 10 000 Hz:n taajuusalueella. Mikäli taustamelun peittovaikutus halutaan ottaa huomioon, on tuulivoimarakentajan määritettävä taustamelun taso pahiten häiriintyvässä kohteessa ennen tuulivoimaloiden rakentamista. Taustamelun on ylitettävä tuulivoimaloiden mallintamalla ennakoitu kokonaismelutaso vähintään 10 dB tarkasteltavassa kohteessa jokaisella tarkastellulla 1/3-oktaavikaistalla, jotta tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen lisäys melutasoon voidaan jättää huomiotta.

Huomattakoon, että liikenteen aiheuttama melu vaimenee olennaisesti yöaikaan, mutta tuulivoimaloiden melu on jatkuvaa, joten liikenteen melua ei tule taustameluna ottaa huomioon tuulivoimalan yöajan melun häiriövaikutusta arvioitaessa. Samoin esim. murskausasemien ympäristöluvan mukaiset ilta- ja yöaikaiset toimintarajoitukset on otettava huomioon, eikä niiden mahdollista päiväaikaista taustamelua voi käyttää perusteena tuulivoimalan yöajan meluvaikutusta arvioitaessa. Vain jatkuvasti toimivan teollisuuden tai muun tuotannollisen toiminnan aiheuttama taustamelu voidaan ottaa huomioon tuulivoimaloiden ilta- ja yöajan melun peittovaikutusta arvioitaessa.

7 Yhteenveto

Tässä osaraportissa on kuvattu yleisellä tasolla tuulivoimaloiden äänentuottoa, äänen leviämistä ja leviämiseen liittyviä todennäköisyyksiä eri maasto- ja sääolosuhteissa. Näiden tarkastelujen pohjalta on laadittu ehdotus tuulivoimaloiden ja tuulivoima-alueiden melumallinnusten kaksivaiheiseksi ohjeistukseksi.

Ohjeistusehdotuksen mukaan kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheissa melumallinnuksen tulee perustua ISO 9613-2 malliin yhtenäisen käytännön luomiseksi. Tämä melumallinnus on pääasiallinen mallinnustarkastelu. Mikäli rakennuslupavaiheen mallinnustulos (valittu voimalaratkaisu) kuitenkin osoittaa, että tuulivoimala tai tuulivoima-alue voi aiheuttaa meluhäiriötä (suunnitteluohjearvot ylittyvät) jossain tai joissain altistuvista kohteista, tulee ympäristölupaharkinnan perustaksi laatia tarkennettu malli, jossa äänen etenemiseen ja maaston vaikutuksiin liittyvät parametrit muutetaan sijoituspaikalla vallitsevia olosuhteita mahdollisimman hyvin vastaaviksi Nord2000 mallia käyttäen. Ympäristöluvan pohjaksi

mahdollisesti tehtävä melumallinnus on poikkeusmenettely, jonka avulla pyritään ennen kaikkea selvittämään miten melun häiritsevyys voidaan minimoida teknisin tai voimaloiden säädön keinoin.

Ympäristöministeriö valmistelee ja julkaisee varsinaisen tuulivoimaloiden melun mallinnus- ja mittausohjeen tämän hankkeen tuloksia hyödyntäen.

Lähdeviitteet

1. Ympäristöministeriö. Helsinki 2012. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2012. 92 s.
2. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki 2003. Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. 93 s.
3. ISO 9613-2:1996. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. International Organization for Standardisation.
4. DELTA, Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord 2000 – Summary report, Lyngby, Denmark, 2002.
5. Manning, C., The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities. CONCAWE 4/81, 1981.
6. Rogers, A.L., Manwell, J.E. & Wright, S., Wind Turbine Acoustic Noise. A white paper. Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts at Amherst. June 2002, Amended January 2006.
7. IEC 61400-11. Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Edition 3.0 2012-11. International Electrotechnical Commission.
8. ISO 7574-1, 2, 3 & 4:1985. Acoustics -- Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment. International Organization for Standardization.
9. IEC TS 61400-14. Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values. First edition 2005-03. Technical specification. International Electrotechnical Commission.
10. SFS-EN ISO 3744:2009. Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure. Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. Suomen standardisoimisliitto SFS.
11. Karjalainen, M., Kommunikaatioakustiikka. Espoo 1999. Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing. Report 51. 237 s.
12. IEC 61400-11. Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Edition 2.1 2012-11. International Electrotechnical Commission.
13. Friman, M., Directivity of sound from wind turbines. A study on the horizontal sound radiation pattern from a wind turbine. Thesis for the degree of Master of Science, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, The Marcus Wallenberg Laboratory for Sound and Vibration Research, Stockholm, Sweden 2011.
14. Oerlemans, S. & Schepers, J.G., Prediction of wind turbine noise directivity and swish. Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise, Aalborg, Denmark (2009).
15. Gipe, P., Wind Energy Comes of Age. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1995. 536 p.

16. ISO 9613-1:1993. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. International Organization for Standardisation.
17. Evans, T. Cooper, J. Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. *Acoustics Australia*, Vol. 40, No. 1, April 2012, p. 28-36.
18. Duncan, E. & Kaliski, K., *Improving Sound Propagation Modeling for Wind Turbines*, Acoustics 08, Paris 2008.
19. VTT, *NORD2000 for traffic noise predictions – Weather classes and statistics*. Research Report VTT-R-02530_06, Espoo, 2006.
20. The Danish Ministry of the Environment. 2011. *Statutory Order on Noise from Wind Turbines*. Translation of Statutory Order no.1284 of 15 December 2011. 14 s.
21. Møller, H., Pedersen, S., Staunstrup, J.K. & Pedersen, C.S, *Assessment of low-frequency noise from wind turbines in Maastricht*. Report prepared for the City Council of Maastricht. ISBN 978-87-92328-82-3, Aalborg University, 10. April 2012. 26 s.

Liite 1:
Ehdotus ohjeistukseksi tuulivoimamamelun mallintamiseen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	3
2 MÄÄRITELMIÄ	4
3 MELUMALLINNUSOHJEISTUS	6
3.1 KAAVOITUS-, YVA- JA RAKENNUSLUPAVAIHEEN MELUMALLINNUS	6
3.1.1 Tuuliturbiinien melupäästö, tyyppi ja sijoitusvaihtoehdot	6
3.1.2 Immissiopisteiden laskentakorkeus	6
3.1.3 Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus ja geometrinen vaimennus	6
3.1.4 Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus	7
3.1.5 Maaperän tai veden absorptio/heijastusten ja muodon vaikutus	7
3.1.6 Sääolosuhde	7
3.1.7 Laskennan vaaka- ja pystyresoluutio	7
3.1.8 Pienitaajuisten melun etenemisvaimennus	7
3.2 YMPÄRISTÖLUPAVAIHEEN MELUMALLINNUS	10
3.2.1 Tuuliturbiinien melupäästö, tyyppi ja sijoitusvaihtoehdot	10
3.2.2 Immissiopisteiden laskentakorkeus	10
3.2.3 Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus ja geometrinen vaimennus	11
3.2.4 Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus	11
3.2.5 Maaperän tai veden absorptio/heijastusten ja muodon vaikutus	11
3.2.6 Sääolosuhde	11
3.2.7 Laskennan vaaka- ja pystyresoluutio	11
3.2.8 Pienitaajuisten melun etenemisvaimennus	12
4 MALLINNUSTEN RAPORTOINTI	14
4.1 TURBIININ (TURBIINIEN) TIEDOT	14
4.2 MALLINNUSOHJELMAT JA ALGORITMIT	14
4.3 AKUSTISET TIEDOT	14
4.4 MUUT TIEDOT	15
LÄHDEVIITTEET	16

1 JOHDANTO

Tuulivoimaloiden ja tuulivoima-alueiden melumallinnuksen ohjeistusta on tässä ehdotuksessa tarkasteltu tuulivoima-alueiden suunnittelulogiikan ja hyväksyntäprosessin näkökulmasta. Melumallinnuksen epävarmuus on ohjeistusehdotuksessa sisällytetty laskennassa käytettyyn tuuliturbiinien melupäästön arvoon. Mallinnuksessa tuuliturbiinien melupäästölle on siis käytettävä riittävän suurta varmuutta (valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuuarvoa, jossa varmuus melupäästön hyväksymiselle mahdollisessa verifiointissa on noin 95 %), jotta mallinnuksessa voidaan käyttää tähtäysarvona suunnitteluohjearvoa ja äänen etenemisen ja ympäristöolosuhteiden mallinnukseen vakioituja sää- ja ympäristöolosuhdearvoja.

Yksittäisen tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen suunnittelussa meluun liittyvä suunnittelu tapahtuu kolmessa tai neljässä päävaiheessa:

Esisuunnitteluvaiheessa hankkeen käynnistäjä laatii arvion tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tulevien turbiinien maksimikoolle ja maksimilukumäärälle ottaen huomioon myös yksittäisen tuuliturbiinin tai tuulivoima-alueelle tulevien tuuliturbiinien melupäästöjen suuruuden.

Kaavoitus- ja mahdollisessa ympäristövaikutusten arviointimenettelyvaiheessa (YVA-menettely) tuuliturbiini(e)n koolle on ilmoitettava yksityiskohtaiset, vaihtoehtoiset tiedot (tuuliturbiinien lukumäärä ja paikat, teho, korkeus, roottorin halkaisija, melupäästötiedot), joita voidaan käyttää tuulivoimaloiden meluvaikutusten arviointiin mallintamalla (**kaavoitus-YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnus**).

Rakennuslupavaiheessa on oltava tiedossa valittu vaihtoehto, ja vasta tässä vaiheessa voidaan lopullisesti arvioida valitun ratkaisun meluvaikutukset melumallinnuksen avulla. Mikäli valittu ratkaisu on joku jo edellisessä vaiheessa tarkastelluista suunnitteluvaihtoehtoista, uutta melumallinnusta ei kuitenkaan tarvita.

Mikäli tuulivoimalalle tai tuulivoima-alueelle käynnistetään ympäristölupaharkinta eli edellisen suunnitteluvaiheen melumallinnus osoittaa, että tuulivoimala tai tuulivoima-alue voi aiheuttaa meluhäiriötä (melun suunnitteluohjearvot ylittyvät) jossain tai joissain altistuvista kohteista, tarvitaan tarkennettu melumallinnus ympäristölupaharkintaa ja -menettelyä varten (**ympäristölupavaiheen melumallinnus**).

Tässä ohjeistusehdotuksessa melumallinnusta tarkastellaan kolmen viimeisen suunnitteluvaiheen osalta. Esisuunnitteluvaiheen melumallinnus on täysin hankkeen toteuttajan valittavissa, mutta kolmen viimeisen suunnitteluvaiheen osalta voidaan lupamenettelyihin liittyen edellyttää tiettyjen melumallinnuksen menettelytapojen noudattamista. Luonnollisesti hankkeen toteuttajan kannattaa jo esisuunnitteluvaiheessa noudattaa mahdollisimman pitkälti olemassa olevaa ohjeistusta, jotta melumallinnuksen tulokset ovat yhdenmukaiset koko toteutusprosessin ajan.

Ohjeistusehdotuksena on kaksiosainen melumallinnus:

- Kaavoitus- ja YVA-menettelyvaiheessa meluvaikutusten tarkastelu perustuu turbiinien melupäästön ”ylärajatarkasteluun”. Suunniteltujen tuuliturbiinien melupäästölle on käytettävä valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuuarvoa. Melupäästön takuuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus, jolloin etenemislaskennassa voidaan käyttää ISO 9613-2 standardiin perustuvia vakioituja etenemiseen liittyviä sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Vain maaston pinnan laatu ja muoto otetaan erillisinä huomioon seuraavasti:
 - tuulivoimala sijaitsee akustisesti kovan heijastavan pinnan ympäröimänä (kuva tilannetta, jossa tuulivoimala on veden ympäröimä)
 - tuulivoimala sijaitsee tyypillisellä sisämaan sijoituspaikalla (kohtalaisen tasainen pelto-metsä-järvi-alue, jossa hankealueen korkeuserot ovat enintään 40 m)
 - hankealueen korkeuserot ovat yli 40 m eli tuulivoimalan perustukset sijaitsevat korkealla suhteessa melulle altistuvan kohteen maanpinnan korkeuteen (esimerkiksi korkeat kummut ja tunturit).

Kaavoitusvaiheessa ja YVA-menettelyssä voidaan tarkastella useita turbiinityypin-, lukumäärä- ja sijoitusvaihtoehtoja ja mallintaa eri vaihtoehtojen tuottamia melualueita. Rakennuslupavaiheen melumallinnuksessa tarkastellaan vain toteutukseen valittua vaihtoehtoa. Uutta melumallinnusta ei kuitenkaan tarvita, mikäli valitun vaihtoehdon on todettu alittavan suunnitteluohjearvot.

- Ympäristölupaharkinnassa melumallinnusta tulee tarkentaa sekä valittujen turbiinityypin melupäästön että äänen etenemiseen liittyvien parametrien osalta. Turbiinien melupäästön mallinnuksessa on kuitenkin edelleen käytettävä valmistajan ilmoittamaa tunnus- tai takuuarvoa. Äänen etenemiseen liittyvät parametrit tulee valita sijoituspaikalla vallitsevien todellisten olosuhteiden mukaiseksi. Tämä edellyttää kuitenkin ISO 9613-2 mallista poikkeavaa, tarkempaa mallinnusmenetelmää Nord2000. Ympäristölupavaiheessa on tarkasteltava miten häiritsevän melun alueelle mahdollisesti jäävien asuinrakennusten, loma-asumiseen tarkoitettujen rakennusten tai muiden erityistä suojaa vaativien alueiden meluhäiriö saatetaan hyväksyttäviin rajoihin.

Ohjeiden mukaisella mallinnuksella on mahdollista kuvata tuuliturbiinien aiheuttama äänenpainetaso yksittäisessä mallinnuspisteessä tai tehdä melualuekarttoja, joissa alueen melutaso on tietyissä rajoissa.

Ohjeet perustuvat viitteisiin [i - vii].

2 MÄÄRITELMIÄ

Äänenpaine p [Pa]

Ääneen liittyvä hetkellisen paineen ja staattisen ilmanpaineen ero, yleensä tehollisarvona.

A-painotettu äänenpaine p_A [Pa]

Äänenpaine määritettynä A-taajuuspainotusta käyttäen, yleensä tehollisarvona.

Äänenpainetaso L_p [dB]

Äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

A-äänitaso L_{pA} [dB]

Hetkellisen A-painotetun äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

Keskiäänitaso (ekvivalentti A-äänitaso, ekvivalenttitaso) L_{Aeq} [dB]

A-painotetun äänenpaineen keskimääräistä tehollisarvoa määritetyllä aikavälillä (T) vastaava A-äänitaso ($L_{Aeq,T}$). Valtioneuvoston päätöksessä n:o 993/1992 suureesta käytetään nimitystä A-painotettu ekvivalenttitaso.

Keskiäänitaso määritellään yhtälöllä

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right)$$

$$= 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right),$$

missä

t_1	on määritellyn aikavälin T alkuhetki
t_2	on määritellyn aikavälin T loppuhetki
$L_{pA}(t)$	on tarkasteltavan äänen A-äänitason hetkellisarvo [dB]
$p_A(t)$	on tarkasteltavan äänen A-painotetun äänenpaineen hetkellisarvo [Pa]
p_0	on vertailuäänepaine 20 μ Pa.

Tuulivoimalan näennäinen äänitehotaso (apparent sound power level) $L_{WA,k}$ [dB]

Taustamelukorjatuista äänenpainetasoista ($L_{Aeq,c,k}$) määritetty näennäinen äänitehotaso:

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \lg \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right]$$

missä

$L_{Aeq,c,k}$	on taustamelukorjattu A-painotettu äänenpainetaso
R_1	on vino etäisyys roottorin navasta mikrofoniiin (m)
S_0	on referenssiaala = 1 m ² .

Tonaalisuus

Yhden tai useamman äänksen äänenpainetaso ja peittoäänien tason erotus kriittisellä kaistalla äänksen (äänksien) ympärillä.

Tuulen nopeuden referenssiarvo

Tuulen nopeus, jonka vallitessa äänenpainetaso (immissiotasot melualueilla) tulee mallintaa. Referenssiarvona tuulen nopeus 8 m/s 10 m korkeudessa.

3 MELUMALLINNUSOHJEISTUS

3.1 Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnus

3.1.1 Tuuliturbiinien melupäästö, tyyppi ja sijoitusvaihtoehdot

Tuulivoimalan tai tuulipuiston kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnuksessa on käytettävä lähtötietoina standardin IEC 61400-11 [i] mukaisten mittausten perusteella määritettyjä standardin IEC TS 61400-14 [ii] mukaisesti valmistajan ilmoittamia tuuliturbiinien tunnus- tai takuuarvoja (valmistajan ilmoittama ”declared value” tai ”warranted level”).

Äänitehotasot ilmoitetaan 1/3-oktaaveittain keskitaajuuksilla 20 Hz - 10 000 Hz ja oktaaveittain keskitaajuuksilla 31,5 Hz - 8000 Hz. Vanhemmille, ennen vuoden 2012 joulukuuta testatuille tuulivoimalatyypeille voidaan hyväksyä standardin vanhemman version [iii] mukaisesti 1/3-oktaavikaistoittaiseksi taajuusalueeksi 50 Hz - 10 000 Hz. Pienitaajuisen melun vaikutus immissiopisteissä on tällöin tarkastettava erikseen esim. ekstrapoloimalla pienimpien taajuuksien äänitehotasot tuuliturbiini(e)n melupäästön taajuuskäyrästä. Äänitehotasojen tulee olla saatavilla 10 m:n referenssikorkeutta vastaavilla tuulen nopeuksilla 8 m/s ja 10 m/s.

Melupäästön takuuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus, jolloin etenemislaskennassa voidaan käyttää ISO 9613-2 perustuvia vakioituja etenemiseen liittyviä sää- ja ympäristöolosuhdearvoja, eikä mahdollisessa mallinnustulosten verifiointissa mittauksin tarvitse tehdä epävarmuusarviota.

Kaavoitus- ja mahdollisessa YVA-vaiheessa voidaan tarkastella useita turbiinityyppi-, lukumäärä- ja sijoitusvaihtoehtoja ja mallintaa eri vaihtoehtojen tuottamia melualueita. Rakennuslupavaiheen mallinnuksessa tarkastellaan vain toteutukseen valittua vaihtoehtoa. Uutta mallinnusta ei tarvita, mikäli valittu vaihtoehto on mallinnettu jo kaavavaiheessa ja melutasojen on todettu alittavan suunnitteluohjearvot.

3.1.2 Immissiopisteiden laskentakorkeus

Immissiopisteiden (laskennan kohdepisteet) laskentakorkeus on 4 m maanpinnasta kaikissa kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnuksissa. Immissiopisteen 4 m:n korkeudella kompensoidaan ISO 9613-2 mallin tuottamia liian alhaisia mallinnustasoja korkean äänilähteen ja peitteisen maaston tapauksessa. Validointimittauksissa mittauskorkeutena tulee kuitenkin käyttää 1,5 ... 2 m verrattaessa mittaustuloksia mallinnustuloksiin.

3.1.3 Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus ja geometrinen vaimennus

Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnuksessa kukin tuuliturbiini mallinnetaan ympärisäteilevänä suuntaamattomana pistelähteenä tuulen suunnasta riippumatta. Äänen säteily mallinnetaan vapaaseen avaruuteen, jolloin geometrinen vaimennus on 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa.

3.1.4 Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus

Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnuksessa ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus mallinnetaan lämpötila-arvolla 15 °C ja ilman suhteellisen kosteuden arvolla 70 % käyttäen standardin ISO 9613-1 (1996) [iv] mukaisia absorptioarvoja.

3.1.5 Maaperän tai veden absorptio/heijastusten ja muodon vaikutus

Maaperän tai veden absorptio/heijastus ja muoto mallinnetaan kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheen melumallinnuksessa parhaiten soveltuvalla seuraavista kolmesta vaihtoehdosta käyttäen ISO 9613-2 standardin mukaisia vakioituja vaimennuksen/heijastuksen arvoja:

- tuulivoimala sijaitsee akustisesti kovan heijastavan pinnan ympäröimänä (kuvaa tilannetta, jossa tuulivoimala on veden ympäröimä), mallinnuksessa käytettävä vaikutuskerroin: 0
- Metsä- ja viljelysmaan sekä mahdollisten vesialueiden ympäröimä voimala, jossa hankealueen korkeuserot enintään 40 m, maa-alueella maaperän vaikutuskerroin: 0,4; vesialueella vaikutuskerroin: 0
- Hankealueen korkeuserot yli 40 m, esimerkiksi kummulla tai tunturissa sijaitseva voimala, maaperän vaikutuskerroin: 0

3.1.6 Sääolosuhde

Kaavoitus-, YVA- ja rakennusvaiheen melumallinnuksissa mallinnuksen perustana oleva sääolosuhde on periaatteessa määritelty Pasquill-luokkiin neutraali – stabiili, esim. [v]. Pasquill-luokat riippuvat tuulen nopeudesta, tuulen nopeusprofiilista, pilvisyydestä ja auringon asennosta horisonttiin nähden. Stabiili ilmakehä on huomattavan yleinen yöaikaan ja syksyllä, epästabiili ilmakehä on yleisempi päivällä ja keväällä. Tässä mallinnusvaiheessa sääolosuhdeiden vaikutus huomioidaan käyttämällä standardin ISO 9613-2 mukaisessa mallissa meteorologisen korjauksen arvoa 0.

3.1.7 Laskennan vaaka- ja pystyresoluutio

Kaavoitus-, YVA- ja rakennusvaiheen melumallinnuksissa laskennan vaakaresoluutiona tulee käyttää arvoa 1,0 m ja pystyresoluutiona arvoa 2,5 m. Suositeltavaa on käyttää laserkeilattua maaston topografiaa. Mikäli maastosta ei ole saatavissa kartta-aineistoa edellä mainitulla tarkkuudella, on mallinnuksessa käytettävä tarkinta mahdollista maaston vaaka- ja pystyresoluutiota.

3.1.8 Pienitaajuuden melun etenemisvaimennus

Kaavoitus-, YVA- ja rakennusvaiheen melumallinnuksissa pienitaajuinen melu on tarkasteltava erikseen 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 - 200 Hz soveltaen Tanskan ympäristöministeriön julkaisemaa ohjetta [vi], jossa on myös pientaajuuden melun laskennan yksinkertainen periaate. Lähtökohdana on standardin ISO 9613-2 mukainen laskenta, jossa otetaan huomioon vain geometrinen etäisyysvaimennus ja seuraavassa taulukossa esitetyt maa- tai vesialueen vahvistuksen/vaimennuksen ja ilmakehän absorptio aiheuttamat vakioidut vaikutukset.

Maa- tai vesialueen vahvistus ja ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus pienitaajuiselle melulle [vi, soveltaen].

Taajuus [Hz]	Maaperän aiheuttama vahvistus A_{gr} [dB]	Vesialueen aiheuttama vahvistus A_{gr} [dB]	Ilmakehän aiheuttama vaimennus A_{atm} [dB/km],
20	5.6	6.0	0.0
25	5.4	6.0	0.02
31.5	5.2	5.9	0.03
40	5.0	5.9	0.05
50	4.7	5.8	0.07
63	4.3	5.7	0.11
80	3.7	5.5	0.16
100	3.0	5.2	0.25
125	1.8	4.7	0.38
160	0.0	4.0	0.57
200	-1,8	3,0	0,82

Vesialueen kokonaan ympäröivien (offshore) turbiinien osalta käytetään vesialueen vaimennusta, jos immission laskentapiste on rannan välittömässä läheisyydessä ja maaperän aiheuttamaa vaimennusta, jos laskentapiste on maalla vähintään 200 m etäisyydellä rannasta. Näiden väliin jäävällä alueella voi käyttää näistä kahdesta arvosta lineaarisesti interpoloitua arvoa. Menetelmää ei ole installoitu kaupallisiin ohjelmiin, joten pientaajuisen melun vaikutusten laskenta edellyttää erillislaskentaa.

Seuraavassa taulukossa on esitetty kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheiden melumallinusten laskentaparametrien tiivistetty yhteenveto.

Kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheiden melumallinnuksessa käytettävät laskentaparametrit.

Mallinnukseen tarvittava suure ¹⁾	Mallinusparametrin arvo kaavoitus-, YVA- ja rakennuslupavaiheiden melumallinnuksessa ²⁾	Standardi tai muu ohje, jonka mukaan parametri on määritettävä
Tuuliturbiini(e)n melupäästö tuulen nopeudella 8 m/s referenssi-korkeudella 10 m	Valmistajan ilmoittama(t): 1. Melupäästön (äänitehotason) tunnus- tai takuuarvo 2. Melupäästön tonaalisuus tai kapeakaistaisuus 3. Pienitaajuisen melun tason voimakkuus (1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 – 200 Hz)	1. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) ³⁾ IEC TS 61400-14 (2005) 2. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) 3. DSO 1284 (2011) ⁴⁾
Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus	Oletuksena ympärisäteilevä suuntaamaton pistelähde tuulen suunnasta riippumatta.	Äänen säteily vapaaseen avaruuteen, geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa.
Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus	Lämpötila: 15 °C Ilman suhteellinen kosteus: 70 %	ISO 9613-1 (1996)
Vesialueen tai maaperän laadun ja muodon vaikutus	Veden ympäröimä voimala, vedenpinnan vaikutuskerroin: 0 Metsä- ja viljelysmaan sekä mahdollisten vesialueiden ympäröimä voimala, jossa hankealueen korkeuserot enintään 40 m, maa-alueella maaperän vaikutuskerroin: 0,4; vesialueella vaikutuskerroin: 0 ⁵⁾ Hankealueen korkeuserot yli 40 m, esimerkiksi kummulla tai tunturissa sijaitseva voimala, maaperän vaikutuskerroin: 0	ISO 9613-2 (1996), 7.3.1 General method of calculation kaikissa kolmessa tapauksessa
Sääolosuhde	Neutraali - stabiili sääolosuhde, meteorologinen korjaus: 0	ISO 9613-2 (1996)
Laskennan vaakaja pystyresoluutio	Vaakaresoluutio: 1,0 m Pystyresoluutio: 2,5 m	Tai tarkin käytettävissä oleva resoluutio
Pientaajuisen melun etenemisvaimennus	Geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa, maa- ja vesialuevaikutus DSO 1284:n mukaan	DSO 1284 (2011) ⁴⁾

¹ Immissiopisteen (laskennan kohdepiste) laskentakorkeus 4 m maanpinnasta kaikissa tapauksissa, immissiopisteen 4 m:n korkeudella kompensoidaan ISO 9613-2 mallin tuottamia liian alhaisia mallinnustasoja korkean äänilähteen ja peitteisen maaston tapauksessa. Validointimittauksissa mittauskorkeutena tulee kuitenkin käyttää 1,5 ... 2 m verrattaessa mittaustuloksia mallinnustuloksiin.

² Kaavoitus- ja YVA-mallinnusvaiheissa voi olla useita tarkasteluvaihtoehtoja.

³ Vanhemmille, ennen vuoden 2012 joulukuuta testatuille tuulivoimalatyypeille voidaan hyväksyä standardin vanhemman version [iii] mukaisesti 1/3-oktaavikaistoittaiseksi taajuusalueeksi 50 Hz – 10 000 Hz.

⁴ The Danish Ministry of Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011.

⁵ Maavaikutuksen arvo tulee valita maa- tai vesialueen mukaan. Metsä- ja viljelysmaalle käytetään maavaikutuksen arvoa 0,4 ja vesialueille (lammet ja järvet) arvoa 0. Jokia ja puroja ei mallinneta vesialueina.

3.2 Ympäristölupavaiheen melumallinnus

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa tarkastellaan vain rakennusluvan mukaista turbiinityyppi-, lukumäärä- ja sijoitusvaihtoehtoa.

Ympäristölupavaiheessa melumallinnusta tulee tarkentaa huomioimalla sekä valittujen turbiinityyppien melupäästön erityispiirteet (impulssimaisuus, amplitudimodulaatio) että paikalliset äänen etenemiseen liittyvät parametrit. Turbiinien melupäästön mallinnuksessa on kuitenkin edelleen käytettävä valmistajan ilmoittamaa takuuarvoa. Äänen etenemiseen liittyvät parametrit tulee valita sijoituspaikalla vallitsevien todellisten olosuhteiden mukaiseksi. Tämä edellyttää kuitenkin ISO 9613-2 menetelmää tarkemman Nord2000 melumallinnusmenetelmän käyttämistä.

3.2.1 Tuuliturbiinien melupäästö, tyyppi ja sijoitusvaihtoehdot

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen ympäristölupaharkintaan liittyvässä melumallinnuksessa on käytettävä lähtötietoina rakennusluvan mukais(t)en tuuliturbiini(e)n standardin IEC 61400-11 [i] mukaisten mittausten perusteella määritettyjä standardin IEC TS 61400-14 [ii] mukaisesti valmistajan ilmoittamia tuuliturbiinien tunnus- tai takuuarvoja (valmistajan ilmoittama ”declared value” tai ”warranted level”).

Äänitehotasot ilmoitetaan 1/3-oktaaveittain keskitaajuuksilla 20 Hz – 10 000 Hz ja oktaaveittain keskitaajuuksilla 31,5 Hz – 8000 Hz. Vanhemmille, ennen vuoden 2012 joulukuuta testatuille tuulivoimalatyypeille voidaan hyväksyä standardin vanhemman version [iii] mukaisesti 1/3 oktaavikaistoittaiseksi taajuusalueeksi 50 Hz – 10 000 Hz. Pienitaajuisen melun vaikutus immissiopisteissä on tällöin tarkastettava erikseen esim. ekstrapoloimalla pienimpien taajuuksien äänitehotasot tuuliturbiini(e)n melupäästön taajuuskäyrästä. Äänitehotasojen tulee olla saatavilla ainakin 10 m:n referenssikorkeutta vastaavilla tuulen nopeuksilla 8 m/s ja 10 m/s.

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa mallinnusta tulee tarkentaa huomioimalla valittujen turbiinityyppien melupäästön mahdolliset erityispiirteet impulssimaisuus ja vaihteluvomakkuus (amplitudimodulaatio). Melupäästön impulssimaisuus määritetään tarvittaessa standardin SFS-EN ISO 3744:2009 Annex D [vii] ja melupäästön vaihteluvomakkuus (amplitudimodulaatio) viitteen [viii] mukaan.

Melupäästön takuuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus, vaikka etenemislaskennassa käytetäänkin Nord2000 menetelmään perustuvia etenemiseen liittyviä sää- ja ympäristöolosuhdearvoja. Tällöin mahdollisessa mallinnustulosten verifiointissa mittauksin ei tehdä epävarmuusarviota.

3.2.2 Immissiopisteiden laskentakorkeus

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa immissiopisteiden (laskennan kohdepisteet) laskentakorkeus on 2 m maanpinnasta. Validointimittauksissa mittauskorkeutena tulee käyttää 1,5 ... 2 m verrattaessa mittaustuloksia mallinnustuloksiin.

3.2.3 Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus ja geometrinen vaimennus

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa kukin tuuliturbiini mallinnetaan ympärisäteilevänä suuntaamattomana pistelähteenä. Äänen säteily mallinnetaan vapaaseen avaruuteen, jolloin geometrinen vaimennus on 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Tuulen tilastollinen suunta- ja nopeusinformaatio voidaan ottaa huomioon Nord2000 mallinnusmenetelmän mukaisesti, mikäli luotettava tuulen suuntainformaatio on saatavilla.

3.2.4 Ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa ilmakehän absorptio aiheuttama vaimennus mallinnetaan lämpötila-arvolla 15 °C ja ilman suhteellisen kosteuden arvolla 70 % käyttäen standardin ISO 9613-1 (1996) [iv] arvoja.

3.2.5 Maaperän tai veden absorptio/heijastusten ja muodon vaikutus

Maaperän tai veden absorptio/heijastus ja muoto mallinnetaan ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa parhaiten soveltuvalla seuraavista kolmesta vaihtoehdosta käyttäen Nord2000 menetelmän mukaisia vakioitua vaimennuksen/heijastuksen arvoja:

- Tuulivoimala sijaitsee akustisesti kovan heijastavan pinnan ympäröimänä (kuvaa tilannetta, jossa tuulivoimala on veden ympäröimä), mallinnuksessa käytettävä vaikutuskerroin: G
- Metsä- ja viljelysmaan sekä mahdollisten vesialueiden ympäröimä voimala, jossa hankealueen korkeuserot enintään 40 m, Maavaikutuksen arvo tulee valita maa- tai vesialueen mukaan riittävällä tarkkuudella. Metsä- ja viljelysmaalle käytetään maavaikutuksen arvoa A ... D, kovalle heijastaville pinnoille (esim. kalliot) arvoa E ... F ja vesialueille (lammot ja järvet) arvoa G. Jokia ja puroja ei mallinneta vesialueina.
- Hankealueen korkeuserot yli 40 m, esimerkiksi kummulla tai tunturissa sijaitseva voimala, maaperän vaikutuskerroin: G

3.2.6 Sääolosuhde

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksen perustana oleva sääolosuhde on periaatteessa määriteltä Pasquill-luokkiin neutraali – stabiili, esim. [v]. Pasquill-luokat riippuvat tuulen nopeudesta, tuulen nopeusprofiilista, pilvisyydestä ja auringon asennosta horisonttiin nähden. Stabiili ilmakehä on huomattavan yleinen yöaikaan ja syksyllä, epästabiili ilmakehä on yleisempi päivällä ja keväällä.

Sääolosuhteiden vaikutus huomioidaan käyttämällä Nord2000 mukaisessa mallissa turbulenssin ja lämpötilagradientin arvoa 0 ja maanpinnan karheusermin arvoa 0,05.

3.2.7 Laskennan vaaka- ja pystyresoluutio

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa laskennan vaakaresoluutiona tulee käyttää arvoa 1,0 m ja pystyresoluutiona laserkeilaukseen perustuvaa 0,5 m:n korkeusresoluutiota, mikäli laserkeilattu aineisto olemassa. Mikäli laserkeilaukseen perustuvaa aineistoa ei ole käytettävissä, tulee käyttää tarkinta mahdollista korkeusresoluutiota, enintään 2,5 m:n korkeusresoluutiota.

3.2.8 Pienitaajuisen melun etenemisvaimennus

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa pienitaajuinen melu on tarkasteltava erikseen 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 - 200 Hz soveltaen Tanskan ympäristöministeriön julkaisemaa ohjetta [vi]. Lähtökohtana on standardin ISO 9613-2 mukainen laskenta, jossa otetaan huomioon vain geometrinen etäisyysvaimennus ja seuraavassa taulukossa esitetyt maa- vaimennuksen ja ilmakehän absorptioon aiheuttamat vakioidut vaimennukset.

Maa- tai vesialueen vahvistus ja ilmakehän absorptioon aiheuttama vaimennus pienitaajuiselle melulle [vi, soveltaen].

Taajuus [Hz]	Maaperän aiheuttama vahvistus A_{gr} [dB]	Vesialueen aiheuttama vahvistus A_{gr} [dB]	Ilmakehän aiheuttama vaimennus A_{atm} [dB/km],
20	5.6	6.0	0.0
25	5.4	6.0	0.02
31.5	5.2	5.9	0.03
40	5.0	5.9	0.05
50	4.7	5.8	0.07
63	4.3	5.7	0.11
80	3.7	5.5	0.16
100	3.0	5.2	0.25
125	1.8	4.7	0.38
160	0.0	4.0	0.57
200	-1,8	3,0	0,82

Vesialueen kokonaan ympäröivien (offshore) turbiinien osalta käytetään vesialueen vaimennusta, jos immission laskentapiste on rannan välittömässä läheisyydessä ja maaperän aiheuttamaa vaimennusta, jos laskentapiste on maalla vähintään 200 m etäisyydellä rannasta. Näiden väliin jäävällä alueella voi käyttää näistä kahdesta arvosta lineaarisesti interpoloitua arvoa. Menetelmää ei ole installoitu kaupallisiin ohjelmiin, joten pientaajuisen melun vaikutusten laskenta edellyttää erillislaskentaa.

Seuraavassa taulukossa on esitetty ympäristölupavaiheen laskentaparametrien tiivistetty yhteenveto.

Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa käytettävät laskentaparametrit.

Mallinnukseen tarvittava suure¹⁾	Mallinnusparametrin arvo ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa²⁾	Standardi tai muu ohje, jonka mukaan parametri on määritettävä
Tuuliturbiini(e)n melupäästö tuulen nopeudella 8 m/s referenssi-korkeudella 10 m	Valmistajan ilmoittama(t): 1. Melupäästön (äänitehon) tunnus- tai takuuarvo 2. Melupäästön tonaalisuus tai kapeakaistaisuus 3. Melupäästön impulssimaisuus 4. Pientaajuisen melun tason voimakkuus (1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 – 200 Hz)	1. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) IEC TS 61400-14 (2005) 2. IEC 61400-11 Ed 3.0 (2012) 3. SFS-EN-ISO 3744:2009, Annex D 4. DSO 1284 (2011) ³
Tuuliturbiinien äänen suuntaavuus, tuulen suunnan vaikutus	Tuulen suunta voidaan huomioida vallitsevien tuuliolosuhteiden mukaisena.	Nord2000 mukainen menettely tuulen suunnan huomioimiseksi.
Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus	Lämpötila: 15 °C Ilman suhteellinen kosteus: 70 %	ISO 9613-1 (1996)
Vesialueen tai maaperän laadun ja muodon vaikutus	Veden ympäröimä voimala, vaikutuskerroin: G Metsä- ja viljelysmaan sekä mahdollisten vesialueiden ympäröimä voimala, jossa hankealueen korkeuserot enintään 40 m, maa-alueella maaperän vaikutuskerroin: A ... F; vesialueella vaikutuskerroin: G ⁴⁾ Hankealueen korkeuserot yli 40 m, esimerkiksi kummulla tai tunturissa sijaitseva voimala, maaperän-vesialueen vaikutuskerroin: G	Nord2000 kaikissa kolmessa tapauksessa.
Sääolosuhde	Neutraali - stabiili sääolosuhde	Nord2000
Laskennan vaakaja pystyresoluutio	Vaakaresoluutio: 1,0 m Pystyresoluutio: 0,5 m tai tarkin mahdollinen saatavissa oleva	Käytettävä laserkeilaukseen perustuvaa 0,5 m:n korkeusresoluutiota, mikäli laserkeilattu aineisto olemassa
Pientaajuisen melun etenemisvaimennus	Geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuuessa, maa- ja vesialuevaikutus DSO 1284:n mukaan	DSO 1284 (2011) ³

1. Immissiopisteen (laskennan kohdepiste) laskentakorkeus 2 m maanpinnasta kaikissa tapauksissa.
2. Ympäristölupavaiheen melumallinnuksessa tarkastellaan vain sitä vaihtoehtoa, jolle haetaan ympäristölupaa.
3. The Danish Ministry of Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011.
4. Maavaikutuksen arvo tulee valita maa- tai vesialueen mukaan riittävällä tarkkuudella. Metsä- ja viljelysmaalle käytetään maavaikutuksen arvoa A ... D, kovalle heijastaville pinnoille (esim. kalliot) arvoa E ... F ja vesialueille (lammet ja järvet) arvoa G. Jokia ja puroja ei mallinneta vesialueina.

4 MALLINNUSTEN RAPORTOINTI

4.1 Turbiinin (turbiinien) tiedot

Turbiini(t) ja niiden käyttöolot tulee kuvata mahdollisimman tarkasti. Kaavoitus- ja YVA-vaiheessa tiedot voivat olla ”yläraajatietoja” suurinta melupäästöä edustavasta laitetypistä. Yksityiskohtaisista tiedoista osa voi olla vain lupaviranomaiselle tarkoitettua luottamuksellista tietoa. Seuraavat tiedot raportoidaan:

- turbiinin valmistaja, tyyppi ja sarjanumero;
- nimellisteho;
- tehokäyrä;
- navan korkeus;
- roottorin halkaisija;
- tornin tyyppi;
- tieto siitä, voidaanko turbiinia ohjata, turbiinin lapakulmat ja pyörimisnopeus tai muut ohjaukseen liittyvät seikat.
- melupäästötiedot

4.2 Mallinnusohjelmat ja algoritmit

Seuraavat tiedot raportoidaan:

- mallinnusohjelma ja versio
- mallinnusmenetelmä (ISO 9613-2 tai Nord2000)

4.3 Akustiset tiedot

Seuraavat tiedot raportoidaan:

- laskennan vaaka- ja pystyresoluutio
- laskennassa käytetyt lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot
- tuuliturbiinien äänen suuntaavuustiedot
- vesialueen tai maaperän vaikutuskertoimet
- laskennan sääolosuhde
- tuulivoima-alueen karttapohja, jossa tuuliturbiinien ja melulle altistuvien kohteiden (rakennusten) paikat, eri vaihtoehtojen melualueet karttapohjassa (kaavoitus- ja YVA-vaihe), valitun vaihtoehdon melualueet karttapohjassa (rakennus- ja ympäristölupavaihe), A-painotetut äänen immissiotasot altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella eniten melulle altistuvissa kohteissa
- mahdollisesti tehdyt kapeakaistaisuus-, impulssimaisuus- ja/tai amplitudimodulaatiokorjaukset lähtö- tai immissiopisteiden arvoihin; mikäli korjauksia ei ole tehty, myös tämä tulee mainita
- pienitaajuisen melun laskentamenetelmä ja A-painotetut tai lineaariset immissiotasot altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella eniten melulle altistuvissa kohteissa 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20 – 200 Hz

4.4 Muut tiedot

Seuraavat tiedot raportoidaan:

- mallintajan nimi ja organisaation yhteystiedot;
- mallinnusten suorittamisen päivämäärä(t);
- mallinnusraportin numero, laatija, tarkastaja ja hyväksyjä
- mallinnusraportin hyväksyntäpäivämäärä

LÄHDEVIITTEET

-
- i IEC 61400-11. Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Edition 3.0 2012-11. International Electrotechnical Commission.
 - ii IEC TS 61400-14. Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values. Technical specification, First edition, 2005-03. International Electrotechnical Commission.
 - iii IEC 61400-11. Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Edition 2.1 2012-11. International Electrotechnical Commission.
 - iv ISO 9613-1:1993. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. International Organization for Standardisation.
 - v Manning, C., The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities. CONCAWE 4/81, 1981.
 - vi The Danish Ministry of the Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no.1284 of 15 December 2011. 14 s.
 - vii SFS-EN ISO 3744:2009. Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure. Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. Suomen standardisoimisliitto SFS.
 - viii Karjalainen, M., Kommunikaatioakustiikka. Espoo 1999. Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing. Report 51. 237 s.