



Seppo Uosukainen

Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys

Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys

Seppo Uosukainen



ISBN 978-951-38-7570-1 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7571-8 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2010

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Toimitus Mirjami Pullinen

Edita Prima Oy, Helsinki 2010

Seppo Uosukainen. Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys [Generation, propagation and annoyance of the noise of wind power plants]. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2529. 35 s.

Avainsanat wind turbine, noise, amplitude modulation, sound propagation, annoyance, visual perception, interaction

Tiivistelmä

Tuulivoimaloiden merkittävin melulähde on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista laajakaistaista melua. Kyseisessä melussa ilmenee $\pm 2\text{--}3$ dB:n suuruinen amplitudimodulaatio tyypillisesti noin 1 Hz:n modulaatiotaajuudella. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat, joista merkittävin on vaihteisto.

Tuulivoimalan melun etenemiseen vaikuttavat oleellisesti geometrisen etenemisvaimennuksen lisäksi tuuliolosuhteet, lämpötilaprofiili erityisesti korkeussuunnassa sekä ilmakehän terminen stabiilisuus. Maanpinnan yläpuolella etenemiseen vaikuttavat lisäksi maaston korkeuserot ja pinnanmuodot sekä maanpinnan materiaalit ja kasvillisuus.

Tuulivoimaloiden melusta häiriytyy enemmän ihmisiä kuin kuljetusvälinemien häiriytyvyys–meluallistisuus-riippuvuus antaisi olettaa. Tämän katsotaan johtuvan näkö- ja kuulohavainnon yhteisvaikutuksesta sekä tuulivoimalamelun erityisen häiritsevistä ominaisuuksista, jotka aiheutuvat pääosin melun amplitudimodulaatiosta.

Seppo Uosukainen. Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys [Generation, propagation and annoyance of the noise of wind power plants]. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2529. 35 p.

Keywords wind turbine, noise, amplitude modulation, sound propagation, annoyance, visual perception, interaction

Abstract

The most remarkable noise source of wind power plants is the rotor blades of turbines generating mainly aerodynamic broadband noise. In that noise there occurs an amplitude modulation of $\pm 2\text{--}3$ dB, having typically a modulation frequency of about 1 Hz. Other noise sources are the various parts of the generation system, the most remarkable of which is the gearbox.

The propagation of the noise from a power plant is essentially affected by, besides the geometrical attenuation, the wind conditions, the temperature profile especially in the vertical direction, and the thermal stability of the atmosphere. Above ground surface, the propagation is also affected by the height differences and the surface profile of the terrain, and the materials and the vegetation of the ground surface.

The noise of wind power plants causes annoyance to a greater amount of people that could be deduced from the annoyance–noise exposure dependence of the transportation noise. This is considered to be due to the interaction of the visual and aural perceptions, and the especially disturbing properties of the noise of wind power plants, mainly due to the amplitude modulation of the noise.

Alkusanat

Tekijä kiittää VTT:tä tämän tutkimuksen rahoituksesta. Erityiskiitos Denis Siposelle ja Esa Peltolalle Johdanto-osan kirjoittamisesta.

Tässä raportissa esitetään tuulivoimaloiden melun syntymekanismeja, etenemistä ja häiritsevyyttä suppean kirjallisuuskatsauksen pohjalta. Aineistoa on tarkoitus käyttää tulevien projektisuunnitelmien pohjatietona.

Espoo 22.1.2010

Seppo Uosukainen

Sähköposti: Seppo.Uosukainen@vtt.fi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	7
2. Tuulivoimaloiden melun synty.....	8
2.1 Roottorilavat.....	8
2.1.1 Laajakaistainen aerodynaaminen melu.....	10
2.1.2 Aerodynaamisen melun amplitudimodulaatio	11
2.1.3 Jaksollinen melu.....	12
2.2 Laitemelu	13
2.2.1 Vaihteisto.....	14
2.2.2 Generaattori	14
2.2.3 Muuntajat.....	14
2.2.4 Jäähdytysjärjestelmät.....	16
2.2.5 Taajuusmuuttaja.....	17
3. Melun eteneminen	18
3.1 Geometrisen etenemisen ja ilmakehän absorptio vaikutus	18
3.2 Heijastukset	21
3.3 Lämpötila- ja tuuliprofiilin vaikutus	22
3.4 Seismiset aallot.....	26
3.5 VTT:ssä käytössä olevat ohjelmat	26
3.5.1 Atmosaku	26
3.5.2 CadnaA	27
4. Tuulivoimaloiden melun häiritsevyys	29
5. Yhteenveto	32
Lähdeluettelo.....	33

1. Johdanto

Tuulivoimatuotanto on nopeimmin kasvava energiantuotantomuoto maailmassa. Tuulivoimalaitosten yleistyessä tullaan Suomessakin suunnittelemaan niitä entistä lähemmäksi loma- ja asutuskeskuksia. Tällöin niiden aiheuttama melu ja melun häiritsevyys nousevat yhdeksi suunnittelua ja rakentamista ohjaavaksi ja rajoitettavaksi tekijäksi. Tuulivoimapuistojen suunnitteluvaiheessa tehtävä meluselvitys rajoittuu pääosin Suomen ulko- ja sisämelun ohjearvoihin (VNp 993/1992). Siinä annetut raja-arvot ovat kuitenkin suurempia kuin tuulivoimalamelun häiritseväksi koetut tasot ovat olleet.

Tässä raportissa esitetään tuulivoimaloiden melun syntymekanismia, etenemistä ja häiritsevyyttä suppean kirjallisuuskatsauksen pohjalta.

2. Tuulivoimaloiden melun synty

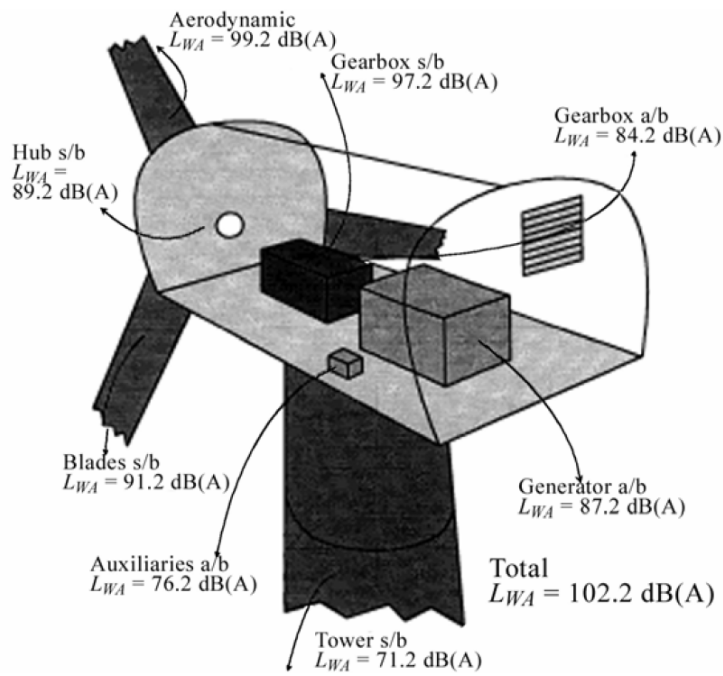
Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen 2 MW:n tuuliturbiinin eri komponenttien tuottamat äänitehotasot ja niihin liittyvät siirtotiet. Merkittävin tuulivoimaloiden melulähde on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista melua. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat, kuten vaihteisto, generaattori, muuntajat, jäähdytysjärjestelmät ja taajuusmuuttaja, jotka tuottavat pääosin mekaanista melua [1, 2, 3]. Aerodynaaminen melu on tyypillisesti nykytekniikalla rakennettujen tuulivoimaloiden merkittävin melulähde, koska laitevalmistajat ovat kyenneet vaimentamaan mekaanisen melun selvästi aerodynaamista pienemmäksi [1, 2]. Aerodynaamisen melun hallittavuus on havaittavissa varsinkin suurilla turbiinin dimensioilla [4]. Mekaanisen melun suhteellinen osuus saattaa vielä vähetä turbiinikokojen kasvaessa, koska aerodynaaminen melu kasvaa turbiinin dimensioiden myötä voimakkaammin kuin mekaaninen melu [1, 2].

Kuvassa 2 on esitetty kahden kolmilapaisen ylävirtaturbiinin tuottaman melun spektrit. Kuvassa 3 on puolestaan esitetty A-äänitaso kolmen minuutin ajalta erään tuulivoimalaitoksen lähellä. Hidas perustason muutos on peräisin tuulen nopeuden ja ilmakehän muutosten vaikutuksista. Noin 1 Hz:n modulaatio äänessä taas johtuu roottorilapojen melussa ilmenevästä amplitudimodulaatiosta, johon palataan myöhemmin. Modulaatiosyvyyden vaihtelu on peräisin useamman tuuliturbiinin roottoriäänien keskinäisen vaiheistuksen muutoksista, koska roottorit eivät pyöri täsmälleen samoilla nopeuksilla.

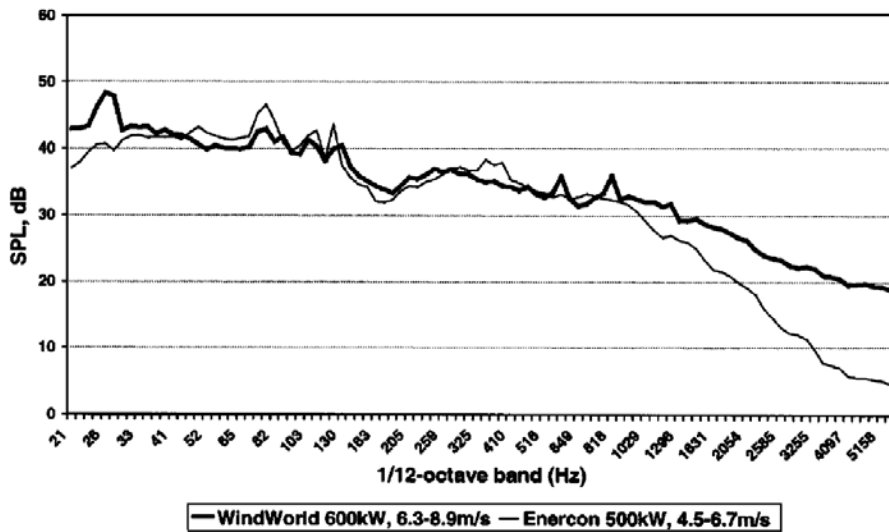
2.1 Roottorilavat

Roottorilapojen tuottama melu on tuulivoimaloiden merkittävin osamelu sekä melun voimakkuuden että häiritsevyyden kannalta. Melu on pääosin aerodynaamista ja laajakaistaista. [1, 2, 3]

2. Tuulivoimaloiden melun synty

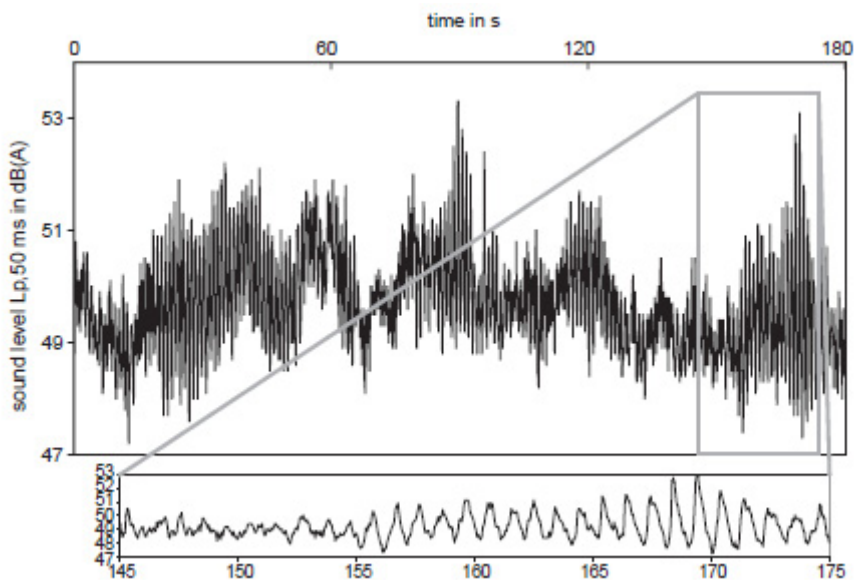


Kuva 1. Tyypillisen 2 MW:n tuuliturbiinin komponenttien tuottamat äänitehotasot; siirtotiet: a/b ilmaääni, s/b runkovärähtely [5].



Kuva 2. Kahden kolmilapaisen ylävirtaturbiinin tuottaman melun spektrit myötätuuleen [1].

2. Tuulivoimaloiden melun synty

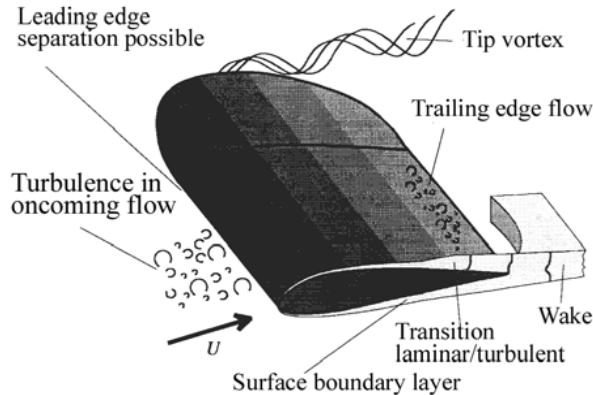


Kuva 3. Erään tuulivoimalaitoksen tuottama A-äänitaso 750 m:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista 3 minuutin ajalta mitattuna; osa äänitasovaihtelusta on zoomattu kuvan alapuolelle [6].

2.1.1 Laajakaistainen aerodynaaminen melu

Kun roottorilapa pyörii, ilmavirtaus osuu lavan profiilin kohtauspinnalle ja jatkaa matkaansa lavan yli jättöreunalle, jossa se irtoaa (ks. kuva 4). Virtauksen alkupää lavan pinnalla on laminaarinen, mutta virtauksen edetessä kohti jättöreunaa sen turbulentsisuus kasvaa. Lavan eri puoliilta tulevat turbulentsiset virtaukset kohtaavat jättöreunalla synnyttäen pyörteisen virtausvanan. Turbulentsisuuden kasvu lavan yli on sitä suurempaa, mitä suurempi on lavan profiilin muutos. Turbulenssia lisäävät jättöreunan geometria (tylppä/terävä), lapapinnan rosoisuus (liikaisuus) sekä kohtaavan ilman oma turbulenssi ja virtausnopeus. Lavan kärjessä ilmavirtaukset kohtaavat kolmesta eri suunnasta, mikä synnyttää ns. kärkipyörteen (*tip vortex*). Turbulenssi kasvaa, kun lavan kärkinopeus kasvaa. Turbulensista syntyy laajakaistaista aerodynaamista melua taajuuskaistalla 60–4 000 Hz. Sakkaussäätöisillä laitoksilla sakkaustilanteessa melu voimistuu huomattavasti; tätä ilmiötä ei synny lapakulmasäätöisissä laitoksissa. Moderneissa lapaprofiileissa lavan pinta-ala kapenee kärjessä, jolloin suurin osa melusta ei synnykään lavan kärjessä vaan alueella, joka sijaitsee lavassa kohdassa 0,75–0,95 tyvestä mitattuna [3]. American Wind Energy Associationin eräässä informaatiolomak-

keessa [7] esitetään, että lapaprofiilin optimointi toiminnallisen tehokkuuden lisäämiseksi vähentäisi aerodynaamista melua. Melua voidaan vähentää myös rajoittamalla lavan kärkinopeus tiettyyn maksiminopeuteen ja muuttamalla lapakulmaa lapakulmasäätöisissä laitoksissa [3].



Kuva 4. Virtaukset lapaprofiilissa [5].

Myös virtaavan ilman turbulenssien voimavaikutukset lavan pintaan tuottavat laajakaistaista aerodynaamista melua. Ilmiön merkittävyyttä ei ole täysin selvitetty [5].

2.1.2 Aerodynaamisen melun amplitudimodulaatio

Roottorilapojen tuottaman aerodynaamisen melun amplitudimodulaatio esiintyy yleisemmin 500 Hz:n, 1 kHz:n ja 2 kHz:n oktaavikaistoilla amplitudilla $\pm 2-3$ dB [8, 9]. Modulaatiotaajuus saadaan lausekkeesta

$$f = \frac{n\omega}{60} [\text{Hz}], \quad (1)$$

jossa n on lapojen lukumäärä ja ω on roottorin pyörimisnopeus [rpm]. Kolmilapaisen pyörimisnopeudella 26 rpm pyörivän tuuliturbiinin tuottaman melun amplitudimodulaation modulaatiotaajuus on näin ollen 1,3 Hz [8]. On myös esitetty, että amplitudimodulaatiotaajuus ei ole aivan suorassa suhteessa mainittuun lapataajuuteen ainakaan pitkillä havainnointietäisyyksillä ja että eri taajuuskomponenttien modulointi ei tapahdu samantapaisesti [9].

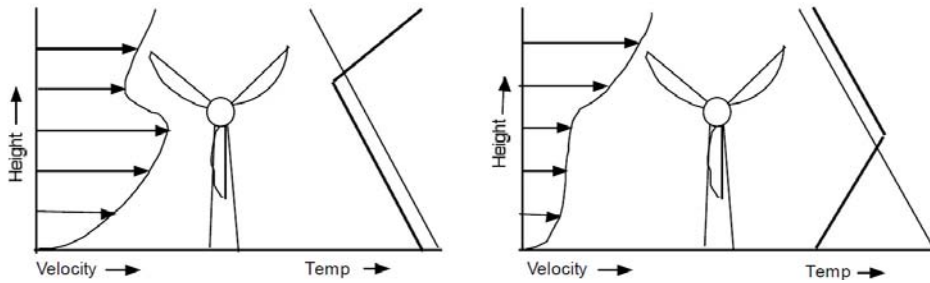
2. Tuulivoimaloiden melun synty

Amplitudimodulaation syntymekanismeja ei ole täysin yksiselitteisesti saatu selville [2]. Erään selityksen mukaan sen aiheuttaisi maston ympäri tapahtuvan häirityn virtauksen ja lapojen välinen vuorovaikutus, toisin sanoen se, kun lavat ohittavat maston aiheuttaman tuulivarjon [7]. Toinen mahdollinen selitys on maston aiheuttama pieni lapaan kohdistuva paineen pudotus lavan ollessa alimmillään [10]. Kolmannen vaihtoehdon mukaan ilmiön aiheuttaisivat lapojen äänensäteilyn suuntaavuusominaisuudet yhdessä Doppler-ilmiön kanssa. Lavat suuntaavat ääntä tasossa, joka on kohtisuorassa lavan akseliin nähden, ja tämä taso muuttuu ajallisesti, kun lapa pyörii. Doppler-ilmiön takia lavan ja havaitsijan suhteellinen liike vaikuttaa melun havaittuun taajuussisältöön: lavan lähestyessä havaitsijaa havaittu taajuus nousee ja lavan kaikutessa havaitsijasta se laskee [11]. Neljäs mahdollinen selitys on voimakas tuuliprofiilin muuttuminen lapakorkeuksilla stabiilissa ilmakehässä (ks. kuva 5). Koska lavan synnyttämä melu kasvaa, kun virtausnopeus kasvaa, ja koska virtausnopeus kasvaa korkeuden funktiona stabiilissa ilmakehässä, stabiilissa ilmakehässä lapa tuottaa enemmän ääntä yläasennossa kuin ala-asennossa ollessaan. Amplitudimodulaation perustuminen tähän ilmiöön saa lisäksi tukea siitä, että modulaatio ilmenee voimakkaimmin yöaikaan, jolloin stabiili ilmakehä maanpinnan läheisyydessä on todennäköisempää [12].

Bowdlerin [9] mukaan amplitudimodulaatiossa vaikuttaa kaksi eri mekanismia. Toinen on suhahtamisilmiö (*swishing*), joka syntyy voimakkaasti ääntä suuntaavien lapojen pyöriessä. Toinen on jyskytys (*thumping*), joka syntyy, kun turbiinilavat kulkevat pyöriessään epätasaisesti jakautuneiden virtausten läpi.

2.1.3 Jaksollinen melu

Epästabiili virtaus reikien, rakojen tai tylpän jättöreunan yli voi aiheuttaa myös tonaalisia äänikomponentteja [5].



Kuva 5. Neutraali ilmakehä maanpinnan lähellä ja stabiili ylempänä (vasen); stabiili ilmakehä maanpinnan lähellä ja neutraali ylempänä (oikea) [12].

Alavirtakoneet, joissa roottori toimii tuuleen nähden maston alavirtapuolella, tuottavat pienitaajuisia melua (20–100 Hz) ja infraääntä. Näitä syntyy muun muassa silloin, kun pyörivä roottorilapa kohtaa maston ohittavan ilmavirtauksen paikallisia muutoksia. Infraääntä voi myös syntyä lavan ja maston väliin jaksollisesti puristuvan ilman johdosta. Kumpikin näistä ilmiöistä tuottaa jaksollista ääntä lapataajuudella, joka on sama kuin aerodynaamisen melun modulaatiotaajuus (ks. lauseke (1)), sekä tämän kerrannaisilla. Lapataajuinen melu osuu infraäänialueelle ja korkeammat harmoniset, jotka saattavat olla voimakkuudeltaan merkittäviä, kuuloualueelle. Useimmat uudemmat tuulivoimalat rakennetaankin ylävirtakoneiksi, jossa roottori toimii maston ylävirtapuolella. Ne eivät tuota yhtä paljon pienitaajuisia melua ja infraääntä [4, 5, 13].

2.2 Laitemelu

Sähköntuottolaitteisto synnyttää konehuoneeseen ja sen ulkopuolelle ilmaääntä sekä tukirunkoon värähtelyä. Jälkimmäinen tuottaa konehuoneen ulkopuolelle ääntä ja on tyypillisesti merkittävämpi melulähde kuin suora ilmaääni. Suora ilmaääni etenee konehuoneen ulkopuolelle pääosin jäähdytysjärjestelmien ilmavaihtoaukon välityksellä [3]. Laitemelu on enimmäkseen mekaanista: pääosa sen energiasta on 1000 Hz:n alapuolisilla taajuuksilla, ja se sisältää kapeakaistaisia komponentteja [1, 2]. Pääasialliset meluntorjuntakeinot ovat kotelointi, tärinäneristimet ja siirtotien katkaisu tehokkaasti ääntä säteileville pinnoille.

2. Tuulivoimaloiden melun synty

2.2.1 Vaihteisto

Vaihteisto on konehuoneen merkittävin melulähde [1, 3] tuottaessaan ääntä hammaspyörien ryntötaajuudella ja sen kerrannaisilla. Vaihteisto on koteloitu, mikä osaltaan vähentää äänilähteen merkittävyyttä.

2.2.2 Generaattori

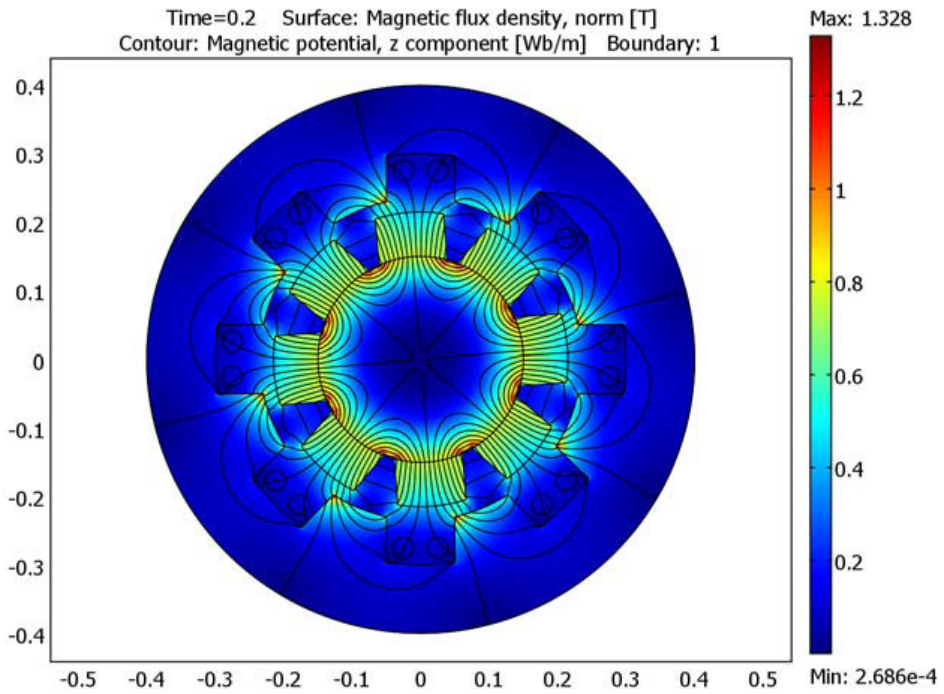
Myös generaattori on merkittävä äänilähde, vaikka sekin on koteloitu äänen tuoton vähentämiseksi. Magneettiset voimavaikutukset aiheuttavat staattorin värähtelyä, joka voi siirtyä kotelo- ja tukirakenteisiin. Pintojen värähtely tuottaa ääntä edelleen.

Käämivirtaan liittyvän magneettivuon ja roottorin magneettisten osien vuorovaikutus (ks. kuva 6) tuottaa magneettikentän toiseen potenssiin verrannollisen voiman. Näin ollen se tuottaa kapeakaistaista melua pääosin tuottotaajuuden toisella kerrannaisella ja lisäksi sen hyvinkin korkeilla monikerroilla aina taajuuksiin 1...5 kHz saakka [14, 15, 16]. Lisäksi roottoritankoihin induoitunut virta aiheuttaa ajan ja paikan funktiona vaihtelevia voimia staattorin hampaille (ks. kuva 7), jotka edelleen herättävät staattorin ominaismuodot värähtelemään (ks. kuva 8). Tämän värähtelyn perustaajuus määräytyy roottorin urien ohitusnopeuden perusteella, ja spektrissä on paljon sivukeiloja [15].

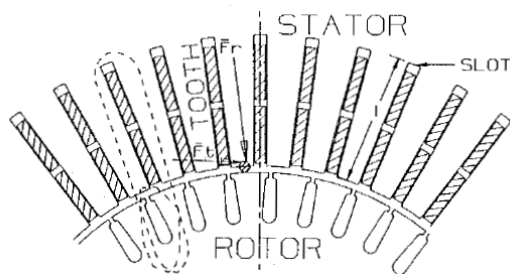
2.2.3 Muuntajat

Generaattorin muuntaja tuottaa kapeakaistaista melua pääosin verkkotaajuuden toisella kerrannaisella ja sen monikerroilla, eli 50 Hz:n verkossa taajuudella 100 Hz ja sen kerrannaisilla. Muuntajamelun voimakkuus on yleensä pieni. [3]

2. Tuulivoimaloiden melun synty

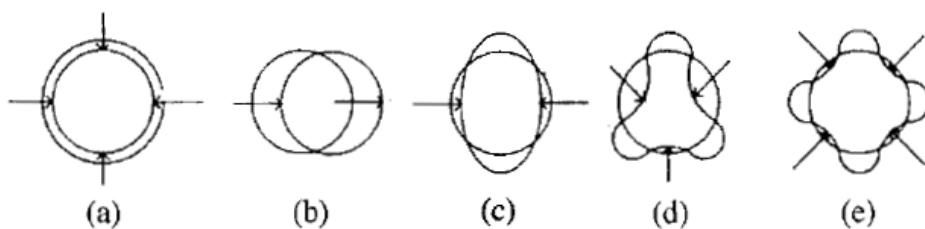


Kuva 6. Magneettivuon tiheys sähkökoneessa [17].



Kuva 7. Magneettikenttä roottoritankojen ympärillä ja siitä syntyvät voimat [15].

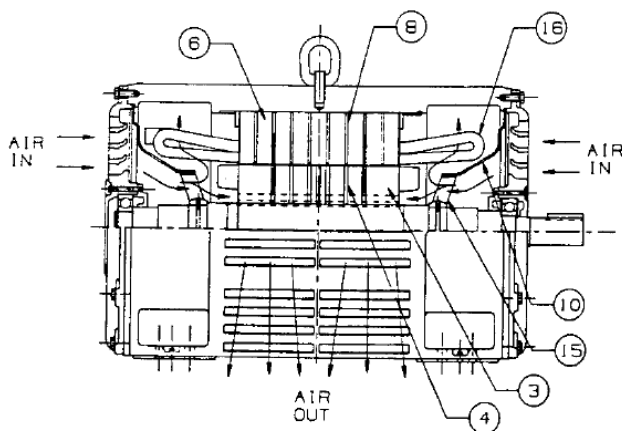
2. Tuulivoimaloiden melun synty



Kuva 8. Staattorin värähtelymuotoja [15].

2.2.4 Jäähdytysjärjestelmät

Generaattorin jäähdytys on toteutettu joko ilma- tai vesijäähdytyksellä. Jäähdytysmelua syntyy lähinnä ilmajäähdytyksen yhteydessä, kun roottorin liikkuvat ja myös generaattorin paikallaan olevat osat sekä generaattorin läpi kulkeva jäähdytysilma joutuvat keskenään vuorovaikutukseen (ks. kuva 9). Tämä melu on luonteeltaan ilmaääntä, eikä se aiheuta rungon värähtelyä. Äänilähde on merkittävä avonaisilla generaattoreilla [15].



Kuva 9. Puhaltimen tuottama ilmavirta roottorin läpi [15].

Turbiinin käydessä hydraulikka- ja vaihteistoöljy kuumenevat. Öljy jäähdytetään usein ilmajäähdytyksellä, jolloin melua syntyy tulo- ja lähtöilman virtauksesta. Syntyvään ääneen summautuu lisäksi puhaltimen synnyttämä melu [3].

2.2.5 Taajuusmuuttaja

Muuttuvanopeuksisen laitoksen taajuusmuunnin eli invertteri tuottaa suuritaajuista kapeakaistaista melua [3], jossa on paljon harmonisia komponentteja. Eri-tyisesti jos taajuuskomponentit osuvat rakenteen ominaistaajuuksille, niillä voi olla meluun merkittävä vaikutus. Taajuusmuuttajan tuottama melu on havaittavissa pääosin voimalan välittömässä läheisyydessä [3].

3. Melun eteneminen

Tuulivoimalan melun etenemiseen vaikuttavat oleellisesti geometrisen etenemisvaimennuksen lisäksi tuuliolosuhteet, lämpötilaprofiili erityisesti korkeussuunnassa sekä ilmakehän terminen stabiilisuus. Maanpinnan yläpuolella etenemiseen vaikuttavat lisäksi maaston korkeuserot ja pinnanmuodot sekä maanpinnan materiaalit ja kasvillisuus. Kasvillisuus ja pehmeä maa absorboivat ääntä merkittävästi. Veden pinta on akustisesti kova ja heijastava, joten etenemisvaimennus veden yli on vähäisempää kuin vastaavalla matkalla maanpinnalla. Aallokko tuulisella säällä aiheuttaa äänen sirontaa ja taustamelua.

3.1 Geometrisen etenemisen ja ilmakehän absorptioin vaikutus

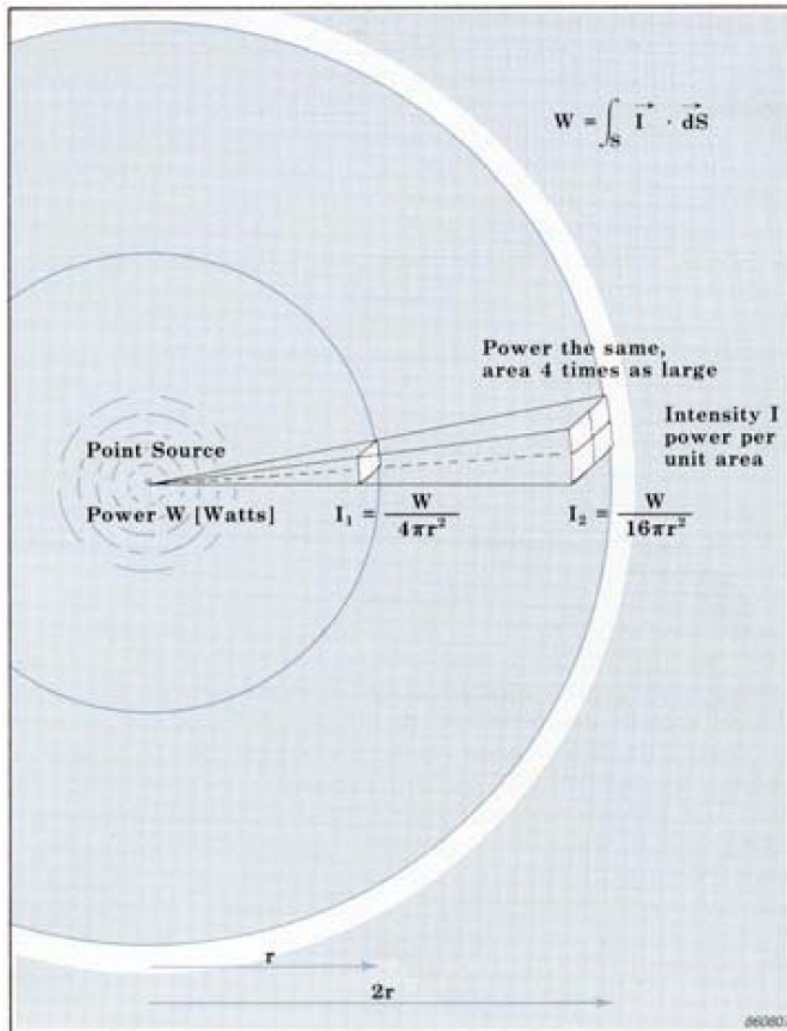
Geometrinen etenemisvaimennus ja ilmakehän absorptioin vaikutus keskitetyn äänilähteen äänelle voidaan esittää muodossa

$$L_p(r) = L_w - 10 \log_{10}(2\pi r^2) - \Delta L_a(r), \quad (2)$$

kun äänilähteen korkeus maan tai veden pinnasta on paljon pienempi kuin havainnointietäisyys. Lausekkeessa (2) $L_p(r)$ on äänenpainetaso [dB] etäisyydellä r äänilähteestä, L_w on äänilähteen äänitehotaso [dB] ja $\Delta L_a(r)$ on ilmakehän absorptiosta syntyvä vaimennus [dB]. Esitetty kaava koskee äänilähdettä, joka säteilee ääntä tasaisesti kaikkiin suuntiin. Mahdolliset suuntaavuusominaisuudet voidaan huomioida erikseen painottamalla äänitehotasoa suuntaavuusominaisuuksien mukaisesti eri suuntiin.

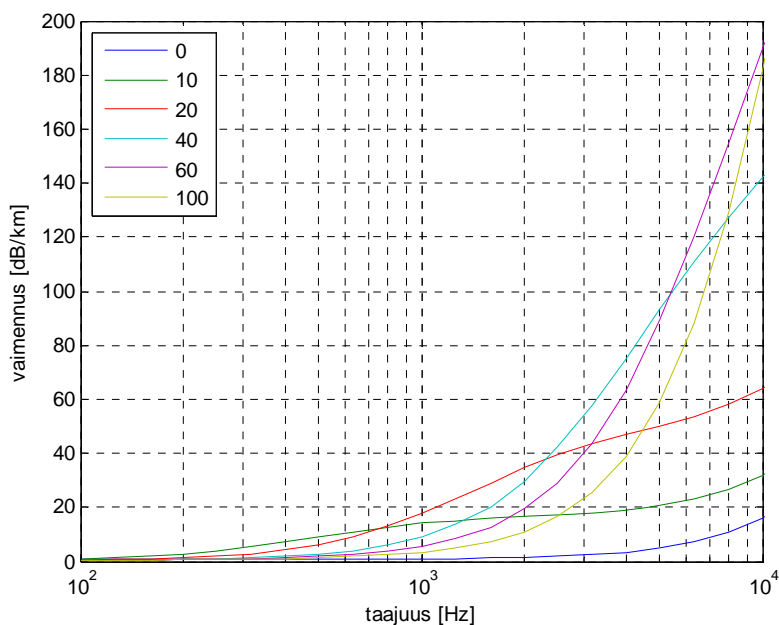
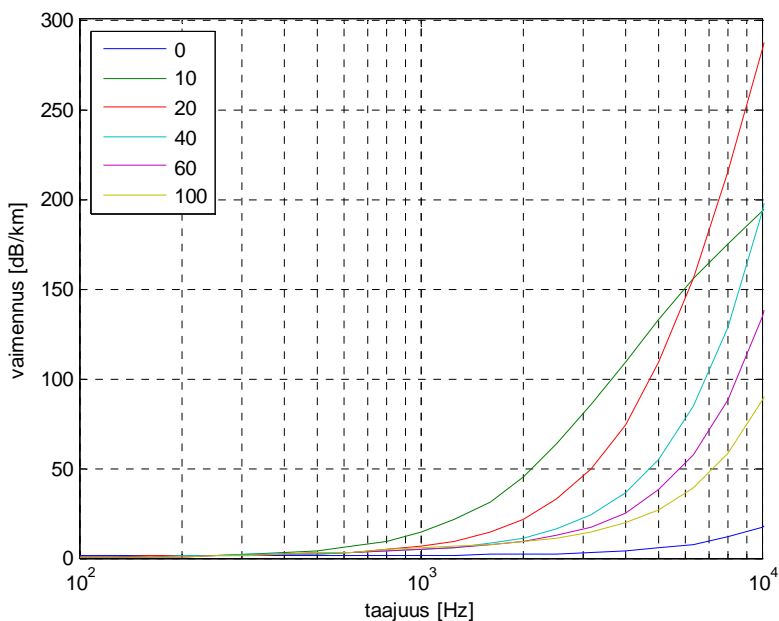
Kuvassa 10 on esitetty äänen intensiteetin vaimeneminen etäisyyden funktiona. Nähdään, että intensiteetti vähenee neljäsosaan eli intensiteettitaso alenee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Äänenpainetaso vähenee etäisyyden funktiona

(kaukana äänilähteestä) kuten intensiteettitaso. Tämä näkyy lausekkeen (2) oikealla puolella olevassa toisessa termissä, jonka mukaan ääni vaimenee 6 dB etäisyyden äänilähteeseen kaksinkertaistuessa.



Kuva 10. Äänen intensiteetin vaimeneminen etäisyyden funktiona [18].

3. Melun eteneminen

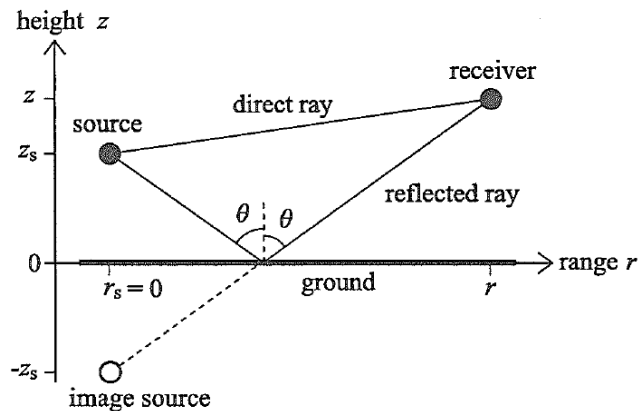


Kuva 11. Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus, suhteellinen kosteus (0–100 %) parametrina. Ylempi kuva lämpötilassa 20°C, alempi kuva lämpötilassa 0°C. Laskettu standardin ISO 9613–1 mukaan [19].

Ilmakehän absorptiosta syntyvä lisävaimennus (desibeleissä) on suoraan verrannollinen etäisyyteen r , mutta siten, että suuret taajuudet vaimentuvat huomattavasti nopeammin kuin pienet. Tämä aiheuttaa sen, että äänilähteen tuottaman äänen spektri muuttuu etäisyyden kasvaessa. Lisäksi lisävaimennus on voimakkaasti lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden funktio (ks. kuva 11).

3.2 Heijastukset

Kuvassa 12 on esitetty äänilähteestä vastaanottopisteeseen suoraan saapuva äänisäde ja maanpintaheijastuksen kautta saatava äänisäde. Heijastuneen äänen amplitudi ja vaihe riippuvat heijastavan pinnan ominaisuuksista.



Kuva 12. Äänilähteestä vastaanottopisteeseen suoraan saapuva äänisäde ja maanpintaheijastuksen kautta tuleva äänisäde [20].

Maanpinnan ja vedenpinnan heijastus- ja absorptio-ominaisuudet vaikuttavat taajuuden funktiona äänen etenemiseen joko vahvistavasti tai vaimentavasti. Vedenpinta ja kova maanpinta aiheuttavat äänen lähes täydellisen heijastumisen. Mitä pehmeämpi maanpinta on, sitä enemmän se absorboi siihen kohdistuvaa ääntä ja sitä vähemmän pinta tuottaa heijastusta. Pinnan muoto vaikuttaa heijastuneen äänen kulkusuuntaan. Pinnasta heijastuneet äänikomponentit summautuvat äänilähteestä havaitsijalle suoraan tulevaan ääneen, ja komponenttien vaiheerot määräävät, summautuvatko ne suoraan ääneen konstruktiivisesti (lisäten ääntä) vai destruktiivisesti (vähentäen ääntä). Vaihe-erot määräytyvät eri etenemisteiden kuluaikaerojen (kerrottuna kulmataajuudella) ja pinnan heijastusominaisuuksien (ominaisvirtausvastuksen) mukaan. Kuvassa 13 on esitetty

3. Melun eteneminen

näiden ilmiöiden vaikutuksia. Vaihtelevat tuuliolosuhteet ja ilmakehän turbulenssi sekoittavat ja satunnaistavat vaihe-eroja, jolloin eri äänisäteet summautuvat enemmän tai vähemmän tehollisarvoina yhteen.

Jos maanpinnan muoto aiheuttaa geometrisen katvealueen havainnointipisteeseen, ääni diffraktoituu eli taipuu esteen taakse (ks. kuva 14). Diffraktio on voimakkainta pienillä taajuuksilla; suurilla taajuuksilla äänen eteneminen noudattaa enemmän optiikan lakeja.

Offshore-tuulivoimalan runkoääni etenee tornia pitkin tornin vedenalaiseen osaan, josta se säteilee ääntä. Ääni etenee kanavoituneena veden pinnan ja merenpohjan välissä etenemisvaimennuksen ollessa ilmassa tapahtuvaa etenemisvaimennusta vähäisempää (ks. kuva 15). [3]

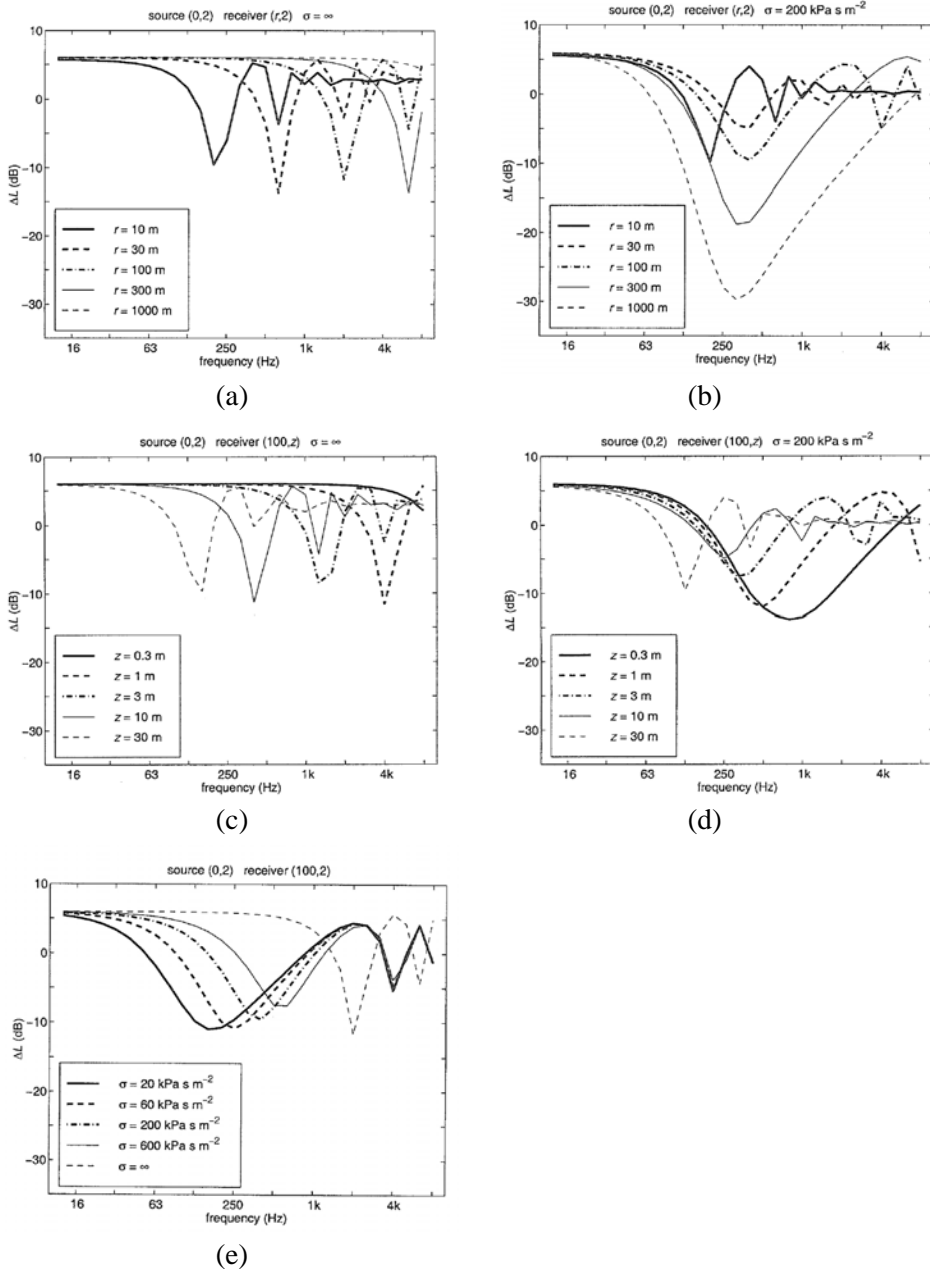
3.3 Lämpötila- ja tuuliprofiilin vaikutus

Jos äänen nopeus on paikan funktio, ääni taittuu edetessään hitaamman nopeuden suuntaan. Äänen nopeus c on verrannollinen lämpötilan neliöjuureen

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}, \quad (3)$$

jossa c_0 on äänen nopeus lämpötilassa T_0 [K] ja T on vallitseva lämpötila [K]. Kun lämpötila laskee korkeuden funktiona, kuten neutraali-ilmakehän tilanteessa tapahtuu, ääni taittuu edetessään ylöspäin. Päinvastaisessa tilanteessa, jota kutsutaan inversioksi, ääni taittuu edetessään alaspäin (ks. kuva 16). Tuulen nopeus summautuu vektorina äänen nopeuteen, joten ääni kulkee nopeammin myötätuuleen kuin vastatuuleen. Tuulen nopeus kasvaa tyypillisesti korkeuden funktiona, mikä aiheuttaa sen, että myötätuuleen edetessään ääni taittuu alaspäin ja vastatuuleen edetessään ylöspäin (ks. kuva 17).

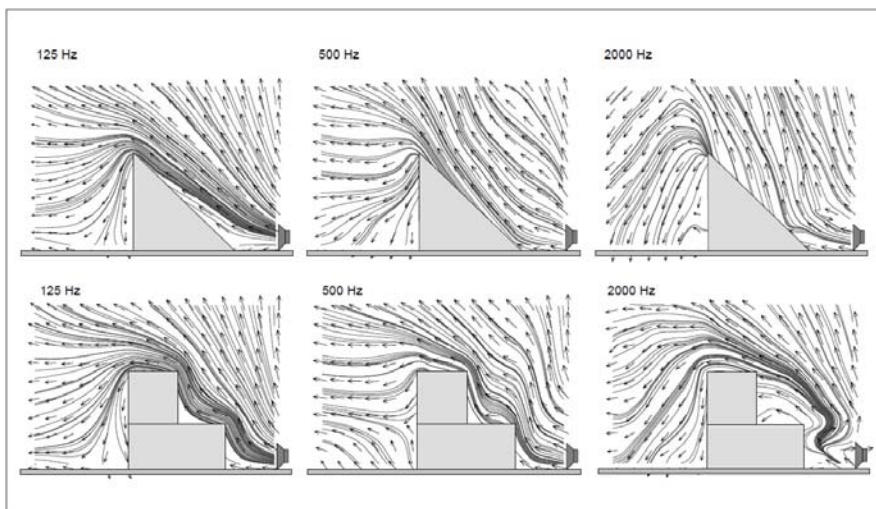
3. Melun eteneminen



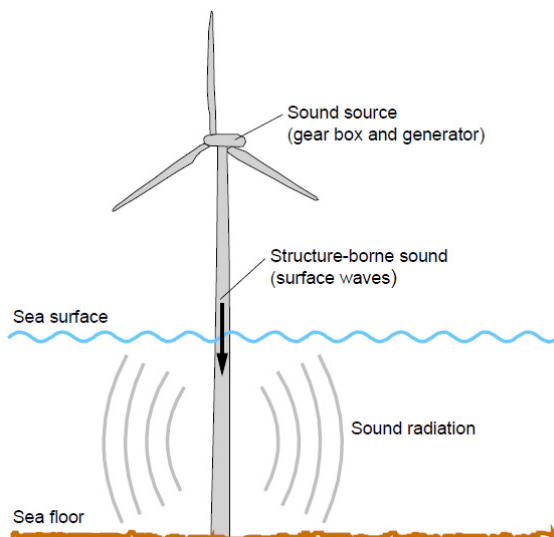
Kuva 13. Suoran ja heijastuneen äänen summan suhteelliset 1/3-oktaavispektrit [20]:

- (a) kova maanpinta, viisi vastaanottoetäisyyttä
- (b) absorboiva maanpinta, viisi vastaanottoetäisyyttä
- (c) kova maanpinta, viisi vastaanottokorkeutta
- (d) absorboiva maanpinta, viisi vastaanottokorkeutta
- (e) viisi maanpinnan ominaisvirtausvastusta.

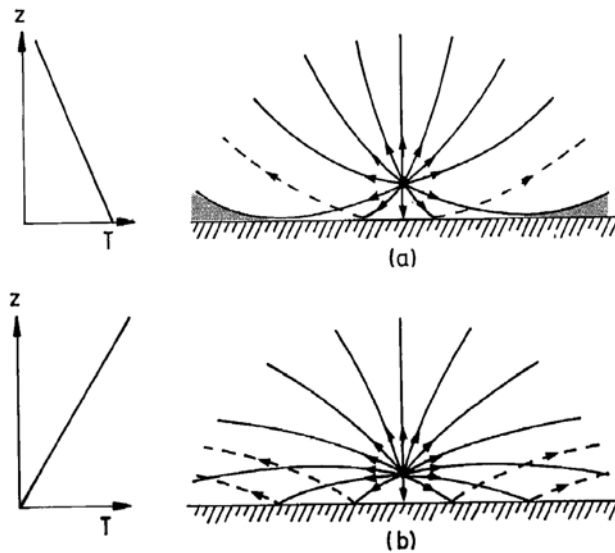
3. Melun eteneminen



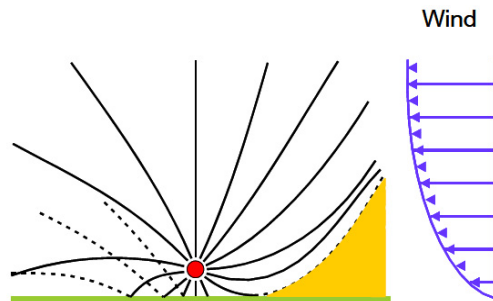
Kuva 14. Esimerkkejä diffraktiosta [21].



Kuva 15. Offshore-tuulivoimalan vedenalaisiin osiin tuottaman äänen syntymekanismi [22].



Kuva 16. Lämpötilan laskiessa korkeuden funktiona ääni taittuu edetessään ylöspäin, ja lämpötilan kasvaessa korkeuden funktiona ääni taittuu edetessään alaspäin [23].



Kuva 17. Tuulen nopeuden kasvaessa korkeuden funktiona ääni taittuu ylöspäin vastatuuleen edetessään ja alaspäin myötätuuleen edetessään [24].

Äänen taittuessa alaspäin sen etenemisvaimennus on vähäisempää kuin suoraviivaisessa etenemisessä, koska äänisäteet jäävät ikään kuin loukkuun: alaspäin taittunut säde heijastuu maanpinnasta taittuakseen takaisin maanpintaheijastukseen. Ilmiö korostuu erityisesti maanpinnan ollessa kova tai vedenpinnan yläpuolella; jälkimmäisessä tapauksessa mahdollinen aallokko tosin satunnaistaa heijastusuuntia. Parhaimmillaan ilmiö voi aiheuttaa äänen etenemisen sylinterimäisesti [25], jolloin etäisyyden kaksinkertaistuminen tuottaa vain 3 dB:n geometrisen

3. Melun eteneminen

vaimentumisen. Vastaavasti äänen taittuessa ylöspäin syntyy varjoalueita, joihin ääni ei kulje. Äänen etenemisvaimennus on siis erityisen vähäistä, kun ääni kulkee myötätuuleen tai kun lämpötilaprofilissa on inversio. Äänen varjoalueita syntyy, kun ääni kulkee vastatuuleen tai kun lämpötila laskee korkeuden funktiona. Tyypillisesti tuulen vaikutus dominoi lämpötilan vaikutusta, paitsi täysin tyynellä tai lähes tyynellä säällä.

3.4 Seismiset aallot

Tuulivoimaloiden tuottama pientaajuinen ja erityisesti infraäänialueen melu etenee myös seismisinä Rayleigh-aaltoina, jotka voivat aiheuttaa rakennusten värinää [26]. Rayleigh-aallot vaimenevat vain 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa, ja ne voivat kytkeytyä edetessään ilmaääneksi.

3.5 VTT:ssä käytössä olevat ohjelmat

VTT:ssä on käytössä äänen etenemisen laskentaan kolme ohjelmistoa. Ensimmäinen on VTT:ssä kehitetty Atmosaku, toinen on kaupallisesti saatavissa oleva CadnaA ja kolmas kaupallisesti saatavissa oleva Sound Plan. Viimeiseksi mainitun käyttöversio on vanhentunut, eikä se ole enää käytössä, joten siihen ei tässä puututa sen enempää.

3.5.1 Atmosaku

Matlab-pohjainen Atmosaku-ohjelmisto käsittää kaksi toisiinsa integroitua laskentaperiaatetta. Ensimmäisenä on fysikaalinen äänen etenemismalli ja toisena tilastollinen malli, jolla pitkäaikaismittausten perusteella ”korjataan” fysikaalisen mallin tulokset. Ohjelmisto antaa äänen etenemisvaimennuksen eri sää- ja ympäristöolosuhteissa. [27]

Äänen etenemismallin logiikka perustuu Salomonsin kirjaan [20]. Äänen etenemistä ilmakehässä voidaan hallita Helmholtzin yhtälöllä

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0, \quad (4)$$

jossa p on äänenpaine ja k on aaltoluku. Ohjelmiston laskenta perustuu PE-menetelmään, jossa elliptistä Helmholtzin yhtälöä approksimoidaan numeerisesti helpommin ratkaistavissa olevalla parabolisella yhtälöllä (*Parabolic Equation*).

PE-menetelmä jättää suuren elevaatiokulman äänikentät huomioimatta. Ohjelmistossa on käytettävissä Crank-Nicholson PE-menetelmä (CNPE-menetelmä) sekä GTPE-menetelmä (*Generalized Terrain PE*). GTPE-menetelmä eroaa CNPE-menetelmästä siinä, että GTPE-menetelmässä maanpinnan topografia (ei-tasainen maasto) voidaan ottaa huomioon. Ohjelmistossa äänenopeusprofiili ja maanpinnan impedanssi voivat muuttua äänen etenemistiellä. Myös ilmakehän turbulenssi on mahdollista huomioida [27]. Ilmakehän absorptiosta syntyvää vaimennusta ei sen sijaan ole sisällytetty ohjelmaan. Fysikaalisen mallin lisäksi oleva tilastollinen malli antaa arvion siitä, millaista vaihtelua sääolosuhteet aiheuttavat todelliselle äänen etenemisvaimennukselle [27].

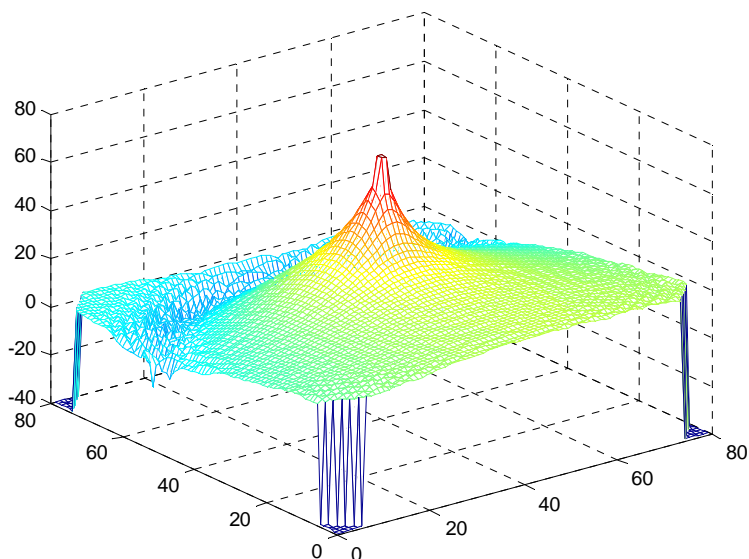
Äänilähteenä on pistelähde. Äänilähteen suuntaavuus ja useampien lähteiden vaikutus melukarttalaskennassa voidaan ottaa huomioon pienillä modifikaatioilla. Koska fysikaalinen malli pohjautuu Helmholtzin yhtälön ratkaisemiseen, laskenta ja melukarttojen luominen vaatii runsaasti tietokoneaikaa ja -muistia. Kuvassa 18 on esitetty esimerkkilaskenta melukartasta.

3.5.2 CadnaA

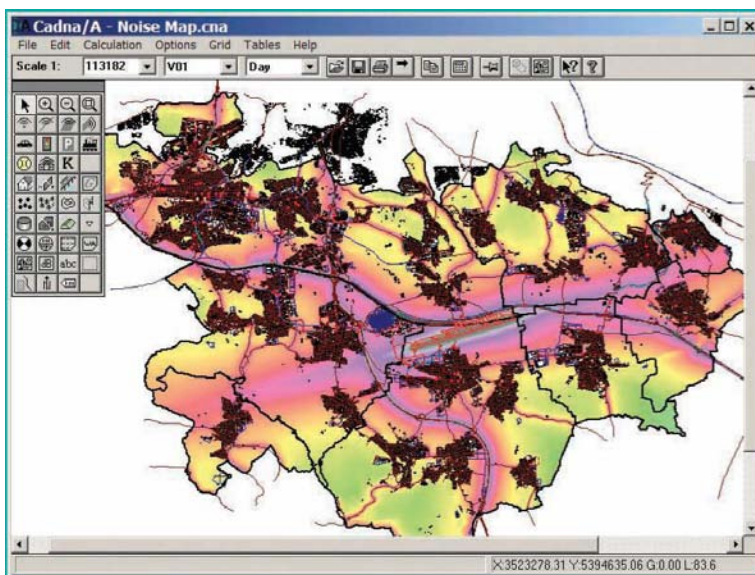
CadnaA on DataKustikin kehittämä Windows-pohjainen ohjelmisto äänen ja ilmansaasteiden leviämisen laskentaan erilaisista lähteistä [28]. Akustinen laskenta ei perustu Helmholtzin yhtälön ratkaisuun vaan kansallisten ja kansainvälisten standardien ja säädösten käyttöön. VTT:ssä ei ole tässä ohjelmistossa ilmansaasteiden laskentaoptiota. Laskenta ja melukarttojen luonti on huomattavasti nopeampaa kuin Atmosakulla.

Äänilähteiksi voi yleisten ja erityisten lähteiden lisäksi määritellä pistelähteitä, viivalähteitä ja pintalähteitä. Myös äänilähteiden suuntaavuus voidaan ottaa huomioon, samoin esteet ja maanpinnan topografia. Ohjelmistossa on myös monipuoliset tulostus- ja tallennusmahdollisuudet. Kuvassa 19 on esitetty esimerkkilaskenta melukartasta.

3. Melun eteneminen



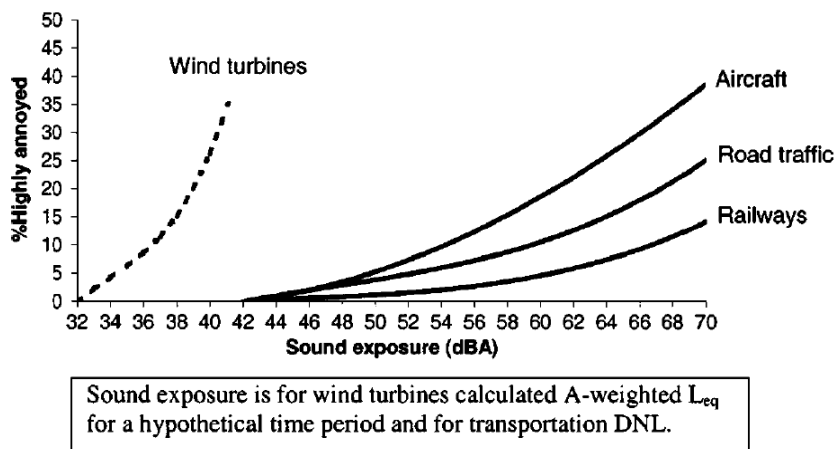
Kuva 18. Esimerkki Atmosakun melulaskennasta 2 km x 2 km alueella. Melun lähteenä pistelähde 4 m:n korkeudella keskellä aluetta, taajuus 125 Hz, äänitehotaso 100 dB, maanpinta ruohopintainen metsämaa.



Kuva 19. Esimerkilaskenta CadnaA:n melukartasta, äänilähteinä tie ja lentokenttä [29].

4. Tuulivoimaloiden melun häiritsevyys

Pedersenin et al. [1, 2] mukaan tuulivoimalan melusta häiriytyy enemmän ihmisiä kuin kuljetusvälinemelun häiriytyvyys–melualtistus-riippuvuus antaisi olettaa. Myös häiriytyvien määrä melualtistuksen funktiona kasvaa huomattavasti nopeammin kuin kuljetusvälineiden tapauksessa (ks. kuva 20). Tämän katsotaan johtuvan näkö- ja kuulohavainnon yhteisvaikutuksesta sekä tuulivoimalamelun erityisen häiritsevistä ominaisuuksista.



Kuva 20. Suuresti häiriytyvien suhteellinen osuus funktiona melualtistuksesta. Melun aiheuttajana kuljetusvälineet ja tuuliturbiinit [1].

Havaintajan asenne siihen, miten tuulivoimalat vaikuttavat maisemanäkymään, näkyy koetussa häiritsevyydessä. Merkitystä on myös yleisellä asenteella tuulivoimaloihin, joskin tämä ei selitä häiritsevyyttä yhtä paljon. Visuaalisen havainnon vaikutus on kohtalaisen vähäinen, kun melulähde nähdään pienemmässä kuin 3,5 asteen kulmassa, mikä vastaa havainnointietäisyyttä $16 \times$ turbiinin napakorkeus

4. Tuulivoimaloiden melun häiritsevyys

[1, 2]. Joidenkin mielestä tuuliturbiinit ovat visuaalinen tahra maisemassa, kun taas joidenkin mielestä ne ovat elegantteja työhevosia. Reagoiminen on siis vahvasti subjektiivista. Erityisesti maalaismaisemassa tuulivoimalat koetaan visuaalisesti kielteisinä; teollisuusalueille rakennetuista tuulivoimaloista on tullut vähemmän valituksia visuaalisista syistä. On esitetty, että visuaalinen vaikutus olisi pienempi pienemmällä määrällä suuria turbiineja kuin suurella määrällä pieniä turbiineja [13].

Melun erityisen häiritseviä ominaisuuksia kuvataan muun muassa termeillä suhahtaminen (*swishing*), viheltäminen (*whistling*), sykkiminen (*pulsating/throbbing*), jyskytys (*thumping*) ja kaikuminen (*resounding*) [1, 2, 6, 9]. Joku puolestaan on luonnehtinut melua siten, että aivan kuin sen aiheuttaisi päättymätön juna [6]. Häiriytyvien määrä kasvaa altistuksen funktiona voimakkaasti jo noin tasosta $L_{Aeq} = 35$ dB alkaen, ainakin hiljaisilla alueilla. Häiritsevyyteen vaikuttaa lisäksi tuulivoimalan ikä: mitä kauemmin se on ollut toiminnassa, sitä vähemmän se koetaan häiritsevänä.

Häiritsevyyttä koetaan eniten erityisesti kello 16 ja keskiyön välisenä aikana. Tämä johtuu siitä, että taustamelu on yöaikaan pienempää kuin päivällä ja että yöaikaan voi esiintyä ääntä vahvistavaa inversiota ja äänen etenemisen kannalta edullisia tuuliolosuhteita. Häiritsevyys on voimakkainta vietettäessä vapaa-aikaa ulkona, joten asuinrakennusten ääneneristävyyden parantaminen ei ole yleensä ratkaisu häiritsevyyteen [1, 2].

Jotkut ihmiset häiriintyvät kuitenkin myös sisätiloissa jopa siinä määrin, että heillä on unihäiriöitä. Jopa 3 km:n etäisyydellä tuulivoimalasta on valitettu unihäiriöistä ja 300 m:n etäisyydellä suurista univaikeuksista ja muista terveydellisistä haitoista, jotka johtuvat tuulivoimalan melusta yöaikaan [30]. Unihäiriöt lisääntyvät voimakkaasti noin 40–45 dB:n A-äänitasosta alkaen, ja niitä esiintyy enemmän hiljaisilla alueilla [31]. Jotkut ihmiset eivät häiriinny tuulivoimalan melusta. Potentiaalisimpia häiriytyviä ovat lapset, vanhukset ja sairaat, erityisesti muutenkin unihäiriöistä kärsivät [30]. Pedersenin [2, 31] mukaan ei ole olemassa tieteellistä todistetta siitä, että tuulivoimaloiden tuottamat melutasot voisivat aiheuttaa muuta terveydellistä haittaa kuin häiritsevyyttä ja unihäiriöitä.

Useimpien valitusten taustalla on aerodynaaminen roottorilavoista peräisin oleva melu. Sen amplitudimodulaatio on yksi tärkeimmistä tuulivoimalamelun häiritsevyyden fysikaalisista selittäjistä ja melun erityisen häiritsevien ominaisuuksien pääasiallinen syy [2]. Joskus amplitudimodulaatiota kuvataan termillä impulssimelu, vaikka se ei sitä fysikaalisesti ole [13]. Amplitudimoduloitu ääni on helposti havaittavissa jopa sitä voimakkaamman muun melun seasta. 1 Hz:n

modulaatiolla moduloitu kohinaääni erottuu muusta samantaajuisesta valkoisesta kohinasta vielä, kun moduloidun äänen taso on 1–2 dB alempi kuin muun peittävän äänen [2]. Tästä syystä moduloitu melu ei ole helposti peitettävissä muulla, tasaisemmalla melulla. Se on myös havaittavissa pidempien etäisyyksien päästä kuin tasaisempi melu [1, 2]. Amplitudimodulaatio on helpointa havaita modulaatiotaajuudella 4 Hz [32]. Tyypilliset modulaatiotaajuudet ovat tätä pienempiä. Uusimmilla vaihtuvanopeuksisilla roottoreilla varustetuissa turbiineissa ne ovat välillä 0,5–1 Hz, jotka ovat helposti havaittavalla alueella [2]. Modulaatiotaajuuksien alentaminen vähentäisi melun havaittavuutta ja häiritsevyyttä. Amplitudimodulaation syntymekanismia ei ole kuitenkaan vielä tyhjentävästi selvitetty, joten sitä ei voida vähentää tehokkaasti. Tällä on suuri merkitys keskusteltaessa tuulivoimalan tuottaman melun häiritsevyydestä [2].

Alavirtakoneiden tuottama pienitaajuisen melu ja infraääni aiheuttavat unihäiriöitä erityisesti herkille ihmisille [13]. Hubbardin et al. [4] mukaan tämän taajuusalueen melu saattaa olla havaittavissa helpommin sisätiloissa kuin ulkona rakennusten huonon pientaajuisen ääneneristävyyden ja huoneresonanssien takia. Sitä ei kuitenkaan havaita niinkään kuulon avulla vaan epäsuorasti rakenteiden tärinän kautta, ainakin pienimpien taajuuksien osalta. Seismisten Rayleigh-aaltojen kytkeytyminen rakennusten tärinäksi lisää tämän taajuusalueen häiritsevyyttä.

Taustamelu voi peittää tuulivoimalan melun kuuluvuutta. Erityisesti tuulen aiheuttama taustamelu voi olla hyvinkin vähäistä mäkisessä maastossa katvealueilla, joissa tuulivoimalan melu voidaan koeta huomattavasti häiritsevämpänä [33].

Tuulivoimalan yleiseen häiritsevyyteen liittyy auringonvalon vilkuntamainen varjostus (*shadow flicker*) sekä televisiolähetysten ja muiden kommunikatiotiesignaalien häiriytyminen. Nämä aiheutuvat turbiinien roottorilapojen auringonvaloon ja radioaaltoihin kohdistuvasta varjostusvaikutuksesta [34, 13]. Auringonvalon vilkkumista voi esiintyä ainoastaan auringon ollessa riittävän alhaalla. Kumpaankin ilmiöön voidaan vaikuttaa sopivalla sijoittelumenettelyllä (asunnot, antennit, tuuliturbiinit). Ilmiöiden esiintyminen voi vaikuttaa yleiseen tuulivoimaloihin suhtautumiseen ja sitä kautta tuulivoimaloiden melun häiritsevyykokemus voi lisääntyä.

5. Yhteenveto

Tuulivoimaloiden merkittävin melulähde on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista laajakaistaista melua. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat: vaihteisto, generaattori, muuntajat, jäähdytysjärjestelmät ja taajuusmuuttaja. Osista merkittävin on vaihteisto, ja ne tuottavat pääosin mekaanista jaksollista melua. Roottorilapojen tuottamassa aerodynaamisessa melussa ilmenee $\pm 2\text{--}3$ dB:n suuruinen amplitudimodulaatio tyypillisesti noin 1 Hz:n modulaatiotaajuudella. Amplitudimodulaation synty-mekanismia ei ole täysin yksikäsitteisesti osattu selittää.

Tuulivoimalan melun etenemiseen vaikuttavat oleellisesti geometrisen etenemisvaimennuksen lisäksi tuuliolosuhteet, lämpötilaprofiili erityisesti korkeussuunnassa sekä ilmakehän terminen stabiilisuus. Tuuliolosuhteet ja lämpötilaprofiili voivat aiheuttaa toisaalta äänen varjoalueita ja toisaalta äänen vähäistä etenemisvaimennusta. Maanpinnan yläpuolella etenemiseen vaikuttavat lisäksi maaston korkeuserot ja pinnanmuodot sekä maanpinnan materiaalit ja kasvillisuus. VTT:ssä on käytössä äänen etenemisen laskentaan lähinnä kaksi ohjelmistoa. Toinen on VTT:ssä kehitetty Atmosaku, toinen on kaupallisesti saatavissa oleva ohjelmisto CadnaA.

Tuulivoimaloiden melusta häiriytyy enemmän ihmisiä kuin kuljetusvälinemelon häiriytyvyys–meluallistutus-riippuvuus antaisi olettaa. Lisäksi häiriytyvien määrä meluallistuksen funktiona kasvaa huomattavasti nopeammin kuin kuljetusvälineiden tapauksessa. Tämän katsotaan johtuvan näkö- ja kuulohavainnon yhteisvaikutuksesta sekä tuulivoimalamelun erityisen häiritsevistä ominaisuuksista. Amplitudimodulaatio on tuulivoimalan melun häiritsevyyden tärkeimpiä fysikaalisia selittäjiä ja sen erityisen häiritsevien ominaisuuksien pääasiallinen syy. Amplitudimoduloitu ääni on helposti havaittavissa jopa sitä voimakkaamman muun melun seasta. Häiriytyvien määrä kasvaa allistuksen funktiona voimakkaasti jo noin tasosta $L_{Aeq} = 35$ dB alkaen ainakin hiljaisilla alueilla. Pedersenin mukaan ei ole olemassa tieteellisiä todisteita siitä, että tuulivoimaloiden tuottamat melutasot voisivat aiheuttaa muuta terveydellistä haittaa kuin häiritsevyyttä ja unihäiriöitä [2, 31].

Lähdeluettelo

1. Pedersen, E. & Waye, K. P. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. Vol. 116, No. 6, s. 3460–3470.
2. Pedersen, E. Noise Annoyance from Wind Turbines – a Review. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency, Report 5308, 2003. 25 s.
3. Di Napoli, C. Tuulivoimailoiden melun syntytavat ja leviäminen. Helsinki: Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 4, 2007. 31 s.
4. Hubbard, H. H. & Shepherd, K. P. Aeroacoustics of large wind turbines. *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. Vol. 89, No. 6, s. 2495–2508.
5. Rogers, A. L., Manwell, J. F. & Wright, S. Wind turbine acoustic noise. Amherst, Massachusetts: University of Massachusetts, 2006. 26 s. Available at: http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev2006.pdf.
6. Van den Berg, G. P. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *J. Sound Vib.* 2004. Vol. 277, s. 955–970.
7. Facts about Wind Energy and Noise. American Wind Energy Association. Available at: <http://www.docstoc.com/docs/2282669/FACTS-ABOUT-WIND-ENERGY-AND-NOISE>.
8. Dunbabin, P. An investigation of blade swish from wind turbines. *Internoise 96*, proceedings. Liverpool 1996.
9. Bowdler, D. Amplitude modulation of wind turbine noise. A review of the evidence. *Institute of Acoustic Bulletin*. Vol. 33, No. 4. Available at: <http://www.wind-watch.org/documents/wp-content/uploads/bowdler-amofwindturbines.pdf>.
10. Wind Energy Noise Impacts. Acoustic Ecology Institute Special Report 1/6/09. 30 s. Available at: <http://www.acousticecology.org/srwind.html>.
11. Richarz, W. & Richarz, H. Wind turbine noise diagnostics. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, proceedings. Aalborg, 2009.
12. Palmer, W. K. G. A new explanation for wind turbine whoosh – wind shear. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, proceedings. Aalborg, 2009.

13. Wind Power in the UK. Sustainable Development Commission, 2005. 166 s. Available at: http://www.sd-commission.org.uk/publications/downloads/Wind_Energy-NovRev2005.pdf.
14. Finley, W. R., Hodowanec, M. M. & Holter, W. G. An analytical approach to solving motor vibration problems. IEEE Transact. Ind. Appl. 2000. Vol. 36, No. 5, s. 1467–1478.
15. Finley, W. R. Noise in induction motors – causes and treatments. IEEE Transact. Ind. Appl. 1991. Vol. 27, No. 6, s. 1204–1213.
16. Roivainen, J. Sähkökoneen magneettinen melu ja sen vaimentaminen. AEL:n kurssi Meluntorjunta teollisuudessa ja koneensuunnittelussa. 21.–23.4.2009, Vantaa.
17. Comsol Multiphysics 35a, AC/DC Module, Model Library. Comsol AB.
18. Sound Intensity. Brüel & Kjær, Nærum 1993.
19. ISO 9613-1 Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
20. Salomons, E. M. Computational Atmospheric Acoustics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 335 s.
21. Weyna, S. Experimental 3D visualization of power flow around obstacles in real acoustic field. Available at: http://www.microflown.com/data/ICSV11_2004-IJAV2004.pdf.
22. Betke, K. Underwater noise emissions of offshore wind turbines. First International Conference on Wind Turbine Noise, proceedings. Berlin 2005.
23. Ljud från vindkraftverk. Sverige: Naturvårdsverket. Rapport 6241, 2001. 37 s.
24. Kragh, J., Plovsin, B. & Søndergaard, B. Prediction of wind turbine noise propagation over complex terrain in all kinds of weather with Nord2000. First International Conference on Wind Turbine Noise, proceedings. Berlin 2005.
25. Björk, E. A. A simple statistical curved ray model for noise under downward refracting conditions. Acta Acustica united with Acustica 2005. Vol. 91, s. 389–391.
26. Bakker, H. H. C., Bennett, D. J., Rapley, B. & Thorne, R. Seismic effect on residents from 3 MW wind turbines. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, proceedings. Aalborg, 2009.
27. Maijala, P. ATMOSAKU-ohjelmisto. VTT tutkimusraportti VTT-R-02565-06, 2008. 245 s.

28. CadnaA. Computer Aided Noise Abatement. Manual Version 3.7. DataKustik.
29. <http://www.mipoy.com/index.php?sid=879>.
30. Kamperman, G. W. & James, R. R. Guidelines for selecting wind turbine sites. Sound and Vibration. July 2009, s. 8–12.
31. Pedersen, E. Effects of wind turbine noise on humans. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, proceedings. Aalborg, 2009.
32. Zwicker, E. & Feldtkeller, R. Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Stuttgart: Hirzel Verlag, 1967. 232 s.
33. Weed, C. Summary of wind turbine noise. Available at: http://www.leelanaucounty.com/downloads/summary_of_wind_turbine_noise.pdf.
34. Wind Power Myths vs. Facts. American Wind Energy Association. Available at: http://www.vtcomwind.com/050629_Myths_vs_Facts_Fact_Sheet.pdf.

Tekijä(t) Seppo Uosukainen		
Nimeke Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys		
Tiivistelmä Tuulivoimaloiden merkittävin melulähde on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista laajakaistaista melua. Kyseisessä melussa ilmenee $\pm 2-3$ dB:n suuruinen amplitudimodulaatio tyypillisesti noin 1 Hz:n modulaatiotaajuudella. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat, joista merkittävin on vaihteisto. Tuulivoimalan melun etenemiseen vaikuttavat oleellisesti geometrisen etenemisvaimennuksen lisäksi tuuliolosuhteet, lämpötilaprofiili erityisesti korkeussuunnassa sekä ilmakehän terminen stabiilisuus. Maanpinnan yläpuolella etenemiseen vaikuttavat lisäksi maaston korkeuserot ja pinnanmuodot sekä maanpinnan materiaalit ja kasvillisuus. Tuulivoimaloiden melusta häiriytyy enemmän ihmisiä kuin kuljetusvälinemelon häiriytyvyys-melualtistus-riippuvuus antaisi olettaa. Tämän katsotaan johtuvan näkö- ja kuulohavainnon yhteisvaikutuksesta sekä tuulivoimalamelun erityisen häiritsevistä ominaisuuksista, jotka aiheutuvat pääosin melun amplitudimodulaatiosta.		
ISBN 978-951-38-7570-1 (nid.) 978-951-38-7571-8 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 34211
Julkaisuaika Helmikuu 2010	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 35 s.
Projektin nimi Osaamisen suuntaaminen OSSU 2009 – Äänenlaatu		Toimeksiantaja(t) VTT
Avainsanat Wind turbine, noise, amplitude modulation, sound propagation, annoyance, visual perception, interaction		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374

Author(s) Uosukainen, Seppo		
Title Generation, propagation and annoyance of the noise of wind power plants		
Abstract <p>The most remarkable noise source of wind power plants is the rotor blades of turbines generating mainly aerodynamic broadband noise. In that noise there occurs an amplitude modulation of $\pm 2\text{--}3$ dB, having typically a modulation frequency of about 1 Hz. Other noise sources are the various parts of the generation system, the most remarkable of which is the gearbox.</p> <p>The propagation of the noise from a power plant is essentially affected by, besides the geometrical attenuation, the wind conditions, the temperature profile especially in the vertical direction, and the thermal stability of the atmosphere. Above ground surface, the propagation is also affected by the height differences and the surface profile of the terrain, and the materials and the vegetation of the ground surface.</p> <p>The noise of wind power plants causes annoyance to a greater amount of people that could be deduced from the annoyance–noise exposure dependence of the transportation noise. This is considered to be due to the interaction of the visual and aural perceptions, and the especially disturbing properties of the noise of wind power plants, mainly due to the amplitude modulation of the noise.</p>		
ISBN 978-951-38-7570-1 (soft back ed.) 978-951-38-7571-8 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 34211
Date February 2010	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 35 p.
Name of project Osaamisen suuntaaminen OSSU 2009 – Äänenlaatu		Commissioned by VTT
Keywords Wind turbine, noise, amplitude modulation, sound propagation, annoyance, visual perception, interaction		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374

Tuulivoimaloiden merkittävin melulähde on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista laajakaistaista noin 1 Hz:n taajuudella amplitudimoduloidua melua. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat, joista merkittävin on vaihteisto. Melun etenemiseen vaikuttavat geometrisen etenemisvaimennuksen lisäksi tuuliolosuhteet, lämpötilaprofiili erityisesti korkeussuunnassa sekä ilmakehän terminen stabiilisuus. Myös maanpinnan yläpuolella maaston korkeuseroilla ja pinnanmuodoilla sekä maanpinnan materiaaleilla ja kasvillisuudella on merkitystä. Tuulivoimaloiden melusta häiriytyy enemmän ihmisiä kuin meluallistusta antaisi aiheutta olettaa. Tämän katsotaan johtuvan näkö- ja kuulohavainnon yhteisvaikutuksesta sekä melun erityisen häiritsevistä ominaisuuksista, jotka aiheutuvat pääosin melun amplitudimodulaatiosta.