



Tuulivoiman melu ja sen vaikutukset

PETRI VÄLISUO (TOIM.)



Julkaisija

Vaasan yliopisto

Julkaisupäivämäärä

Elokuu 2020

Tekijät

Petri Välisuo (Toim.), Kendal Rutledge, Marko Antila, Sari Janhunen, Ricardo Fonseca, Seppo Uosukainen, Jari Kataja, Dennis Bengs, Thileepan Paulraj.

Julkaisun tyyppi

Loppuraportti

Julkaisusarjan nimi, osan numero

Vaasan yliopiston raportteja

Yhteystiedot

Vaasan yliopisto
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
PL 700
65101 Vaasa

ISBN

ISBN 978-952-476- 914-3

(verkkoaineisto)

URN:ISBN:978-952-476- 914-3

ISSN

ISSN 2489-2580 (Vaasan yliopiston raportteja 18, verkkoaineisto)

Sivumäärä

78

Kieli

Suomi

Julkaisun nimike

Tuulivoiman melu ja sen vaikutukset

Tiivistelmä

Tuulivoiman tuotanto on kasvussa, koska sen avulla voidaan vähentää energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä. Tuulivoima tulee sijoittaa riittävän etäälle asutuksesta, koska sen haittavaikutuksena on ympäristölle koituva meluhaitta, jolta voidaan suojautua parhaiten riittävällä turvaetäisyydellä. Lainsäädännössä on määriteltävä melurajat, joita suurempaa meluhaittaa tuulivoimalla ei saa tuottaa asutukselle, ja riittävä turvetäisyys määritetään melurajojen perusteella laskennallisesti melumallien avulla. Tämä malli toimii vain mikäli käsityksemme tuulivoiman melun etenemisestä, luonteesta, vaikutuksista ja häiritsevyydestä pitävät paikkansa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli laajojen mittausten avulla mitata melun etenemistä ja sen luonnetta, melun riippuvuutta sääolosuhteista ja verrata mittaustuloksia asukkaiden kokemuksiin. Tutkimuksessa suoritettiin myös sääolosuhteiden pitkäaikaismittauksia ja mallinnusta, kerättiin palautetta asukkailta ja kehitettiin metriikoita vaikutusten mittaamiseen. Mittausten mukaan nykyinen melumallinnus ei vaikuttaisi ainakaan aliarvioivan melutasoja. Myöskään mittauksissa ei havaittu huolestuttavia infraäänitasoja tai infraäänialueen paineenvaihteluita kohteena olleiden tuulipuistojen läheisyydessä.

Asiasanat

tuulivoima, melu, akustiikka, uusiutuva energia, tuuliprofiili, amplitudimodulaatio

Publisher

Vaasan yliopisto

Date of publication

August 2020

Authors

Petri Välisuo (Ed.), Kendal Rutledge, Marko Antila, Sari Janhunen, Ricardo Fonseca, Seppo Uosukainen, Jari Kataja, Dennis Bengs, Thileepan Paulraj.

Type of publication

Final report

Name and number of series

University of Vaasa reports

Contact information

University of Vaasa
School of technology and innovation management
PL 700
65101 Vaasa

ISBN

ISBN 978-952-476- 914-3 (verkkoaineisto)
URN:ISBN:978-952-476- 914-3

ISSN

ISSN 2489-2580 (Vaasan yliopiston raportteja 18, verkkoaineisto)

Number of pages

78

Language

Finnish

Title of publication

Wind turbine noise and its effects

Abstract

Wind power production is growing, because it is an effective methods to reduce greenhouse gases of energy production. Wind turbines must be placed far enough from dwellings, because of their noise effects, which can be best mitigated with sufficient safety distance. The regulations determine limits for noise immission which cannot be exceeded, and the safety distance is calculated based on the regulations using noise propagation models. This is only reliable if our understanding of noise propagation, character, effects and annoyance are true. The purpose of this research was to carry out a comprehensive measurement campaign to study the propagation and character of the noise in different weather conditions and compare the measurements with the feedback from dwellers. Long term weather measurements and modelling were also carried out to find out how they affect to noise generation and propagation. Dweller feedback and noise quality metrics were utilized to analyze the subjective effects of noise and infrasounds. According to the measurements, the noise propagation model does not seem to underestimate the actual noise levels. We could not either observe excessive infrasound levels or pressure pulses in wind turbine sites.

Keywords

Wind power, noise, acoustics , renewable energy, wind profile, amplitude modulation

ESIPUHE

Tuulivoimasta on kehittynyt kustannustehokas ja elinkaaripäästöiltään ympäristöystävällinen energiantuotantomuoto, ja sen osuus onkin koko ajan kasvanut Suomen energiaportfoliossa. Tuulivoimaloiden kasvava määrä on myös aiheuttanut kasvavaa huolta tuulivoimaloiden mukanaan tuomista lieveilmiöistä, joista melu- ja maisemavaikutukset ovat olleet lähinnä kansalaisten kokemuspiiriä. Maisemavaikutukset ovat kunkin itse tulkittavissa, mutta meluvaikutuksiin oli liitetty kansan suussa epäilyksiä fyysisistä haittavaikutuksista, jotka edellyttäisivät aikaisempaa laajempia tutkimuksia. Näistä vaikutuksista ei ollut näyttöä, mutta tuulivoiman melua ei ylipäätään ollut tutkittu kovin paljoa, joten lisätutkimus nähtiin hyödylliseksi. Tutkimuskonsortio oli muodostunut vähitellen jo aikaisemmasta yhteistyöstä Vaasan yliopiston, Novian ja VTT:n kanssa, ja lyötiin lopullisesti lukkoon Vaasassa energiaviikkojen aikana, kun Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston edustajakin oli paikalla. Näin saatiin muodostettua konsortio, joka pystyi toteuttamaan ensimmäisenä hankkeen, jossa yhdistyivät pitkäaikaiset melumittaukset, säämittaukset ja kyselytutkimukset samassa tutkimuksessa. Hanke päättyi jo muutama vuosi sitten, joten viimeistään nyt on aika julkaista loputkin tulokset tässä raportissa. Osa tutkimustuloksista on julkaistu jo aiemmin tieteellisissä julkaisuissa. Tulokset olivat sikäli yllätyksettömiä, että tuulivoimamelun yhteyttä haitallisiin terveysvaikutuksiin ei voi tämänkään tutkimuksen valossa pitää todennäköisenä.

Vaasassa 12.5.2020

Petri Välisuo

Sisältö

ESIPUHE	IV
1 Johdanto	1
1.1 Aikaisempia tutkimuksia	1
1.2 Omat tutkimuksemme	2
1.3 Tuulivoimalaitosten ääni	3
1.3.1 Etenevä, tavallisella kuuloalueella oleva ääni	3
1.3.2 Äänen erityispiirteet	4
1.3.3 Infraääni	5
2 Mittaukset	7
2.1 Äänimittauslaitteisto	7
2.1.1 Mittausjärjestelmän toiminta	8
2.1.2 Infraäänien nauhoittaminen	9
2.1.3 Tietoliikenne ja tiedon varastointijärjestelmä	9
2.2 Ilmakehän olosuhteiden mittaaminen	10
2.2.1 Sääolosuhteiden mittaaminen	10
2.2.2 Sääolosuhteiden mallintaminen	11
2.3 Mittauspaikat	14
2.3.1 Mittausalueen kuvaus	15
2.4 Asukkaiden mielipiteen tutkiminen	16
3 Analysointimenetelmät	18
3.1 Äänitasojen analysointi	18
3.2 Turbiinin tuottaman äänen aaltomuodon analysointi	20
3.3 Tuulivoiman äänen laatumittarit	21
3.3.1 Yleistä	21
3.3.2 Amplitudimodulaatio	22
3.3.3 Äänekset	23
3.3.4 Impulsiivisuus	24
3.3.5 Tuulivoimalan kuunneltava malli	24
4 Tulokset	26
4.1 Sääolosuhteiden mittaukset	26
4.1.1 Säämastomittaukset	26
4.1.2 Tuuliprofilimittaukset	28
4.2 Lämpötilaprofilimittaukset	29
4.3 Äänitasot	30
4.3.1 Äänenpainetasojen vaihtelevuus tunneittain	31

4.3.2	Äänenpainetasojen pysyvyys	36
4.3.3	Äänitason riippuvuus tuulen nopeudesta	38
4.4	Luokittelu melulähteittäin	41
4.5	Sääolosuhteiden vaikutus	44
4.6	Tuulivoimalan infraääni	45
4.7	Äänen erityispiirteet	50
4.8	Äänen sykkivyyks	52
5	Kyselytutkimuksen tulokset	55
5.1	Vastaajien taustatiedot	55
5.2	Vastaajien kokemuksia tuulivoimaloista omalla asuinpaikkakunnalla	56
5.3	Osallistuminen tuulivoimatuotantoalueen suunnittelu- ja sijoitusvaiheeseen . . .	59
5.4	Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys	60
6	Johtopäätökset	66
6.1	Äänen kuuluminen ja häiritsevyys	66
6.2	Tuulivoimaloiden ääni	67
	Viitteet	69

1 JOHDANTO

1.1 Aikaisempia tutkimuksia

Maailmanlaajuinen ilmastonmuutos on yksi aikakautemme suurimmista haasteista. Suomi on kansallisen energia- ja ilmastostrategian myötä (Huttunen 2017) muiden Euroopan maiden mukana sitoutunut vähentämään hiilidioksidipäästöjä ja kehittämään vähähiilistä energiantuotantoa. Tuulivoima on yksi uusiutuvan energian muoto, joka mm. IPCC:n raportin (Schlömer et al. 2014) mukaan on ydinvoiman ohella elinkaarensa aikana vähiten kasvihuonepäästöjä aiheuttava energiantuotantomuoto. Suomessa on jo valmiiksi luvitettuna arviolta 6 TWh verran tuulivoimakapasiteettia, ja tavoitteena on päästä kokonaan hiilineutraaliin energiantuotantoon vuoteen 2050 mennessä (Huttunen 2017). Tuulivoiman rakentamisen suurimpana rajoitteena on ympäristövaikutukset, erityisesti melu ja visuaaliset vaikutukset.

Tuulivoiman melua, leviämistä ja vaikutuksia ihmisiin on tutkittu esimerkiksi laajoissa Health Canadan, yli 1 200 asukasta (Keith et al. 2016b,a) ja Tanskan valtion (Bräuner et al. 2018), yli 40 000 tuhatta asukasta kattavissa tutkimuksissa. Näiden tutkimusten mukaan ei vielä ole voitu aukottomasti osoittaa, onko vai eikö tuulivoimalla ole vaikutusta asukkaiden terveyteen (n=28 731), tai raskauteen tai syntyvien lasten terveyteen (n=135 795) (Poulsen et al. 2018), mutta ainakin näiden tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että terveysvaikutukset eivät voi olla yleisiä, koska niiden esiintymisessä ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa suuresta populaatiosta huolimatta.

Monissa tunnetuimmissa aikaisemmissa tutkimuksissa on selvitetty kyselytutkimuksella asukkaiden mielipiteitä ja verrattu sitä tuulivoimalan lähtömelutason ja äänen leviämismallin avulla arvioituun melutasoon (Bakker et al. 2012; Nissenbaum et al. 2012; Pedersen & Waye 2004; Shepherd & Billington 2011; Michaud et al. 2016a; Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2014). Näissä tutkimuksissa on todettu melun lisäävän asukkaan kokemaa häiritsevyyttä vähitellen, siitä lähtien kun tuulivoimamelun taso ylittää 35 dBA (Michaud et al. 2016a). Tosin häiritsevyyden kokemukseen vaikuttaa äänenpainetasoa enemmän monet muut tekijät, kuten huolestuneisuus melun terveysvaikutuksista, sekä tuulivoimasta saatava henkilökohtainen hyöty (Michaud et al. 2016b).

Aikaisemmissa tutkimuksissa tuulivoiman melu asutuksen lähellä on tyypillisesti mallinnettu erilaisilla leviämismalleilla, kuten yksinkertaisella ISO 9613-2 melumallilla, tai yksityiskohtaisemmalla pohjoismaisella Nord2000 melumallilla. Kumpikin malli pystyy mallintamaan hyvin keskimääräisen äänenpainetaso asutuksen lähellä, kuten esimerkiksi Health Canadan tutkimuksessa voitiin havaita (Keith et al. 2016a,b). Tämä melutaso kuitenkin vaihtelee sääolosuhteiden mukaan, joka mutkistaa asukkaiden melukokemusta. Lisäksi on hyvin tunnettua, että melun häiritsevyyteen vaikuttavat keskimääräisen melutason lisäksi myös äänen erityispiirteet, kuten äänen merkityksellinen sykintä (ns Amplitudimodulaatio, AM) sekä äänen sisältämät kaapekaistaiset komponentit eli äänekset. Tutkimusten mukaan pelkkä äänenpainetaso ei yksi-

nään selitä hyvin koettua häiritsevyyttä, vaan siihen vaikuttavat äänestä riippumattomat tekijät, mutta myös äänen erityispiirteet voivat olla myös merkittäviä tekijöitä.

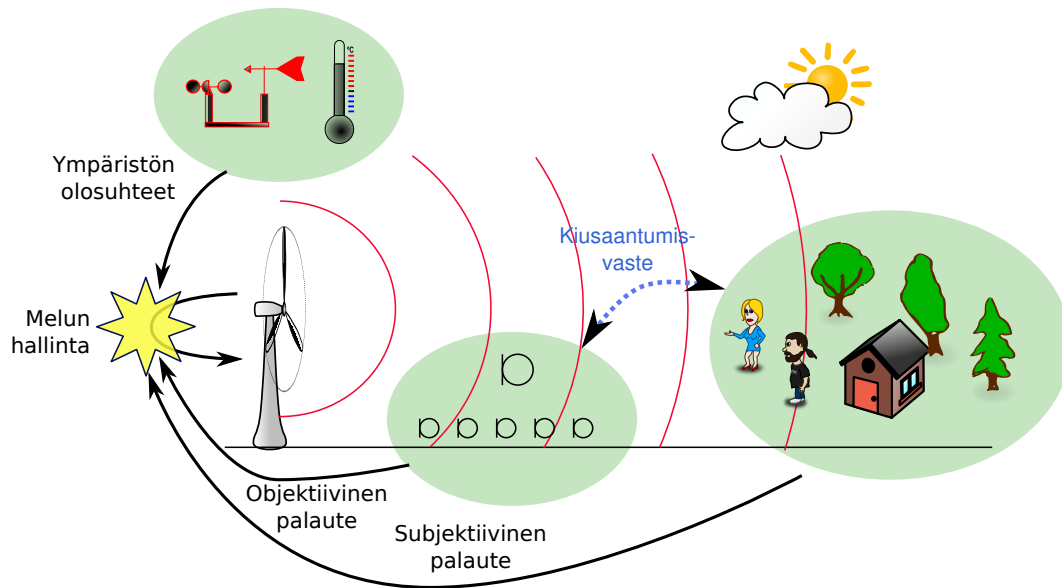
Tuulivoimaloiden ääntä kuvailtaessa, asukkaat mainitsevat usein äänen sykkivyyden, joka johtuu nykyäsitelyksen mukaan siitä, että tuulen nopeus on erisuuruinen roottorin pyörähdyspinnan eri kohdissa tuuliväänteen vaikutuksesta (Van den Berg 2006; Palmer 2009). Pohjoismaisessa kylmässä ilmastossa alailmakehä on usein stabiili, jolloin voimakas tuuliväänteen on yleisempää, jonka lisäksi metsäinen maasto edesauttaa tuuliväänteen syntymistä. Puusto aiheuttaa myös tuulen turbulentsuutta, joka vaikuttaa äänen syntymiseen. Sekä tuuliväänteen, että turbulentsuus vaikuttavat myös äänen etenemiseen (Barlas et al. 2016). Siksi ulkomaisia tuulivoiman melututkimuksia ei voida välttämättä soveltaa suoraan Suomeen, tekemättä myös omia ääni- ja säämittauksia, ja selvittämättä eroavaisuuksia.

1.2 Omat tutkimuksemme

Pohjoismaisen sääolosuhteiden ja melun mittaaminen koko vuoden kestävän ajanjakson yli katsottiin välttämättömäksi, jotta melua ja sen syntyyn vaikuttavia tekijöitä voitaisiin analysoida kaikilla aikaskaaloilla, sekunneista aina vuoteen asti, ja ottaa myös huomioon vuodenaikojen aiheuttamat vaihtelut. Siksi omassa tutkimuksessa keskityimme äänen ja sääolosuhteiden pitkäaikaismittausten kehittämiseen, ja sitä varten välttämättömään suurien datamäärien analysointiin, laadullisten ominaisuuksien mittaamiseen. Yhdistimme myös mittaustuloksia kansalaisilta kyselytutkimuksien ja melupalautejärjestelmän avulla kerättyyn tietoon, jotta voitiin arvioida, koettujen meluvaikutusten riippuvuutta sääolosuhteista, melutasosta ja äänen ominaispiirteistä. Pitkäaikaismittauksia varten tarvitaan soveltuvia automaattisia miehittämättömiä mittaussasemia, sekä automaattisia äänimittausten analysointimenetelmiä, jotta pystyisimme kohtuullisin kustannuksin mittaamaan ja käsittelemään vuoden yli ulottuvan mittausjakson. Sääolosuhteet mitattiin ja mallinnettiin samanaikaisesti äänimittauksen kanssa. Asukkaiden mielipidettä selvitettiin sekä kyselytutkimuksilla että reaaliaikaisella palautejärjestelmällä. Kohdealueita olivat Kirkkokallion tuulipuisto Honkajoella, Torkkolan tuulipuisto Vähäkyrössä ja Santavuoren tuulipuisto Kurikassa.

Tutkimuksessamme keskityttiin seuraaviin osa-alueisiin:

1. Sääolosuhteiden mittaukset: Mitattiin ja mallinnettiin äänen syntyyn ja etenemiseen liittyvät sääolosuhteet, mukaanlukien tuuliprofiili, lämpötilaprofiili, ilmankosteus, sade, yms.
2. Akustiset mittaukset: Mitattiin ja mallinnettiin tuuliturbiinin äänitehotaso ja äänenpaine-taso altistuvassa kohteessa. Ääni nauhoitettiin sellaisenaan, jolloin sen pohjalta voitiin mitata kaikkia äänen tunnuslukuja ja jopa kuunnella nauhoitettuja näytteitä jälkikäteen. Myös infraäänitaajuuksia mitattiin.
3. Reaaliaikainen melupalautejärjestelmä: Kehitettiin älypuhelimella käytettävä järjestelmä,



Kuva 1. Kaavio hankkeen tutkimusasetelmasta, jonka mukaisesti kerättiin säätietoja, tehtiin melumittauksia ja kerättiin palautetta asukkailta.

jolla voitiin kerätä palautetta meluhavainnoista sillä hetkellä kuin havainto tehtiin. Havaintoon saatiin näin liitettyä asukkaan kokemuksen lisäksi havainnon ajankohta sekä havainnon tekopaikan GPS-koordinaatit.

4. Tulosten analysointi ja riippuvuuksien mallintaminen: Yhdistettiin akustiset mittaukset, äänen laatukriteerit, sääolosuhteiden mittaukset, sekä asukkailta kyselytutkimuksella ja palautejärjestelmällä saadut tiedot. Tarkoituksena oli selvittää, miten melukokemukset riippuivat mitatusta äänestä ja vastaavasti miten ääni riippuu sääolosuhteista.
5. Asukkaiden kokemuksia tutkittiin ja verrattiin mittaustuloksiin: Selvitettiin kyselytutkimuksella tuulivoima-alueiden lähistöllä asuvien mielipiteitä tuulivoimasta ja sen ympäristövaikutuksista. Tuloksia verrattiin hankkeessa tehtyihin mittauksiin.
6. Äänen laatumittarien toteuttaminen, äänien arviointi ja niistä tehtävät johtopäätökset: Kehitettiin edelleen ja toteutettiin käytännössä aikaisemmissa hankkeissa suunniteltuja äänen laatumittareita, joilla voitiin mitata äänen sykkivyyttä, impulssimaisuutta, ääneksiä sekä muita ominaisuuksia pelkän äänenpainetason lisäksi.

1.3 Tuulivoimalaitosten ääni

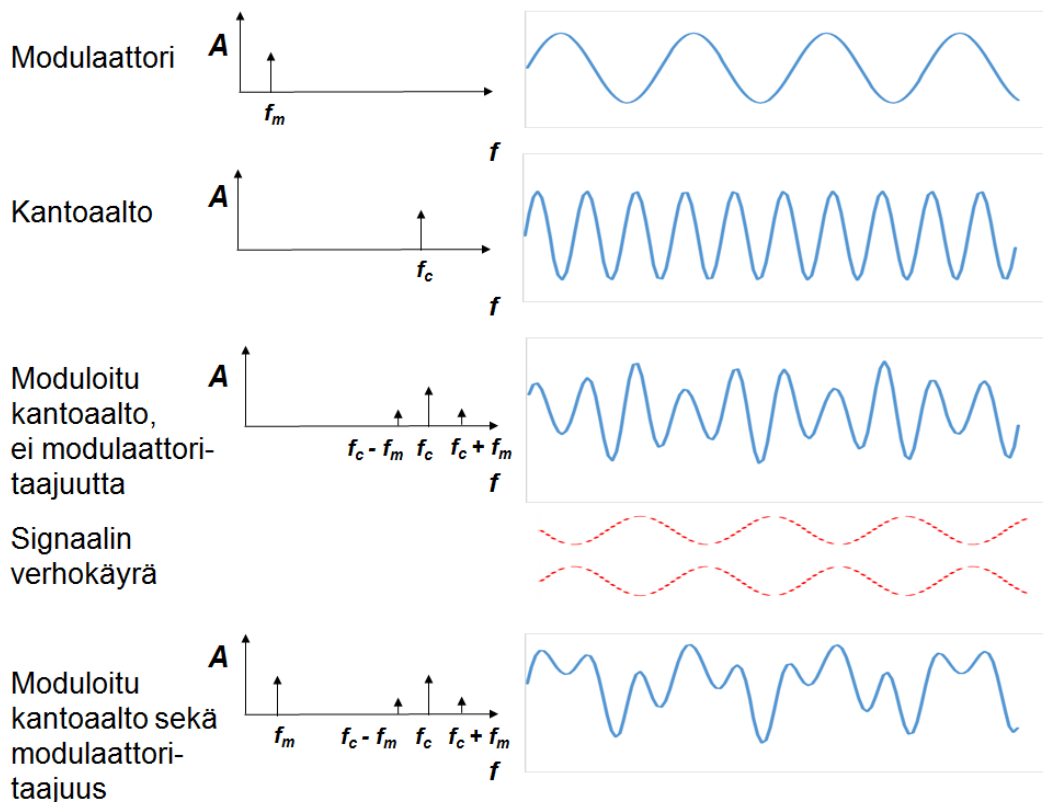
1.3.1 Etenevä, tavallisella kuuloalueella oleva ääni

Suurin osa tuulivoimaloiden tuottamasta äänestä syntyy turbiinin lavoissa aerodynaamisen vuorovaikutuksen seurauksena. Äänen aiheuttavat lapojen jättöreunan ja kärkien synnyttämät pyörteet, lapojen etureunan ja tulovirtauksen kohtaaminen, sekä tornin ja lapojen vuorovaikutukset (Bowdler & Leventhall 2011; Pilger & Ceranna 2017). Aerodynaamisen vuorovaikutuksen seurauksena syntynyt ääni on luonteeltaan laajakaistaista, kohinatyyppistä ääntä. Toissijaisia ääni-

lähteinä ovat vaihteiston tai generaattorin aiheuttama jaksollinen, yleensä pienitaajuinen melu, sekä muut sähköntuotantokoneiston osat (Uosukainen 2010).

1.3.2 Äänen erityispiirteet

Tuulivoiman äänessä voidaan erottaa erityispiirteitä, joita esiintyy myös muissa ympäristömelulajeissa. Tällaisia erityispiirteitä ovat jaksollinen sykintä (amplitudimodulaatio, AM), tonaalisuus (äänesmäisyys tai ääneksisyys) ja impulssimaisuus. Nämä erityispiirteet on periaatteellisesti käyty läpi TUMEVA-hankkeen loppuraportissa (Nykänen, Uosukainen, Antila & Siponen 2014).



Kuva 2. Ympäristömelu, kuten tuulivoimankin melu, on usein monimutkainen aaltomuoto, joka on muodostunut useista toisiaan moduloivista taajuuksista. Kuvassa esitetään Modulaattorin ja kantaallon suhde amplitudimodulaatiotapauksessa. Modulaattorin ja kantaallon yhdistelmä muodostaa moduloitua kantaallia, jollainen tuulivoiman äänisignaalin on.

Kuvassa (2) on esitetty modulaattorin ja kantaallon suhde amplitudimodulaatiotapauksessa. Allekkain ovat eri tapaukset, ja vaakasuunnassa on tilanteen taajuusesitys sekä myös näyte aikatason signaalista. Ylimpänä kaaviossa on modulaattori taajuinen, f_m , sinimuotoinen signaali (modulaattori-taajuus). Tätä huomattavasti suuremmalla taajuudella on kantaalto taajuudella, f_c . Kantaalto on yleensä laajakaistainen mutta tässä yksinkertaisuuden vuoksi se on sinimuotoinen, jotta eri ilmiöt voidaan erottaa. Kun kantaalto moduloidaan modulaattorilla niin saadaan keskimääräisen kuvan kaltainen tilanne. Siinä on edelleen sama kantaalto, mutta sen molemmilla puolilla syntyvät sivukaistat f_m -taajuuksien etäisyyksille.

Huomioitavaa tässä tilanteessa on se, että varsinaista modulaatiotaajuutta, f_m , ei taajuustason tarkastelussa esiinny. Toiseksi alimmassa kuvassa näkyy signaalin verhokäyrä symmetrisesti nollan molemmiin puolin. Jos myös modulaatiotaajuus on myös mukana, niin tilanne on alimman kuvan näköinen. Todellisessa tuulivoimatilanteessa modulaattori on tuuliturbiinin pyörimisnopeuteen liittyvä taajuus (tyypillisesti 0,5 - 1 Hz) ja kantoaalto lavoissa syntyvä aerodynaaminen melu. Käytännön tilanteissa sekä modulaatiotaajuus että sen tuottama verhokäyrä (amplitudimodulaatio) näkyvät vaihtelevin suhtein signaalissa. Modulaatiotaajuus on käytännössä aina infraäänialueella, mutta ihminen kuulee sen moduloiman korkeamman taajuuden verhokäyrän (suuremmilla taajuuksilla) tason vaihteluna. Lisäksi tuulivoimalan äänessä voi syntyä taajuusmodulaatioilmiöitä, mutta niihin ei otettu tässä tutkimuksessa kantaa, koska niiden todennäköinen merkittävyys on huomattavasti vähäisempi.

1.3.3 Infraääni

Osa tuuliturbiinin tuottamasta aerodynaamisesta ja mekaanisesta äänestä on taajuudeltaan alle 20 Hz, joten sitä kutsutaan määritelmän mukaan infraääniksi. (Moller & Pedersen 2004) mukaan ihmisen korva ei ole herkkä infraäänille, joten infraäänialueella äänen voimakkuuden pitää olla lähes 80 dB 20 Hz taajuudella ja yli 120 dB 1 Hz taajuudella, jotta sen voisi kuulla. Tuulivoimaloiden tuottama infraääni ei ole tasoltaan niin voimakasta, että se ylittäisi kuulokynnystä edes voimalan juurella. Infraäänitason lisäksi tuuliturbiinien melukeskustelussa on usein puhuttu tuuliturbiinien lapataajuudellaan tuottamista paineaalloista, ja niiden vaikutuksesta ihmisiin. Mittauksissa on todettu tuuliturbiinin tuottavan jaksollisia pulsseja turbiinin lavan ohittaessa tornin, jossa lapa joutuu tornin häiritsemään, hitaampaan ilmavirtaukseen (Hansen et al. 2016; Kim et al. 2011; Doolan et al. 2012). Näiden tornin ja lavan vuorovaikutuksesta aiheutuneiden pulssien suuruus on alle 0,1 Pa (Vanderkooy & Mann 2015). Normaali ilmanpaine on 100 000 Pa, ja se laskee meren pinnasta ylöspäin siirryttäessä noin 100 Pa 8 metrin matkalla. Havaittu 0,1 Pa painenvaihtelu vastaa siis alle 1 cm korkeuden vaihtelua. Siksi juoksija altistuu moninkertaiselle jaksolliselle painenvaihtelulle tuuliturbiinin lähellä seisovaan henkilöön nähden. Vaikka tuuliturbiinin aiheuttamat pulssit ovat todennäköisesti merkityksettömän pieniä, ne erottuvat selvästi mittauksissa, joissain sääolosuhteissa kaukanakin tuuliturbiinista.

ISO 9613-2:1996 äänen leviämisen mallintamisstandardin mukaan, tuuliturbiini kuvataan pistemäiseksi äänilähteeksi, josta ääni etenee kaikkiin suuntiin, leviten pallomaisesti r-säteisen pallon pinnalle. Koska pallon pinta-ala kasvaa suhteessa säteen neliöön, vastaavasti äänen intensiteetti laskee kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön ($1/r^2$), jolloin äänenpainetaso vähenee 6 dB aina etäisyyden kaksinkertaistuessa. Tällöin myös infraäänitason häviöt (Ratzel et al. 2016) mittausten mukaan taustameluun tyypillisesti alle kilometrin etäisyydellä tuuliturbiinista, niin että niitä ei voi havaita enää edes mittalaitteilla. Jos kuitenkin sääolosuhteet ovat otolliset, lämpötilainversio ja myötätuulen sekä tuuliväänteen (shear) yhdistelmä voivat muodostaa positiivisen äänennopeusprofiilin, jossa äänen nopeus kasvaa korkeammalla ilmakehässä noustaessa. Tällainen äänennopeusprofiili saa äänen taipumaan alaspäin myötätuulella, jolloin jo kertaalleen maasta heijastunut ääni voi kaartua takaisin maan pinnalle ja heijastua yhä uudestaan (Barlas et al. 2016; Hansen et al. 2016). Positiivinen äänennopeusprofiili tehostaa ää-

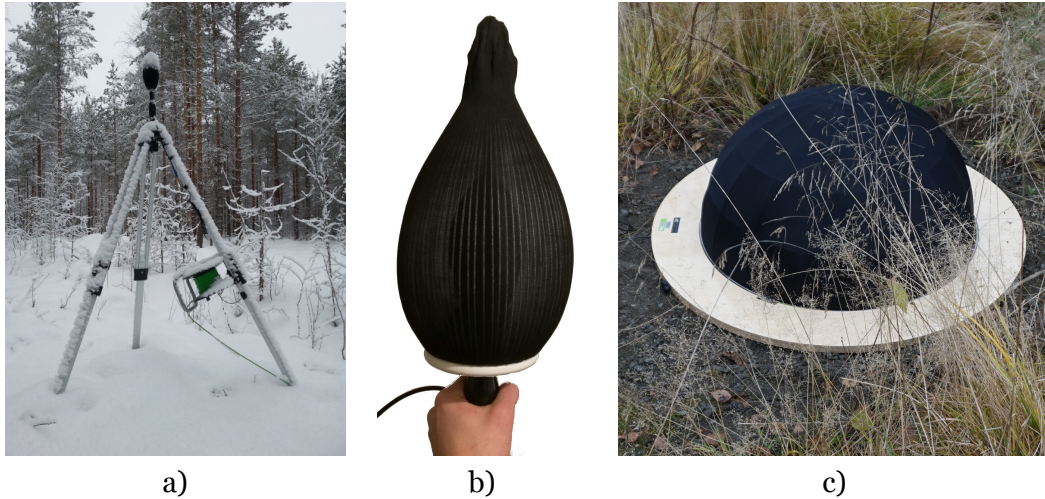
nen etenemisestä, koska ääni etenee riittävän kaukana voimalaitoksesta ikäänkuin levynä maan pintaa pitkin, levittäytyen r -säteisen sylinterin pinnalle. Tällöin äänen intensiteetti vaimentuisi geometrisen hajaantumisen vuoksi vain suhteessa etäisyyteen ($1/r$), joka vastaa 3 dB vaimentumista aina etäisyyden kaksinkertaistuessa, tosin jokainen maaheijastus vähentää äänisignaalin tehoa.

Yksityiskohtaisemmin tarkasteltuna heijastusten summautuessa äänenvoimakkuus voi vaihdella eri etäisyyksillä paljon monimutkaisemmin. Tätä pystytään parhaiten mallintamaan aaltoyh-tälöön pohjautuvilla fysiikaalisilla malleilla, esimerkiksi (Lee et al. 2016). Korkeammat taajuudet vaimenevat enemmän heijastuessaan maasta, joten vain matalimmat äänet etenevät tehokkaasti moninkertaisten maaheijastusten avulla. Tuulivoimalan lapataajuudellaan tuottamat pulssit voivat näissä olosuhteissa olla mittareilla havaittavissa vielä yli kymmenen kilometrin etäisyydellä voimalasta (Michaud et al. 2016a; Pilger & Ceranna 2017; Vanderkooy & Mann 2015).

Tuulivoimaloiden tuottamia infraääniä voidaan joissain olosuhteissa mitata siis kaukanakin tuulivoimaloista, mutta niiden voimakkuus on turbiinien juurellakin suhteellisen alhainen muun ympäristömelun infraääniin verrattuna, joten niillä ei vaikuttaisi olevan merkitystä käytännös-sä.

2 MITTAUKSET

2.1 Äänimittauslaitteisto



Kuva 3. a) Mikrofonin ja Nor1217 tuulisuojan, b) Toisiotuulisuoja G.R.A.S 46Az mikrofonin ja Nor1217 ensiotuulisuojan ympärillä. c) MTG MK250 ja puolipallon muotoinen toisiotuulisuoja.

Äänimittaukset tehtiin käyttämällä korkealaatuisista komponenteista itse rakennettuja mittausasemia. Niissä käytettiin G.R.A.S 46AC mittausmikrofoneja (G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, Holte Tanska), sekä ulkokäyttöön tarkoitettuja 80 mm tuulisuojia, Nor1217 (Norsonic, Lierskogen, Norja). Mikrofonit kiinnitettiin kolmijalkaan, ja sijoitettiin mittaamaan 150 cm korkeudelta, kuten Kuvassa (3 a). Mikrofonisignaali digitoitiin 24 bittisellä NI-9234 A/D muuntimella (National Instruments, Austin, USA) ja lähetettiin langattomasti palvelimelle digitoinnin jälkeen. Viidenteen mittausasemaan hankittiin G.R.A.S 46AZ-mikrofoni, jonka taajuusalue ulottuu 0.5 Hz taajuisiin infraääniin asti (0.5 Hz +/- 3 dB, 1 Hz +/- 1 dB). Kaikki mikrofonit, ja samalla koko järjestelmä, kalibroitiin säännöllisesti G.R.A.S. 42AB (Class 1), kalibrointilaitteella, joka tuotti mikrofonille 114 dB:n sinimuotoisen äänen 1 kHz taajuudella.

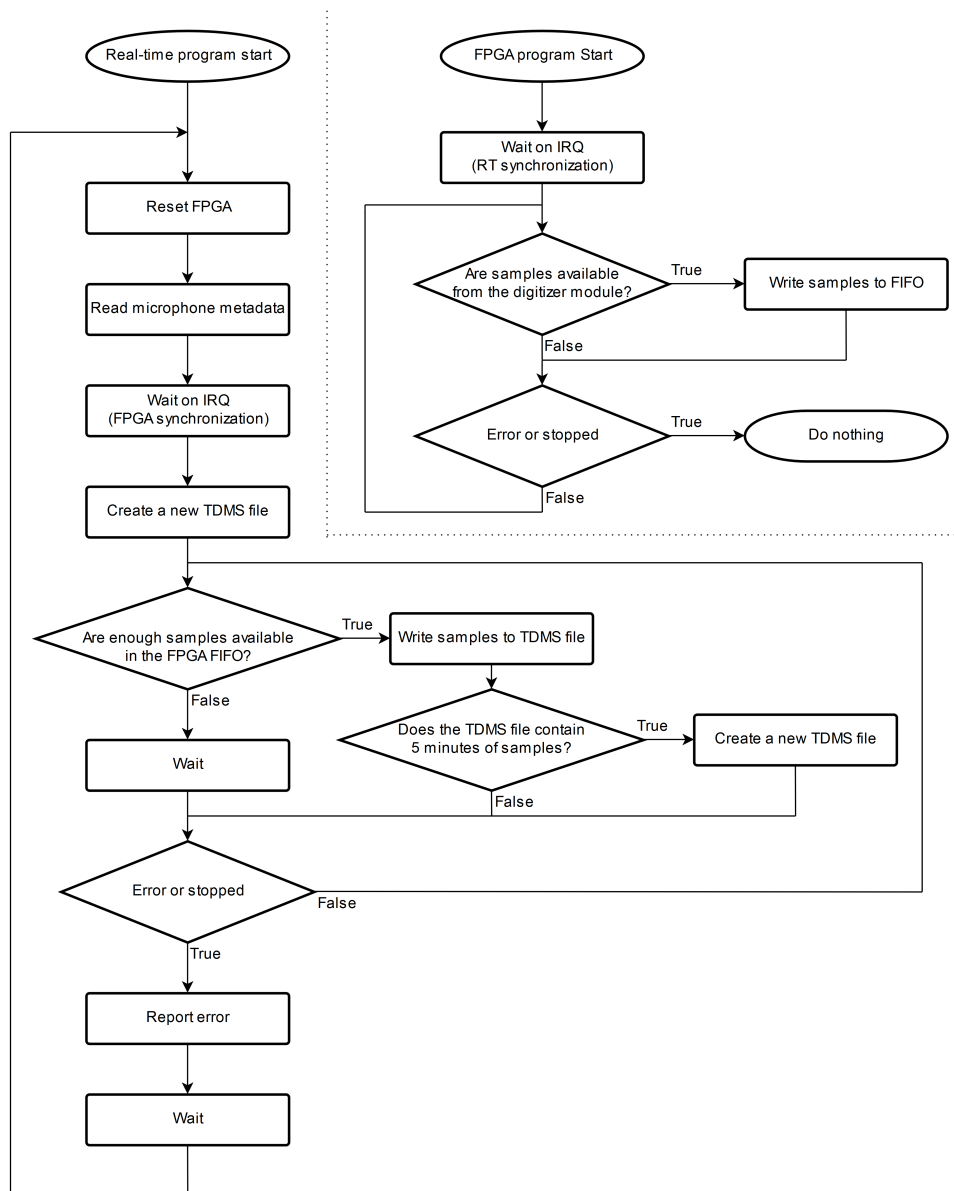
Mittausasemien ohjelmisto luki mikrofoneihin itseensä upotetuille siruille tallennetut mikrofonin kalibrointitiedot (TEDS), joiden avulla mikrofonin tuottama jännite muunnettiin äänenpaineeksi, eikä sekaantumiseen vaaraa mikrofonien välillä ollut. Mikrofonin kalibrointitiedot, sarjanumero, mittauspaikka ja -aika, sekä muuta metatietoa mittaustapahtumasta, tallennettiin samaan tiedostoon äänidatan kanssa. Mikrofonien ja koko äänenkäsittelyjärjestelmän tarkkuus varmistettiin vertaamalla järjestelmän kautta saadun 114 +/- 0.1 dB:n tasoista kalibrointisignaali järjestelmän kautta saatuihin lukemiin.

Viidettä mittausasemaa varten toteutettiin infraäänimittausten luotettavuuden parantamiseksi myös Kuvassa (3 b) näkyvä toisiotuulisuoja sijoittamalla noin 25 cm halkaisijaltaan oleva pi-saranmallinen teräslankahäkki Nor1217 tuulisuojan ympärille ja päällystämällä se ohuella kankaalla, katso Kuva (3 b). Mittauksia tehtiin vertailun vuoksi myös käyttäen THL:ltä lainattua, pyöreän, halkaisijaltaan 1000 millimetriä olevan puulevyn päälle asennettua 750 mm puolipal-

lonmuotoista toisiotuulisuojaa, GFM 920, jonka sisällä oli 85 mm ensiötuulisuoja. Mikrofonina käytettiin MTG MK250 mittausmikrofonia. Sekä mikrofonin, että tuulisuojan valmistaja on Microtech Gefell GmbH (Thüringen, Deutschland), Kuva (3 c).

Näitä kolmea eri mittaustapaa vertailtiin keskenään sijoittamalla mikrofonit toistensa lähetyville 660 m:n etäisyydelle tuulivoimalasta, ja vertaamalla saatuja mittaustuloksia. Valmistajan antamien tietojen mukaan toisiotuulisuoja vähentää tuulen aiheuttamaa kohinaa noin 20 dB pelkkään valmistajan 85 mm ensiötuulisuojaan verrattuna, kun tuulen nopeus on välillä 3 - 20 m/s.

2.1.1 Mittausjärjestelmän toiminta



Kuva 4. Mittausjärjestelmän ohjelman toiminta pääpiirteittäin.

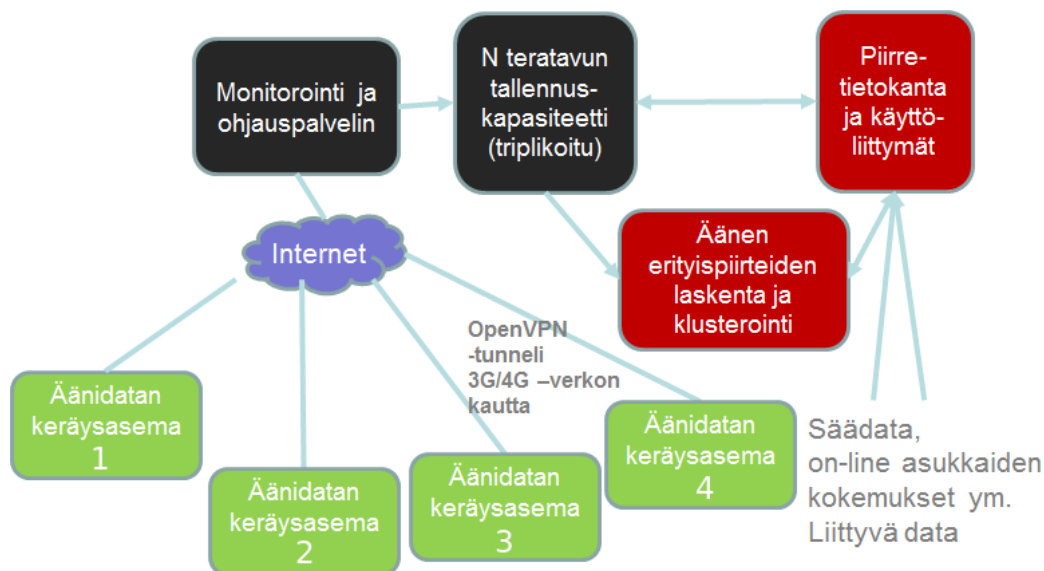
Äänimittausemien ohjelmisto, jonka lohkokaavion on esitetty Kuvassa (4), koostui kahdesta erillisestä prosessista, jotka on molemmat toteutettu LabView-ympäristön G-kielellä (National Instruments, Austin, USA), ja niitä suoritettiin Niinikään National Instrumentsin Compact-RIO-järjestelmässä (cRIO-9063) (myöhemmin cRIO). Tosiaikaisesta signaalin näytteistyksestä huo-

lehtivaa koodiosuutta suoritettiin laitteistonläheisesti cRIO:n FPGA (Field Programmable Gate Array) –piirillä. Sen tehtävänä on lukea näytteitä mikrofoniin kytketyltä analogi–digitaalimuuntimelta täsmällisin aikavälein, ja kirjoittaa näytteet puskurimuistiin (FIFO). Toisen prosessin, jota suoritetaan cRIO:n keskussuorittimella, tehtävänä oli lukea mittausdata puskurimuistista lohkoittain, ja kirjoittaa se tiedostoon. Näiden lisäksi mittausaseman kuuluu myös mikrokontrolleri (ei esitettyä kuvassa), jonka tehtävänä oli tiivistää mittausdata ja lähettää se palvelimelle langattoman 3G/4G-modeemin välityksellä, viiden minuutin välein. Mikäli yhteys palvelimeen välillä katkesi, mittausdata puskuroitiin laitteen sisäiseen muistiin, josta se siirretään palvelimelle yhteyden palattua. Mittausasemat suunniteltiin niin, että mittaus ei häiriinny alle viikon mittaisista yhteyskatkoksista.

2.1.2 Infraäänien nauhoittaminen

Mittausasemat tallensivat myös kuuloalueen alapuolisia (alle 16 Hz) infraääniä, vaikka niiden tallentaminen ei ole ollut suoraan hankkeen tavoitteissa. Varsinaista infraäänikalibrointia ei pystytty kuitenkaan tallentaville mikrofoneille tekemään, ja lisäksi tuulen vaikutus mikrofoniin tuulisuojaan aiheutti häiriöitä infraäänitaajuuksille, joten näitä mittauksia tulee pitää infraäänien osalta vain suuntaa-antavina.

2.1.3 Tietoliikenne ja tiedon varastointijärjestelmä



Kuva 5. Mittausasemien (1 - 4), tiedonsiirto- ja tallennusjärjestelmän kaaviokuva

Jokainen mittausasema tallensi itsenäisesti ääntä ja lähetti sen langattomasti 3G- tai 4G-verkon kautta 5 minuutin jaksoissa palvelimelle. Palvelimelle tallennettiin yhteensä lähes 20 TBi dataa, joka oli hankkeen kaikkien tutkimusosapuolien käytössä.

2.2 Ilmakehän olosuhteiden mittaaminen

Tarkoituksena oli mitata ne säähän liittyvät tekijät, joilla voi olla vaikutusta äänen syntyyn ja etenemiseen. Lisäksi hankkeessa mallinnettiin sääolosuhteita simulointimallilla (Weather Research and Forecast model, WRF), ja simulaation tärkeimmät parametrit tallennettiin ja niitä käytettiin havaitsemaan sääolosuhteet, joiden vallitessa ääni etenee kauimmaksi. Sen ymmärtämiseksi, miten sääolosuhteet vaikuttavat äänen kulkeutumiseen luonnossa, säämittauksia suoritettiin Honkajoella, Kirkkokallion tuulipuiston läheisyydessä vuoden ajan (15.3.2016 - 15.3.2017). Samaan aikaan suoritettiin myös äänimittauksia, jotta äänen ja sääolosuhteiden riippuvuutta voitiin arvioida parhaalla mahdollisella tavalla. Kaikki säämittaukset tallennettiin 10 minuutin keskiarvoina, joka on tuulivoimateollisuuden normaali käytäntö. Äänimittauksista laskettuja tietoja, joita haluttiin verrata säätietoihin, pyrittiin myös esittämään 10 minuutin yhteenvetoina, jolloin niitä oli helppo verrata säämittauksiin. Tällä resoluutiolla mittausdata sisältää 144 näytettä päivässä 365 päivän ajan, eli yhteensä 52 560 näytettä. Sääolosuhteiden mittaustietoa puuttuu vain muutaman päivän osalta, pääasiassa mittalaitteiden virtakatkosten takia.

Äänen etenemistä luonnossa määrääviä pääperiaatteita on tutkittu jo vuosisatoja. Tämä tutkimus on kuitenkin sikäli ainutlaatuinen, että se yhdistää pitkäjaksoiset akustiset mittaukset ja sääolosuhteiden simuloinnin pitkäaikaisiin säämittauksiin, jonka ansiosta on mahdollista havaita näiden välillä riippuvuuksia erilaisilla ajanjaksoilla 10 minuutin ja vuoden välillä.

2.2.1 Sääolosuhteiden mittaaminen



Kuva 6. SODAR mittausyksikkö, jonka päälle on asennettu mikroaaltoradiometri. Laitteistolla voidaan mitata sekä lämpötila, että tuuliprofiili. Taustalla näkyvä 10 m korkeuteen asennettu sääasema.

Sään havainnointi perustui kahteen erilaiseen järjestelmään. Sääolosuhteita toisaalta mitattiin tuulipuiston läheisyyteen asennetuilla mittausjärjestelmillä ja toisaalta niitä myös mallinnettiin numeerisella sääennustusmallilla. Tällä tavalla pystyttiin tuntemaan sääolosuhteet paljon

paremmin kuin käyttämällä pelkästään jompaa kumpaa menetelmää erikseen. Sääolosuhteita kuvaavia suureita on paljon, ja niitä ei voida kustannussyistä mitata kovin monesta paikasta ja korkeudelta yhtäaikaisesti. Sääolosuhteiden ymmärtämiseen liittyviä muuttujia saadaan numeerisen sääennustemallin avulla laskettua mielivaltaisesta paikasta ja korkeudelta. Suorittamalla säämittauksia ja simulaatiota rinta-rinnan, voidaan arvioida simulaatiomallin tarkkuutta.

Säämittauksia tehtiin usealla eri mittalaitteella eri paikoista tuulivoima-alueelta ja sen ympäristöstä. Tuulivoimayhtiö Nordex, joka oli mukana tutkimushankkeessa, toimitti meille mittaustietoja noin 120 metrin korkeudelta, turbiinien nasellin sääasemista. Nämä mittaustiedot sisälsivät lämpötilan sekä tuulen nopeuden ja suunnan. Muut mittaukset tehtiin samasta paikasta, johon neljäs mittausasemakin oli sijoitettu (Kuva 6). Siellä mitattiin sääolosuhteita 10 metrin korkeudelle asennetulla WTX520 sääasemalla (Vaisala, Vantaa, Suomi) tuuliprofilia SODAR–mittausyksiköllä sekä talvikuukausien aikana myös lämpöprofilia mikroaaltoradiometrillä MTP-5, (RPO Attex, Moskova, Venäjä). Painopiste oli tuuli- ja lämpötilaprofilin mittaamisessa alailmakehässä äänimittausten aikana. Nämä kaksi suurta ovat tärkeitä ajan ja paikan suhteen vaihtelevan ääninopeusprofilin selvittämiseksi. Kuvassa (6) on auton peräkärriin asennettu SODAR–mittalaite, SODAR:in katolle asennettu mikroaaltoradiometri ja taustalla 10 m maston huipulle asennettu sääasema. SODAR ja mikroaaltoradiometri tuottavat tietoa ajan suhteen muuttuvasta alailmakehän tuuli- ja lämpötilaprofilista.

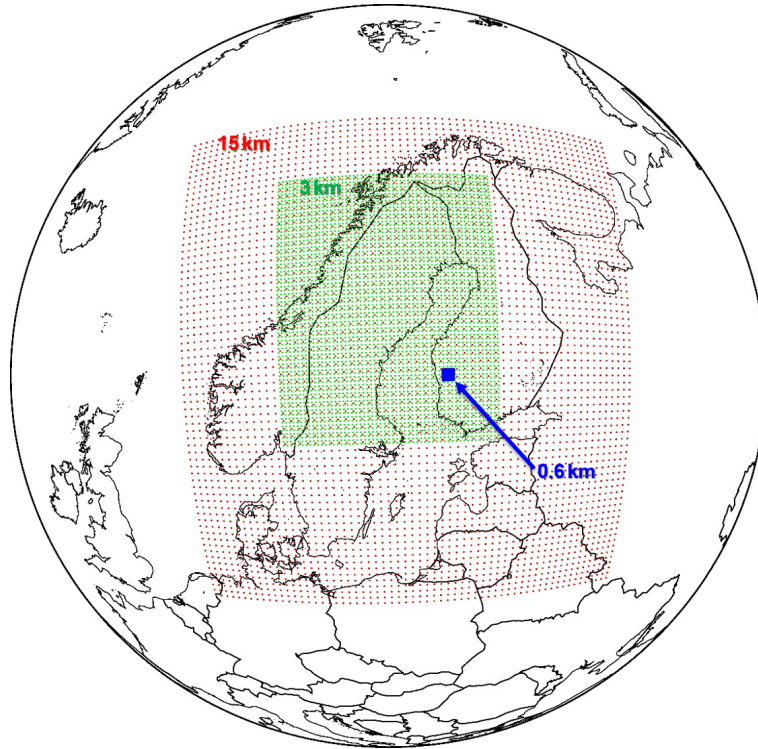
SODAR:in toiminta perustuu ilmaan lähetettyjen äänisignaalien kaiun doppler-siirtymän mittaamiseen, jonka pohjalta voidaan laskea kolmiulotteinen tuulen suunta kymmenen metrin välein 50 - 200 metrin korkeuksilta. Tulokset ilmoitetaan 10 minuutin keskiarvoina. Tuuliprofilia mitattiin koko ajan samalla kun äänimittaukset olivat käynnissä.

2.2.2 Sääolosuhteiden mallintaminen

Mittaamisen lisäksi, sääolosuhteen eri vuodenaikoina myös mallinnettiin WRF (Weather Research and Forecast) mallin avulla (Skamarock et al. 2008), joka oli sovitettu erityisesti pohjoismaisiin olosuhteisiin ottamalla mukaan Polar WRF-hankkeessa tehdyt parannukset (Hines & Bromwich 2008). Simulointeja suorittivat Luulajan yliopiston tutkijat pohjoismaisen tuulivoimakeskushankkeen (WindCoE) rahoituksella. Simuloinnin tarkoitus oli selvittää myös ne säähän liittyvät suureet, joita ei voi suoraan mitata, ja myös niissä paikoissa, joista säähän liittyviä muuttujia ei oltu mitattu.

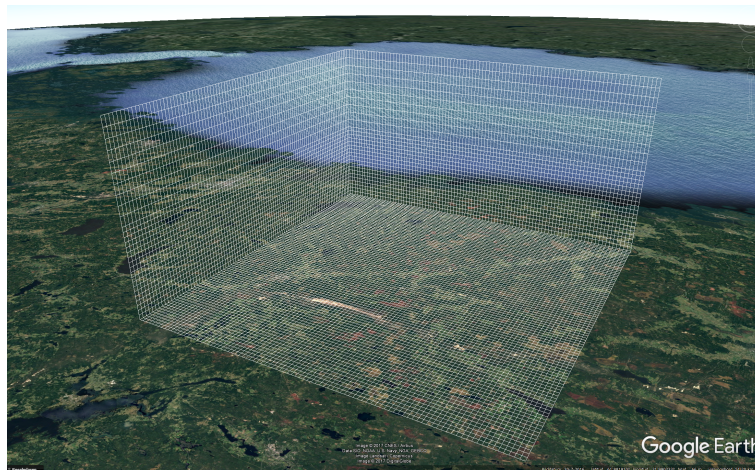
WRF–mallia varten määritettiin tuulivoima-alueen ympärille kolme eritiheyksistä ruudukkoa, joissa ruutujen koko oli 15 km, 3 km ja tiheimmässä 600 m. Uloin ruudukko kattaa koko Pohjoismaat, sisempi Perämeren ympäristön (Kuva 7) ja tihein ruudukko vain lähinnä tuulivoimalan alueen (Kuva 8). Tällä järjestelyllä pystytään ottamaan huomioon koko Pohjoismaiden säätilanne karkealla tasolla, ja keskittymään kohdealueen olosuhteisiin suuremmalla tarkkuudella.

Luotu ruudukko oli yhteensopiva USA:n kansallisen ympäristönseurantakeskuksen säädatan (Climate Forecast Systems Reanalysis data) kanssa. Tämä data tarjosi tarvittavan syötteen WRF



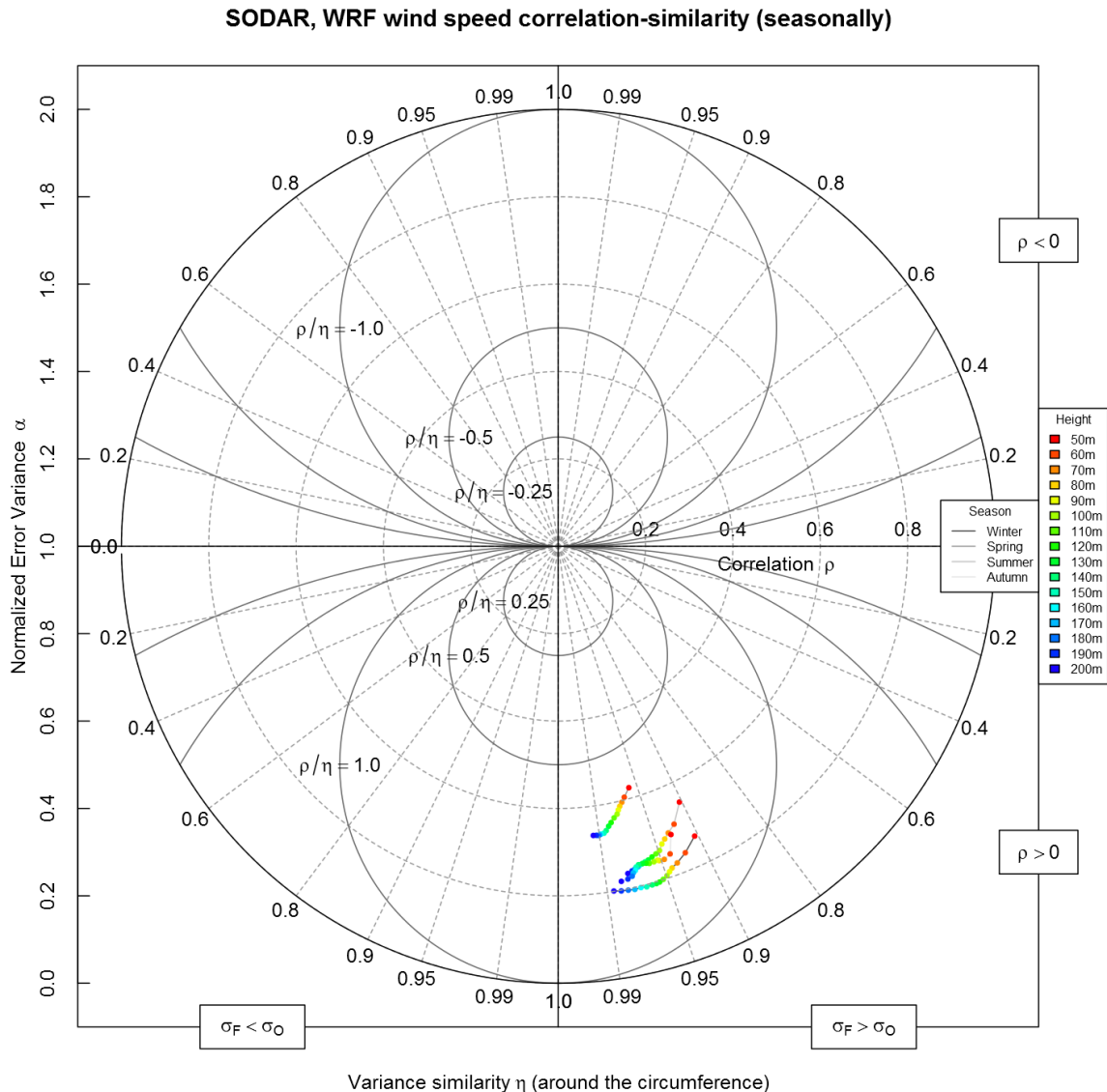
Kuva 7. WRF-sääennustemallin käyttämä globaali simulointiruudukko

sääennustemallille 6 tunnin aikaresoluutiolla ja 0.5° pituus- ja leveysasteen paikkaresoluutiolla. Sääennustemallilla mittaustiedot interpoloitiin tuottamaan pienemmän simulointiruudukon määrittämälle suuremmalle aika- ja paikkaresoluutiolle sääolosuhde-laskelmat koko vuoden ajalle. Laskenta tehtiin Luulajan teknillisessä yliopistossa, käyttäen Ruotsin kansallista super-tietokoneklusteria, Abisko, suurteholaskentaan.



Kuva 8. WRF-sääennustemallin käyttämä paikallinen simulointiruudukko

Simulointien realistisuutta parannettiin lisäämällä simulointiin myös malli tuulivoima-alueen vaikutuksista sääolosuhteisiin, (Fitch et al. 2012) tutkimuksen pohjalta. Tämän mallin ansiosta, WRF-mallilla voidaan simuloida myös tuuliturbiinien vaikutus paikallisiin tuuliolosuhteisiin. Kun tuuliturbiinit ottavat energiaa tuulesta, ne myös hidastavat tuulen nopeutta, ja kasvattavat tuulen turbulentsuutta. Mallin toimintaa verrattiin mittaustuloksiin, ja sen havaittiin parantavan simulointitulosten vastaavuutta mittausten kanssa.



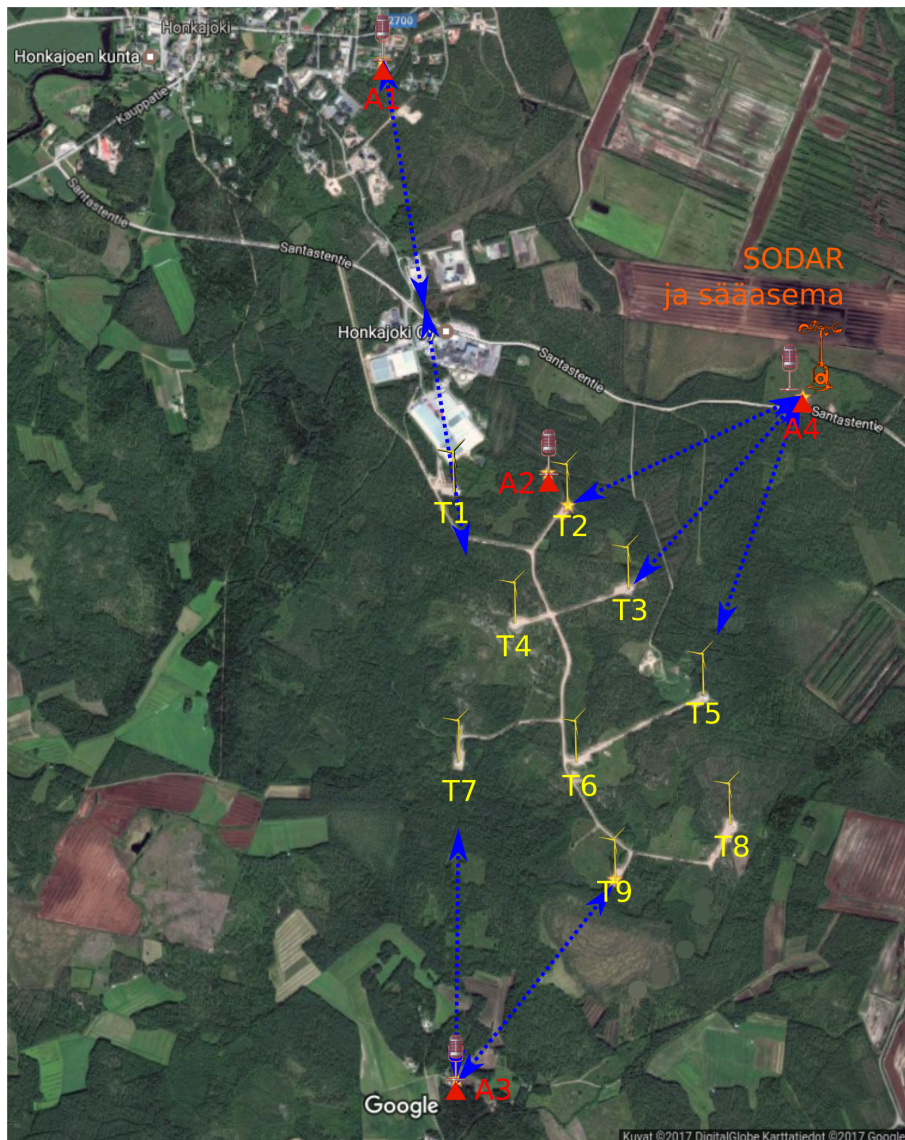
Kuva 9. Mallin diagnostiikkaa. Korrelaation varianssikaavio.

Mittausten ja simulointien vastaavuutta arvioitiin käyttäen useita arviointimetriikoita, joita ovat ehdottaneet esimerkiksi (Koh et al. 2012). Tässä tutkimuksessa sovellettiin erityisesti mitattujen ja simuloitujen suureiden vaihe-erojen korrelaatiota sekä varianssien yhtenevyysmetriikkaa. Arvioinnin tulokset visualisoitiin graafisesti tulosten tulkinnan helpottamiseksi. Esimerkiksi Kuva 9 on esitetty korrelaatioiden yhtenevyys, eli korrelaation suhde varianssien yhtenevyyteen, eri tuulen nopeuksilla, neljänä eri vuodenaikana. Kuvaajasta nähdään, että tuulen mallintaminen toimii parhaiten talvella ja huonoiten keväällä, ja että malli on sitä parempi, mitä korkeammalla olevaa tuulta mallinnetaan. Tässä käytetty mallin arviointimenetelmä tarjoaa harhattoman yhteenvedon mallin toimivuudesta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että malli toimii paremmin toisten muuttujien arvioinnissa kuin toisten, ja että yleisesti ottaen mallin vastaavuus mittaustuloksiin on hyvä. Jos kuvaajaan piirretyt mallin toimivuutta kuvaavat pisteet sijaitsisivat koordinaatiston ala- tai yläreunoissa, niin

silloin mallin toimivuus olisi täydellinen.

2.3 Mittauspaikat



Kuva 10. Mittauspaikat Kirkkokallion tuulivoima-alueella ja sen ympäristössä. Punaiset kolmiot osoittavat mittausasemien 1 - 4 paikkoja. Keltaiset tuuliturbiinin symbolit T1 - T9 osoittavat tuulivoimaloiden paikkoja. Oranssi tuuliviiri osoittaa SODAR- ja säämittausaseman sijaintia. Siniset mittaviivat ovat pituudeltaan noin 1000 m. (Kuva Google Maps).

Neljä mikrofonia, SODAR tuuliprofiilimittari, ja sääasema sijoiteltiin aluksi Honkajoella sijaitsevan Kirkkokallion tuulivoima-alueen ympärille Kuvan (10) mukaisesti. Mittauspaikkojen tarkemmat kuvaukset on myös lueteltu taulukossa (1).

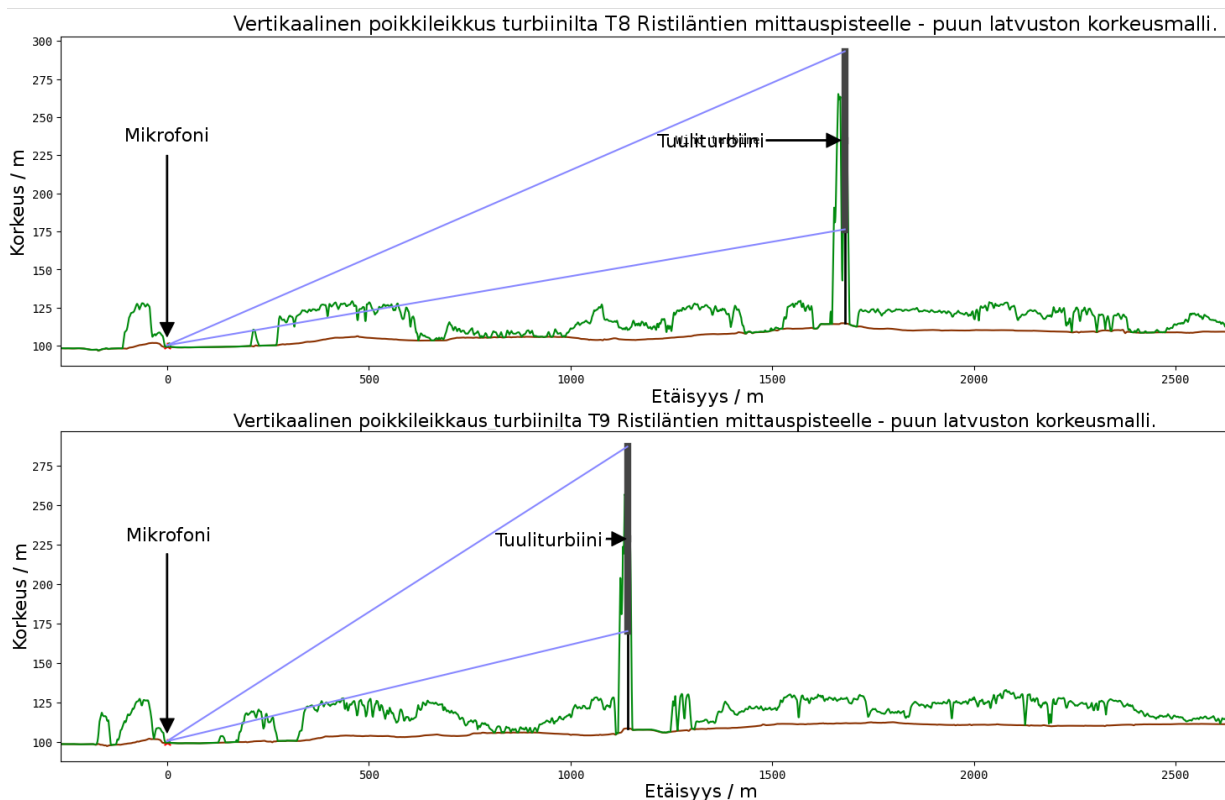
Mittausasema 1, siirrettiin Torkkolan tuulivoima-alueelle, hakkuuaukealle jossa mittauksia tehtiin 18.10.2016 - 31.5.2017 noin 660 m etäisyydellä lähimmästä tuulivoimalasta Koilliseen (35°).

Taulukko 1. Mittauspaikkojen sijainti ja mittausajankohdat Kirkkokallion tuulivoima-alueella.

Mittaus- asema	Etäisyys lähimpään turbiiniin	Mittausajankohta	Mittauspaikan kuvaus
1	2000 m	3.2.2016 - 3.8.2016	Rivitalon takapiha
2	170 m	18.1.2016 - 31.5.2017	Metsä
3	1100 m	30.3.2016 - 31.5.2017	Maatilan takana, pellonreunalla
4	1100 m	3.2.2016 - 17.5.2017	Hakkuuaukea, SODAR- aseman vierellä.

Hankkeen aikana rakennettiin vielä viides mittausasema, koska haluttiin mitata vielä Santavuoren tuulivoima-alueen melua. Koska infraäänistä oli syntynyt siellä niin paljon keskustelua, viidennen mittausasemaan asennettiin alemmaksi infraäänialueelle ulottuva mikrofoni. Mittausasema sijoitettiin Santavuoren tuulipuiston lähistölle 1170 m päähän lähimmästä turbiinista itään (260°). Mittaukset alkoivat 13.3.2017 ja jatkuivat 31.5.2017 asti.

2.3.1 Mittausalueen kuvaus



Kuva 11. Esimerkki tuulivoima-alueen topografiatiedoista GTK:n tietokannan mukaan. Kuvassa näkyy maastonmuodot ja metsäpeitteen korkeus turbiinien T8 ja T9, sekä Ristiläntien mittauspisteessä olevan mittausaseman, 3, välillä.

Maasto tuulivoima-alueen ja sen ympäristön välillä on Kuvan 1(10) mukaisesti tasaista tai loivasti kaltevaa, luokkaa muutama kymmenen metriä, tuulivoima-alueen keskipisteestä piirretyn 2.5 km säteisen ympyrän alueella. Lähinnä voimaloita, alue on pääasiassa metsää, ja vain vähän

peltoa, teollisuusalueita, suota ja hiekkateitä.

Tiedot tuulipuistoalueen topografiasta ja puuston korkeudesta saatiin Geologian Tutkimuskeskukselta (GTK), katso Kuvaa (11). Nämä korkeustiedot voivat olla tärkeitä äänen etenemisen kannalta, johon palataan myöhemmin. Kuvan tiedot on muodostettu Maanmittauslaitoksen 4 x 4 m resoluutiolla mittaaman maaston laserskannausdatan perusteella. Koska mittauspisteet on luokiteltu maaperään ja kasvillisuuteen, sen pohjalta voidaan laskea sekä maastonmuoto, että metsän latvuston korkeus. Kuvassa (11) nämä tiedot on esitetty kuvaamalla maanpinnan korkeusprofiili ja latvuston korkeus suhteessa merenpinnan tasoon kahden tuuliturbiinin ja mittausaseman, 3, välillä. Kuvasta nähdään myös mittausaseman ja tuuliturbiinin välinen etäisyys, ja nähdään kuinka paljon puun latvustoa osuu äänen suoralle kulkureitille. Koska mittausasemia on neljä ja tuuliturbiineita 9, näitä profiileita on laskettuna yhteensä 36 kappaletta, vaikka vain kaksi niistä on tässä esitettynä.

2.4 Asukkaiden mielipiteen tutkiminen

Aiemmassa tutkimuksessa on havaittu, että tuulivoimaloiden lähellä asuminen saattaa olla yhteydessä kiusaantumisen kokemukseen (*annoyance*), unihäiriöihin ja elämänlaadun alentumiseen, (Onakpoya et al. 2015). Tuulivoimaloiden äänen havaitseminen ja koettu häiritsevyys ovat yhteydessä äänenpainetason voimakkuuteen, mutta kokemus riippuu myös monista ihmisen persoonallisuuteen liittyvistä tekijöistä. A-painotettu melutaso 35 - 40 dB lisää todennäköisyyttä kokea tuulivoimaloiden ääni häiritseväksi (Pawlaczyk-Łuszczynska, Dudarewicz, Zaborowski, Zamojska-Daniszevska & Waszkowska 2014; Pedersen & Larsman 2008). Myös kokemus vaikutusmahdollisuuden puuttumisesta ja käsitykset tuulivoimaloiden kielteisistä vaikutuksista maisemaan lisäävät koettua äänen häiritsevyyttä (Pedersen & Waye 2004; Pedersen & Larsman 2008; Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2014). Kielteinen asenne tuulivoimaloita kohtaan lisää todennäköisyyttä kokea melu voimakkaampana ja häiritseväksi (Taylor et al. 2013; Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2014).

Asukkaiden kokemuksia tuulivoimaloista ja niiden äänistä selvitettiin kyselytutkimuksella kahdella tutkimuspaikkakunnalla. Kyselytutkimuslomake perustui (Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2014) tutkimuksessaan käyttämään lomakkeeseen, jonka avulla arvioitiin tuulivoimamelun aiheuttamaa häiritsevyyttä.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston väitöskirjalautakunta, joka toimi yliopiston eettisenä toimikuntana, käsitteli tutkimuksen eettisen suunnitelman 9.12.2014. Tutkimukseen valitun joukon henkilötiedot (Väestötietojärjestelmä, Väestörekisterikeskus, Tietolupapäätökset 2.10.2015, Dnro 1865/410/15 ja 2.11.2016, Dnro 2421 /410/16) sisälsivät nimen, kotikunnan, syntymävuoden, sukupuolen, äidinkielen, asuinrakennuksen kuntakoodin, rakennustunnuksen, asuinpaikkatunnuksen, rakennuksen käyttötarkoituksen ja sijaintikoordinaatit.

Kyselytutkimuslomake postitettiin vuodenvaihteessa 2015 - 2016 kirjepostina Honkajoella kai-

kille yli 18-vuotiaille asukkaille, jotka asuivat alle 4 km etäisyydellä tuulipuistosta (783 henkilöä). Torkkolassa kyselytutkimuslomake lähetettiin vuodenvaihteessa 2016 - 2017 kaikille yli 18-vuotiaille asukkaille, jotka asuivat tuulivoimapuiston keskelle sijoitetusta pisteestä alle 3 km etäisyydellä tuulivoimalasta (447 henkilöä). Vastattuja kyselylomakkeita palautui Honkajoella yhteensä 232 ja Torkkolassa 189. Vastausaktiivisuus Honkajoella oli 29,6 % ja Torkkolassa 42,3 %. Vastaukset koodattiin ja tallennettiin Excel-tiedostoon ja tulokset analysoitiin IBM SPSS Statistics®-tilasto-ohjelmaa käyttäen.

3 ANALYSOINTIMENETELMÄT

3.1 Äänitasojen analysointi

Kirkkokallion tuulivoima-alueella äänitasoja arvioitiin ensisijaisesti mittauspisteessä, joka sijaitsi noin kilometrin päässä tuulivoima-alueesta lounaassa, mittauspisteessä, A3, Kuvassa (10). Tämä mittauspiste oli sopivin, koska A2 oli liian lähellä turbiinia, A1 oli niin kaukana, että siellä ei juuri koskaan havaittu tuulivoimaloiden ääntä ja A4 oli lähempänä tietä, jolloin siellä olisi ollut enemmän häiriöääniä. Mittauspistettä A2 käytettiin tuuliturbiinin äänitehotason laskemiseen.

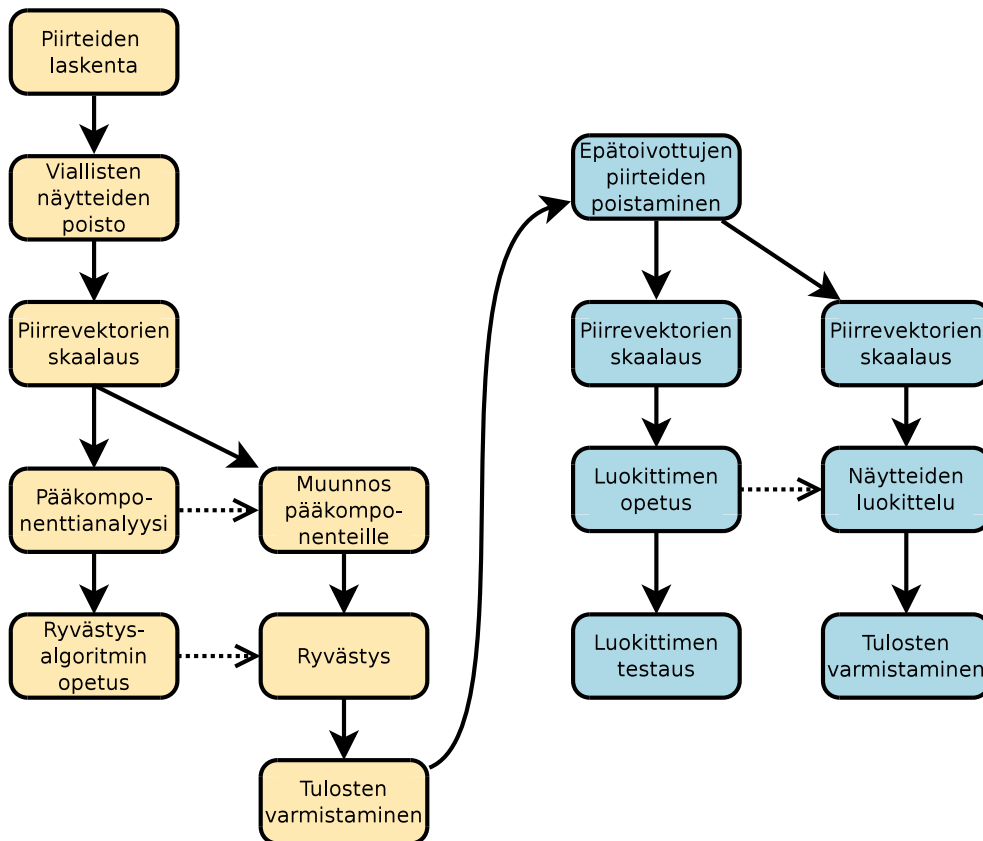
Mittaustulosten pohjalta selvitettiin äänen voimakkuutta ja laatua eri etäisyyksillä tuulivoima-alueesta. Yli kilometrin etäisyydellä äänet ovat sen verran vaikeita, että on hankala arvioida niiden yksinään aiheuttamaa äänenpainetasoa, koska ympäristössä on myös monia muita äänilähteitä. Siksi tutkimuksessa päätettiin myös kokeilla ympäristön äänten luokittelua äänilähteiden mukaan. Ryvästämisalgoritmit (engl. *clustering*) ovat yleisiä koneoppimisen menetelmiä, mutta niitä on vain harvoin käytetty ympäristömelun yhteydessä, mutta kun niitä on käytetty, tulokset ovat yleensä olleet hyviä (Nykaza et al. 2015; Tanweer et al. 2016; Bountourakis et al. 2015; Tsau et al. 2012). Ryvästämistä varten, ääninäytteet jaettiin 10 sekunnin mittaisiin näytteisiin, joista kustakin laskettiin tunnuspiirteet, joiden pohjalta ryvästäminen toteutettiin. Kuuntelemalla ääninäytteitä eri ryhmistä, tarkistettiin ryvästämisen onnistuminen ja annettiin kullekin ryhmälle sen sisältöä kuvaava nimi. Ryvästämisen avulla voidaan selvittää kunkin äänilähteen tuottama keskimääräinen äänenpainetaso ja äänen jakauma eri vuorokaudenaikoihin. Hankkeessa käytetyt ääninäytteitä kuvaavat tunnuspiirteet olivat A-painotettu äänenpainetaso, C-painotettu äänenpainetaso, 1/3 oktaavikaistaiset äänenpainetasot 2 Hz keskitaajuudesta 10 kHz keskitaajuuteen asti. Lisäksi yhtenä tunnuspiirteinä käytettiin hyvin yksinkertaista tuulivoimalan merkityksellistä sykkivyyttä mittaavaa tunnuspiirrettä, joka saadaan vähentämällä 2 s ajalta lasketusta äänenpainetason keskiarvosta, lyhyeltä, 0.5 s ajalta keskiarvotettu äänenpainetaso. Tämä menetelmä on mukailtu (Fukushima et al. 2013) ehdottamasta menetelmästä. Ennen ryvästämistä ääninäytteiden tunnuspiirteiden keskinäinen korrelaatio poistettiin pääkomponenttianalyysillä (PCA). Ryvästämistä varten testattiin kolmea eri algoritmia: 1) Mean Shift Clustering (MSC), 2) DBSCAN ja 3) BIRCH. Tuloksen tarkistamista varten tehtiin sovellus, jolla pystyttiin ryvästämisen tulos näyttämään kuvaruudulla ja josta voitiin hiirtä näpäyttämällä valita kustakin ryppästä ääninäytteitä, ja soittaa ne. Samalla kunkin ryppään äänilähde nimettiin ja mahdollisesti samankaltaisia ääniä sisältävät ryppäät yhdistettiin nimetyiksi luokiksi. Ryvästämisen jälkeen laskettiin ääniluokkien keskiäänitasot ja äänen jakauma vuorokaudenaikojen mukaan.

Seuraavaksi opetettiin luokitin erottamaan luokat toisistaan käyttäen mahdollisimman vähän äänimittausten tunnuspiirteitä, jotta voidaan minimoida mittaamisen, siirtämisen ja tallentamisen tarvetta. Siksi opetettiin luokitin toistamaan automaattisesti ryvästämällä ja käsityönä nimeämällä saatu luokittelu. Testattavaksi luokittelualgoritmeiksi valittiin 1) Naiivi Bayesilainen luokitin (NBC), 2) satunnaistettuun päätöspuiden joukkoon perustuva Extratrees-luokitin sekä 3) tukivektoreihin perustuva Support Vector Machine (SVM) -luokitin. Kunkin luokittimen

tulosta verrattiin ryvästämällä saatuun luokitukseen ristiinvalidoinnin (Cross Validation, CV) avulla ja luokittelun epätarkkuuksia tutkittiin yksityiskohtaisemmin sekaannusmatriisin (confusion matrix) avulla.

Koko luokitteluprosessi on esitetty Kuvassa (12). Prosessin vaiheet ovat seuraavat:

1. *Piirteiden laskeminen:* Piirteinä käytettiin enimmäkseen äänisignaalin spektristä laskettuja arvoja. Spektrien ja piirteiden laskeminen vaatii paljon laskentatehoa, joten ajan säästämiseksi laskenta suoritettiin tieteellisen laskennan keskuksen (CSC:n) tietokoneklusterilla rinnakkaislaskentaa hyödyntäen.
2. *Virheellisten näytteiden poistaminen:* Mittauksissa esiintyi toisinaan mittausinstrumentin virhetoiminnaksi luokiteltavaa sähköistä kohinaa. Siihen liittyvät näytteet tunnistettiin ja poistettiin häiritsemästä muuta käsittely. Koko aineistossa virheellisten mittaustulosten osuus oli vähäinen, mutta huhtikuun 2016 mittauksissa virheellisen datan osuus oli jopa 20%.
3. *Piirrevektorien skaalaus:* Ryvästyksen toiminnan helpottamiseksi, piirrevektorit skaalattiin niin että kunkin piirteen keskiarvo on nolla ja keskihajonta on yksi.
4. *Pääkomponenttianalyysi ja ryvästys:* Ryvästysalgoritmi opetettiin järjestelemään satunnaisesti valittu 20 000 näytteen näytejoukko, käyttäen piirrevektorien viittä pääkomponenttia. Koko datajoukko muunnettiin samoihin pääkomponentteihin ja ryvästettiin valmiiksi opetetulla ryvästysalgoritmilla.
5. *Tulosten varmistaminen:* Ryvästyksen tulos varmistettiin kuuntelemalla satunnaisesti valittuja näytteitä kustakin ryppäästä. Jos useamman ryppään näytteet vaikuttivat hyvin samanlaisilta, ne yhdistettiin yhdeksi luokaksi.
6. *Epätoivottujen piirteiden poistaminen:* Ryvästämisen jälkeen opetettiin luokittelija luokittelemaan näytteet suoraan piirrevektoreiden avulla, ilman pääkomponenttianalyysiä, käyttämällä mahdollisimman pientä määrää piirrevektoreita. Joukossa oli myös sellaisia piirrevektoreita, joita ei haluttu käyttää, koska niiden mittaaminen on hankalaa. Näitä ovat esimerkiksi infraäänitaajuiset oktaavikaistat. Nämä poistettiin datasta, ja luokitin opetettiin selviytymään ilman niitä. Piirrevektorit skaalattiin jälleen nollakeskiarvoisiksi ja keskihajonnaltaan vakioiksi normaalikäytännön mukaisesti.
7. *Luokittimen opetus ja testaus:* Luokitin opetettiin luokittelemaan näytteet ryvästysalgoritmien tavoin, käyttämällä suoran alkuperäisiä piirteitä, ja niistäkin vain mahdollisimman harvoja. Opetusta varten valittiin ryvästysalgoritmien tuottamasta aineistosta tasapainoinen opetusjoukko, valitsemalla satunnaisesti 250 näytettä kustakin luokasta. Luokitin testattiin ristiinvalidoimalla (Cross Validation) se ryvästysalgoritmien tuloksien avulla.
8. *Luokittelu ja varmistus:* Seuraavaksi opetettu luokitin sovellettiin koko mittausaineistoon, ja tuloksia verrattiin ryvästysalgoritmien kanssa, sekä selvitettiin mitkä piirteet parhaiten erottavat eri äänilähteet toisistaan.



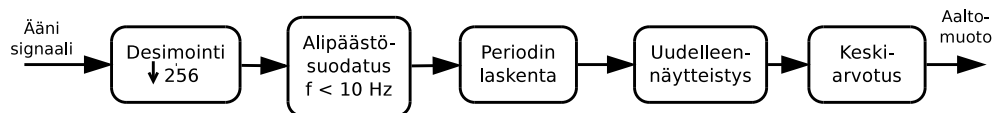
Kuva 12. Ääninäytteiden luokitteluprosessin vaiheet. Ryvästyksen tarvitut vaiheet keltaisella ja luokitteluvaiheet sinisellä.

3.2 Turbiinin tuottaman äänen aaltomuodon analysointi

(Vanderkooy & Mann 2015) onnistui saamaan tuulivoimalan tuottaman infraäänitaajuuden aaltomuodon esille tuuliturbiinin pyörimiseen optisesti synkronoidulla, ns. koherentilla ilmaisumenetelmällä. Menetelmän ideana on se, että infraäänitaajuinen äänisignaali leikataan täsmälleen lapataajuuden jaksonaikaan vastaaviin näytteisiin, siten että näytteet on otettu lavan ollessa aina täsmälleen samassa vaihekulmassa. Yhdeltä turbiinin kierrokselta mitattu ääni jaetaan siis kolmeen (lähes) samanmittaiseen näytteeseen. Kun nämä näytteet keskiarvoistetaan keskenään, saadaan yhtä lapajaksoa kuvaava keskimääräinen aaltomuoto, jossa jokaisessa jaksossa toistuva aaltomuoto säilyy, ja jaksoton, tai muulla kuin lapataajuudella jaksollinen aaltomuoto vaimenee. Koska nykyaikaiset tuuliturbiinit ovat muuttuvanopeuksisia, lapajakson pituus ei pysy vakiona, vaan sitä pitää koko ajan seurata, ja näytteen pituus valita lapajakson mittaiseksi. Lopuksi lapajakson mittaiset näytteet pitää venyttää tasamittaisiksi uudelleennäytteistämällä ennen kuin niitä voi keskiarvottaa keskenään. Vanderkooy toteutti lapajaksojen seurannan optisesti, mutta tässä tutkimuksessa lapajakson pituutta seurattiin akustisesti autokorrelaation avulla seuraavasti. Äänisignaalista valittiin $T = 10$ s mittainen jakso, jota siirrettiin eteenpäin ajan dt verran, jossa $1.5 \text{ s} < dt < 2.3 \text{ s}$ on se siirros, dt , joka maksimoi autokorrelaatiofunktion.

$$(1) \quad R(n) = \sum_{k=a}^b x(n)x(n+k),$$

missä $k = dt F_s$, $a = 1.5 s \cdot F_s$ ja $b = 2.3 s \cdot F_s$ ovat aikasiirroksia, dt , $1.5 s$ ja $2.3 s$, vastaavia näytemääriä. Tulos hyväksytään vain siinä tapauksessa, että siirretty signaali korreloi riittävän vahvasti optimaalisessa siirroskohdassa. Sopivuutta mitataan laskemalla signaalien RMS-ero, eli neliöllinen keskivirhe, jonka tulee olla pienempi kuin raja-arvo, esimerkiksi $0,1 Pa$. Muuten todetaan, että signaalit eivät vastaa riittävästi toisiaan, eikä niiden pohjalta voida laskea lapataajuutta riittävän suurella varmuudella. Aaltomuodon laskennan toimintaperiaate on esitetty kuvassa (13). Ennen laskentaa signaalin näytteistystaajuutta alennettiin 256 kertaisesti 100 hertsiin desimoimalla, ja sen jälkeen signaali alipäästösuodatettiin poistamalla siitä yli 10 Hz taajuudet.



Kuva 13. Lapataajuuteen synkronoidun aaltomuodon laskennan toimintaperiaate.

Laskenta toistetaan halutuvin aikavälein, esim. $1 s$, jolloin saadaan riittävällä tarkkuudella seurattua lapataajuuden muutoksia. Tämän jälkeen äänisignaali uudelleennäytteistetään niin, että lapataajuus on signaalissa koko ajan vakio, ja sen jälkeen voidaan jaksollisesti toistuva osuus äänisignaalista tuoda esiin keskiarvottamalla. Menetelmän toiminnan varmistamiseksi akustisesti laskettua lapataajuutta verrattiin turbiinista mitattuihin pyörimisnopeuden 10 minuutin keskiarvoihin, ja niiden todettiin olevan samaa luokkaa. Toisinaan havaittiin arvioidussa pyörimisnopeudessa askelmaisia hyppäyksiä, jotka johtuivat mahdollisesti siitä, että algoritmi synkronoituu aina siihen turbiiniin, josta signaali välittyy parhaiten, ja synkronoinnin kohde on siten saattanut äkillisesti vaihtua tuuliolosuhteiden muuttuessa.

Koska menetelmän avulla voidaan synkronoitua turbiinin pyörimiseen, sen avulla voidaan myös selvittää kuuluvan äänen tason jaksollisen vaihtelun, eli merkityksellisen sykinnän aaltomuoto ja vaihe. Tämä tehtiin sekä Kirkkopuistikon että Santavuoren tuulivoima-alueilla.

3.3 Tuulivoiman äänen laatumittarit

3.3.1 Yleistä

Tuulivoiman ääntä arvioitiin äänen laadun mittareilla, jotka pyrkivät mittaamaan ja kvantisoimaan tuulivoiman äänen erityispiirteitä. Valitut erityispiirteet olivat sykintä (amplitudimodulaatio, AM), tonaalisuus eli ääneksisyys ja impulssimaisuus. Näiden erityispiirteiden laskentamenetelmien periaatteet ja liittyvät standardit sekä menetelmät on esitetty TUMEVA-hankkeen loppuraportissa, (Nykänen et al. 2014). Valituista menetelmistä tehtiin analyysiohjelmistot, joilla laskettiin vastaavat tunnusluvut. Lisäksi amplitudimodulaation laskentamenetelmiä päivitettiin IOA AM Working Groupin menetelmiä vastaaviksi ja osittain jopa paremmiksi. (IOA Amplitude Modulation Working Group, 2015a).

Lasketut tunnusluvut olivat amplitudimodulaation syvyys, kuuluvuus (liittyy tonaliteettiin) ja

prominenssi (liittyy impulsiivisuuteen). Myös lapataajuus ja A-painotettu vastaava äänenpainetaso (L_{Aeq}) lasketaan. Laskentaväli on 10 s. Tätä laskentaväliä käytetään amplitudimodulaatiolaskelmissa ja osatiedoston pituutena ääneslaskelmissa. Impulsiivisuuden laskemisessa ei ole määritelmiä lyhyille aikaväleille tai osatiedostonpituuksille, mutta samaa 10 s pituutta on käytetty ja se on tuottanut vertailukelpoisia tuloksia. Ääneksisyyden laskennassa osatiedostojen kuuluvuudelle tulee varsin suuria arvoja, mutta lopulliset arvot ovat huomattavasti pienempiä osatiedostojen keskiarvotuksen takia.

3.3.2 Amplitudimodulaatio

Amplitudimodulaatiolaskelmat perustuvat Yhdistyneen kuningaskunnan akustiikan instituutin esittelemiin menetelmiin (Bass et al. 2015). Se sisältää kolme menetelmää: aikasarjamenetelmä, Fourier-analyysimenetelmä ja hybridi rekonstruktio menetelmä. Kaikki menetelmät käyttävät 100 ms A-painotettua ekvivalenttia äänenpainetasoa L_{Aeq} , 100 ms syöttötietona. Mittarit lasketaan 10 sekunnin välein ja lopullinen tulos on välin arvojen 90 prosentin prosenttiosuus koko mittausaikana (10 min) . Menetelmissä 2 ja 3 taajuusalue on 100 Hz - 400 Hz.

Menetelmässä 1 vähennetään A-painotettu äänitaso $L_{p,A}$ aikapainotuksella S (slow) 100 ms:n datasta ja tulosten 95%: n ja 5%: n prosenttiosuuksien (persentiili) ($\Delta L_{A,95}$ ja $\Delta L_{A,5}$) erosta 10 s:n aikavälit antavat aikavälin amplitudimodulaatiosyvyyden (D_{AM}).

$$(2) \quad D_{AM} = \Delta L_{A,95} - \Delta L_{A,5},$$

missä,

$$(3) \quad \Delta L_A(t) = L_{Aeq,100ms}(t) - L_{pA,S}(t).$$

Menetelmissä 2 ja 3 A-painotettu aikaisignaali suodatetaan aluksi kaistanpäästösuotimella 100 - 400 Hz. Myös kaistaa 200 - 800 Hz voi käyttää, jolloin valinta tulee perustella.

Menetelmässä 2 tehospektrin tiheys lasketaan käyttäen suorakaideikkunaa. Spektriresoluutio on 5/128 Hz ja suurin taajuus on 5 Hz 10 s verhoikäyräsignaalille, joka on laskettu 100 ms ekvivalenttitasosta. Vakiokomponentti on poistettu 5. asteen polynomisella sovituksella 10 s dataan.

Spektri on integroitu taajuustasossa käyttäen liukuvaa neljän spektriviivan summaa. Modulaatiospektrin maksimin amplitudi ja taajuus antavat siten modulaatiosyvyyden ja lapataajuuden 10 s intervalleissa. Jos lapataajuus tai sen vaihtelurajat tunnetaan etukäteen, niitä voidaan hyödyntää laskennassa.

Menetelmässä 3 lapataajuus määritetään kuten menetelmässä 2. Signaalin amplitudit lapataajuudella ja sen toinen ja kolmas harmoninen saadaan suodattamalla 10 s verhoikäyräsignaali 1/3-oktaavin kolmannen kertaluvun nollavaiheisilla Butterworth-kaistanpäästösuodattimilla,

joiden keskitaajuudet ovat lapataajuudella ja sen harmonisilla.

Ennen suodatusta 10 s dataa sisällytetään kyseisen 10 s lohkon kummallekin puolelle suodattimen reunailmiöiden poistamiseksi ja suodatuksen jälkeen 10 s:n analyysilohko leikataan 30 s:n lohkon keskeltä. Sitten kolme näin suodatettua signaalia summataan ja amplitudimodulaation arvo lasketaan 10 s välein summasignaalin maksimi- ja minimiarvojen keskiarvojen erotuksena. Kolme ehtoa käytetään määrittelemään, pitääkö harmoniset sisällyttää rekonstruoituihin aikasarjoihin.

3.3.3 Äänekset

Ääneslaskelmat perustuvat standardiin IEC 61400-11 (Comission 2006) (International Electrotechnical Commission (IEC), 2012). Tässä menetelmässä A-painotettu äänisignaali jaetaan alilohkoihin, joiden pituus on 10 s, ja energiakeskiarvospektrit, joiden taajuusresoluutio on 1 - 2 Hz (tässä tutkimuksessa käytetty 1 Hz), lasketaan näille alilohkoille. Lohkojen vähimmäismäärä on 10 ja erikoistapauksissa 30. Jokaiselle spektrille määritellään paikallisten maksimien taajuudet ja niiden ympärillä olevat kriittiset kaistanleveydet. Paikallinen maksimi luokitellaan äänekseksi, jos sen energia on riittävän suuri suhteessa peittoenergiaan, jonka kriittinen kaistanleveys on suurin. Äänimerkkien luokittelu ja peittomelu perustuvat spektrin 70 prosentin persenttiin mahdollisen ääneksen kriittisessä kaistanleveydessä. Kriittisen kaistanleveyden sisällä olevat äänekset luokitellaan yhdeksi äänekseksi äänen summaamisella ja sen taajuus määritellään korkeimman tason ääneksen taajuudeksi. Ääneksen ääneksisyysarvo (tonaalisuus) on määritelty äänestason, L_{pt} , ja peittomelun, L_{pn} , tason välisellä erolla ja äänen kuuluvuus, ΔL_a , on äänekorjattu taajuusriippuvaisen kuuluvuus-kriteerin avulla, joka perustuu kuuntelukokeisiin. ΔL_a määritellään siis seuraavasti:

$$(4) \quad \Delta L_a = L_{pt} - L_{pn} - L_a,$$

jossa

$$(5) \quad L_a = -2 - \log_{10} \left[1 + \left(\frac{f}{502} \right)^{2.5} \right]$$

Kaikki spektrit lajitellaan tuulennopeusluokkiin. Tietyn tuulennopeusluokan yleinen ääneksen kuuluvuus voidaan määrittää vain, jos vähintään 6 tietyn tuulennopeusluokan spektristä on sama määritelty äänes. Eri spektreissä tunnistettuja ääneksiä pidetään samoina, jos ne ovat $\pm 25\%$:n etäisyydellä taajuuden kriittisestä kaistasta. Samaa alkuperää olevat äänet käsitellään yhtenä ääneksenä. Äänes on kuuluva, jos sen kuuluvuus on yli 0 - 3 dB tasoiset ja sitä korkeammat äänekset raportoidaan yleensä myös aina, lukuun ottamatta tiettyjä erikoistapauksia.

3.3.4 Impulsiivisuus

Impulsiivisuuden (iskumaisuuden) laskelmat perustuvat Nordtest Method NT ACOU 112 –menetelmään (Nordtest 2002). Tässä menetelmässä käytetään A-painotettua äänitasoa aikavakiolla F (fast) $L_{pA,F}$. Näytteenottoaika on yleensä 10 min ja 25 ms välillä (tässä tutkimuksessa käytetty 10 ms). Ensin impulssin alkukohtat määritellään osaksi L_{pA} :n, F:n aika-historian positiivista kaltevuutta, jossa gradientti ylittää 10 dB / s. Impulssin tasoero (LD) on L_{pA} :n, F:n ero loppupisteen ja aloituspisteen välillä. Impulssin jyrkkyys (OR) on suoran linjan dB / s kaltevuus, joka antaa parhaan sovituksen lähtöpisteen ja loppupisteen välillä. Impulsiivisuuden häiritsevyyttä kuvaava ennustearvo (P) lasketaan jokaiselle alkulähtöiselle sen tasoeron ja impulssin jyrkkyyden perusteella

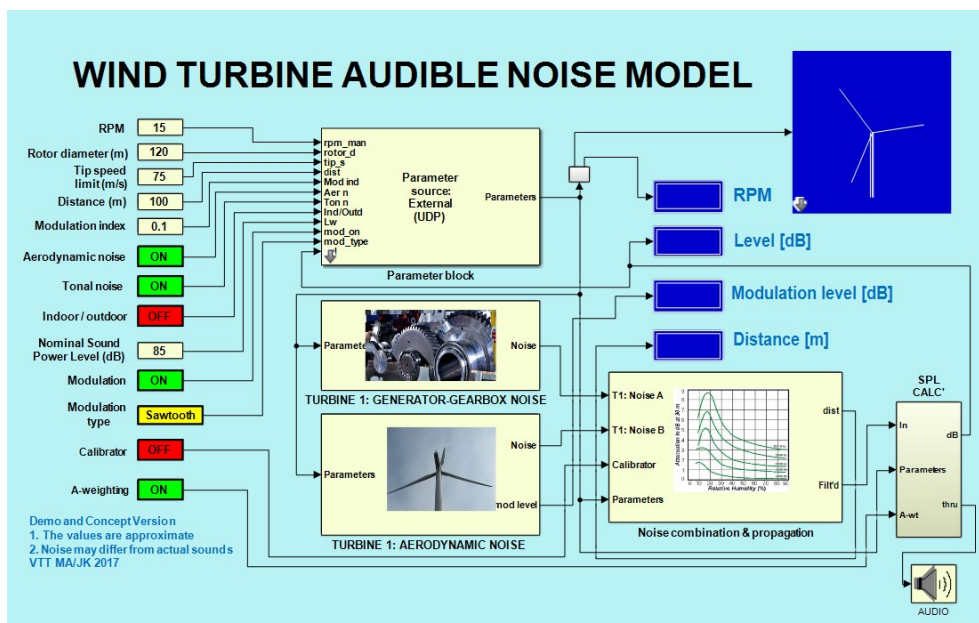
$$(6) \quad P = 3 \cdot \log_{10}(OR) + 2 \cdot \log_{10}(LD)$$

Impulsiivisuus on merkittävä, jos ennustearvo on yli 5. Kokonaismittausaika on 30 minuuttia.

Kaikkien näiden menetelmien laskenta toteutettiin Matlab-ohjelmina. Ohjelmia kehitettiin hankkeen ajan, ja ne sovitettiin toimimaan hankkeen loppupuolella myös laskentaklusterissa ajoa varten.

3.3.5 Tuulivoimalan kuunneltava malli

Edellisissä hankkeissa alkuun saatettua tuulivoiman kuunneltavaa mallia, (Antila & Kataja 2013), kehitettiin edelleen tässä hankkeessa saatujen tulosten pohjalta. Kehityskohteenä oli erityisesti mallin saaminen vastaamaan todellista tilannetta tehtyjen mittausten analyysien pohjalta.



Kuva 14. Tuulivoimamelun kuunneltava malli.

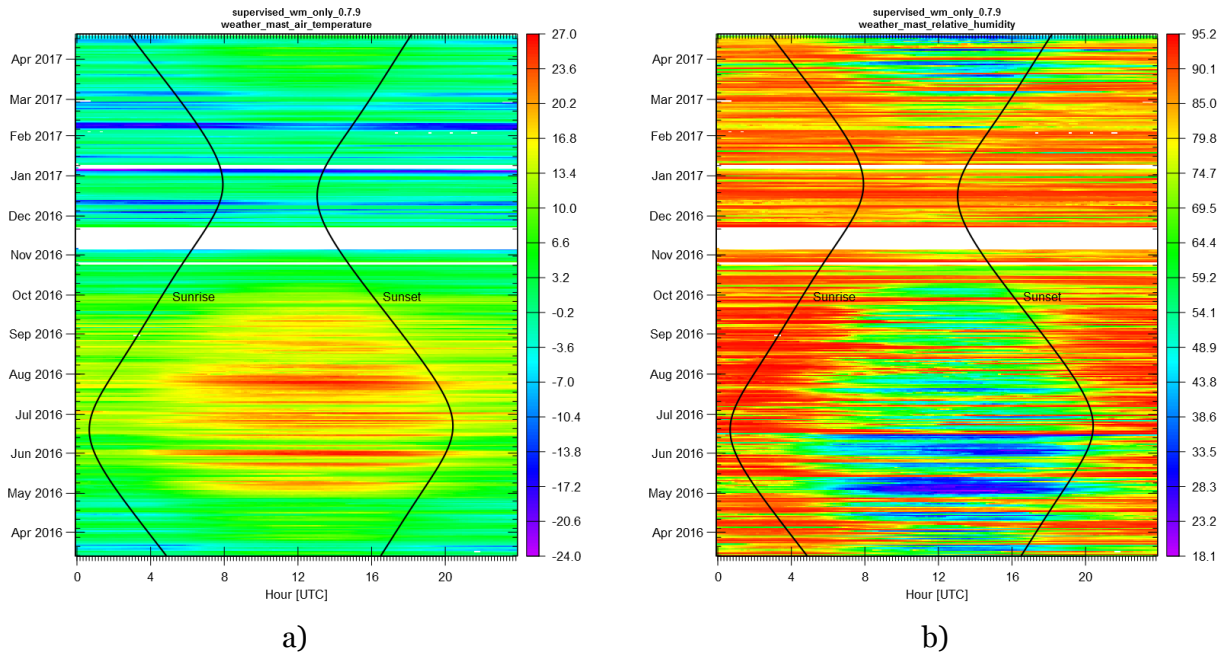
Kuvassa (14) on esitetty nykyinen versio kuunneltavasta mallista. Se koostuu lähdeosasta, etene-

mismallista sekä analyysiosasta. Lähdeosa on erotettu vaihteistomeluun sekä aerodynaamiseen meluun, ja näitä voidaan tarvittaessa evaluoida toisistaan riippumatta. Lisäksi mallissa on parametrilohko, jonka avulla ajasta riippuvat parametrit (kuten mm. tuulen nopeus) voidaan tuoda malliin ulkopuolisesta lähteestä tai sitten antaa suoraan mallissa.

4 TULOKSET

4.1 Sääolosuhteiden mittaukset

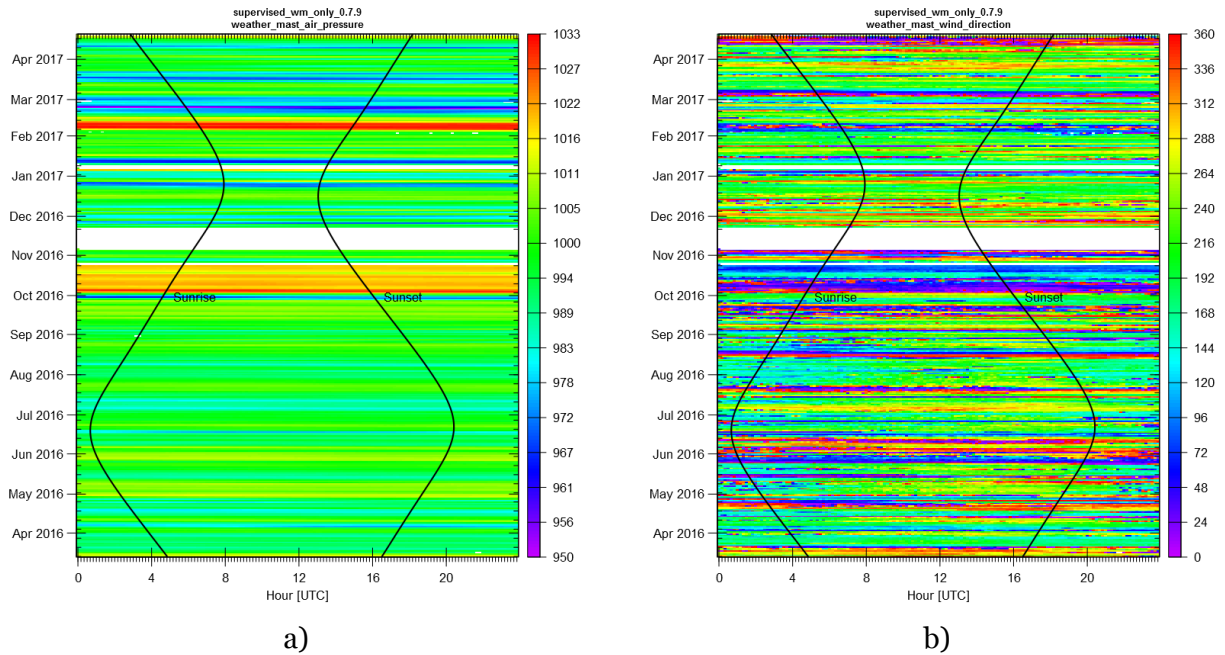
4.1.1 Säämastomittaukset



Kuva 15. Ilman lämpötila a) ja suhteellinen ilman kosteus b) 10 metrin korkeudella, mittauspisteessä A4.

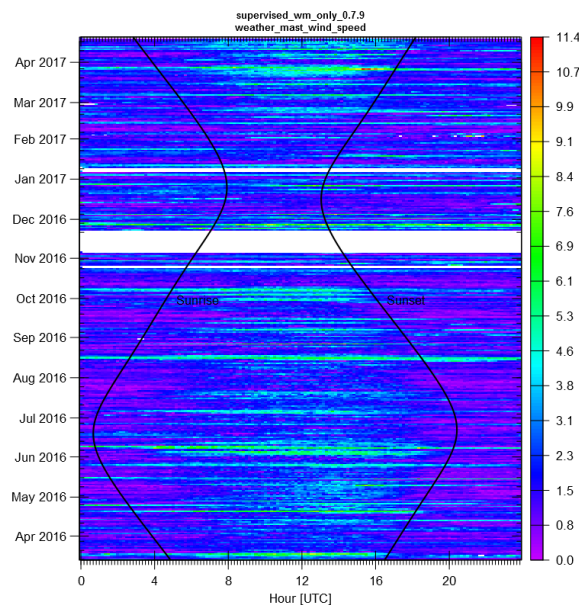
Vuosittainen ja vuorokausittainen sääolosuhteiden vaihtelu visualisoitiin graafisesti Kuvan (15) mukaisesti. Tässä kuvaajassa vuorokaudenaika (tunnit) on kuvattuna x-akselille ja vuodenaika y-akselille. Kuvan mukaan lämpötila on vaihdellut -24°C ja $+27^{\circ}\text{C}$ asteen välillä tutkimuksen aikana. Kaarevat mustat viivat osoittavat Auringon nousun ja laskun aikoja. Aurinko on horisontin yläpuolella mustien viivojen välissä, ja muulloin horisontin alapuolella. Viivojen väli on pisimmillään kesäpäivän seisauksen aikana ja lyhimmillään vastaavasti talvipäivän seisauksena. Viivojen sijainti on erilainen eri leveyspiireillä, tässä ne on sovitettu vastaamaan Auringon nousu- ja laskuaikoja Kirkkokallion tuulipuiston keskipisteessä.

Kuvissa (15) a) ja b) havaitaan selkeä vuorokausittainen vaihtelu kesäaikaan sekä lämpötilassa, että ilmankosteudessa, kun taas talvisaikaan vuorokausittainen vaihtelu on molempien suureiden osalta vähäistä. Kuvaajassa olevat valkoiset alueet merkitsevät puuttuvaa mittausdataa, esimerkiksi laitevian vuoksi.



Kuva 16. Ilmanpaine a) ja tuulen suunta b) 10 metrin korkeudella, mittauspisteessä A4.

Kuvissa (16) a) ja b) on esitetty ilmanpaine ja tuulen suunta 10 m korkeudella. Sekä ilmanpaineen että tuulen suunnan riippuvuus vuorokauden ajasta on selvästi heikkoa. Ilmanpaineeseen ja tuulen suuntaan vaikuttaa eniten alueen yli kulkevat säärintamat, jotka taas liittyvät korkea- ja matalapaineen alueisiin.

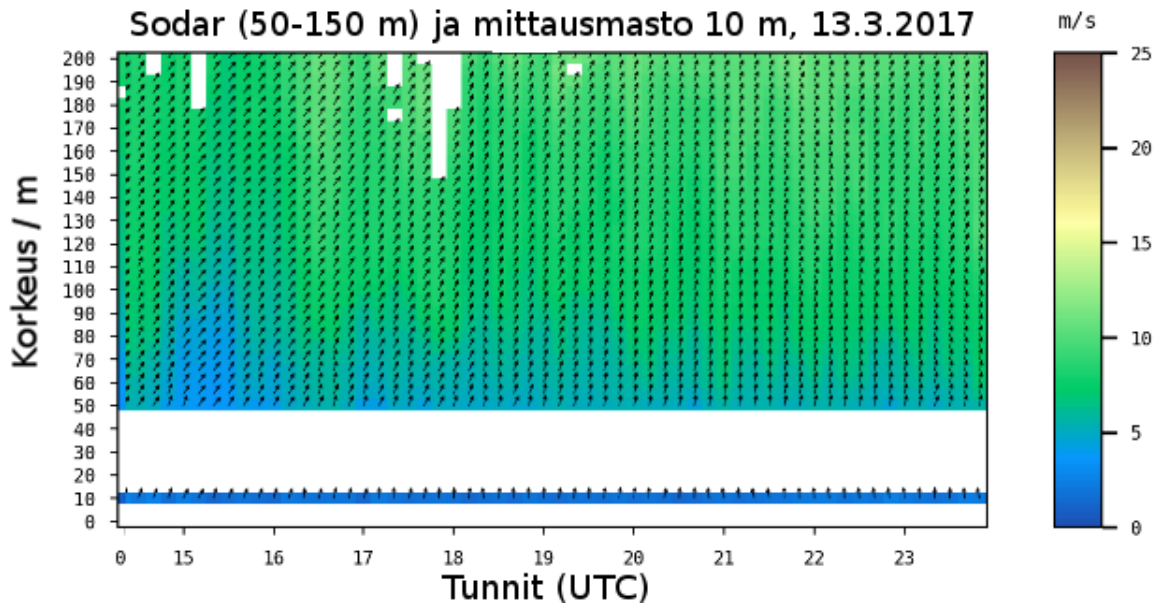


Kuva 17. Tuulen nopeus 10 metrin korkeudella, mittauspisteessä A4.

Kuvassa (17) esitetyllä tuulen nopeudella 10 m korkeudessa, on jonkin verran vuorokaudenajasta riippuvaa vaihtelua kesäaikaan, mutta ei helposti havaittavaa vuorokaudenaikariippuvuutta talvella. Kuvaajasta nähdään, että suurin osa hyvin hiljaisista tuulen nopeuksista 10 m korkeudella esiintyy yöaikaan kun taas kovat tuulen nopeudet esiintyvät yleisemmin päiväsaikaan.

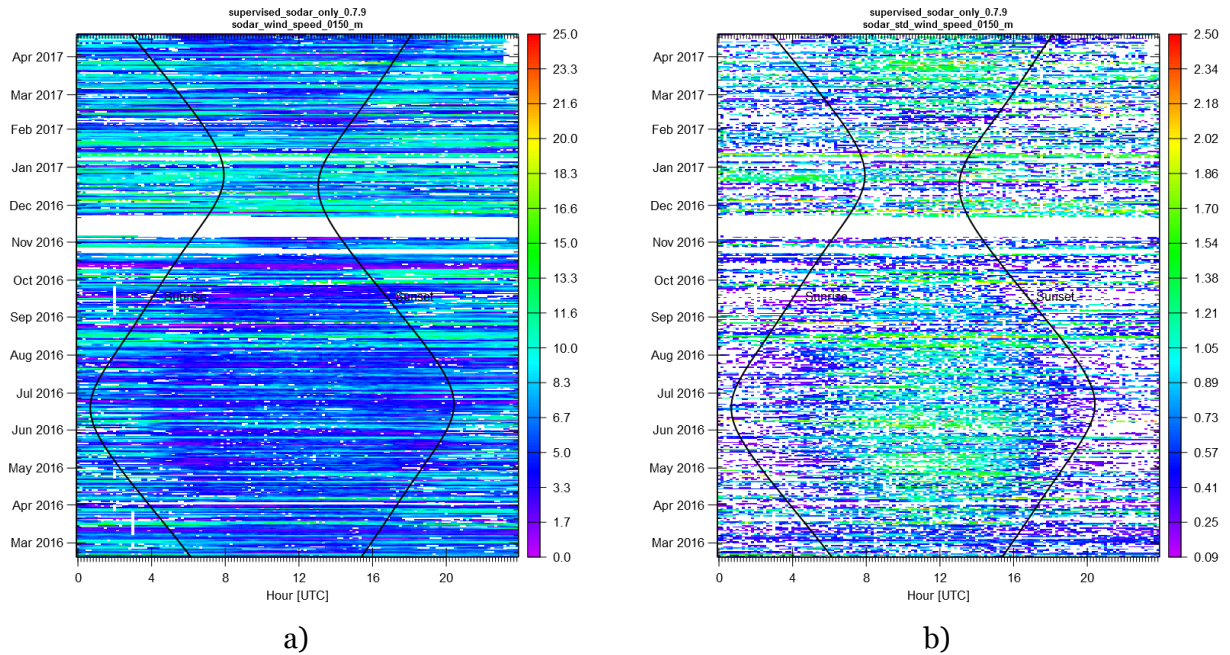
Nämä tulokset osoittavat kuinka auringon tuottama lämpö vaikuttaa paikallisiin sääolosuhteisiin. Kesäisin aurinko tuottaa riittävästi energiaa maanpinnan lämmittämiseen, jolloin myös ilma maan pinnan lähellä lämpenee. Tästä aiheutuu kesäaikaan alailmakehän lämpeneminen päiväsaikaan, ja vastaavasti öisin energian vähenemisestä johtuva jäähtyminen. Tämä auringon säteilypakote vaikuttaa moniin alailmakehän ilmiöihin. Talvisin tämä säteilypakote puuttuu, tai on hyvin heikko pohjoisilla leveysasteilla, joka näkyy myös näissä mittaustuloksissa, tuulen nopeuden ja lämpötilan vuorokausittaisen vaihtelun puuttumisena talvisaikaan.

4.1.2 Tuuliprofiilimittaukset



Kuva 18. Tuulen nopeus ja suunta korkeuden ja ajan suhteen noin yhdeksän tunnin aikana. Tuulen nopeus on kuvattu väreillä ja suunta nuolilla. X-akselilla on aika tunteina ja y-akselilla on mittauskorkeus metreinä. Valkoiset alueet kuvaavat puuttuvaa dataa heikon kaiun vuoksi. Niitä esiintyy yleisesti yli 100 m korkeudessa.

Kuvassa (18) on esitettyä tuuliprofiilit ja niiden muutos ajan suhteen yhden vuorokauden aikana. Tuuliprofiili mitattiin koko mittausjakson ajan Kirkkokallion tuulivoima-alueella. Muilta alueilta ei valitettavasti ole yhtä tarkkaa tuulitietoa saatavissa. Tuuliprofiilista selviää tuulen nopeuden lisäksi myös tuuliväanne, tuulen turbulentsisuus ja tuulen suunnan vaihtelu korkeuden mukaan (wind veer). Näillä on vaikutusta sekä äänen muodostumiseen, että äänen etenemiseen.



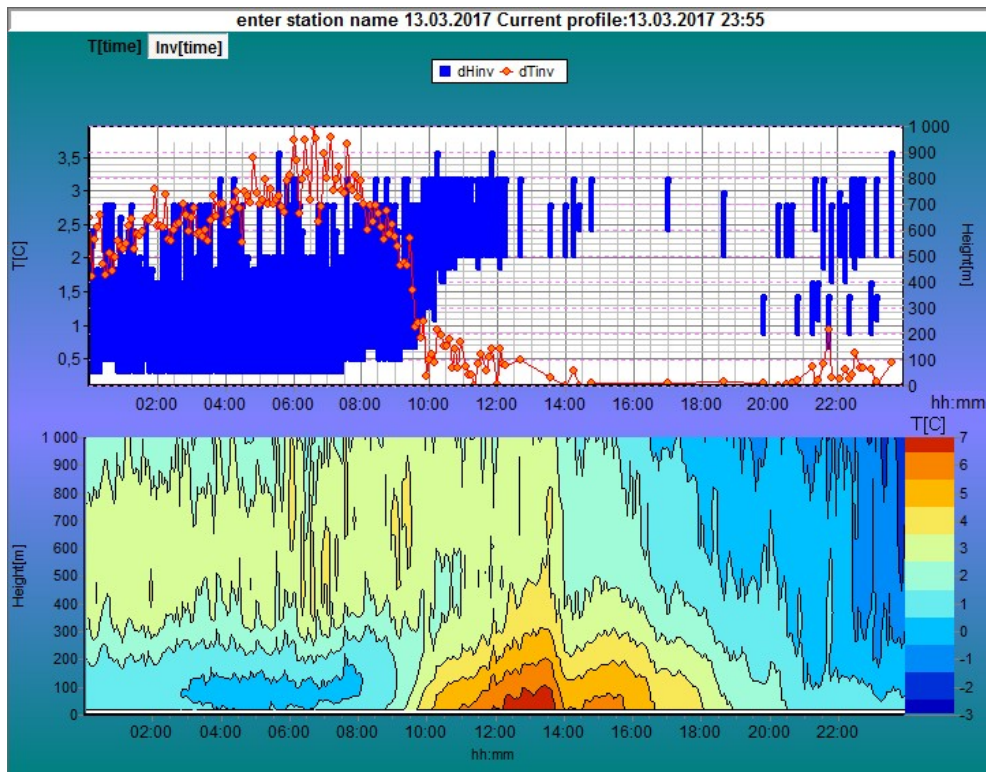
Kuva 19. Tuulen nopeus a) ja tuulen nopeuden vaihtelevuus (keskihajonta) b) 150 metrin korkeudella, mittauspisteessä A4.

Kuvassa (19) a) esitetty, 150 m korkeudessa vallitseva tuulennopeus vaihtelee kesäisin vuorokausittain samalla tavalla kuin alailmakehän tuulikin (vrt. Kuva 17), paitsi että korkeammalla kovimmat tuulennopeudet esiintyvät useammin öisin, ja päivisin tuulen nopeus on yötä vähäisempi. Talvisaikaan tuulen nopeudet ovat keskimäärin suurempia, eikä vuorokaudenajasta riippuvaa vaihtelua havaita myöskään 150 m korkeudella.

Tuulen nopeuksien vaihtelevuus, Kuvassa (19) b) on suurinta kesällä päiväsaikaan. Tälläkin kertaa vuorokaudenajasta riippuva vaihtelevuus puuttuu talvisaikaan.

4.2 Lämpötilaprofiilimittaukset

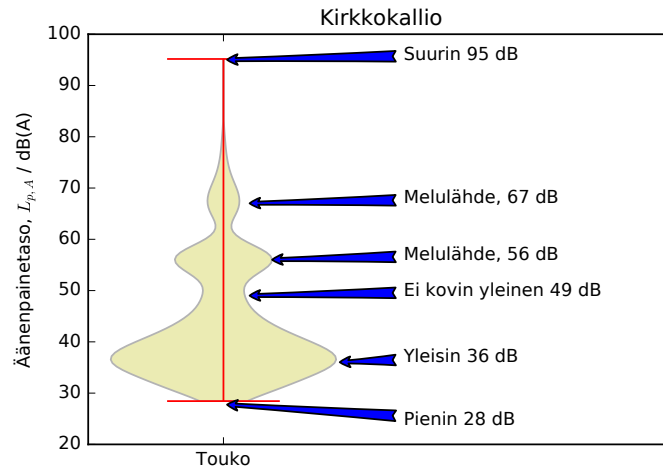
Kuvassa (20) on esimerkki lämpötilaprofiilimittauksen tuottamasta tiedosta. Normaalisti ilma on lämpimintä maanpinnan tuntumassa ja viilenee ylöspäin siirryttäessä. Päinvastaista tilannetta, jossa ilma onkin alhaalla kylmempää kuin ylempänä, kutsutaan inversiotilanteeksi. Mikroalatoradiometrin mittausdatan pohjalta piirretystä kuvaajasta nähdään kuinka koko yön jatkunut inversiotilanne on purkautunut maan pinnasta lähtien, kun maa on alkanut lämmitä auringonnousun jälkeen, klo 9 lähtien. Kello 14 aikaan ylempät ilmakerrokset ovat alkaneet jäähtyä, ja siksi seuraavana yönä inversiotilannetta ei näyttäisikään muodostuvan.



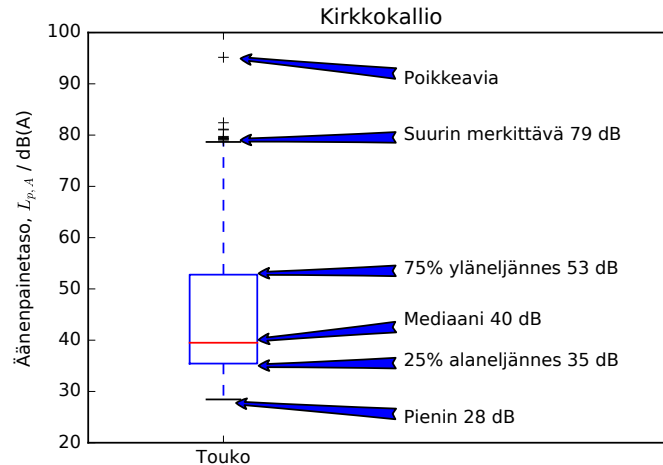
Kuva 20. Mikroaaltoradiometrin tuottama lämpötilaprofiili yhden vuorokauden aikana. X-akselilla on kellonaika, y-akselilla korkeus. Ylemmässä kuvassa on kuvattu inversion voimakkuus punaisella käyrällä ja sen sijainti sinisenä alueena. Alemmassa kuvassa on vastaavasti esitetty ilman lämpötila eri korkeuksilla. Kuvassa esitettynä vuorokautena on siis ollut yöllä parin asteen inversio-tilanne noin 50-600 m korkeudessa. Auringon nousun jälkeen inversio on vähitellen pienentynyt ja siirtynyt ylemmäs.

4.3 Äänitasot

Mittauspaikkojen äänitasojen kausi- ja vuorokaudenaikavaihtelua havainnollistettiin tulostamalla mediaaniarvo ja jakauma kuukausittain ja tunneittain kolmella eri tuulivoima-alueella: Kirkkokallion, Torkkolan ja Santavuoren mittausten perusteella. Kuukausittaisissa tasoissa havaittiin eroja sekä keskiarvoissa, että jakaumassa. Siksi kuukausitasot tulostettiin viulukaaviona, kuva (23), jonka tulkintaohjeet ovat kuvassa (21). Huhti–kesäkuussa taustamelukorjaamaton melutaso on 3 – 4 dBA korkeampi kuin muina kuukausina. Kuuntelutestien mukaan syynä on todennäköisemmin muuttolintujen laulu-aika ja mittauspaikan vieressä olevalla pellolla tehdyt toukutyöt. Lisäksi helmi- ja maaliskuu olivat noin 2 dBA hiljaisempia ja syyskuu 1.5 dBA hiljaisempi kuin melutasot keskimäärin. Erot olivat tilastollisesti merkittäviä. Kuvassa (21) oleva toukokuun viulukaaviosta voi erottaa kolme erillistä melutasoaluetta, jotka ovat toistuneet mittauksessa tavallista useammin: 36, 56 ja 67 dBA:n ympärillä olevat melutasot. Mahdollinen tulkinta tälle jakaumalle on se, että normaali melutaso alueella, mukaan lukien taustamelu ja tuulivoimalan melu aiheuttaa useimmiten havaitut 36 dBA mittaus tulokset. 56 dBA:n alue voi olla lintujen laulusta aiheutuvaa ja 67 dBA johtuu todennäköisesti lähellä käytettävistä maatalouskoneista. Melutasojen jakautumista melulähteittäin on käsitelty tarkemmin kappaleessa (4.4).



Kuva 21. Esimerkki Kirkkokallion toukokuun aikaisen melun kuvaamisesta ns. viulukaaavion avulla. Kaavio näyttää äänenpainetasojen vaihteluvälin (kaikki arvot ovat välillä 28 dBA - 95 dBA), sekä sillä välillä havaittujen arvojen yleisyyden. Mitä leveämpi kuvaaja on, sitä useammin vastaava äänenpainetaso havaittiin. Useimmiten äänenpainetaso oli 36 dBA:n ympärillä, noin 30 – 40 dBA:n välillä. Noin 56 dBA:n arvoja mitattiin myös suhteellisen usein. Koska 56 ja 36 dBA:n välillä on kapea kohta, näyttäisi siltä, että kyseessä on kaksi eri äänilähdettä. Kolmas paljon harvinaisempi äänilähde on 67 dBA:n kohdalla. Yli 80 dBA:n yläpuolella olevia arvoja mitattiin ani harvoin. Puolet havainnoista on 35 - 53 dBA:n välillä ja mediaani äänenpainetaso on 39 dBA.



Kuva 22. Sama Kirkkokallion toukokuun ajan mittausdata ruutu-janakaavion avulla. Ruutu-janakaavio on parhaimmillaan esittäessään tilastollisia suureita: Mediaani, ala- ja yläneljänneksen sekä maksimi- ja minimiarvot. Laatikon määrittämälle alueelle (35 - 53 dBA) mahtuu puolet mittaustuloksista. Pienimmän ja suurimman väliin (28 - 79 dBA) mahtuu muutamaa poikkeavaa lukuunottamatta kaikki mitatut arvot. Yksittäiset poikkeavat arvot on piirretty erikseen plusmerkeillä.

4.3.1 Äänenpainetasojen vaihtelevuus tunneittain

Koko mittausajan aikana kerätyt melutasot tulostettiin myös tunneittain kunkin tuulivoima-alueen osalta, jotta voitiin tarkastella melutasojen vaihtelua vuorokaudenaikojen mukaan. Kul-

lekin tunnille kertyi paljon mittaustuloksia vuoden jokaisen kuukauden ajalta, jonka seurauksena äänenpainetasojen jakaumissa ei ollut suurta eroa eikä viulukaaviosta olisi lisäarvoa. Siksi tunneittainen tilasto tulostettiin ruutu–janakaaviona, joka osoittaa paremmin keskimääräistä melutasoa ja vaihteluväliä kuvaavat tilastolliset suureet. Tunneittainen erittely on kuvassa (24) ja ruutu–janakaavion tulkintaohje on kuvassa (22).

Kirkkokallion mittauspisteessä, A3, hiljaisin hetki on noin keskiyöllä, jolloin melutaso on 2.1 dB keskimääräistä hiljaisempi, kun taas kello 10 - 16 välillä melutaso on 1.6 - 1.9 dBA keskimääräistä voimakkaampi. Honkajoen omakotialueella sijainneessa mittauspisteessä A1, yöllä melutaso oli 4.5 dBA keskimääräistä hiljaisempi ja päivällä 1.6 - 2.1 dBA keskimääräistä voimakkaampi välillä 10 - 18. Erot ovat tilastollisesti merkitseviä. Tuuliturbiinin lähellä, mittauspisteessä A2, melutasojen vaihtelu päivän ja yön välillä oli vähäistä. Yöaikaan melutaso oli noin 1 dBA keskimääräistä korkeampi ja päiväaikaan noin dBA keskimääräistä alhaisempi.

Torkkolan mittauspisteessä keskimääräinen melutaso oli 38.5 dBA ja melutason vaihtelu yön ja päivän välillä oli enimmillään 3.2 dBA. Erot olivat tilastollisesti merkitseviä.

Santavuoren mittauspisteessä yönaikainen melu oli enimmillään jopa 3.5 dBA päiväaikaista melutasoa hiljaisempi ja iltapäivällä melutaso oli vastaavasti 3.2 dBA keskimääräistä korkeampi. Erot olivat tilastollisesti merkitseviä.

Taulukko 2. Päivä ja yöaikaiset taustamelukorjaamattomat äänenpainetasot, jossa d =mikrofonin etäisyys lähimmästä turbiinista, L_p =keskimääräinen äänenpainetaso, L_d =päiväaikainen äänenpainetaso (7 - 22) ja L_n =yöaikainen äänenpainetaso (22 - 7).

Mittauspaikka	d/ m	L_p/ dBA	L_d/ dBA	L_n / dBA	$(L_d - L_n) /dBA$
Kirkkokallio A1	2000	41,8	43,4	39,6	3,7
Kirkkokallio A2	170	43,9	43,6	44,4	-0,8
Kirkkokallio A3	1000	36,6	37,7	35,0	2,7
Torkkola	660	38,5	38,9	37,9	1,0
Santavuori	1000	38,6	39,6	36,2	3,3

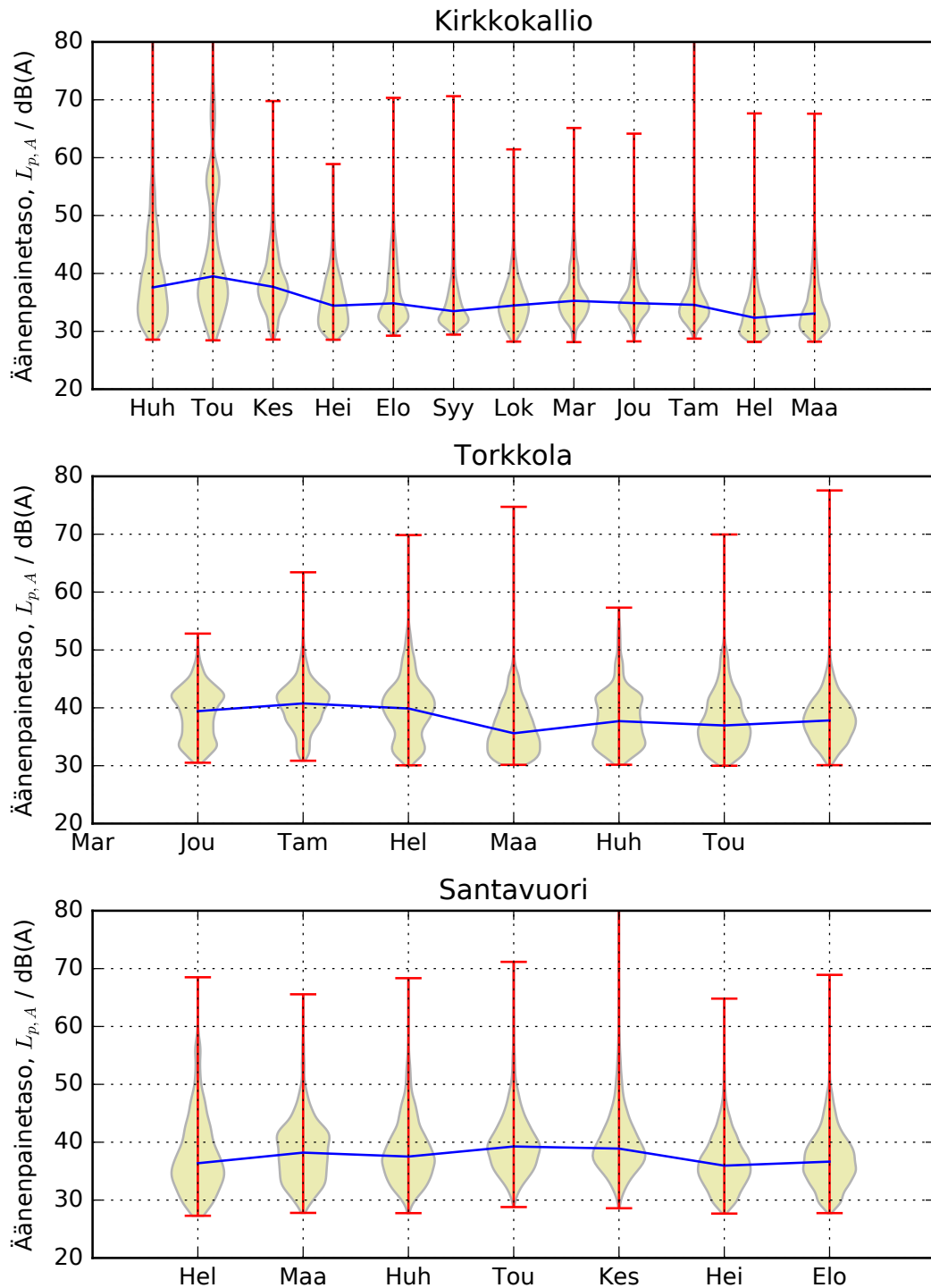


Figure 23. Kuukausittaiset taustamelukorjaamattomat äänenpainetasot Kirkkokallion, Torkkolan ja Santavuoren tuulipuistoista. Mittauspisteen etäisyys lähimpään turbiniin oli noin 1000 m Kirkkokalliossa, 660 m Torkkolassa ja 1000 m Santavuoren tuulivoima-alueen lähistöllä. Kirkkokallion ja Torkkolan mittaukset ovat vuosilta 2016 - 2017 ja Santavuoren vuodelta 2017. Sininen poikkiviiva kuvaa äänenpainetaso mediaaniarvoa.

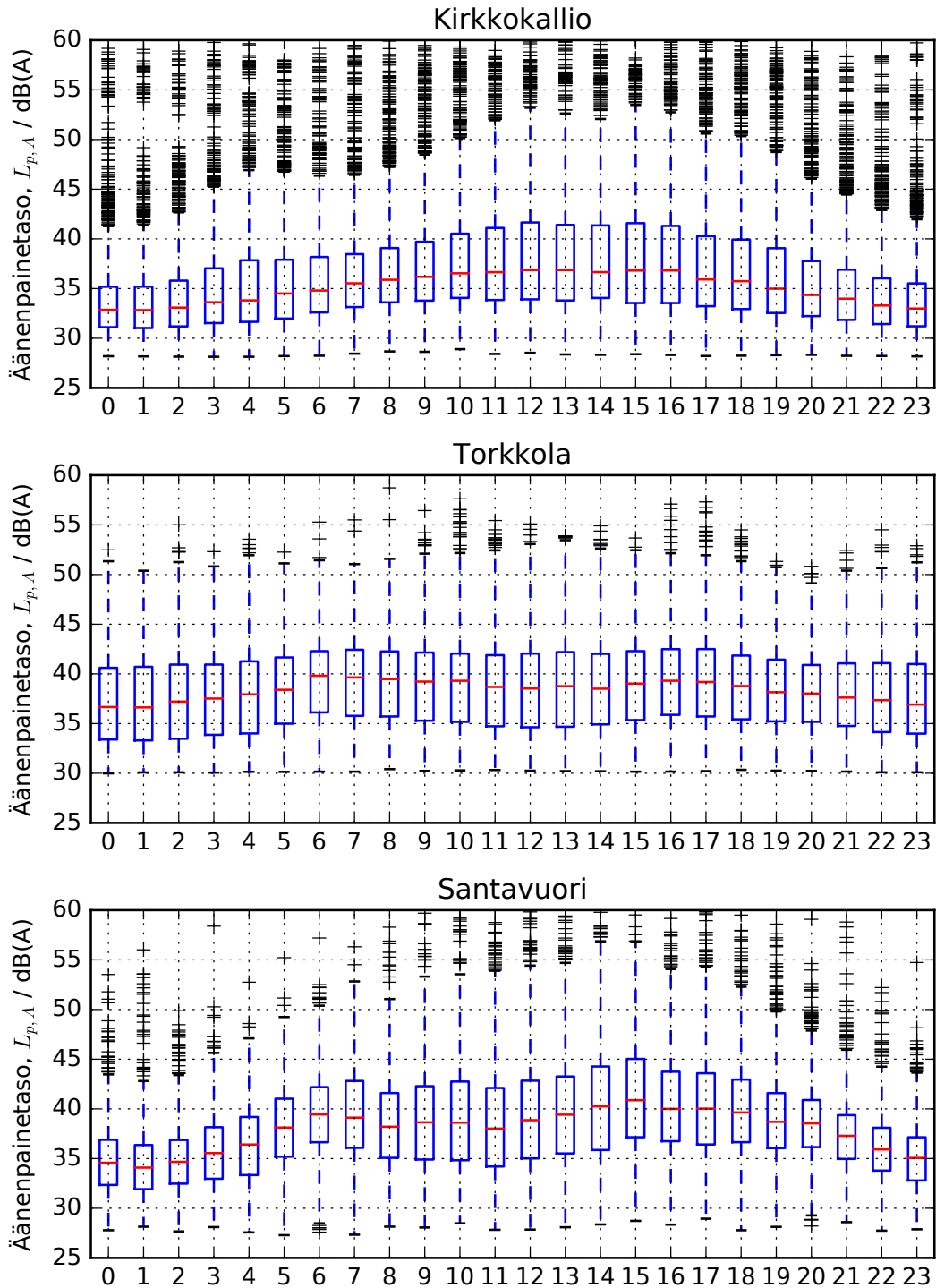


Figure 24. Taustamelukorjaamattomat äänenpainetasot tunneittain a) Kirkkokallion tuulipuiston mittauspisteessä A3, b) Torkkolan mittauspisteessä sekä c) Santavuoren mittauspisteessä. Santavuoren mittauspisteessä päiväaikainen melutaso on huomattavasti yöllistä melutasoa alhaisempi. Tämä viittaa asutusalueelta tulevan melun vaikutukseen, kuten tieliikennemelu.

Äänenpainetason vaihtelu vuodenaikojen ja vuorokausien mukaan samanaikaisesti on visualisoitu kuvassa (30). Kuvasta erottuu hyvin lintujen laulu huhti-heinäkuun aamuisin. Laulu vähenee päivän kuluessa iltaa kohti. Muutenkin melutaso näyttää olevan korkeampi päiväsaikaan, ja

kuvaaja onkin lähes päinvastainen tuulennopeutta esittävään kuvaajaan (19 a) nähden. Havaittu auringon vaihetta seuraava melun vaihtelu ei näyttäisikään olevan peräisin tuulivoimalasta, vaan esimerkiksi lintujen laulusta. Toisaalta kuvassa (19 b) esitetty tuulen turbulenttisuus ja kuvassa (17) esitetty tuulen nopeus lähellä maan pintaa, ovat pääpiirteittäin samanlaisia kuin melutasokin. Melutason vaihteluun vaikuttaa mahdollisesti myös tuulen tuottama suhina. Äänenpainetaso kuvaajassa näkyvät poikkiraidat voivat selittyä vuorokaudenvaihteluista riippumattomiin säärintamiin, jotka vaikuttavat tuuleen ja tuovat sadetta. Toukokuun alkupuolella oleva puna-valkoinen raita johtuu mittalaitteen viasta.

Kuvassa (26) on vastaava kuvaaja Santavuoren äänenpainetasoista, jotka eivät noudatakaan yhtä selkeästi auringon nousuaikaa kuin Kirkkokalliossa. Tämä selittyy sillä, että mittauspaijalta on noin kilometrin matka kolmostielle, joten sieltä, ja myös lähistön muilta teiltä kantautuu liikennemelua päivisin. Kuvassa äänen voimakkuus alkaa kasvaa kello 2 - 3 normaaliaikaa (UTC) talvisin, eli välillä 4 - 5 paikallista aikaa. Kesällä äänen alkamisaika on siirtynyt vielä yhtä tuntia aikaisemmaksi normaaliajassa, koska kellot on siirretty kesäaikaan. Vastaavasti liikennemelua vaimenee kello 17 - 18 normaaliaikaan iltapäivällä, eli kello 19 - 20 paikallista aikaa talvella, ja vielä tuntia myöhempään kesällä. Tässäkin kuvassa näkyy ”poikkiraitoja”, eli päiviä jolloin äänenpainetaso on ollut tavallista korkeampi yötä päivää. Nämä voivat olla säärintamia, jotka ovat vaikuttaneet tuulen ja sateen ääneen, tai tuuliturbiinin äänentuottoon tai sen etenemiseen.

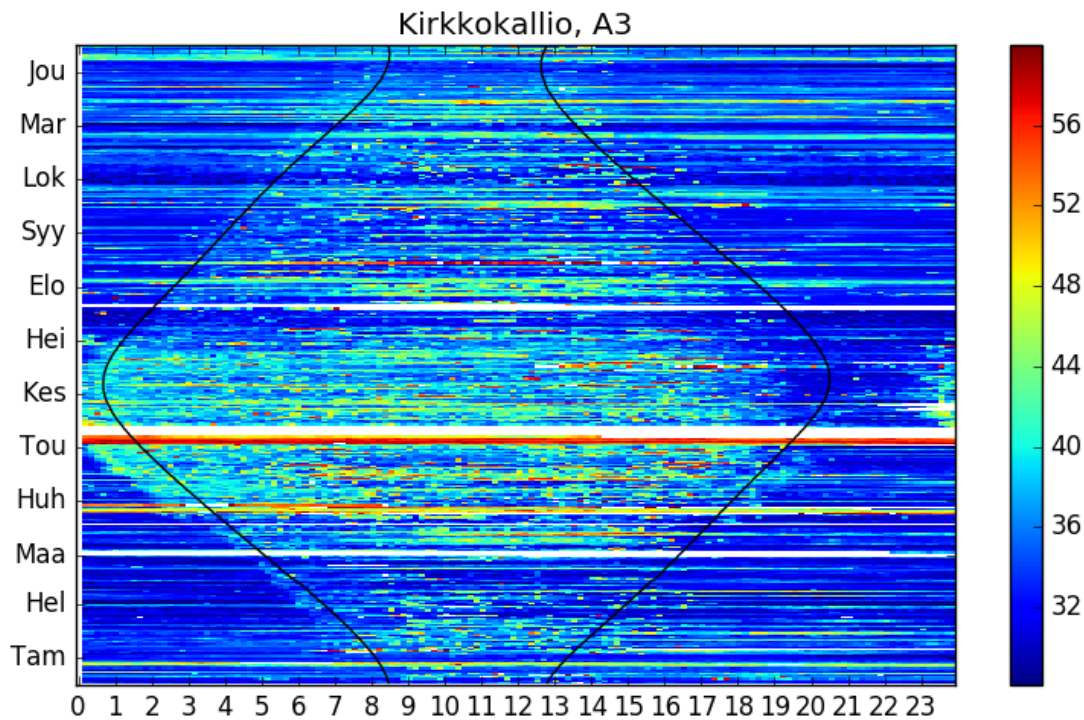


Figure 25. Melutason vaihtelut Kirkkokallion tuulivoima-alueen mittauspisteessä A3. X-akselin kellonajat on normaaliaikaa, joka on kesällä kolme ja talvella kaksi tuntia Suomen aikaa jäljessä. Mustilla viivoilla on kuvattu Auringon nousu- ja laskuajat, myös normaaliaikaan. Kuvaajan perusteella melutasot alueella ovat selvästi voimakkaampia päiväsaikaan.

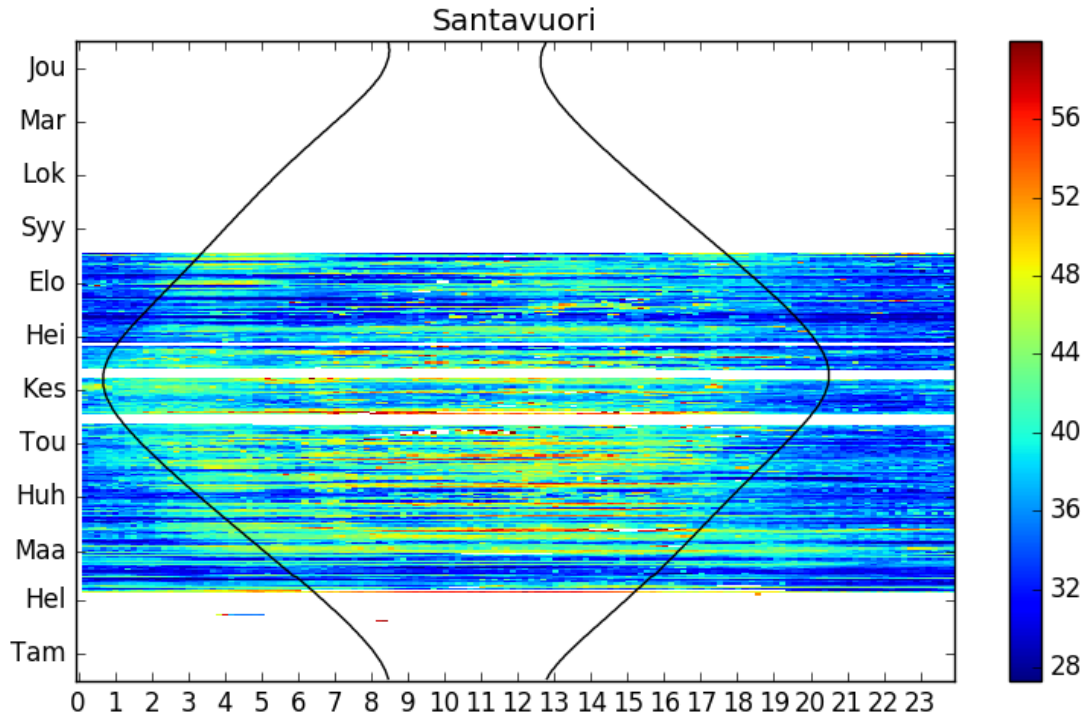


Figure 26. Äänenpainetasot Santavuoren lähistöltä, jossa äänen voimakkuus ei näytä olevan kovin vahvasti riippuvainen auringon sijainnista, vaan paremminkin kellonajasta. Kellonajat ovat normaaliaikaa.

4.3.2 Äänenpainetasojen pysyvyys

Koko vuoden melukuormituksen havainnollistamiseksi piirrettiin melutasoista myös pysyvyyskäyrät, kuvaan (27). Pysyvyyskäyrästä voidaan helposti lukea, kuinka monena päivänä vuodessa tietty melutaso ylittyy. Esimerkiksi Kirkkokallion mittauspisteessä 40 dBA melutaso ylittyy 73 vuorokauden mittaisen ajanjakson aikana vuoden aikana. Jos alueella vallitsisi koko ajan yön-aikainen melutaso, jossa asutuksen aiheuttama melu on hiljaisempaa, 40 dBA ylittyisi 42 vuorokauden ajan vuodessa. Jos taas alueen melutaso vastaisi koko ajan päiväaikaista melutasoa, 40 dBA ylittyisi 94 vuorokauden ajan joka vuosi. Vastaavat lukemat muiltakin mittauspaikoilta on kerätty taulukkoon (3). Nämä melutasot ovat taustamelukorjaamattomia, joten niiden pohjalta ei voida sanoa kuinka usein ylitys johtuu tuulivoiman melusta tai muista melulähteistä. Taustamelukorjauksesta puhutaan lisää seuraavassa kappaleessa.

Taulukko 3. Melutasojen pysyvyys. Taulukkoa luetaan seuraavasti: Kirkkokallio A1 mittauspisteessä, joka sijaitsee 2000 m etäisyydellä lähimmästä turbiinista, melutaso ylittää raja-arvon ,40 dBA, 213 vuorokauden ajan, päiväaikainen melu 268 päivän, yöaikainen 124 yön ja keskiyön melutaso 82 keskiyön ajan vuodessa.

Mittauspaikka	d/ m	Vuorokausi	Päivä	Yö	Keskiyö
Kirkkokallio A1	2000	213	268	124	82
Kirkkokallio A2	170	300	291	313	315
Kirkkokallio A3	1000	73	94	42	37
Torkkola	660	139	147	125	113
Santavuori	1000	119	152	63	36

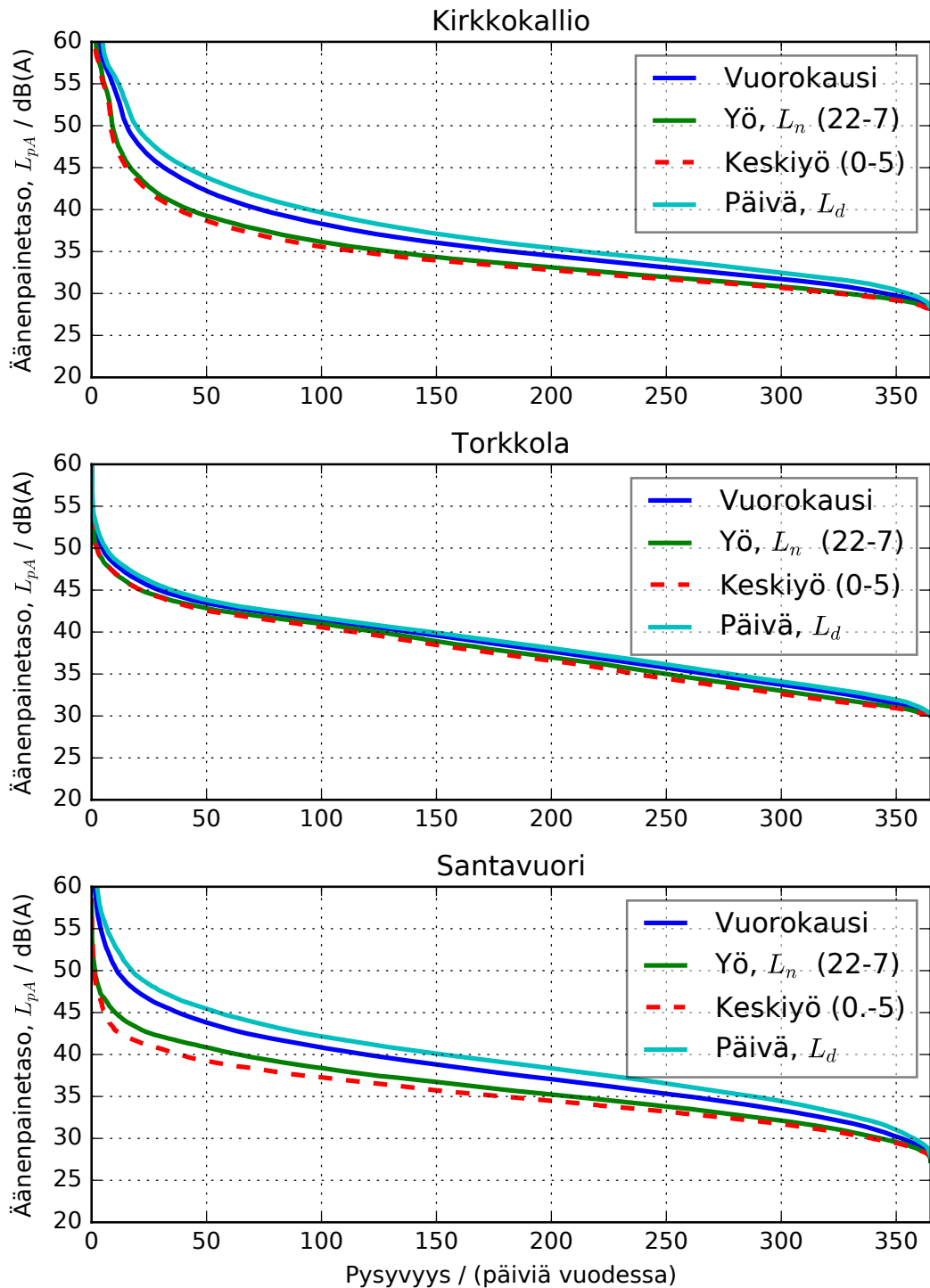


Figure 27. Taustamelukorjaamattomat pysyvyyskäyrät a) Kirkkokallion mittauspisteessä, A3, Torkkolan mittauspisteessä ja Santavuoren mittauspisteessä. Vuorokauden pysyvyyskäyrä on laskettu kaikesta mittausdatasta. Kuvaajassa on myös pysyvyyskäyrät laskettuna pelkästään päivän ajalta 7 - 22, yön ajalta 22 - 7 tai keskiyön ajalta 0 - 5. Asutuilla alueilla, lähempänä tietä, yön ja päiväajan melutasoissa on eniten eroa.

4.3.3 Äänitason riippuvuus tuulen nopeudesta

Pitkän mittausjakson aikana kertyi mittausdataa runsaasti erilaisissa sääolosuhteissa. Kun tulostetaan melutaso eri tuulennopeusluokkien vallitessa, voidaan helposti havainnollistaa, miten melutaso riippuu tuulen nopeudesta, kuten on tehty kuvassa (28). Mittausjakson aikana tuulipuiston turbiineita ei pyydetty pysäyttämään kertaakaan, mutta ne olivat silloin tällöin pysähdyksissä, esimerkiksi huoltokatkojen aikana. Myös mittaustulokset näinä ajanjaksoina jaettiin tuulennopeusluokkiin, jolloin voidaan arvioida taustamelun voimakkuutta eri tuulennopeuksilla. Myös tämä on visualisoitu kuvassa (28).

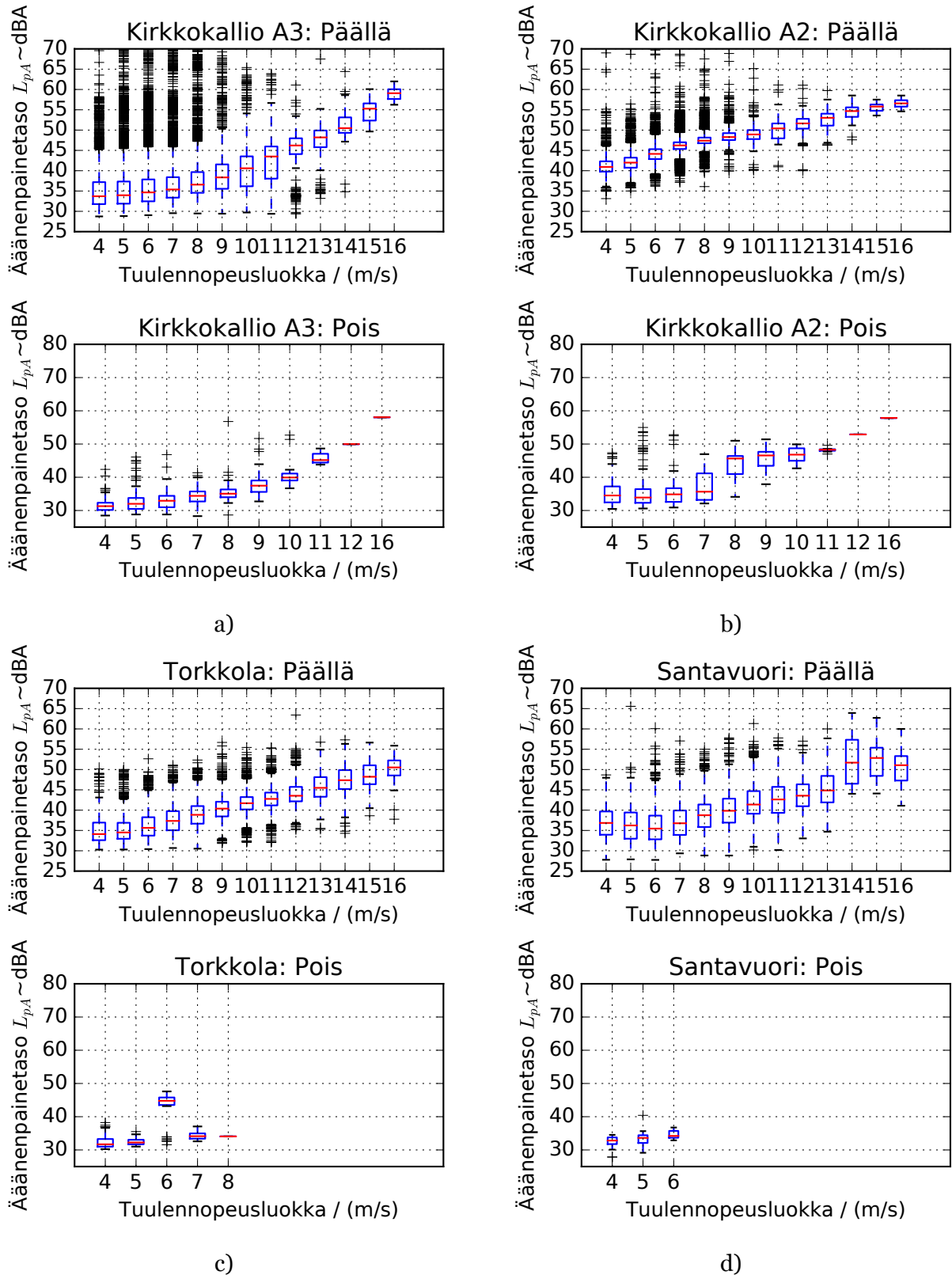
Kun nyt tiedetään melutasot eri tuulennopeuksilla sekä turbiinien ollessa päällä normaalisti, että turbiinien ollessa pysäytettynä, voidaan turbiinimeluun tehdä taustamelukorjaus, ja laskea tuulivoimaloiden vaikutus taustamelutasojen lisäykseen. IEC 6xxx standardin mukaan tuuliturbiinin taustamelukorjattu melutaso, L_S , lasketaan seuraavasti:

$$(7) \quad L_s = 10 \log_{10}(10^{L_{S+N}/10} - 10^{L_N/10}),$$

missä, L_{S+N} , on tuulivoiman tuottaman äänenpainetason ja taustamelun summa ja, L_N , on pelkän taustamelun mitattu taso.

Kirkkokallion tuulivoima-alueella, äänitasoja arvioitiin mittauspisteessä, joka joka sijaitsi noin kilometrin päässä tuulivoima-alueesta lounaassa, mittauspisteessä, A3, kuvassa (10). Vertailun vuoksi äänitasoja laskettiin myös mittapisteessä A2, joka oli lähellä turbiinia, 170 m etäisyydellä. Mittapiste A1 oli niin kaukana, että siellä ei juuri koskaan havaittu tuulivoimaloiden ääntä ja A4 oli lähempänä tietä, jolloin siellä oli enemmän häiriöääniä. Äänenpainetasojen jakaumat tuulennopeusluokittain on esitetty kuvassa (28). Kirkkokallion mittauspisteessä A3 nähdään, että äänenpainetaso kasvaa suhteessa tuulen nopeuden neliöön sekä silloin kun turbiinit ovat päällä että silloin kun ne ovat pois päältä. Kun taas lähellä turbiinia, pisteessä A2, äänenpainetaso kasvaa lähes lineaarisesti tuulen nopeuteen nähden, aina 9 m/s asti, ja sen jälkeen kasvu hidastuu. Näiden mittausten perusteella tehtiin taustamelutasojen korjaus mittauspisteeseen A3 mittausten pohjalta taulukkoon (4).

Torkkolan ja Santavuoren tuulivoima-alueilta on vain vähän mittaustietoja ajalta, jolloin turbiinit olivat pois päältä, jolloin taustamelukorjausta ei voida tehdä kuin niillä pienillä tuulennopeuksilla, joilta tuloksia on mitattu. Vertailulaskelmat kaikkien tuulivoima-alueiden osalta on laskettu taulukkoon (5).



Kuva 28. Äänenpainetasot luokiteltuna tuulennopeuden mukaan Kirkkokallion, Torkkolan ja Santavuoren tuulivoima-alueiden läheisyydessä, silloin kun tuulivoimalat tuottavat tehoa normaalisti tai ovat pysähdyksissä.

Taulukko 4. Mittauspisteen A3 äänenpainetasot silloin kun tuulivoimalat tuottavat energiaa ja silloin kun ne ovat pois päältä. Viimeisessä sarakkeessa myös taustamelukorjattu melutaso, mutta taustamelukorjausta ei kuulu tehdä silloin kun melutasojen erotus on alle 3 dBA.

Tuulen nopeus / (m/s)	L_{pA} / dBA (tuulivoimalat käytössä)	L_{pA} / dBA (tuulivoimalat ei käytössä)	Erotus / dBA	L_{pA} / dBA (taustamelukorjattu)
4	33.6	31.2	*** 2.4	29.9
5	33.9	31.9	*** 2.0	29.5
6	34.6	32.9	*** 1.7	29.8
7	35.3	34.4	*** 0.9	28.1
8	36.5	35.1	*** 1.5	31.1
9	38.3	37.5	** 0.8	30.0
10	40.5	39.9	0.5	-
11	43.4	45.2	* -1.5	-
12	46.2	50.0	* -3.8	-
13	48.2	-	-	-
14	50.5	-	-	-
15	55.3	-	-	-

Erotuksen merkitsevyys (riippumaton t-testi) : *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Samalla tavoin voidaan laskea taustamelukorjatut melutasot muissakin mittauspisteissä 8 m/s tuulennopeudella. Torkkolan ja Santavuoren melutasot piti laskea eri tuulennopeuksilla, koska suuremmilla nopeuksilla ei ollut riittävästi mittaustietoa.

Taulukko 5. Taustamelukorjatut äänenpainetasot Kirkkokallion, Torkkolan ja Santavuoren tuulivoima-alueilta, tuulen nopeudella 8 m/s. Koska Torkkolan ja Santavuoren alueilta oli vähän mittaustuloksia, niiden osalta on korjaus laskettu myös pienemmillä tuulennopeuksilla, joilla mittaustuloksia on tarjolla enemmän.

Mittauspaikka	Tuulen nopeus u / (m/s)	L_{pA} / dBA (tuulivoimalat käytössä)	L_{pA} / dBA (tuulivoimalat ei käytössä)	Erotus / dBA	L_{pA} / dBA (taustamelukorjattu)
Kirkkokallio A1	8	42.3	40.0	2.3	-
Kirkkokallio A2	8	47.4	45.6	*** 1.8	42.6 §
Kirkkokallio A3	8	36.6	35.1	*** 1.5	31.3 §
Torkkola	7	37.3	34.1	*** 3.2	34.5
Torkkola	8	38.8	34.1	** 4.8	37.1
Santavuori	5	36.2	33.6	*** 2.6	32.8 §
Santavuori	8	38.7	-	-	-

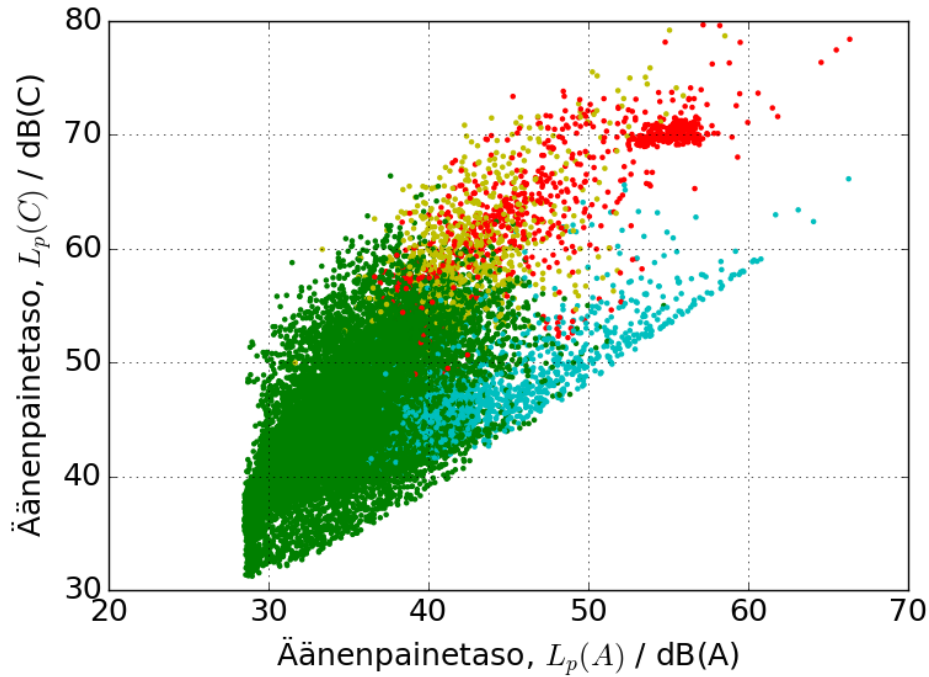
§: Taustamelukorjausta ei kuulu tehdä, koska erotus on alle 3 dBA

Erotuksen merkitsevyys (riippumaton t-testi) : *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

4.4 Luokittelu melulähteittäin

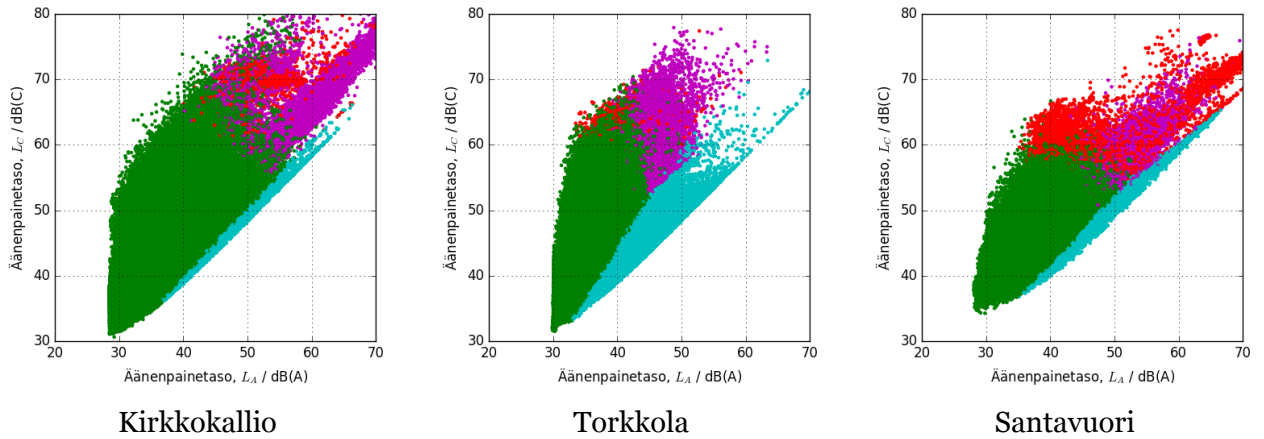
Melumittauksissa ongelmana on erotella muista lähteistä tuleva melu mitattavan kohteen tuottamasta melusta. Esimerkiksi Kirkkokallion mittauspisteessä A3, tuulivoimameluun yhdistyy tuulen suhina, vesisade ja lintujen laulu keväällä. Ajoittain mittauspaikalla havaittiin paljon voimakkaampia ääniä, kuten ukkonen, maatalouskoneet, liikenne ja sotilasalueella suoritetut ammunnat. Jatkuvaa taustamelua lienee mahdotonta erotella tuulivoimalan äänestä, joten ainoaksi keinoksi taustamelun arvioimiseksi jää tuuliturbiinien hetkellinen pysäyttäminen ja aiemmin mainitun taustamelukorjauksen tekeminen. Jos taas mittauksessa on mukana hetkellisiä voimakkaita sivuääniä, ne voidaan leikata pois mittausaineistosta, jolloin ne eivät häiritse tuulivoimamelun arviointia. Lyhytaikaisissa tämä voidaan tehdä manuaalisesti, mutta pitkäaikaismittauksissa prosessi on automatisoitava.

Kirkkokallion mittauspisteessä, A3, mitatun datan jakaminen äänilähteisiin tehtiin aluksi ryvästämällä ja sen jälkeen luokittelualgoritmi opetettiin toistamaan ryvästyksen tulos mahdollisimman pienellä mittausdatamäärällä. Luokitin pystyikin tuottamaan ryvästystä vastaavan tuloksen pelkästään käyttämällä A- ja C-painotettuja äänenpainetasoja, sekä kahta 1/3 oktaavin taajuuskaistaa, joiden keskitaajuudet olivat 20 Hz ja 62 Hz. Luokittelija luokitteli 10 sekunnin ääninäytteet 91% tarkkuudella samoihin luokkiin, kuin ryvästysalgoritmi. Kun luokitellut ääninäytteet tulostetaan koordinaatistoon, jossa x-akselilla on A-painotettu äänenpainetaso ja y-akselilla C-painotettu äänenpainetaso (Kuva 29) niin nähdään, että pelkästään nämä kaksi suuretta yhdessä riittävät aika hyvin erottelemaan tuulivoiman melun muista melulähteistä. Mittausalueella havaittua traktorin ja räjäytysten ääniä ne sen sijaan eivät riitä erottelemaan toisistaan.

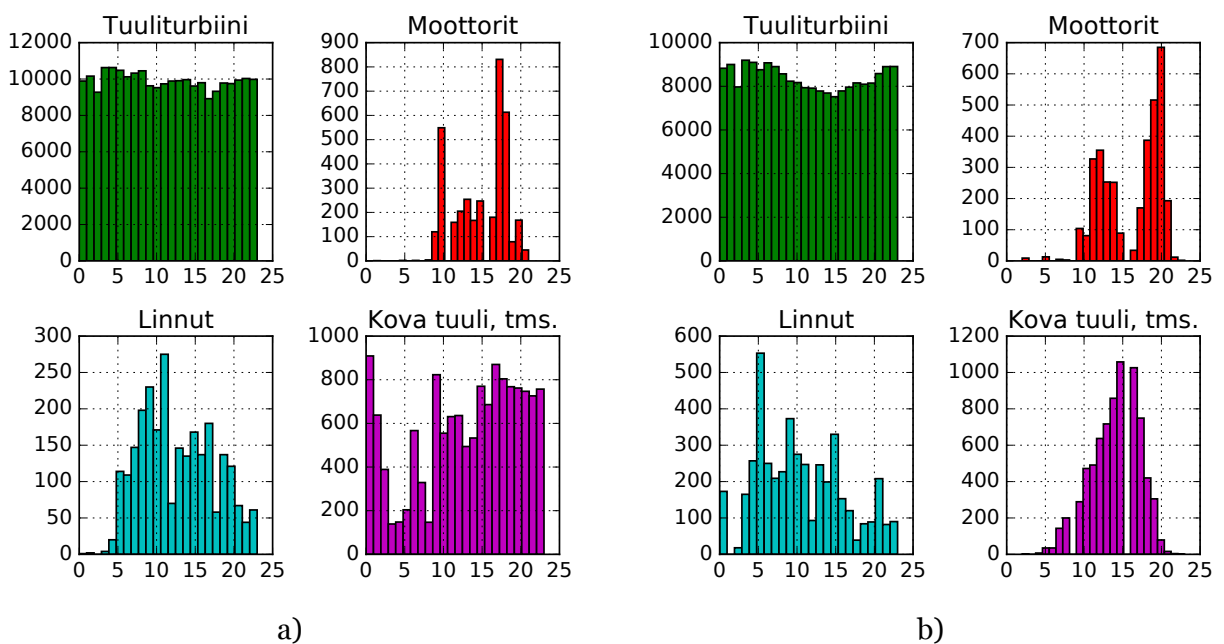


Kuva 29. Ympäristömelun luokittelualgoritmin tulos esitettynä A- ja C-painotettujen äänenpainetasojen mukaan. Jo nämä kaksi muuttujaa riittävät erottelemaan suhteellisen hyvin tuulivoiman melun (vihreä) muista melulähteistä, joita ovat lintujen äänet (sinivihreä), traktorin äänet (punainen) ja räjäytykset (keltainen). Jos halutaan erottaa traktorin äänet räjäytyksistä, tarvitaan enemmän muuttujia.

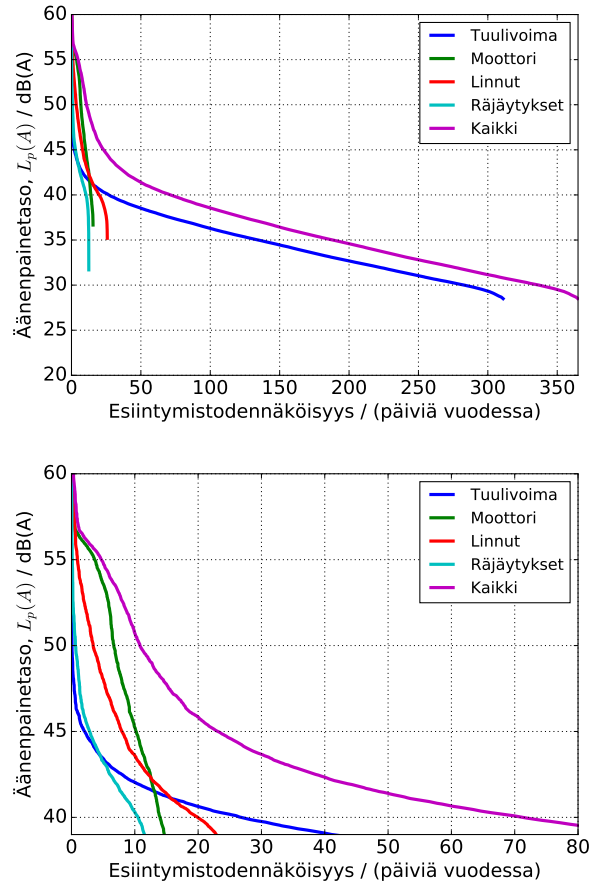
Seuraavaksi kokeiltiin, voiko samaa luokittintä soveltaa myös eri tuulivoima-alueilla, joissa äänimaisema on kussakin erilainen. Tulokset ovat kuvassa (30). Tämä luokitinversio toimi hyvin sekä Torkkolassa että Santavuoressa, mutta Kirkkokallion tulos eroaa aika paljon sitä varten erikseen suunnitellusta luokittimesta. Siksi toistaiseksi on vielä parempi käyttää erillisiä luokittimia. Yleispätevällä luokittimella olisi kuitenkin kiistattomia etuja, koska luokittimen opettaminen vaatii myös käsityötä, jolta vältyttäisiin, jos yleispätevä luokitin saataisiin kehitettyä. Tutkimusta tämän osalta kannattaa vielä jatkaa.



Kuva 30. Melutasojen luokittelua melulähteittäin kolmella eri tuulivoima-alueella. Jokainen kuvan piste kuvaa 10 sekunnin mittaista ääninäytettä. Luokittelualgoritmi on sijoittanut näytteet eri luokkiin äänen sisällön perusteella, ja eri luokat on merkitty väreillä. Vihreä väri tarkoittaa tuuliturbiinin ääntä, sinivihreä lintujen laulua, punainen koneiden ääntä ja violetti ukkosen, räjäytyksistä tai kovasta tuulen huminasta syntyvää ääntä tai tuulen kohinaa tuulisuojaissa.



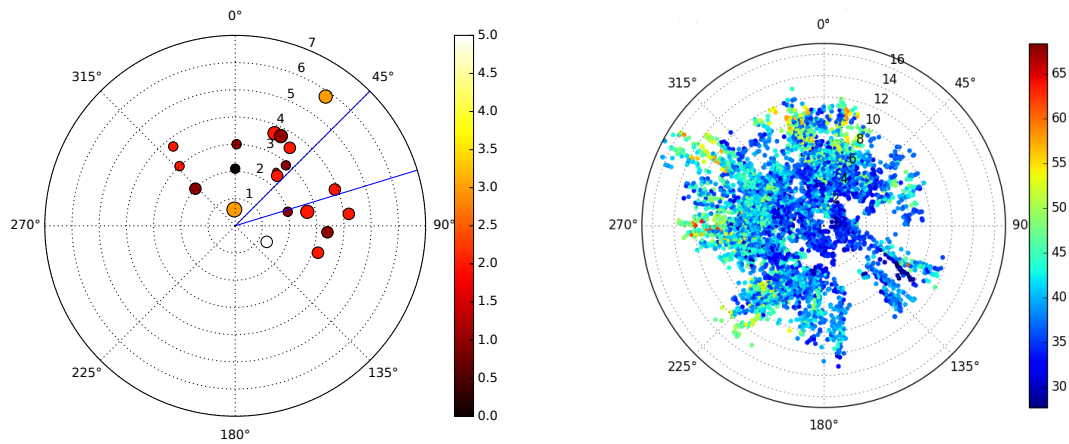
Kuva 31. Melulähteitten vuorokausittainen jakauma a) Kirkkokallion ja b) Santavuoren tuulivoima-alueilla.



Kuva 32. Eri äänilähdeluokkien vaikutus mittauspisteessä A3, hiljaisella maaseutualueella. Tilaston mukaan räjäytykset ja ukkonen aiheuttavat yli 40 dBA äänialtistuksen alueella ajan, joka vastaa 10 vuorokautta (2.7 %), moottorin äänet 14 vuorokautta (3.8 %), lintujen laulu 20 vuorokautta (5.5 %) sekä tuulivoima ja muu taustamelu 26 vuorokautta (7.1 %), siten että 40 dB(A) ylittyy 70 vuorokauden ajan vuodessa (19.2 %).

4.5 Sääolosuhteiden vaikutus

Tutkimuksessa selvitettiin myös äänenpainetasoa, äänen laadullisten ominaisuuksien ja äänihavaintojen riippuvuutta sääolosuhteista. Kyselytutkimuksesta kävi ilmi, että asukkaiden mielestä tuulivoimamelu on voimakkaampaa ja häiritsevämpää silloin, kun tuulee tuulivoima-alueen suunnasta. Äänen tehokkaampi eteneminen myötätuuleen on havaittu myös aaltoyhtälöpohjaisissa simuloinneissa tuuliväälteen yhteydessä (Barlas et al. 2016). Palautejärjestelmällä reaaliaikaista palautetta meluhavainnoista antaneen asukkaaseen mukaan häiritseviksi merkityistä meluhavainnoista pääosa on tehty silloin, kun tuulen suunta on lähes tuulivoima-alueen suunnasta, katso kuvaa (33). Jonkin verran havaintoja on myös pohjois- ja luoteistuulella, jotka vastaavat jo sivutuulta. Sen sijaan 1 km etäisyydellä 3 kk ajan tehdyissä melumittauksissa ei havaittu äänenpainetasoissa merkittävää eroa tuulen suuntien mukaan, kuten ei myöskään Kirkkokallion tuulivoima-alueella.

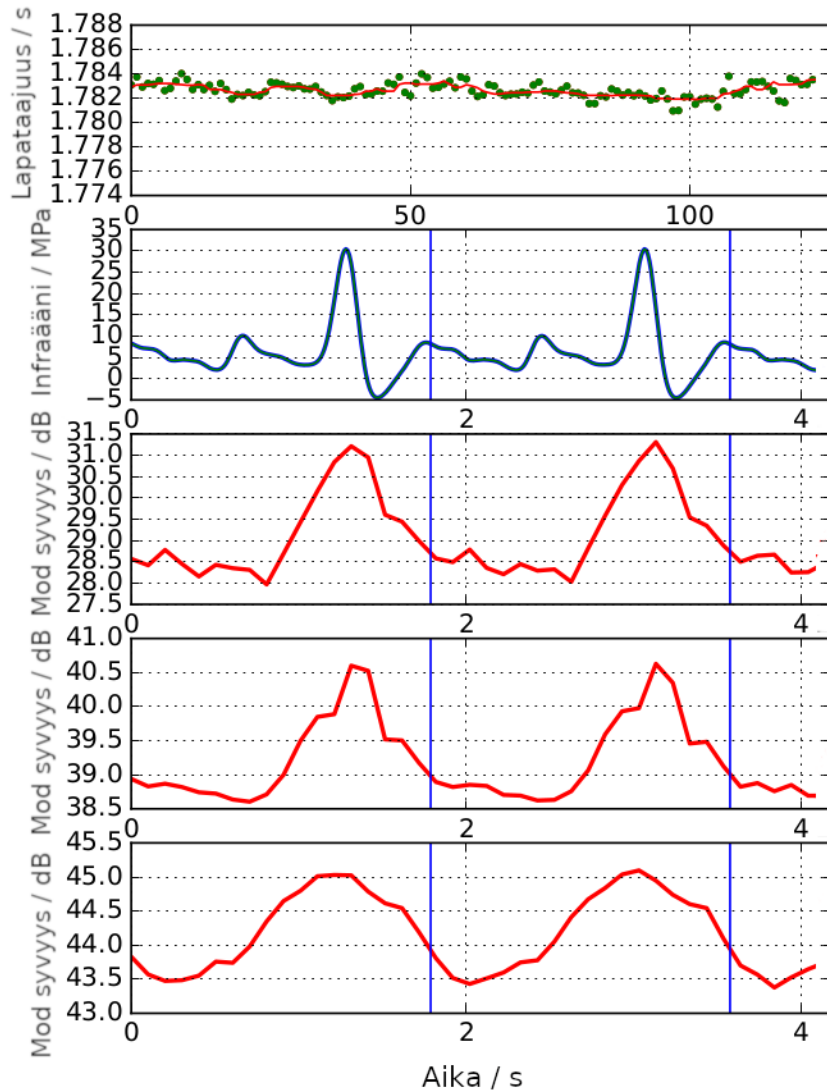


Kuva 33. Asukkaan kokema tuulivoimamelun voimakkuus ja häiritsevyys Santavuoren tuulipuiston läheisyydessä, noin 3 km etäisyydellä lähimmästä turbiinista, tuulen suunnan ja keskituulennopeuden funktiona. Tuulipuisto sijaitsee sinisillä viivoilla erotetussa sektorissa. Pisteiden etäisyys keskipisteessä kuvaa tuulen nopeutta 10 m korkeudella, pisteen koko äänen kuuluvuutta ja väri koettua häiritsevyyttä: 0=ei häiritsevää, 5=erittäin häiritsevää. Oikealla puolella samalta ajalta A-painotettu äänenpainetaso tuulen suunnan ja voimakkuuden funktiona 1 km etäisyydellä, tuulivoima-alueen sijaitessa samalla sektorilla kuin vasemman puolen kuvassakin.

4.6 Tuulivoimalan infraääni

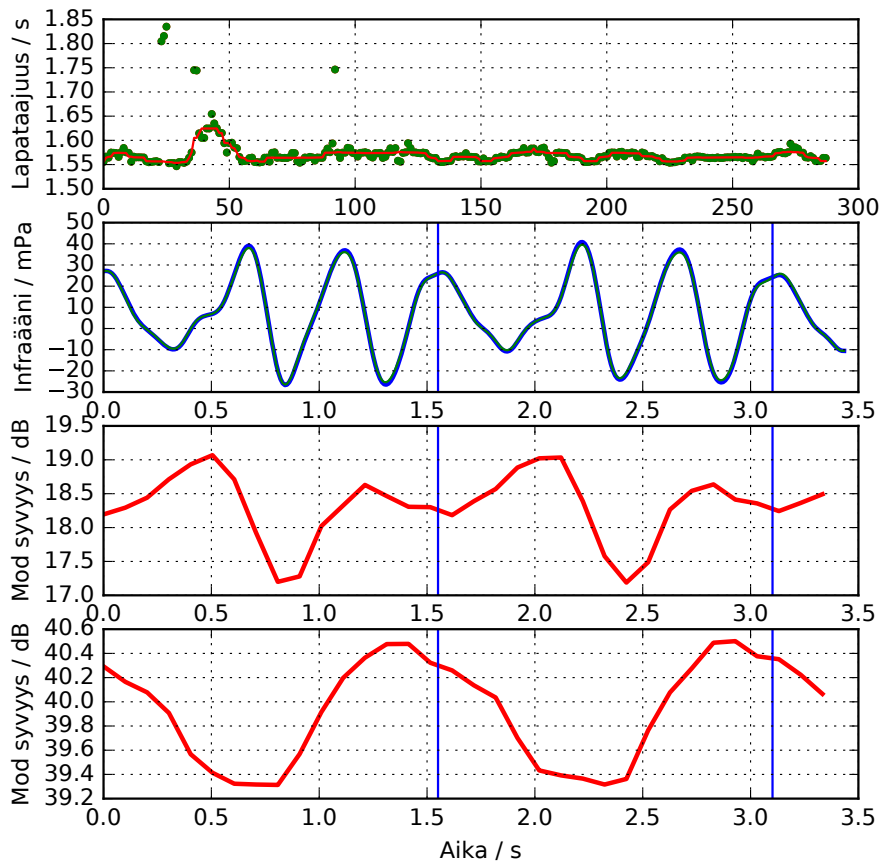
Tuulivoiman lapataajuuteen synkronoiduissa mittauksissa pystyttiin toisinaan havaitsemaan ja visualisoimaan turbiinin roottorin asennon mukaan muuttuva äänen voimakkuus (sykkivyyss) ja mahdollisesti lavan ja tornin vuorovaikutuksesta aiheutuva paineenvaihtelu, joka on esitetty kuvissa (34) - (36). Kirkkokallion tapauksessa aaltomuodot ovat selkeämpiä, ehkä sen vuoksi että mittaushetkellä mittaukseen on vaikuttanut yksi tuulivoimala paljon voimakkaammin kuin muut. Santavuoren tapauksessa taas aaltomuotoon on ilmeisesti vaikuttanut monta tuulivoimalaa yhtäaikaan.

Aaltomuoto kaistoilla (0 - 10 Hz), (50 - 200 Hz) ja (20 - 1000 Hz)

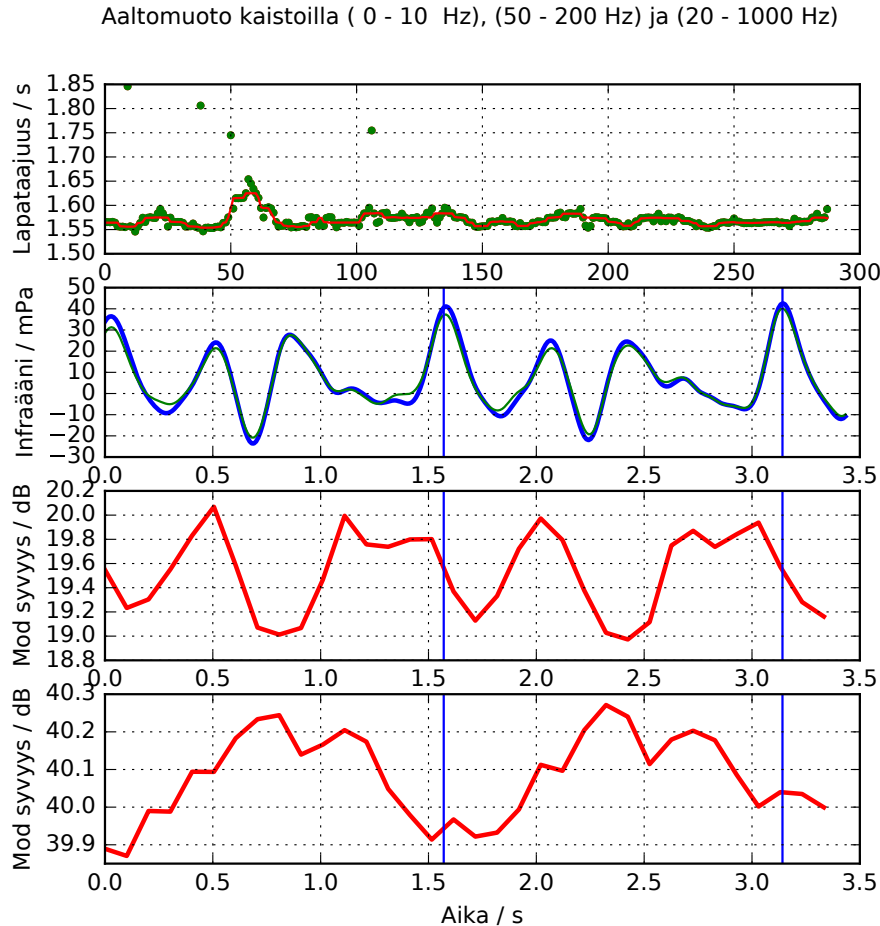


Kuva 34. Tuuliturbiinin tuottama aaltomuoto. Ylimmässä paneelissa on tuuliturbiinin hetkellinen lapajakson pituus. Toiseksi ylimmässä on lapajakson tahdistumalla laskettu tuuliturbiinin tuottama keskimääräinen paineenvaihtelu taajuuskaistalla 0,5 - 10 Hz. Kaksi alinta paneelia esittävät kuuluvan äänen voimakkuuden vaihtelemista, niinkään lapajaksoon tahdistettuna, toiseksi alempana kapealla taajuuskaistalla 50 - 200 Hz ja alimpana laajalla taajuuskaistalla 20 - 1000 Hz. Mittaus on suoritettu 170 m:n etäisyydellä tuuliturbiinista Honkajoella, hetkellä, jolloin paineenvaihtelu oli erityisen voimakas, vaikka se oli silloinkin vain alle 40 mPa. Sykkivyyden voimakkuus on kyseisessä tilanteessa parin desibelin luokkaa.

Aaltomuoto kaistoilla (0 - 10 Hz), (50 - 200 Hz) ja (20 - 1000 Hz)

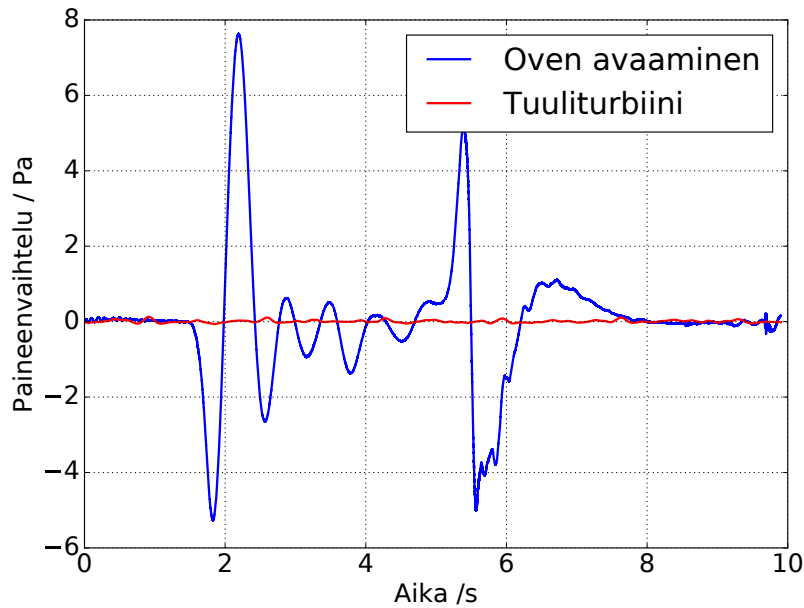


Kuva 35. Tuuliturbiinin tuottama aaltomuoto. Ylimmässä paneelissa on tuuliturbiinin hetkellinen lapajakson pituus. Toiseksi ylimmässä on lapajakson tahdistumalla laskettu tuuliturbiinin tuottama keskimääräinen paineenvaihtelu taajuuskaistalla 0.5 - 10 Hz. Kaksi alinta paneelia esittävät kuuluvan äänen voimakkuuden vaihtelemista, niinkään lapajaksoon tahdistettuna, toiseksi alempana kapealla taajuuskaistalla 50 - 200 Hz ja alimpana laajalla taajuuskaistalla 20 - 1000 Hz. Torkkola 2017-03-07T03:06:02.903231+00:00"



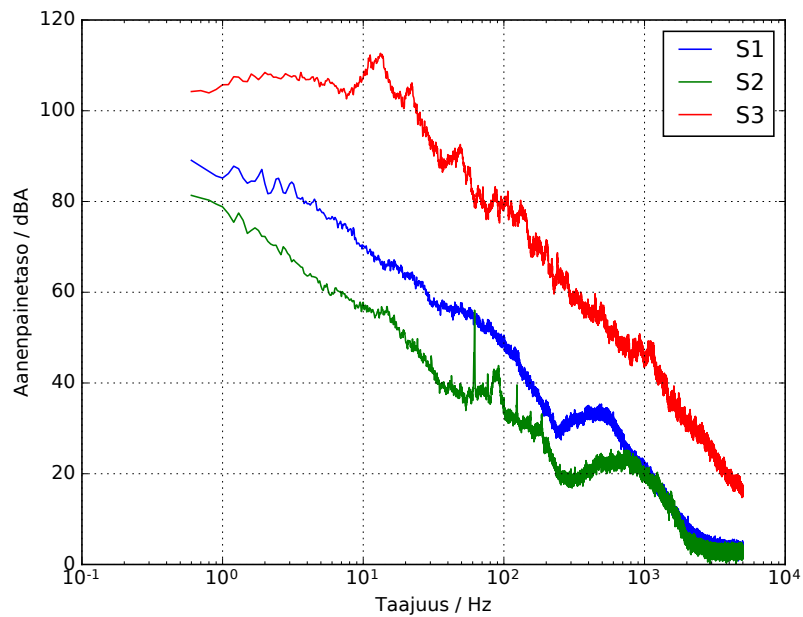
Kuva 36. Tuuliturbiinin tuottama aaltomuoto. Ylimmässä paneelissa on tuuliturbiinin hetkellinen lapajakson pituus. Toiseksi ylimmässä on lapajakson tahdistumalla laskettu tuuliturbiinin tuottama keskimääräinen paineenvaihtelu taajuuskaistalla 0.5 - 10 Hz. Kaksi alinta paneelia esittävät kuuluvan äänen voimakkuuden vaihtelemista, niinkään lapajaksoon tahdistettuna, toiseksi alempana kapealla taajuuskaistalla 50 - 200 Hz ja alimpana laajalla taajuuskaistalla 20 - 1000 Hz. Santavuori (2017-03-07T03:06:02.903231+00:00).

Havaitun paineenvaihtelun amplitudi on hyvin pieni, ja on siksi epätodennäköistä, että sillä voisi olla vaikutusta ihmisiin. Sen merkityksen arvioimiseksi voidaan sitä verrata esimerkiksi talon sisällä tapahtuvaan paineenvaihteluun, silloin kun talon ulko-ovi avataan ja suljetaan. Näin on tehty kuvassa (37). Huoneen sisällä oven avaamisesta aiheutuva paineenvaihtelu oli tässä mitauksessa noin 80 kertaa voimakkaampi kuin mikään tuuliturbiinista mitattu paineenvaihtelu, eikä sitäkään huoneessa olevat henkilöt vielä omin aistein huomaa, puhumattakaan että kärsisivät sen terveysvaikutuksista.



Kuva 37. Tuulivoimalan tuottama paineaalto verrattuna ulko-oven avaamiseen ja sulkemiseen liittyvä paineenvaihtelu omakotitalon sisällä. Ulko-oven avaamisesta syntyi noin 8 Pa suuruinen paineenvaihtelu. Punaisella on kuvattu tuuliturbiinista noin 1000 m etäisyydellä mitattu paineenvaihtelun hetkellisarvo, suuruudeltaan noin 100 mPa. Ihminen ei omin aistein havaitse yleensä kumpaakaan.

Tuulivoiman tuottamille infraäänitasoille voidaan hakea vertailukohtaa myös vertaamalla niitä infraäänitasoihin liikkuvassa autossa. Kuvassa (38) on esitetty melutasot infraäänineen lähellä Torkkolan tuulivoimapuistoa silloin kun turbiinit eivät olleet toiminnassa, silloin kun ne olivat toiminnassa sekä vastaava melutaso auton sisällä. Kuvaajasta voidaan havaita, että melutaso auton sisällä ylittää melutason tuulivoimapuiston alueella vähintään 10 dBA verran kaikilla taajuuksilla. Näiden mittausten mukaan ei siis ole mahdollista, että autoa ajaessaan voisi havaita tuulivoimaloiden ääniä niiden ohi ajaessaan, tai että ne voisivat vaikuttaa autossa olijoihin muutenkaan.

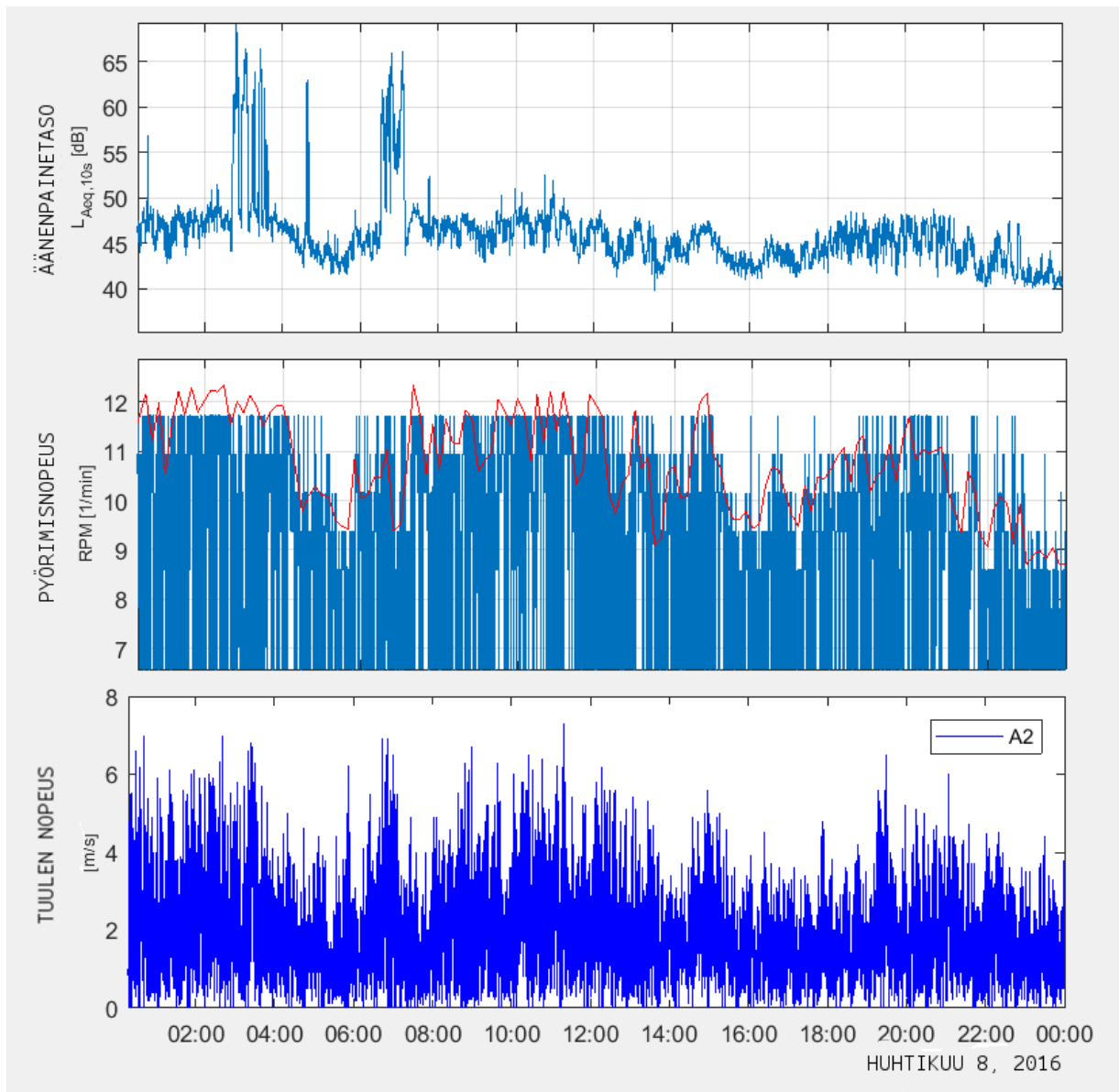


Kuva 38. Melutasojen ja meluspektrien vertailua S1) tuulivoima-alueelta, 660 metrin etäisyydeltä lähimmästä tuulivoimalasta, kun tuulivoimala on toiminut normaalisti. S2) Mittaus samasta paikasta, kun tuulen nopeus on niin alhainen, että turbiinit eivät tuota sähköä. S3) Melumittaus auton sisätiloista, kun takaikkuna on ollut auki ja ajonopeus noin 100 km/h.

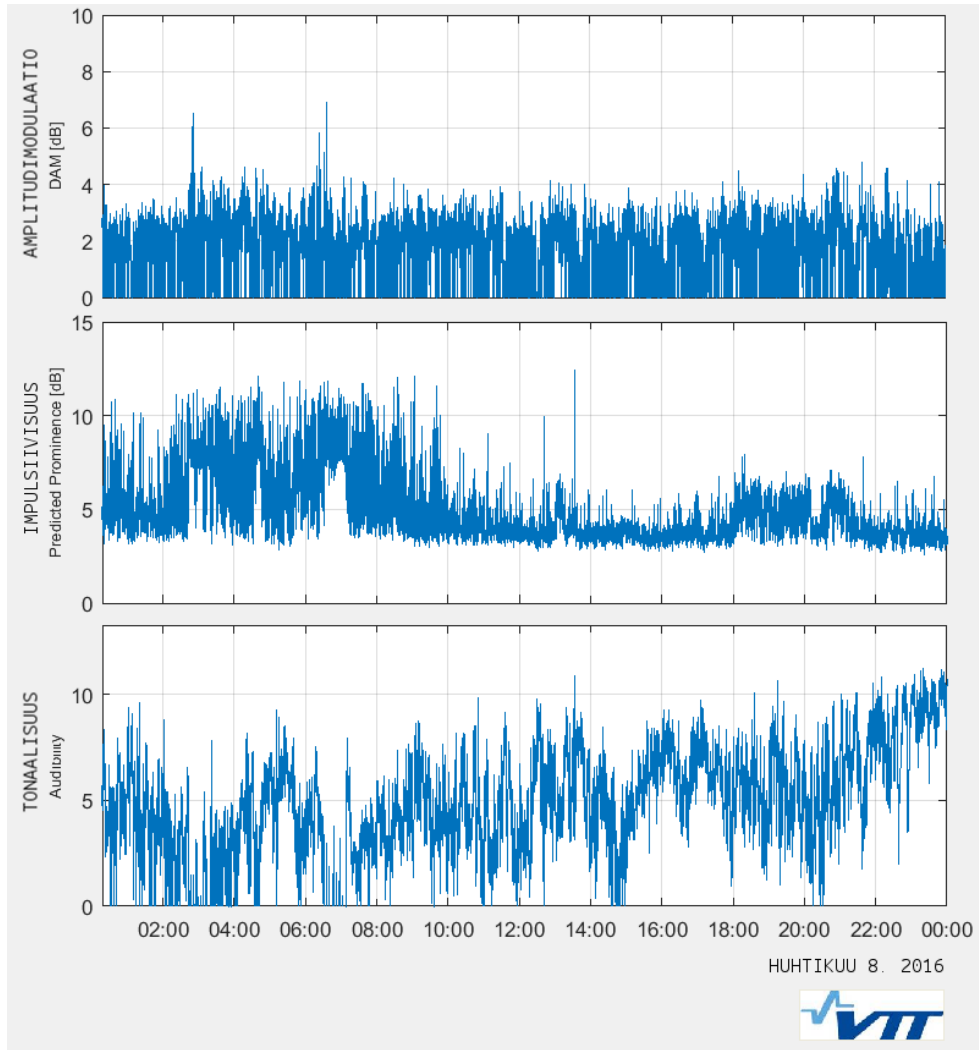
4.7 Äänen erityispiirteet

Esimerkki äänen erityispiirteiden laskennasta ja tulosten esittämisestä kuvissa (39) ja (40). Samaan kuvaan on tuotu sekä äänenpaine, turbiinin pyörimisnopeus, tuulennonopeus, amplitudi-modulaatio, iskumaisuus sekä ääneksisyys.

Erityispiirteet sekä äänenpaine on laskettu VTT:n laskentaklusterissa mittausasemilta saadusta raakadatasta. Tuulen nopeus on mukana vertailun vuoksi sääasemalta. Kaikki kuvaajia voidaan yhtäaikaaisesti zoomata, ja niiden arvoja tarkastella kursorin avulla.



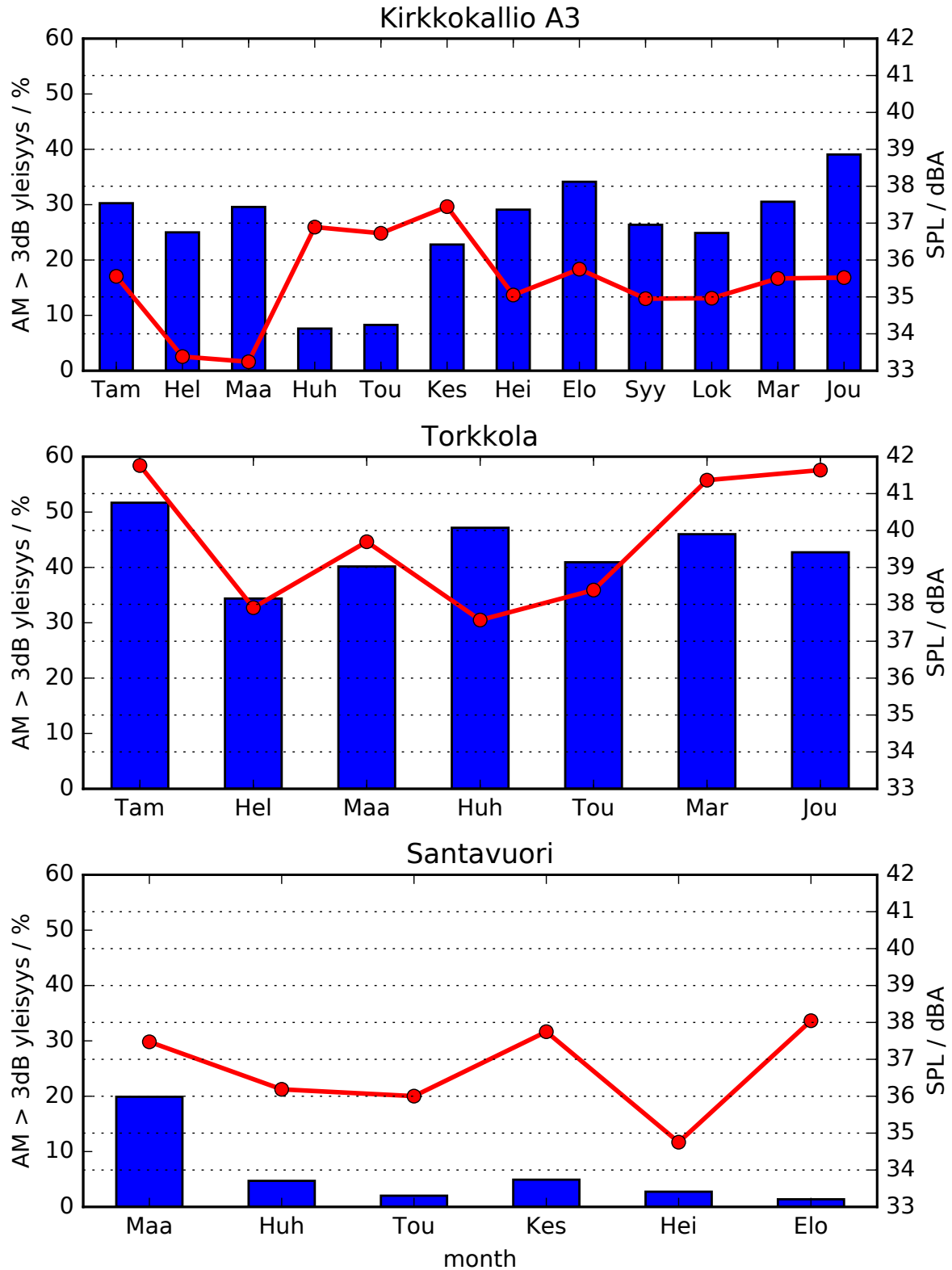
Kuva 39. Äänen erityispiirteiden analysointiesimerkki. Esimerkipäivänä 8.4.2016. Kuvassa näkyvät vasemmalla puolella äänen ekvivalenttitaso $L_{Aeq, 10s}$, turbiinin pyörimistaajuuden estimaatti sekä tuulen nopeus mitattuna sääasemalla. Oikealla puolella on laskettuja äänenlaatusuureita, ylhäältä alas amplitudimodulaatio, iskumaisuus ja ääneksisyys.



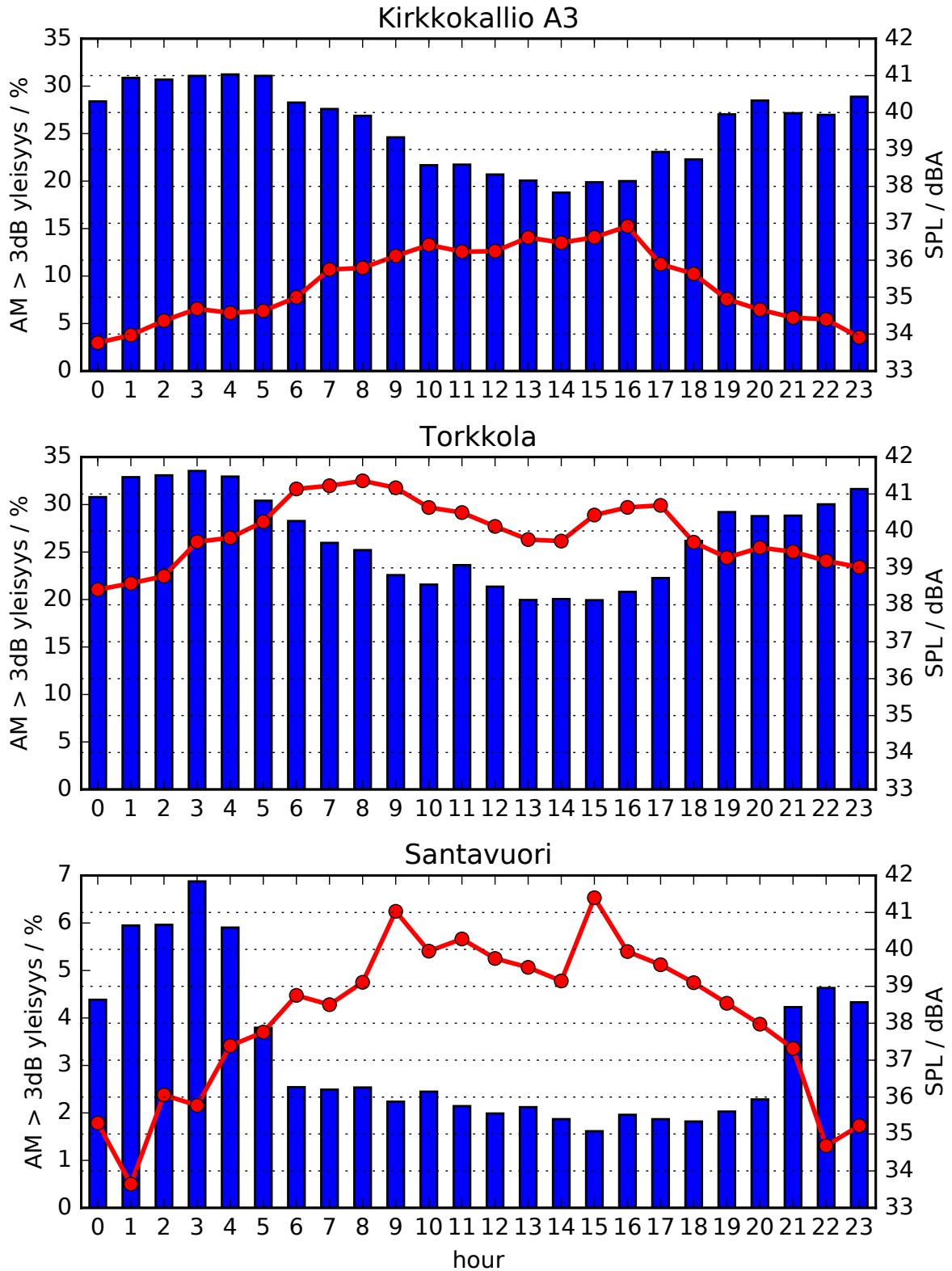
Kuva 40. Äänen erityispiirteiden analysointiesimerkki. Esimerkkipäivänä 8.4.2016. Kuvassa näkyvät vasemmalla puolella äänen ekvivalenttitaso LAeq, 10s, turbiinin pyörimistaajuuden estimaatti sekä tuulen nopeus mitattuna sääasemalla. Oikealla puolella on laskettuja äänenlaatusuureita, ylhäältä alas amplitudimodulaatio, iskumaisuus ja ääneksisyys.

4.8 Äänen sykkivyyys

Äänen sykkivyyttä, eli ns. amplitudimodulaatiota eli sen voimakkuuden vaihtelua turbiinin lapataajuuden tahdissa, laskettiin kansainvälisen AMWG:n työryhmän ehdottamalla algoritmilla (Bass, Cand, Coles, Irvine, Leventhall, Levet, Miller, Sexton & Shelton 2015). Sykkivyyden määrittämiseen ei ole soveltuvaa standardia, eikä sille määritellä raja-arvoja lainsäädännössä. Sykkivyyys on kuitenkin merkittävä osa tuulivoiman melun luonteesta, joten sen arvioiminen on merkittävä osa tuulivoimalan melukokemuksen arviointia. Normaalialueen voimakkaamman sykkivyyden esiintyvyyttä eri mittauskohteissa on kuvattu eri vuodenaikoina kuvassa (41) ja eri vuorokaudenaikoina kuvassa (42).



Kuva 41. Normaalia voimakkaamman, syvyydeltään yli 3 dB olevan amplitudimodulaation yleisyys kuukausittain kolmessa eri mittauspisteessä, jotka olivat eri tuulivoima-alueilla, kuvattu sinisillä palkeilla. Keskimääräinen taustamelukorjaamaton äänenpainetaso kuukausittain niinä ajanhetkinä kun amplitudimodulaatiota esiintyi, on esitetty punaisella viivalla käyttäen oikeanpuoleista y-akselia. Torkkolan mittauspiste on noin 660 m etäisyydellä lähimmästä turbiinista, kun kaksi muuta sijaitsevat noin 1 km etäisyydellä.



Kuva 42. Normaalia voimakkaamman, syvyydeltään yli 3 dB olevan amplitudimodulaation yleisyys tunneittain kolmessa eri mittauspisteessä, jotka olivat eri tuulivoima-alueilla. Keskimääräinen taustamelukorjaamaton äänenpainetaso kuukausittain niinä ajanhetkinä kun amplitudimodulaatiota esiintyi, on esitetty punaisella viivalla käyttäen oikeanpuoleista y-akselia.

5 KYSELYTUTKIMUKSEN TULOKSET

5.1 Vastaajien taustatiedot

Honkajoella kyselyyn vastanneista naisia oli 51,9 % (121) ja miehiä oli 48,1 % (112). Torkkolassa vastaajista naisia oli 49,2 % (94) ja miehiä 50,8 % (97). Vastaajien ikä vaihteli Honkajoella 18 ja 92 vuoden välillä, keski-ikä ollessa 57,4 ja mediaanin 60 vuotta. Torkkolassa ikä vaihteli välillä 18 ja 95, keski-ikä ollessa 55,9 ja mediaanin 58 vuotta. Molemmilla tutkimuspaikkakunnilla eläkeläiset olivat suurin yksittäinen ammattiryhmä: Honkajoella 12,1 % (95) ja Torkkolassa 38,1 % (74). Honkajoella kyselylomakkeen saajat asuivat 516 - 6342 metrin ja Torkkolassa 455 - 3222 metrin etäisyydellä lähimmästä tuulivoimalasta. Etäisyys lähimpään tuulivoimalaan ei vaikuttanut vastausaktiivisuuteen Honkajoella, jossa vastaajien keskiarvoetäisyys lähimpään tuulivoimalaan oli 2539 m ja ei-vastaajien 2582 m. Torkkolassa lähempänä tuulivoimaloita asuvat ihmiset (keskiarvoetäisyys 2273 m) vastasivat kyselyyn tilastollisesti merkittävästi aktiivisemmin kuin kauempana asuvat (keskiarvoetäisyys 2387 m). Honkajoella 41,1 % vastaajista näkee tuulivoimalan tai useita tuulivoimaloita ikkunasta tai parvekkeelta ja puutarhasta 62,8 %. Torkkolassa 33,1 % näkee tuulivoimalan tai useita tuulivoimaloita ikkunasta tai parvekkeelta ja puutarhasta vastaavasti 36,9 %.

Vastaajilta kysyttiin, saavatko he taloudellista hyötyä tuulivoimaloista (kuten tuulivoimalan tai tuotantoalueen omistajana, maanvuokraajana, palkkaa työstä tuulivoimalalla tai jollakin muulla tavalla). Honkajoella 2,7 % (6 vastaajaa) ja Torkkolassa 5,1 % (23 vastaajaa) ilmoitti saavansa taloudellista hyötyä tuulivoimaloista. Taulukossa 6 on esitetty vastaajien taustatietoja Honkajoella ja Torkkolassa.

Vastaajat sekä Honkajoella että Torkkolassa arvioivat oman terveytensä ja kuulonsa keskimäärin hyväksi. Honkajoen vastaajista 9,5 % ja Torkkolan vastaajista 11,6 % ei koskaan kärsi unettomuudesta. Unettomuutta vastaajat raportoivat taulukon 6 mukaisesti joko vuosittain, kuukausittain, viikoittain tai päivittäin.

Taulukko 6. Vastaajien taustatiedot

Muuttuja	Honkajoki	Torkkola
Otanta	783	447
Vastaajat	232	189
Vastausaktiivisuus %	29,6 %	42,3 %
Etäisyys metreinä lähimpään tuulivoimalaan (keskihajonta)		
vastaajat	2539 (232)	2273 (434)
ei vastanneet	2582 (551)	2387 (492)
t-arvo ^a	0,387 n.s.	0.011 **
Ikä, ka (keskihajonta)	57,4 (17,1)	55.9 (16.2)
Sukupuoli, vastaajista miehiä % (n)	48,1 % (112)	50.8 % (97)
Ammattiasema (% , n)		
työssä	50,2 % (113)	53.1 % (103)
eläkkeellä	12,1 % (95)	38.1 % (74)
Tuulivoimalat näkyvät (% , n)		
ikkunasta tai parvekkeelta	41,1 % (92)	33.1 % (148)
pihalta tai puutarhasta	62,8 % (140)	36.9 % (165)
Yleinen asenne tuulivoimaa kohtaan, keskiarvo (keskihajonta) (asteikko: 1-5, 1=hyvin negatiivinen, 5=hyvin positiivinen)	3,76 (0,86)	3.42 (1.02)
Tuulivoimasta taloudellista hyötyä saavat vastaajat % (n)	2,7 % (6)	5.1 % (23)
Oma arvio omasta terveydestä, keskiarvo (keskihajonta) (asteikko: 1-6, 1=erittäin huono, 6=erittäin hyvä)	4,39 (0,93)	4.56 (0.92)
Oma arvio omasta kuulosta, keskiarvo (keskihajonta) (asteikko: 1-6, 1=erittäin huono, 6=erittäin hyvä)	4,49 (1,01)	4.64 (1.03)00
Unettomuuden esiintyminen (itse todettu, asteikko:		
en koskaan	9,5 % (74)	11.6 % (52)
vuosittain	4,7 % (37)	9.2 % (41)
kuukausittain	6,1 % (48)	10.7 % (48)
viikoittain	5,0 % (39)	5.6 % (25)
päivittäin lähes päivittäin	3,6 % (28)	4.3 % (19)

^a Riippumattomien otosten t-testi,

* p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

5.2 Vastaajien kokemuksia tuulivoimaloista omalla asuinpaikkakunnalla

Vastaajat suhtautuivat tuulivoimaan yleisellä tasolla varovaisen myönteisesti kummallakin tutkimuspaikkakunnalla (taulukko 7.) Tuulivoimaloiden omalla asuinalueella arvioitiin vaikuttavan maisemaan, omaan terveyteen ja omaan hyvinvointiin melko vähän. Asteikolla 1-5, jossa 1 oli hyvin kielteisesti ja 5 hyvin myönteisesti (numero 3 = ei vaikuta) Honkajoen vastaajat arvioivat tuulivoiman vaikutuksen maisemaan olevan hieman myönteinen (3,12) ja Torkkolan vastaajat hieman kielteinen (2,89). Omaan fyysiseen terveyteen ja hyvinvointiin Honkajoen vastaajat ei-

vät arvioineet olevan vaikutusta ja Torkkolan vastaajien mielestä vaikutus oli hieman kielteinen. Vastaajien vaikutusarvioiden keskiarvot on esitetty Taulukossa 7.

Taulukko 7. Vastaajien arvioita siitä, miten tuulivoimalat vaikuttavat asuinalueella Honkajoella ja Torkkolassa. Asteikko on 1-5 (1=hyvin kielteisesti, 5=hyvin myönteisesti, 3=ei vaikutusta).

	Tuulivoimaloiden arvioitu vaikutus, keskiarvo (keskihajonta)		
	Maisemaan	Omaan fyysiseen terveyteen	Omaan hyvinvointiin
Honkajoki	3,12 (0,737)	3,00 (0,397)	3,01 (0,449)
Torkkola	2,89 (1,098)	2,89 (0,550)	2,88 (0,600)

Vastaajilta kysyttiin, ovatko he havainneet asuinalueella tuulivoimaloiden aiheuttamaa ääntä. Honkajoella 63,2 % ei ole havainnut ääntä ulkona ja 77,0 % ei ole havainnut ääntä sisällä. Torkkolassa 23,7 % vastaajista ei ole havainnut ääntä ulkona ja 51 % ei ole havainnut ääntä sisällä. Tuulivoimaloiden ääni siis on ylipäättään kuultavissa kummallakin asuinalueella (taulukko 8). Vastaajien arvion mukaan kuultava ääni häiritsee keskimäärin melko vähän. Arviointiasteikolla 1-5, numero 1 tarkoitti, ettei ääni ole lainkaan häiritsevää ja 5 tarkoitti, että ääni häiritsee erittäin paljon. Ääni häiritsee sisällä hieman vähemmän kuin ulkona kummallakin tutkimuspaikkakunnalla. Korkein keskiarvo häiritsevyydelle (2,17) raportoitiin Torkkolassa ulkona.

Taulukko 8. Vastaajien havainnot tuulivoimaloiden äänestä ulkona ja sisällä omalla asuinalueella.

	<i>Tutkimuspaikkakunta</i>	<i>% (n)</i>
Ei ole havainnut ääntä ulkona	Honkajoki	63,2 (139)
	Torkkola	23,7 (47)
Ei ole havainnut ääntä sisällä	Honkajoki	77,0 (171)
	Torkkola	51,0 (100)
		<i>keskiarvo (n)</i>
Äänen häiritsevyys ulkona	Honkajoki	1,75 (81)
	Torkkola	2,17 (151)
Äänen häiritsevyys sisällä	Honkajoki	1,65 (51)
	Torkkola	1,93 (96)

Vastaajat arvioivat, kuinka usein tuulivoimaloiden ääni häiritsee asunnon ulkopuolella ja sisätiloissa. Ulkona tuulivoimaloiden ääni ei koskaan häiritse Honkajoen vastaajista 86,1 % (192 vastaajaa) ja Torkkolassa 59,3 % (115 vastaajaa). Viikoittain tuulivoimaloiden ääni häiritsee ulkona 5,8 % (13 vastaajaa) Honkajoella ja 17,0 % (33 vastaajaa) Torkkolassa. Kuvassa 43 näkyy, kuinka usein tuulivoimaloiden ääni häiritsee asunnon ulkopuolella.

Asunnon sisätiloissa tuulivoimaloiden ääni häiritsee harvoin: ei koskaan häiritse Honkajoen vastaajista 92,6 % (201 vastaajaa) ja Torkkolassa 78,9 % (150 vastaajaa). Viikoittain tuulivoimaloiden ääni häiritsee sisällä 1,4 % (3 vastaajaa) Honkajoella ja 7,9 % (15 vastaajaa) Torkkolassa. Kuvassa 44 näkyy, kuinka usein tuulivoimaloiden ääni häiritsee asunnon sisätiloissa.

Vastaajilta kysyttiin, millainen melu häiritsee unta (herättää tai vaikeuttaa nukahtamista), katso Taulukko 9. Honkajoella pahimmat unen häiritsijät ovat koirien haukkuminen (34,2 %) ja tie-



Kuva 43. Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyyden esiintyminen tutkimuspaikkakunnilla asunon ulkopuolella.

liikennemelu (30,1 %). Tuulivoimamelu häiritsee unta 5,1 % Honkajoen vastaajilla. Torkkolassa pahimmat unen häiritäjät ovat äänekkäät perheenjäsenet (30,5 %) ja tieliikennemelu (28,9 %). Tuulivoimamelu häiritsee unta 14,2 % Torkkolan vastaajilla.

Taulukko 9. Millainen melu herättää tai vaikeuttaa nukahtamistanne?

Melulähde	Paikkakunta	Herättää tai vaikeuttaa nukahtamista % (n)
Tieliikennemelu	Honkajoki	30,1 (66)
	Torkkola	28,9 (54)
Rautatieliikennemelu	Honkajoki	0,9 (2)
	Torkkola	1,7 (3)
Tuulivoimamelu	Honkajoki	5,1 (11)
	Torkkola	14,2 (26)
Lentoliikennemelu	Honkajoki	2,4 (5)
	Torkkola	6,1 (11)
Äänekkäät perheenjäsenet	Honkajoki	27,5 (53)
	Torkkola	30,5 (51)
Äänekkäät naapurit	Honkajoki	16,8 (33)
	Torkkola	11,3 (19)
Koirien haukkuminen	Honkajoki	34,2 (67)
	Torkkola	26,2 (44)

Jos tuulivoimaloiden ääni häiritsee vastaajia ulkona, ajoittuu häiritsevyys vuorokaudenajoista erityisesti iltapäivä-yö-aikavälille kummallakin tutkimuspaikkakunnalla (Kuva 45.). Sisällä tuulivoimaloiden ääni häiritsee erityisesti yöllä ja varhain aamulla (Kuva 46)

Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys ei Torkkolassa näytä erityisesti vaihtelevan eri vuodenaikoina. Häiritsevyyttä raportoivien vastaajien määrät ovat samalla tasolla eri vuodenaikoina sekä



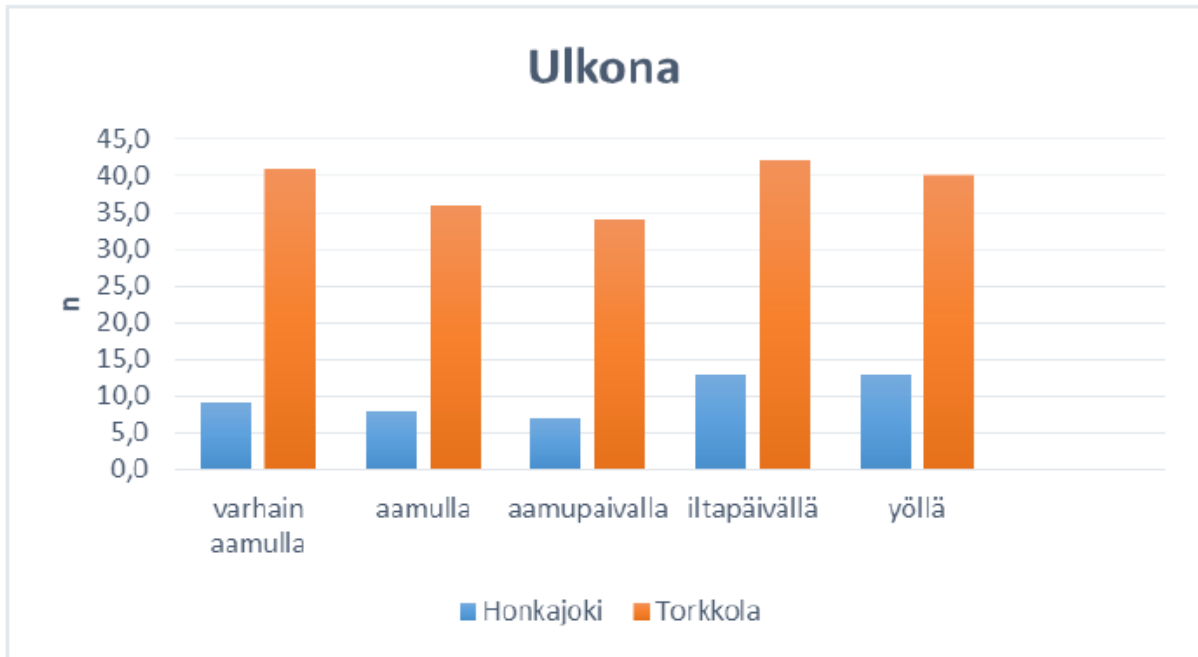
Kuva 44. Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyyden esiintyminen tutkimuspaikkakunnilla asunnon sisätiloissa.

ulkona (12,3 - 13,2 %) että sisällä (5,6 - 6,0 %). Honkajoella tuulivoimaloiden äänen häiritsevyydessä on pieniä eroja eri vuodenaikoina: ääni häiritsee kesällä ja syksyllä enemmän kuin talvella ja keväällä (ulkona 1,5 - 2,2 % ja sisällä 0,6 - 1,4 %). Kuvissa 47 ja 48 on esitetty tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys eri vuodenaikoina. Torkkolassa häiritsevyyttä on raportoitu Honkajokea enemmän.

Vastaajien mukaan sekä Honkajoella että Torkkolassa voimalan suunnasta asunnolle päin puhaltaava tuuli lisää äänen voimakkuutta. Samoin voimakas tuuli ja ulkoilman matala lämpötila (kova pakkanen) lisäävät äänen voimakkuutta (kuva 49).

5.3 Osallistuminen tuulivoimatuotantoalueen suunnittelu- ja sijoitusvaiheeseen

Honkajoella vastaajat (94,2 %, 195 vastaajaa) olivat sitä mieltä, ettei heillä ollut mahdollisuutta osallistua tuulivoimatuotantoalueen suunnittelu- ja sijoittamisvaiheeseen. Torkkolassa tilanne oli parempi, sillä 21,7 % (40 vastaajaa) koki mahdollisuuden osallistumismahdollisuuksien toteutuneen. Taulukosta 10 käy ilmi, että Honkajoella vain 13,8 % (4 vastaajaa) oli sitä mieltä, että heidän mielipiteensä otettiin huomioon, kun Torkkolassa 26,4 % (14) vastaajan mielipide huomioitiin.



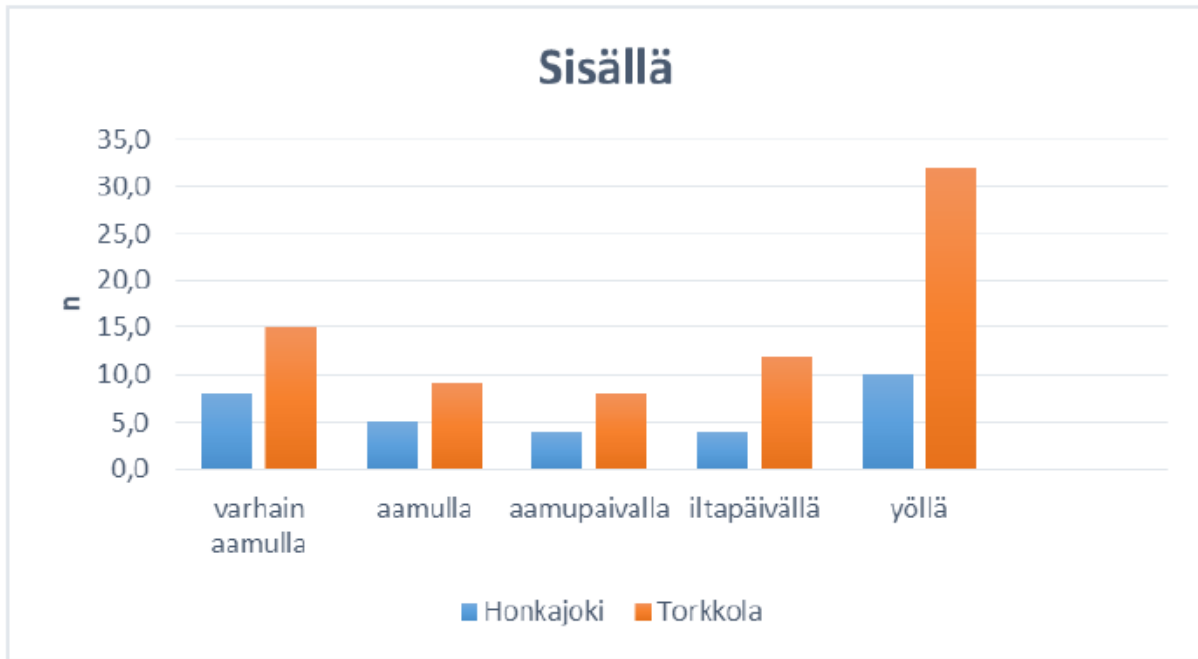
Kuva 45. Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys eri vuorokaudenaikoina ulkona.

Taulukko 10. Vastaajien kokema mahdollisuus osallistua tuulivoimatuotantoalueen suunnittelu- ja sijoitusvaiheeseen.

<i>Osallistumismahdollisuus suunnittelu- ja sijoitusvaiheessa</i>	<i>Kyllä % (n)</i>	<i>Ei % (n)</i>	
Honkajoki	5,8 (12)	94,2 (195)	
Torkkola	21,7 (40)	78,3 (144)	
<i>Otettiinko mielipiteenne huomioon</i>	<i>Kyllä % (n)</i>	<i>Ei % (n)</i>	<i>En tiedä % (n)</i>
Honkajoki	13,8 (4)	48,3 (14)	37,9 (11)
Torkkola	26,4 (14)	35,8 (19)	37,7 (20)

5.4 Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys

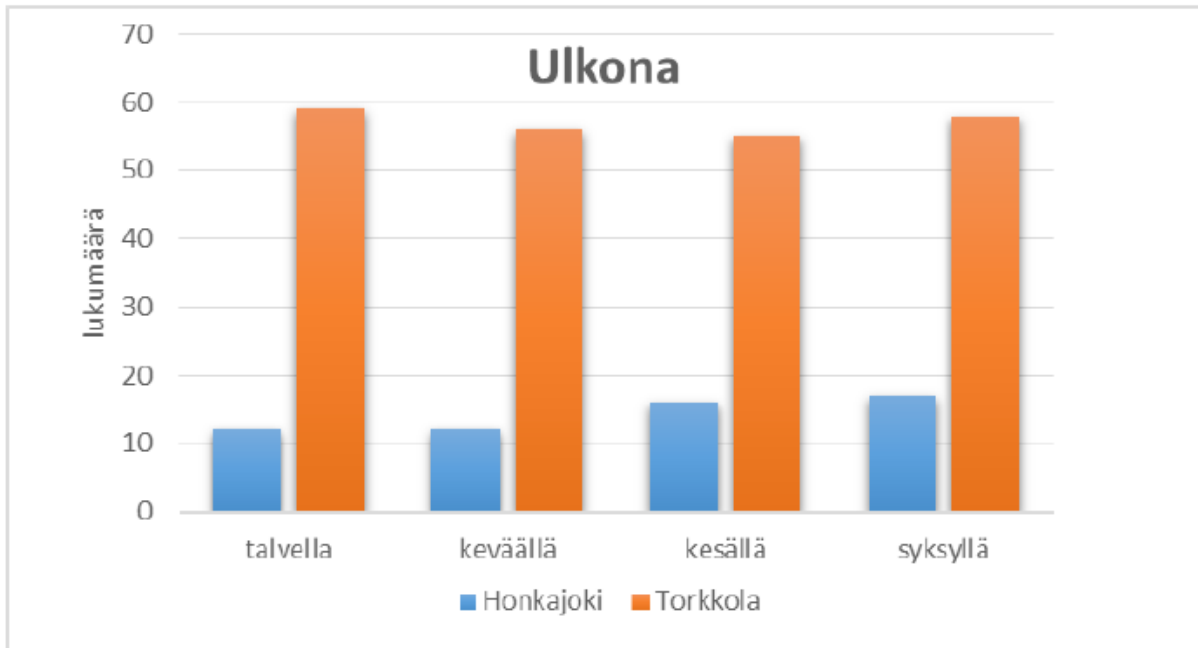
Regressioanalyysin avulla tarkasteltiin, kuinka hyvin kyselytutkimuksessa käytetyt muuttujat selittävät vastaajien kokemusta tuulivoimaloiden äänen häiritsevyydestä. Analyysimallissa selitettiin äänen häiritsevyyttä asunnon ulkopuolella käyttäen selittäjinä vastaajan sukupuolta, ikää, käykö vastaaja töissä, etäisyyttä lähimpään tuulivoimalaan, tuulivoimaloiden näkymistä pihalta tai puutarhasta (äänen ulkohäiritsevyyden selittäjänä) tai tuulivoimaloiden näkymistä ikkunas- ta tai parvekkeelta (äänen sisähäiritsevyyden selittäjänä) tuulivoimaloiden koettua vaikutusta asuinalueen maisemaan ja fyysiseen terveyteen, tuulivoimamelua unihäiriöiden (herättää tai estää nukahtamista) aiheuttajana, koettua osallistumismahdollisuutta tuulivoimatuotantoal- ueen suunnittelu- ja sijoitusvaiheeseen sekä yleistä asennetta tuulivoimaa kohtaan. Vastaajien arviot tuulivoimaloiden vaikutuksesta omaan fyysiseen terveyteen ja omaan hyvinvointiin kor- reloivat kyselytutkimuksen tulosten perusteella voimakkaasti ja regressioanalyysissä käytettiin näistä vain toista muuttujaa eli vaikutusta omaan fyysiseen terveyteen.



Kuva 46. Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys eri vuorokaudenaikoina sisällä.

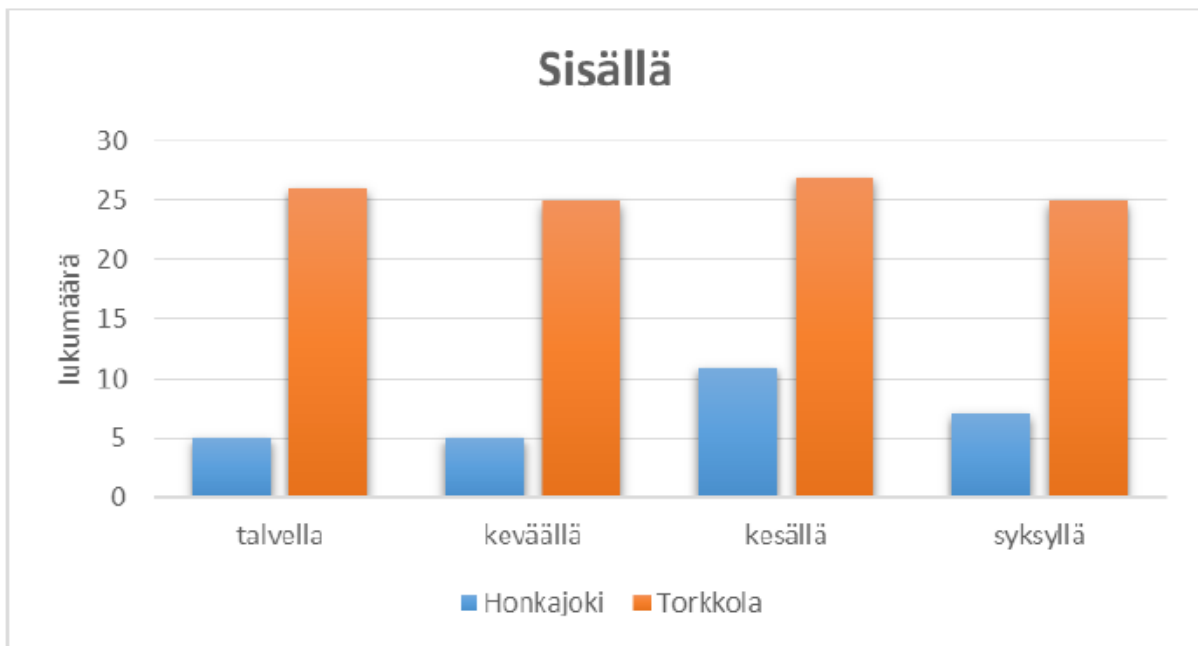
Honkajoella äänen häiritsevyyttä ulkotiloissa selittävät erittäin merkittävästi tuulivoiman vuoksi koetut unihäiriöt, merkittävä selittäjä on tuulivoimaloiden näkyminen pihalta tai puutarhasta ja melkein merkittäviä selittäjiä olivat lyhin etäisyys tuulivoimalaan, arvioitu vaikutus maisemaan ja yleinen asenne tuulivoimaa kohtaan. Tulokset on esitetty taulukossa 11. Mikäli vastaaja kokee tuulivoiman herättävän tai estävän nukahtamista, häiritsee tuulivoimaloiden ääni ulkona enemmän. Tuulivoimaloiden näkyminen pihaan tai puutarhaan lisää äänen häiritsevyyttä asunnon ulkopuolella. Samoin häiritsevyyttä ulkona koetaan enemmän, mitä lyhempi on etäisyys lähimpään tuulivoimalaan, mitä kielteisempänä pidetään asuinalueen tuulivoimaloiden vaikutusta maisemaan ja mitä kielteisempi on yleinen asenne tuulivoimaa kohtaan. Myös asunnon sisätiloissa häiritsevyydelle erittäin merkittävä selittäjä Honkajoella olivat tuulivoiman vuoksi koetut unihäiriöt; jos vastaaja kokee tuulivoiman herättävän tai estävän nukahtamista, häiritsee tuulivoimaloiden ääni ulkona enemmän. Mitä lyhyempi etäisyys lähimpään tuulivoimalaan vastaajalla oli, sitä häiritsevämpää ääni oli sisätiloissa, joskin tulos oli merkittävydeltään vain suuntaa-antava.

Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyyttä Torkkolassa selitettiin samanlaisella regressiomallilla kuin Honkajoella. Tulokset on esitetty taulukossa 12. Tulos osoittaa, että ulkona koettua häiritsevyyttä selittävät erittäin merkittävästi lyhin etäisyys tuulivoimalaan ja unihäiriöt. Mitä lähempänä asuntoa on tuulivoimala ja mitä enemmän vastaaja kokee unihäiriöitä tuulivoiman takia, sitä enemmän tuulivoimaloiden ääni häiritsee. Merkittävä selittäjä on myös arvioitu tuulivoimaloiden vaikutus maisemaan. Mitä kielteisempänä vastaaja kokee vaikutuksen maisemaan sitä enemmän tuulivoimaloiden ääni häiritsee ulkona. Melkein merkittävä ennustaja äänen ulkohäiritsevyydelle on arvioitu kielteinen vaikutus asuinalueen tuulivoimaloilla omaan terveyteen. Suuntaa antava vaikutus on tuulivoimaloiden näkymisellä omalle pihalle tai puutarhaan. Asunnon sisätiloissa Torkkolassa äänen häiritseväksi kokemiseen vaikuttavat erittäin merkittävästi lyhin etäisyys tuulivoimalaan, koetut tuulivoiman aiheuttamat unihäiriöt ja yleinen asenne tuuli-

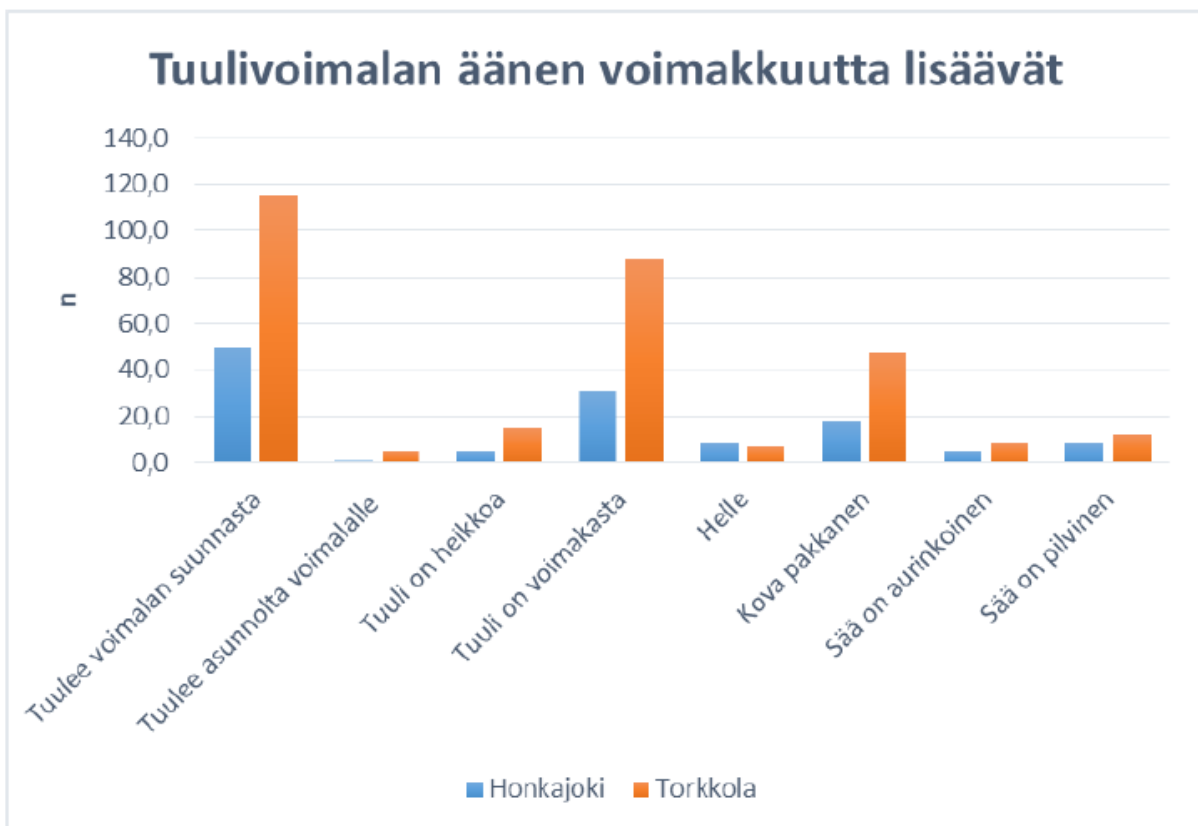


Kuva 47. Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys eri vuodenaikoina ulkona.

voimaa kohtaan. Mitä lähempänä vastaaja on tuulivoimaloita, mitä enemmän tuulivoima aiheuttaa heräämistä tai vaikeuttaa nukahtamista ja mitä kielteisemmin vastaaja suhtautuu tuulivoimaan, sitä enemmän ääni häiritsee sisällä. Melkein merkitsevä vaikutus on arvioidulla vaikutuksella fyysiseen terveyteen. Mitä negatiivisempaan kokee tuulivoimaloiden vaikutuksen omaan terveyteensä, sitä enemmän tuulivoimaloiden ääni häiritsee. Suuntaa antava ennustaja on ikä; iäkkäämmät vastaajat kokevat äänen häiritsevämpänä kuin nuoremmat.



Kuva 48. Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys eri vuodenaikoina sisällä.



Kuva 49. Vastaajien kokemus sään vaikutuksesta tuulivoimaloiden äänen voimakkuuteen asuinalueella.

Taulukko 11. Regressioanalyysit, joilla selitettiin tuulivoimaloiden äänen häiritseväksi kokemista Honkajoella, asunnon ulkopuolella ja asunnon sisätiloissa.

Honkajoki		Standardoi- tu regressio- kerroin	t-arvo
Vakiotermi	Ulkona		1,991*
	Sisällä		2,518*
Sukupuoli ^a	Ulkona	-0,014	-0,282
	Sisällä	-0,052	-0,922
Ikä	Ulkona	-0,047	-0,884
	Sisällä	-0,006	-0,098
Työssäkäynti	Ulkona	0,002	-0,043
	Sisällä	0,033	0,522
Lyhin etäisyys tuulivoimalaan	Ulkona	-0,109	-2,201*
	Sisällä	0,102	-1,798
Näkykö pihalta/puutarhasta ^b	Ulkona	0,158	3,247**
	Sisällä	-	
Näkykö ikkunasta/parvekkeelta ^b	Ulkona	-	
	Sisällä	0,050	0,864
Vaikutus maisemaan	Ulkona	-0,128	-2,053*
	Sisällä	-	
Vaikutus terveyteen	Ulkona	0,067	1,008
	Sisällä	-0,063	-0,838
Koetut unihäiriöt	Ulkona	0,702	10,775***
	Sisällä	0,611	8,210***
Osallistumismahdollisuus suunnitteluvaiheessa	Ulkona	-0,023	-0,443
	Sisällä	-0,002	-0,032
Yleinen asenne tuulivoimaa kohtaan	Ulkona	-0,129	-2,088*
	Sisällä	0,096	-1,361

^aMiehet verrattuna naisiin,^bTuulivoimaloiden näkyminen pihalta tai puutarhasta (äänen ulkohäiritsevyyden selittäjänä) tai tuulivoimaloiden näkyminen ikkunasta tai parvekkeelta (äänen sisähäiritsevyyden selittäjänä)

Taulukko 12. Regressioanalyysit, joilla selitettiin tuulivoimaloiden äänen häiritseväksi kokemista Torkkolassa, asunnon ulkopuolella ja asunnon sisätiloissa.

Torkkola		Standardoi- tu regressio- kerroin	t-arvo
Vakiotermi	Ulkona		6,176
	Sisällä		4,603
Sukupuoli ^a	Ulkona	-0,028	-0,476
	Sisällä	-0,073	-1,601
Ikä	Ulkona	-0,015	-0,223
	Sisällä	0,088	1,658
Työssäkäynti	Ulkona	0,020	0,306
	Sisällä	0,056	1,108
Lyhin etäisyys tuulivoimalaan	Ulkona	-0,251	-4,025***
	Sisällä	-0,173	-3,625***
Näkykö pihalta/puutarhasta ^b	Ulkona	0,107	1,753
	Sisällä	-	
Näkykö ikkunasta/parvekkeelta ^b	Ulkona	-	
	Sisällä	0,098	2,088*
Vaikutus maisemaan	Ulkona	-0,228	-3,036**
	Sisällä	0,085	1,492
Vaikutus terveyteen	Ulkona	-0,147	-2,008*
	Sisällä	-0,128	-2,264*
Koetut unihäiriöt	Ulkona	0,362	5,017***
	Sisällä	0,625	11,434***
Osallistumismahdollisuus suunnitteluvaiheessa	Ulkona	0,059	0,990
	Sisällä	-0,006	-0,124
Yleinen asenne tuulivoimaa kohtaan	Ulkona	-0,068	-0,863
	Sisällä	-0,223	-3,781***

^aMiehet verrattuna naisiin,^bTuulivoimaloiden näkyminen pihalta tai puutarhasta (äänen ulkohäiritsevyyden selittäjänä) tai tuulivoimaloiden näkyminen ikkunasta tai parvekkeelta (äänen sisähäiritsevyyden selittäjänä)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa mitattiin ja mallinnettiin tuuliturbiinin äänitehotaso ja äänenpainetaso altistuvassa kohteessa sekä mitattiin äänen syntyyn ja etenemiseen liittyviä sääolosuhteita. Tutkimuksessa kehitettiin älypuhelimella käytettävä järjestelmä, jolla voidaan antaa palautetta tuulivoimalan äänestä reaaliaikaisesti eli sillä hetkellä kuin havainto tehdään. Tuulivoimaloiden lähellä asuvien ihmisten kokemuksia ja käsityksiä äänestä selvitettiin kyselytutkimuksella. Seuraavassa saatuja tuloksia tarkastellaan siten, että pyrkimys on muodostaa kokonaiskuva: miten ääni koetaan tutkimusalueella ja mitkä äänen ominaisuudet, ilmiöt tai ihmisen persoonallisuustekijät tätä mahdollisesti selittävät.

6.1 Äänen kuuluminen ja häiritsevyys

Suurin osa kyselyyn vastanneista asukkaista ei ole kuullut tuulivoimaloiden ääntä Honkajoella ulkona eikä sisällä asunnossa. Torkkolassa äänen on ulkona kuullut kolme neljästä vastaajasta ja sisällä noin puolet. Äänen erilaista kuulumista saattaa selittää sekin, että Torkkolan vastaajat olivat keskimäärin hieman lähempänä tuulivoimaloita asuvia ihmisiä kuin Honkajoella.

Keskimäärin ääntä ei kuitenkaan pidetty kovin häiritsevänä ulkona eikä sisällä kummallakaan tutkimuspaikkakunnalla. Tuulivoimaloiden ääni ei myöskään ollut pahin unihäiriöiden aiheuttaja, vaan heräämistä ja nukahtamisvaikeuksia aiheuttivat enemmän asumiseen liittyvät äänet sisällä ja ulkona sekä tieliikennemelu.

Mikäli tuulivoimaloiden äänen koki häiritsevänä, ajoittui häiritsevä melu yöhön ja varhaiseen aamuun kummallakin tutkimuspaikkakunnalla sekä sisällä että ulkona, joskin kaikkein häiritsevintä ääni oli ulkona iltapäivällä. Vuodenajoista Honkajoella ulkona ja sisällä pahimpia olivat kesä ja syksy, Torkkolassa ulkona syksy ja talvi ja sisällä kesä ja talvi.

Tuulivoimalan suunnasta puhaltava tuuli lisäsi asukkaiden kokemuksen mukaan äänen voimakkuutta sekä Honkajoella että Torkkolassa. Myös voimakas tuuli ja kova pakkanen vaikuttivat tuulivoimaloiden ääntä voimistavasti asuinalueella. Mittauksissa ei kuitenkaan löydetty tuulen suunnan ja äänen voimakkuuden välille tilastollisesti merkitsevää riippuvuutta.

Honkajoella tuulivoimaloiden äänen häiritsevyyttä sisällä ja ulkona ennustavat merkitsevästi koetut unihäiriöt. Tuulivoimaloiden näkyminen pihalle ennustaa äänen häiritsevyyttä ulkona. Mitä lähempänä tuulivoimaloita asuu, mitä kielteisemmäksi arvioi tuulivoimaloiden aiheuttaman maisemavaikutuksen ja mitä kielteisempi on asenne tuulivoimaa kohtaan, sitä enemmän ääni häiritsee.

Torkkolassa sekä sisällä että ulkona äänen häiritsevyyttä ennustavat lyhyt etäisyys asuinpaikan ja tuulivoimaloiden välillä, koetut unihäiriöt sekä arviot tuulivoimaloiden kielteisestä vaikutuk-

sesta omaan terveyteen. Ulkona ääni häiritsee enemmän, mikäli vaikutus maisemaan koetaan negatiivisena. Lisäksi ääni häiritsee sisällä enemmän, mikäli yleinen asenne tuulivoimaa kohtaan on kielteinen tai tuulivoimalat näkyvät ikkunasta tai parvekkeelta.

6.2 Tuulivoimaloiden ääni

Mitatut tuulivoimalat tuottivat melko usein infraäänitaajuuksilla tapahtuvaa jaksollista paineenvaihtelua roottorin lavan ohittaessa tornin. Sopivissa sääolosuhteissa tämä paineenvaihtelu voi olla herkillä mittalaitteilla havaittavissa vielä useiden kilometrien päässäkin. Kirkkokallion tuulipuistossa tämä paineenvaihtelu havaittiin 2 km etäisyydellä lähimmästä turbiinista noin 10% ajasta, mutta sen voimakkuuden havaittiin kuitenkin olevan niin pieni, että sillä ei ole käytännön merkitystä edes turbiinin juurella, jossa se on voimakkain. Puolen vuoden tarkastelujakson aikana paineenvaihtelun voimakkuus 2 km etäisyydellä oli voimakkaimmillaankin keskiarvoltaan vain noin 40 mPa, hetkellisarvon ollessa noin kaksi kertaa isompi (80 mPa). Ihminen altistuu jokapäiväisessä elämässään jatkuvasti moninkertaisille paineenvaihteluille, jo kävellessään, sillä pään korkeuden parin senttimetrin muutos aiheuttaa jo kaksinkertaisen paineenvaihtelun. Asunnon ulko-oven avaaminen aiheuttaa 80 kertaisen paineenvaihtelun, eikä sitäkään yleensä huomata. Tutkimuksessa verrattiin Kirkkokallion tuuliturbiinien aiheuttamaa jaksollista paineenvaihtelua myös Torkkolan ja Santavuoren turbiineihin. Tarkastelujakso näiden osalta on huomattavan paljon lyhyempi, mutta mittaustulokset olivat samansuuntaisia, joten ei ole syytä olettaa, että myöskään näillä toisilla alueilla tällaisilla paineenvaihteluilla olisi minkäänlaista käytännön merkitystä.

Tuulivoimalat tuottavat infraäänialueella energiaa koko ajan toimiessaan. Tämä energia ei kuitenkaan ylitä ihmisen kuulokynnystä edes turbiinin juurella, eikä varsinkaan kaukana tuulivoimaloista. Nykytietämyksen mukaan infraäänimelulla ei ole terveysvaikutuksia ihmiseen, jos se ei ole kuuluvaa, ja koska tuuliturbiinien infraäänitaajuinen ääni on kaukana kuuloluuesta, sillä ei pitäisi olla terveysvaikutuksia. Liikkeessä olevan auton sisällä melu on myös infraäänitaajuuksilla paljon tuuliturbiinien tuottamaa ääntä voimakkaampaa, eikä senkään terveysvaikutuksista yleensä valiteta. Siksi tuuliturbiinien tuottamaa infraääntä ei voida pitää merkityksellisenä, eikä tutkimuksen aikana löytynyt mitään syytä, miksi meluvaikutuksia arvioitaessa ei tulevaisuudessakin kannattaisi melun keskimääräisen tason arvioinnissa pitäytyä ihmisen kuulokäyrän mukaan A-painotettujen melumittareiden käytössä, mahdollisesti kuitenkin huomioiden merkityksellisen sykkivyyden ja joissain tilanteissa myös tonaalisuuden tuoma subjektiivinen lisävaikutus häiritsevyyden kokemukseen.

Tuulivoimaloiden vaikutusta altistuvan kohteen äänenpainetasoon on yleensä vaikea mitata, koska voimaloiden vaikutusten pitää melurajoitusten mukaan olla alhaisia, alle 40 dBA, jolloin ympäristössä on usein monia yhtä voimakkaita, tai voimakkaampia äänilähteitä, luonnon omista äänistä lähtien. Tutkimuksen perusteella näyttäisi siltä, että pitkäaikaisten äänimittausten ja äänilähteiden luokittelun avulla voitaisiin ainakin varmistaa, ylitetäänkö mallinnuksen avulla arvioidut melutasot vai ei. Äänilähteitä luokittelemalla voidaan tuulivoimaloiden vaikutusten

arviointiin tarvittavaa mittausaikaa lyhentää. Samalla pystytään myös analysoimaan ympäristön äänimaisema, eli mitä äänilähteitä alueella on, kuinka paljon niistä kukin vaikuttaa äänenpainetasoon ja mihin aikaan vuorokaudesta tai vuodesta ne vaikuttavat. Analyysien perusteella näyttäisi esimerkiksi siltä, että Kirkkokallion valitussa mittauspisteessä tuulivoimaloiden vaikutus äänenpainetasoon ei ole ainakaan mallinnettua suurempi. Vaikka äänenpainetasot olivatkin sallittujen rajojen alapuolella, muutama asukas koki tuulivoimaloiden äänen välillä häiritseväksi. On mahdollista, että tutkijoiden itsekin havaitsema äänen sykkivä luonne kyseisessä mittauspaikassa on yksi äänen häiritsevyyttä kasvattava osatekijä.

Viitteet

- Antila, M. & Kataja, J. (2013). Tuulivoimamelun kuunneltava malli. Turku, 166–170.
- Bakker, R.H., Pedersen, E., van den Berg, G.P., Stewart, R.E., Lok, W. & Bouma, J. (2012). Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of The Total Environment* 425, Supplement C, 42–51. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712003373>.
- Barlas, E., Zhu, W.J., Shen, W.Z. & Andersen, S.J. (2016). Wind Turbine Noise Propagation Modelling: An Unsteady Approach. *Journal of Physics: Conference Series* 753, 2, 022003. URL <http://stacks.iop.org/1742-6596/753/i=2/a=022003>.
- Bass, J., Cand, M., Coles, D., Irvine, G., Leventhall, G., Levet, T., Miller, S., Sexton, D. & Shelton, J. (2015). Methods for rating amplitude modulation in wind turbine noise.
- Bountourakis, V., Vrysis, L. & Papanikolaou, G. (2015). Machine Learning Algorithms for Environmental Sound Recognition: Towards Soundscape Semantics. In *Proceedings of the Audio Mostly 2015 on Interaction With Sound*, AM '15. New York, NY, USA: ACM, 5:1–5:7. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2814895.2814905>.
- Bowdler, D. & Leventhall, H.G. (2011). *Wind turbine noise*. Brentwood, Essex: Multi-Science Pub. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=493671>.
- Bräuner, E.V., Jørgensen, J.T., Duun-Henriksen, A.K., Backalarz, C., Laursen, J.E., Pedersen, T.H., Simonsen, M.K. & Andersen, Z.J. (2018). Long-term wind turbine noise exposure and incidence of myocardial infarction in the Danish nurse cohort. *Environment International* 121, 794–802. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018315228>.
- Comission, I.E. (2006). IEC 61400-11 Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
- Doolan, C.J., Moreau, D.J., Brooks, L.A., Hessler Jr, G.F., Schomer, P.D., Tonin, R., Evans, T., Cooper, J., Najera, L., Turnbull, C. & others (2012). Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. *Acoustics Australia* 40, 1, 7–13.
- Fitch, A.C., Olson, J.B., Lundquist, J.K., Dudhia, J., Gupta, A.K., Michalakes, J. & Barstad, I. (2012). Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parameterized in a Mesoscale NWP Model. *Monthly Weather Review* 140, 9, 3017–3038. URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/mwr-d-11-00352.1>.
- Fukushima, A., Yamamoto, K., Uchida, H., Sueoka, S., Kobayashi, T. & Tachibana, H. (2013). Study on the amplitude modulation of wind turbine noise: Part 1–Physical investigation. In *Proc. Inter-noise*, volume 2013.
- Hansen, C., Zajamšek, B. & Hansen, K. (2016). Infrasound and Low-Frequency Noise from Wind Turbines. In Y. Zhou, A.D. Lucey, Y. Liu & L. Huang (Eds.) *Fluid-Structure-Sound Interactions and Control*, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 3–16. URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-48868-3_1.
- Hines, K.M. & Bromwich, D.H. (2008). Development and Testing of Polar Weather Research and Forecasting (WRF) Model. Part I: Greenland Ice Sheet Meteorology. *Monthly Weather Review* 136, 6, 1971–1989. URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2007MWR2112.1>.
- Huttunen, R. (Ed.) (2017). *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030*. Työ- ja elinkeinoministeriö. URL <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79189>.

Keith, S.E., Feder, K., Voicescu, S.A., Soukhovtsev, V., Denning, A., Tsang, J., Broner, N., Leroux, T., Richarz, W. & van den Berg, F. (2016a). Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, 3, 1436–1442. URL <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4942404>.

Keith, S.E., Feder, K., Voicescu, S.A., Soukhovtsev, V., Denning, A., Tsang, J., Broner, N., Richarz, W. & van den Berg, F. (2016b). Wind turbine sound power measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, 3, 1431–1435. URL <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4942405>.

Kim, H., Lee, S. & Lee, S. (2011). Influence of blade-tower interaction in upwind-type horizontal axis wind turbines on aerodynamics. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25, 5, 1351. URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-011-0311-5>.

Koh, T.Y., Wang, S. & Bhatt, B.C. (2012). A diagnostic suite to assess NWP performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117, D13, D13109. URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JD017103/abstract>.

Lee, S., Lee, D. & Honhoff, S. (2016). Prediction of far-field wind turbine noise propagation with parabolic equation. *JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA* 140, 2. URL <http://escholarship.org/uc/item/51j597qx>.

Michaud, D.S., Feder, K., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Denning, A., McGuire, D., Bower, T., Lavigne, E., Murray, B.J., Weiss, S.K. & van den Berg, F. (2016a). Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, 3, 1443–1454.

Michaud, D.S., Keith, S.E., Feder, K., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Bower, T., Denning, A., Lavigne, E., Whelan, C., Janssen, S.A., Leroux, T. & van den Berg, F. (2016b). Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, 3, 1455–1466. URL <http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4942390>.

Moller, H. & Pedersen, C.S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and Health* 6, 23, 37. URL <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=37;epage=57;aulast=;type=0>.

Nissenbaum, M.A., Aramini, J.J., Hanning, C.D. & others (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise and Health* 14, 60, 237.

Nordtest (2002). Acoustics: Prominence of impulsive sounds and for adjustment of Laeq (NT ACOU 112) - Nordtest.info. URL <http://www.nordtest.info/index.php/methods/item/acoustics-prominence-of-impulsive-sounds-and-for-adjustment-of-laeq-nt-acou-112.html>.

Nykänen, H., Uosukainen, S., Antila, M. & Siponen, D. (2014). TUULIVOIMALAN MELUVAIKUTUKSET: Häiritsevyysmittaristo ja sen käyttö. URL <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04392-14.pdf>. 00000.

Nykaza, E.T., Boedihardjo, A.P., Blevins, M.G., Hulva, A.M. & Valente, D. (2015). Classification of environmental noise sources using machine-learning methods. *The Journal of the Acoustical Society of America* 138, 3, 1731–1731. URL <http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4933450>.

Onakpoya, I.J., O'Sullivan, J., Thompson, M.J. & Heneghan, C.J. (2015). The effect of wind turbine noise on sleep and quality of life: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Environment International* 82, 1–9. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412015001051>.

- Palmer, W. (2009). A new explanation for wind turbine whoosh–wind shear. In *Proceedings of Third International Meeting on Wind Turbine Noise*. Aalborg, Denmark.
- Pawlaczyk-Łuszczynska, M., Dudarewicz, A., Zaborowski, K., Zamojska-Daniszewska, M. & Waszkowska, M. (2014). Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: A pilot study. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 27, 3, 364–388. URL <https://link.springer.com/article/10.2478/s13382-014-0252-1>.
- Pedersen, E. & Larsman, P. (2008). The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology* 28, 4, 379–389. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494408000224>. 00080.
- Pedersen, E. & Wayne, K.P. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America* 116, 6, 3460–3470. URL <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/116/6/10.1121/1.1815091>. 00324.
- Pilger, C. & Ceranna, L. (2017). The influence of periodic wind turbine noise on infrasound array measurements. *Journal of Sound and Vibration* 388, 188–200. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X16305612>.
- Poulsen, A.H., Raaschou-Nielsen, O., Peña, A., Hahmann, A.N., Nordborg, R.B., Ketzler, M., Brandt, J. & Sørensen, M. (2018). Pregnancy exposure to wind turbine noise and adverse birth outcomes: a nationwide cohort study. *Environmental Research* 167, 770–775. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935118304985>.
- Ratzel, U., Bayer, O., Brachat, P., Hoffmann, M., K, J., Kiesel, K., Mehnert, C. & Scheck, C. (Eds.) (2016). *Low-frequency noise incl. infrasound from wind turbines and other sources*. Ministry for the Environment, Climate and Energy of the Federal State of Baden-Wuerttemberg; State Office for the Environment, Measurement and Nature Conservation of the Federal State of Baden-Wuerttemberg. URL <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/262445/>.
- Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaefer, R., Sims, R., Smith, P. & Wiser, R. (2014). Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. URL https://books.google.com/books/about/Climate_Change_2014_Impacts_Adaptation_a.html?id=aJ-TBQAAQBAJ.
- Shepherd, D. & Billington, R. (2011). Mitigating the Acoustic Impacts of Modern Technologies Acoustic, Health, and Psychosocial Factors Informing Wind Farm Placement. *Bulletin of Science, Technology & Society* 31, 5, 389–398. URL <http://bst.sagepub.com/content/31/5/389>.
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W. & Powers, J. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR technical note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. *National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA*.
- Tanweer, S., Mobin, A. & Alam, A. (2016). Environmental Noise Classification using LDA, QDA and ANN Methods. *Indian Journal of Science and Technology* 9, 33. URL <http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/95628>.
- Taylor, J., Eastwick, C., Lawrence, C. & Wilson, R. (2013). Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines. *Renewable Energy* 55, Supplement C, 120–127. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112007665>.
- Tsau, E., Chachada, S. & Kuo, C.C.J. (2012). Content/context-adaptive feature selection for environmental sound recognition. In *Proceedings of The 2012 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*. 1–5.

Uosukainen, S. (2010). *Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys*. VTT.

Van den Berg, G.P. (2006). The sound of high winds. The effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise URL http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:38004386.

Vanderkooy, J. & Mann, R. (2015). Measuring Wind Turbine Coherent Infrasound. *Wind Turbine Noise* , 20–23.