

TUULIVOIMALOIDEN INFRAÄÄNI

Panu Maijala¹

¹ VTT
PL 1000
02044 VTT
Panu.Maijala@vtt.fi

Tiivistelmä

Suurten tuulivoimaloiden tiedetään tuottavan kuultavan äänen lisäksi infraäänä, mutta luotettavia, jäljitettävästi kalibroituja mittaustuloksia ei kirjallisuudesta vielä löydy. Mittasimme kahden viikon ajan kahden erilaisen tuulivoimapuiston tuottamaa ääntä mittalaitteilla, joiden herkkyys on jäljitettävissä taajuusvälillä 0.05 ja 20 kHz. Tässä esityksessä kerromme, mitä mittaustuloksista paljastui ja mitä haasteita taajuusalueen laajentamiseen infraäänille liittyy.

1 JOHDANTO

Tuulivoimaloiden tuottamaan ääneen liittyy paljon ennakkoluuloja ja uskomuksia. Yksi kysymyksiä herättänyt asia on tuuliturbiinien tuottama infraääni ja sen terveysvaikutukset. Tuuliturbiinien infraäänimittauksista löytyy suuri määrä julkaisuja, joista osa on myös vertaisarvioituja [1–12]. Käytännössä yksikään julkaisuista ei täytä riittäviä ulkoisen validiteetin kriteereitä, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään. Jakobsen teki yhteenvedon vuoteen 2005 mennessä julkaistuista tuuliturbiinien infraäänimittauksista ja totesi, ettei mikään julkaisuista sisältänyt kaikkia tarvittavia taustatietoja: ympäristöolosuhteista, tuulivoimaloiden tyypit, signaalianalyysi (esim. integrointiajan pituus) ja lisäksi jokaisesta puuttui taustamelutaso [13].

Infraäänen määrittävä taajuusalue ei ole eksakti, mutta yleensä tarkoitetaan alle 20 Hz:n taajuuksia. Joissakin tuulivoimamelua käsittelevissä artikkeleissa infraääneneen saatetaan viitata jo taajuusalueena 20–200 Hz [11, 14]. Berger kumppaneineen mittasi immisiotasoja useilla etäisyyksillä (400–900 m) ja myös sisätiloista [14]. Lisäksi he koostivat julkaisuunsa taulukot eri maiden kansallisista ohje- ja raja-arvoista tuulivoiman infraäänelle. Yhden hertsin alapuolelle ulottuvia mittaustuloksia on vertaisarvioituna julkaistu huomattavasti vähemmän. Esimerkiksi NCEJ:ssä julkaistussa Japanin ympäristöministeriön laajassa tutkimuksessa tulokset on esitetty alkaen taajuudesta 0.8 Hz [15], mistä on vielä pitkä ja työläs prosessi laajentaa mittaus- ja analyysikapasiteettia esimerkiksi kolme oktaavia alemmaksi, taajuuteen 0.1 Hz, mikä on tässä paperissa esitettävien tulosten alarajataajuus.

Tutkimuksemme tavoite oli selvittää keskimääräisiä tuulivoimatuotantoalueiden ympäristössä esiintyviä infraäänitasoja ja verrata mitattuja tasoja luonnontilaisen metsän ja kaupunkiympäristön infraäänitasoihin.

2 METODI

Mittauspaikkoja valittaessa ensisijaisina mittauskohteina pidettiin tuulivoimatuotantoalueita, joissa turbiinit ovat teholtaan suuria, yli 3 MW. Muita valintakriteereitä tutkitaville tuotantoalueille olivat: kertomukset ääneen liittyvistä ongelmista, ympäristön topografia, tuulen suunta, asutuksen esiintyminen (0.7–3 km välillä) ja mittausten toteutettavuuden kannalta sähkön saanti sekä huoltoyhteydet. Valintakriteerit huomioiden mittauskohteiksi valikoituivat Salon Märynummen (kolme Gamesan G128 -tyyppistä 5 MW:n tuuliturbiinia) ja Siikaisten Jäneskeitaan (kahdeksan Vestas V126 -tyyppistä 3.3 MW:n tuuliturbiinia) tuulivoimatuotantoalueet sekä luonnon taustamelun vertailualueeksi Hyytiälän tutkimusasema Juupajoella ja kaupunkialueeksi Tampereen Hervanta.

Infraääniä mitattiin molempien tuulivoimatuotantoalueiden ympäristössä noin 2 viikkoa kahdella etäisyydellä. Tuulivoimaloiden emissiotasoja mitattiin n. 200 metrin etäisyydellä lähimmästä turbiinista (kts. kuva 1) ja immisiotasoja 2–3 km etäisyydellä lähimmästä turbiinista (2).



Kuva 1: Emissiomittauspiste Salon Märynummella.



Kuva 2: Siikaisten immissiomittauspiste. Samanlainen mittausjärjestely oli jokaisella mittauspisteellä ja lisäksi mikrobarometri emissiomittauspisteillä.

Akustisina antureina mittauksissa käytettiin infraäänimikrofoneja (G.R.A.S. 47AC) sekä mikrobarometriä (Chaparral Physics Model 25). Mikrofonien valmistajan ilmoittamat taajuusvasteen kalibrointiarvot kattoivat taajuusalueen 0.05–20 000 Hz ja niiden herkkyyttä infraäänialueella seurattiin kampanjan aikana infraäänikalibraattorilla (G.R.A.S. 42AE) taajuusvälillä 0.05–250 Hz, pistofonilla, sekä ennen ja jälkeen mitausten tehdyin kaiuntahuonemittauksin. Jokaisella mittauspisteellä oli kaksi mikrofoonia: toinen sääsuojassa (B&K 4198) 2 m:n korkeudella ja toinen horisontaalitasossa 2 m:n etäisyydellä maalevytuulisuojassa (Microtech Gefell GFM 920.1) siten, että kumpikin olivat samalla etäisyydellä lähimmästä tuuliturbiinista.

Lisäksi kaikilla mittauspisteillä mitattiin meteorologisia perussuureita kahdella korkeudella (2 ja 10 m) Davis Vantage Pro 2 Plus -sääasemia käyttäen.

IEC 61400-11 -standardin [16] mukainen emissiomittaus antaa luotettavimman arvion voimaloiden tuottamasta äänestä. Mittaus suoritetaan tuulen eri nopeuksilla ja myös tuuliturbiini pysäytettynä. Mittausaikataulumme ei mahdollistanut vastaavaa, eri tuulen nopeudet kattavaa mittausa, mutta saimme toteutettua mittaukset yhdelle pysäytys- ja pyörimissyklille Siikaisissa: yhteistyössä tuulivoimatuottajan operaattorin kanssa kaikki tuulivoimatuotantoalueen 8 tuuliturbiinia pysäytettiin tuulisena päivänä, jotta saatiin vertailudataa normaalitilanteen lisäksi. Samaa yritettiin Salossa, mutta kevätmyrskystä johtunut laaja sähkökatkos esti toteutuksen.

Akustisten antureiden signaalit tallennettiin keskeytyksettä 24-bittisinä lineaarisina PCM-signaaleina 48 kHz:n näytteenottotaajuudella. Keskimääräinen signaalienergia laskettiin integroimalla neliöidyt äänenpainetasot ajan suhteen 10 minuutin jaksoissa. Kaikki tuloksissa esiintyvät vakiokaistaspektrit on laskettu IEC 61260-standardin [17] mukaisilla FFT-suotimilla terssikaistoittain taajuuksivälillä 0.1–10 000 Hz ja keskiäänitasot on laskettu vain kuvissa näkyville kaistoille painotuksineen. Keskiäänitasot esitetään painottamattomina (L_Z), A-painotettuina (L_A) ja G-painotettuina (L_G) [18, 19]. Mahdolliset muut melulähteet poistettiin laskemalla ensin keskiäänitaso koko mittausjason yli ja sen jälkeen poistettiin 10 minuutin jaksoista ne, joissa millä tahansa taajuuskaistalla esiintyi yli 20 dB suurempi taso, kuin ensin lasketussa keskiäänitasossa. Näitä poistettuja jaksoja oli muutamia, esimerkiksi traktorilla ajo mikrofonien viereltä, ja ne käyvät ilmi tuloksista: vertaamalla mitatun aikajakson pituutta ja hyväksytyjen 10 minuutin jaksojen lukumäärää N .

Mittaustuloksille ei ole tehty maaheijastuskorjausta (−6 dB), koska se ei ole infraäänitaajuuksilla perusteltua ja vertailun helpottamiseksi vuoksi kaikki tuloksissa esitettävät keskiäänitasot ovat ilman maaheijastuskorjausta.

Tarkempi kuvaus mittausjärjestelyistä topografiakarttoineen ja koordinaatteineen löytyy Työ- ja elinkeinoministeriön raportista numero 28 [20].

3 TULOKSET

Tässä kappaleessa esitetään ainoastaan tärkeimmät tulokset, yksityiskohtaisemmat tulokset keskiäänitasospektreineen löytyvät Työ- ja elinkeinoministeriön raportista [20].

Kaupunkiympäristössä mitatut keskiäänitasot olivat samaa suuruusluokkaa kummallakin tuulivoiman tuotantoalueella mitattujen emissiotasojen kanssa, katso taulukko 1. Hervannassa ja Siikaisissa tuli sama tulos lineaarisesti keskiäänitasoksi: 73 dB, toisaalta Hervannassa mittaus tehtiin viikonlopun yli, jolloin liikenne oli vähäisempää kuin arkipäivisin.

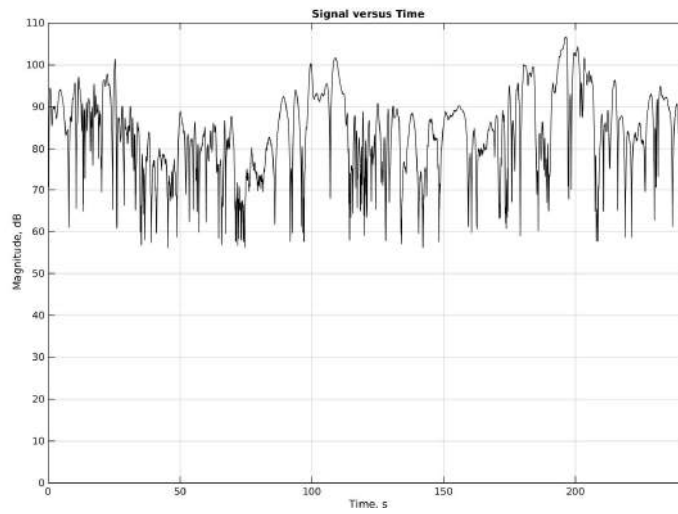
Hyytiälässä mitatut infraäänitasot olivat merkittävästi pienemmät kuin muualla, vaikka seudulla oli viikonlopun yli kestänyt sotaharjoitus.

Taulukko 1: Keskiäänitasojen [dB] vertailu eri mittauspisteillä, validit 10 minuutin jaksojen lukumäärät N ja mittausajanjaksot

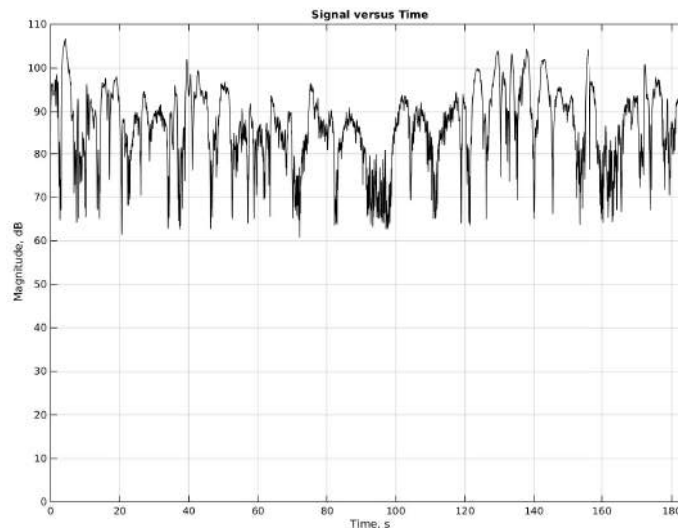
Mittauspiste	L_A	L_G	L_Z	N	mittausajanjakso
Hervanta	49	62	73	587	20.04. – 24.04.2017
Hyytiälä	47	46	54	549	20.04. – 24.04.2017
Salo emissio	50	63	70	1807	05.04. – 18.04.2017
Salo immissio	41	51	65	1822	05.04. – 18.04.2017
Siikainen emissio	49	64	73	1932	25.04. – 09.05.2017
Siikainen immissio	41	51	63	2010	25.04. – 09.05.2017

Kontrolloitu emissiomittaus ja tuuliturbiinien pysäytys toteutettiin maanantaina 8.5.2017. Mitatut painottamattomat keskiäänitasot muodostuvat käytännössä infraäänestä. Voimakas turbulenti tuuli aiheutti huomattavan suuret infraäänitasot, kun kaikki tuuliturbiinit

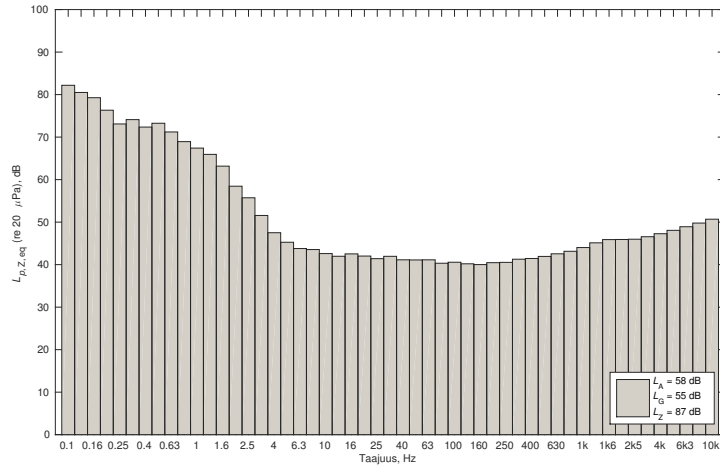
olivat pysäytettyinä ($L_Z = 87$ dB) ja eikä liukuvalla 50 ms:n aikaikkunalla laskettu ajallinen vaihtelu kuva 3) poikennut tilanteesta, jossa tuuliturbiinit pyörivät nimellisa nopeudellaan (kuva 4). Molemmissa tilanteissa huippuarvoksi saatiin 107 dB.



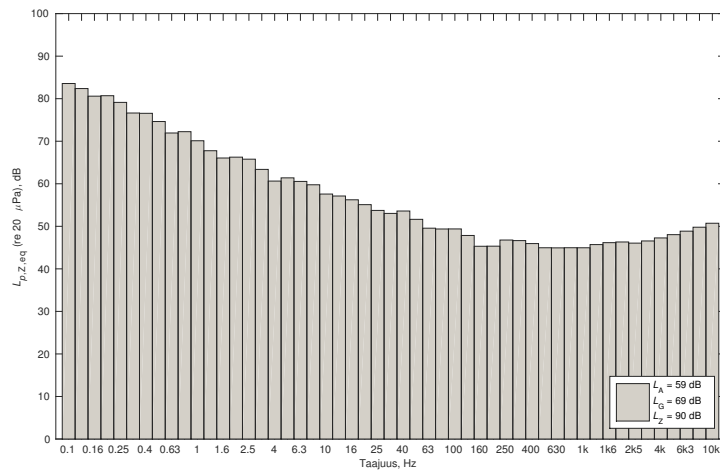
Kuva 3: Taustamelutason ajallinen vaihtelu.



Kuva 4: Tuuliturbiinien emissiotason ajallinen vaihtelu.



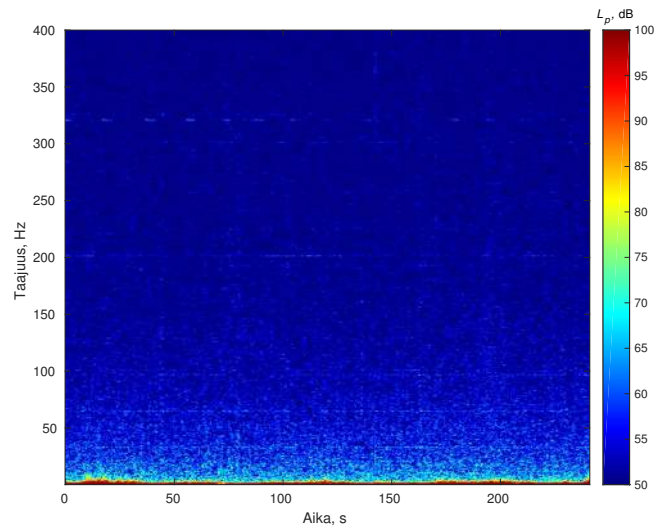
Kuva 5: Keskiäänitaso tuuliturbiinit pysäytettynä.



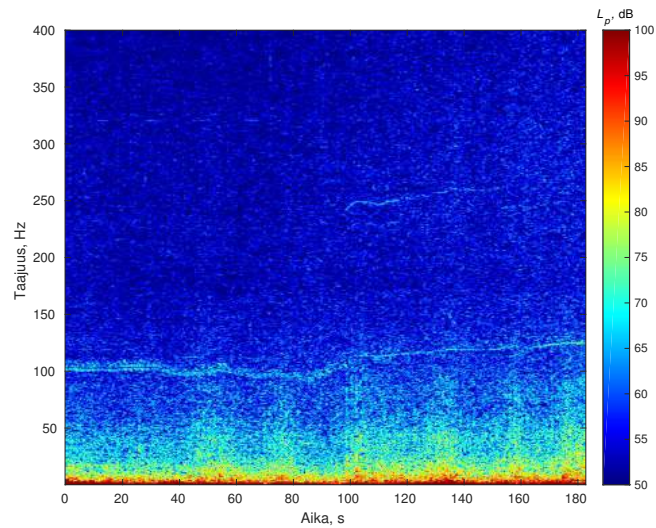
Kuva 6: Keskiäänitaso tuuliturbiinien pyöriessä normaalisti.

Painottamaton keskiäänitaso nousi kolme desibeliä ($L_Z = 90$ dB), kun tuuliturbiinit käynnistettiin pyörimään nimellisa nopeudellaan, mutta selkeimmin turbiinien melu kävi ilmi kuuloalueella sijaitsevilta taajuuskaistoilta (alle 100 Hz, vertaa kuvat 5 ja 6). G-painotettu keskiäänitaso paljasti turbiinien pyörimisen selkeämmin: taso nousi 55 desibelistä 69 desibeliin.

Ajallista vaihtelua voidaan tarkastella myös spektrogrammien avulla: niistä voidaan päätellä, mm. millä taajuusalueella vaihtelu on ajan funktiona (kuvat 7 ja 8, spektrogrammien taajuus- ja aikaresoluutiot ovat 0.5 Hz/1.6 s).



Kuva 7: Taustamelun spektrin ajallinen vaihtelu tuuliturbiinien ollessa pysäytettyinä.



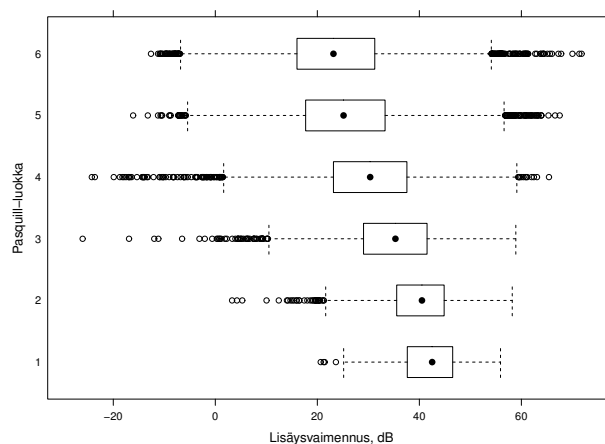
Kuva 8: Emissiospektrin ajallinen vaihtelu tuuliturbiinien pyöriessä normaalisti.

4 DISKUSSIO

Mittausalueen laajentaminen alle 1 Hz:n osoittautui erittäin haasteelliseksi. Suurimmat haasteet liittyivät kalibrointiin ja mittaustulosten analyysiin. Infraäänitaajuuksilla kaikki tapahtumat ovat erittäin hitaita, minkä vuoksi kaikki toiminnot, esimerkiksi kalibrointi, vaativat merkittävästi enemmän aikaa verrattuna toimintoihin suuremmilla taajuuksilla. Taajuudet kalibroidaan pisteittäin, esimerkiksi terssikaistojen keskitaajuuksilla, yksi taajuus kerrallaan ja koska mittausepävarmuuden minimoimiseksi sinijaksoja täytyy kerätä riittävä määrä, kestää yhden mikrofonin kalibrointi useita tunteja. Lisäksi mikrofonin ja kalibraattorin sovittimen tiiviyteen tulee kiinnittää erityisesti huomiota, koska hitaampien ilmiöiden vuoksi paine ”ehtii” helpommin vuotamaan kalibrointikammioista. Mittausalueen laajentaminen lisää myös mittaustulosten analyysin vaatimuksia laskentatoholle: tilastollisen epävarmuuden pienentämiseksi kerralla täytyy käsitellä ajallisesti pitkiä näytejonoja. Tässä hankkeessa laskenta tehtiin laajakaistaisena (Fs 48 kHz) ja kuukauden mittaustulosten käsittely vei yli kolme vuotta CPU-aikaa.

Mikrobarometrin tärkein etu mikrofoniin nähden on tuulen aiheuttaman paikallisen painevaihtelun suodattaminen pois jopa kymmenien metrien pituisten letkujen avulla. Letkujen ansiosta mikrobarometrin mittaama painevaihtelu on letkujen kattaman alueen spatiaalinen keskiarvo. Yritimme toteuttaa myös mikrobarometrin herkkyyden kalibroinnin kaiuntahuoneessa, mutta jouduimme toteamaan, ettei se sovellu äänitasojen seurantaan suuren mittausepävarmuuden vuoksi [18]: itse sensorin herkkyys on toistettavasti kalibroitu katiuntahuoneessa, mutta laitteeseen liitettävät letkut muuttavat herkkyyttä täysin hallitsemattomalla tavalla, jopa kymmeniä desibelejä.

Suurimman mittausepävarmuuden ympäristöakustiikan mittauksiin tuottavat sää ja muuttuvat ympäristöolosuhteet. Näistä ympäristötekijät, kuten ilman, maaperän tai muiden pintojen absorptio voidaan jossain määrin ottaa huomioon, joko laskennallisesti tai mittaustilanteen valinnassa. Sen sijaan sää aiheuttama vaihtelu muuttuu sitä haasteellisemmaksi, mitä kauemmaksi äänilähteestä siirrytään. Immissiomittauksissa sää vaikutus mittausepävarmuuteen on merkittävä. On esitetty, että tuuliturbiinien ääni vaimenisi infraäänillä sopivissa olosuhteissa ainoastaan 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuuessa, viivalähteen lähteen kaltaisesti [21], mutta tämä lähestymistapa on väärä, koska sille ei ole fysikaalisia perusteita: myös tuuliturbiini on pistemäinen äänilähde riittävän kaukaa katsottuna. Useita turbiineja rivissä voi sen sijaan käyttäytyä kuin viivalähde riittävän läheltä tarkasteltaessa. Sen sijaan tiedetään, että 3 km:n etäisyydellä sää ja ympäristöolosuhteiden aiheuttama vaihtelu voi olla vuositasolla jopa 80 dB ja merkittävimmät tekijät ovat ilmakehän tuuli- ja lämpötilaprofiilin muutokset, sekä erityisesti pienillä taajuuksilla ilmakehän stabiilisuus (kuva 9). Varsinkin tuulisina päivinä ja öinä, kun ilmakehän stabiilisuus on neutraali (Pasquill-luokka 4), voi äänenpainetaso 3 km:n etäisyydellä sijaitsevassa immissiopisteessä hetkellisesti ylittää 20 desibelillä geometrisen vaimenemisen perusteella arvioidun tason (kuva 9), vaikka lisäsvaimennuksen mediaani on yli 30 dB. Infraäänillä ympäristöolosuhteiden merkitys on pienempi kuin suuremmilla taajuuksilla, koska esimerkiksi ilmakehän ja maaperän absorptio on olemattoman pieni ja esteiden tulisi olla suuria (kymmenistä metreistä kilometreihin), jotta niillä olisi merkitystä infraäänien etenemisen kannalta.



Kuva 9: Mittauksiin perustuva keskimääräinen lisäysvaimennus (40–1600 Hz) ilmakehän stabiilisuuden funktiona 3 km:n etäisyydellä [22]. Tuloksista kaksi keskimmäistä neljänestä (50%) on rajattu laatikolla, mediaani on esitetty pisteellä ja viikset ulottuvat jakauman 2.7σ asti.

Jokaisessa mittauspisteessä oli kahden mikrofoniin muodostama akustinen antenni, jotta analysivaiheessa myös äänen tulosuunta olisi voitu huomioida. Emme ehtineet tätä toteuttaa, mutta tämä tai vielä massiivisempi antennitoteutus [23] pienentäisi erityisesti immissiomittausten epävarmuutta.

Kirjallisuudessa ei ole aiemmin esitetty infraäänimittaustuloksia jäljitettävästi kalibroituilla mittalaitteilla 100 mHz:istä ylöspäin. Jos tarkastellaan 3 oktaavia suurempia taajuuksia, tässä tutkimuksessa esitetyt mittaustulokset ovat samaa suuruusluokkaa, kuin muissa julkaisuissa raportoidut tulokset. Esimerkiksi Turnbull kumppaneineen mittasi Australiassa kahden 2/2.1 MW:n tuuliturbiineista koostuvan tuotantoalueen infraäänitä ja vertasi tuloksia kaupunkialueen ja infraäänestä tunnetun rannikkoalueen tuloksiin. Heidän johtopäätöksensä ovat samat kuin tekemässämme selvityksessä: tuuliturbiinien infraäänitasot ovat samaa suuruusluokkaa kuin vertailukohteissa [3]. Samaan tulokseen päätyivät puolalaiset tutkijat mitatessaan 25 turbiinia tyypiltään Vestas V80 2 MW [8].

Tuulivoiman infraääni on aiheuttanut keskustelua erityisesti terveydellisten vaikutusten osalta. Tämän selvityksen ja tietämyksen perusteella tuulivoiman infraäänitasot ovat niin pieniä, että niiden havainnointi onnistuu vain mittalaitteilla, mutta todennäköisesti emme tunne vielä kaikkia infraäänien terveydellisiä vaikutusmekanismeja [20, 24].

5 YHTEENVETO

Selvitimme mittauksin tuulivoiman tuotantoalueiden ympäristössä esiintyviä keskimääräisiä infraäänitasoja taajuusvälillä 0.1–10 000 Hz. Alueiden tuuliturbiinit olivat teholtaan suuria: 3.3–5 MW. Tarkastelimme infraäänitasojen ajallista vaihtelua ja vertasimme niitä luonnonhiljaisella alueella sekä kaupunkialueella mittaamiimme infraäänitasoihin. Tuuliturbiinien keskiäänitasot 200 metrin etäisyydeltä mitattuna olivat samaa suuruusluokkaa kuin kaupunkialueella mitatut tasot: $L_Z = 70\text{--}73$ dB, kun taas luonnonhiljaisella alueella painottoman keskiäänitaso oli noin 20 dB pienempi. Keskiäänitasot 2–3 km:n etäisyyksiltä mitattuina olivat 5–10 dB pienempiä kuin emissiotasot. Kun kaikki tuulivoiman tuotantoalueen turbiinit pysäytettiin, mittaukset osoittivat, että luonnon taustamelu oli tuuliturbiinien emissiotason ajallisen vaihtelun kanssa samaa suuruusluokkaa ja turbiinien käynnistäminen nimellisoiteensa nosti kokonaistasoa 3 dB ja keskiäänitasoja 1–18 dB terssikaistoilla 1–100 Hz.

Mittaaminen erityisesti alle 1 hertsin infraäänitaajuuksilla on merkittävästi haasteellisempää kuin suuremmilla taajuuksilla painevaihtelun hitauden ja suurempien taustamelutasojen sekä instrumentoinnin mittausepävarmuuksien vuoksi.

VIITTEET

- [1] Sung Soo Jung, Wan-Sup Cheung, Cheolung Cheong, and Su-Hyen Shin. Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise. *Journal of the Korean Physical Society*, 53(4):1897–1905, 2008.
- [2] Robert D. O’Neal, Robert D. Hellweg, and Richard M. Lampeter. Low frequency noise and infrasound from wind turbines. *Noise Control Engineering Journal*, 59(2):135–157, 2011.
- [3] Chris Turnbull, Jason Turner, and Daniel Walsh. Measurement and level of infrasound from wind farms and other sources. *Acoustics Australia*, 40(1):45–50, 2012.
- [4] Colin Tickell. Low frequency, infrasound and amplitude modulation noise from wind farms – some recent findings. *Acoustics Australia*, 40(1):64–66, 2012.
- [5] T. Boczar, T. Malec, and D. Wotzka. Studies on Infrasound Noise Emitted by Wind Turbines of Large Power. *Acta Physica Polonica-Series A General Physics*, 122(5):850, 2012.
- [6] R. Pierzga, T. Boczar, D. Wotzka, and D. Zmarzly. Studies on infrasound noise generated by operation of low-power wind turbine. *Acta Physica Polonica A*, 124:542–545, 2013.
- [7] Paul Botha. Ground Vibration, Infrasound and Low Frequency Noise Measurements from a Modern Wind Turbine. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(4):537–544, 2013.
- [8] Ryszard Ingielewicz and Adam Zagubień. Infrasound Noise of Natural Sources in the Environment and Infrasound Noise of Wind Turbines. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4):1323–1327, 2014.
- [9] Matthew Stead, Jon Cooper, and Tom Evans. Comparison of Infrasound Measured at People’s Ears when Walking to that Measured Near Wind Farms. *Acoustics Australia*, 42(3), 2014.

- [10] John Vanderkooy and Richard Mann. Measuring Wind Turbine Coherent Infrasonnd. *Wind Turbine Noise*, pages 20–23, 2015.
- [11] Payam Ashtiani and Adelaide Denison. Spectral discrete probability density function of measured wind turbine noise in the far field. *Frontiers in public health*, 3, 2015. doi: 10.3389/fpubh.2015.00052.
- [12] Branko Zajamšek, Kristy L. Hansen, Con J. Doolan, and Colin H. Hansen. Characterisation of wind farm infrasonnd and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, 370: 176–190, 2016. ISSN 0022-460X. doi: 10.1016/j.jsv.2016.02.001.
- [13] Jørgen Jakobsen. Infrasonnd Emission from Wind Turbines. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 24(3):145–155, 2005.
- [14] Robert G. Berger, Payam Ashtiani, Christopher A. Ollson, Melissa Whitfield Aslund, Lindsay C. McCallum, Geoff Leventhall, and Loren D. Knopper. Health-based audible noise guidelines account for infrasonnd and low-frequency noise produced by wind turbines. *Frontiers in public health*, 3, 2015. doi: 10.3389/fpubh.2015.00031.
- [15] Hideki Tachibana, Hiroo Yano, Akinori Fukushima, and Shinichi Sueoka. Nationwide field measurements of wind turbine noise in Japan. *Noise Control Engineering Journal*, 62(2): 90–101, 2014.
- [16] IEC. Standard IEC 61400-11:2012. Wind turbines — Part 11: Acoustic noise measurement techniques, November 2012.
- [17] IEC. Standard IEC 61260-1:2014. Electroacoustics — Octave-band and fractional-octave-band filters — Part 1: Specifications, February 2014.
- [18] IEC. Standard IEC 61672-1:2002. Electroacoustics — Sound Level Meters — Part 1: Specifications, May 2002.
- [19] ISO. Standard ISO 7196:1995. Acoustics — Frequency-weighting characteristic for infrasonnd measurements, 1995.
- [20] Timo Lanki, Anu Turunen, Panu Maijala, Marja Heinonen-Guzejev, Sami Kännälä, Tim Toivo, Tommi Toivonen, Jukka Ylikoski, and Tarja Yli-Tuomi. Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen . Technical Report 28, Työ- ja elinkeinoministeriö, jun 2017.
- [21] Kevin P. Shepherd and Harvey H. Hubbard. Physical Characteristics and Perception of Low Frequency Noise from Wind Turbines. *Noise Control Engineering Journal*, 36(1): 5–15, 1991. ISSN 0736-2501. doi: 10.3397/1.2827777.
- [22] Panu P. Maijala. *A Measurement-based Statistical Model to Evaluate Uncertainty in Long-range Noise Assessments*. Doctoral dissertation, Tampere University of Technology, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, December 2013.
- [23] Rakesh C. Ramachandran, Ganesh Raman, and Robert P. Dougherty. Wind turbine noise measurement using a compact microphone array with advanced deconvolution algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 333(14):3058–3080, 2014. ISSN 0022-460X. doi: 10.1016/j.jsv.2014.02.034.
- [24] Renzo Tonin. A Review of Wind Turbine-Generated Infrasonnd: Source, Measurement and Effect on Health. *Acoustics Australia*, Jul 2017. ISSN 1839-2571. doi: 10.1007/s40857-017-0098-3.