

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja • Energia • 28/2017

# Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen



Työ- ja elinkeinoministeriö  
Arbets- och näringsministeriet

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 28/2017

# Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen

Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki 2017



Työ- ja elinkeinoministeriö

ISBN:978-952-327-229-3

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2017



## Kuvailulehti

Julkaisija	Työ- ja elinkeinoministeriö		Kesäkuu 2017
Tekijät	Timo Lanki, Anu Turunen, Panu Majjala, Marja Heinonen-Guzejev, Sami Kännälä, Tim Toivo, Tommi Toivonen, Jukka Ylikoski, Tarja Yli-Tuomi		
Julkaisun nimi	Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja TEM raportteja 28/2017		
Diaari/hankenumero		Teema	Energia
ISBN PDF	978-952-327-229-3	ISSN PDF	1797-3562
URN-osoite	<a href="http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3">http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3</a>		
Sivumäärä	164	Kieli	Suomi
Asiasanat	tuulivoima, ääni, infraääni, melu, terveysvaikutukset		
<b>Tiivistelmä</b>	<p>Tuulivoimalat tuottavat laajakaistaista ääntä, joka sisältää myös pieniä taajuuksia. Alle 20 Hz:n taajuisia ääniä kutsutaan sopimusluonteisesti infraääneksi. Infraääntä esiintyy yhdessä kuultavan äänen kanssa kaikkialla luonnossa ja rakennetuissa ympäristöissä. Infraäänit eivät yleensä ole kuultavissa tavanomaisilla ympäristössä esiintyvillä tasoilla.</p> <p>Kuultavan melun yleisin vaikutus on sen häiritsevyys ja unen häiriintyminen. Myös tuulivoimaloiden kuultava ääni on yhteydessä häiritsevyyden kokemiseen, mutta näyttöä yhteydestä inihäiriöihin on vähemmän. Tuulivoima-alueiden välillä vaikuttaa olevan eroa häiritsevyyden yleisyydessä. Häiritsevyyteen vaikuttavat äänenpainetason lisäksi myös monet muut tekijät. Tieteellistä näyttöä tuulivoimaloiden kuultavan äänen vaikutuksista sairauksien esiintymiseen ei ole.</p> <p>Osa tuulivoimaloiden lähellä asuvista saa oireita, jotka he yhdistävät tuulivoimaloiden infraääneseen. Infraäänitasot tuulivoimaloiden läheisyydessä ovat samaa tasoa tai pienempiä kuin kaupunkikeskustoissa. Ei ole tieteellistä näyttöä siitä, että tällaisissa ympäristöissä esiintyvät infraäänitasot aiheuttaisivat terveyshaittaa, eikä esimerkiksi toistaiseksi tehdyissä väestötutkimuksissa oireilun ole havaittu olevan yleisempää lähellä tuulivoimaloita. Asiaa on kuitenkin tutkittu varsin vähän. Sen sijaan voimakkaan, kuultavissa olevan infraäänen on raportoitu vaikuttavan esimerkiksi valvetilaan.</p> <p>On esitetty erilaisia mekanismeja, joiden kautta myös pienten infraäänitasojen on ajateltu voivan vaikuttaa terveyteen tuulivoimaloiden läheisyydessä. Vastaavia tasoja esiintyy myös muualla rakennetussa ympäristössä. Infraäänen on esitetty voivan aiheuttaa herkissä ihmisryhmissä (poikkeavuudet korvan rakenteessa, kuulo- ja tasapainoelimiin liittyvät sairaudet) tasapainoelimiin liittyvää oireilua. Toisaalta yksittäisessä kokeellisessa tutkimuksessa on raportoitu, että infraääni aiheuttaa aivojen aktiivatiota myös muualla kuin kuuloalueella. Tutkimuksia erityisesti pitkäaikaisen tuulivoimaloiden infraäänille ja kuultavalle melulle altistumisen vaikutuksista terveyteen on varsin vähän, joten lisätutkimukset ovat perusteltuja.</p>		
Kustantaja	Työ- ja elinkeinoministeriö		
Julkaisun jakaja	Sähköinen versio: <a href="http://julkaisut.valtioneuvosto.fi">julkaisut.valtioneuvosto.fi</a>		

## Presentationsblad

Utgivare	Arbets- och näringsministeriet	Juni 2017	
Författare	Timo Lanki, Anu Turunen, Panu Majjala, Marja Heinonen-Guzejev, Sami Kännälä, Tim Toivo, Tommi Toivonen, Jukka Ylikoski, Tarja Yli-Tuomi		
Publikationens titel	Ljudet från vindkraftverk och dess inverkan på hälsan Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen		
Publikationsseriens namn och nummer	Arbets- och näringsministeriets publikationer ANM rapporter 28/2017		
Diarie- /projektnummer		Tema	Energi
ISBN PDF	978-952-327-229-3	ISSN PDF	1797-3562
URN-adress	<a href="http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3">http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3</a>		
Sidantal	164	Språk	Finska
Nyckelord	vindkraft, ljud, infraljud, buller, hälsoeffekter		
Referat	<p>Vindkraftverken alstrar bredbandigt ljud som innehåller också låga frekvenser. Enligt en överenskommelse kallas ljud som har en frekvens under 20 Hz infraljud. Infraljud förekommer tillsammans med hörbart ljud överallt i naturen och i den bebyggda miljön. Infraljud är i allmänhet inte hörbara på de vanliga nivåer som förekommer i miljön.</p> <p>Den vanligaste verkningen av hörbart buller är dess störande effekt och sömnstörningar. Också det hörbara ljud som vindkraftverk alstrar upplevs som störande, men det finns inte lika mycket bevis på att ljudet har samband med sömnstörningar. Det verkar finnas skillnader mellan olika vindkraftsområden i fråga om hur allmänna störningarna upplevs vara. Till den störande effekten bidrar vid sidan av ljudtrycksnivån dessutom många andra faktorer. Det finns inga vetenskapliga bevis på att vindkraftverkens hörbara ljud skulle ha något samband med förekomsten av sjukdomar.</p> <p>En del människor som bor i närheten av vindkraftverk får symptom som de förknippar med infraljudet från vindkraftverk. Infraljudnivåerna i närheten av vindkraftverk är lika eller lägre än i städernas centrum. Det föreligger inga vetenskapliga bevis på att de infraljudnivåer som förekommer i sådana miljöer skulle ha några negativa hälsoeffekter, och i de befolkningsundersökningar som hittills gjorts har symtomen inte konstaterats vara mer allmänt förekommande i närheten av vindkraftverk än annanstans. Saken har dock undersökts i ganska liten utsträckning. Däremot har det starka hörbara infraljudet rapporterats påverka t.ex. vakenheten.</p> <p>Det har presenterats olika slags mekanismer genom vilka också låga infraljudnivåer har ansetts kunna påverka hälsan hos människor i närheten av vindkraftverk. Motsvarande nivåer förekommer också annanstans i den bebyggda miljön. Infraljudet har påståtts kunna orsaka symptom i balansorganen hos känsliga människogrupper (med avvikelser i örats konstruktion, sjukdomar i hörsel- och balansorganen). Å andra sidan har det i samband med en enskild experimentell undersökning rapporterats att infraljud orsakar aktivering av hjärnan också annanstans än inom området för hörsel. Hittills har det gjorts ganska få undersökningar av hur en långvarig exponering för infraljud och hörbart buller från vindkraftverk påverkar hälsan, och därför är ytterligare undersökningar motiverade.</p>		
Förläggare	Arbets- och näringsministeriet		
Distribution	Elektronisk version: <a href="http://julkaisut.valtioneuvosto.fi">julkaisut.valtioneuvosto.fi</a>		

## Description sheet

<b>Published by</b>	Ministry of Economic Affairs and Employment	June 2017
<b>Authors</b>	Timo Lanki, Anu Turunen, Panu Majjala, Marja Heinonen-Guzejev, Sami Kännälä, Tim Toivo, Tommi Toivonen, Jukka Ylikoski, Tarja Yli-Tuomi	
<b>Title of publication</b>	Health effects of sound produced by wind turbines (Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen)	
<b>Series and publication number</b>	Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment MEAE reports 28/2017	
<b>Register number</b>		<b>Subject</b> Energy
<b>ISBN PDF</b>	978-952-327-229-3	<b>ISSN PDF</b> 1797-3562
<b>Website address (URN)</b>	<a href="http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3">http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3</a>	
<b>Pages</b>	164	<b>Language</b> Finnish
<b>Keywords</b>	wind power, sound, infrasound, noise, health effects	
<p><b>Abstract</b></p> <p>Wind turbines produce broadband sound that also includes low frequencies. Sounds below 20 Hz are contractually referred to as infrasound. Infrasound occurs together with audible sound in both natural and built environments. Infrasound is not generally audible at levels occurring typically in the environment.</p> <p>The most usual effects of audible noise are annoyance and sleep disturbance. Audible sound from wind turbines is associated with annoyance, but evidence of its link to sleep disturbance is less prominent. There appears to be a difference in the prevalence of annoyance between wind power areas. In addition to sound pressure level, other factors are associated with annoyance as well. There is no scientific evidence of the effects of audible sound from wind turbines on the emergence of illnesses.</p> <p>Some people who reside close to wind turbines have symptoms that they associate with infrasound from wind turbines. Infrasound levels within the vicinity of wind turbines are on the same level or lower than in city centres. There is no scientific evidence that the infrasound levels present in these kinds of environments could cause negative health effects. Furthermore, in the population studies undertaken so far, symptoms have not been observed to be more prevalent close to wind turbines. However, the number of studies is relatively limited. On the other hand, strong, audible infrasound has been reported to have an effect on, for example, wakefulness.</p> <p>Various mechanisms have been presented through which low infrasound levels have been thought to potentially affect on health within the vicinity of wind turbines. Similar levels also appear elsewhere in built environments. It has been indicated that infrasound can cause the appearance of symptoms connected with vestibular disorders in sensitive groups of people (anomalies in the structure of the ear, hearing-related and vestibular diseases). On the other hand, in one experimental study it has been reported that infrasound also activates other brain areas than those responsible for hearing. Scientific studies on the effects of exposure to infrasound and to audible noise from wind turbines are rather limited, thus additional studies are justified.</p>		
<b>Publisher</b>	Ministry of Economic Affairs and Employment	
<b>Distributed by</b>	Distribution by: <a href="http://julkaisut.valtioneuvosto.fi">julkaisut.valtioneuvosto.fi</a>	

# Sisältö

Tiivistelmä .....	8
<b>1 Johdanto .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Tuulivoimamelun ominaispiirteet.....</b>	<b>10</b>
2.1 Eteneminen ja vaimeneminen.....	10
2.2 Ajallinen vaihtelu .....	11
2.3 Pientaajuinen ääni ja infraääni.....	12
2.3.1 Kuulokynnys.....	12
2.3.2 Lähteet ja tasot ympäristössä .....	13
2.3.3 Taajuuspainotukset.....	14
<b>3 Infraäänien mittauskampanja .....</b>	<b>15</b>
3.1 Mittauspaikkojen kuvaus.....	16
3.2 Mittausmenetelmät ja mittalaitteet .....	23
3.3 Tulokset .....	27
3.4 Kontrolloitu emissiomittaus, tuulivoimaloiden pysäytys.....	31
3.5 Mittausepävarmuus.....	37
3.6 Pohdinta.....	39
3.7 Vertailu aiempiin tutkimuksiin.....	45
<b>4 Kuultavissa olevan tuulivoimamelun vaikutukset terveyteen .....</b>	<b>46</b>
4.1 Ympäristömelun terveys- ja hyvinvointivaikutukset.....	46
4.1.1 Häiritsevyys.....	47
4.1.2 Unen häiriintyminen .....	48
4.1.3 Sydän- ja verisuonisairaudet.....	49
4.1.4 Henkinen hyvinvointi .....	50
4.1.5 Meluherkkyys.....	51

4.2	Tuulivoimamelun terveys- ja hyvinvointivaikutukset.....	53
4.2.1	Havainnoivat tutkimukset .....	53
4.2.2	Kokeelliset tutkimukset.....	70
4.2.3	Vertaisarvioidut katsaukset ja asiantuntijapaneelien raportit.....	70
4.2.4	Tuulivoimaloiden aiheuttaman meluallistuksen mallinnus.....	75
4.2.5	Yhteenveto .....	77
<b>5</b>	<b>Tuulivoimamelun sisältämän infraäänen vaikutukset terveyteen .....</b>	<b>78</b>
5.1	Teorioita vaikutusmekanismeista .....	78
5.1.1	Korvan kautta välittyvät vaikutukset .....	78
5.1.2	Tärinän kautta välittyvät vaikutukset .....	85
5.1.3	Tuulivoimamelun erityisominaisuudet ja yksilölliset erot kuulokynnyksessä .....	87
5.1.4	Epäspesifinen oireilu .....	88
5.2	Infraäänen terveys- ja hyvinvointivaikutukset.....	90
5.2.1	Havainnoivat ja kokeelliset ihmistutkimukset .....	90
5.2.2	Koe-eläintutkimukset.....	102
5.2.3	Solututkimukset.....	110
5.2.4	Asiantuntijapaneelien raportit.....	112
5.2.5	Yhteenveto .....	113
5.3	Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänen terveys- ja hyvinvointivaikutukset.....	115
5.3.1	Havainnoivat tutkimukset .....	115
5.3.2	Kokeelliset tutkimukset.....	121
5.3.3	Vertaisarvioidut katsaukset ja asiantuntijapaneelien raportit.....	122
5.3.4	Muut julkaisut .....	127
5.3.5	Yhteenveto .....	129
<b>6</b>	<b>Johtopäätökset.....</b>	<b>130</b>
6.1	Kuuluva ääni .....	130
6.2	Infraääni.....	131
6.3	Jatkotutkimustarpeita .....	133
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>135</b>



## TIIVISTELMÄ

Tuulivoimalat tuottavat laajakaistaista ääntä, joka sisältää myös pieniä taajuuksia. Alle 20 Hz:n taajuisia ääniä kutsutaan sopimusluonteisesti infraääneksi. Infraääntä esiintyy yhdessä kuultavan äänen kanssa kaikkialla luonnossa ja rakennetuissa ympäristöissä. Infraäänit eivät yleensä ole kuultavissa tavanomaisilla ympäristössä esiintyvillä tasoilla.

Kuultavan melun yleisin vaikutus on sen häiritsevyys ja unen häiriintyminen. Myös tuulivoimaloiden kuultava ääni on yhteydessä häiritsevyyden kokemiseen, mutta näyttöä yhteydestä unihäiriöihin on vähemmän. Tuulivoima-alueiden välillä vaikuttaa olevan eroa häiritsevyyden yleisyydessä. Häiritsevyyteen vaikuttavat äänenpainetason lisäksi myös monet muut tekijät. Tieteellistä näyttöä tuulivoimaloiden kuultavan äänen vaikutuksista sairauksien esiintymiseen ei ole.

Osa tuulivoimaloiden lähellä asuvista saa oireita, jotka he yhdistävät tuulivoimaloiden infraääneen. Infraäänitasot tuulivoimaloiden läheisyydessä ovat samaa tasoa tai pienempiä kuin kaupunkikeskustoissa. Ei ole tieteellistä näyttöä siitä, että tällaisissa ympäristöissä esiintyvät infraäänitasot aiheuttaisivat terveyshaittaa, eikä esimerkiksi toistaiseksi tehdyissä väestötutkimuksissa oireilun ole havaittu olevan yleisempää lähellä tuulivoimaloita. Asiaa on kuitenkin tutkittu varsin vähän. Sen sijaan voimakkaan, kuultavissa olevan infraäänen on raportoitu vaikuttavan esimerkiksi valvetilaan.

On esitetty erilaisia mekanismeja, joiden kautta myös pienten infraäänitasojen on ajateltu voivan vaikuttaa terveyteen tuulivoimaloiden läheisyydessä. Vastaavia tasoja esiintyy myös muualla rakennetussa ympäristössä. Infraäänen on esitetty voivan aiheuttaa herkissä ihmisryhmissä (poikkeavuudet korvan rakenteessa, kuulo- ja tasapainoelimiin liittyvät sairaudet) tasapainoelimiin liittyvää oireilua. Toisaalta yksittäisessä kokeellisessa tutkimuksessa on raportoitu, että infraääni aiheuttaa aivojen aktivaatiota myös muualla kuin kuuloalueella. Tutkimuksia erityisesti pitkäaikaisen tuulivoimaloiden infraäänille ja kuultavalle melulle altistumisen vaikutuksista terveyteen on varsin vähän, joten lisätutkimukset ovat perusteltuja.

# 1 Johdanto

Kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa vuoteen 2030 on linjattu (kohta 3.6), että työ- ja elinkeinoministeriö teettää riippumattoman ja kattavan selvityksen tuulivoiman terveys- ja ympäristöhaitoista ennen tuotantotukea koskevan lain valmistelua. Tämän johdosta työ- ja elinkeinoministeriö on rahoittanut yhdessä sosiaali- ja terveysministeriön kanssa käsillä olevan selvityksen, jonka aiheena ovat tuulivoimaloiden tuottaman äänen terveyshaitat. Selvitys laadittiin maaliskokuussa 2017, ja työtä valvoi ohjausryhmä.

Selvityksen laatimiseen on osallistunut lääketieteen, ympäristöterveyden, akustiikan ja ionisoimattoman säteilyn asiantuntijoita. Selvityksen vastuujärjestäminen on ollut Terveystieteiden tutkimuskeskuksen ja hyvinvoinnin laitoksen, ja infraäänimittauksista on vastannut Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Asiantuntijoita on mukana lisäksi Helsingin yliopistosta, Helsinki Ear Institutesta ja Säteilyturvakeskuksesta. Selvityksen tiivistelmä ja johtopäätökset ovat koko työryhmän hyväksymät, eri aihealueita koskevien kappaleiden sisällöstä vastaavat ensisijaisesti niiden kirjoittajat.

Selvitystyön keskeisinä tavoitteina ovat olleet tuulivoimaloiden äänen terveysvaikutuksia koskevan tiedon kokoaminen yhteen, vaikutuksia koskevan tieteellisen näytön arviointi, mukaan lukien epävarmuudet, sekä jatkotutkimustarpeiden selvittäminen. Pääpaino selvityksessä on infraäänien (taajuudeltaan alle 20 Hz) vaikutuksissa. Vastaavia selvityksiä on tehty viime vuosina esimerkiksi Kanadassa ja Yhdysvalloissa.

Kirjallisuusselvityksen lisäksi hankkeessa tuotettiin myös uutta tietoa: infraäänitasoja mitattiin kahden tuulivoiman tuotantoalueen ympäristössä sekä vertailun vuoksi myös kaupunkialueella ja luonnonympäristössä. Sen lisäksi tehtiin jatkoanalyysijä Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitoksen aiemmin tuulivoimaluonnon ympäristössä toteuttaman kyselytutkimuksen aineistosta.

## 2 Tuulivoimamelun ominaispiirteet

*Anu Turunen, THL*

Ääni on väliaineessa kuten kaasussa, nesteessä tai kiinteässä aineessa etenevää mekaanista värähtelyä (aaltoliikettä), joka saa aikaan kuuloaistimuksen. Ääniaaltojen aiheuttamien ilmanpaineen muutosten suuruus määrää äänen voimakkuuden, jonka yksikkönä käytetään logaritmiasteikollista desibeliä (dB). Äänen taajuus on aaltojen lukumäärä aikayksikkö kohti (Hz=yksi aalto sekunnissa). Äänen taajuusjakaumassa on sopimusluonteinen 20 Hz:n raja, jonka alapuolella olevia taajuuksia kutsutaan infraääneksi ja yläpuolella olevia taajuuksia 200 Hz:iin asti pientaajuiseksi ääneksi. Elinympäristössä esiintyvä ääni on tyypillisesti laajakaistaista eli se sisältää kaikkia taajuuksia. Melu on ääntä, joka on ei-toivottua, epämiellyttävää, häiritsevää tai terveydelle ja hyvinvoinnille haitallista.

Tuulivoimamelulla on ominaispiirteitä, jotka lisäävät sen erottuvuutta ja häiritsevyyttä. Tämän vuoksi esimerkiksi liikennemelun haitallisista melutasoista saatua tietoa ei voida välttämättä suoraan soveltaa tuulivoimaloiden tuottamaan meluun.

### 2.1 Eteneminen ja vaimeneminen

Melun etenemiseen ympäristössä vaikuttavat maaston pinnanmuodot, kasvillisuus ja sääolot kuten tuulen nopeus ja suunta sekä lämpötila. Äänen vaimenemista etäännyttäessä äänilähteestä sanotaan etenemisvaimennukseksi ja se koostuu hajaantumisvaimennuksesta ja lisävaimennuksesta. Hajaantumisvaimennus aiheutuu äänen hajaantumisesta laajemmalle pinnalle etäisyyden kasvaessa eikä se riipu äänen taajuudesta. Pistemäisen äänilähteen ääni hajaantuu vapaassa äänikentässä pallopinnalle, jolloin äänenpainetaso laskee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Viivamaisen äänilähteen tuottama ääni hajaantuu sylinteripinnalle, jolloin ääni vaimenee 3 dB matkan kaksinkertaistuessa. Heijastavien pintojen vaikutuksesta ja esimerkiksi inversiotilanteiden aikana hajaantumisvaimennus voi olla pienempi kuin vapaassa äänikentässä. Lisävaimennus voi taas aiheutua ilman absorptiosta, kasvillisuuden, maanpinnan tai sääolojen vaikutuksesta sekä estevaimennuksesta, joiden suuruus riippuu äänen taajuudesta (Björk, 1997).

Muista ympäristömelun lähteistä poiketen tuulivoimalan ääni syntyy korkealla maan- tai vedenpinnasta, jolloin sen eteneminen on esteetöntä. Lisäksi pienien taajuuksien aallonpituus on niin pitkä, esimerkiksi 1 Hz:n taajuisella äänellä 340 m, että ääniaallot taipuvat helposti esteiden yli. Mitä pienempi taajuus on, sitä vähemmän ilmakehä, maaperä ja rakenteet absorboivat eli vaimentavat ääntä (Jakobsen, 2005; Moller & Pedersen, 2011). Esimerkiksi kilometrin matkalla 63 Hz:n taajuinen ääni vaimenee ilmakehän absorption vaikutuksesta keskimäärin vain 0,1 dB, kun 250 Hz:n taajuinen ääni vaimenee keskimäärin 1,1 dB (Leventhall, 2003). On kuitenkin muistettava, että edellä kuvattu hajaantumisvaimennus on sama taajuudesta riippumatta. Asuinrakennuksen rakenteiden läpi kulkiessaan alle 50 Hz:n taajuudet vaime-

nevat keskimäärin alle 15 dB, kun taas yli 1 000 Hz:n taajuuksilla vastaava vaimeneminen voi olla yli 40 dB (Oliva et al., 2011). Vaimenemisen suuruus vaihtelee rakenteiden äänitekniisten ominaisuuksien mukaan. Vähäisemmän absorption vuoksi pienten taajuuksien suhteellinen osuus joka tapauksessa kasvaa äänen edetessä. Tästä johtuen pientaajuinen melu saattaa olla helpommin havaittavissa sisätiloissa kuin ulkona (Hubbard & Shepherd, 1991). Lisäksi kuuloalueen pienillä taajuuksilla huonetilan sisälle saattaa joissain tilanteissa syntyä nk. seisova aalto, kun ääniaallon reitin mitta on aallonpituuden monikerta ja ääni heijastuu kahden tai useamman seinäpinnan kautta takaisin lähtöpisteeseen. Tällöin alkuperäinen ääni voimistuu osassa huonetta (Oliva et al., 2011). Esimerkiksi mitoiltaan 3x4x5 m huoneeseen voi syntyä seisovia aaltoja taajuudesta 34 Hz alkaen. Infraäänialueella aallonpituudet ovat liian suuria seisovan aallon syntyänsä tavanomaiseen huonetilaan.

Tuulivoimamelu kuten muukin ympäristömelu korostuu yöllä, jolloin taustamelutaso on pienempi kuin päiväaikaan. Lisäksi auringonlaskun aikaan illalla sekä yöllä esiintyy tyypillisesti meteorologisia olosuhteita, jotka saattavat johtaa tavanomaista suurempiin äänenpainetasoihin voimaloiden ympäristössä. Tällainen olosuhde on esimerkiksi lämpötilainversio, jonka vallitessa ilmakehä on stabiili, lämpötila nousee maanpinnalta ylöspäin noustaessa ja ääniaallot kaareutuvat alaspäin (Moller & Pedersen, 2011). On myös havaittu, että yöaikaan tuulivoimamelussa esiintyy päiväaikaan enemmän impulssimaista jyskyttävää ääntä, joka korostuu, jos lähemmäs olevien turbiinien pyörimistaajuus on toisiinsa verrattuna lähes sama (van den Berg, 2004).

Italialaisessa kokeellisessa tutkimuksessa havaittiin, että 150–250 metrin päässä lähteestä tuulivoimalan ääni oli selvästi erotettavissa ja 1 500 metrin päässä se ei enää ollut erotettavissa pääasiassa tuulen ja kasvillisuuden tuottamasta taustamelusta. Signaali nauhoitettiin 34 turbiiniin (kunkin turbiinin nimellisteho 0,85 MW) tuulivoima-alueilla eri etäisyyksillä (Maffei et al., 2015).

Ruotsalaisessa kokeellisessa tutkimuksessa havaittiin, että tuulivoimamelu saattaa peittyä kokonaan tuulen ja meren aaltojen tuottaman äänen alle kun signaalikohinasuhde oli -8–12 dB (Bolin et al., 2010). Koettu äänekkyyttä ja häiritsevyyttä vähentyivät, kun tuulivoimalan ääni kuului yhdessä luonnonäänten kanssa (Bolin et al., 2012). Aistinvaraisesti useilla alueilla ja useissa olosuhteissa arvioituna tuulivoimamelun on todettu kuuluvan selvästi ainakin 2 km:n päähän turbiineista (Thorne, 2012).

## 2.2 Ajallinen vaihtelu

Suurin osa tuulivoimamelusta on lapojen tuottamaa aerodynaamista ääntä. Se on laajakaistaista ja sille on luonteenomaista äänenvoimakkuuden jaksollinen vaihtelu, jota kuvataan termillä amplitudimodulaatio tai vaihteluvoimakkuus. On esitetty, että on olemassa kahdenlaista amplitudimodulaatiota. Tavanomaisessa suhahtavassa (swishing) amplitudimodulaatiossa modulaatiosyvyys on korkeintaan 6 dB. Suhahtava ääni etenee tuulen suuntaan nähden 90 asteen kulmassa ja vaimenee nopeasti. Joskus ilmiö kuitenkin esiintyy voimakkaampana jyskyttävänä (thumping, swooshing) äänenä. Tällöin modulaatiosyvyys on yli 6 dB ja ilmiöön liittyy tavanomaista enemmän pientaajuisia ääntä. Jyskyttävä ääni etenee turbiinista pääasiassa myötätuulen suuntaan ja sen on todettu olevan erityisen häiritsevää (RenewableUK, 2013; Nykänen et al., 2014). Tällöin voidaan käyttää termiä merkityksellinen sykintä. Amplitudimodulaation syntymekanismista on esitetty useita teorioita. Erään teorian mukaan suhahtava ääni syntyy voimakkaasti ääntä suuntaavien lapojen pyöriessä suhteessa havainnoijan ja turbiiniin sijaintiin, kun taas jyskyttävä ääni syntyy, kun roottorin lavat kohtaavat epätasaisesti jakautuneita ilmapirtauksia, jotka puo-

lestaan johtuvat suuresta tuulennopeudesta, interaktiosta toisen turbiinin kanssa tai maanmuodoista (Uosukainen, 2010).

On arvioitu, että amplitudimodulaatio olisi aistinvaraisesti havaittavissa 20–30 % turbiinin toiminta-ajasta. Amplitudimodulaation esiintyminen riippuu sääolosuhteista (tuulen suunta ja turbulenttisuus, tuulennopeuden ja lämpötilan muutos maanpinnasta ylöspäin mentäessä) ja turbiinin etäisyydestä havainnoivaan kohteeseen. Ilmiö esiintyy usein auringonlaskun aikaan ja yöllä, kun ilmakehä on tyypillisesti stabiili ja lämpötila nousee maanpinnalta ylöspäin noustaessa (lämpötilainversio). Lisäksi amplitudimodulaatiota saattaa voimistaa edelleen useamman turbiinin yhtäaikainen ääniemissio (Larsson & Ohlund, 2014).

## 2.3 Pientaajuinen ääni ja infraääni

Tuuliturbiinin lapaan kohdistuva turbulenssi tuottaa pientaajuista aerodynaamista ääntä, jonka osuuden on arvioitu olevan suurempi tuulivoimamelussa kuin taustamelussa keskimäärin (Siponen, 2011). Tuuliturbiinin tuottaman infraäänien määrästä on erilaisia näkemyksiä, mutta yleisen käsityksen mukaan nykyaikaiset vastatuuliturbiinit tuottavat infraääntä hyvin vähän verrattuna aiemmin rakennettuihin myötätuuliturbiineihin (Jakobsen, 2005, 2012).

### 2.3.1 Kuulokynnys

ISO 226:2003 -standardin mukaan kuulokynnys on pienin äänenpainetaso, jolla normaalikuuloisen koehenkilön aistihavainnoista 50 % on oikein, kun ärsykettä toistetaan laboratorio-olosuhteissa. Teoreettinen kuulokynnys on 18–25-vuotiaiden keskimääräinen kuulokynnys taajuusalueella 20 Hz–12,5 kHz. Esimerkiksi 20 Hz:n taajuisella äänellä kuulokynnys on keskimäärin 79 dB, 100 Hz:n taajuisen äänen keskimäärin 27 dB ja 200 Hz:n taajuisen äänen keskimäärin 14 dB (ISO, 2003a). Laboratorio-olosuhteissa määritettyä kuulokynnystä ei voida suoraan soveltaa ympäristömelun arviointiin, koska ympäristömelu on yleensä laajakaistaista ja ympäristön äänet esiintyvät aina yhdessä, jolloin esimerkiksi taustamelu voi peittää yksittäisen äänilähteen alleen.

Alle 20 Hz:n taajuuksilla teoreettista kuulokynnystä ei ole määritetty, ja 20 Hz:n rajaa pidetään usein virheellisesti kuulon alueen rajana. Virheellistä käsitystä tukee myös etuliite ”infra”, joka tarkoittaa latinan kielellä ”alapuolella olevaa”. Ihmisen kuulo on herkin taajuusalueella 200(300) Hz–10 kHz ja heikkenee asteittain pienempiin taajuuksille mentäessä, mutta ei ole olemassa taajuutta, jolla kuuleminen loppuisi. Laboratorio-olosuhteissa osa normaalikuuloisista henkilöistä voi havaita jopa muutaman hertsin taajuisia ääniä, kun äänenpainetaso on riittävän suuri. Tyypillisesti 20 Hz:n alapuolella (noin 16 Hz:ssä) kokemus sävelkorkeudesta (tonaalisuus) kuitenkin häviää, ja 10 Hz:n alapuolella aistimus muuttuu paineen tunteeksi tärykalvoissa ja jaksoittaisiksi, laskettavissa oleviksi sykäyksiksi.

Korvan ajatellaan olevan kaikkein herkin elin myös pientaajuisten ja infraäänien aistimiseen, koska kuulokynnyksen on kokeellisissa tutkimuksissa havaittu olevan sama riippumatta siitä, altistetaanko äänelle koko keho vai pelkästään korva. Lisäksi rintakehän värinä ilmenee sekä kuuroilla että normaalikuuloisilla samalla äänenpainetasolla. Kokeellisissa tutkimuksissa on myös havaittu, että kuurot henkilöt aistivat äänen kehossaan 63 Hz:n taajuuteen asti vasta 40–50 dB normaalikuuloisen kuulokynnystä suuremmilla äänenpainetasoilla, ja esimerkiksi 1 kHz:n taajuusalueella vaaditaan noin 100 dB kuulevien kuulokynnystä suurempi äänenpainetaso. Riittävän voimakas pientaajuinen ja infraääni voi aiheuttaa kuulohavainnon lisäksi tuntoaistiin perustuvia aistimuksia kuten paineen tunnetta tärykalvolla, värinää rintake-

hässä ja värinän tunteen koko kehossa (tavallisimmin kurkussa, vatsassa, lantiossa, reisissä ja pohkeissa). Yleisen käsityksen mukaan värinätuntemukset edellyttävät kuulokynnyksen ylittävää ääntä. Tyypillisin taajuusalue värinän tunteelle rinnassa on 50–80 Hz ja vaadittava äänenpainetaso on yli 80 dB. On arvioitu, että resonaatio on mahdollista, kun äänenpainetaso ylittää kuulokynnyksen vähintään 20–25 dB:llä. Paineentunne korvassa vaatii keskimäärin noin 125–130 dB:n äänenpainetasoa. Korvakipu voi aiheutua 2 Hz:n taajuudella noin 165 dB:n äänenpainetasolla ja 20 Hz:n taajuudella noin 145 dB:n äänenpainetasolla. Tärykalvo voi vaurioitua, kun äänenpainetaso on 185–190 dB (Moller & Pedersen, 2004; Leventhall, 2009).

Elinympäristössä on mahdollista altistua kuulokynnyksen ylittävälle pientaajuiselle ja infraäänelle. Esimerkiksi ikkuna auki maantienopeutta ajavassa autossa altistuu kuultavalle 10–20 Hz:n taajuiselle äänelle. Infraääni esiintyy yleensä yhdessä muiden taajuuksien kanssa, joten puhtaasti infraäänelle altistuminen on harvinaista (Moller & Pedersen, 2004). Äänen kuuleminen edellyttää 2 Hz:n taajuudella keskimäärin 120 dB:n, 4 Hz:n taajuudella keskimäärin 107–112 dB:n, 10 Hz:n taajuudella 95–97 dB:n ja 20 Hz:n taajuudella 76–79 dB:n äänenpainetasoa (Moller & Pedersen, 2004; Leventhall, 2009; Health Protection Agency, 2010; Persson Waye, 2011). G-taajuuspainotettuna (kts. kappale 2.3.3.) taajuudeltaan 1–20 Hz:n äänen kuuleminen edellyttää 95–100 dB:n äänenpainetasoa, ja alle 85–90 dB:n äänenpainetasoa ajatellaan olevan kuulokynnyksen alapuolella (Moller & Pedersen, 2004; Jakobsen, 2005).

## 2.3.2 Lähteet ja tasot ympäristössä

Infraääntä esiintyy yleisesti sekä luonnossa esimerkiksi tuulen, aaltojen, maanjäristyksen ja ukkosen tuottamassa äänessä että rakennetussa ympäristössä esimerkiksi rakennusten huojunnan ja ihmisen rakentamien laitteiden, kuten kompressorien, pumppujen, tuulettimien, pesukoneiden, autojen, junien ja lentokoneiden tuottamana. Äänenpainetasot ovat tyypillisesti niin pieniä, että infraääni on kuulokynnyksen alapuolella, mutta samanaikaisesti esiintyy yleensä myös kuultavaa ääntä (Health Protection Agency, 2010). Esimerkiksi australialaistutkimuksessa infraäänen G-taajuuspainotettu äänenpainetaso oli noin 75 dB sekä merenrannassa lähellä vesirajaa että 350 metrin päässä energiantuotantolaitoksesta ja noin 57 dB sisämaassa 8 km:n päässä rannikosta (Turnbull et al., 2012).

Baijerin ympäristöviraston raportissa on esitetty esimerkkimittaukset 250 m:n etäisyydellä 1 MW:n tuulivoimalasta, ja sen mukaan esimerkiksi tuulennopeudella 15 m/s turbiinin tuottama äänenpainetaso on 8 Hz:n taajuudella keskimäärin 75 dB ja 20 Hz:n taajuudella keskimäärin 70 dB (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016). Spektri sisältää sitä alempia taajuuksia, mitä suurempi on turbiinin koko eli on oletettu, että turbiinikoon kasvaessa pientaajuisuuteen liittyvät ongelmat lisääntyvät (Moller & Pedersen, 2011). Viime aikoina on kuitenkin arvioitu, että turbiinikoon kasvaessa pientaajuisen äänen suhteellinen osuus ei kuitenkaan lisääntyisi (Sondergaard, 2015).

Infraääntä syntyy myös ilmapirran tuottamana vaikkapa ikkunat auki liikkuvassa autossa tai liikkuvan ihmisen sisäkorvassa. Esimerkiksi keinuva lapsi altistuu taajuudeltaan noin 0,5 Hz:n infraäänelle keskimäärin 110 dB:n äänenpainetasolla riippuen keinun mittasuhteista ja korkeuden muutoksista keinunnan aikana (Leventhall, 2007; Persinger, 2014).

Tuulivoimalat tuottavat pääasiassa laajakaistaista lapojen liikkeen ja ilmapirtauksen tuottamaa (aerodynaamista) ääntä, jonka äänenpainetaso ja taajuusjakauma vaihtelevat suuresti riippuen turbiinin suunnittelusta ja koosta, roottorin pyörimisnopeudesta, generaattorin kuormituksesta ja ympäristön olosuhteista kuten tuulen nopeudesta ja turbulenssista. Yleisen käsityksen mukaan erityisesti modernit vastatuuliturbiinit tuottavat infraääntä niin pienillä äänenpainetasoilla, ettei ääni ole kuultavissa edes lähietäisyydellä.

Vanhanaikaiset ja jo käytöstä poistuneet myötätuuliturbiinit sen sijaan tuottivat infraääntä 10–30 dB suuremmilla äänenpainetasoilla (Jakobsen, 2005, 2012), mikä saattaa olla syy tuuliturbiinien huonoon maineeseen infraäänien lähteenä.

Tuulivoimaloiden tuottamaa ääntä on mitattu lukuisissa tutkimuksissa ja havaittu, että infraäänien äänenpainetasot ovat tyypillisesti kuulokynnyksen alapuolella (Jakobsen, 2005; Moller & Pedersen, 2011; Ingieleticz & Zagubien, 2014; Tachibana et al., 2014; Ashtiani & Denison, 2015). Esimerkiksi 250 metrin päässä 4,2 MW:n turbiinista infraäänien G-äänitasoksi on mitattu 84 dB (Jakobsen, 2005) ja 360–500 metrin päässä 1,5–2,4 MW:n turbiineista 60–67 dB (Turnbull et al., 2012; Ingieleticz & Zagubien, 2014; Berger et al., 2015).

Tuulivoimalan tuottamalle infra- tai pientaajuiselle äänelle ei ole olemassa kansainvälisiä terveysperusteisia raja-arvoja. Niitä ei välttämättä ole nähty tarpeellisina, koska on esitetty arvio, että kokonaisäänienpainetasoa seuraamalla voidaan huolehtia myös pientaajuisesta melusta, kun turbiinit toimivat normaalisti (Berger et al., 2015). Joissakin maissa on kuitenkin annettu kansallisia suosituksia. Esimerkiksi Tanskassa infraäänien (1–20 Hz) suositeltava enimmäisäänienpainetaso elinympäristössä on G-taajuuspainotettuna 85 dB, jolloin infraääni on kuulokynnyksen alapuolella. Lisäksi tuulivoimaloiden tuottama pientaajuinen ääni (10–160 Hz, 1/3-oktaavikaistoittain) ei saisi ylittää A-äänitasoa (kts. kappale 2.3.3.) 25 dB päiväaikaan ja 20 dB yöaikaan sisätiloissa, kun tuulennopeus on 6 tai 8 m/s (Jakobsen, 2001, 2012). Suomessa elinympäristön infraääntä ei ole huomioitu virallisissa ohjeistuksissa, mutta sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 545/2015 on annettu pientaajuisen sisämelun tunnin keskiäänitason toimenpiderajat Z-äänitasona (kts. kappale 2.3.3.) taajuuskaistoittain nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa. Toimenpiderajat perustuvat kuulokynnyskäyrään. Yöaikana (klo 22–7) toimenpideraja ( $L_{eq,1h}$ ) esimerkiksi 20 Hz:n taajuiselle äänelle on 74 dB, 50 Hz:n äänelle 44 dB, 100 Hz:n äänelle 38 dB ja 200 Hz:n äänelle 32 dB. Päiväaikana (klo 7–22) toimenpiderajat ovat 5 dB suurempia.

### 2.3.3 Taajuuspainotukset

Melumittauksissa käytetään lähes yksinomaan A-taajuuspainotusta (A-äänitaso), joka pyrkii jäljittelemään ihmiskorvan herkkyyttä eri taajuuksille, kun äänenpainetaso on 35–45 dB (Lahti, 2003). A-taajuuspainotusta on kritisoitu siitä, että se aliarvioi pieniä taajuuksia ja siten tuulivoimamelun häiritsevyyttä (Siponen, 2011). Mahdollinen pientaajuisen melun aliarviointi saattaisi selittää sen, että joissain tilanteissa tuulivoimalan äänelle altistuneiden ihmisten kokemusten ja mitattujen äänenpainetasojen välillä on ristiriita, mutta asiaa on tutkittu vähän. Myös WHO on esittänyt, että A-taajuuspainotus aliarvioi pienten taajuuksien häiritsevyyttä ja esittää A-taajuuspainotetun ja C-taajuuspainotetun (C-äänitaso, tarkoitettu 85 dB ylittävälle äänenpainetasoille) välistä erotusta keinoksi pientaajuisen äänen osuuden arvioimiseen (Berglund & Lindvall, 1995; Berglund et al., 1999). Toisaalta joissain tutkimuksissa on osoitettu, että mitatut A- ja C-äänitasot korreloivat keskenään hyvin ja päädytty siihen, että A-taajuuspainotettu äänenpainetaso voi olla pääasiallinen suure myös tuulivoimamelua mitattaessa. Samalla on havaittu, että A-taajuuspainotuksen avulla äänekkyykokemuksen arviointi onnistuu paremmin kuin esimerkiksi C-taajuuspainotuksen avulla (Tachibana et al., 2014). Joskus infraäänimittauksissa on kuitenkin päädytty käyttämään G-taajuuspainotusta (G-äänitaso, soveltuu taajuusalueelle 3–50 Hz), jonka on ajateltu kuvaavan paremmin alle 20 Hz:n taajuisen äänen häiritsevyyttä, ja esimerkiksi Tanskassa infraäänelle annetut suositukset esitetään G-äänitasoina (Jakobsen, 2001). Yksi tapa välttää mahdollinen taajuuspainotusongelma on tarkastella koko taajuusjakamaa (Bockstael et al., 2012; Salt et al., 2014) ja taajuuspainottamatonta eli lineaarista äänenpainetasoa (Z-äänitaso).

## 3 Infraäänen mittauskampanja

*Panu Majjala, VTT*

*Pekka Taimisto, THL*

*Tarja Yli-Tuomi, THL*

Hankkeeseen kuului myös kokeellinen osuus. Uusinta infraäänen mittausteknologiaa hyödyntäen haluttiin selvittää, millaisia keskimääräisiä infraäänitasoja tuulivoimatuotantoalueiden ympäristössä esiintyy ja ovatko tasot suurempia kuin muissa ympäristöissä. Mittauspaikkoja valittaessa ensisijaisina mittauskohteina pidettiin tuulivoimatuotantoalueita, joissa turbiinit ovat teholtaan suuria, yli 3 MW. Muita valintakriteereitä tutkittaville tuotantoalueille olivat: kertomukset ääneen liittyvistä ongelmista, ympäristön topografia, tuulen suunta, asutuksen esiintyminen (0,7–3 km välillä) ja mittauksen toteutettavuuden kannalta sähkönsaanti sekä huoltoyhteydet.

Valintakriteerit huomioiden mittauskohteiksi valikoituivat Salon Märynummen ja Siikaisten Jäneskeitaan tuulivoimatuotantoalueet.

Vertailun vuoksi infraääniä mitattiin luonnonhiljaisella alueella, metsäisellä Hyytiälän tutkimusasemalla Juupajoella ja kaupunkialueella Tampereen Hervannassa.

Infraääniä mitattiin molempien tuulivoimatuotantoalueiden ympäristössä noin 2 viikkoa ja kahdella etäisyydellä. Tuulivoimalan emissiotasoa eli melupäästöä mitattiin lähellä voimaloita n. 200 metrin etäisyydellä lähimmästä turbiinista sekä immissiotasoa vaikutus- tai vastaanottopisteessä 2–3 km etäisyydellä turbiinista.

Antureina mittauksissa käytettiin infraäänimikrofoneja (4 kpl G.R.A.S. 47AC) sekä usein infraäänien mittaamiseen käytettyä mikrobarometriä (Chaparral Physics Model 25). Mikrofonien taajuusvasteen kalibrointiarvot kattoivat taajuusalueen 0,05–20 000 Hz ja niiden herkkyyttä infraäänialueella seurattiin kampanjan aikana infraäänikalibraattorilla (G.R.A.S. 42AE) taajuusvälillä 0,01–250 Hz, tavanomaisilla kalibraattoreilla, sekä ennen ja jälkeen mittauksen tehdyin kaiuntalaboratoriomittauksin. Kaiuntahuoneessa yritimme myös mikrobarometrin herkkyyden kalibrointia, mutta lopulta todettiin, ettei se sovellu tämän tarkkuusluokan mittauksiin: itse sensorin herkkyys on kalibroitavissa, mutta laitteeseen liitettävät ledit muuttavat herkkyyttä hallitsemattomalla tavalla jopa kymmeniä desibelejä.

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

Jatkuvan tallennuksen lisäksi toteutettiin Siikaisissa lyhyt mittauskampanja, jossa 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.

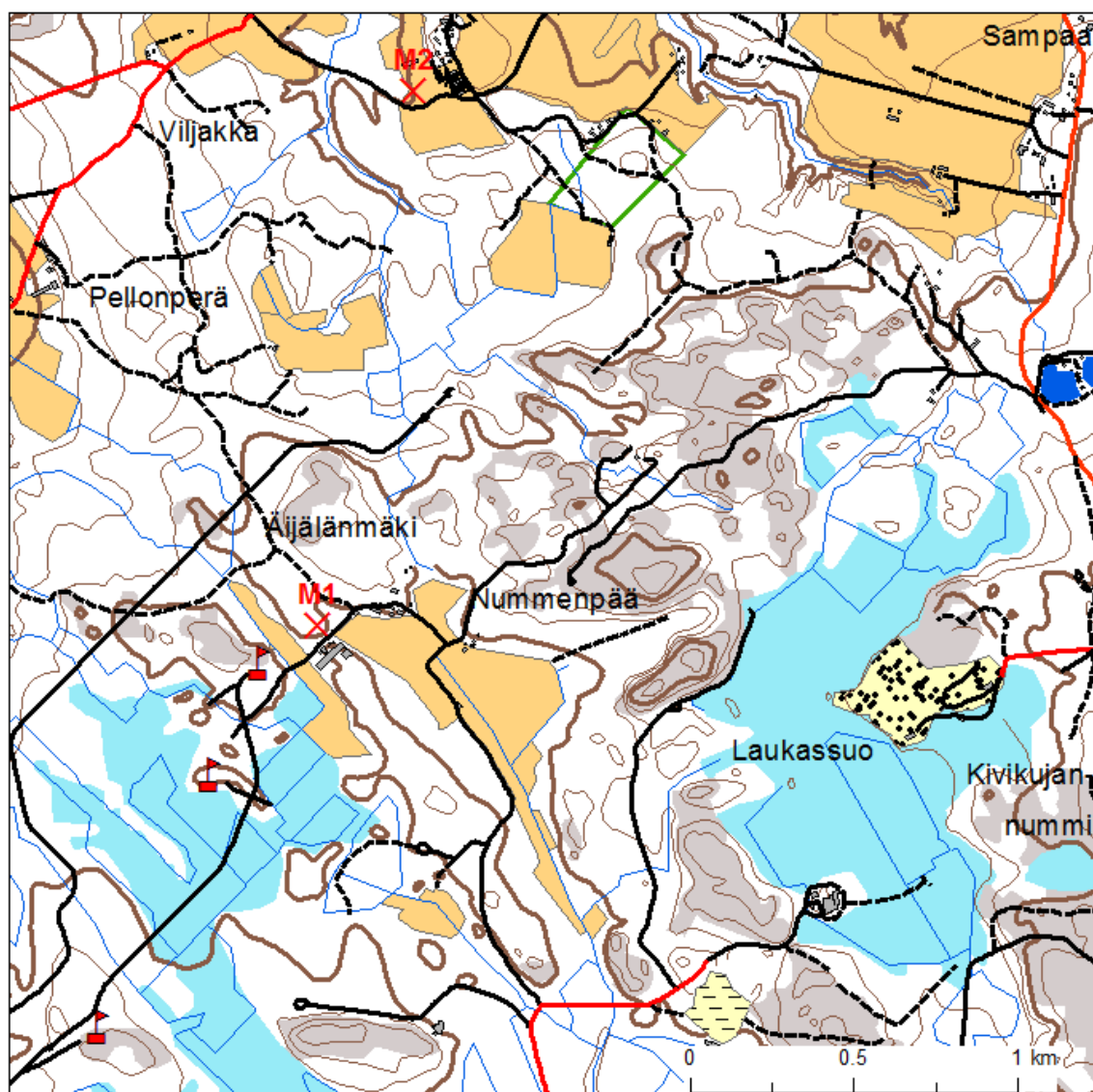
### 3.1 Mittauspaikkojen kuvaus

Salon Märynummen tuulivoimatuotantoalue sijaitsee topografialtaan hyvin vaihtelevassa maastossa (kuva 1). Siellä on kolme Gamesan G128 -tyyppistä 5 MW:n tuuliturbiinia (2 kpl Tuuliwatti Oy ja 1 kpl Restuuli Oy). Seudulle vuodenaikaan tyypillinen tuulensuunta on lounaistuuli ja tämän vuoksi sekä emissiomittauspiste että immissiopiste (taulukko 1) valittiin koillispuolelta tuulivoimatuotantoaluetta. Emissiomittauspiste sijaitsi 200 m:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista, hakkuuaukiolla (kuva 2) yksityisellä maalla ja sähkö mittalaitteille saatiin omistajan läheiseltä kasvihuoneelta. Immissiomittauspiste valittiin noin 3 km:n etäisyydeltä, pellolta Viljakkalan kylästä (kuva 3). Sähköt mittalaitteille vedettiin maanviljelijän kasvihuoneelta.

Siikaisten Jäneskeitaan topografia on tasaisempaa (kuva 4) ja siellä on kahdeksan Vestas V126 -tyyppistä 3,3 MW:n tuuliturbiinia (Tuuliwatti Oy). Myös Siikaisilla tyypillinen tuulensuunta huhti-toukokuussa on lounaistuuli ja mittauspisteet (taulukko 1) valittiin koillispuolelta tuulivoimatuotantoaluetta. Emissiomittauspiste sijaitsi 200 m:n etäisyydellä lähimmästä tuuliturbiinista, hakkuuaukion laidalla (kuva 5) ja sähkö mittalaitteille saatiin tuulivoimaoperaattorin muuntajalta 250 m:n etäisyydeltä. Immissiomittauspiste valittiin noin 2 km:n etäisyydeltä, maanviljelijän pellolta (kuva 6). Sähköt mittalaitteille vedettiin läheisestä rakennuksesta. Tuuliwatti Oy ja Restuuli Oy toimittivat kaikki pyydetyt tiedot tuulivoimaloiden käyntitulosuhteista Märynummella ja Jäneskeitaalla.

Vertailukohteeksi valitun Juupajoen Hyytiälän taustamittauspisteen koordinaatit KKJ27 -järjestelmässä olivat 3357212, 6863147 (kuva 7). Mittauspiste sijaitsi keskellä metsää (kuva 8) ja sähköt sinne vedettiin tutkimusaseman alueen keskustan etäisimmästä rakennuksesta, joka oli mittausaikaan sopivasti ilman asukkaita.

Kaupunkitaustamittauspisteen koordinaatit KKJ27 järjestelmässä olivat 3333047, 6820074. Mittauspiste sijaitsi VTT:n ulkotestausalueella (kuva 9) keskellä Tampereen Hervannan lähiötä, joka on tiiviisti rakennettu ja lähistöllä on teollista toimintaa ja liikkuu paljon raskasta liikennettä (kuva 10).



Kuva 1. Salon mittauspisteiden M1 ja M2 sekä voimaloiden sijainnit. Kartta sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 05/2017 ja Maastokartan 05/2017 aineistoa.

Taulukko 1. Mittauspisteiden KKJ 27 -koordinaatit, Salo

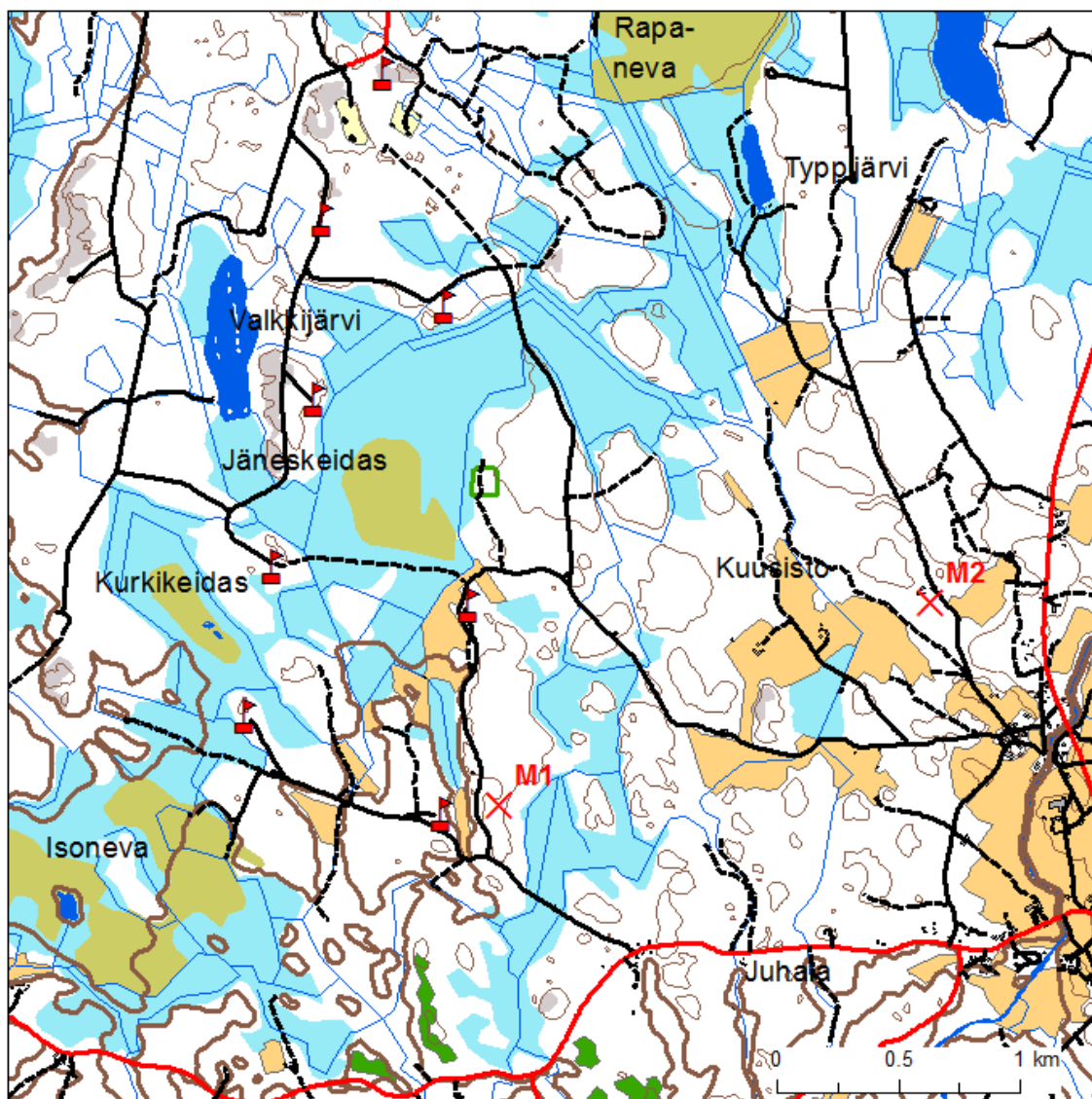
Emissio, tuuliturbiinin lähimittaus	3283156	6712560
Immissio, mittaus altistuvassa pisteessä	3283451	6714195



Kuva 2. Emissionmittauspiste Salon Märynummella.



Kuva 3. Immissionmittauspiste Salon Viljakkalan kylässä.



Kuva 4. Siikaisten mittauspisteiden M1 ja M2 sekä voimaloiden sijainnit. Kartta sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 05/2017 sekä Maastokartan 05/2017 aineistoa.

Taulukko 2. Mittauspisteiden KKJ 27 -koordinaatit, Siikainen

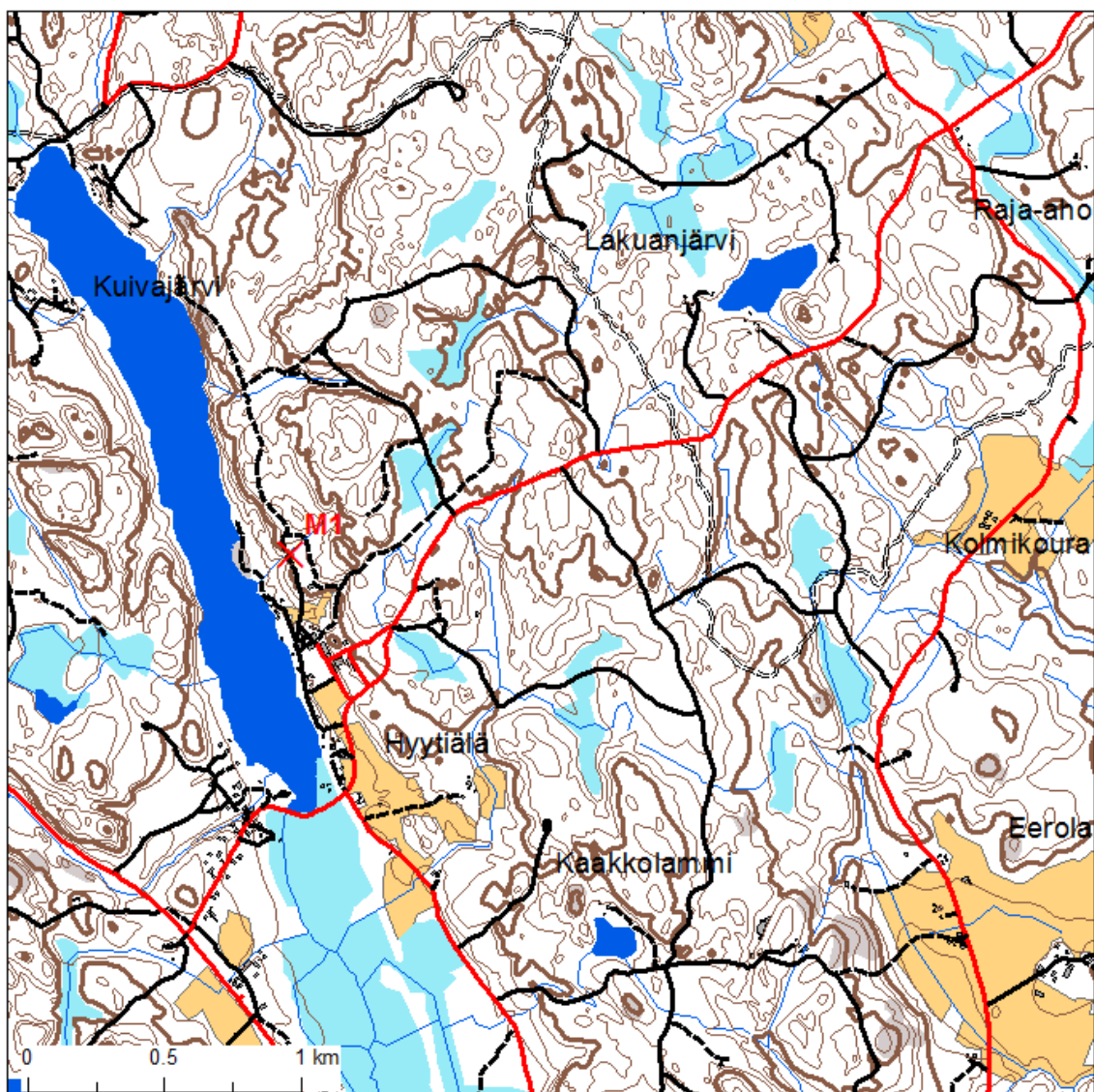
Emissio, tuuliturbiinin lähimittaus	3222095	6869606
Immissio, mittaus altistuvassa pisteessä	3223872	6870441



Kuva 5. Siikaisten emissiomittauspiste.



Kuva 6. Siikaisten immissiomittauspiste.



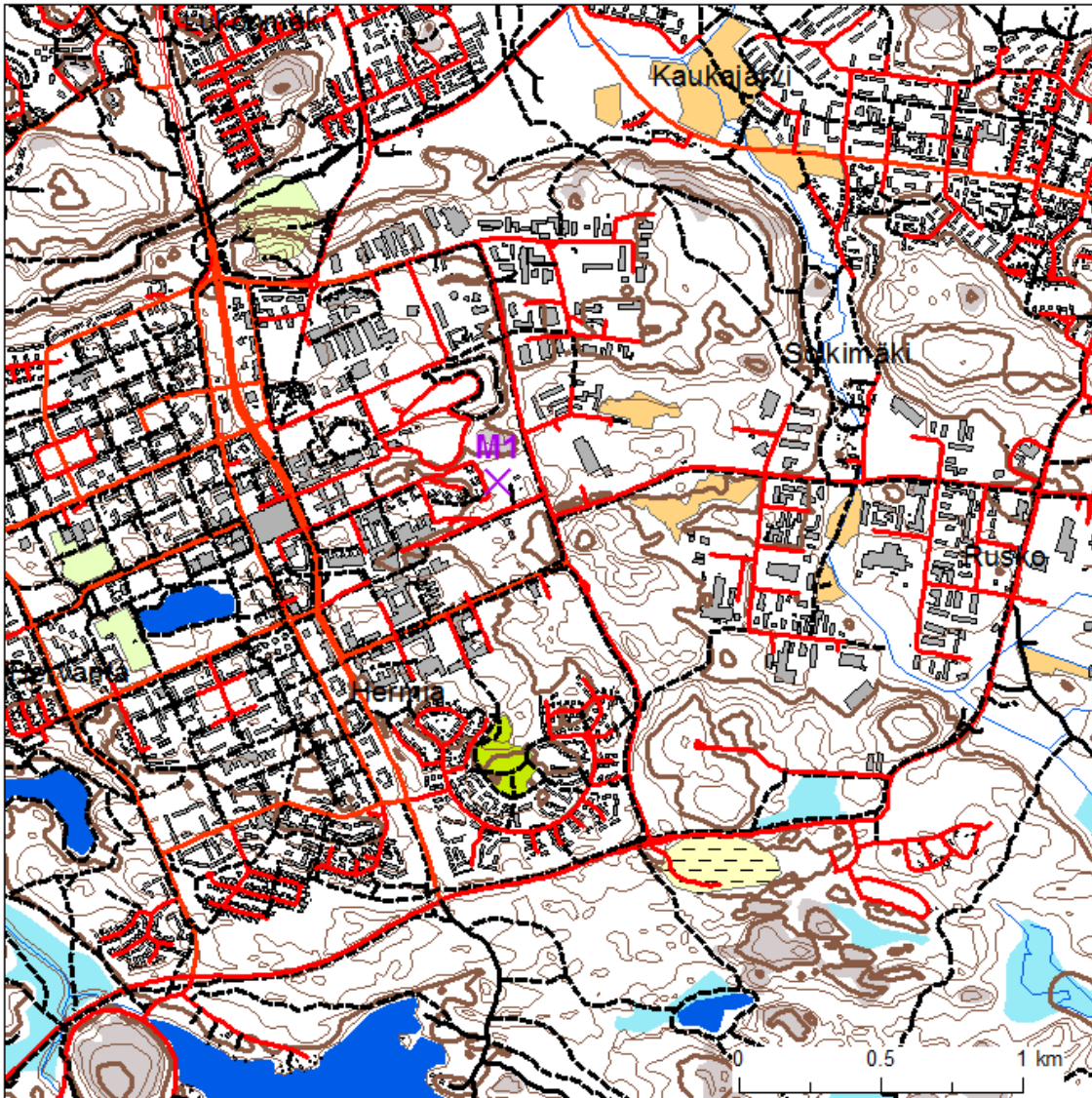
Kuva 7. Hyytiälän mittauspiste M1 (punainen rasti) ja sen ympäristö. Kartta sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 05/2017 ja Maastokartan 05/2017 aineistoa.



Kuva 8. Juupajoen Hyytiälän mittauspiste.



Kuva 9. Tampereen Hervannan mittauspiste.



Kuva 10. Hervannan mittauspiste M1 (vihreä rasti) ja sen ympäristö. Kartta sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 05/2017 ja Maastokartan 05/2017 aineistoa.

## 3.2 Mittausmenetelmät ja mittalaitteet

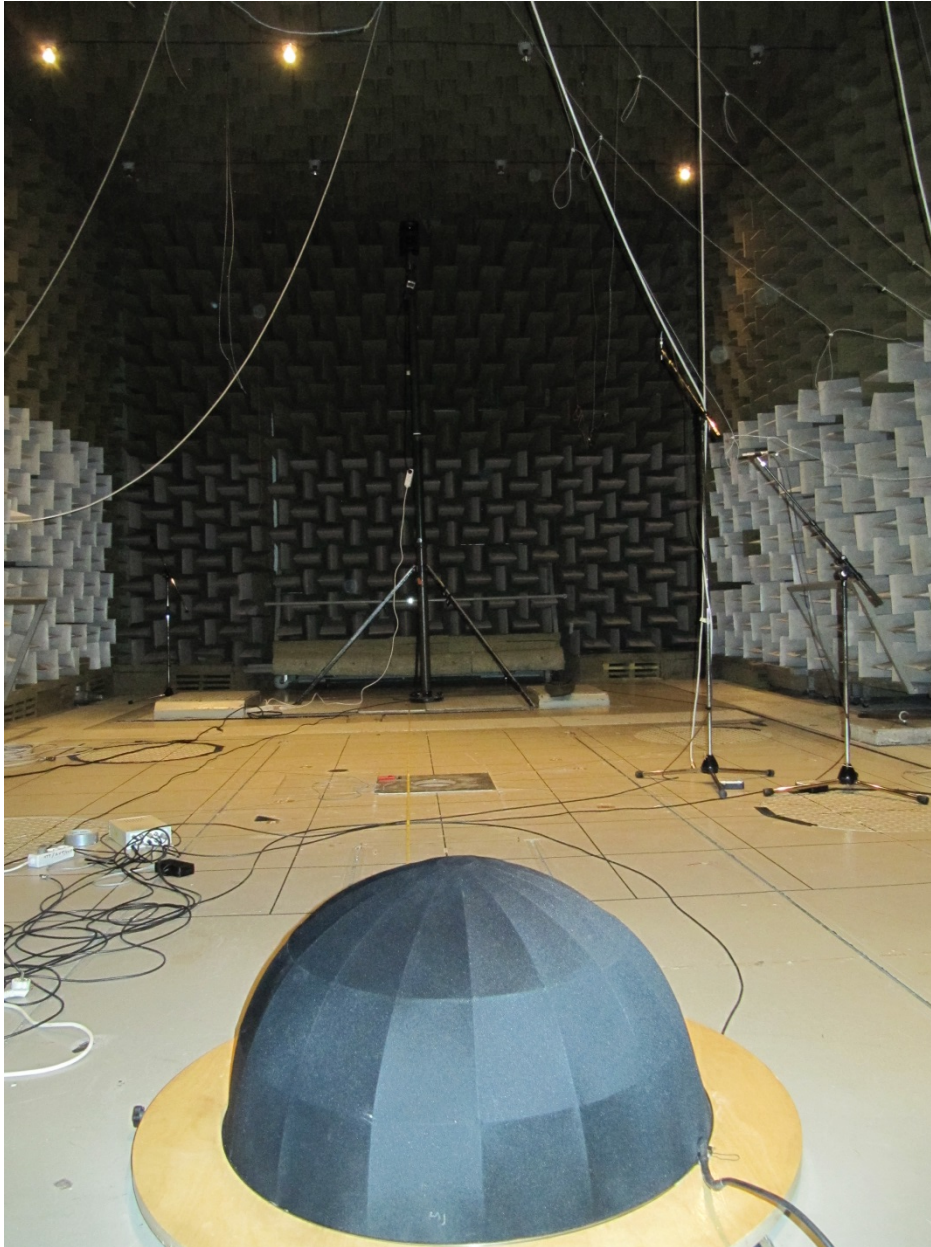
Tuulivoimamelun infräänelle ei ole mittausohjeistusta, mutta hankkeessa päätettiin soveltaa kansainvälistä tuulivoimaloiden emissiotasojen mittausstandardia IEC 61400-11:2012 (IEC, 2012). Standardin taajuusalue on 20 Hz–10 kHz, eikä siinä mittalaitteille ja menetelmille esitettyjen vaatimusten tai ohjeiden fyysikaaliset perusteet ulotu infräänialueelle. Standardin liitteessä A.2 mainitaan infräänien mittaus ja suositellaan käyttämään äänenpainetasoja laskettaessa G-painotusta. G-painotus on infräänille tarkoitettu painotus standardin ISO7196:1995 mukaisesti (ISO, 1995). Infräänien mittaus, fyysikaaliset vaatimukset huomioon ottaen, aiheuttaisi suuria käytännön vaikeuksia, esimerkiksi antureiden asemoinnin suhteen: standardin mukaan mittausmikrofoni sijoitetaan vähintään metrin halkaisijaltaan olevan levyn päälle, kun infräänialueella mitattaessa levyn tulisi olla jopa sata metriä halkaisijaltaan (0,1 Hz:n aallonpituus on yli 3 km).



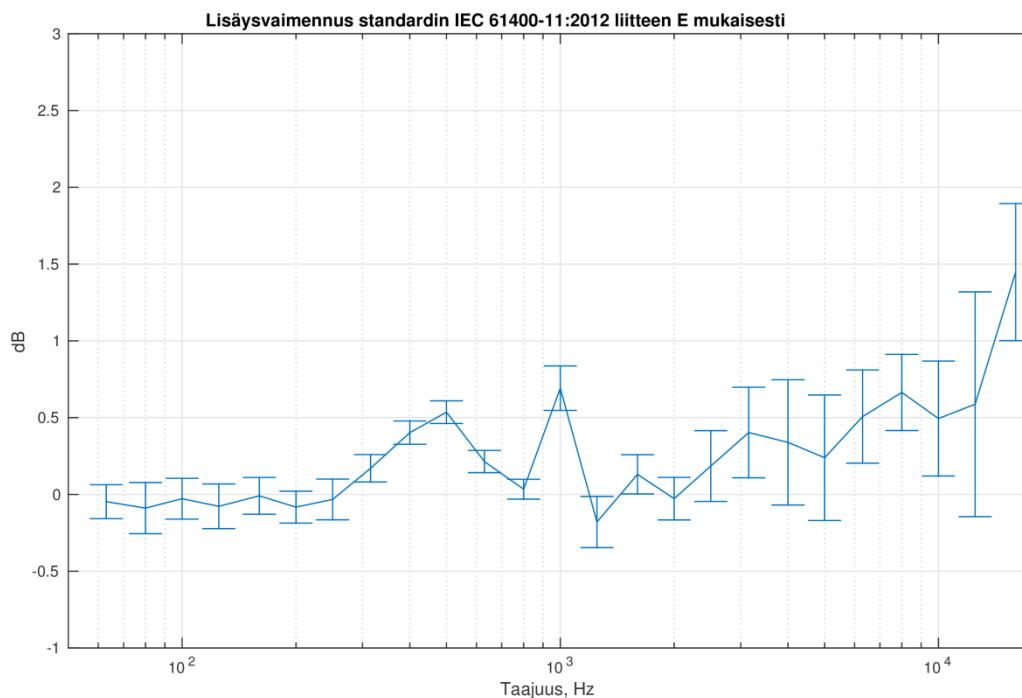
Käytimme sekä emissio- että immissiomittauspisteissä infraäänimikrofoneja (G.R.A.S. 47AC, G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, Holte, Tanska), jotka oli sijoitettu GFM 920.1-maalevyille (Microtech Gefell GmbH, Gefell, Saksa) sekä statiiviin 2 m:n korkeudelle maanpinnasta. Maalevyssä oli kaksi päällekkäistä, erisäteistä tuulisuojaa pienentämässä tuulen vaikutusta tuloksiin. Statiivimikrofoni oli sijoitettu 2,5 m:n etäisyydelle maalevymikrofonista siten, että kohtisuora etäisyys tuulivoimalasta oli sama kuin maalevymikrofonilla. Statiivimikrofonissa käytettiin Brüel&Kjærin säesuojaa tyypiltään 4198. Statiivimikrofonin tallentaman signaalin tarkoitus oli muodostaa akustinen suunta-antenni maalevymikrofonin kanssa, jotta muista suunnista kuin tuulivoimalasta tulevat äänet saataisiin minimoitua signaalinkäsittelyn keinoin. Lisäksi statiivimikrofonilla tallennettuja vasteita vertailemalla maalevymikrofoniin, kyettiin arvioimaan tuulen merkitystä lopputuloksen kannalta. Emissiopisteessä infraääni tallennettiin myös Chaparral Physics Model 25-mikrobarometrillä (Chaparral Physics, Fairbanks, Alaska, USA). Mikrobarometriin liitettynä käytettiin valmistajan suosittelemaa neljää huokoista kastelulettoa, kukin pituudeltaan 15 m. Letkut asetettiin ristin muotoon siten, että mikrobarometri sijaitsee ristin keskellä ja yksi ristin haaroista osoitti kohti lähintä tuuliturbiinia. Kauempana tuulivoimaloista olevissa immissiomittauspisteissä akustiset anturit olivat muuten vastaavat, mutta ilman mikrobarometriä.

Koska mittalaitteita jouduttiin modifioimaan jonkin verran mittauskampanjan erityisvaatimuksia varten, kaikki mittalaitteet testattiin ja kalibroitiin ennen mittauksia VTT:n äänilaboratoriossa Tampereella. Esimerkiksi maalevyjen tuulisuojiihin lisättiin lämmityskaapelointi sekä kämmenen kokoinen muovikalvo ulomman tuulisuojan yläpintaan estämään sadeveden suora osuminen keskellä levyä olevaan mikrofoniiin. Myös muokattujen tuulisuojien aiheuttamat lisäsvaimennukset mitattiin (kuva 11) ja niiden todettiin täyttävän IEC 61400-11:2012 -standardin vaatimukset (kuva 12). Alle 100 Hz:n taajuuksilla tuulisuojien vaikutus lähestyy nollaa ja on infraäänillä käytännössä nolla.

Sen lisäksi, että mittausketjun yksittäiset komponentit mitattiin yksilöllisesti, myös koko mittausketju mikrofonista AD-muuntimiin mitattiin kokonaisuutena, jotta saatiin varmuus mittausjärjestelmän vaatimista, yhteenlasketuista kalibrointikertoimista. Tulosten laskennassa laboratoriossa mitatut kalibrointikertoimet otettiin huomioon komponenttikohtaisesti, niin mikrofoneille, tuulisuojille, mittausvahvistimille, kuin tallennusjärjestelmällekkin.



Kuva 11. Muokatun maalevytuulisuojan lisäysvaimennusmittaus puolikaiuttomassa huoneessa. Kaiutin taustalla olevassa mastossa kuvaa tuuliturbiinia äänilähteenä.



Kuva 12. VTT:n laboratoriossa mitattu, muokatun GFM 920.1-maalevytuulisuojan (SN 3499) lisäsvaimennus.

Melumittausten lisäksi mittauspisteissä seurattiin vallitsevia sääolosuhteita käyttäen Davis Vantage Pro2-sääasemia sekä Davis Envoy 8x-datankeräimiä (Davis Instruments Corporation, Hayward, Kalifornia, USA). Mittauspisteissä sääaseman kokoonpano koostui Davis Vantage Pro2-anturistosta (mitattavat suureet lämpötila, ilmankosteus, ilmanpaine, sademäärä, auringon säteilyn sekä UV-säteilyn voimakkuus) sekä kahdesta anemometristä (mitattavat suureet tuulen voimakkuus ja suunta). Anemometrit asetettiin mittaamaan tuulen voimakkuutta ja suuntaa 2 m ja 10 m:n korkeuksilta käyttäen alumiinisia Spiderbeam-mastoja (Spiderbeam GmbH, Spremberg, Saksa).

Kaikkien akustisten antureiden signaalit tallennettiin laajakaistaisena 24-bittisenä lineaarisena PCM-signaalina 48 kHz:n näytteenottotaajuudella. Käytännön syistä signaalit tallennettiin 10 minuutin pätkissä, mutta jatkuvasti ympäri vuorokauden. Käytännön syistä myös analyysi toteutettiin 10 minuutin pätkissä, koska liukuva analyysi olisi kestänyt merkittävästi kauemmin. 10 minuuttia on kuitenkin riittävä aika, jotta myös infraäänialueelle saadaan tilastollisesti luotettavia tuloksia, sillä siihen mahtuu 100 jaksoa 0,17 Hz:iin saakka. Keskimääräinen signaalienergia laskettiin integroimalla neliöidyt äänenpainetasot ajan suhteen koko mittausjakson yli. Kaikki tässä raportissa esitetyt vakiokaistaspektrit on laskettu FFT-suotimella terssikaistoittain taajuusvälillä 0,1–10 000 Hz ja keskiäänitasot on laskettu vain kuvissa näkyville kaistoille painotuksineen. Painottamattomien ( $L_Z$ ) lisäksi esitetään A-painotetut ( $L_A$ ) sekä G-painotetut ( $L_G$ ) keskiäänitasot. Äänidataa kertyi kuukauden mittauksista tuhansia gigatavuja ja koska myös laskenta tehtiin laajakaistaisena, se vei yli kolme vuotta CPU-aikaa, mutta käytännössä hajautettuna VTT:n laskentaklusterissa noin kuukauden.

Äänitallenteet saattavat sisältää myös muita kuin tuulivoimaloiden melua, koska niiden poistaminen kuuntelemalla kaikki ääninäytteet läpi olisi ollut hankkeen tiukasta aikataulusta johtuen mahdotonta. Näytteille tehtiin kuitenkin karkea suodatus, jossa laskettiin ensin keskiäänitaso koko mittausjakson yli ja sen jälkeen poistettiin jokainen 10 minuutin jakso, jossa millä tahansa taajuuskaistalla esiintyi yli 20 dB

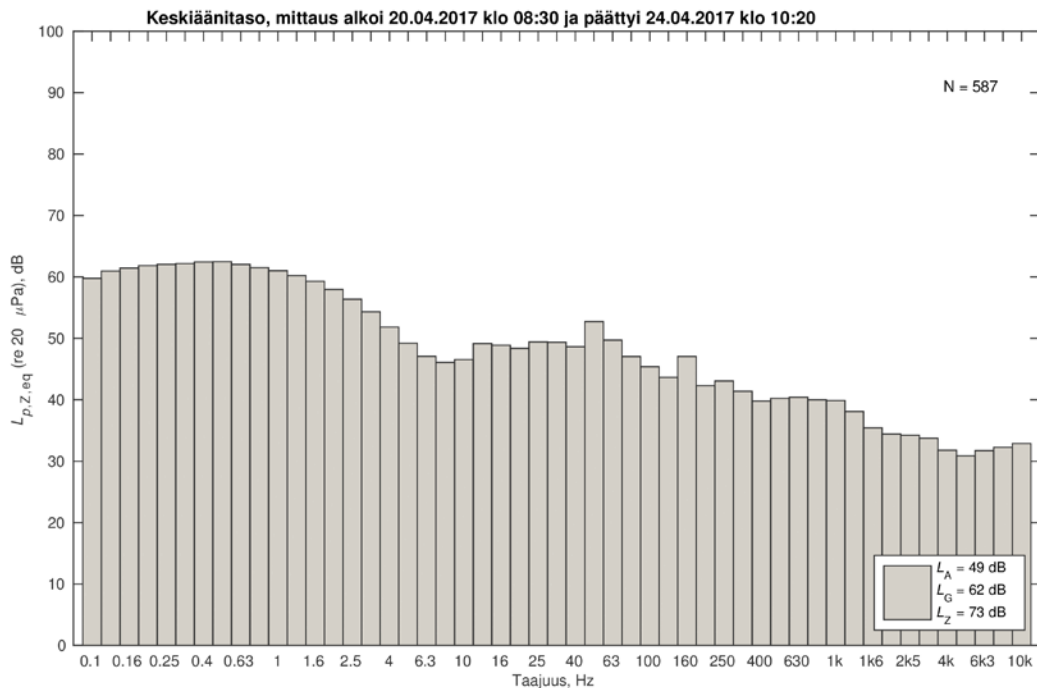
suurempi äänenpainetaso kuin ensin lasketussa keskiäänitasossa. Näitä poistettuja aikajaksoja oli muutamia, esimerkiksi traktorilla ajo mikrofonien viereltä, ja ne käyvät ilmi seuraavan kappaleen tuloksista: mitatun aikajakson pituus ja hyväksytyjen 10 minuutin jaksojen lukumäärä (N) käy ilmi kuvista.

Mittaustuloksille ei ole tehty maaheijastuskorjausta (-6 dB). Infraäänitaajuuksilla maaheijastusta ei ole mielekäästä vähentää lopputuloksesta, koska maaheijastuksen vaikutusalue ulottuu korkealle maanpinnasta suuren aallonpituuden (kymmenistä metreistä kilometriin) vuoksi. A-painotetuille keskiäänitasoille korjaus olisi perusteltua tehdä, mutta johdonmukaisuuden vuoksi kaikki taajuusjakaumien yhteydessä esitettävät keskiäänitasot ovat ilman maaheijastuskorjausta.

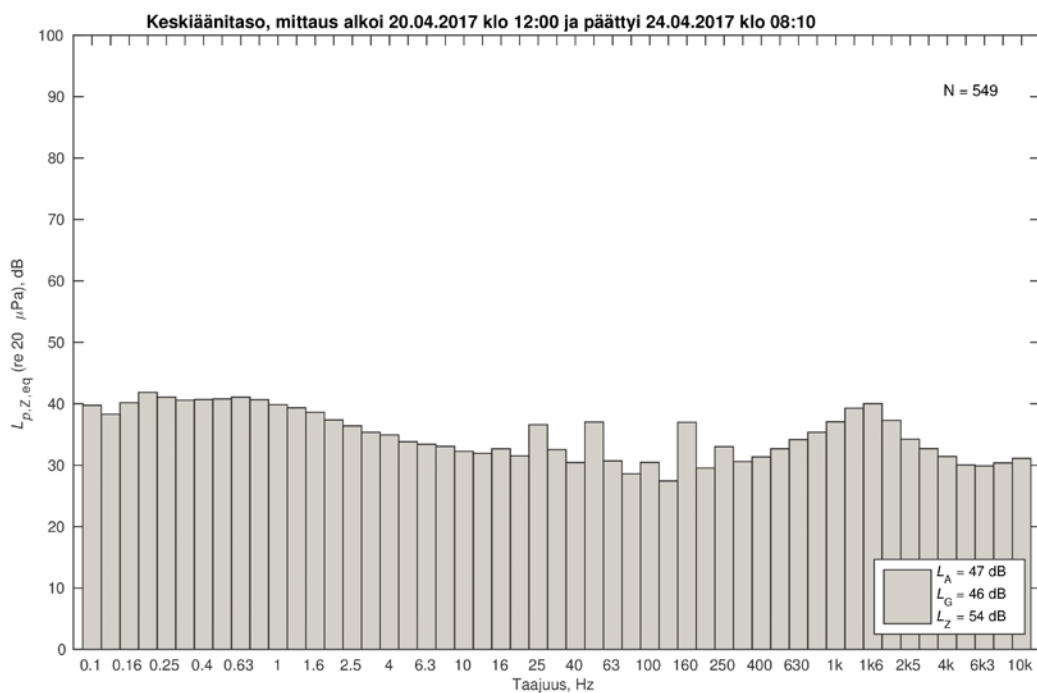
### 3.3 Tulokset

Ympäristössä vallitsevan infraäänien tasoja voi arvioida, kun tarkastellaan kaupunkiympäristön (kuva 13) ja syrjäisen metsäympäristön (kuva 14) keskiäänitasoja. Painottamaton eli lineaarinen keskiäänitaso ( $L_z$ ) muodostuu kaupunkiympäristössä käytännössä infraäänistä (73 dB), mutta metsässä spektri on huomattavasti tasaisempi ja keskiäänitaso on 19 dB pienempi (54 dB). Mittaukset tehtiin viikonlopun yli perjantaista 20.4. maanantaiaamuun 24.4. Kaupunkiympäristön äänitaso on luultavasti aliarvioitu viikonlopun hiljaisten tuntien vuoksi, kun taas metsäympäristön tasot ovat odotettua suurempia, jota voi selittää se, että alueen ympäristössä oli sotaharjoitus viikonlopun aikana. Lisäksi viikonlopun mittaustuloksissa esiintyvä 50 Hz:n häiriö kerrannaisineen vaikuttaa Hyytiälän tulokseen.

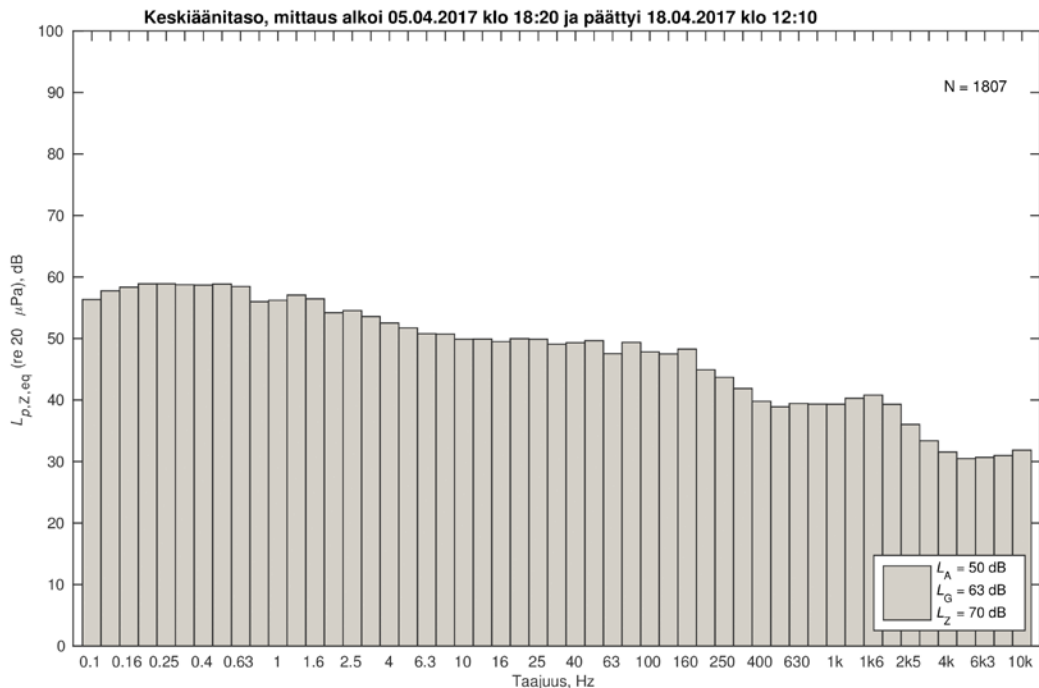
Infraäänien keskiäänitaso viikonlopun kaupunkiympäristössä oli samaa suuruusluokkaa kuin Salon tai Siikaisten voimaloiden lähellä mitatut infraäänitasot. Salon mittausjaksolla, 5.4. ja 18.4. välillä, keskiäänitaso oli emissiopisteessä (200 m lähimmästä tuuliturbiinista) painottamattomana 70 dB ja immissiopisteessä 65 dB. Vastaavat keskiäänitasot Siikaisista mittausjaksolla 25.4.–9.5. olivat 73 dB ja 63 dB.



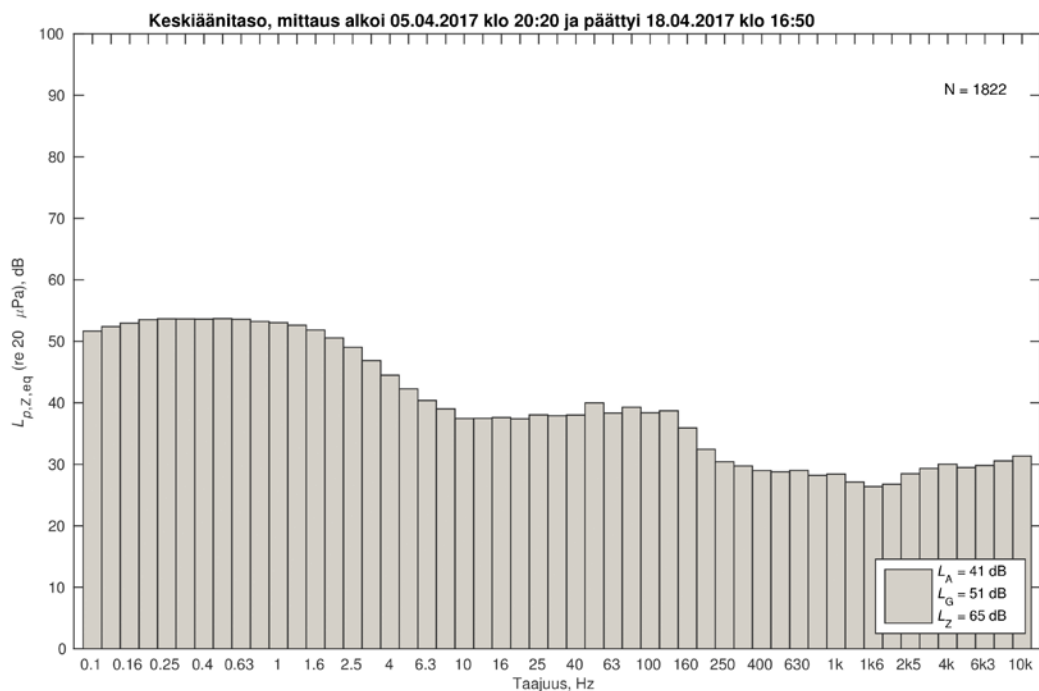
Kuva 13. Hervannan mittausjakson keskiäänitaso.



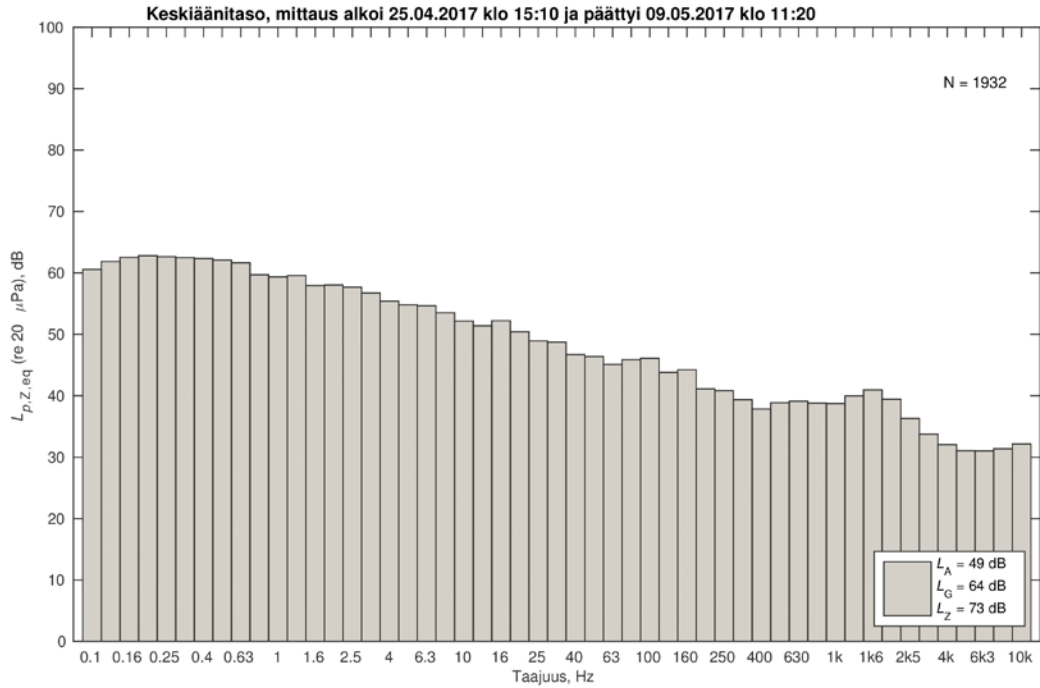
Kuva 14. Hyytiälän mittausjakson keskiäänitaso.



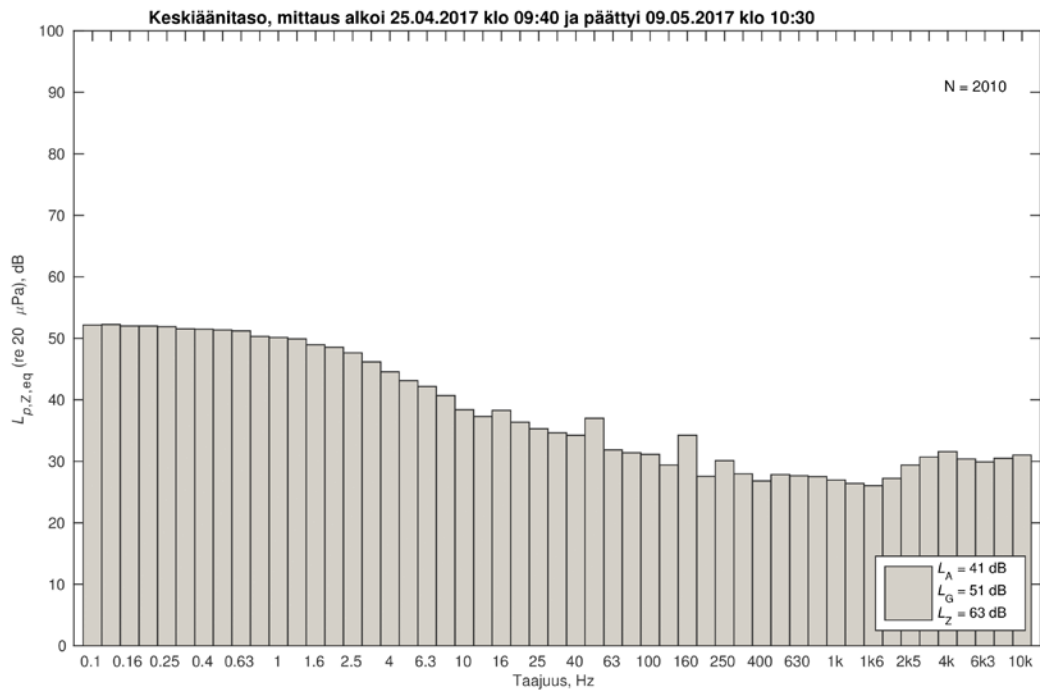
Kuva 15. Salo, keskiäänitaso emissiomittauspisteessä maalevymikrofonilla.



Kuva 16. Salo, keskiäänitaso immissiomittauspisteessä maalevymikrofonilla.



Kuva 17. Siikainen, keskiäänitaso emissiomittauspisteessä maalevymikrofonilla.



Kuva 18. Siikainen, keskiäänitaso immissiomittauspisteessä maalevymikrofonilla.

## 3.4 Kontrolloitu emissiomittaus, tuulivoimaloiden pysäytys

IEC 61400-11 -standardin mukainen emissiomittaus antaa luotettavimman arvion voimaloiden tuottamasta äänestä. Mittaus suoritetaan tuulen eri nopeuksilla ja myös tuuliturbiini pysäytettynä. Tämän hankkeen aikataulu ei mahdollistanut vastaavaa, eri tuulen nopeudet kattavaa mittausta, mutta päätimme tehdä emissiomittauksen ainakin yhdelle pysäytys- ja pyörimissyklille.

Odotimme sääolosuhteiltaan sopivaa päivää ja vaikka mittauspisteemme kannalta tuulen suunta olikin väärä, päätimme toteuttaa mittaukset maanantaina 8.5.2017, koska tuulen nopeus oli riittävä kokeelle. Siirsimme mittauspisteen täsmälleen valitun tuuliturbiinin taakse, alatuulen puolelle (kuva 20) ja teimme manuaalisesti keskimäärin kymmenen minuutin tallennuksia tilanteista, joissa

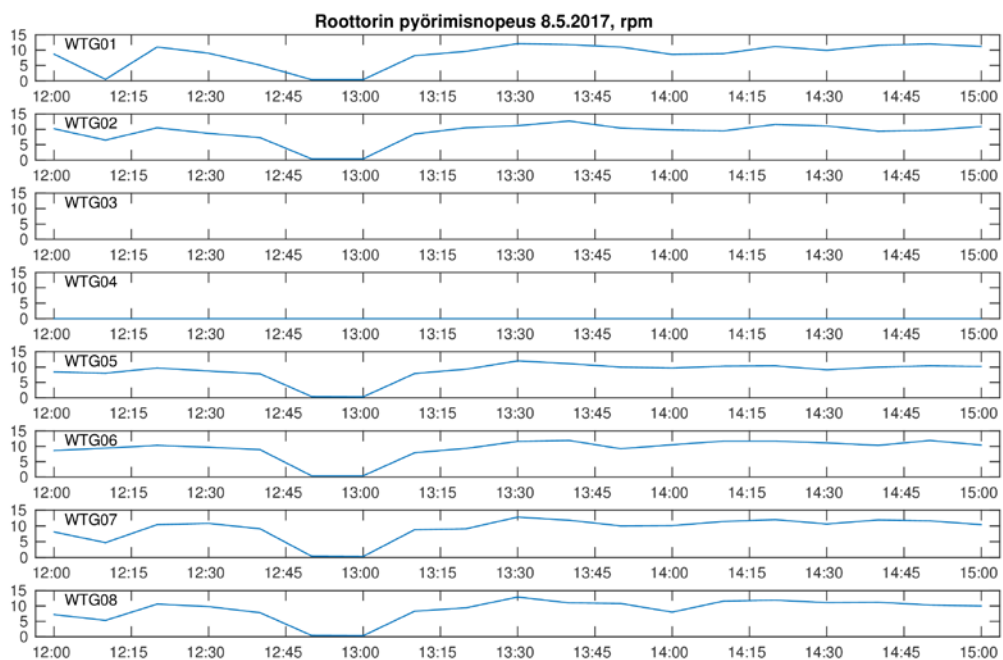
- a) tuuliturbiinit pyörivät normaalisti (11–12,9 rpm, kaksi turbiinia oli seisokissa koko ajan),
- b) kaikki alueen kahdeksan tuuliturbiinia pidetään jarrulla paikoillaan ja
- c) tuuliturbiinit pyörivät hitaasti (4–8 rpm).

Mitatut painottamattomat keskiäänitasot muodostuvat käytännössä infraäänestä. Voimakas turbulenti tuuli aiheutti huomattavan suuret infraäänitasot, kun kaikki tuuliturbiinit olivat pysäytettyinä ( $L_z=87$  dB, kuva 21). Tuuliturbiinien pyöriessä nimellinopeudellaan, painottamaton keskiäänitaso nousee kolme desibeliä ( $L_z=90$  dB) ja samoin myös kuuloalueella sijaitsevat taajuuskaistat 100 Hz:iin saakka (kuva 22). G-painotettu keskiäänitaso paljastaa turbiinien pyörimisen selkeämmin, tason noustessa 55 desibelistä 69 desibeliin.

Suurin keskiäänitaso ( $L_z=93$  dB, kuva 23) saatiin, kun tuuliturbiinit pyörivät hitaasti. Tosin tämä tallenne on vain 158 sekuntia, koska turbiinit lähtivät pyörimään nopeammin ja uudesta tilanteesta tehtiin taas uusi tallennus. Alasajon ajankohta oli sovittu Tuuliwatti Oy:n operaattorin kanssa, mutta reaaliaikaista yhteyttä operaattoriin meillä ei ollut, vaan tuuliturbiinien pyöriminen todettiin visuaalisesti. Operaattori toimitti myöhemmin voimaloiden lokitiedot, joista havaintomme voitiin varmentaa (esim. pyörimisnopeudet, kuva 19).

Mittauksen aikaiset hetkelliset vaihtelut eivät tule esiin keskiäänitasoja tarkasteltaessa. Jos tarkastellaan a-tilannetta (tuuliturbiinit pyörivät normaalisti) liukuvalla 50 ms:n aikaikkunalla, saadaan suurimmaksi hetkelliseksi tehollisarvoksi 107 dB (kuva 24). Ajallista vaihtelua voidaan tarkastella myös spektrogrammien avulla, joista voidaan päätellä, mm. millä taajuusalueella vaihtelu on ajan funktiona (kuva 25 ja kuva 26). Sama huippuarvo (107 dB) tulee myös b-tilanteessa, jossa kaikki tuuliturbiinit ovat pysäytettyinä (kuva 27). Kokonaistason ajallisen vaihtelun perusteella ei voi päätellä tuuliturbiinien toimintaa (kuva 27 vs. kuva 24), mutta turbiinien toiminta käy selkeästi ilmi vertaamalla spektrogrammeja: kuva 25 ja kuva 28. Pysäytystilanne alkaa ajanhetkeltä 12:50 ja normaalitilanne ajanhetkeltä 13:20 (kuva 19).

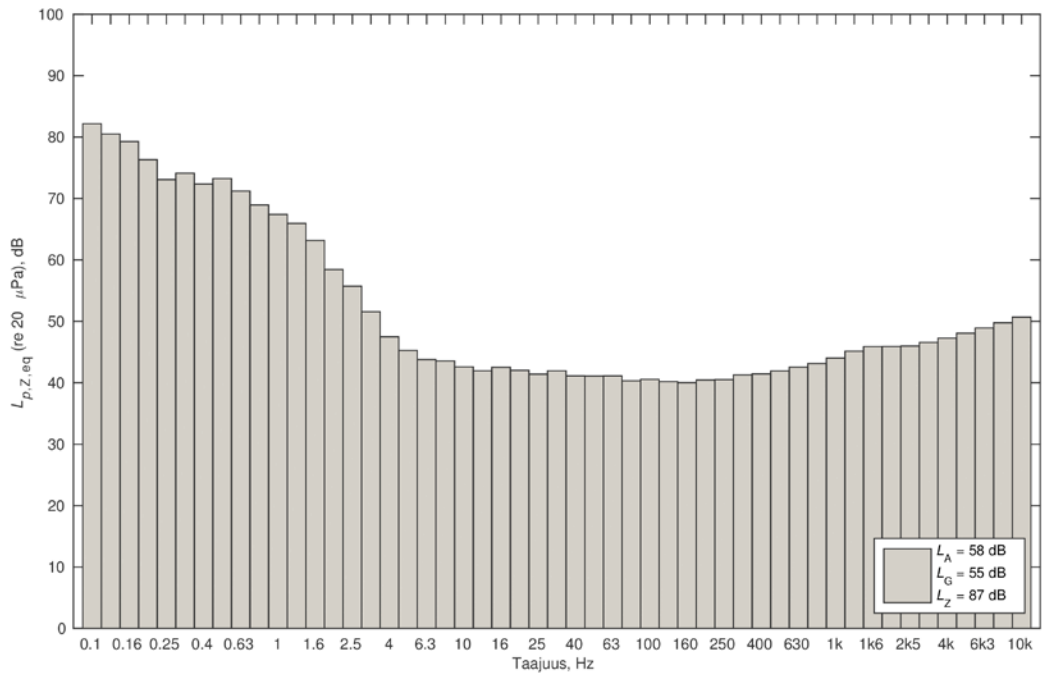




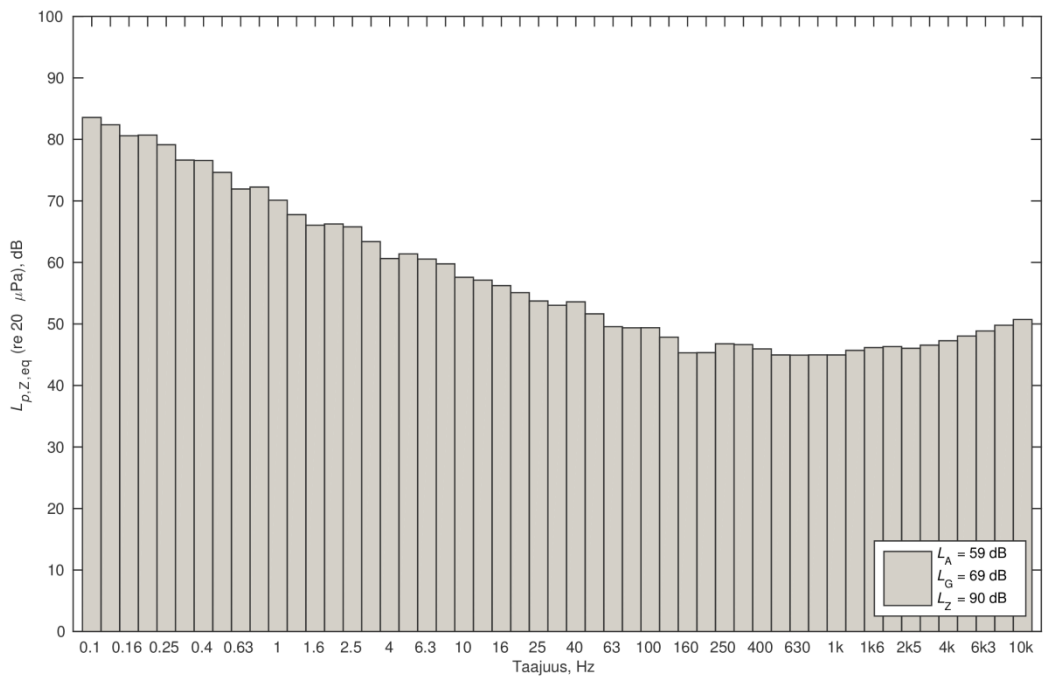
Kuva 19. Tuulivoimatuotantoalueen pysäytyksen aikaiset roottorien pyörimisnopeudet Siikaisten voimaloista mitattuna.



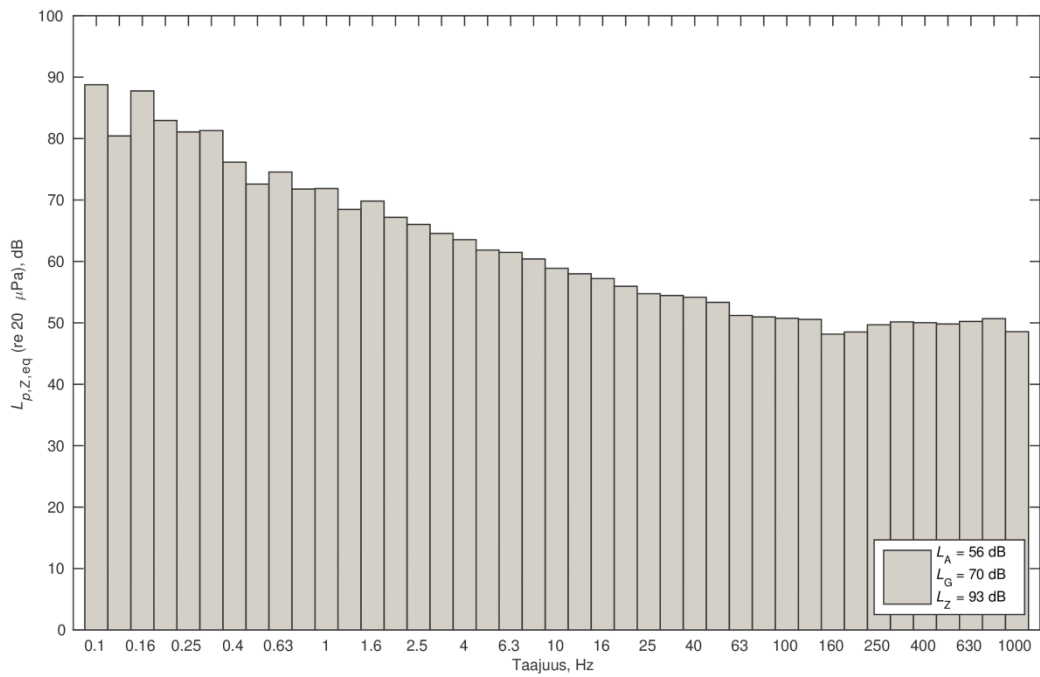
Kuva 20. Tuulivoimatuotantoalueen pysäytyksen aikainen mittauspiste pellon laidalla.



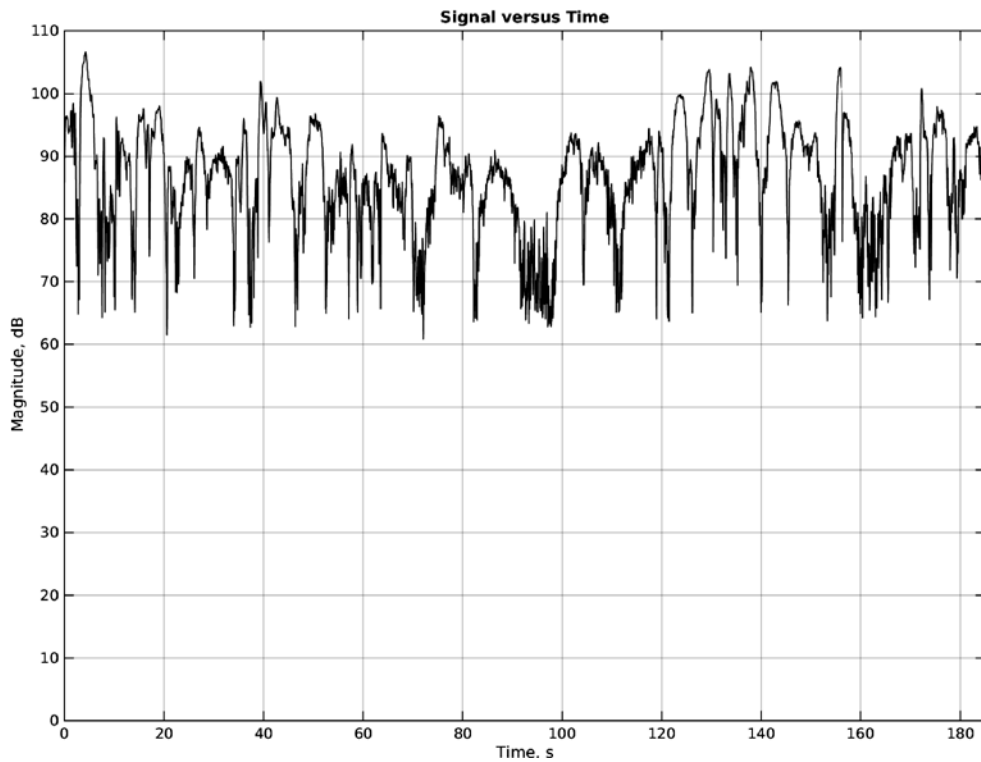
Kuva 21. Siikainen, keskiäänitaso emissiomittauspisteessä kaikki turbiinit pysäytettynä (taustamelutaso).



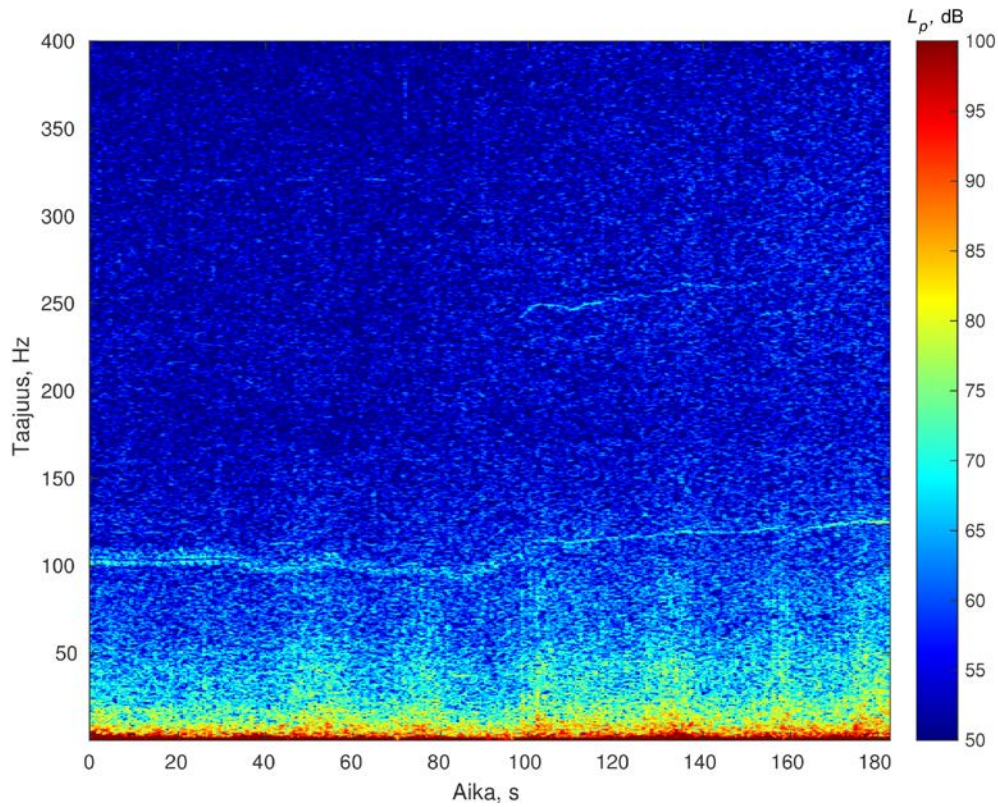
Kuva 22. Siikainen, emissiomittauksen keskiäänitaso, kun tuuliturbiinit pyörivät normaalisti.



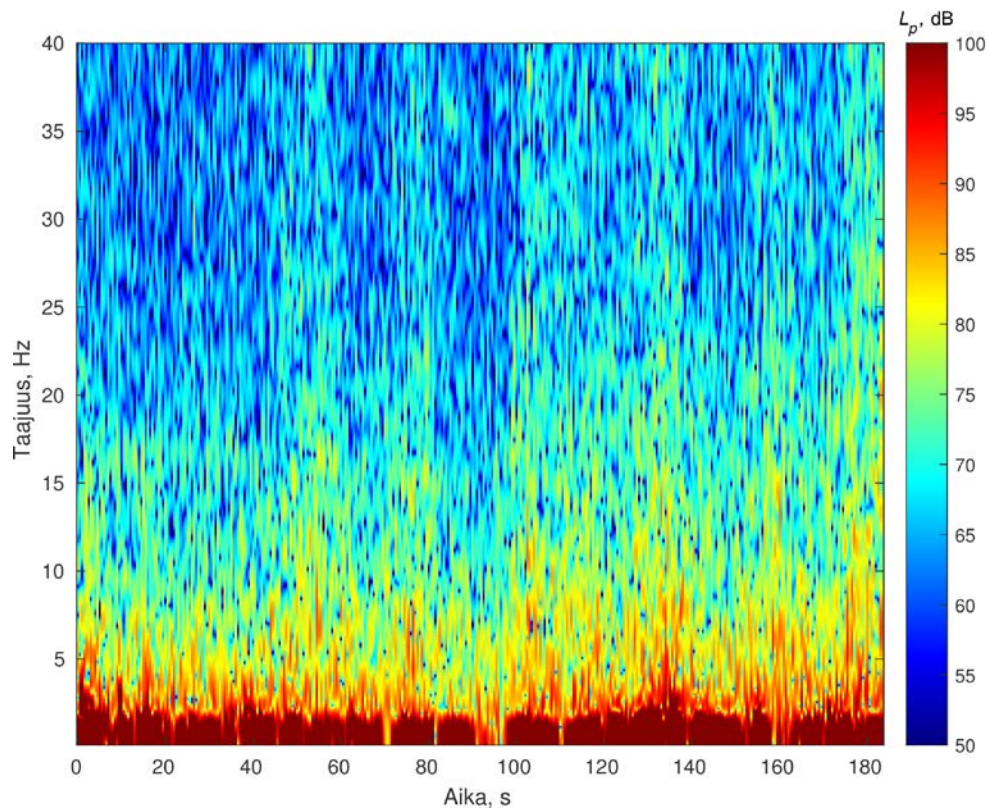
Kuva 23. Siikainen, emissiomittauksen keskiäänitaso, kun tuuliturbiinit pyörivät hitaasti.



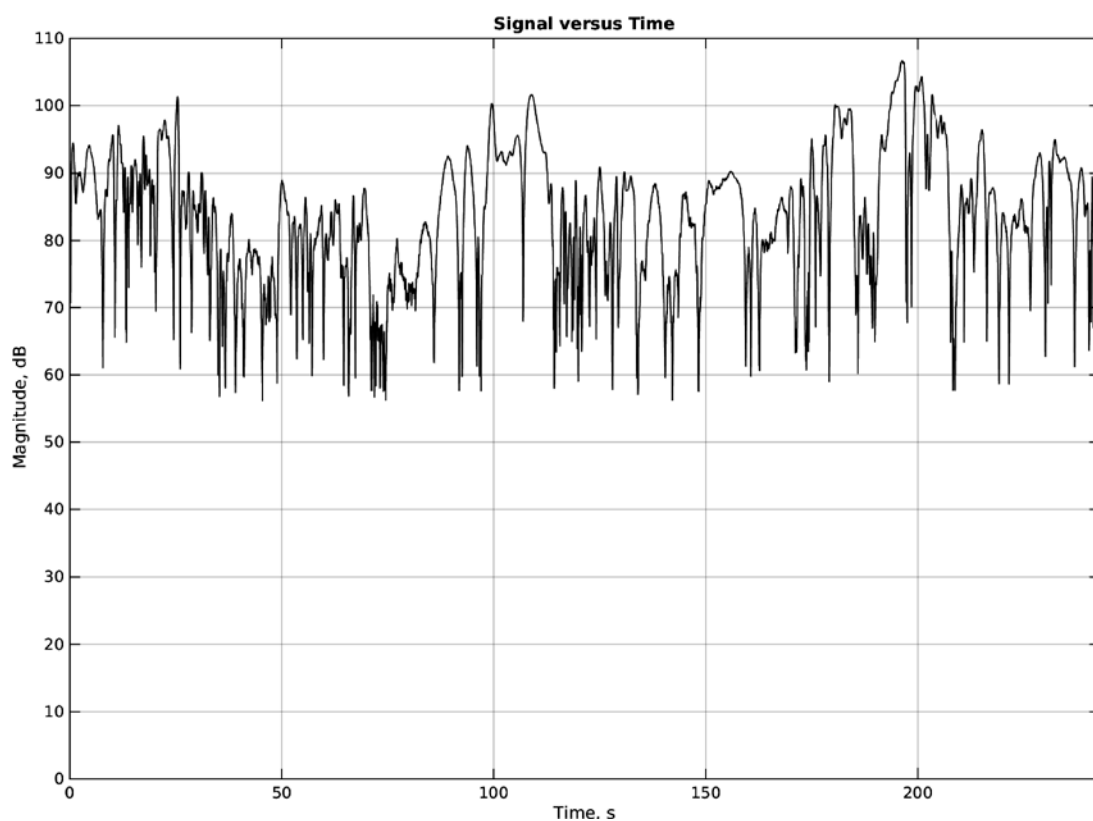
Kuva 24. Siikainen, emissiomittauksen ajallinen vaihtelu, kun tuuliturbiinit pyörivät normaalisti.



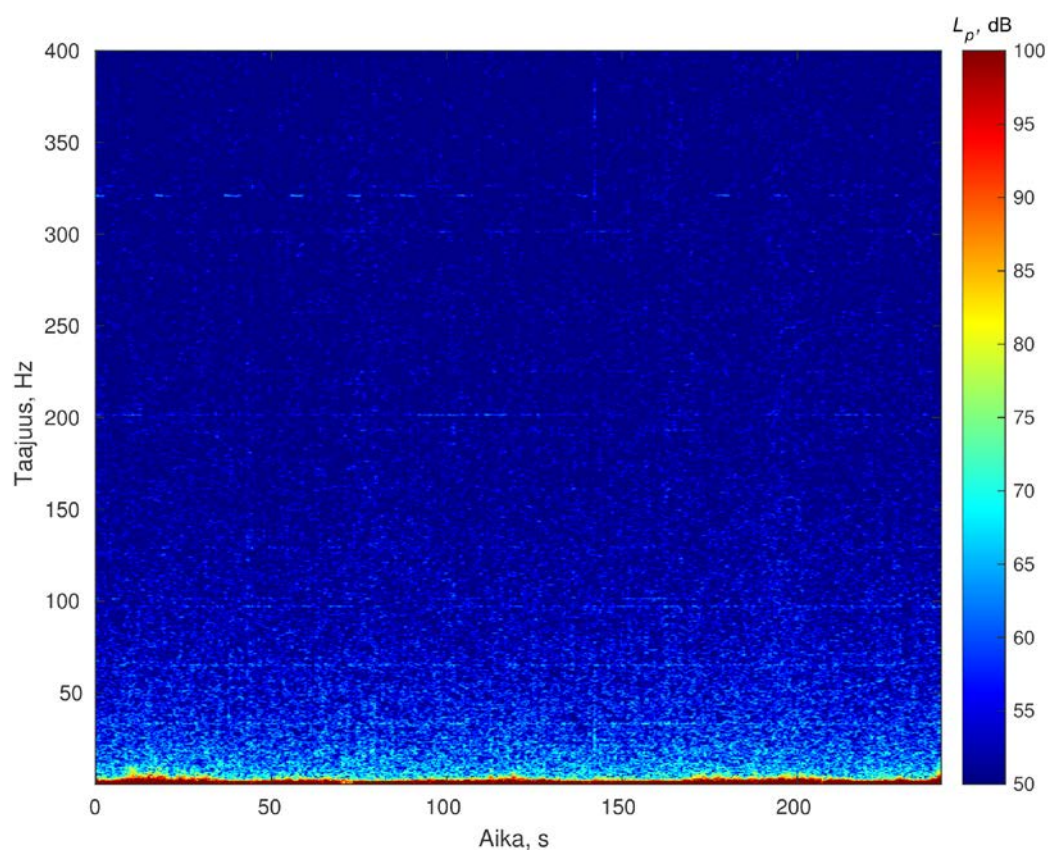
Kuva 25. Siikainen, emissiomittauksen ajallinen vaihtelu, kun tuuliturbiinit pyörivät normaalisti. Spektrogrammin taajuusresoluutio on 0,5 Hz ja aikaresoluutio 1 618 ms.



Kuva 26. Siikainen, emissiomittauksen ajallinen vaihtelu, kun tuuliturbiinit pyörivät normaalisti. Spektrogrammin taajuusresoluutio on 1,0 Hz ja aikaresoluutio 996 ms.



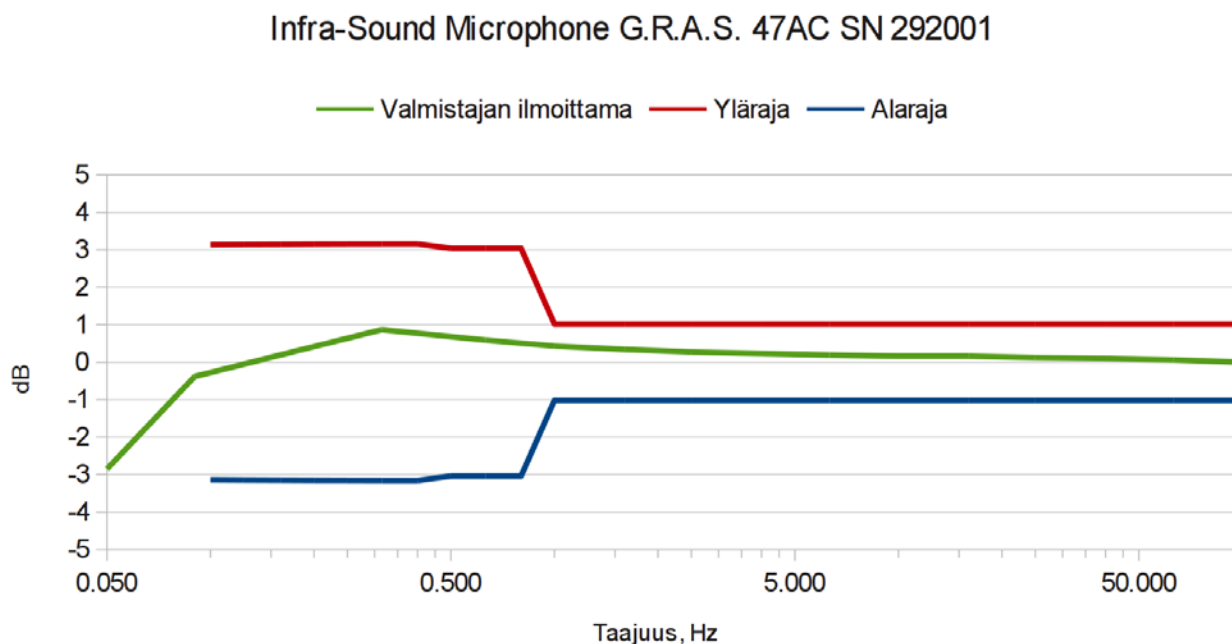
Kuva 27. Siikainen, taustamelutason vaihtelu emissiomittauspisteessä kaikki turbiinit pysäytettyinä.



Kuva 28. Siikainen, taustamelutason vaihtelu emissiomittauspisteessä kaikki turbiinit pysäytettyinä. Spektrogrammin taajuusresoluutio on 0,5 Hz ja aikaresoluutio 1 619 ms.

## 3.5 Mittausepävarmuus

Kaikkeen mittaamiseen liittyy mittausepävarmuus. Sähköisten komponenttien osalta suurin mittausepävarmuuden lähde mittauksissa on mikrofoni, jolle valmistaja ilmoittaa alle hertsin taajuuksille toleranssiksi  $\pm 3$  dB, suuremmille taajuuksille (1–10 000 Hz)  $\pm 1$  dB (kuva 29). Mittausketjun herkkyys mikrofoniasta tallenninjärjestelmään tarkistettiin aina ennen ja jälkeen, sekä välillä myös kesken mittauksen mäntäänilähteellä Brüel&Kjær Type 4220, jonka kalibroitodistuksen mukainen mittausepävarmuus on 0,08 dB.

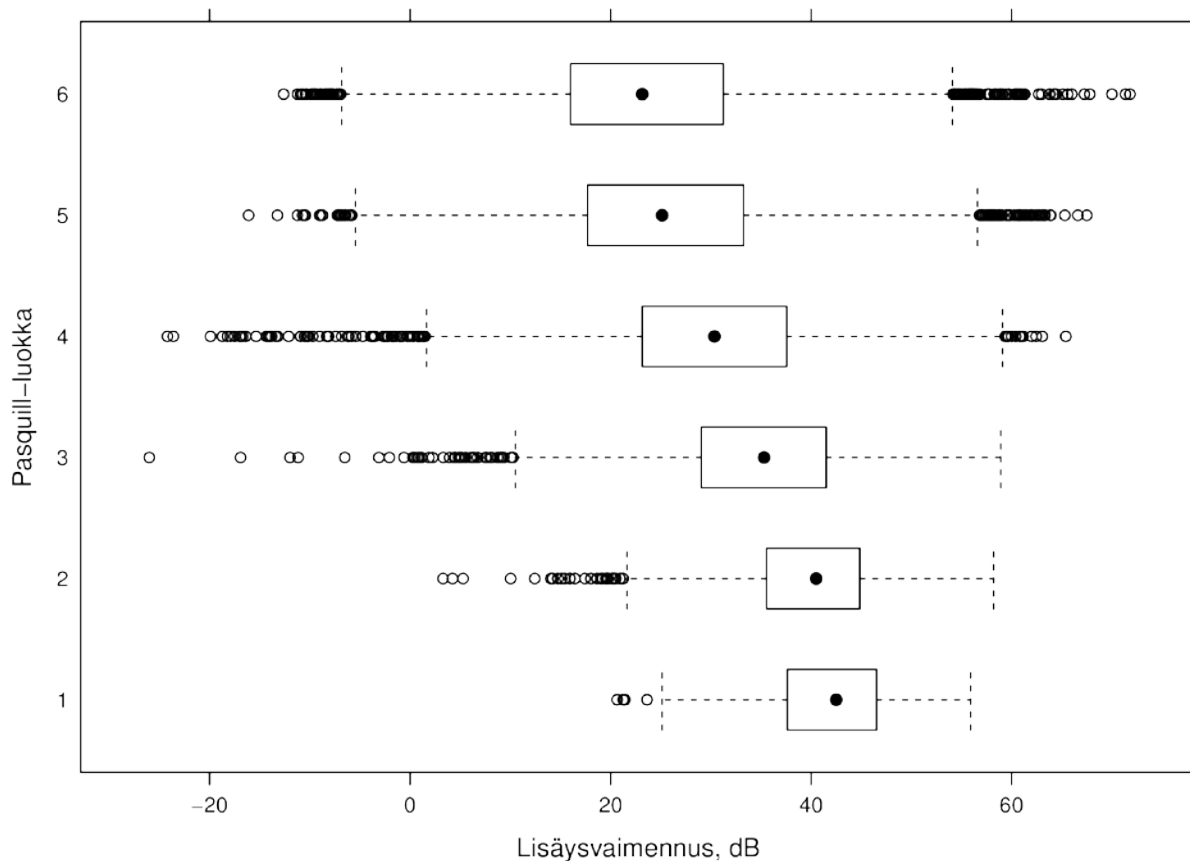


Kuva 29. Mittauksissa käytetyn mikrofoniityypin toleranssirajat ja yhden mikrofoniin vaste infraäänitaajuuksilla.

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 mittauspaikan valinnassa. Sen sijaan sään aiheuttama vaihtelu muuttuu sitä haasteellisemmaksi, mitä kauemmaksi äänilähteestä siirrytään. Emissiomittaukset tehdään aina mahdollisimman lähellä äänilähdettä, mutta äänilähteen omat dimensiot määrittelevät minimietäisyyden. Tuuliturbiinien tapauksessa emissiomittausetäisyys,  $d=h+r/2$ , lasketaan navan korkeudesta  $h$  ja roottorin halkaisijasta  $r$ . Koska mittaus tehdään ainoastaan alatuulilanteessa, myös tuulen nopeus huomioiden, on sään aiheuttama epävarmuus hallittavissa.

Immissiomittauksissa sään vaikutus mittausepävarmuuteen on huomattava. On jopa esitetty, että tuuliturbiinien ääni vaimenisi infraäänillä sopivissa olosuhteissa ainoastaan 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa, viivalähteen lähteen kaltaisesti (Shepherd & Hubbard, 1991), 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 sään 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 30). Varsinkin tuulisina päivinä ja öinä, kun ilmakehän stabiilisuus on neutraali (Pasquill-luokka 4), voi äänenpainetaso 3 km:n etäisyydellä

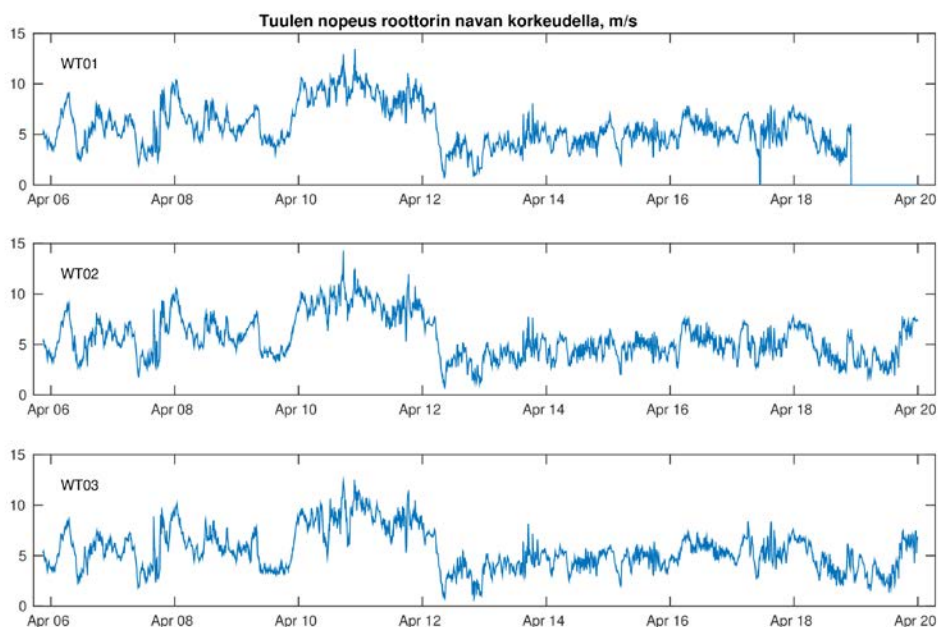
sijaitsevassa immissiopisteessä hetkellisesti ylittää 20 desibelillä geometrisen vaimenemisen perusteella arvioitun tason (kuva 30), vaikka lisäsvaimennuksen mediaani on yli 30 dB. Infraäänillä ympäristöolosuhteiden merkitys on pienempi kuin suuremmilla taajuuksilla, koska esimerkiksi ilmakehän ja maaperän absorptio on olemattoman pieni ja esteiden tulisi olla suuria (kymmenistä metreistä kilometreihin), jotta niillä olisi vaikutusta infraäänien etenemiseen.



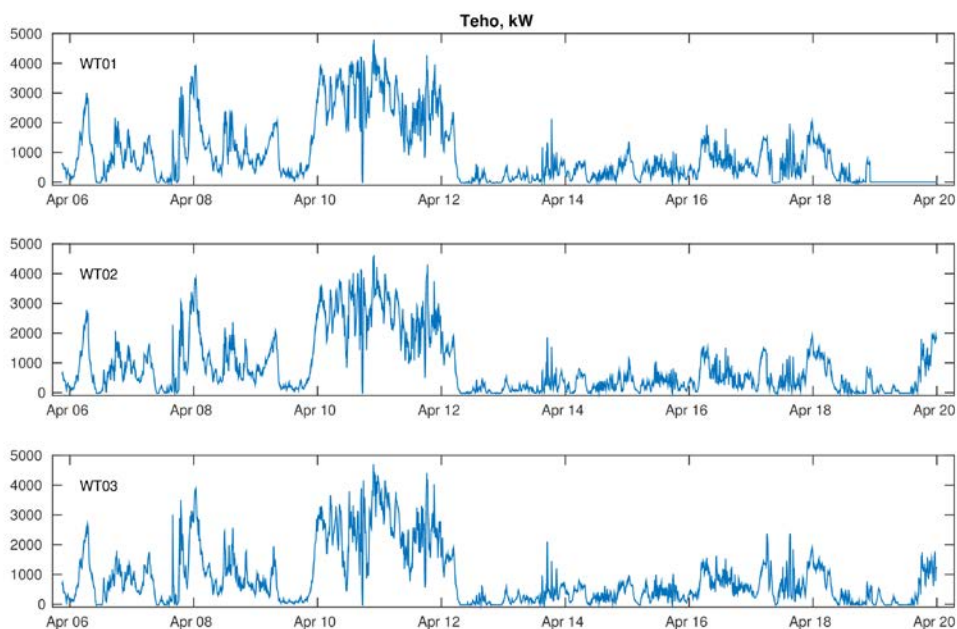
Kuva 30. Mittauksiin perustuva keskimääräinen lisäsvaimennus (40–1600 Hz) ilmakehän stabiilisuuden funktiona 3 km:n etäisyydellä (Maijala, 2013). Tuloksista kaksi keskimmäistä neljänestä (50 %) on rajattu laatikolla, mediaani on esitetty pisteellä ja viikset ulottuvat jakauman  $2.7\sigma$  asti.

## 3.6 Pohdinta

Salon mittausajanjaksolle osui varsin vähän tuulisia päiviä (kuva 31) ja tuuliturbiinit kävivät suurimman osan ajasta pienellä teholla (kuva 32).

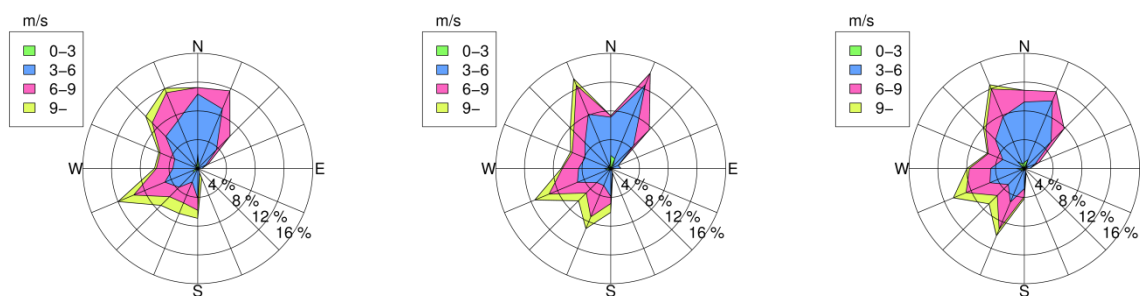


Kuva 31. Keskimääräinen (10 min.) tuulen nopeus Salon voimaloista mitattuna.



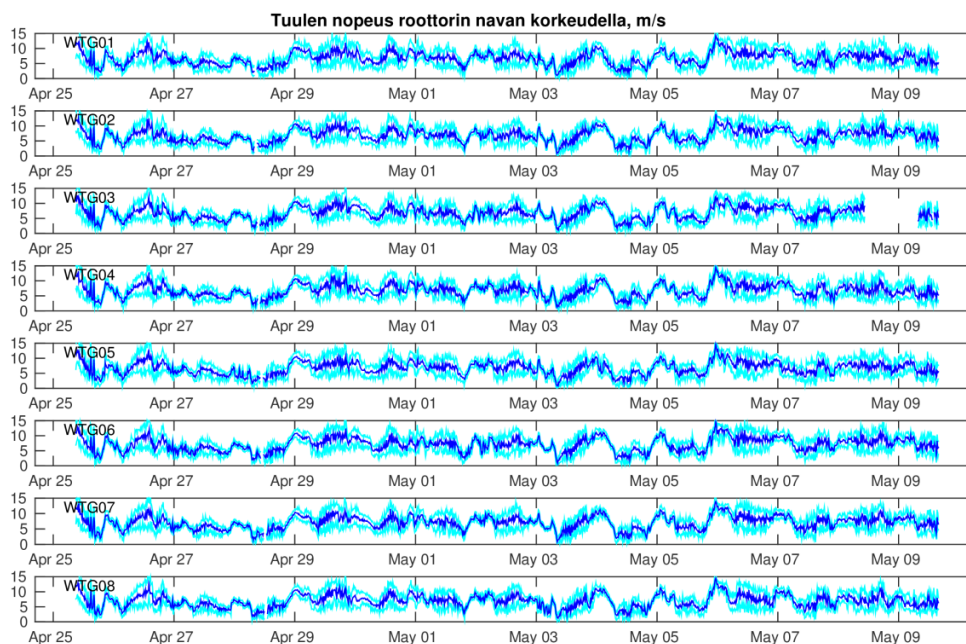
Kuva 32. Keskimääräinen (10 min.) tuotettu sähköteho Salon voimaloista (maksimi 5 MW).



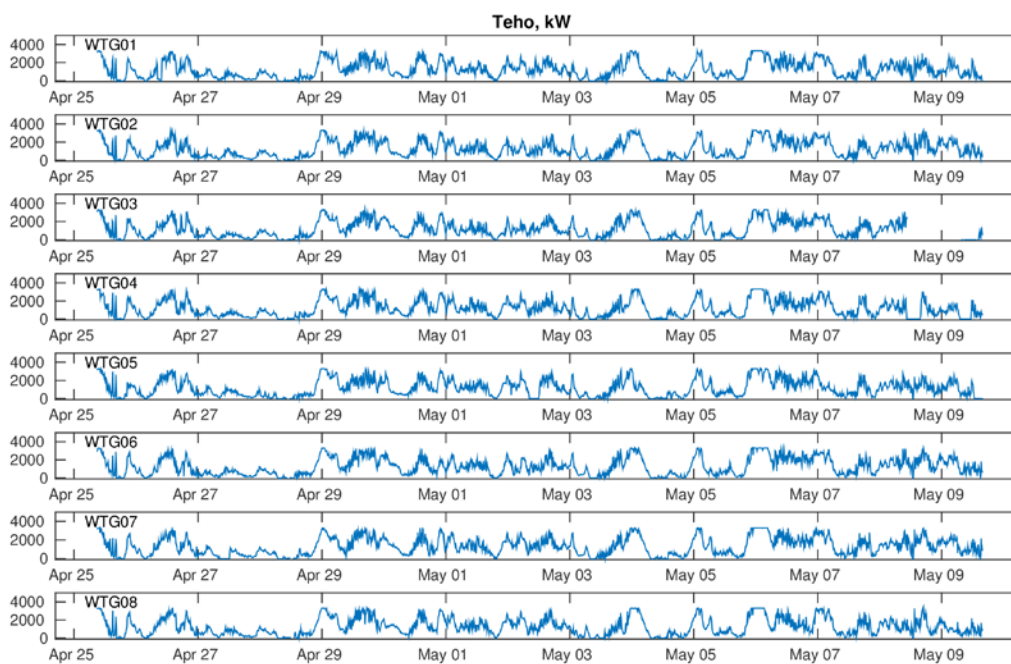


Kuva 33. Salon voimaloista WT01, WT02 ja WT03 roottorin navan korkeudelta mitattu tuulen nopeus- ja suuntajakaumat. Luokkaan nollatuulet (alle 0,3 m/s) 0 % (paitsi WT01: 7,8 %).

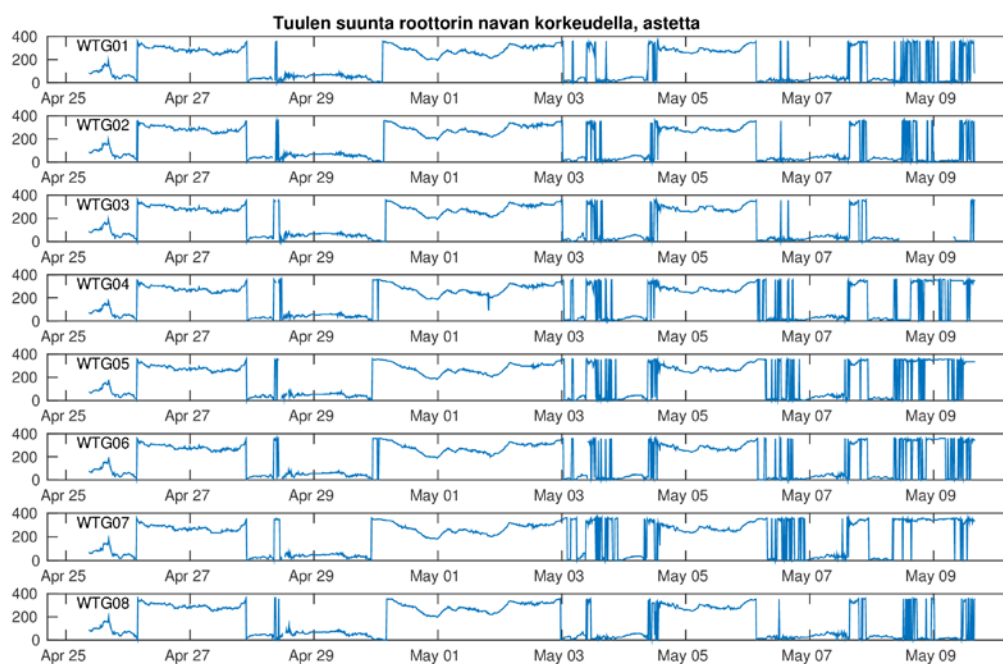
Siikaisissa oli parempi tuulisää (kuva 34) Saloon mittausajanjaksoon verrattuna ja tuuliturbiinit tuottivat tasaisemmin sähköä (kuva 35), mutta valitsemamme mittaus suunnan (koillinen) kannalta vallitseva tuulen suunta (kuva 36) ei ollut optimaalinen. Tilastollisesti ajankohdan vallitseva tuuli olisi pitänyt olla lounaasta, mutta mittauskampanjan aikana vallitsi pohjoistuuli (kuva 37). Tämä laski kumuloituvaa keskiäänitasa ja kahden viikon keskiäänitasa myös emissiopisteessä on huomattavasti pienempi kuin kontrolloidussa emissiomittauksessamme (kappale 3.4).



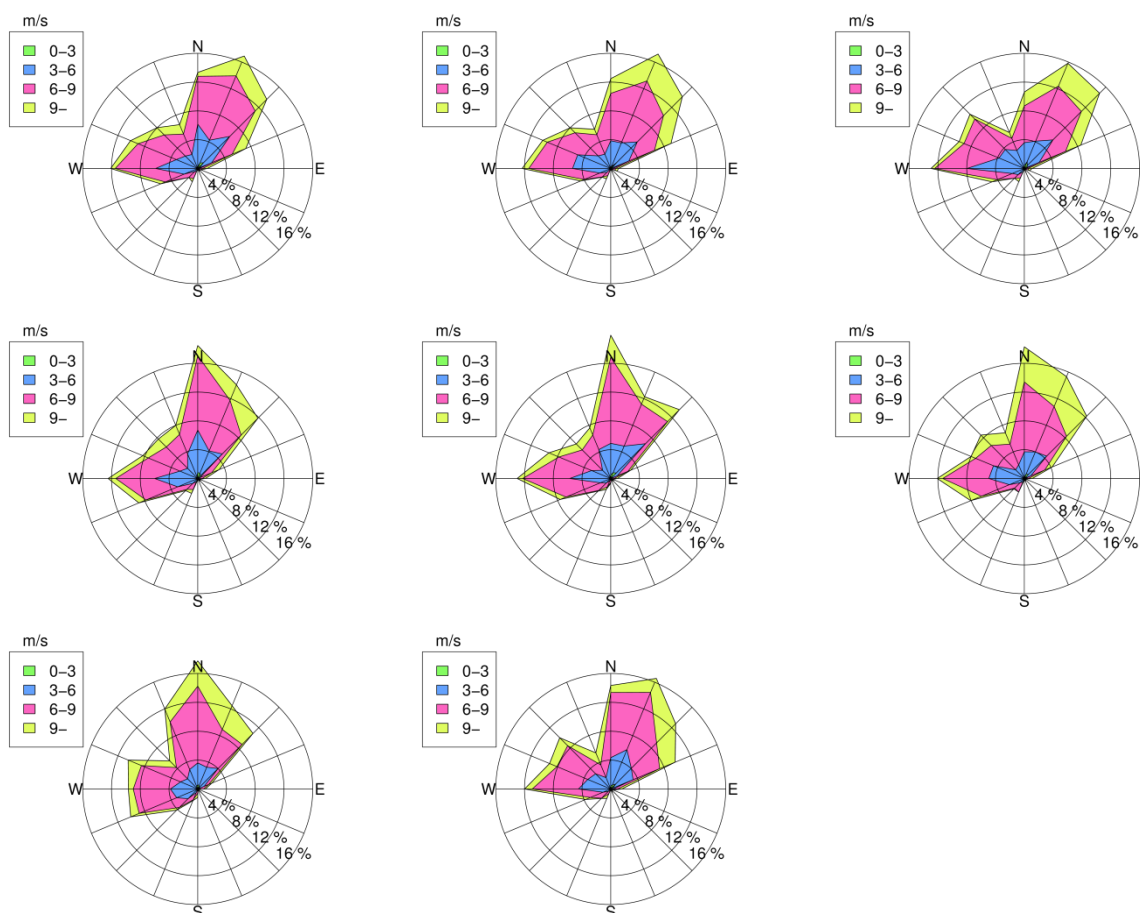
Kuva 34. Keskimääräinen (10 min.), minimi ja maksimi tuulen nopeudet Siikaisten voimaloista mitattuna.



Kuva 35. Keskimääräinen (10 min.) tuotettu sähköteho Siikaisten voimaloista (maksimi 3,3 MW).



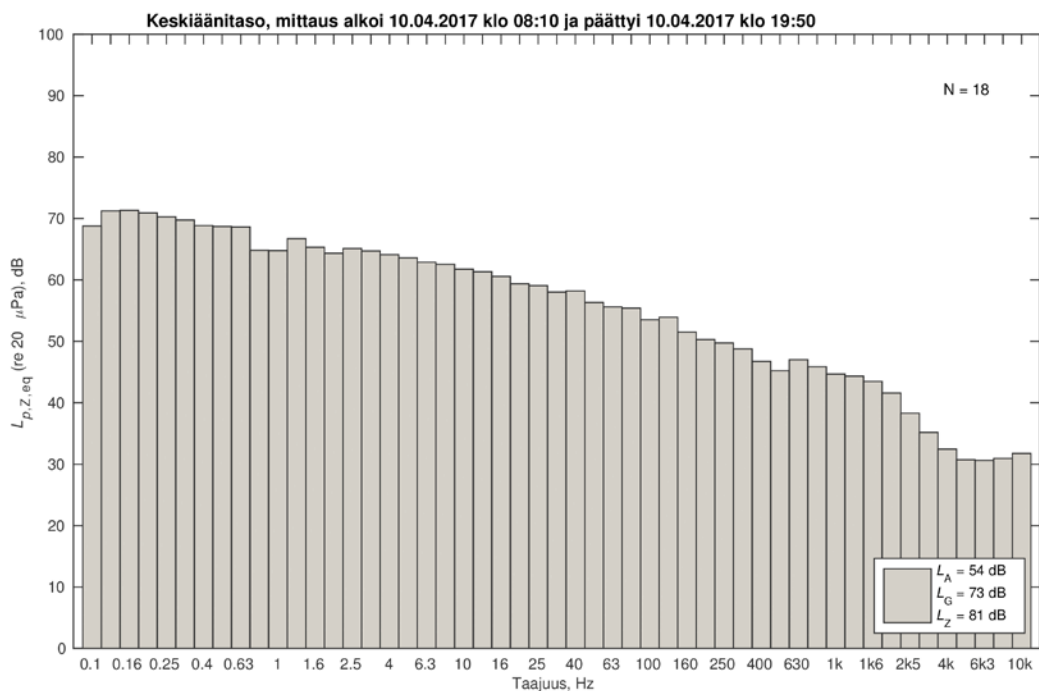
Kuva 36. Keskimääräinen (10 min.) tuulen suunta Siikaisten voimaloista mitattuna.



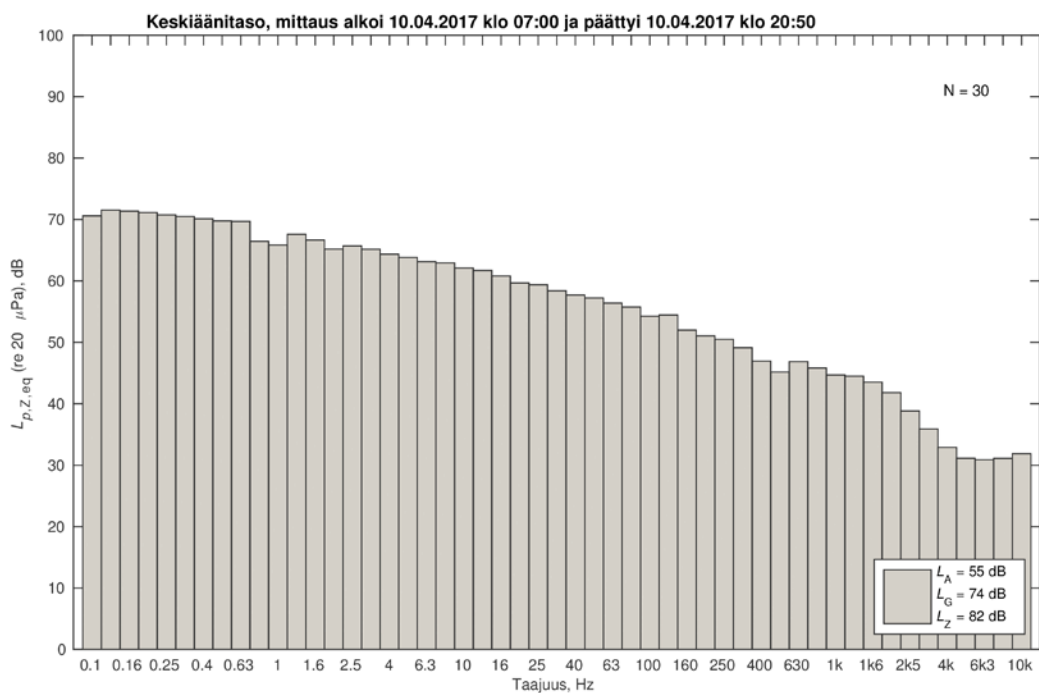
Kuva 37. Siikaisten voimaloista WTG01...8 roottorin navan korkeudelta mitattu tuulen nopeus- ja suuntajakaumat. Luokkaan nollatuulet (alle 0,3 m/s) 0 %.

Mittauskampanjan aikana vallinneista tuuliolosuhteista johtuen teimme analyysin erikseen myös tuulen suunnan ja nopeuden mukaan luokitelluille tuloksille, jotta toteutettujen mittausten perusteella voisi saada edes jonkinlaisen arvion kun tuuli on myös oikeaan suuntaan, eli kohti mittauspisteitä. Suurimmat tasot emissio- ja immissiomittauspisteille saatiin, kun tuuli oli etelästä (kuva 38 ja kuva 40) tai etelälounaasta (kuva 39 ja kuva 41). Tähän luokitteluun sopivia tuulia oli vain yhtenä päivänä koko mittausjakson aikana ja tuolloinkin vain hetkittäin. Myös tuulen suunnalle on laskennassa käytetty 10 minuutin keskiarvoa. A-painotetuista keskiäänitasoista täytyy vähentää maaheijastuskorjaus 6 dB, jos niitä verrataan ohje- tai raja-arvoihin.

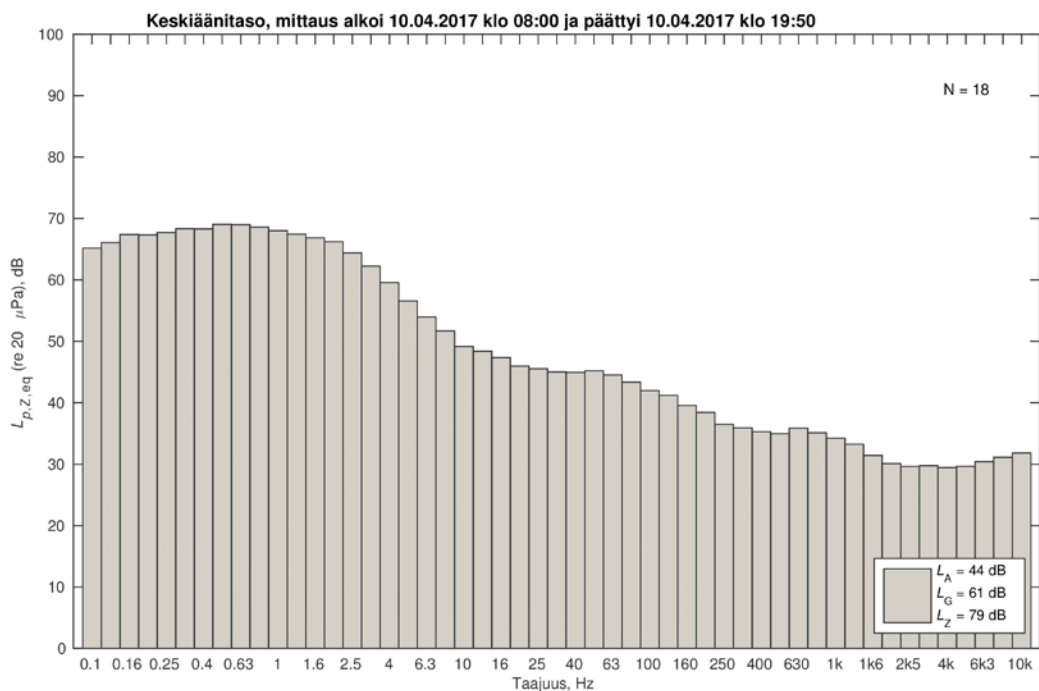
Infraäänen mittaamiseen liittyy erilaisia haasteita, kuin suuremmilla taajuuksilla: esimerkiksi kalibrointi vaatii enemmän huolellisuutta ja erityisvälineet, näytteiden ajalliset pituudet ovat merkittävästi pidempiä ja jos analyysi tehdään samaan aikaan myös kuuloalueen taajuuksille, tarvitaan tehokkaat tietokoneet suurella muistikapasiteetilla ja paljon aikaa.



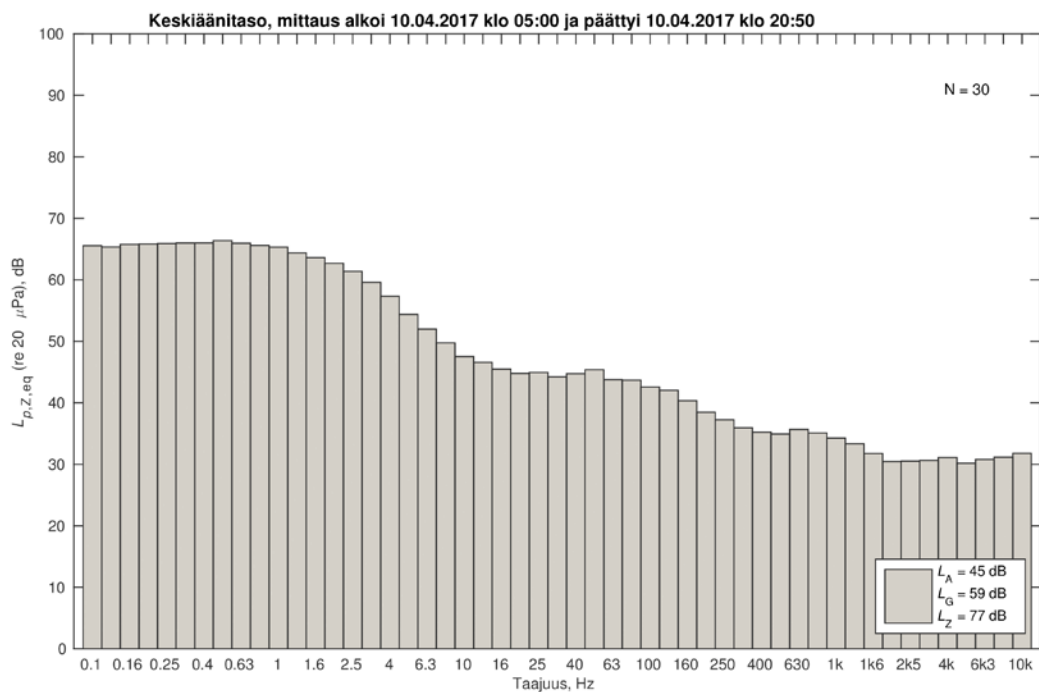
Kuva 38. Salo, emissiomittauspisteen keskiäänitaso etelätuulella 9 m/s tai enemmän, maalevymikrofoni.



Kuva 39. Salo, emissiomittauspisteen keskiäänitaso, kun tuuli on etelä-lounaasta 9 m/s tai enemmän, maalevymikrofoni.



Kuva 40. Salo, immissiomittauspisteen keskiäänitaso, kun tuuli on etelästä 9 m/s tai enemmän, maalevymikrofoni.



Kuva 41. Salo, immissiomittauspisteen keskiäänitaso, kun tuuli on etelä-lounaasta 9 m/s tai enemmän, maalevymikrofoni.

## 3.7 Vertailu aiempiin tutkimuksiin

Tuuliturbiinien infraäänimittauksista löytyy runsaasti artikkeleita, mutta niistä vertaisarvioituja on huomattavasti vähemmän ja riittävät ulkoisen validiteetin kriteerit täyttäviä vain muutama. Infraäänien määrittävä taajuusalue ei ole eksakti ja tuulivoiman kohdalla infraääneen saatetaan viitata jo taajuusalueena 20–200 Hz (Ashtiani & Denison, 2015; Berger et al., 2015). Berger kumppaneineen mittasi immisiotasoja useilla etäisyyksillä (400–900 m) ja myös sisätiloista, lisäksi he ovat koostaneet julkaisuunsa taulukot eri maiden kansallisista ohje- ja raja-arvoista tuulivoiman infraäänelle. Vain muutama artikkeli löytyy, jossa mittaustulokset ulottuvat yhden hertsin alapuolelle, mistä on pitkä ja työläs prosessi laajentaa mittaus- ja analyysikapasiteettia yli kolme oktaavia alemmaksi, tämän tutkimuksen alarajataajuuteen 0,1 Hz. Japanin ympäristöministeriön laaja tutkimus vuodelta 2014 kattaa 34 kansallista tuulivoiman tuotantoaluetta ja tulokset on esitetty alkaen taajuudesta 0,8 Hz (Tachibana et al., 2014). He tekivät jokaisella mittauspaikalla 120 tunnin yhtäjaksoiset mittaukset useilla etäisyyksillä (136–561 m), turbiinien koon vaihdellessa välillä 400–3 000 kW. Suurimmat yksittäiset äänitasot ( $L_2=80$  dB) he saivat 0,8 Hz:n taajuuksilla ja yhteensä 164 mittauspisteen keskiäänitaso oli 10 dB vähemmän, taajuusjakauma laskiessa keskimäärin 4 dB oktaavia kohden.

Jakobsen on tehnyt yhteenvedon vuoteen 2005 mennessä julkaistuista tuuliturbiinien infraäänimittauksista (Jakobsen, 2005). Jakobsen toteaa, että yksikään julkaistuista mittauksista ei sisällä tarvittavia taustatietoja: niistä puuttuu mm. tietoja ympäristöolosuhteista, tuulivoimaloiden tyypistä, toteutetusta signaalianalyysistä (esim. integrointiajan pituus) ja kaikista taustamelutasot. Vaikka hänen taulukoimansa infraäänitasot eivät ole puutteellisten taustatietojen vuoksi täysin vertailukelpoisia edes keskenään, voi niitä varauksin käyttää erityyppisten voimaloiden emissioinfraäänitasojen suuruusluokan arvioimiseen. Jakobsenin taulukon G-painotetut arvot vaihtelevat välillä 56–107 dB (Jakobsen, 2005) ja turbiinien tehot välillä 50–4 200 kW. Tämän tutkimuksen G-painotetut arvot vaihtelivat emissiopisteissä välillä 63–74 dB (turbiinien tehot 3 100–5 000 kW).

Mittauksen aikaisen tuulen aiheuttaman infraäänien välttämiseksi on esitetty esimerkiksi mikrofoniin sijoittamista maakuoppaan (Turnbull et al., 2012). Esitetty maakuoppamenetelmä pienentää varmasti tuulikohinaa suuremmilla taajuuksilla, mutta pintakerroksen yläpuolella, Ekmanin kerroksessa syntyvään suurten pyörteiden aiheuttamaan infraääneen sillä ei ole vaikutusta (Stull, 1988). Turnbull kumppaneineen mittasi Australiassa kahden 2/2,1 MW:n tuuliturbiineista koostuvan tuotantoalueen infraääntä ja vertasi tuloksia kaupunkialueen ja infraäänestä tunnetun rannikkoalueen tuloksiin. Heidän johtopäätöksensä ovat samat kuin tekemässämme selvityksessä: tuuliturbiinien infraäänitasot ovat samaa suuruusluokkaa kuin vertailukohteissa (Turnbull et al., 2012). Samaa tulokseen päätyivät puolalaiset tutkijat mitatessaan 25 turbiinia tyypiltään Vestas V80 2 MW:n (Ingielewicz & Zagubien, 2014).

## 4 Kuultavissa olevan tuulivoimamelun vaikutukset terveyteen

Anu Turunen, THL

Melu on elinympäristön stressitekijä, jonka aiheuttama stressireaktio voi välittyä sekä tiedostamattomien hermostollisten reaktioiden että melun tiedostamisen kautta. Fysiologinen ja psyykinen stressi voivat molemmat johtaa häiriöihin autonomisen hermoston ja umpieritysjärjestelmän toiminnassa ja aiheuttaa pitkään jatkuessaan terveysongelmia (Rylander, 2004; Chrousos, 2009; Babisch et al., 2013; Munzel et al., 2014). Tutkituimpia ympäristömelun aiheuttamia haittoja ovat viihtyvyyden aleneminen, häiritsevyys, unihäiriöt sekä sydän- ja verisuonisairaudet (Basner et al., 2014). Suurin osa ympäristömelusta on peräisin tieliikenteestä. Ympäristömelun aiheuttaman haitan suuruuteen vaikuttavat äänen fysikaaliset ominaisuudet (esim. voimakkuus, taajuus, jaksollisuus), altistuvan ympäristön ominaisuudet (esim. kaupungistumisaste), se millaista ihmisen toimintaa melu häiritsee (esim. lepo, virkistys, työ) sekä altistuvien yksilöiden henkilökohtaiset ominaisuudet (Shepherd & Billington, 2011), kuten asenne äänilähdettä kohtaan, tapa reagoida meluun, meluherkkyys, sekä tottuminen ja sopeutuminen meluun.

### 4.1 Ympäristömelun terveys- ja hyvinvointivaikutukset

Maailman terveysjärjestön (WHO) mukaan haitallisia terveysvaikutuksia alkaa näkyä, kun yöaikainen äänenpainetaso on ulkona yli 40 dB (WHO, 2011, 2009). Euroopan ympäristökeskus on julkaissut raportissaan yhteenvetotaulukon, johon on koottu ne ympäristömelun terveys- ja hyvinvointivaikutukset, joista on arvioitu olevan riittävää tutkimusnäyttöä (European Environment Agency, 2010) (taulukko 3). Sen mukaan häiritsevyys ja unihäiriöt alkavat yleistyä, kun pitkäaikainen äänenpainetaso ulkona ylittää 40 dB ja vastaavasti vaikutukset koettuun terveyteen ja verenpaineeseen yleistyvät, kun pitkäaikainen äänenpainetaso ulkona ylittää 50 dB. Yleisesti ottaen Pohjoismaiden ulkopuolella tehtyjen melun terveyshaittatutkimusten osalta on syytä huomioida, että lämpimässä ilmastossa on tavanomaista pitää ikkunoita auki ja siten melutasot ulkona ja sisällä saattavat olla hyvin lähellä toisiaan. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa ikkunoita pidetään kiinni suurimman osan aikaa vuodesta, ja lisäksi rakennusten ääneneristävyyden on parempi kuin Keski- ja Etelä-Euroopassa, joten terveysvaikutuksia alkaa todennäköisesti näkyä vasta suuremmilla ulkomelutasoilla.

**Taulukko 3.** Ympäristömelun todennetut terveys- ja hyvinvointivaikutukset.

Vaikutus	Akustinen suure <sup>1</sup>	Kynnysarvo, dB <sup>2</sup>	Altistuksen kesto
Uni (polysomnografia)	$L_{\max, \text{indoors}}$	32	Akuutti, krooninen
Häiritsevyys	$L_{\text{den}}$	42	Krooninen
Itse raportoidut unihäiriöt	$L_{\text{night}}$	42	Krooninen
Oppiminen, muisti	$L_{\text{eq}}$	50	Akuutti, krooninen
Stressihormonit	$L_{\max, L_{\text{eq}}}$	-	Akuutti, krooninen
Itse raportoitu herääminen	$SEL_{\text{indoors}}$	53	Akuutti
Itse raportoitu terveys	$L_{\text{den}}$	50	Krooninen
Kohonnut verenpaine	$L_{\text{den}}$	50	Krooninen
Sepelvaltimotauti	$L_{\text{den}}$	60	Krooninen

<sup>1</sup>  $L_{\text{den}}$  ja  $L_{\text{night}}$  on määritelty ulkona esiintyvänä äänenpainetasoina.

<sup>2</sup> Äänenpainetaso, jonka yläpuolella vaikutus alkaa esiintyä tai ilmenee tavanaomaista useammin.

$L_{\max}$  = Suurin äänenpainetaso mittauksen aikana.

$L_{\max, \text{indoors}}$  = Suurin äänenpainetaso mittauksen aikana sisätiloissa.

$L_{\text{den}}$  = vuorokauden äänitaso, jossa ilta-ajan (klo 19–22) keskiäänitasoa painotetaan + 5 dB ja yöaikaa (klo 22–07) +10 dB melun häiritsevyyden kuvaamiseksi.

$L_{\text{night}}$  = Yöajan keskiäänitaso

$L_{\text{eq}}$  = Keskiäänitaso

SEL = Yhden melutapahtuman aikainen äänialtistustaso (Sound Exposure Level)

Lähde: European Environment Agency, 2010 (muokattu)

## 4.1.1 Häiritsevyys

Meluksi tulkittu ääni on kiusallista tai ärsyttävää (annoyance), jos henkilö kokee sen ei-toivotuksi, kielteiseksi tai asuinympäristön laatua heikentäväksi. Melu voi myös häiritä keskittymistä ja vaikeuttaa suoritusta tehtävistä (disturbance). Lapsilla pitkäaikainen melualtistus voi johtaa häiriöihin kielellisessä kehityksessä, oppimisessa ja muistissa. Erilaisista määritelmistä huolimatta suomenkielisessä kirjallisuudessa kiusallisuus ja häiritsevyys usein yhdistetään ja käytetään häiritsevyys-termiä, joka on lähellä englanninkielisessä kirjallisuudessa esiintyvää annoyance-termiä. Tätä käytäntöä tukee myös standardi ISO/TS 15666, jossa termiin "noise annoyance" sisältyvät mm. "dissatisfaction", "bother", "annoyance" ja "disturbance" (ISO, 2003b).

Häiritsevyys on melun yleisimpiä ja myös tutkituimpia haittoja. WHO:n määritelmän mukaan terveys on täydellisen fyysisen, henkisen ja sosiaalisen hyvinvoinnin tila eikä pelkästään sairauden puuttumista (WHO, 2011). Siten on ymmärrettävää, että WHO myös sisällyttää häiritsevyyden tautitaakkalaskelmiin. WHO:n määritelmää on kuitenkin kritisoitu liian väljäksi (Saracci, 1997; Huber et al., 2011), sillä häiritsevyyttä ei voida välttämättä pitää itsenäisenä terveysvaikutuksena. Joka tapauksessa häiritsevyys voi voimakkaana ja pitkään jatkuessaan myötävaikuttaa terveyshaitan syntymiseen. On esitetty, että melun aiheuttama häiriintyminen heikentäisi elämänlaatua (Dratva et al., 2010) ja toimisi yhdessä unihäiriöiden kanssa välittävänä tekijänä melualtistuksen ja terveyteen liittyvän elämänlaadun välisessä yhteydessä (Heritier et al., 2014). WHO:n koordinoimassa Large Analysis and Review of European Housing and Health Status (LARES) -tutkimuksessa kroonisen melun aiheuttaman häiriintymiskokemuksen on raportoitu olevan yhteydessä sydän- ja verisuonisairauksien sekä hengityselinsairauksien, nivel tulehduksen ja migreeniin kohonneeseen riskiin (Niemann et al., 2006).

Koska pientaajuisista ääntä esiintyy elinympäristössä yleisesti, melun terveysvaikutuksia käsittelevien tutkimuksien voidaan ajatella käsittelevän osaltaan myös pientaajuiselle melulle altistumisen terveysvai-



kuuksia. Puhtaasti pientaajuisen melun terveysvaikutuksia onkin vaikeaa tutkia, koska se esiintyy elinympäristössä yleensä erottamattomana osana laajakaistaista melua (Berglund et al., 1996). Pientaajuista ääntä pidetään yleisesti häiritsevämpänä kuin suurempia taajuuksia. WHO:n yhdyskuntameluohjeistuksessa todetaankin, että pientaajuinen ääni voi häiritä lepoa ja unta sisätiloissa jopa alle 30 dB:n A-äänitasoilla (Berglund et al., 1999). WHO myös arvioi, että monet laajakaistaisen melun haitoista johtuvat itse asiassa pientaajuisesta äänestä (Berglund & Lindvall, 1995).

Pientaajuisen (20–200 Hz) melun terveys- ja hyvinvointivaikutuksia on tutkittu toistaiseksi melko vähän, ja pääosa tutkimuksista liittyy työympäristötekijöihin ja/tai psyykkiseen suorituskykyyn. Tulokset ovat osin ristiriitaisia, eikä tutkimuksissa ole yleensä huomioitu sekoittavia tekijöitä. Puolalaisessa kokeellisessa tutkimuksessa, joka sisälsi kaksi erillistä koetta (n=55, n=70), yli puolet koehenkilöistä arvioi pientaajuisen melun erittäin häiritseväksi ajatustyötä vaativaa tehtävää suorittaessaan kun A-äänitaso ylitti 62 dB ja C-äänitaso ylitti 83 dB (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2010). Saman ryhmän aiemmista kokeellisista tutkimuksista toisessa (n=191, vain miehiä) altistaminen pientaajuiselle äänelle hiukan pienemmällä C-äänitasolla 51 dB ja 74 dB ei vaikuttanut psyykkistä suorituskykyä mittaavista testeistä saatiin suoriutumispisteisiin (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2005a), mutta toisessa (n=96) altistus pientaajuiselle äänelle (A-äänitaso 50 dB, C-äänitaso 66 dB, G-äänitaso 73 dB) heikensi havainnointi- ja keskittymiskykyä erityisesti pientaajuiselle melulle herkäksi itsensä kokevilla (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2005b). Kokeellisessa ruotsalaistutkimuksessa (n=32) vapaaehtoisia altistettiin pientaajuiselle ilmastointilaitteen äänelle (31,5–125 Hz, A-äänitaso 40 dB) ja laajakaistaiselle vertailuäänelle työskentelyn aikana. Pientaajuinen melu arvioitiin työskentelyä enemmän häiritseväksi ja meluherkillä altistuminen pienensi normaaliin vuorokausirytmiiin kuuluvaa elimistön kortisolipitoisuuden laskua (Persson Waye et al., 2002). Ruotsalaisen tutkimusryhmän havainnoivassa tutkimuksessa pitkäaikaisesti ilmalämpöpumpujen ja/tai ilmastointilaitteiden tuottamalle pientaajuiselle melulle altistuneilla (n=108) häiriintymisen kokemukset ja keskittymisvaikeudet olivat yleisempiä kuin kontroleilla, mutta altistuneet ja kontrollit eivät eronneet toisistaan lääketieteellisen tai psykososiaalisen oireilun yleisyyden suhteen. Henkilöt, jotka kokivat pientaajuisen melun melko tai hyvin häiritseväksi raportoivat enemmän psykososiaalisia oireita, unihäiriöitä ja päänsärkyä kuin keskitaajuuksille altistuneet henkilöt (Persson Waye & Rylander, 2001). Toisen ruotsalaisryhmän tutkimuksessa (n=439) mitattiin työntekijöiden altistumista pientaajuiselle äänelle toimistoissa, laboratorioissa ja teollisuudessa. Niillä, jotka altistuivat pientaajuiselle äänelle siinä määrin, että A- ja C-äänitasojen ero oli 15 dB, raportoivat enemmän töiden jälkeistä väsymystä. Altistuminen pientaajuiselle äänelle oli yhteydessä myös uupumukseen ja häiritsevyyden kokemukseen (Tesarz et al., 1997). Tuoreessa systemaattisessa katsauksessa todettiin, että on jonkin verran näyttöä elinympäristössä pientaajuiselle melulle altistumisen yhteydestä häiriintymisen kokemukseen sekä neurologisiin oireisiin, kuten unihäiriöihin, keskittymisvaikeuksiin ja päänsärkyyn (Baliatsas et al., 2016a).

## 4.1.2 Unen häiriintyminen

Melun haitalliset terveysvaikutukset voivat välittyä häiritsevyyden lisäksi myös unihäiriöiden kautta (Heritier et al., 2014; Munzel et al., 2014). Yöaikaisen tie-, lento- ja raideliikennemelun yhteydestä sekä itse ilmoitettuihin että objektiivisesti mitattuihin unihäiriöihin on runsaasti näyttöä (Aasvang et al., 2011; Basner et al., 2011; Brink, 2011; Elmenhorst et al., 2012; Pennig et al., 2012; Perron et al., 2012; Pirrera et al., 2010; Roosli et al., 2014; Perron et al., 2016). Suomalaisessa tutkimuksessa unihäiriöiden määrän havaittiin alkavan lisääntyä työikäisillä, kun tieliikenteen aiheuttama yöajan äänenpainetaso ulkona oli  $\geq 55$  dB ja ahdistuneisuuteen taipuvaisilla jo äänenpainetasolla  $\geq 50$  dB (Halonen et al., 2012).

Lyhytaikaisten unihäiriöiden on todettu olevan yhteydessä lieviin vaikutuksiin, kuten kohonneeseen verenpaineeseen, sympaattisen hermoston aktivaatioon, muutoksiin sisäerityksessä ja hormonitoiminnas-

sa sekä kohonneisiin tulehdusvälittäjäaineiden pitoisuuksiin. Ne voivat mahdollisesti pitkään jatkuessaan kiihdyttää ateroskleroosia ja sydän- ja verisuonisairauksien kehittymistä (Mullington et al., 2009).

Ruotsalaisen tutkimusryhmän unilaboratoriossa tekemässä kokeellisessa tutkimuksessa koehenkilöitä (n=12) altistettiin liikennemelulle ja pientaajuiselle melulle peräkkäisinä öinä. Yönaikainen altistus pientaajuiselle äänelle (31,5–125 Hz, A-äänitaso 40 dB) vaikeutti nukahtamista ja alensi heräämisen aikaista elimistön kortisolipitoisuutta. Alhaisemmat kortisolitasot heräämisen jälkeen olivat puolestaan yhteydessä huonompaan koettuun unen laatuun ja mielialaan. Altistuminen liikennemelulle vaikutti pääasiassa unen laatuun ja ärsyyntyneisyyteen aamulla (Persson Wayne et al., 2003). Japanilaisessa kokeessa (n=18) tutkittavat altistettiin unilaboratoriossa liikennemelulle (25–1 600 Hz, L<sub>50</sub> 40, 59 ja 60 dB) sekä äänenpainetasoltaan vaihtelevalle pientaajuiselle ja infraäänelle (10, 20, 40 ja 63 Hz, 60–105 dB:n äänenpainetasoilla taajuudesta riippuen). Kokeen perusteella liikennemelu häiritsi unta enemmän kuin pientaajuinen ja infraääni (Okada & Inaba, 1990)

### 4.1.3 Sydän- ja verisuonisairaudet

Tieliikennemelun ja sydän- ja verisuonisairauksien välistä yhteyttä on tutkittu paljon. Meta-analyysissä jossa yhdistettiin 27 vuosina 1970–2010 julkaistua havainnoivaa tutkimusta, todettiin, että 5 dB:n nousu tieliikennemelun äänenpainetasossa nosti kohonneen verenpaineen riskiä 3 % (van Kempen & Babisch, 2012). Uusimmissa seurantatutkimuksissa on pyritty ottamaan huomioon myös samanaikaisen ilmaansaastealtistuksen vaikutus verenpaineeseen, ja näissä ei ole havaittu tilastollisesti merkitseviä yhteyksiä melutason ja kohonneen verenpaineen välillä (Sorensen et al., 2011; Babisch et al., 2014; Foraster et al., 2014). Myöskään tuoreessa hollantilaisen, isobritannialaisen ja norjalaisen kohorttiaineiston sisältävässä poikkileikkaustutkimuksessa (n=88 336) tieliikennemelualtistus ei ollut yhteydessä verenpaineeseen (Zijlema et al., 2016). Kahdessa muussa poikkileikkaustutkimuksessa tieliikennemelun on havaittu olevan yhteydessä diastoliseen verenpaineeseen (n=2 552) (Pitchika et al., 2017) ja kohonneen verenpaineeseen diabeetikoilla (n=6 450) (Dratva et al., 2012). Laajoissa seurantatutkimuksissa on puolestaan havaittu, että 10 dB:n nousu tieliikennemelun äänenpainetasossa lisäsi sydäninfarktin riskiä 4–12 % (Roswall et al., 2017; Heritier et al., 2017), sydämen vajaatoiminnan riskiä 2 % (Seidler et al., 2016) (ei huomioitu altistumista liikenteen ilmaansaasteille), aivohalvauksen riskiä 15 % (Sorensen et al., 2011a) ja sepelvaltimotautikuolleisuutta 9 % (n=445 868) (Gan et al., 2012). Toisaalta kaikissa tutkimuksissa ei ole nähty melualtistuksen yhteyttä esimerkiksi sydäninfarktin riskiin (Bodin et al., 2016).

Lentoliikennemelualtistuksen haitallisuutta sydän- ja verenkiertoelimistölle on myös tutkittu runsaasti. Kuuden eurooppalaisen lentokentän läheisyydessä toteutetussa poikkileikkaustutkimuksessa (n=4 861) havaittiin, että 10 dB:n nousu yöaikaisessa lentoliikenteen äänenpainetasossa nosti kohonneen verenpaineen riskiä 14 % (Jarup et al., 2008). Tukholman Arlandan lentokentän läheisyydessä verenpainetta kohottava vaikutus nähtiin vain miehillä (Eriksson et al., 2010). Seitsemän eurooppalaisen lentokentän läheisyydessä toteutetussa poikkileikkaustutkimuksessa (n=4 712) 10 dB:n nousu äänenpainetasossa lisäsi sepelvaltimotaudin ja aivohalvauksen riskiä 25 % henkilöillä, jotka olivat asuneet samassa osoitteessa vähintään 20 vuotta. Keskimääräinen äänenpainetaso kenttien läheisyydessä oli päiväaikaan noin 52 dB (35–76 dB) ja yöaikaan 41 dB (vaihteluväli 30–70 dB) (Floud et al., 2013). Lontoon Heathrow'n lentoaseman läheisyydessä tehdyssä pienalue-epidemiologisessa tutkimuksessa (n=3 600 000) havaittiin, että suurimmalle päiväajan äänenpainetasolle (>63 dB) altistuneilla oli 24 % suurempi aivohalvauksen, 21 % suurempi sepelvaltimotaudin ja 14 % suurempi kaikkien sydän- ja verisuonisairauksien riski verrattuna pienimmälle päiväajan äänenpainetasolle (≤51 dB) altistuneisiin (Hansell et al., 2013). Rekisteritietoon pohjautuvien tutkimuksien osalta on kuitenkin syytä muistaa, että sekoittavia tekijöitä voidaan yleensä huomioida vain rajallisesti.

Mekanismeista joilla melu vaikuttaa sydän- ja verisuonisairauksien riskiin, on myös saatu näyttöä. Kokeellisessa asetelmassa havaittiin, että yöaikainen altistuminen lentoliikennemelulle aiheutti verisuonen seinämän toimintahäiriöitä ja lisäsi adrenaliinin eritystä terveillä henkilöillä (Schmidt et al., 2013) sekä nosti verenpainetta sepelvaltimotautipotilailla, kun melutapahtumia oli yön aikana 60 ja melutaso oli keskimäärin 46 dB (Schmidt et al., 2015). Kuuden eurooppalaisen lentokentän läheisyydessä  $\geq 65$  dB:n lentomelun äänenpainetasolle altistuminen nosti syljen kortisolipitoisuutta naisilla (Selander et al., 2009). Pohjoismaisissa seurantatutkimuksissa on puolestaan saatu viitteitä pitkäaikaisen lentomelualtistuksen yhteydestä keskivartalolihavuuteen ( $n=5\ 156$ ) (Eriksson et al., 2014; Christensen et al., 2016). Tuoreessa sveitsiläistutkimuksessa ( $n=2\ 631$ ) havaittiin tieliikennemelun olevan yhteydessä kohonneeseen diabeteksen riskiin ( $RR=1,35$ ; 95 % CI 1,02–1,78). Lentoliikenteen osalta riski oli kohonnut 86 %:lla, mutta riskiestimaatti ei ollut tilastollisesti merkitsevä (Eze et al., 2017).

#### 4.1.4 Henkinen hyvinvointi

On ajateltu, että ympäristömelualtistus ei ole psykiatristen sairauksien suora riskitekijä väestötasolla (Stansfeld, 1992), eikä perusväestössä olekaan yleensä nähty yhteyttä melun ja henkisen hyvinvoinnin välillä (Stansfeld et al., 2009; Schreckenberget al., 2010). On kuitenkin selvää, että jos melu on häiritsevää ja altistuminen pitkäkestoista eikä sitä ole mahdollista välttää, melualtistus voi heikentää henkistä hyvinvointia esimerkiksi stressin ja unihäiriöiden kautta. Tuoreessa saksalaisessa tapaus-verrokkitutkimuksessa ( $n_{\text{tapaukset}}=77\ 295$ ) havaittiin, että altistuminen tie-, lento- ja raideliikennemelulle oli yhteydessä kohonneeseen masennuksen riskiin. Esimerkiksi henkilöillä, jotka altistuivat  $\geq 60$  dB:n liikennemelulle, oli 12 % suurempi masennuksen riski kuin henkilöillä, jotka altistuivat 40 dB:iä alittavalle liikennemelulle. Vastaavasti henkilöillä, jotka altistuivat  $\geq 50$  dB:n lentoliikennemelulle, oli 23 % suurempi riski masennukselle kuin henkilöillä, jotka altistuivat 40 dB:iä alittavalle lentoliikennemelulle (Seidler et al., 2017). Vastaavasti myös pienemmässä saksalaisessa seurantatutkimuksessa ( $n=3\ 300$ ) masennusoireiden riski oli 26 % suurempi yli 55 dB:n äänenpainetasoille altistuvilla verrattuna korkeintaan 55 dB:n äänenpainetasoille altistuviin. Lisäksi riski oli suurempi unihäiriöistä kärsivillä (Orban et al., 2016). On myös saatu viitteitä siitä, että melun haitallinen vaikutus henkiseen hyvinvointiin olisikin nähtävissä ainoastaan melun häiritseväksi kokevilla (Hammersen et al., 2016) tai melun vaikutuksille herkissä ihmisryhmissä, kuten unihäiriöistä kärsivillä (Sygna et al., 2014), ahdistuneisuuteen taipuvaisilla (Stansfeld et al., 1996) tai meluherkillä (Kishikawa et al., 2009). Esimerkiksi saksalaisessa poikkileikkaustutkimuksessa ( $n=15\ 010$ ) elinympäristön melun häiritseväksi kokeminen oli yhteydessä masennukseen ja ahdistuneisuuteen. Melusta erittäin häiriintyneillä sekä masennuksen että ahdistuneisuuden riski oli lähes kaksinkertainen verrattuna henkilöihin, jotka eivät kokeneet melua häiritseväksi (Beutel et al., 2016). On syytä kuitenkin muistaa, että poikkileikkaustutkimuksissa vaikutuksen suuntaa ei pystytä arvioimaan. Siten on mahdollista, että masentuneet vain kokevat melun häiritsevämmäksi kuin muu väestö.

Melualtistuksen yhteyttä psyykenlääkkeiden käyttöön on tutkittu jonkin verran, mutta saadut tulokset ovat ristiriitaisia. Kuuden eurooppalaisen lentokentän läheisyydessä tehdyssä poikkileikkaustutkimuksessa ( $n=4\ 642$ ) havaittiin, että 10 dB:n nousu äänenpainetasossa lisäsi rauhoittavien lääkkeiden käytön todennäköisyyttä 28 % (Floud et al., 2011), mutta suomalaistutkimuksessa tieliikennemelualtistuksen ei havaittu olevan yhteydessä psyykenlääkkeiden käyttöön (Halonen et al., 2014). Ranskalaisessa seurantatutkimuksessa ( $n=190\ 617$ ) tieliikennemelun  $\geq 55$  dB:n äänenpainetasolle altistuneilla rauhoittavien lääkkeiden käytön riski oli kohonnut ainoastaan parhaiten toimeentulevassa väestöryhmässä (Bocquier et al., 2013).

## 4.1.5 Meluherkkyys

*Marja Heinonen-Guzejev, Helsingin yliopisto*  
*Anu Turunen, THL*

Meluherkkyys on pysyvä piirre ja se kuvaa tapaa kokea melu ja reagoida siihen. Meluherkät aistivat melun häiritsevämpänä ja uhkaavampana, reagoivat meluun voimakkaammin ja tottuivat siihen hitaammin kuin ei-meluherkät (Stansfeld, 1992). Subjekttiivisen kokemuksen lisäksi meluherkkyys kertoo siitä, miten herkästi ja voimakkaasti yksilön elimistö reagoi meluun (Job, 1999). Meluherkyyden ajatellaan olevan äänenpainetasoa ohella tärkein selittävä tekijä melun koetussa häiritsevyydessä (van Kamp et al., 2004; Stansfeld, 1992).

Meluherkkyys on jatkuvaluonteinen ominaisuus (Vartiainen et al., 2015). Meluherkyyden yleisyys vaihtelee määrittelytavan ja mahdollisesti myös tutkittavan väestön mukaan. Eri tutkimusten mukaan meluherkkiä on 20–40 % väestöstä ja erittäin meluherkkiä noin 12–15 %. Suomalaisessa kaksosaineistoon perustuvassa tutkimuksessa meluherkkiä oli 38 % tutkituista eikä miesten ja naisen välillä todettu tilastollisesti merkitsevää eroa meluherkyydessä (Heinonen-Guzejev et al., 2004). Toisessa suomalaistutkimuksessa meluherkkiä oli eniten naisissa, keski-ikäisissä ja korkeasti koulutetuissa (Vartiainen et al., 2015).

Meluherkyyden geneettistä komponenttia on selvitetty suomalaisessa kaksosaineistoon perustuvassa tutkimuksessa. Tutkimuksessa todettiin, että identtiset kaksosparit ovat meluherkyyden suhteen enemmän samankaltaisia kuin epäidenttiset kaksosparit. Meluherkkyys kasautuu perheisiin eli lähisukulaisilla esiintyy meluherkyyttä enemmän kuin väestössä yleensä. Väestössä havaittavasta vaihtelusta meluherkyydessä noin 36 % johtuu yksilöiden välisistä geneettisistä eroista (Heinonen-Guzejev et al., 2005).

Melun häiritsevyys ja meluherkkyys näyttävät ennustavan melun terveyshaittoja jopa äänenpainetasoa paremmin. Useissa tutkimuksissa on todettu, että meluherkät ovat ei-meluherkkiä alttiimpia melun terveyshaittoille (Heinonen-Guzejev, 2008; Fyhri & Klæboe, 2009; Kishikawa et al., 2009; Schreckenberget al., 2010). Näyttää myös siltä, että meluherkät henkilöt ovat alttiita psyykkiselle stressille (Hill et al., 2014), ja heidän persoonallisuuteensa liittyy usein taipuvaisuus ahdistuneisuuteen (Persson et al., 2007). Joissain tutkimuksissa meluherkät ovat olleet melun lisäksi herkkiä muillekin ympäristön ärsykeille (Stansfeld et al., 1985; Palmquist et al., 2014).

Meluherkät kuuluvat riskiryhmään melun terveysvaikutuksia arvioitaessa. He ovat herkempiä saamaan melun vaikutuksesta unihäiriöitä ja heidän unensa laatu heikkenee helposti melun vaikutuksesta (Nivison & Endresen, 1993; Marks & Griefahn, 2007). Meluherkkyys ennakoii myös sydän- ja verenkiertoelimistön meluvastetta (Heinonen-Guzejev, 2008). Meluherkät ovat myös herkempiä melun vaikutuksille kognitiivisiin toimintoihin, kuten keskittymiseen, tarkkavaisuuteen, muistitoimintoihin, suoritustarkkuuteen, lukemiseen ja oppimiseen. Meluisissa oloissa meluherkät suoriutuvat muita huonommin muistia ja tarkkavaisuutta mittaavissa tehtävissä. Työpaikan meluisuus voi heikentää meluherkkien tuloksia työtehtävissä (Belojevic et al., 2003). Meluherkkyys ei tarkoita herkkyyttä saada kuulovaurio eikä se ole liittynyt audiometriassa mitattuun kuulokynnykseen (Heinonen-Guzejev et al., 2011). Meluherkkyys ei myöskään ole identtinen käsite ääniyliherkkyyden (hyperacusis) kanssa.

Tuoreen tutkimuksen mukaan meluherkkyys näkyy aivojen äänenkäsittelyssä eli siinä miten aivot käsittelevät muutoksia ympäröivässä äänimaailmassa. Meluherkkien koehenkilöiden kuulojärjestelmä reagoi

muita henkilöitä heikommin uusiin ääniin toistuvien äänien joukossa, erityisesti silloin, kun uusi ääni on muita häiritsevempi. Näin ollen meluherkkien on vaikea ennakoida ääniympäristönsä muutoksia. Välttyäkseen ylireagoimasta yllättäviin häiriöääniin, heidän kuulojärjestelmänsä toiminta heikkenee. Tutkimus vahvistaa näkemystä siitä, että meluherkkyyden taustalla on muutakin kuin negatiivinen asenne melua kohtaan, ja samalla meluherkkyys voidaan liittää aiempaa suuremmin aivojen kuulojärjestelmän toimintaan (Kliuchko et al., 2016).

Meluherkkyyttä tutkitaan yleensä kysymyssarjoilla kuten Weinsteinin meluherkkyyskyselyllä (Weinstein, 1978). Yleistä meluherkkyyttä mittaavien kysymyssarjojen lisäksi on olemassa myös erityisesti pientaajuiselle melulle herkkyyttä mittaavia kyselyitä (Persson Waye, 1995).

Henkilöt, jotka kokevat pientaajuisen melun hyvin häiritseväksi, ovat myös reagoineet voimakkaammin psykologisesti ja fysiologisesti altistuessaan sille (Yamada et al., 1984; Persson Waye, 1995; Persson Waye et al., 2001). Tapaustutkimusten perusteella henkilöt, joita pientaajuinen melu häiritsee, saattavat kehittää erityisen herkkyuden pientaajuisen melun lähteille, vaikka he muuten eivät olisikaan meluherkkiä. Kokeellisissa tutkimuksissa yleinen meluherkkyys ja meluherkkyys pientaajuiselle melulle eivät ole korreloineet keskenään (Persson Waye, 2011). Ilmastointilaitteiden toimistoissa aiheuttaman melun vaikutuksia selvittäneessä tutkimuksessa, jossa mitattiin sekä yleinen meluherkkyys että herkkyys pientaajuiselle melulle, todettiin, että vaste pientaajuiselle melulle oli hieman erilainen yleisesti meluherkillä ja pientaajuiselle melulle herkkillä (Persson Waye et al., 2001).

Meluherkät ovat usein herkkiä myös muille ympäristötekijöille ja ärsykeille, esimerkiksi valolle, väreille, kivulle ja kosketukselle (Stansfeld et al., 1985). Meluherkkyyden yhteydestä muihin ympäristöherkkyysiin (kts. kappale 5.1.4.) on julkaistu joitain tutkimuksia. Niiden tulkinnessa on ongelmallista niissä käytetyt erilaiset tavat määrittää ja mitata eri ympäristöherkkyksiä. Tuoreessa ruotsalaistutkimuksessa eri ympäristöherkkyysien (kemikaaliherkkyys, sairas rakennus oireyhtymä, sähköliherkkyys, meluherkkyys) esiintyvyydessä todettiin päällekkäisyyttä. Siinä meluherkkyys mitattiin lyhyellä jokapäiväisten äänten kokemista selvittäneellä kysymyksellä (Palmquist et al., 2014).

Ruotsalaistutkimuksessa sähköherkkien todettiin raportoivan liikenteen, naapureiden ja ilmastointikanavien melun häiritsevyyttä ainakin kaksi kertaa yleisemmin kuin verrokkit (Hillert et al., 2007). Tuoreessa ruotsalaistutkimuksessa itse raportoidun sähköherkkyyden ja ääni/meluherkkyyden esiintyvyydessä todettiin päällekkäisyyttä, mutta lääkärin toteaman sähköherkkyyden ja ääni/meluherkkyyden välillä päällekkäisyyttä ei todettu (Palmquist et al., 2014). Meluherkkyyden on joissain tutkimuksissa todettu liittyvän kemikaaliherkkyyteen (Andersson et al., 2008; Nordin et al., 2014). Suomalaisessa tutkimuksessa meluherkkyyden ja monikemikaaliherkkyyden todettiin kuitenkin olevan eri ominaisuuksia, ja ne liittyvät eri somaattisiin, psykologisiin ja elintapatekijöihin (Heinonen-Guzejev et al., 2012).

## 4.2 Tuulivoimamelun terveys- ja hyvinvointivaikutukset

Anu Turunen, THL

Tuulivoimamelulla on akustisia erityispiirteitä, joiden vuoksi se saatetaan kokea muuta ympäristömelua erottuvampana ja häiritsevämpänä. Äänen erityispiirteiden lisäksi tuulivoimamelun häiritsevyyteen vaikuttavat tuulivoimaloiden ei-akustiset erityispiirteet kuten tuulivoimaloiden suuri koko ja korkeus, vilkkuva varjostus sekä lentoestevalot, jotka koetaan yleensä tavanomaista rakentamista merkittävämpinä maisemallisina vaikutuksina. Tämän vuoksi esimerkiksi liikennemelun haitallisista melutasoista saatua tietoa ei voida välttämättä suoraan soveltaa tuulivoimaloiden tuottamaan meluun. Kuultavissa olevan tuulivoimamelun vaikutuksia on tutkittu tieteellisesti jonkin verran, mutta kaikki aiheeseen liittyvät vertaisarvioitujen epidemiologisten tutkimusten on tehty poikkileikkausasetelmassa, eikä seuranta- tai tapaus-verrokkitutkimuksia ole lainkaan. Pääosa tutkimuksista keskittyy häiritsevyyteen, unihäiriöihin, stressiin ja elämänlaatuun. Tuulivoimaloiden tuottaman pientaajuisen äänen ja infraäänien terveysvaikutuksia ei ole toistaiseksi tutkittu niin, että altistuminen olisi mitattu tai mallinnettu, mutta muutamia oireilua tarkastelluista tutkimuksista käsitellään tässä raportissa infraäänien terveysvaikutusten puolella.

### 4.2.1 Havainnoivat tutkimukset

#### **Häiritsevyys**

Tuulivoimamelun häiritsevyyttä koskevat tulokset perustuvat uusimpia kanadalaista, japanilaista, yhdysvaltalaisista ja puolalaista tutkimusta (Kuwano et al., 2014; Magari et al., 2014; Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014a, 2014b, Michaud et al., 2016b, 2016d) lukuun ottamatta saman tutkimusryhmän osatutkimuksiin Ruotsissa ja Alankomaissa (taulukko 4). Lähes kaikissa tutkimuksissa havaittiin positiivinen yhteys äänenpainetason ja häiritsevyyden välillä, mutta nähtävissä ei ollut selkeää kynnysarvoa, jonka jälkeen häiritsevyys yleistyi selvästi. Kun äänenpainetaso ulkona oli  $\geq 45$  dB, tuulivoimamelun koki ulkona melko ja/tai erittäin häiritseväksi 6–64 % vastanneista ja sisällä 2–31 % vastanneista. Lähes kaikissa tutkimuksissa ongelmana oli se, että vaikka tuulivoimamelun ja häiritsevyyden välinen yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, mallinnuksessa ja tulosten esitystavassa tätä ei oltu huomioitu. Meta-analyysi kuudesta poikkileikkaustutkimuksesta (Pedersen & Persson Waye, 2004, 2007; Shepherd & Billington, 2011; Bakker et al., 2012; Magari et al., 2014; Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014b) päättyi siihen, että tuulivoima-alueiden läheisyydessä asuminen on yhteydessä lisääntyneeseen häiritsevyyteen (OR 4,08; 95 % CI 2,37–7,04) (Onakpoya et al., 2015).

Useissa edellä mainituissa tutkimuksissa raportoitiin, ettei äänenpainetaso ollut ainoa häiritsevyyttä selittävä tekijä. Tuulivoimamelun häiritsevyyteen oli yhteydessä äänenpainetason lisäksi mm. asenne tuulivoimaa kohtaan (van den Berg et al., 2008; Janssen et al., 2011; Magari et al., 2014; Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014a; Klæboe & Sundfor, 2016), meluherkkyys (Michaud et al., 2016d), tuulivoimalasta saatava taloudellinen hyöty (van den Berg et al., 2008; Janssen et al., 2011; Michaud et al., 2016d), näköyhteys tuulivoimalaan sisältä asunnosta tai pihalta (van den Berg et al., 2008; Pedersen & Persson Waye, 2008; Janssen et al., 2011), maiseman muuttuminen, henkinen hyvinvointi (van den Berg et al., 2008; Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014a), stressi, nukahtamisvaikeudet ja unen keskeytyminen (van den Berg et al., 2008), arvio palautumisen ja levon mahdollisuudesta nykyisellä asuinalueella (Pedersen & Persson Waye, 2008) sekä tuuliturbiinien terveysvaikutuksiin liittyvä huoli (Magari et al., 2014; Michaud et al., 2016d). Edelleen häiriintymisen aiheuttama psyykinen reaktio voi osaltaan johtaa oireiluun. Esimerkiksi ruotsalais-hollantilaisessa tutkimuksessa äänenpainetason ei havaittu ole-

van yhteydessä tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvien terveyteen ja hyvinvointiin, mutta häiriintyminen melun vuoksi oli yhteydessä päänsärkyyn sekä stressin, ärtymisen, rasittumisen, väsymyksen, alistumisen ja loukatuksi tulemisen tunteisiin (Pedersen, 2011; Pedersen & Persson Wayne, 2007). Samoin japanilaistutkimuksessa äänenpainetaso ei ollut yhteydessä fyysiseen tai psyykkiseen terveyteen, mutta itse raportoitu meluherkkyys ja tuuliturbiinien kokeminen häiritseväksi maisemassa olivat yhteydessä fyysiseen ja psyykkiseen terveyteen (Kuwano et al., 2014). Puolalaisessa tutkimuksessa havaittiin, että tuulivoimamelun häiritseväksi kokeneilla huimaus (28 % vs. 10 %), rintakivut (34 % vs. 11 %), sykkimisen tunne korvassa (14 % vs. 3 %) sekä hermostuneisuus, jännittyneisyys ja stressi (45 % vs. 29 %) olivat yleisempiä verrattuna ryhmään, joka ei kokenut häiriintyvänsä tuulivoimamelusta (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014b).

Tuulivoimamelun häiritsevyyttä on tutkittu myös Suomessa. THL:n toteutti vuosina 2015–2016 kyselytutkimuksen (n~1 200) viiden tuulivoima-alueen ympäristössä eri puolilla Suomea. Tuulivoimatuotanto oli käynnistynyt alueilla pääosin vuosina 2012–2014 ja turbiinien nimellisteho vaihteli välillä 2–4,5 MW. Kysely ei profiloitunut pelkäksi tuulivoimamelukyselyksi, vaan siinä kysyttiin laajasti myös muista ympäristöaltisteista. Tutkimusalueilla tuulivoimaloiden ääni kuului varsin harvoin sisällä edes lähimmällä etäisyysvyöhykkeellä (<2,5 km), ja vain 1,6 % lähimmällä etäisyysvyöhykkeellä asuvista koki tuulivoimamelun häiritsevän paljon oleskelua sisällä (Turunen et al., 2016). Vastaavasti 2,2 % samalla alueella asuvista koki autoliikenteen melun häiritsevän paljon oleskelua sisällä. Häiritsevyyttä tarkasteltiin myös mallinnetun äänenpainetason luokissa. Melumallinnukset tehtiin Ympäristöhallinnon ohjeen 2/2014 ”Tuulivoimaloiden melun mallintaminen” mukaisilla laskentaparametreilla ja menetelmillä (kts. kappale 4.2.4.). Ylimmässä meluluokassa (>34 dB) 1,9 % vastanneista koki tuulivoimaloiden tuottaman melun häiritsevän paljon oleskelua sisällä. Täydentävässä otoksessa, johon otettiin neljä harvaan asuttua tuulivoima-aluetta, lähimmällä etäisyysvyöhykkeellä 6 % vastanneista (n=6) koki tuulivoimamelun häiritsevän paljon sisällä.

Työterveyslaitoksen toteuttamassa kyselytutkimuksessa (n=152) alle 2 km:n etäisyydellä lähimmästä tuuliturbiinista toisella alueella (turbiinien nimellisteho 3–3,3 MW) 1 % vastaajista koki tuulivoimamelun häiritsevän paljon sisätiloissa, kun toisella alueella (turbiinien nimellisteho 4,5 MW) paljon häiriintyvien osuus oli 18 %. Alueella, jolla häiritsevyys oli yleisempää, luottamus tuulivoimarakentamiseen liittyvään päätöksentekoon oli huonompi ja huoli tuulivoimamelun terveysvaikutuksista oli yleisempää kuin toisella alueella (Hongisto et al., 2015). Lappeenrannan teknillisen yliopiston kyselytutkimuksessa (n~100, turbiinien nimellistehot kahdella alueella 3 MW ja 2,3 MW) (Janhunen et al., 2016) 12 % vastanneista koki tuulivoimamelun paljon tai erittäin paljon häiritseväksi sisätiloissa ja 23 % paljon tai erittäin paljon häiritseväksi ulkona (Janhunen, 2017).

Yleisesti ottaen tuulivoimaloiden tuottama melu ei ole äänenpainetasoltaan erityisen voimakasta verrattuna esimerkiksi liikenne- tai teollisuusmeluun (Jakobsen, 2012). Erityisominaisuksiensa vuoksi tuulivoimamelua pidetään kuitenkin häiritsevämpänä kuin muuta ympäristömelua. Ruotsalais-hollantilainen tutkimusryhmä yhdisti usean poikkileikkaustutkimuksensa (n=1 820) aineiston ja vertasi saatua tuulivoimamelun annos-vastesuhdetta häiritsevyydelle aiemmissä tutkimuksissa raportoituihin teollisuusmelun tai lento-, tie- ja raideliikenteen melun häiritsevyyden annos-vastesuhteisiin. Vertailun mukaan sisätiloissa tuulivoimamelun häiritsevyys alkoi yleistyä pienemmillä melutasoilla kuin teollisuus tai liikennemelun häiritsevyys (Janssen et al., 2011). Tähän tutkimukseen viitataan usein, kun puhutaan tuulivoimamelun häiritsevyydestä suhteessa muihin ympäristömelulähteisiin.

**Taulukko 4.** Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset tuulivoimamulun häiritsevyydestä.

Viite, lehti	Tutkittavat, maa, tuulivoimaloiden teho	Altiste, vaste	Päätulos	Huomiot
Michaud et al. 2016d J Acoust Soc Am	1 238 henkilöä (606 miestä, 632 naista)	Mallinnettu äänenpainetaso: <25, 25–30, 30–35, 35–40, 40–46 (L <sub>A,eq</sub> ) Haastattelukysely: häiritsevyyttä	Äänenpainetason yhteys melun kokemukseen hyvin tai erittäin häiritseväksi / 5 dB:n nousu äänenpainetasossa: <b>OR 2,60; 95 % CI 1,92–3,58</b> Kotona hyvin tai erittäin häiritseväksi kokevien osuudet (%): <25 dB: <b>0</b> 25–30 dB: <b>2,1</b> 30–35 dB: <b>1,0</b> 35–40 dB: <b>10</b> 40–46 dB: <b>14</b>	Kyselyn todellinen tarkoitus pyrittiin peittämään. Tuulivoimamulun häiritsevyyteen olivat yhteydessä muut tuulivoimassa häiritsevät tekijät, henkilökohtainen hyöty, meluherkkyys, fyysiseen terveyteen kohdistuvat huolet ja asunnon omistaminen.
Michaud et al. 2016b J Acoust Soc Am	0,25–11,2 km:n etäisyydellä lähimmistä turbiinista Lounais-Ontario ja Prince Edward Island, Kanada Turbiinit 0,66–3 MW, keskimäärin 2 MW	Mitattu äänenpainetaso: ≤30, 31–35, 36–40, 41–45, 46–50 dB (L <sub>A,eq</sub> ) Haastattelu: häiritsevyyttä	Äänenpainetason yhteys melun kokemukseen erittäin häiritseväksi: Malli 1 (OR; 95 % CI): –30 dB: <b>4,65; 0,88–25</b> 31–35dB: <b>1,00</b> 36–40 dB: <b>2,60; 0,74–9,15</b> 41–45 dB: <b>6,46; 1,91–22</b> >45 dB: <b>9,27; 2,40–36</b> Kotona äärimmäisen tai hyvin häiritseväksi kokevien osuudet (%): –30 dB: <b>10</b> 31–35 dB: <b>10</b> 36–40 dB: <b>13</b> 41–45 dB: <b>20</b> >45 dB: <b>23</b>	Prosentiosuukausien luottamusvälejä ei ole raportoitu, joten erojen tilastollista merkisyyttä ei voida arvioida. Kirjoittajat perusteleval toiseksi alimman äänenpainetasoluokan valitsemista vertailuluokaksi sillä, että erittäin häiritsevyyden osuus oli siinä pienin. Ainoa oikea ratkaisu olisi ollut valita vertailuluokaksi alin luokka, ja tällöin tilastollisesti merkittäviä yhteyksiä ei olisi havaittu.
Community Noise and Health Study (CNHS)				
Kuwano et al. 2014 Noise Contr Engr	744 tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvaa henkilöä (387 naista ja 357 miestä) 332 kontrollialueella asuvaa henkilöä (203 naista ja 129 miestä) noin 80 % ≥50-vuotiaita 34 tuulivoima-alueita ja 16 kontrollialueita Hokkaido-Okinawa, Japani Turbiinit 400 kW–3 MW:n, pääosin >1,5 MW			



<p>Magari et al. 2014 Noise &amp; Health</p>	<p>62 henkilöä (27 naista ja 35 miestä), keski-ikä 51 vuotta keskimääräinen etäisyys turbiineista &lt;580 m Wethersfield, NY, Yhdysvallat Turbiinit 84x1,5 MW</p>	<p>Lyhytaikaiset (10 min.) melumittaukset ulkona ja sisällä: L<sub>A,eq</sub>: 6,3–3150 Hz L<sub>Z,eq</sub>: 6,3–16 Hz, 20–250 Hz Haastattelu: häiritsevyys</p>	<p>Keskimääräiset äänenpainetasot (dB; vaihteluväli) sisällä ja ulkona: 6,3–16 Hz: <b>60,8</b>; 44,1–80,3 ja <b>61,5</b>; 52,0–79,1 20–250 Hz: <b>56,9</b>; 42,3–78,3 ja <b>58,3</b>; 49,2–73,4 6,3–3 150 Hz: <b>47,0</b>; 20,2–64,5 ja <b>45,3</b>; 31,9–72,1</p>	<p>Tulokset keskittyivät korrelaatiokertoimiin. Kolme neljästä kirjoittajasta on konsulttiyritysten palveluksessa. Artikkelellä on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.</p>
<p>Pawlaczyk-Luszczynska et al. 2014a Arch Acoust</p>	<p>361 tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvaa henkilöä, 15–88-vuotiaita 8 tuulivoima-alueita Keski- ja Luoteis-Puolassa (Lipnon, Koszalin, Bialogardin, Slawnon ja Puckin kuntien alueella) Turbiinit 42x2 MW, 60x1,5 MW ja 6x0,15 MW</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: ≤40, 40–45, &gt;45 dB (L<sub>den</sub>) Etäisyys tuulivoimalasta: &lt;400, 400–800, &gt;800 m Kysely: häiritsevyys</p>	<p>Äänenpainetason yhteys melun kokemiseen häiritseväksi yhden luokan nousu 3-luokkaisessa äänenpainetasossa: <b>OR 3,44</b>; 95 % CI 1,81–6,53 Etäisyyden yhteys melun kokemiseen häiritseväksi yhden luokan nousu 3-luokkaisessa etäisyydessä: <b>OR 0,32</b>; 95 % CI 0,16–0,63 Ulkona häiritseväenä kokemisen osuudet (%; 95 % CI): ≤40 dB: <b>30</b>; 22–39 40–45 dB: <b>33</b>; 27–39 &gt;45 dB: <b>41</b>; 29–55 &lt;400 m: <b>52</b>; 35–68 400–800 m: <b>35</b>; 29–41 &gt;800 m: <b>22</b>; 15–32 Sisällä häiritseväenä kokemisen osuudet (%; 95 % CI): ≤40 dB: <b>18</b>; 12–26 40–45 dB: <b>21</b>; 16–27 &gt;45 dB: <b>31</b>; 20–45 &lt;400 m: <b>42</b>; 27–59 400–800 m: <b>22</b>; 17–28 &gt;800 m: <b>13</b>; 8–22</p>	<p>Tuittava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten luokitellun melun käyttäminen mallissa arvoja 1–3 saavana jatkuvaluonteisena muuttujana ei ole järkevää. Artikkelissa ei ole mainittu, sisältävätkö analyysit aineiston pilottitutkimuksesta, joka on julkaistu artikkelissa Pawlaczyk-Luszczynska et al. 2014b.</p>
<p>Pawlaczyk-Luszczynska et al. 2014b Int J Occup Med Environ Health</p>	<p>156 tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvaa henkilöä, 15–82-vuotiaita 3 tuulivoima-alueita Keski- ja Luoteis-Puolassa Turbiinit 8x0,1–2,5 MW</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: 30–35, 35–40, 40–45, 45–50 dB (L<sub>den</sub>) Etäisyys tuulivoimalasta: &lt;400, 400–800, 800–1 200, &gt;1 200 m Kysely: häiritsevyys</p>	<p>Äänenpainetason yhteys melun kokemiseen häiritseväksi yhden luokan nousu 4-luokkaisessa äänenpainetasossa: <b>OR 2,41</b>; 95 % CI 1,08–5,38 Ulkona häiritseväenä kokemisen osuudet (%; 95 % CI): 30–35 dB: <b>0</b>; 0–44 35–40 dB: <b>27</b>; 17–39 40–45 dB: <b>36</b>; 26–47 45–50 dB: <b>64</b>; 36–91 &lt;400 m: <b>71</b>; 43–100 400–800 m: <b>35</b>; 26–45 800–1200 m: <b>23</b>; 12–37 &gt;1200 m: <b>29</b>; 7,6–65 Sisällä häiritseväenä kokemisen osuudet (%; 95 % CI): 30–35 dB: <b>0</b>; 0–44 35–40 dB: <b>19</b>; 8,5–29 40–45 dB: <b>23</b>; 14–33 45–50 dB: <b>18</b>; 4,0–49 &lt;400 m: <b>57</b>; 14–86 400–800 m: <b>22</b>; 14–30 800–1200 m: <b>14</b>; 4,7–26 &gt;1200 m: <b>0</b>; 0–40</p>	<p>Tuittava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten luokitellun melun käyttäminen mallissa arvoja 1–4 saavana jatkuvaluonteisena muuttujana ei ole järkevää. Pilottitutkimus laajemmalle tutkimukselle, joka on julkaistu artikkelissa Pawlaczyk-Luszczynska et al. 2014a.</p>

<p>Bakker et al. 2012 Sci Tot Environ</p>	<p>586 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista kaikki tuulivoima-alueet, joissa 2 kpl ≥500 kW:n turbiineja ≤500 m:n etäisyydellä toistaan. Alankomaat</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;30, 30–35, 36–40, 41–45, &gt;45 dB (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: häiritsevyys</p>	<p>Rakennetyömaailmien perusteella näyttää siltä, että vain melusta häiriintyvillä on riski kärsiä meluun liittyvistä unihäiriöistä ja stressistä. Ulkona melko- tai erittäin häiritsevänä kokevien osuudet (%): &lt;30 dB: 2 30–35 dB: 9 36–40 dB: 20 41–45 dB: 25 &gt;44 dB: 28 Sisällä melko- tai erittäin häiritsevänä kokevien osuudet (%): &lt;30 dB: 1 30–35 dB: 4 36–40 dB: 8 41–45 dB: 25 &gt;44 dB: 19</p>	<p>Äänenpainetaso kuvaa kokonaisuutta kaikista lähteistä, ei pelkästään tuulivoimaloiden tuottamaa melua. Analyseista oli poistettu ne, jotka saavat taloudellista hyötyä tuulivoimalasta. Prosenttiosuuksien luottamusvälejä ei ole raportoitu, joten erojen tilastollista merkittävyyttä ei voida arvioida.</p>
<p>Janssen et al. 2011 J Acoust Soc Am</p>	<p>725 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Alankomaat 754 + 351 henkilöä äänepainetaso ≥30 dB Ruotsi</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;30, 30–35, 35–40, 40–45, &gt;45 dB (L<sub>A,den</sub>) Kysely: havaitseminen, häiritsevyys, äänen esiintyminen ja ominaisuudet</p>	<p>Äänenpainetaso yhteys melun kokemiseen häiritseväksi: <b>β 5,48</b>, p&lt;0,05 ulkona <b>β 5,50</b>, p&lt;0,05) sisällä Kun äänenpainetaso oli 30–35 dB, juuri kukaan tutkitavista ei kokenut sitä häiritsevänä. Äänenpainetasolla 45 dB 26 % tutkitavista koki sen häiritsevänä tai erittäin häiritsevänä ulkona ja 12 % sisällä.</p>	<p>Regressionanalyysia varten 5-luokkainen häiritsevyysmuuttuja on muunnettu arvoja 0–100 saavaksi jatkuvaluonteiseksi muuttujaksi. Kaikkia prosenttiosuuksia ei ole raportoitu, joten häiritsevyyden yleistymistä äänenpainetason kasvaessa ei voida arvioida. Yhdistetty julkaisut Pedersen &amp; Waye 2004, Pedersen &amp; Persson Waye 2007 ja Pedersen et al. 2009.</p>
<p>Pedersen 2011 Noise Control Eng</p>	<p>725 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Alankomaat 754 + 351 henkilöä äänepainetaso ≥30 dB Ruotsi</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: jatkuva (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: havaitseminen, häiritsevyys, äänen esiintyminen ja ominaisuudet</p>	<p>Äänenpainetaso yhteys melun kokemiseen häiritseväksi kaikissa kolmessa aineistossa yhden dB:n nousu äänenpainetasossa: Häiritsevyys ulkona (OR; 95 % CI): Häiritsevyys sisällä (OR; 95 % CI): Ruotsalaiset aineistot: 1,24; 1,13–1,36 1,14; 1,03–1,27 Hollantilainen aineisto: 1,18; 1,12–1,24</p>	<p>Tuulttava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten OR:t olisi syytä laskea äänenpainetason luokissa. Yhdistetty julkaisut Pedersen &amp; Persson Waye 2004, Pedersen &amp; Persson Waye 2007 ja Pedersen et al. 2009.</p>

<p>Pedersen et al. 2009 J Acoust Soc Am</p>	<p>725 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista kaikki tuulivoima-alueet, joissa 2 kpl ≥500 kW:n turbiineja ≤500 m:n etäisyydellä toistaan, tasaiset maanmuodot ja vaihteleva määrää tiiliikemettä, Alankomaat</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;30, 30–35, 35–40, 40–45, &gt;45 dB ja jatkuvana (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: havaitseminen, häiritsevyys, äänen esiintyminen ja omien naisuudet</p>	<p>Äänenpainetason yhteys melun kokemiseen häiritseväksi lyhden dB:n nousu äänenpainetasossa: <b>OR 1,1</b>; p&lt;0,001 Ulkona melko häiritseväenä kokevien osuudet (%: 95 % CI): &lt;30 dB: 1: 0–4 30–35 dB: 6: 4–10 35–40 dB: 12: 8–18 40–45 dB: 6: 3–13 &gt;45 dB: 6: 2–15 Ulkona erittäin häiritseväenä kokevien osuudet (%: 95 % CI): &lt;30 dB: 1: 0–4 30–35 dB: 1: 0–4 35–40 dB: 6: 3–10 40–45 dB: 12: 7–20 &gt;45 dB: 6: 2–15</p>	<p>Tuikittava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten OR:t olisi ollut syytä laskea äänenpainetason luokissa. Artikkeliin liittyvä alkuperäinen tutkimusraportti: van den Berg et al. 2008.</p>
<p>Pedersen ja Persson Waye 2008 Environ Res Lett</p>	<p>754 + 351 henkilöä äänepainetaso ≥30 dB Ruotsi</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: jatkuvana (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: havaitseminen, häiritsevyys, äänen esiintyminen ja omien naisuudet</p>	<p>Äänenpainetason yhteys melun kokemiseen häiritseväksi: <b>β 0,34</b>; p&lt;0,001</p>	<p>Regressionanalyysissä käytettiin 5-luokkaista häiritsevyysmuuttujaa jatkuvaluonteisena. Yhdistetty julkaisut Pedersen &amp; Waye 2004 ja Pedersen &amp; Persson Waye 2007.</p>
<p>Pedersen ja Persson Waye 2007 J Occup Environ Med</p>	<p>754 henkilöä äänepainetaso ≥30 dB 12 aluetta, joilla vähintään yksi &gt;500 kW:n turbiini, vaihtelevat maanmuodot ja vaihteleva kaupungistumisaste, Ruotsi</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;32,5, 32,5–35, 35–37,5, 37,5–40, &gt;40 dB ja jatkuvana (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: havaitseminen, häiritsevyys, äänen esiintyminen ja omien naisuudet</p>	<p>Äänenpainetason yhteys melun kokemiseen häiritseväksi lyhden dB:n nousu äänenpainetasossa: <b>OR 1,1</b>; 95 % CI 1,01–1,25 Ulkona häiritseväenä kokevien osuudet (%): 37,5–40 dB: 6 &gt;40 dB: 15</p>	<p>Tuikittava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten OR:t olisi ollut syytä laskea äänenpainetason luokissa. Kaikkia prosenttiosuuksia ei ole raportoitu, joten häiritsevyyden yleistymistä äänenpainetason kasvaessa ei voida arvioida.</p>

<p>Pedersen ja Persson Waye 2004 J Acoust Soc Am</p>	<p>351 henkilöä, 18–75-vuotiaita äänenpainetaso &gt;30 dB 5 aluetta, joilla 14 kpl 600–650 kW:n, 1 kpl 500 kW:n ja 1 kpl 150 kW:n turbiineja, tasaiset maan- muodot ja maaseutumainen alue, Ruotsi</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;30, 30–32,5, 32,5–35, 35–37,5, 37,5– 40, &gt;40 dB (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: havaitseminen, häiritse- vyys, äänen esiintyminen ja omi- naisuudet</p>	<p>Äänenpainetason yhteys melun kokemiseen häiritseväksi yhden luokan nousu 6-luokkaisessa äänenpainetasossa: <b>OR 1,76; 95 % CI 1,29–2,39</b> Ulkona melko häiritsevänä kokevien osuudet (%; 95 % CI): &lt;30 dB: <b>0</b> 30–32,5 dB: <b>0</b> 32,5–35 dB: <b>10; 5–15</b> 35–37,5 dB: <b>6; 0–13</b> 37,5–40 dB: <b>8; 1–16</b> &gt;40 dB: <b>8; 19–57</b></p>	<p>Turbiinikoot ovat pieniä nykyisiin turbiineihin verrattu- na. Tuikittava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten luokitellun melun käyttäminen mallissa jatkuvana muuttujana ei ole järkevää.</p>
--	--	--	--	---

## Unen häiriintyminen

Kahdessa pienessä kanadalaistutkimuksessa verrattiin polysomnografialla (n=16) ja unipäiväkirjalla (n=37) mitattua unenlaatua ennen ja jälkeen tuuliturbiinien (nimellisteho 1,8 MW) käynnistämisen 2 km:n säteellä lähimmästä turbiinista asuvilla henkilöillä. Tutkimuksessa ei havaittu eroa polysomnografialla mitatuissa parametreissa (Jalali et al., 2016b) eikä unipäiväkirjalla mitatussa unen pituudessa (Jalali et al., 2016c) ennen ja jälkeen turbiinien käynnistämisen, mutta koettu unen laatu oli huonompi ja päivän-aikainen väsymys sekä unettomuus yleisempää turbiinien käynnistämisen jälkeen. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että koettu huono unenlaatu oli yhteydessä tuulivoimaan kohdistuviin kielteisiin asenteisiin, huoleen asuinrakennuksen arvon alenemisesta sekä turbiinien näkymiseen asunnosta. Keskimääräinen äänenpainetaso sisätiloissa oli kuitenkin sekä A-taajuuspainotettuna että painottamattomana lähes sama ennen ja jälkeen turbiinien käynnistämisen. Japanilaistutkimuksessa (n=747) mitattu äänenpainetaso 41–45 dB oli yhteydessä unihäiriöihin (OR 7,93; 95 % CI 1,57–40,07), mutta yllättäen yhteys ei ollut enää tilastollisesti merkitsevä äänenpainetasolla >45 dB (OR 6,61; 95 % CI 0,84–52,31) (Kageyama et al., 2016; Kuwano et al., 2014). Japanilaistutkimuksessa turbiinien nimellisteho oli yleisimmin <1,5 MW. Laajassa kanadalaistutkimuksessa (n=1 238, turbiinien nimellisteho keskimäärin 2 MW) unen laatua mitattiin ranneaktigrafilla, unipäiväkirjalla ja kyselyllä (vakavat unihäiriöt, diagnosoidut unihäiriöt ja unilääkkeiden käyttö), mutta mallinnettu tuulivoimamelu ei ollut yhteydessä unen laatuun (Michaud et al., 2016b, 2016c). Myöskään toisen kanadalaisyhmän pienessä tutkimuksessa (n=12) turbiinien läheisyydessä ja kontrollialueilla asuvat eivät eronneet toisistaan ranneaktigrafimittauksella ja unipäiväkirjalla mitatun unen laadun suhteen (Lane et al., 2016). Ruotsalais-hollantilaisen tutkimusryhmän tutkimuksissa (n=351, n=754, n=586/725) nähtiin yhteys mallinnetun äänenpainetason ja unihäiriöiden riskin välillä yhtä ruotsalaisaineistoa lukuunottamatta (van den Berg et al., 2008; Pedersen, 2011; Bakker et al., 2012). Niissä unihäiriöksi luokiteltiin vähintään kerran kuussa tai määrittelemättömällä ajanjaksolla tapahtuva unen häiriintyminen (taulukko 5).

Useissa tutkimuksissa on raportoitu, että tuulivoimamelun äänenpainetason sijaan tuulivoimamelun häiritsevyys on yhteydessä unihäiriöihin. Ruotsalaisessa tutkimuksessa tuulivoimamelun häiritseväksi kokeneista 36 % raportoi kärsivänsä unihäiriöistä ja niistä, jotka eivät kokeneet tuulivoimamelua häiritseväksi, ainoastaan 9 % raportoi unihäiriöitä (Pedersen & Persson Wayne, 2007). Saman ryhmän Alankomaissa tehdyssä tutkimuksessa raportoitiin häiritsevyyden kokemuksen olevan yhteydessä stressiin (OR 1,27; 95 % CI 1,07–1,51), nukahtamisvaikeuksiin vähintään kerran kuukaudessa (1,41; 1,18–1,67) ja unen häiriintymiseen vähintään kerran kuukaudessa (1,78; 1,49–2,14) (van den Berg et al., 2008). Unen häiriintymiseen näytti olevan yhteydessä sekä tuulivoimamelun häiritsevyys ulkona (OR:t vaihtelivat välillä 1,71–2,26; 95 % CI 1,35–2,90) että sisällä (OR:t vaihtelivat välillä 2,03–2,62; 95 % CI 1,66–3,71) (Pedersen, 2011). Japanilaistutkimuksessa itse raportoitu meluherkkyys ja tuuliturbiinien kokeminen häiritseväksi maisemassa olivat yhteydessä unihäiriöihin (Kuwano et al., 2014).

Meta-analyysi kuudesta poikkileikkaustutkimuksesta (Pedersen & Persson Wayne, 2004, 2007; Shepherd et al., 2011; Bakker et al., 2012; Magari et al., 2014; Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014a) päättyy myös siihen, että tuulivoima-alueiden läheisyydessä asuminen saattaa olla yhteydessä lisääntyneisiin unihäiriöihin (OR 2,94; 95 % CI 1,98–4,37) (Onakpoya et al., 2015).

THL:n kyselytutkimuksessa (n~1 200) viiden tuulivoima-alueen läheisyydessä (<2,5 km lähimmästä turbiinista) 1,6 % vastanneista koki tuulivoimamelun häiritsevän paljon nukkumista (Turunen et al., 2016). Vastaavasti 2,2 % samalla alueella asuvista koki autoliikenteen melun häiritsevän paljon nukkumista. Kun tarkasteltiin mallinnettua melua, ylimmässä meluluokassa (>34 dB) 1,9 % vastanneista koki tuulivoimaloiden tuottaman melun häiritsevän paljon unta. Täydentävässä otoksessa harvaan asutuilla tuuli-

voima-alueilla 6 % vastanneista (n=6) koki tuulivoimamelun häiritsevän paljon unta lähimmällä etäisyysvyöhykkeellä.

Työterveyslaitoksen toteuttamassa kyselytutkimuksessa (n=152) toisella alueella kukaan ei kokenut tuulivoimamelun häiritsevän unta muutamia kertoja viikossa tai useammin, mutta toisella alueella unihäiriöitä koki 9 % vastaajista (Hongisto et al., 2015). Lappeenrannan teknillisen yliopiston aineistossa (n~100) 14 % vastaajista koki tuulivoimaloiden äänen herättävän tai estävän nukahtamista (Janhunen, 2017).

**Taulukko 5.** Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset tuulivoimamelun ja unihäiriöiden välisestä yhteydestä.

Viite, lehti	Tutkittavat, maa, tuulivoimaloiden teho	Altiste, vaste	Päätulos	Huomioit
Jalali et al. 2016b Noise & Health	16 henkilöä (10 naista, 6 miestä), keski-ikä 56 vuotta 2 km:n säteellä lähimmistä turbiineista Ontario, Kanada Turbiinit 5x1,8 MW	Tutkimus tehty ennen ja jälkeen turbiinien käynnistymisen. Mittattu äänenpainetaso ja infraäänin äänenpainetaso makuhuoneessa yön aikana ( $L_{A,eq}$ , $L_{Z,eq}$ ) Yhtäaikainen polysomnografia (11 parametria) ja unipäiväkirja kahtena peräkkäisenä yönä ennen ja jälkeen tuulivoimaloiden käynnistämisen	Ennen turbiinien käynnistämistä ja turbiinien käynnistämisen jälkeen tehtyyn polysomnografiaan perustuvissa unenlaatu kuvaavissa parametreissa ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa. Unipäiväkirjaan perustuvassa unen määrässä ei myöskään ollut eroa, mutta koettu unen laatu oli huonompi, stressin määrä ennen nukkumaan menoa ja aamulla oli suurempi sekä unisuus aamulla ja päivällä oli suurempi turbiinien käynnistämisen jälkeen. Keskimääräinen yönaikainen A-äänitaso sisällä oli 36,6 dB ja Z-äänitaso 63,8 dB ennen turbiinien käynnistämistä ja 36,5 ja 61,9 dB turbiinien käynnistämisen jälkeen.	Pieni aiheisto. Myös äänenpainetaso ulkona oli keskimäärin sama ennen turbiinien käynnistämistä ja turbiinien käynnistämisen jälkeen. Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.
Jalali et al. 2016c Environ Res	37 henkilöä (21 naista, 16 miestä), keski-ikä 54 vuotta 2 km:n säteellä lähimmistä turbiineista Ontario, Kanada Turbiinit 5x1,8 MW	Tutkimus tehty ennen ja jälkeen turbiinien käynnistymisen. Mittattu äänenpainetaso makuhuoneessa yön aikana 16 yönä ( $L_{A,eq}$ , $L_{Z,eq}$ ) Kysely: Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI), Epworth Sleepiness Scale (ESS) ja Insomnia Severity Index (ISI)	Verrattuna aikaan ennen turbiinien käynnistämistä huono unen laatu, päivänaikainen väsymys ja unettomuus (PSQI, ESS, ISI) olivat yleisempiä turbiinien käynnistämisen jälkeen. Huono unenlaatu oli yhteydessä tuulivoimaan kohdistuviin kielteisiin asenteisiin, huoleen asuinrakennuksen arvon alenemisesta ja turbiinien näkymiseen asuntoon. Keskimääräinen yönaikainen A-äänitaso sisällä oli 31,5 dB ja Z-äänitaso 59,9 dB ennen turbiinien käynnistämistä ja 31,2 ja 57,4 dB turbiinien käynnistämisen jälkeen.	Melumittaukseen suostui vain pieni osa tutkittavista, joten melumittauksen ja uniparametrien välistä yhteyttä ei voitu arvioida.
Kageyama et al. 2016 Noise & Health  Kuwano et al. 2014 Noise Contr Engr	747 tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvaa henkilöä (52 % naisia) 332 kontrollialueella asuvaa henkilöä (61 % naisia) noin 80 % $\geq 50$ -vuotiaita 34 tuulivoima-alueita ja 16 kontrollialuetta, Hokkaido-Okinawa, Japani Turbiinit 0,4–3 MW, pääosin >1,5 MW	Mittattu äänenpainetaso: $\leq 30$ , 31–35, 36–40, 41–45, 46–50 dB ( $L_{A,eq}$ ) Haastattelu: häiritsevyys, unihäiriöt, terveydentila	Äänenpainetason yhteys unihäiriöihin (OR: 95 % CI): –40 dB: 1,00 41–45 dB: 7,93; 1,57–40,07 >45 dB: 6,61; 0,84–52,31  Itse raportoitu meluherkkyys ja tuuliturbiinien kokeminen häiritseväksi maimessa olivat yhteydessä unihäiriöihin sekä fyysiseen ja psyykkiseen terveyteen.  Suurin osa mitatuista äänenpainetasoista tuulivoimaloiden läheisyydessä oli 36–40 dB ja kontrollialueella $\leq 35$ dB ( $p < 0,001$ ).	Unihäiriön määritelmänä käytettiin nukahtamisvaikeuksien, unen keskeytymisen, liian aikaisen heräämisen tai pinnallisen unen esiintymistä vähintään 3 kertaa viikossa.  Toinen artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.

<p>Lane et al. 2016 J Environ Health</p>	<p>12 henkilöä (5 naista) tuulivoima-alueelta 10 henkilöä (10 naista) kontrollialueelta &gt;18 vuotiaita Ontario, Kanada</p>	<p>Mitattu äänenpainetaso makuuhuoneessa yön aikana (<math>L_{A,eq}</math>) Ranneaktigrafia (6 parametria) ja unipäiväkirja viitenä peräkkäisenä yönä</p>	<p>Tuulivoima-alueella ja kontrollialueella asuvat henkilöt eivät eronneet tilastollisesti merkittävästi toisistaan aktigrafirekisteröinnillä tai unipäiväkirjalla arvioidun unen laadun suhteen.</p>	<p>Pieni aineisto. Tuulivoimaloiden kokoja ja mitattuja äänenpainetasoja ei ole raportoitu.</p>
<p>Michaud et al. 2016c Sleep</p> <p>Michaud et al. 2016b J Acoust Soc Am</p> <p>Community Noise and Health Study (CNHS)</p>	<p>1 238 henkilöä (606 miestä, 632 naista), 18–79-vuotiaita 0,25–11,2 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Lounais-Ontario (315 turbiinia) ja Prince Edward Island (84 turbiinia), Kanada Turbiinit 0,66–3 MW, keskimäärin 2 MW</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;25, 25–30, 30–35, 35–40, 40–46 (<math>L_{A,eq}</math>) Ranneaktigrafia 7 vuorokauden ajan Haastattelukysely: unihäiriöt</p>	<p>Yhteyttä tuulivoimamelun ja aktigrafialla sekä päiväkirjalla arvioidun unenlaadun välillä ei havaittu. Vakava unihäiriöiden yleisyys, % (<math>p=0,43</math>): &lt;25 dB: 16 25–30 dB: 12 30–35 dB: 14 35–40 dB: 15 40–46 dB: 10 Unilääkkeiden käytön yleisyys, % (<math>p=0,008</math>): &lt;25 dB: 19 25–30 dB: 19 30–35 dB: 13 35–40 dB: 9 40–46 dB: 12</p>	<p>Diagnosoitujen unihäiriöiden yleisyys, % (<math>p=0,31</math>): &lt;25 dB: 16 25–30 dB: 11 30–35 dB: 9 35–40 dB: 8 40–46 dB: 11</p>
<p>Magari et al. 2014 Noise &amp; Health</p>	<p>62 henkilöä (27 naista ja 35 miestä), keski-ikä 51 vuotta keskimääräinen etäisyys turbiinista &lt;580 m Wethersfield, NY, Yhdysvallat Turbiinit 84x1,5 MW</p>	<p>Lyhytaikaiset (10 min.) melumittaukset ulkona ja sisällä: <math>L_{A,eq}</math>: 6,3–3 150 Hz <math>L_{z,eq}</math>: 6,3–16 Hz, 20–250 Hz Haastattelu: unihäiriöt</p>	<p>Keskimääräiset äänenpainetasot (dB: vaihteluväli) sisällä ja ulkona: 6,3–16 Hz: 60,8; 44,1–80,3 ja 61,5; 52,0–79,1 20–250 Hz: 56,9; 42,3–78,3 ja 58,3; 49,2–73,4 6,3–3150 Hz: 47,0; 20,2–64,5 ja 45,3; 31,9–72,1 26 % tutkittavista raportoi unihäiriöitä Yleisen terveysvaikutuksista huolestuneisuuden ja unihäiriöiden kokemisen välinen korrelaattokerroin oli 0,58.</p>	<p>Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.</p>



<p>Bakker et al. 2012 Sci Tot Environ</p>	<p>586 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista kaikki tuulivoima-alueet, joissa 2 kpl ≥500 kW:n turbiineja ≤500 m:n etäisyydellä toistaan. Alankomaat</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;30, 30–35, 36–40, 41–45, &gt;45 dB (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: unihäiriöt</p>	<p>Rakenneyhtiömallien perusteella näyttää siltä, että vain melusta häiriintyvillä on riski kärsiä meluun liittyvistä unihäiriöistä. Suoraa yhteyttä meluallistuksen ja unihäiriöiden välillä ei näytä olevan. Äänenpainetason yhteys unihäiriöihin (=häiriintymisen äänestä vähintään kerran kuukaudessa) (OR: 95 % CI): &lt;30 dB: <b>1,00</b> &gt;45 dB: <b>2,98</b>; 1,35–6,60 Kun äänenpainetaso ylitti 45 dB, 48 % vastaajista raportoi unihäiriöitä.</p>	<p>Äänenpainetaso kuvaa kokonaisuutena kaikista lähteistä, ei pelkästään tuulivoimaloiden tuottamaa melua.</p>
<p>Nissenbaum et al. 2012 Noise &amp; Health</p>	<p>38 henkilöä ≤1,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista 41 henkilöä 3–7 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Mars Hill ja Vinalhaven -tuulivoima-alueet, Maine, USA Turbiinit 1,5 MW</p>	<p>Etäisyys tuulivoimalaan: 0,375–1,4 ja 3,0–6,6 km Kysely: unihäiriöt</p>	<p>Lineaarissa regressioanalyysissä sekä Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI, p=0,02) että Epworth Sleepiness Scale (ESS, p=0,03) olivat yhteydessä etäisyyteen lähimmästä tuulivoimalasta. <b>PSQI Score</b>, unihäiriöiden määrä lähellä ja kauempana tuulivoimalasta (p=0,032): 0,375–1,4 km: <b>66</b> 3,0–6,6 km: <b>44</b> <b>ESS Score</b>, unihäiriöiden määrä lähellä ja kauempana tuulivoimalasta (p=0,032): 0,375–1,4 km: <b>7,8</b> 3,0–6,6 km: <b>5,7</b></p>	<p>Regressioanalyysistä ei ole raportoitu estimaatteja eikä muita tunnuslukuja. Tulosten esitystapaa ja tulkintaa on kritisoitu julkisesti. Tutkittavien määrä on pieni ja tutkimus ei ole luotettavasti raportoitu. Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.</p>
<p>Pedersen 2011 Noise Control Eng</p>	<p>725 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Alankomaat 754 + 351 henkilöä äänepainetaso ≥30 dB Ruotsi</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: jatkuva (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: unen laatu</p>	<p>Äänenpainetaso oli positiivisessa yhteydessä unihäiriöiden todennäköisyyteen kahdessa aineistossa kolmesta (OR: 95 % CI yhden dB:n nousu äänenpainetasossa): Ruotsalaiset aineistot: 1,12; 1,03–1,22 0,97; 0,90–1,05 Hollantilainen aineisto: 1,03; 1,00–1,07</p>	<p>Tutkittavilta kysyttiin unen häiriintymisiä minkä tahansa melun vuoksi (kyllä/ei). Tutkittava yhteys ei todennäköisesti ole lineaarinen, joten OR:t olisi ollut syytä laskea äänenpainetason luokissa. Yhdistetty julkaisut Pedersen &amp; Persson Waye 2004, Pedersen &amp; Persson Waye 2007 ja Pedersen et al. 2009.</p>
<p>van den Berg et al. 2008 Project WINDFARMperception: Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents University of Groningen &amp; University of Gothenburg</p>	<p>725 henkilöä ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista kaikki tuulivoima-alueet, joissa kaksi ≥500 kW turbiinia ≤500 m:n etäisyydellä toistaan, tasaiset maanmuodot ja vaihteleva määrä tieliikennettä, Alankomaat</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;30, 30–35, 36–40, 41–45, &gt;44 dB (L<sub>A,eq</sub>) Kysely: unen laatu</p>	<p>Äänenpainetason yhteys unihäiriöiden esiintymiseen vähintään kerran kuukaudessa (OR: 95 % CI): &lt;30 dB: <b>1,00</b> 30–35 dB: <b>1,36</b>; 0,84–2,21 35–40 dB: <b>1,54</b>; 0,92–2,59 40–45 dB: <b>1,83</b>; 0,98–3,44 &gt;45 dB: <b>2,98</b>; 1,35–6,60</p>	<p>Tutkittavilta kysyttiin, kuinka usein heidän unensa häiriintyi minkä tahansa melun vuoksi (4-portainen asteikko). Alkuperäinen tutkimusraportti, jonka tulokset on julkaistu myös artikkelissa Bakker et al. 2012.</p>

## ***Stressi ja elämänlaatu***

Laajassa kanadalaistutkimuksessa (n=1 238, turbiinien nimellisteho keskimäärin 2 MW) mallinnettu tuulivoimamelu ei ollut yhteydessä koettuun eikä objektiivisesti mitattuun stressiin (kortisoli hiusrnäytteestä, sydämen syketaajuus, verenpaine) (Michaud et al., 2016a, 2016b). Hollantilaistutkimus (n=586, turbiinien nimellisteho  $\geq 0,5$  MW) ei havainnut suoraa yhteyttä mallinnetun tuulivoimameluallistuksen ja kyselyllä mitatun psyykkisen stressin välillä, mutta rakenneyhtälömallien perusteella näyttäisi siltä, että vain melusta häiriintyvillä on riski kärsiä melun aiheuttamasta psyykkisestä stressistä (Bakker et al., 2012) (taulukko 6).

Kanadalaistutkimuksessa (n=1 238) mallintamalla arvioidun tuulivoimaloiden tuottaman äänenpainetason ja elämänlaadun välillä ei ollut yhteyttä (OR 0,99–1,02; 95 % CI 0,80–1,32) (Feder et al., 2015). Pienemmässä kanadalaistutkimuksessa (n=31) havaittiin, että koettu elämänlaatu heikkeni tuuliturbiinien käynnistymisen jälkeen verrattuna aikaan ennen turbiinien käynnistymistä erityisesti niillä, joilla oli kielteinen asenne tuulivoimaloita kohtaan, jotka olivat huolissaan kiinteistönsä arvon alenemisesta ja jotka ilmoittivat kokevansa visuaalista tai melun aiheuttamaa häiriötä (Jalali et al., 2016a). Puolalaisessa tutkimuksessa (n=1 277) tuulivoima-alue lähellä asuinalueita ei vaikuttanut kielteisesti elämänlaatuun. Paras elämänlaatu oli niillä, jotka asuivat kilometrin etäisyydellä tuulivoima-alueista ja huonoin niillä, jotka asuivat vasta suunnitteilla tai rakenteilla olevien tuulivoima-alueiden lähellä (Mroczek et al., 2015). Edellä kuvatuista tutkimuksista poiketen pienessä uusiseelantilaisessa tutkimuksessa (n=39) ryhmällä, joka asui lähellä tuulivoima-alueita, oli alhaisempi fyysiseen terveyteen liittyvä elämänlaatu (sis. huonompi koettu unen laatu) ja alhaisempi ympäristöön liittyvä elämänlaatu (sis. mielipide oman elinympäristön terveellisyydestä ja tyytyväisyys omaan elinympäristöön). Eroa ei ollut sosiaalisessa tai psykologisessa terveyteen liittyvässä elämänlaadussa (Shepherd et al., 2011) (taulukko 7).

**Taulukko 6.** Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset tuulivoimamelun ja stressin välisestä yhteydestä.

Viite, lehti	Tutkittavat, maa, tuulivoimaloiden teho	Altiste, vaste	Päätulos	Huomiot
Michaud et al. 2016a J Acoust Soc Am	1 238 henkilöä (606 miestä, 632 naista), 18–79-vuotiaita	Mallinnettu äänenpainetaso: <25, 25–30, 30–35, 35–40, 40–46 (L <sub>A,eq</sub> ) Sydämen syketaajuuden ja verenpaineen mittaustulokset korissolimaäärityksistä Haastattelukysely: Perceived Stress Scale (PSS)	Tuulivoimamelu ei ollut yhteydessä itse raportoituun tai objektiivisesti mitattuun stressiin ( <b>keskiarvo</b> : vaihteluväli) PSS, (n=987, p=0,86): <25 dB: <b>13,7</b> ; 11,9–15,5 25–30 dB: <b>13,8</b> ; 11,9–15,8 30–35 dB: <b>13,2</b> ; 11,7–14,7 35–40 dB: <b>13,2</b> ; 11,8–14,6 40–46 dB: <b>13,5</b> ; 12,0–14,9 Kortisoli, ng/g (n=528, p=0,54): <25 dB: <b>151</b> ; 99–234 25–30 dB: <b>182</b> ; 119–280 30–35 dB: <b>191</b> ; 136–269 35–40 dB: <b>182</b> ; 132–249 40–46 dB: <b>160</b> ; 116–222 Sydämen syketaajuus, lyontia/minuutti (n=990, p=0,52) <25 dB: <b>68</b> ; 68–73 25–30 dB: <b>71</b> ; 67–74 30–35 dB: <b>70</b> ; 67–72 35–40 dB: <b>70</b> ; 67–72 40–46 dB: <b>71</b> ; 66–71	Kyselyn todellinen tarkoitus pyrittiin peittämään.
Michaud et al. 2016b J Acoust Soc Am	0,25–11,2 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Lounais-Ontario (315 turbiinia) ja Prince Edward Island (84 turbiinia), Kanada		Korkean verenpaineen yleisyys, % (p=0,74): <25 dB: <b>29</b> 25–30 dB: <b>38</b> 30–35 dB: <b>27</b> 35–40 dB: <b>32</b> 40–46 dB: <b>28</b> Systolinen verenpaine, mmHg (n=810, p=0,50) <25 dB: <b>113</b> ; 109–118 25–30 dB: <b>117</b> ; 112–121 30–35 dB: <b>117</b> ; 113–120 35–40 dB: <b>115</b> ; 112–119 40–46 dB: <b>116</b> ; 113–120 Diastolinen verenpaine, mmHg (n=815, p=0,50) <25 dB: <b>68</b> ; 65–71 25–30 dB: <b>70</b> ; 67–74 30–35 dB: <b>70</b> ; 67–73 35–40 dB: <b>70</b> ; 67–72 40–46 dB: <b>70</b> ; 68–73	
Community Noise and Health Study (CNHS)	Turbiinit 0,66–3 MW, keskimäärin 2 MW			
Bakker et al. 2012 Sci Tot Environ	586 henkilöä (49 % naisia), keski-ikä 51 vuotta ≤2,5 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista kaikki tuulivoima-alueet joissa 2 kpl ≥500 kW:n turbiineja ≤500 m:n etäisyydellä toistaan. Alankomaat	Mallinnettu äänenpainetaso (21–54 dB: <30, 30–35, 36–40, 41–45, >45 dB (L <sub>A,eq</sub> )) Kysely: psyykkinen stressi (General Health Questionnaire, GHQ-12)	Rakennehiölmäläisten perusteella näyttää siltä, että vain melusta häiriintyvillä on riski kärsiä meluun liittyvistä psyykkisistä stressistä. Suoraa yhteyttä meluallisuuden ja psyykkisen stressin välillä ei näytä olevan.	

**Taulukko 7.** Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset tuulivoimamulun ja elämänlaadun välisestä yhteydestä.

Viite, lehti	Tutkittavat, maa, tuulivoimaloiden teho	Aitiste, vaste	Päätulos	Huomiot
<p>Jalali et al. 2016a Environ Poll</p>	<p>31 henkilöä (58 % naisia), keski-ikä 54 vuotta 2 km:n säteellä lähimmistä turbiineista Ontario, Kanada Turbiini: 5x1,8 MW</p>	<p>Tutkimus toistettu ennen ja jälkeen turbiinien käynnistymisen. Eiäisyys lähimmistä tuuliturbiineista: &lt;1000m, &gt;1000 m Kysely: Satisfaction With Life Scale (SWLS), SF-12, Physical Component Scale (PCS), Mental Component Scale (MCS)</p>	<p>Henkilöillä, joilla oli kielteinen asenne tuulivoimaloita kohtaan, huoli kiinteistön arvon alenemisesta ja jotka kokivat tuulivoimalat visuaalisesti häiritseviksi, henkinen hyvinvointi ja tyytyväisyys elämään laskivat tuulivoimaloiden käynnistämisen jälkeen.</p> <p><b>Ennen käynnistämistä</b>  <b>MCS (keskiarvo)</b>                  &lt;1000 m: 56                  &gt;1000 m: 56                  kielteinen asenne: 56                  myönteinen asenne: 56                  taloudellinen huoli: 56                  ei taloudellista huolta: 57                  visuaalisesti häiritsevä: 55                  ei visuaalisesti häiritsevä: 57  <b>SWLS (keskiarvo)</b>                  &lt;1000 m: 26                  &gt;1000 m: 31                  kielteinen asenne: 28                  myönteinen asenne: 29                  taloudellinen huoli: 28                  ei taloudellista huolta: 30                  visuaalisesti häiritsevä: 28                  ei visuaalisesti häiritsevä: 30</p> <p><b>Käynnistämisen jälkeen</b>  <b>MCS (keskiarvo)</b>                  &lt;1000 m: 45                  &gt;1000 m: 52, p=0,17                  kielteinen asenne: 44                  myönteinen asenne: 52,                  p=0,04                  taloudellinen huoli: 45                  ei taloudellista huolta: 56,                  p=0,01                  visuaalisesti häiritsevä: 51                  ei visuaalisesti häiritsevä: 45,                  p=0,04  <b>SWLS (keskiarvo)</b>                  &lt;1000 m: 20                  &gt;1000 m: 26, p=0,65                  kielteinen asenne: 21                  myönteinen asenne: 26,                  p=0,03                  taloudellinen huoli: 22                  ei taloudellista huolta: 25,                  p=0,32                  visuaalisesti häiritsevä: 24                  ei visuaalisesti häiritsevä: 21,                  p=0,02</p>	

<p>Feder et al. 2015 Environ Res</p> <p>Michaud et al. 2016b J Acoust Soc Am</p> <p>Community Noise and Health Study (CNHS)</p>	<p>1 238 henkilöä (51 % naisia), 18–79-vuotiailta</p> <p>0,25–11,2 km:n etäisyydellä lähimmistä turbiinista</p> <p>Lounais-Ontario (315 turbiinia) ja Prince Edward Island (84 turbiinia), Kanada</p> <p>Turbiinit 0,66–3 MW, keskimäärin 2 MW</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;25, 25–30, 30–35, 35–40, 40–46 (L<sub>A,eq</sub>)</p> <p>Kysely: WHOQOL-BREF</p>	<p>Tuulivoimamelu ei ollut yhteydessä elämäntilanteeseen (OR: 95 % CI / 5 dB:n nousu äänenpainetasossa).</p> <p>QOL rating: <b>1,02</b>; 0,80–1,32</p> <p>Satisfaction with Health: <b>0,99</b>; 0,82–1,18</p> <p>Fyysinen terveys "Physical Health domain" (vakioitu keskiarvo: 95 % CI), p=0,17</p> <p>&lt;25 dB: <b>13,1</b>; 12,3–13,9</p> <p>25–30 dB: <b>13,4</b>; 12,6–14,2</p> <p>30–35 dB: <b>13,3</b>; 12,7–14,0</p> <p>35–40 dB: <b>13,7</b>; 13,1–14,3</p> <p>40–46 dB: <b>13,5</b>; 12,8–14,1</p> <p>Psyykkinen hyvinvointi "Psychological domain" (vakioitu keskiarvo: 95 % CI), p=0,60</p> <p>&lt;25 dB: <b>15,1</b>; 14,4–15,9</p> <p>25–30 dB: <b>15,0</b>; 14,2–15,8</p> <p>30–35 dB: <b>14,8</b>; 14,2–15,4</p> <p>35–40 dB: <b>15,0</b>; 14,5–15,6</p> <p>40–46 dB: <b>14,8</b>; 14,2–15,4</p> <p>Huonon elämäntilanteen yleisyys edellävän kuukauden aikana. % (p=0,98):</p> <p>&lt;25 dB: <b>11</b></p> <p>25–30 dB: <b>3</b></p> <p>30–35 dB: <b>7</b></p> <p>35–40 dB: <b>6</b></p> <p>40–46 dB: <b>9</b></p>	<p>Kyselyn todellinen tarkoitus pyrittiin peittämään.</p>
<p>Mroczek et al. 2015 Int J Environ Res Public Health</p>	<p>1 277 henkilöä (55 % naisia)</p> <p>2 km:n säteellä lähimmästä tuuliturbiinista</p> <p>toimivassa, rakenteilla olevassa tai suunnitella olevalla tuulivoimaa-alueella, Puola</p>	<p>Etäisyys tuulivoima-alueesta: -700, 701–1 000, 1 001–1 500, 1 501–2 000 m</p> <p>Tuulivoima-alueen tila: rakenteilla, suunnitella, valmis</p> <p>Kysely: elämäntilanteen SF-36v2 (puolalainen versio)</p>	<p>Korkeimmat elämäntilanteepisteet saivat tutkittavat, jotka asuivat lähimpänä tuulivoima-alueita ja matalimmat pisteet 1 501–2 000 m:n etäisyydellä asuvat.</p> <p>Matalimmat elämäntilanteen ja yleisiä terveyttä koskevat pisteet saivat tutkittavat, jotka asuivat suunnitella tai rakenteilla olevien tuulivoima-alueiden läheisyydessä.</p> <p>Etäisyys tuulivoima-alueelta:</p> <p>mental component: <math>\beta = -0,11</math>, p=0,001</p> <p>role physical: <math>\beta = -0,06</math>, p=0,02</p> <p>social functioning: <math>\beta = 0,15</math>, p=0,001</p> <p>role emotional: <math>\beta = 0,06</math>, p=0,001</p> <p>Tuulivoima-alueen tila:</p> <p>general health: <math>\beta = -0,05</math>, p=0,03</p> <p>vitality: <math>\beta = -0,07</math>, p=0,01</p>	<p>Vain tilastollisesti merkitsevät tulokset on taulukoitu. Turbiinien nimellistehoja ei ole ilmoitettu.</p>

<p>Shepherd et al. 2011 Noise &amp; Health</p>	<p>39 henkilöä (58 % naisia) 2 km:n säteellä lähimmästä tuuliturbiinista South Makara Valley, Uusi-Seelanti Turbiini 66 x 2,3 MW Äänenpainetasot (<math>L_{95, 10 \text{ min}}</math>) asuinrakennusten ulkopuolella keskimäärin 20–50 dB</p> <p>158 henkilöä (59 % naisia) vähintään 8 km:n päässä tuulivoima-alueelta maantieteellisesti ja sosioekonomisesti samantaselta alueelta</p>	<p>”Turbiiniyhmä” ja vertailuryhmä Kysely: WHOQOL-BREF Kyselyn todellinen tarkoitus pyrittiin peittämään.</p>	<p>Turbiiniyhmällä oli vertailuryhmää huonompi</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fyysiseen terveyteen liittyvä elämälaatu, sisältäen huonomman unenlaadun ja energisyyden</li> <li>- ympäristöön liittyvä elämälaatu (<math>p=0,02</math>), sisältäen huonomman elinympäristön terveellisyden (<math>p&lt;0,01</math>) ja tyytymättömyyden elinympäristön olosuhteisiin (<math>p=0,03</math>)</li> </ul> <p>Ryhmien välillä ei ollut eroa sosiaalisessa ja psykologisessa elämälaadussa.</p> <p>Elämälaatuasteiden (Health-Related Quality of Life, HRQL) keskiarvot lähellä ja kauempana tuulivoimalasta: Fyysinen HRQL (<math>p=0,02</math>): <math>\leq 27</math> km: 27 &gt;8 km: 29 Sisältää koetun unen laadun, jossa ryhmien välinen ero tilastollisesti merkittävä (<math>p=0,01</math>).</p> <p>Psykologinen HRQL: (<math>p=0,07</math>) <math>\leq 22</math> km: 22 &gt;8 km: 23</p> <p>Sosiaalinen HRQL (<math>p=0,96</math>): <math>\leq 13</math> km: 13 &gt;8 km: 13 Ympäristöön liittyvä HRQL (<math>p=0,02</math>): <math>\leq 30</math> km: 30 &gt;8 km: 33</p>	<p>Pieni aineisto. Tulokset taulukoitu puutteellisesti. Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.</p>
--	---	---	---	---

## 4.2.2 Kokeelliset tutkimukset

Laajakaistaista tuulivoimamelua on tutkittu jonkin verran myös altistamalla vapaaehtoisia kontrolloidussa olosuhteissa erilaisille audio-visuaalisille ärsykkeille. Yhteinen nimittäjä kokeellisille tutkimuksille on pyrkimys häiritsevyyden tarkempaan luonnehdintaan. Ruotsalaisessa kuuntelukokeessa häiritsevimmiksi tuulivoimalan aiheuttamiksi ääniksi koettiin suhahtava, viheltävä tai hakkaava ääni (Persson Wayne & Öhrström, 2002). Sveitsiläis-saksalaisessa kokeellisessa tutkimuksessa (n=60) lyhytaikainen altistus tuulivoimaloiden äänelle koettiin häiritsevämpänä kuin tieliikennemelualtistus samalla äänenpainetasolla varsinkin silloin, kun tuulivoimalan ääni sisälsi äänenvoimakkuuden jaksollista vaihtelua (Schaffer et al., 2016). Toisaalta belgialaisessa kuuntelukokeessa (n=50) tuulivoimamelu yksinään tai yhdistettynä valtatienmeluun ei lisännyt tutkittavan häiriintymistä melusta, kun tutkittavat eivät tienneet melun lähdettä, mutta yksittäisen turbiinin tuottama ääni oli helposti erotettavissa valtatienmelusta, kun melun lähde oli tiedossa. Johtopäätöksenä oli, että tuulivoimamelu ei poikkea kovin paljoa esimerkiksi tieliikennemelusta, kun melun lähde ei ole tiedossa. Sen sijaan kun kokeessa keskityttiin kuuntelemaan ääntä, tuulivoimamelun erityispiirteet edesauttoivat sen erottamista hyvinkin pienillä signaali-kohinasuhteilla. Lisäksi yksilöiden välillä havaittiin eroja tuulivoiman tuottaman äänen erottamisessa (Van Renterghem et al., 2013). Ruotsalaistutkimuksessa, jossa selvitettiin tieliikennemelun kykyä peittää tuulivoimamelua, tieliikennemelu vähensi tuulivoimamelun häiritsevyyttä ainoastaan tilanteissa, joissa tuulivoimamelun äänenpainetaso oli pieni (35–40 dB) ja tieliikennemelu ylitti sen vähintään 20 dB:llä (Pedersen et al., 2010).

## 4.2.3 Vertaisarvioidut katsaukset ja asiantuntijapaneelien raportit

Tuulivoimamelun terveysvaikutuksista on julkaistu lukuisia katsauksia. Niissä päädytään lähes yksimielisesti siihen, että kuultavissa oleva tuulivoimamelu saattaa häiritä ja aiheuttaa unihäiriöitä, jos tuulivoimalue sijaitsee liian lähellä asutusta. Näyttöä ja tutkimuksia unihäiriöistä on kuitenkin selvästi vähemmän kuin häiritsevyydestä. Lisäksi useissa katsauksissa todetaan, että melusta häiriintyminen ja unihäiriöt ovat yhteydessä toisiinsa ja unihäiriöt saattavat johtaa negatiivisiin terveysvaikutuksiin ja heikentää elämänlaatua. Äänenpainetason lisäksi monet ei-akustiset tekijät kuten asenteeet, näköhavainto tuulivoimalasta ja meluherkkyys selittävät häiritsevyyttä. Muutamissa katsauksissa arvioidaan haittojen lisääntyvän, kun äänenpainetaso ylittää ulkona 35–40 dB. Useissa katsauksissa todetaan myös tarve lisätutkimuksille erityisesti pientaajuisen äänen ja häiriintymisestä seuraavien terveysvaikutusten osalta (taulukko 8).

Vertaisarvioitujen tieteellisten artikkelien lisäksi tuulivoimamelun terveysvaikutuksista on julkaistu asiantuntijapaneelien raportteja. Myös niiden lähes yksimielinen johtopäätös on, että tuulivoimamelun häiritsevyydestä on riittävää ja johdonmukaista näyttöä. Häiritsevyyden osalta todetaan kuitenkin, että äänenpainetason itsenäisestä yhteydestä häiritsevyyteen näyttö on vielä riittämätöntä, koska häiritsevyyteen vaikuttavat myös monet ei-akustiset tekijät. Unihäiriöiden, stressin ja elämänlaadun osalta monet raportit päätyvät siihen, että näyttö on rajallista. Useissa raporteissa todetaan myös, että häiriintymisestä tahansa äänestä voi johtaa pitkittyneeseen stressiin ja unihäiriöihin sekä niiden kautta muihin terveyshaittoihin. Muutamissa raporteissa viitataan pientaajuisen melun ja tuulivoimamelulle tyypillisen äänenvoimakkuuden jaksollisen vaihtelun häiritsevyyteen ja erottuvuuteen tuulivoimamelun mahdollisesti suurimpana ongelmana (taulukko 9).

**Taulukko 8.** Vertaisarvioituissa lehdissä julkaistut katsaukset kuultavan tuulivoimamelun yhteydestä häiritsevyyteen, unihäiriöihin, stressiin ja elämänlaatuun.

Viite, lehti	Katsauksessa käytetyt hakukriteerit	Katsauksessa tehdyt pääteimat	Huomiot
Baliatsas et al. 2016a Sci Tot Environ	PubMed, Embase, PsycInfo, relevant journals: kymmeniä aiheeseen liittyviä hakusanoja	<b>Häiritsevyyks ja neurologinen oireilu</b> (univaikaukset, keskittymisvaikeudet, päänsärky): jonkin verran näyttöä, tuloksia on vähän Elinympäristössä esiintyvän pientaajuuden äänen terveysvaikutuksista tarvitaan lisää epidemiologisia tutkimuksia, suurempia otoksia ja parempaa menetelmällistä laatua.	Systemaattinen kausaus Vain 7 tutkimuksista läpäisi valintakriteerit Allisteena pientaajuinen tai infraääni mistä tahansa lähteestä.
Onakpoya et al. 2015 Environ Int	PubMed, Embase, Global health: wind turbine, wind energy, clean energy, annoyance, sleep, quality of life	<b>Häiritsevyyks:</b> jonkin verran näyttöä, <b>OR 4,08</b> (95 % CI 2,37–7,04) <b>Unihäiriöt:</b> jonkin verran näyttöä, <b>OR 2,94</b> (95 % CI 1,98–4,37) Sekä kokeelliset että havainnoivat tutkimukset tuulivoimaloiden tuottaman äänen terveysvaikutuksista ovat perusteltuja.	Systemaattinen kausaus Pieni allistus <40 DB, suuri allistus >40 dB
Jeffery et al. 2014 Can J Rural Med	PubMed, Google Scholar: wind turbine health, wind turbine infrasound, wind turbine annoyance, low frequency noise Vuodesta 2000 eteenpäin	Fyysinen, henkinen ja sosiaalinen hyvinvointi voivat heikentyä, jos tuuli-voima-alue sijoitetaan liian lähelle asutusta. Tuulivoimaloiden tuottaman kuultavan äänen terveysvaikutuksista on riittävästi näyttöä. Kuuloalueen ulkopuolella pientaajuuden äänen terveysvaikutuksia ei voida sulkea pois.	Toinen kirjoittaja kuuluu the Society for Wind Vigilancen asiantuntijaryhmään. Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.
Knopper et al. 2014 Front Publ Health	PubMed, Web of Science, Google: annoyance, noise, environmental change, sleep disturbance, epilepsy, stress, health effect(s), wind farm(s), infrasound, wind turbine(s), LFN, EMF, wind turbine syndrome, neighbourhood change	<b>Häiritsevyyks:</b> riittävästi näyttöä <b>Unihäiriöt:</b> ei riittävästi näyttöä Jos häiriintyminen on voimakasta, se saattaa aiheuttaa terveyshaittoja, kuten unihäiriöitä erityisesti, jos äänenpainetaso ylittää 40 dB. Häiriintymiseen vaikuttavat asenteet ja odotukset. Nocebo-vaikutus saattaa olla yksi osatekijä koettujen terveysvaikutusten synnystä. Oikein sijoitetut tuuliturbiinit eivät näytä aiheuttavan terveyshaittoja.	Konsulttitoimiston tekemä
McCunney et al. 2014 J Occup Environ Med	PubMed, Google: wind turbines, wind turbines and health effects, infrasound, infrasound and health effects, low-frequency sound, wind turbine syndrome, wind turbines and annoyance, wind turbines and sleep disturbances	Tuulivoimalan läheisyydessä asumisen ja häiritsevyyden välinen yhteys on monimutkainen ja siihen vaikuttavat myös havainnoijan henkilökohtaiset ominaisuudet. Muihin vaikuttaviin tekijöihin verrattuna äänenpainetaso on pieni unihäiritsevyydessä ja siitä raportoimisessa Pientaajuuden äänen ei ole voitu osoittaa olevan terveysuhka tuuli-voimala-alueiden läheisyydessä asuville.	Murray & McMurtry 2015 ovat kirjoittaneet kriittisen vastineen.
Rubin et al. 2014 Noise & Health	PubMed: (wind farm OR wind turbine OR infrasound) AND (psych* OR nocebo OR worry OR annoyance OR misattribution OR personality)	Vaihtoehtoisia sellyksia tuuli-voimalan aiheuttamiksi oletetuille oireille ovat nocebo-vaikutus, väärä päättely ja lisääntynyt huomion kiinnittäminen oireisiin johtuen huolestuneisuudesta tai melun häiritsevyydestä.	Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.



<p>Schmidt ja Klokner 2014 Plos One</p>	<p>PubMed, Web of Science, Google Scholar, other Internet sources: wind turbine(s) OR wind farm(s) AND health OR noise OR annoyance OR tinnitus OR vertigo OR epilepsy OR headache</p>	<p><b>Häiritsevyys ja unihäiriöt:</b> jokseenkin selvää näyttöä annosvastesuhteesta Siedettävän äänitason yläraja näyttää olevan n. 35 dB <math>L_{Aeq}</math>. Melusta häiriintyminen ja unihäiriöt ovat yhteydessä toisiinsa. Unihäiriöt saattavat johtaa negatiivisiin terveysvaikutuksiin. Tuulivoima-alueiden sijoittelussa varovaisuus on perusteltua. Pientaajuisten ja amplitudimoduloituneen äänen huomioiminen altistumisen arvioinnissa saattaisi johtaa erilaisiin johtopäätöksiin.</p>	
<p>Arra et al. 2014 Cureus</p>	<p>EMBASE, PubMed, OvidMedline, PsycINFO, Cochrane, SIGLE, Scirus; (wind power OR wind farm OR air turbine OR wind turbine) AND (distress OR annoyance OR sleep disturbance OR noise OR sound OR infrasound OR sonic OR low-frequency OR acoustic OR hear OR ear OR wind turbine syndrome)</p>	<p><b>Ahdistus (distress):</b> uskottavaa näyttöä, mutta syy-seuraussuhdetta ei ole voitu osoittaa Kausaalisuhteen olemassaolon arvioiminen edellyttää lisätutkimuksia.</p>	
<p>Kurpas et al. 2013 Ann Agric Environ Med</p>	<p>Web of Science, Google, Research Gate: wind farm, health effects</p>	<p><b>Häiritsevyys:</b> riittävästi näyttöä Ärtymys ja unihäiriöt ovat yhteydessä tuulivoimaloihin erityisesti kun äänenpainetaso ylittää 40 dB. Silti visuaaliset havainnot, asenteet ja meluherkkyys näyttävät tärkeämmiltä kuin äänenpainetaso. Jatkotutkimukset ovat perusteltuja.</p>	
<p>Roberts &amp; Roberts 2013 J Environ Health</p>	<p>PubMed: infrasound AND health effects, low-frequency noise AND health effects, low-frequency sound AND health effects, wind power AND noise, wind turbines, wind turbines AND noise</p>	<p><b>Häiritsevyys:</b> riittävästi näyttöä sekä äänen että pelkän tuulivoimaloiden läsnäolon osalta Vaatii lisätutkimuksia, joita voidaan arvioida, onko tuulivoimaloiden tuottama ääni terveysriski. Häiriintymisen aiheuttamia terveysvaikutuksia on syytä tutkia.</p>	
<p>Bolin et al. 2011 Environ Res Lett</p>	<p>PubMed, PsycInfo, Science Citation Index, InterNoise ja Wind Turbine Noise-konferenssi-julkaisut, Google, Google Scholar</p>	<p><b>Häiritsevyys:</b> riittävästi näyttöä <b>Unihäiriöt:</b> hyvin vähän näyttöä (kaksi tutkimusta)</p>	<p>Perustuu vain muutamaan tutkimukseen.</p>
<p>Knopper &amp; Ollison 2011 Environ Health</p>	<p>Web of Science: annoyance, noise, environmental change, sleep disturbance, epilepsy, stress, health effect(s), wind farm(s), infrasound, wind turbine(s), low frequency noise, wind turbine syndrome, neighbourhood change Ei-tieteellinen kirjallisuus: health effects wind farms, health effects wind turbines, annoyance wind turbines, sleep disturbance wind turbines Vuosina 2003–2011</p>	<p><b>Häiritsevyys ja unihäiriöt:</b> riittävästi näyttöä, erityisesti kun äänenpainetaso on &gt;40 dB Äänenpainetason lisäksi häiritsevyys on yhteydessä näköhavaintoon, tuulivoimaan kohdistuvaan asenteeseen ja meluherkyyteen.</p>	<p>Konsulttitoimiston tekemä</p>

**Taulukko 9.** Viranomaisten, tutkimuslaitosten ja järjestöjen julkaisemat raportit kuultavan tuulivoimamelun yhteydestä häiritsevyyteen, unihäiriöihin, stressiin ja elämäntilaatuun.

Viite, julkaisija	Raportissa tehdyt päätelmät	Huomiot
Council of Canadian Academies 2015, Kanada	<p><b>Häiritsevyyks:</b> riittävää näyttöä  <b>Unihäiriöt:</b> rajallista näyttöä  <b>Stressi:</b> Näyttö ei riitä arvioimaan kausaalisuhteen olemassaoloa. Näyttää siltä, että rajallista näyttöä on, mutta metodologisten ja tilastollisten heikkouksien vuoksi näyttö on heikompaa kuin univaikutusten osalta.</p>	
Merlin et al. 2015 National Health and Medical Research Council (NHMRC) 2015, Australia	<p><b>Häiritsevyyks:</b> johdonmukaista näyttöä  <b>Unihäiriöt:</b> jonkin verran näyttöä  <b>Elämäntilaatu:</b> jonkin verran näyttöä</p>	Systemaattinen katsaus
State Government Victoria 2013, Australia	<p>Tuulivoimaloiden tuottama ääni ja myös pientaajuinen ääni voi olla lähiasukkaiden kuultavissa.            Kuultava ääni mistä tahansa lähteestä voi häiritä ja kohtaa pitkittyneeseen stressiin ja muihin terveysvaikutuksiin.</p>	
von Humerbein et al. 2013 University of Salford, UK	<p><b>Häiritsevyyks:</b> riittävää näyttöä  <b>Unihäiriöt:</b> jonkin verran näyttöä, mutta eivät välttämättä aiheudu melusta            Äänenpainetason lisäksi myös asenne, näköhavainto ja taloudellinen hyöty ovat yhteydessä häiritsevyyteen.</p>	
Ellenbogen et al. 2012 Massachusetts Department of Environmental Protection & Massachusetts Department of Public Health, USA	<p><b>Häiritsevyyks:</b> rajallista näyttöä            Häiritsevyyteen näyttää vaikuttavan äänenpainetason lisäksi myös näköhavainto sekä asenne tuulivoimaloita kohtaan.            Äänenpainetason itsenäisen yhteyden osalta näyttö on riittämätöntä.  <b>Unihäiriöt:</b> rajallista näyttöä            Hyvin suuri äänenpainetaso voi häiritä unta, mutta kynnyksarvoa ei toistaiseksi tunneta. Unen häiriintyminen voi vaikuttaa mielialaan, älyllisiin toimintoihin ja kokonaisvaltaisesti terveyteen ja hyvinvointiin.  <b>Psyykinen stressi/henkisen hyvinvoinnin heikentyminen:</b> ei yhteyttä            Keskimääräinen emissio tuuliturbiinista on 103 dB ja yli 400 m:n päässä äänenpainetaso on jo alle 40 dB.</p>	
Colby et al. 2009 American Wind Energy Association & Canadian Wind Energy Association	<p><b>Häiritsevyyks:</b> Joikut henkilöt saattavat kokea tuuliturbiinin äänen häiritsevänä. Tuuliturbiinin äänen suurin ongelma on sille luonteomainen äänenpainetason jaksottainen vaihtelu, joka voidaan kokea häiritsevänä riippumatta äänenpainetasosta.</p>	Työn tilaajat ovat tuulivoimatoimijoiden etujärjestöjä.

<p>Herbrandson &amp; Messing 2009 Minnesota Department of Health, Minnesota Government, USA</p>	<p>Häiritsevyys, elämänlaadun heikentyminen, unettomuus ja päänsärky ovat yleisimmät raportoidut haitat. Unettomuus ja päänsärky korreloivat voimakkaasti häiritsevyyden kanssa. Haittojen kokeminen on yleisempää, jos tuulivoimalat ovat näkyvissä ja jos esiintyy vilkkuvaa varjostusta. Haitat näyttäisivät olevan yhteydessä kuuloalueella olevaan pientaajuiseen meluun. Valitusten määrä lisääntyy, kun äänenpaineet ulkona ylittävät 35 dB. Tavanomaisissa olosuhteissa tuulivoimaloiden tuottama pientaajuinen ääni ei ole helposti havaittavissa enää yli 800 m:n päässä lähteestä.</p>	
<p>Pedersen 2003 Swedish Environmental Protection Agency, Ruotsi</p>	<p><b>Häiritsevyys:</b> jonkin verran näyttöä Tuulivoimamelun häiritsevyyteen vaikuttaa meluallistuksen lisäksi tuuliturbiinien näkyvyys maisemassa ja asenteet. Häiritsevyyttä ja unihäiriöitä voi lisätä tuulivoimamelulle tyypillinen äänenvoimakkuuden jaksollinen vaihtelu ja suhahtava luonne (swishing), joiden vuoksi se voi erottua helposti taustamelusta. Em. tekijät saattavat aiheuttaa lievää stressiä, jota tulisi tutkia lisää. <b>Unihäiriöt:</b> ei riittävää näyttöä</p>	

## 4.2.4 Tuulivoimaloiden aiheuttaman melualtistuksen mallinnus

*Tarja Yli-Tuomi, THL*

Havainnoivissa tuulivoimamelun terveys- ja hyvinvointivaikutuksia selvittävässä tutkimuksessa äänenpainetasoja ei yleensä mitata vaan mallinnetaan. Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistuissa tuulivoimamelun häiritsevyyttä koskeissa alkuperäistutkimuksissa on altistuvan kohteen äänenpainetason mallintamiseen käytetty yleisimmin ISO 9613-2 kansainvälistä standardia (ISO, 1996a) tai Ruotsin ympäristöministeriön esittämän mallin alkuperäistä (Naturvårdsverket, 2001) tai muokattua versiota (Naturvårdsverket, 2010). Lisäksi on käytetty hollantilaista mallia, joka on hyvin lähellä ISO 9613-2 menetelmää sekä Uudessa-Seelannissa käytettyä yksinkertaista mallia, joka on sama kuin Ruotsin ympäristöministeriön malli 2001.

ISO 9613-2 menetelmän avulla voidaan arvioida A-taajuuspainotettu keskiäänitaso tuulivoimaloiden ympärillä äänen etenemistä suosivien sääolojen aikana. Äänitehotasona käytetään A-taajuuspainotettua äänitehotasoa oktaavikaistoittain (kaistojen keskitaajuus 63 Hz–8 kHz) tuulennopeudella 8 m/s 10 m:n korkeudella. Turbiinien tuottama melu mallinnetaan ympäristölähteenä pistelähteenä, joka sijoitetaan voimalan napakorkeuteen. Äänen vaimenemista laskettaessa on yleensä otettu huomioon geometrinen vaimeneminen, ilmakehän absorptio sekä maaperän aiheuttama vaimeneminen, mutta rakennuksista tapahtuvia heijastuksia ei ole otettu huomioon. Kaikkien turbiinien vaikutus altistuvassa kohteessa on laskettu yhteen logaritmisesti.

Ruotsin ympäristöministeriön malli 2001 mallintaa äänisäteilyn puolipallon alueelle. Lähtöarvona käytetään valmistajan ilmoittamaa A-taajuuspainotettua kokonaisäänitehotasoa (ei oktaavikaistoittain) tuulennopeudella 8 m/s 10 m korkeudella. Geometrisen vaimennuksen lisäksi menetelmä ottaa huomioon vain ilmakehän absorption (0,005 dB/m). Van den Berg ym. (van den Berg et al., 2008) tekemän vertailun perusteella ISO 9613-2 ja hollantilainen malli antavat lähes samat tulokset, mutta Ruotsin ympäristöministeriön mallia 2001 vastaava uusiseelantilainen yksinkertainen malli yliarvioi äänitasoja lähellä turbiinia ja aliarvioi äänitasoja suurilla (>2 km) etäisyyksillä.

Ruotsin ympäristöministeriön päivitetystä mallista 2010 leviäminen alle 1 km etäisyydelle lasketaan kuten 2001 mallissa. Yli 1 km:n etäisyydellä otetaan huomioon myös ilmakehän absorptio oktaavikaistoittain keskitaajuuksilla 63 Hz–4 kHz.

Hollannissa vuonna 2007 tehdyssä tutkimuksessa tuulivoimaloiden aiheuttama melualtistus arvioitiin kolmella eri menetelmällä: ISO 9613-2 mallilla, hollantilaisella mallilla sekä Uudessa-Seelannissa käytettävällä yksinkertaisella mallilla, joka on sama kuin Ruotsin ympäristöministeriön malli 2001. Pedersen ym. käyttivät julkaisussaan näistä ISO 9613-2 mallin tuloksia (Pedersen et al., 2009). Bakker ym. käyttivät omassa julkaisussaan hollantilaisen mallin tuloksia (Bakker et al., 2012).

Ruotsin ympäristöministeriön esittämän mallin alkuperäistä versiota on käytetty altistumisen arviointiin vuonna 2000 Ruotsissa toteutetussa kyselytutkimuksessa (Pedersen & Persson Waye, 2004). Toisessa julkaisussaan Pedersen ja Persson Waye käyttivät samaa menetelmää myös 2005 kerättyyn aineistoon sillä erotuksella, että jos turbiinien ja asunnon väliin jäi lahti tai jos alueella oli suuria korkeuseroja voimaloiden perustusten ja asunnon välillä, mallinnettuun arvoon lisättiin 1,5 dB (Pedersen & Persson Waye, 2007).

Janssen ym. (Janssen et al., 2011) käyttivät aiemmin laskettuja melutasoja (Pedersen & Persson Wayne, 2004, 2007; Pedersen et al., 2009), mutta mallien antamat keskiäänitasot ( $L_{A,eq}$ ) muutettiin vuorokauden äänitasoiksi  $L_{den}$ , jossa ilta-ajan keskiäänitasoa painotetaan + 5 dB ja yö-aikaa +10 dB, melun häiritsevyyden kuvaamiseksi. Muuntaminen tapahtui lisäämällä mallien antamiin keskiäänitasoihin 4,7 dB. Muunnos perustui van den Bergin raporttiin Hollannissa tehdyistä mittauksista (van den Berg, 2008).

Puolassa tehdyssä tutkimuksessa (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2014a) keskiäänitasot arvioitiin Ruotsin 2001 mallin mukaisesti ja muunnettiin vuorokauden äänitasoiksi lisäämällä 4,7 dB.

Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa (Keith et al., 2016) tuulivoiman aiheuttamat äänitasot asuntojen ulkopuolella laskettiin käyttäen ISO 9613-2 mallia (etäisyys voimalasta korkeintaan 10 km) sekä vertailun vuoksi Ruotsin ympäristöviraston mallia 2010 (kaikki etäisyydet).

### **Melumallinnus THL:n kyselytutkimuksessa**

THL:n toteutti vuosina 2015–2016 kyselytutkimuksen (n~1 200) viiden tuulivoima-alueen ympäristössä eri puolilla Suomea. Tutkimuksen tuloksia kuvataan kappaleissa 4.2.1. ja 5.3.1. Altistusta arvioitiin sekä etäisyytenä lähimmästä tuuliturbiinista että mallintamalla melutasot Ympäristöhallinnon ohjeen 2/2014 ”Tuulivoimaloiden melun mallintaminen” mukaisilla laskentaparametreilla ja -menetelmillä. Laskennassa käytettiin SoundPlan 7.4 -melulaskentaohjelmaa ja siihen sisältyvää ISO 9613-2 -melulaskentamallia, joka huomioi kolmiulotteisessa laskennassa muun muassa maastonmuodot sekä etäisyysvaimentumisen, ilman ääniabsorption, esteet, heijastukset ja maanpinnan absorptio-ominaisuudet. Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus laskettiin lämpötila-arvolla 15 °C ja ilman suhteellisen kosteuden arvolla 70 %. Pystysuorilta pinnoilta heijastusten lukumäärä oli rajoitettu kolmeen. Maa-alueella absorptio- ja heijastuksen vaikutuskertoimena käytettiin arvoa 0,4 (akustisesti puolikova) ja vesialueilla arvoa 0 (akustisesti kova). Ympäristöhallinnon ohjeesta poiketen meren, järvien ja lampien lisäksi myös joet mallitettiin vesialueina.

Maastomallin lähtötietoina käytettiin Maanmittaustoimiston Maastotietokantaa (Hamina 3/2015, Vähäkylä 9–10/2015, Simo 10/2015, Tervola 11/2015, Honkajoki 3/2016). Korkeusero asunnon ja voimalan perustuksen välillä oli kaikilla mallitettujen alueiden asunnoilla alle 60 m. Haminassa rakennusten korkeudet määritettiin Maanmittauslaitoksen Laserkeilausaineistosta (2/2014). Muilla paikkakunnilla 1–2 kerroksisten talojen korkeudeksi asetettiin mallissa 5 m ja muiden rakennusten korkeudeksi 10 m. Allasrakennelmia ei mallitettu rakennuksina.

Kukin voimala mallitettiin turbiinin napakorkeuteen sijoitettuna ympärisäteilevänä suuntaamattomana pistelähteenä tuulen suunnasta riippumatta. Haminassa Summa 1 voimaloiden melupäästöinä käytettiin PROMETHOR Oy:n tekemiin mittauksiin perustuvia arvoja terssikaistoilla 50 Hz–10 kHz ( $L_{W,A}$  105,6 dB). (PROMETHOR Oy, Tuulivoimaloiden ympäristö- ja sisämeluselvitys, Loppuraportti mittaussajanjaksolta 6.6.–10.8.2012, Selvityksen kohde: Hamina, Petkele). Mäkelänkankaan voimaloiden päästöarvoina käytettiin WSP Finland Oy:n tekemiin mittauksiin perustuvia arvoja terssikaistoilla 50 Hz–10 kHz. Kaikille Mäkelänkankaan voimaloille käytettiin voimaloiden 2–4 mittaustulosten logaritmisesti laskettua keskiarvoa ( $L_{W,A}$  106,7 dB) (WSP Finland Oy, Hamina Mäkelänkangas, Tuulivoimaloiden melupäästöjen mittaukset ja melun laskennallinen arviointi, 23.10.2014). Muilla tuulivoima-alueilla käytettiin lähtötietoina turbiinivalmistajien antamia takuuarvoja sekä tietoja päästön taajuussisällöstä. Valmistajien antamat tiedot päästön taajuussisällöstä ovat informatiivisia eikä niitä voida pitää takuuarvoina.

Laskentaruudun koko oli 5 m x 5 m ja laskentakorkeus 4 m. Kyselyyn vastanneiden meluallistus arvioitiin valitsemalla kodin koordinaattipisteestä 20 m säteellä olevista laskentapisteistä suurin keskiäänitaso ( $L_{A, eq}$ ). Rakennusten päällä olevat laskentapisteet eivät olleet mukana valinnassa. Laskenta-alue oli noin 5 km x 5 km ulottuen alueelle, jolla mallitettu keskiäänitaso oli alle 30 dB.

## 4.2.5 Yhteenveto

Tuulivoimamelun vaikutuksista häiritsevyyttä on tutkittu eniten, ja tuulivoimamelun äänenpainetaso näyttääkin olevan yhteydessä häiritsevyyden kokemukseen. Johdonmukaista häiritsevyyden kokemuksen yleistymistä äänenpainetason kasvaessa tai kynnyksarvoa, jonka jälkeen häiritsevyys yleistyisi selvästi, ei kuitenkaan ole nähtävissä. Yleisen käsityksen mukaan tuulivoimamelu on akustisten ominaisuuksiensa vuoksi häiritsevämpää kuin esimerkiksi liikenne tai teollisuusmelu, mutta todellisuudessa tästä on vähän varsinaista tutkimusnäyttöä.

Unihäiriöiden yhteydestä tuulivoimameluallistukseen näyttöä on vähemmän kuin häiritsevyyden osalta, mutta on selvää, että tuulivoimamelu voi häiritä unta, jos asuinrakennus sijaitsee hyvin lähellä tuulivoimalaa.

Häiritsevyyden kokemuksella on joka tapauksessa keskeinen rooli tuulivoimamelun terveysvaikutuksissa, koska se näyttää selittävän unihäiriöitä ja muita terveys- ja hyvinvointivaikutuksia enemmän kuin äänenpainetaso. Lisäksi voimakas häiritsevyyden kokemus, stressi, huoli, pelko tai muut negatiiviset tunteet sekä vakavat unihäiriöt voivat pitkään jatkuessaan johtaa merkittävään terveyden ja hyvinvoinnin heikkenemiseen. Äänenpainetason lisäksi tuulivoimamelun koettuihin vaikutuksiin vaikuttavat asenteet, huolet, pelot ja tuulivoimaloiden näkyminen maisemassa.

## 5 Tuulivoimamelun sisältämän infraäänien vaikutukset terveyteen

### 5.1 Teorioita vaikutusmekanismeista

#### 5.1.1 Korvan kautta välittyvät vaikutukset

*Jukka Ylikoski, Helsinki Ear Institute*

Kun pyritään selvittämään, miten tuulivoimamelu vaikuttaa yksilöihin, on tärkeää ymmärtää sen vaikutusmekanismit ihmisen elimistöön ja se kuinka sama melu voi vaikuttaa yksilöihin eri tavalla riippuen fysiologisista ja psykologisista tekijöistä ja mahdollisista olemassa olevista lääketieteellisistä tiloista.

Seuraavassa kuvataan mekanismeja miten ääni voi vaikuttaa elimistöön, joka tapahtuu joko kuulosysteemin (auditory pathway) tai kuuloon liittymättömän sisäkorvamekanismin (non-auditory pathway) kautta. Äänet aistitaan ensisijaisesti korvalla, jossa sijaitsee aaltoliikkeen aistimiseen erikoistuneet mekanoreseptorit. Kuulosysteemin kautta tuleva ääni johdetaan sisäkorvan kuuloelimeen, jossa se muunnetaan karvasoluissa sähköisiksi hermosimpulsseiksi. Ääni voi myös stimuloida sisäkorvan tasapainoelimä ja siten tasapainosysteemiä, ja suurilla äänenpainetasoilla aiheuttaa myös koko kehon värinää.

Tuulivoimaloiden tuottama ääni on siinä määrin hiljaista, että voidaan katsoa tuulivoimalaäänten vaikutusten elimistöön tapahtuvan yksinomaan korvan - siis kuulo- tai tasapainoelinten kautta. On luultavaa, että korkeilla äänenpainetasoilla elimistövaikutuksia voi esiintyä myös muiden kehon osien kautta.

Edellä olevasta seuraa, että mahdollisten vahinkomekanismien ymmärtämiseksi olisi tärkeää, että kun tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvien oireita kuvataan tai niistä raportoidaan, tehtäisiin ero varsinaisten korvaoireitten (tinnitus, hyperakusia, paineen tunne korvassa, pahoinvointi, huimaus) ja erilaisten yleisoireitten, kuten unihäiriöt, stressi, ahdistus, väsymys ja päänsärky välillä. On kuitenkin huomattava, että rajanveto oirekategorioiden välillä on vaikeaa, sillä esim. pahoinvointi ja huimaus ovat myös yleisluonteisia, autonomisen hermoston kautta välittyviä oireita eivätkä siis suoria korvaoireita.

#### ***Peruskäsitteitä sisäkorvan anatomiasta ja toiminnasta***

Ilmassa kulkeva ääni ohjautuu korvakäytävän kautta välikorvaan ja edelleen sisäkorvan simpukkaan, jossa sijaitsee varsinainen kuuloelin eli Cortin elin. Sisäkorva, sisältäen sekä kuulo- että tasapainoelimet, muodostuu nesteeseen täyttämästä kalvoisesta lokerostosta, joka sijaitsee ohimoluun sisällä. Kalvoston sisustan täyttää endolymfa ja ulkopuolen perilymfa.

Sisäkorvan kuuloelin sisältää ihmisellä noin 16 000 karvasolua, noin 3 000 sisä- ja 13 000 ulkokarvasolua (inner and outer hair cells, IHCs ja OHCs). Näistä varsinaisesti IHC:t ja niitä hermottavat tyyppi I hermot välittävät kuuloa. IHC:n yläpinnan karvat (sensory hairs eli stereocilia) eivät kosketa yläpuolella olevaa peitinkalvoa (tectorial membrane, TM) ja ovat siksi herkkiä niitä ympäröivän, TM:n alapuolella olevan nesteen (endolymfa) liikkeille. Tästä seuraa, että IHC:t aktivoituvat ja ovat siis herkkiä aaltoliikkeen aiheuttamille endolymfan nopeuden muutoksille. Kun nesteen nopeus alenee pientaajuisilla äänillä, IHC:n herkkyys vähenee ja hyvin pientaajuiselle äänelle (infraäänille) IHC:t eivät reagoi ollenkaan. Tästä syystä ko. äänet eivät ole kuultavissa tavanomaisilla äänenpainetasoilla.

Toista karvasolutyyppiä, kolmea riviä OHC:ta hermottaa tyyppi I hermotusta paljon vähäisempi tyyppi II hermosysteemi, jonka tarkka funktio ei ole täysin selvitetty mutta tiedetään, että se ei välitä tietoista kuulemista. IHC:sta poiketen OHC:n yläpinnassa olevat karvat (stereocilia) ovat kiinni peitinkalvossa. Tämä mekaaninen kytkentä tekee OHC:t siirtymälle herkiksi ("displacement sensitive") mikä tarkoittaa, että OHC:t ovat herkkiä pientaajuisille ja infraäänille.

Pientaajuiset äänet stimuloivat siis ensisijaisesti OHC:a, joka vaste on mitattavissa sähköpotentiaalimutoksina (cochlear microphonics) (Dallos et al., 1972). Toinen kuuloelimen toimintaa kuvaava ja mitattava sähköpotentiaali on endolymfaattinen potentiaali (Salt et al., 1987).

Samantyyppinen kahtiajakoisuus kuin kuuloelimessä, vallitsee myös sisäkorvan tasapainoelimessä. Kaarikäytävien laajentumissa sijaitsevat crista ampullarikset ovat herkkiä endolymfanesteen nopeudelle ja etenkin kiihtyvyydelle, kun taas ns. otoliittielinten (utriculus ja sacculus) aistinepiteeli karvasoluineen ovat herkkiä siirtymälle eli esimerkiksi pään asennon muutoksille.

### ***Miten infra- ja pientaajuinen ääni vaikuttaa***

#### ***Vaikutus koklean karvasoluihin***

Kun äänet etenevät ilmasta korvaan tullakseen muunnetuiksi biosähkösignaaleiksi simpukan aistin- eli karvasoluissa, niissä tapahtuu monia, osin taajuusriippuvaisia, mekaanisia ja fysiologisia muunnoksia. Näistä merkittävimpiä on 3 filterisysteemiä, joiden vaikutuksesta alle 100 Hz:n äänet vaimenevat ja siten ihmisen kuuloherkkyys alenee taajuuksilla 100 Hz–20 Hz nopeudella 18 dB/oktaavi. Tästä nopeasta herkkyuden laskusta johtuu, että jotta 5 Hz:n ääni olisi kuultavissa, sen äänenpainetason tulisi olla 105 dB voimakkaampi kuin vastaava 500 Hz:n äänellä.

Tämä osoittaa sen tosiasian, että tyyppi I hermot stimuloituvat IHC:n kautta ja että nisäkkäät kuulevat IHC:illa (Dallos, 2008). Tärkeä seuraus tästä perusmekanismista on se, että OHC:t ovat IHC:ä paljon herkempiä pientaajuisille äänille. Tämä ero on teoriassa yli 50 dB 1 Hz:n äänille (käytännössä eri syistä jonkin verran alempi).

Sisäkorvan vasteita infra- ja pientaajuiselle äänialtistukselle koe-eläinmalleissa on tutkittu monilla anatomisilla ja elektrofysiologisilla menetelmillä hyväksikäyttäen myös erilaisia kokeellisia järjestelyjä mm. aiheuttamalla nestekierron häiriö (hydrops) pientaajuisilla äänillä. Tutkimuksia infraäänialtistuksen koe-eläinmalleilla on suoritettu etenkin professori Alec Saltin sisäkorvalaboratoriossa Washington yliopistossa.



Salt ja Hullar (Salt & Hullar, 2010) ja Salt ym. (Salt et al., 2013) ovat osoittaneet, että A-taajuuspainotettuna 125 Hz:n pientaajuinen vain 45 dB tasoinen kapeakaistainen melu aiheuttaa suurempia sisäkorvavasteita kuin 90 dB tasolla annettu laajakaistamelu (jossa on sama pientaajuussisältö). Lisäksi he osoittivat, että 5 Hz:n infraääni 60–65 dB äänenpainetasolla stimuloi kuuloelintä. Näistä he päätyivät yhteenvetoon, jonka mukaan pitkäaikainen tuulivoimamelu stimuloi kohtalaisen voimakkaasti korvan pientaajuusaluetta (simpukan kärki eli apex).

Vastaavia tutkimuksia ihmisillä, käyttäen pääosin pientaajuisia ääntä on suoritettu Munchenin yliopistossa M Drexlin tutkimusryhmän toimesta. Mittaamalla ns. Distorsion-product-acoustic-emissioita (DPOAE) he ovat osoittaneet, että myös ihmisellä OHC:t ovat herkkiä pientaajuisille äänille ja että ihmisen altistaminen ko. äänille aiheuttaa sisäkorvassa hydrops-tilan.

OHC-stimuloituminen edelleen stimuloi niitä hermottavat tyypin II kuulohermon neuronit, jotka eivät sinänsä välitä kuuloaistimusta. Infraäänit näyttävätkin olevan optimaalinen stimulaatiotapa OHC:lle (Weisz et al., 2012). Vastaavia infraääni-herkkiä neuroneja on todettu linnun kuuloelimessä (Schermyly & Klinke, 1990). Tyyppi II neuronit myös ovat yhteydessä aivorungon kuulotumakkeen kautta aivokuoren kuulo- ja muille alueille, joilla katsotaan olevan rooli valikoivassa huomioinnissa ja häilytyksessä (selective attention and alerting) (Brown et al., 1988; Godfrey et al., 1997; Shore, 2005). Tämä voisi selittää tuulivoimama-oireina raportoituja unihäiriöitä.

### ***Vaikutus tasapaino- eli vestibulaarielimiin***

Infraäänien vaikutuksista ihmiseen ja nimenomaan ihmisen sisäkorvan tasapainoelimeen on vähän varmaa tutkimustietoa. Oletettuja infraäänivaikutuksia alettiin tutkia 1970-luvulla Yhdysvaltojen ilmavoimissa koska lentäjät raportoivat saavansa humalaisen tunteen ("drunk"). Altistuskokeissa, joissa käytettiin 105–120 dB voimakkuuksia, ei kuitenkaan havaittu vahingollisia vaikutuksia. Altistus aiheuttaa lähinnä hierovan tunteen (massage) (Harris et al., 1976). Arveltiin, että merkittävää vaikutusta tasapainoelimeen ei ole, koska akuutti altistus ei aiheuttanut välittömiä tasapainohäiriöitä.

Elektrofysiologisesti sisäkorvan tasapainoelinten karvasolut ovat herkkiä hyvin pientaajuisille äänille, tyypillisesti alle 30 Hz (Grossman et al., 1988). On esitetty, että ne eivät kuitenkaan reagoisi hiljaisille ilmassa kulkeville infraäänille. Toisaalta hiirimallissa on raportoitu että pientaajuinen 100 Hz:n ääni 70 dB voimakkuudella aiheutti tasapainohäiriöitä ja tasapainoelimissä oksidatiivista stressiä ja soluvaurioita (Tamura et al., 2012).

Ihmisillä on osoitettu, että otoliittielimet (sacculus ja utriculus) reagoivat kohtalaisen voimakkailla korkeampitaajuisille (yli 100 dB, yli 100 Hz) luujohtotietä kulkeville äänille ja värinöille (Todd et al., 2003). Tätä ilmiötä on käytetty hyväksi kun on kehitetty uusi tasapainoelimen funktiotesti, Vestibular Evoked Myogenic Potential (VEMP) (Todd et al., 2003; Curthoys, 2010). Tasapainoelimen toimintakokeiden, etenkin VEMP-tutkimusten perusteella, on arveltu, että alle 100 dB ilmassa kulkevat äänet eivät aktivoisi tasapainoelintä normaaleilla, terveillä henkilöillä (Harrison, 2015). VEMP-tutkimuksissa normaali ärsytyskynnys on 110 dB. Eri syistä ääniherkistyneillä henkilöillä ko. kynnys saattaa olla alentunut 20–40 dB. On kuitenkin arveltu, että jos tuulivoimamelu on normaaleilla tasoilla (A-taajuuspainotettuna 40–50 dB), se niin harvoin nousee yli 70 dB:n, että ei ärsytä ääniherkistynyttä osaa väestöstä (Harrison, 2015).

Edellä olevat arviot perustuvat kanadalaisen paneelin kannanottoihin, joissa siis todetaan että varmaa tietoa ei ole ja että kyseessä on asiantuntija-arvio (educated guess). Toisaalta on huomattava, että kokemukset ja arviot tasapainoelimen ärsytyskynnyksistä perustuvat akuutteihin äänialtistuksiin. Kyseessä

on kuitenkin siinä määrin pienet marginaalit (marsuille aiheutettu hydroks 80 dB, 20 Hz, 30 min) ja ihmiselle aiheutettu hydroks 80 dB, 30 Hz, 1,5–3 min), että kroonisissa altistuksissa tuulivoimalamelun aiheuttamaa suoraa vaikutusta tasapainosysteemiin ei voi ilman lisätutkimuksia poissulkea.

Epäsuora tekijä, joka tukee mahdollisuutta, että hiljainenkin infraääni (vastaavan voimakas mitä tuulivoimala tuottaa) vaikuttaa sisäkorvaan on jo noin 20 vuotta käytössä ollut Meniett-terapia. Kyseinen hoito perustuu yleiseen käsitykseen, että Menieren taudin patofysiologinen vastine on endolymfaattinen hydroks. Laitteella hoidetaan Menieren tautia antamalla korvaan infraäänipulsseja (6 Hz, 0,6 s; 0,4–1,2 kPa) (Thomsen et al., 2005).

### ***Vaikutus sisäkorvan nestekiertoön***

Ehkä varteenotettavin mahdollisuus mekanismiksi millä pientaajuinen tai infraääni vahingoittaa sisäkorvaa on sen vaikutus sisäkorvan nestekiertoön. Sisäkorvakalvoston sisustan täyttää endolymfa ja ulkopuolen perilymfa. Endolymfan kierron häiriöt johtavat endolymfaattinen hydroks tilaan. Tällöin endolymfan määrä lisääntyy ja kuulo- ja tasapainoelimen ontelot laajenevat. Herkimmin laajenevia sisäkorvan kohtia ovat koklean apex ja sacculus. Seurauksena on paineen tunne, pienten taajuuksien kuulonalentuma, tinnitus ja huimaus. Tunnetuin tällainen oireyhtymä on Menieren tauti, jonka keskeinen oire ovat rajut kierto- ja huimauskohtaukset (fluktuoivan kuulonalentuman, paineen tunteen ja tinnituksen lisäksi). Menieren taudin esiintyvyydeksi on raportoitu 0,5–1,5 % väestöstä (Harris & Alexander, 2010; Tyrrell et al., 2014). Vastaavaa oireilua ilman huimauskohtauksia on kutsuttu epätyypilliseksi Menieren taudiksi, jonka esiintyvyys ilmeisesti on 2–3 kertaa Menieren taudin esiintyvyyttä suurempi (Pyykkö, 2017). Osalle näitä potilaita asetetaan diagnoosi ”subkliininen endolymfaattinen hydroks”. Kaikkiaan Menieren tautia tai hydroks-tilasta johtuvia oireita potevia arvioidaan olevan 2–5 % väestöstä.

Pientaajuinen ja infraääninen on osoitettu aiheuttavan endolymfaattisen hydroksin sekä koe-eläin- että humaanitutkimuksissa. Lim ym. altisti chinchilloja 1, 10 tai 20 Hz:n infraäänille 10–120 sekuntia, voimakkuus vaihteli 150 dB:stä 170 dB:iin (Lim et al., 1982). Sisäkorvahydroks todettiin yli 80 %:ssa korvista, lisäksi useimmissa sisäkorvissa todettiin massiivinen karvasolutuho. Flock ja Flock altistivat marsut rakenteellisesti ei-vahingoittavalle pientaajuiselle melulle 20 Hz, 80 dB, 30 minuutin ajan (Flock & Flock, 2000). Altistus ei aiheuttanut karvasolusolutuhoa, mutta hydroksin ja mikroruptuuroita Reissnerin kalvoon.

Ihmisillä on todettu, että 1,5–3 minuutin altistus kohtalaisen voimakkaalle 30 Hz:n äänelle (Z-äänitaso 120 dB, A-äänitaso 80 dB) aiheuttaa hydroksin, joka ilmenee tinnituksena (korvien soiminen) ja muutoksina akustisissa emissioissa. Kun altistus lopetettiin, hydroks poistui, mutta jos altistuminen olisi jatkuvaa, on todennäköistä, että syntyisi pysyvä hydroks tila. Tuulivoimalamelun mahdollisia terveyshaittoja ajatellen yksi teoreettinen mahdollisuus on että infra- tai pientaajuinen tuulivoimamelu pitkäaikaisaltistuksena aiheuttaa endolymfaattisen hydroksin ja sitä kautta altistuneille kuvattuja oireita (huimaus, pahoinvointi, tinnitus, paineen tunne korvassa). Ilmiötä olisi mahdollista tutkia, koska akustisia emissioita voidaan mitata objektiivisesti, (Drexler et al., 2014; Ueberfuhr et al., 2016) ja mahdollisesti syntyvää hydroksia voidaan kuvata magneettitutkimuksella (fMRI) (Seo et al., 2013).

### ***Tasapainoelinten ja kuuloelimen ääniyliherkkyys***

Otoliittielinten (sacculus ja utriculus) on todettu reagoivan voimakkailla, kuultavissa olevilla äänillä synnyttäen pahoinvointia (nausea) ja tasapainohäiriöitä (Todd et al., 2003). Myös kaarikäytäväsysteemin ääniärsytyksestä aiheutuu pienelle osalle ihmisistä huimausta (ns. Tullio-ilmiö). Sen ajatellaan johtuvan

SCD-syndromasta (superiorisen kaarikäytävän dehiskenssi) (Minor et al., 1998). Kyseessä on luupuutos superiorisen kaarikäytävän katossa jonka arvellaan johtuvan syntymän jälkeisestä paikallisesta luun kehityshäiriöstä, joka esiintyy noin 1–5 %:lla väestöstä (Erdogan et al., 2011; Russo et al., 2014), alle 2-vuotiailla lapsilla jopa 27 %:lla (Hagiwara et al., 2012). Luupuutoksen takia sisäkorvaan syntyy ikään kuin ”kolmas ikkuna” (olemassa olevien pyöreän ja soikean ikkunan lisäksi), jonka kautta ääni pääsee vaikuttamaan suoraan sisäkorvan tasapainoelimeen.

Lisäksi on todettu sekä koe-eläimillä että ihmisillä, että endolymfaattinen hydroops aiheuttaa tasapainoelimen herkistymisen myös pientaajuisille- ja infraäänille. Tämän on ajatettu selittävän sisäkorvan hypersensitiivisyyden äänille tietyissä patologisissa tiloissa kuten Menieren taudissa ja oireettomassa endolymfaattisessa hydroopsissa. Kokeellisessa endolymfaattisessa hydroopsissa korvan herkkyys infraäänille on osoitettu lisääntyvän jopa yli 20 dB (Salt et al., 2009; Drexler et al., 2014).

Äänilyherkkyyttä esiintyy myös muissa, toistaiseksi patofysiologialtaan huonosti tunnetuissa oireyhtymissä kuten autismissa (Autism Spectrum Disorder, ASD). ASD:n previanssi on noin 2 % väestöstä. Autismissa ääni-intoleranssia esiintyy yli 70 %:lla ja se on yksi merkittävimpiä oireita, koska äänilyherkkyys pahentaa epäsosiaalisia käyttäytymisoireita ja esiintyy jo tavanomaisissa ääniympäristöissäkin. Siksi ASD-potilaille on hankalaa löytää tarpeeksi hiljaisia asumisympäristöjä.

Kaikkiaan henkilöitä, joilla esiintyy jonkin edellä kuvatun tai muun syyn pohjalta äänilyherkkyyttä ja jotka siksi voisivat teoriassa saada tuulivoimamelun aiheuttamiksi kuvattuja korva- ym. oireita, voi hyvinkin olla noin 10 % väestöstä.

### ***Ristiriita kuvattujen oireiden ja tuulivoimamelun fyysikaalisten ominaisuuksien välillä***

Luonteenomaista viime vuosien tuulivoimaloiden terveysvaikutuskannanotoissa on se jyrkkä ristiriita mikä vallitsee toisaalta voimaloiden lähialueilla asuvien ilmoittamien terveyshaittojen ja toisaalta voimamelun ja raportoitujen oireiden välistä syy-yhteyttä arvioivien asiantuntijalausuntojen ja -paneeliraporttien välillä.

Edellä oleva tuulivoimamelun korvavaikutuskatsaus on laadittu hakemaan vastausta kysymykseen voisiko tuulivoimalan infra- ja pientaajuisella äänellä olla sisäkorvavaikutuksia, joiden voisi ajatella aiheuttavan (patofysiologisia muutoksia, joilla voitaisiin selittää tuulivoimamelun aiheuttamiksi esitettyjä terveyshaittoja.

Mahdollisten patofysiologisten mekanismien tunnistaminen olisi erityisen tärkeää siksi, että niiden perusteella olisi mahdollista luokitella raportoituja haittavaikutuksia sillä perusteella voisiko kunkin oireen takana olla suora korvavaikutus vai jokin muu mekanismi.

Tuulivoimamelun terveysvaikutusten arvioinnin yhteydessä keskeinen kysymys on voiko altistuminen infraäänille aiheuttaa riskin fyysiselle tai henkiselle hyvinvoinnille. Vuosikymmeniä vallinneen yleisen käsityksen mukaan infraäänen taajuudet ovat liian pieniä, jotta ihmisen kuulosysteemi voisi niitä prosessoida. Tämä perustuu käsitykseen, että ihmisen kuuloalue käsittäisi vain taajuudet 20–20000 Hz (Leventhall, 2007). Tätä käsitystä tukevat lukuisat koe-eläimillä ja ihmisillä suoritetut tutkimukset, jotka osoittavat, että kuuloelimen kuulosta vastuussa olevat sisäkarvasolut ovat huomattavan epäherkkiä infraäänelle (Dallos et al., 1972; Salt & Hullar, 2010).

Toisaalta, käsitys että kuulosysteemi ei pysty prosessoimaan infraääntä on haastettu useissa tutkimuksissa, joissa on osoitettu infraäänien aiheuttavan muutoksia kuuloelimen toimintaan sekä koe-eläimillä (Marquardt et al., 2007) että normaalikuuloisilla ihmisillä (Hensel et al., 2007). Itse asiassa on toistuvasti osoitettu, että ihminen aistii infraääntä, mikäli äänenpainetasot ovat riittävän suuria (Robinson & Dadson, 1956; Corso, 1958; Landström et al., 1988; Moller & Pedersen, 2004; Schust, 2004). Kahdessa suhteellisen tuoreessa magneettikuvaus-tutkimuksessa (fMRI) on edelleen osoitettu, että 12 Hz:n infraääntä annettuna yli 110 desibelin voimakkuudella aiheuttaa kuuloaivokuoren aktivoitumisen, joka osoittaa, että (kuultavissa olevan) infraäänien aistimisprosessit kuuloaivokuoritasolla muistuttavat vastaavia ”normaalien” äänten kuulemisen prosesseja (Dommes et al., 2009; Weichenberger et al., 2015). Näyttääkin siis nyt olevan yleinen käsitys, että ihmiset tosiaan aistivat infraääntä ja että altistuminen pientaajuuiselle ja infraäänimelulle voi aiheuttaa hankalaakin häiritsevyyttä (annoyance) ja stressiä (distress) (Leventhall, 2004).

Tuulivoimalamelun on raportoitu aiheuttavan tuulivoimalasyndroomaksi (Wind Turbine Syndrome) nimetyn sairauden oireita unihäiriöistä, pääsärystä, huimauksesta, tinnituksesta ja ääniyliherkkyydestä paniikkikohtauksiin ja masennukseen (Shepherd & Billington, 2011; Enbom & Enbom, 2013; Farboud et al., 2013). Tämä siitä huolimatta, että vaikka tuulivoimalamelulla on osoitettu olevan merkittäviä infraäänikomponentteja, maksimaaliset infraäänien äänenvoimakkuudet jäivät tasolle 80–90 dB (Jakobsen, 2005; van den Berg, 2006; Jung et al., 2008), joka ei ole tarpeeksi, jotta infraääni olisi kuultavissa. Näihin käsityksiin pohjaten onkin esitetty, että jos et kuule ääntä, sillä ei voi olla sinuun vaikutusta (Leventhall, 2007). Samanlaisen kannan on ottanut myös Maailman Terveysjärjestö (World Health Organisation, WHO), jonka mukaan ei ole luotettavaa näyttöä siitä, että kuulokynnyksen alapuolella olevalla infraäänellä olisi fysiologisia tai psykologisia vaikutuksia (Berghlund & Lindvall, 1995).

Nyt ovat kuitenkin edistysaskeleet viime vuosien sisäkorvan ja kuulofysiologian tutkimuksessa saattaneet kyseenalaiseksi edellä mainitun kannanoton, koskien erityisesti väitettä että (infra)äänien tulee olla kuultavissa, jotta sillä voisi olla vaikutuksia elimistöön eikä siten mahdollisia infraäänivaikutuksia tarvitsisi huomioida riskiarvioinneissa. On esimerkiksi osoitettu, että koe-eläimillä 5 Hz:n taajuinen infraääni annettuna niinkin pienellä kuin 60–65 dB äänenpainetasolla aktivoi kuuloelintä ja erityisesti sen ulkokarvasoluja (Salt et al., 2013). Ulkokarvasoluilla, jotka osallistuvat varsinaiseen kuulemisprosessiin vain sekundaarisina vahvistajina, taas on osoitettu olevan aivorungon kuulotumakkeiden kautta laajempi vaikutus keskushermostoon (Salt & Hullar, 2010; Salt & Kaltenbach, 2011). Lisäksi on osoitettu, että erilaisilla aistimiskynnyksen lähellä, vähän sen alapuolella olevilla ärsykkeillä, erityisesti ääniärsykkeillä, voi olla merkittäviä vaikutuksia aivojen toimintaan, erityisesti kognitiivisiin funktioihin (Dixon & Henley, 1991; Swingle, 1991; Taylor, 1994).

Viimeisin ja vahvin osoitus siitä, että ei-kuultava infraääni vaikuttaa aivoihin, ei vain alueisiin jotka ovat tärkeitä kuulemisessa, vaan myös emootioita ja autonomista hermostoa kontrolloiviin alueisiin ja niiden välisiin yhteyksiin, tulee aivan tuoreesta Weichenberger ym. tutkimuksesta (Weichenberger et al., 2017). He antoivat lähellä kuulokynnystä olevaa infraääntä (9–122 dB, 12 Hz) 200 sekunnin ajan (aikaisempien töiden altistusaika oli 1–3 sekuntia) terveille koehenkilöille ja tutkivat aivovasteita fMRI:llä. Yllättävä havainto oli, että kuulokynnyksen yläpuoliset stimulaatiot eivät näkyneet fMRI-vasteina, kun sen sijaan kuulokynnyksen alapuolella olevat äänistimulaatiot aiheuttivat fMRI-vasteen, ei vain kuuloaivokuorelle, vaan myös emotionaalista ja autonomista kontroleista vastuussa olevissa alueissa (Anterior Cingulate Cortex, ACC ja oikea manteliumake, amygdala). Yllättävä löydös selittyy tutkijoiden mukaan annoksella: 200 s stimulaation aikana tapahtuu tottuminen eli adaptaatio, jota aikaisemmissa 1–3 s stimuloineissa ei ehdi tapahtua (Dommes et al., 2009; Weichenberger et al., 2015). Jos siis ääni on kuultavaa,

kuuloaivokuorelta alaspäin vaikuttava (top-down) inhibitio aiheuttaa adaptaation eikä stimulaatio näy fMRI:ssä. Jos ääni ei kuulu, ei tule inhibitiota eikä adaptaatiotakaan.

ACC-alueella on osoitettu olevan tärkeä rooli autonomisen hermoston säätelyssä (Terreberry & Neafsey, 1983; Hurley et al., 1991). Mantelimumake taas on keskeinen erilaisten sensoristen aistimusten prosessoinnissa. Sitä kutsutaankin epämiellyttävyykeskukseksi, koska sen on osoitettu olevan yliaktiivinen erilaisissa herkkyytiloissa, kuten haju-, maku-, valo- ja ääniherkkyyksissä (Irwin et al., 1996; Lane et al., 1997; Zald & Pardo, 2002). Sillä on myös esitetty olevan merkittävä rooli vaikeassa tinnituksessa ja hyperakusiassa (Auerbach et al., 2014).

Weicherberger ym. siis osoittavat, että kuulumaton infraääni vaikuttaa tiedostamattomasti (Weichenberger et al., 2017) - luultavasti ulkokarvasolujen välittämän "ei-auditorisen" signaalitien kautta (Graybiel, 1972; Aitkin, 1986) - suoraan tärkeisiin emootioista ja autonomisista kontroleista vastaaviin aivoalueisiin ja voi siten selittää tuulivoimalamelun aiheuttamiksi raportoituja terveyshaittoja.

Korvaoireet kuten tinnitus, paineen tunne, huimaus, usein myös pahoinvointi ovat yleensä merkkejä sisäkorvan toiminnan häiriöstä (erityisesti juuri endolymfaattisesta hydropsista), kun taas muut yleisimmin raportoidut oireet kuten unihäiriöt, stressi, väsymys ja päänsärky ovat yleisoireita, eivätkä heijasta korvavaikutuksia. Ne voisivat pikemminkin olla seurausta joko suorasta infraäänien vaikutuksesta aivojen emootioista ja autonomisen hermoston toiminnasta vastaaviin kontrollikeskuksiin tai primaarioireiden aiheuttaman stressireaktion seurauksena syntyneestä autonomisen hermoston epätasapainosta.

On tunnettua, että esimerkiksi tinnitus ei sinänsä yleensä ole iso ongelma, mutta jos siihen kytkeytyy tunne-elämästä vastaava limbisen systeemi (negatiiviset emootiot esimerkiksi pelkona, että tinnitus ei mene pois tai että se pahenee), kehittyä helposti mentaalinen stressireaktio ja sitä kautta jopa invalidisoivia autonomisen hermoston epätasapainosta johtuvia yleisoireita, erityisesti unihäiriöitä ja ahdistusta.

Nykytietämyksemme siitä, miten infraääni vaikuttaa korvaan, edellyttää lisätutkimuksia. Näiden pääsisältöjä tulisi olla tutkia tuulivoimalamelua vastaavan infraäänien pitkäaikaisvaikutuksia ihmisillä ja myös sitä, mikä on se infraäänialtistuksen määrä, joka aiheuttaa koe-eläimen sisäkorvassa (akustisen) stressitilan. Koe-eläinmalleja tutkimalla saataisiin tietoa siitä, kuinka voimakkaita infraäänialtistuksia ihmisillä voitaisiin käyttää, sillä sisäkorvan ja kuulon fysiologia on hyvin samankaltaista kaikilla nisäkkäillä. Yleisesti infraäänien vaikutuksia sisäkorvan fysiologiaan ja sitä kautta elimistöön tunnetaan toistaiseksi siinä määrin vähän, että niitä tulisi selvittää lisää.

Amygdala sijaitsee mediaalisesti temporaalilohkossa, on toiminnallisesti osa limbistä järjestelmää ja on tiiviisti yhteydessä hippokampukseen. Mantelimumakkeen toiminta yhdistyy pitkälti negatiivisten tunnekokemuksien prosessointiin, kuten pelkoon ja uhkaan. Emotionaalinen oppiminen ja tunneassosiatiot, erityisesti pelkoehdollistuminen, ovat tyypillisiä toimintoja mantelimumakkeelle. Mantelimumakkeen ja hippokampuksen yhteistoimintaa ajatellaan niin, että mantelimumakkeen uskotaan olevan vastuussa pelon ja uhkaavien negatiivissävytteisten tunteiden havainnoinnissa ja prosessoinnissa, kun taas hippokampus vastaa näiden tunteiden ympäröivän kontekstin muistiin painamisesta.

ACC on limbisen järjestelmän voimakkaasti verkottunut osa, joka osallistuu etenkin kognitiivisten ja emotionaalisten ristiriitojen prosessointiin (Botvinick et al., 1999; Bush et al., 2000; Kerns et al., 2004; Egner & Hirsch, 2005; Etkin et al., 2006), mutta sillä on osoitettu myös olevan tärkeä rooli autonomisen her-

moston säätelyssä tiiviitten yhteyksiensä kautta insulaan, prefrontaalikorteksiin, amygdalaan, hypotalamukseen ja aivorunkoon (Terreberry & Neafsey, 1983; Meneguzzo et al., 2014).

### **Yhteenveto**

Nykytietämyksemme siitä, miten infraääni vaikuttaa korvaan ja raportit, joiden mukaan tuulivoimamelu olisi enemmän häiritsevää ja aiheuttaisi enemmän negatiivisia vaikutuksia elämänlaatuun kuin vastaavan tasoinen muu ääni edellyttää lisätutkimuksia. Näiden pääsisältöjä tulisi olla tutkia tuulivoimalamelua vastaavan infraäänien pitkäaikaisvaikutuksia ihmisillä ja myös sitä, mikä on se infraäänialtistuksen määrä, joka aiheuttaa terveyshaittoja. Yleisesti infraäänien vaikutuksia sisäkorvan fysiologiaan ja sitä kautta elimistöön tunnetaan toistaiseksi siinä määrin vähän, että niitä tulisi selvittää lisää.

Myös haitallisia terveysvaikutuksia valittavia henkilöitä kannattaisi tutkia. Tällöin tulisi selvittää olisiko heillä ääniherkkyyttä selittämässä jokin sairaudesta tai poikkeamasta johtuva syy.

Nykyisin käytettävissä olevan tutkimustiedon valossa ei ole mahdollista arvioida syy-yhteyttä tuulivoimaloiden aiheuttaman ei-kuultavan äänen (erityisesti infraäänien) ja kuulo- ja tasapainoaistin kautta välittyvien oireitten kuten huimaus, pahoinvointi, tinnitus ja korvien paineen tunne, välillä.

Aivojen kuvantamistutkimuksilla on osoitettu, että infraäänillä on suora vaikutus aivojen autonomisen hermoston toimintaan ja emootioita sääteleviin hermoverkkoihin. Krooninen altistuminen tuulivoimalamelulle voisi aiheuttaa tätä kautta haitallisia terveysvaikutuksia.

Merkittävällä osalla väestöstä (arviolta 5–10%) voi olla sairaus tai kuulo- ja tasapainosysteemin poikkeama, joka tekee heidät yliherkiksi infraäänille.

## **5.1.2 Tärinän kautta välittyvät vaikutukset**

*Anu Turunen, THL*

Tärinä esiintyy usein yhdessä kuuloalueella olevan äänen kanssa. Ihminen altistuu mekaaniselle tärinälle, kun kappaleen pinnan edestakainen värähtely siirtyy pintaa koskettaessa tärinänä henkilön käsiin tai koko kehoon. Voimakkaalle tärinälle altistutaan pääasiassa teollisissa työympäristöissä, kun käytetään paineilma- tai sähkökäyttöisiä käsityökaluja tai istutaan rakennus- ja maatalousajoneuvoissa. Pitkäaikaisena tärinä voi aiheuttaa terveyshaittoja kuten valkosormisuutta ja käsien puutumista sekä alaselkäoireita (koko kehon tärinä) tai ammattitautteja kuten traumaattinen vasospastinen sairaus (nk. tärinätauti). Elinympäristössä voi altistua työperäistä altistusta lievemmälle tärinälle, jos asuinrakennus on liian lähellä esimerkiksi raide- ja tieliikennettä tai teollisuutta, ja olosuhteet tärinän etenemiselle ovat suotuisat. Tärinä voi edetä maaperän kautta rakennukseen ja ihminen voi aistia sen kehossaan tai esimerkiksi esineiden ikkunoiden tai astioiden helinänä asunnossa. Ihminen aistii tärinän hyvin herkästi; yleisimpiä tärinän aiheuttamia haittoja ovat viihtyvyyshaitat, keskittymishäiriöt ja unen häiriintyminen. Elinympäristössä esiintyvälle tärinälle ei ole Suomessa ohjearvoja.

Infraääni voi vahvistua asunnon rakenteiden läpi edetessään ja tällöin asukkaat voivat aistia infraäänien rakenteiden tärinänä ja kokea sen epämiellyttäväksi. Tätä ilmiötä ei kuitenkaan ole toistaiseksi todennettu tuulivoimaloiden läheisyydessä. On myös epätodennäköistä, että seisminen maaperän tärinä tuuli-voima-alueiden läheisyydessä voisi edetä rakenteisiin (Ellenbogen et al., 2012).

Tärinän vaikutukset on kuitenkin julkisuudessa yhdistetty myös tuulivoimameluallistukseen. Portugalilainen tutkimusryhmä on tutkinut 1980-luvulta saakka pitkäaikaista ( $\geq 10$  vuotta) työperäistä altistumista taajuudeltaan alle 500 Hz:n äänelle suurilla ( $>90$  dB) äänenpainetasoilla ja todennut sen voivan aiheuttaa nk. vibroakustisen sairauden (VAD), johon liittyy solujen välisen kollageenin ja elastiinin liikakasvu ilman tulehdusreaktiota ja siitä seuraavia hermoston, hengityselimistön ja sydän- ja verenkiertoelimistön toimintahäiriöitä. Ensimmäisessä vaiheessa (1–4 vuoden altistus) seurauksena on lieviä mielialamuu-toksia, ruoansulatusvaivoja, suu- ja kurkkuihkeitä sekä keuhkoputkentulehduksia, toisessa vaiheessa (4–10 vuoden altistus) seuraa kohtalaisen vakavia oireita kuten rintakipua, selviä mielialanvaihteluita, selkäkipua, uupumusta, sieni-, virus ja loisinfektioita ihossa, vatsan limakalvon tulehtumista, virtsaamis-kipua ja verta virtsassa, silmän sidekalvon tulehduksia ja allergioita ja kolmannessa vaiheessa (yli 10 vuoden altistus) vakavia oireita kuten psykiatrisia häiriöitä, limakalvoverenvuotoja, suonikohjuja ja perä-pukamia, pohjukaissuolen haavaumia, näön heikentymistä, päänsärkyä, pahoja nivel- ja lihaskipuja ja hermoston toimintahäiriöitä (Alves-Pereira & Castelo Branco, 2007). Ryhmä esitti vuonna 2007 lehdistö-tiedotteessaan, että vastaava sairaus voisi selittää myös tuulivoima-alueiden läheisyydessä oireilevien ihmisten oireet. Tuulivoimameluallistuksen suhteen tutkimusryhmä on kuitenkin julkaissut ainoastaan tapauselostuksiin perustuvia konferenssiivitelmiä, eikä yhteydestä ole julkaistu yhtään vertaisarvioi-tua tieteellistä julkaisua. Ryhmä on tutkinut ilmiötä pääasiassa lentomekaanikoilla, jotka altistuvat työs-sään myös tärinälle. Kuvatut fysiologiset muutokset vaativat vuosia kestävästä altistumisesta hyvin suurilla äänenpainetasoilla eikä ole uskottavaa, että ympäristömelussa voisi esiintyä infraääntä vastaavilla ää-nenpainetasoilla kuin työympäristöissä. Lisäksi em. portugalilainen ryhmä on käytännössä ainoa tutki-musryhmä, joka on julkaissut tutkimuksia vibroakustisesta sairaudesta eikä sairauden olemassaoloa ole virallisesti tunnustettu lääketieteessä edes ammattialtistuksen osalta. Onkin arvioitu, että vibroakustisen sairauden saama huomio on perusteetonta ja omiaan levittämään tuulivoimatuotantoon liittyviä pelkoja (Chapman & St George, 2013; Von Gierke & Mohler, 2002).

Yhtenä todisteena tuulivoimaloiden tuottaman infraäänien haitallisuudesta pidetään portugalilaisen oi-keuden määräystä neljän tuuliturbiinin purkamisesta, kun tuulivoima-alueen läheisyydessä asuvan he-vostilallisen perhe valitti unettomuutta, unihäiriöitä, mielialan ailahtelua, uupumusta, päänsärkyä ja yli-herkkyyttä melulle. Kyseinen hevostila oli toinen edellä kuvatun portugalilaisen tutkimusryhmän esimerk-kitapauksista, joiden perusteella he päätyivät esittämään tuulivoimaloiden infraääntä vibroakustisen sai-rauden aiheuttajaksi ja edelleen viboakustista sairautta tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvien oireiden aiheuttajaksi. Lisäksi hevostilan hevosilla oli karioepämuodostumia, jotka yhdistettiin myös infraääni-altistukseen. Mittauksissa infraäänien äänenpainetasot taajuusalueella 6,3–20 Hz jäivät alle 60 dB:n (Alves-Pereira & Castelo Branco, 2014). Purettavaksi määrättyt turbiinit sijaitsivat 322–642 m asuinra-kennuksesta ja 182–566 m hevostallista, joten kysymyksessä on todennäköisesti ollut kuultavan melun aiheuttama ongelma, eikä oikeuden päätöksessä viitata infraääni-altistukseen tai vibroakustiseen sairau-teen.

Tärinän vaikutuksiin liittyen myös ICD-10-tautiluokituksessa olevaa diagnoosiluokkaa T75.2 ”Värähtelyn vaikutus” pidetään toisinaan osoituksena siitä, että tuulivoimaloiden tuottama infraääni aiheuttaa väitetty-jä oireita, koska kyseinen tautiluokitus sisältää alakohdan ”Infraäänien aiheuttama pyörtyys” (Terveysten ja hyvinvoinnin laitos, 2011). Kyseinen diagnoosiluokka on kuitenkin tarkoitettu lähinnä työperäisen altis-tuksen, erityisesti voimakkaan tärinän ja suurella äänenpainetasolla esiintyvän infraäänien vaikutuksiin, eikä sitä ole tarkoitettu sovellettavaksi elinympäristössä esiintyvään infraääneen.

Myös standardia ISO 9996:1996 ”Mechanical vibration and shock - Disturbance to human activity and performance” pidetään toisinaan osoituksena tuulivoimaloiden tuottaman infraäänien haitallisuudesta. Todellisuudessa standardi on tarkoitettu nimensä mukaisesti voimakkaan mekaanisen tärinän ja iskun

aiheuttamien vaikutusten arviointiin tyypillisesti työperäisessä altistuksessa esimerkiksi laivassa tai lentokoneessa, eikä liity tuulivoimaloiden tuottamaan infraääneen (ISO, 1996b).

### 5.1.3 Tuulivoimamelun erityisominaisuudet ja yksilölliset erot kuulokynnyksessä

*Anu Turunen, THL*

Tuulivoimamelun akustisista ominaisuuksista erityisesti lapojen pyörimisliikkeen mukainen äänenvoimakkuuden jaksollinen vaihtelu ja kuuloalueella oleva pientaajuinen ääni ovat todennäköisiä selityksiä sille, että tuulivoimana ääni koetaan usein häiritsevämpänä ja heikommin taustamelun alle peittyvänä kuin muu ympäristömelu (Persson Waye et al., 2003; Pedersen et al., 2008; Lee et al., 2011; Baliatsas et al., 2014). Osa infraäänialtistukseen liitetystä havainnoista voisikin selittyä äänenvoimakkuuden jaksollisella vaihtelulla ja kuulokynnyksen yläpuolella olevalla pientaajuisella äänellä (Jakobsen, 2012), joka tulkitaan virheellisesti infraääneksi. Esimerkiksi tanskalais-ruotsalaisessa tutkimuksessa selvitettiin tapauksia (n=21), joissa henkilö valitti häiritsevästä jyrisevästä äänestä. Noin kolmasosassa tapauksissa kyse oli taajuusalueeltaan 20–180 Hz:n äänestä, eikä yhdessäkään tapauksessa syynä häiriintymiseen ollut alle 20 Hz:n ääni (Pedersen et al., 2008).

On myös esitetty hypoteesi, että kun infraääni stimuloi tärykalvoa ja välikorvan luurakenteita, joissain tapauksissa liike voi olla niin suurta, että niiden mekaaniset ominaisuudet ja äänen välittyminen muuttuu. Tällöin suuremmilla taajuuksilla esiintyy äänenvoimakkuuden jaksollista vaihtelua ja havainnointikynnyks ylittyy (Moller & Pedersen, 2004). Toinen hypoteesi on, että alle 150 Hz:n taajuuksilla useita toisiaan lähellä olevia ääneksi sisältävän äänen yhdistelmällä kuulokynnyks ylittyy pienemmällä äänenpaine-  
tasolla kuin yksittäisellä ääneksellä. Kuulokynnyks voisi ylittyä vaikka kukin yksittäinen äännes olisi yksinään kuulokynnyksen alapuolella. Tämä voisi selittää sen, että osa ihmisistä häiriintyy esimerkiksi tuulivoimalan tuottamasta äänestä, vaikka sen kokonaisäänepainetaso olisi pieni (Ryu et al., 2011).

Lisäksi kuulokynnyksen ylittävän infraäänen kuuloaistimus on sävelkorkeuden häviämisen vuoksi hyvin erilainen (paineen tunne tärykalvolla ja laskettavissa olevat sykäykset) verrattuna suurempiin taajuuksiin, mikä voisi teoriassa selittää ainakin osan raportoiduista korvaoireista. Todennäköisesti tuulivoimala-  
alueiden lähellä olevilla asuinalueilla ei kuitenkaan esiinny infrataajuisia ääntä niin suurilla äänenpaine-  
tasolla, että se olisi aistittavissa.

Infraääneen liittyvissä valituksissa on tyypillistä, että vain osa tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvista kokee oireita. Lisäksi usein oireilu ei näytä olevan suorassa yhteydessä etäisyyteen lähimmästä turbiinista, vaan esimerkiksi kauempana asuva henkilö saattaa oireilla, vaikka joku lähempänä asuva ei olisi havainnut mitään haittoja. Tämä voisi teoriassa selittyä sillä, että ihmisten välillä on suuria eroja aistihavaintojen tarkkuudessa. Yksilöllisen kuulokynnyksen keskihajonta on noin 5 dB ja noin 2,5 %:lla väestöstä pientaajuisen äänen kuulokynnyks on yli 10 dB pienempi kuin keskimäärin. Näin ollen on mahdollista, että ääni, jota toinen henkilö ei kuule lainkaan, on toisen henkilön mielestä erittäin häiritsevää. Lisäksi yksilöllinen kuulokynnyks ei välttämättä ole tasaisesti taajuuksien mukaan etenevä, vaan kuulokynnyks voi vaihdella useita desibelejä sekä ylös- että alaspäin eri taajuuksilla. Lisäksi suurempiin taajuuksien verrattuna infraäänen ja pientaajuisen äänen äänekkyyks kasvaa jyrkemmin äänenpaine-  
tason noustessa, jolloin juuri ja juuri kuultavan ja hyvin äänekkään äänen ero äänenpaine-  
tasossa on hyvin pieni, esimerkiksi 4 Hz:n taajuisella äänellä vain noin 10 dB (Leventhall, 2004; Jakobsen, 2005; Moller & Pedersen, 2011; Persson Waye, 2011). On myös henkilöitä, jotka vaikuttavat olevan äärimmäisen herk-



kiä pientaajuuselle äänelle. Todennäköisin selitys tälle on rakenteellinen poikkeavuus korvassa, kuten epänormaalin pieni aukko simpukan kärjessä (Moller & Pedersen, 2004).

Infraääneen liittyvissä tapausselostuksissa tulee joskus esille herkistyminen infraäänelle jatkuvan pitkäaikaisen altistuksen vuoksi. Erään hypoteesin mukaan aivojen plastisuudesta johtuen voimakas ja pitkäaikainen stimulaatio saattaa tehostaa tiettyjä alueita aivokuorella ja henkilö voi herkistyä voimakkaasti tietyille taajuuksille (Leventhall, 2003). Tästä ei kuitenkaan ole vakuuttavaa tutkimusnäyttöä.

## 5.1.4 Epäspesifinen oireilu

*Anu Turunen, THL*

*Marja Heinonen-Guzejev, Helsingin yliopisto*

### **Negatiiviset odotukset ja virheelliset tulkinnat**

Ihminen on psykofyysinen kokonaisuus ja siksi fyysisiä ja psyykkisiä reaktioita ei useinkaan pysty erottamaan toisistaan. Tämän vuoksi psyykkisten reaktioiden kautta välittyvien vaikutusten ottaminen huomioon myös tuulivoimaloihin liittyvää fyysistä oireilua selvitetessä on välttämätöntä.

Ympäristökäyttäytymisiin voi joskus liittyä kielteisiä odotuksia, jotka voimistavat reaktioita, jolloin kyseessä on ns. nosebovaikutus (Witthoft & Rubin, 2013; Crichton et al., 2014a). Placebovaikutus ja vastakkainen nocebo ovat tavanomaisia ilmiöitä kaikilla elämän osa-alueilla, ja on tunnustettu tosiasia, että esimerkiksi lääketieteessä osa lääkkeiden ja hoitojen parantavasta vaikutuksesta perustuu siihen, että henkilö uskoo lääkkeen tai hoidon auttavan. Vastaavasti usko jonkin asian haitallisuuteen saattaa synnyttää todellisen fyysisen oireen. Esimerkiksi joissakin tapauksissa tuulivoimalan tuottamaan ääneen liitetyt voimakkaat negatiiviset tunteet, huolet ja pelot saattavat johtaa psykosomaattiseen oireiluun (Benedetti et al., 2007; Salminen, 2013). Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänen osalta tämä ilmiö onkin todennettu kokeellisessa asetelmassa (Crichton et al., 2014c). Psykosomaattisen oireilun lisäksi huolet ja pelot voivat johtaa siihen, että henkilö tarkkailee tavanomaista enemmän tuntemuksiaan tai muistikuvat esimerkiksi aiemmasta oireilusta vääristyvät.

Pelkojen syntymisessä tiedotusvälineillä ja kanssaihminen kokemuksilla on merkittävä rooli. Esimerkiksi Australiassa on arvioitu tuulivoimaloihin liittyvien valitusten määrän, tuulivoimatuotantoon liittyvän uutisoinnin ja aktivistitoiminnan ajallista ja paikallista jakaantumista ja todettu, että tuulivoimaa vastustavien järjestöjen aktiivinen tiedostustoiminta on myötävaikuttanut valitusten lisääntymiseen (Chapman et al., 2013; Rubin et al., 2014; Chapman et al., 2014). On myös tavallista, että moderniin tekniikkaan liitetään perusteettomasti uhkia (Rubin et al., 2014; Baliatsas et al., 2015). Esimerkiksi ensimmäisten puhelimiin ja näyttöjen sekä radiotekniikan pelättiin aikanaan aiheuttavan terveyshaittoja. Moderniin tekniikkaan liittyvien terveyshuolien onkin osoitettu olevan yhteydessä yleisluonteisten oireiden yleisyyteen ja keskeiseen, oireiluun liittyvään terveyspalvelujen käyttöön, vaihtoehtoisten hoitojen käyttöön sekä huonompaan unen ja elämänlaatuun (Baliatsas et al., 2015).

Tuulivoimaloiden läheisyydessä raportoituja oireita esiintyy väestössä hyvin yleisesti stressin ja erilaisen sairaustilojen yhteydessä. Jos lääketieteellistä sairautta ei ole syystä tai toisesta diagnosoitu, on mahdollista, että henkilö yhdistää oireet perusteettomasti elinympäristössä olevaan altisteeseen (Pedersen et al., 2008; Rubin et al., 2014). Esimerkiksi tinnitus saatetaan tulkita virheellisesti ympäristöaltisteeseen, esimerkiksi infraäänen aiheuttamaksi. Tanskalais-ruotsalaisen kokeellisen tutkimuksen (n=21)

mukaan lähes kolmannes henkilöistä, jotka ilmoittivat kärsivänsä tuulivoiman tuottamasta pientaajuista melusta kärsivät todellisuudessa pientaajuudesta tinnituksesta, joka ei liittynyt tuulivoimameluun (Pedersen et al., 2008).

### **Ympäristöherkkyys**

Hyvin monimuotoisia yleisoireita raportoidaan monien ympäristöaltisteiden yhteydessä ja onkin alettu puhua ympäristöherkyydestä yleiskäsitteenä erilaisille herkkyyksille. Termiä ympäristöherkkyys (Idiopathic Environmental Intolerance, IEI) on käytetty WHO:n suosituksesta vuodesta 1996 alkaen samankaltaisista ympäristöön liittyvistä oirekuvista. Ympäristöherkkydeksi kutsutaan tilaa, jossa ihminen saa terveyttä haittaavia oireita tietyssä työ- tai elinympäristössä, vaikka sama ympäristö ei aiheuta oireita valtaosalle muita ihmisiä. Ympäristöherkkyys on lisätty ICD-10-tautiluokitukseen nimikkeellä R68.81: Jatkuva tai toistuva poikkeuksellinen herkkyys ympäristön tavanomaisille tekijöille. Se voi liittyä mihin tahansa ympäristötekijään, kuten hajuihin (tuoksuyliherkkyys), kemikaaleihin (mm. monikemikaaliherkkyys, Multiple Chemical Sensitivity, MCS), sähköön (sähköherkkyys, Electromagnetic Hypersensitivity, EHS; Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to EMF, IEI-EMF), sisäilmaan (Sick Building Syndrome, SBS) ja ääniin (äärimmäinen meluherkkyys).

Tyypillisesti oireilu liittyy aluksi yhteen ympäristötekijään ja laajenee myöhemmin reagoimiseksi yhä useammalle tekijälle (Labarge & McCaffrey, 2000; Hetherington & Battershill, 2013; Dantoft et al., 2015). Sisäilmalle reagoivilla voi olla samanaikaisesti monikemikaali-, ääni- tai sähköherkkyys (Edvardsson et al., 2008; Palmquist et al., 2014; Baliatsas et al., 2016b;). Hajuherkkyttä esiintyy myös ääni- ja sähköherkkydessä (Nordin et al., 2014).

Ympäristöherkkyydelle on ominaista useisiin eri elinjärjestelmiin liittyvä oireilu. Tavallisimmin mukana ovat neurologiset oireet, kuten huimaus, keskittymisvaikeudet ja uupumus, tai oireet tuki- ja liikuntaelimestössä, ruoansulatuskanavassa, iholla, kuulossa, limakalvoilla/hengitysteissä tai sydän- ja verenkiertoelimestössä. Tietyissä ympäristöissä ilmenevät toistuvat oireet vähenevät tai loppuvat, kun ympäristöstä poistetaan tekijä, joka liittyy potilaan kokemiin oireisiin. Tila on krooninen (kestää vähintään 6 kk) ja aiheuttaa huomattavia rajoituksia elämään tai toimintakyvyn häiriöitä, esim. kykenemättömyys käydä töissä ja elämänpiirin kaventuminen (Baliatsas, 2015).

Ympäristöherkkyys ei tarkoita ympäristötekijöiden aiheuttamia suoria elinvaikutuksia, vaan oireisto selittyy todennäköisesti elimistön puolustusjärjestelmien vasteilla keskushermostossa, tahdosta riippumattomassa hermostossa ja immunologisessa järjestelmässä (Hofmann et al., 2012). Esimerkiksi sähköherkkyden on esitetty aiheuttavan yleisoireita kuten päänsärkyä, uupumusta, pahoinvointia ja unihäiriötä, mutta tuoreessa väitöskirjatutkimuksessa ei nähty yhteyttä sähkömagneettisille kentille altistumisen ja oireilun välillä, kun taas koettu altistuminen oli yhteydessä oireiluun (Baliatsas, 2015). Hermoston suojajärjestelmät ovat automaattisia, tiedostamattomia, tahdosta riippumattomia ja hyvin mukautuvia. Koettu uhka tai sen ennakointi käynnistävät välittömät fysiologiset stressimekanismit ja stressireaktiot välittyvät laajalle elimistöön aivolisäke-hypotalamus-lisämunuaisakselin säätelemien stressihormonien ja autonomisen hermoston kautta (van Ravenzwaaij et al., 2010; Tak & Rosmalen, 2010; Hofmann et al., 2012; Sainio & Karvala, 2017). Ehdollistumisen, jossa syntyy yhteys tietyn ärsykkeen ja uhkan tai vaaran merkityksen välille, on katsottu selittävän oireiluerkkyttä (Otto & Giardino, 2001; Van den Bergh et al., 2001; Sainio & Karvala, 2017;).

Ympäristöherkkien keskushermosto reagoi herkästi uhkaaviin signaaleihin (Tran et al., 2013; Yunus, 2015). Jatkuva ympäristön tarkkailu ja varuillaanolo ilmenevät poikkeavana aktiivisuutena aivokuorena-

laisissa verkostoissa (mantelitimake, hippokampus ja insulan kuorikerros) ja fysiologisten stressimekanismien herkkänä käynnistymisenä (Hofmann et al., 2012). Stressimekanismien käynnistyminen uhkaaviksi koettujen ympäristötekijöiden läsnä ollessa selittää toiminnallisia oireita. Ympäristöherkät kiinnittävät verrokkeja enemmän huomiota altistesanoihin ja arvioivat niitä verrokkeja kielteisemmin (Witthoft et al., 2009). He myös huomioivat ja tarkkailevat epämiellyttäviä kehon tuntemuksia enemmän kuin terveet verrokkit sekä muistavat paremmin oireita laukaisevat tuntemukset (Witthoft et al., 2006, 2009; Andersson et al., 2013).

## 5.2 Infraäänen terveys- ja hyvinvointivaikutukset

*Sami Kännälä, STUK*

*Tim Toivo, STUK*

*Tommi Toivonen, STUK*

Infraäänen terveys- ja hyvinvointivaikutuksia on selvitetty kokeellisten ihmistutkimusten sekä koe-eläin- ja solututkimusten avulla. Kokeellisten ihmistutkimusten avulla on tarkasteltu infraäänen häiritsevyyttä, vaikutuksia aivotoimintaan, kognitiivisiin toimintoihin, kuuloon ja vestibulaariseen eli tasapainojärjestelmään, sydämeen ja verenkiertoelimistöön sekä uneen ja valvetilaan. Koe-eläintutkimuksilla on pyritty selvittämään infraäänen vaikutuksia kuuloon ja vestibulaarijärjestelmään, kognitiivisiin toimintoihin, sydämeen ja verenkiertoelimistöön, aivojen toimintaan ja vatsan limakalvoihin. Lisäksi solututkimuksilla on selvitetty muun muassa muutoksia apoptoosissa eli ohjelmoidussa solukuolemassa ja erilaisten proteiinien ja entsyymien ilmentymistä.

### 5.2.1 Havainnoivat ja kokeelliset ihmistutkimukset

Infraäänen terveys- ja hyvinvointivaikutuksia selvittäviä havainnoivia tutkimuksia ei löytynyt.

Kokeellisia ihmistutkimuksia on tehty 1970-luvulta lähtien ja niillä on pyritty selvittämään muun muassa infraäänen häiritsevyyttä ja vaikutuksia eri elintoimintoihin. Vertaisarvioitujen kokeellisten ihmistutkimusten päätulokset on koottu taulukkoon 10.

#### **Häiritsevyyys**

Infraäänen häiritsevyyttä on tarkasteltu vain yhdessä vertaisarvioidussa tutkimuksessa altistamalla koehenkilöitä infraäänelle ja pyytämällä heitä arvioimaan äänen häiritsevyyttä graafisella skaalalla (Andresen & Moller, 1984). Tutkimuksessa tarkasteltiin infraäänen (4, 8 ja 16 Hz) ja pientaajuisen äänen häiritsevyyttä 18 erilaisen äänialtistuksen avulla. Infraäänien äänenpainetasot olivat välillä 95–124 dB. Kukin altistus kesti 15 minuuttia. Tutkimuksessa havaittiin, että pienillä taajuuksilla äänenpaineen tulee olla suurempi, jotta ääni koetaan häiritseväksi. Jo pienellä äänenpainetaso muutoksella oli suhteellisen paljon vaikutusta häiritsevyyteen.

#### **Vaikutukset aivotoimintaan**

Infraäänen vaikutuksia koehenkilöiden aivotoimintaan on tarkasteltu vain muutamassa tutkimuksessa. Dommes ym. pyrkivät selvittämään pientaajuisen ja infraäänen vaikutuksia kuuloaivokuoreen funktionaalisen magneettikuvauksen (Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI) avulla (Dommes et al.,

2009). Koehenkilöinä tutkimuksessa oli 17 tervettä oikeakätistä naista, joiden keski-ikä oli 40 vuotta (keskihajonta 16 vuotta). Koehenkilöitä altistettiin lyhyille äänipurskeille, joiden taajuus ja äänenpainetaso olivat 12 Hz/120 dB, 12 Hz/110 dB, 12 Hz/90 dB, 36 Hz/70 dB, 48 Hz/100 dB, 500 Hz/105 dB. Kaikki tarkasteltavat äänenpainetasot olivat vähintään 30 dB taustamelun yläpuolella. Tutkimuksessa havaittiin kuuloaivokuoren aktivaatiota äänenpainetasosta riippuen. Altistustasolla 12 Hz/110 dB havaittiin aivojen ohimolohkossa sijaitsevan poimun (Superior Temporal Gyrus, STG) aktivaatiota molemmilla puolilla aivoja. Aktivaatiota ei havaittu, kun altistustaso oli kuulokynnyksen alapuolella (12 Hz/90 dB).

Myös Weichenberger ym. tarkastelivat infraäänien vaikutuksia aivojen aktivaatioon fMRI:n avulla (Weichenberger et al., 2017). Koehenkilöitä (n=14) altistettiin 12 Hz:n taajuiselle infraäänelle äänenpainetasolla, joka oli 2 dB yksilöllisen kuulokynnyksen alapuolella (79–96,5 dB) ja kuulokynnyksen yläpuolisella tasolla, jonka äänekkyys koettiin keskimääräiseksi (111–124 dB). Tutkimuksessa havaittiin kohonnutta paikallista kytkennällisyyttä aivojen oikealla puolella ohimolohkon poimussa (STG) ja mantelitumakkeessa sekä anteriorisessa pihtipoimussa (Anterior Cingulate Cortex, ACC), kun kuulokynnystä lähellä olevaa altistumista verrattiin kuulokynnyksen yläpuoliseen altistumiseen ja ei-altistumiseen. Kyseessä on tekijöiden mukaan ensimmäinen tutkimus, jossa havaitaan kuulokynnystä lähellä olevan infraäänien vaikuttavan aivoalueisiin, jotka ovat tärkeitä kuulotiedon prosessoinnille sekä tunteiden ja autonomisten toimintojen kontrolloinnille. Tekijät arvioivat, että aivoalueiden aktivoituminen lähellä kuulokynnystä voi kuvastaa kehon stressireaktion syntyä, joka saattaisi edistää oireiden syntyä, kun altistuminen jatkuu pitkään ja muut riskitekijät, kuten meluherkkyys ja negatiiviset odotukset, vaikuttavat tilanteeseen. Tulosten vahvistamiseksi tarvitaan kuitenkin lisätutkimusta. Erityisen tärkeää olisi tarkastella pitkäaikaisen altistumisen vaikutuksia.

Kasprzak tarkasteli infraäänien vaikutuksia aivojen alfa-aaltoihin altistamalla 33 koehenkilöä 7 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 120 dB (Kasprzak, 2012). Altistuksen aikana seurattiin alfa-aaltoja EEG-mittauksen (elektroenkefalografia) avulla. Infraäänialtistus alensi alfarytmin tehoa.

### ***Vaikutukset kognitiivisiin toimintoihin***

Infraäänien vaikutuksia kognitiivisiin toimintoihin alettiin tarkastella 1970-luvulla. Tutkimusalue sai alkunsa lentomelun haitallisiin vaikutuksiin kohdistuneesta huolesta. Slarve ja Johnson pyrkivät selvittämään infraäänien vaikutuksia kognitiivisiin toimintoihin altistamalla neljää koehenkilöä lyhyille (<8 min) sinimuotoisille 120 Hz äänipurskeille äänenpainetasolla 144 dB (Slarve & Johnson, 1975). Koehenkilöiden sydämen sykettä ja hengitystiheyttä monitoroitiin altistusten aikana. Koehenkilöiltä kysyttiin silloin tällöin yksinkertaisia kysymyksiä ja heitä pyydettiin suorittamaan yksinkertaisia tehtäviä (kuten laulu tai hengityksen pidätys). Kuulokynnyksissä ei havaittu muutoksia. Koehenkilöt kokivat paineen tunnetta korvissa kaikilla käytetyillä taajuuksilla. Lisäksi he tunsivat rintakehän tärinää. Tutkimuksessa havaittiin psykofysiologisia muutoksia kuten alentunutta toimintakykyä, keskittymisvaikeuksia, uneliaisuutta ja ajan kaventumisen tunnetta, mutta näiden merkittävyyttä tekijät eivät osanneet arvioida. Sykkeessä ja hengityksessä ei havaittu muutoksia.

Kyriakides ja Leventhall selvittivät infraäänien, kuultavan äänen ja alkoholin vaikutuksia visuomotoriikkaan ja reaktioaikaan (Kyriakides & Leventhall, 1977). Miespuolisia koehenkilöitä (n=32) altistettiin 2–15 Hz:n infraäänelle Z-äänitasolla 115 dB 40 minuutin ajan. Tutkimuksen mukaan infraäänellä ei ollut vaikutusta visuomotoriikkaan tai reaktioaikaan liittyvien tehtävien suorittamiseen.

Harris ja Johnson altistivat 40 normaalikuuloista koehenkilöä lyhyille sinimuotoisille 7 Hz:n äänipurskeille erilaisilla äänenpainetasoilla (Harris & Johnson, 1978). Koehenkilöt suorittivat erilaisia kognitiivista toi-

mintakykyä arvioivia testejä (complex counting task, serial search task). Saadut tulokset eivät tukeneet väitettä siitä, että infraääni vaikuttaisi negatiivisesti kognitiivisiin toimintoihin. Osa koehenkilöistä raportoi, että eräässä kokeessa 142 dB:n infraääni oli häiritsevää, koska he tunsivat tärinää, painetta korvassa ja ongelmia keskittymisessä. Tutkimuksen tekijät arvioivat, että äänenpainetaso tulisi olla lähellä kuulon heikkenemisrajaa (yli 150 dB), jotta altistuksella olisi negatiivisia vaikutuksia.

Weichenberger ym. pyrkivät selvittämään infraäänien vaikutuksia kognitiivisiin toimintoihin fMRI:n avulla (Weichenberger et al., 2015). Koehenkilöitä (n=13) altistettiin lyhyille sinimuotoisille 12 Hz:n äänipurskeille. Ääni johdettiin suoraan koehenkilöiden korviin. Äänenpainetaso valittiin siten, että kukin koehenkilö aisti äänen yhtä äänekkäänä (keskiarvo 115 dB, max. 124 dB, min 111 dB). Tulosten perusteella infraääni ei vaikuta negatiivisesti kognitiivisiin toimintoihin. Yllättäen fMRI:lla saatiin tulos, että infraääni voisi jopa parantaa työmuistin toimintaa. Tekijöiden mukaan tarvitaan lisätutkimusta pitkäaikaisen altistuksen osalta.

### ***Vaikutukset kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään***

Infraäänien vaikutuksia ihmisen kuuloon ja vestibulaarisen järjestelmän toimintaan on selvitetty useissa tutkimuksissa jo 1960-luvulta lähtien. Tutkimuksilla on pääasiassa pyritty selvittämään minkä tasoiset signaalit aiheuttavat vaikutuksia ihmisen kuuloelimiin ja millä tasolla ihmisen toiminta häiriintyy.

Mohr ym. altistivat viiden koehenkilön koko kehoa useille eritaajuisille äänille (1–100 Hz) suurella tehotasolla (max. 154 dB) kahden minuutin ajan (Mohr et al., 1965). Heidän tarkoituksenaan oli selvittää miten avaruusaluksessa voi toimia. Henkilöille tehtiin monia erityyppisiä toimintakyvyn ja fysiologisen vasteen testejä. Tärkeimmät havaitut vasteet eivät liittyneet kuuloon (mm. rintakehän tärinä, oksetuksen tunne, hengityksen rytminmuutos).

Takigawa ym. altistivat terveitä koehenkilöitä (n=25 silmänliiketutkimukset, n=34 kehon heilumistutkimukset ja n=9 pulssi-aaltotutkimukset) ja tutkivat vaikuttaako infraääni ihmisen vestibulaarisen järjestelmän toimintaan (Tagikawa et al., 1991). Altistus oli kahdentyyppistä: laajakaistainen ääni taajuuksilla 100–10 000 Hz, A-äänitasolla 75 ja 95 dB ja kapeakaistainen infraääni taajuuksilla 3–7 Hz, Z-äänitasolla 95 dB. Silmien ollessa kiinni infraäänialtistus vaikutti kaikkiin tutkittuihin parametreihin (mm. tahaton silmien liike lisääntyi), joten infraääni vaikuttaa vestibulaarisen järjestelmän kautta.

Hensel ym. pyrkivät selvittämään infraäänellä ja pientaajuisilla äänillä mahdollisia vaikutuseroja ihmisen kuulosimpukan toiminnassa (Hensel et al., 2007). Tutkimuksessa altistettiin 12 koehenkilöä 6, 12, 24 ja 50 Hz:n äänille ja mitattiin särösyntyisen otoakustisen emission (Distortion Product Otoacoustic Emission, DPOAE) vasteita. Äänenpainetaso oli 6 Hz:n taajuudella 130 dB. Muilla taajuuksilla taso valittiin henkilökohtaisesti. Laitteistolla pystyttiin 80–130 dB tasoon 1 dB:n askelin. Tulokset osoittavat selvästi, että infraääni etenee sisäkorvaan ja voi muuttaa kuulosimpukan prosessointia. Vaikutus löytyi 130 dB:n äänenpainetasolla 6 Hz:n taajuudella ja taso madaltui taajuuden kasvaessa. Tuloksia on verrattu myös hyvin kuulokynnystasoon yli 20 Hz:n taajuuksilla (ISO, 2003a) ja infraäänellä (Moller & Pedersen, 2004).

Todd ym. pyrkivät selvittämään ihmisen vestibulaarisen järjestelmän herkkyyttä pientaajuiselle tärinälle (Todd et al., 2008). Neljää tervettä koehenkilöä ja kontrollina 70-vuotiasta vestibulaaripotilasta altistettiin lyhyelle (viisi aaltoa) sinimuotoiselle kiihtyvyydelle taajuuksilla 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 Hz. Henkilöiden vestibulo-okulaarista refleksiä (VOR) tutkittiin pään kiihtyvyyteen nähden. Kiihtyvyys aiheutettiin mekaanisella järjestelyllä. Silmän ympäriltä mitattiin VEMP-vasteita (Vestibular Evoked Myogenic Potential), jotka liittyvät vestibulaariseen järjestelmään kuulosimpukan sijaan. Tuloksina VEMP-vasteet näkyi-

vät parhaiten 100 Hz:n taajuudella ja ne suodattuvat kaistanpäästösuodattimen tavoin 25 ja 200 Hz:n rajataajuuksilla. Tulokset osoittavat, että ihminen omaa sammakon (ja kalan) kaltaisen vestibulaarisen tuntomekanismin, joka huomaa pientaajuisten värinän kuulosimpukkaa alemmilla tasoilla.

Jerger ym. havaitsivat, että 2–12 Hz:n infraäänelle altistuminen (119–144 dB, 3 min ajan) aiheutti tilapäisen kuulokynnyksen laskun (10–22 dB taajuuksilla 3–8 kHz) 11 koehenkilöllä (yhteensä 19 henkilöä) (Jerger et al., 1966). Kuulokynnyksen lasku kesti muutaman tunnin.

Evans ja Tempest tarkastelivat moottoritienopeutta ajavan auton synnyttämien infraäänien vaikutusta vestibulaariseen järjestelmään (Evans & Tempest, 1972). Koehenkilöitä altistettiin 2–10 Hz infraäänelle äänenpainetasoilla 120–150 dB. Silmävärvettä (nystagmus) havaittiin 30 %:lla koehenkilöistä 60 sekunnin kuluttua 120 dB altistumisen aloittamisesta. Taajuudeltaan 7 Hz:n infraääni aiheutti nystagmusta tehokkaimmin. Suurilla äänenpainetasoilla nystagmus havaittiin nopeammin. Koehenkilöt eivät kokeneet oloaan epämukavaksi millään altistustasolla.

### ***Vaikutukset sydämeen ja verenkiertoelimistöön***

Infraäänien vaikutuksia sydämeen ja verenkiertoelimistöön on tarkasteltu useissa tutkimuksissa 1970-luvulta lähtien. Suuri osa tutkimuksista on raportteja, joita ei ole vertaisarvioitu. Infraäänien vaikutuksia on selvitetty muun muassa seuraamalla sydämen sykkeen ja verenpaineen muutoksia.

Karpova ym. altistivat työntekijöitä simuloidulle teollisuusympäristön infraäänelle taajuuksilla 5 ja 10 Hz (Karpova et al., 1970). Altistukset kestivät 15 minuuttia ja äänenpainetasot olivat 100 ja 135 dB. Koehenkilöt raportoivat väsymystä, apatiaa, depressiota, paineen tunnetta korvissa, keskittymiskyvyn häviämistä, uneliaisuutta ja sisäelinten värinää. Lisäksi havaittiin vaikutuksia keskushermostoon, sydämeen ja verenkiertoelimistöön ja hengityselimistöön. Julkaisun vertaisarvioinnista ei ole tietoa.

Lidström ym. altistivat lentäjiä (n=40) 14 ja 16 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 125 dB (Lidstrom, 1978). Koehenkilöiden diastolinen verenpaine nousi ja systolinen verenpaine laski altistuksen seurauksena. Tutkimustulokset on julkaistu raportissa, jota ei ole vertaisarvioitu.

Danielsson ja Landström altistivat koehenkilöinä olleita 20 tervettä miestä 6, 12 ja 16 Hz:n taajuiselle infraäänelle Z-äänitasoilla 95, 110 ja 125 dB (Danielsson & Landstrom, 1985). Diastolinen verenpaine nousi ja systolinen verenpaine laski altistuksen myötä. Sydämen sykkeessä ei havaittu muutoksia.

Martinik ja Opltová tarkastelivat infraäänien (8–12,5 Hz), valkoisen kohinan (4–1 000 Hz) ja puhtaiden äänien (125–500 Hz) vaikutuksia sydämeen ja verenkiertoelimistöön (Martinik & Opltova, 1986). Infraäänien osalta altistukset tehtiin äänenpainetasolla 80–100 dB ja ne kestivät 180 minuuttia. Infraääni aiheutti suurimman muutoksen sydämen sykkeeseen. Tutkimustuloksille ei kuitenkaan ole tehty minkäänlaista tilastollista analyysia, joten niiden tilastollisesta merkitsevyydestä ei ole tietoa. Julkaisun vertaisarvioinnista ei ole tietoa.

Strandberg ym. altistivat 11 koehenkilöä tunnin ajan 16 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 125 dB (Strandberg et al., 1986). Koehenkilöiden diastolinen verenpaine kasvoi, systolinen verenpaine laski ja syke kohosi. Tutkimustulokset on julkaistu raportissa, jota ei ole vertaisarvioitu.

Kasprzak tarkasteli infraäänien vaikutusta sydämeen ja verenkiertoelimistön toimintaan (Kasprzak, 2010). Koehenkilöitä altistettiin 20 minuutin ajan 7 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 120 dB. Altistus pienensi sydämen sykettä. Lisäksi diastolinen verenpaine kohosi ja systolinen pieneni, mutta muutokset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

### ***Vaikutukset uneen ja valvetilaan***

Ruotsalainen tutkimusryhmä on selvittänyt useilla laboratoriotutkimuksilla infraäänien vaikutuksia uneen ja valvetilaan (Landström et al., 1982, 1983, 1985, 1991; Landström & Byström, 1984). Varhaisimmassa tutkimuksessa (Landström et al., 1982) altistettiin koehenkilöinä olevia miehiä Z-äänitasolla 125 dB 20 minuutin ajan 6, 12 ja 16 Hz:n infraäänelle tai ajoittaiselle, satunnaistetuin välein toistetulle 16 Hz:n infraäänelle. Koehenkilöiden valvetilaa monitoroitiin EEG:n avulla. Ajoittainen 16 Hz:n infraääni kasvatti theta-aktiivisuutta eli valvetila heikkeni. Yksittäisissä havainnoissa oli kuitenkin paljon vaihtelua. Lisäksi havaittiin, että ajoittainen 16 Hz:n infraääni pienensi sydämen sykettä sekä systolista ja diastolista verenpainetta.

Samainen tutkimusryhmä altisti kymmentä kuuroa ja kymmentä kuulevaa koehenkilöä 6 Hz:n infraäänelle 20 minuutin ajan Z-äänitasolla 115 dB (Landström et al., 1983). Altistus heikensi kuulevien koehenkilöiden valvetilaa, mutta sillä ei ollut vaikutusta kuurojen valvetilaan. Tulosten perusteella valvetilan muutokset johtuvat sisäkorvan stimulaatiosta.

Landström ja Byström altistivat koehenkilöitä 15 minuutin ajan 6 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 95 tai 115 dB ja 16 Hz:n taajuudella tasolla 80 tai 100 dB (Landström & Byström, 1984). Altistustasot olivat 10 dB kuulokynnyksen ylä- ja alapuolella. Koehenkilöiden valvetila heikkeni, kun altistus oli kuulokynnyksen yläpuolella. Kuulokynnyksen alapuolella ei havaittu vaikutuksia. Tutkimuksen johtopäätös oli, että infraäänien tulee olla kuultavissa, jotta se voisi heikentää valvetilaa.

Landström ym. tallensivat kuuden koehenkilön aivosähkökäyrän (EEG) ja altistivat koehenkilöitä aivosähkökäyrän spektriä vastaavalle infraäänelle (Landström et al., 1985). Muutoksia koehenkilöiden aivosähkökäyrässä tarkasteltiin 15 minuuttia kestäneen altistuksen aikana. EEG-muutokset olivat vaihtelevia, eivätkä ne olleet tilastollisesti merkitseviä.

Landström ym. altistivat koehenkilöitä laajakaistaiselle ilmastoinnin melulle, tonaaliselle melulle (ilmastoinnin melu ja 100 Hz:n äänisignaali) ja tonaaliselle melulle, johon on lisätty vaaleanpunaista kohinaa (50–200 Hz) (Landström et al., 1991). Ilmastoinnin melu ja tonaalinen melu eivät vaikuttaneet kuvantuntustehtävistä suoriutumiseen. Vaaleanpunaisen kohinan lisääminen tonaaliseen meluun paransi tehtävistä suoriutumista ja valvetilaa.

Japanilainen tutkimusryhmä on tarkastellut kahdessa tutkimuksessa infra- ja pientaajuisten melun vaikutuksia uneen (Inaba & Okada, 1988; Okada & Inaba, 1990). Ensimmäisessä tutkimuksessa altistettiin koehenkilöinä toimineita terveitä opiskelijoita unen aikana 10, 20, 40 ja 63 Hz:n äänelle monitoroiden samalla heidän aivosähkökäyräänsä (Inaba & Okada, 1988). Vaikutuksia arvioitiin reaktioasteen ja unirytmien muutosten avulla. Reaktioaste oli suurinta univaiheessa 1 ja vähäisintä univaiheissa 3 ja 4. Alle 85 dB:n äänenpainetasoilla ei havaittu muutoksia reaktioasteessa. Yli 85 dB:n äänenpainetasoilla reaktioaste oli taajuuksilla 40 ja 63 Hz suurempi kuin taajuuksilla 10 ja 20 Hz. Infraäänialtistuksilla ei ollut vaikutusta unirytmiiin. Tulosten perusteella äänen vaikutus uneen on sitä suurempi mitä suurempi taajuus on.

Toisessa japanilaisten tutkimuksessa jaettiin 18 tervettä miesopiskelijaa kolmeen ryhmään, joista ensimmäistä altistettiin infra- ja pientaajuiselle äänelle, toista käytettiin ensimmäisen ryhmän tulosten varmistamiseksi ja kolmatta altistettiin syntetisoidulle liikennemelulle (Okada & Inaba, 1990). Ensimmäisen ja toisen ryhmän koehenkilöitä altistettiin unen aikana erilaisille äänenpainetasoille taajuuksilla 10, 20, 40 ja 63 Hz. Taajuuksilla 10 ja 20 Hz äänenpainetasot vaihtelivat välillä 60–105 dB. Altistuksessa käytetyt äänet olivat puhtaita ääniä (sinimuotoisia). Altistus kesti 30 sekuntia kunkin 20 minuutin jakson aikana. Kolmannen ryhmän koehenkilöitä altistettiin unen aikana liikennemelulle, jonka taajuus vaihteli välillä 25–1 600 Hz ja äänenpainetaso oli 40, 50 tai 60 dB ( $L_{50}$ ). Altistus kesti 30 sekuntia kunkin 20 minuutin jakson aikana. Infra- ja pientaajuisten äänien vaikutuksia uneen tarkasteltiin polysomnografian avulla, jolla monitoroitiin aivosähkökäyrää (EEG), silmän verkkokalvon lepopotentiaalia (elektro-okulografia, EOG), leuan lihasten aktivaatiota (elektromyografia, EMG) ja sydänsähkökäyrää (elektrokardiografia, EKG). Infraäänillä ei ollut vaikutusta unirytmiiin. Tulosten perusteella liikennemelulla oli enemmän vaikutusta uneen kuin infra- tai pientaajuisella äänellä. Koehenkilöiden reaktioaste oli suurempi 20 Hz:n taajuudella kuin 10 Hz:n taajuudella. Infra- ja pientaajuinen ääni vaikuttivat uneen sitä enemmän mitä kevyemmässä unen vaiheessa koehenkilö oli.



**Taulukko 10.** Vertaisarvioituissa lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset infraäänen vaikutuksista koehenkilöihin.

Viite, lehti	Koehenkilöt	Allistite, vaste	Päätulos	Huomiot
<b>Häiritsevyys</b>				
Andresen & Moller. 1984 J Low Freq Noise V A	18 henkilöä (3 naista), 18–25- vuotiaita	18 äänialistetta (pientaajuinen ääni ja infraääni) Infraäänialueen allistheet: 4 Hz / 120 ja 124 dB 8 Hz / 109, 114, 119 ja 124 dB 16 Hz / 95, 102, 109 ja 116 dB Kukin allistus kesti 15 min	Pienillä taajuuksilla äänenpaineen tuli olla suurempi, jotta ääni koettiin häiritseväksi.	
<b>Aivo toiminta</b>				
Weichenberger et al. 2017 PloS One	14 henkilöä (6 naista), keski-ikä 23,4 vuotta	Kolme allistustasoa: Ei allistusta 12 Hz / taso 2 dB yksilöllisen kuulokynnyksen alapuolella (79– 96,5 dB ) 12 Hz / taso yksilöllisen kuulokyn- nyksen yläpuolella keskimääräisel- lä äänekkyydellä (111–124 dB) Funktionaalinen MRI (fMRI)	Aivojen oikean puolen ohimolohkon paimun (STG, superior temporal gyrus), manteliumakkeen ja anteriorisen pihhi- paimun (ACC, anterior cingulate cortex) paikallinen kytken- näällisyys kohosivat, kun lähellä kuulokynnyksiä olevaa allistumista verrattiin kuulokynnyksen yläpuoliseen allistu- miseen ja ei-allistumiseen. Aktivoituneet aivoalueet liittyvät kuuloaistion prosessointiin sekä tunteiden ja autonomisten toimintojen kontrollointiin.	
Kasprzak 2012 Acta Phys Pol A	33 henkilöä	7 Hz / 120 dB Allistus kesti 20 min EEG-mittaus	Allistus alensi alfarytmin tehoa.	

Dommes et al. 2009 Brain Res	17 henkilöä (oikeakätisiä naisia), keski-ikä 40 vuotta	<p>Lyhyet äänipurskeet: 12 Hz / 120 dB, 110 dB, 90 dB 36 Hz / 70 dB 48 Hz / 100 dB 500 Hz / 105 dB</p> <p>Kuuloaivokuoren aktivoitumista tarkasteltiin funktionaalisen magneettikuvauksen (fMRI) avulla.</p>	<p>Alitustasolla 12 Hz / 110 dB havaittiin aivojen ohimolohkossa sijaitsevan paimun (STG) aktivaatiota molemmilla puolilla aivoja. Aktivaatiota ei havaittu, kun alitustaso oli kuulokynnyksen alapuolella (12 Hz / 90 dB).</p>	
<b>Kognitiiviset toiminnot</b>				
Weichenberger et al. 2015 Hear Res	13 henkilöä (7 naista), keski-ikä 23,7 vuotta	<p>Lyhyet sinimuotoiset 12 Hz äänipurskeet</p> <p>Äänenpainetaso valittiin siten, että kukin koehenkilö aisti äänen yhtä voimakkaana (keskiarvo 115 dB, max. 124 dB, min 111 dB).</p> <p>Aivojen funktionaalinen magneettikuvaus (fMRI)</p>	<p>Alitustus ei vaikuttanut kognitiivisiin toimintoihin negatiivisesti.</p> <p>fMRI:lla saatiin yllättäen tulos, että infraääni voisi jopa parantaa työmuistin toimintaa.</p>	
Harris & Johnson 1978 Aviat Space Env Med	40 henkilöä (8 naista), 19–24-vuotiaita	<p>Lyhyet sinimuotoiset 7 Hz äänipurskeet</p> <p>Koe 1: Serial Search Task (SST) alitisteilla 65 dB ambient noise, 110 dB taustamelu, 7 Hz / 125 dB ja 110 dB taustamelu + 7 Hz / 125 dB</p> <p>Koe 2: Complex counting task (CCT) samolla alitisteilla</p> <p>Koe 3: CCT alitisteilla 110 dB taustamelu, 110 dB taustamelu + 7 Hz / 125 dB, 110 dB taustamelu + 7 Hz / 132 dB ja 110 dB taustamelu + 7 Hz / 142 dB</p>	<p>Infraääni ei vaikuttanut kognitiivisiin toimintoihin negatiivisesti.</p> <p>Kokeessa 3 kuusi koehenkilöä koki paineen tunnetta korvissa kaikilla käytetyillä taajuuksilla äänenpainetasolla 142 dB. Lisäksi he tunsivat rintakehän lärmää ja ongelmia keskittymisessä.</p> <p>Sykkeessä ja hengityksessä ei havaittu muutoksia.</p>	
Kyriakides & Leventhall 1977 J Sound Vib	32 henkilöä (miehiä), 19–25-vuotiaita	<p>Infraääni 2–15 Hz / Z-äänitaso 115 dB</p> <p>Ääni 40 Hz–16 kHz / A-äänitaso 90 dB</p> <p>Alkoholi</p>	<p>Infraäänellä ei ollut vaikutusta visuumotoriikkaan tai reaktioaikaan liittyvien tehtävien suorittamiseen.</p> <p>Infraääni ei vaikuttanut kuulokynnykseen.</p>	

Slarve & Johnson 1975 Aviat Space Env Med	4 henkilöä (miehiä)	Lyhyet sinimuotoiset 1–20 Hz äänipurskeet äänenpainetasolla 144 dB Sydämen syketaajuuden ja hengitystiheyden mittaust Yksinkertaiset kysymykset ja tehtävät (esim. laulu, hengityksen pidämys)	Kuulokymnyksissä ei havaittu muutoksia. Koehenkilöt kokivat paineen tunnetta korvissa kaikilla käytetyillä taajuuksilla. Lisäksi he tunsivat rintakehän tärinää. Tutkimuksessa havaittiin psykofysiologisia muutoksia kuten alentunutta toimintakykyä, keskittymisvaikeuksia, uneliaisuutta ja ajan kaventumisen tunnetta, mutta näiden merkittävyyttä tekijät eivät osanneet arvioida. Sykkeessä ja hengityksessä ei havaittu muutoksia.	Koehenkilöitä vähän
<b>Kuulo ja vestibulaarinen järjestelmä</b>				
Todd et al. 2008 Neurosci Lett	4 tervettä henkilöä (2 naista), 31–52-vuotiaita Vestibulaaripotilas kontrollina	Lyhyt sinimuotoinen kiihtyvyyttäajuuksilla 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 ja 800 Hz Vestibulo-okulaarisen refleksin (VOR) mittaus VEMP-vasteen (vestibular evoked myogenic potential) mittaus	VEMP-vasteet näkyivät parhaiten 100 Hz taajuudella ja ne suodatituvat kaistanpääsuodatitimen tavoin 25 ja 200 Hz rajataajuuksilla. Tulokset osoittivat, että ihminen omaa sammakon (ja kalan) kaltaisen vestibulaarisen tuntoekanismin, joka huomaa pientaajuisten tärinän kuulosimpukkaa alemmilla tasolla.	Koehenkilöitä vähän
Hensel et al. 2007 Hearing Res	12 henkilöä (2 miestä), keski-ikä 25,5	6, 12, 24, 50 Hz Äänenpainetaso 130 dB taajuudella 6 Hz, muilla taajuuksilla taso vaihtoi henkilökohtaisesti DPOAE-vasteen (distortion product otoacoustic emission) mittaus	Infraääni etenee sisäkorvaan ja voi muuttaa kuulosimpukan prosessointia. Vaikutus havaittiin 6 Hz taajuudella 130 dB tasolla. Taajuuden kasvaessa taso madaltui.	
Takigawa et al. 1991 J Sound Vib	Silmän liikkeeseen liittyvä koe: 25 henkilöä (miehiä), 22–24-vuotiaita Kehon heiluminen: 34 henkilöä (miehiä), 21–24-vuotiaita Pulssi-aalto-koe: 9 henkilöä, 25–55-vuotiaita	Laajakaistainen ääni 100–1 000 Hz / A-äänitaso 75 ja 95 dB Kapeakaistainen infraääni 3–7 Hz / 95 dB	Vaikutuksia havaittiin infraäänellä kaikissa kokeissa (mm. tahaton silmien liike lisäänty), kun koehenkilöiden silmät olivat kiinni. Näin ollen infraääni vaikuttaa vestibulaarisen järjestelmän kautta.	Allistusjärjestelmä kuvattu puutteellisesti
Evans & Tempest 1972 J Sound Vib	25 henkilöä (5 naista), 18–40-vuotiaita	2–10 Hz / 120–150 dB	Silmävärrettä (nystagmus) havaittiin 30 % koehenkilöistä 60 s kuluttua 120 dB allistumisen aloittamisesta. Nystagmusta aiheutui tehokkaimmin 7 Hz äänellä. Suuremmilla äänenpainetasoilla nystagmus havaittiin nopeammin. Koehenkilöt eivät kokeneet oloaan epämukavaksi millään allistustasolla.	

Jeger et al. 1966 J Speech Hear Res	19 henkilöä	2–22 Hz / 119–144 dB Altistus kesti 3 min	Osalla koehenkilöistä (11/19) kuulokymys laski tilapäisesti (10–22 dB taajuuksilla 3–8 kHz) altistuksen myötä. Kuulokynnyksen lasku kesti muutaman tunnin.	Koehenkilöitä vähän
Mohr et al. 1965 Aerospace Med	5 henkilöä (1 nainen), 24–46-vuotiaita, melua kokeneita ilmailomien virkailijoita	Useita eritaajuisia äänialisteita (1–100 Hz) suurilla äänenpainetasoilla (max. 154 dB), altistus kesti vähintään 2 min 16 erilaista testiä, joilla selvitettiin toimintakykyä ja fysiologisia vasteita	Tärkeimmät vasteet eivät liittyneet kuuloon (rintakehän tärinä, oksetuksen tunne, hengityksen rytmin muutos).	
<b>Sydän ja verenkiertoelimistö</b>				
Kasprzak 2010 Acta Phys Pol A	33 henkilöä, 20–30-vuotiaita	7 Hz / 120 dB Altistus kesti 20 min	Altistus pienensi sydämen sykettä. Lisäksi diastolinen verenpaine kohosi ja systolinen pieneni, mutta muutokset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.	
Danielsson & Landström 1985 Acta Med Scand	20 henkilöä (miehiä), 20–30-vuotiaita	6, 12 ja 16 Hz / Z-äänitaso 95, 110 ja 125 dB Sydämen syketaajuuden ja verenpaineen mittausta, seurumin kor-tisolipitoisuuden määrittäminen	Diastolinen verenpaine kasvoi ja systolinen verenpaine laski. Muutokset olivat pieniä 20 min altistuksessa, mutta olivat merkittävämpiä 30 min altistuksessa. Suurin vaikutus verenpaineeseen oli 16 Hz altistuksella.	
<b>Uni ja valvettia</b>				
Landström et al. 1991 J Low Freq Noise V A	Koe 1: 12 henkilöä (6 miestä), keski-ikä 28,1 vuotta Koe 2: 12 henkilöä (6 miestä), keski-ikä 26,1 vuotta	Koe 1: Laajakaistainen ilmastoinnin melu, Z-äänitaso 68 dB Tonaalinen melu (ilmastoinnin melu + 100 Hz), A-äänitaso 68 dB Koe 2: Tonaalinen melu + vaaleanpunainen kohina 50–200 Hz, Z-äänitaso 68 dB 2 kuvantunnistustehtävää	Altistus ei vaikuttanut tehtävistä suoriutumiseen kokeessa 1. Vaaleanpunaisen kohinan lisääminen tonaaliseen meluun paransi tehtävistä suoriutumista ja valvettia (koe 2).	

Okada & Inaba 1990 Environ Int	18 henkilöä (miehiä), 20–25-vuotiaita	3 ryhmää altistettiin unen aikana erillisille äänille: 1. ja 2. ryhmä: 10, 20, 40 ja 63 Hz / 60–105 dB, 30 s kunkin 20 min jakson aikana 3. ryhmä: liikennemelu 25–1600 Hz / 40, 50 tai 60 dB (L <sub>50</sub> ) Polysomnografia (EEG, EOG, EMG, EKG)	Liikennemelu vaikutti uneen enemmän kuin pientaajuinen tai infraääni. Infraäänillä ei ollut vaikutusta uniryhtiin.	
Inaba & Okada 1988 J Low Freq Noise V A	6 henkilöä, 20–25-vuotiaita	10 Hz / 80–105 dB 20 Hz / 75–105 dB 40 Hz / 60–100 dB 63 Hz / 50–90 dB EEG-monitorointi unilaboratoriossa	Alle 85 dB äänepainetasoilla ei havaittu muutoksia reaktioasteessa. Yli 85 dB tasolla reaktioaste oli taajuuksilla 40 ja 63 Hz suurempi kuin taajuuksilla 10 ja 20 Hz. Lisäksi reaktioaste oli taajuudella 20 Hz suurempi kuin taajuudella 10 Hz. Tulosten perusteella äänen vaikutus uneen on sitä suurempi mitä suurempi taajuus on. Altistuksilla ei ollut vaikutusta uniryhtiin.	Koehenkiloita vähän
Landström et al. 1985 J Low Freq Noise V A	6 henkilöä	Äänialisteen spektri vastasi koehenkilöiden EEG-talenteen spektriä Altistus kesti 15 min EEG- ja EKG-monitorointi	Havaitut EEG-muutokset olivat vaihtelevia, eivätkä ne olleet tilastollisesti merkittäviä.	Koehenkiloita vähän
Landström & Byström 1984 J Low Freq Noise V A	20 henkilöä (10 miestä), 20–35-vuotiaita	6 Hz / Z-äänitaso 95 ja 115 dB 16 Hz / Z-äänitaso 80 ja 100 dB	Valvetta heikentyi, kun altistus oli kuulokymmen yläpuolella. Kuulokymmen alapuolella ei havaittu selviä vaikutuksia. Infraäänen tulee olla kuultavaa, jotta se voisi heikentää valvetilaa.	
Landström et al. 1983 J Low Freq Noise V A	10 kuuroa ja 10 kuulevaa henkilöä	6 Hz / Z-äänitaso 115 dB Altistus kesti 20 min	Koehenkiöt tunsivat kehon värinää noin 20 dB kuulokymmen yläpuolella. Värinän tuntemisessa ei ollut eroa kuurojen ja kuulevien välillä. Valvetilan heikentymisiä havaittiin kuulevilla, mutta ei kuuroilla koehenkiöillä. Tulosten perusteella valvetilan muutokset johtuvat sisäkorvan stimulaatiosta.	

<p>Landström et al. 1982 J Low Freq Noise V A</p>	<p>20 henkilöä (miehiä), 20-30- vuotiaita</p>	<p>6, 12 ja 16 Hz / Z-äänitaso 125 dB 20 min jaksoissa Ajoittainen 16 Hz infraääni Z- äänitasolla 125 dB (23 pursketta satunnaisiin väleihin) Valveittilan monitorointi EEG:n avulla</p>	<p>Ajoittainen 16 Hz infraääni kasvatti theta-aktiivisuutta eli valveilla heikkeni. Yksittäisissä havainnoissa oli kuitenkin paljon vaihtelua. Ajoittainen 16 Hz infraääni pienensi sydämen sykettä ja sekä systolista että diastolista verenpainetta.</p>	
---	---	--	--	--

## 5.2.2 Koe-eläintutkimukset

Infraäänen terveysvaikutuksia on selvitetty koe-eläintutkimuksilla jo 1970-luvulta lähtien. Tutkimuksissa on tarkasteltu erityisesti infraäänen vaikutuksia koe-eläinten kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään sekä kognitiivisiin toimintoihin. Vertaisarvioitujen koe-eläintutkimusten päätulokset on koottu taulukkoon 11. Infraäänen vaikutuksia muun muassa koe-eläinten aivotointaan on lisäksi selvitetty useassa kii- nan- ja venäjänkielisessä tutkimuksessa. Julkaisuja ei ollut saatavilla englanninkielisinä, joten niitä ei voitu arvioida.

### ***Vaikutukset kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään***

Salt ym. pyrkivät selvittämään vaikuttaako infraääni (ja pientaajuiset äänet) 13 marsun kuulosimpukan endolymfaattisiin potentiaaleihin (Salt et al., 2013). Altistus tehtiin taajuuksilla 5–500 Hz äänenpainetasolla 130 dB. Tuloksena löytyi vaikutuksia erityisen pienillä tasoilla, kun käytettiin pieniä taajuuksia (infraääniä). Kun infraäänen lisäksi käytettiin 500 Hz:n signaalia, mitatut endolymfaattiset potentiaalit olivat matalampia kuin pelkällä infraäänellä. Tutkijat arvelevat, että infraäänellä voi olla vaikutuksia myös ihmisillä ja jo pienillä tasoilla (huomattavasti alle kuulokynnyksen). Vaikutus löytyi myös huomattavasti kuulo-tason alapuolella (5 Hz, 60–65 dB marsuilla, vastanee ihmisillä n. 55–65 dB tasoa). Tutkijat pitivät erit-täin tarpeellisena ymmärtää miten korva käyttäytyy hyvin pienillä taajuuksilla ja selvittää miten se mah-dollisesti vaikuttaa koko elimistön toimintaan.

Harding ym. pyrkivät selvittämään aiheuttaako infraääni ja 4 kHz oktaavikaistainen melu (OBN) tsintsillo- jen kuulosimpukan tuhoja (Harding et al., 2007). Tsintsilloja (n=8) altistettiin 30 Hz:n infraäänelle (tsintsil- lan kuuloalue alkaa >100 Hz) tasolla 100 dB ja 4 KHz OBN:lle joko 1,75 tuntia tasolla 108 dB tai 24 tun- tia tasolla 86 dB. Altistuksia tehtiin infraäänelle ja OBN:lle erikseen ja yhtäaikaaisesti. Tutkimuksessa tarkasteltiin aivorunkovasteen (Auditory Brainstem Response, ABR) muutoksia ja särösyntyisen oto- akustisen emission (Distortion Product Optoacoustic Emission, DPOAE) tasoja. ABR- ja DPOAE- muutoksia havaittiin pelkästään infraäänialtistuksella ja OBN-altistuksella. Pelkkä infraäänialtistus ei aiheuttanut pysyviä vaikutuksia simpukkaan. Muutokset olivat suurempia samanaikaisella infraäänen ja suuren OBN:n altistuksella. Samanaikainen infraääni ja pieni OBN ei lisännyt muutoksia. Tutkijat arvele- vat, että samanaikainen altistus infraäänelle ja voimakkaalle OBN:lle kasvattaa kuulosimpukan tuhoja suurista nestevirtauksista johtuen. Näitä muutoksia ei tapahtunut, kun OBN oli pieni (86 dB).

Lim ym. yrittivät selvittää vaikuttaako infraääni tsintsillan korvan toimintaan (Lim et al., 1982). Tsintsilloja (n=28) altistettiin 1, 10 ja 20 Hz:n äänelle tasoilla 150, 160 tai 170 dB. Altistus oli jatkuvaa tai ajoittaista. Sisäkorvan luurakennetta tutkittiin valomikroskopian avulla. Monenlaisia muutoksia havaittiin (mm. väre- karvojen tuhoa, verenvalumista eri elimistä). Altistustason kasvaessa muutoksia esiintyi enemmän ja taajuuden kasvaessa muutoksia oli vähemmän. Jatkuva altistus aiheutti enemmän muutoksia kuin ajoit- tainen altistus.

### ***Vaikutukset kognitiivisiin toimintoihin***

Infraäänen vaikutuksia kognitiivisiin toimintoihin on tarkasteltu rotilla tehdyissä koe-eläintutkimuksissa. Yamamura ja Kishi pyrkivät selvittämään infraäänen vaikutuksia rottien käyttäytymiseen (Yamamura & Kishi, 1980). Tutkimuksessa poimittiin pyörivä sauva -kokeen perusteella (rota-rod treadmill) 19 uros- puolisen Wistar-rotan joukosta kuusi hyvin suoriutuvaa ja kuusi huonosti suoriutuvaa yksilöä. Rottia altis- tettiin 16 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 72–105 dB altistuksen keston ollessa 70–150 minuuttia. Lisäksi rotille tehtiin kontrollikoe, joka kesti 150 minuuttia. Rottien suoriutumista arvioitiin pyörivä sauva -

kokeella ennen altistusta sekä 10, 30, 70 ja 150 minuuttia altistuksen jälkeen. Huonosti suoriutuneiden ryhmän suoriutuminen heikkeni, kun infraäänen äänenpainetaso oli 85 dB. Sen sijaan hyvin suoriutuneiden ryhmän suoriutuminen ei heikentynyt äänenpainetasolla 105 dB. Tekijöiden mukaan tulokset viittaavat siihen, että infraääni vaikuttaa eläinten suoriutumiseen ja suoriutuminen heikkenee sitä enemmän mitä pidempään altistus kestää.

Zhuang ym. selvittivät infraäänen vaikutuksia urosrottien seksuaaliseen käyttäytymiseen, seerumin testosteronikonsentraatioon ja lähetti-RNA:n ilmentymisen tasoon (SF-1, StAR, P450scc) (Zhuang et al., 2007). Urosrotat (n=40) jaettiin kahdeksaan ryhmään, joita altistettiin 8 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 90 tai 130 dB. Koe kesti ryhmästä riippuen 1, 7, 14 tai 21 päivää siten, että rottia altistettiin päivittäin kaksi tuntia. Yhden päivän altistuksessa havaittiin eroja äänenpainetasolla 90 dB kaikissa tutkimuskohteissa. Äänenpainetasolla 130 dB tehdyissä kokeissa havaittiin eroja kaikissa altistusryhmissä kaikissa tutkimuskohteissa.

Yuan ym. (2009) tarkastelivat rottien avulla infraäänen vaikutuksia hippokampuksesta riippuvaan spatioaaliseen oppimiseen ja muistiin sekä niihin vaikuttaviin mekanismeihin (Yuan et al., 2009). Urosrottia (n=48) altistettiin 14 päivän ajan 6 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 130 dB siten, että altistus kesti 2 tuntia päivässä. Rottien oppimista ja muistia testattiin Morrisin vesisokkelon avulla. Tulosten mukaan altistetut rotat olivat toisesta altistuspäivästä lähtien kontrolleja hitaampia ja niiden muisti oli heikompi.

Petounis ym. tarkastelivat infraäänen vaikutusta naarasrottien liikkumiseen (Petounis et al., 1977a). Rottia altistettiin 2–16 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 102–124 dB. Rottien spontaani aktiivisuus ja etsintä heikkenivät kahden tunnin altistuksen jälkeen. Altistuksella oli myös huomiota herättäviä unta aiheuttavia vaikutuksia. Sama tutkimusryhmä tarkasteli infraäänen vaikutuksia rottien muistiin (Petounis et al., 1977b). Rottia altistettiin 2 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 104 dB. Rottien selviytyivät muistamiseen ja löytämiseen liittyvistä tehtävistä heikommin altistuksen jälkeen.

Spyraki ym. altistivat rottia tunnin ajan infraäänelle ja havaitsivat pienen norepinefriinin konsentraation vähenemisen altistustasoilla 7 Hz/122 dB ja 16 Hz/124 dB (Spyraki et al., 1978). Muutosta ei havaittu altistustasolla 2 Hz/105 dB. Sama tutkimusryhmä havaitsi toisessa tutkimuksessaan, että infraäänialtistus 16 Hz:n taajuudella äänenpainetasolla 124 dB vähensi rottien norepinefriinin ja dopamiinin tasoja (Spyraki et al., 1980). Altistus kesti tunnin päivässä neljän päivän ajan. Altistuksella ei ollut vaikutusta rottien aktiivisuuteen.

Busnel ja Lehmann havaitsivat, että normaalien ja kuurojen hiirien uintiaika lyheni, kun hiiriä altistettiin 50 Hz:n äänelle äänenpainetasolla 106 dB ja pienemmillä taajuuksilla tasolla 112–115 dB (Busnel & Lehmann, 1978). Myöhemmin samat tutkijat tarkastelivat infraäänen ja alkoholin yhteisvaikutuksia (Lehmann & Busnel, 1979). Hiiriä altistettiin kahden tunnin ajan 6–50 Hz:n äänelle tasolla 100–106 dB. Infraääni tai alkoholi ei vaikuttanut uppoamisen latenssiaikaan. Kun alkoholia annettiin heti infraäänialtistuksen jälkeen, uintiaika lyheni. Tämä aiheutui hiirien kohonneesta aktiivisuudesta, joka johti nopeamman väsymiseen. Normaaleilla ja kuuroilla hiirillä havaittiin samanlaisia tuloksia, joten vaikutuksen mekanismin ei pitäisi liittyä kuuloon.

Sherry ym. altistivat reesusapinoita 10 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 160 dB ja tarkastelivat apinoiden tasapainoa (Sherry et al., 2008). Apinoille annettiin heikko sähköisku, jos ne suoriutuivat huonosti tasapainokokeesta. Tutkimuksen mukaan altistus heikensi apinoiden kykyä säilyttää tasapaino ja samalla annettujen sähköiskujen määrä kasvoi. Apinoiden sisäkorvassa ja kuulossa ei havaittu muutoksia heti altistuksen jälkeen tai 24 tunnin kuluttua.



### ***Vaikutukset sydämeen ja verenkiertoelimistöön***

Pei ym. tutkivat rotilla infraäänen vaikutusta sydämen rakenteeseen ja toimintaan (Pei et al., 2007). Rottia altistettiin 5 Hz:n taajuudella 130 dB:n tasolla 1, 7 tai 14 päivän ajan. Tulosten mukaan infraäänialtistuksen jälkeen havaittiin vaikutuksia useassa eri tekijässä (esim. sydämen syke,  $Ca^{2+}$ :n ja SERCA2-entsyymien määrissä). Näin ollen tutkijat päättelivät, että infraäänialtistus voi vahingoittaa sydämen rakennetta ja toimintaa.

Pei ym. pyrkivät selvittämään vaikuttaako infraääni rotan keuhkojen lihassolujen L-tyypin  $Ca^{2+}$ -virtoihin (WLCC) ja niiden taustalla oleviin mekanismeihin (Pei et al., 2009). Altistus toteutettiin samoin kuin Pei et al. 2007. WLCC kasvoi yhden päivän altistuksella ja kasvoi edelleen altistusajan ollessa 7 ja 14 päivää. Samoin kävi LCC mRNA ilmaisemiselle. SERCA2 taas nousi ylös yhden päivän jälkeen ja laski 7 ja 14 päivän jälkeen. Tutkijat arvelevat, että infraäänellä voi olla huomatuista muutoksista johtuen vaikutuksia sydämen rakenteeseen ja toimintaan.

Pei ym. tutkivat myös aiheuttaako infraääni solukuolemaa vastasyntyneen rotan sydämen lihassoluista otettujen näytteiden avulla (Pei et al., 2011). Altistus tehtiin kammiossa 5 Hz:n taajuudella 130 dB:n tasolla 2, 4 tai 6 päivän ajan. Tutkijat sanovat, että infraääni aiheuttaa solukuolemaa sydämen lihassoluissa, joka näkyy monissa proteiini muutosten ilmentymisissä. Tässäkin tutkimuksessa vaikutus kasvoi pidemmällä altistuksella.

### ***Vaikutukset aivojen toimintaan***

Liu Z. ym. tutkivat vaikuttaako infraääni N-metyyli-D-aspartaatin (NMDAR)1 ilmentymiseen ja aiheuttaako infraääni kalsiumionien konsentraation muutoksia rotan hippokampuksen alueen soluissa (Liu et al., 2010b). Altistus tehtiin kammiossa 8 Hz:n taajuudella 90 tai 130 dB:n äänenpainetasolla 2 tuntia päivässä. NMDAR1:n ilmentymistä tutkittiin 1, 7, 14, 21 ja 28 päivän altistuksen jälkeen. Muutoksia löytyi molemmilla tehoilla 90 ja 130 dB, mutta ne olivat päinvastaisia. Tasot laskivat ja nousivat ajan kuluessa, mutta ne palautuivat alkuperäiseen 28 päivän jälkeen.

Liu J. ym. tarkastelivat infraäänen vaikutusta rottien hippokampuksen pykäläpoimun (dentate gyrus) neurogeneesiin eli hermosolujen muodostumiseen altistamalla rottia seitsemän päivän ajan 16 Hz:n infraäänelle äänenpainetasolla 130 dB (Liu et al., 2010a). Tutkimuksessa havaittiin, että bromodeoksiuridiini (BrdU) ja doublecortin-proteiini (DCX) määrät laskivat 3, 6, 10 ja 14 päivän kohdalla ja palautuivat normaaliksi 18 päivän kuluttua. Tutkimuksen mukaan infraääni rajoittaa solujen määrän lisääntymistä rottien hippokampuksen pykäläpoimussa, mutta sillä ei ole vaikutusta solujen liikkumiseen tai erilaistumiseen.

Liu Z. ym. tarkastelivat infraäänen vaikutusta hippokampuksen neuronien  $Ca^{2+}$ -tasoihin altistamalla rottia kahden päivän ajan 8 Hz:n infraäänelle äänenpainetasoilla 90 dB ja 130 dB (Liu et al., 2012). Neuronien  $Ca^{2+}$ -tasot olivat kohonneet 14 ja 21 päivää altistuksen jälkeen. Suurimmat tason nousut havaittiin 130 dB:lle altistettujen ryhmässä. Hippokampuksen neuronien apoptoosi kasvoi 7 päivää 90 dB:n altistuksen jälkeen ja kasvoi 14 päivän jälkeen. Apoptoosia havaittiin 130 dB:n altistuksen jälkeen 14 päivän kohdalla, jonka jälkeen apoptoottisten solujen määrä pieneni vähitellen. Tutkimuksen mukaan infraääni voi vaurioittaa keskushermostoa  $Ca^{2+}$ -välitteisesti hippokampuksen neuroneissa.

Zhang ym. selvittivät infraäänen aiheuttamia hippokampuksen vaurioita ja HSP70-proteiiniin (heat shock protein) ilmentymistä hippokampuksessa (Zhang et al., 2016). Rottia altistettiin 8 Hz:n infraäänelle ää-

nenpainetasolla 140 dB kahden tunnin ajan päivässä yhteensä kolmen päivän ajan. Hippokampuksen morfologiaa tarkasteltiin läpäisyelektronimikroskopian (Transmission Electron Microscopy, TEM) avulla. Solujen apoptoosia havainnointiin TUNEL-tekniikan (Terminal deoxynucleotidyl transferase dUTP nick end labeling) avulla 0, 24 ja 48 h ja 2 viikkoa altistuksen jälkeen. HSP70-proteiinin ilmentymistä tarkasteltiin immunohistokemian ja Western Blottingin avulla. Tutkimuksessa havaittiin, että infraäänialtistus aiheutti vaurioita rottien hippokampuksiin, jotka paranivat viikon kuluttua altistuksesta. HSP70-proteiinin ilmentyminen lisääntyi altistuksen jälkeen ja väheni 48 tunnin kuluessa.

### ***Vaikutukset muihin elimiin***

Morioka ym. pyrkivät selvittämään aiheuttaako infraääni muutoksia rottien vatsan limakalvojen verenkierron (Morioka et al., 1996). Aikuisia urospuolisia Wistar-rottia (n=216) käytettiin kahdessa altistuskokeessa. Koe 1 tehtiin 8, 16 ja 32 Hz:n infraäänellä 80–130 dB:n äänenpainetasolla ja vatsan limakalvojen verenkiertoa mitattiin vedyn virtausmittarilla. Vaikutustasoa mitattiin kokeessa ennen altistusta sekä 10, 20, 30 ja 40 minuuttia aloituksen jälkeen. Kokeessa 2 rottia altistettiin 16 Hz:n infraäänelle 120 dB:n äänenpainetasolla ja verta tutkittiin sydänpunktiolla heti altistuksen jälkeen ja mitattiin katekoliamiinia, adrenaliinia ja noradrenaliinia. Molemmissa kokeissa altistus kesti 20 minuuttia. Muutoksia vatsan limakalvojen verenkierron löytyi jokaisella tutkitulla taajuudella, kun infraääni oli luokkaa 100–130 dB. Vaikutus löytyi pienemmillä tasoilla taajuuden kasvaessa. Rotilla vatsanalueen resonanssi saattaa olla noin 16 Hz:n taajuudella, kun ihmisellä se on 4–8 Hz. Tutkijat sanovat, että mahdollisesti infraääni stimuloi sympaattista hermostoa ja siten aiheuttaa vähentynyttä vatsanalueen verenkiertoa.

**Taulukko 11.** Vertaisarvioituissa lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset infraäänen vaikutuksista koe-eläimiin.

Viite, lehti	Koe-eläimet	Altiste, vaste	Päätulos	Huomiot
<b>Kuulo ja vestibulaarijärjestelmä</b>				
Salt et al. 2013 J Acoust Soc Am	Marsut, 13 kpl	5–500 Hz / 130 dB Kuulosimpukan endolympfaattisten potentiaalien mittaus	Vaikutuksia havaittiin infraäänillä jo pienillä tasoilla. Kun altisteena oli infraäänen lisäksi 500 Hz ääni, endolympfaattiset potentiaalit olivat matalampia kuin pelkällä infraäänellä. Vaikutus havaittiin myös kuulotason alapuolella (5 Hz, 60–65 dB).	Altistusjärjestelmä ja biologinen määrittäminen (mm. kontrollit) kuvattu puutteellisesti
Harding et al. 2007 Hear Res	Tsintsillat, 8 kpl	30 Hz / 100 dB (sisinsillan kuuloalue alkaa >100 Hz) 4 kHz oktaavikaistainen melu (OBN) äänenpainetasoilla 108 dB 1,75 tunnin ajan ja 86 dB 24 tunnin ajan Altistuksia tehtiin erikseen ja samanaikaisesti Aivorunkovasteen (ABR) muutokset ja särsömyyksen otoakustisen (DPOAE) emission tasot	ABR- ja DPOAE-muutoksia havaittiin infraääni- ja OBN-altistuksella. Muutokset olivat suurempia, kun altistettiin samanaikaisesti infraäänelle ja 108 dB OBN:lle. Samanaikainen infraääni ja 86 dB OBN ei lisännyt muutoksia. Tekijöiden mukaan infraääni ja voimakas OBN kasvattavat kuulosimpukan tuhoja suurista nestevirtauksista johtuen.	
Lim et al. 1982 Acta Otolaryngol	Tsintsillat, 28 kpl + 7 kontrollia	1 Hz / 170 dB, 10 Hz / 150, 160 tai 170 dB, 20 Hz / 150, 160 tai 163 dB Jalkuva tai ajoittainen altistus Sisäkorvan luurakennetta tutkittiin valomikroskopialla	Havaittiin monenlaisia muutoksia (mm. värekarvojen tuhoa, veren valumista eri elimistä). Altistustason kasvaessa muutoksia esiintyi enemmän. Taajuuden kasvaessa muutoksia oli vähemmän. Jalkuva altistus aiheutti enemmän muutoksia kuin ajoittainen altistus.	
<b>Kognitiiviset toiminnot</b>				
Shery et al. 2008 J Low Freq Noise Vib	Reesusapinat, 5 kpl	10 Hz / 160 dB Altistus kesti 75–509 s Tasapainokoe (tuoli + joystick), heikko sähköisku huonosti suoriutumisesta	Altistus heikensi apinoiden kykyä säilyttää tasapaino, jolloin annettujen sähköiskujen määrä kasvoi. Sisäkorvassa ja kuulossa ei havaittu muutoksia heti altistuksen jälkeen tai 24 h kuluttua.	

Zhuang et al. 2007 Environ Toxicol Pharmacol	Rotat, 40 kpl (uros)	8 Hz / 90 tai 130 dB Seksuuaalinen käyttäytyminen, seerumin testosteronikonsentraatio ja lähetti-RNA:n ilmentymisen taso (SF-1, STAR, P450ccc) Allistus kesti ryhmästä riippuen 1, 7, 14 tai 21 päivää (2 h/päivä).	90 dB yhden päivän allistuksessa havaittiin eroja kaikissa tutkimuskohteissa. 130 dB äänenpainetasolla tehdyissä kokeissa havaittiin eroja kaikissa allistusrhymissä kaikissa tutkimuskohteissa.	
Yuan et al. 2009 Environ Toxicol Pharmacol	Rotat, 48 kpl (uros)	6 Hz / 130 dB Allistus kesti 14 päivää (2 h/päivä). Morrisin vesisokkelo (oppiminen ja muisti)	Allistetut rotat olivat toisesta allistuspäivästä lähtien kontroleja hitaampia ja niiden muistit oli heikompi.	
Spyraki et al. 1980 Pharmacol Biochem Behav	Rotat	16 Hz / 124 dB Allistus kesti 4 päivää (1 h/päivä)	Allistus vähensi rottien norepinefriinin ja dopamiinin tasoja. Ei vaikutusta rottien aktiivisuuteen.	
Yamanura & Kishi 1980 Eur J Appl Physiol Occup Physiol	Rotat, 19 kpl Pyörivä sauva -kokeen (Rota-rod treadmill) perusteella valittiin 6 hyvin suorituvaa ja 6 huonosti suorituvaa yksilöä	16 Hz / 75–105 dB Allistus kesti 70–150 min, kontrollikoe 150 min Suoritumista arvioitiin pyörivä sauva -kokeella (ennen allistusta sekä 10 min, 30 min, 70 min ja 150 min allistuksen jälkeen)	Huonosti suorituneiden ryhmän suorituminen heikkeni äänenpainetasolla 85 dB. Hyvin suorituneiden ryhmän suorituminen ei heikentynyt äänenpainetasolla 105 dB. Tekijöiden mukaan tulokset viittaavat siihen, että infraääni vaikuttaa eläinten suoritumiseen ja suorituminen heikkenee sitä enemmän mitä pidempään allistus kestää.	
Lehmann & Busnel 1979 Psychopharmacol	Hiiret	6–50 Hz / 100–106 dB Allistus kesti 2 h Äänialtiste + alkoholi Ulmatesti	Infraääni tai alkoholi eivät vaikuttaneet oppoamisen latenssiaikaan. Kun alkoholia annettiin heti infraäänialtistuksen jälkeen, uintaika lyheni (kohonnut aktiivisuus, nopeampi väsyminen).	
Busnel & Lehmann 1978	Hiiret	50 Hz 6–50 Hz Eriaisilla äänenpainetasoilla	Normaaleilla ja kuuroilla hiirillä havaittiin samanlaisia tuloksia, joten vaikutuksen mekanismin ei pitäisi liittyä kuuloon.	
Spyraki et al. 1978 Physiol Behav	Rotat, 12–13 kpl/ryhmä	2 Hz / 105 dB 7 Hz / 122 dB 16 Hz / 124 dB Allistus kesti 1 h	Normaalien ja kuurojen hiirien uintaika lyheni, kun hiiriä allistettiin 50 Hz äänelle äänenpainetasolla 106 dB ja pienemmillä taajuuksilla tasolle 112–115 dB. Pieni norepinefriinin konsentraation väheneminen havaittiin allistustasolla 7 Hz/122 dB ja 16 Hz/124 dB. Muutosta ei havaittu allistustasolla 2 Hz/105 dB.	

Petounis et al. 1977a Physiol Behav	Rotat (naaras), 20 kpl/ryhmä	2 Hz / 105 dB, 7 Hz / 122 dB, 16 Hz / 124 dB	Rottien spontaani aktiivisuus ja eisintä heikkenivät kahden tunnin altistuksen aikana. Altistuksella oli unta aiheuttavia vaikutuksia.	
Petounis et al. 1977b Physiol Behav	Rotat, 20 kpl/ryhmä	2 Hz / 104 dB	Rotat selviytyivät muistamiseen ja löytämiseen liittyvistä tehtävistä heikommalla altistuksen jälkeen.	
<b>Sydän ja verenkiertoelimistö</b>				
Pei et al. 2011 Cardiovasc Toxicol	Rotat, 32 kpl	5 Hz / 130 dB Altistus kesti 2, 4 tai 6 päivää	Altistus aiheutti apoptoosia sydämen lihassoluissa, joka näkyi monissa proteiiniomuutosten ilmentymisissä. Vaikutus kasvoi pidemmällä altistuksella.	
Pei et al. 2009 Cardiovasc Toxicol	Rotat, 32 kpl (uros)	5 Hz / 130 dB 4 altistusryhmää Altistus kesti 1, 7 tai 14 päivää	Kehukojen lihassolujen L-tyypin Ca <sup>2+</sup> -virta kasvoi yhden päivän altistuksella ja kasvoi edelleen altistusajan ollessa 7 ja 14 päivää. Myös LCC mRNA:n ilmaiseminen kasvoi. SERCA2-entsyymi nousi yhden päivän jälkeen ja laski 7 ja 14 päivän jälkeen. Infraäänellä voi olla tutkijoiden mukaan havaituista muutoksista johtuen vaikutuksia sydämen rakenteeseen ja toimintaan.	
Pei et al. 2007 Environ Toxicol	Rotat, 32 kpl	5 Hz / 130 dB 4 altistusryhmää Altistus kesti 1, 7 tai 14 päivää	Vaikutuksia havaittiin useassa eri tekijässä (mm. sydämen syke, Ca <sup>2+</sup> :n ja SERCA2-entsyymin määrissä).	Rottien alkavertailu puuttuu, jokaiselle alkapisteele tulisi olla oma kontrolli
<b>Aivotointia</b>				
Zhang et al. 2016 Biomed Environ Sci	Rotat, 126 kpl (uros)	8 Hz / 140 dB Altistus kesti 3 päivää (2 h/päivä). Läpäisyelektronimikroskopia (hippokampuksen morfologia) TUNEL-tekniikka (apoptoosi) Immunohistokemia ja Western Blotting (HSP70 ilmentyminen)	Altistus aiheutti rottien hippokampuksiin vaurioita, jotka paranivat viikon kuluttua altistuksesta. HSP70-proteiinin ilmentyminen lisääntyi altistuksen jälkeen ja väheni 48 h kuluessa.	

Liu Z et al. 2012 Mol Med Rep	Rotat, 66 kpl	8 Hz / 90 dB tai 130 dB Altistus kesti 2h/päivä. Hippokampuksen neuronien Ca <sup>2+</sup> -tasot määritettiin 1, 7, 14, 21 ja 28 päivää altistuksen jälkeen.	Ca <sup>2+</sup> -tasot olivat kohonneet 14 ja 21 päivää altistuksen jälkeen. Suurimmat tason nousut havaittiin 130 dB allistettujen ryhmässä. Hippokampuksen neuronien apoptoosi kasvoi 7 päivää 90 dB altistuksen jälkeen ja kasvoi 14 päivän jälkeen. 130 dB altistuksen jälkeen apoptoosia havaittiin 14 päivän kohdalla, jonka jälkeen apoptoottisten solujen määrä pieneni vähitellen. Tutkimuksen mukaan infraääni voi vaurioittaa keskushermostoa Ca <sup>2+</sup> -välitteisesti hippokampuksen neuroneissa.	
Liu J et al. 2010 NeuroReport	Rotat	16 Hz / 130 dB Altistus kesti 7 päivää. Infraäänien vaikutus hippokampuksen pykäläpöimään (dentate gyrus) neurogeneesiin	Deoksiridiiniin (BrdU) ja doublecortin-proteiiniin (DCX) määrät laskivat 3, 6, 10 ja 14 päivän kohdalla ja palautuivat normaalksi 18 päivän kuluttua. Tutkimuksen mukaan infraääni rajoittaa solujen määrän lisääntymistä rottien hippokampuksen pykäläpöimässä, mutta sillä ei ole vaikutusta solujen liikkumiseen tai erilaistumiseen.	
Liu Z et al. 2010 Molec Med Rep	Rotat, 132 kpl (uros)	8 Hz / 90 dB tai 130 dB Altistus kesti 1, 7, 14, 21 tai 28 päivää (2 h/päivä). N-metyyli-D-aspartaatin (NMDAR) 1 ilmentymisen ja kalsiumionien konsentraatio hippokampuksen alueen soluissa	Muutoksia havaittiin molemmilla tehoilla 90 ja 130 dB, mutta ne olivat päinvastaisia. Tasot laskivat ja nousivat ajan kuluessa, mutta ne palautuivat alkuperäiseen 28 pv jälkeen.	
<b>Muut elimet</b>				
Morioka et al. 1996 Environ Health Prev Med	Hiiret, 216 kpl (uros)	Koe 1: 8, 16 ja 32 Hz / 80–130 dB Koe 2: 16 Hz / 120 dB Altistukset kestivät 20 min	Muutoksia vatsan limakalvojen verenkierrossa löytyi jokaisella tutkitulla taajuudella, kun infraääni oli luokkaa 100–130 dB. Vaikutus löytyi pienemmillä tasolla taajuuden kasvaessa. Tutkijat sanovat, että infraääni mahdollisesti stimuloi sympaattista hermostoa ja siten aiheuttaa vähentynyttä vatsanalueen verenkiertoa.	

### 5.2.3 Solututkimukset

Infraäänen vaikutuksia soluihin on tarkasteltu vain muutamassa tutkimuksessa. Yleisesti ottaen solututkimukset ovat käyttökelpoisia, koska ne ovat paremmin hallittuja ja helpommin toteutettavissa kuin ihmis- ja eläinkokeet. Solututkimusten tuloksia ei kuitenkaan voi suoraan ekstrapoloida ihmiseen. Niiden avulla voi kuitenkin arvioida millaisia vaikutusmekanismeja infraäänellä voi olla ja käyttää tuloksia tulevia tutkimuksia kohdennettaessa. Vertaisarvioitujen solututkimusten päätulokset on koottu taulukkoon 12.

Cheng ym. pyrkivät selvittämään aiheuttaako infraääni neuronisolujen aksonaalista rappeutumista  $Ca^{2+}$ -kanavan kautta (Cheng et al., 2012). Soluja altistettiin 16 Hz:n taajuudella 130 dB:n äänenpainetasolla tunnin ajan. Tutkijat osoittivat, että infraääni aiheuttaa aksonaalista rappeutumaa hippokampuksen alueen soluilla. He myös toteavat, että luultavasti  $Ca^{2+}$ -signaalin kulurata voi olla osallisena tähän.

Du ym. tutkivat rottia ja niiden keskushermoston immuunisoluja infraäänialtistuksen jälkeen (Du et al., 2010). Kokeita suoritettiin sekä *in vivo* että *in vitro* altistuksilla 16 Hz:n taajuudella 130 dB:n äänenpainetasolla 2 tunnin ajan. Infraäänialtistuksen jälkeen solut aktivoituivat. Muutos oli palautuva eli se väheni 6 h aikapisteen jälkeen ja sitä ei havaittu enää 24 tunnin aikapisteen jälkeen. CRH-R1 -proteiinien ilmentyminen lisääntyi altistuksen jälkeen ja tästä johtuen solut aktivoituivat. Aktivoituminen pystyttiin blokaamaan kemikaalilla, *in vitro*. Infraäänellä oli myös vaikutuksia solujen väliseen vuorovaikutukseen.

Jiang ym. altistivat primäärisiä rotan astrozyyttejä (aivoissa olevia soluja) infraäänelle (16 Hz, 130 dB) ja/tai erilaisille kemikaaleille, jotka olivat blokkereita eli estäjiä eri reseptoreille (Jiang et al., 2014). Altistuksen kesto vaihteli ja näistä tutkittiin useita eri biokemiallisia ilmiöitä. Kirjoittajien mukaan glutamaatin vapautuminen astrozyyteistä lisääntyi altistuksen jälkeen ja tähän tarvitaan joko Cx43-proteiinien ilmentymisen lisääntyminen tai muutoksia GAP-liitoksissa altistuksen.

Pei ym. tutkivat infraäänen oksidatiivisia vauriovaikutuksia rotilta eristettyihin sydänlihassoluihin (Pei et al., 2013). Solut on altistettu 5 Hz:n taajuiselle infraäänelle 130 dB:n äänenpainetasolla eri pituisia aikoja (0, 24, 48, 72 h). Soluista tutkittiin useita eri biokemiallisia tekijöitä, jotka liittyvät oksidatiiviseen stressiin, useilla eri menetelmillä. Havaittiin, että infraäänialtistuksen jälkeen moni biokemiallinen tekijä oli muuttunut soluissa. Esimerkiksi CAT-, GPx-, SOD1- ja SOD2-entsyymien ilmentyminen ja aktiivisuus laski infraäänialtistuksen jälkeen. Soluissa havaittiin myös elinkyvyn laskeminen altistuksen jälkeen. Tutkimuksen hypoteesin mukaan infraäänialtistus voisi aiheuttaa oksidatiivisia vaurioita inaktivoimalla PPAR:n ilmentymistä. Aktivoimalla PPAR:a erityisellä agonistilla infraäänialtistuksessa vaikutuksia ei havaittu altistuksen jälkeen. Tutkimuksen mukaan infraääni aiheuttaa soluissa oksidatiivisia vaurioita.

Yount ym. altistivat ihmisen aivosyöpäsoluja altistettiin infraäänelle (Yount et al., 2004). Tutkimuksessa ei havaittu muutoksia solujen erilaistumisessa, eikä vasteessa toiselle altisteelle (röntgensäteily). Kun soluja altistettiin infraäänelle ja solunsalpaajatehosteelle, pesäkkeen muodostava yksikkö (CFU) pieneni.

**Taulukko 12.** Vertaisarvioituissa lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset infraäänien vaikutuksista soluihin.

Viite, lehti	Solut	Altiste, vaste	Päätulos	Huomiot
Jiang et al. 2014 Neurochem Res	Rottien primääriset astrozyytit	16 Hz / 130 dB ja/tai kemikaalit Altistuksen kesto vaihteli. Tarkastelun kohteena erilaiset biokemialliset ilmiöt	Glutamaatin vapautuminen astrozyyteistä lisääntyi altistuksen jälkeen. Tähän tarvitaan joko Cx43-proteiinin ilmenymisen lisääntyminen tai muutoksia GAP-liitoksissa allistuksen.	
Pei et al. 2013 Cardiovasc Toxicol	Rottien sydänlihassolut	5 Hz / 130 dB Altistus kesti 0, 24, 48 tai 72 h. Oksidatiiviseen stressiin liittyvät biokemialliset tekijät	Altistuksen jälkeen moni biokemiallinen tekijä oli muuttunut soluissa (esim. CAT-, GPx-, SOD1- ja SOD2-entsyymien ilmentyminen ja aktiivisuus laskivat altistuksen jälkeen). Soluissa havaittiin myös elinkyvyn laskeminen altistuksen jälkeen. Hypoteesin mukaan infraäänialistutus voisi aiheuttaa oksidatiivisia vaurioita inaktiivomalla PPAR:n ilmentymistä. Aktiivomalla PPAR:a erityisellä agonistilla infraäänialistuksessa vaikutuksia ei havaittu altistuksen jälkeen. Tutkimuksen mukaan infraääni aiheuttaa soluissa oksidatiivisia vaurioita.	
Cheng et al. 2012 Toxicol Lett	Rottien hippokampuksen neuronit	16 Hz / 130 dB	Altistus aiheutti neuronien aksonaalista rappeutumaa. Tekijöiden mukaan Ca <sup>2+</sup> -signaalin kulurata voi olla osallisena tähän.	
Du et al. 2010 Neuroscience	Rotat ja niiden keskushermoston immuunisolut	16 Hz / 130 dB (in vivo ja in vitro) Altistus kesti 2 h.	Solujen CRH-R1 -proteiinien ilmentyminen lisääntyi ja solut aktivoituivat altistuksen jälkeen. Muutos oli palautuva eli se väheni 6 h jälkeen ja sitä ei havaittu enää 24 h jälkeen. Aktivoituminen pystyttiin blokkamaan kemikaalilla, in vitro. Infraäänellä oli myös vaikutuksia solujen väliseen vuorovaikutukseen.	
Yount et al. 2004 J Altern Compl Med	Ihmissen aivosyöpäsolut	Koe 1: Infraääni 8–14 Hz / 72–79 dB Koe 2: Infraääni + solunsalpaajatehoste (5-FU) Koe 3: Infraääni + röntgensäteily Altistus kesti 10 min kerrallaan kahden päivän ajan 10 kertaa päivässä	Ei muutoksia solujen erilaistumisessa, kun niitä altistettiin pelkälle infraäänelle tai infraäänelle ja solunsalpaajatehosteelle (5-FU). Infraääni ei vaikuttanut solujen vasteeseen röntgensäteilylle. Pesäkkeen muodostava yksikkö (CFU) pieneni, kun soluja altistettiin infraäänelle ja solunsalpaajatehosteelle.	



## 5.2.4 Asiantuntijapaneelien raportit

Infraäänen terveysvaikutuksia on arvioitu muun muassa englantilaisen, yhdysvaltalaisen ja kanadalaisen asiantuntijapaneelin raporteissa.

### ***Health Protection Agency (HPA) 2010***

Englannin terveydensuojeluviranomaisen HPA:n (nykyään Public Health England) asiantuntijapaneelin mukaan infraäänen terveysvaikutuksia on selvitetty melko suppeassa määrässä kokeellisia ihmistutkimuksia (Health Protection Agency, 2010). Suuri osa varhaisista tutkimuksista on laadultaan kyseenalaisia ja niiden tulokset ovat olleet usein ristiriitaisia. Asiantuntijapaneelin mukaan tämänhetkisen tiedon perusteella ei voi sanoa, että akuutti infraäänelle altistuminen voisi aiheuttaa yhdenmukaisia fysiologisia tai käyttäytymiseen liittyviä vaikutuksia, kun äänenpainetaso on tyypillisellä ympäristössä havaittavalla tasolla. On kuitenkin saatu hieman näyttöä, että infraääni voi heikentää valvetilaa, kun äänenpainetaso on kuulokynnyksen yläpuolella.

Infraäänien biologisia vaikutuksia ei ole HPA:n asiantuntijapaneelin mukaan tutkittu laajasti ja tutkimusalueeseen sisältyy vielä epävarmuuksia erityisesti pitkäkestoisen, matalatasoisen altistumisen osalta. Solukokeita on tehty liian vähän, jotta niistä voisi vetää johtopäätöksiä. Eläinkokeissa on havaittu infraäänen aiheuttamia biologisia vaikutuksia, kun altistuminen on ollut tyypillisesti yli 100 dB. Yli 140 dB:n altistus voi johtaa kuulonmenetykseen tai korvan vaurioitumiseen. Vain harvassa eläinkokeessa on selvitetty infraäänen pitkäaikaisvaikutuksia. Infraäänen vaikutuksista eläinten neurofysiologiaan tai käyttäytymiseen ei voi sanoa mitään, koska asiaa on selvitetty liian harvassa tutkimuksessa. Missään tutkimuksessa ei ole asiantuntijapaneelin mukaan pyritty selvittämään infraäänen karsinogeenisia tai sikiövaurioita aiheuttavia vaikutuksia. Kaikkinensa tutkimusta on tehty eläin- ja solukokeilla niukasti ja niiden vertailu on vaikeaa, koska koejärjestelyissä ja tekniikoissa on paljon eroja.

### ***Report of Independent Expert Panel (Massachusetts) 2012***

Yhdysvaltalaisen asiantuntijapaneelin mukaan tuulivoimaloiden infraäänen suorasta vaikutuksesta vestibulaariseen järjestelmään ei ole tieteellistä näyttöä (Ellenbogen et al., 2012). Tuulivoimaloiden lähellä mitatut infraäänen tasot ovat olleet selvästi pienempiä kuin tasot, joilla vestibulaarinen järjestelmä voisi aktivoitua. Tutkimuksissa on ehdotettu mahdollista kytkentämekanismia infraäänen ja vestibulaarisen järjestelmän välille sisäkorvan ulompien värekarvojen kautta, mutta kyseistä mekanismia ei vielä tunneta tarpeeksi. Infraäänitasot ovat olleet tuulivoimaloiden lähellä tarpeeksi suuria, jotta värekarvat aistisivat ne. Todisteita tuulivoimaloiden infraäänen vaikutuksista aivoihin vestibulaarisen järjestelmän kautta ei kuitenkaan ole. Eläinkokeilla on saatu rajallista näyttöä lyhytkestoisista biokemiallisista muutoksista sydän- ja aivosoluissa taajuudella 16 Hz ja äänenpainetasolla 130 dB. Äänenpainetaso on kuitenkin vähintään 35 dB suurempi kuin modernien tuulivoimaloiden läheltä mitatut tasot.

### ***Council of Canadian Academies 2015***

Kanadalaisen asiantuntijapaneelin mukaan infraääni voi stimuloida simpukan ulompia värekarvoja kohtuullisilla äänenpainetasoilla (>60 dB) tietyillä eläinmalleilla (Council of Canadian Academies, 2015). Vaikutusta aivoihin ei kuitenkaan tiedetä ja tutkimuslöydöstä ei ole ekstrapoloitu ihmisiin. Infraääni voi stimuloida ihmisen vestibulaarista järjestelmää suurilla äänenpainetasoilla (>110 dB henkilöillä, joilla on normaali herkkyys ja >85 dB henkilöillä, jotka ovat erityisen herkkiä).

Paneelin mukaan infraääneen liitetyt sisäkorvan vauriot ja vestibulaarisen järjestelmän aktivoituminen ovat mahdollisia vain selvästi suuremmalla altistuksella kuin mitä tuulivoimaloista aiheutuu. Eläinmalleilla on havaittu sisäkorvan aktivoitumista tuulivoimaloiden äänenpainetasoilla, mutta aktivoitumista ei voi liittää terveysvaikutuksiin, koska aktivaation aiheuttamia vaikutuksia aivoissa ja ihmisen kynnystasoa ei tunneta.

Asiantuntijapaneeli pitää uskottavana sitä, että tietyt sairaudet voivat heikentää sisäkorvan ja vestibulaarisen järjestelmän toimintaa ja aiheuttaa erityisesti lapsilla suuremman herkkyyden infraäänille. Ei kuitenkaan ole tiedossa minkäänlaisia kynnystasoja, joten jää epäselväksi voisiko tuulivoimaloiden infraääni ylittää kyseisen tason.

Paneelin mukaan tuulivoimaloiden infraäänien ja erilaisten oireiden (mm. huimaus, pahoinvointi, paine korvissa) välisen syy-yhteyden olemassaoloa tai poissaoloa ei pysty tämän hetkisen tutkimustiedon perusteella arvioimaan.

## 5.2.5 Yhteenveto

Infraäänen terveys- ja hyvinvointivaikutuksia on selvitetty koehenkilö- ja koe-eläintutkimusten avulla 1960-luvulta lähtien. Lisäksi vaikutuksia on alettu 2000-luvulla selvittää solututkimusten avulla. Kokeellisissa ihmistutkimuksissa on tarkasteltu erityisesti infraäänen häiritsevyyttä, vaikutuksia aivotoimintaan, kognitiivisiin toimintoihin, kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään, sydämeen ja verenkiertoelimistöön sekä uneen ja valvetilaan.

Infraäänen häiritsevyydestä ei ole saatu kokeellisilla ihmistutkimuksilla viitteitä, kun äänenpainetaso on kuulokynnystä pienempi. Vaikutuksia koehenkilöiden kognitiivisiin toimintoihin on tarkasteltu kuulokynnyksen selvästi ylittävillä äänenpainetasoilla, mutta viitteitä vaikutuksista ei ole saatu.

Unta ja valvetilaa tarkastelleiden tutkimusten perusteella infraääni ei vaikuta unirytmiiin tai heikennä valvetilaa, kun infraäänen taso on kuulokynnyksen alapuolella. Selvästi kuulokynnystä suuremmilla tasoilla valvetila sen sijaan heikentyi. Vaikutus ilmeni kuulevilla, mutta ei kuuroilla henkilöillä, joten valvetilan muutosten täytyy johtua sisäkorvan stimulaatiosta.

Infraäänen vaikutuksista verenpaineeseen on tehty havaintoja kuulokynnyksen yläpuolella. Altistus kasvatti muutamassa tutkimuksessa diastolista ja laski systolista verenpainetta suurilla äänenpainetasoilla. Vaikutuksista sydämen sykkeeseen on saatu ristiriitaisia tuloksia kuulokynnyksen yläpuolella. Infraäänen vaikutuksista koehenkilöiden kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään on saatu hajanaisia tuloksia. Joissain tutkimuksissa on havaittu suurilla äänenpainetasoilla tilapäistä kuulokynnyksen laskua, vaikutuksia kuulosimpukan prosessointiin ja silmävärvettä eli nystagmusta osalla koehenkilöistä. Osassa tutkimuksista infraäänen ei ole sen sijaan havaittu vaikuttavan kuuloon tai vestibulaariseen järjestelmään edes suurilla äänenpainetasoilla.

Viime vuosina on julkaistu kiinnostavia kokeellisia ihmistutkimuksia, joissa on tarkasteltu infraäänen vaikutuksia aivotoimintaan ja kognitiivisiin toimintoihin funktionaalisen magneettikuvauksen (fMRI) avulla. Uusimmassa saksalaisessa tutkimuksessa havaittiin aivojen eri alueiden aktivaatiota jo hieman kuulokynnystä pienemmillä tasoilla. Havainnon yhteydestä terveysvaikutuksiin ei ole tietoa. Tuloksen vahvistamiseksi tarvitaan lisätutkimusta. Toisessa fMRI:ta hyödyntäneessä tutkimuksessa havaittiin kuuloai-

vokuoren aktivaatiota vasta kuulokynnyksen yläpuolella. Infraäänen vaikutuksista koehenkilöiden kognitiivisiin toimintoihin ei saatu viitteitä fMRI:n avulla.

Koe-eläintutkimuksilla on selvitetty muun muassa infraäänen vaikutuksia kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään, kognitiivisiin toimintoihin, sydämeen ja verenkiertoelimistöön sekä aivotoimintaan. Viitteitä vaikutuksista kuuloon ja vestibulaariseen järjestelmään on saatu pääsääntöisesti hyvin suurilla äänenpainetasoilla. Voimakkaan infraäänen on havaittu heikentävän marsujen Cortin elimen värekarvojen toimintaa, aiheuttavan tuhoja sisäkorvassa ja vaikuttavan vestibulaarisen järjestelmän toimintaan. Samansuuntaisia tuloksia on saatu myös tsintilloilla. Sisäkorvan muutoksia havaittiin enemmän, kun altistus kasvatettiin entisestään. Yhdessä tutkimuksessa löydettiin vaikutuksia marsujen kuuloon jo hyvin pienellä tasolla (60–65 dB / 5 Hz).

Äänenpaineeltaan suuren infraäänialtistuksen on havaittu vaikuttavan rottien kognitiivisiin toimintoihin kuten aktiivisuuteen, suorituskykyyn, seksuaaliseen käyttäytymiseen ja muistiin. Hyvin voimakas infraääni (160 dB / 10 Hz) heikensi yhdessä tutkimuksessa reesusapinoiden kykyä säilyttää tasapaino. Voimakkaan infraäänen (130 dB / 5 Hz) on lisäksi havaittu vaikuttavan rottien sydämeen ja verenkiertoelimistöön muun muassa muuttamalla sydämen syketaajuutta ja vaikuttamalla sydämen lihassolujen apoptoosiin.

Infraäänen vaikutuksista rottien aivotoimintaan on saatu viitteitä suurilla äänenpainetasoilla (90–140 dB). Tutkimuksissa on muun muassa tarkasteltu infraäänen vaikutuksia rottien hippokampukseen havainnoidulla N-metyyli-D-aspartaatin ilmentymistä, kalsiumionien konsentraatiota, neuronien  $Ca^{2+}$ -tasoja ja pykäläpöimun (dentate gyrus) neurogeneesiä. Osa havaituista muutoksista palautui viikkojen kuluttua altistuksesta.

Infraäänen vaikutuksia soluihin on tarkasteltu vain muutamassa tutkimuksessa. Käytetyt äänenpainetasot ovat olleet suuria (130 dB / 5 Hz tai 16 Hz). Tutkimuksissa on havaittu altistuksen aiheuttavan muun muassa erilaisten proteiinien ilmentymisen lisääntymistä, solujen aktivoitumista, glutamaatin vapautumista, biokemiallisten tekijöiden muutoksia ja neuronien aksonaalista rappeumaa. Solututkimuksia on tehty hyvin vähän ja tutkimuksissa on tarkasteltu monenlaisia tekijöitä, joten saaduista havainnoista ei voi vetää johtopäätöksiä.

Äänenpainetasoltaan pienen infraäänen haitallisista terveysvaikutuksista ei ole saatu näyttöä kokeellisten ihmistutkimusten, koe-eläin- ja solututkimusten avulla. Joissain tutkimuksissa on saatu viitteitä jo kuulokynnyksestä pienemmillä tasoilla, muun muassa koehenkilöiden aivotoimintaan ja marsujen kuuloon. Infraäänen pitkäaikaisvaikutuksia ei ole juuri tutkittu. Näistä syistä lisätutkimukselle on tarvetta.

## 5.3 Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänien terveys- ja hyvinvointivaikutukset

Anu Turunen, THL

### 5.3.1 Havainnoivat tutkimukset

Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänien vaikutuksia terveyteen ei ole toistaiseksi tutkittu epidemiologisilla menetelmillä siten, että altistumista olisi mitattu. Syinä tähän ovat todennäköisesti mittausmenetelmien haasteellisuus ja se, ettei infraääntä ole pidetty uhkana terveydelle niillä äänenpainetasoilla, joita esiintyy elinympäristössä. Muutamissa uusimmissa tuulivoimaloiden terveysvaikutuksiin keskittyneissä epidemiologisissa tutkimuksissa on kuitenkin tarkasteltu itse raportoidun oireilun yleisyyttä eri etäisyyksillä tuulivoimaloista tai eri äänenpainetasoilla. Sekä etäisyyden lähimpään tuulivoimalaan että mallinnetun laajakaistaisen äänen äänenpainetason voidaan ajatella edustavan jossain määrin myös altistumista tuulivoimaloiden tuottamalle infraäänelle.

Kanadalaisessa poikkileikkaustutkimuksessa (n=1 238) mallinnettu A-äänitaso (<25, 25–30, 30–35, 35–40, 40–46 dB) ei ollut yhteydessä migreenin, kroonisen kivun, tinnituksen ja huimauksen yleisyyteen tuulivoima-alueiden ympäristössä (≤11 km). Osa turbiineista oli pienehköjä, mutta keskimääräinen nimellisteho oli siitä huolimatta 2 MW ja kahdella alueella oli yhteensä 399 turbiinia (Michaud et al., 2016b). Tanskalaisessa poikkileikkaustutkimuksessa (n=454) etäisyys tuuliturbiineista (<0,5, 0,5–1, 1–2, >2 km) tai turbiinien määrä kilometrin säteellä asuinrakennuksesta ei ollut yhteydessä päänsärkyyn, pahoinvointiin, epätavanomaiseen uupumukseen, keskittymisvaikeuksiin ja huimaukseen tuulivoima-alueiden läheisyydessä (≤9 km) (Blanes-Vidal & Schwartz, 2016). Tämän tutkimuksen osalta on kuitenkin huomiotavaa, että tutkimusalueilla osa tuuliturbiineista on nimellisteholtaan hyvin pieniä ja keskimääräinen nimellisteho oli 0,8 MW. Huomionarvoista on myös, että kun altisteena oli epätavanomaisempi turbiinien määrä kilometrin säteellä asuinrakennuksesta, altistukseen liittyvän riskiestimaatti oli kohonnut kaikissa tilastollisissa malleissa epätavanomaisen uupumuksen (OR=1,28–1,35), päänsärkyyn (OR=1,22–1,26) ja huimauksen (OR=1,17–1,24) osalta. Riskiä ei näyttänyt olevan, kun altisteena käytettiin etäisyyttä lähimmästä turbiinista (taulukko 13).

Puolalaisessa (n=1 277, 2 km:n säteellä lähimmästä turbiinista) (Mroczek et al., 2015) ja amerikkalaisessa (n=62, turbiinien nimellisteho 1,5 MW, keskimääräinen etäisyys turbiineista <580 m) (Magari et al., 2014) tutkimuksissa oli kuvattu erilaisten oireiden yleisyyttä aineistossa. Puolalaisessa aineistossa päänsärkyyn yleisyys oli 42 %, uupumuksen yleisyys 36 % ja unihäiriöiden yleisyys 28 %, kun amerikkalaisessa aineistossa vastaavat osuudet olivat 19 % (10–31), 18 (8–27) ja 26 % (15–37) eli päänsärkyyn ja uupumuksen osalta yleisyydessä oli isoja eroja alueiden välillä.

**Taulukko 13.** Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistut alkuperäistutkimukset tuulivoimamelun ja oireilun välisestä yhteydestä.

Viite, lehti	Tutkittavat, maa, tuulivoimaloiden teho	Altiste, vaste	Päätulos	Huomiot
Blanes-Vidal & Schwartz 2016 Neurotoxicol Teratol	454 henkilöä (46 % naisia) 0,17–9 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista kuudella 12x12 km alueella Tansassa (kahden kyselyä edeltäneen vuoden aikana tuulivoima-alueen tuli olla toiminnassa vähintään 12 kk) Turbiinit 0,11–3,6 MW, keskimäärin 0,8 MW	Etäisyys lähimmästä tuulturbiinista: <500 m, 500–1 000 m, 1 000–2 000 m, >2 000 Kysely: selittämätön oireilu, ärsytys-/hengitysoireilu Kyselyn todellinen tarkoitus pyrittiin peittämään.	Etäisyys lähimpään tuulturbiiniin ei ollut yhteydessä selittämättömään oireiluun.  Alitseaena Log10 asuinrakennuksen etäisyydelle lähimmästä turbiinista (OR: 95 % CI) Malli 1: Pahoinvointi <b>0,44</b> : 0,09–2,07 Epätavanomainen väsymys <b>0,38</b> : 0,15–1,00 Päänsärky <b>0,45</b> : 0,20–1,05 Keskitymisvaikeudet <b>0,26</b> : 0,08–0,83 Huimaus <b>0,39</b> : 0,14–1,08  Alitseaena turbiinin määrä 1 000 metrin säteellä asuinrakennuksesta (OR: 95 % CI) Malli 1: Pahoinvointi <b>0,98</b> : 0,59–1,63 Epätavanomainen väsymys <b>1,35</b> : 1,07–1,70 Päänsärky <b>1,26</b> : 1,00–1,58 Keskitymisvaikeudet <b>1,14</b> : 0,86–1,51 Huimaus <b>1,24</b> : 0,95–1,61	Osa turbiineista hyvin pieniä Malli 1: vakioitu sosio-demografisilla muuttujilla Malli 4: vakioitu sosio-demografisilla muuttujilla ja potentiaalisilla sekoittavilla tekijöillä (häiritsevyys, terveystietoisuuskäsitteet, käyttäytymisen, kielteinen asenne tuulivoimaloita kohtaan, tuulivoimamelun kokeminen häiritseväksi)  Huom. epätavanomaisen väsymyksen, päänsärlyn ja huimauksen osalta esitimaattit ovat 1,29, 1,22 ja 1,24 myös mallissa kolme.

<p>Michaud et al. 2016b J Acoust Soc Am Community Noise and Health Study (CNHS)</p>	<p>1 238 henkilöä (606 miestä, 632 naista), 18–79-vuotiaita 0,25–11,2 km:n etäisyydellä lähimmästä turbiinista Lounais-Ontario (315 turbiinia) ja Prince Edward Island (84 turbiinia), Kanada Turbiinit 0,66–3 MW, keskimäärin 2 MW</p>	<p>Mallinnettu äänenpainetaso: &lt;25, 25–30, 30–35, 35–40, 40–46 (L<sub>A,eq</sub>) Haastattelukysely: oireet, krooniset sairaudet</p>	<p>Tuulivoimamelu ei ollut yhteydessä itse raportoituun oireiluun. Migreenin yleisyys, % (p=0,23): &lt;25 dB: 21 25–30 dB: 25 30–35 dB: 18 35–40 dB: 26 40–46 dB: 24 Tinnituksen yleisyys, % (p=0,76): &lt;25 dB: 25 25–30 dB: 19 30–35 dB: 23 35–40 dB: 25 40–46 dB: 23 Huiituksen yleisyys, % (p=0,26): &lt;25 dB: 23 25–30 dB: 17 30–35 dB: 21 35–40 dB: 22 40–46 dB: 25</p>	<p>Kroonisen kivun yleisyys, % (p=0,90): &lt;25 dB: 24 25–30 dB: 24 30–35 dB: 25 35–40 dB: 23 40–46 dB: 25 Rauhoittavien/lunilääkkeiden käytön yleisyys, % (p=0,25): &lt;25 dB: 13 25–30 dB: 15 30–35 dB: 12 35–40 dB: 11 40–46 dB: 10</p>	<p>Oireilun yleisyyttä ei ole ilmoitettu etäisyysohyykkeittäin. Turbiinien nimellistehoja ei ole ilmoitettu.</p>
<p>Mroczek et al. 2015 Int J Environ Res Public Health</p>	<p>1 277 henkilöä (55 % naisia) 2 km:n säteellä lähimmästä tuuliturbiinista toimivassa, rakenteilla olevassa tai suunnitella olevalla tuulivoima-alueella, Puola</p>	<p>Etäisyys tuulivoima-alueesta: ≤700, 701–1 000, 1 001–1500, 1 501–2 000 m Tuulivoima-alueen tila: rakenteilla, suunnitella, valmis Kysely: elämäntilaisuus SF-36v2 (puolalainen versio)</p>	<p>Oireiden/sairauksien yleisyyksiä (%) aineistossa: kohonnut verenpaine: 27 päänsärky: 42 hermostuneisuus: 42 selkäsärky: 40 vakava uupumus: 36 vihan tunteet: 31 ärsyyntyneisyys: 30 unihäiriöt: 28 ahdistuneisuuteen liittyvät unihäiriöt: 16</p>	<p>Oireilun yleisyyttä ei ole ilmoitettu etäisyysohyykkeittäin. Turbiinien nimellistehoja ei ole ilmoitettu.</p>	

THL:n toteuttamassa kyselytutkimuksessa (n~1 200) viiden tuulivoima-alueen ympäristössä eri puolilla Suomea kysyttiin myös yleisluonteisen oireilun esiintymistä. Kysely ei profiloitunut pelkäsi tuulivoimamelukyselyksi, vaan siinä kysyttiin laajasti myös muista ympäristöaltisteista. Tutkimusalueilla olevien tuuliturbiinien nimellisteho vaihteli välillä 2–4,5 MW. Tutkimuksen tuloksia ei ole vielä julkaistu kansainvälisessä vertaisarvioidussa tieteellisessä lehdessä, mutta koska kysymyksessä on ainoa suomalaistutkimus, jossa on kysytty mm. oireilua, tulosten esittäminen tässä on perusteltua. Etäisyys lähimmästä tuuliturbiinista (<2,5, 2,5–5, 5–10 km) ei ollut yhteydessä päänsäryn, huimauksen, pahoinvoinnin, korvien soimisen/tinnituksen, korvien lukkiutumisen/paineen tunteen, sydämen rytmihäiriöiden, uupumuksen/ylirasittuneisuuden, unihäiriöiden, ahdistuneisuuden tai stressin yleisyyteen (Turunen et al., 2016).

Osana tätä selvitystä mallinnettiin äänenpainetasot edellä kuvattuun tutkimukseen osallistuneiden osoitteisiin ja näiden yhteyttä terveyteen tutkittiin tarkemmin. Melumallinnukset tehtiin Ympäristöhallinnon ohjeen 2/2014 ”Tuulivoimaloiden melun mallintaminen” mukaisilla laskentaparametreilla ja -menetelmillä (kts. kappale 4.2.4.). Mallinnetut äänenpainetasot (<30, 30–32, >32–34, >34 dB) eivät olleet yhteydessä oireiluun, sairauksien (kohonnut verenpaine, sydämen vajaatoiminta, diabetes) yleisyyteen tai lääkkeiden (särkyläkkeet, unilääkkeet, rauhoittavat tai masennuslääkkeet, verenpainelääkkeet) käyttöön (taulukko 14). Äänenpainetason ja oireilun, sairauksien ja lääkityksien välisiä yhteyksiä tutkittiin logistisella regressioanalyysillä. Mallinnuksessa huomioitiin iän, sukupuolen, siviilisäädyn, koulutuksen, työtilanteen, tupakoinnin, alkoholinkäytön, liikunnan, painoindeksin ja mahdollisen heikentyneen kuulon vaikutus. Sairauksista voitiin ottaa mukaan vain ne, joiden yleisyys oli riittävä vyöhykkeittäin tehtävään tarkasteluun.

Tuulivoimaloiden tuottaman äänen yhteyttä terveyteen voidaan arvioida myös vertailemalla tuulivoima-alueiden lähellä olevaa väestöä muualla asuvaan väestöön. Edellä kuvatussa THL:n kyselytutkimuksessa oireilun yleisyys oli samaa suuruusluokkaa kuin pääkaupunkiseudulla perusväestössä toteutetussa Ympäristöterveyskyselyssä, jossa kysymykset olivat samoja (taulukko 15). Oireilun yleisyys ei näyttänyt poikkeavan myöskään yleisyyksistä suomalaisissa väestötutkimuksissa. Esimerkiksi päänsäryn yleisyys viimeksi kuluneen kuukauden aikana oli tuulivoimaloiden ympäristössä 41–46 % ja suomalaisissa AVTK 2014, FINRISKI 2012 ja ATH 2010 -tutkimuksissa 42–55 %. Nukahtamisvaikeuksista kärsi edeltävän kuukauden aikana 39–45 % tuulivoima-alueiden ympäristössä asuvista, kun suomalaisessa perusväestössä yleisyys oli 24–53 %. Pahoinvoinnin yleisyys puolestaan oli 5–9 % tuulivoimaloiden ympäristössä ja noin 10 % FINRISKI 2012 - tutkimuksessa. Uupumuksen osalta vastaavat osuudet olivat 49–51 % ja 75 %. Huimauksen yleisyys oli tuulivoimatutkimuksessa 20–23 % ja lähes 50 % ATH 2010 -tutkimuksessa.

**Taulukko 14.** Oireilun, sairauksien ja lääkkeiden käytön yleisyys viiden tuulivoima-alueen läheisyydessä Suomessa.

	Mallinnettu äänenpainetaso ulkona ( $L_{A,eq}$ ) <sup>1</sup>				p-arvo <sup>2</sup>
	<30 dB	30–32 dB	>32–34 dB	>34 dB	
	% (n)	% (n)	% (n)	% (n)	
<b>Onko Teillä viimeksi kuluneen kuukauden (30 pv) aikana ollut seuraavia oireita tai vaivoja? Kyllä</b>					
Päänsärky ( <i>n</i> =1 119)	45 (346)	40 (43)	46 (51)	46 (45)	0,82
Pahoinvointi ( <i>n</i> =1 019)	8,7 (63)	8,2 (8)	2,9 (3)	5,4 (5)	0,18
Huimaus ( <i>n</i> =1 068)	22 (167)	22 (22)	22 (24)	17 (16)	0,72
Korvien soiminen/tinnitus ( <i>n</i> =1 082)	28 (218)	21 (21)	33 (37)	29 (28)	0,23
Korvien lukkiutuminen/paineen tunne ( <i>n</i> =1 023)	15 (107)	12 (12)	15 (15)	16 (15)	0,85
Sydämen rytmihäiriöt ( <i>n</i> =1 075)	19 (150)	13 (13)	13 (14)	18 (17)	0,22
<b>Ajatelkaa viimeksi kulunutta kuukautta (30 pv). Ilmoittakaa, kuinka usein kysytty asia on ollut mielessänne tai oire on vaivannut teitä? Silloin tällöin tai useammin</b>					
Uupumus/ylirasittuneisuus ( <i>n</i> =1 206)	50 (435)	46 (51)	53 (63)	51 (52)	0,79
Nukahtamisvaikeudet ( <i>n</i> =1 213)	42 (369)	44 (49)	34 (41)	41 (43)	0,42
Liian aikainen herääminen ( <i>n</i> =1 197)	54 (468)	45 (51)	50 (60)	54 (55)	0,28
Ahdistuneisuus ( <i>n</i> =1 142)	19 (159)	20 (21)	18 (21)	14 (14)	0,65
Stressi ( <i>n</i> =1 153)	33 (274)	30 (32)	27 (31)	32 (32)	0,67
<b>Onko Teillä viimeksi kuluneen vuoden (12 kk) aikana ollut mitään seuraavia lääkärin toteamia tai hoitamia sairauksia? Kyllä</b>					
Kohonnut verenpaine ( <i>n</i> =1 220)	41 (363)	42 (47)	44 (53)	42 (42)	0,94
Sydämen vajaatoiminta ( <i>n</i> =1 081)	9,4 (73)	9,4 (10)	12 (13)	6,6 (6)	0,59
Diabetes ( <i>n</i> =1 093)	14 (113)	13 (14)	13 (14)	14 (13)	0,98
<b>Milloin viimeksi olette käyttänyt seuraavia lääkkeitä? Vähintään edeltävän vuoden aikana</b>					
Särkylääkkeitä päänsärkyyn ( <i>n</i> =1 148)	67 (558)	67 (73)	70 (78)	61 (60)	0,57
Särkylääkkeitä nivel- tai lihassärkyyn ( <i>n</i> =1 165)	61 (517)	56 (59)	66 (76)	56 (54)	0,38
Särkylääkkeitä muuhun särkyyn ( <i>n</i> =1 077)	49 (384)	46 (48)	40 (42)	48 (44)	0,35
Unilääkkeitä ( <i>n</i> =1 097)	15 (121)	5,9 (6)	13 (14)	11 (10)	0,06
Rauhoittavia tai masennuslääkkeitä ( <i>n</i> =1 085)	9,2 (72)	3,9 (4)	5,7 (6)	4,4 (4)	0,10
Verenpainelääkkeitä ( <i>n</i> =1 200)	41 (356)	41 (46)	42 (51)	41 (41)	1,00

<sup>1</sup> suurin äänenpainetaso 20 m säteellä vastaajan kotiosoitteen koordinaateista (ISO9613-2)<sup>2</sup>  $\chi^2$ -testi, verrattu vyöhykkeiden välistä eroa



**Taulukko 15. Oireilun yleisyys THL:n Asuin ympäristökyselyssä (nk. Tuulivoimakysely) ja suomalaisissa väestöaineistoissa.**

	Asuin ympäristökysely 2015–16 n~1 200 ≥18-vuotiaita (ei yläikärajaa)		Ympäristöterveyskysely 2015–16 n~7 000 ≥25-vuotiaita		AVTK 2014 n=2 620 15–64-vuotiaita	FINRISKI 2012 n=4 900–6 400 25–74-vuotiaita	EVTK 2011 65–84-vuotiaita	ATH 2010 n~14 800 20–65- vuotiaita
	<2,5 km <sup>1</sup>	2,5–5 km <sup>1</sup>	>5–10 km <sup>1</sup>				miehet n=853	naiset n=870
Oireet ja vaivat viimeisen 30 päivän aikana kyllä, %								
Päänsärky	42,7	46,2	41,2	47,2	42,2	52,5 <sup>3</sup>	10,9	19,3
Pahoinvointi	5,2	8,4	9,4	10,9	-	9,7	-	6,0 <sup>5</sup>
Huimaus	20,2	22,7	21,2	22,6	-	-	9,8	16,3
Korvien soiminen (tinnitus)	28,7	25,2	30,6	23,4	-	-	-	-
Korvien lukkiutuminen, paine	13,9	12,3	17,6	-	-	-	-	-
Sydämen rytmihäiriöt	14,7	17,8	21,2	13,9	-	-	-	-
Uupumus ja yllärituneisuus	50,0	50,5	49,1 <sup>2</sup>	56,0 <sup>2</sup>	-	75,4 <sup>3</sup>	-	-
Nukahtamisvaikeudet	38,8	44,7	40,1 <sup>2</sup>	39,0 <sup>2</sup>	23,9 <sup>4</sup>	52,5 <sup>3,4</sup>	17,8	26,6 <sup>4</sup>
Liian aikainen herääminen	50,9	54,6	53,1 <sup>2</sup>	53,4 <sup>2</sup>	-	-	-	-
Ahdistuneisuus	16,8	20,2	19,1 <sup>2</sup>	28,1 <sup>2</sup>	-	-	-	-
Stressi	29,9	34,9	30,7 <sup>2</sup>	41,2 <sup>2</sup>	-	-	-	-

<sup>1</sup> etäisyys lähimmästä tuulivoimalasta

<sup>2</sup> silloin tällöin tai useammin

<sup>3</sup> joskus tai usein

<sup>4</sup> unettomuus

<sup>5</sup> oksentelu

Tuulivoimamelun terveysvaikutuksia selvittäviä laajojakin tutkimuksia on käynnissä tai alkamassa eri maissa. Tanskassa on parhaillaan valmistumassa Danish Cancer Societyn toteuttama valtakunnallinen rekisteritutkimus, jossa selvitetään rekisteriaineistojen perusteella tuulivoimamelualtistuksen yhteyttä diabetekseen, sydän- ja verisuonisairauksiin, syntymäpainoon ja sikiöikään sekä verenpainelääkkeiden, unilääkkeiden ja masennuslääkkeiden käyttöön vuodesta 1982 alkaen. Tutkimusta varten on tunnistettu yli 210 000 henkilöä, jotka asuvat 3 km:n säteellä kokonaiskorkeudeltaan vähintään 75 m olevasta turbiinista (Poulsen & Sorensen, 2016). Myös Australiassa on alkamassa mittava hallituksen alaisen National Health and Medical Research Councilin rahoittama tutkimus, jossa selvitetään sekä kokeellisessa että havainnoivassa tutkimusasetelmassa tuulivoimamelualtistuksen yhteyttä unen laatuun, tasapainovaikutuksiin, mielialaan sekä sydän- ja verisuonisairauksiin (National Health and Medical Research Council, 2016). Lisäksi WHO on laatimassa uutta melusuositusta ”Environmental Noise Guidelines for the European Region”, jossa otetaan kantaa myös tuulivoimameluun.

### 5.3.2 Kokeelliset tutkimukset

Tuulivoimaloiden tuottamaa infraääntä on tutkittu myös kokeellisessa asetelmassa. Uudessa-Seelannissa toteutetuissa sokkoutetuissa kuuntelukokeissa (n=60–66) tutkittavat satunnaistettiin kahteen ryhmään, joista toiselle ryhmälle luotiin kielteinen ja toiselle ryhmälle myönteinen ennako-odotus tuulivoimalan tuottaman äänen, erityisesti infraäänien terveysvaikutusten suhteen. Tämän jälkeen molemmat ryhmät altistettiin kuuloalueen alapuolella olevalle infraäänelle (9 Hz, 50,4 dB) ja kuultavissa olevalle tuulivoimalan äänelle (43 dB). Tutkittavat, joilla oli positiivinen ennako-odotus, kokivat äänen vähemmän häiritseväksi kuin tutkittavat, joilla ennako-odotus oli kielteinen. Kielteisen ennako-odotuksen ryhmässä erityisesti meluherkäksi itsensä kokevat kokivat äänen häiritseväksi, mutta positiivisen ennako-odotuksen ryhmässä meluherkkyys ei lisännyt häiritsevyyttä (Crichton et al., 2015). Tutkittavilta kysyttiin kyselyllä myös välitöntä oireilua (mm. huimaus, paineen tunne korvassa, pahoinvointi) ja mielialaa (mm. rauhallisuus, rentoutuneisuus, iloisuus, huolestuneisuus, levottomuus, ahdistuneisuus) sekä ennen altistusta että altistuksen jälkeen. Kielteisen ennako-odotuksen ryhmässä raportoivat oireiden määrän ja voimakkuuden lisääntymistä ja mielialan huononemista altistuksen seurauksena, kun taas myönteisen ennako-odotuksen ryhmässä oireilu pikemminkin väheni ja mieliala parani (Crichton et al., 2014b). Välitöntä oireilua ja mielialaa tutkittiin myös siten, että kaikki tutkittavat altistettiin kielteiselle ennako-odotukselle ja tutkittavat jaettiin kahteen ryhmään sen mukaan millainen selitys reaktioille annettiin. Toiselle ryhmälle reaktiot selitettiin nocebo-vaikutuksella ja toiselle selitykseksi esiteltiin patofysiologinen mekanismi infraäänialtistuksesta oireisiin. Oireiden esiintymistä ja mielialaa kysyttiin ennen altistusta ja altistuksen jälkeen. Oireilu väheni ryhmässä, jolle tarjottiin nocebo-selitys (Crichton & Petrie, 2015). Lisäksi välitöntä oireilua (päänsärky, paineen tunne korvassa, korvien soiminen, ihon kutina, sisäkorvatuntemukset, huimaus, paineen tunne rintakehässä, värinä kehossa, nopea sydämen syke, pahoinvointi, väsymys, voimattomuuden tunne sekä erilaiset vähemmän yleisesti infraäänialtistukseen liitetyt oireet kuten erilaiset kivut, lihasjäykkyys ja tunnottomuus eri puolilla kehoa) tutkittiin altistamalla kielteisen ja myönteisen ennako-odotuksen ryhmiin satunnaistetut tutkittavat (n=54) infraäänelle (5 Hz, 40 dB) ja näennäiselle infraäänelle (ei mitään ääntä). Altistuksen aikana mitattiin verenpainetta ja sydämen syketaajuutta. Kokeessa havaittiin, että niillä tutkittavilla, jotka odottivat infraäänien aiheuttavan oireita, koettujen oireiden määrä ja voimakkuus lisääntyivät lähtötasoon verrattuna, altistettiinpa tutkittavia todelliselle tai näennäiselle infraäänelle. Samaa koetun oireilun lisääntymistä lähtötasosta ei tapahtunut ryhmässä, jolle luotiin neutraali ennako-odotus. Suoria vaikutuksia verenpaineeseen tai sydämen syketaajuuteen ei havaittu (Crichton et al., 2014c). Italialainen tutkimusryhmä toisti uusiseelantilaisen ryhmän kokeen korkeammalla altistustasolla (n=72). Vapaaehtoiset altistettiin 0,8 Hz:n taajuiselle äänelle 91 dB:n äänenpainetasolla. Tässäkin tutkimuksessa altistuminen infraäänelle ei ollut yhteydessä

oireilun määrään tai voimakkuuteen, mutta kielteinen ennako-odotus puolestaan lisäsi oireilua. Tulos tukee nosebovaikutus-hypoteesia (Tonin et al., 2016).

Edellä kuvattujen kokeellisten tutkimusten tulokset siis osoittavat, että ennako-odotukset vaikuttavat voimakkaasti äänen kokemiseen häiritseväksi sekä oireiden kokemiseen. Niistä ei voida kuitenkaan vetää johtopäätöksiä infraäänen ja oireilun välisestä yhteydestä, koska altistuminen oli lyhytaikaista ja lisäksi uusiseelantilaisessa tutkimuksessa altistustaso oli hyvin pieni (9 Hz, 50,4 dB sekä 5 Hz, 40 dB).

### 5.3.3 Vertaisarvioidut katsaukset ja asiantuntijapaneelien raportit

Useissa tuulivoimamelun terveysvaikutuksia yhteen vetävissä vertaisarvioiduissa katsauksissa on otettu kantaa tuulivoimamelun tai sen sisältämän infraäänen suoriin terveysvaikutuksiin. Katsauksissa todetaan yksimielisesti, että suorista terveysvaikutuksista ei ole toistaiseksi näyttöä ja useissa mainitaan, että tuulivoimaloiden läheisyydessä infraäänen äänenpainetasot ovat kuuloalueen alapuolella. Muutamman katsauksen johtopäätöksissä nostetaan esille mahdolliset korva- ja/tai tasapainoelinvaikutukset ja fysiologinen herkkyys infraäänen vaikutuksille todeten, että mekanismeja ei tunneta tarpeeksi eikä vaikutusten mahdollisuutta voi sulkea pois. Vastaavasti muutamissa katsauksissa tuodaan esille myös häiritsevyyden kokemuksen, negatiivisten odotusten ja muiden vaihtoehtoisten selitysten osuus. Useissa mainitaan myös, että jatkotutkimukset ovat perusteltuja (taulukko 16).

Myös asiantuntijapaneelit ovat päätyneet raporteissaan edellä kuvattuihin päätelmiin. Asiantuntijapaneelit tuovat katsausartikkeleita vahvemmin esille, että kuuloalueen ulkopuolella olevalla infraäänellä ei uskota olevan terveysvaikutuksia eikä mikään tunnettu mekanismi selitä terveysvaikutuksia tuulivoimaloiden läheisyydessä vallitsevilla infraäänen äänenpainetasoilla (taulukko 17).

**Taulukko 16.** Vertaisarvioituissa lehdissä julkaistut katsaukset, joissa otetaan kantaa tuulivoimamelman sisältämän infraäänien terveysvaikutuksiin.

Viite, lehti	Katsauksessa käytetyt hakukriteerit	Katsauksessa tehdyt päätelemät	Huomiot
Harrison 2015 Int J Environ Health Res	-	Tyypillisessä tuulivoimalan tuottamassa äänessä, jonka keskiäänitaso on 45 dB ei voi olla pientaajuisia ääntä, jonka äänenpainetaso ylittäisi 60 dB. Tasapainoelimen stimulaatio terveellä aikuisella vaatii noin 110 dB:n äänenpainetason, joten stimulaatio on hyvin epätodennäköistä. Sisäkorvan sairauksista kärsivillä altistuminen yltää lähemmäs alentunutta stimulaatiokynnystä (n. 85 dB), mutta ei välttämättä vielä riitä aiheuttamaan stimulaatiota. Tasapainojärjestelmän aktivoitumisesta pientaajuiselle äänelle ja infra-äänelle altistuttaessa tiedetään vielä liian vähän, mutta tämänhetkisen tiedon mukaan tuuliturbiinisyndrooma ei ole biologisesti uskottava.	Ei-systemaattinen kirjallisuuskatsaus, lähteiden valintaa ei ole kuvattu. Kirjoittaja on lääkäri, joka on erikoistunut korva- ja kurkkutauteihin sekä neurobiologiaan ja kuuluu Council of Canadian Academies -neuvoston tuulivoimamelman terveysvaikutuksia arvioivaan asiantuntijajapaneeleihin.
Jeffery et al. 2014 Can J Rural Med	PubMed, Google Scholar: wind turbine health, wind turbine infrasound, wind turbine annoyance, low frequency noise Vuodesta 2000 eteenpäin	<b>Infra- tai pientaajuisen äänen terveysvaikutukset:</b> jonkin verran näyttöä Kuuloalueen ulkopuolella olevan infraäänien terveysvaikutuksia ei voida sulkea pois.	Toinen kirjoittaja kuuluu the Society for Wind Vigilancen asiantuntijaryhmään. Artikkelit on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.
Knopper et al. 2014 Front Publ Health	PubMed, Web of Science, Google: annoyance, noise, environmental change, sleep disturbance, epilepsy, stress, health effect(s), wind farm(s), infrasound, wind turbine(s), LFN, EMF, wind turbine syndrome, neighbourhood change	<b>Suorat terveysvaikutukset:</b> ei riittävästi näyttöä Nocebo-vaikutus saattaa olla yksi osatekijä koettujen terveysvaikutusten synnystä. Oikein sijoitetut tuuliturbiinit eivät näytä aiheuttavan terveyshaittoja.	Konsulttitoimiston tekemä
McCunney et al. 2014 J Occup Environ Med	PubMed, Google: wind turbines, wind turbines and health effects, infrasound, infrasound and health effects, low-frequency sound, wind turbine syndrome, wind turbines and annoyance, wind turbines and sleep disturbances	<b>Suorat terveysvaikutukset ja oireet:</b> ei selkeää ja johdonmukaista näyttöä <b>Infra- tai pientaajuisen äänen terveysvaikutukset:</b> ei näyttöä Infraäänien äänenpainetasot ovat selvästi kuuloalueen ulkopuolella tuulivoima-alueiden lähellä olevilla asuinalueilla. Infraäänien ei ole voitu osoittaa olevan terveysuhka tuulivoima-alueiden läheisyydessä asuville.	Murray & McMurry 2015 ovat kirjoittaneet kriittisen vastineen.
Rubin et al. 2014 Noise & Health	PubMed: (wind farm OR wind turbine OR infrasound) AND (psych* OR nocebo OR worry OR annoyance OR misattribution OR personality)	Vaihtoehtoisia selityksiä tuulivoimalan aiheuttamiksi oletetuille oireille ovat nocebo-vaikutus, väärä päättely ja lisääntynyt huomion kiinnittäminen oireisiin johtuen huolestuneisuudesta tai melun häiritsevyydestä.	Artikkeli on julkaistu lehdessä, joka ei ole tieteellisesti korkeatasoinen.

Schmidt & Klokner 2014 Plos One	PubMed, Web of Science, Google Scholar, other Internet sources: wind turbine(s) OR wind farm(s) AND health OR noise OR annoyance OR tinnitus OR vertigo OR epilepsy OR headache	<b>Suorat terveysvaikutukset:</b> ei selvää näyttöä (aihoastaan tapaustutkimuksia) Siedettävän äänitason ylärajaa näyttää olevan n. 35 dB $L_{A,eq}$ . Melusta häiriintyminen ja unihäiriöt ovat yhteydessä toisiinsa. Unihäiriöt saattavat johtaa negatiivisiin terveysvaikutuksiin. Tuulivoima-alueiden sijoittelussa varovaisuus on perusteltua. Pientaajuisten ja amplitudimoduloituneen äänen huomioiminen altistumisen arvioinnissa saattaisi johtaa erilaisiin johtopäätöksiin.	
Farboud et al. 2013 J Laryng Otol	PubMed, Google Scholar: wind turbine, infrasound, low frequency noise vuosina 2003–2013	<b>Infra- tai pientaajuisten äänen terveysvaikutukset:</b> jonkin verran näyttöä fysiologisista vaikutuksista korvaan Vaikutukset ovat biologisesti ja fysiologisesti uskottavia. Mekanismeja ei tunneta tarpeeksi hyvin, jotta yhteys oireiluun voitaisiin sulkea pois ja asiaa onkin syytä tutkia lisää. Yleisesti kuitenkin ajatellaan, että oireilu voisi johtua meluallistuksen aiheuttamasta stressistä.	
Kurpas et al. 2013 Ann Agric Environ Med	Web of Science, Google, Research Gate: wind farm, health effects	<b>Psykykinen ja fyysinen terveys:</b> ei näyttöä On todennäköisempää, että raportoidut oireet johtuvat häiriintymisestä kuin infraäänestä. Jalkotutkimukset ovat perusteltuja.	
Roberts & Roberts 2013 J Environ Health	PubMed: infrasound AND health effects, low-frequency noise AND health effects, low-frequency sound AND health effects, wind power AND noise, wind turbines, wind turbines AND noise	<b>Infra- tai pientaajuisten äänen terveysvaikutukset:</b> rajallista näyttöä fysisistä terveysvaikutuksista (värinäntuntemukset, uupumus, häiritsevyys, epämieltyttävät tuntemukset), mutta mekanismeja ei tunneta Vaatii lisätutkimuksia, jotta voidaan arvioida, onko tuulivoimaloiden tuottama ääni terveysriski.	
Bolin et al. 2011 Environ Res Lett	PubMed, PsycInfo, Science Citation Index, InterNoise ja Wind Turbine Noise-konferenssi-julkaisut, Google, Google Scholar	<b>Suorat terveysvaikutukset:</b> ei johdonmukaista näyttöä <b>Infra- tai pientaajuisten äänen terveysvaikutukset:</b> ei näyttöä yhteydestä vibroakustiseen sairauteen, tuuliturbinsyndroomaan tai haitallisiin sisäkorvavaikutuksiin	Perustuu vain muutamaaan tutkimukseen.
Knopper & Olsson 2011 Environ Health	Web of Science: annoyance, noise, environmental change, sleep disturbance, epilepsy, stress, health effect(s), wind farm(s), infrasound, wind turbine(s), low frequency noise, wind turbine syndrome, neighbourhood change Ei-tieteellinen kirjallisuus: health effects wind farms, health effects wind turbines, annoyance wind turbines, sleep disturbance wind turbines vuosina 2003–2011	<b>Suorat terveysvaikutukset - tieteellinen kirjallisuus:</b> ei näyttöä On mahdollista, että terveysvaikutukset ovat seurausta häiritsevyyden kokemuksesta. <b>Suorat terveysvaikutukset - ei-tieteellinen kirjallisuus:</b> itse raportoidut terveysvaikutukset ovat yhteydessä etäisyteen tuulivoimalasta ja infraääni on synynä raportoituin terveysvaikutuksiin	Konsulttitoimiston tekemä

**Taulukko 17.** Viranomaisten, tutkimuslaitosten ja järjestöjen julkaisemat raportit, joissa otetaan kantaa tuulivoimamelun sisältämän infraäänien terveysvaikutuksiin.

Viite, julkaisija	Raportissa tehdyt päätelmät	Huomioit
Council of Canadian Academies 2015, Kanada	<b>Suorat terveysvaikutukset</b> (esim. uupumus, tinnitus, huimaus, pahoinvointi, sydän- ja verisuonisairaudet, diabetes): Näyttö ei riitä arvioimaan kausaalisuhteen olemassaoloa. Aiheesta ei ole empiirisiä tutkimuksia. On kuitenkin epätodennäköistä, että tuulivoimaloiden tuottamat signaalit voisivat ylittää aktiivatiokynnystä ihmisillä.	
Merlin et al. 2015 National Health and Medical Research Council (NHMRC) 2015, Australia	<b>Suorat terveysvaikutukset:</b> ei johdonmukaista näyttöä Mekanismi, jolla infraääni ja pientaajuinen ääni voisi vaikuttaa terveyteen, ei ole selvä. Allistuksen ja fysiologisten reaktioiden (esim. verenpaine) välillä ei nähty johdonmukaista yhteyttä. Varsinaisia terveysvaikutuksia ei ole tutkittu. Yksittäiset havainnot saattavat olla seurausta sekoittuneisuudesta, harhaista tai sattumasta.	Systemaattinen katsaus
State Government Victoria 2013, Australia	Tuulivoimaloiden tuottama infraääni on selvästi kuulualueen ulkopuolella myös lähiasukkaiden osalta. Ei ole näyttöä siitä, että kuulualueen alapuolella äänellä voisi olla fysiologisia vaikutuksia ihmisen kehoon. Tämä koskee myös infraääntä.	
von Huerbein et al. 2013 University of Salford, UK	<b>Suorat terveysvaikutukset:</b> ei näyttöä Jos tuulivoimaloiden tuottama pientaajuinen ääni tai infraääni aiheuttaisi terveyshaittaa, mukana täytyisi olla jonkin toistaiseksi vahvistamaton mekanismi. Infraäänien äänenpainetasot tuulivoima-alueiden läheisyydessä eivät poikkea muista ympäristöistä, ja tuulivoimaloita enemmän infraääntä tuottavat liikenne ja muu ihmisen toiminta.	

<p>Ellenbogen et al. 2012 Massachusetts Department of Environmental Protection &amp; Massachusetts Department of Public Health, USA</p>	<p><b>Suorat terveysvaikutukset:</b> näyttö riittämättömää itsenäistä vaikutuksesta (ei häiritsevyyden tai unihäiriöiden kautta) Rajallinen epidemiologinen näyttö ei viittaa siihen, että tuulivoimamelu olisi yhteydessä kipuun, jäykkyyteen, diabetekseen, korkeaan verenpaineeseen, tinnitukseen, kuulon heikentymiseen, sydän- ja verisuonisairauksiin tai päänsärkyyn/migreeniin.</p> <p><b>Infra- tai pientaajuinen äänen terveysvaikutukset:</b> ei näyttöä vaikutuksesta tasapainojärjestelmään</p> <p>Jo noin 70 m:n päässä turbiinista infraäänen äänenpainetaso on niin pieni, ettei se riitä aiheuttamaan kuulon kautta välittyviä vaikutuksia, kuten värinän tuntemuksia kehossa tai paineentunnetta rintakehässä.</p> <p>Infraääni voi vahvistua (coupling) asunnon rakenteiden läpi edetessään ja tällöin asukkaat voivat aistia infraäänen rakenteiden värinää ja kokea sen epämiellyttäväksi. Tätä ilmiötä ei kuitenkaan ole toistaiseksi todennettu tuulivoimaloiden läheisyydessä. On myös epätodennäköistä, että seisminen maaperän värinä tuulivoima-alueiden läheisyydessä voisi edetä ja rakenteisiin.</p> <p>Infraäänen äänenpainetasot lähellä tuulivoima-alueita voivat olla niin suuria, että sisäkorvan ulompien karvasolujen stimulaatioiokynnys ylittyy. Esitettyä mekanismia ei kuitenkaan täysin tunneta, eikä tuulivoimaloiden tuottaman infraäänen tasapainojärjestelmän kautta välittyvästä vaikutuksesta aivoihin ole toistaiseksi näyttöä.</p> <p><b>Tuuliturbiinisyndrooma:</b> ei näyttöä</p> <p>Suurimmat infraäänitasot tuuliturbiinien läheisyydessä (100 m:n etäisyydellä) ovat olleet alle 90 dB (5 Hz).</p>	<p>Chief Medical Officer of Health (CMOH) 2010, Kanada</p>	<p><b>Suorat terveysvaikutukset</b> (esim. huimaus, päänsärky, unihäiriöt): ei näyttöä</p> <p>Tuulivoimaloiden ääni tavanomaisilla etäisyyksillä asuinrakennuksista ei riitä aiheuttamaan kuulon heikentymistä tai muita suoria terveysvaikutuksia.</p> <p>Pientaajuinen melu nykyaikaisista tuuliturbiineista on selvästi alle äänenpainetaso, jonka tiedetään aiheuttavan terveysvaikutuksia. Ei myöskään ole tieteellistä näyttöä siitä, että pientaajuinen tuulivoimamelun aiheuttama värinä voisi aiheuttaa haittaa terveydelle.</p>	<p>Colby et al. 2009 American Wind Energy Association &amp; Canadian Wind Energy Association</p>	<p><b>Suorat terveysvaikutukset:</b> Tuuliturbiinien ääni ei ole riski kuulolle tai muulle terveydelle.</p> <p>Tuuliturbiinien kuulokynnyksen alittava infra- tai pientaajuinen ääni ei ole riski terveydelle. Tuuliturbiinisyndroomaksi kutsuttu oirekokonaisuus johtuu todennäköisesti häiritymisen kautta välittyvistä vaikutuksista. Vibroakustinen sairaus on epäuskottava niillä äänenpainetasoilla, joita tuulivoimaloiden läheisyydessä on.</p> <p>Ei-tieteellisissä tapausselesteissa esitetyt väitteet eivät anna riittäviä perusteita jatko tutkimuksiin.</p>	<p>Herbrandson &amp; Messing 2009 Minnesota Department of Health, Minnesota Government, USA</p>	<p>On esitetty, että osa koetuista haitoista johtuisi tasapainojärjestelmän ja autonimisen hermoston aktiivisista, mutta näyttö tästä on vähäistä.</p> <p>Tavanomaisissa olosuhteissa tuulivoimaloiden tuottama pientaajuinen ääni ei ole helposti havaittavissa enää yli 800 m:n päässä lähteestä.</p>	<p>Roberts &amp; Roberts 2009 Exponent Inc. &amp; Wisconsin Public Service Commission, USA</p>	<p><b>Suorat terveysvaikutukset:</b> ei näyttöä, tutkimuksia aiheesta on vähän</p> <p>Toinen julkaisija on konsulttitytys.</p>
---	---	--	---	--	--	---	---	--	--

### 5.3.4 Muut julkaisut

Huoli tuulivoimaloiden tuottaman melun terveysvaikutuksista perustuu todennäköisesti suurelta osin yhdysvaltalaisen lääkärin Nina Pierpontin julkaisemaan kirjaan, jota varten hän haastatteli puhelimitse 23 tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvaa ja oireita kokevaa henkilöä (Pierpont, 2009). Kirjassa tuuliturbiinisyndroomaksi nimetty oirekonaisuus kattaa suuren määrän yleisoireita, joita ovat esimerkiksi paineen ja sykkimisen tunne korvissa, väsymys, uupumus, päänsärky, pahoinvointi, matkapahoinvoinnin tyyppiset oireet, huimaus, levottomuus, sekavuus, keskittymisvaikeudet, sydämen tykytys, näkö- ja/tai kuulohäiriöt, tinnitus ja unihäiriöt. Syyksi oireistolle Pierpont esittää pientaajuisen ja infraäänien aiheuttamaa sisäkorvan tasapainoelimen stimulaatiota. Tuuliturbiinisyndrooma nousi kirjan ansiosta suuren yleisön tietoisuuteen ja kirjaan viitataan usein tuulivoimaloiden terveysvaikutuksiin liittyvän julkisen keskustelun yhteydessä. Kysymyksessä ei kuitenkaan ole tieteellisiä kriteerejä noudattaen tehty eikä kriittisesti vertaisarvioitu tutkimus, vaan joukko tapausselostuksia, joten sitä ei voida pitää näyttönä tuulivoimameluallistuksen ja oireilun välisestä yhteydestä. Kukaan ei kiistäne sitä, etteivätkö tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvat kokisi todellista oireita, mutta toistaiseksi ei ole näyttöä siitä, että oireilu aiheutuisi tuulivoimaloiden tuottamasta infraäänestä.

Kanadalaiset lääkäri Robert McMurtry ja apteekkari, the Society for Wind Vigilancen asiantuntijaryhmän jäsen Carmen Krogh ovat kehittäneet diagnostiset kriteerit tuulivoimaloiden läheisyydessä koetuille terveyshaitoille (McMurtry & Krogh, 2014). Kriteerien mukaan tuulivoimaloiden läheisyydessä asuminen on todennäköinen syy oireiluun, jos henkilö asuu korkeintaan 10 km:n päässä tuulivoimaloista, terveydentila on muuttunut tuulivoimaloiden käynnistymisen jälkeen tai niiden toiminnan aikana (oireilun alkamiseen voi mennä puoli vuotta altistumisen alusta), oireet helpottuvat yli 10 km:n päässä tuulivoimaloista, ja oireet palaavat tuulivoimaloiden läheisyyteen palatessa. Toissijaisena kriteerinä on, että edellisten lisäksi vähintään kolme seuraavista alkaa/pahenee: heikentynyt elämänlaatu, univaikeudet, häiriintyminen ja siitä seuraava psyykinen stressi sekä halu lähteä pois kodista uni- tai palautumisvaikeuksien vuoksi. Kolmantena kriteerinä todennäköiselle diagnosoille on vähintään kolmen seuraavan oireen ilmaantuminen tai paheneminen tuulivoimaloiden käynnistymisen jälkeen: tinnitus, huimaus, tasapaino-ongelmat, korvakipu, pahoinvointi, päänsärky, keskittymisvaikeudet, muistivaikeudet, korkea verenpaine, sydämentykytys, sydämen laajentuma, mielialaongelmat (masennus tai ahdistuneisuus), turhautumisen tunteet, huolestuneisuus, vihan tunteet, vaikeudet diabeteksen hoitotasapainossa, kilpirauhasongelmat, uupumus ja uneliaisuus. Jos edellä kuvatut kriteerit täyttyvät, eikä vaihtoehtoista selitystä löydy terveydentilasta tai olosuhteista kotona, syynä oireiluun ovat kriteerien laatijoiden mukaan oletettavasti tuulivoimaloiden haitalliset terveysvaikutukset, kunnes toisin todistetaan. Edellä kuvattuja kriteereitä on kuitenkin kritisoitu siitä, että ne eivät perustu tieteelliseen vertaisarvioituun kirjallisuuteen ja ne johtavat suureen määrään vääriä positiivisia diagnooseja. Kriteerien perusteella käytännössä minikä tahansa uuden sairauden ilmaantuminen tai olemassa olevan sairauden pahentuminen tuulivoima-alueen rakentamisen jälkeen voidaan ajatella johtuvan tuulivoimaloista, jos henkilö voi paremmin ollessaan poissa kotoa (McCunney et al., 2015).



Edellä kuvattujen diagnostisten kriteerien laatijoista Krogh on mukana artikkelissa, jonka kirjoittajat yhdysvaltalaiset Institute of Noise Control Engineering (INCE) of the USA -järjestön jäsenet Stephen E. Ambrose (S.E. Ambrose & Associates) ja Robert W. Rand (Rand Acoustics) kertovat julkaisussa omakohtaisista kokemuksistaan tuulivoimaloiden läheisyydessä. Ollessaan aloittamassa pientaajuisen ja infraäänien mittausta alueella, jossa asukkaat olivat valittaneet tuulivoimaloiden (3x1,65 MW) aiheuttavan heille oireita, kuten unihäiriöitä, päänsärkyä, tinnitusta, paineen tunnetta korvissa, huimausta, pahoinvointia, näön sumentumista, sydämen nopealyöntisyyttä, ärtyneisyyttä, keskittymis- ja muistihäiriöitä ja paniikkikohtauksia, myös tutkijat kokivat samanlaisia voimakkaita oireita 20 minuutin kuluttua saapumisestaan tutkimuspaikalle. Äänenpaine-tasot alueella olivat keskimäärin 35–45 dB, eikä äänenpainetaso korreloinut oireilun kanssa. Oireiden pääteltiin aiheutuvan infrataajuisen äänen äänenvoimakkuuden vaihtelusta ja äänen voimistumisesta sisätiloissa (Ambrose et al., 2012). Kyseessä on ei-tieteellinen tapausselestus.

Keskustelu tuulivoimamelun terveysvaikutuksista on voimakkaasti polarisoitunut. Joukkotiedotusvälineissä ja yleistajuisessa kirjallisuudessa tuulivoiman terveyshaitat esitetään usein kiistattomina. Satunnaisesti jopa tieteellisesti arvostetuissa lehdissä saatetaan sivuuttaa näytön puute. Esimerkiksi British Medical Journal -lehdessä julkaistiin vuonna 2012 unilääketieteen alalla työskentelevän konsultti Christopher Hanningin ja emeritusprofessori Alun Evansin kirjoittama pääkirjoitus, jossa todettiin, että tuulivoimamelun haitallisista vaikutuksista uneen ja terveyteen on runsaasti näyttöä (Hanning & Evans, 2012). Pääkirjoituksessa mainitaan valikoivasti vain muutama julkaisu, joista osa on konferenssitiivistelmiä ja yksi keskeisimmistä on ensimmäisen kirjoittajan kanssa samaan The Society for Wind Vigilancen asiantuntijaryhmään kuuluvan röntgenlääkäri Michael Nissenbaumin artikkeli, jonka tieteellistä laatua on kritisoitu voimakkaasti. Pääkirjoitus sai runsaasti kritiikkiä, ja esimerkiksi Sydneyn yliopiston kansanterveystieteen professori Simon Chapman kirjoitti vastineen pääkirjoitukselle todeten, että pääkirjoituksessa jätettiin huomiotta lukuisia aiheesta kirjoitettuja katsauksia (Chapman, 2012).

Michiganin valtionyliopiston emeritusprofessori Jerry L. Punch on julkaissut the Society for Wind Vigilancen asiantuntijoihin ja Institute of Noise Control Engineering (INCE) of the USA -järjestöön kuuluvan Richard R. Jamesin kanssa raportin, jonka mukaan on kiistatonta näyttöä siitä, että tuulivoimaloiden ääni on tärkein syy merkittävän ihmisryhmän terveysongelmiin. Samalla he kyseenalaistavat tieteellisen vertaisarviointiprosessin merkityksen sekä lukuisten viranomais- ja asiantuntijalaitosten kuten laajan Health Canadan tutkimuksen päätelmät ja väittävät niitä tuulivoimatoimijoita suosiviksi ja puolueellisiksi (Punch & James, 2016). Raportti on rakennettu taitavasti siten, että monet kumottavista väitteistä on tarkoituksellisesti kärjistetty siten, että ne on helppo kumota joiltain osin ja lukijalle jää virheellinen mielikuva siitä, mistä tiedeyhteisö on eri mieltä kirjoittajien kanssa ja mistä todellisuudessa on liian vähän tutkimustietoa. Samat kirjoittajat ovat julkaisseet aikaisemmin myös mm. artikkelin Audiology Today -lehdessä tarkoituksenaan antaa audiologeille perustietoa tuulivoimamelusta (Punch et al., 2010). Valitettavasti he samalla kuvaavat mm. tuuliturbiinisyndroomaa ja vibroakustista sairautta kriittikittömästi, mikä on omiaan lisäämään pelkoa ja negatiivisia ennako-odotuksia.

Trentin yliopiston limnologi ja ekologi Magda Havas on profiloitunut mm. elektromagneettisten kenttien haitoista puhuvana tutkijana ja hän on ottanut kantaa myös tuulivoima-alueiden läheisyydessä asuvien kokemaan oireiluun. Hänen teoriansa on, että tuulivoimalat luovat ympärilleen sähkömagneettisen kentän, joka voi vaikuttaa haitallisesti sähköherkkiin, ja oireilua voisi selittää yhtäaikainen altistuminen melulle, infraäänelle, vilkkuvalla varjostukselle, ”säröytyneelle sähkövirralle” (dirty electricity) ja ”maadoitusvirralle” (ground current). Hän mukaansa tähän viittaa myös se, että sähköherkkien kokemat oireet ovat hyvin pitkälti samoja kuin tuulivoima-alueiden lähellä oireilevien raportoimat oireet. Havaksen mukaan oireilulle herkimpiä ovat matkapa-hoinvoinnista, migreenistä sekä korva- tai silmäongelmista kärsivät henkilöt (Havas & Colling, 2011). On kuitenkin osoitettu, että tuulivoimaloiden ympärillä ei ole tavallisuudesta poikkeavaa sähkömagneettista kenttää vaan säteilymäärät ovat jopa pienempiä kuin tavallisissa kodeissa (McCallum et al., 2014). Myös osa suomalaisista tuulivoiman infraääneen oireensa yhdistävistä on tuonut esille, että he ovat alkaneet oireilla myös sähkölle.

### 5.3.5 Yhteenveto

Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänen terveysvaikutuksia ei ole toistaiseksi juurikaan tutkittu. Muutamassa epidemiologisessa tutkimuksessa on kuitenkin tarkasteltu oireilun yleisyyttä joko suhteessa etäisyyteen lähimmästä turbiinista tai mallinnettuun äänenpainetasoon. Kummankaan altisteen ei ole havaittu olevan yhteydessä oireiluun. Suomalaisessa aineistossa myöskään lääkitykset ja sairaudet eivät olleet yhteydessä etäisyyteen tai äänenpainetasoon ja oireilun yleisyys oli samaa suuruusluokkaa kuin suomalaisissa väestötutkimuksissa. Kokeellisissa tutkimuksissa on nähty, että ennako-odotukset vaikuttavat voimakkaasti sekä häiritsevyyteen että oireiluun.

Tämänhetkinen tieteellinen näyttö perustuu vähäiseen määrään tutkimuksia eikä vahvojen johtopäätösten tekeminen ole mahdollista. Näin ollen jatkotutkimukset ovat perusteltuja. Tuulivoimamelun ja sen sisältämän infraäänen terveysvaikutuksia tutki-taankin parhaillaan useissa maissa.

Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänen terveysvaikutusten käsitteleminen kattavasti edellyttää tieteellisen kirjallisuuden lisäksi myös ei-tieteelliseen kirjallisuuteen perehtymistä. Tapausselostusten perusteella suurta huomiota ovat saaneet hypoteesit tuuliturbiinisyndroomasta ja vibroakustisesta sairaudesta. Tuuliturbiinisyndrooma eli epäspesifin oireilun esiintyminen tuulivoima-alueiden läheisyydessä asuvilla on todellinen ilmiö, mutta oireilun syyksi ei ole toistaiseksi voitu osoittaa tuulivoimaloiden tuottamaa infraääntä. Vibroakustinen sairaus ei ole yleisesti hyväksytty sairaus nykylääkete-teessä edes työperäisen altistuksen osalta, eikä hypoteesia sen yhteydestä tuulivoi-mamelu-altistukseen ole toistaiseksi edes yritetty tutkia tieteellisesti.

## 6 Johtopäätökset

*Timo Lanki, Anu Turunen ja Tarja Yli-Tuomi, THL*

*Marja Heinonen-Guzejev, Helsingin yliopisto*

*Panu Majjala, VTT*

*Tommi Toivonen, Tim Toivo ja Sami Kännälä, STUK*

*Jukka Ylikoski, Helsinki Ear Institute*

### 6.1 Kuuluva ääni

#### ***Tuulivoimaloiden melun luonne***

Tuulivoimalat tuottavat kuuluvaa ääntä useiden eri mekanismien kautta. Tavallisimmissa toimintaolosuhteissa merkittävin ja kauaskantoisin ääni syntyy roottorin siipien vuorovaikutuksesta ilman kanssa. Tälle ns. aerodynaamiselle äänelle on ominaista laajakaistaisuus sekä äänenpaineen jaksollinen vaihtelu, joka olosuhteista riippuen voi olla kuultavissa toistuvina suhahduksina tai jyskytyksenä. Tuulivoimamelu korostuu öisin, kun taustäänitaso on pieni. Myös sää voi aiheuttaa huomattavia vaihteluita melutasoihin. Kauempana voimalasta äänen voi arvioida vaimenevan 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Etäisyyden kasvaessa pienten taajuuksien suhteellinen osuus kasvaa, koska muut ääntä vaimentavat mekanismit vaikuttavat vähemmän pieniin taajuuksiin. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (545/2015) on annettu toimenpiderajat erikseen pientaajuiselle äänelle nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa.

#### ***Yleistä ympäristömelun terveyshaitoista***

Melun yleisin vaikutus on sen häiritsevyys ja unen häiriintyminen. Melun häiritsevyyteen vaikuttavat melun fysikaalisten ominaisuuksien lisäksi esimerkiksi yksilöllinen herkkyys ja asenteet melulähdettä kohtaan. Melu aiheuttaa fysiologista ja psyykkistä stressiä sekä tiedostamattomien että tiedostettujen reaktioiden kautta. Pitkään jatkessaan voimakas häiritsevyyden kokemus, unihäiriöt ja stressitila voivat johtaa esimerkiksi henkisen hyvinvoinnin laskuun, muistin ja keskittymiskyvyn heikkenemiseen tai kohonneeseen sydän- ja verisuonisairausten riskiin.

### ***Tieteellinen näyttö tuulivoimaloiden melun haitoista***

Melutasot tuulivoimaloiden läheisyydessä ovat pienempiä kuin esimerkiksi liikenneympäristöissä, mutta toisaalta äänenpaineen jaksollinen vaihtelu lisää tuulivoimaloiden äänen häiritsevyyttä. Tutkimuksissa, joissa on tarkasteltu olemassa olevien tuulivoiman tuotantoalueiden läheisyydessä olevia asuinalueita, mallinnetut melutasot ovatkin olleet yhteydessä häiritsevyyden kokemiseen. Tutkimustulokset altistevastesuhteesta ovat olleet vaihtelevia, mutta koettu häiritsevyys on useassa tutkimuksessa alkanut selvästi yleistyä melutason ylittäessä A-taajuuspainotettuna noin 40 dB. Melutasojen lisäksi tutkimuksissa on havaittu monien muidenkin tekijöiden vaikuttavan häiritsevyyden kokemiseen, esimerkkeinä näköyhteys voimaloihin, asenteet ja huoli terveyshaitoista. Tuulivoima-alueiden välillä näyttää myös olevan eroja häiritsevyyden yleisyydessä.

Näyttöä tuulivoimaloiden tuottaman melun yhteydestä unihäiriöihin on vähemmän, mutta on selvää että mikä tahansa riittävän voimakas ääni voi häiritä unta. Tutkimuksia vaikutuksista stressiin tai sydän- ja verisuonisairauksiin on hyvin vähän. Liikennemelututkimusten perusteella vaikutuksia sydän- ja verisuonisairauksiin alkaa näkyä vasta suuremmilla äänenpainetasoilla kuin mitä tuulivoimaloiden läheisyydessä on tyypillisesti mitattu.

Osana selvitystyötä tehtiin lisäanalyysyjä aiemmin kerätystä suomalaisesta kyselyaineistosta. Tutkimuksessa havaittiin, että tuulivoimaloiden äänen kokeminen yleisesti ottaen häiritseväksi sekä unihäiriöitä aiheuttavaksi oli yhteydessä mallinnettuihin äänenpainetasoihin sekä etäisyyteen voimaloista. Mallinnettu tuulivoimaloiden tuottama ääni ei kuitenkaan ollut yhteydessä nukahtamisvaikeuksiin, liian aikaiseen heräämiseen tai unilääkkeiden käyttöön. Alle 2,5 km:n etäisyydellä tuulivoimaloista (5 tuulivoima-alueetta) noin 2 % asukkaista koki äänen häiritsevän paljon sisätiloissa tai häiritsevän paljon nukkumista. Samoilla alueilla liikennemelu koettiin häiritseväksi yhtä usein. Melun ei tutkimuksessa havaittu olevan yhteydessä kohonneeseen verenpaineeseen, diabetekseen tai sydämen vajaatoimintaan.

## **6.2 Infraääni**

### ***Infraäänen esiintyminen ympäristössä***

Äänen taajuusjakaumassa on sopimusluonteinen 20 Hz:n raja, jonka alapuolella olevaa ääntä kutsutaan infraääneksi. Mitä pientaajuisempi ääni on, sitä suurempi äänenpainetaso vaaditaan, että äänen voi kuulla (esim. 20 Hz:in taajuudella noin 79 dB). Infraääntä esiintyy yleisesti sekä luonnossa että rakennetuissa ympäristöissä yhdessä kuultavan äänen kanssa, mutta tyypillisesti infraäänen äänenpainetasot ovat kuulo-kynnyksen alapuolella.

Kansainvälisissä tutkimuksissa infraäänitasot tuulivoima-alueiden läheisyydessä olevilla asuinalueilla ovat olleet samaa tasoa tai pienempiä kuin kaupunkien keskusta-alueilla (enimmillään noin 80 dB), mutta suurempia kuin luonnonympäristöissä (poikkeuksena merenranta, jossa aallot aiheuttavat infraääntä).

Uusia infraäänimittauksia tehtiin osana selvitystyötä kahden tuulivoima-alueen läheisyydessä, sekä vertailun vuoksi kaupunkialueella ja luonnontilaisella alueella. Mitatut infraäänitasot olivat samaa suuruusluokkaa kuin muissa vastaavissa tutkimuksissa.

### ***Vaikutukset korvan kuulo- ja tasapainoelinten kautta***

Korvan tasapainoelimen tiedetään reagoivan yli 100 dB:n infraäänitasoille. Arviolta 5–10 % väestöstä kärsii sellaisista tasapainoelimen poikkeavuuksista ja sairaustiloista, joihin liittyy tavanomaista herkempi reagointi pientaajuiseen ääneen. Ei tiedetä, tapahtuuko reagoitua jo sellaisilla äänenpainetasoilla, joita havaitaan tuulivoimaloiden läheisyydessä. Tuulivoima-alueiden ympäristössä asuvat ovat kuitenkin kertoneet myös oireista, jotka voisivat johtua häiriöistä tasapainoelimessä.

Sisäkorvan ulommat karvasolut ovat herkkiä pientaajuuselle äänelle ja voisivat teoriassa (eläinkokeiden perusteella) reagoida myös tuulivoimaloiden läheisyydessä esiintyvillä tasoilla. Ulommat karvasolut eivät välitä varsinaista kuuloaistimusta aivoille. Niiden hermotus on yhteydessä aivokuoren kuulo- ja muille alueille, joilla katsotaan olevan rooli valikoivassa huomiointissa ja valppaudessa. Tuoreessa aivokuvantamiseen perustuvassa kokeellisessa tutkimuksessa raportoitiin hieman kuuloalueen alapuolella olevan infraäänialtistuksen aiheuttavan hermoverkkojen aktivaatiota paitsi kuuloaivokuorella myös emotionaalisista ja autonomisista kontroleista vastuussa olevilla alueilla. Tämän perusteella on esitetty, että tiedostamattomat reaktiot voisivat selittää erityyppistä oireilua. Kyseessä on toistaiseksi yksittäinen tutkimus, eikä tällä hetkellä ole näyttöä siitä, että aktivaatio johtaisi terveyshaittoihin.

Kokeellisissa tutkimuksissa on myös havaittu suurille infraäänitasoille altistumisen voivan vaikuttaa tutkittavien valvetilaan, mutta alle kuulokynnyksen olevilla tasoilla vastaavaa ei ole havaittu. Edes suurten infraäänitasojen ei ole havaittu vaikuttavan kognitiivisiin toimintoihin ihmisillä, vaikka koe-eläimillä vaikutuksia on esiintynyt.

### ***Muut vaikutusmekanismit***

Kokeellisissa tutkimuksissa on arvioitu infraäänien vaikutuksia myös esimerkiksi sydämen ja verenkiertoelimestön toimintaan. Selkeää näyttöä edes voimakkaan altistuksen vaikutuksista ei ole saatu. Muiden vasteiden kohdalla tutkimuksia on ollut niin vähän, että johtopäätösten teko on vaikeaa.

Tuulivoimaloiden läheisyydessä raportoidut yleisluonteiset oireet ovat yleisiä väestössä ja voivat aiheutua monista syistä, esimerkiksi sairauksista tai stressistä – usein syytä ei pystytä selvittämään. Niissäkin tilanteissa, joissa tuulivoimaloiden ääni ei ole äänenpainetasoltaan riittävä aiheuttamaan suoria fysiologisia vaikutuksia, voi henkilö

kuitenkin yhdistää kokemansa oireet tuulivoimaloihin. Hyvin monimuotoisia yleisoireita raportoidaan myös monien muiden ympäristöaltisteiden yhteydessä, ja onkin alettu puhua ympäristöherkkyydestä yleiskäsitteenä erilaisille herkkyyksille. Oireilu voi tällöin selittyä elimistön puolustusjärjestelmän vasteilla keskushermostossa, autonomisessa hermostossa ja immunologisessa järjestelmässä. Toisaalta jo huoli ja epäily haitoista voi johtaa myös fyysiseen oireiluun.

### ***Pitkäaikaisen altistumisen vaikutukset***

Kokeellisissa tutkimuksissa ei ole tarkasteltu pitkäaikaisen infraäänille altistumisen vaikutuksia terveyteen tai oireiluun, mitä voidaan pitää puutteena. Epidemiologiset väestötason tutkimukset soveltuvat myös infraäänen pitkäaikaisvaikutusten arviointiin. Väestötutkimuksia mallinnettujen tai mitattujen infraäänitasojen mahdollisesta yhteydestä esimerkiksi tasapainoelimiin liittyviin tai yleisluontoisiin oireisiin ei kuitenkaan ole tehty. Epäsuoria päätelmiä voi tehdä tutkimuksista, joissa oireilua on tarkasteltu suhteessa mallinnettuun laajakaistaiseen ääneen tai etäisyyteen tuulivoimaloista. Kahdessa kansainvälisessä tutkimuksessa ei ole saatu näyttöä oireilun yhteydestä tuulivoimaloihin. Selvitystyön osana tehdyissä analyyseissä ei havaittu yhteyttä tuulivoimaloiden etäisyyden tai mallinnetun melun ja oireilun välillä; oireilu ei myöskään ollut yleisempää tuulivoima-alueiden läheisyydessä kuin muualla Suomessa. Tutkimuksia on kuitenkin niin vähän, että pitkäaikaisen altistumisen haittoja ei voida sulkea pois.

## **6.3 Jatkotutkimustarpeita**

Tutkimuksia infraäänelle altistumisesta ja erityisesti pitkäaikaisen altistumisen vaikutuksista terveyteen ja hyvinvointiin on vähän - siten lisätutkimukset ovat perusteltuja. Tutkimuksia onkin parhaillaan käynnissä useassa maassa.

### ***Tuulivoimaloiden läheisyyden yhteys terveydentilaan***

Tutkimuksia tuulivoimaloiden äänen yhteydestä sairauksien esiintymiseen on vähän. Tuulivoimaloiden lähellä asumisen, ja siten kuultavissa olevalle äänelle ja infraäänelle altistumisen yhteyttä sairauksien tai lievempien terveyden häiriöiden esiintymiseen on mahdollista arvioida suomalaisten korkealaatuisten rekisteriaineistojen avulla. Esimerkiksi hoitoa vaativan verenpainetaudin, ahdistuneisuuden, huimauksen ja unihäiriöiden esiintyvyys voidaan arvioida lääkkeitä sisältävien rekisteritietojen avulla. Päätelmiä tuulivoimaloiden tuottaman äänen mahdollisesta vaikutuksesta voidaan tehdä vertailemalla tuulivoima-alueita muihin alueisiin sekä vertaamalla tilannetta ennen ja jälkeen tuulivoimatuotannon aloittamisen.

***Infraäänen vaikutus oireiluun ja fysiologisiin reaktioihin***

Epidemiologisissa tutkimuksissa tilastollinen voima ei aina riitä havaitsemaan vaikutuksia, jotka koskevat vain pientä osaa väestöstä, esimerkiksi vaikutuksille erityisen herkkiä ryhmiä. Haasteena on myös se, että tietoa oireilusta ja lievistä fysiologisista vasteista ei kerätä kattavasti rekistereihin. Vaihtoehtoina ovat tällöin tutkittavien seuranta heidän asuinympäristössään sekä kokeellinen tutkimus täysin kontrolloiduissa olosuhteissa. Näistä jälkimmäinen on perusteltu, koska infraäänen yhteyttä esimerkiksi oireiluun ei voida luotettavasti arvioida seuraamalla infraäänitasoja ja oireilua todellisissa olosuhteissa monien sekoittavien tekijöiden vuoksi (esim. kuultavissa oleva melu, henkilön tietoisuus tuulivoimaloiden käyntiolosuhteista). Kokeellisissa olosuhteissa on myös mahdollista tuottaa luotettavaa tietoa altiste-vastesuhteista.

Kokeellisessa tutkimuksessa vapaaehtoiset henkilöt voidaan altistaa infraäänelle, joka vastaa tasoltaan ja luonteeltaan tuulivoimaloiden läheisyydessä esiintyvää ääntä, sekä hiljaisuudelle. Kokeen aikana voidaan seurata paitsi oireiden ilmaantumista myös fysiologisia vasteita, esimerkkinä stressireaktioiden havainnointi EKG:n avulla ja verenpaineen ja sykkeen mittaaminen muiden sydämeen ja verenkiertoelimistöön kohdistuvien vaikutusten havaitsemiseksi. Tutkittaviksi tulisi pyrkiä saamaan erityisesti oman käsityksensä mukaan infraäänelle herkistyneitä ja siitä oireita saavia. Tällöin on myös mahdollista arvioida kliinisesti mahdollisesti herkkyttä lisääviä tekijöitä.

***Äänitasot sisätiloissa tuulivoimaloiden läheisyydessä***

Melutaso sisällä, erityisesti yöaikaan jolloin nukutaan, on ratkaiseva terveyshaittojen syntymisen kannalta. Tuulivoimaloiden melun mittaamisesta tekee haastavaa tuulivoimaloiden tuottaman äänen riippuvuus tuulesta ja sääolosuhteiden aiheuttama suuri vaihtelu, minkä vuoksi mittauksia tulee jatkaa pidempiä jaksoja. Lisäksi sisätiloissa tehty mittaustulos riippuu hyvin paljon asunnon rakenteellisista ratkaisuista ja sijainnista, joten mittauskohteita olisi hyvä olla useita erilaisia. Lisää tietoa tarvitaan siitä, kuinka hyvin tuulivoimaloiden aiheuttama melu kulkeutuu sisätiloihin ja millaisia tasoja sisätiloissa esiintyy erityisesti yöaikaan tuulivoimaloiden läheisyydessä. Tietoa tarvitaan erityisesti lähimpänä voimaloita sijaitsevista kohteista, joissa asukkaat ovat valittaneet meluhaitoista. Mitata tulisi niin kuultavalla kuin infraäänialueellakin olevaa ääntä.

## LÄHTEET

Aasvang, G.M., Overland, B., Ursin, R. & Moum, T. (2011). A field study of effects of road traffic and railway noise on polysomnographic sleep parameters. *J Acoust Soc Am.* 129 (6). p.pp. 3716–3726.

Aitkin, L. (1986). *The Auditory Midbrain: Structure and Function in the Central Auditory Pathways*. Humana Press.

Alves-Pereira, M. & Castelo Branco, N.A.A. (2014). Letter to the editor re: 'How the factoid of wind turbines causing 'vibroacoustic disease' came to be 'irrefutably demonstrated'. *Aust N Z J Public Health.* 38 (2). p.pp. 191–192.

Alves-Pereira, M. & Castelo Branco, N.A.A. (2007). Vibroacoustic disease: Biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling. *Prog Biophys Mol Biol.* 93. p.pp. 256–279.

Ambrose, S.E., Rand, R.W. & Krogh, C.M.E. (2012). Wind turbine acoustic investigation: Infrasound and low-frequency noise. A case study. *Bull Sci Technol Soc.* 32 (2). p.pp. 128–141.

Andersson, L., Claeson, A.-S., Ledin, L., Wisting, F. & Nordin, S. (2013). The influence of health-risk perception and distress on reactions to low-level chemical exposure. *Front Psychol.* 4. p.p. 816.

Andersson, L., Johansson, A., Millqvist, E., Nordin, S. & Bende, M. (2008). Prevalence and risk factors for chemical sensitivity and sensory hyperreactivity in teenagers. *Int J Hyg Environ Health.* 211 (5–6). p.pp. 690–697.

Andresen, J. & Moller, H. (1984). Equal annoyance contours for infrasonic frequencies. *J Low Freq Noise V A.* 3 (3). p.pp. 1–9.

Arra, I., Lynn, H., Barker, K., Ogbunike, C. & Regalado, S. (2014). Systematic review 2013: Association between wind turbines and human distress. *Cureus.* 6(5) (5). p.pp. 183–95.

Ashtiani, P. & Denison, A. (2015). Spectral discrete probability density function of measured wind turbine noise in the far field. *Front Public Health.* 3. p.p. 52.

Auerbach, B.D., Rodrigues, P. V & Salvi, R.J. (2014). Central gain control in tinnitus and hyperacusis. *Front Neurol.* 5. p.p. 206.



- Babisch, W., Pershagen, G., Selander, J., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Cadum, E., Vigna-Taglianti, F., Katsouyanni, K., Haralabidis, A.S., Dimakopoulou, K., Sourtzi, P., Floud, S. & Hansell, A.L. (2013). Noise annoyance: A modifier of the association between noise level and cardiovascular health? *Sci Total Environ.* 452–453. p.pp. 50–57.
- Babisch, W., Wolke, G., Heinrich, J. & Straff, W. (2014). Road traffic noise and hypertension: Accounting for the location of rooms. *Environ Res.* 133. p.pp. 380–387.
- 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. *Sci Total Environ.* 425. p.pp. 42–51.
- Baliatsas, C., van Kamp, I., Hooiveld, M., Lebret, E. & Yzermans, J. (2015). The relationship of modern health worries to non-specific physical symptoms and perceived environmental sensitivity: A study combining self-reported and general practice data. *J Psychosom Res.* 79 (5). p.pp. 355–361.
- Baliatsas, C. (2015). *Non-specific physical symptoms in relation to actual and perceived exposure to electromagnetic fields (EMF)*. Thesis. Utrecht University.
- Baliatsas, C., van Kamp, I., van Poll, R. & Yzermans, J. (2016a). Health effects from low-frequency noise and infrasound in the general population: Is it time to listen? A systematic review of observational studies. *Sci Total Environ.* 557–558. p.pp. 163–169.
- Baliatsas, C., van Kamp, I., Swart, W., Hooiveld, M. & Yzermans, J. (2016b). Noise sensitivity: Symptoms, health status, illness behavior and co-occurring environmental sensitivities. *Environ Res.* 150. p.pp. 8–13.
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet.* 383 (9925). p.pp. 1325–1332.
- Basner, M., Muller, U. & Elmenhorst, E.-M. (2011). Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep.* 34 (1). p.pp. 11–23.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016). *Windenergieanlagen: Beeinträchtigt infraschall die gesundheit?* Augsburg.
- Belojevic, G., Jakovljevic, B. & Slepcevic, V. (2003). Noise and mental performance: personality attributes and noise sensitivity. *Noise & Health.* 6 (21). p.pp. 77–89.
- Benedetti, F., Lanotte, M., Lopiano, L. & Colloca, L. (2007). When words are painful: Unraveling the mechanisms of the nocebo effect. *Neuroscience.* 147. p.pp. 260–271.

- van den Berg, F. (2008). Criteria for wind farm noise: Lmax and Lden. In: *Proceedings of the 7th European Conference on Noise Control, EURO-NOISE*. 2008.
- van den Berg, F., Pedersen, E., Bouma, J. & Bakker, R. (2008). *WINDFARMperception: Visual and Acoustic Impact of Wind Turbine Farms on Residents*. University of Groningen and University of Gothenburg.
- van den Berg, G.P. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *J Sound Vib*. 277 (4–5). p.pp. 955–970.
- van den Berg, G.P. (2006). *The Sound of High Winds: The Effect of Atmospheric Stability on Wind Turbine Sound and Microphone Noise*. Thesis. University of Groningen.
- Berger, R.G., Ashtiani, P., Ollson, C.A., Whitfield Aslund, M., McCallum, L.C., Leventhall, G. & Knopper, L.D. (2015). Health-based audible noise guidelines account for infrasound and low-frequency noise produced by wind turbines. *Front Public Health*. 3. p.p. 31.
- Van den Bergh, O., Devriese, S., Winters, W., Veulemans, H., Nemery, B., Eelen, P. & Van de Woestijne, K.P. (2001). Acquiring symptoms in response to odors: a learning perspective on multiple chemical sensitivity. *Ann N Y Acad Sci*. 933. p.pp. 278–290.
- Berglund, B., Hassmen, P. & Soames Job, R.F. (1996). Sources and effects of low-frequency noise. *J Acoust Soc Am*. 99 (5). p.pp. 2985–3002.
- Berglund, B. & Lindvall, T. (1995). Community Noise. *Adv Appl Mech*. 42. World Health Organization.
- Berglund, B., Lindvall, T. & Schwela, D. (1999). *Guidelines for Community Noise*. Geneva: World Health Organization.
- Beutel, M.E., Junger, C., Klein, E.M., Wild, P., Lackner, K., Blettner, M., Binder, H., Michal, M., Wiltink, J., Braehler, E. & Munzel, T. (2016). Noise annoyance is associated with depression and anxiety in the general population: The contribution of aircraft noise. *PLoS One*. 11 (5). p.p. e0155357.
- Björk, E. (1997). *Meluntorjunta*. 3. painos. Kuopio: Kuopion yliopisto.
- Blanes-Vidal, V. & Schwartz, J. (2016). Wind turbines and idiopathic symptoms: The confounding effect of concurrent environmental exposures. *Neurotoxicol Teratol*. 55. p.pp. 50–57.

- Bockstael, A., Dekoninck, L., Can, A., Oldoni, D., De Coensel, B. & Botteldooren, D. (2012). Reduction of wind turbine noise annoyance: An operational approach. *Acta Acust united Ac.* 98. p.pp. 392–401.
- Bocquier, A., Cortaredona, S., Boutin, C., David, A., Bigot, A., Chaix, B., Gaudart, J. & Verger, P. (2013). Small-area analysis of social inequalities in residential exposure to road traffic noise in Marseilles, France. *Eur J Public Health.* 23 (4). p.pp. 540–546.
- Bodin, T., Bjork, J., Mattisson, K., Bottai, M., Rittner, R., Gustavsson, P., Jakobsson, K., Ostergren, P.-O. & Albin, M. (2016). Road traffic noise, air pollution and myocardial infarction: A prospective cohort study. *Int Arch Occup Environ Health.* 89 (5). p.pp. 793–802.
- Bolin, K., Bluhm, G.G., Eriksson, G. & Nilsson, M.E. (2011). Infrasound and low frequency noise from wind turbines: Exposure and health effects. *Environ Res Lett.* 6 (3). p.p. 35103.
- Bolin, K., Kedhammar, A. & Nilsson, M.E. (2012). The influence of background sounds on loudness and annoyance of wind turbine noise. *Acta Acust united Ac.* 98. p.pp. 741–748.
- Bolin, K., Nilsson, M.E. & Khan, S. (2010). The potential of natural sounds to mask wind turbine noise. *Acta Acust united Ac.* 96. p.pp. 131–137.
- Botvinick, M., Nystrom, L.E., Fissell, K., Carter, C.S. & Cohen, J.D. (1999). Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature.* 402 (6758). p.pp. 179–181.
- Brink, M. (2011). Parameters of well-being and subjective health and their relationship with residential traffic noise exposure: A representative evaluation in Switzerland. *Environ Int.* 37 (4). p.pp. 723–733.
- Brown, M.C., Berglund, A.M., Kiang, N.Y. & Ryugo, D.K. (1988). Central trajectories of type II spiral ganglion neurons. *J Comp Neurol.* 278 (4). p.pp. 581–590.
- Bush, Luu & Posner (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends Cogn Sci.* 4 (6). p.pp. 215–222.
- Busnel, R.G. & Lehmann, A.G. (1978). Infrasound and sound: differentiation of their psychophysiological effects through use of genetically deaf animals. *J Acoust Soc Am.* 63 (3). p.pp. 974–977.
- Chapman, S. (2012). Editorial ignored 17 reviews on wind turbines and health. *BMJ.* 344. p.p. e3366.

Chapman, S., Joshi, K. & Fry, L. (2014). Fomenting sickness: Nocebo priming of residents about expected wind turbine health harms. *Front Public Health*. 2. p.p. 279.

Chapman, S. & St George, A. (2013). How the factoid of wind turbines causing 'vibroacoustic disease' came to be 'irrefutably demonstrated'. *Aust N Z J Public Health*. 37 (3). p.pp. 244–249.

Chapman, S., St George, A., Waller, K. & Cakic, V. (2013). The pattern of complaints about Australian wind farms does not match the establishment and distribution of turbines: support for the psychogenic, 'communicated disease' hypothesis. *PloS One*. 8 (10). p.p. e76584.

Cheng, H., Wang, B., Tang, C., Feng, G., Zhang, C., Li, L., Lin, T., Du, F., Duan, H., Shi, M. & Zhao, G. (2012). Infrasonic noise induces axonal degeneration of cultured neurons via a Ca(2)(+) influx pathway. *Toxicol Lett*. 212 (2). p.pp. 190–197.

Chief Medical Officer of Health (2010). The Potential Health Impact of Wind Turbines. Ontario.

Christensen, J.S., Raaschou-Nielsen, O., Tjønneland, A., Overvad, K., Nordsborg, R.B., Kettel, M., Sørensen, T.I. & Sørensen, M. (2016). Road traffic and railway noise exposures and adiposity in adults: A cross-sectional analysis of the Danish Diet, Cancer, and Health Cohort. *Environ Health Perspect*. 124 (3). p.pp. 329–335.

Chrousos, G.P. (2009). Stress and disorders of the stress system. *Nat Rev Endocrinol*. 5 (7). p.pp. 374–381.

Colby, W.D., Dobie, R., Leventhall, G., Lipscomb, D.M., McCunney, R.J., Seilo, M.T. & Sondergaard, B. (2009). Wind Turbine Sound and Health Effects: An Expert Panel Review. American Wind Energy Association & Canadian Wind Energy Association.

Corso, J.F. (1958). Absolute thresholds for tones of low frequency. *Am J Psychol*. 71 (2). p.pp. 367–374.

Council of Canadian Academies (2015). *Understanding the Evidence: Wind Turbine Noise. The expert panel on wind turbine noise and human health*. Ottawa.

Crichton, F., Chapman, S., Cundy, T. & Petrie, K.J. (2014a). The link between health complaints and wind turbines: Support for the nocebo expectations hypothesis. *Front Public Health*. 2. p.p. 220.

Crichton, F., Dodd, G., Schmid, G., Gamble, G., Cundy, T. & Petrie, K.J. (2014b). The power of positive and negative expectations to influence reported symptoms and mood during exposure to wind farm sound. *Health Psychol*. 33 (12). p.pp. 1588–1592.

- Crichton, F., Dodd, G., Schmid, G., Gamble, G. & Petrie, K.J. (2014c). Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines? *Health Psychol.* 33 (4). p.pp. 360–364.
- Crichton, F., Dodd, G., Schmid, G. & Petrie, K.J. (2015). Framing sound: Using expectations to reduce environmental noise annoyance. *Environ Res.* 142. p.pp. 609–614.
- Crichton, F. & Petrie, K.J. (2015). Health complaints and wind turbines: The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting. *Environ Res.* 140. p.pp. 449–455.
- Curthoys, I.S. (2010). A critical review of the neurophysiological evidence underlying clinical vestibular testing using sound, vibration and galvanic stimuli. *Clin Neurophysiol.* 121 (2). p.pp. 132–144.
- Dallos, P. (2008). Cochlear amplification, outer hair cells and prestin. *Curr Opin Neurobiol.* 18 (4). p.pp. 370–376.
- Dallos, P., Billone, M.C., Durrant, J.D., Wang, C. & Raynor, S. (1972). Cochlear inner and outer hair cells: Functional differences. *Science.* 177 (4046). p.pp. 356–358.
- Danielsson, A. & Landstrom, U. (1985). Blood pressure changes in man during infrasonic exposure: An experimental study. *Acta Med Scand.* 217 (5). p.pp. 531–535.
- Dantoft, T.M., Andersson, L., Nordin, S. & Skovbjerg, S. (2015). Chemical intolerance. *Curr Rheumatol Rev.* 11 (2). p.pp. 167–184.
- Dixon, N.F. & Henley, S.H. (1991). Unconscious perception. Possible implications of data from academic research for clinical practice. *J Nerv Ment Dis.* 179 (5). p.pp. 243–252.
- Dommes, E., Bauknecht, H.C., Scholz, G., Rothmund, Y., Hensel, J. & Klingebiel, R. (2009). Auditory cortex stimulation by low-frequency tones-an fMRI study. *Brain Res.* 1304. p.pp. 129–137.
- Dratva, J., Phuleria, H.C., Foraster, M., Gaspoz, J.-M., Keidel, D., Kunzli, N., Liu, L.-J.S., Pons, M., Zemp, E., Gerbase, M.W. & Schindler, C. (2012). Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults. *Environ Health Perspect.* 120 (1). p.pp. 50–55.
- Dratva, J., Zemp, E., Felber Dietrich, D., Bridevaux, P.-O., Rochat, T., Schindler, C. & Gerbase, M.W. (2010). Impact of road traffic noise annoyance on health-related quality of life: Results from a population-based study. *Qual Life Res.* 19 (1). p.pp. 37–46.

- Drexl, M., Uberfuhr, M., Weddell, T.D., Lukashkin, A.N., Wiegrebe, L., Krause, E. & Gurkov, R. (2014). Multiple indices of the 'bounce' phenomenon obtained from the same human ears. *J Assoc Res Otolaryngol.* 15 (1). p.pp. 57–72.
- Du, F., Yin, L., Shi, M., Cheng, H., Xu, X., Liu, Z., Zhang, G., Wu, Z., Feng, G. & Zhao, G. (2010). Involvement of microglial cells in infrasonic noise-induced stress via upregulated expression of corticotrophin releasing hormone type 1 receptor. *Neuroscience.* 167 (3). p.pp. 909–919.
- Edvardsson, B., Stenberg, B., Bergdahl, J., Eriksson, N., Linden, G. & Widman, L. (2008). Medical and social prognoses of non-specific building-related symptoms (Sick Building Syndrome): A follow-up study of patients previously referred to hospital. *Int Arch Occup Environ Health.* 81 (7). p.pp. 805–812.
- Egner, T. & Hirsch, J. (2005). The neural correlates and functional integration of cognitive control in a Stroop task. *NeuroImage.* 24 (2). p.pp. 539–547.
- Ellenbogen, J.M., Grace, S., Heiger-Bernays, W., Manwell, J.F., Mills, D.A., K.A., S. & Weisskopf, M.G. (2012). *Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel.* Massachusetts Department of Environmental Protection (MassDEP) and Massachusetts Department of Public Health (MDPH).
- Elmenhorst, E.-M., Pennig, S., Rolny, V., Quehl, J., Mueller, U., Maass, H. & Basner, M. (2012). Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance. *Sci Total Environ.* 424. p.pp. 48–56.
- Enbom, H. & Enbom, I.M. (2013). [Infrasound from wind turbines: An overlooked health hazard]. *Lakartidningen.* 110 (32–33). p.pp. 1388–1389.
- Erdogan, N., Songu, M., Akay, E., Mete, B.D., Uluc, E., Onal, K. & Oyar, O. (2011). Posterior semicircular canal dehiscence in asymptomatic ears. *Acta oto-laryngologica.* 131 (1). p.pp. 4–8.
- Eriksson, C., Bluhm, G., Hilding, A., Ostenson, C.-G. & Pershagen, G. (2010). Aircraft noise and incidence of hypertension: Gender specific effects. *Environ Res.* 110 (8). p.pp. 764–772.
- Eriksson, C., Hilding, A., Pyko, A., Bluhm, G., Pershagen, G. & Ostenson, C.-G. (2014). Long-term aircraft noise exposure and body mass index, waist circumference, and type 2 diabetes: A prospective study. *Environ Health Perspect.* 122 (7). p.pp. 687–694.
- Etkin, A., Egner, T., Peraza, D.M., Kandel, E.R. & Hirsch, J. (2006). Resolving emotional conflict: A role for the rostral anterior cingulate cortex in modulating activity in the amygdala. *Neuron.* 51 (6). p.pp. 871–882.

European Environment Agency (2010). *Good Practice Guide on Noise Exposure and Potential Health Effects*. EEA Technical report No 11/2010. Copenhagen.

Evans, M.J. & Tempest, W. (1972). Some effects of infrasonic noise in transportation. *J Sound Vib.* 22 (1). p.pp. 19–24.

Eze, I.C., Foraster, M., Schaffner, E., Vienneau, D., Heritier, H., Rudzik, F., Thiesse, L., Pieren, R., Imboden, M., von Eckardstein, A., Schindler, C., Brink, M., Cajochen, C., Wunderli, J.-M., Roosli, M. & Probst-Hensch, N. (2017). Long-term exposure to transportation noise and air pollution in relation to incident diabetes in the SAPALDIA study. *Int J Epidemiol.* doi: 10.1093/ije/dyx020

Farboud, A., Crunkhorn, R. & Trinidad, A. (2013). 'Wind turbine syndrome': Fact or fiction? *J Laryngol Otol.* 127. p.pp. 222–226.

Feder, K., Michaud, D.S., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Denning, A., Bower, T.J., Lavigne, E., Whelan, C. & van den Berg, F. (2015). An assessment of quality of life using the WHOQOL-BREF among participants living in the vicinity of wind turbines. *Environmental Res.* 142. p.pp. 227–238.

Flock, A. & Flock, B. (2000). Hydrops in the cochlea can be induced by sound as well as by static pressure. *Hear Res.* 150 (1–2). p.pp. 175–188.

Floud, S., Blangiardo, M., Clark, C., de Hoogh, K., Babisch, W., Houthuijs, D., Swart, W., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Velonakis, M., Vigna-Taglianti, F., Cadum, E. & Hansell, A.L. (2013). Exposure to aircraft and road traffic noise and associations with heart disease and stroke in six European countries: a cross-sectional study. *Environ Health.* 12. p.p. 89.

Floud, S., Vigna-Taglianti, F., Hansell, A., Blangiardo, M., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Cadum, E., Babisch, W., Selander, J., Pershagen, G., Antoniotti, M.C., Pisani, S., Dimakopoulou, K., Haralabidis, A.S., Velonakis, V. & Jarup, L. (2011). Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: Results of the HYENA study. *Int J Occup Environ Med.* 68 (7). p.pp. 518–524.

Foraster, M., Kunzli, N., Aguilera, I., Rivera, M., Agis, D., Vila, J., Bouso, L., Deltell, A., Marrugat, J., Ramos, R., Sunyer, J., Elosua, R. & Basagana, X. (2014). High blood pressure and long-term exposure to indoor noise and air pollution from road traffic. *Environ Health Perspect.* 122 (11). p.pp. 1193–1200.

Fyhri, A. & Klæboe, R. (2009). Road traffic noise, sensitivity, annoyance and self-reported health--a structural equation model exercise. *Environ Int.* 35 (1). p.pp. 91–97.

Gan, W.Q., Davies, H.W., Koehoorn, M. & Brauer, M. (2012). Association of long-term exposure to community noise and traffic-related air pollution with coronary heart disease mortality. *Am J Epidemiol.* 175 (9). p.pp. 898–906.

- Von Gierke, H. & Mohler, S.R. (2002). 'Vibroacoustic disease'. *Aviation, space, and environmental medicine*. 73 (8) p.pp. 828–830.
- Godfrey, D., Godfrey, T., Mikesell, N., Waller, H., Yao, W. & Chen K, et al. (1997). Chemistry of Granular and Closely Related Regions of the Cochlear Nucleus. In: J. Syka (ed.). *Acoustical Signal Processing in the Central Auditory System*. p.pp. 139–153.
- Graybiel, A.M. (1972). Some ascending connections of the pulvinar and nucleus lateralis posterior of the thalamus in the cat. *Brain Res*. 44 (1). p.pp. 99–125.
- Grossman, G.E., Leigh, R.J., Abel, L.A., Lanska, D.J. & Thurston, S.E. (1988). Frequency and velocity of rotational head perturbations during locomotion. *Exp Brain Res*. 70 (3). p.pp. 470–476.
- Hagiwara, M., Shaikh, J.A., Fang, Y., Fatterpekar, G. & Roehm, P.C. (2012). Prevalence of radiographic semicircular canal dehiscence in very young children: An evaluation using high-resolution computed tomography of the temporal bones. *Pediatr Radiol*. 42 (12). p.pp. 1456–1464.
- Halonen, J.I., Lanki, T., Yli-Tuomi, T., Turunen, A.W., Pentti, J., Kivimaki, M. & Vahtera, J. (2014). Associations of traffic noise with self-rated health and psychotropic medication use. *Scand J Work Environ Health*. 40 (3). p.pp. 235–243.
- Halonen, J.I., Vahtera, J., Stansfeld, S., Yli-Tuomi, T., Salo, P., Pentti, J., Kivimaki, M. & Lanki, T. (2012). Associations between nighttime traffic noise and sleep: The Finnish public sector study. *Environ Health Perspect*. 120 (10). p.pp. 1391–1396.
- Hammersen, F., Niemann, H. & Hoebel, J. (2016). Environmental noise annoyance and mental health in adults: Findings from the cross-sectional German Health Update (GEDA) Study 2012. *Int J Environ Res Public Health*. 13 (10).
- Hanning, C.D. & Evans, A. (2012). Wind turbine noise - Seems to affect health adversely and an independent review of evidence is needed. *BMJ*. 344. p.p. e1527.
- Hansell, A.L., Blangiardo, M., Fortunato, L., Floud, S., de Hoogh, K., Fecht, D., Ghosh, R.E., Laszlo, H.E., Pearson, C., Beale, L., Beevers, S., Gulliver, J., Best, N., Richardson, S. & Elliott, P. (2013). Aircraft noise and cardiovascular disease near Heathrow airport in London: Small area study. *BMJ*. 347. p.p. f5432.
- Harding, G.W., Bohne, B.A., Lee, S.C. & Salt, A.N. (2007). Effect of infrasound on cochlear damage from exposure to a 4 kHz octave band of noise. *Hear Res*. 225 (1–2). p.pp. 128–138.
- Harris, C.S. & Johnson, D.L. (1978). Effects of infrasound on cognitive performance. *Aviat Space Env Med*. 49 (4). p.pp. 582–586.



- Harris, C.S., Sommer, H.C. & Johnson, D.L. (1976). Review of effects of infrasound on man. *Aviat Space Env Med.* 47 (4). p.pp. 430–434.
- Harris, J.P. & Alexander, T.H. (2010). Current-day prevalence of Meniere's syndrome. *Audiol Neurootol.* 15 (5). p.pp. 318–322.
- Harrison, R. V (2015). On the biological plausibility of wind turbine syndrome. *Int J Environ Health Res.* 25 (5). p.pp. 463–468.
- Havas, M. & Colling, D. (2011). Wind turbines make waves: Why some residents near wind turbines become ill. *Bull Sci Technol Soc.* 5 (31). p.p. 414.
- Health Protection Agency (2010). *Health Effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound: Report of the independent advisory group on non-ionising radiation.* London: Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards.
- Heinonen-Guzejev, M. (2008). *Noise Sensitivity: Medical, Psychological and Genetic Aspects.* Thesis. Helsinki: University of Helsinki.
- Heinonen-Guzejev, M., Jauhiainen, T., Vuorinen, H., Viljanen, A., Rantanen, T., Koskenvuo, M., Heikkila, K., Mussalo-Rauhamaa, H. & Kaprio, J. (2011). Noise sensitivity and hearing disability. *Noise & Health.* 13 (50). p.pp. 51–58.
- Heinonen-Guzejev, M., Koskenvuo, M., Mussalo-Rauhamaa, H., Vuorinen, H.S., Heikkila, K. & Kaprio, J. (2012). Noise sensitivity and multiple chemical sensitivity scales: Properties in a population based epidemiological study. *Noise & Health.* 14 (60). p.pp. 215–223.
- Heinonen-Guzejev, M., Vuorinen, H.S., Mussalo-Rauhamaa, H., Heikkila, K., Koskenvuo, M. & Kaprio, J. (2005). Genetic component of noise sensitivity. *Twin Res Hum Genet.* 8 (3). p.pp. 245–249.
- Heinonen-Guzejev, M., Vuorinen, H.S., Mussalo-Rauhamaa, H., Heikkila, K., Koskenvuo, M. & Kaprio, J. (2004). Somatic and psychological characteristics of noise-sensitive adults in Finland. *Arch Environ Health.* 59 (8). p.pp. 410–417.
- Hensel, J., Scholz, G., Hurrting, U., Mrowinski, D. & Janssen, T. (2007). Impact of infrasound on the human cochlea. *Hearing Res.* 233 (1–2). p.pp. 67–76.
- Herbrandson, C. & Messing, R. (2009). Public Health Impacts of Wind Turbines. Minnesota Department of Health. p.pp. 1–32.

- Heritier, H., Vienneau, D., Foraster, M., Eze, I.C., Schaffner, E., Thiesse, L., Rudzik, F., Habermacher, M., Kopfli, M., Pieren, R., Brink, M., Cajochen, C., Wunderli, J.M., Probst-Hensch, N. & Roosli, M. (2017). Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: A nationwide cohort study from Switzerland. *Eur J Epidemiol.* 32 (4). p.pp. 307–315.
- Heritier, H., Vienneau, D., Frei, P., Eze, I.C., Brink, M., Probst-Hensch, N. & Roosli, M. (2014). The association between road traffic noise exposure, annoyance and health-related quality of life (HRQOL). *Int J Environ Res Public Health.* 11 (12). p.pp. 12652–12667.
- Hetherington, L. & Battershill, J. (2013). Review of evidence for a toxicological mechanism of idiopathic environmental intolerance. *Hum Exp Toxicol.* 32 (1). p.pp. 3–17.
- Hill, E.M., Billington, R. & Krageloh, C. (2014). Noise sensitivity and diminished health: testing moderators and mediators of the relationship. *Noise & Health.* 16 (68). p.pp. 47–56.
- Hillert, L., Musabasic, V., Berglund, H., Ciumas, C. & Savic, I. (2007). Odor processing in multiple chemical sensitivity. *Hum Brain Mapp.* 28 (3). p.pp. 172–182.
- Hofmann, S.G., Ellard, K.K. & Siegle, G.J. (2012). Neurobiological correlates of cognitions in fear and anxiety: A cognitive-neurobiological information-processing model. *Cogn Emot.* 26 (2). p.pp. 282–299.
- Hongisto, V., Suokas, M., Varjo, J. & Yli-Kätkä, V.-M. (2015). Tuulivoimalamelun häiritsevyys kahdella tuulivoima-alueella. *Ympäristö ja Terveys -lehti.* 46. p.pp. 54–59.
- Hubbard, H.H. & Shepherd, K.P. (1991). Aeroacoustics of large wind turbines. *J Acoust Soc Am.* 89. p.pp. 2495–2508.
- Huber, M., Knottnerus, J.A., Green, L., van der Horst, H., Jadad, A.R., Kromhout, D., Leonard, B., Lorig, K., Loureiro, M.I., van der Meer, J.W.M., Schnabel, P., Smith, R., van Weel, C. & Smid, H. (2011). How should we define health? *BMJ.* 343. p.p. d4163.
- von Hunerbein, S., Moorhouse, A., Fiumicelli, D. & Baguley, D. (2013). Report on Health Impacts of Wind Turbines. University of Salford.
- Hurley, K.M., Herbert, H., Moga, M.M. & Saper, C.B. (1991). Efferent projections of the infralimbic cortex of the rat. *J Comp Neurol.* 308 (2). p.pp. 249–276.
- IEC (2012). *Standard IEC 61400-11:2012. Wind turbines --- Part 11: Acoustic noise measurement techniques I.* E. Commission (ed.). (IEC61400) p.p. 60.

Inaba, R. & Okada, A. (1988). Study on the effects of infra- and low frequency sound on the sleep by EEG recording. *J Low Freq Noise V A.* 7 (1). p.pp. 15–19.

Ingielewicz, R. & Zagubien, A. (2014). Infrasound noise of natural sources in the environment and infrasound noise of wind turbines. *Pol J Environ Stud.* 23 (4). p.pp. 1323–1327.

Irwin, W., Davidson, R.J., Lowe, M.J., Mock, B.J., Sorenson, J.A. & Turski, P.A. (1996). Human amygdala activation detected with echo-planar functional magnetic resonance imaging. *Neuroreport.* 7 (11). p.pp. 1765–1769.

ISO (2003a). *International Standard ISO 226:2003. Acoustics: Normal equal-loudness-level contours.* International Organisation for Standardization.

ISO (1996a). *International Standard ISO 9613-2. Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation.* International Organisation for Standardization.

ISO (1996b). *International Standard ISO 9996:1996. Mechanical vibration and shock - Disturbance to human activity and performance - Classification.* International Organisation for Standardization.

ISO (1995). *Standard ISO 7196:1995. Acoustics --- Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements I.* O. for Standardization (ed.). (ISO7196) p.p. 4.

ISO (2003b). *Technical specification ISO/TS 15666. Acoustics: Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys.* International Organisation for Standardization.

Jakobsen, J. (2001). Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. *J Low Freq Noise V A.* 20 (3). p.pp. 141–148.

Jakobsen, J. (2012). Danish regulation of low frequency noise from wind turbines. *J Low Freq Noise V A.* 31. p.pp. 239–246.

Jakobsen, J. (2005). Infrasound emission from wind turbines. *J Low Freq Noise V A.* 24. p.pp. 145–155.

Jalali, L., Bigelow, P., McColl, S., Majowicz, S., Gohari, M. & Waterhouse, R. (2016a). Changes in quality of life and perceptions of general health before and after operation of wind turbines. *Environ Pollut.* 216. p.pp. 608–615.

Jalali, L., Bigelow, P., Nezhad-Ahmadi, M.R., Gohari, M., Williams, D. & McColl, S. (2016b). Before-after field study of effects of wind turbine noise on polysomnographic sleep parameters. *Noise & Health*. 18 (83). p.pp. 194–205.

Jalali, L., Nezhad-Ahmadi, M.R., Gohari, M., Bigelow, P. & McColl, S. (2016c). The impact of psychological factors on self-reported sleep disturbance among people living in the vicinity of wind turbines. *Environ Res*. 148. p.pp. 401–410.

Janhunen, S. (2017). *Henkilökohtainen tiedonanto 27.4.2017*.

Janhunen, S., Hynynen, K., Grönman, A., Hujala, M., Kuisma, M., Härkönen, P., Rantonen, J. & Kolari, P. (2016). *Tuulivoimamelun häiritsevyys kahdella tutkimuspaikkakunalla Suomessa*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Janssen, S.A., Vos, H., Eisses, A.R. & Pedersen, E. (2011). A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources. *J Acoust Soc Am*. 130. p.pp. 3746–3753.

Jarup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadum, E., Dudley, M.-L., Savigny, P., Seiffert, I., Swart, W., Breugelmans, O., Bluhm, G., Selander, J., Haralabidis, A., Dimakopoulou, K., Sourtzi, P., Velonakis, M. & Vigna-Taglianti, F. (2008). Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environ Health Perspect*. 116 (3). p.pp. 329–333.

Jeffery, R.D., Krogh, C.M.E. & Horner, B. (2014). Industrial wind turbines and adverse health effects. *Can J Rural Med*. 19 (1). p.pp. 21–26.

Jerger, J., Alford, B. & Coats, A. (1966). Effects of very low frequency tones on auditory thresholds. *J Speech Hear Res*. 9 (1). p.pp. 150–160.

Jiang, S., Wang, Y.-Q., Xu, C.-F., Li, Y.-N., Guo, R. & Li, L. (2014). Involvement of connexin43 in the infrasonic noise-induced glutamate release by cultured astrocytes. *Neurochem Res*. 39 (5). p.pp. 833–842.

Job, R.F.S. (1999). Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to noise. *Noise & Health*. 1 (3). p.pp. 57–68.

Jung, S.S., Cheung, W.-S., Cheong, C. & Shin, S.-H. (2008). Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise. *J Korean Phys Soc*. 53 (4). p.pp. 1897–1905.

Kageyama, T., Yano, T., Kuwano, S., Sueoka, S. & Tachibana, H. (2016). Exposure-response relationship of wind turbine noise with self-reported symptoms of sleep and health problems: A nationwide socioacoustic survey in Japan. *Noise & Health*. 18 (81). p.pp. 53–61.

- van Kamp, I., Job, R.F.S., Hatfield, J., Haines, M., Stellato, R.K. & Stansfeld, S.A. (2004). The role of noise sensitivity in the noise-response relation: A comparison of three international airport studies. *J Acoust Soc Am.* 116 (6). p.pp. 3471–3479.
- Karpova, N.I., Alekseev, S. V., Erohkin, V., Kayskina, E.N. & Reutov, R.P. (1970). Early response of the organism to low frequency acoustic oscillations. *Noise and Vibration Bulletin.* (11). p.pp. 100–103.
- Kasprzak, C. (2012). Influence of infrasound on the alpha rhythm of EEG signal. *Acta Phys Pol A.* 121 (1A). p.pp. A61–A64.
- Kasprzak, C. (2010). The influence of infrasounds on the electrocardiograph patterns in humans. *Acta Phys Pol A.* 118 (1). p.pp. 87–90.
- Keith, S.E., Feder, K., Voicescu, S.A., Soukhovtsev, V., Denning, A., Tsang, J., Broner, N., Leroux, T., Richarz, W. & van den Berg, F. (2016). Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings. *J Acoust Soc Am.* 139 (3). p.pp. 1436–1442.
- van Kempen, E. & Babisch, W. (2012). The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis. *J Hypertens.* 30 (6). p.pp. 1075–1086.
- Kerns, J.G., Cohen, J.D., MacDonald, A.W. 3rd, Cho, R.Y., Stenger, V.A. & Carter, C.S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science.* 303 (5660). p.pp. 1023–1026.
- Kishikawa, H., Matsui, T., Uchiyama, I., Miyakawa, M., Hiramatsu, K. & Stansfeld, S.A. (2009). Noise sensitivity and subjective health: Questionnaire study conducted along trunk roads in Kusatsu, Japan. *Noise & Health.* 11 (43). p.pp. 111–117.
- Klaeboe, R. & Sundfor, H.B. (2016). Windmill noise annoyance, visual aesthetics, and attitudes towards renewable energy sources. *Int J Environ Res Public Health.* 13 (8).
- Kliuchko, M., Heinonen-Guzejev, M., Vuust, P., Tervaniemi, M. & Brattico, E. (2016). A Window into the Brain Mechanisms Associated with Noise Sensitivity. *Scientific reports.* 6. p.p. 39236.
- Knopper, L.D., Ollson, C.A., McCallum, L.C., Whitfield Aslund, M.L., Berger, R.G., Souweine, K. & McDaniel, M. (2014a). Wind turbines and human health. *Front Public Health.* 2. p.p. 63.
- Kurpas, D., Mroczek, B., Karakiewicz, B., Kassolik, K. & Andrzejewski, W. (2013). Health impact of wind farms. *Ann Agric Environ Med.* 20 (3). p.pp. 595–604.
- Kuwano, S., Yano, T., Kageyama, T., Sueoka, S. & Tachibana, H. (2014). Social survey on wind turbine noise in Japan. *Noise Control Eng J.* 62. p.pp. 503–520.

- Kyriakides, K. & Leventhall, H.G. (1977). Some effects of infrasound on task-performance. *J Sound Vib.* 50 (3). p.pp. 369–388.
- Labarge, X.S. & McCaffrey, R.J. (2000). Multiple chemical sensitivity: A review of the theoretical and research literature. *Neuropsychol Rev.* 10 (4). p.pp. 183–211.
- Lahti, T. (2003). *Ympäristömelun arviointi ja torjunta*. Ympäristöopas 101: Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto.
- Landström, U. & Byström, M. (1984). Infrasonic threshold levels of physiological effects. *J Low Freq Noise V A.* 3 (4). p.pp. 167–173.
- Landström, U., Byström, M. & Nordström, B. (1985). Changes in wakefulness during exposure to noise at 42 Hz, 1000 Hz and individual EEG frequencies. *J Low Freq Noise V A.* 4 (1). p.pp. 27–33.
- Landström, U., Häggqvist, S.L. & Löfstedt, P. (1988). Low frequency noise in lorries and correlated effects on drivers. *J Low Freq Noise V A.* 7 (3). p.pp. 104–109.
- Landström, U., Kjellberg, A., Söderberg, L. & Nordström, B. (1991). The effects of broadband, tonal and masked ventilation noise on performance, wakefulness and annoyance. *J Low Freq Noise V A.* 10 (4). p.pp. 112–122.
- Landström, U., Liszka, L., Danielsson, A., Lindmark, A., Lindqwist, M. & Söderberg, L. (1982). Changes in wakefulness during exposure to infrasound. *J Low Freq Noise V A.* 1 (2). p.pp. 79–87.
- Landström, U., Lundström, R. & Byström, M. (1983). Exposure to infrasound: Perception and changes in wakefulness. *J Low Freq Noise V A.* 2 (1). p.pp. 1–11.
- Lane, J.D., Bigelow, P.L., Majowicz, S.E. & McColl, R.S. (2016). Impacts of industrial wind turbine noise on sleep quality: Results from a field study of rural residents in Ontario, Canada. *J Environ Health.* 79 (1). p.pp. 8–12.
- Lane, R.D., Reiman, E.M., Bradley, M.M., Lang, P.J., Ahern, G.L., Davidson, R.J. & Schwartz, G.E. (1997). Neuroanatomical correlates of pleasant and unpleasant emotion. *Neuropsychologia.* 35 (11). p.pp. 1437–1444.
- Larsson, C. & Ohlund, O. (2014). Amplitude modulation of sound from wind turbines under various meteorological conditions. *J Acoust Soc Am.* 135. p.pp. 67–73.
- Lee, S., Kim, K., Choi, W. & Lee, S. (2011). Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise. *Noise Control Eng J.* 59. p.pp. 38–46.

- Lehmann, A.G. & Busnel, R.G. (1979). Reduction of swimming time in mice through interaction of infrasound and alcohol. *Psychopharmacology*. 65 (1). p.pp. 79–84.
- Leventhall, G. (2003). *A Review of Published Research on Low Frequency Noise and Its Effects*. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), British Government.
- Leventhall, G. (2009). Low frequency noise: What we know, what we do not know, and what we would like to know. *J Low Freq Noise V A*. 28. p.pp. 79–104.
- Leventhall, G. (2007). What is infrasound? *Prog Biophys Mol Biol*. 93. p.pp. 130–137.
- Leventhall, H.G. (2004). Low frequency noise and annoyance. *Noise & Health*. 6. p.pp. 59–72.
- Lidstrom, I.M. (1978). *The Effects of Infrasound on Humans. Invest Report*. Umea.
- Lim, D.J., Dunn, D.E., Johnson, D.L. & Moore, T.J. (1982). Trauma of the ear from infrasound. *Acta Oto-Laryngologica*. 94 (3–4). p.pp. 213–231.
- Liu, J., Lin, T., Yan, X., Jiang, W., Shi, M., Ye, R., Rao, Z. & Zhao, G. (2010a). Effects of infrasound on cell proliferation in the dentate gyrus of adult rats. *Neuroreport*. 21 (8). p.pp. 585–589.
- Liu, Z.-H., Chen, J.-Z., Ye, L., Liu, J., Qiu, J.-Y., Xu, J., Lu, R., Yuan, X.-C., Zhang, W.-D., Li, X.-F. & Li, G. (2010b). Effects of infrasound at 8 Hz 90 dB/130 dB on NMDAR1 expression and changes in intracellular calcium ion concentration in the hippocampus of rats. *Mol Med Rep*. 3 (6). p.pp. 917–921.
- Liu, Z., Gong, L., Li, X., Ye, L., Wang, B., Liu, J., Qiu, J., Jiao, H., Zhang, W., Chen, J. & Wang, J. (2012). Infrasound increases intracellular calcium concentration and induces apoptosis in hippocampi of adult rats. *Mol Med Rep*. 5 (1). p.pp. 73–77.
- Maffei, L., Masullo, M., Di Gabriele, M., Votsi, N.-E.P., Pantis, J.D. & Senese, V.P. (2015). Auditory recognition of familiar and unfamiliar subjects with wind turbine noise. *Int J Environ Res Public Health*. 12 (4). p.pp. 4306–4320.
- Magari, S.R., Smith, C.E., Schiff, M. & Rohr, A.C. (2014). Evaluation of community response to wind turbine-related noise in Western New York State. *Noise & Health*. 16 (71). p.pp. 228–239.
- Majjala, P.P. (2013). *A Measurement-based Statistical Model to Evaluate Uncertainty in Long-range Noise Assessments*. P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland.

- Marks, A. & Griefahn, B. (2007). Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise. *Noise & Health*. 9 (34). p.pp. 1–7.
- Marquardt, T., Hensel, J., Mrowinski, D. & Scholz, G. (2007). Low-frequency characteristics of human and guinea pig cochleae. *J Acoust Soc Am*. 121 (6). p.pp. 3628–3638.
- Martinik, K. & Opltova, L. (1986). Human nonspecific response to sound stimulation. *J Hyg Epidemiol Microbiol Immunol*. 30 (2). p.pp. 139–144.
- McCallum, L.C., Whitfield Aslund, M.L., Knopper, L.D., Ferguson, G.M. & Ollson, C.A. (2014). Measuring electromagnetic fields (EMF) around wind turbines in Canada: Is there a human health concern? *Environ Health*. 13. p.p. 9.
- McCunney, R.J., Morfeld, P., Colby, W.D. & Mundt, K.A. (2015). Wind turbines and health: An examination of a proposed case definition. *Noise & Health*. 17 (77). p.pp. 175–181.
- McCunney, R.J., Mundt, K.A., Colby, W.D., Dobie, R., Kaliski, K. & Blais, M. (2014). Wind turbines and health: A critical review of the scientific literature. *J Occup Environ Med*. 56 (10). p.pp. e133-5.
- McMurtry, R.Y. & Krogh, C.M. (2014). Diagnostic criteria for adverse health effects in the environs of wind turbines. *JRSM open*. 5 (10).
- Meneguzzo, P., Tsakiris, M., Schioth, H.B., Stein, D.J. & Brooks, S.J. (2014). Subliminal versus supraliminal stimuli activate neural responses in anterior cingulate cortex, fusiform gyrus and insula: A meta-analysis of fMRI studies. *BMC psychology*. 2 (1). p.p. 52.
- Merlin, T., Newton, S., Ellery, B., Milverton, J. & Farah, C. (2015). Systematic Review of the Human Health Effects of Wind Farms. Adelaide: National Health and Medical Research Council.
- Michaud, D.S., Feder, K., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Denning, A., Bower, T., Villeneuve, P.J., Russell, E., Koren, G. & van den Berg, F. (2016a). Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise. *J Acoust Soc Am*. 139 (3). p.pp. 1467–1479.
- 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. (2016b). Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *J Acoust Soc Am*. 139 (3). p.pp. 1443–1454.



Michaud, D.S., Feder, K., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Denning, A., Murray, B.J., Frcp, C.D., Weiss, S.K., Villeneuve, P.J., van den Berg, F. & Bower, T. (2016c). Effects of wind turbine noise on self-reported and objective measures of sleep. *Sleep*. 39 (1). p.pp. 97–109.

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. (2016d). Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. *J Acoust Soc Am*. 139 (3). p.pp. 1455–1466.

Minor, L.B., Solomon, D., Zinreich, J.S. & Zee, D.S. (1998). Sound- and/or pressure-induced vertigo due to bone dehiscence of the superior semicircular canal. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 124 (3). p.pp. 249–258.

Mohr, G.C., Cole, J.N., Guild, E. & Vonkierge, H.E. (1965). Effects of low frequency and infrasonic noise on man. *Aerospace Medicine*. 36. p.pp. 817–824.

Moller, H. & Pedersen, C.S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health*. 6 (23). p.pp. 37–57.

Moller, H. & Pedersen, C.S. (2011). Low-frequency noise from large wind turbines. *J Acoust Soc Am*. 129 (6). p.pp. 3727–3744.

Morioka, I., Kuriyama, Y., Miyashita, K. & Takeda, S. (1996). Effects of infrasound on gastric mucosal blood flow in rats. *Environ Health Prev Med*. 1 (2). p.pp. 71–75.

Mroczek, B., Banas, J., Machowska-Szewczyk, M. & Kurpas, D. (2015). Evaluation of quality of life of those living near a wind farm. *Int J Environ Res Public Health*. 12 (6). p.pp. 6066–6083.

Mullington, J.M., Haack, M., Toth, M., Serrador, J.M. & Meier-Ewert, H.K. (2009). Cardiovascular, inflammatory, and metabolic consequences of sleep deprivation. *Prog Cardiovasc Dis*. 51 (4). p.pp. 294–302.

Munzel, T., Gori, T., Babisch, W. & Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *Eur Heart J*. 35 (13). p.pp. 829–836.

National Health and Medical Research Council (2016). *NHMRC awards funding into wind farms and human health*. Media release.

Naturvårdsverket (2001). *Ljud från vindkraftverk. Rapport 6241*.

Naturvårdsverket (2010). *Ljud från vindkraftverk. Reviderad utgåva av rapport 6241*.

- Niemann, H., Bonnefoy, X., Braubach, M., Hecht, K., Maschke, C., Rodrigues, C. & Robbel, N. (2006). Noise-induced annoyance and morbidity results from the pan-European LARES study. *Noise & Health*. 8 (31). p.pp. 63–79.
- Nissenbaum, M.A., Aramini, J.J. & Hanning, C.D. (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise & Health*. 14. p.pp. 237–243.
- Nivison, M.E. & Endresen, I.M. (1993). An analysis of relationships among environmental noise, annoyance and sensitivity to noise, and the consequences for health and sleep. *J Behav Med*. 16 (3). p.pp. 257–276.
- Nordin, S., Neely, G., Olsson, D. & Sandstrom, M. (2014). Odor and noise intolerance in persons with self-reported electromagnetic hypersensitivity. *Int J Environ Res Public Health*. 11 (9). p.pp. 8794–8805.
- Nykänen, H., Uosukainen, S., Antila, M. & Siponen, D. (2014). *Tuulivoimalan meluvaikutukset: Häiritsevyyssmittaristo ja sen käyttö. Tutkimusraportti VTT-R-04392-14*.
- Okada, A. & Inaba, R. (1990). Comparative study of the effects of infrasound and low-frequency sound with those of audible sound on sleep. *Environ Int*. 16 (4–6). p.pp. 483–490.
- Oliva, D., Hongisto, V., Keränen, J. & Koskinen, V. (2011). *Measurement of Low Frequency Noise in Rooms*. Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health.
- 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. *Environ Int*. 82. p.pp. 1–9.
- Orban, E., McDonald, K., Sutcliffe, R., Hoffmann, B., Fuks, K.B., Dragano, N., Viehmann, A., Erbel, R., Jockel, K.-H., Pundt, N. & Moebus, S. (2016). Residential road traffic noise and high depressive symptoms after five years of follow-up: Results from the Heinz Nixdorf Recall Study. *Environ Health Perspect*. 124 (5). p.pp. 578–585.
- Otto, T. & Giardino, N.D. (2001). Pavlovian conditioning of emotional responses to olfactory and contextual stimuli: A potential model for the development and expression of chemical intolerance. *Ann N Y Acad Sci*. 933. p.pp. 291–309.
- Palmquist, E., Claeson, A.-S., Neely, G., Stenberg, B. & Nordin, S. (2014). Overlap in prevalence between various types of environmental intolerance. *Int J Hyg Environ Health*. 217 (4–5). p.pp. 427–434.

- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Szymczak, W. & Sliwinska-Kowalska, M. (2010). Evaluation of annoyance from low frequency noise under laboratory conditions. *Noise & Health*. 12 (48). p.pp. 166–181.
- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Waszkowska, M., Szymczak, W., Kamedula, M. & Sliwinska-Kowalska, M. (2005a). Does low frequency noise at moderate levels influence human mental performance? *J Low Freq Noise V A*. 24 (1). p.pp. 25–42.
- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Waszkowska, M., Szymczak, W. & Sliwińska-Kowalska, M. (2005b). The impact of low-frequency noise on human mental performance. *Int J Occup Med Environ Health*. 18 (2). p.pp. 185–198.
- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Zaborowski, K., Zamojska-Daniszevska, M. & Waszkowska, M. (2014a). Annoyance related to wind turbine noise. *Arch Acoustics*. 39. p.pp. 89–102.
- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Zaborowski, K., Zamojska-Daniszevska, M. & Waszkowska, M. (2014b). Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: A pilot study. *Int J Occup Med Environ Health*. 27 (3). p.pp. 364–388.
- Pedersen, C.S., Moller, H. & Persson Waye, K. (2008). A detailed study of low-frequency noise complaints. *J Low Freq Noise V A*. 27. p.pp. 1–33.
- Pedersen, E. (2011). Health aspects associated with wind turbine noise: Results from three field studies. *Noise Control Eng J*. 59. p.pp. 47–53.
- Pedersen, E. (2003). Noise Annoyance from Wind Turbines: A review. Stockholm: Naturvårdsverket, Swedish Environmental Protection Agency.
- Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R. & Bouma, J. (2010). Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound. *Energy Policy*. 38. p.pp. 2520–2527.
- Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R. & Bouma, J. (2009). Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *J Acoust Soc Am*. 126 (2). p.pp. 634–643.
- Pedersen, E. & Persson Waye, K. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise: A dose-response relationship. *J Acoust Soc Am*. 116 (6). p.pp. 3460–3470.
- Pedersen, E. & Persson Waye, K. (2007). Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occup Environ Med*. 64 (7). p.pp. 480–486.

- Pedersen, E. & Persson Waye, K. (2008). Wind turbines: Low level noise sources interfering with restoration? *Environ Res Lett.* 3.
- Pei, Z., Meng, R., Zhuang, Z., Zhao, Y., Liu, F., Zhu, M.Z. & Li, R. (2013). Cardiac peroxisome proliferator-activated receptor-gamma expression is modulated by oxidative stress in acutely infrasound-exposed cardiomyocytes. *Cardiovasc Toxicol.* 13 (4). p.pp. 307–315.
- Pei, Z., Sang, H., Li, R., Xiao, P., He, J., Zhuang, Z., Zhu, M., Chen, J. & Ma, H. (2007). Infrasound-induced hemodynamics, ultrastructure, and molecular changes in the rat myocardium. *Environ Toxicol.* 22 (2). p.pp. 169–175.
- Pei, Z., Zhuang, Z., Xiao, P., Chen, J., Sang, H., Ren, J., Wu, Z. & Yan, G. (2009). Influence of infrasound exposure on the whole L-type calcium currents in rat ventricular myocytes. *Cardiovasc Toxicol.* 9 (2). p.pp. 70–77.
- Pei, Z.H., Chen, B.Y., Tie, R., Zhang, H.F., Zhao, G., Qu, P., Zhu, X.X., Zhu, M.Z. & Yu, J. (2011). Infrasound exposure induces apoptosis of rat cardiac myocytes by regulating the expression of apoptosis-related proteins. *Cardiovasc Toxicol.* 11 (4). p.pp. 341–346.
- Pennig, S., Quehl, J., Mueller, U., Rolny, V., Maass, H., Basner, M. & Elmenhorst, E.-M. (2012). Annoyance and self-reported sleep disturbance due to night-time railway noise examined in the field. *J Acoust Soc Am.* 132 (5). p.pp. 3109–3117.
- Perron, S., Plante, C., Ragettli, M.S., Kaiser, D.J., Goudreau, S. & Smargiassi, A. (2016). Sleep disturbance from road traffic, railways, airplanes and from total environmental noise levels in Montreal. *Int J Environ Res Public Health.* 13 (8).
- Perron, S., Tetreault, L.-F., King, N., Plante, C. & Smargiassi, A. (2012). Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults. *Noise & Health.* 14 (57). p.pp. 58–67.
- Persinger, M.A. (2014). Infrasound, human health, and adaptation: An integrative overview of recondite hazards in a complex environment. *Nat Hazards.* 70 (1). p.pp. 501–525.
- Persson, R., Bjork, J., Ardo, J., Albin, M. & Jakobsson, K. (2007). Trait anxiety and modeled exposure as determinants of self-reported annoyance to sound, air pollution and other environmental factors in the home. *Int Arch Occup Environ Health.* 81 (2). p.pp. 179–191.
- Persson Waye, K. (2011). Noise and Health - Effects of Low Frequency Noise and Vibrations: Environmental and Occupational Perspectives. In: J. O. Nriagu (ed.). *Encyclopedia of Environmental Health.* p.pp 240–253.

- Persson Waye, K. (1995). *On the Effects of Environmental Low Frequency Noise*. Thesis. Gothenburg: University of Gothenburg.
- Persson Waye, K., Bengtsson, J., Kjellberg, A. & Benton, S. (2001). Low frequency noise 'pollution' interferes with performance. *Noise & Health*. 4. p.pp. 33–49.
- Persson Waye, K., Bengtsson, J., Rylander, R., Hucklebridge, F., Evans, P. & Clow, A. (2002). Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance. *Life Sci*. 70 (7). p.pp. 745–758.
- Persson Waye, K., Clow, A., Edwards, S., Hucklebridge, F. & Rylander, R. (2003). Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality. *Life Sci*. 72 (8). p.pp. 863–875.
- Persson Waye, K. & Rylander, R. (2001). The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. *J Sound Vib*. 240 (3). p.pp. 483–497.
- Persson Waye, K. & Öhrström, E. (2002). Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *J Sound Vib*. 250. p.pp. 65–73.
- Petounis, A., Spyraakis, C. & Varonos, D. (1977a). Effects of infrasound on activity levels of rats. *Physiol Behav*. 18 (1). p.pp. 153–155.
- Petounis, A., Spyraakis, C. & Varonos, D. (1977b). Effects of infrasounds on the conditioned avoidance response. *Physiol Behav*. 18 (1). p.pp. 147–151.
- Pierpont, N. (2009). *Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment*. K-Selected Books.
- Pirrerera, S., De Valck, E. & Cluydts, R. (2010). Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health. *Environ Int*. 36 (5). p.pp. 492–498.
- Pitchika, A., Hampel, R., Wolf, K., Kraus, U., Cyrus, J., Babisch, W., Peters, A. & Schneider, A. (2017). Long-term associations of modeled and self-reported measures of exposure to air pollution and noise at residence on prevalent hypertension and blood pressure. *Sci Total Environ*. 593–594. p.pp. 337–346.
- Poulsen, A.H. & Sorensen, M. (2016). Wind Turbine Noise and Health, a nationwide prospective study in Denmark. In: *Inter-Noise 2016*. 2016, pp. 7858–7861.
- Punch, J.L., James, R. & Pabst, D. (2010). Wind-turbine noise: What audiologists should know. *Audiology Today*. p.p. 20.

- Punch, J.L. & James, R.R. (2016). *Wind Turbine Noise and Human Health: A Four-Decade History of Evidence that Wind Turbines Pose Risks*.
- Pyykkö, I. (2017). *Henkilökohtainen tiedonanto*.
- van Ravenzwaaij, J., Olde Hartman, T., van Ravesteijn, H., Eveleigh, R., van Rijswijk, E. & Lucassen, P. (2010). Explanatory models of medically unexplained symptoms: A qualitative analysis of the literature. *Ment Health Fam Med*. 7 (4). p.pp. 223–231.
- RenewableUK (2013). *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect*. London.
- Van Renterghem, T., Bockstael, A., De Weirt, V. & Botteldooren, D. (2013). Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise. *Sci Total Environ*. 456–457. p.pp. 333–345.
- Roberts, M. & Roberts, J. (2009). Evaluation of the Scientific Literature on the Health Effects Associated with Wind Turbines and Low Frequency Sound. Exponent Inc. & Wisconsin Public Service Commission.
- Robinson, D.W. & Dadson, R.S. (1956). A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *Br J Appl Sci Technol*. 7 (5). p.p. 166.
- Roosli, M., Mohler, E., Frei, P. & Vienneau, D. (2014). Noise-related sleep disturbances: Does gender matter? *Noise & Health*. 16 (71). p.pp. 197–204.
- Roswall, N., Raaschou-Nielsen, O., Ketzel, M., Gammelmark, A., Overvad, K., Olsen, A. & Sorensen, M. (2017). Long-term residential road traffic noise and NO<sub>2</sub> exposure in relation to risk of incident myocardial infarction - A Danish cohort study. *Environ Res*. 156. p.pp. 80–86.
- Rubin, G.J., Burns, M. & Wessely, S. (2014). Possible psychological mechanisms for 'wind turbine syndrome'. On the windmills of your mind. *Noise & Health*. 16. p.pp. 116–122.
- Russo, J.E., Crowson, M.G., DeAngelo, E.J., Belden, C.J. & Saunders, J.E. (2014). Posterior semicircular canal dehiscence: CT prevalence and clinical symptoms. *Otol Neurotol*. 35 (2). p.pp. 310–314.
- Rylander, R. (2004). Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance. *J Sound Vib*. 277 (3). p.pp. 471–478.
- Ryu, J., Sato, H., Kurakata, K. & Inukai, Y. (2011). Hearing thresholds for low-frequency complex tones of less than 150 Hz. *J Low Freq Noise V A*. 30 (1). p.pp. 21–30.

Sainio, M. & Karvala, K. (2017). Sisäilma ja ympäristöherkkyys. *Suomen Lääkärilehti*. p.pp. 848–854.

Salminen, E. (2013). Ympäristöherkkyys - taistelua tuulimyllyjä vastaan? *Suomen Lääkärilehti*. 68 (19). p.pp. 1404–1405.

Salt, A.N., Brown, D.J., Hartsock, J.J. & Plontke, S.K. (2009). Displacements of the organ of Corti by gel injections into the cochlear apex. *Hearing Res.* 250 (1–2). p.pp. 63–75.

Salt, A.N. & Hullar, T.E. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hear Res.* 268. p.pp. 12–21.

Salt, A.N. & Kaltenbach, J.A. (2011). Infrasound from wind turbines could affect humans. *Bull Sci Technol Soc.* 31. p.pp. 296–302.

Salt, A.N., Lichtenhan, J. & Rauch, S.D. (2014). How does wind turbine noise affect people. *Acoustics Today*. p.pp. 20–28.

Salt, A.N., Lichtenhan, J.T., Gill, R.M. & Hartsock, J.J. (2013). Large endolymphatic potentials from low-frequency and infrasonic tones in the guinea pig. *J Acoust Soc Am.* 133 (3). p.pp. 1561–1571.

Salt, A.N., Melichar, I. & Thalmann, R. (1987). Mechanisms of endocochlear potential generation by stria vascularis. *The Laryngoscope.* 97 (8 Pt 1). p.pp. 984–991.

Saracci, R. (1997). The World Health Organization needs to reconsider its definition of health. *BMJ.* 314 (7091). p.pp. 1409–1410.

Schaffer, B., Schlittmeier, S.J., Pieren, R., Heutschi, K., Brink, M., Graf, R. & Hellbruck, J. (2016). Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study. *J Acoust Soc Am.* 139 (5). p.p. 2949.

Schermuly, L. & Klinke, R. (1990). Infrasound sensitive neurones in the pigeon cochlear ganglion. *J Comp Physiol.* 166 (3). p.pp. 355–363.

Schmidt, J.H. & Klokke, M. (2014). Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review. *PLoS One.* 9. p.p. e114183.

Schmidt, F., Kollé, K., Kreuder, K., Schnorbus, B., Wild, P., Hechtner, M., Binder, H., Gori, T. & Munzel, T. (2015). Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease. *Clin Res Cardiol.* 104 (1). p.pp. 23–30.

Schmidt, F.P., Basner, M., Kroger, G., Weck, S., Schnorbus, B., Muttray, A., Sariyar, M., Binder, H., Gori, T., Warnholtz, A. & Munzel, T. (2013). Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults. *Eur Heart J.* 34 (45). p.p. 3508–14a.

Schreckenber, D., Griefahn, B. & Meis, M. (2010). The associations between noise sensitivity, reported physical and mental health, perceived environmental quality, and noise annoyance. *Noise & Health.* 12. p.pp. 7–16.

Schust, M. (2004). Effects of low frequency noise up to 100 Hz. *Noise & Health.* 6 (23). p.pp. 73–85.

Seidler, A., Hegewald, J., Seidler, A.L., Schubert, M., Wagner, M., Droge, P., Haufe, E., Schmitt, J., Swart, E. & Zeeb, H. (2017). Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data. *Environ Res.* 152. p.pp. 263–271.

Seidler, A., Wagner, M., Schubert, M., Droge, P., Romer, K., Pons-Kuhnemann, J., Swart, E., Zeeb, H. & Hegewald, J. (2016). Aircraft, road and railway traffic noise as risk factors for heart failure and hypertensive heart disease: A case-control study based on secondary data. *Int J Hyg Environ Health.* 219 (8). p.pp. 749–758.

Selander, J., Bluhm, G., Theorell, T., Pershagen, G., Babisch, W., Seiffert, I., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Vigna-Taglianti, F., Antoniotti, M.C., Velonakis, E., Davou, E., Dudley, M.-L. & Jarup, L. (2009). Saliva cortisol and exposure to aircraft noise in six European countries. *Environ Health Perspect.* 117 (11). p.pp. 1713–1717.

Seo, Y.J., Kim, J., Choi, J.Y. & Lee, W.S. (2013). Visualization of endolymphatic hydrops and correlation with audio-vestibular functional testing in patients with definite Meniere's disease. *Auris Nasus Larynx.* 40 (2). p.pp. 167–172.

Shepherd, D. & Billington, R. (2011). Mitigating the acoustic impacts of modern technologies. *Bull Sci Technol Soc.* 31 (5). p.pp. 389–398.

Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K.N. & Hill, E.M. (2011). Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise & Health.* 13. p.pp. 333–339.

Shepherd, K.P. & Hubbard, H.H. (1991). Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines. *Noise Control Eng J.* 36 (1). p.pp. 5–15.

Sherry, C.J., Cook, M.C., Jauchem, J.R., Brown, G.C., Whitmore, H.B. & Edrids, R.W. (2008). The effects of infrasound on rhesus monkey performance of a continuous compensatory tracking task. *J Low Freq Noise V A.* 27 (1). p.pp. 53–64.



- Shore, S.E. (2005). Multisensory integration in the dorsal cochlear nucleus: Unit responses to acoustic and trigeminal ganglion stimulation. *Eur J Neurosci.* 21 (12). p.pp. 3334–3348.
- Siponen, D. (2011). *Noise Annoyance from Wind Turbines. Research Report VTT-R-00951-11.*
- Starve, R.N. & Johnson, D.L. (1975). Human whole-body exposure to infrasound. *Aviat Space Environ Med.* 46 (4 Sec 1). p.pp. 428–431.
- Sondergaard, B. (2015). Low frequency noise from wind turbines: Do the Danish regulations have any impact? An analysis of noise measurements. *Int J Aeroacoust.* 14 (5–6). p.pp. 909–915.
- Sorensen, M., Hvidberg, M., Andersen, Z.J., Nordsborg, R.B., Lillelund, K.G., Jakobsen, J., Tjonneland, A., Overvad, K. & Raaschou-Nielsen, O. (2011a). Road traffic noise and stroke: A prospective cohort study. *Eur Heart J.* 32 (6). p.pp. 737–744.
- Sorensen, M., Hvidberg, M., Hoffmann, B., Andersen, Z.J., Nordsborg, R.B., Lillelund, K.G., Jakobsen, J., Tjonneland, A., Overvad, K. & Raaschou-Nielsen, O. (2011b). Exposure to road traffic and railway noise and associations with blood pressure and self-reported hypertension: A cohort study. *Environ Health.* 10. p.p. 92.
- Spyraki, C., Papadopoulou-Daifoti, Z. & Petounis, A. (1978). Norepinephrine levels in rat brain after infrasound exposure. *Physiol Behav.* 21 (3). p.pp. 447–448.
- Spyraki, C., Papadopoulou, Z., Zis, B. & Varonos, D. (1980). Effects of diazepam-infrasounds combination on locomotor activity and avoidance behaviour of rats. *Pharmacol Biochem Behav.* 12 (5). p.pp. 767–771.
- Stansfeld, S.A. (1992). Noise, noise sensitivity and psychiatric disorder: Epidemiological and psychophysiological studies. *Psychol Med Monogr Suppl.* 22. p.pp. 1–44.
- Stansfeld, S.A., Clark, C.R., Turpin, G., Jenkins, L.M. & Tarnopolsky, A. (1985). Sensitivity to noise in a community sample: II. Measurement of psychophysiological indices. *Psychol Med.* 15 (2). p.pp. 255–263.
- Stansfeld, S.A., Haines, M.M., Berry, B. & Burr, M. (2009). Reduction of road traffic noise and mental health: an intervention study. *Noise & Health.* 11 (44). p.pp. 169–175.
- Stansfeld, S., Gallacher, J., Babisch, W. & Shipley, M. (1996). Road traffic noise and psychiatric disorder: prospective findings from the Caerphilly Study. *BMJ.* 313 (7052). p.pp. 266–267.

State Government of Victoria (2013). Technical information: Wind farms, sound and health. Melbourne: Department of Health.

Strandberg, U., Bjerle, P., Danielsson, A. & Hornqvist-Bylund, S Landström, U. (1986). *Studies of Circulation Changes During Exposure to Infrasound*. Solna.

Stull, R.B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer Netherlands.

Swingle, P. (1991). *Subliminal Treatment Procedures: A Clinician's Guide*. Professional Resource Press.

Sygna, K., Aasvang, G.M., Aamodt, G., Oftedal, B. & Krog, N.H. (2014). Road traffic noise, sleep and mental health. *Environ Res*. 131. p.pp. 17–24.

Tachibana, H., Yano, H., Fukushima, A. & Sueoka, S. (2014). Nationwide field measurements of wind turbine noise in Japan. *Noise Control Eng J*. 62. p.pp. 90–101.

Tagikawa, H., Sakamoto, H. & Murata, M. (1991). Effects of infrasound on vestibular function. *J Sound Vib*. 151 (3). p.pp. 455–460.

Tak, L.M. & Rosmalen, J.G.M. (2010). Dysfunction of stress responsive systems as a risk factor for functional somatic syndromes. *J Psychosom Res*. 68 (5). p.pp. 461–468.

Tamura, H., Ohgami, N., Yajima, I., Iida, M., Ohgami, K., Fujii, N., Itabe, H., Kusudo, T., Yamashita, H. & Kato, M. (2012). Chronic exposure to low frequency noise at moderate levels causes impaired balance in mice. *PLoS One*. 7 (6). p.p. e39807.

Taylor, E. (1994). *Thinking Without Thinking: Who's in Control of Your Mind*. Progressive Awareness Research.

Terreberry, R.R. & Neafsey, E.J. (1983). Rat medial frontal cortex: A visceral motor region with a direct projection to the solitary nucleus. *Brain Res*. 278 (1–2). p.pp. 245–249.

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos (2011). *Tautiluokitus ICD-10. Klassifikation av sjukdomar. Luokitukset, termistöt ja tilasto-ohjeet*.

Tesarz, M., Kjellberg, A., Landstrom, U. & Holmberg, K. (1997). Subjective response patterns related to low frequency noise. *J Low Freq Noise V A*. 16. p.pp. 145–149.

- Thomsen, J., Sass, K., Odkvist, L. & Arlinger, S. (2005). Local overpressure treatment reduces vestibular symptoms in patients with Meniere's disease: A clinical, randomized, multicenter, double-blind, placebo-controlled study. *Otol Neurotol.* 26 (1). p.pp. 68–73.
- Thorne, B. (2012). Finding the character of wind turbine sound. *Acoust Australia.* 40 (1). p.pp. 62–63.
- Todd, N.P.M., Rosengren, S.M. & Colebatch, J.G. (2003). A short latency vestibular evoked potential (VsEP) produced by bone-conducted acoustic stimulation. *J Acoust Soc Am.* 114 (6 Pt 1). p.pp. 3264–3272.
- Todd, N.P.M., Rosengren, S.M. & Colebatch, J.G. (2008). Tuning and sensitivity of the human vestibular system to low-frequency vibration. *Neurosci Lett.* 444 (1). p.pp. 36–41.
- Tonin, R., Brett, J. & Colagiuri, B. (2016). The effect of infrasound and negative expectations to adverse pathological symptoms from wind farms. *J Low Freq Noise V A.* 35 (1). p.pp. 77–90.
- Tran, M.T.D., Arendt-Nielsen, L., Kupers, R. & Elberling, J. (2013). Multiple chemical sensitivity: On the scent of central sensitization. *Int J Hyg Environ Health.* 216 (2). p.pp. 202–210.
- Turnbull, C., Turner, J. & Walsh, D. (2012). Measurement and level of infrasound from wind farms and other sources. *Acoust Australia.* 40 (1). p.pp. 45–50.
- Turunen, A., Tiittanen, P. & Lanki, T. (2016). Meluhaittojen kokeminen ja oireilu yhdeksällä tuulivoima-alueella Suomessa. *Ympäristö ja Terveys -lehti.* 47 (5). p.pp. 76–81.
- Tyrrell, J.S., Whinney, D.J.D., Ukoumunne, O.C., Fleming, L.E. & Osborne, N.J. (2014). Prevalence, associated factors, and comorbid conditions for Meniere's disease. *Ear Hear.* 35 (4). p.pp. e162-9.
- Ueberfuhr, M.A., Wiegrebe, L., Krause, E., Gurkov, R. & Drexler, M. (2016). Tinnitus in normal-hearing participants after exposure to intense low-frequency sound and in Meniere's disease patients. *Front Neurol.* 7. p.p. 239.
- Uosukainen, S. (2010). *Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys. VTT Tiedotteita 2529.*
- Vartiainen, A.-K., Turunen, A.W., Ung-Lanki, S. & Lanki, T. (2015). Meluherkkyydellä on tärkeä rooli melun kokemisessa. *Psykologia.* 4 (50). p.pp. 244–256.

Weichenberger, M., Bauer, M., Kuhler, R., Hensel, J., Forlim, C.G., Ihlenfeld, A., Ittermann, B., Gallinat, J., Koch, C. & Kuhn, S. (2017). Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold: Evidence from fMRI. *PLoS One*. 12 (4). p.p. e0174420.

Weichenberger, M., Kuhler, R., Bauer, M., Hensel, J., Bruhl, R., Ihlenfeld, A., Ittermann, B., Gallinat, J., Koch, C., Sander, T. & Kuhn, S. (2015). Brief bursts of infrasound may improve cognitive function: An fMRI study. *Hearing Res.* 328. p.pp. 87–93.

Weinstein, N.D. (1978). Individual differences in reactions to noise: A longitudinal study in a college dormitory. *J Appl Psychol.* 63 (4). p.pp. 458–466.

Weisz, C.J.C., Lehar, M., Hiel, H., Glowatzki, E. & Fuchs, P.A. (2012). Synaptic transfer from outer hair cells to type II afferent fibers in the rat cochlea. *J Neurosci.* 32 (28). p.pp. 9528–9536.

WHO (2011). *Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe.

WHO (2009). *Night Noise Guidelines for Europe*. Copenhagen: World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe.

Witthoft, M., Gerlach, A.L. & Bailer, J. (2006). Selective attention, memory bias, and symptom perception in idiopathic environmental intolerance and somatoform disorders. *J Abnorm Psychol.* 115 (3). p.pp. 397–407.

Witthoft, M., Rist, F. & Bailer, J. (2009). Abnormalities in cognitive-emotional information processing in idiopathic environmental intolerance and somatoform disorders. *J Behav Ther Exp Psychiatry.* 40 (1). p.pp. 70–84.

Witthoft, M. & Rubin, G.J. (2013). Are media warnings about the adverse health effects of modern life self-fulfilling? An experimental study on idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF). *J Psychosom Res.* 74 (3). p.pp. 206–212.

Yamada, S., Watanabe, T., Kosaka, T., Uchiyama, Y., Kasada, K. & Tamura, S. (1984). Psychological and physiological effects of low-frequency noise. *Noise Control Eng J.* 23 (3). p.p. 124.

Yamamura, K. & Kishi, R. (1980). Effects of infrasound on the rota-rod treadmill performance of rats. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 45 (1). p.pp. 81–86.

- Yount, G., Taft, R., West, J. & Moore, D. (2004). Possible influence of infrasound on glioma cell response to chemotherapy: A pilot study. *J Altern Complement Med.* 10 (2). p.pp. 247–250.
- Yuan, H., Long, H., Liu, J., Qu, L., Chen, J. & Mou, X. (2009). Effects of infrasound on hippocampus-dependent learning and memory in rats and some underlying mechanisms. *Environ Toxicol Pharmacol.* 28 (2). p.pp. 243–247.
- Yunus, M.B. (2015). Editorial review: An update on central sensitivity syndromes and the issues of nosology and psychobiology. *Curr Rheumatol Rev.* 11 (2). p.pp. 70–85.
- Zald, D.H. & Pardo, J. V (2002). The neural correlates of aversive auditory stimulation. *NeuroImage.* 16 (3 Pt 1). p.pp. 746–753.
- Zhang, M.Y., Chen, C., Xie, X.J., Xu, S.L., Guo, G.Z. & Wang, J. (2016). Damage to hippocampus of rats after being exposed to infrasound. *Biomed Environ Sci.* 29 (6). p.pp. 435–442.
- Zhuang, Z., Pei, Z. & Chen, J. (2007). Infrasound-induced changes on sexual behavior in male rats and some underlying mechanisms. *Environ Toxicol Pharmacol.* 23 (1). p.pp. 111–114.
- Zijlema, W., Cai, Y., Doiron, D., Mbatchou, S., Fortier, I., Gulliver, J., de Hoogh, K., Morley, D., Hodgson, S., Elliott, P., Key, T., Kongsgard, H., Hveem, K., Gaye, A., Burton, P., Hansell, A., Stolk, R. & Rosmalen, J. (2016). Road traffic noise, blood pressure and heart rate: Pooled analyses of harmonized data from 88,336 participants. *Environ Res.* 151. p.pp. 804–813.

# Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen

ISSN 1797-3562 (verkkójulkaisu)

ISBN 978-952-327-229-3

[julkaisut.valtioneuvosto.fi](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi)



Työ- ja elinkeinoministeriö  
Arbets- och näringsministeriet