

Tuulivoimaloiden infraäänät ja niiden terveysvaikutukset



Valtteri Hongisto & David Oliva

Tuulivoimaloiden infraäänät ja niiden terveysvaikutukset

Turun ammattikorkeakoulun raportteja 239

Turun ammattikorkeakoulu 2017
Turku 2017

ISBN 978-952-216-653-1 (pdf)
ISSN 1459-7764 (elektroninen)
Jakelu: loki.turkuamk.fi

Sisältö

1	Tausta ja tarkoitus.....	9
2	Ääni ja infraääni	10
2.1	Infraäänten kuuleminen	10
2.2	Infraäänten mittaaminen	14
2.3	Infraäänen lähteitä	14
2.4	Äänen ja infraäänen leviäminen ympäristössä	15
3	Infraääni tuulivoima-alueilla.....	18
3.1	Tuulivoimaloiden äänen syntymekanismi	18
3.2	Tuulivoimalan äänenpainetason riippuvuus toimintaperiaatteesta ja tehosta	18
3.3	Infraäänen äänenpainetasot asuntojen etäisyyksillä	21
3.4	Tuulivoimaloiden infraäänen aiheuttamat äänenpainetasot sisätiloissa	22
3.5	Maan pinnan värähtely	23
3.6	Rakennusten värähtely ja räminä	24
3.7	Ohjeavrot tuulivoimaloiden pientaajuisen melun äänenpainetasoille	25
4	Infraäänen vaikutukset.....	26
4.1	Johdanto	26
4.2	Kuultavan infraäänen vaikutukset	26
4.3	Ei-kuultavan infraäänen vaikutukset	28
4.4	FMRI-tutkimukset	29
4.5	Ulkoisten karvasolujen hypoteesi	29
4.6	Kehon värähtely	30
5	Tuulivoimaloiden äänen ja infraäänen terveysvaikutukset.....	31
5.1	Syy-seuraus-suhteen osoittamisen haasteet	31

5.2	Melun häiritsevyys	32
5.3	Stressivaikutukset	34
5.4	Terveysoirevaikutukset	36
5.5	Unen häiriintyminen	36
5.6	”Tuuliturbiinisyndrooma”	37
5.7	”Vibroakustinen tauti”	39
5.8	Elämänlaatu	40
5.9	Diabetes	43
6	Miten tuulivoimaloista koetut oireet selittyvät?	44
6.1	Johdanto	44
6.2	Nosebovaikutus	45
6.3	Ympäristöyliherkkyys	51
6.4	Perusteeton aiheuttajaksi lukeminen (misattribution)	53
6.5	Huolestuneisuus	53
6.6	Melun häiritsevyys	55
6.7	Persoonallisuustekijät	56
6.8	Median ja internetin antama kuva	56
6.9	Amplitudimodulaatio	57
6.10	Herkistyminen	58
7	Infraäänien mittaustulokset.....	59
7.1	Tavoite	59
7.2	Menetelmät	59
7.3	Mittauskohteet	61
7.4	Mittaustulokset ja niiden tulkinta	61
8	Jatkotutkimustarpeet	66
9	Johtopäätökset.....	68
	Lähteet.....	70

Tiivistelmä

Hongisto, V., Oliva, D. (2017). Tuulivoimaloiden infraäänien ja niiden terveysvaikutukset. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 239, 76 s., Turku. ISBN 978-952-216-653-1 (pdf).

Infraääni: Infraäänellä tarkoitetaan ääniä, joiden taajuus on pieni, alle 20 Hz. Vastoin yleisiä käsityksiä, infraäänikin on korvin kuultavaa, kunhan sen äänenpainetaso ylittää kuulokynnyksen. Infraäänien kuulokynnys on erittäin korkea: äänenpainetaso pitää olla yli 90–120 dB riippuen taajuudesta, jotta infraääni voitaisiin kuulla. Esimerkiksi 1000 Hz:n taajuudella kuulokynnyksen äänenpainetaso on noin 0 dB. Korvin kuultavaa infraääntä esiintyy ympäristössämme erittäin harvoin. Sen sijaan ei-kuultavaa infraääntä (äänenpainetaso alle 90 dB) esiintyy ympäristössämme jatkuvasti. Sitä aiheuttavat mm. ilmakehän painevaihtelut, rakenteiden värähtelyt, teolliset prosessit ja tuulivoimalat.

Tausta ja tavoite: Tuulivoimaloiden infraäänien on väitetty aiheuttavan negatiivisia terveysvaikutuksia, kuten erilaisia oireita ja sairastumisia, lähellä tuulivoima-alueita asuvien keskuudessa. Tavoitteena oli selvittää kirjallisuustutkimuksen keinoin, onko tuulivoimaloiden infraäänillä havaittu em. terveysvaikutuksia ja mitkä tekijät voisivat niitä selittää. Lisäksi haluttiin akustisilla mittauksilla selvittää tuulivoimaloiden aiheuttamien infraäänien äänenpainetasojen [dB] suhdetta arkielämässä yleisesti esiintyvien infraäänien tasoihin.

Menetelmät: Kirjallisuustutkimusta varten koottiin tietoa pääasiassa vertaisarvioituista tieteellisistä tutkimusartikkeleista ja vertaisarvioituista kirjallisuuskatsauksista. Infraäänien mittauksia tehtiin tavanomaisissa elinympäristöissä ja kahden tuulivoima-alueen lähellä Suomessa.

Kirjallisuustutkimuksen tulokset: Infraäänien terveysvaikutukset ovat hyvin pitkälle samoja kuin äänen vaikutukset ylipäätään. Vaikutuksia alkaa ilmetä nykytiedon mukaan vasta, kun äänenpainetaso ylittää kuulokynnyksen. Yleisimmin raportoitu infraäänien vaikutus on häiritsevyys. Häiritsevyys alkaa yleensä heti, kun äänenpainetaso ylittää kuulokynnyksen.

Nykyaikaiset tuulivoimalat eivät aiheuta infraääntä, jonka äänenpainetaso ylittäisi kuulokynnyksen. Äänenpainetaso on ulkona korkeimmillaan noin 80 dB (1 Hz) noin 100 m päässä voimaloista. Tätä kauempana äänenpainetaso pienenee aina 6 dB, kun etäisyys kaksinkertaistuu. Tyypillisesti infraäänien äänenpainetasot ovat asuntojen etäisyyksillä (yli 500 metriä) alle 70 dB, kun voimalat käyvät täydellä teholla. Tuulivoimaloiden infraääni on siis ei-kuultavaa infraääntä. Tutkimustieto ei tue näkemystä, että tuulivoimaloiden infraääni aiheuttaisi ihmisille negatiivisia terveysvaikutuksia. Tähänastisissa tutkimuksissa ei ole havaittu itsearvioidun terveyden tai objektiivisesti mitatun stressin riippuvan etäisyydestä tuulivoimaloihin. Keskeinen ja kiistaton tuulivoimaloiden aiheuttama terveysvaikutus on tuulivoimalamelun häiritsevyys: yhteys on havaittu useissa eri maissa, myös Suomessa.

Tästä huolimatta pieni osa väestöstä kokee tuulivoiman aiheuttavan negatiivisia terveysoireita. Oireita on pyritty tiedekirjallisuudessa selittämään erilaisilla tavoilla, kuten väärän tiedon aiheuttama nosebovaikutus, perusteeton oireiden aiheuttajaksi lukeminen, huolestuneisuus, melun häiritsevyys, persoonallisuustekijät ja median levittämä väärä tieto. Tieteellisen näytön valossa ainoa oireiden olemassaoloon yhteydessä oleva tekijä on ollut melun häiritsevyys: oirekokemukset ovat olleet voimakkaampia niillä asukkailla, jotka ovat raportoineet korkeaa melun häiritsevyyttä, riippumatta siitä, mille tuulivoimalamelun äänitasolle asukkaat ovat altistuneet. Oireiden selitys lienee monisyinen ja jokaisen oireita kokevan yksilön tapauksessa erilainen.

Mittaukset: Infraääntä mitattiin 31 paikassa. Mittaukset tukivat jo kirjallisuudessa esitettyä näkemystä, että tuulivoima-alueiden lähellä infraäänien äänenpainetaso ei merkittävästi poikkea siitä, mitä voidaan havaita erilaisissa elinympäristöissä kaukana tuulivoima-alueista.

Johtopäätökset: Vertaisarvioitu tiedekirjallisuus ei puolla sitä näkemystä, että tuulivoimaloiden, saati tuulivoimaloiden aiheuttama infraääni, aiheuttaisi asukkaille terveyshaittoja. Meluntorjunta näyttyy järkevimmältä negatiivisten terveysvaikutusten vähentämiskeinolta. Tutkimusta terveysvaikutuksista tarvitaan lisää, koska tutkimuksia on verrattain vähän ja niissä on sovellettu erilaisia menetelmiä.

Rahoittajat: Tutkimuksen rahoitti Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Raportti laadittiin huhti-toukokuussa 2017 ja sen kirjoitti Valteri Hongisto. Mittaukset teki ja raportoi David Oliva. Rahoittaja ei puuttunut tutkimukseen valittuihin kirjallisuuslähteisiin, raportin näkökulmaan, raportin tietosisältöön tai mittauspisteiden valintaan.

Summary

Hongisto, V., Oliva, D. (2017). *Infrasounds of wind turbines and their health effects*. Reports from Turku University of Applied Sciences 239 (In Finnish), 76 pp., Turku, Finland. ISBN 978-952-216-653-1 (pdf).

Infrasound. The usual definition of infrasound is sound with a frequency lower than 20 Hz. Against general beliefs, infrasound is audible, if the sound pressure level (SPL, expressed in dB) exceeds the hearing threshold of infrasound. The hearing threshold of infrasound is very high: the SPL must exceed 90–120 dB to be audible, depending on frequency. For comparison, the hearing threshold at a frequency of 1000 Hz is only 0 dB. Audible infrasound is very rare in normal living environments. Instead, we are continuously exposed to inaudible infrasound (SPL under 90 dB). Inaudible infrasound originates from e.g. pressure variations of the atmosphere, vibration of building structures, industrial processes, vehicles and wind turbines.

Purpose. It has been suggested that the infrasound from wind turbines produces adverse health effects, such as different symptoms and illnesses among residents living close to wind power areas. The purpose of this study is to investigate if adverse health effects are observed in existing epidemiological studies and how the adverse health effects could be explained. The second purpose is to compare the infrasound SPL of wind turbines to the infrasound SPL observed in normal living environments.

Methods. Peer-reviewed scientific review papers and peer-reviewed original research papers were collected for the literature review. Infrasound measurements were conducted both indoors and outdoors in different environments, including wind power areas.

Results of literature review. The health effects of infrasound do not differ from the health effects of noise. Infrasound can produce adverse health effects when the infrasound SPL exceeds the hearing threshold. The hearing threshold depends on frequency and it is well reported also for infrasound. The most usual adverse health effect of infrasound is annoyance. Depending on the individual, annoyance perception can appear immediately after the hearing threshold of infrasound is exceeded.

Modern wind turbines do not produce infrasound SPLs exceeding the hearing threshold. At the distance of 100 metres from the turbines, the SPL of infrasound is at most 80 dB

at the frequency of 1 Hz. The SPL reduces by 6 dB when the distance to the wind power area doubles. The distance to the nearest residential dwelling is seldom less than 500 metres, at which distance the infrasound SPL remains below 70 dB at full power. The infrasound of wind turbines is inaudible. Scientific research does not support the view that inaudible sound or the infrasound from wind turbines could induce adverse health effects. The studies conducted near wind power areas have not revealed that self-rated health or objectively measured stress would depend on the distance to the wind turbines. Instead, the indisputable health effect of wind turbines is noise annoyance which is caused by audible sound. The association between the A-weighted SPL and annoyance has been observed also in Finland.

However, a minority of the population living close to wind power areas experiences that the infrasound from wind turbines explains their health symptoms. Scientific literature has attempted to explain these symptom experiences in various ways, such as the nocebo effect caused by negative false information, misattribution of pre-existing or new symptoms, stress caused by the concern of possible health effects or reduction of real estate prices, noise annoyance, personality factors and biased information distributed by media. From the scientific point of view, the only factor associated with the symptoms is noise annoyance: symptoms have been stronger among residents who perceived high noise annoyance independent of the A-weighted SPL of wind turbine noise exposure. The reasons for the symptoms always depend on the individual.

Results of measurements. Infrasound was measured in 31 locations. Measurement results supported the existing view provided by the scientific literature, according to which the infrasound SPL in the proximity of wind power areas does not significantly differ from the infrasound SPL far from wind power areas.

Conclusions. Scientific literature does not support the view that the infrasound from wind power areas could explain the adverse health effects of residents. Noise control seems to be the most reasonable way of reducing adverse health effects. However, more research in this field is needed since the number of existing studies is so far quite low.

Funders. This research was funded by Finnish Wind Power Association. The report was written in April–May 2017 by Valteri Hongisto. The measurements were conducted and reported by David Oliva. The funder did not interfere with the selection of the scientific literature, the perspective of the report, the content of the report, nor the locations of infrasound measurements.

1 Tausta ja tarkoitus

Tuulivoimaloiden infraäänien on väitetty vaikuttavan terveyteen negatiivisesti. Internetissä ja mediassa on sekä oikeaa että väärää tietoa tuulivoimaloiden infraäänistä ja niiden terveysvaikutuksista. Väärä tieto voi kuitenkin vaikuttaa terveyteen haitallisemmin kuin itse tuulivoimalat tai niiden aiheuttama infraääni. Tämän vuoksi tarvitaan päivitettyä faktatietoa infraäänien ja tuulivoimaloiden infraäänien terveysvaikutuksista, mittaustietoa infraäänien voimakkuuksista sekä arviointia siitä, minkälaista jatkotutkimusta tulisi tehdä.

Tähän mennessä tuulivoimaloiden ääniä tai infraääniä koskevia riippumattomia kirjallisuuskatsauksia on esitetty suomenkielisenä vain muutamia (Hongisto, 2014; Turunen ja Lanki, 2015).

Tämän raportin tavoitteena on kuvata, mitä infraääni on, miten sitä mitataan sekä minkä verran infraääntä elinympäristössä ja tuulivoima-alueiden läheisyydessä esiintyy. Toisena tavoitteena on esittää tiedeyhteisön käsitys infraäänien sekä tuulivoimaloiden infraäänien terveysvaikutuksista. Lisäksi tavoitteena oli kartoittaa tiedeyhteisön tarjoamia selityksiä siihen, miksi tuulivoima-alueiden lähellä asuvat voivat saada oireita tai sairastua.

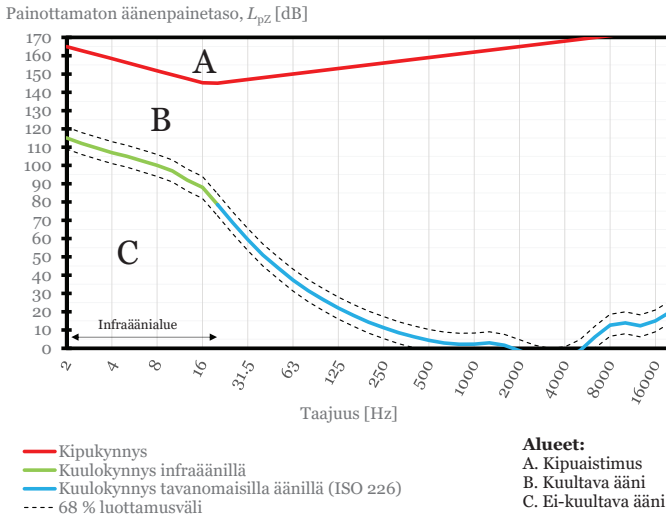
2 Ääni ja infraääni

2.1 Infraäänten kuuleminen

Ääni on ilmanpaineen vaihtelua, jonka korva voi aistia. Äänen voimakkuutta kuvataan suureella äänenpainetaso, jonka yksikkö on desibeli [dB]. Taajuuden yksikkö on Hertsi [Hz] ja se tarkoittaa värähdysten lukumäärää sekunnissa. Esimerkiksi pianon alimman sävelen taajuus on 27,5 Hz (subkontra A) ja korkeimman 4186 Hz (C-5).

Äänenpainetaso mitataan yleensä vain taajuuksilla 20–20.000 Hz, jolloin saadaan ns. spektri eli äänen taajuusjakauma. Luvussa 7 on esitetty esimerkkejä erilaisten äänten taajuusjakaumista. Infraäänit jätetään yleensä mittaamatta, koska niiden äänenpainetaso harvoin ylittää kuulokynnyksen.

Kuulokynnyksellä tarkoitetaan alinta äänenpainetasoa, jonka 18-vuotias normaali-kuuloinen ihminen kuulee. Kuulokynnys on standardisoitu taajuusalueella 20–20.000 Hz (kuva 2.1). Tätä taajuusaluetta kutsutaan kuuloalueeksi mutta nimitys on harhaanjohtava. Ihminen kuulee myös infraääniä ja ultraääniä. Tutkimusten mukaan ihmisen on havaittu kuulevan ääniä ainakin taajuusvälillä 1–30.000 Hz (Berglund ja Hassmen, 1996). Tämä taajuusalue edustaa ihmisen kuuloaluetta paremmin kuin tavanomaisesti käytetty taajuusalue 20–20.000 Hz.



Kuva 2.1. Ihmisen standardisoitu kuulokynnys taajuuksilla 20–20.000 Hz (ISO 226, 2003) ja infraäänillä 1–20 Hz (Watanabe & Møller, 1990). Nämä edustavat normaali-kuuloisen väestön keskiarvoa. Ei-kuultavia ääniä ovat kaikki äänet, jotka ovat sinisen tai vihreän viivan alapuolella.

Kuvan 2.1 mukaan kuuloaisti on herkimmillään 1.000–3.000 Hz:n alueella. Ihminen kuulee infra- ja ultraääniä erittäin huonosti. Infraäänten äänenpainetaso pitää olla erittäin suuri, jotta niitä voitaisiin kuulla. Kuultavia infraääniä myös esiintyy ympäristössämme erittäin vähän. Tästä johtuen standardisoitu kuulokynnys on rajattu taajuusvälille 20–20.000 Hz. Tätä kutsutaan tässä raportissa ”tavanomaiseksi kuuloalueeksi”.

Taajuutta 20 Hz ei tule kuvan 2.1 perusteella pitää ratkaisevana rajataajuutena, jonka alapuolella äänen aistiminen muuttaisi erityisesti luonnettaan. Ääni on samantyyppistä ilmanpaineen vaihtelua, riippumatta taajuudesta. Ääni, mukaan lukien infraääni, on kuultavissa, jos sen voimakkuus ylittää kuvan 2.1 kuulokynnyksen. Vastavasti ääni, myös infraääni, ei ole kuultavissa, jos sen voimakkuus alittaa kuvan 2.1 kuulokynnyksen. Ääni ei siis ole väistämättä ei-kuultavaa, jos sen taajuus on alle 20 Hz.

Useat tieteelliset tutkimukset ovat julkaisseet kuulokynnyksen myös infraäänille. Kaiutinkuuntelulla tuloksia on raportoitu 4 Hz asti ja kuulokekuuntelulla aina 1.5 Hz asti (Leventhall, 2009). Viitatuimpia alan kirjallisuustutkimuksia ovat mm. Bro-

ner (1978), Berglund ja Hassmén 1996, Leventhall (2003), Schust (2004) ja Møller ja Pedersen (2004), joihin kuulokynnys kuvassa 2.1 perustuu.

Infraäänen kuulokynnystä ei esitetä peruskoulun, lukion ja ammattikorkeakoulujen opetusmateriaaleissa. Asiaa käsitellään riittämättömästi myös yliopistojen opetusmateriaaleissa. Perusopetuksen tarjoama puutteellinen tieto on aiheuttanut virheelisen käsityksen siitä, että infraääniä (taajuudet alle 20 Hz) ja ultraääniä (taajuudet yli 20.000 Hz) ei kuultaisi lainkaan. Tämä on yksi syy siihen, että infraääneen liitetään mystiikkaa, koska yleinen ajattelumalli on, että infraääntä ei voi kuulla. Samaan aikaan on tiedossa, että voimakkailla infraäänillä on haitallisia terveysvaikutuksia (Broner, 1978; Berglund ja Hassmén (1996); Leventhall, 2003; Schust, 2004). Tästä on luultavasti aiheutunut joidenkin omaksuma ajatusmalli, että jos infraääniä on ylipäättään ympäristössä, niistä voi olla ihmiselle haittaa, vaikka niitä ei kuultaisi (Leventhall, 2009).

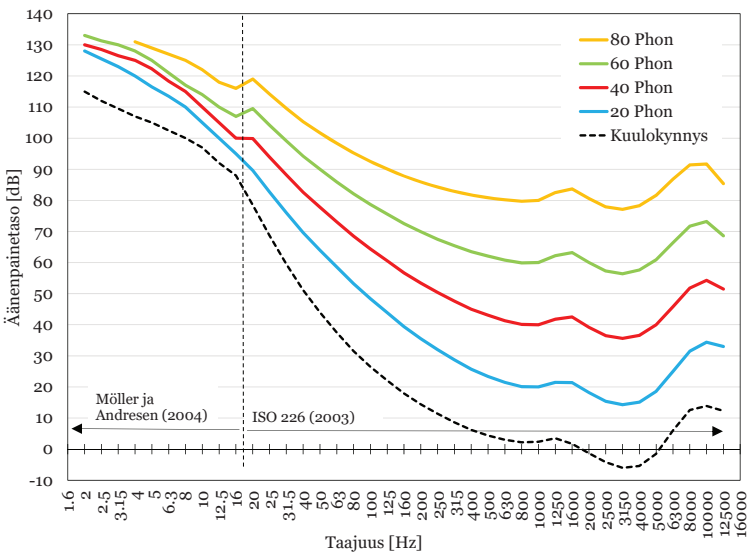
Kuvan 2.1 käyrät edustavat normaalikuuloisen väestön keskiarvoa. Normaalikuuloisten 18-vuotiaiden henkilöiden kuulokyvvyssä on kuitenkin yksilöllisiä eroja. Kuulokynnyksen keskiarvon standardipoikkeama on noin 6 dB (Leventhall, 2007; 2009), jonka sisällä on 68 % väestöstä. Standardipoikkeama on esitetty kuvassa 2.1 katkoviivoilla. Näin ollen 16 % normaalikuuloisista pystyy kuulemaan hiljaisempia ääniä kuin kuvan alin katkoviiva. Tämä tulee ottaa huomioon, kun arvioidaan äänen aistittavuutta koko väestön parissa tai laaditaan ohjearvoja: herkimvät yksilöt voivat aistia jopa 10 dB alempia äänenpainetasoja kuin kuvan 2.1 keskiarvo.

Kipukynnys kertoo äänenpainetason, jossa kuuloaistimus muuttuu kipuaistimukseksi. Infraäänillä kipukynnys on noin 140 taajuudella 20 Hz ja noin 160 dB taajuudella 2 Hz (von Gierke ja Nixon, 1976).

Suurimmalla osalla väestöstä kuulokyky on kuvan 2.1 keskiarvoa selvästi heikompi. Kuulokyky voi olla normaalia heikompi synnyntäisen vamman, iän, meluvamman tai perinnöllisten tekijöiden vuoksi. Kuulokyky heikentyy iän vuoksi voimakaimmin suurilla taajuuksilla. 50–60 vuotiaiden kuulokyky on noin 7 dB heikompi pienillä taajuuksilla kuin normaalikuuloisten 18-vuotiaiden kuulokyky (ISO 7029, 2017). Suurilla taajuuksilla ero näiden ikäryhmien välillä on kymmeniä desibelejä.

Vakioäänekkyyssäyrät (ISO 226, 2003) kuvaavat äänekkyydeltään samanarvoisia äänenpainetasoja eri taajuuksilla esitetyille testiäänille. Vertailukohtana käyrille on 1.000 Hz:n taajuudella koettu äänekkyyys. Vakioäänekkyyssäyriä dynaaminen

alue (havaintokynnyksen ja kipukynnyksen välinen erotus desibeleinä) on 1.000 Hz:n taajuudella erittäin suuri, yli 120 dB. Infraäänillä erotus on paljon pienempi, luokkaa 50 dB (kuva 2.1). Møller ja Andresen (1984) ovat määrittäneet kokeellisesti vakioäänekkyyskäyriä infraäänille (kuva 2.2). Tutkimus vahvistaa sen, että 10 dB:n kasvu infraäänien äänenpainetasossa tuntuu yhtä voimakkaalta kuin 40 dB:n äänenpainetason kasvu taajuudella 1.000 Hz. Tämä selviää tarkastelemalla sinisen ja vihreän käyrän välisen etäisyyden pienenemistä, kun taajuus pienenee.



Kuva 2.2. Vakioäänekkyyskäyriä tavanomaisille äänenvoimakkuuksille 20–80 Phon. Kukin käyrä tarkoittaa subjektiivisesti yhtä äänekkäältä (loudness) tuntuvan äänen äänenpainetasoa. Taajuuksilla 2–16 Hz arvot ovat peräisin Møllerin ja Andresenin (1984) tutkimuksesta ja taajuuksilla 20–12.500 Hz standardista ISO 226 (2003).

Koska yksilölliset erot ovat myös infraäänien kuulokynnyksen osalta ± 6 dB luokkaa, on mahdollista, että sama infraääni koetaan hyvin eri tavoin: kuuloltaan epäherkkä yksilö kokee infraäänien juuri havaittavana, kuuloltaan herkkä yksilö pitää samaa ääntä jo voimakkaana ja häiritsevänä (Jakobsen, 2005). Tästä syystä esimerkiksi Tanskassa infraäänien G-painotetun ekvivalenttitason enimmäisarvon suositus asunnon sisätiloissa on 85 dB $L_{G_{eq}}$ (ISO 7196, 1995). Tämä on 10 dB keskimääräistä kuulokynnystä alempana, jolloin kuuloherkimmätkin yksilöt on huomioitu.

2.2 Infraäänten mittaaminen

Infraääniä ja ääniä mitataan mikrofonin avulla. Mikrofonia on käytetty lähes kaikissa alan vertaisarvioituissa tutkimuksissa infraäänten mittaamiseen eikä vaihtoehtoisia mittausantureita ole toistaiseksi yleisesti käytössä.

Tavanomaiset mikrofonit on usein suunniteltu mittaamaan tarkasti taajuusväliä 20–20.000 Hz. Infraäänten mittaamiseen suunnitellut mikrofonit kykenevät mittaamaan myös taajuusalueen 0.5–20 Hz tarkasti. Mikrofonin ja analysointilaitteen toimivuus varmistetaan ennen mittauksia tehtävällä äänitasokalibroinnilla. Infraääni-mikrofonien kalibrointi tapahtuu infraäänille tarkoitettulla kalibraattorilla.

2.3 Infraäänien lähteitä

Ihminen altistuu jatkuvasti luontoilmiöiden aiheuttamalle ei-kuultavalle (äänenpainetaso kuulokynnyksen alapuolella) infraäänelle taajuuksilla 0,01–2 Hz (Leventhall, 2007). Pientaajuisimmat infraäänit aiheutuvat ilmakehän paineen vaihteluista. Ilmakehän paine on normaalitilanteessa merenpinnan korkeudella 101.325 Pascalia. Ilmanpaine vaihtelee jopa 16.000 Pascalin välillä: voimakkaan matalapaineen aikana ilmanpaine on 92.000 Pascalia ja korkeapaineen aikana 108.000 Pascalia. Koko ilmakehän paineen (101.325 Pa) suuruinen paineenvaihtelu tarkoittaa 191 desibelin äänenpainetasoa. Pienikin hetkellinen ilmanpaineen muutos (100 Pascalia) tarkoittaa noin 131 dB:n äänenpainetasoa infraäänialueella. Ilmakehässä tapahtuu jatkuvasti pienitaajuisia alle 2 Hz:n paineenvaihteluja, mikä näkyy mm. tuulenpuuskina.

Tuuli aiheuttaa turbulenttista virtausääntä osuessaan ihmisen kehoon, kasvillisuuteen ja rakenteisiin kaikilla äänen taajuuksilla, mukaan lukien infraäänit.

Infraääntä (0–20 Hz) esiintyy luonnossa myös meteorien aiheuttamana, aallokossa, myrskyissä, vesiputouksissa, maanvyörymissä ja maanjäristyksissä (Leventhall, 2007; HPA, 2010). Infraääntä syntyy elimistön fysiologisissa prosesseissa kuten hengityksessä, sydämenlyönnissä ja yskimisessä. Infraääntä syntyy myös ihmisen aiheuttamana räjähdyksissä, piennopeuspuhaltimissa, kompressoreissa, liikennevälineissä, rakenteiden heilahteluissa ja teollisissa prosesseissa, kuten tuulivoimaloissa (HPA, 2010; Knopper ja Ollson, 2011).

Merenpinnalla ilmanpaine pienenee ylöspäin mentäessä noin 100 Pascalia kahdeksaa metriä kohti. Keinuttaessa korkeusvaihtelu on enintään 1 metrin luokkaa, jolloin paineen vaihtelu on noin 12 Pascalia (112 dB). Tämä vaihtelu tapahtuu jaksollisesti noin 2 sekunnin välein, jolloin korvassa koetaan infraääntä taajuudella 0.5 Hertsiä. Ihminen altistuu siis hyvin voimakkaalle paineenvaihtelulle ja infraäänelle keinumisen aikana, vaikka infraääntä ei sinänsä ympäristössä mikään aiheuta. Juostaessa altistutaan infraäänelle samasta syystä kuin keinuttaessa mutta korkeusvaihtelu ja tästä aiheutuva paineenvaihtelu on pienempi (0.1 m, 1.2 Pa, 90 dB) ja taajuus on suurempi (3 Hz).

Kuultavaa infraääntä esiintyy ympäristössämme hyvin harvoin. Jos sitä esiintyy, äänessä on yleensä mukana myös yli 20 Hz:n taajuisia ääniä, joihin huomio pääasiassa kiinnittyy. Kuuluvaa infraääntä aiheutuu mm. pommeista ja tykistön laukauksista. Helpoin arkinen tapa kokea kuuluvaa infraääntä on avata henkilöauton takaikkuna moottoritiellä (120 km/h). Tällöin syntyy infraääntä, jonka taajuus on ajoneuvosta riippuen noin 18 Hz ja taso noin 120 dB. Arkipäivän infraäänten mittaustuloksia esitellään luvussa 7.

2.4 Äänen ja infraäänien leviäminen ympäristössä

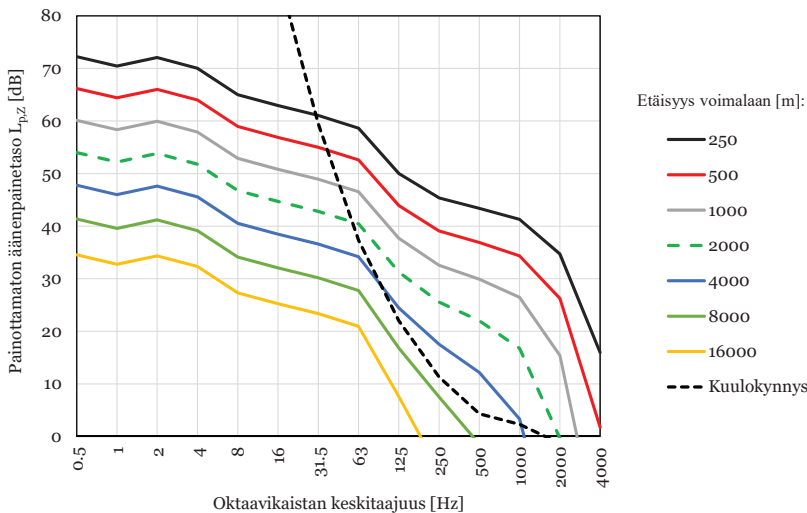
Yksittäistä tuulivoimalaa voidaan kaukokentässä (yli 300 m päässä) tarkastella pistemäisenä äänilähteenä. Pistemäisestä äänilähteestä äänenpainetaso pienenee 6 dB aina etäisyyden tuplaantuessa (leviämismaimennusaste). Esimerkiksi jos voimalan äänenpainetaso on 39 dB 600 metrin päässä, on äänenpainetaso 1200 metrin päässä enää 33 dB.

Äänitehotasolla tarkoitetaan sitä äänenpainetasoa, jonka äänilähde aiheuttaa noin 28 cm päässä äänilähteestä, jos äänilähde ajatellaan pistemäiseksi. Tyypillinen tuulivoimalan äänitehotaso on noin 105 dB (L_{WA}). Tämä tarkoittaa, että 28 cm päässä pisteäänilähteestä A-painotettu äänenpainetaso on 105 dB, 56 cm päässä 99 dB ja tällä tavalla edeten noin 39 dB 600 metrin päässä. Tämä etäisyys vastaa tavanomaisista 40 dB:n suojaetäisyyttä tuulivoima-alueisiin.

Infraäänen leviäminen ympäristöön tapahtuu samaa luonnonlakia noudattaen: äänenpainetaso pienenee joka kerta 6 dB, kun etäisyys äänilähteeseen kaksinkertaistuu.

Esimerkki. Tuulivoimalan äänitehotaso L_w on 123 dB infraäänen oktaavitaa-juudella 4 Hz. Kuvitellaan tuulivoimala pistemäiseksi. Tällöin melumittarilla mitattava äänenpainetaso L_p 30 cm päässä pisteestä on 123 dB. Kun etäisyys on 56 cm, äänenpainetaso pienenee 6 dB arvoon 117 dB ja etäisyydellä 1.12 m arvoon 111 dB, jne. Tällä periaatteella edeten äänenpainetaso on 600 metrin päässä noin 57 dB.

Kuvassa 2.3 on esitetty tarkempi laskelma infraäänen äänenpainetasosta eri etäisyyksillä tuulivoimalasta kaikilla taajuuksilla. Laskelma perustuu luvussa 7 esitettyyn lähtöäänepainetasoon.



Kuva 2.3. Yksittäisen tuulivoimalan painottamaton äänenpainetaso eri etäisyyksillä voimalasta oktaavitaaajuuskaistoilla 1–4.000 Hz (Vestas V112, 3.0 MW; $L_{wA} = 106.5$ dB). Lähtöteho perustuu luvun 7 mittapisteeseen 16.

Suurilla taajuuksilla (yli 500 Hz) leviämismuunnosaste on suurempi kuin 6 dB, koska ilmakehässä tapahtuu absorptiota. Myös esteet ja kasvillisuus vaimentavat suurtaajuisia ääntä enemmän kuin pientaajuisia ääntä. Näillä lisämuunnosta tuotavilla tekijöillä ei ole paljon käytännön merkitystä, koska tuulivoimaloiden pihamaille kuuluva ääni painottuu alle 500 Hz:n taajuuksille.

Kun ilmakehä on erittäin stabiili (alhaalla ei tuule, ylhäällä tuulee, taivas pilvetön), voi lämpötila olla maanpinnalla alempi kuin ylemmissä kerroksissa (inversiotilanne). Inversio-olosuhde toteutuu herkimmin yöaikaan. Tällöin ääni voi taittua ylemmistä ilmakehän kerroksista takaisin maanpinnan suuntaan ja ääni kantautuu pidemmälle kuin melun leviämismallilla saadut laskelmat osoittavat. Inversiotilanne vaikuttaa äänenpainetasoihin vasta oltaessa yli 1.0 km päässä tuulivoimaloista (van den Berg, 2004). Tässä tilanteessa äänen leviämismuunnosaste voi olla pienempi kuin 6 dB, jopa vain 3-4 dB. Inversiotilanne ei yleensä kuitenkaan johda melutason ohjearvon (tavanomaisesti 40 dB L_{Aeq}) rikkoutumiseen, koska 40 dB:n rajaetäisyys on yleensä alle 1 km päässä voimaloista.

3 Infraääni tuulivoima-alueilla

3.1 Tuulivoimaloiden äänen syntymekanismi

Bolinin ym. (2011) mukaan tuulivoimalan ääni aiheutuu pääasiassa neljällä eri mekanismilla:

- Mekaaninen ääni: Ääni on tasaista ja jossain määrin kapeakaistaista (ääneksiä sisältävää, tonaalista). Ääni ei yleensä kuulu kovin kauas. Ääni painottuu 100– 500 Hz:n välille
- Aerodynaaminen ääni 1: Jaksollinen lavan pyörimisen ja tornin vuoro-vaikutus. Ääni havaitaan pyörimisnopeudesta riippuvalla taajuudella sekä harmonisilla taajuuksilla. Tyypillinen taajuusalue on 1– 30 Hz. Tämä ääni on keskeinen infraäänten kannalta.
- Aerodynaaminen ääni 2: Lavan liike ilmakerrosten läpi aiheuttaa pyörteilyä eli virtausturbulenssia. Ääntä muodostuu erityisesti 10– 200 Hz alueella.
- Aerodynaaminen ääni 3: Siiven jättöreunan ääni. Ääni on laajakaistaista mutta sitä muodostuu erityisesti keskitaajuuksilla 250– 2000 Hz. Ääni on amplitudimoduloitunutta. Bolinin ym. (2011) mukaan tämä ääni on keskeinen häiritsevyyttä laukaiseva mekanismi.

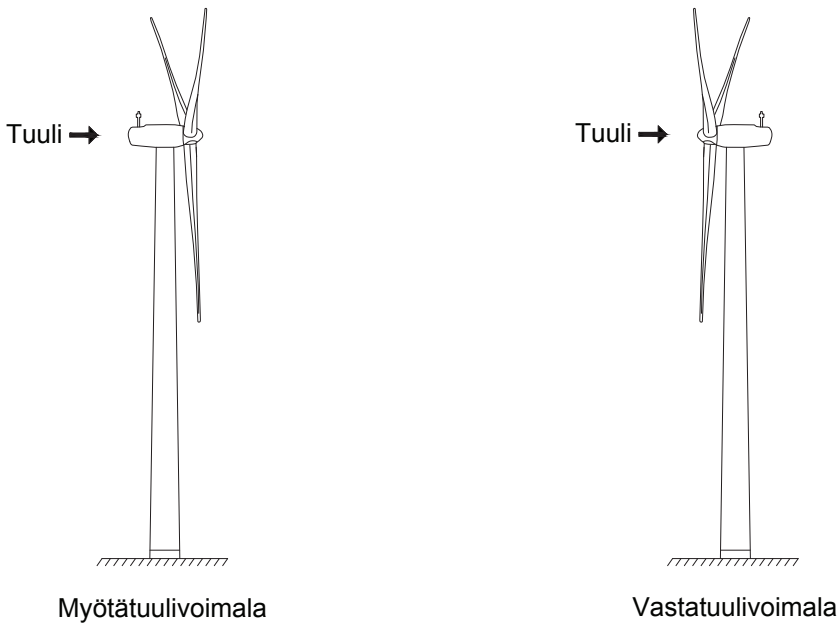
Infraääntä muodostuu eniten mekanismeilla 2 ja 3.

3.2 Tuulivoimalan äänenpainetason riippuvuus toimintaperiaatteesta ja tehosta

Äänitehotaso mitataan yleensä alle 300 metrin päässä tuulivoimalasta riippuen voimalan korkeudesta ja lapojen pituudesta. Møller ja Pedersen (2011) mittasivat 48 erityyppityyppisen nykyaikaisen kolmilapaisen ja vastatuuliperiaatteella toimivan tuulivoimalan (0.4–3.6 MW) äänitehotason alueella 20–10.000 Hz standardin IEC 61400-11 (2012) mukaan. Äänitehotasot olivat odotetusti suurempia, kun voimalakoko oli suurempi. Lisäksi pientaajuisen äänen (alle 50 Hz) suhteellinen osuus oli

suurempi suurilla (yli 2.3 MW) kuin pienillä (alle 2.3 MW) voimaloilla. Tämän perusteella on oletettavissa, että suurilla voimaloilla myös infraäänien äänenpainetaso kasvaa voimalan tehon kasvaessa. Voimalan sähköntuotantotehon ja infraäänien äänitehotason yhteydestä ei liene tehty yhtä systemaattista tutkimusta nykyaikaisilla tuulivoimaloilla, kuin mitä Møller ja Pedersen (2011) tekivät yli 20 Hz:n taajuuksilla.

1980- ja 1990-luvulla julkaistujen tutkimusten perusteella myötätuuliperiaatteella (kuva 3.1) toimivat tuulivoimalat aiheuttavat infraääniä, joiden äänenpainetaso on voimaloiden lähellä kuulokynnyksen tuntumassa tai jopa sen yläpuolella (Hubbard ym. 1983; Shepherd and Hubbard, 1991; Hubbard and Shepherd, 1991). Tämä on osasy siihen, että tuulivoimaloiden infraääniä edelleen pidetään mahdollisena ympäristöriskinä.



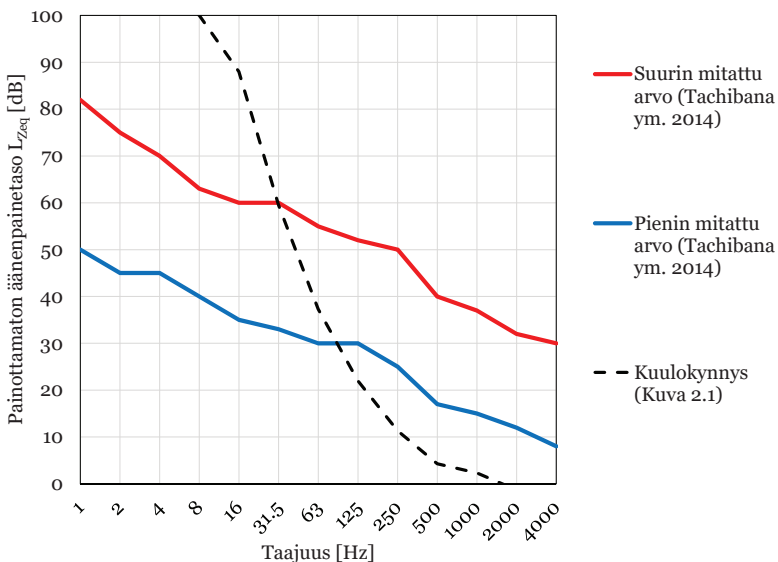
Kuva 3.1. Myötä- ja vastatuulivoimalan toimintaperiaatteet. Myötätuulivoimalat aiheuttavat enemmän infraääntä eikä niitä ei enää nykyään juurikaan rakenneta.

Tuulivoimaloiden koko ja tekniikka on muuttunut vuosikymmenten aikana. 1990-luvulla käytettiin vielä myötätuuliperiaatteella toimivia turbiineja, joissa lavat asettuivat myötätuulen (*down-wind*) puolelle ja voimalan tornista aiheutuva tuulen turbulenssi vaikutti osaltaan voimalan siiven aiheuttamaan infraääneen (kuva 3.1). Nykyaikaiset tuulivoimalat toimivat vastatuuliperiaatteella (*up-wind*), jossa siivet asettuvat vastatuulen puolelle. Tästä johtuen 1980- ja 1990-luvuilla tehdyt havainnot eivät edusta nykyaikaisia voimaloita.

Jakobsen (2005) tutki 18 erityyppisten (kuva 3.1) ja kokoisten (0.05–4.2 MW) tuulivoimaloiden aiheuttamia infraäänien äänenpainetasoja. Tutkimus perustui kirjallisuudesta koottuihin mittaustuloksiin. Tutkimuksen mukaan myötätuuliturbiinit aiheuttivat 10–30 dB voimakkaampia infraäänitasoja kuin saman tehoiset vastavirtaturbiinit. Lähellä suuritehoisia myötätuuliturbiineja infraäänit olivat jopa kuultavissa (taso ylitti luvun 2.1 kuulokynnyksen). Myötävirtaturbiinienkin infraäänien äänenpainetasot vaimenivat kuitenkin kuulokynnyksen alapuolelle muutamien satojen metrien päässä tuulivoimalasta, jossa asunnot yleensä lähimmillään sijaitsevat. Sen sijaan nykyaikaisten vastavirtaperiaatteella toimivien turbiinien infraäänitasot olivat selvästi alle kuulokynnyksen sekä voimaloiden lähellä että kaukana voimaloista. Tanskalaisen tutkimuksen mukaan vastavirtaperiaatteella toimivien tuulivoimaloiden infraäänien äänenpainetasot olivat niin alhaisia, ettei niitä tarvitse huomioida ympäristövaikutuksia arvioitaessa (Jakobsen, 2005).

3.3 Infraäänen äänenpainetasot asuntojen etäisyyksillä

Toistaiseksi laajimman tutkimuksen tuulivoimaloiden infraäänten äänenpainetasoista on julkaissut japanilainen ryhmä (Tachibana ym. 2014). Tutkimus käsitti 164 viisipäiväistä mittausjaksoa 29 eri tuulivoima-alueen ympäristössä. Mittausetäisyydet olivat 100–1000 metriä ja voimalakoko 1–3 MW. Tutkimuksen perusteella alin taajuus, jossa kuulokynnys ylittyi, oli 31,5 Hz (kuva 3.2). Tämä havainto tukee Jakobsenin (2005) näkemystä siitä, että infraäänten äänenpainetaso on alle kuulokynnyksen. On huomattavaa, että mittaustulokset sisälsivät myös tuulen aiheuttamaa ääntä. Sen vuoksi mitatut äänenpainetasot edustavat yläarviota tuulivoimaloiden aiheuttamalle äänelle.



Kuva 3.2. Japanissa tehdyn tutkimuksen mukainen äänenpainetasojen vaihteluväli 0.1–1.0 km päässä tuulivoimaloista.

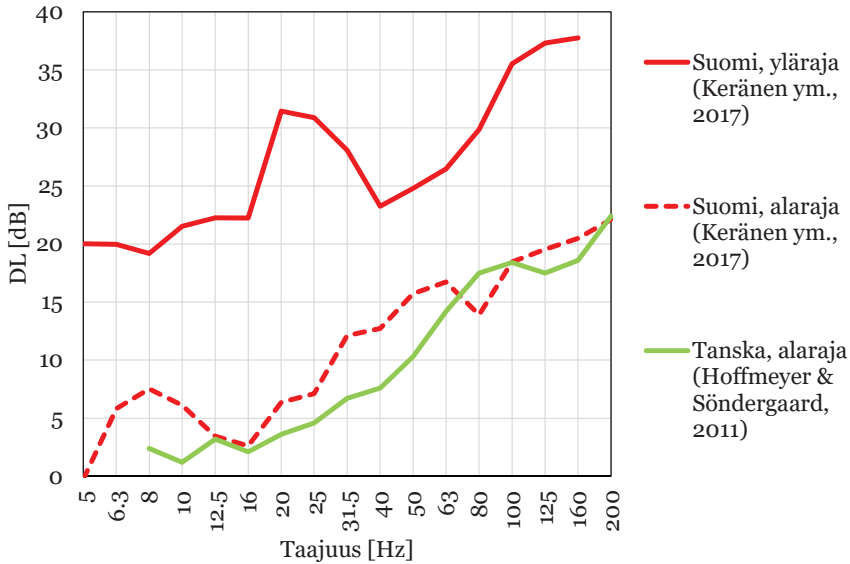
3.4 Tuulivoimaloiden infraäänien aiheuttamat äänenpainetasot sisätiloissa

Tuulivoimalan aiheuttaman infraäänien mittauksia sisätiloissa on tehty huomattavasti vähemmän kuin ulkoalueilla. Tähän on keskeisenä syynä se, asukkaiden läsnäolo ei ole mahdollista tarkkuusmittausten aikana. Lisäksi tuulivoimaloiden aiheuttamat äänenpainetasot sisätiloissa ovat yleensä niin alhaisia, että niiden tarkka mittaaminen on erittäin hankalaa asunnon sisäisten melulähteiden (lämmitys, kylmäkoneet, ilmanvaihto) aiheuttaman taustamelun vuoksi.

Mittauksia sisätiloissa ovat tehneet nykyaikaisille tuulivoimaloille mm. O’Neal ym. (2011) ja Hansen ym. (2015). Infraäänien äänenpainetasot eivät niissä ylittäneet kuvan 2.1 kuulokynnystä.

Yleensä tuulivoimaloista sisätiloihin kantautuva äänenpainetaso arvioidaan laskennallisesti taajuuskaistoittain vähentämällä ulkoäänepainetasosta julkisivun äänieristyksen aiheuttama äänitasoero DL. Luotettavin tulos saadaan, jos asunnon julkisivun äänitasoero on mitattu. Mittaus on kuitenkin kallista ja aikaa vievää. Tämän vuoksi sisätilojen äänenpainetason laskelmissa hyödynnetään kirjallisuudessa esitettyjä tilastollisia arvioita rakennuskannan julkisivujen äänieristyksestä aiheutuvan äänitasoeron DL vähimmäisarvosta.

Kuvassa 3.3 on vertailtu tanskalaisen ja suomalaisen tutkimuksen DL-arvoja. Tanskalainen tutkimus (Hoffmeyer & Söndergaard, 2010) käsitti mittauksen 9 huoneessa, kun suomalainen tutkimus käsitti 20 huonetta (Keränen ym. 2017). Suomalainen tutkimus sisälsi sekä massiivisia että kevytrakenteisiä taloja. Molemmissa tutkimuksissa havaitaan, että äänitasoero on erittäin pieni infraäänillä, alle 7 dB. Äänitasoero kasvaa, kun taajuus ylittää 20 Hz. Suomalaisten asuntojen julkisivujen ääneneristys pientaajuuksilla vaihtelee erittäin paljon (Hongisto, 2017): infraäänillä DL-arvot vaihtelivat 0 ja 22 dB:n välillä eri taajuuksilla ja eri huoneiden kesken. Sisätilojen äänenpainetason laskenta sisältää paljon epävarmuuksia yksittäisten rakennusten kohdalla, jos käytetään kuvan 3.3 mukaisia alaraja-arvoja.



Kuva 3.3. Julkisivurakenteiden aiheuttama äänitasoero pientaajuuksilla, DL, kahden eri tutkimuksen mukaan. Tanskalainen tulos edustaa alaraja-arvoa, joka ylittyi 80–90 % tapauksessa mitatuista 9 huoneista. Suomen alarajan ja ylärajan kohdalla prosentit ovat 95 ja 5. Punaisten käyrien välinen ero kuvastaa vaihteluväliä, joka havaittiin erilaisten rakennusten välillä. Äänitasoeroja sovelletaan ympäristömelun äänenpaine-tasoon, joka on mitattu pihamaalla vähintään 2 m päässä rakennuksista.

3.5 Maan pinnan värähtely

Tuulivoimaloiden turbiinin pyöriminen aiheuttaa ilmaäänien lisäksi maanpinnan värähtelyä. Värähtely on kuitenkin hyvin vähäistä, koska kävely tai juokseminen 50 metrin päässä aiheutti suurempia värähtelytasoja kuin tuulivoimala 90 metrin päässä (Botha, 2013; Schmidt & Klokker, 2014). On todennäköistä, että ääni ja infraääni etenevät asuinympäristöihin voimakkaimmin ilmaäänien kuin maanpinnan värähtelyn välityksellä.

3.6 Rakennusten värähtely ja räminä

On mahdollista, että ilmakehässä etenevä infraääni voi aikaansaada rakennuksen osien värähtelyä, ja tätä kautta rakennusosien, huonekalujen tai esineiden kuulemalla aistittavaa räminää, vaikka itse infraäänen taso olisi havaintokynnyksen alapuolella (Schmidt & Klokker, 2014). Taulukkoon 3.1 on koottu O’Nealin ym. (2011) soveltamia kynnyksarvoja. Kynnyksarvot eivät ole voimassa Suomessa eikä niiden soveltuvuudesta suomalaisiin rakennuksiin ole tutkimustietoa. O’Nealin ym. (2011) mukaan erityisesti Japanin ympäristöministeriön (sarake A) arvot ovat hyvin konservatiivisia, koska perinteiset japanilaiset pientalot ovat hyvin kevytrakenteisia.

Taulukko 3.1. Ulkona vallitsevan äänenpainetaso [dB] aiheuttaman värähtelyn ja räminän kynnyksarvot O’Nealin ym. (2011) mukaan.

Taajuus [Hz]	A	B	C
5	70		
6.3	71		
8	72		
10	73		
12.5	75		
16	77	78	68
20	80		
25	83		
31.5	87	81	71
40	93		
50	99		
63		89	79
80			

A
Japan Ministry of the Environment (2004)

B
ANSI S12.2 (2008)
Selvästi aistittava värähtely ja räminä todennäköistä

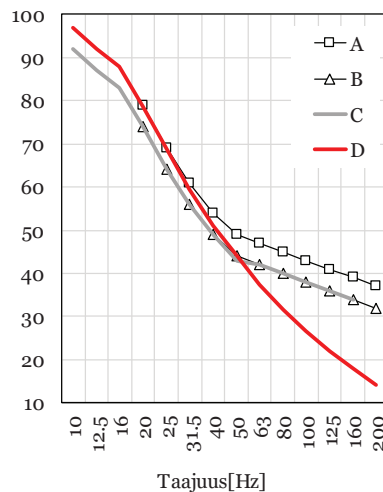
C
ANSI S12.2 (2008)
Kohtalaisen aistittava värähtely ja räminä todennäköistä

3.7 Ohjearvot tuulivoimaloiden pientaajuisten melun äänenpainetasoille

Berger ym. (2015) on esittänyt melko tuoreen vertailun siitä, minkälaisia ohjearvoja ja suosituksia eri maissa on annettu tuulivoimaloiden pientaajuista melua koskien. Eri maissa käytetään hyvin erilaisia mittalukuja ja niitä koskevia raja-arvoja. Myös ohjearvojen velvoittavuus ja valvontamenetelmät vaihtelevat.

Suomessa ei toistaiseksi ole ohjearvoja infraääniä koskien. Pientaajuista melua (20–200 Hz) koskien annetaan ohjearvoja asuinhuoneille Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetuksessa 545/2015 (STM, 2015). Moorhouse ym. (2011) ovat laatineet Yhdistyneiden Kuningaskuntien viranomaiselle muistion, jossa esitetään suositus ohjearvoiksi infraäänitaajuuksilla 10–16 Hz. Tämän lisäksi on tiedossa infraäänten kuulokynnys. Näitä viitearvoja verrataan kuvassa 3.4.

Taajuus [Hz]	A	B	C	D
10			92	97
12.5			87	92
16			83	88
20	79	74	74	79
25	69	64	64	69
31.5	61	56	56	60
40	54	49	49	51
50	49	44	43	44
63	47	42	42	37
80	45	40	40	32
100	43	38	38	27
125	41	36	36	22
160	39	34	34	18
200	37	32		14



- A - STM (2015) päiväaika 07-22
- B - STM (2015) yöaika 22-07
- C - DEFRA suositus (Moorhouse ym. 2011)
- D - Kuulokynnys (Kuva 2.1)

Kuva 3.4. Pientaajuisten melun ekvivalenttiäänepainetaso [dB] suositeltuja enimmäisarvoja asuinrakennusten sisätiloissa (A–C) ja vertailu kuulokynnukseen (D).

4 Infraäänen vaikutukset

4.1 Johdanto

Yhdistyneiden Kuningaskuntien terveysuojeluvirasto teetti laajan kirjallisuusselvityksen ultra- ja infraäänien terveysvaikutuksista joitakin vuosia sitten (HPA; 2010). Sen tiivistelmässä todettiin seuraavaa:

Ei ole olemassa johdonmukaista näyttöä siitä, että akuutti altistuminen infraäänille aiheuttaisi ihmiselle fysiologisia vaikutuksia tai vaikuttaisi käyttäytymistä muuttavasti. Alalla on kuitenkin hyvin vähän hyvälaatuista tutkimusta ja niiden tulkinta on monimutkaista, koska pientaajuinen ääni sisältää usein myös tavanomaisen kuuloalueen (yli 20 Hz) taajuuksia eikä pelkästään infraäänitaajuuksia (alle 20 Hz). Suurilla infraäänien äänenpainetasoilla on mahdollista, että koetaan kipua tai että korvan rumpukalvo rikkoutuu. Pitkäaikaisen infraäänialtistumisen vaikutuksista on joitakin tutkimuksia eikä niissä ole voitu näyttää toteen haittavaikutuksia.

Tässä luvussa käsitellään kirjallisuutta, johon yllä mainittu tiivistelmä perustuu.

4.2 Kuultavan infraäänien vaikutukset

Infraäänien havaintokynnys on käsitelty luvussa 3. Kipuaistimus aiheutuu infraäänistä, kun äänenpainetaso on 140–165 dB (Berglund & Hassmen, 1996; Leventhall, 2007). Kipukynnystä on käsitelty luvussa 2.1.

Voimakas infraääni, samoin kuin tavanomainenkin voimakas ääni (20–20.000 Hz), aiheuttaa lyhykestoisena tilapäisen kuulonaleneman (TTS, *Temporary Threshold Shift*) ja pitkäkestoisena pysyvän kuulonaleneman (PTS, *Permanent Threshold Shift*).

Yksi kiistattomin infraäänien vaikutus on paineen tunne korvassa. Paineen tunne edellyttää kuitenkin sitä, että infraäänien taso ylittää selvästi kuulokynnyksen, 127–133 dB (Broner, 1978).

Infraäänien vaikutus tasapainoon on kiistanalainen: kynnyksarvot vaihtelevat 95 ja 150 dB:n välillä eri tutkimusten kesken. Todennäköisesti väestön kynnyksarvon keskiarvo on 130 dB:n paikkeilla (Broner, 1978).

Infraäänien mahdolliset vaikutukset fysiologisiin toimintoihin, kuten sydämen syke, hengitysnopeus, verenkierron muutokset, hermostolliset muutokset tapahtuvat vasta äänenpainetasoilla, jotka ovat kuulokynnyksen yläpuolella (Broner, 1978). Sama koskee vaikutuksia kognitiiviseen tehtäväsuoriutumiseen.

Voimakas infraääni (150 dB) voi aiheuttaa hengitysvaikeuksia. Näin voimakkaita äänenpainetasoja ei yleensä esiinny, joten tällä ei ole käytännön merkitystä (Berglund & Hassmen, 1996).

Pianon alin kosketin (subkontra A) tuottaa perustaajuuden 27.5 Hz. Äänen sävelkorkeuden (taajuuden) tunnistamiskyky heikkenee taajuuden pienetessä. 25 Hz:n taajuudella sävelkorkeuden tunnistamisvirhe on kolminkertainen taajuuteen 63 Hz verrattuna (Broner, 1978). Infraäänillä (alle 20 Hz) ei ole käyttöä musiikissa, koska infraäänien sävelkorkeutta ei aistita yhtä tarkasti kuin yli 20 Hz:n äänillä.

Yleisin ja eniten tutkittu pientaajuisten äänen vaikutus on häiritsevyys (*annoyance, noisiness*). Häiritsevyys on hyvin yksilöllinen kokemus ja se riippuu äänenpainetasosta lisäksi useista tekijöistä kuten kulttuuritekijöistä, käynnissä olevasta aktiviteetista, asenteista äänilähdettä kohtaan, äänilähteen kontrolloitavuudesta, ja muista yksilöllisistä tekijöistä kuten meluherkkyydestä. Yksilön häiritsevyyskokemuksen ennustaminen sisältää paljon epävarmuuksia, mutta väestön keskiarvo osataan ennustaa paljon paremmin (Berglund & Hassmen, 1996).

Infraäänien häiritsevyyttä koskevia tutkimuksia on hyvin vähän (Leventhall, 2009). Møller (1987) tutki vakiohäiritsevyyssävyriä taajuuksilla 4, 8, 16, 31.5 ja 1.000 Hz. Oli ilmeistä, että 4 Hz:n taajuudella jo 5 dB:n äänenpainetaso kasvu (arvosta 119 dB arvoon 124 dB) johti häiritsevyyden merkittävään kasvuun, kun 1.000 Hz:llä vastaavaan häiritsevyyssisään vaadittiin 60 dB:n äänenpainetaso korotus (arvosta 20 dB arvoon 80 dB). Tulos tarkoittaa, että mitä pienempi äänen taajuus on, sitä

herkempi ihminen on äänenpainetason vaihteluille, edellyttäen, että ääni on kuultavaa. Tulos oli samansuuntainen kuin vakioäänekkyyssäyriensä kohdalla kuvassa 2.2.

Berglundin ja Hassmenin (1996) mukaan infraäänien vaikutuksia stressihormoneihin, unen häiritsevyyteen, kommunikaatioon, työsuoriutumiseen tai mielenterveyteen on tutkittu erittäin vähän. Vuoden 1996 jälkeen on tehty runsaasti tutkimusta pientaajuisista melua koskien erityisesti Ruotsissa mutta niissä alimmat käytetyt taajuuudet ovat 20 Hz:n yläpuolella, eivätkä ne siten suoranaisesti liity infraääniin.

Bronerin (1978) mukaan infraäänien (alle 20 Hz) vaikutukset elinympäristöissä jäävät yleensä pieniksi verrattuna pientaajuisen melun (20–200 Hz) vaikutuksiin, koska yleensä infraääntä aiheuttavat ilmiöt aiheuttavat myös pientaajuisia ääntä, joka on voimakkaampaa kuin infraääni. Tätä havainnollistaa kuva 3.2, jossa nähdään, että vaikka tuulivoimalat aiheuttavat infraääntä, alimmat kuultavat äänet ovat taajuukseltaan 31.5 Hz luokkaa.

4.3 Ei-kuultavan infraäänien vaikutukset

Leventhall (2003; 2007; 2009) on kartoittanut laajasti infraäänien vaikutuksia ihmiseen. Hänen mukaansa infraääni on viimeisten vuosikymmenten aikana saanut paljon negatiivista julkisuutta koskien infraäänien väitetyjä terveysvaikutuksia. Tiedot perustuvat hyvin pitkälle väärinkäsityksiin ja liioitteluun. Yhtenä väärinkäsitysten aiheuttajana voidaan pitää erittäin voimakkailla infraäänillä (yli 150 dB) havaittuja haitallisia terveysvaikutuksia (Leventhall, 2009). Näitä tutkimuksia aloitettiin tekemään 1960-luvulla Yhdysvalloissa, kun NASA halusi selvittää etukäteen, miten avaruusalusten pientaajuinen melu (1–100 Hz) vaikuttaa avaruuslentäjiin (Mohr ym. 1965). Koska suuri yleisö uskoo, että infraäänä ei voi kuulla, voi se tulkita tuloksia siten, että infraäänien esiintyessä haitalliset terveysvaikutukset voivat esiintyä riippumatta äänenpainetasosta.

Väärinkäsitysten seurauksena osa väestöstä voi ottaa infraäänien hyvin yksisilmäisen kannan, joka riippuu yksinomaan infraäänien olemassaolosta, ei sen voimakkuudesta. Infraääntä koskevat kuitenkin samat lainalaisuudet kuin muitakin ympäristöaltisteita: altistustason pitää ylittää kynnyksarvo, jotta sillä voisi olla mitattavia vaikutuksia. Jos tilanne olisi päinvastoin, kaikki ihmiset sairastuisivat maapallon pinnalla, koska kaikki altistuvat jatkuvasti ei-kuultavalle infraäänelle. Tätä tukevat

luvun 7 mittauksia, jotka osoittavat, että ei-kuultavia infraääniä esiintyy kaikkialla ympäristössämme.

Nykyisen tutkimustiedon mukaan alin kynnyksarvo infraäänten terveysvaikutuksille on kuulokynnyks (kuva 2.2). Ei-kuultavalla infraäänellä eli infraäänellä, jonka äänenpainetaso on kuulokynnyksen alapuolella, ei ole havaittu terveysvaikutuksia. Tämä ei poissulje sitä vaihtoehtoa, etteikö terveysvaikutuksia voisi olla. Nykyinen tutkimustieto ei kuitenkaan tue sitä näkemystä, että äänellä tai infraäänellä voisi olla terveysvaikutuksia ilman samanaikaista kuulohavaintoa (Leventhall, 2007; Heinonen-Guzejev, 2012).

4.4 FMRI-tutkimukset

FMRI on toiminnallinen magneettikuvaus (*functional magnetic resonance*), jolla tutkitaan aivojen toimintaa. Menetelmässä pyritään havaitsemaan ja paikallistamaan aivojen eri osissa tapahtuvia veren happipitoisuuden muutoksia jopa alle 1 mm paikannustarkkuudella. FMRI-tutkimusmenetelmiä on käytetty selvittämään sitä, tapahtuuko kuuloaivokuoressa (*auditory cortex*) aktivoitumista eri taajuisilla äänillä, mukaan lukien 12 Hz:n infraääni. Tällaisia tutkimuksia ovat tehneet mm. Dommes ym. (2009) ja Weichenberger ym. (2015). Aivokuoren aktivoitumista havaittiin kuitenkin vasta, kun äänenpainetaso oli lähellä kuulokynnystä (110 dB, kuva 2.1) tai selvästi sen yläpuolella, joten kuuloaivokuoressa havaitut aktivaatiot voivat johtua myös kuuloaistimuksesta. Samaa johtopäätökseen ovat päätyneet myös Schmidt ja Klokker (2014). Tutkimuksista ei ole vedettävissä johtopäätöksiä tuulivoimaloiden infraääniin, koska tutkitut äänenpainetasot olivat kymmeniä desibelejä tuulivoimaloiden äänenpainetasoja korkeampia (kuva 3.2).

4.5 Ulkoisten karvasolujen hypoteesi

Saltin ja Hullarin (2010) kirjallisuustutkimuksen mukaan voimakkaat mutta ei-kuultavat infraäänit aiheuttivat koe-eläimen (marsu) korvassa simpukan ulkoisissa karvasoluissa pieniä fysiologisia muutoksia, kun taas simpukan sisäisissä karvasoluissa muutoksia ei havaittu. Toistaiseksi ei ole sellaista tutkimustietoa, joka osoittaisi ihmisten korvassa havaitun vastaavia muutoksia. Jos tällaisia muutoksia tapahtuisi ihmisillä, se voisi selittää tinnituksen, huimauksen ja Menieren taudin oireet infraäänialtistuksessa (Schmidt & Klokker, 2014).

Koe-eläintutkimuksiin perustuvasta tiedosta ei voida vetää johtopäätöstä, että tuulivoimaloiden aiheuttamat infraäänit, joita havaitaan asujaimistojen tavanomaisilla etäisyyksillä tuulivoimaluista, aiheuttaisivat ihmiskorvan simpukan ulkoisissa karvasoluissa muutoksia (Bolin ym. 2011). Tutkimusta tulee tehdä ihmisillä ja tuulivoimaloiden infraääniä vastaavilla äänenpainetasoilla (kuva 3.2), jotta hypoteesi voidaan vahvistaa tai kumota. Hypoteesien esittäjillä ja sitä puolustavilla on luonnollisesti keskeinen vastuu koellisen tutkimusnäytön hankkimisessa.

4.6 Kehon värähtely

Keho värähtelee jatkuvasti altistuessaan ilmaäänille tai ollessaan kosketuksissa värähteleviin pintoihin, kuten lattiaan, maanpintaan tai ajoneuvon runkoon, riippumatta äänen tai värähtelyn voimakkuudesta. On hyvin tiedossa, että voimakas pientaajuinen ääni aiheuttaa kehon resonansseja (Leventhall, 2007). Tunnetuin näistä on rintakehän resonanssi, joka tapahtuu taajuuksilla 50–80 Hz, kun äänenpainetaso on erittäin suuri (yökerhot, konsertit, potkurilentokoneen matkustamot). Kehon pientaajuisten resonanssien olemassaolosta on aiheutunut uskomus siitä, että infraäänit voisivat aiheuttaa haitallisia terveysvaikutuksia kehon värähtelyjen kautta.

Yamada ym. (1983) tutkivat normaalikuuloisten ja kuuroiden havaintokynnystä pientaajuiselle melulle. Tutkimus osoitti, että myös kuurot kykenivät aistimaan pientaajuisia ääntä (8–63 Hz) kehon värähtelyn välityksellä. Aistiminen tapahtui kuitenkin vasta 30–40 dB normaalikuuloisen kuulokynnystä korkeammilla äänenpainetasoilla. Myös Landström ym. (1983) havaitsivat, ettei kehon värähtelyn aistimiskynnyksessä ollut eroa kuuroiden ja normaalikuuloisten kesken. Taajuuksilla 4–20 Hz kehon aistimiskynnys ilmaäänelle oli 20 dB kuulokynnystä korkeammalla. Tutkimukset eivät siis tue sitä käsitystä, että keho aistisi pientaajuisen melun herkemmin kuin kuulojärjestelmä, kun kyseessä on normaalikuuloinen tai lähes normaalikuuloinen henkilö. Tutkimus tuki sitä käsitystä, että korva on kehoa herkempi reseptori pientaajuiselle melulle. Kehon värähtelyjen ei ole toistaiseksi havaittu aiheuttavan haitallisia terveysvaikutuksia värähtelyn havaintokynnyksen alapuolella, eli tilanteessa, jossa henkilö ei itse huomaa kehonsa värähtelyä. Näin ollen on todennäköistä, että ihminen myös kuulee äänen, tai infraäänin, jos kehossa alkaa syntyä haitallisia vaikutuksia. Tätä tukee esimerkiksi Danielssonin ja Landströmin (1985) laboratoriotutkimus 6, 12 ja 16 Hz:n äänillä, jossa havaittiin infraäänin vaikutuksia verenpaineeseen ja syketaajuuteen vasta, kun äänenpainetaso oli selvästi kuulokynnyksen yläpuolella. Samankaltaisia vaikutuksia on havaittu voimakkaalla melulla.

5 Tuulivoimaloiden äänen ja infraäänien terveysvaikutukset

5.1 Syy-seuraus-suhteen osoittamisen haasteet

Epidemiologia on lääketieteellinen kvantitatiivinen tutkimusmenetelmä. Se tutkii terveyteen liittyvien tilojen ja tapahtumien ja niihin liittyvien tekijöiden jakaantumista väestön tai valitun väestöosan parissa. Epidemiologinen tutkimus on luotettavin menetelmä kartoittaa, onko ympäristötekijöillä mahdollisesti vaikutusta väestön terveyteen. Menetelmällä voidaan ehdottaa syy-seuraussuhteita, jos tutkimus on riittävän laaja ja mukana kontrolliryhmä, joka ei altistu tutkittavalle ympäristötekijälle. Kenttätutkimuksissa on kuitenkin mukana runsaasti ns. sekoittavia muuttujia. Tämän vuoksi kenttätutkimuksia tarvitaan runsaasti, jotta ehdotetut syy-seuraussuhteet olisivat luotettavia.

Tuulivoimaloiden tuottaman infraäänien ja terveyden välistä yhteyttä ei ole yksinomaaisesti tutkittu asuinympäristöissä. Yhteyden tutkiminen ja syy-seuraussuhteen osoittaminen on erittäin vaikeaa kahdesta syystä:

- Tuulivoimaloiden aiheuttaman infraäänien voimakkuus on selvästi alle kuulokynnyksen (ei-kuultavaa ääntä) eikä tuulivoimaloiden aiheuttaman infraäänien taso ole mitattavasti muuta luonnossa tai rakennetussa ympäristössä esiintyvää infraääntä voimakkaampaa. Altisteen mittaaminen sisältää siis liikaa epävarmuustekijöitä, jotta voitaisiin edes teoreettisesti määrittää kynnyksarvoja, jossa vaikutuksia alkaisi esiintyä.
- Tuulivoimalat aiheuttavat samanaikaisesti useita fyysisiä ärsyksiä, kuten kuultavaa ääntä (lähinnä taajuudet 31,5–2.500 Hz), välkettä, näköhavaintoja ja maisemallisia muutoksia. Lisäksi tuulivoima-alueen pystyttämiseen voi liittyä yhteiskunnallisia (mm. valitusprosessit, kyläyhteisön aktivoituminen) ja taloudellisia vaikutuksia (mm. maavuokran saaminen tai pelko kiinteistön arvon laskemisesta). Tähänastisissa tutkimuksissa ei ole löydetty kiistattomia viitteitä siitä, että tuulivoima-

alueiden lähellä asuvien parissa terveys olisi huonompi kuin kaukana voimaloista asuvien parissa. Vaikka tulevaisuudessa vahvistuisi päinvastainen näkemys, on silti mahdotonta todistaa, mikä edellä luetelluista ärsykkeistä on pääasiallinen terveyshaittojen aiheuttaja.

Jos ympäristön altistustekijä, kuten tuulivoimalan infraääni, aiheuttaa terveysvaikutuksen, on tämän riipputtava altistustekijän, tässä tapauksessa infraäänen, voimakkuudesta. Infraäänen voimakkuutta mitataan äänenpainetasolla. Koska myös infraäänen äänenpainetaso pienenee 6 dB joka kerta, kun etäisyys tuulivoimalaan kaksinkertaistetaan (luku 2.4), käyvät infraäänen mahdolliset terveysvaikutukset esille myös, jos terveysoireita selvitetään eri A-äänitasovyöhykkeillä ja eri etäisyyksillä tuulivoimaloista. Tällaisia epidemiologisia tutkimuksia on toteutettu jonkin verran ja niitä käsitellään seuraavissa luvuissa.

5.2 Melun häiritsevyys

Vertaisarvioidut asuinympäristöissä toteutetut epidemiologiset tutkimukset, sekä niitä läpikäyneet kirjallisuustutkimukset, ovat lähes yksimielisiä siitä, että melun häiritsevyys on tuulivoimaloiden kiistaton terveysvaikutus.

Tuulivoimalamelun äänenpainetason on havaittu järjestelmällisesti olevan yhteydessä tuulivoimalamelun häiritsevyyteen Ruotsissa (Pedersen ja Persson Waye, 2004, Pedersen ja Persson Waye, 2007), Alankomaissa (Pedersen ym. 2009), Puolassa (Pawlaczyk-Luszczynska ym. 2014), Japanissa (Kuwano ym. 2014), Kanadassa (Michaud ym. 2016a; 2016b) ja Suomessa (Hongisto ym. 2015; 2017).

Melun häiritsevyys ei kuitenkaan selity yksinomaan tuulivoimaloiden melutasosta. Äänenpainetasoa voimakkaammin häiritsevyyteen ovat yhteydessä mm. seuraavat muuttujat:

- Taloudellinen hyötyminen voimaloista: häiritsevyys on erittäin vähäistä, jos henkilö saa taloudellista hyötyä voimaloista.
- Voimaloiden näkyminen: häiritsevyys on suurempi, jos voimalat näkyvät pihamaalle tai asuntoon.
- Yksilöllinen meluherkkyys: häiritsevyys on suurempi, jos henkilö on meluherkkä. Meluherkkyyttä mitataan yleensä muutamalla standardoidulla kysymyksellä.

- Alueen taustamelutaso: alun perin hiljaisemmilla alueilla tuulivoimalamelu on koettu häiritsevemmäksi kuin alun perin meluisammilla alueilla.

Edellä mainittujen muuttujien kohdalla voidaan olettaa, että häiritsevyyden kasvu johtuu muuttujasta eikä päinvastoin, koska muuttuja on objektiivisesti todennettavissa tai luonteeltaan pysyvä yksilöllinen ominaisuus.

Edellisten lisäksi on havaittu häiritsevyyden olevan yhteydessä mm. seuraaviin subjektiivisiin muuttujiin:

- Asenteet tuulivoimaloita kohtaan: häiritsevyyks on suurempi, jos asenteet tuulivoimaa tai tuulivoimaloita kohtaan ovat negatiivisia.*
- Asenteet voimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan: häiritsevyyks on suurempi, jos asenteet voimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan ovat negatiivisia.*
- Huolestuneisuus terveysvaikutuksista: häiritsevyyks on suurempi, jos henkilö on huolestunut tuulivoiman tai tuulivoimalamelun terveysvaikutuksista.*
- Odotukset alueen hiljaisuutta tai luonnonmukaisuutta kohtaan: häiritsevyyks on suurempi, jos henkilöllä on suuria odotuksia alueen hiljaisuutta tai luonnonmukaisuutta kohtaan.*
- Luottamus virkamiehiä ja tuulivoimatoimijoita kohtaan: häiritsevyyks on suurempi, jos henkilö ei luota virkamiehiin tai toimijoihin.*
- Terveysoireet: häiritsevyyks on suurempi, jos henkilöllä on enemmän terveysoireita.*

* Näistä yhteyksistä ei voida osoittaa syy-yhteyden suuntaa, koska yhteyksien molemmat muuttujat (häiritsevyyks ja siihen yhteydessä oleva muuttuja) perustuvat puhtaasti subjektiivisiin kokemuksiin. Ei siis voida tietää aiheuttaako häiritsevyyks muuttujan muutoksen tai päinvastoin.

Myös suomalaisissa tutkimuksissa (Hongisto ym. 2015; Hongisto ym. 2017) on havaittu selvä yhteys tuulivoimalamelun äänenpainetason ja tuulivoimalamelun häiritsevyyden välillä, kun äänenpainetaso oli alle 40 dB. Häiritsevyyks oli suurempi, kun äänenpainetaso oli suurempi. Hongiston ym. (2015) tutkimus vahvisti myös yhteyden häiritsevyyden ja useiden ei-akustisten muuttujien kesken (meluherkkyys,

asenne maisemavaikutuksia kohtaan, asenne energiantuotantomuotoa kohtaan, luottamus virkamiehiä kohtaan, huolestuneisuus terveysvaikutuksista).

5.3 Stressivaikutukset

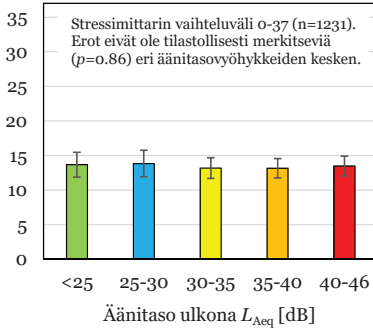
Tärkein ja laajin tuulivoimaloiden terveysvaikutuksia koskeva väestötutkimus on tehty Kanadassa Ontarion ja Prince Edward Islandin osavaltioissa. Health Canadian tutkimus käsittää useita artikkeleita (Feder ym. 2015; Michaud ym. 2016a; Michaud ym. 2016b; Michaud ym. 2016c; Michaud ym. 2016d).

Health Canadian tutkimuksessa toteutettiin kysely yli 1200 vastaajan parissa. Vastajat asuivat 0,25–11,2 km päässä tuulivoimaloista. Asukkaat sijoitettiin pihamaalla vallitsevan tuulivoimalamelun äänitason perusteella johonkin viidestä äänitasovyöhykkeistä (<25 dB, 25–30 dB, 30–35 dB, 35–40 dB, 40–46 dB LAeq). Kyselytutkimuksen vastausaste oli 78,9 %. Kysely kattoi hyvin laajasti erilaiset tekijät, kuten terveydentila, terveysoireet, stressi, elämänlaatu, tuulivoimalamelun häiritsevyys ja häiritsevyyteen yhteydessä olevat tekijät, joita käsiteltiin edellisessä luvussa.

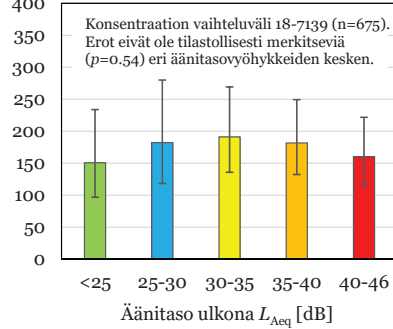
Poikkeuksellisen Michaudin ym. (2016c) tutkimuksesta tekee se, ettei tutkimus rajautunut kyselyihin. Niiden lisäksi 1077 vastaajalta mitattiin haastattelun yhteydessä verenpaine ja leposyke. Lisäksi 675 vastaajalta mitattiin stressihormonipitoisuus leikkaamalla hiusjuuresta 3 cm pitkä tuppo (10–15 g), joka analysoitiin laboratoriossa. Menetelmällä saadaan veri-, sylki- ja virtsanäytteitä luotettavammin selville krooninen stressitaso, koska stressihormonit kertyvät hiuksiin useiden kuukausien ajalta. Missään aikaisemmassa tuulivoimatutkimuksessa ei ole tehty kliinisiä tutkimuksia väestössä tässä mittakaavassa.

Tuloksia fysiologisista mittauksista ja melun häiritsevyydestä on koottu kuvaan 5.1. Mikään stressiä tai verenkiertoa mittaavista tekijöistä ei riippunut äänitasovyöhykkeestä. Melun häiritsevyys sen sijaan oli yhteydessä äänitasoon, kuten aiemmissakin tutkimuksissa.

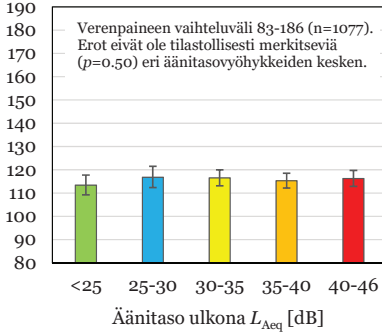
Itsearvioitu stressi



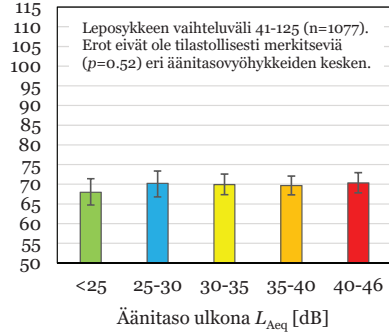
Hiusten kortisolikonsentraatio [ng/g]



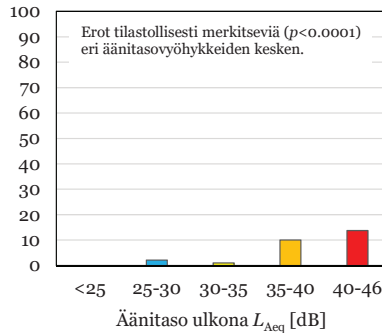
Systolinen verenpaine [mmHg]



Leposyke [1/min]



Melun erittäin häiritseväksi kokeneiden osuus [%]



Kuva 5.1. Itsearvoidun stressin, objektiivisesti mitatun stressin, systolisen verenpaineen, sykkeen (Michaud ym. 2016c) ja häiritsevyyden (Michaud ym. 2016a) riippuvuus tuulivoimamelun äänenpainetasosta. Etäisyys voimaloihin kasvaa, kun äänenpainetaso pienenee. Keskiarvot ja 95 % luottamusväli. Neljän ensimmäisen kuvan p-arvot ovat peräisin usean muuttujan regressiomallista, jossa on vakioitu stressiin äänenpainetasoa enemmän vaikuttaneiden yksilöllisten muuttujien vaikutus (vaihtelevasti muuttujasta riippuen esimerkiksi osavaltio, sukupuoli, ikä, BMI, kofeiinin kulutus, kuultavan raidemelun määrä, taloudellinen hyötyminen voimaloista, tupakointi, tinnitus, diagnosoitu korkea verenpaine).

Tulosten perusteella on epätodennäköistä, että tuulivoimaloiden aiheuttamalla infraäänellä olisi vaikutuksia stressiin, koska näin laajassa tutkimuksessa, joka käsitti myös suuria etäisyyksiä tuulivoima-alueista, ei voitu nähdä minkäänlaisia viitteitä siitä, että etäisyyksien voimaloihin selittäisi oireiden määrää.

5.4 Terveysoirevaikutukset

Michaud ym. (2016a) tutkivat Kanadassa 1238 satunnaisesti valitun asukkaan terveydentilaa 0,25–11,2 km päässä tuulivoima-alueesta. Kyselyllä kartoitettiin oirekokemuksia, terveydentilaa ja elämänlaatua hyvin monipuolisesti: migreeni, huikaus, tinnitus, krooninen kipu, astma, niveltulehdus, korkea verenpaine, lääkitys korkean verenpaineen vuoksi, verenpaineen sukuhistoria, krooninen keuhkoputkentulehdus/ilmapöhö, diabetes, sydänsairaus, suuri unen häiritsevyys, diagnosoitu unihäiriö, unilääkitys, levottomien jalkojen syndrooma, ahdistus- tai masennuslääkitys, elämänlaatu ja tyytyväisyys terveyteen. Asukkaat jaettiin pihamaalla vallitsevan tuulivoimaloiden äänitason perusteella yhteen viidestä äänitasovyöhykkeistä (<25 dB, 25–30 dB, 30–35 dB, 35–40 dB, 40–46 dB L_{Aeq}). Vyöhykkeet edustavat samalla etäisyyttä tuulivoimaloihin, koska pienillä äänitasoilla etäisyys on suuri ja päinvastoin.

Tilastollinen analyysi ei osoittanut vyöhykkeen vaikuttavan mitattaviin muuttujiin. Ainoa poikkeus oli unilääkitys, joka oli jostain syystä hieman yleisempää kaukana tuulivoima-alueesta (yli 18 % käytti lääkitystä vyöhykkeillä <30 dB) kuin lähellä sitä (alle 13 % käytti lääkitystä).

Myös Suomessa on tehty tutkimus terveysoireiden ja tuulivoima-alueen etäisyyden välisestä yhteydestä (Turunen ym. 2016). Siinä ei havaittu eroja oireiden määrissä etäisyysvyöhykkeillä < 2,5 km, 2,5–5 km ja 5–10 km asuvien kesken. Tämä tukee Kanadan tutkimuksesta saatua kuvaa.

5.5 Unen häiriintyminen

Onakpoya ym. (2015) ovat julkaisseet meta-analyysin siitä, miten tuulivoimalamelu on yhteydessä itsearvioituun unen laatuun. Tutkimus käsitti 2433 vastaajaa 8 eri tutkimuksesta, joista useimmat on jo mainittu luvuissa 5.1–5.4.

Tutkimuksen perusteella on jonkin verran todistusaineistoa siitä, että altistuminen tuulivoimalamelulle on yhteydessä kasvaneeseen unen häiriintymiseen ja uniongelmiin. Tuulivoimalamelun häiritsevyys on kuitenkin voimakkaasti yhteydessä tuulivoimaloiden näkymiseen: jos voimat nähdään, on todennäköisyys häiritsevyyskokemukselle suurempi, riippumatta tuulivoimaloiden aiheuttamasta äänenpainetasosta. Tämän vuoksi tutkijat olivat epävarmoja siitä, onko tuulivoimalamelu lähtökohtainen selittäjä unen häiriintymiselle.

Suomalaisessa tutkimuksessa (Hongisto ym. 2015) on havaittu selvä yhteys tuulivoimalamelun äänenpainetason ja tuulivoimalamelun aiheuttamien unihaittojen välillä. Haitat olivat suurempia, kun äänenpainetaso oli suurempi. Vastaava havainto on tehty myös toisessa suomalaisessa tutkimuksessa, jonka mukaan tuulivoimalamelun aiheuttamat unihaitat kasvoivat, kun etäisyys voimaloihin lyheni (Turunen ym. 2016).

Merkittävin tuulivoimaloiden univaikutuksia koskeva tutkimus on toteutettu Kanadassa (Michaud ym. 2016d). Tutkimus käsitti 1238 satunnaisesti valittua asukasta 0,25–11,22 km päässä tuulivoima-alueesta. Unenlaatua tiedusteltiin sekä subjektiivisin (monipuolinen kysely) että objektiivisin mittarein. Objektiivinen mittaus perustui 7 yötä kestäneeseen liikeseurantaan aktigrafilla 654 kyselyyn vastanneen keskuudessa. Aktigrafi seuraa kehon liikkeitä yöaikaan ja sen avulla voidaan melko luotettavasti saada tietoa nukahtamisajasta, unen kokonaiskestosta, valvelukumääristä ja -jaksoista. Aasukkaita jaettiin pihamaalla vallitsevan tuulivoimaloiden äänenpainetason perusteella yhteen viidestä äänitasovyöhykkeistä (<25 dB, 25–30 dB, 30–35 dB, 35–40 dB, 40–46 dB L_{Aeq}). Subjektiiviset ja objektiiviset mittarit eivät paljastaneet eroja eri äänitasovyöhykkeiden välillä. Erittäin suurta unihaittaa raportoineiden osuus oli 10–15 % väestöstä kaikilla äänitasovyöhykkeillä. Heidän kohdallaan tuulivoima mainittiin syyksi sitä useammin, mitä lähempänä tuulivoima-alueita oltiin. Tulos on linjassa aiempien tutkimusten kanssa.

5.6 ”Tuuliturbiinisyndrooma”

Pierpont (2009) on esittänyt omakustanteisessa kirjassaan, että tuulivoimaloiden infraäänit aiheuttavat terveysoireita. Kirjassa esitetään selvitys, jonka mukaan kirjoittaja olisi haastatellut 38 henkilöä 10 eri perheestä, jotka sijaittivat tuulivoima-alueen lähellä. Pierpont (2009) havaitsi tutkittavilla runsaasti erilaisia oireita, kuten sydämentykytystä, unettomuutta, päänsärkyä, korvakipua, pahoinvointia, vatsaki-

pua, nivelkipuja, painetta korvissa, tinnitusta, kuulokyvyn heikentymistä, keskittymisongelmia, lyhytkestoisen muistin ongelmia, ärsyyntyneisyyttä, huimausta, ahdistuneisuutta, näkemiseen liittyviä ongelmia, huolestuneisuutta ja paniikkikohtauksia. Oireyhtymän hän nimitti ”tuuliturbiinisyndroomaksi”.

Pierpontin tutkimuksessa on useita rajoituksia, kuten melu- tai infraäänimittausten puuttuminen, valintaharhan riski (perheitä ei ole valittu satunnaisesti), tutkimukseen osallistuneiden talouksien liian pieni määrä (10), ja vertailuryhmän puuttuminen. Koska Pierpontin (2009) selvityksessä ei ollut vertailuryhmää, joka asuu kaukana tuulivoima-alueesta, ei voida sen vuoksi osoittaa, että kuvatut oireet olisivat muuta väestöä voimakkaampia saattikka että ne aiheutuisivat infraäänistä. ”Tuuliturbiinisyndrooman” mukaiset oireet ovat yleisiä koko maapallon väestöllä. Toistaiseksi ”tuuliturbiinisyndrooman” olemassaoloa ei ole voitu osoittaa tieteellisin tutkimuksin. ”Tuuliturbiinisyndroomaksi” kuvattua oireyhtymää ei esiinny minkään valtion lääketieteen tautiluokituksissa, koska näyttö sen olemassaolosta on toistaiseksi kiistanalainen (Schmidt & Klokker, 2014). Tutkimusta ei luultavasti hyväksyttäisi julkaistavaksi vertaisarvioidussa tiedelehdessä ainakaan alkuperäistutkimuksena. Pierpontin (2009) tutkimuksen ei ole näiden syiden vuoksi katsottu esittävän luotettavaa näyttöä tuulivoimaloiden terveysvaikutuksista (Bolin ym. 2011; Knopper and Ollson, 2011; Schmidt & Klokker, 2014; Knopper ym. 2014).

Rubinin ym. (2014) näkemyksen mukaan Pierpontin (2009) raportoimat oireet voivat olla psykosomaattisia oireita, jotka aiheutuvat tuulivoimaloihin liittyvistä pe-loista. Psykosomaattisista oireista on kyse silloin, kun ruumiillisille oireille ei lääketieteellisissä tutkimuksissa löydy riittävää selitystä. Knopper ja Ollson (2011) ovat arvioineet, että muutos ympäristössä, eivätkä itse tuulivoimalat, voisivat selittää asukkaiden kuvaamien oireiden syntymisen. Tätä kutsutaan myös kognitiiviseksi stressiteoriaksi: sen mukaan yksilö arvioi ympäristön kuormitustekijää, kuten tuulivoimalamelua tai tuulivoimaloita, sen hyödyn mukaan ja käyttäytyy sen mukaisesti (Pedersen, 2011). Jo valmiiksi rasittuneessa tilassa oleva yksilö voi arvioida tuulivoima-alueen ylimääräisenä uhkana omalle psykofysiologiselle palautumiselleen. Yksilö ei voi kontrolloida tuulivoima-alueen toimintaa tai melua, jolloin seurauksena on usein melusta häiriintyminen. Melun häiritsevyys taas on yhteydessä terveyshaittoihin (luku 6.6).

Leventhall (2006) on tutkinut runsaasti infraääniin liittyviä lehtikirjoittelua ja niitä aiheutuneita väärää käsityksiä ja pelkovaikutuksia yhteiskunnassa. Hänen mu-

kaansa Nina Pierpont on levittänyt mediassa tuulivoimaloiden infraääniin liittyvää väärää tietoa jo vuonna 2005. Tällainen toiminta asettaa kyseenalaiseen valoon Pierpontin (2009) tutkimuksen ja lisää valintaharhan ja provokaation epäilyksiä. Kirjallisuudessa on esitetty jopa sellaisia väitteitä, että Pierpont olisi valinnut tutkimukseensa vain sellaisia perheitä, joissa oireita on runsaasti, tai että perheille olisi tarjottu väärää tietoa tuulivoimaloiden terveysvaikutuksista ennen kyselyn tekoa. Tällaisilla väitteillä ei luonnollisesti ole mitään todistusrvoa mutta löydösten kyseenalaistaminen osoittaa laadukkaiden lisätutkimusten olevan välttämättömiä. Pierpontin (2009) kirja onkin lisännyt aihepiirin tutkimusta voimakkaasti.

5.7 ”Vibroakustinen tauti”

”Vibroakustisen taudin” (VAD, *Vibroacoustic Disease*) käsitteen on luonut Castelo Branco ym. (1999) lentokonehuoltajien parissa tehtyjen havaintojen pohjalta. Huoltajat altistuivat erittäin voimakkaalle melulle työssään. Vibroakustiseen tautiin liittyi kirjoittajien mukaan sydän- ja verisuonirakenteiden paksuuntumista, mikä kasvattaa sydäntautisairauksien riskiä. Vibroakustisen taudin riski on kirjoittajien mukaan olemassa, jos altistutaan yli 90 dB pientaajuiselle melulle useita vuosia.

On huomattava, että ”vibroakustinen tauti” ei nimestään huolimatta kuulu minikään valtion tautiluokituksiin, vaikka tutkimusryhmä on 90-luvulta lähtien tehnyt töitä kansainvälisen luottamuksen saavuttamiseksi.

Tuulivoimaloiden pientaajuinen melu asuinympäristössä ei lukujen 3.3 ja 7 mukaan ole lähelläkään tasoa 90 dB. Alves-Pereira ja Castelo Branco (2007) esittivät kuitenkin väitteen, että myös tuulivoimaloiden infraääni ja pientaajuinen melu sisätiloissa voisivat aiheuttaa ”vibroakustisen taudin”. Väittäjä ei ole saanut tukea tieteellisissä yhteisöissä.

Chapman ja George (2013) ovat tehneet tutkimuksen ”vibroakustista tautia” koskevista artikkeleista ja niiden viittauksista. Selvitys havaitsi 35 artikkelia. Näistä yksikään ei osoittanut tutkimuksilla yhteyttä ”vibroakustisen taudin” ja tuulivoimaloiden välillä. 35 artikkelista vain yksi oli muun kuin Alves-Pereiran tai Castelo Brancon ryhmän kirjoittama. Peräti 74 % näihin artikkeleihin liittyvistä viittauksista oli kirjoittajien itsensä tekemiä. Keskimääräinen itseviittausprosentti tieteen parissa on 7.

”Vibroakustista tautia” koskevia julkaisuja on runsaasti ilmaiseksi saatavilla internetissä. Korkeatasoiset tieteelliset julkaisut kansainvälisissä vertaisarvioituissa tiedelehdissä ovat pääasiassa maksullisia, ellei tietoa etsivä työskentele tutkimuslaitoksessa, jolloin useimmat tiedelehdet ovat maksuttomina saatavilla. Kun kansalainen etsii tietoa tuulivoimasta, hän ei pääse helposti käsiksi korkeatasoisiin tieteellisiin julkaisuihin.

Chapmanin ja Georgen (2013) mukaan ”vibroakustisesta taudista” on tullut runsaan kirjoittamisen ja viestinnän myötä ”faktoidi” eli faktalta kuulostava näennäis-totuus. Näennäistotuuksia levittämällä voidaan aiheuttaa ns. nosebovaikutus (luku 6) tai perusteetonta aiheuttajaksi lukemista.

5.8 Elämänlaatu

WHO määrittelee elämänlaadun (QOL, *Quality of Life*) seuraavasti: yksilön kokemus asemastaan elämässä suhteessa kulttuuriin ja vallitseviin arvosysteemeihin sekä suhteessa yksilön tavoitteisiin, odotuksiin, standardeihin ja huoliin. (*“An individual’s perception of their position in life in the context of the culture and value systems in which they live, and in relation to their goals, expectations, standards and concerns.”*). Elämänlaatu on terveydentilaa laajempi käsite koskettuen elämän eri osa-alueita.

Shepherdin ym. (2011) Uudessa-Seelannissa toteuttamassa tutkimuksessa lähellä tuulivoima-alueita asuvien parissa elämänlaatua (WHOQOL-BREF) mittaavan kyselymenetelmän ympäristön ja fyysikaalisen osa-alueen tulokset olivat heikompia kuin vertailuryhmässä. Nissenbaumin ym. (2012) Kanadassa toteuttamassa tutkimuksessa lähellä tuulivoima-alueita asuvien parissa elämänlaadun mittarin (SF-36) henkinen osa-alue oli puolestaan alempi kuin vertailuryhmässä.

Shepherdin ym. (2011) ja Nissenbaumin ym. (2012) tulokset ovat keskenään ristiriidassa, koska ero vertailuryhmään nähden ei näkynyt samassa elämänlaadun osa-alueita koskevassa mittarissa. Esimerkiksi melun häiritsevyyden riippuvuus äänenpainetasosta on tullut esiin kaikissa alan tutkimuksissa (luku 5.2), joten tutkimusten kesken ei tältä osin ole ristiriitaa. Ristiriitaan voi olla osasyynä vastaajiin liittyvä valintaharha tai vastaajien vähyys ja tästä johtuva sattumallinen tutkimuslöydös. Shepherdin tutkimuksessa lähellä tuulivoima-alueita kyselyyn vastasi vain 39 henkilöä läheltä voimaloita (etäisyys alle 2 km) ja 158 henkilöä kontrolliryhmästä (etäisyys yli 8 km). Nissenbaumin tutkimuksessa vastaajamäärä oli vain 38 etäisyyksillä

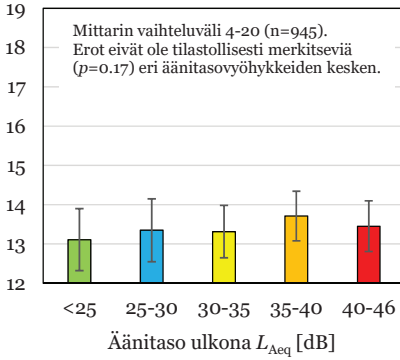
375–1400 m ja kontrolliryhmässä 41 etäisyyksillä 3.3–6.6 km. Näin pieniä vastaajamääriä ei yleensä pidetä riittävinä epidemiologisissa tutkimuksissa.

Shepherdin ym. (2011) ja Nissenbaumin ym. (2012) tulokset ovat ristiriidassa myös Puolassa toteutetun, paljon suuremman tutkimuksen kanssa (Mroczek ym. 2015). Tutkimukseen osallistui 1277 vastaajaa 4 eri etäisyysvyöhykkeeltä (alle 700 m, 700–1000 m, 1000–1500 m ja yli 1500 m). Tutkimuksessa kaikki tutkitut elämänlaadun (SF-36 mittari) osa-alueet (mm. fyysikaalinen komponentti, kehon kipu, yleinen terveys, elinvoimaisuus, sosiaalinen komponentti ja mielenterveys) havaittiin paremmiksi etäisyysvyöhykkeellä alle 700 m kuin etäisyysvyöhykkeellä yli 1500 m. Tutkimuksen epävarmuutta kasvatti se, että etäisyys perustui vastaajien itsearvioon.

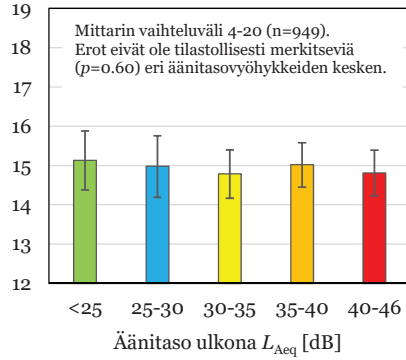
Edellä kuvattujen ristiriitaisten tulosten vuoksi Feder ym. (2015) toteuttivat laajan tutkimuksen Kanadassa, jossa mitattiin WHON:n elämänlaadun mittaristoa WHO-QOL-BREF. Se sisältää 26 kysymystä kattaen fyysisen terveyden, psykologisen terveyden, sosiaaliset suhteet ja ympäristön. Tutkimukseen osallistui 1238 vastaajaa. Vastausaste oli intensiivisen haastattelumenetelmän vuoksi peräti 78,9 %. Vastaajat sijaitsivat tasaisesti etäisyyksillä 0,25–11,2 km tuulivoimaloista. Vastaajat jaettiin tasaisesti tuulivoimalamelun äänitason mukaan viiteen kategoriaan (<25 dB, 25–30 dB, 30–35 dB, 35–40 dB ja 40–46 dB L_{Aeq}).

Federin ym. (2015) tutkimuksessa elämänlaadun eri mittarien arvot eivät riippuneet äänitasovyöhykkeestä (kuva 5.2). Tulokset ovat ristiriidassa Shepherdin ym. (2011) tutkimuksen kanssa. Nissenbaum ym. (2012) ja Mroczekin ym. (2015) käyttivät hieman erilaista elämänlaadun mittaria (SF-36) kuin Feder ym. (2015) ja Shepherd ym. (2011) mutta ristiriita kaikkien näiden tutkimusten kesken on melko ilmeinen.

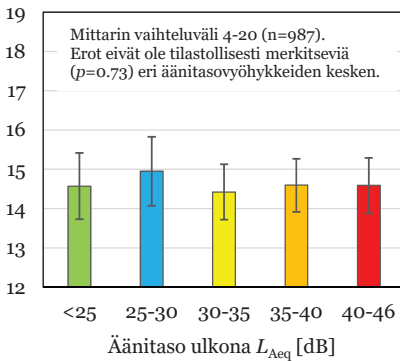
Fyysinen Terveys -osa-alue



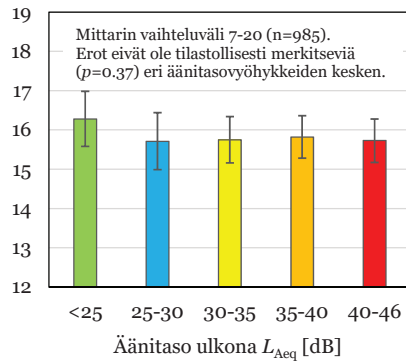
Psykologinen -osa-alue



Sosiaaliset suhteet -osa-alue



Ympäristö -osa-alue



Kuva 5.2. Elämänlaadun eri osa-alueiden pistemäärän riippuvuus äänenpainetasosta. Keskivrot ja 95 % luottamusvälit (Feder ym. 2015).

Federin ym. (2015) aiemmasta poikkeavat löydökset asettavat kyseenalaiseksi Shepherdin ym. (2011) ja Nissenbaumin ym. (2012) ehdottamat 2 km ja 1.4 km suojaetäisyydet, koska Feder ym. (2015) eivät havainneet huomattavasti suuremmissa tutkimuksissa eroja elämänlaadun eri komponenttien suhteen, vaikka tutkimusalue kattoi paljon laajemman etäisyysalueen kuin aiemmat 3 tutkimusta.

Federin ym. (2015) tutkimus ei siis tue sitä, että tuulivoimaloiden melutasolla olisi vaikutusta elämänlaatuun äänitasoalueella 25–46 dB L_{Aeq} . Tämän perusteella on epätodennäköistä, että millään muullakaan tuulivoimaan liittyvällä tekijällä, mukaan lukien infraääni, olisi vaikutusta elämänlaatuun etäisyysalueella 0,25–11,2 km voimaloista.

5.9 Diabetes

Pedersen (2011) toteutti meta-analyysin kolmesta eri poikkileikkaustutkimuksesta, joista yksi toteutettiin Alankomaissa ja kaksi Ruotsissa. Hän havaitsi melun häiritsevyyden olevan yhteydessä diabetekseen Alankomaita koskevassa tutkimuksessa. Diabetes ei ollut kuitenkaan yhteydessä tuulivoimamelun äänenpainetasoon. Yhteyttä ei kuitenkaan havaittu kahdessa aiemmassa tutkimuksessa, jotka oli toteutettu Ruotsissa. Poikkileikkaustutkimuksen luonteen takia syy-seuraussuhdetta ei voida osoittaa: häiritsevyys voi olla seurausta diabeteksestä tai päinvastoin.

Tieliikennemelualtistuksen on havaittu lisäävän stressiä ja univaikeuksia. Näiden on arvioitu lisäävän puolestaan sydän- ja verisuonitautien ja diabeteksen riskiä (Schmidt & Klokke, 2014). Tämän vuoksi Pedersenin (2011) löydös diabeteksen yhteydestä häiritsevyyteen edellyttää jatkotutkimuksia, jotta yhteys voidaan vahvistaa tuulivoimamelun osalta.

6 Miten tuulivoimaloista koetut oireet selittyvät?

6.1 Johdanto

King's College Londonin yliopiston psykologisen lääketieteen tutkijoiden (Rubin, Burns ja Wessely, 2014) mukaan uusia teknologioita on jo ennen tuulivoimaloiden yleistymistä epäilty ja syytetty usein terveysoireiden aiheuttajiksi. Tieteellinen tutkimustieto ei heidän mukaansa tue sitä näkemystä, että tuulivoimalat aiheuttaisivat muita terveysvaikutuksia kuin häiritsevyyttä ja unen häiritsevyyttä.

Rubin ym. (2014) esittivät ainakin kuusi hypoteettista selitysmallia siitä, miten tuulivoima-alueiden asukkaiden raportoimat oireet voitaisiin selittää. Näitä ovat:

- Nosebovaikutus: uskomukset tuulivoimaloiden terveyshaitoista voivat aiheuttaa tai lisätä oirekokemuksia.
- Perusteeton aiheuttajaksi lukeminen: oireiden aiheuttajaksi luetaan joskus tuulivoima, vaikka tähän ei ole perusteita.
- Huolestuneisuus: huolestuneisuus ja ahdistuneisuus ympäristöriskistä voivat lisätä koettujen tai muistettujen oireiden määrää, vaikka ympäristö ei oireita suoranaisesti aiheuttaisi.
- Melun häiritsevyys: terveysoireet ovat olleet suurempia niillä, jotka raportoivat voimakasta melun häiritsevyyttä. Melun häiritsevyys taas on yhteydessä useisiin tekijöihin (luku 5.2).
- Persoonallisuustekijät: eräät persoonallisuustekijät ovat yhteydessä oireiden määrään.
- Median antama kuva: osa tuulivoimaa koskevasta uutisoinnista luo kuvaa, jonka mukaan selittämättömiä terveysvaikutuksia voisi olla olemassa.

Tämän lisäksi pientaajuisen melun tutkija Geoff Leventhall on esittänyt kaksi selitysmallia:

- Amplitudimodulaatio eli jaksollinen sykintä (Leventhall, 2006)
- Herkistyminen (Leventhall, 2009).

Näitä selitysmalleja käsitellään seuraavissa luvuissa.

6.2 Nosebovaikutus

Plasebovaikutuksessa positiiviset odotukset tuottavat positiivisia terveysvaikutuksia, vaikka altistuksessa tai lääkityksessä ei ole tapahtunut muutoksia. Tämän vastakohta on nosebovaikutus: siinä kielteiset odotukset tuottavat haitallisia terveysvaikutuksia, vaikka altistuksessa tai lääkityksessä ei ole tapahtunut muutoksia.

Nosebovaikutus on negatiivista itsehypnoosia aiheuttaen terveyshaittoja ilman objektiivista syytä yksilön ominaisuuksien, odotusten ja ehdollistumisen kautta (Strandberg, 2014). Nosebovaikutukselle altistavat mm.

- suggestiotaipumus (hypnoosiherkkyys),
- pessimismi (huonojen puolien näkeminen kaikessa),
- neuroottisuus (keskimääräistä suurempi taipumus kokea negatiivisia tunteita, kuten ahdistuneisuus, huolestuneisuus, viha, pelko, turhautuminen, kateus, syällisyys, alavireisyys ja yksinäisyys) ja
- tyyppin A persoonallisuus (keskimääräistä kilpailunhaluisempi, kunnianhimoisempi, kärsimättömämpi ja aggressiivisempi persoonallisuus).

Strandbergin (2014) mukaan lääkärin tulisi käyttää hyväksi plasebovaikutusta ja välttää nosebovaikutusta ollessaan vuorovaikutuksessa selittämättömistä oireista kärsivän potilaan kanssa.

Kun yksilö olettaa tai uskoo lääkityksen, tai tuulivoimaloiden aiheuttaman infraäänien, aiheuttavan oireita tai sairauksia, tämä voi aloittaa yksilön kohdalla prosessin, jossa hän alkaa tarkkailla oireita tai sairauksien merkkejä itsessään tai läheistensä parissa negatiivisten olettamusten tai uskomusten vahvistamiseksi (Crichton ym. 2014a). Negatiiviset odotukset ja uskomukset muuttuvat oirekokemuksiksi, koska kasvanut huomion kiinnittyminen kehoon aiheuttaa yleensä oirekokemuksien kas-

vamista, vaikka ne muuten jäisivät huomaamatta (Crichton ym. 2014a). Tämän lisäksi kasvanut ahdistuneisuus itsessään aiheuttaa fysiologisen aktiivisuuden kasvua aiheuttaen oireita kuten suun kuivuminen ja sydämen sykkeen kasvu (Crichton ym. 2014a). Tällaiset yksilö voi tulkita ahdistuneisuuden ja ylivalppauden aiheuttamien oireiden johtuvan sairaudesta erityisesti silloin, jos koetut oireet ovat johdonmukaisia terveyshuolien kanssa (Crichton ym. 2014a).

Terveydestään huolestuneet ja ahdistuneet yksilöt voivat kärsiä univaikeuksista, jotka puolestaan lisäävät ahdistuneisuuden aiheuttamia fysiologisia oirekokemuksia. Nämä oireet voidaan kokea aiheutuvan tuulivoimaloista, jos henkilöllä on oletuksia, että tuulivoimalat aiheuttavat terveyshaittoja (Crichton ym. 2014a). Tuulivoimalamelun kuuleminen ja voimaloiden näkeminen voi tässä yhteydessä lisätä oirekokemuksia, koska terveyshaittaa aiheuttavan tekijän (tuulivoima) aistiminen muistuttaa oletetun vaaratekijän läsnäolosta ja sille altistumisesta.

Nosebovaikutus ja ympäristöyliherkkyys otettiin Suomen lääkirilehdessä esiin yhdeksi potentiaaliseksi selitysmalliksi tuulivoima-alueilla havaituille selittämättömille oireille paljon aiemmin, kuin aihe saavutti mediassa suuren huomion (Salminen, 2013). Oireina on havaittu mm. päänsärkyä, huimausta, pahoinvointia, unihäiriöitä ja muistihäiriöitä. Oireet ovat Pierpontin (2009) kuvaaman ”tuuliturbiinisyndrooman” mukaisia epäspesifejä oireita.

On mahdollista, että henkilön vahva uskomus tuulivoimaloiden infraäänen olemassaolosta sekä esimerkiksi internetistä tai aktivisteilta saatu tieto tuulivoimaloiden infraäänen oletetuista terveyshaitoista voi aiheuttaa itseään ruokkivan psykofyysisen kierteen, joka voi johtaa pahimmillaan henkilön täydelliseen invalidisoitumiseen (Salminen, 2013). Invalidilla henkilöllä tarkoitetaan sitä, että henkilöllä on vamman tai sairauden vuoksi alentunut työkyky.

Lääketieteellisesti ei ole voitu osoittaa tuulivoimaloiden aiheuttaman infraäänen aiheuttavan ihmiselle terveysvaikutuksia. Sen sijaan on runsaasti tutkimustietoa siitä, että negatiiviset odotukset uskomukset ja odotukset voivat niitä aiheuttaa. Tästä ovat esimerkkinä Uudessa-Seelannissa tehdyt laboratoriotutkimukset, joiden sisältö on tiivistetty seuraaviin kappaleisiin.

Koe 1 (Crichton ym. 2014b):

- **Tavoite.** Tavoitteena oli selvittää, onko etukäteen tarjotulla negatiivisella tiedolla mahdollista lisätä oireiden esiintymistä ja voimakkuutta.
- **Menetelmät.** 54 koehenkilöä jaettiin tasaisesti kahteen ryhmään A ja B. Kumpikin ryhmä altistettiin kahdelle äänitilanteelle: 1. Ei-kuultava infraääni (5 Hz, 40 dB); 2. Valeinfraääni (ei infraääntä) satunnaisessa järjestyksessä. Altistus aika oli kummassakin 10 minuuttia. Koehenkilöille kerrottiin, että kummankin äänitilanteen aikana soitetaan infraääntä. Kokeen vetäjälle ei kerrottu, kumpi äänitilanne on kyseessä, joten kokeen vetäjän käytöksellä ei todennäköisesti ollut vaikutuksia koehenkilöiden käytökseen. Ennen äänitilanteita ryhmälle A esitettiin video, jossa tuulivoima-alueiden lähiasukkaat kertoivat kokemuksiaan oireista, joiden alkuperäksi kuvattiin tuulivoimaloiden infraäänit. Ryhmälle B esitettiin puolestaan video, jossa asiantuntijat kertoivat tieteeseen perustuvaa näyttöä siitä, ettei tuulivoimaloiden infraäänillä ole oirevaikutuksia. Kummankin ryhmän koehenkilölle esitettiin samat kysymykset heti koetilanteen alussa (ennen videon näyttämistä) sekä heti kummankin äänitilanteen jälkeen. Tiedustellut oireet vastasivat niitä, joita tuulivoima-alueiden lähellä asuvat ovat kirjallisuuden mukaan kokeneet esiintyvän tuulivoimaloiden infraäänien vaikutuksesta (päänsärky, paine korvissa, korvien soiminen, kutiseva iho, kehon elinten paine tai ärsytys, huimaus, paineen tunne rintakehässä, kehon värähtely, rauhaton sydämen toiminta, pahoinvointi, väsymys ja heikotus). Oireiden voimakkuutta tiedusteltiin 7-portaisella asteikolla 0 (Ei lainkaan) - 6 (Erittäin paljon). Oire katsottiin esiintyvän, jos koehenkilö raportoi arvon 1 tai enemmän. Oirekokemusten voimakkuus oli oirevoimakkuuksien summa. Lisäksi tiedusteltiin koehenkilöiden huolestuneisuutta tuulivoimaloiden äänten terveysvaikutuksista asteikolla 0 (Eri mieltä) - 100 (Voimakkaasti samaa mieltä).
- **Tulokset.** Kokeen alussa ryhmien A ja B välillä ei ollut merkitsevää eroa huolestuneisuudessa (keskiarvot 44 ja 37), oireiden määrässä tai oireiden voimakkuudessa. Kummankin äänitilanteen jälkeen Ryhmä A raportoi merkitsevästi enemmän huolestuneisuutta terveysvaikutuksista kuin ryhmä B (keskiarvot 72 ja 38, $p < 0.001$). Ryhmä A raportoi kummankin äänitilanteen jälkeen merkitsevästi enemmän oireita (8–9 kpl) kuin ryhmä B (noin 6 kpl). Lisäksi oireiden voimakkuus oli merkitsevästi korkeampi ryhmässä A (pistemäärä noin 17) kuin ryhmässä B (pistemäärä 9–11). Oireiden määrä ja voimakkuus eivät riippuneet ryhmän sisällä äänitilanteesta 1 (infraääni) tai 2 (valeinfraääni): kummassakin arvot olivat tilastollisesti katsoen samanarvoiset.

- **Johtopäätökset.** Tutkimus osoitti, että oireiden esiintyminen ja voimakkuus eivät riippuneet äänitilanteesta vaan siitä, kumpaan ryhmään koehenkilö kuului, toisin sanoen, etukäteen annetusta tiedosta ja niiden luomista odotuksista (nosebovaikutus). Vaikka laboratoriotutkimusta ei voida suoraan soveltaa elinympäristöihin, joissa altistuminen on pitkäkestoista, tutkimus osoittaa, että negatiivisella tiedolla voidaan saada aikaan akuutteja oirekokemuksia. Tämän vuoksi on tärkeää, ettei asukkaiden parissa levitetä tietoa, joka ei perustu tutkimustietoon.

Koe 2 (Crichton ym. 2014c):

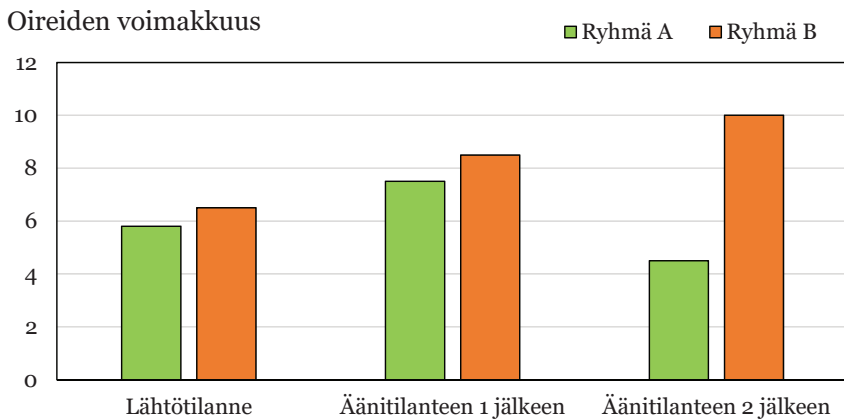
- **Tavoite.** Tavoitteena oli selvittää, voidaanko etukäteen tarjotulla negatiivisella tiedolla lisätä oirekokemuksia ja päinvastoin.
- **Menetelmät.** 60 koehenkilöä jaettiin kahteen ryhmään ja altistettiin tuulivoimalamelulle (43 dB), jossa on ei-kuultavaa infraääntä (50 dB, 9 Hz). Ennen äänitilanteita ryhmälle A esitettiin video, jossa tuulivoima-alueiden lähiasukkaat kertoivat kokemuksiaan oireista, joiden alkuperäksi kuvattiin tuulivoimaloiden infraäänit. Ryhmälle B esitettiin puolestaan video, jossa asiantuntijat kertoivat infraäänien terapeuttisista positiivisista vaikutuksista. Mitattavat oireet olivat samat kuin kokeessa 1. Tämän lisäksi tiedusteltiin mielialaa. Kyselyt tehtiin ennen videon katsomista sekä 7 minuutin kestoisen äänitilanteen jälkeen.
- **Tulokset.** Ryhmässä A oireiden lukumäärä ja voimakkuus kasvoivat ja mieliala heikkeni äänitilanteen jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen videon katsomista. Ryhmässä B oireiden lukumäärä ja voimakkuus pienenivät ja mieliala parani äänitilanteen jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen videon katsomista.
- **Johtopäätökset.** Etukäteen tarjotulla tiedolla voidaan lisätä (nosebovaikutus) tai vähentää (plasebo-efekti) oirekokemuksia.

Koe 3 (Crichton & Petrie, 2015a):

- **Tavoite.** Tavoitteena oli selvittää, voidaanko oireiden määrää ja voimakkuutta pienentää kertomalla koehenkilöille tapahtuneesta nosebovaikutuksesta.
- **Menetelmät.** 66 koehenkilöä jaettiin ryhmään A tai B. Kumpikin ryhmä altistettiin kahteen kertaan äänitilanteelle, jossa oli tuulivoimalamelua (43 dB L_{Aeq}) ja infraääntä (50.4 dB, 9 Hz). Ennen ensimmäistä äänitilannetta kummallekin ryhmälle esitettiin video, jossa tuulivoima-alueiden lähiasukkaat kertoivat kokemuksiaan oireista, joiden alkuperäksi kuvattiin tuulivoimaloiden infraäänit. Ennen toista äänitilannetta, ryhmälle A

esitettiin video, jossa kerrottiin totuus nosebovaikutuksesta eli siitä, että negatiivinen tieto tuulivoimaloiden terveysvaikutuksista voi lisätä oireita, vaikka itse tuulivoimaloiden ääni tai infraääni ei niitä lisäisi. Ryhmälle B esitettiin puolestaan video, jossa kuvattiin patofysiologiaa (sairaalan elimistön toimintaa tutkiva tiede) teorioita oireiden mekanismeista. Oireiden määrä ja voimakkuus mitattiin koetilanteeseen saavuttaessa sekä molempien äänitilanteiden jälkeen. Käytössä olivat samat mittarit kuin kokeessa 2.

- **Tulokset.** Ensimmäisen äänitilanteen jälkeen molemmat ryhmät raportoivat lähtötilanteeseen nähden lukumääräisesti enemmän ja voimakkaampia oireita sekä heikentyneitä mielialaa. Toisen äänitilanteen jälkeen ryhmässä A oirelukumäärä, oireiden voimakkuus (kuva 6.1) ja mieliala palautuivat lähtötilanteen tasolle, kun taas ryhmässä B tapahtui päinvastoin: oireiden lukumäärä ja voimakkuus kasvoivat entisestään (kuva 6.1) ja mieliala heikkeni entisestään.
- **Johtopäätökset.** Tutkimus tukee sitä näkemystä, että asiallinen nosebovaikutuksesta kertominen voi vähentää oirekokemuksia. Tällä on erityisesti sovelluksia elinympäristöissä, koska on epäilty, että osa asukkaista oireilisi nosebovaikutuksen eikä itse tuulivoimaloiden infraäänien vuoksi.



Kuva 6.1. Oireiden voimakkuus laboratorioskokeen 3 eri vaiheissa (Crichton ja Petrie 2015a, Fig. 1). Kummallekin ryhmälle kerrottiin ennen äänitilannetta 1 infraäänien negatiivisista terveysvaikutuksista. Äänitilanteen 1 jälkeen havaittu oireiden voimakkuuden kasvu voitiin poistaa ryhmässä A tarjoamalla heille tietoa nosebovaikutuksesta. Ryhmälle B puolestaan kerrottiin oireiden patofysiologisista mekanismeista ja oireiden kasvaminen jatkui äänitilanteessa 2. Lähtötilanteessa ja äänitilanteen 1 jälkeen ryhmien A ja B väliset erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä mutta äänitilanteen 2 jälkeen olivat.

Koe 4 (Crichton & Petrie, 2015b):

- **Tavoite.** Tavoitteena oli selvittää, voidaanko positiivisia odotuksia synnyttävällä tiedolla vähentää oireita, jotka ovat aiemmin syntyneet negatiivisia odotuksia synnyttävällä väärällä tiedolla.
- **Menetelmät.** 64 koehenkilöä jaettiin ryhmiin A ja B. Kumpikin altistettiin kaksi kertaa äänitilanteelle, jossa soitettiin tuulivoimalan ääntä (43 dB L_{Aeq}) ja ei-kuultavaa infraääntä (50.4 dB, 9 Hz). Ryhmälle A kerrottiin ennen ensimmäistä äänitilannetta tuulivoimaloiden infraäänten negatiivisista vaikutuksista ja ennen äänitilannetta 2 infraäänen terapeuttisista eli positiivista terveysvaikutuksista. Ryhmälle B tieto tarjottiin päinvastaisessa järjestyksessä (ensin positiivinen tieto, sitten negatiivinen tieto). Mitattavat muuttujat olivat samat kuin kokeessa 3.
- **Tulokset.** Koehenkilöt, jotka saivat negatiivista tietoa, raportoivat vähemmän oireita, alemmaa oireiden voimakkuutta ja parempaa mielialaa, jos heille oli tätä ennen tarjottu positiivista tietoa (Ryhmä B). Lisäksi ryhmässä A havaittiin plasebo-efekti eli oireiden määrä ja voimakkuus pienenivät ja mieliala paranivat, kun heille tarjottiin positiivinen tieto aiemman negatiivisen jälkeen.
- **Johtopäätökset.** Positiivisella tiedolla voidaan poistaa aiemmin negatiivisen tiedon aiheuttamia oirekokemuksia.

Koe 5 (Crichton ym. 2015):

- **Tavoite.** Tavoitteena oli selvittää, voidaanko tuulivoimalamelun terveysvaikutuksiin liittyvällä positiivisella tai negatiivisella tiedolla vaikuttaa melun häiritsevyyteen ja selvittää, miten yksilöllinen meluherkkyys selittää mahdollisia muutoksia.
- **Menetelmät.** 60 koehenkilöä jaettiin ryhmiin A ja B. Ennen koetta meluherkkyys mitattiin kaikilta koehenkilöiltä kyselyllä. Tämän jälkeen ryhmälle A tarjottiin negatiivista tietoa ja ryhmälle B positiivista tietoa (sisältö kuvattu yllä). Kumpikin ryhmä altistettiin yhdelle 7 minuutin kestoiselle äänitilanteelle, jossa oli tuulivoima-alueen ääntä (40 dB L_{Aeq}) ja ei-kuultava infraääntä (9 Hz, 50.4 dB).
- **Tulokset.** Ryhmässä A melun häiritsevyys oli merkittävästi suurempi kuin ryhmässä B. Meluherkkyys vaikutti tuloksiin vain ryhmässä A: meluherkkien kohdalla häiritsevyys oli suurempi kuin ei-meluherkkien kohdalla.
- **Johtopäätökset.** Negatiivinen tieto voi lisätä melun koettua häiritsevyyttä. Muutos voi olla suurempi meluherkkien yksilöiden tapauksessa. Sen sijaan

positiivinen tieto voi vähentää melun häiritsevyyttä, myös meluherkkien yksilöiden tapauksessa.

Edellä kuvatut 5 laboratoriotutkimusta osoittavat, että nosebo- tai plasebovaikutus voidaan aikaansaada hyvin nopeasti terveiden henkilöiden parissa. Tämän vuoksi on mahdollista, että nosebovaikutus selittäisi tuulivoimaloista koettuja oireita asuin-ympäristöissä.

6.3 Ympäristöliherkkyys

Sosiaali- ja terveysministeriö, ympäristöministeriö, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Työterveyslaitos ja Säteilyturvakeskus tekevät yhteistyötä mm. ympäristöyliherkkyyteen liittyen (*Idiopathic Environmental Intolerance, IEL*). Tavoitteena on linjata, miten erilaiset selittämättömät ympäristöön liittyvät oireilut voitaisiin selittää ja miten potilaiden tuntemuksia tulisi lääketieteellisesti diagnosoida ja potilaita sen jälkeen hoitaa. Tieto on koottu internetsivuille: <http://stm.fi/ymparistoherkkyydet>.

SOTERKO-yhteistyön aikana suomalaiseen ICD-10-tautiluokitukseen on vuoden 2015 alusta lisätty ympäristöliherkkyyteen liittyvä nimike:

- *R68.81: Jatkuva tai toistuva poikkeuksellinen herkkyys ympäristön tavanomaisille tekijöille.*

Nimikkeen tarkoitus on selkeyttää ympäristöherkkyyden määrittelyä, edistää ympäristöherkkyyden esiintyvyyden seuranta ja tutkimusta, sekä mahdollistaa terveydenhuollon ohjeistamisen sairastuneiden tunnistamiseksi, kohtaamiseksi ja tukemiseksi.

Ympäristöherkkyydellä tarkoitetaan tilaa, jossa henkilö saa merkittävää toiminnallista haittaa tai elämäntavan rajoittumista aiheuttavia oireita tiettyssä työ- tai elinympäristössä, vaikka sama ympäristö ei suurimmalle osalle ihmisiä aiheuta oireita. Tila voi liittyä mihin tahansa ympäristötekijään. Tyypillisesti oireilu liittyy aluksi johonkin tiettyyn ympäristötekijään ja laajenee myöhemmin reagoimiseksi yhä useammalle tekijälle. Ympäristöliherkkyys ei tarkoita ympäristötekijöiden aiheuttamia suoria elinvaikutuksia, kuten allergiaa tai ilman epäpuhtauksien ärsytysvaikutuksia limakalvoilla.

Yleisimmät yliherkkyyden muodot ovat tuoksuyliherkkyys, sähköyliherkkyys, sisäilmayliherkkyys, kemikaaliyliherkkyys ja äänyliherkkyys. Uutena yliherkkyyden muotona on havaittu infraäänilyliherkkyys. Viime vuosina on lääkärin vastaanotoille saapunut potilaita, jotka kokevat ympäristöyliherkkyyttä vastaavien oireiden aiheutuvan tuulivoimaloiden infraäänistä.

Ympäristöyliherkkyyden oireet ovat hyvin moninaisia ja yleisluonteisia ja voivat ilmetä esimerkiksi keskittymisvaikeutena, hengenahdistuksena tai vatsakipuna. Oireiden ei ole voitu osoittaa syntyvän altisteiden suorilla fysikaalisilla, kemiallisilla tai biologisilla elinvaikutuksilla, eikä toisaalta potilaalta ole löydetty muuta sairautta, joka selittäisi oireita.

Oireisto selittyy elimistön puolustusjärjestelmien vasteilla keskushermostossa, tahdosta riippumattomassa hermostossa ja immunologisessa järjestelmässä. Vastaavia oireita esiintyy monissa muissakin tiloissa, joissa elimistön hälytysjärjestelmät aktivoituvat. Näyttää siltä, että oireet ovat seurausta biologisten, psykologisten ja sosiaalisten tekijöiden vuorovaikutuksesta.

Nykyinen tutkimustieto ei tue sitä näkemystä, että tuulivoimaloiden infraäänillä olisi terveysvaikutuksia etäisyyksillä, jossa asunnot yleensä sijaitsevat. Ei voida kuitenkaan poissulkea sitä mahdollisuutta, etteivätkö infraäänestä koetut oireet johtuisi infraäänen aiheuttamista biologisista muutoksista kehossa. Tämä on mahdollista joidenkin yksilöiden kohdalla. Tämän vuoksi tuulivoimaloiden terveysvaikutuksia koskevien epidemiologisten tutkimusten tulisi sisältää myös terveydentilaan liittyviä objektiivisia mittauksia. Tällaisia on toistaiseksi tehty ainakin yksi koskien stressiä (Michaud ym. 2016c, luku 5.3).

Sähköyliherkkyydellä tarkoitetaan, että henkilö kokee sähkökenttien aiheuttavan terveyshaittoja. WHO:n mukaan ympäristön sähkömagneettisten kenttien ja väestön oireilun välillä ei kuitenkaan ole yhteyttä. Sähköyliherkän henkilön oirekokeemukset perustuvat nykyäsityksen mukaan nosebovaikutukseen. On mahdollista, että Pierpontin (2009) luoma ”tuuliturbiinisyndrooman” käsite on luonut joukon infraäänilyliherkkiä henkilöitä, joiden terveys kärsii uskomusten, eikä itse infraäänien vuoksi.

6.4 Perusteeton aiheuttajaksi lukeminen

Nosebovaikutus tarjoaa hyvän selitysmallin sille, että akuuttien oireiden voidaan kokea lisääntyvän nopeastikin sen jälkeen, kun väärä tieto tai käsitys tuulivoimaloiden negatiivisista terveysvaikutuksista on omaksuttu. Nosebovaikutus ei kuitenkaan selitä kroonisia oireita.

Knopperin ym. (2014) mukaan stressi on erittäin yleistä ainakin Yhdysvalloissa. Tärkeimmät stressin aiheuttajat ovat raha, työ, perhevastuut, ihmissuhteet, työn pysyvyys, asumiskustannukset, terveyshuolet ja turvallisuus. Stressi aiheuttaa hyvin monenlaisia oireita ja terveysvaikutuksia. Näitä ovat mm. ärsyyntyneisyys, viha, ahdistuneisuus, surullisuus, syyllisyyden tunne, unihaitat, väsymys, keskittymisvaikeudet, päätöksentekovaikeudet, nautinnon ja mielenkiinnon hiipuminen, pahoinvointi, päänsärky ja tinnitus. Oireet ovat lähes samat kuin McMurtryn (2011) ehdottamat kriteerit tuulivoimaloiden haitallisten terveysvaikutusten diagnosoimiseksi. Hänen esittämilleen kriteereille ei kuitenkaan ole riittävää epidemiologista tai lääketieteellistä pohjaa.

Edellisen mukaan osalla väestöstä on todennäköisesti stressiperäisiä oireita jo ennen tuulivoima-alueen suunnittelemista tai rakentamista. Perusteeton aiheuttajaksi lukeminen (*misattribution*) tarkoittaa, että omille oireille pyritään löytämään jokin konkreettinen syy muualta kuin niiden todellisista syistä. Rubinin ym. (2014) mukaan on mahdollista, että oireiden aiheuttajaksi koetaan lähiympäristöön asettunut uusi teknologia, kuten tuulivoima, vaikka todellinen aiheuttaja on jokin muu tekijä, joka on ollut oireiden lisäksi olemassa jo ennen ympäristömuutosta.

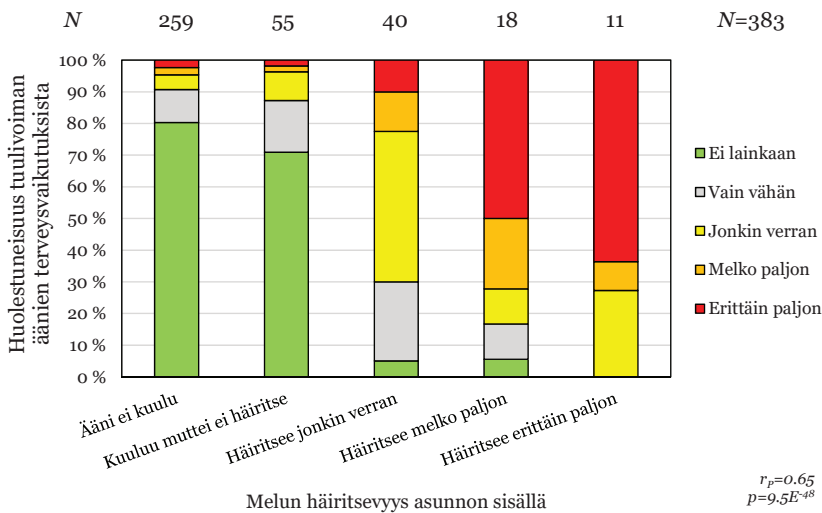
6.5 Huolestuneisuus

Useat tutkimukset ovat havainneet, että ympäristöriskeistä huolestuneet tai ahdistuneet raportoivat todennäköisemmin oireita (Rubin ym. 2014). Useat psykologiset mekanismit voivat selittää tämän.

1. Huolestuneisuuden ja ahdistuneisuuden tunteisiin liittyy usein muutoksia fysiologiassa (syke, ruoansulatuksen toiminta) ja käyttäytymisessä (syömistai nukkumistavat), jotka voivat johtaa fyysisiin oireisiin.

2. Huolestuneisuus tai ahdistuneisuus tiettyä riskiä kohtaan voi aiheuttaa tarkkaavaisuuden kasvua omaa terveydentilaa kohtaan. Tämä voi johtaa sellaisten oireiden havaitsemiseen, joita ei muutoin olisi havaittu.
3. Huolestuneisuus riskistä voi kasvattaa oireiden muistamisen virhettä. Huolestuneisuus ympäristöriskin terveysvaikutuksista voi kasvattaa muistettujen oireiden lukumäärää.
4. Huolestuneisuus riskistä lisää katastrofaalisen eli pahimman mahdollisen vaikutuksen ajattelun riskiä.

Ulkomaista tutkimusta tukee Suomessa tehty tutkimus kolmella tuulivoima-alueella, jonka mukaan melun häiritsevyys oli erittäin voimakkaasti yhteydessä huolestuneisuuteen tuulivoimaloiden äänten terveysvaikutuksista (kuva 6.2). Kaikki vastaajat asuivat alle 2 km päässä tuulivoimaloista. Vastaajista 29 (8 %) koki melun häiritsevän melko paljon tai erittäin paljon. Heistä 21 (72 %) koki melko tai erittäin paljon huolta tuulivoimaloiden äänten terveysvaikutuksista. Huolestuneisuus oli yhteydessä myös mallinnettuun äänenpainetasoon ($R_p=0.24$, $p=3.0E-6$), mutta selvästi heikommin kuin melun häiritsevyyteen ($R_p=0.65$, $p=9.5E-48$). R_p on Pearsonin korrelaatiokerroin. Jos sen itseisarvo on lähellä ykköstä, yhteys muuttujien välillä on voimakas. Yhteyden tilastollisesta merkittävyydestä kertoo p-arvo, jonka tulee olla alle 0.01, jotta yhteys olisi tilastollisesti merkitsevä.



Kuva 6.2. Melun häiritsevyyden ja huolestuneisuuden välinen yhteys suomalaisessa tutkimuksessa.

6.6 Melun häiritsevyys

Pedersen (2011) toteutti meta-analyysin kolmesta epidemiologisesta poikkileikkaus-tutkimuksesta, johon osallistui 1725 vastaajaa. Näistä kaksi oli toteutettu Ruotsissa ja yksi Alankomaissa. Hän havaitsi, että melun häiritsevyys sisätiloissa oli voimakkaasti yhteydessä terveysoireisiin logistisessa regressiomallissa, joka huomioi myös iän ja sukupuolen ja A-äänitason vaikutukset. Yhteys havaittiin unen häiriintymisen osalta kaikissa kolmessa tutkimuksessa. Yksittäisissä tutkimuksissa kolmesta havaittiin yhteys päänsärkyyn, kohtuuttomaan väsymykseen, jännittyneisyyteen ja stressiin sekä ärsyyntyneisyyteen.

Melun häiritsevyys ulkona oli vielä voimakkaammin yhteydessä terveysoireisiin. Yhteys havaittiin unen häiriintymisen, jännittyneisyyden ja stressin sekä ärsyyntyneisyyden osalta kaikissa kolmessa tutkimuksessa. Yhteys havaittiin päänsärkyyn kahdessa ja kohtuuttomaan väsymykseen yhdessä tutkimuksessa kolmesta.

Edellä kuvattujen yhteyksien syy-seuraussuhdetta, eli aiheuttajaa, ei voida tutkimuksen perusteella esittää. Pedersen (2011) selitti havaintoa kognitiivisen stressiteorian avulla. Sen mukaan yksilö arvioi ympäristökuormitusta, kuten melua ja sen lähdettä (tai maisemahaitan aiheuttajaa), sen hyödyn mukaan, ja käyttäytyy sen mukaisesti. Jo valmiiksi rasittuneessa tilassa oleva yksilö mahdollisesti arvioi melun ylimääräisenä uhkana omalle psykofysiologiselle palautumiselleen. Yksilö ei voi kontrolloida tuulivoimaloiden melua, jolloin raportoidaan melusta häiriintymistä. Unen häiriintyminen voi lisätä entisestään tunnetta siitä, että tuulivoimaloiden melu on uhkatekijä.

Pedersenin (2011) tulos on yksi harvoista tutkimuksista, joissa on voitu esittää tutkimusaineiston perusteella hypoteesi terveysoireiden aiheuttajalle, vaikka syy-seuraussuhde jää epäselväksi. Tulosta on tulkittu useissa review-artikkeleissa niin, että melun häiritsevyys voisi olla keskeinen terveysoireita laukaiseva tekijä (Rubin ym. 2014, Schmidt & Klokker, 2014).

6.7 Persoonallisuustekijät

Taylor ym. (2013) tutkivat Englannissa sitä, miten ”tuuliturbiinisyndrooman” (luku 5.6) mukaisten epäspesifien oireiden voimakkuus riippuu tuulivoimalamelun äänenpainetasosta ja tietyistä persoonallisuuspiirteistä. Tutkimukseen vastasi 138 henkilöä.

Tuulivoimalamelun äänenpainetaso L_{Aeq} [dB] ei ollut yhteydessä oireiden voimakkuuteen. Sen sijaan havaittiin, että oireiden määrä oli yhteydessä negatiivisiin persoonallisuuspiirteisiin (*negatively oriented personality traits*). Oireiden määrä oli suurempi henkilöillä, joilla oli

- korkeampi neuroottisuus (*neurotism*),
- suurempi taipumus reagoida negatiivisin tuntein (*negative affectivity*), ja
- alhaisempi turhautumisen sietokyky (*frustration intolerance*).

Tutkimuksen vastausprosentti oli 11, joten löydökseen liittyy epävarmuuksia. Tarvittaisiin lisätutkimusta, jotta voitaisiin saada varmempi kuva, onko tietty persoonallisuuspiirre riskitekijä oireiden esiintyvyydelle asuinympäristöissä.

6.8 Median ja internetin antama kuva

Media johtaa suurta yleisöä valitettavan usein harhaan, kun se raportoi infraääniä koskevista tutkimuksista tai asukaskokemuksista. Väärä tieto johtaa usein tarpeetomiin pelkoihin ja ahdistuneisuuteen suuren yleisön keskuudessa. Mm. Broner (1978), Leventhall (2006, 2007, 2009) ja Deignan ym. (2013) ovat käsitelleet infraääniin liittyvää harhaanjohtavaa media uutisointia.

Chapman (2014) selvitti Australiassa tuulivoimavastustajien levittämää väitettä siitä, että 40 perhettä on hylännyt kotinsa tuulivoima-alueen aiheuttamien haittojen vuoksi. Selvityksessä hyödynnettiin useita riippumattomia lähteitä. Selvityksen perusteella tunnistettiin 12 perhettä, jotka olivat jättäneet kotinsa pysyvästi tai ajoitain. Yhtään taloa ei ollut kuitenkaan hylätty ilman myyntiä. Tuulivoimavastustajien levittämään tietoon Australiassa liittyy tutkimuksen perusteella epävarmuuksia. Kotien massahylkäämisistä on kuitenkin tullut Australiassa ”faktoidi” eli faktalta kuulostava näennäistotuus, jolla voidaan luoda nosebovaikutuksia.

Schmidtin ja Klokkerin (2014) mukaan toimittajat (media) sortuvat usein käyttämään tuulivoiman yhteydessä termejä, jotka voivat lisätä huolestuneisuutta ja terveysoireiden kokemista. Lisäksi kirjoitukset sisältävät usein virheellistä tietoa, jota tutkimus ei tue. Tuulivoima kuvataan usein mediassa uhkana ja korostetaan tutkimustiedon puuttumista, vaikka todellisuus on päinvastainen.

Luotettavan tiedon vähyden, vaikealukuisuuden ja vaikean saatavuuden vuoksi kansalaisten on vaikea sanoa, mikä tieto on varmaa ja mikä ei. Osittain vääää tietoa tuulivoimaloiden terveysvaikutuksista tarjoaa Suomessa ainakin Tuulivoimakansalaisyhdistys ry. (TVKY, 2016) ja yhdistyksen infraääniraportti (TVKY, 2015). Luotettavaa ja tutkimukseen perustuvaa tietoa puolestaan tarjoavat suomenkielisenä mm. Turunen ja Lanki (2015) sekä Turunen ym. (2016).

Knopper ja Ollson (2011) toteavat, että tuulivoiman terveysvaikutuksista kiinnostuneet tahot ovat kiinnostuneet joko tieteellisistä vertaisarvioituista tutkimuksista tai populaareista julkaisuista, joita on tarjolla internetissä ja mediassa. Kansalaiset kääntyvät todennäköisimmin jälkimmäisten julkaistujen puoleen, koska niitä on ilmaiseksi tarjolla. Usein nämä julkaisut sisältävät tietoa koetuista terveysvaikutuksista, joihin perehtymällä oireita kokeva lukija voi kokea oiretuntemustensa lähteen varmistuvan tuulivoimaloihin. Populaareja julkaisuja ei kuitenkaan voida pitää tieteellisinä tutkimuksina.

6.9 Amplitudimodulaatio

Tuulivoimalamelun lapojen jättöreunan aiheuttama ääni (swish) on amplitudimoduloivaa eli jaksollisesti sykkivää. Sykinnän eli äänenvoimakkuuden vaihtelun taajuus on noin 0,65 Hz eli se toistuu noin 1,5 sekunnin välein (13 kierrosta minuutissa), eli joka kerta, kun voimalan lapa liikkuu alaspäin. Amplitudimodulaatiosta aiheutuva A-painotetun äänenpainetasen vaihtelu (maksimi- ja minimiäänitason erotus) on Japanissa tehdyn laajan pitkäaikaistutkimuksen (Fukushima ym. 2013) mukaan 3 % ajasta yli 4 dB (voimakas amplitudimodulaatio), 19 % ajasta 3–4 dB, 54 % ajasta 2–3 dB ja 20 % ajasta alle 2 dB (heikko amplitudimodulaatio).

Leventhallin (2006) ja Jakobsenin (2012) mukaan tuulivoimaloiden amplitudimodulaatio käsitetään virheellisesti infraäänen lähteeksi, koska sykinnän taajuus (0,65 Hz) on infraäänien taajuudella.

Laboratoriotutkimukset ovat osoittaneet, että amplitudimoduloitunut tuulivoimalan ääni on häiritsevämpää kuin tasainen ääni, jossa ei esiinny amplitudimodulaatiota (Lee ym. 2011; Schäffer ym. 2016). Lisäksi tuulivoimaloiden jaksollisesti sykkivä ääni erottuu muusta taustamelusta helpommin kuin muut äänet nimenomaan amplitudimodulaation vuoksi (Van Renterghem ym. 2013). Tämä voi selittää, miksi tuulivoimalamelu voidaan kokea häiritseväksi pienelläkin äänenpainetasolla.

6.10 Herkistyminen

Walford (1983) vertasi pientaajuisesta melusta valittaneiden kuulokykyä väestön normaaliin kuulokykyyn. Näissä ei havaittu eroja. Tämän vuoksi on esitetty arvio, että pientaajuisesta melusta valittaneet voivat olla herkistyneitä kyseisen äänen havaitsemiselle (Leventhall, 2009).

Korvassa tapahtuva hyvin hiljaisen äänen rekisteröinti (*detection*) ei aina johda äänen tiedostettuun havaitsemiseen (*perception*), koska se vaatii korvassa tapahtuneen rekisteröinnin prosessointia aivoissa. Leventhallin (2009) mukaan on mahdollista, että pitkäaikainen altistuminen melulle etenkin yöaikaan voi johtaa herkistyneeseen äänen tiedostettuun havaitsemiskykyyn. Tämä tarkoittaa sitä, että herkistyneen yksilön aivot kykenevät havaitsemaan kyseisen äänilajin paremmin kuin väestö keskimäärin, vaikka kuulokynnys ei sinänsä olisi väestön keskiarvoa parempi. Tuulivoimaloiden ääni on luonteeltaan amplitudimoduloitunutta, joten se on helpompi havaita kuin tasainen ääni. Tällöin havaitsemisesta voi seurata suoraan voimakas häiritsevyys eli ero havaitsemiskyvyn ja häiritsevyysreaktion välillä on olematon.

Tietylelle melulajille herkistyneet henkilöt voivat myös kokea aidolta tuntuvia äänihavaintoja ilman, että kyseistä ääntä kyseisellä hetkellä mittausten perusteella esiintyi (Leventhall, 2009). Selityksenä ristiriidalle voi olla tinnitus (korvien soiminen), elimistön aiheuttama äänikokemus tai mittaustavan riittämätön kyky havaita äänilähdettä taustamelusta.

Riippumatta siitä, onko ääni todellinen vai elimistön aiheuttama, seurauksena voi joka tapauksessa olla melun häiritsevyys. Melun häiritsevyydestä voi seurata unen häiriintyminen ja pitkällä aikavälillä vakavampia terveysvaikutuksia, joita on käsitelty edellä.

7 Infraäänten mittaustulokset

7.1 Tavoite

Tavoitteena oli selvittää akustisilla mittauksilla tuulivoimaloiden aiheuttamien infraäänen äänenpainetasojen [dB] suhdetta arkielämässä yleisesti esiintyvien infraäänten tasoihin taajuusalueella 0,4–20.000 Hz. Mittaukset ovat ainutlaatuisia, koska yleensä mittaukset tehdään vain taajuusalueella 20–20.000 Hz.

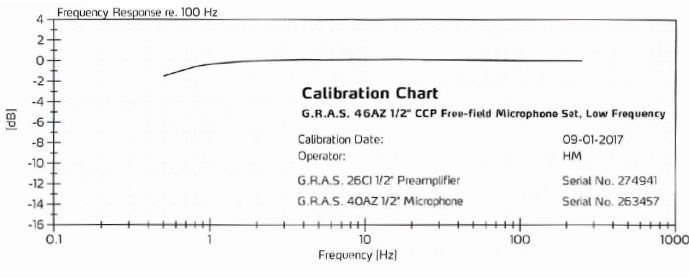
7.2 Menetelmät

Mittaus tehtiin mahdollisuuksien mukaan kahteen kertaan (A ja B), jotta analyysi olisi luotettava. Kummassakin tapauksessa mittausanturina käytettiin infraäänten mittaukseen tarkoitettua mikrofonia (GRAS 46 AZ).

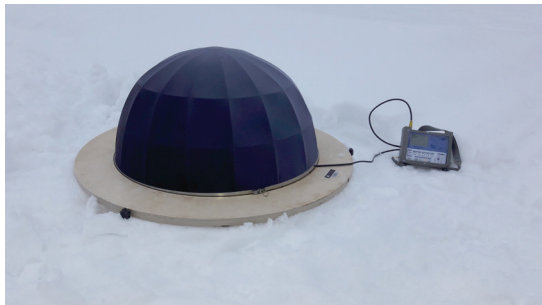
- A. Mittaus: Mikrofoni oli kytketty äänitasomittariin (Norsonic Nor150), joka teki suoraan taajuusanalyysin mittausjaksosta. Järjestelmä kalibroitiin ennen mittausta vakioäänilähteellä (B&K 4231).
- B. Nauhoitus: Mikrofoni kytkettiin signaalitallentimeen (RION DA-21). Nauhoitettu signaali analysoitiin jälkikäteen äänitasomittarilla (Norsonic Nor150)

Mikrofonin taajuusvaste on esitetty kuvassa 7.1. Mittaukset, nauhoitukset ja analyysit tehtiin taajuusalueella 0,4–20.000 Hz.

Mittaukset tehtiin käyttäen halkaisijaltaan 65 tai 90 mm olevaa tuulisuojaa. Mikrofonin sijainti 1.5 m korkeudella eli oleskelukorkeudella. Tuulivoima-alueella tehdyssä mittauksessa tuuli oli kohtalaista. Silloin mikrofoni sijoitettiin maahan ja käytettiin kaksinkertaista tuulisuojaa. Valokuvat näistä kahdesta eri mittaustavasta on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.1. Mikrofonin ja esivahvistimen taajuusvaste pientaajuuksilla.



Kuva 7.2. Tuulivoiman mittaus sisätilassa (piste 11) ja ulkona (piste 16).

Mittaus A kesti 30 sekuntia. Nauhoitus B kesti vähintään 60 sekuntia. Nauhoitusta äänisignaalista valittiin ajanjakso, jossa ei havaittu häiriöitä (linnunlaulu tms.). Analyysi tehtiin vähintään 30 sekunnin ajalta. Menetelmät A ja B tuottivat yleensä täsmälleen saman tuloksen.

Mittaustuloksista raportoidaan painottoman äänenpainetaso, L_{Zeq} , A-painotettu äänenpainetaso L_{Aeq} , ja C-painotettu äänenpainetaso, L_{Ceq} , joissa huomioidaan äänen taajuudet 20–20.000 Hz. Tämän lisäksi laskettiin $L_{Aeq,10-160}$, joka ilmaisee taajuusalueen 10-160 Hz A-painotetun äänenpainetason. Esimerkiksi Tanskassa $L_{Aeq,10-160}$ ei saa sisätiloissa ylittää arvoa 20 dB.

7.3 Mittauskohteet

Mittauskohteet valittiin siten, että saataisiin nykyistä parempi käsitys siitä, minkälaisia infraäänien tasoja elinympäristöissä vallitsee. Tämän lisäksi tehtiin kaksi mitausta tuulivoima-alueilla. Mittauskohteet on kuvattu taulukossa 7.1.

Mittapisteet 10 ja 15 sisältävät tuulivoimaloiden ääntä. Muut mittapisteet sijaitsevat vähintään 40 km päässä tuulivoimaloista, joten niissä mitattu ääni ei ole peräisin tuulivoima-alueilta.

Mittaus 10 on muita pidempi, tunnin mittainen. Mittaus on tehty kellonajalla 06-07. Mittaus 15 on niin ikään muita pidempi, 30 minuutin mittainen.

7.4 Mittaustulokset ja niiden tulkinta

Mittaustulokset on esitetty kuvassa 7.3 ja taulukossa 7.2. Tuulivoimaloita koskevat mittaustulokset nähdään ryhmissä A ja B paksulla punaisella viivalla.

Ryhmä A: Asunnon sisätilat

Tuulivoima-alueen lähellä tehdyssä mittauksessa (piste 10) on hiljaisempaa (piste 10: $L_{Aeq}=18$ dB) kuin muissa pisteissä, joissa on hiljaista (piste 8: 28 dB; piste 9: 24 dB). Infraäänien äänenpainetaso on pisteessä 10 samaa luokkaa kuin pisteissä 8 ja 9. Voimakkainta infraääntä havaittiin ovien avauksen ja sulkemisen aiheuttaman ilmanpaineen vaihtelun (piste 1) ja pesukoneen linkouksen aiheuttaman lattian runkovärähtelyn (piste 2) aikana. Linkouksen ääni saavutti jopa kuulokynnyksen äänenpainetason taajuudella 16 Hz.

Ryhmä B: Pihamaat ja ulkoalueet

Tuulivoima-alueen läheisyydessä (piste 15) mitattu infraäänen äänenpainetaso ei merkittävästi poikkea pihamailla tai muilla ulkoalueilla mitatuista äänenpainetasoista. Infraäänen äänenpainetaso ei missään tilanteessa ylitä kuulokynnystä.

Ryhmä C: Luontoympäristöt

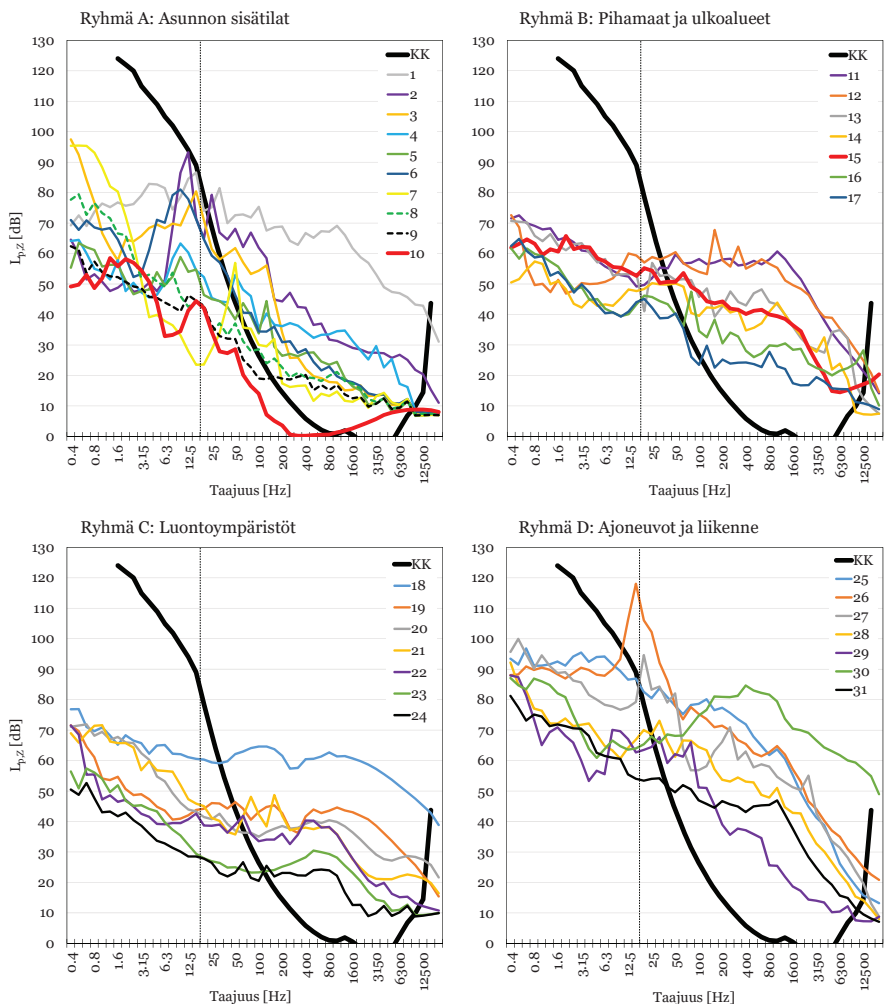
Luonnossa mitatut infraäänen äänenpainetasot eivät merkittävästi poikkea tuulivoima-alueen lähellä (piste 15) mitatuista arvoista. Infraäänen äänenpainetaso ei missään tilanteessa ylitä kuulokynnystä.

Ryhmä D: Ajoneuvot ja liikenne

Ajoneuvoissa ja liikenteessä mitatut infraäänen äänenpainetasot ovat selvästi voimakkaampia kuin tuulivoima-alueen lähellä (piste 15) mitattu arvo. Kuulokynnyksen ylittävää infraääntä mitattiin ajoneuvossa (pisteet 25 ja 26). Ruotsinlaivan yläkannella infraäänen äänenpainetaso on kuulokynnyksen tuntumassa (piste 27). Selkeästi voimakkainta infraääntä mitattiin henkilöauton sisällä, kun nopeus oli 100 km/h ja takaikkuna oli avoinna (piste 26: 16 Hz ja 118 dB).

Taulukko 7.1. Mittauspisteiden kuvaus.

Piste	Ryhmä	Kuvaus
1	A	Oven avaus ja sulkeminen, kolahdusääni mukana.
2	A	Pesukoneen linkous 1000 rpm puutalon puuvälipohjalla. Mittaus alakerran asuinhuoneessa.
3	A	Kävely puutalon puulattialla. Mittaus alapuoleisessa keittiössä.
4	A	Vesikiertoisen lämmityksen ääni pattereista. Mittaus pannuhuoneen viereisessä huoneessa.
5	A	Tieliikenteen ääni puutalon sisällä.
6	A	Kävely puulattialla. Alakerran olohuone.
7	A	Maalämpöpumpun käynti. Mittaus pannuhuoneen viereisessä huoneessa (vrt. 4).
8	A	Taustamelutaso puutalon olohuoneessa.
9	A	Taustamelutaso puutalon keittiössä (vrt. 3).
10	A	Asunnon sisällä yöllä. Tuulivoima-alue 1,7 km päässä. Tuotantoteho 19,3 MW (maksimi 26,4 MW).
11	B	Tieliikenteen ääni vilkkaan kadun varrella.
12	B	Oppilaitoksen poistoilmahuone. Mittaus pihamaalla.
13	B	Kerrostalon pihamaa lähiöalueella. Mäntämoottorivoimalaitos (16 MW) 35 m päässä.
14	B	Tieliikenteen ääni asunnon pihamaalla.
15	B	Tuulivoima-alueella 0,4 km tuulivoimalasta. Sähkötuototeho maksimissa (3,3 MW).
16	B	Lentokoneen ääni asunnon pihamaalla.
17	B	Asunnon pihamaa, hiljainen kaupunginosa.
18	C	Hallistenkoski. Kohtalainen veden virtaus.
19	C	Vähäjoki. Vähäisempi veden virtaus.
20	C	Kansallispuisto. Puuston humina.
21	C	Kansallispuisto. Tieliikenteen ääni 1,5 km 2-tieltä.
22	C	Kansallispuisto. Parkkipaikalla. Tieliikenneääni.
23	C	Kansallispuisto. Yöllä. Ei tuule.
24	C	Kansallispuisto. Ei tuule.
25	D	Henkilöauton sisällä (Kia Ceed). 100 km/h. Ikkunat kiinni.
26	D	Henkilöauton sisällä (Kia Ceed). 100 km/h. Takaikkuna auki.
27	D	Ruotsinlaivan yläkannella ulkona. Tuulensuojassa.
28	D	Ruotsinlaivan aulassa. 3. kansi.
29	D	Ruotsinlaivan hytissä. 7. kansi. Sängyn tyynyn luona.
30	D	Teräsrakenteisen rautatiesillan alla. Junan ohiajo 60 km/h.
31	D	Teräsrakenteisen rautatiesillan alla. Ei junaa.



Kuva 7.3. Painottomaton äänenpainetaso taajuuksilla 0,4–20.000 Hz taulukon 7.1 mit-
tapisteissä 1–31. KK on kuulokynnyksi eli alin ihmisen havaitsema äänenpainetaso.

Taulukko 7.2. Mittaustulokset eri taajuuspainotuksilla [dB].

Piste	L_{Aeq}	L_{Ceq}	L_{Ceq} - L_{Aeq}	L_{Aeq,10-160}	L_{Zeq}	L_{Geq}
1	74.8	85.0	10.2	60.3	93.2	95.9
2	50.8	83.4	32.6	49.1	94.3	97.8
3	43.0	74.0	30.9	42.9	100.1	89.3
4	42.8	57.6	14.8	30.4	70.6	69.2
5	33.7	53.2	19.5	29.4	72.3	65.7
6	33.1	71.5	38.5	28.2	86.3	86.2
7	28.5	55.7	27.2	27.9	70.5	53.2
8	27.9	44.8	17.0	16.5	89.0	57.2
9	24.3	42.8	18.5	10.6	74.4	56.7
10	17.6	40.5	22.9	3.7	48.1	55.4
11	66.1	69.9	3.8	46.8	81.9	64.2
12	64.3	71.6	7.3	54.5	90.3	71.5
13	52.1	60.8	8.7	35.9	63.7	65.6
14	48.6	57.0	8.3	32.3	67.2	61.5
15	48.2	59.8	11.5	35.6	63.6	67.6
16	39.4	51.4	12.0	28.6	72.7	57.8
17	32.5	46.4	13.9	17.7	75.0	57.0
18	70.9	74.7	3.9	53.7	87.2	73.8
19	52.8	56.4	3.6	34.4	70.0	57.2
20	47.7	51.7	4.0	26.6	83.9	57.3
21	44.8	54.4	9.7	36.2	81.3	60.5
22	44.3	49.8	5.6	24.4	64.8	53.6
23	35.9	39.5	3.6	13.5	67.7	44.1
24	29.6	35.7	6.1	12.9	62.3	41.5
25	75.6	89.8	14.3	67.9	106.2	99.0
26	72.6	110.2	37.6	66.7	118.9	126.3
27	67.6	90.6	23.0	55.7	104.9	103.9
28	58.7	75.4	16.7	51.9	96.7	81.6
29	46.1	70.9	24.8	45.4	95.8	78.1
30	88.2	92.0	3.8	68.7	96.8	78.5
31	52.4	61.0	8.6	36.1	91.6	68.5

kemuksia muihin melulajeihin käyttäen samoja kyselytutkimusmenetelmiä. Tällainen tutkimus on paraikaa käynnissä Turun ammattikorkeakoulun vetämässä Anojanssi-projektissa. Tuloksia saadaan vuoden 2018 lopussa.

9 Johtopäätökset

Alan vertaisarvioitu tiedekirjallisuus ei puolla sitä näkemystä, että tuulivoimat tai tuulivoimaloiden aiheuttama infraääni, aiheuttaisivat asukkaille terveyshaittoja. Tutkimustiedon valossa keskeisin asukkaiden raportoimien terveysoireiden kanssa yhteydessä oleva tekijä on melun häiritsevyys: oireita paljon raportoivat kokevat yleensä myös melun häiritseväksi, riippumatta etäisyydestä voimaloihin. Tästä johtuen meluntorjunta näyttäytyy järkevimältä negatiivisten terveysvaikutusten vähentämiskeinolta. Suomessa tuulivoimalamelun ohjearvoja on tiukennettu vuonna 2015, ja tällä on luultavasti melun häiritsevyyttä vähentävä vaikutus.

Tutkimusta tuulivoimaloiden terveysvaikutuksista on tehty toistaiseksi melko vähän ja lähes kaikissa tutkimuksissa on sovellettu erilaisia menetelmiä. Tutkimusta tarvitaan tästä johtuen lisää.

Kentällä tehdyt akustiset mittaukset osoittivat, että tuulivoima-alueiden lähellä mitattu infraäänien äänenpainetaso ei merkittävästi poikkea siitä, mitä mitattiin erilaisissa elinympäristöissä kaukana tuulivoima-alueista. Tulokset ovat linjassa aiempien tutkimusten kanssa.

Pientaajuisen melun tutkimuksen uranuurtajan (Leventhall, 2007) mukaan nykyinen infraäänien (taajuudet alle 20 Hz) käsite tulisi kokonaan poistaa siihen liittyvän turhan mystiikan vuoksi. Infraäänien mielletään suuren yleisön parissa poikkeukselliseksi ääni-ilmiöksi, jota ei voi kuulla, vaikka infraäänien todistettavasti ovat kuuluvissa, kunhan niiden äänenpainetaso ylittää kuulokynnyksen. Tuulivoimaloiden infraäänien ja etenkin niihin liittyvä epävarmuutta lisäävä keskustelu aiheuttavat ihmisissä turhia pelkoja riippumatta siitä mikä infraäänien äänenpainetaso on. Infraäänien terveysvaikutuksiin pätevät kuitenkin desibeleinä ilmoitettavat kynnyksarvot samoin kuin tavanomaisiinkin ääniin. Infraääniä koskevia ohjearvoja ei ole esitetty lainsäädännössä, koska infraäänien taso on yleensä hyvin alhainen eikä infraäänillä ole havaittu terveysvaikutuksia kuin hyvin voimakkailla tasoilla (yli 130 dB). Keskeisin infraäänien terveysvaikutus on häiritsevyys kuten tavanomaisillakin äänillä.

Infraääni (alle 20 Hz) on ääntä siinä missä yli 20 Hz taajuinen äänikin. Taajuuden 20 Hz kohdalla ei ole käänteentekevää rajaa, jonka alapuolisilla taajuuksilla äänen

fysikaalinen luonne tai aistimismekanismi olisivat erilaisia kuin taajuuden yläpuolella. Myös meidän näkemyksemme on, että tulisi luopua erillisestä infraäänien käsitteestä ja puhua tarvittaessa pientaajuisesta äänestä. Tämä laajempi käsite kattaa jo nyt monessa kirjallisuustutkimuksessa taajuudet 0–200 Hz.

Lähteet

Alves-Pereira, M., Castelo Branco, N.A.A. (2007). In-home wind turbine noise is conducive to vibroacoustic disease. Wind Turbine Noise Conference, Lyon, France, Sept 20-21.

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. Publ. Health* 3 Article 31. doi: 10.3389/fpubh.2015.00031.

Berglund, B., Hassmén, P. (1996). Sources and effects of low-frequency noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 99(5) 2985 - 3002.

Bolin, K., Bluhm, G., Eriksson, G., Nilsson, M.E. (2011). Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environ. Res. Lett.* 6 035103 6pp. doi:10.1088/1748-9326/6/3/035103.

Botha, P. (2013). Ground Vibration, Infrasound and Low Frequency Noise measurements from a modern wind turbine. *Acta. Acust. united Ac.* 99 537-544.

Broner, N. (1978). The effects of low frequency noise on people - A review. *J. Sound Vib.* 58(4) 483-500.

Castelo Branco, N.A., Rodriguez, E., Alves-Pereira, M., Jones, D.R. (1999). Vibroacoustic disease: some forensic aspects. *Aviat. Space Environ. Med.* 70(3 Pt 2):A145-51.

Chapman, S. (2014). Factoid forensics: Have "more than 40" Australian families abandoned their homes because of wind farm noise? *Noise & Health* 16(71) 208-212.

Chapman, S., St George, A. (2013). How the factoid of wind turbines causing 'vibroacoustic disease' came to be 'irrefutably demonstrated'. *Austr. New Zeal. J Publ. Health* 37(3) 244-249.

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. Publ. Health* 2 Article 220 8 pp. doi: 10.3389/fpubh.2014.00220.

Crichton, F., Dodd, G., Schmid, G., Gamble, G., Petrie, K.J. (2014b). Can Expectations Produce Symptoms From Infrasound Associated With Wind Turbines? *Heath Psychol.* 33(4) 360-364.

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

Crichton, F., Petrie, K. J. (2015a). Health complaints and wind turbines: The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting. *Environ. Res.* 140 449-455.

Crichton, F. Petrie K. J. (2015b). Accentuate the positive: Counteracting psychogenic responses to media health messages in the age of the Internet. *J. Psychosom. Res.* 79 185-189.

Crichton, F., Dodd, G., Schmid, G., Petrie, K.J. (2015). Framing sound: Using expectations to reduce environmental noise annoyance. *Environ. Res.* 142 609-614.

Danielsson, Å., Landström, U. (1985). Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. *Acta Med. Scand.* 217 531-535.

Deignan, B., Harvey, E., Hoffman-Goetz, L. (2013). Fright factors about wind turbines and health in Ontario newspapers before and after the Green Energy Act. *Health. Risk Soc.* 15(3) 234-250.

Dommes, E., Bauknecht, H.C., Scholz, G., Rothemund, Y., Hensel, J., Klingebiel, R. (2009). Auditory cortex stimulation by low-frequency tones - An fMRI study. *Brain Res.* 1304 129-137.

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. *Environ. Res.* 142 227-238.

Fukushima, A., Yamamoto, K., Uchida, H., Sueoka, S., Kobayashi, T., Tachibana, H. (2013). Study on the amplitude modulation of wind turbine noise: Part 1 - Physical investigation. *Proc. Internoise 2013*, 15-18 September, Innsbruck, Austria.

Hansen, K.L., Hansen, C.H., Zajamšek, B. (2015). Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. *Build. Environ.* 94 764-772.

Heinonen-Guzejev, M., Jauhiainen, T., Sala, E., Ström, U., Vuorinen, H.S. (2012). Melulla on monia vaikutuksia terveyteen. *Suomen Lääkärilehti* 36 vsk 67 2445-2450.

Hoffmeyer, D., Jakobsen, J. (2010). Sound insulation of dwellings at low frequencies. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 29(1) 15-34.

Hongisto, V. (2014). Tuulivoimalamelun terveysvaikutukset. 64 s., Työterveyslaitos, Helsinki.

Hongisto, V., Suokas, M., Varjo, J., Yli-Kätkä, V.-M. (2015). Tuulivoimalamelun häiritsevyys kahdella tuulivoima-alueella. Ympäristö ja Terveys -lehti, 6 54-59.

Hongisto, V. (2017). Miten ympäristömelua pitäisi mitata, jotta tulos edustaisi koettua häiritsevyyttä? Ympäristö ja Terveys -lehti, 2 6-12.

Hongisto, V., Keränen, J., Oliva, D. (2017). Indoor noise annoyance due to 3-5 MW wind turbines - an exposure-response relationship, *J. Acoust. Soc. Am.* 142(4) 2185-2196. Open access at: <http://dx.doi.org/10.1121/1.5006903>.

HPA (2010) Health effects of exposure to ultrasound and infrasound. Report of the independent advisory group on non-ionising radiation. RCE-14. Document of the Health Protection Agency: Radiation, Chemical and Environmental Hazards, 194 pp., London, UK.

Hubbard, H.H., Grosveld, F.W., Shepherd, K.P. (1983). Noise characteristics of large wind turbine generators. *Noise Con. Eng. J.* 21(1) 21-29.

Hubbard, H.H., Shepherd, K.P. (1991). Aeroacoustics of large wind turbines. *J. Acoust. Soc. Am.* 89(6) 2495-2508.

IEC 61400-11 Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

ISO 7029 (2017) Acoustics. Statistical distribution of hearing thresholds related to age and gender. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 7196 (1995) Acoustics - Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 226 (2003) Acoustics – Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jakobsen, J. (2005). "Infrasound emission from wind turbines," *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 24(3) 145-155.

Jakobsen, J. (2012). Danish regulation of low frequency noise from wind turbines. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 31(4) 239-246.

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(6), 3746-3753.

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. Kor. Phys. Soc.* 53(4) 1897-1905.

Keränen, J., Hongisto, V., Hakala, J. (2017). Julkisivurakenteiden ääneneristävyys pienillä taajuuksilla. *Akustiikkapäivät 2017*, 24 - 25.8.2017, Akustinen Seura ry, Espoo.

Knopper, L.D., Ollson, C. A. (2011). Health effects and wind turbines: A review of the literature. *Environ. Health* 10:78.

Knopper, L.D., Ollson, C. A., McCallum, L. C., Whitfield Aslund M.L. Berger R. G., Souweine, K., McDaniel, M. (2014). Wind turbines and human health. *Front. Publ. Health* 2 Article 63.

Kroenke, K. (2003). Patients presenting with somatic complaints: epidemiology, psychiatric co-morbidity and management. *Int. J. Meth. Psychiatr. Res.* 12 (1) 34-43.

Kuwano, S., Yano, T., Kageyama, T., Sueoka, S., Tachibana, H. (2014). Social survey on wind turbine noise in Japan. *Noise Con. Eng. J.* 62(6), 503-520.

Landström, U., Lundström, R., Byström, M. (1983). Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 2 (1) 1-11.

Lee, S., Kim, K., Choi, W., Lee, S. (2011). Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise, *Noise Con. Eng. J.* 59 38-46.

Leventhall, G. (2003). A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. Report for DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs), London, UK.

Leventhall, G. (2006). Infrasound from wind turbines - Fact, fiction or deception. *Can. Acoust.* 23(2) 29-36.

Leventhall, G. (2007). What is infrasound? *Biophys. Molec. Biol.* 93 130-137.

Leventhall, G. (2009). Review: Low Frequency Noise. What we know, what we do not know, and what we would like to know. *Noise Notes* 8 (4) 3-28. (Also in: *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 28(2) 2009 79 - 104)

McMurtry, R.Y. (2011). Toward a case definition of adverse health effects in the environs of industrial wind turbines: Facilitating a Clinical Diagnosis. *Bull. Sci. Tech. Soc.* 31(4) 316-320.

Michaud, D.S., Feder, K., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Denning, A., McGuire, D., Bowe, T., Lavigne, E., Murray, B.J., Weiss, S.K., van den Berg, F. (2016a). Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *J. Acoust. Soc. Am.* 139(3) 1443-1454.

Michaud, D.S., Keith, S.E., Feder, K., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Bower, T., Denning, A., Lavigne, E., Whelan, C., Janssen, S.A., Leroux, T., van den Berg, F. (2016b). Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. *J. Acoust. Soc. Am.* 139(3) 1455-1466.

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. (2016c). Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 139(3) 1467-1479.

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

Mohr, G.C., Cole, J.N., Guild, E., von Gierke, H. E. (1965). Effects of low frequency and infrasonic noise on man. *Aerospace Med.* 36(9) 1965 817-824.

Moorhouse, A., Waddington, D., Adams, M. (2011). Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance. Prepared for DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, UK), Revision 1, December 2011, Contract no NANR45, University of Salford, Manchester, UK.

Møller, H., Andresen, J. (1984). Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies. *J. Low Freq. Noise Vib.* 3(2) 78-87.

Møller, H. (1987). Annoyance of audible infrasound. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 6(1) 1-17.

Møller, M., Pedersen, C.S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health* 6 (23) 37-57.

Møller, M., Pedersen, C.S. (2011). Low frequency noise from large wind turbines. *J. Acoust. Soc. Am.* 129 3727-44.

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 6066-6083.

Nissenbaum, M.A., Aramini, J.J., Hanning, C.D. (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise & Health* 14(60) 237-243.

- O'Neal, R. D., Hellweg, R.D., Lampeter, R.M. (2011). Low frequency noise and infrasound from wind turbines. *Noise Con. Eng. J.* 59(2) 135-157.
- 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 1-9.
- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Zaborowski, K., Zamojska-Daniszevska, M., Waszkowska, M. (2014). Annoyance related to wind turbine noise. *Arch. Acoust.* 39(1) 89-102.
- Pedersen, E., Persson Waye, K. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise - a dose-response relationship. *J. Acoust. Soc. Am.* 116 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) 480-486.
- 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) 634-643.
- Pedersen, E. (2011). Health aspects associated with wind turbine noise - Results from three field studies. *Noise Con. Eng. J.* 59(1) 47-53.
- Pierpont, N. (2009). *Wind turbine syndrome. A report on a natural experiment.* K-Selected Books, Santa Fe.
- Rubin, J.G., Burns, M., Wessely, S. (2014). Possible psychological mechanisms for "wind turbine syndrome". *On the windmills of your mind. Noise Health* 16(69) 116-122.
- Salminen, E. (2012). Ympäristöherkkyys – taistelua tuulimyllyjä vastaan? *Suomen Lääkärilehti*, 19, vsk 68, 1404-5.
- Salt, A.N., Hullar, T.E. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hear. Res.* 268 12-21.
- Schmidt, J.H., Klokke, M. (2014). Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review, *PLoS ONE* 9(12): e114183. doi:10.1371/journal.pone.0114183.
- Schust, M. (2004). Effects of low frequency noise up to 100 Hz. *Noise Health* 6(23) 73-85.
- Schäffer, B., Schlittmeier, S.J., Pieren, R., Heutschi, K., Brink, M., Graf, R., Hellbrück, 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) 2949-2963.

Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K., Hill, E. (2011). Evaluating the impact of wind turbine noise on health related quality of life. *Noise Health* 13(54) 333-339.

Shepherd, K.P., Hubbard, H.H. [1991]. Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines. *Noise Con. Eng. J.* 36(1) 5-15.

STM (2015). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545/2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista, 15.5.2015, Helsinki.

Strandberg, T. (2014). Nosebo - plasebon ilkeä sisarpuoli. *Suomen Lääkärilehti* 36 vsk 69 2180-2181.

Tachibana, H., Yano, H., Fukushima, A., Sueoka, S. (2014). Nationwide field measurements of wind turbine noise in Japan. *Noise Con. Eng. J.* 62(2) 90-101.

Taylor, J., Eastwick, C., Wilson, R., Lawrence, C. (2013). The influence of negative oriented personality traits on the effects of wind turbine noise. *Person. Individ. Diff.* 54 338-343.

Turunen, A., Tiittanen, P., Lanki, T. (2016b). Meluhaittojen kokeminen ja oireilu yhdeksällä tuulivoima-alueella Suomessa. *Ympäristö ja Terveys -lehti*, 5, 76-81.

TVKY (2015). Tuulivoimaloiden infraäänen aiheuttama terveysongelma Suomessa, 19.10.2015, Tuulivoima-kansalaisyhdistys ry. (http://tvky.info/tiedostot/infra_aani.pdf)

TVKY (2016). <http://tvky.info/tuulivoimaloiden-vaikutukset/>. Tuulivoima-kansalaisyhdistys ry.

van den Berg, G.P. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *J. Sound Vib.* 277 955-970.

Van Rentergrem, T., Bockstael, A., De Weirt, V., Botteldooren, D. (2013). Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise. *Sci. Tot. Environ.* 456-457 333-345.

Weichenberger, M., Kühler, R., Bauer, M., Hensel, J., Brühl, R., Ihlenfeld, A., Itterman, B., Gallinat, J., Koch, C., Sander, T., Kühn, S. (2015). Brief bursts of infrasound may improve cognitive function - An fMRI study. *Hear. Res.* 328 87-93.

Yamada, S., Ikuji, M., Fujikata, S., Watanabe, T., Kosaka, T. (1983). Body sensation of low frequency noise of ordinary persons and profoundly deaf persons. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Con.* 2(3) 32-36.