



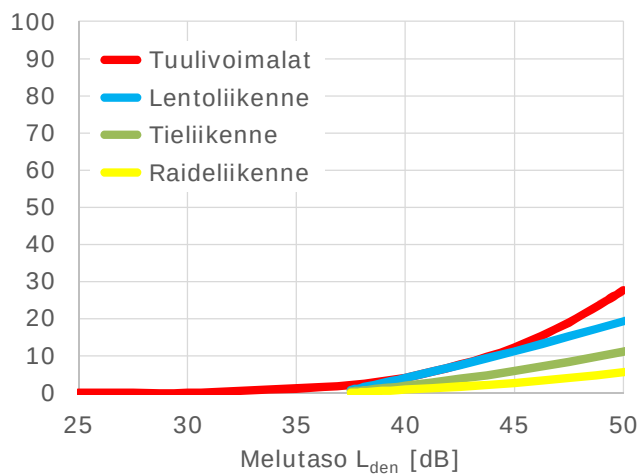
Työterveyslaitos | Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

Tuulivoimalamelun terveysvaikutukset

Valtteri Hongisto
Lokakuu 2014

Tuulivoimalamelun terveysvaikutukset

Melu ärsyttäväksi kokevien osuus [%]



Janssen, Vos, Eissens, Pedersen (2011)

Valtteri Hongisto
Lokakuu 2014

Työterveyslaitos
Sisäympäristölaboratorio
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 Turku
www.ttl.fi

Kansi: Mainostoimisto Albert Hall Finland Oy Ltd

© 2014 Työterveyslaitos ja Valtteri Hongisto

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-261-488-9 (PDF)

TIIVISTELMÄ

Julkaisun viitetieto: Hongisto V, Tuulivoimalamelun terveysvaikutukset, 64 sivua, Työterveyslaitos, 2014.

ISBN numero: ISBN 978-952-261-488-9

Tavoitteena oli koota yhteen ulkomaalainen tutkimustieto, jossa on selvitetty tuulivoimalamelun terveysvaikutuksia asuinympäristöissä.

Tuulivoimalamelun terveysvaikutuksia on tutkittu epidemiologisin tutkimusmenetelmin vuodesta 1993 lähtien. Niissä on kerätty kyselyjen avulla tietoa asukkailta alueilla, joissa oletettavasti on havaittavissa tuulivoimaloiden ääntä. Äänitasot asuntojen pihamaalla on yleensä määritetty mallintamalla.

Tämän raportin luvussa 4 tarkastellaan lähemmin 13 tutkimusta, jotka juontavat 6 kenttä-tutkimukseen, jotka on toteutettu Tanskassa, Hollannissa, Saksassa, Ruotsissa, Uudessa-Seelannissa ja Yhdysvalloissa.

Tutkimusten perusteella tuulivoimalamelun äänitaso on yhteydessä melun häiritsevyyteen. Yksilölliset erot melun kokemisessa ovat kuitenkin erittäin suuria. Noin 10 % väestöstä kokee tuulivoimalamelun häiritseväksi asunnon sisäpuolella, kun A-painotettu äänitaso ulkona ylittää 40 dB. Tätä korkeampien äänitasojen osalta ei ole olemassa luotettavaa tietoa, koska vastaajamäärät ovat erittäin pieniä. Tuulivoimalamelu koetaan yhtä häiritseväksi kuin tasoltaan samanlainen lentoliikennemelu mutta hieman häiritsevämmäksi kuin tasoltaan samanlainen tieliikennemelu.

Yhteyttä tuulivoimalamelun äänitason ja unenlaadun välillä ei ole löytynyt. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteivätkö herkimmat yksilöt voisi kokea tuulivoimalamelun häiritsevän unta.

Suurin osa kyselyihin vastanneista sijaitsee alueella, jossa tuulivoimaloiden äänitaso on alle 40 dB L_{Aeq} . Tässä tilanteessa melun häiritsevyyttä näyttäisivät selittävän äänitasoa paremmin erilaiset väliin tulevat muuttujat kuten tuulivoimalan näkyminen asuntoon tai pihamaalle, asenteet tuulivoimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan, odotukset asuinalueen rauhallisuuden suhteen ja taloudellinen hyötyminen tuulivoimaloista.

Tutkimuksia on toistaiseksi julkaistu vähän ja niihin liittyy useita epävarmuustekijöitä niin äänitasoihin, kyselymenetelmiin, aineistojen laajuuteen kuin tulosten tulkintoihinkin liittyen. Tutkimusta melun terveysvaikutuksista tulisi tehdä myös Suomessa, koska täällä asuinympäristöt ja rakennukset poikkeavat ulkomaalaisista merkittävästi. Jatkotutkimuksissa tulisi kiinnittää huomiota epävarmuustekijöiden vähentämiseen.

ESIPUHE

Tämän tutkimuksen päätarkoitus on selvittää kirjallisuustutkimuksen keinoin, mitä terveysvaikutuksia tuulivoimaloiden melulla on. Tutkimuksen pääjohtopäätöksissä on huomioitu pääasiassa tieteelliseltä laadultaan korkealaatuiset tutkimukset, joita on julkaistu vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä tai tieteellisissä kongressijulkaisuissa. Tutkimus ei kata läheskään kaikkia alan kongressijulkaisuja mutta vertaisarvioitujen terveysvaikutuksia koskevien julkaisujen osalta tutkimus on erittäin kattava.

Osa tutkimuksista sisälsi selviä menetelmällisiä puutteita. Sen vuoksi tämän raportin johtopäätöksiin ovat vaikuttaneet myös kirjoittajan tekemät perustellut tulkinnat siitä, missä määrin alkuperäistutkimusten tuloksia tai johtopäätöksiä voidaan nykytiedon perusteella pitää luotettavina.

Tämä raportti sisältää TUMEVA hankkeen työpaketin 1 tulokset. Työpaketin toteutti Työterveyslaitos. Kirjallisuustutkimuksen ja kirjoitustyön teki Valtteri Hongisto. Käyrien piirtämisessä avusti apulaistutkija Laura Rekola. Tilastotieteisiin liittyvissä kysymyksissä sekä oikolukemisessa avusti tutkija Maija Suokas.

TUMEVA hankkeen päärahoittajia olivat ympäristöministeriö, työ- ja elinkeinoministeriö, Energiateollisuus ry:n ympäristöpooli (Adato Energia Oy, Suomen Tuulivoimayhdistys r.y. Lisäksi hanketta rahoittivat hankkeen toteuttajaorganisaatiot. Hankkeen toteuttivat VTT, Työterveyslaitos, Vaasan energiainstituutti (Novia-ammattikorkeakoulu ja Vaasan yliopisto).

Hankkeen ohjausryhmässä toimivat Ari Saarinen (pj.), Marko Antila, Anni Mikkonen, Taamir Fareed, Heidi Lettojärvi, Minna Näsman, Valtteri Hongisto, Petri Välisuo, Kristian Blomqvist, Hannu Nykänen ja Annukka Saari. Kirjoittaja kiittää ohjausryhmän jäseniä raportin luonnosversioon annetuista kommentteista.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Tavoite	6
2 Menetelmät	7
3 Tuulivoimaloiden melu	8
3.1 Kuulokynnys ja äänenpainetaso	8
3.2 Amplitudimodulaatio	8
3.3 Äänenpainetaso ja äänitehotaso	9
3.4 Melupäästöarvojen varmuusvara	9
3.5 Tuulivoimalan melun taajuusjakauma ulkona	10
3.6 Tuulivoimalamelun leviämislaskelma ulkona	11
3.7 Tuulivoimalan melun taajuusjakauma sisätiloissa	11
3.8 Tuulivoimalamelun laskelma sisätilaan	11
3.9 Huonemoodien vaikutus äänenpainetasoon sisätiloissa	12
3.10 Sääolojen vaikutus tuulivoimalan melupäästöön	12
3.11 Tuulivoimalamelun ja taustamelun suhde	13
3.12 Infraäänit	13
4 Melun terveysvaikutukset	15
4.1 Terveyden käsite	15
4.2 Wolsink ym. (1993)	15
4.3 Pedersen ja Persson Waye (2004)	17
4.4 Pedersen ja Persson Waye (2007)	19
4.5 Pedersen ym. (2007) haastattelututkimus	20
4.6 Pedersen ja Persson Waye (2008)	21
4.7 Pedersen ja Larsman (2008)	22
4.8 Pedersen ym. (2009)	24
4.9 Pedersen ym. (2010)	25
4.10 Pedersen (2011)	26
4.11 Janssen ym. (2011)	28
4.12 Shepherd ym. (2011)	30
4.13 Bakker ym. (2012)	31
4.14 Nissenbaum ym. (2012)	32
4.15 Poikkileikkaustutkimusten epävarmuuskysymykset	33
5 Laboratoriotutkimukset	35
6 Review-artikkelit	38
7 Kyseenalaiset tutkimukset	39
8 Johtopäätökset	42
Kirjallisuusviitteet	43
Kuvat ja taulukot	47

1 TAVOITE

Ympäristömeluntorjuntaa koskee Suomessa yleisesti valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista (Valtioneuvosto 1993). Lakia laadittaessa ei teollisen kokoluokan tuulivoimaloita Suomessa vielä ollut. Tämän vuoksi julkaistiin ympäristöministeriön suunnitteluohjearvot (Ympäristöministeriö 2012), jotka ovat edellistä tiukempia. Asetustyöryhmä valmistelee paraikaa ehdotusta valtioneuvoston päätökseksi tuulivoimaloiden melua koskien.

Tuulivoimaloiden määrän ja koon lisääntyessä huoli tuulivoimaloiden melun terveysvaikutuksista on lisääntynyt kansalaisten keskuudessa. Liikkeellä on paljon tietoa, joka ei perustu tieteelliseen tutkimukseen. Suomessa ei toistaiseksi ole tehty epidemiologista tutkimusta tuulivoimaloiden melun terveysvaikutuksista, joten tältä osin on turvauduttava ulkomailla tehtyyn tutkimustietoon.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli laatia riippumaton kirjallisuustutkimus tuulivoimalamelun terveysvaikutuksista ja lisätä tätä kautta kansainvälisen tutkimustiedon tuntemusta Suomessa. Tutkimusta voidaan hyödyntää pohdittaessa terveysperustaisia melutason ohjearvoja.

2 MENETELMÄT

Kirjallisuustutkimus aloitettiin Google Scholar hakukoneella, jonka perusteella voitiin löytää eniten viitatu vertaisarvioidut julkaisut. Niitä lukemalla päästiin asteittain käsiksi olennaiseen kirjallisuuteen. Tutkimuksessa tarkasteltiin neljän tyyppisiä kirjallisuuslähteitä:

1. vertaisarvioitu tieteellinen alkuperäisjulkaisu eli julkaisu, jossa esitetään ajankohta huomioiden uutta tutkimustietoa, ja käsikirjoitus on 2-3 riippumattoman tutkijan arvioima ja hyväksymä;
2. vertaisarvioitu tieteellinen review-julkaisu eli kirjallisuustutkimus, jonka käsikirjoitus on 2-3 riippumattoman tutkijan arvioima ja hyväksymä;
3. tieteellinen kongressijulkaisu, eli yleensä 4-10 sivuinen tiivis julkaisu, jota ei välttämättä ole vertaisarvioitu;
4. vertaisarvioimattomat raportit tai kirjat, jota ei välttämättä ole vertaisarvioitu ja jotka on julkaistu tutkimuslaitoksen tai vastaavan omarahoituksella.

Terveysvaikutuksia koskeva kirjallisuustutkimus (luku 4) keskittyi tyyppin 1 ja 2 julkaisuihin. Tyyppin 3 ja 4 julkaisuja huomioitiin jossain määrin mutta ei kovin kattavasti.

Raportti koostuu neljästä luvusta:

- Luvussa 3 käsitellään tuulivoimaloiden äänen fysikaalista luonnetta, eli sitä, millaista ääni on ja miten se suhtautuu muihin yleisesti tunnettuihin äänilähteisiin. Tässä luvussa ei oteta kantaa äänen kokemiseen.
- Luvussa 4 käsitellään tuulivoimaloiden melun terveysvaikutuksia. Siinä käsitellään tärkeimmät tiedossa olevat vertaisarvioidut tutkimukset, joissa on selvitelty tuulivoimaloiden melun terveysvaikutuksia.
- Luvussa 5 käsitellään muutamia laboratoriotutkimuksia koskien tuulivoimalamelun häiritsevyyden tutkimusta.
- Luvussa 6 on käsitelty review-artikkeleita. Tämä luku palvelee niitä, jotka haluavat nopeasti päästä laadukkaan, tiiviin ja helposti luettavan tiedon lähteille menemättä syvälle alkuperäistutkimuksiin, jotka edellyttävät lukijaltaan tilastotieteen, meluntorjunnan ja ympäristöpsykologian asiantuntemusta. Review-artikkeleista voi muodostaa käsityksen, mitkä tutkimukset ovat luotettavia ja mitkä kyseenalaisia.
- Luvussa 7 käsitellään kyseenalaisia tutkimuksia. Lukuun on koottu joukko epätieteellisiä "tutkimuksia", jotka ovat saaneet paljon huomiota etenkin tuulivoimaa vastustavien tahojen parissa mutta niitä ei voida pitää luotettavina lähteinä keskusteltaessa tuulivoimaloiden melun terveysvaikutuksista.

Tutkimuksen päähuomio on luvussa 4, johon myös johtopäätökset perustuvat.

3 TUULIVOIMALOIDEN MELU

3.1 Kuulokynnys ja äänenpainetaso

Äänen objektiivista voimakkuutta mitataan äänenpainetason L_p avulla. Äänenpainetason yksikkö on desibeli [dB]. Ihminen kuulee äänen eri taajuudet hyvin eri herkkyyksillä johtuen kuuloaistin toiminnasta. Kuvassa 3.1 on esitetty äänen kuulokynnys taajuusalueella 20 – 20.000 Hz (ISO 226). Kuulokynnys on alin äänenpainetaso, jonka ihminen voi kuulla. Tätä pienempiä taajuuksia kutsutaan infraääniksi. Ihmiskorva aistii myös voimakkaita infraääniä. Aistimus ei kuitenkaan vastaa ääntä, jolla on selkeä sointi, vaan aistimus tuntuu paineen vaihteluna tärykalvolla.

Tuulivoimaloiden ääni on laajakaistaista eli se sisältää kaikkia äänen taajuuksia.

Kun äänenpainetaso halutaan kuvata yhdellä luvulla niin, että se kuvaisi hyvin ihmisen subjektiivista kokemusta äänen voimakkuudesta, tehdään mittaustulokseen A-painotus, joka vastaa korvassa tapahtuvaa taajuuspainotusta. Siinä käytetään standardoituja taajuuspainotuksia (IEC 61672-1). A-painotus ottaa huomioon kuvan 3.1 kaltaisesti kuuloherkkyyden eri taajuuksilla. Luvuissa 3.6 ja 3.8 on esitetty esimerkkejä, mitä A-painotus tarkoittaa tuulivoimalamelun kohdalla ulkona ja sisätiloissa.

Tässä raportissa keskeisin melun objektiivinen mittaluku on A-painotettu keskiäänitaso L_{Aeq} . Se voidaan mitata yksinkertaisella äänitasomittarilla. Toinen tärkeä mittaluku on L_{den} eli päivä-ilta-yömelutaso. Sitä ei voida mitata äänitasomittarilla suoraan, koska se painottaa eri vuorokauden aikojen meluja eri tavoin. L_{den} kuvaa koko päivän keskiäänitason yhdellä luvulla siten, että päiväajan keskiäänitaso $L_{Aeq,07-19}$ on huomioitu sellaisenaan, iltajan äänitasoihin $L_{Aeq,19-22}$ on tehty 5 dB:n korotus ja yöajan äänitasoihin $L_{Aeq,22-07}$ on tehty 10 dB:n korotus. Mittalukua L_{den} käytetään paljon ulkomaille kuvaamaan ympäristömelun tasoa koko vuorokauden aikana. Se selittää vuorokauden ympäri jatkuvan ympäristömelun häiritsevyyttä tutkimusten mukaan paremmin kuin koko vuorokauden keskiäänitaso $L_{Aeq,24h}$.

3.2 Amplitudimodulaatio

Tuulivoimaloiden ääni syntyy pääasiassa virtausäänestä, jonka lavat liikkeessaan aiheuttavat (aerodynaaminen ääni). Tämä kirjallisuuskatsaus ei käsittele fyysikaalisia syitä äänen syntymiselle. Hyviä tutkimuksia aiheesta esittää mm. *Oerlemans et al.* (2007).

Tuulivoimaloiden äänelle on ominaista amplitudimodulaatio eli jaksollinen äänenvoimakkuuden vaihtelu. Amplitudimodulaatio tarkoittaa, että virtausäänen kokonaistaso vaihtelee eli sykkii jaksollisesti. Ääni voimistuu, kun lapa liikkuu alaspäin. Jaksollisuuden aiheuttaa lapojen pyörimisliike. Yleinen pyörimisnopeus teollisen kokoluokan voimaloille on 6-16 kierrosta minuutissa. Koska lapoja on yleensä kolme, tämä tarkoittaa, että lapa ohittaa voimalan huipun 18-48 kertaa minuutissa eli 1.25 - 3.3 sekunnin välein. Tämä aikaansaa amplitudimodulaation taajuuksi 0.3-0.8 Hz.

Ääni on amplitudimoduloitua, kun tuulen voimakkuus on riittävän suuri. Kuvassa 3.2 on esitetty mittaustulos erään voimalan lähistöltä, kun amplitudimodulaatio on voimakasta. Äänen voimakkuus vaihtelee noin 1.5 sekunnin välein. Amplitudimodulaation aste on noin 5 dB ja taajuus noin 0.7 Hz.

Amplitudimodulaation aste riippuu myös taajuudesta, koska eritaajuiset äänet suuntautuvat eri tavoin (Lee et al. 2011). Näin ollen kuuntelupisteen sijainti vaikuttaa amplitudimodulaation luonteeseen.

Joillakin tuulivoimalatyypeillä voi aiheutua merkittävää ääntä vaihteiston ja generaattorin mekaanisesta melusta tai voimalan kääntymisestä. Nämä äänet eivät yleensä ole voimakkaita ja jatkossa keskitytään aerodynaamisiin ääniin.

3.3 Äänenpainetaso ja äänitehotaso

Ihminen perustaa kokemuksensa äänilähteen voimakkuudesta hyvin pitkälti äänenpainetason. Äänenpainetaso riippuu äänilähteen melupäästöstä (eli äänitehotasosta), etäisyydestä äänilähteeseen, erilaisista vaimennustekijöistä äänilähteen ja kuulijan välillä (esteet, ilman absorptio) sekä sääolosuhteista.

Äänitehotason käsitettä tarvitaan kuvaamaan kokonaisäänien energian tuottoa sekuntia kohti. Äänitehotaso kertoo äänienergian määrän sekuntia kohti pallopinnalla, jonka sisäpuolella äänilähde on. Äänitehotason yksikkö on myös [dB], minkä vuoksi äänitehotaso ja äänenpainetaso voivat mennä sekaisin.

Äänitehotason mittaushjeita on laadittu myös suomeksi (Ympäristöministeriö 2014a). Siinä mitataan voimalan tuottama A-painotettu äänenpainetaso L_{pA} heijastavalla maan pinnalla. Mittausetäisyys mastoon valitaan suunnilleen samaksi kuin voimalan kokonaiskorkeus. Nimellinen melupäästöarvo ilmoitetaan voimalan takana tehtävällä mittauksella, kun tuulen nopeus 10 metrin korkeudella on noin 8 m/s. Käytännössä mittauksia tehdään useilla eri tuulen nopeuksilla. Äänitehotaso lasketaan äänenpainetasosta kaavalla

$$(1) \quad L_{WA} = L_{pA} + 10 \log_{10}(4\pi d^2) - 6$$

missä d [m] on etäisyys turbiinin napaan.

Esimerkki: Mittausetäisyys turbiinin napaan on $d=160$ m. Tällä etäisyydellä mitataan A-painotetun äänenpainetason arvoksi $L_{pA}=59$ dB. Kaavan mukaan turbiinin äänitehotasoksi saadaan $L_{WA}=108$ dB.

Valmistajan ilmoittamasta äänitehotason arvosta saadaan äänenpainetaso jossain tarkastelupisteessä oktaavikaistoittain yhtälöllä (Ympäristöministeriö 2014b)

$$(2) \quad L_p = L_{WA} - 20 \lg d - 11 - \alpha d + G$$

missä L_{WA} on A-painotettu äänitehotaso ko. taajuudella, d [m] on etäisyys turbiinin navasta tarkastelupisteeseen, α [dB/km] on taajuusriippuva ilman absorptio ja G on taajuusriippuva vakio, jolla huomioidaan maanpinnasta aiheutuvan heijastuksen vaikutus. Ympäristöministeriö (2014b) esittää suosituksia G :n arvoille oktaavikaistoittain.

3.4 Melupäästöarvojen varmuusvara

Tietylle voimalayksilölle mitattu melupäästöarvo (äänitehotaso) ei välttämättä päde toiselle voimalalle, vaikka molemmat edustaisivat saman valmistajan samaa tyyppiä. Melupäästöarvot voivat vaihdella useita desibelejä johtuen mm. lapojen muodosta, laitteiden kokoisesta, huollosta ja komponenttien laadusta. Lisäksi mittauksiin sisältyy virheitä.

Tuulivoimalan toimittajan on annettava laitteelle virallinen melupäästöilmoitus. Voimalalle mitattu melupäästö ei saa ylittää tätä ilmoitusarvoa. Melupäästön ilmoitusarvossa on tämän vuoksi sisäänrakennettuna varmuusvara, jolla pyritään takaamaan, että 95 % tuotteista tuottaa melupäästöarvoa alhaisemman melutason.

Voimalan melupäästöarvon tulisi perustua usean samaa tyyppiä olevan voimalan melupäästömittaukseen (IEC TS 61400-14). Melupäästömittausten tuloksista lasketaan keskiarvo ja tähän lisätään vakio, joka on 1.6 kertaa yksilöiden melupäästömittausten standardipoikkeama.

- *Esimerkki: Neljälle voimalalle mitataan äänitehotasot (L_{WA}) 103, 104, 105 ja 107 dB. Näiden keskiarvoksi saadaan 104.8 dB ja standardipoikkeamaksi 1.7 dB. Melupäästöilmoituksessa esitetään tällöin äänitehotaso 108 dB.*

On epäselvää, noudattavatko kaikki voimalatoimittajat samoja käytäntöjä melupäästöilmoituksia tehdessään.

Väärän melupäästöarvon käyttö vaikuttaa merkittävästi siihen rajaetäisyyteen, jossa maan käytön kannalta kriittiset äänitason raja-arvot saavutetaan. Muutaman desibelin virhe melupäästöarvossa voi merkitä satojen metrien virhettä rajaetäisyyden laskentatuloksessa.

3.5 Tuulivoimalan melun taajuusjakauma ulkona

Eri lähteistä raportoitujen äänitehotasospektrien vertaileminen keskenään on tärkeää, jotta voidaan saada riippumaton käsitys melupäästön luonteesta. Tuulivoimaloiden melupäästöarvoja (äänitehotasoja) ovat julkaisseet lukuisat tutkijat. Laajimman tutkimuksen esittivät Möller ja Pedersen (2011), jotka analysoivat 45 erikokoisen tuulivoimalan äänitehotason IEC standardin mukaisesti. Yhteenveto on esitetty kuvassa 3.3.

Tuulivoimaloiden spektrit ovat muodoltaan hyvin samanlaisia riippumatta siitä, minkä kokoisia ne ovat. Kuvassa on esitetty myös tieliikenteen spektri kahdella eri liikennemäärällä niin, että niiden tehotaso on normalisoitu voimaloiden tehotasoihin. Tieliikenteen melupäästön taajuusjakauma muistuttaa tuulivoimalan melupäästön taajuusjakamaa.

Möller ja Pedersen (2011) määrittivät 45 voimalan aineistostaan A-painotetun äänitehotason audiotaajuuksilla (L_{WA} ; 20-20000 Hz). Kuvan 3.4 perusteella A-äänitehotaso riippuu voimakkaasti voimalan sähköntuottotehosta. Kun teho kaksinkertaistuu, äänitehotaso kasvaa 3 dB.

Möller ja Pedersen määrittivät myös A-painotetun äänitehotason pientaajuuksilla (L_{WALF} ; 10-160 Hz). Kuvan 3.4 perusteella A-painotettu äänitehotaso audiotaajuuksilla on selvästi suurempi kuin pientaajuuksilla. Voimaloiden ääni ei siis johdu pientaajuuksista vaan audiotaajuuksista kaiken kaikkiaan.

Toisin sanoen, lähellä tuulivoimalaa, missä äänen spektri on muodoltaan kuvan 3.3 kaltainen, ääni ei ole erityisen pientaajuista, koska audiologinen havainto perustuu keskitaajuuksiin. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun ääntä tarkastellaan kauempana voimalasta tai sisätiloissa.

Voimalan koko vaikuttaa hieman taajuusjakaumaan (Kuva 3.5). Suurilla voimaloilla (yli 2 MW) pientaajuista melua on suhteellisesti ottaen noin 2 dB enemmän kuin pienillä voimaloilla (alle 2 MW). Kuuloaistimuksen kannalta tällä voi olla merkitystä esimerkiksi sisätiloissa, jossa pientaajuinen melu voi ylittää kuulokynnyksen. Käytännössä enemmän on kuitenkin merkitystä sillä, että suurten voimaloiden kokonaisäänitehotaso on suurempi kuin pienten, minkä kuva 3.4 osoittaa.

3.6 Tuulivoimalamelun leviämislaskelma ulkona

Kuvassa 3.6 on esitetty yhtälön (2) mukainen laskelma erään 1.5 MW tuulivoimalan aiheuttamasta äänenpainetason spektristä eri etäisyyksillä, kun oletetaan, että voimalan ja mittauspisteen välillä ei ole esteitä ja sääolot ovat normaalit (ei inversiotilanne). Laskelmassa on käytetty taulukon 3.1 äänitehotasoa. Leviämislaskelmissa käytetyt vakiot ovat taulukossa 3.2. Tuulivoimalamelun taajuusjakauma riippuu voimakkaasti etäisyydestä, koska ilman absorptio kasvaa taajuuden kasvaessa. Pientaajusten äänten osuus korostuu etäisyyden kasvaessa.

Kuvassa 3.7 on esitetty kuvaa 3.6 vastaavat A-äänitasot eri etäisyyksillä. A-äänitaso pienenee lähellä voimalaa noin 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessaa ja kauempana siitä jopa 8 dB etäisyyden kaksinkertaistuessaa, koska suurilla taajuuksilla vaimennus on voimakasta.

Taulukossa 3.3 on esitetty kuvan 3.6 mukaiset A- ja C-painotetut äänenpainetasot. Jos erotuksen $L_C - L_A$ arvo ylittää 20 dB, katsotaan melu pientaajuiseksi. Tämän laskentaesimerkin tuulivoimalan melu ei ole pientaajuista, kun ääntä tarkastellaan ulkona.

Kuvien 3.6-7 ja taulukon 3.3 äänitasot eivät päde ilmakehän inversiotilanteessa.

3.7 Tuulivoimalan melun taajuusjakauma sisätiloissa

Tuulivoimalan tuottama äänenpainetaso asuinhuoneessa, L_2 , voidaan laskea, kun tunnetaan äänenpainetaso julkisivupinnalla ja rakennuksen ulkovaipan ilmajäeneneristävyyden eri taajuuksilla (*Keränen ja Hongisto 2010*). Äänenpainetaso saadaan yhtälöllä

$$(3) \quad L_2 = L_1 - R + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A} \right) - 3$$

missä R [dB] on koko julkisivurakenteen ilmajäeneneristävyyden, L_1 [dB] on äänenpainetaso ulkona 2 metrin päässä ulkoseinästä, S [m²] on asuinhuonetta ja ulkotilaa erottavan julkisivurakenteen pinta-ala, ja A [m²] on asuinhuoneen absorptioala. Laskelma tehdään taajuuskaistoittain ja se tuottaa äänenpainetason huoneen keskiosissa.

Asuinhuoneiden taustamelutasot ovat pääsääntöisesti välillä 15-30 dB L_{Aeq} , mikä täytyy ottaa huomioon, kun melua mitataan.

Rakenteiden ilmajäeneneristävyyksistä on yleensä saatavana luotettavia mittausarvoja vain taajuusalueelta 100-3150 Hz. Alle 100 Hz:n arvoja toki mitataan, mutta mittausepävarmuus alle 100 Hz:n taajuuksilla yli 5-10 dB (*Keränen ja Hongisto 2010*). Tämän vuoksi äänitasolaskelmat sisätiloihin sisältävät paljon epävarmuuksia alle 100 Hz taajuuksilla.

3.8 Tuulivoimalamelun laskelma sisätilaan

Työterveyslaitos on mitannut julkisivun ilmajäeneneristävyyden tyypilliselle pientalolle alueella, jossa äänieristysvaatimuksia julkisivurakenteelle ei ole asetettu. Ilmajäeneneristävyys on esitetty kuvassa 3.8. Tämän perusteella tehtiin äänenpainetason laskelma, jonka tulos on kuvassa 3.9. Siinä on oletettu, että voimala on 800 m päässä ja ulkomelun L_1 taajuusjakauma on kuvan 3.6 mukainen.

Sisätilassa ääni sisältää suhteellisesti enemmän pienitaajuisia ääntä kuin ulkona, koska julkisivurakenne eristää pientaajuisia ääntä heikommin kuin suuritaajuisia ääntä. Laskelman mukaan ääni on pientaajuisia, koska $L_C - L_A$ ylittää arvon 20 dB.

Äänenpainetaso alittaa esimerkissä kuulokynnyksen, joten ääntä ei periaatteessa kuulu.

Pientalojen julkisivujen ilmaääneneristävyydet voivat poiketa 10-20 dB kuvan 3.8 arvosta, joten kuvan 3.9 laskelmaa ei pidä yleistää. Esimerkki on esitetty siksi, että nähdään, mitä äänen taajuusjakaumalle yleensä tapahtuu, kun ääni saapuu sisätilaan.

Yleensä julkisivun ilmaääneneristävyys riippuu eniten ikkunarakenteen ja korvausilmakanavien ääneneristyskyvystä. Haluttaessa parantaa julkisivun ääneneristävyyttä on syytä selvittää, mitä rakennetta pitkin ääntä kulkeutuu sisätilaan eniten ja kohdistaa parannustoimenpiteet ensisijaisesti tähän rakenneosaan.

3.9 Huonemoodien vaikutus äänenpainetasoon sisätiloissa

Oliva ym. (2010, 2011) tutkivat, miten julkisivurakenteen läpi huoneeseen kantautuvan melun äänenpainetaso vaihtelee huoneen sisällä eri taajuuksilla. Mittauspisteet sijaitsivat vähintään 20 cm huonepinnoista. Äänenpainetason vaihtelu on esitetty kuvassa 3.10. Vaihtelu kasvaa taajuuden pienentyessä. Äänenpainetaso vaihteli huoneen eri pisteissä jopa yli 15 dB pientaajuuksilla.

Suuri äänenpainetason vaihtelu pientaajuuksilla johtuu huoneen ominaistaajuuksista (eli moodi tai seisova aalto). Alimmat ominaistaajuudet esiintyvät asuinhuoneissa yleensä 20-80 Hz:n taajuuksilla. Jos ulkoa kantautuu sisään merkittävästi ääntä, joka osuu huoneen ominaistaajuudelle, äänenpainetason vaihtelun voi havaita aistinvaraisesti huoneen eri pisteissä. Siirryttäessä huoneen keskeltä kohti seinäpintoja tai nurkkia, pientaajuinen äänitaso voi kasvaa jopa 10-15 dB.

Sänky on makuuhuoneissa usein sijoitettu siten, että nukuttaessa pää sijaitsee seinäpinnan lähellä. On mahdollista, että pään alue sijaitsee ominaistaajuuden maksimin kohdalla, jolloin äänitaso on korkeampi kuin huoneessa keskimäärin. Toisaalta näin ei kuitenkaan voida yleistää, koska huoneessa on myös alueita, jossa taso on merkittävästi keskiarvoa pienempi (*Oliva ym.* 2010, 2011).

On huomattava, että äänenpainetaso voi olla huoneen ominaistaajuuden maksimin kohdalla lähes yhtä korkea kuin äänenpainetaso rakennuksen ulkopuolella, jos ääneneristyskyky samalla taajuudella on alhainen, alle 15 dB (*Oliva ym.* 2011, kuva 33).

3.10 Sääolojen vaikutus tuulivoimalan melupäästöön

Normaalisti ilmakehässä vallitsee tilanne, jossa lämpötila laskee ylemmäs mentäessä. Heikotuulisen ja selkeän sään aikana maanpinnan lähelle voi kuitenkin muodostua inversiotilanne, jossa lämpötila kasvaa ylemmäs mentäessä tiettyyn rajakorkeuteen asti. Rajakerroksen yläpuolella lämpötila alkaa jälleen laskea. Inversiotilanne esiintyy usein kesän selkeinä öinä ja talvella mihin vuorokauden aikaan tahansa. Inversiotilanteessa ilma on melko stabiili rajakerroksen alapuolella, jolloin lämpötilakerrostuminen voi tapahtua. Inversio purkautuu yleensä, kun aurinko alkaa lämmittää ilmakehän alimpia kerroksia.

Rajakerroksessa oleva lämmin ilmakerros heijastaa äänen erittäin tehokkaasti. Normaalisissa sääolosuhteissa A-äänitaso pienenee 6-8 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa kuten kuvassa 3.7 esitettiin (leviämisvaimennusaste). Inversiotilanteessa leviämisvaimennusaste voi olla kuitenkin poiketa tästä suuntaan taikka toiseen riippuen siitä, missä suunnassa tuulen suuntaan nähden ääntä tarkastellaan. Myötätuulen suunnassa leviämisvaimennusaste voi olla pienempi ja vastatuulen suunnassa suurempi kuin 6-8 dB. Myötätuulen suunnassa

äänenpainetasot voivat siis olla korkeampia kuin yhtälöllä (2) lasketut arvot, koska taivaalle muutoin suuntautunut ääni heijastuu rajakerroksesta alaspäin.

Möller ja Pedersen (2011) ehdottivat tarkennusta, jonka mukaan tuulivoimalan melu leviäisi inversiotilanteessa myötätuulen suunnassa sylinteriaallon tavoin yli 200 metrin päässä voimalasta. He väittivät *Hubbardin* ja *Shepherdin* (1991) havainneen kyseisen ilmiön pientaajuuksilla mittauksin. Havaintoja ei kuitenkaan esitetty kuin yhdestä tapauksesta ja esimerkki koski alle 20 Hz:n taajuuksia. Tutkimustietoa inversiotilanteen vaikutuksista tuulivoimalamelun leviämismuunnosasteeseen olisi tärkeä lisätä.

Meteorologisten perusteorioiden mukaan tuulen nopeus kasvaa logaritmisesti maan pinnalta ylöspäin siirryttäessä. Teoria ei kuitenkaan ole voimassa inversiotilanteessa. *van den Berg* (2004) tutki voimaloiden äänitasoa pitkäaikaismittauksin yöaikaan. Hänen mukaansa tuulen nopeus voi olla jopa $2\frac{1}{2}$ kertaa suurempi navan korkeudella kuin 10 metrin korkeudella, jossa standardin mukaiset tuulen nopeusmittaukset tehdään. Näin ollen äänitasot olivat paljon suurempia kuin voisi 10 metrin korkeudelta tehtyjen tuulennopeusmittausten perusteella odottaa. Äänitasot eivät koskaan kuitenkaan ylittäneet valmistajan antamaa enimmäisarvoa 10 m/s tuulennopeudella (*van den Berg* 2004).

Forssen ym. (2010) seurasivat 30 vuorokautta tuulivoimalan äänitasoa eri sääolosuhteissa. Mittaus tehtiin 530 metrin päässä kahdesta 1.5-1.8 MW voimalasta eikä mittauspisteen ja voimaloiden välillä ollut puita tai maanmuotoja. Kuvan 3.11 mukaan äänitason vaihtelu oli jopa 8 dB, kun tuulen nopeus oli välillä 5.5-6.5 m/s. Vaihtelua oli myös muilla tuulen nopeuksilla mutta se oli vähäisempää. Sääolot vaikuttavat siis äänitason merkittävästi näinkin lähellä voimalaa.

3.11 Tuulivoimalamelun ja taustamelun suhde

Lisäksi jos ylätuuli on voimakasta mutta alatuuli ei, voimalan äänen signaalikohinasuhde eli voimalan äänitason ja taustamelun äänitason erotus on korkea. Tällöin voimalan ääni erottuu paremmin, koska tuulen huminaa ei kuulu. Esimerkki *van den Bergin* (2004) kuvaamasta signaalikohinasuhteen käyttäytymisestä on esitetty kuvassa 3.12. Signaalikohinasuhteen kasvaessa tuulivoimalamelun erottuminen taustamelusta helpottuu ja samalla sen häiritsevyys todennäköisesti kasvaa. Suuret signaalikohinasuhteet ovat yleisiä ilmakehän inversiotilanteessa.

3.12 Infraäänät

Useat artikkelit sisältävät väitteitä, että tuulivoimaloiden melu sisältäisi kuulokynnyksen ylittäviä infraääniä eli ääniä, joiden taajuus on alle 20 Hz. Mittauksiin perustuvaa todistusaineistoa kuulokynnyksen ylittävistä infraäänien tasoista ei kuitenkaan ole esitetty tuulivoimaloiden lähetyviltä.

Tuulivoimalat tuottavat infraääntä. Niiden äänenpainetaso jää kuitenkin huomattavasti alle kuulokynnyksen. Tutkimuskirjallisuus on harvinaisen yksimielinen siitä, että tuulivoimaloiden infraäänät eivät ylitä kuulokynnystä (*Möller ja Pedersen* 2011, *Leventhall* 2006, *Jakobsen* 2005).

Jacobsenin (2005) mukaan ns. vastatuulivoimalat (tuuli kohdistuu voimalaan edestä päin) eivät tuota infraääntä, jonka voisi kuulla lähistöllä olevissa asunnoissa. Vastatuulivoimalat ovat pääasiassa käytössä nykyisissä uusissa tuulivoimaloissa. Vanhemmat voimalat voivat

olla tyypiltään myötätuulivoimaloita (tuuli kohdistuu voimalaan takaa päin). Näissä infraäänitasot ovat 10-30 dB korkeampia ja tasot voivat ylittää kuulokynnyksen aivan lähelle voimaloita sijoittuvissa asunnoissa.

Tästä huolimatta väestön keskuudessa voi vallita uskomuksia, että tuulivoimaloista aiheutuu havaittavaa infraääntä. Kyseessä on kuitenkin provokaatio, jonka syntymistä *Leventhall* (2006) on käsitellyt yksityiskohtaisesti. Hänen mukaansa amplitudimodulaation ja infraäänien käsitteet ovat voineet sekoittua, koska amplitudimodulaation taajuus on yleensä välillä 0.5-1.0 Hz (ks. luku 3.2) ja infraääniksi lasketaan äänet, joiden taajuus on alle 20 Hz. Tuulivoimalan taajuusanalysissä ei kuitenkaan nähdä piikkiä (äänestä) amplitudimodulaation taajuudella.

4 MELUN TERVEYSVAIKUTUKSET

4.1 Terveiden käsite

Pedersenin (2011) mukaan ympäristömelun vaikutuksia arvioidaan epidemiologisissa tutkimuksissa pääsääntöisesti häiritsevyyden esiintymisen kautta. Tutkimuksilla selvitetään miten suuri osa väestöstä raportoi häiritsevyyttä eri melualueilla. Suoria klinisiä tutkimuksia väestön parissa ei yleensä tehdä, koska ne tulisivat hyvin kalliiksi.

Maaailman terveysjärjestön määritelmän mukaan *"Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity"* (WHO).

Terveiden- ja hyvinvoinnin laitos käyttää seuraavaa käännoästä määritelmälle: *"terveys on täydellisen fyysisen, psyykkisen ja sosiaalisen hyvinvoinnin tila eikä pelkästään sairauden tai heikkouden poissaoloa."* (Malmivaara 2011)"

British Medical Journal -lehden asiantuntijat ovat ehdottaneet korvaavaa määritelmää: *"terveys on yksilön kyky sopeutua ja itse korjata sosiaalisen, fyysisen tai tunne-elämään liittyvän haasteen aiheuttamat häiriöt"*. Määritelmässä korostuvat toimintakyky, elämänlaatu ja hyvinvoinnin kokemus (Malmivaara 2011).

Pedersenin (2011) tulkinnan mukaan melun häiritsevyyden kokeminen on WHO:n määritelmän valossa haittavaikutus, jota tulisi välttää hyvinvoinnin ylläpitämiseksi. Häiritsevyyttä voidaan myös tarkastella mitattavissa olevana indikaattorina kasvavalle terveysriskille: korkeilla ympäristömelutasoilla (yli 56 dB $L_{Aeq,24h}$) on havaittu olevan yhteys esimerkiksi verenpainetautiin (Barregard ym. 2009). *Pedersenin* (2011) mukaan voimakkaalla melun häiritsevyyden kokemuksella olisi yhteys sisäelintauteihin luultavasti fysiologisen palautumisen estymisen kautta.

Tuulivoimaloiden melun vaikutuksia asunnoissa on tutkittu useissa maissa ja hyvin erilaisin menetelmin. Tämä luku painottaa tutkimuksia, jotka on julkaistu vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä. Kuvassa 4.1 ja Taulukossa 4.1 on esitetty yhteenvedo näistä 12 tutkimuksesta. Ne perustuvat aineistoihin 6 eri tutkimusprojektista, joita on tehty 6 eri maassa.

4.2 Wolsink ym. (1993)

Tämä tutkimus lienee yksi vanhimpia poikkileikkaustutkimuksia. Se on julkaistu englanniksi kolmessa eri kongressissa (Wolsink ym. 1993, Wolsink ja Sprengers 1993a, 1993b). Tuohon aikaan voimalat olivat nykyistä merkittävästi pienempiä, joten tutkimuksen voi jättää hieman vähemmälle huomiolle. Tutkimus kuitenkin on huomioitu, koska se on poikkileikkaustutkimuksista ainoa, jossa tuulivoimaloiden äänitaso on määritetty kirjoittajien mukaan mittauksin eikä mallintamalla. Lisäksi tutkimus on toiminut esikuvana myöhemmille tutkimuksille. On tärkeä nähdä, ovatko tulokset olennaisesti muuttuneet 20 vuoden aikana, kun voimaloiden koko on kasvanut.

Tutkimus toteutettiin Tanskassa, Alankomaissa ja Saksassa kuudellatoista alueella, jossa oli tuulivoimala tai useita sellaisia.* Vastaaia oli 574 ja heidän sijoittumisensa eri äänitasoalueille on esitetty Taulukossa 4.2.

Kaikista vastaajista 6,4 % ilmoitti tuulivoimaloiden melun olevan joskus häiritsevää (Taulukko 4.3). Valitettavasti tutkimuksissa ei kerrottu häiritsevyyttä raportoineiden osuutta eri äänitasoluokissa.* *

* Wolsink antoi sähköpostissa lisätietoja tutkimusmenetelmistä. Kysely toteutettiin haastattelijan toimesta asukkaiden kotona eikä koteihin postitettuna paperikyselynä, kuten kaikissa muissa tämän luvun tutkimuksissa. Tuulivoimaloiden äänitasot määritettiin konsulttitoimiston puolesta. Melua mitattiin ensin eri puolilla tuulipuistoja eri tuulen nopeuksilla. Mittaustuloksista määritettiin mallilaskelmien avulla keskimääräiset äänitasot asuinrakennusten tontilla. Tämä poikkeaa melko paljon 2000-luvun tutkimuksissa käytetyistä menetelmistä.

** Wolsinkin sähköpostivastauksen mukaan kyselyvastauksia ei ole enää arkistoitu eikä äänitaso-häiritsevyys-käyriä voida valitettavasti jälkikäteen määrittää. Hänen mielestään *Pedersenin* tutkimukset 2000-luvulla (tulevat esiin myöhemmin tässä luvussa) ovat laadukkaita ja niihin kannattaisi perustaa kirjallisuustutkimukseni johtopäätökset tuulivoimaloiden äänitason ja melun häiritsevyyden välisestä riippuvuudesta tai sellaisen puuttumisesta.

Tuloksena esitettiin, että tuulivoimaloiden äänitason ja tuulivoimaloiden melun häiritsevyyden välillä oli tilastollisesti merkitsevä yhteys (Kendallin järjestyskorrelaatiokerroin $\tau=0.09$; $p<.05$). Yhteys oli kuitenkin niin heikko, että tällä yhteydellä ei voida katsoa olevan käytännön merkitystä. Häiritsevyyttä selittivät enemmän muut tekijät kuin äänitaso.

Kyselyllä mitattiin erilaisia tilannetekijöitä (esteet voimalan ja asunnon välillä, etäisyys voimalaan, asunnon sijainti suhteessa voimalaan ja dominoivaan tuulensuuntaan) ja asennetekijöitä (asenne tuulivoimatuotantoa kohtaan, asenne maisemavaikutuksia kohtaan, tyytyväisyys asuinympäristöön, tuulivoimalamelun aiheuttama stressi).

Tuulivoimalamelun häiritsevyys oli alhaisempi, jos tuulivoimalan ja asunnon välillä oli rakennuksia tai esteitä. Tuulivoimalamelun aiheuttama stressi oli voimakkaimmin yhteydessä melun häiritsevyyden kanssa. Lisäksi melun häiritsevyys oli suurempi, jos asukas koki tuulivoimalan häiritsevän paljon maisemaa. Lisäksi havaittiin, että melun häiritsevyyttä raportoititiin sitä vähemmän, mitä pidempään voimalat olivat olleet toiminnassa.

Tutkijat arvioivat, että tuloksiin pitää suhtautua varauksella, koska tutkimus tehtiin kolmessa maassa ja kyselyt eivät välttämättä mittaa samoja asioita eri kielille käännettynä.

Pohdinnassa korostettiin, että voimaloiden sijaintia valittaessa tuulivoimalamelu kuitenkin helposti muodostuu keskustelun pääaiheeksi, vaikka vahvaa yhteyttä melun äänitason ja melun häiritsevyyden välillä ei löytynyt. Jos tuulivoimaloita kohtaan ilmenee vastustusta, melua käytetään argumenttina mutta vastustus johtuu todennäköisesti muista tekijöistä kuin melusta. Kirjoittajien mielestä tuulivoimala-alueiden lähiasukkaille on syytä kertoa kaikki mahdollinen tieto alueelle muodostuvista äänitasoista ja alueella sovellettavista äänitason ohjearvoista (taajama, vapaa-ajan alue, yöajan vs. päiväajan ohjearvo), jotta asukkaille syntyy totuudenmukainen kuva kaikesta siitä, mitä meluntorjunnan eteen on tehty. Jos asukkaille jää sellainen käsitys, että meluntorjunta on jäänyt puolitiehen, melun häiritsevyys todennäköisesti kasvaa. Tästä ei kuitenkaan ollut esittää tieteellistä näyttöä, vaan viitattiin aiempaan tutkimukseen (Fields 1993).

Myöhemmin julkaistut tutkimukset vahvistavat useimpia Wolsinkin havaintoja.

Pedersen ja Nielsen (1994) laativat tanskankielisen raportin koskien Tanskan tuulipuisto-alueilla tehtyä tutkimusta. Siellä esitetään yksityiskohtaisemmin mittaus- ja kyselymenetelmää sekä lisäksi riippuvuuksia melun kokemisen ja tuulivoimalamelun äänitason (ja tuulivoimalan etäisyyden) välillä.

4.3 Pedersen ja Persson Waye (2004)

Pedersenin ja Persson Wayen (2004) tavoitteena oli määrittää, miten tuulivoimalamelun häiritsevyys riippuu tuulivoimaloiden äänitasosta. Lisäksi tavoitteena oli määrittää, mitkä väliin tulevat muuttujat vaikuttavat melun häiritsevyyteen. Tutkimus on ensimmäinen tuulivoimalamelun terveysvaikutuksia koskeva epidemiologinen tutkimus, jonka tulokset on julkaistu tieteellisessä vertaisarvioidussa lehdessä.

Tutkimus tehtiin Etelä-Ruotsin alavilla mailla noin 30 km² kokoisella alueella, johon sijoittui 16 tuulivoimalaa. Kysely tehtiin paperilla ja siihen vastasi 68 % kyselyn saaneista (Taulukko 4.1). Äänitasot asukkaiden tontilla määritettiin mallintamalla. Äänitaso asukkaiden tontilla määritettiin mallintamalla. Laskelmissa käytettiin lähtötietona valmistajan antamaa melupäästöarvoa, joka on mitattu myötätuuleen tuulen nopeuden ollessa 8 m/s kymmenen metrin korkeudella. Kysely tehtiin touko-kesäkuussa, jolloin ulkona oleskeltiin paljon. Meluvaikutuksia raportoitiin pääosin ulkona tapahtuvien kokemusten perusteella eikä sisällä koettua melua käsitelty kuin maininnan tasolla johtuen luultavasti siitä, että häiritsevyys oli selvästi vähäisempää sisätiloissa. Tämä puute on onneksi korjautunut myöhemmissä samasta aineistosta laadituissa artikkeleissa.

Tuulivoimaloissa eniten häiritsi lavoista aiheutuva melu (16 % vastaajista). Tämän jälkeen eniten häiritsi muuttunut näkymä (14 %), melu koneistosta (9%), varjot lavoista (9 %) ja heijastukset lavoista (7 %). Häiritsevyyttä koettiin eniten oltaessa ulkosalla rentoutumassa tai yöaikaan vietettäessä iltaa esimerkiksi grillattaessa. Vastaajista 54 % koki, että melun voi kuulla paremmin, kun tuuli kävi tuulivoimalasta asuntoon päin (myötävirtatilanne). Vastaajista 9 % kuuli melun paremmin, kun tuuli kävi turbiinia kohti.

Kuvassa 4.2 on esitetty tutkimuksen päätulos, joka perustuu taulukon 4.4 mittariin. Siinä esitetään, miten melu koetaan asunnon pihamaalla eri äänitasoilla. Kun äänitaso kasvaa, ääni havaitaan paremmin. Kaikista vastaajista 15 % koki äänen melko tai erittäin häiritseväksi. Kun äänitaso ylittää 40 dB, käytännössä kaikki havaitsivat jo äänen ja häiritseväksi äänen kokee 45 % asukkaista. Tutkimuksessa havaittiin merkitsevä positiivinen yhteys äänitason ja häiritsevyyden välille. Äänitasoalueella >40 dB vastauksia saatiin kuitenkin vain 25 ihmiseltä ja 45 % häiritsevyyssaste muodostui vain 11 vastaajan kokemuksista. Tämän vuoksi yli 40 dB:n äänitasoalueen tuloksista ei voi tehdä kovin luotettavia johtopäätöksiä. Tutkimusta täydennettiinkin pian tämän jälkeen laajemmalla tutkimuksella (luku 4.4).

Vastaajia pyydettiin luonnehtimaan tuulivoimaloiden ääntä valitsemalla valmiista listasta ääntä kuvaavia adjektiiveja. Melun häiritsevyys oli yhteydessä seuraaviin luonnehdintoihin (käännökset on tehnyt kirjoittaja):

- huiskiva/viuhtova (*swish*, 0.72)
- viheltävä (*whistle*, 0.64)
- sykkivä/tykyttävä (*pulsating/throbbing*, 0.45)
- kaikuva (*resounding*, 0.48)
- raapiva (*scratching*, 0.40)
- soinnikas (*tonal*, 0.34)
- pientaajuinen (*low frequency*, 0.29) ja
- läpäyttävä (*lapping*, 0.26).

Sulkeissa on esitetty yhteyden voimakkuutta kuvaava korrelaatiokerroin. Sen arvo voi olla 0 (ei yhteyttä) ja 1 (täydellinen yhteys) välillä.

Noin 7 % vastaajista koki tuulivoimaloiden melun häiritsevän sisätiloissa. Melun häiritsevyyttä sisällä raportoi siis noin puolet vähemmän kuin ulkona. Tuloksia äänitasoluokittain ei tutkimus esittänyt. Ulkona vallitsevan tuulivoimalan äänitason ja sisätilassa koetun häiritsevyyden välillä oli kuitenkin merkitsevä yhteys ($p < .001$).

Tuulivoimalan melu häytti niin harvojen unta, ettei aineiston pohjalta voitu tehdä luotettavaa tilastoanalyysiä. Vastaajista 23 % (80 henkilöä) raportoi unen häiriintyvän melusta. Melulähdettä ei kuitenkaan kysymyksessä rajattu tuulivoimaloihin vaan mihin tahansa meluun. Melun lähteiksi mainittiin avoimissa vastauksissa tieliikenne, raideliikenne, naapurit ja tuulivoimalat. Niistä 128 henkilöstä, jotka asuivat melualueella >35 dB, noin 16 % (20 hlöä) kertoi tuulivoimaloiden melun häyttävän unta.

Melun häiritsevyys ulkona oli tuulivoimaloiden äänitasoa paremmin yhteydessä asenteeseen maiseman muutosta kohtaan ja asenteisiin tuulivoimaa kohtaan. Jos äänitaso on korkea, asenne maiseman muutosta kohtaan (*attitude to visual impact*) on negatiivinen ja asenne tuulivoimaa kohtaan ylipäättään (*attitude to wind turbines*) on negatiivinen, on riski melun häiritsevyydelle erittäin korkea. On huomattava, että tämä tutkimus tehtiin alavalla alueella, jossa jokaisesta asunnosta oli suora näkymä tuulivoimalaan tai useaan sellaiseen.

Merkittävää on, että yksilöllinen meluherkkyys ei ollut läheskään samassa mitassa yhteydessä melun häiritsevyyteen kuin edellä mainitut asennetekijät.

Tuulivoimaloiden melusta häiriintyvät raportoivat naapurustossa tapahtuneen enemmän negatiivisia muutoksia kuin he, jotka eivät häiriintyneet melusta. Lisäksi sama ryhmä koki vähän mahdollisuuksia vaikuttaa paikallishallintoon. Tästä herää tarve jatkotutkimukselle: voisiko melun häiritsevyyttä lieventää sillä, että paikallishallinto ja rakennuttajat ottaisivat asukkaat huomioon paremmin, kun tuulivoimala-alueita kaavoitetaan ja rakennetaan?

Tutkimuksen pohjalta ei voida arvioida, oliko tuulivoimaloiden kaavoitus- ja rakentamisprosessi hoidettu asukkaita huomioonottavasti vai ei.

Tutkimuksen pohdintaosassa esitettiin kuva 4.3, jonka tarkoitus oli vertailla tuulivoimalamelun häiritsevyyttä muiden melulajien häiritsevyyteen. Kuva on virheellinen kahdesta syystä.

1. Tuulivoimaloita koskeva melusuure on A-painotettu äänitaso kun taas muita melulajeja on kuvattu melun päiväyötasoilla (DNL).
2. Tuulivoimalamelun häiritsevyyttä koskeva käyrä perustuu melukokemuksiin ulkona kun taas lento-, tie- ja raideliikennemeluja koskevat käyrät koskevat pääasiassa sisätiloissa koettua häiritsevyyttä. Sisällä äänitaso on 15-30 dB alhaisempi kuin ulkona, joten liikennemelulajien häiritsevyyssäyrät alkavat nousta 15-30 dB myöhemmin kuin tuulivoimalamelun häiritsevyys.

Tuulivoimaloita koskevaa käyrää ei olisi saanut alun perinkään julkaista liikennemelukäyrien kanssa samassa kuvassa, koska liikennemelulajien käyrät koskevat eri muuttujaa sekä vaak- että pystyakselilla. Pedersen osallistuikin myöhemmin laajempaan tutkimukseen, jossa tämä käyrä korvattiin. Tätä käsitellään luvussa 4.11.

Tutkimusta tulisi lisätä alueilla, jossa tuulivoimalamelun äänitaso ylittää 40 dB L_{Aeq} , jotta voitaisiin saada luotettavampaa tietoa myös melun terveysvaikutuksista sisätiloissa.

4.4 Pedersen ja Persson Waye (2007)

Pedersen ja Persson Waye (2007) toteuttivat myös toisen tutkimuksen Ruotsissa. Sen tavoitteena oli parantaa ja täydentää edellistä tutkimusta keräämällä aineistoa monimuotoisemmista ympäristöistä, kuten esikaupungeista ja maaseudulta sekä tasaiselta ja mäkiseltä alueelta. Tällöin mm. taustamelu, asukkaiden asenteet asumisympäristöä kohtaan ja näkyvyys tuulivoimaloihin voisivat vaihdella ensimmäistä tutkimusta enemmän (Taulukko 4.1).

Kyselymenetelmä pidettiin pääosin samana mutta tilastollisessa analysoinnissa käytettiin enemmän summamuuttujia, jotta tilastollinen voima olisi suurempi.

Julkaisussa raportoitiin vain meluvaikutuksia ulkona oltaessa. Sisällä koettua melua ei raportoitu. Se huomioitiin kuitenkin myöhemmässä tutkimuksessa, johon koottiin sisäpuolisen melun häiritsevyyttä koskevat havainnot kolmesta tutkimuksesta (*Janssen ym.* 2011).

Tuulivoimalamelun havaitsi ulkona 39 % vastanneista (n=307). Tuulivoimalamelun koki häiritseväksi ulkona 2.3 % vastanneista (n=31). Tuulivoimalamelun havaitsemisen ja häiritsevyyden riippuvuutta äänitasosta on esitetty kuvassa 4.4. Häiritsevyyttä raportoitiin selvästi vähemmän kuin edellisessä tutkimuksessa (kuva 4.2), vaikka tutkimus tehtiin samoilla äänitasovyöhykkeillä mutta suuremmalla otoksella.

Tuulivoimalamelun havaitseminen oli selvästi yhteydessä äänitason kanssa. Myös häiritsevyyksi oli yhteydessä äänitason kanssa. Yhteyttä ei voida pitää kuitenkaan käytännön kannalta merkityksellisenä. Häiritsevyys näyttäisi kuvan 4.4 mukaan kasvavan, kun äänitaso ylittää 40 dB L_{Aeq} . Ero luokkien ">40 dB" ja "37.5-40 dB" häiritsevyyssarvojen välillä ei kuitenkaan ole tilastollisesti merkitsevä ($p>.05$).

Äänitasoalueella ">40 dB" vastauksia antoi 20 ihmistä ja 15 % (3 ihmistä) raportoi melun olevan häiritsevää. Näin pienen vastaajamäärän pohjalta ei voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Sen sijaan on ilmeistä, että alle 40 dB:n äänitasoilla melun häiritsevyyttä ei juurikaan esiinny.

Tutkimus toi esiin tekijöitä, jotka voisivat selittää tuulivoimalamelun havaitsemisen äänitasosta riippumatta. Työssäkäynti, asuminen omakotitalossa, asuminen alhaisen taustamelun alueella (perustui itsearviointiin) ja vähintään yhden voimalan näkeminen asunnosta lisäsivät riskiä havaita tuulivoimalan melua. Kirjoittajien mukaan asukkaan työssäkäynti voisi aiheuttaa suuremman palautumisen ja elpymisen tarpeen kotona oltaessa kuin jos ei käytäisi työssä. Tätä kautta odotukset ympäristöolosuhteita kohtaan voisivat olla korkeammat työssä käyvillä. Ympäristön elvyttävyyden merkitystä hyvinvoinnille käsiteltiin artikkelin pohdinnassa erittäin laajasti tieteellisiin tutkimuksiin nojautuen. Tätä tärkeää aihetta koskettaa tarkemmin tutkimus, joka esitetään myöhemmin tässä luvussa (*Pedersen ja Persson Waye* 2008).

Samanlainen ei-meluperäisten riskitekijöiden analyysi tehtiin myös tuulivoimalamelun häiritsevyydelle, vaikkakin häiritsevyyttä raportoi vain 2.3 % vastanneista. Alhainen itsearvioitu taustamelu, itsearvioitu meluherkkyys, negatiivinen asenne tuulivoimaloihin kohtaan ja negatiivinen asenne tuulivoimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan kasvattivat melun häiritsevyyden kokemisen riskiä ulkona.

On huomattavaa, että tässä tutkimuksessa äänitaso ei korreloinut minkään terveyttä tai hyvinvointia mittaavan muuttujan kanssa (häiritsevyys, itsearvioitu terveydentila, negatiiviset tunteet, hyvinvointi ja unen laatu). Muuttujat korreloivat kylläkin keskenään: melun häiritsevyys korreloi unenlaadun ja negatiivisten tunteiden kanssa. Tällaiset yhteydet eivät

kuitenkaan esitä syy–seuraussuhteita eli sitä, että melu olisi syypää unenlaadun heikkene-miseen tai negatiivisiin tunteisiin.

4.5 Pedersen ym. (2007) haastattelututkimus

Pedersenin ja Persson Wayen (2004) tutkimuksessa havaittiin, että vaikkakin tuulivoima-loiden äänitasolla ja tuulivoimalamelun häiritsevyydellä havaittiin tilastollisesti merkitsevä yhteys (kuvat 4.2 ja 4.4), oli selvää, että vastausten varianssi oli yksittäisellä äänitasolla suuri. Se osoittaa, että väliin tulevat muuttujat voivat selittää häiritsevyyttä jopa enemmän kuin äänitaso.

Pedersen ym. (2007) kutsuivat haastateltavakseen vapaaehtoisia, jotka olivat myös vas-tanneet *Pedersenin ja Persson Wayen* (2004) kyselytutkimukseen. Haastatteluilla haluttiin saada syvällisempi käsitys asukkaiden mielipiteistä, koska kyselytutkimukset eivät aina suoraan vastaa niihin reaktioihin, joita asukkailla on. Lisäksi haastattelututkimuksella halut-tiin myös kehittää uusia malleja siitä, minkä vuoksi ihmisten reaktiot tuulivoimaloita ja nii-den melua kohtaan ovat vaihtelevia.

Tämä tutkimus ei käy esiin Taulukosta 4.1, koska kysymyksessä on laadullisin menetel-min toteutettu haastattelututkimus.

Haastatteluja tehtiin, kunnes uutta informaatiota ei enää vastaajilta saatu. Viisitoista oli tämän kannalta riittävä haastateltavien määrä. Vapaaehtoiset valittiin huolellisesti siten, että saataisiin kattava kokonaiskuva tuulivoimaloiden kokemisesta.

- Kaikki vastaajat sijaitsivat alle 600 metrin päässä voimaloista.
- Yli puolet asui äänitasoalueella yli 37 dB L_{Aeq} , koska tutkimuksessa haluttiin ym-märtää erityisesti melun kokemiseen vaikuttavia ei-akustisia tekijöitä.
- Vastaajiksi valittiin eri-ikäisiä ja eri ammateissa toimivia.

Haastatellut kokivat kolmenlaista haittaa voimaloista: melu, väike ja pyöriminen. Haasta-tellut voitiin jakaa selvästi kahteen luokkaan (luokkien nimet Hongiston käännöksiä):

- neutraalisti suhtautuvat.
- negatiivisesti suhtautuvat

Neutraalisti suhtautuvat asukkaat kokivat maaseudun taloudellisen kasvun alueeksi ja tek-nisten innovaatioiden hyödyntämispaikaksi. Koska voimalat eivät sijaitse heidän mailiaan, naapurimaiden omistajilla on oikeus liiketoimintaan omalla maallaan. He kokivat, että jos ihminen valitsee maaseudun asuinalueekseen, on hyväksyttävä tyypilliset maaseudun häi-riöt kuten karpäset, lannan hajut ja esimerkiksi tuulivoimaloiden väkkeit ja melut. "Jos voimalat ovat oman reviiirin ulkopuolella, niistä ei ole minulle haittaa." Neutraalisti suhtau-tuvat pystyivät olemaan välittämättä voimaloista: ilmiselvästi he kykenivät hallitsemaan reaktioitaan tuulivoimaloita kohtaan vaikkakaan he eivät voineet hallita itse voimaloiden melua tai pyörimistä. He näkivät, että negatiivisesti suhtautuvilla on liian korkeat odotukset asuinympäristöstään. Samoin kuin negatiivisesti suhtautuvat, heidän eivät kokeneet voi-vansa vaikuttaa tuulivoimaloiden sijoittamiseen alueelle. He olivat vakuuttuneita siitä, että viranomaiset antaisivat rakennuslupan vaikka joku alueella valittaisi. He suhtautuivat voi-maloihin neutraalisti tai pitivät niitä rumina mutta välttämättöminä.

Negatiivisesti suhtautuvat kokivat maaseudun paikaksi, jossa on oltava hiljaista ja rauhal-lista ja siellä on voitava elpyä ja rentoutua ilman häiriötekijöitä. He kokivat, että voimalat haittasivat heidän yksityisyyttään ja tunkeutuivat heidän reviiirilleen. He kokivat avutto-

muutta, vaikutusmahdollisuuksien puuttumista, hallinnan tunteen puutetta, epäoikeudenmukaisuuden tunnetta ja sitä, että heitä ei uskota. Negatiivisesti suhtautuvat olivat usein investoineet asuinympäristöönsä, kuten asunnon ja pihan sisustukseen sekä aikaa että rahaa, ja hakivat sillä korkeampaa elämänlaatua ja omaisuuden arvon pysyvyyttä. Heille koti oli erittäin tärkeä henkilökohtaisen identiteetin ja itseilmaisun kannalta. Voimaloiden koettiin rikkovan idylliä ja tunkeutuvan omalle reviirille. Erityisesti reviirit rikkovaksi koettiin se, että ääni kuuluu makuuhuoneeseen. Negatiivisesti suhtautuvat kokivat vihaa, ahdistuneisuutta ja väsymystä. Haastatteluissa jotkut myös itkivät kertoessaan voimaloiden tuottamasta pettymyksestä. Negatiivisesti suhtautuvat eivät kyenneet suojaamaan itseään negatiivisilta tunteiltaan ja tämä aiheutti elämänlaadun ja hyvinvoinnin merkittävää heikkenemistä. He myös kokivat epäreiluksi sen, että valtio tukee uusiutuvan energian tuotantoa naapurimailla sillä kustannuksella, että he joutuvat kärsimään. He kokivat, että viranomaiset ja poliitikot kohtelivat heitä epäkunnioittavasti, kun he valittivat tuulivoimaloiden haittoja.

Coping tarkoittaa pyrkimystä käyttäytyä niin, että ulkoisen tai sisäisen tekijän aiheuttama haitta pienenee. Selviytymiskeinot voivat olla fyysisiä, psykologisia tai sosiaalisia. Jotkut asukkaat käyttivät coping-keinoja meluhaitan vähentämiseksi. Coping-keinoja käytettiin enemmän negatiivisesti suhtautuvien parissa. Yleisiä selviytymiskeinoja olivat mm.

- fyysisten muutosten tekeminen esimerkiksi puutarhaan
- huonejärjestyksen muuttaminen
- valittaminen viranomaiselle tai voimalan omistajalle (suurin osa voimaloista oli yksityisessä omistuksessa)
- siirtyminen ulkoa sisätiloihin

Valittaminen viranomaisille tai voimaloiden maan omistajille koettiin usein jo etukäteen turhaksi, joten selviytymiskeinona valittaminen oli irrationaalinen. Siitä huolimatta valituksia tehtiin vaikka keskustelut olivat stressaavia ja epäluottamus viranomaisia kohtaan kasvoi. Valittamista voidaan pitää yrityksenä lisätä hallinnan tunnetta.

4.6 Pedersen ja Persson Waye (2008)

Pedersenin ja Persson Wayen (2008) tavoitteena oli selvittää tuulivoimaloiden vaikutus asuinympäristön elvyttävyyteen. Aineistona käytettiin kahta ruotsalaista tutkimusaineistoa, jonka kirjoittajat olivat keränneet (*Pedersen ja Persson Waye*, 2004, 2007, Taulukko 4.1). Meluvaikutuksia kartoitettiin vain ulkona oltaessa eikä sisällä koettua melua käsitelty.

Kuvista 4.2 ja 4.4 yhdistetty aineisto on esitetty kuvassa 4.5. Kuvasta saa hyvän käsityksen siitä, miten suuria yksilöllisiä eroja tuulivoimalamelun kokemisessa on. Esimerkiksi korkeimmassa äänitasoluokassa 41 dB havaitaan, että

- noin 29 % kokee melun erittäin häiritseväksi,
- noin 52 % ei koe melua lainkaan häiritseväksi ja
- noin 11 % ei edes havaitse tuulivoimalan ääntä.

Melko ja erittäin häiritseväksi ääntä raportoivien osuus kasvaa äänitason noustessa äänitason 37 dB L_{Aeq} yläpuolella mutta kasvu ei ole tilastollisesti merkitsevä. Tähän on syynä pieni vastaajamäärä suurimmissa äänitasoluokissa.

Kaikki, jotka raportoivat tuulivoimalamelun olevan ulkona melko tai erittäin häiritsevää, näkivät voimalan asunnostaan.

Tutkimus vahvistaa aiemman löydön siitä, että tuulivoimalamelun häiritsevyys ulkona oli yhteydessä negatiivisiin asenteisiin tuulivoimaloita ja niiden maisemavaikutuksia kohtaan.

Häiritsevyyttä melko tai erittäin paljon raportoineiden parissa esiintyi enemmän stressioireita ja jännittyneisyyttä. Tällä voi olla suoria tai epäsuoria terveysvaikutuksia. Syy-seuraus-suhdetta ei kuitenkaan voitu tässä osoittaa eli sitä, johtuvatko oireet melun häiritsevyydestä.

Vastaajat, jotka olivat muuttaneet maalaisympäristöön kaupungista olivat herkempiä melulle kuin he, jotka olivat aina asuneet maalla. Tämä voi indikoida sitä, että maalaisympäristöön hakeutuvat pitävät elvyttävää luontoympäristöä tärkeämpänä kuin maalaisympäristössä pitkään asuneet paikallisasukkaat ja tämän vuoksi maalaisympäristöstä luopuminen (tuulivoimalan rakentaminen) voisi tuottaa enemmän haittaa heille kuin paikallisasukaille.

Tutkimus esittää lukuisia yhteyksiä, jotka selittävät melun häiritsevyyttä äänitasoa paremmin. Korrelaatiokertoimet ovat kuitenkin hyvin alhaisia, eikä niistä uskalla vetää yleisiä johtopäätöksiä.

Pohdinnassa esitetään aiemman tieteellisen tutkimuksen valossa hyödyllisiä ja loogiselta tuntuvia hypoteeseja siitä, mikä voi selittää tuulivoimaloiden häiritsevyyden kokemista. Selitykset voidaan tiivistää seuraavaan:

Luonnonympäristön tasapainon voidaan kokea heikentyvän, kun sinne sijoitetaan ei-luonnollinen ja visuaalisesti hyvin erottuva komponentti, kuten teollinen tuulivoimala. Muutoksella arvioidaan olevan heikentävä vaikutus ympäristön elvyttävyyden kokemiseen. Tämä taas vähentää ympäristötyytyväisyyttä ja voi heijastua mm. melun häiritsevyyden kokemuksena. Koska voimalan lavat liikkuvat koko ajan, on ympäristön visuaalisen puolen huomioimatta jättäminen vaikeaa, koska näköaisti automaattisesti takertuu liikkeeseen. Tämä häiriötekijä voi lisätä kokemusta siitä, että ympäristö ei olisi elvyttävyyttä ajatellen paras mahdollinen.

Kursivoitu teksti perustuu pohdintaosan hypoteeseihin eikä sille löydy suoraa tieteellistä todistus pohjaa. Tulokset kuitenkin osoittavat, että voimalan näkeminen lisää häiritsevyyden riskiä, ja yhteys visuaaliseen ympäristöön on tätä kautta olemassa.

4.7 Pedersen ja Larsman (2008)

Pedersenin ja Larsmanin (2008) tavoitteena oli selvittää tarkemmin asenteiden vaikutuksia melun koettuun häiritsevyyteen ulkona. Tutkimus pohjautui kahteen aiemmin kerättyyn ruotsalaiseen aineistoon (*Pedersen ja Persson Waye*, 2004 ja 2007; Taulukko 4.1).

Tutkittuja asenteita olivat:

- yleinen asenne voimaloita kohtaan (myöh: yleinen asenne) ja
- asenne tuulivoimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan (myöh: maisema-asenne).

Asennemuuttujat muodostettiin kyselyn kuudesta mittarista, eikä niitä tässä toisteta.

Melun häiritsevyys ulkona korreloi

- äänitason kanssa ($r=0.37$)
- yleisen asenteen kanssa ($r=0.30$) ja
- maisema-asenteen kanssa ($r=0.63$).

Melun häiritsevyys ei riippunut iästä tai sukupuolesta.

Koska ruotsalaiset aineistot oli järkevästi koottu maanmuodoiltaan ja asukastiheydeltään erilaisilta alueilta, voitiin asenteiden ja äänitason yhteyttä melun häiritsevyyteen testata kuudessa eri ryhmässä käyttäen rakenneyhtälömalleja (*structural equation models*). Ryhmät koottiin seuraavalla tavoin:

- Tuulivoimalan näkyminen: vastaajat jaettiin kahteen ryhmään sen mukaan, näkyykö voimala asuntoon tai pihamaalle tai ei.
- Alueen maanmuoto: vastaajat jaettiin kahteen ryhmään sen mukaan, sijaitseeko asunto tasaisella vai mäkisellä alueella.
- Asuinalue: vastaajat jaettiin maaseudulla ja taajamassa asuviin.

Rakenneyhtälömallien tulokset on pelkistetty kuvaan 4.6. Niiden pohjalta voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Jos tuulivoimala näkyy asuntoon, on maisema-asenne voimakkaimmin yhteydessä melun häiritsevyyteen. Äänitaso on heikosti yhteydessä melun häiritsevyyteen verrattuna maisema-asenteeseen.
- Jos voimalaa ei näy, maisema-asenteen merkitys edellistä pienempi mutta edelleenkin se on yhteydessä melun häiritsevyyteen voimakkaammin kuin äänitaso. Tämä johtunee siitä, että asukkaat kuitenkin näkevät voimalat liikkeessaan asuntoon ja sieltä pois.
- Tasaisella alueella, jossa voimalat erottuvat silmiinpistävästi ympäristöstä, maisema-asenne on yhteydessä melun häiritsevyyteen erittäin voimakkaasti. Äänitaso on yhteydessä melun häiritsevyyteen merkittävästi heikommin kuin maisema-asenne.
- Mäkisellä alueella, jossa voimalat eivät erotu ympäristöstä niin silmiinpistävästi, maisema-asenteen ja melun häiritsevyyden välillä ei ole enää yhteyttä. Ainoastaan äänitaso on yhteydessä melun häiritsevyyteen mutta yhteys on heikko.
- Maisema-asenne on yhteydessä melun häiritsevyyteen yhtä voimakkaasti, ja huomattavasti äänitasoa voimakkaammin, niin maaseudulla kuin taajama-alueella.
- Yleinen asenne ei ole yhteydessä melun häiritsevyyteen missään kuvan 4.6 kuudesta ryhmästä. Sen sijaan yleinen asenne ja maisema-asenne ovat voimakkaasti yhteydessä keskenään kaikissa ryhmissä.

Mallit olettavat asenteiden vaikuttavan melun häiritsevyyteen eikä päinvastoin. Mallit eivät kuitenkaan todista syy-seuraus-suhteita. On siis mahdollista, että melun häiritsevyys selittää maisema-asenteen tai että häiritsevyys ja maisema-asenne vahvistavat toisiaan molempiin suuntiin. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä. Maisema-asenteet ovat olemassa jo ennen voimaloiden pystyttämistä eikä melun alkaminen ole niiden aikaansaaja. Sama koskee yleistä asennetta. Näin ollen kuvan 4.6 tuloksia voidaan pitää tärkeänä edistysaskeleena, kun halutaan ymmärtää melun häiritsevyyteen vaikuttavia tekijöitä. Äänitaso yksin ei selitä melun häiritsevyyttä missään tilanteessa.

On huomattava, että kuvan 4.6 yhteydet perustuvat ruotsalaiseen aineistoon, jossa tuulivoimaloiden äänitasot olivat välillä 29-42 dB L_{Aeq} . On mahdollista, että äänitason merkitys melun häiritsevyyden selittäjänä on suurempi, jos olisi tarkasteltu pelkästään asukkaita, joiden pihamaalla äänitaso ylittää 40 dB. Tällainen analyysi ei kuitenkaan ollut ruotsalaisella aineistolla mahdollista.

Tutkimuksen pohdinnassa käytiin läpi kirjallisuutta, jonka mukaan silmiinpistävät ei-luonnolliset rakennetut elementit vaikuttavat negatiivisesti alueen esteettiseen arvioon. Esimerkiksi puhelin- ja sähköpylväiden arvioitiin olevan esimerkkejä tällaisista elementeistä. Tuulivoimalat vertautuvat jossain määrin näihin, paitsi että voimaloihin yhdistyy liike, jolloin elementti muistuttaa olemassaolostaan jatkuvasti.

4.8 Pedersen ym. (2009)

Pedersenin ym. (2009) tavoitteena oli lisätä tutkimustietoa tuulivoimalamelun vaikutuksista toteuttamalla ruotsalaisten tekemä tutkimus Hollannissa. Erityisesti haluttiin lisätietoa tuulipuistoista, kun aikaisemmat tutkimukset oli tehty enimmäkseen yksittäisten tuulivoimaloiden lähellä. Tutkimukseen haettiin alueita, jossa on vähintään kaksi voimalaa alle 500 metrin päässä toisistaan. Mukaan valittiin asuinalueita, jotka edustavat maaseutua, maaseutua päätien varrella ja taajama-alueita. Tavoitteena oli selvittää, miten eri melualueilla reagoidaan tuulivoimaloiden meluun.

Vastausprosentti oli merkittävästi pienempi (37 %) kuin ruotsalaisissa tutkimuksissa (58 ja 68 %) minkä vuoksi tämän tutkimuksen tuloksiin pitää suhtautua suuremmalla varauksella (Taulukko 4.1).

Tässä tutkimuksessa raportoitin ensimmäisen kerran tuloksia melun kokemisesta erikseen sekä ulkona että sisällä.

Melun häiritsevyys ulkona ja sisällä on esitetty kuvissa 4.7-4.8. Käyrien muodot ovat samansuuntaisia. Melu koettiin kuitenkin häiritsevämpänä ulkona kuin sisällä.

Silmiinpistävää on havainto, jonka mukaan häiritsevyys sekä sisällä että ulkona pieneni äänitasoluokassa ">45 dB" verrattuna alhaisempaan äänitasoluokkaan "40-45 dB". Tätä selitettiin sillä, että suurimman äänitasoluokan alueilla oli paljon henkilöitä, jotka saivat taloudellista hyötyä voimaloista.

Toinen silmiinpistävä havainto on, että myös melun havaitseminen sisätiloissa väheni siirtyessä luokasta "40-45 dB" luokkaan ">45 dB". Tähän tutkimus ei antanut selitystä.

Lähes 70 % asukkaista raportoi, että melu on keskimääräistä voimakkaampaa, kun tuuli käy voimaloiden suunnalta (myötätuulitilanne). Vain 5 % koki tilanteen olevan päinvastainen. Tämä on linjassa ruotsalaisten tutkimusten kanssa.

Asukkaista 40 % koki melun olevan voimakkaampaa yöllä kun taas 20 % koki asian päinvastoin. Loput vastaajista joko kokivat melun voimakkuuden olevan riippumaton ajankohdasta tai eivät osanneet sanoa.

Tutkimuksessa tehtiin erittäin merkittävä uusi havainto, jonka mukaan taloudellinen hyötyminen tuulivoimaloista vaikuttaa melun häiritsevyyteen (kuva 4.9). Taloudellinen hyöty ei kuitenkaan vaikuttanut lainkaan voimalan melun havaitsemiseen. Kaikista tutkimukseen vastanneista 100 (14 %) sai taloudellista hyötyä voimaloista joko omistamalla niistä osan tai saamalla esimerkiksi alennusta sähkön hinnassa. Suurin osa näistä sadasta sijoittui kahteen korkeimpaan äänitasoluokkaan (>40 dB). Vain kolme näistä sadasta raportoi melun häiritsevyyttä.

Tutkimuksessa saatiin myös lisätukea aiemmalle tulokselle, jonka mukaan voimalan näkyminen vaikuttaa melun kokemiseen. Häiritsevyyttä raportoineista lähes kaikki muutamaa lukuun ottamatta näkivät voimalan asunnostaan. Tuulivoimalan näkeminen myötävaikuttaa

melun havaitsemiseen merkittävästi ja aikaansaa häiritsevyyden kokemuksen (kuva 4.10). Häiritsevyys käytännössä poistuu, jos voimalaa ei näy.

Ruotsalaisten tutkimusten tapaan tuulivoimalan ääni havaittiin helpoiten maaseudulla, jos lähistöllä ei ollut tietä ja taustamelu oli näin ollen alhainen.

Melun häiritsevyys oli kuitenkin ruotsalaisia tutkimuksia voimakkaammin yhteydessä äänitasoon ($r=0.51$). Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että äänitasoluokista "yli 40 dB" saatiin huomattavasti enemmän vastauksia kuin Ruotsissa ja siitä, että melun häiritsevyyttä alkaa laajamittaisemmin esiintyä äänitasoilla yli 40 dB L_{Aeq} . Myös asenteet korreloivat melun häiritsevyyden kanssa vähemmän kuin ruotsalaisissa tutkimuksissa: asenteet tuulivoimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan ($r=0.29$) ja yleinen asenne tuulivoimaloita kohtaan ($r=0.24$).

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan esittää rajausta, jonka mukaan kuvan 4.6 yhteydet olisivat voimassa vain, kun äänitason on alle 40 dB. Tätä korkeammilla äänitasoilla äänitaso alkaa olla voimakkaammin yhteydessä melun häiritsevyyteen.

Tutkimuksessa julkaistiin tuulivoimaloiden äänitaso-häiritsevyys-käyrä ja verrattiin sitä eri liikennemelulajien vastaaviin käyriin (kuva 4.11). Kuva on virheellinen, koska tuulivoimaloita on arvioitu ulkona ja muita melulajeja pääasiassa sisätiloissa. Liikennelajien melun häiritsevyys on merkittävästi pienempi, koska julkisivurakenne vaimentaa ääntä vähintään 15 desibeliä. Lisäksi tuulivoimaloita koskevista havainnoista on poistettu sata vastaajaa, jotka saivat taloudellista hyötyä voimaloista, koska heitä melu ei häirinnyt käytännössä lainkaan. Vastaavaa poistoa ei ollut tehty liikennemelulajien kohdalla. Poiston seurauksena häiritsevyyttä raportoineiden osuudet ovat esimerkiksi äänitasoluokassa "40-45 dB" 6 % suu-rempiä. Käyriä koskee siksi sama kritiikki kuin kuvaa 4.3 eikä kuvan 4.11 äänitaso-häiritsevyys-käyriä tule ottaa huomioon, kun arvioidaan tuulivoimaloiden meluvaikutuksia suhteessa muihin melulajeihin. Luotettavampi melulajien vertailu esitetään luvussa 4.11.

4.9 Pedersen ym. (2010)

Monesti tuulivoimaloita sijoitetaan liikennereittien varrelle, jotta tuulivoimaloiden meluhaitat olisivat pienempiä. Modernin tuulivoimalan (3 MW) äänitehotaso (L_{WA}) vastaa moottoritiellä etenevän henkilöauton äänitehotasoa. Tieliikennemelun voisi siksi kuvitella peittävän tuulivoimaloiden melua.

Pedersenin ym. (2010) tavoitteena oli selvittää, peittääkö tieliikennemelu tuulivoimalamelun ääntä siinä määrin, että se tulisi ottaa huomioon tuulivoimaloita sijoitettaessa.

Aineistona käytettiin Hollannissa tehtyä tutkimusta, joka käsiteltiin edellä (Taulukko 4.1). Aineisto jaettiin kolmeen ryhmään sen mukaan, kumpi äänilajeista oli melulaskelmien mukaan dominoiva:

- Ryhmä 1 - tuulivoimalamelu dominoi: vastaajat, jotka altistuivat tuulivoimaloiden äänitasolle, joka oli vähintään 5 dB korkeampi kuin tieliikenteen äänitaso
- Ryhmä 2 - kumpikaan melulaji ei dominoi: vastaajat, jotka altistuivat tuulivoimaloiden äänitasolle, joka oli korkeintaan 5 dB korkeampi tai korkeintaan 5 dB hiljaisempi kuin tieliikenteen äänitaso
- Ryhmä 3 - tiemelu dominoi: vastaajat, jotka altistuivat tuulivoimaloiden äänitasolle, joka oli vähintään 5 dB hiljaisempi kuin tieliikenteen äänitaso

Kyselyn muuttujista muodostettiin laajempia faktorimuuttujia, jotta tulosten käsittely olisi helpompaa. Faktorimuuttujan keskiarvo on nolla ja keskihajonta 1. Jos arvo on nollaa pienempi, on reaktio keskimääräistä pienempi. Jos arvo on nollaa suurempi, on reaktio keskimääräistä suurempi.

Odotusten mukaan tuulivoimaloiden melun kuulivat parhaiten Ryhmän 1 asukkaat (Kuva 4.12). Sen sijaan häiritsevyyden kohdalla ryhmällä ei ollut juurikaan merkitystä.

Yleisesti pätee se tosiasia, että signaalikohinasuhteen pienentäminen vaikeuttaa signaalin havaitsemista. Tutkimus toi vahvistuksen tälle väitteelle. Sen sijaan häiritsevyyteen signaalikohinasuhteen pienentämisellä ei ollut vaikutusta. Kirjoittajien mukaan tähän voisi olla syynä se, että päivä-ilta-yömelutaso L_{den} ei riittävän hyvin ota huomioon seuraavia seikkoja:

- tuulivoimaloiden melu kuuluu myös yöaikaan kun taas tieliikennemelu rauhoittuu;
- tuulivoimaloiden näkyminen on muiden tutkimusten perusteella tärkeä häiritsevyyden laukaiseva tekijä mutta sitä ei tässä analyysissä otettu huomioon;
- tuulivoimalamelun erityispiirre, amplitudimodulaatio, voi erottua tasaisesta taustamelusta vaikka sen taso olisi taustamelua pienempi.

Tutkimus lieenee ainoa tässä lajissa, joten ei voida kiistatta sanoa, etteikö häiritsevyyden voisi vähentyä tieliikenteen taustamelun vuoksi. Tulos ei siis poissulje sitä mahdollisuutta, etteikö tuulivoimaloiden sijoittaminen jo valmiiksi meluisalle alueelle olisi hyvä ajatus.

4.10 Pedersen (2011)

Pedersenin (2011) tavoitteena oli analysoida kahden ruotsalaisen ja yhden hollantilaisen tutkimuksen aineistoa keskittymällä yksinomaan terveysvaikutuksiin (Taulukko 4.1). Tutkimus kokosi yhteen terveyteen liittyvät kysymykset, joita oli käytetty aikaisemmissa kyselytutkimuksissa mutta ne olivat jääneet vielä raportoimatta.

Itsearvioituja terveysmuuttujia olivat:

- häiritsevyys sisällä ja ulkona (Taulukko 4.4)
- taudit tai terveyden heikkenemistä indikoivat oireet (krooniset taudit, diabetes, korkea verenpaine, sydän- ja verisuonitaudit, tinnitus, kuulonalenema)
- stressioireet (päänsärky, liiallinen väsymys, jännittyneisyys tai stressin tunne, ärtyneisyyden tunne)
- unen häiriintyminen (unen katkeaminen minkä tahansa äänilähteen vuoksi)

Äänitason (riippumaton muuttuja) ja itsearvioitujen terveysmuuttujien (riippuva muuttuja) yhteyttä testattiin binäärisellä logistisella regressiolla. Sen tuloksena saadaan todennäköisyysuhde (OR, *Odds Ratio*), joka kertoo riskin, jolla terveysmuuttujan arvo kasvaa äänitason vuoksi. Jos arvo on 1, riskiä ei ole. Jos arvo on selvästi yli yhden (95 % luottamusvälin ala- ja ylärajat ovat molemmat suurempia kuin 1), riski on olemassa.

Tulosten perusteella

- Tuulivoimalan äänitaso ulkona oli yhteydessä melun häiritsevyyteen sisällä (OR 1.38*, 1.42 ja 1.20) kaikissa kolmessa tutkimuksessa.
- Tuulivoimalan äänitaso ulkona oli yhteydessä melun häiritsevyyteen ulkona (OR 1.24, 1.14 ja 1.18) kaikissa kolmessa tutkimuksessa.

- Tuulivoimalan äänitaso ulkona oli yhteydessä unen keskeytymiseen** kahdessa tutkimuksessa kolmesta (OR 1.12 ja 1.03).

* OR 1.38 tarkoittaa, että äänitason kasvaminen tasosta 30 dB tasoon 42.5 dB, kasvatti riskiä kokea häiritsevyyttä keskimäärin 38 %.

** Kyselyssä ei selvitetty nimenomaan tuulivoimaloiden melun aiheuttamia unen keskeytymisiä vaan minkä tahansa ympäristömelulähteen aiheuttamia unen keskeytymisiä. Aiempien kirjoittajien julkaisujen mukaan suurin osa unihahtaa aiheuttavista melulähteistä oli peräisin naapurien juhlimisesta tai tieliikenteestä.

Koska äänitaso on riippumaton muuttuja, yhteydet osoittavat syy-seuraussuhteen eli korkeammalla melutasolla riski kokea häiritsevyyttä kasvaa. Tämä oli ilmeistä jo aiemmista tutkimuksista. Sen sijaan uutta tietoa on se, että äänitasolla ei ole yhteyttä kroonisten tautien, diabeteksen, korkea verenpaineen, sydän- ja verisuonitautien, tinnituksen, kuulon heikkenemisen, päänsäryn, liiallisen väsymyksen, stressin, jännittyneisyyden tai ärsyyntyneisyyden esiintymisen kanssa.

Tuulivoimalamelun häiritsevyys ulkona oli yhteydessä muihin riippuviin muuttujiin seuraavasti:

- häiritsevyys ulkona oli yhteydessä unen häiriintymiseen** (OR 2.26, 1.71 ja 1.78) kaikissa kolmessa tutkimuksessa.
- häiritsevyys ulkona oli yhteydessä stressioireisiin: päänsärkyyn, stressin tunteeseen ja ärsyyntyneisyyteen (OR 1.22-1.36) kaikissa kolmessa tutkimuksessa ja päänsärkyyn ja liialliseen väsymykseen (OR 1.22-1.25) osassa tutkimuksista

Tuulivoimalamelun häiritsevyys sisällä oli yhteydessä muihin riippuviin muuttujiin seuraavasti:

- häiritsevyys sisällä oli yhteydessä unen häiriintymiseen** (OR 2.62, 2.58 ja 2.03) kaikissa kolmessa tutkimuksessa.
- häiritsevyys sisällä oli yhteydessä päänsärkyyn, liialliseen väsymykseen, jännittyneisyyteen ja stressin tunteeseen sekä ärsyyntyneisyyteen yhdessä tutkimuksessa kolmesta (OR 1.24-1.36).

Häiritsevyys ei ole riippumaton muuttuja vaan riippuva muuttuja. Siksi syy-seuraus-suhteita ei voida edellisten kahden luettelon kohdalla todistaa. Toisin sanoen, voi olla niin, että yllä kuvatut muut terveystuuttujat selittävät häiritsevyyden eikä päinvastoin. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä.

Tuulivoimalamelun kiistattomat terveysvaikutukset rajoittuvat häiritsevyyden kokemiseen. Muita terveysvaikutuksia ei tutkituilla äänitasoilla varmuudella tässä aineistossa esiinny.

Pedersen (2011) esitti pohdinnassa mallin, jonka mukaan *kognitiivinen stressiteoria* (Lazarus ja Folkman 1984) voisi selittää tuulivoimalamelun häiritsevyysvaikutuksia. Sen mukaan yksilö arvioi ympäristökuormitusta, kuten melua ja sen lähdeä (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 tuulivoimalan melua, jolloin seurauksena on melusta häiriintyminen. Unen häiriintyminen voi lisätä tunnetta siitä, että tuulivoimalan melu on uhkatekijä.

Pedersenin mielestä tulokset eivät ole hälyttäviä mutta ne edellyttävät jatkotutkimuksia ja poliittisia päätöksiä siitä, mitä raja-arvoja tulisi noudattaa erilaisia tarkoituksia palvelevilla alueilla. Jatkotutkimuksissa tulisi pyrkiä selvittämään äänitaso myös sisätiloissa, kun nyt melua on tarkasteltu vain ulkona laskentamallien avulla. Unen häiriintyvyyden ymmärtämiseksi sisämelutason tunteminen on ehdoton edellytys. Tarvitaan sekä pitkittäistutkimuksia kentällä että laboratoriotutkimuksia, koska poikittaistutkimuksissa ei voida osoittaa syy-seuraussuhteita.

4.11 Janssen ym. (2011)

Pedersenin ja Persson Wayen (2004) ja *Pedersenin ym.* (2009) julkaisemat tuulivoimaloiden äänitaso-häiritsevyyssäyrät (Kuvat 4.3 ja 4.11) eivät anna totuudenmukaista tuulivoimaloiden melun häiritsevyydestä suhteessa muihin melulajeihin. Kuvat on kuitenkin julkaistu tieteellisessä lehdessä joten niitä helposti tulkitaan totuudenmukaisesti. Esimerkiksi kuvaa 4.3 on käytetty niin valtamediassa kuin lukuisissa asiantuntijaesityksissä ja raporteissa ilman kritiikkiä.

Kuvissa 4.3 ja 4.11 tuulivoimaloiden melun häiritsevyyttä koskeva käyrä koskee häiritsevyyden kokemusta ulkona, kun taas muiden melulajien käyrät koskevat häiritsevyyden kokemusta pääasiassa asunnon sisäpuolella. Samassa kuvassa on siis esitetty kahden täysin eri häiritsevyydenmuuttujan käyttäytymistä ulkoäänitason funktiona. Näin ei saisi tieteellisissä kuvaajissa tapahtua. Julkisivurakenteen äänieristys nimittäin aikaansaa sen, että muiden melulajien häiritsevyys alkaa kasvaa 15-30 dB korkeammilla äänitasoilla kuin tuulivoimalamelun häiritsevyys.

Janssenin ym. (2011) tutkimuksen tavoitteena oli päivittää kuvat 4.3 ja 4.11 tuulivoimalamelun osalta. Aineistona käytettiin kahta ruotsalaista (*Pedersen ja Persson Waye* 2004, 2007) ja yhtä hollantilaista (*Pedersen et al.* 2009) tutkimusta (Taulukko 4.1). Pedersen on yksi tämänkin tutkimuksen kirjoittajista.

Teollisuus- ja liikennemeluille häiritsevyys on esitetty päivä-ilta-yömelutason L_{den} funktiona. Tuulivoimalamelun päivä-ilta-yömelutaso oli määritetty yhtälöllä $L_{den} = L_{Aeq} + 4.7$ dB perustuen *van den Bergin* (2008) suositukseen.

Eri melulajien (mm. tuulivoimalamelu) häiritsevyyttä tiedusteltiin asukkailta kaikissa näissä tutkimuksissa Taulukon 4.4 mittarilla. Kysymys tehtiin koskien kokemuksia sekä sisällä että ulkona. *Janssenin ym.* (2011) tutkimuksessa keskityttiin pelkästään melun kokemiseen sisällä, jotta kuvissa 4.3 ja 4.11 oleva tieto voitaisiin päivittää totuudenmukaisempaan muotoon.

Taulukon 4.4 viisiportainen mittari muutettiin neliportaiseksi siten, että kaksi ensimmäistä kategoriala (Ei havaittavissa, Havaittavissa muttei häiritse) yhdistettiin, koska ne molemmat indikoivat sitä, että ääni ei häiritse lainkaan. Aineisto koottiin jatkuvaan 100 pisteen malliin sillä oletuksella, että neliportainen kategoria olisi jatkuva. Pisteeseen 12.5 sijoitettiin vastauksen 1 ja 2 antaneet, pisteeseen 37.5 sijoitettiin vastauksen 3 antaneet, pisteeseen 62.5 koottiin vastauksen 4 antaneet ja pisteeseen 87.5 vastauksen 5 antaneet. Vastausten yli sovittiin polynomi-yhtälö ja määritettiin 95 % luottamusväli.

Äänitaso-häiritsevyyssäyrät julkaistiin kahdelle häiritsevyyssmittarille:

- %A (*percentage annoyed*): niiden vastaajien osuus, jotka vastasivat "4" tai "5" Taulukon 4.4 kysymykseen;

- %HA (*percentage highly annoyed*): niiden vastaajien osuus, jotka vastasivat "5" Taulukon 4.4 kysymykseen.

Tulokset on esitetty kuvassa 4.13. Havaitaan, että sisällä tuulivoimalan melu häiritsee erittäin paljon vähemmän kuin ulkona. Tämä on tärkeä uusi painotus, sillä aikaisemmissa tutkimuksissa on esitetty pääasiassa ulkona koettuun häiritsevyyteen liittyviä tuloksia.

On tärkeä ottaa huomioon, että tulosaineistossa eivät ole mukana henkilöt, jotka saivat taloudellista hyötyä tuulivoimaloista, koska tämä olisi kirjoittajien sanoman mukaan "epäoikeutetusti" pienentänyt tuulivoimaloiden häiritsevyysarvoja äänitasoalueella yli 40 dB L_{den} . Alueellehan sijoittui hollantilaisessa tutkimuksessa 100 henkilöä ja heistä vain 3 raportoi häiritsevyyttä (Pedersen ym. 2009). Tämä menettelytapa on kuitenkin kyseenalainen, koska muilla melulajeilla vastaavaa aineiston tarkoituksenmukaista muokkausta ei ole tehty.

Kuva 4.14 esittää vertailun ajallisesti tasaisena pysyvän teollisuusmelun (Miedema ja Vos 2004) ja tuulivoimalamelun kesken. Häiritsevyydet ovat melko samalla tasolla $L_{den}=45$ dB ($L_{Aeq}=40$ dB) asti mutta tätä suuremmilla äänitasoilla tuulivoimalamelu alkaa olla teollisuusmelua häiritsevämpää.

Kuva 4.15 esittää vertailun eri liikennelajien melun (Miedema and Vos, 1998; Miedema and Oudshoorn 2001) ja tuulivoimalamelun äänitaso-häiritsevyyssvasteiden välillä. Näyttäisi siltä, että tuulivoimalamelu koetaan yhtä häiritseväksi kuin lentoliikennemelu äänitasoon 45 dB L_{den} asti ja tämän yläpuolella tuulivoimalamelu alkaisi olla tätä häiritsevämpää.

Kuviin 4.15 ja 4.16 liittyy kaksi yksityiskohtaa, minkä vuoksi kuviin pitää suhtautua varauksella:

- Tuulivoimalamelulle altistuttiin pääasiassa alle 45 dB L_{den} äänitasoilla, kun taas teollisuusmelulle on altistettu pääasiassa korkeammilla tasoilla. Teollisuusmelun käyrä (Miedema and Vos, 2004) pohjautuu useihin satoihin vastaajiin melualueella >45 dB L_{den} .
- Tuulivoimaloita koskeva käyrä päättyy arvoon 50 dB L_{den} . Tähän pisteeseen on sisällytetty vastaajia vain hollantilaisesta aineistosta, jossa 65 henkilöä altistui äänitasoille yli 45 dB L_{Aeq} . Näistä 65:stä 67 % sai Pedersenin ym. (2009) mukaan taloudellista hyötyä tuulivoimaloista, ja nämä henkilöt oli poistettu kuvan 4.14 käyrästä. Näin ollen tuulivoimalamelun käyrä perustuu pisteessä L_{den} 50 dB vain 21 henkilön valikoituun otantaan. Näistä 21 henkilöstä 15 %, eli vain 3 henkilöä, raportoi tuulivoimalamelun häiritsevän erittäin paljon. Aineiston suppeutta kritisoitiin artikkelin kirjoittajienkin puolesta joten on yllättävää, että käyrät on uskallettu piirtää näin korkeille äänitasoille.

Hongiston näkemys on, että tuulivoimalamelun häiritsevyyssäyrät eivät ole luotettavia tason 45 dB L_{den} yläpuolella alhaisen vastaajamäärän vuoksi.

Kirjoittajat totesivat pohdinnassa, että taloudellisesti hyöttyvät oli poistettu tuulivoimalatutkimusten aineistosta mutta vastaavaa karsintaa ei ollut tehty muiden melulajien tutkimuksissa. Karsinnan avulla tuulivoimalamelulle häiritsevien osuus saatiin merkittävästi "kasvamaan" äänitasoilla yli 35 dB L_{den} . On epäselvää, missä määrin äänitaso-häiritsevyyssmallit liikenne- ja teollisuusmeluille muuttuisivat, jos aineistosta karsittaisiin henkilöt, jotka saavat taloudellista hyötyä näistä liikennelajeista. Suurin osa väestöstä hyöttyy suoraan tai epäsuoraan esimerkiksi tieliikenteestä, joten se voi osaltaan vaikuttaa melulajin hyväksyttävyyteen

ja melusta tehtävään häiritsevyysarvioon. Sen sijaan tuulivoimaloista ei välttämättä koe hyötyvänsä yhtä suuri osa väestöstä.

Pohdinnassa todettiin myös se, että häiritsevyys sisätiloissa oli Ruotsissa alhaisempaa kuin Hollannissa. Tähän lienee syynä parempi julkisivun ääneneristys.

Kirjoittajat toteavat tutkimuksessaan, että tuulivoimaloiden melua on tutkittu aivan liian vähän, minkä vuoksi kuvien 4.14 ja 4.15 mallit ovat vasta suuntaa antavia, joskin ne on laadittu paljon paremmin perusteiden kuin niitä edeltäneet kuvat 4.3 ja 4.11. Aihepiirin tutkimusta pitäisi merkittävästi lisätä, jotta voidaan olla varmoja tuulivoimalamelun vaikutuksista.

4.12 Shepherd ym. (2011)

Shepherdin ym. (2011) tavoitteena oli selvittää, poikkeavatko asukkaiden itsearviot terveydestään kahdessa eri ryhmässä:

- Turbiiniryhmä: 39 asukasta alle 2 km päässä 66 tuulivoimalan tuulipuistosta
- Vertailuryhmä: 158 asukasta yli 8 km päässä em. tuulipuistosta

Tuulivoimaloiden äänitasoa asukkaiden tontilla ei mitattu eikä mallinnettu (Taulukko 4.1). Kyseessä oli kahden riippumattoman otoksen välinen vertailututkimus eikä itsearvioiden yhteyttä äänitasoon haettu.

Poikkeuksena muihin tämän luvun tutkimuksiin, kysely oli oivallisesti naamioitu yleiseksi terveyskyselyksi, eikä siinä ollut mainintaa tuulivoimaloista tai sen melusta. Kyselyn riippuvina muuttujina käytettiin seuraavia keskeisiä faktoreita (kussakin useita alakysymyksiä):

- Terveysteen liittyvä elämänlaatu (*Health-Related Quality of Life HRQOL*)
 - o fyysikaalinen dimensio, mukaan lukien unen laatu ja jaksaminen
 - o psykologinen dimensio
 - o sosiaalinen dimensio
 - o yleinen terveys
 - o yleinen elämänlaatu
 - o ympäristön laatu;
- Tyytyväisyys
- Häiritsevyys eri lähteistä (neljä ilmanlaatuun liittyvää ja kolme ääneen liittyvää: liikennemelu, naapurimelu ja muu vapaasti kuvattava melulähde)
- Meluherkkyys

Ryhmät olivat iän, sukupuolijakauman, koulutustason, työssäkäynnin, ja meluherkkyiden suhteen vertailukelpoisia. Lisäksi tiemelun ja naapurimelun häiritsevyys oli samalla tasolla molemmissa ryhmissä, joten jatkovertailut ovat perusteltuja tehdä.

Turbiiniryhmän ja vertailuryhmän välillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja seuraavien tekijöiden osalta:

- Meluherkkyys
- HRQOL: Sosiaalinen dimensio
- HRQOL: Psykologinen dimensio
- Yleinen terveys
- Häiritsevyys tieliikennemelusta tai naapurimelusta

Turbiiniryhmässä oli vertailuryhmään nähden tilastollisesti merkitsevästi heikompia arvoja seuraavien tekijöiden osalta:

- Terveysteen liittyvä elämänlaatu; fysikaalinen dimensio, siinä erityisesti unenlaatu ja jaksaminen
- ympäristön laatu ja koettu ympäristön terveellisyys, tyytyväisyys
- yleinen elämänlaatu

Turbiiniryhmässä 23 henkilöä mainitsi vapaamuotoisesti tuulivoimaloiden melun häiritsevyystekijäksi, kun vertailuryhmässä mainintoja tuulivoimaloista ei ollut.

Ryhmien välillä löydettiin selviä eroja. Eroja ei voida kuitenkaan selittää tuulivoimaloiden äänitasolla, koska sitä ei mitattu. Epäilemättä kuitenkin alle 2 km päässä tuulipuistosta ääni voidaan havaita ja voimaloita voidaan nähdä, joten ryhmien väliset erot voivat johtua jos-sain määrin tai kokonaan tuulivoimaloista.

Tutkimuksen vahvuutena oli se, että kyselyn tarkoitus ei paljastunut vastaajille, mikä voi vähentää vastausten harhaa. Tutkimuksen puutteena voidaan pitää pientä vastaajamäärää, alhaista vastausprosenttia (turbiiniryhmässä 34 %, vertailuryhmässä 33 %), äänitasojen puuttumista ja tarkemman etäisyydestiedon puuttumista. Tutkimuksesta ei siksi voida tehdä oikeastaan mitään johtopäätöksiä tuulivoimalameluun liittyen.

Tutkimuksen lopussa mainittiin, että tuulivoimapuiston kehittäjien ja alueen yhteisön välillä oli konflikti, kun puistoa rakennettiin. Ns. valituspuhelimeen tuli 1000 soittoa ensimmäisenä vuonna, jolloin tuulipuisto oli toiminnassa. Tämä konflikti voi olla osasyynä ryhmien välisiin eroihin.

Tutkimuksen johtopäätöksenä oli, että suojaetäisyys asutuksen ja tuulivoimaloiden välillä tulisi olla vähintään 2 km mäkisessä maastossa terveydellisten vaikutusten välttämiseksi. Johtopäätös oli varomaton, koska esitetylle minimirajaetäisyydelle ei voida löytää perusteita tästä tutkimuksesta. Turbiiniryhmässä etäisyydet lähimpään tuulipuiston voimalaan vaihtelivat kartan mukaan 0.7 ja 2 km välillä. Suurin osa vastaajista asui noin 1 km päässä voimalasta ja vain pieni osa asui 2 km päässä. Etäisyyden vaikutusta terveysmittareihin ei tarkasteltu tai pohdittu. On erittäin todennäköistä, että jos tuulivoimalat vaikuttivat terveysmittareihin, niin 2 km päässä asuvat kokivat terveydentilansa paremmaksi kuin 1 km päässä asuvat, koska äänitaso on 6-8 dB alhaisempi. Tätä olettamusta puoltaisi kuvan 4.13 äänitaso-häiritsevyyssäyrät.

4.13 Bakker ym. (2012)

Bakkerin ym. (2012) tavoitteena oli selvittää tarkemmin, onko olemassa yhteyksiä riippumattomien muuttujien (äänitaso) ja riippuvien muuttujien (häiritsevyys, unihaitta mistä tahansa melulähteestä, psykologinen ahdistuneisuus, *psychological distress*) välillä. Tutkimuksessa tarkasteltiin melualueita <30 dB, 30-35 dB, 35-40 dB, 40-45 dB ja >45 dB L_{Aeq} . Tutkimus perustui Pedersenin ym. (2009) Hollannissa keräämään aineistoon (Taulukko 4.1).

Tutkimus ei enää lisännyt kokonaisvaltaista ymmärtämystä tuulivoimalamelun vaikutuksista mutta se antoi yksityiskohtaisempia lähtötietoja ja lisätuloksia hollantilaisesta tutkimuksesta. Häiritsevyys oli suoraan yhteydessä tuulivoimaloiden äänitason kanssa. Unihaittan ja äänitason välillä ei ollut suoraa yhteyttä. Samaten ei löytynyt suoraa yhteyttä äänitason ja psykologisen ahdistuneisuuden välillä. Sen sijaan häiritsevyyden ja unihaittan sekä

psykologisen ahdistuneisuuden välillä oli yhteys. Tämä on linjassa aiempien tutkimusten kanssa.

48 % vastaajista raportoi melun (mistä tahansa lähteestä) haittaavan yöunta vähintään kerran kuukaudessa tuulivoimaloiden melutason ylittäessä 45 dB L_{Aeq} . Avovastausten mukaan kuitenkin vain 6 % mainitsi tuulivoimaloiden olevan äänilähde, joka aiheutti tämän haitan. Suurin osa mainitsi ihmisperäiset äänet yöaikaisen unihaitan syyksi.

Häiritsevyys tuulivoimaloiden melusta on siis yhteydessä ahdistuneisuuteen. Melun häiritsevyyden ja unihaittojen välinen yhteys ei ole todennäköisesti todellinen, koska tuloksia ei annettu niiden 32 ihmisen kohdalta, jotka mainitsivat yöaikaisen meluhaitan syyksi tuulivoimalat.

Tutkimuksessa todettiin, että 40 dB L_{Aeq} olisi järkevä yöajan raja-arvo, kun tarkastellaan tuulivoimaloiden melua. Johtopäätökseen päädyttiin kuitenkin ilman perusteita, koska ai-neistot eivät osoita tuulivoimaloiden melun olevan unihaitan pääasiallisena syynä millään tarkastellulla melualueella.

Tutkimuksessa tuotiin esiin tärkeä havainto siitä, että asukkaat, jotka eivät havaitse tuulivoimaloiden melua, eivät myöskään koe psykologista ahdistuneisuutta tai raportoi unihaittoja mistään melulähteestä. Häiritsevyyden kokeminen lienee siis välittävä muuttuja (*mediator variable*) äänitason (*independent variable*) ja ahdistuneisuuden (*dependent variable*) välillä.

4.14 Nissenbaum ym. (2012)

Nissenbaumin ym. (2012) tavoitteena oli selvittää, miten itsearvioitu unen laatu ja terveys poikkeavat toisistaan kahdella etäisyysalueella tuulivoimaloista:

- lähialueella, joista on matkaa tuulipuistoon alle 1.4 km (tutkimusryhmä, n=38).
- kaukoalueella, joista on matkaa tuulipuistoon yli 1.4 km (verrokkiryhmä, n=41).

Mittareina käytettiin hyvin dokumentoituja kyselyjä:

- SF-36v2: henkinen (MCS) ja fyysinen terveys (PCS)
- PSQ: Pittsburgh Sleep Quality Index
- ESS: Epworth Sleepiness Scale

sekä muita kyselyjä, jotka mittasivat unen laatua tai unettomuutta. Viimeinen kysymys koski halukkuutta muuttaa alueelta pois tuulivoimaloiden rakentamisen jälkeen.

Tutkimus tehtiin kahdella eri alueella, joista toinen sijaitsi saarella (3 voimalan puisto) ja toinen mantereella (28 voimalan puisto). Vastaajia rekrytoitiin sekä lähi- että kaukoalueella ovelta-ovelle-menetelmällä. Lähialueen otos koski kaikkia, jotka asuivat alle 1.4 km päässä voimaloista. Vastaajia kerättiin, kunnes oli saatu riittävä määrä vastaajia tilastollisen analyysin voiman rakentamiseksi (38 kpl). Kaukoalueen otos oli satunnainen ja vastaajia kerättiin, kunnes lukumäärä oli samaa luokkaa kuin lähialueella (41). Vastausprosentteja ei raportoitu.

Riippumattomana muuttujana oli etäisyys lähimpään tuulivoimalaan. Äänitasoa asunnon pihamaalla ei määritetty laskennallisesti tai mittaamalla. Mars Hillin alueella oli tehty pitkäaikaismittauksia, joista voitiin arvioida, mikä äänitaso vallitsee eri etäisyyksillä voimaloista. Sen sijaan Vinalhavenissa pitkäaikaismittauksia ei ollut käytettävissä vaan äänitasot arvioitiin yhtenä päivänä tehtyjen mittauksen perusteella. Tämän vuoksi tuloksissa pääasiallisena

riippuvana muuttujana käytetään etäisyyttä voimalaan ja sen rinnalla näitä arvioituja äänitasoja. Äänitasoille kirjoittajat eivät itsekään onneksi antaneet juurikaan painoarvoa.

Tulosten (taulukko 4.5) mukaan lähialueella unen laatu oli merkitsevästi heikompi ja päiväjän uniisuus on merkitsevästi korkeampi kuin kaukoalueella. Lisäksi SF-36v1 henkisen terveyden mittari (MCS) osoitti merkitsevästi huonompia pistemääriä lähialueella. Fyysisen terveyden mittarissa (PCS) ei havaittu eroja ($p < .98$). Yhdeksän vastaajaa lähialueelta raportoi saaneensa uusia mielenterveyslääkäreseptejä tuulivoimaloiden rakentamisen jälkeen kun kaukoalueella tällaisia henkilöitä oli kolme ($p < .06$).

Muuttohalukkuus voimaloiden rakentamisen jälkeen oli kiistatta korkeampi lähialueella. Kukaan ei halunnut muuttaa kotoaan kaukoalueella vastanneista kun taas lähialueella vastanneista 74 % halusi muuttaa pois.

Pohdinnassa mietittiin syitä melko suuriin havaittuihin eroihin otoksen ollessa näinkin pieni. Kirjoittajien mukaan asenne tuulivoimaloita kohtaan oli alueella positiivinen siihen asti kunnes voimalat alkoivat toimimaan (ei kvantitatiivista näyttöä). Molemmilla alueilla (Mars Hill, Vinalhaven) asukkaat (määrää ei kerrottu) saivat taloudellista kompensatiota tuulivoimaloista joko alennetun sähkölaskun tai korotettujen verotulojen kautta (ei kvantitatiivista näyttöä). Tontin arvonalentumisen pelon vuoksi terveysvaikutuksia arvioitiin tutkijoiden mukaan ennemminkin ala- kuin yläkanttiin (ei kvantitatiivista näyttöä). Näiden raportointivirheiden vuoksi tuulivoimaloiden terveyshaitat voivat tutkijoiden mukaan olla lähialueella suuremmat, kuin mitä tulokset antavat ymmärtää. Toisaalta arvioitiin myös mahdollisuutta, että arvioita annettiin yläkanttiin siinä toivossa, että ne johtaisivat laillisiin toimenpiteisiin tuulivoimaloita vastaan. Kyselylomakkeesta nimittäin kävi hyvin ilmi se, että kysely liittyy tuulivoimaloihin.

Tutkimuksesta vedettiin kuitenkin johtopäätös, jonka mukaan negatiiviset terveysvaikutukset tutkituilla alueilla esiintyvät alle 1.4 km päässä voimaloista. Johtopäätös on rajaetäisyyden 1.4 km osalta varomaton, sillä lähiryhmän 38 vastaajasta lähes kaikki (92 %, 35 vastaajaa) sijaitsivat 350-1000 metrin päässä voimaloista ja vain pieni osa (3 vastaajaa) sijaitsi 1000-1400 metrin etäisyydellä. Näin ollen, lähiryhmä olisi kannattanut muodostaa niistä asukkaista, jotka asuivat alle 1000 metrin päässä voimaloista, koska nyt terveysvaikutuksia aiheuttavaa rajaetäisyys kasvoi 400 metrillä vain kolmen asukkaan vuoksi. Toiseksi, lähijä ja kaukoryhmän väliset erot eri terveystutkimuksissa alittivat vain niukasti tilastollisesti merkitsevän eron raja-arvon ($p < .05$). Kenttätutkimuksissa ryhmien väliset erot voivat olla satuman vuoksi suuria, jos otoskoko on pieni.

4.15 Poikkileikkaustutkimusten epävarmuuskysymykset

Tämän luvun tutkimuksiin liittyy joitakin epävarmuuksia, joita käsitellään alla.

Ulkopuolisen äänitason epävarmuus

Useimmissa tämän luvun tutkimuksissa on määritetty voimalan/voimaloiden äänitaso asukkaan tontilla laskennallisin perustein. Laskelmissa on yleensä oletettu vallitsevan tilanne, jossa tuulen nopeus on 8 m/s (10 m korkeudella) ja mittausta tehdään voimalan takana. Tällöin voimalan äänitehotaso on suurimmillaan. Tämän tason on oletettu vallitsevan koko ajan asukkaan tontilla tai pihamaalla.

Käytännössä äänitaso voi poiketa tästä tasosta useita desibelejä suuntaan tai toiseen riippuen voimalavalmistajan melupäästöarvon oikeellisuudesta, tuulen suunnasta, nopeudesta tai ilmakehän käyttäytymisestä (luku 3). Näin ollen ei tiedetä kovin hyvin, minkälaiseen

melutilanteeseen asukkaan vastaus liittyy, meluisimpaan tilanteeseen, jolloin äänitaso voi olla inversion vuoksi vähän korkeampi kuin mallinnettu taso, vaiko keskimääräiseen tilanteeseen, joka on luultavasti mallinnettua tasoa alhaisempi.

Joissakin tutkimuksissa mallinnettuja arvoja on tarkistettu pistemäisin mittauksin ja ne ovat osoittaneet laskelmien ja mittausten poikkeavan toisistaan ”muutamia desibelejä”. Luultavasti tämä on hyvä arvio äänitasojen virheestä siinä tilanteessa, missä sääolot ovat normaalit ja voimala käy maksimiteholla.

Pedersen ja Larsman (2008) totesivat pohdinnassaan, että äänitason laskentamalleissa ei otettu varjostavia objekteja huomioon. Tämä on voinut aikaansaada sen, että laskennalliset äänitasot ovat korkeampia kuin todellinen taso asunnon pihalla, jos pihamaan ja voimalan välissä on ollut selvä näkymän voimalaan peittävä este kuten mäki tai rakennus. Näitä tilanteita on kuitenkin arvion mukaan vähän, koska 77 % asukkaista näki voimalan. Esi-merkki kuitenkin kuvastaa niitä epävarmuuksia, mitä poikkileikkaustutkimuksiin sisältyy.

Sisäpuolisen äänitasotiedon puuttuminen

Kaikissa tämän luvun tutkimuksissa vallitsee täydellinen epätietoisuus tuulivoimalamelun äänitasosta asuinhuoneiston sisällä (imissioäänitaso). Sisäpuolisen äänitason mittaaminen on erittäin vaikeaa eikä sitä voida myöskään johtaa, koska asuntojen julkisivurakenteiden äänieristystä ei ole määritetty ja äänitasot voivat myös vaihdella paljon huoneiston eri osissa.

Voimaloiden kokoluokat

Pääosa tämän luvun poikkileikkaustutkimuksista on tehty voimaloille, joiden sähköteho on alle 1500 kW (Taulukko 4.1). Joidenkin mielestä tuloksia ei voitaisi soveltaa suuremman sähkötehon voimaloille. *Möllerin ja Pedersenin* (2011) tutkimusten mukaan suuremmissa voimaloissa melupäästöt ovat korkeampia ja pientaajuuksia on suhteellisesti ottaen hieman enemmän. Jatkotutkimus toivottavasti keskittyy yli 2000 kW voimalakokoihin, koska ne ovat yleistymässä.

Vertailu muihin melulajeihin

Tuulivoimalamelun häiritsevyyden vertailu muihin melulajeihin on hankalaa, koska muita melulajeja on pääosin tutkittu korkeammilla äänitasoilla kuin tuulivoimaloiden. Lisäksi tuulivoimalamelu riippuu sääoloista kun taas muiden melulajien kohdalla näin ei juurikaan ole. Esimerkiksi liikennemelun äänitasot ovat erittäin samanlaisia päivästä toiseen. Lisäksi äänitasot ovat yöllä merkittävästi (5-15 dB alueesta riippuen) alhaisempia kuin päivällä. Tuulivoimalamelu taas voi olla korkeimmillaan illalla ja yöllä. Jos vertailu muihin melulajeihin on tärkeää, tulisi meluvaikutuksia ja äänitasoa tutkia samoin menetelmin jokaisen melulajin kohdalla, jotta vertailu olisi luotettavaa.

Eri melulajien vertailua vaikeuttaa myös se, että tieliikennemelun vaikutuksia lienee tutkittu pääasiassa alueilla, jossa melua on paljon, asukastiheys suuri ja vastaajat ovat asuneet pääosin kerrostaloissa. Sen sijaan tuulivoimalamelun vaikutuksia on tutkittu pääasiassa harvaan asutuilla alueilla ja pientaloasuminen korostuu. On todennäköistä, että kerrostaloissa ja maaseudulla asuvien odotukset asuinalueen rauhallisuudesta ovat erilaiset ja tätä kautta melun sietokyvyssäkin voi olla merkittäviä eroja. Jos tuulivoimaloiden ja liikennemelun terveysvaikutuksia halutaan vertailla jatkotutkimuksissakin, kannattaisi vastaajat valita samankaltaisilta alueilta.

5 LABORATORIOTUTKIMUKSET

Laboratoriotutkimuksilla tarkoitetaan tutkimuksia, jossa koehenkilöt altistetaan suurelle joukolla ääniä yksi kerrallaan ja heiltä kysytään jokaisen äänen kohdalla arvioita äänestä. Laboratoriotutkimusten etuna on se, että äänitasot voidaan tarkasti kontrolloida. Haittapuolena on se, että laboratorio ei vastaa kotiympäristöä. Koehenkilön laboratoriossa antamat arviot eivät esimerkiksi olisi samat, kuin jos niitä kysyttäisiin yöaikaan kotona. Laboratoriossa on kuitenkin mahdollista saada luotettavaa tietoa erilaisten äänten häiritsevyysjärjestyksistä ja siitä, minkälaisilla objektiivisilla melun mittaluvuilla häiritsevyyttä voidaan ennustaa. Tällaista ei voida kenttätutkimuksissa tehdä, koska melun tarkkaa tasoa, spektriä tai muita erityispiirteitä ei asunnoissa voida kohtuullisin kustannuksin mitata. Tämän vuoksi laboratoriotutkimukset ovat välttämättömiä tiettyjen tutkimuskysymysten ratkaisemiseksi.

Laboratoriotutkimuksia tuulivoimaloiden melua koskien on julkaistu melko vähän. Tähän tutkimukseen on otettu kolme tutkimusta, joista lyhyt tiivistelmä seuraavassa.

Persson Waye ja Öhrström (2002) tutkivat laboratoriossa, miten 25 koehenkilöä kokivat viiden erilaisen voimalan äänen. Äänet oli nauhoitettu 100 m päässä voimalasta. Altistus aika oli 10 minuuttia kutakin voimalääntä kohti. Kaikki äänet esitettiin tasolla 40 dB L_{Aeq} . Tutkimuskysymyksenä oli, koetaanko eri voimaläänet eri tavoin ja voidaanko eroja selittää psykoakustisin tunnusluvuin, joita ovat terävyys, äänekkyys, karheus, vaihteluvuomakkuus ja modulaatioaste (*Zwicker ja Fastl 1990*). Subjektiivisina mittareina käytettiin häiritsevyyttä (annoyance), suhteellista häiritsevyyttä ja äänen tiedostamisen astetta. Voimaloiden äänten välillä oli tilastollisesti merkitseviä eroja näiden mittarien suhteen. Toisin sanoen, A-painotettu äänitaso ei selitä hyvin kokemusta äänestä. Samanlaisen tuloksen saivat *Hongisto ym. (2014)* tutkiessaan taajuusjakaumaltaan ilmanvaihdon ääniä tasolla 42 dB.

Lisäksi *Persson Waye ja Öhrström* havaitsivat, että eroja subjektiivisten mittarien välillä ei voitu selittää psykoakustisilla tunnusluvulla. Johtopäätöksenä on, että *Zwickerin ja Fastlin (1990)* ehdottamat psykoakustiset tunnusluvut eivät sovellu kuvaamaan tuulivoimalan melun kokemusta.

Lee ym. (2011) tutkivat, miten tuulivoimalamelun amplitudimodulaation aste vaikuttaa melun häiritsevyyteen. Kuuntelukokeeseen rekrytoitiin 30 koehenkilöä. He arvioivat 50 erilaista tuulivoimalan ääntä, jotka erosivat toisistaan amplitudimodulaatioasteen (5 tasoa), kokonaisäänitason (5 tasoa) ja taajuusjakauman (2 tapausta) suhteen. Voimakkaasti amplitudimoduloiva tuulivoimalan ääni lisäsi häiritsevyyttä merkittävästi verrattuna vähän amplitudimoduloivaan ääneen. Erittäin voimakkaasti amplitudimoduloiva ääni oli yhtä häiritsevä kuin vähän amplitudimoduloiva ääni mutta soitettuna 3-5 dB korkeammalla äänitasolla. Toisin sanoen, erittäin voimakas amplitudimodulaation aste tulisi ottaa huomioon, kun arvioidaan melun vaikutuksia objektiivisiin mittauksiin perustuen. Tutkimuksen pohdinnassa mietittiin sitä, onko amplitudimodulaatiota tarpeen ottaa huomioon melumittauksissa. Asutuksen ja tuulivoimaloiden välillä on yleensä melko suuri suojaetäisyys, minkä vuoksi voimalan äänitaso asutuksen lähellä vaipuu lähelle taustaaäänitasoa ja amplitudimodulaation aste pienenee. Tutkimus ei siksi vastaa vielä siihen, mikä on amplitudimodulaation merkitys häiritsevyyteen asuinalueilla.

Sakamoto ym. (2013) tutkivat 38 sekalaista laajakaistaista ympäristöääntä, jotka sisälsivät pientaajuista ääntä: 5 liikenneääntä, 7 hyttiääntä laivan ajon aikana, 4 tuuliturbiinin

ääntä ulkona (27-56 dBA), 1 tuuliturbiinin ääni sisällä (27 dB) sekä 5 kohinaääntä, jolla oli tuuliturbiinin spektri (4 dB tason lasku kun taajuus kasvaa oktaavilla). Altistustasot olivat välillä 31 ja 81 dB L_{Aeq} . Äänet toistettiin taajuusalueella 3.15 – 20.000 Hz. Altistusaika ääntä kohti oli 10 sekuntia. Altistusaika on kuitenkin riittävä tutkimuksen päätavoitteen saavuttamiseksi, joka oli selvittää, mikä seuraavista yleisesti käytetyistä mittaluvuista selittää subjektiivista äänekkyyttä parhaiten:

- L_{Aeq} (A-painotettu keskiäänitaso), jota käytetään yleensä hiljaisten äänten (alle 50 dB) äänekkyuden objektiivisessa arvioinnissa;
- L_{Ceq} (C-painotettu keskiäänitaso), jota käytetään yleensä voimakkaiden äänten (yli 70 dB) äänekkyuden objektiivisessa arvioinnissa;
- L_{Geq} (G-painotettu keskiäänitaso), jota käytetään joskus pientaajuisten äänten äänekkyuden objektiivisessa arvioinnissa;
- L_{Leq} (A-painotettu keskiäänitaso), jossa ei tehdä mitään taajuuspainotusta;
- LL_Z (ISO 532B mukainen äänekkyystaso), jota käytetään äänekkyuden objektiivisessa arvioinnissa; ja
- LL_M (ANSI S3.4 mukainen äänekkyystaso), jota käytetään äänekkyuden objektiivisessa arvioinnissa.

Koehenkilöiden (20 kpl) antamien äänekkyysarvioiden keskiarvot määritettiin joka äänelle ja äänille määritettiin em. mittalukujen arvot mittaamalla. Mittaluvut selittivät subjektiivista äänekkyyttä seuraavasti (sulkeissa korrelaatiokertoimet R): L_{Aeq} (0.993), LL_Z (0.991), LL_M (0.990), L_{Ceq} (0.934), L_{Zeq} (0.729) ja L_{Geq} (0.727). Parhaiten laajakaistaisen pientaajuisten ympäristöäänten äänekkyyttä selitti A-painotettu keskiäänitaso. G- ja Z-painotuksia ei tutkimuksen perusteella kannata käyttää subjektiivisen äänekkyuden arviointiin. On todettava, että keskiarvoihin perustuvissa korrelaatioanalyyseissä on aina jonkin verran harhaa, koska koehenkilöiden vastausjakauma ei ole normaali. Mittalukujen paremmuusjärjestys ei kuitenkaan välttämättä muutu, vaikka analyysi suoritettaisiin toisin.

Merkillepantavaa tuloksissa oli se, että tulokset näyttäisivät pätevän hyvin myös tuulivoimaloiden äänille. Tuulivoimaloiden äänen amplitudimodulaatioastetta tutkimuksessa ei kuvattu. Todennäköisesti äänissä oli kuitenkin amplitudimodulaatiota, koska sitä aina tuulivoimaloiden pyöriessä esiintyy.

Bolin ym. (2014) asettivat, riippumatta edellisestä tutkimuksesta, lähes samankaltaisen tutkimuskysymyksen kuin *Sakamoto et al.* (2013) mutta pitäytyivät kokeessa pelkästään tuulivoimaloiden äänissä ja rajoittivat melun mittaluvut kahteen; L_{Aeq} ja L_{Ceq} . Varsinaiseen tutkimusryhmään rekrytoitiin 20 koehenkilöä. Koehenkilöt arvioivat 15 erilaista tuulivoimalan ääntä, joista kutakin soitettiin 8 eri tasolla (yhteensä 120 ääntä). Tasot olivat välillä 27 – 55 dB L_{Aeq} ja tarkasteltava taajuusalue 20-10.000 Hz. Altistusaika ääntä kohti oli 4 sekuntia, jonka jälkeen koehenkilöt arvioivat äänen häiritsevyyden (annoyance).

Tutkimuksen perusteella L_{Aeq} ($R=0.91$, korrelaatiokerroin) selitti tuulivoimaloiden äänen subjektiivista häiritsevyyttä merkittävästi paremmin kuin L_{Ceq} ($R=0.63$).

Tutkimuksen yhteydessä toteutettiin rinnalla toinen samanlainen koe vertailuryhmällä, johon valittiin sellaisia ihmisiä, jotka asuvat tuulivoimaloiden lähellä ja jotka ovat kokeneet melun häiritseväksi. Tulokset analysoitiin niiden 9 henkilön perusteella, jotka olivat ymmärtäneet kokeen arviointiasteikon johdonmukaisesti. Johtopäätökset tällä ryhmällä olivat samat kuin varsinaisella tutkimusryhmällä; A-painotettu äänitaso selittää häiritsevyyttä pa-

remmin kuin C-painotettu äänitaso. Vertailuryhmä arvioi äänet häiritsevämmäksi kuin varsinainen ryhmä, mikä oli odotettua. Vertailuryhmä ei kuitenkaan edusta tuulivoimaloiden lähellä asuvaa väestöä keskimäärin, koska suurin osa voimaloiden lähistöllä asuvista ei häiriinny voimaloiden melusta (*Janssen ym.* 2011). Sen vuoksi eri ryhmien häiritsevyyssarvioiden eroista ei voida vetää mitään johtopäätöstä. Vertailuryhmän mukaan ottaminen tutkimukseen oli enemmänkin seikka, jolla haluttiin vahvistaa tutkimuksen päälöydöstä.

6 REVIEW -ARTIKKELIT

Seuraavia review-artikkeleita voi suositella kaikille, jotka haluavat perehtyä alan kirjallisuuden objektiivisesta näkökulmasta.

Leventhall (2006) tunnetaan pientaajuisen melun innokkaana tutkijana. Hän perustelee artikkelissaan hyvin yksityiskohtaisesti, miten myytti tuulivoimaloiden infraäänistä on syntynyt ja kuka sen on luultavasti aikaansaanut (*Pierpont* 2004). Käyttäen tieteellisesti laadukkaita aineistoja hän arvioi, että kuultavia infraäänä ei tuulivoimaloista aiheudu. Lisäksi hän myös arvioi, että pientaajuisen melun määrä on tuulivoimaloissa kohtuullisen pientä. Hänen arvionsa on, että amplitudimodulaatiota, jossa siis äänen taso vaihtelee noin 0.5-1.0 Hz taajuudella, luullaan infraääneksi. Huomio pitäisi kiinnittää jatkossa amplitudimodulaatioon, joka lienee pääasiallinen syy siihen, miksi tuulivoimalan melu voi olla häiritsevää korkeilla äänitasoilla.

Bastasch et al. (2006) tutkivat tasapuolisesti tuulivoimaloiden fysiikkaa ja ympäristöterveyttä. Paperin pohjalta saa hyvän kokonaisvaltaisen käsityksen melusta, sen synnystä, mittaamisesta ja vaikutuksista, mitä tuohon aikaan oli tiedossa.

Bolin et al. (2011) käsittelevät myyttiä siitä, aiheuttavatko tuulivoimalat kuultavaa infraääntä. Artikkelin osoittaa sen, että tuulivoimaloista ei aiheudu havaittavaa infraääntä ja että infraäänistä ei ole tieteellisissä tutkimuksissa havaittu terveysvaikutuksia ja että tuulivoimaloiden pientaajuinen ääni ei ole voimakkaampaa kuin muiden yleisempien ympäristömelulajien. Lisäksi he arvioivat, että suurin häiritsevyyden lähde on amplitudimodulaatio, joka tekee taajuusalueen 500-1000 Hz äänistä hyvin erottuvaa.

Knopper ja Ollson (2011) tarkastelivat kirjallisuutta hyvin kriittisesti jakaen tutkimukset kahteen luokkaan: tieteelliseen ja populaariin kirjallisuuteen. Hän toteaa, että luokissa tehdyt havainnot poikkeavat toisistaan. Tieteellinen kirjallisuus osoittaa melun ja häiritsevyyden olevan yhteydessä mutta häiritsevyys on enemmän yhteydessä näkymävaikutuksiin, asenteisiin ja meluherkkyyteen kuin itse meluun. Populaari kirjallisuus taas osoittaa lukuisien itsearvioitujen terveysvaikutusten riippuvan etäisyydestä voimaloihin ja väitteisiin infraäänien keskeisestä roolista, vaikka melutasoja ei ole mitattu. Yhteistä eri kirjallisuusluokilla on, että tuulivoimaloiden melu voi häiritä joitakin yksilöitä.

7 KYSEENALAISET TUTKIMUKSET

Luvussa 4 on tuotu esiin pääosin vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistuja alkuperäistutkimuksia, jotka sisältävät tieteellisin menetelmin kerättyä ja analysoitua laajaa tutkimusaineistoa. Lisäksi luvussa 6 on tuotu esiin review-artikkeleita, joissa tulkitaan lukujen 1-2 tuloksia ja pyritään jalostamaan niistä kirjoittajien tietotaidon rajoissa hieman laajalaisempia ja hyödyllisempiä yleistyksiä.

Edellisten lisäksi on runsaasti tutkimuksia, jotka eivät täyttäneet raportin kirjoittajan asettamia laatuvaatimuksia lukuihin 1-3 pääsemiseksi. Näitä ovat:

- Internetissä vapaasti olevat raportit ja artikkelit
- Vertaisarvioituissa lehdissä julkaistut artikkelit, jotka eivät ole objektiivisia tai kriittisiä viittaamiinsa tutkimuksiin nähden tai jättävät tietoisesti tai tietämättään mainitsematta tutkimuksia, jotka kaikki alan tutkijat tuntevat

Seuraavassa luetellaan joitakin artikkeleita tai kirjoja, joihin kannattaa suhtautua kriittisesti seuraavien syiden vuoksi:

Alves-Pereira ja Castelo Branco (2007) väittivät, että tuulivoimaloiden infraääni ja pientaajuinen melu sisätiloissa voisi aiheuttaa *vibroakustisen taudin* (VAD, *Vibroacoustic Disease*, Castelo Branco ja Alves-Pereira, 2004). Taudin on alun perin havainnut Castelo Branco (1999) lentokonehuoltajien parissa, jotka altistuvat erittäin voimakkaalle melulle työssään. Vibroakustisen tautiin liittyy sydän- ja verisuonirakenteiden paksuuntumista, mikä kasvat-
taa sydäntautisairauksien riskiä. Vibroakustisen taudin riski on olemassa, jos altistutaan yli 90 dB pientaajuiselle melulle useita vuosia. Tuulivoimaloiden melu asuinympäristössä ei kuitenkaan yllä tälle tasolle (luku 3).

Pierpont (2009) kutsui "tutkimukseensa" 38 henkilöä 10 perheestä, jotka sijaitsivat tuulivoimaloiden lähellä. Vertailuryhmää ei käytetty, joten mukana oli pelkästään voimaloiden lähellä asuvia. Yksilöiden kokemuksia ei voi tietenkään kiistää mutta suuren valintaharhan riskin vuoksi tuloksia ei voi yleistää kyseisen alueen väestöön keskimäärin. Pierpont havaitsi tutkittavilla oireita, kuten unettomuutta, päänsärkyä, tinnitusta, huimausta, pahoinvointia, ahdistuneisuutta ja huolestuneisuutta. Oireyhtymän hän nimitti *tuuliturbiinisyndroomaksi* (*Wind Turbine Syndrome*). Oireet ovat yleisiä koko maapallon väestöllä, joten oireyhtymää ei tunneta kansainvälisessä tai minkään valtion lääketieteen tautiluokituksissa. Tutkimusta ei ole julkaistu vertaisarvioitussa tieteellisessä lehdessä vaan omakustanteisena kirjana.

Salt ja Hullar (2010) väittivät, että korvan ns. sisäiset karvasolut eivät reagoi infraääneneen. Sen sijaan ulkoiset karvasolut voivat aistia infraäänänen kuulokynnystä alhaisemmillä tasoilla. Toisin sanoen, karvasolut reagoisivat infraääneneen, vaikka ihminen itse ei ääntä kuulisi. Heidän mukaansa jotkut yksilöt olisivat hypersensitiivisiä infraääneneen. Tutkimus ei esitä mitään kokeellista näyttöä tuulivoimaloiden infraäänänen havaitsemisesta tai terveysvaikutuksista. On epäselvää, minkä vuoksi tämä infraäänänen havaitsemiseen liittyvä hypoteesi liitetään tuulivoimaloihin, joissa on todistettavasti hyvin vähän pientaajuisia ääntä verrattuna moneen muuhun paljon yleisempään ääneen (tieliikenne, ilmanvaihto, koneet, keinussa keinuminen, tuuli korvissa ulkona).

Rand ym. (2011) kuvasivat tapaustutkimuksen, jossa tarkoituksena oli mitata melua koh-teessa, jossa oli valitettu tuulivoimalan melusta. Asukkaat olivat kuvanneet tuuliturbiinisyn-drooman mukaisia oireita. Asunto oli 520 m päässä voimalasta. Mittauksia tehtiin 3 päivää, jolloin äänitasot vaihtelivat 18-20 dB välillä sisällä ja 32-44 dB välillä ulkona. Artikkelin kuvaa, miten mittaukset itse kokivat melusta haittaa ja jopa melumittarin kalibrointi oli mahdotonta melun aikana, vaikka se normaalisti onnistuu melumittarilta rutiinin omaisesti. Tutkimuk-sen tieteellinen taso on erittäin huono ja artikkeli herättää epäluuloja, tehdäänkö lehdessä vertaisarviointia lainkaan.

Salt ja Kaltenbach (2011) jatkoivat samaa teemaa kuin *Salt ja Hullar* (2010) lisäämällä mm. edellisestä puuttuneen tiedon mitatuista tuulivoimaloiden äänitasoista sekä äänen kuulokynnyksistä pientaajuuksilla. Vaikka tuulivoimaloiden äänitaso ei ylitä kuulokynnystä, silti ulkoisten karvasolujen väitetään reagoivan tuulivoimalan meluun. Tutkimus ei esitä mi-tään kokeellista näyttöä tuulivoimaloiden infraäänien havaitsemisesta tai terveysvaikutuk-sista.

Krogh ym. (2011) rekrytoivat tutkimukseensa ihmisiä Ontariossa Kanadassa. Rekrytoin-tikirje toimitettiin viiden eri alueen koteihin. Kaikissa näissä alueissa oli valitettu tuulivoima-loiden terveyshaitoista. Vastanneita oli 117 ja heidän asuntonsa sijaitsivat 300-1300 m päässä tuulivoimaloista. Rekrytointikirje oli provosoiva, koska siinä mainittiin tuulivoimaloi-den mahdollisista terveyshaitoista. Tutkimukseen ilmoittautuneet saivat täytettäväkseen kyselyn, jolla mitattiin päänsäryn, migreenin, sydämentykytyksen, voimakkaan väsymyk-sen, unihäiriöiden, stressin, ahdistuneisuuden, masennuksen, tinnituksen ja kuulemisvai-keuksien esiintymistä kaksipuolaisella asteikolla (Kyllä-Ei). Asukkaat jaettiin neljään eri ryh-mään kasvavan etäisyyden mukaan. Tilastotilastointien mukaan ryhmät erosivat toisistaan voimakkaan väsymisen, unihäiriöiden ja päänsäryn suhteen siten, että mitä kauempana asukas sijaitsi voimaloista, sitä vähemmän em. oireita esiintyi. Tutkimuksen eduksi mainit-takoon, että kirjoittajat eivät väitä tutkimustaan epidemiologiseksi tutkimukseksi, joka osoittaisi lyhyen etäisyyden lisäävän em. oireita. Kirjoittajien tarkoitus oli esitellä kartoitta-vaa menetelmää, jolla voidaan hankkia karkeaa tietoa ympäristövaikutuksista. Tuloksia ei voi kiistää mutta minkään tasoista yleistystä melun osuudesta em. oireisiin ei voida esittää, koska äänitasoista ei esitetty mitään tietoa.

Horner ym. (2011) esittivät laajan kirjallisuustutkimuksen, joka on pääasiassa keskittynyt Pohjois-Amerikan yhteiskunnalliseen tilanteeseen tuulivoima-asioissa. Tutkimuksesta on vaikea saada otetta, jos ei tunne alueiden viranomaisten tekemiä kannanottoja, joita artik-kelissa yksityiskohtaisesti käsitellään. Tutkimuksen johtopäätöksenä on, että alan tutki-musta tulisi lisätä, jotta viranomaisilla olisi käytettävissään laadukasta tietoa, kun tuulivoi-maloiden rakennusluvista päätetään.

Phillips (2011) pyrkii esittämään kirjallisuuskatsauksen, jota on höystetty muutamalla tapauksertomuksella. Artikkelin ei tuo alan kirjallisuuteen uutta näkökulmaa.

Farboud ym. (2013) toivat esiin edellä ehdotettuja tuulivoimaloiden infraäänien terveys-vaikutuksia ja tuuliturbiinisyndrooman mahdollisuutta esittämättä kokeellista todistusai-neistoa.

Thorne (2011) kuvaa mittaustuloksia Australian ja Uuden-Seelannin tuulipuistoissa. Alu-eiden ihmisten kokemuksia melusta ei mitattu. Johtopäätöksenä suositellaan, että melun raja-arvon tulisi olla rakennuksen ulkopuolella 32 dB L_{Aeq} . Toisena suosituksena on, että melu ei saa ylittää kuulokynnystä rakennuksen sisällä. Suosituksille, jotka lienevät tiukim-

mat koko kirjallisuudessa, ei esitetä kuitenkaan mitään selkeää perustelua. Ihmisen kuulokynnys on erittäin alhainen ja sen lievästi ylittäviä äänitasoja ei pystytä luotettavasti mittaamaan, koska taustamelut asunnoissa lähtökohtaisesti jo ylittävät kuulokynnyksen.

Hanning ja Evans (2012) kirjoittivat British Medical Journalin pääkirjoituksen, joka pyrkii olemaan lyhyt ja totuudenmukainen. Se ei kuitenkaan tarkastele tutkimuksia totuudenmukaisesti. Mm. *Pedersen ja Persson Wayen* (2004) tutkimuksessa väitettiin havaitun univaikeuksia tuulivoimaloiden vuoksi vaikka näin ei kuitenkaan ole, sillä heidän käyttämä kysymys univaikeuksista oli yleinen eikä liittynyt tuulivoimaloihin. Suurin osa univaikeuksista johtui muista asioista kuin tuulivoimaloiden melusta. Edellisen tueksi viitataan *Shepherdin ym.* (2011) tutkimukseen, jossa voimaloiden lähellä unihaittoja havaittiin. Tämä tutkimus ei kuitenkaan kuvannut, mille äänitasoille asukkaat altistuivat. On erittäin huono asia, että näin korkeatasoisissakin lehdissä esitetään review-artikkeleita, jotka sisältävät vääriä tulintoja.

Ambrose ym. (2012) kuvailivat muutamana päivänä tehtyjä melumittauksia muutamassa pisteessä tuulivoimaloiden lähituntumassa. Alueilla asuvien parissa oli raportoitu tuuliturbiinisyndrooman oireita. Melumittaustuloksista ei voi tehdä oikeastaan mitään päätelmiä eikä niitä kytketty alueen ihmisten kokemuksiin. Sen sijaan tutkimus ei ole objektiivinen vaan siinä sorrutaan kuvaamaan mittaajien omia voimakkaita kokemuksia melun vaikutuksista. Tutkimus pyrki tuomaan esiin tarvetta tehdä lisää tutkimusta tuulivoimaloiden melun vaikutuksista.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tavoitteena oli koota yhteen ulkomaalainen tutkimustieto, jossa on selvitetty tuulivoimalamelun terveysvaikutuksia asuinympäristöissä.

Tuulivoimalamelun terveysvaikutuksia on tutkittu epidemiologisin tutkimusmenetelmin vuodesta 1993 lähtien. Niissä on kerätty kyselyjen avulla tietoa asukkailta alueilla, joissa oletettavasti on havaittavissa tuulivoimaloiden ääntä. Äänitasot asuntojen pihamaalla on yleensä määritetty mallintamalla.

Tämän raportin luvussa 4 tarkastellaan lähemmin 13 tutkimusta, jotka juontavat 6 kenttä-tutkimukseen, jotka on toteutettu Tanskassa, Hollannissa, Saksassa, Ruotsissa, Uudessa-Seelannissa ja Yhdysvalloissa.

Tutkimusten perusteella tuulivoimalamelun äänitaso on yhteydessä melun häiritsevyyteen. Yksilölliset erot melun kokemisessa ovat kuitenkin erittäin suuria. Noin 10 % väestöstä kokee tuulivoimalamelun häiritseväksi asunnon sisäpuolella, kun A-painotettu äänitaso ulkona ylittää 40 dB. Tätä korkeampien äänitasojen osalta ei ole olemassa luotettavaa tietoa, koska vastaajamäärät ovat erittäin pieniä. Tuulivoimalamelu koetaan yhtä häiritseväksi kuin tasoltaan samanlainen lentoliikennemelu mutta hieman häiritsevämmäksi kuin tasoltaan samanlainen tieliikennemelu.

Yhteyttä tuulivoimalamelun äänitason ja unenlaadun välillä ei ole löytynyt. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteivätkö herkimvät yksilöt voisi kokea tuulivoimalamelun häiritsevän unta.

Suurin osa kyselyihin vastanneista sijaitsee alueella, jossa tuulivoimaloiden äänitaso on alle 40 dB L_{Aeq} . Tässä tilanteessa melun häiritsevyyttä näyttäisivät selittävän äänitasoa paremmin erilaiset väliin tulevat muuttujat kuten tuulivoimalan näkyminen asuntoon tai pihamaalle, asenteet tuulivoimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan, odotukset asuinalueen rauhallisuuden suhteen ja taloudellinen hyötyminen tuulivoimaloista.

Tutkimuksia on toistaiseksi julkaistu vähän ja niihin liittyy useita epävarmuustekijöitä niin äänitasoihin, kyselymenetelmiin, aineistojen laajuuteen kuin tulosten tulkintoihinkin liittyen. Tutkimusta melun terveysvaikutuksista tulisi tehdä myös Suomessa, koska täällä asuinympäristöt ja rakennukset poikkeavat ulkomaalaisista merkittävästi. Jatkotutkimuksissa tulisi kiinnittää huomiota epävarmuustekijöiden vähentämiseen.

KIRJALLISUUSVIITTEET

Alves-Pereira M, Castelo Branco NAA, In-home wind turbine noise is conducive to vibroacoustic disease, Proceedings of 2nd International Meeting on Wind Turbine Noise, September 20-21, Lyon, France.

Ambrose SE, Rand RW, Krogh CME, Wind Turbine Acoustic Investigation: Infrasound and Low-Frequency Noise--A Case Study, Bulletin of Science Technology and Society 32(2) 2012 128–141.

Bakker RH, Pedersen E, van den Berg GP, Stewart RD, Lok W, Bouma J, Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress, Sci Tot Environ 425 2012 42–51.

Barregard L, Bonde E, Öhrström E, Risk of hypertension from exposure to road traffic noise in a population-based sample, Occup Environ Med 66 2009 410-415.

Bastasch M, van Dam J, Sondergaard B, Rogers A, Wind Turbine Noise - an overview, Can Acoust 34(2) 2006 7-15.

Bolin K, Bluhm G, Eriksson G, Nilsson ME, Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects, Environ Res Lett 6 2011 6pp.

Bolin K, Bluhm G, Nilsson ME, Listening test comparing A-weighted and C-weighted sound pressure level as indicator of wind turbine noise annoyance, Acta Acust united A 100 2014 842-847.

Castelo Branco NAA, A unique case of vibroacoustic disease. A tribute to an extraordinary patient. Aviat Space Environ Med 70(3) A27-31.

Castelo Branco NAA, Alves-Pereira M, Vibroacoustic disease, Noise Health 6(23) 2004 3-20.

Farboud A, Crunkhorn R, Trinidad A, 'Wind turbine syndrome': fact or fiction? J Laryngol Otol 2013 5pp.

Forssen J, Schiff M, Pedersen E, Persson Waye K, Wind turbine noise propagation over flat ground: measurements and predictions, Acta Acust united Ac 96 2010 753-760.

Hanning CD, Evans A, Wind turbine noise seems to affect health adversely and an independent review of evidence is needed, British Medical Journal 344 2012 Editorial 2pp.

Hongisto V, Oliva D, Rekola L, Subjective and Objective Rating of Spectrally Different Pseudorandom Noises – Implications for Speech Masking Design, Revised manuscript submitted to J Acoust Soc Am, July, 2014.

Horner B, Jeffery RD, Krogh CME, Literature Reviews on Wind Turbines and Health: Are They Enough? Bull Sci Tech Soc 31 2011 399-413.

Hubbard HH, Shepherd KP, Aeroacoustics of large wind turbines, J Acoust Soc Am 89(6) 1991 2495-2508.

IEC 61672-1 (2013) Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

IEC TS 61400-14, Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values.

ISO 226:2003 Acoustics - Normal equal-loudness-level contours.

Jacobsen J, Infrasound emission from wind turbines, J Low Freq Noise V A 24 2005 145-55.

Janssen SA, Vos H, Eisses AR, Pedersen E, A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources, J Acoust Soc Am 130(6) 2011 3746-3753.

Keränen J, Oliva Elorza D, Hongisto V, Prediction model for the risk of annoyance from external low frequency noise, Proceedings of Internoise 2010, ID 70, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.

Knopper LD, Ollson CA, Health effects and wind turbines: A review of the literature, Environmental Health 10(78) 2011 10pp.

Krogh C, Gillis L, Kouwen N, Aramini J, WindVOiCe, a self-reporting survey: adverse health effects, industrial wind turbines, and the need for vigilance monitoring, Bull Sci Tech Soc 31 2011 334-9.

Lazarus RS, Folkman S, Stress, appraisal and coping, Springer, New York, 1984.

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

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

Leventhall G, Infrasound from wind turbines: Fact, fiction or deception, Can Acoust 34 2006 29-36.

Malmivaara A, Pääkirjoitus 3/2011: Hallitusohjelma sopusoinnussa uuden terveyden määritelmän kanssa, Optimi – terveys- ja sosiaalitalouden uutiskirje, 3/2011.

Miedema HME, Vos H, Noise annoyance from stationary sources: Relationships with exposure metric day-evening-night (DENL) and their confidence intervals, J Acoust Soc Am 116 2004 334-343.

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

Møller M, Pedersen C, Low frequency noise from large wind turbines, J Acoust Soc Am 129 2010 3727-44.

Nissenbaum MA, Aramini JJ, Hanning CD, Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health, Noise Health 14(60) 2012 237-243.

Oerlemans S, Sijtsma P, Méndez López B, Location and quantification of noise sources on a wind turbine, J Sound Vib 299 2007 869-883.

Oliva D, Hongisto V, Keränen J, Koskinen V, Measurement of low frequency noise in rooms, Indoor Environment Laboratory, Turku, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland, 2011 (In English).

Oliva D, Koskinen V, Keränen J, Hongisto V, New measurement method of low frequency noise in rooms, Proceedings from 14th International Conference on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, 307-319, Aalborg, Denmark, 9 – 11 June 2010.

Pedersen E, Hallberg LR-M, Persson Waye K, Living in the vicinity of wind turbines - A grounded theory study, Qual Res Psychol 4 2007 49-63.

Pedersen E, Health aspects associated with wind turbine noise - results from three field studies, Noise Con Eng J 59 2011 47-53.

Pedersen E, Health aspects associated with wind turbine noise - results from three field studies. Noise Con Eng J 59 2011 47-53.

Pedersen E, Larsman P, The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines, J Environ Psychol 28(4) 2008 379-389.

Pedersen E, Persson Waye K. Perception and annoyance due to wind turbine noise - a dose-response relationship. J Acoust Soc Am 2004 116 3460-3470.

Pedersen E, Persson Waye K. Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. Occup Environ Med 64(7) 2007 480-486.

Pedersen E, Persson Waye K. Wind turbines - low level noise sources interfering with restoration? Environ Res Lett 3 2008 015002 (5pp).

Pedersen E, van den Berg F, Bakker R, Bouma J, Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound, Energy Policy 38 2010 2520-2527.

Pedersen E, van den Berg F, Bakker R, Bouma J, Response to noise from modern wind farms in The Netherlands, J Acoust Soc Am 126(2) 2009 634-643.

Pedersen TH, Nielsen KS, Genvirkning af støj fra vindmøller, Report 150, DELTA Acoustic and Vibration, Copenhagen, 1994.

Persson Waye K, Öhrström E, Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise, J Sound Vib 250(1) 2002 65-73.

Pierpont N, Wind turbine syndrome: a report on a natural experiment, 294 pp., K-Selected Books, Santa Fe, New Mexico, 2009.

Rand RW, Ambrose SE, Krogh CME, Occupational Health and Industrial Wind Turbines - A Case Study, Bull Sci Tech Soc 31(5) 2011 359-362.

Sakamoto S, Yokoyama S, Tsujimura S, Tachibana H, Loudness evaluation of general environmental noise containing low frequency components, Proceedings of Internoise 2013, 15-18 September 2013, Innsbruck, Austria.

Salt A, Kaltenbach J, Infrasound from wind turbines could affect humans, Bull Sci Tech Soc 31 2011 296-303.

Salt AN, Hullar TE, Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines, Hearing Res 268 2010 12-21.

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

Thorne B, The problems with "noise numbers" for wind farm noise assessment, Bull Sci Tech Soc 31(4) 2011 262-290.

Valtioneuvosto (1993), Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 993/1992, Helsinki.

van den Berg GP, Effects of the wind profile at night on wind turbine sound, J Sound Vibr 2004 277 955-970.

van den Berg GP, Criteria for wind farm noise: Lmax and Lden, Proceedings of 7th European Conference on Noise Control EURONOISE, Acoustics 08, Paris, France.

Watanabe T, Moller H, Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field, J Low Freq Noise Vibr 9(3) 1990 106-115.

WHO, Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, 19-22 June 1948, New York, 1948.

Wolsink M, Sprengers M (1993a), Wind turbine noise: a new environmental threat? Proceedings of the sixth international congress on the Biological Effects of Noise ICBEN, Nice, France, 1993, Vol 2, pp. 235-238.

Wolsink M, Sprengers M (1993b), Windturbine noise: a new environmental threat? Noise as a public health problem, INRETS, Bron, France, 1993.

Wolsink M, Sprengers M, Keuper A, Pedersen TH, Westra CA, Annoyance from wind turbine noise on sixteen sites in three countries, Proceedings of the European Community Wind Energy Conference, Lübeck, Germany, 1993, pp. 273-276.

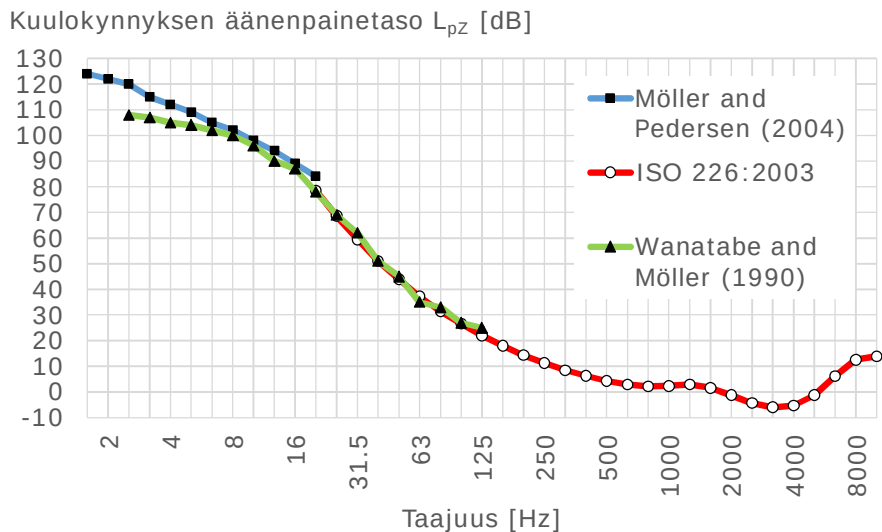
Ympäristöministeriö (2012), Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöhallinnon ohjeita 4-2012, Helsinki.

Ympäristöministeriö 2014a, Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla, Ympäristöhallinnon ohjeita 3-2014, Helsinki.

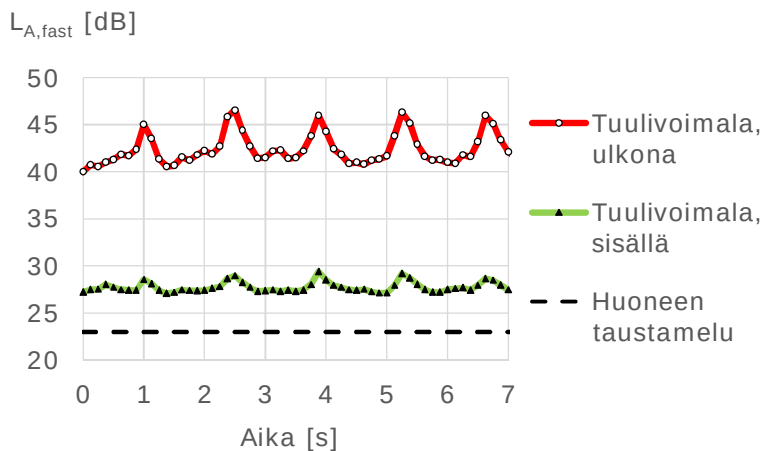
Ympäristöministeriö 2014b, Tuulivoimaloiden melun mallintaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2-2014, Helsinki.

Zwicker E, Fastl H, Psycho-Acoustics: Facts and Models, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990.

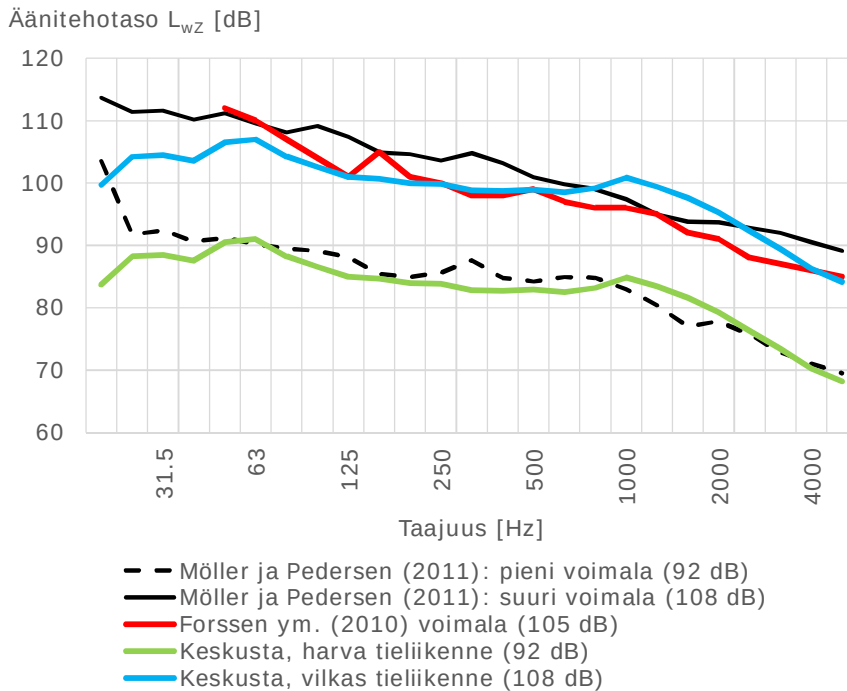
KUVAT JA TAULUKOT



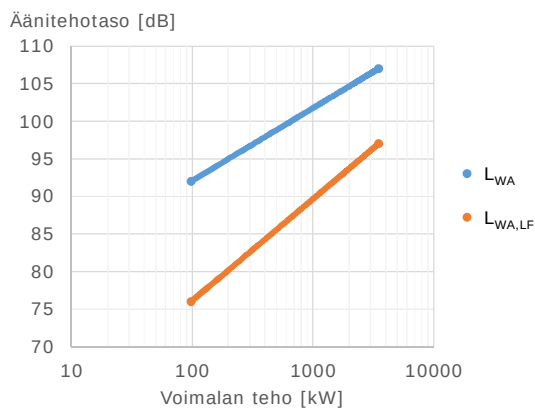
Kuva 3.1. Audiologinen kuulokynnys kuuloalueella (ISO 226) ja infraäänillä (muut käyrät).



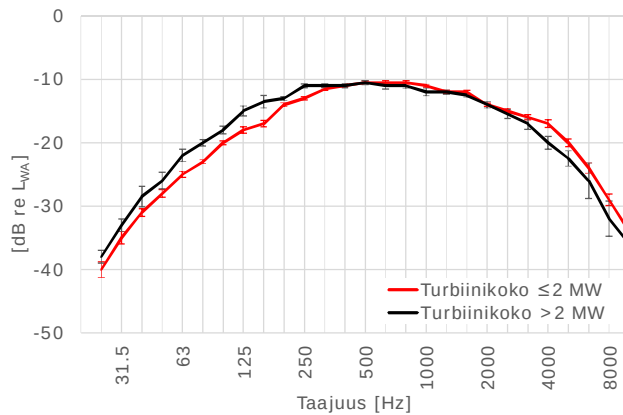
Kuva 3.2. Äänenpainetason vaihtelu ajan funktiona erään asuinrakennuksen pihalla ja asuinhuoneessa, kun tuulivoimalan ääni on selvästi amplitudimoduloitua. Voimala (3 MW) on noin 1.5 km päässä (Työterveyslaitos).



Kuva 3.3. Tuulivoimaloiden ja tieliikenteen äänitehotasojen taajuusjakaumien vertailu. Möllerin ja Pedersenin (2011) tutkimus kattoi voimalakoot 75 -3600 kW. Forssenin ym. (2010) voimala koskee 1500 kW voimalaa. Vertailuna on Työterveyslaitoksen nauhoittama tieliikennemelun spektri normalisoituna voimaloiden teho- tasoihin.



Kuva 3.4. Möllerin ja Pedersenin (2011) mittauksiin perustuva riippuvuus voimalan tehon ja A-painotetun äänitehotason välillä. L_{WA} koskee tehotasoa taajuusalueella 20-20000 Hz ja $L_{WA,LF}$ tehotasoa taajuusalueella 10-160 Hz.



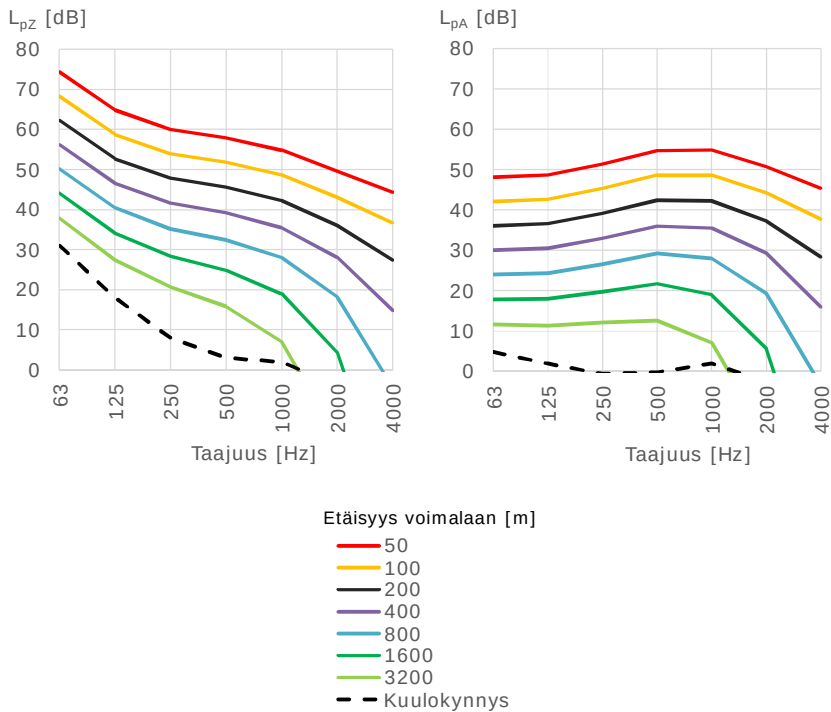
Kuva 3.5. Möllerin ja Pedersenin (2011) julkaisema vertailu eri kokoluokan voimaloiden äänitehotason taajuusjakaumasta. Taajuuksittaiset arvot on normalisoitu tehotasoon $L_{WA} = 0$ dB, jolloin spektrimuotojen vertailu on mahdollista voimalan tehotasosta riippumatta.

Taulukko 3.1. Äänitehotason arvot, joita on käytetty luvun 3.6 laskentaesimerkissä. Ne perustuvat Forssenin ym. (2010) mittauksiin, jotka esitettiin myös kuvassa 3.3.

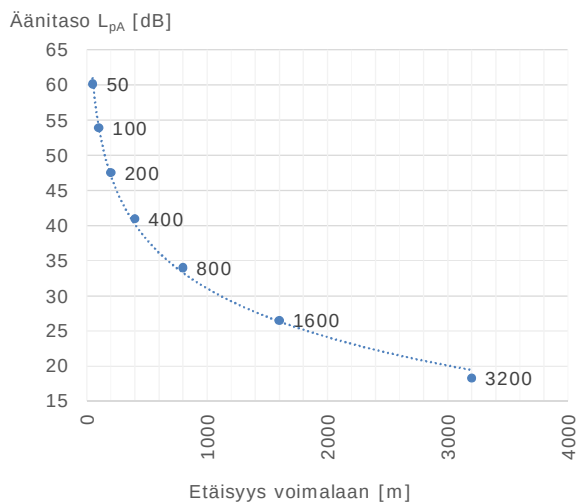
f	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	A	C
L_W	[dB]	115	108	105	103	100	95	91	105	115.9

Taulukko 3.2. Vakioiden α ja G arvot, joita on käytetty luvun 3.6 laskentaesimerkissä.

f	α	G
[Hz]	[dB/km]	[dB]
63	0.1	4.3
125	0.4	1.8
250	1	0
500	1.9	0
1000	3.7	0
2000	9.7	0
4000	32.8	0



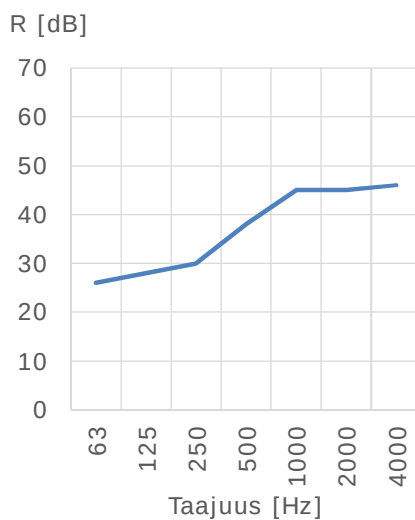
Kuva 3.6. Melun taajuusjakauma eri etäisyyksillä voimalasta luvun 3.6 laskentaesimerkissä. Vasemmalla lineaarinen (painottamaton) ja oikealla A-painotettu taajuusjakauma.



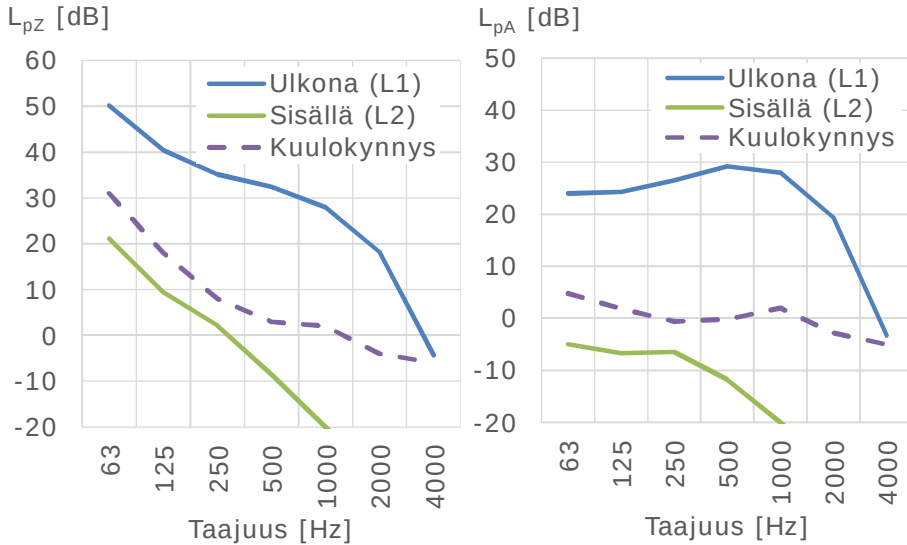
Kuva 3.7. A-painotetut keskiäänitasot eri etäisyyksillä voimalasta kuvan 3.6 esi-merkkiin liittyen.

Taulukko 3.3. Kuvan 3.6 äänenpainetasoista lasketut A- ja C-painotetut äänitasot L_A ja L_C eri etäisyyksillä d voimalasta.

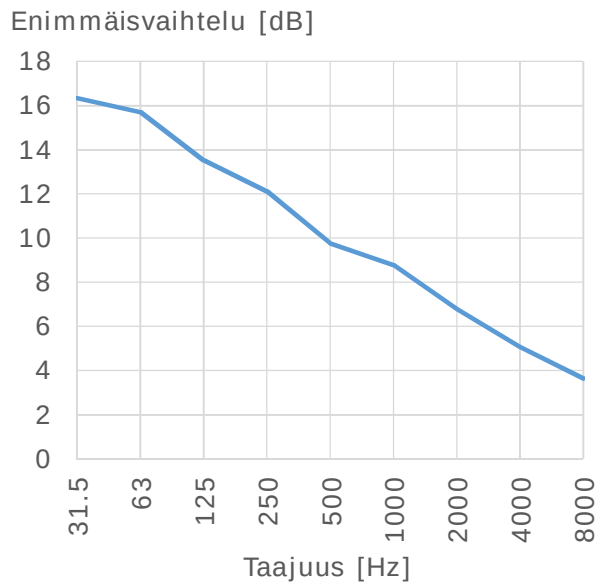
d [m]	L_A [dB]	L_C [dB]	$L_C - L_A$ [dB]
50	60.1	74.4	14.2
100	53.9	68.3	14.4
200	47.6	62.3	14.7
400	41.0	56.2	15.3
800	34.0	50.1	16.1
1600	26.5	43.9	17.4
3200	18.3	37.6	19.3



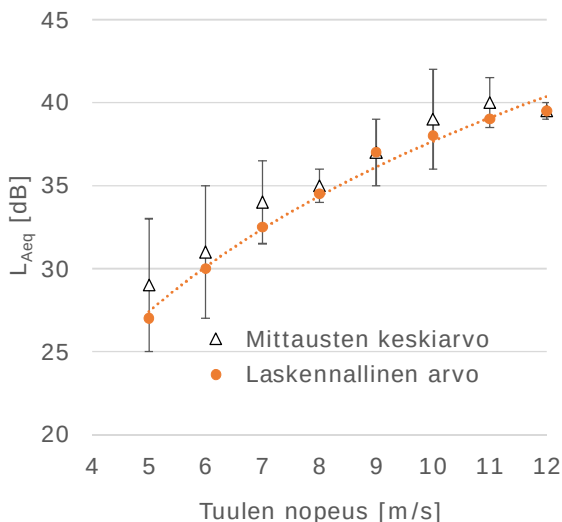
Kuva 3.8. Erään 80-luvulla rakennetun pientalon makuuhuoneen julkisivun ilmaääneneristävyys. Rakenteena on tiilijulkisivu, jossa on yksi 2 m² kokoinen ikkuna. Mitaus on tehty ISO 140-5 mukaan (Työterveyslaitos).



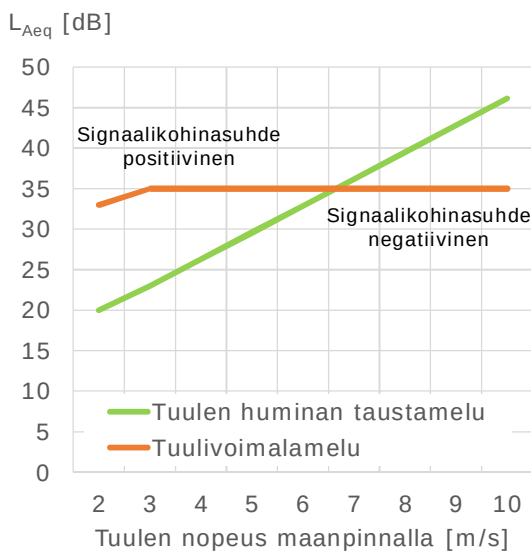
Kuva 3.9. Äänenpainetaso asuinhuoneessa, kun ääneneristyskyky on kuvan 3.8 mukainen. Laskelmassa voimalan etäisyys on 800 m ja taajuusjakauma on kuvassa 3.6. Vasemmalla on lineaarinen ja oikealla A-painotettu äänenpainetaso. A- ja C-painotetut äänenpainetasot sisällä ovat -1 ja 21 dB.



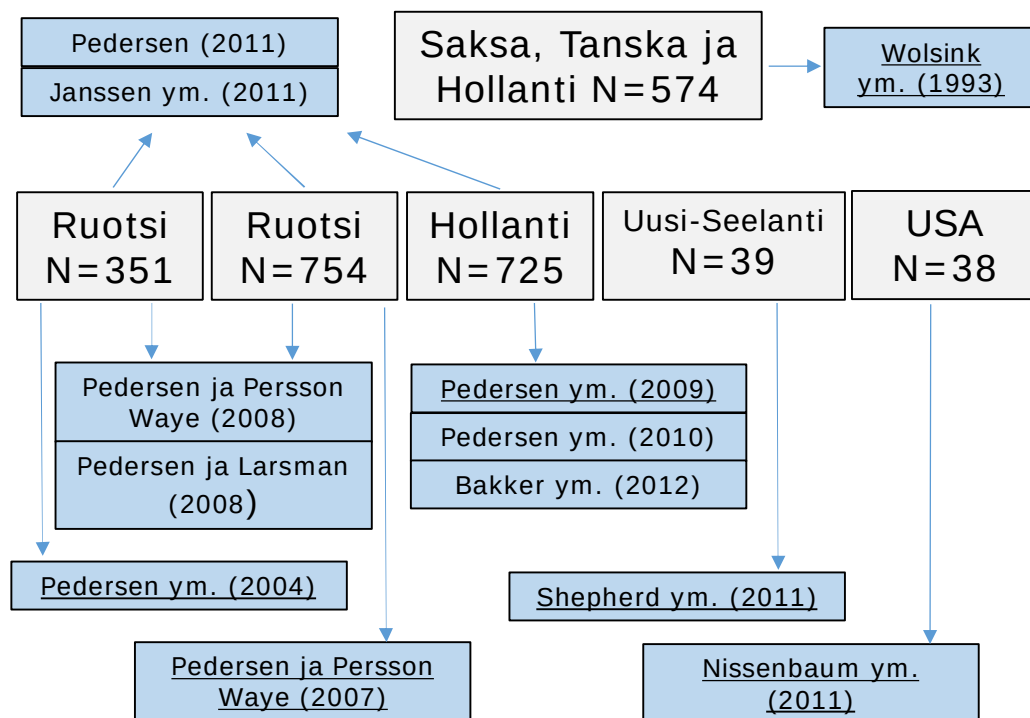
Kuva 3.10. Äänenpainetason vaihtelu huoneen eri mittauspisteissä (Oliva ym. 2010).



Kuva 3.11. Äänenpainetaso vaihtelu eri tuulennopeusalueilla. Luokittelu tehtiin 1 m/s välein. Dataa rekisteröitiin 30 vuorokauden ajan 10 minuutin välein. Tuulen nopeus on mitattu 10 m korkeudella maanpinnasta. (Forssen ym. 2010).



Kuva 3.12. van den Bergin (2004) perusteella laadittu esimerkkilaskelma voimalan signaalikohinasuhteesta eri tuulen nopeuksilla inversiotilanteessa. Kun taustamelu ylittää voimalan äänitason (signaalikohinasuhde negatiivinen), on todennäköistä, että voimalan ääni ei häiritse samoin kuin tilanteessa, jossa voimalan äänitaso on taustamelua korkeampi. Jälkimmäinen tilanne voi vallita inversiotilanteessa.



Kuva 4.1. Vertaisarvioituissa tieteellisissä lehdissä julkaistut poikkileikkaustutkimukset (siniset neliöt) ja niissä käytettyjen aineistojen alkuperämaat ja aineiston laajuus (harmaat neliöt). N on vastaajien lukumäärä. Alleviivatut edustavat ensimmäistä tutkimusta, joka on julkaistu kyseisestä aineistosta.

Taulukko 4.1. Tarkasteltujen poikkileikkaustutkimusten aineistojen kuvausta.

	Lähde	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Wolsink ym. (1993)	?	?	574	?	1	10- 500	?	?	Hollannissa, 3 Saksassa ja 9 Tanskassa.
	Pedersen ja Persson						150-			
2	Waye (2004)	627	513	351	68	2	650	3	94	5 tasaista aluetta, maaseudulla.
	Pedersen ja Persson						400-		64-	mäkistä, 3 esikaupunkia ja 4 maaseutua.
3	Waye (2007)	3471	1309	754	58	2	1500	2.7	91	
	Pedersen ja Persson						150-			
4	Waye (2008)	4098	1822	1095	60	2	1500	2.9	77	Yhdistetty 2 ja 3.
	Pedersen ja						150-		64-	
5	Larsman (2008)	4098	1822	1095	60	2	1500	2.9	100	Yhdistetty 2 ja 3.
	Pedersen ym.						yli			Hollannin tuulipuistojen lähellä.
6	(2009)	70000	1948	725	37	2	500	14.3	68	Taajamaa ja maaseutua.
	Pedersen ym.						yli			
7	(2010)	70000	1948	725	37	2	500	14.3	68	Sama kuin 6.
							150-			
8	Janssen ym. (2011)	74098	3770	2404	64	2	1500	7.6	74	Yhdistetty 2, 3 ja 6.
							150-			
9	Pedersen (2011)	74098	3770	1755	47	2	1500	7.6	74	Yhdistetty 2, 3 ja 6.
	Shepherd ym.									66 voimalan puisto.
10	(2011)	?	115	39	34	0	2300	?	?	Verrokkiryhmä 158 vastaajaa.
	Nissenbaum ym.								yli	28 ja 3 voimalan puistot.
11	(2012)	?	?	38	?	0	1500	suuri	50	Verrokkiryhmä 41 vastaajaa.
							yli			
12	Bakker ym. (2012)	70000	1948	725	37	2	500	14.3	68	Sama kuin 6.

- A Alueen asukasmäärä
B Otos alueelta
C Vastaajamäärä
D Vastausprosentti
E Äänitasojen alkuperä
0 Ei raportoitu lainkaan
1 Mitattu
2 Mallinnettu
F Turbiinien teho kW
G Omistussuhde voimaloihin, %
H Voimalan näkevien osuus, %
I Muut kommentit

Taulukko 4.2. Vastaajien sijoittuminen eri äänitasoalueille (Wolsink ym. 1993).

L _{Aeq} [dB]	<25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-60
Vastaajamäärä	13	64	177	225	69	18	8

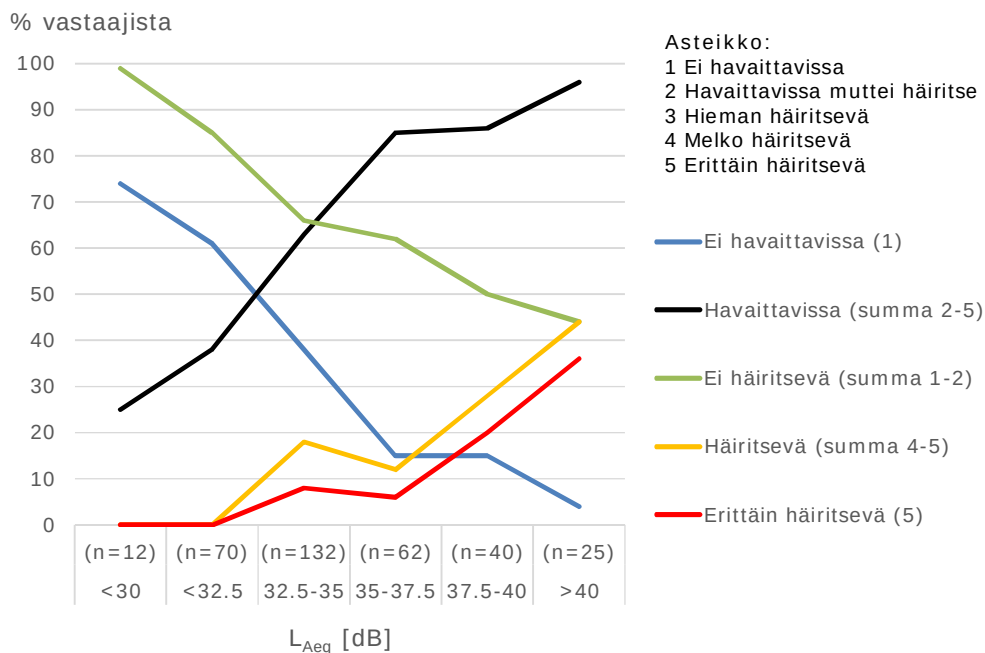
Taulukko 4.3. Vastaajien kokema häiritsevyys tuulivoimaloiden melusta (Wolsink ym. 1993).

	Vastaajia	%
Yhteensä	574	100.0
Ei häiritsevyyttä kokeneita	37	6.4
Häiritsevyyttä kokeneita	537	93.6

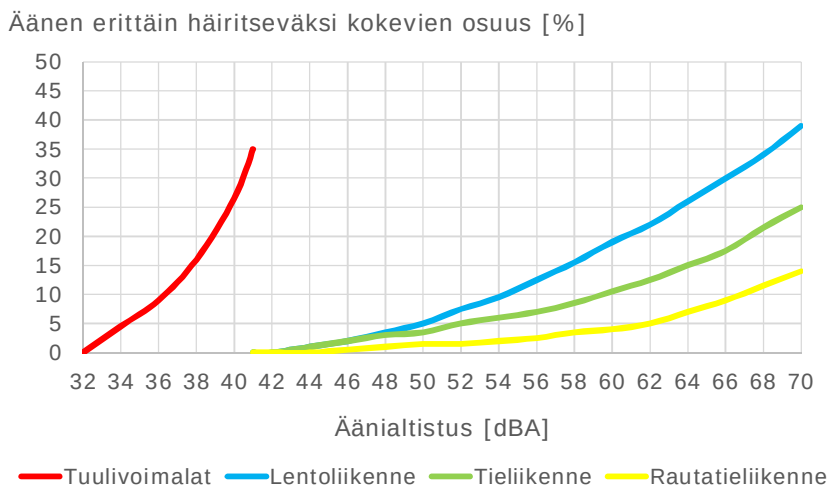
Taulukko 4.4. Ruotsalaisissa (Pedersen ja Persson Waye 2004, 2007) ja hollantilaisissa (Pedersen ym. 2009) tutkimuksessa käytetty häiritsevyyden mittari. Sama kysymys esitettiin myös korvaamalla lihavoitu kohta sanalla "sisätiloissa".

Alla oleva lista esittää useita lähteitä, joista voit olla tietoinen ja joista voit kokea häiritsevyyttä, kun vietät aikaa asuntosi pihamaalla. Ole hyvä ja kerro jokaisen lähteen kohdalla oletko tietoinen siitä ja häiritseekö se sinua:

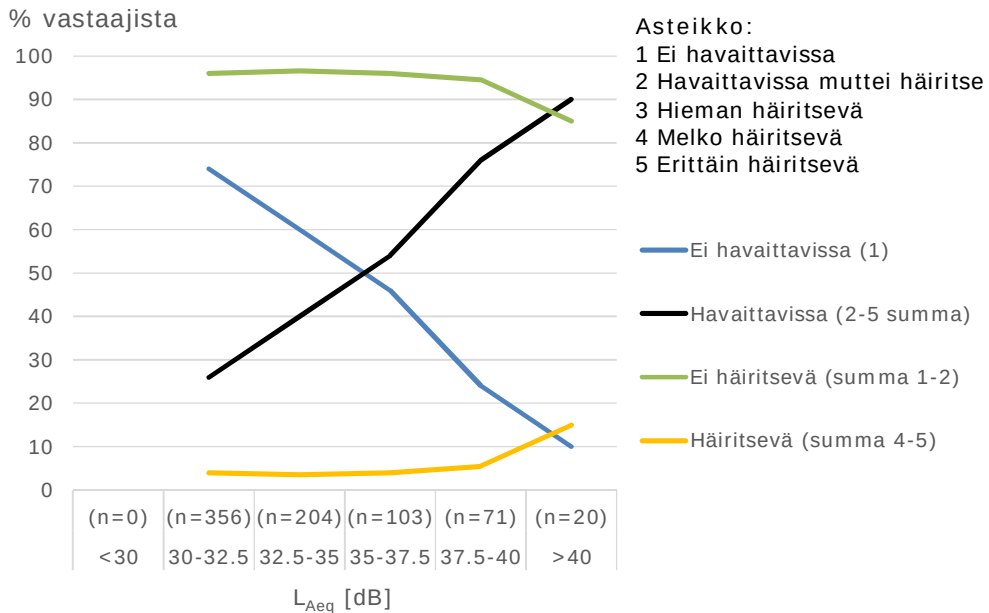
	1	2	3	4	5
	Ei havaitta- vissa	Havaitta- vissa muttei häiritse	Häiritsee hieman	Häiritsee melko paljon	Häiritsee erittäin paljon
teollisuuden hajut	☐	☐	☐	☐	☐
lannan haju	☐	☐	☐	☐	☐
hyönteiset	☐	☐	☐	☐	☐
heinäsiilojen melu	☐	☐	☐	☐	☐
tuulivoimaloiden melu	☐	☐	☐	☐	☐
raideliikennemelu	☐	☐	☐	☐	☐
tieliikennemelu	☐	☐	☐	☐	☐



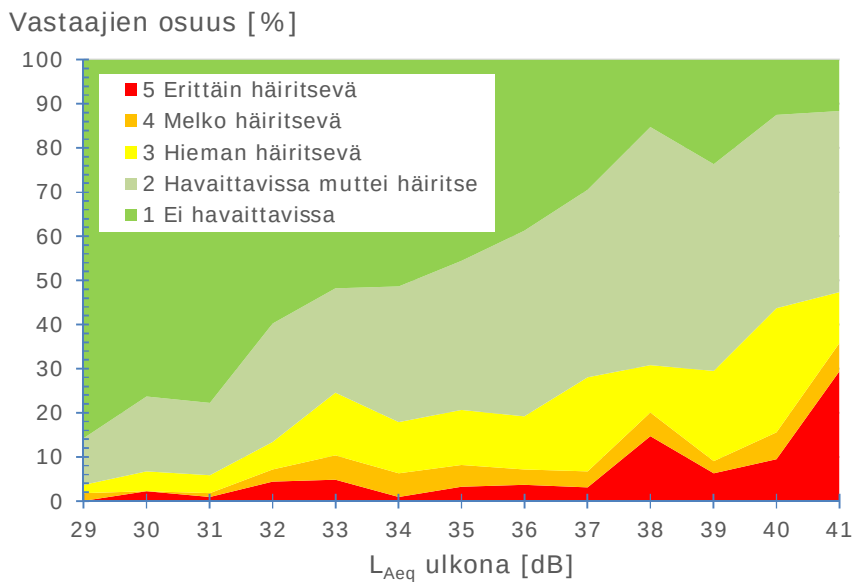
Kuva 4.2. Pedersenin ja Persson Wayen (2004) mukainen tulos melun kokemisesta ulkona (pihalla). Häiritsevyyssasteet erosivat merkittävästi toisistaan eri melualueilla.



Kuva 4.3. Pedersenin ja Persson Wayen (2004) esittämä kuvaaja, jossa vertaillaan tuulivoimaloiden äänitaso-häiritsevyysskäyrää eri liikennelajien vastaaviin aiemmin julkaistuihin käyriin. Kuva antaa virheellisen käsityksen tuulivoimalamelun häiritsevyydestä (ks. teksti) eikä sitä soveltaa arvioitaessa tuulivoimaloiden melun häiritsevyyttä suhteessa muihin melulajeihin.

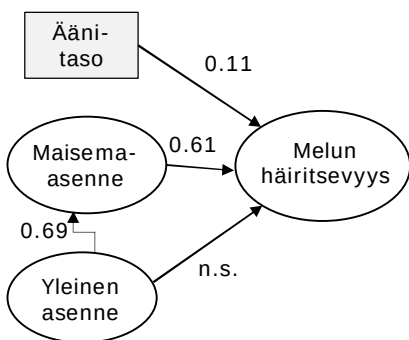


Kuva 4.4. Pedersenin ja Persson Wayen (2007) tulos melun kokemisesta ulkona pihamaalla. Tutkimuksessa ei raportoitu kategorialle <30 dB. Häiritsevyyssasteet eivät eronneet merkittävästi toisistaan eri melualueilla. Erittäin häiritseväksi äänen raportoitujen lukumääriä ei raportoitu alhaisen lukumäärän vuoksi.

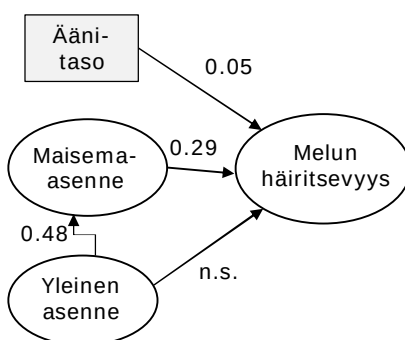


Kuva 4.5. Pedersenin ja Persson Wayen (2008) julkaisema tulos tuulivoimalamelun kokemisesta ulkona. Aineistossa on yhdistetty kaksi ruotsalaista tutkimusta.

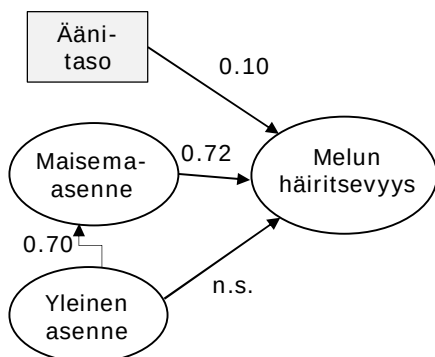
Tuulivoimala näkyy asuntoon (n=843)



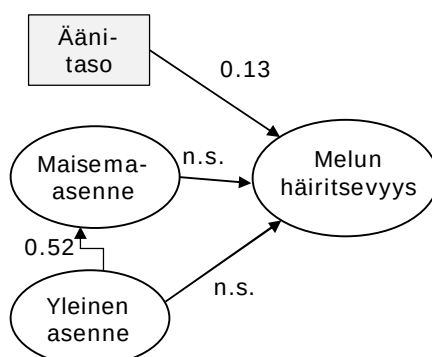
Tuulivoimala ei näy asuntoon (n=237)



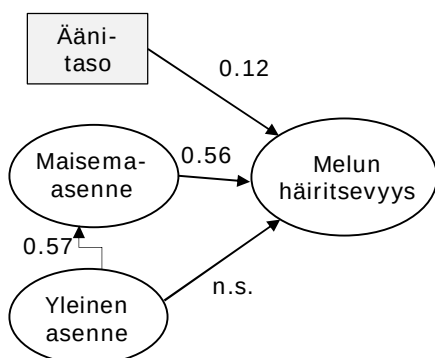
Tasainen alue (n=720)



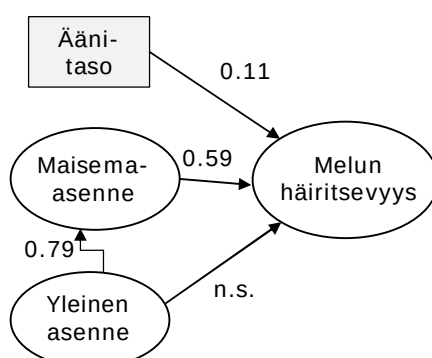
Mäkinen alue (n=375)



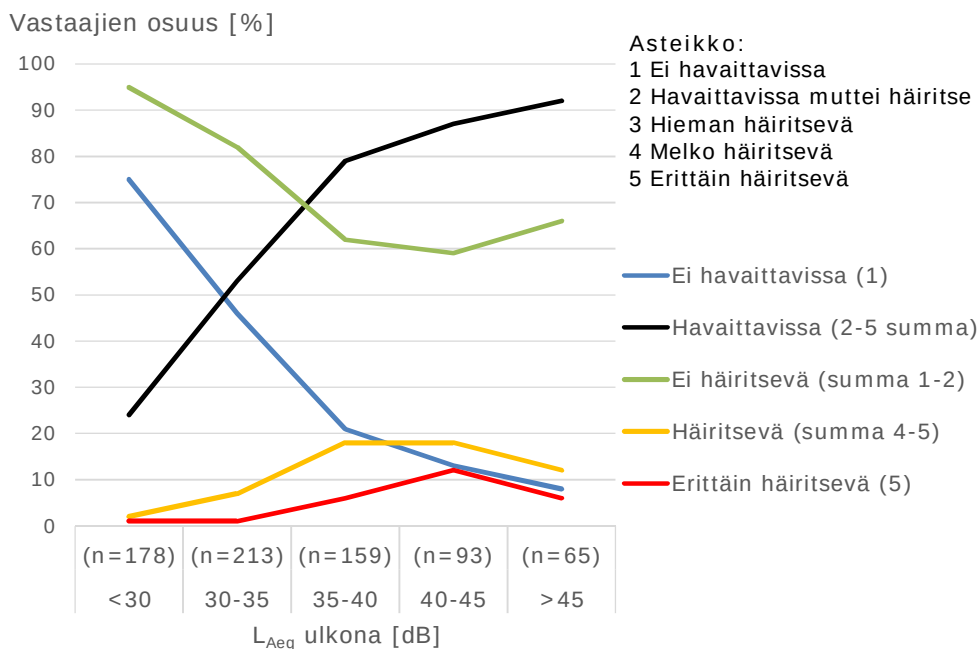
Taajama-alue (n=764)



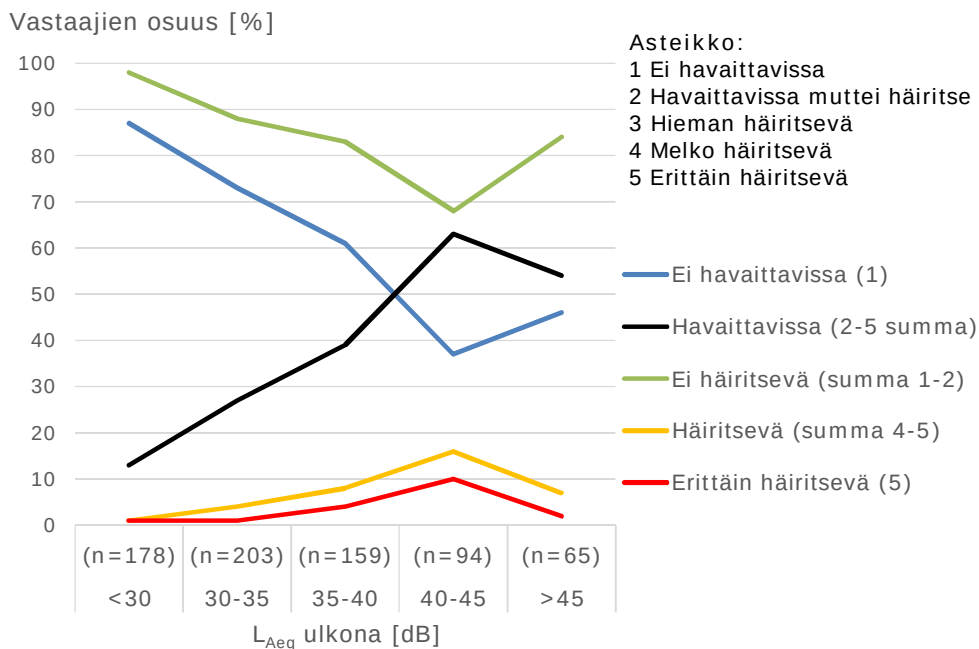
Maaseutu (n=331)



Kuva 4.6. Pedersenin ja Larsmanin (2008) rakenneyhtälömallin mukaisia yhteyksiä eri muuttujien välillä. Nuolen suunnat ovat oletettuja vaikutussuuntia. Mitä suurempi korrelaatiokertoimen arvo on, sitä voimakkaampi on muuttujien välinen yhteys. n.s. tarkoittaa, että yhteyttä ei ole.

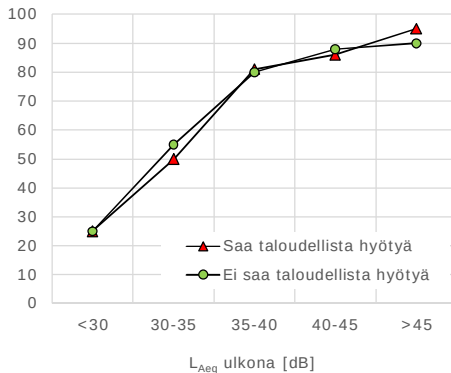


Kuva 4.7. Pedersenin ym. (2009) tulos melun kokemisesta ulkona pihamaalla.

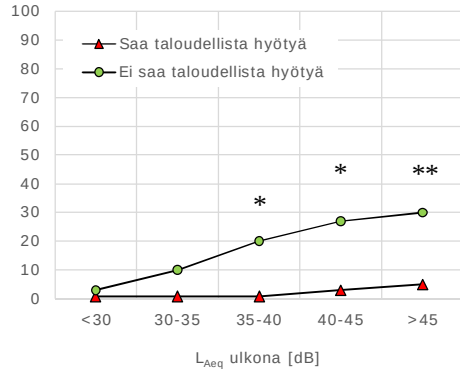


Kuva 4.8. Pedersenin ym. (2009) tulos melun kokemisesta asunnon sisällä.

Äänen havaitsevien osuus [%]

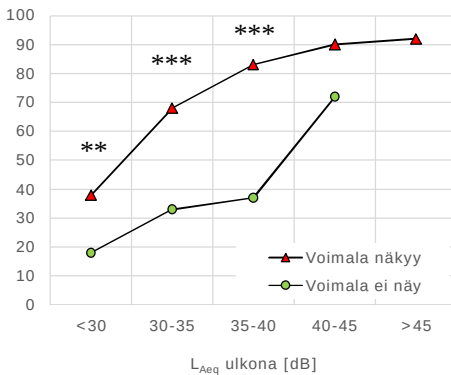


Häiritsevyyttä raportoivien osuus [%]

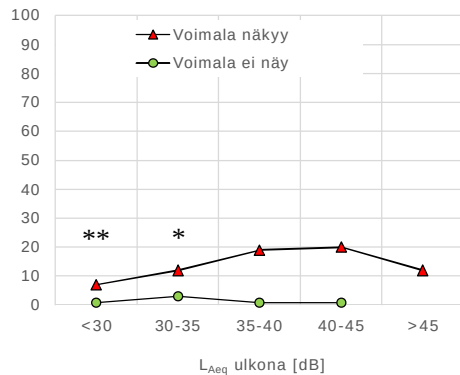


Kuva 4.9. Pedersenin ym. (2009) havainto siitä, että taloudellinen hyötyminen voimaloista ei vaikuta melun havaitsemiseen mutta poistaa häiritsevyyden kokemisen. Ryhmien välisen eron tilastollinen merkitsevyys: * $p < .05$; ** $p < .01$.

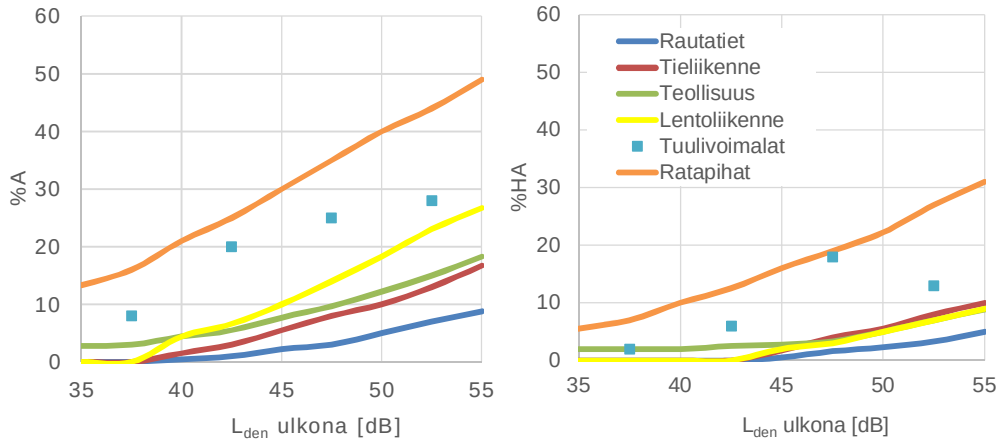
Äänen havaitsevien osuus [%]



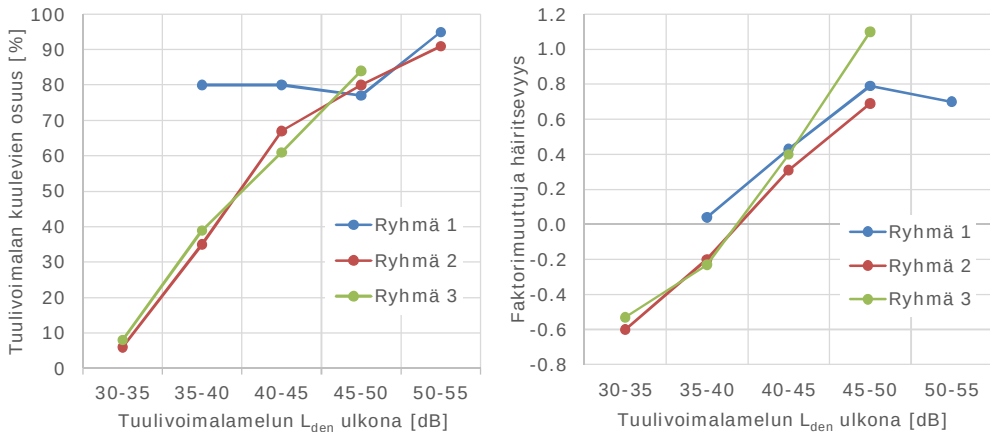
Häiritsevyyttä raportoivien osuus [%]



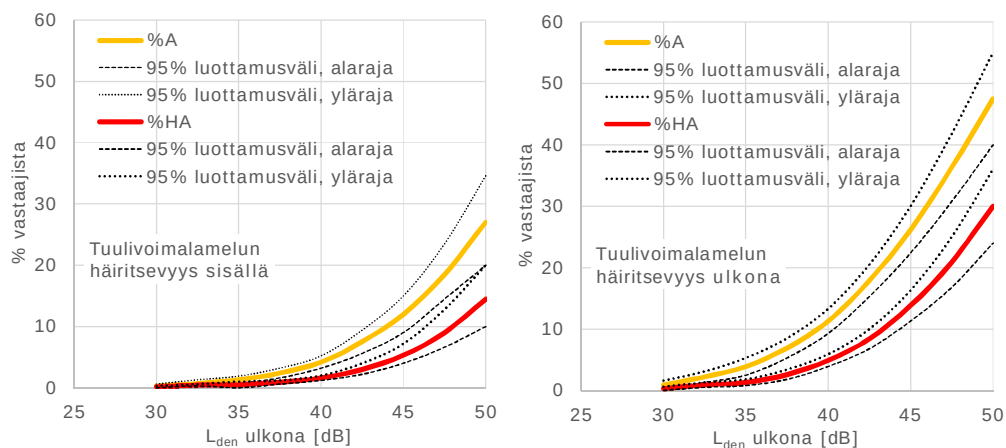
Kuva 4.10. Pedersenin ym. (2009) havainto siitä, että voimalan näkeminen sekä tekee tuulivoimalan melun herkemmin havaittavaksi että aikaansaa häiritsevyyden kokemuksen. Ryhmien välisen eron tilastollinen merkitsevyys: * $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$.



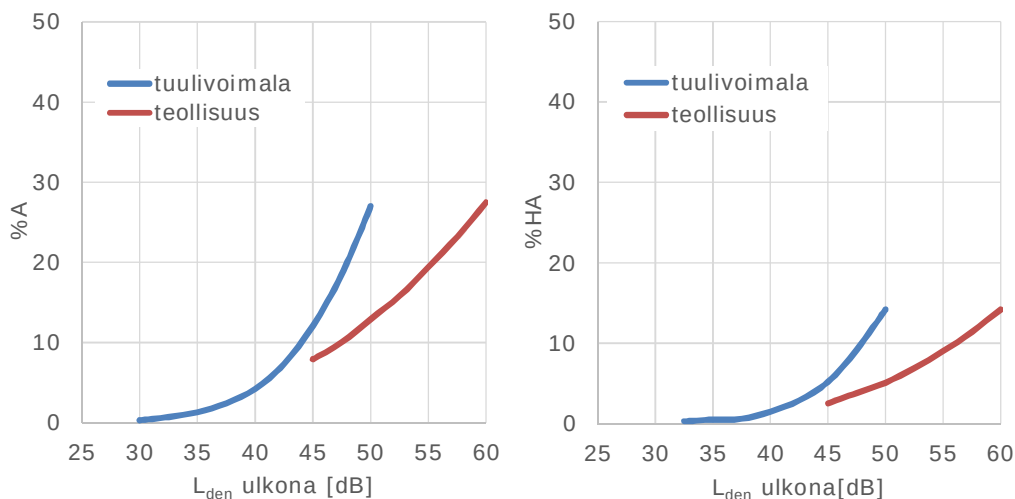
Kuva 4.11. Pedersenin ym. (2009) esittämä kuvaaja, jossa vertaillaan tuulivoimaloiden äänitaso-häiritsevyysskäyrää eri liikennelajien vastaaviin aiemmin julkaistuihin käyriin. %A kertoo häiritsevyyttä raportoineiden osuuden. %HA kertoo erittäin paljon häiritsevyyttä raportoineiden osuuden. Kuva antaa virheellisen käsityksen tuulivoimalamelun häiritsevyydestä (ks. teksti) eikä sitä soveltaa arvioitaessa tuulivoimaloiden melun häiritsevyyttä suhteessa muihin melulajeihin.



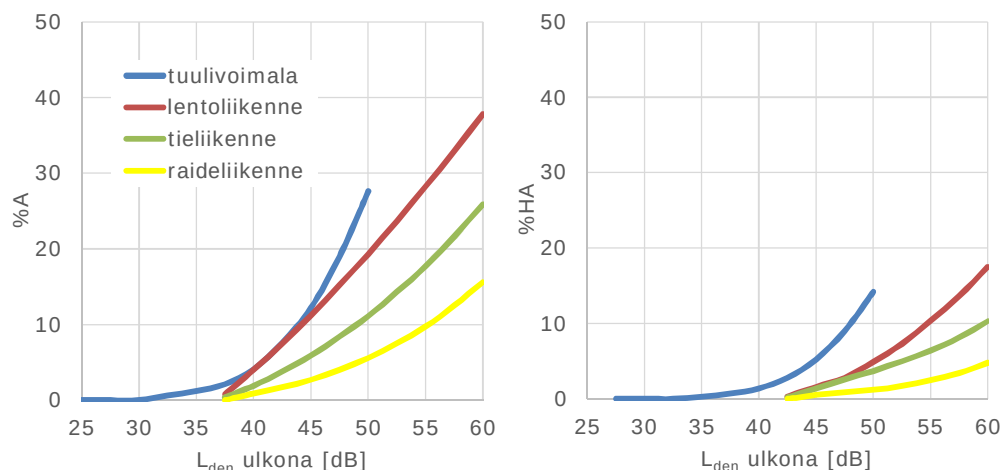
Kuva 4.12. Pedersenin ym. (2010) mukaan jos tieliikenteen taustäänitaso on yhtä suuri tai suurempi kuin tuulivoimaloiden äänitaso, tuulivoimaloiden ääntä kuullaan vähemmän etenkin pienillä voimalan äänitasoilla (vasen). Sen sijaan häiritsevyyteen (oikea) tieliikenteen taustäänitasolla ei ollut juurikaan merkitystä. Oikeanpuoleisessa kuvassa on poistettu henkilöt, jotka saivat taloudellista hyötyä voimaloista, koska he eivät kokeneet melun häiritsevän. Ryhmät 1-3 on kuvattu tekstissä.



Kuva 4.13. Janssenin ym. (2011) mukaiset äänitaso-häiritsevyysskäyrät koskien kokemusta asunnossa sisällä (vasen) tai ulkona pihamaalla (oikea). %A kertoo häiritsevyyttä raportoineiden osuuden. %HA kertoo erittäin paljon häiritsevyyttä raportoineiden osuuden.



Kuva 4.14. Janssenin ym. (2011) mukaiset äänitaso-häiritsevyysskäyrät tuulivoimalamelulle ja tasaiselle teollisuusmelulle. Häiritsevyyssarviot perustuvat kokemuksiin asunnossa sisällä. %A (vasen) kertoo vastaajien osuuden, joka raportoi häiritsevyyttä. %HA (oikea) kertoo vastaajien osuuden, joka raportoi erittäin paljon häiritsevyyttä.



Kuva 4.15. Janssenin ym. (2011) mukaiset äänitaso-häiritsevyyssäyrät tuulivoimalamelulle ja erityyppisille liikennemeluille. Häiritsevyys koskee kokemusta asunnon sisätiloissa. %A kertoo vastaajien osuuden, joka raportoi häiritsevyyttä. %HA (oikea) kertoo vastaajien osuuden, joka raportoi erittäin paljon häiritsevyyttä. Raportin kansikuva on peräisin vasemmasta kuvasta.

Taulukko 4.5. Nissenbaumin ym. (2012) tutkimuksen päämittareiden keskiarvot lähi- ja kaukoalueilla. Keskiarvojen ero on tilastollisesti merkitsevä, kun $p < 0.05$.

Subjektiiivinen mittari	Lähialue	Kaukoalue	p-arvo
	375-1400 m	3000-6600 m	
PSQI pisteiden keskiarvo *	7.8	6	0.046
PSQI pisteiden määrä yli > 5 (% vastaajista)	65.8	43.9	0.0745
ESS pisteiden keskiarvo **	7.8	5.7	0.032
PSQI pisteiden määrä yli > 10 (% vastaajista)	23.7	9.8	0.131
SF36 pisteiden keskiarvo	42	52.9	0.0021
Poismuuttohalukkuus voimaloiden rakentamisen jälkeen (% vastaajista)	73.7	0	0.0001
Vastaajamäärä	38	41	

* PSQI>5 katsotaan huononaiseksi.

** Vain 10-20 % väestöstä ESS pistemäärä on yli 10, joka tarkoittaa korkeaa päiväajan uneliaisuutta.

Tavoitteena oli koota yhteen ulkomaalainen tutkimustieto, jossa on selvitetty tuulivoimalamelun terveysvaikutuksia asuinympäristöissä laajoin kyselytutkimuksin. Tuulivoimalamelun äänitasolla ja häiritsevyydellä voitiin havaita tilastollisesti merkitsevä yhteys. Asunnon sisäpuolisen melun alkaa kokea häiritseväksi yli 10 % väestöstä, kun äänitaso ulkona ylittää 40 dB L_{Aeq} . Tuulivoimalamelu koetaan yhtä häiritseväksi kuin tasoltaan samanlainen lentoliikennemelu mutta hieman häiritsevämmäksi kuin tasoltaan samanlainen tieliikennemelu. Äänitasoa enemmän melun häiritsevyyttä näyttäisivät selittävän erilaiset väliin tulevat muuttujat kuten tuulivoimalan näkyminen asuntoon tai pihamaalle, asenteet tuulivoimaloiden maisemavaikutuksia kohtaan, odotukset asuinalueen rauhallisuuden suhteen ja taloudellinen hyötyminen tuulivoimaloista. Tuulivoimaloiden äänitasolla ja unen laadulla ei ole havaittu yhteyttä. Tutkimuksia on toistaiseksi julkaistu vähän ja niihin liittyy useita epävarmuustekijöitä. Jatkotutkimuksissa tulisi kiinnittää huomiota epävarmuustekijöiden vähentämiseen.

Työterveyslaitos

Topeliuksenkatu 41 a A, 00250 Helsinki

www.ttl.fi

ISBN 978-952-261-488-9 (PDF)



Työterveyslaitos | Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health