

Kari Pesonen

Ympäristömelun haittojen
arvioinnin perusteita

ISSN 1236-2115

ISBN 952-00-1684-8 (nid.)

ISBN 952-00-1685-6 (PDF)

Taitto: AT-Julkaisutoimisto Oy

Paino: Yliopistopaino, Helsinki 2005

TIIVISTELMÄ

Kari Pesonen. Ympäristömelun haittojen arvioinnin perusteita. Helsinki 2005. 174 s. (Sosiaali- ja terveysministeriön selvityksiä, ISSN 12236-2115; 2005:14) ISBN 952-00-1684-8 (nid.), ISBN 952-00-1685-6 (PDF)

Sosiaali- ja terveysministeriön hallinnonalalla on julkaistu useita terveyshaittaa aiheuttavaa, melua koskevia arviointiohjeita. Viimeisimmän, vuonna 2003 julkaistun Asumisterveysohjeen (STM, oppaita 2003:1) yhteydessä, ministeriö päätti laatia erikseen selvityksen ympäristömelun aiheuttamien haittojen arviointiperusteista. Selvityksessä tarkastellaan ympäristömelun erilaisia arvioinnin perusteita ja esitetään katsaus arviointiperusteita ja -menetelmiä käsittelevistä julkaisuista. Tällä tavoin voidaan siirtää tutkimuksella hankittua tietoa alan tutkijoiden ja viranomaisten käyttöön.

Ympäristön- ja terveydensuojelussa ollaan siirtymässä melun ja altistuksen voimakkuuden arvioinnista vaikutusten arviointiin ja erilaisten ympäristön tilaa koskevien meluindikaattoreiden käyttöön. Vaikutusten katsotaan riippuvan parhaiten melun koetusta eli subjektiivisesta voimakkuudesta. Subjektiivisen voimakkuuden mittoja ovat äänekkyyys, meluisuus ja kiusallisuus. Näitä suureita ja niiden arvioinnin perusteita on käsitelty perusteellisesti, kuten myös melua koskevia valituksia meluhaittojen indikaattorina.

Euroopan unioni ja Maailman Terveysjärjestö (WHO) harmonisoivat melun arvioinnin menetelmiä ja suureita. Kyselytutkimuksin mitatusta kiusallisuuden ja yöaikaisen melun aiheuttamien unihäiriöiden esiintyvyydestä on tullut kaksi tärkeintä ympäristömelun päävaikutusta. Näiden lisäksi melulla on useita muita vaikutuksia, joiden esiintyvyyksiä joudutaan selvittämään arvioitaessa millaisia terveyshaittoja melu aiheuttaa ja mikä on haittojen esiintyvyys. Erilaisten meluntorjuntavaihtoehtojen tehokkuuden arvioinnissa ollaan siirtymässä vaikutusperusteiseen vertailuun. Kiusallisuutta, erilaisia häiritsevyyksivaikutuksia ja unihäiriöiden syntymekanismeja ja arviointia on tarkasteltu selvityksessä laajasti.

Selvityksessä on käsitelty myös melun impulssimaisuuden ja kapeakaistaisuuden arviointia, kuten myös pieni- eli matalataajuisen melun arviointia.

Melulle altistuneiden ihmisten yksilölliset erot, esimerkiksi meluherkkyys ja tottuminen meluun, vaikuttavat siihen, miten ihminen melun kokee. Meluherkkyys ja tottuminen ovat vaikutusten voimakkuutta ja esiintyvyyttä muuttavia tekijöitä. Meluherkkyyttä ja tottumista on myös tarkasteltu selvityksessä.

Asiasanat:

altistuminen, melu, menetelmät, terveydensuojelu, terveysvaikutukset, ympäristöhaitat, ympäristövaikutusten arviointi

SAMMANDRAG

Kari Pesonen. Grunder för bedömning av skada som orsakas av miljöbuller. Helsingfors 2005. 174 s. (Social- och hälsovårdsministeriets rapporter, ISSN 12236-2115; 2005:14) ISBN 952-00-1684-8 (inh.), ISBN 952-00-1685-6 (PDF)

Inom social- och hälsovårdsministeriets förvaltningsområde har man publicerat flera rekommendationer för bedömning av buller som är menligt för hälsan. I samband med den senaste, Anvisningar om boendehälsa (SHM:s handböcker 2003:2), beslöt ministeriet att upprätta en separat utredning om bedömningsgrunder för skador som orsakas av miljöbuller. Utredningen granskar olika kriterier och metoder för bedömning av miljöbuller samt framställer en översikt av litteratur kring bedömningsgrunderna och bedömningsmetoderna. På detta sätt kan man överföra forskningsbaserad kunskap till användning för forskare och myndigheter på området.

Inom miljö- och hälsoskydd håller man på att övergå från att bedöma styrkan av buller och utsatthet till att bedöma bullereffekterna och användningen av olika slags bullermått som beskriver miljötillstånd. Effekterna anses vara mest beroende på den subjektiva styrkan av buller. De tre huvudmått på subjektiv styrka är hörstyrka, bullrighet och störning (i meningen störningsupplevelse). Dessa storheter och grunderna för bedömning av dem har behandlats på ett omfattande sätt. Samma gäller för klagomål som ett mått på bullerskada.

Europeiska unionen och Världshälsoorganisationen (WHO) harmoniserar metoder och storheter för bedömning av buller. Prevalensen av störningsupplevelsen och sömnstörningar på grund av nattligt buller som mätts med hjälp av enkäter har blivit de två mest betydande huvudeffekterna av miljöbuller. Därtill har buller flera andra effekter vars prevalens måste utredas när man bedömer hurdana hälsoskador buller orsakar och prevalensen av skadorna. Vid bedömning av effektiviteten av olika bullerbekämpningsmetoder håller man på att övergå till en jämförelse som baseras på skillnader i bullereffekterna. På ett omfattande sätt granskar utredningen störningsupplevelse, olika slags störningseffekter och uppkomstmekanismer bakom dem och bedömning av sömnstörningar.

Utredningen behandlar också bedömningen av hur impulsartat eller smalbandigt bullret är samt bedömningen av lågfrekvent buller.

Individuella skillnader bland människor som blivit utsatta för buller, exempelvis känslighet och tillvänjning på bullerexponering, påverkar hur människor upplever buller. Känslighet för och tillvänjning av bullerexponering är faktorer som påverkar bullereffekternas styrka och prevalens. Utredningen granskar även känslighet och tillvänjning av buller.

Nyckelord:

bedömning av miljöeffekter, buller, exponering, hälsoskydd, hälsoverkan, metoder, miljöskador

SUMMARY

Kari Pesonen. Grounds for assessing hazards caused by environmental noise. Helsinki, 2005. 174pp. (Reports of the Ministry of Social Affairs and Health, ISSN 12236-2115; 2005:14) ISBN 952-00-1684-8 (print), ISBN 952-00-1685-6 (PDF)

A number of guidelines for assessing noise-related health hazards have been published in the administrative field of the Ministry of Social Affairs and Health. In connection with the latest publication, Instructions regarding indoor health from 2003 (MSAH Handbooks 2003:1), the Ministry decided to compile a separate report on the grounds for assessing health hazards caused by environmental noise. The report considers different criteria and bases for assessing environmental noise and presents an overview of the literature on assessment criteria and methods. In this way, research results can be reached easily and applied in practice by researchers and authorities in the field.

In environmental and health protection the emphasis in noise assessment is shifting from the assessment based on noise levels and exposure to noise to the assessment of the prevalence of noise effects and the use of different indicators of noise with regard to the environment. Effects are seen to depend mostly on the perceived intensity of noise. The main measures of the perceived intensity are loudness, noisiness, and annoyance. These quantities and the grounds for assessing them as well as complaints about noise as indicators of noise nuisances have been dealt with thoroughly.

The European Union and the World Health Organization are harmonising the methods and quantities for assessing noise. The prevalence of annoyance and the prevalence of sleep disorders due to night-time noise, as measured by questionnaire surveys, are now considered the two most important effects of environmental noise. In addition, noise has many other effects, which must be studied when assessing case by case what noise-related health hazards there are and their prevalence. In assessing the effectiveness of different alternatives for noise prevention, there is a shift towards comparison based on noise effects. Assessment of different annoyance effects of noise and the mechanisms of sleep disorders are reviewed extensively in the report.

The report also deals with the assessment of impulsive and narrow-band noises, as well as the assessment of low-frequency noise effects.

Individual variations between persons that are exposed to noise, such as sensitivity to noise and habituating to noise, affect how individuals perceive noise. Noise sensitivity and habituating to noise are examples of factors that affect the severity and prevalence of noise effects. This is why the report also examines noise sensitivity and habituating to noise.

Key words:

environmental impact, environmental impact assessment, exposure, health impact, health protection, methods, noise

Esipuhe ja selvityksen taustaa

Sosiaali- ja terveysministeriö julkaisi alkuvuodesta 2003 terveydensuojelulain 763/94 perusteella sisätilojen melutasojen ohjearvot.¹ Tämän oppaan valmistelutyön yhteydessä allekirjoittanut perehtyi suureen joukkoon kansainvälisessä kirjallisuudessa julkaistuja tutkimuksia melun aiheuttamista vaikutuksista, terveyshaitoista, sekä niiden indikaattoreista. Läpikäynti oli jatkoa sille kirjallisuuden ja tutkimusten selvitystyölle, jonka allekirjoittanut teki vuonna 1997 julkaistun sisäilmaohjeen valmistelun yhteydessä.²

Vuoden 1997 sisämelujen ohjearvojen valmistelutyön kuluessa Suomi liittyi Euroopan Unioniin, ensin liitännäisjäseneksi ja sitten täysjäseneksi. EU:n ympäristöasioita koskevan viidennen toimintaohjelman yhtenä kohteena on jäsenmaiden meluntorjuntapolitiikan yhdenmukaistamiseen tähtäävät toimenpiteet. EU-jäsenyyden vaikutuksien ja tarpeiden ennakkoimiseksi valmistelutyön yhteydessä tehtiin laaja selvitys¹⁰ eri maiden melutasojen ohjearvoista ja ympäristömelujen mittaus- ja määritysmenetelmistä. Kun julkistettu tieto ja käytäntö eroavat usein melkoisesti toisistaan, pyrittiin selvittämään myös ko. maiden meluntorjuntapolitiikan käytäntöjä. Jälkikäteen oli mielenkiintoista havaita, että myös saksalaiset¹¹ ja EU:n hallinnossa ympäristöasioita hoitava päätoimisto DG XI¹² (nykyisin DG Env.) olivat samanaikaisesti laatimassa selvityksiä eri maiden ohjearvoista. Kuulopuheiden mukaan myös Italia teki samoihin aikoihin omia vastaavia selvityksiään.

EU:n meluntorjuntapolitiikassa tärkeimpinä melun haitallisuuden kriteereinä on ympäristömelun aiheuttama kiusallisuus (kyselytutkimuksin mitattu annoyance-vaste) ja yöaikainen unenhäirintä. Kiusallisuusvaste soveltuu hyvin yhteiskuntasuunnittelussa* käytettäväksi melun haitallisuuden tai elinympäristön laadun mittariksi, mutta terveydellisten olojen mittarina se on – ainakin yksinomaisena mittarina käytettynä – epäspesifinen.

Oleskelutilojen melutasot ovat yleensä hyvin alhaisia verrattuna ulkoalueiden ja työpaikkojen melutasoihin. Suurin osa meluvaikutustutkimuksia – lukuun ottamatta tutkimuksia melun vaikutuksista uneen – koskee altistuksia, joissa äänitaso ylittää selvästi 45...55 dB(A)-tason. Suurin osa näistä tutkimuksista päättyy tuloksiin, joiden mukaan haitallisuus (terveyden kannalta) on olematon ulkomelun tason ollessa alle 45... 55 dB(A). Näiden tutkimusten perusteella ei pidä tehdä pitkälle meneviä päätelmiä siitä, millaisia haittoja tätä hiljaisemmat sisätilojen melut aiheuttavat tai ovat aiheuttamatta.

Toinen ympäristömelututkimuksiin liittyvä asia, joka on syytä pitää mielessä, on se kymmenissä tutkimuksissa todettu seikka, että kyselytutkimuksissa

* Ympäristömeludirektiivin 2002/49/EY englanninkielisessä versiossa käytetään termiä strateginen suunnittelu.

asukkaiden arviot asuinympäristönsä yleisestä akustisesta laadusta ja melun haitallisuudesta korreloivat usein – mutta ei kaikkien melulajien eikä kaikkien haittojen osalta – huomattavasti paremmin ulkomelun voimakkuuteen kuin sisätilojen¹³ (so. ulkoa sisään kuuluvan) melun voimakkuuteen.^{14, 15, 16} Tämä tarkoittaa sitä, että ulkomelu on asuinympäristön akustisen laadun arvioinnin päätekijä. Tätä ei kuitenkaan pidä ymmärtää niin, että sisätilojen melun (todellinen) haitallisuus vähentyisi sillä, että alennetaan ulkomelun tasoa ja pidetään sisämelun taso entisenä tai annetaan sen kasvaa.

Ulkomelun voimakkuus riippuu yleensä huomattavasti enemmän tarkasteltavana olevan melulähteen melupäästön voimakkuudesta ja etäisyydestä melulähteeseen kuin sisämelun taso. Japanilaisessa tutkimuksessa¹⁷ sisämelun $L_{Aeq,24h}$ -tason todettiin riippuvan selvimmin perheenjäsenten määrästä. Yöaikainen sisämelun voimakkuus riippuu koko vuorokauden sisämelun keskiäänitasoa enemmän ulkomelun tasosta ainakin tiettyyn rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyyteen asti.⁵⁹⁶

- - -

Referoitu kirjallisuus (yli 700 viitettä) on esitetty vain esimerkkinä monista tutkimuksista, ja on tarkoitettu lähinnä tiedonhaun lähtökohdaksi lisätietoja kaipaaville. Valitettavasti monia aiheita ja yksityiskohtia, joista on kerätty kymmeniä tutkimusraportteja ja -viitteitä, on ollut pakko karsia. Esimerkkinä mainittakoon melun häirintävaikutukset kognitiivisiin toimintoihin, kuten muistiin painamiseen ja oppimiseen sekä melun vaikutukset verisuonisairauksiin ja tätä kautta ennenaikaisiin kuolemiin.

Lukija voi kaivata myös enemmän yhteenvetoja. Kun ei ole täyttä varmuutta siitä, miten esimerkiksi suuret vuodenaikavaihtelumme, asunotemme ulkokuoren oletettu monia muita maita parempi ääneneristävyys ja suuri vapaa-ajan asuntokantamme (n. 500 000 vapaa-ajan asuntoa) mahdollisesti vaikuttavat muissa maissa tehtyjen vaikutustutkimusten siirrettävyyteen Suomen oloihin, yhteenvetoja (esim. millaisia vastefunktioita Suomessa tulisi käyttää) on tehty tähän tutkimukseen säästeliäästi.

Helsingissä 19.12.2004

Kari Pesonen
sähköposti: Kari.Pesonen@welho.com

Sisällys

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| SAMMANDRAG | 4 |
| SUMMARY | 5 |
| ESIPUHE JA SELVITYKSEN TAUSTAA | 7 |
| MITÄ MELULLA TARKOITETAAN? | 11 |
| MITÄ YMPÄRISTÖMELULLA TARKOITETAAN? | 11 |
| MELUVAIKUTUKSET, TERVEYSHAITTA | 12 |
| YLEINEN ELINYMPÄRISTÖN TERVEYSVAIKUTUSTEN SELITYSMALLI | 13 |
| MELUREAKTION ELI -VAIKUTUKSEN RIIPPUVUUS ALTISTUKSESTA | 14 |
| MELUINDIKAATTORIT | 15 |
| MELUVAIKUTUSTEN JA MELUN YHTEYDET YKSILÖTASOLLA | 16 |
| MELUN JA MELUREAKTIOIDEN YHTEYDET JOUKKO- JA YHDYSKUNTATASOLLA | 18 |
| VALITUKSET MELUHAITTOJEN INDIKAATTORINA JA KRITEERINÄ | 20 |
| MIKÄ ÄÄNI ON MELUA? | 24 |
| MELUN SUBJEKTIIVISEN VOIMAKKUUDEN MITTARIT | 25 |
| Äänekkyys, meluisuus, kiusallisuus | 26 |
| Melun voimakkuus ympäristön ”pilaantuneisuuden” mittana | 30 |
| Äänekkyys | 31 |
| Ajallisesti vaihtelevan signaalin äänekkyiden prosessoinnista | 36 |
| Äänekkyiden stabiloituminen | 38 |
| Äänekkyiden adaptoituminen | 39 |
| Äänekkyiden riippuvuus altistavan äänen kestosta ja voimakkuuden ajallisesta vaihtelusta | 39 |
| Muistinvarainen äänekkyys | 42 |
| Ennakoitu äänekkyys | 42 |
| Sisä- ja ulkomelun äänekkyys ja niiden keskinäinen riippuvuus | 43 |
| Usean melun yhteensä aiheuttama äänekkyys | 43 |
| Hiljaisten, kuulokynnystä lähellä olevien äänien äänekkyys | 44 |
| Äänekkyys melun kiusallisuuden mittana | 48 |
| Usean melun äänekkyiden yhteisvaikutus kokonaishaitallisuuden kannalta | 50 |
| Äänekkyiden ja meluhaittojen ajallisista kausaalisuhteista | 50 |
| Meluisuus | 51 |
| Kiusallisuus ja häiritsevyys | 53 |
| Kiusallisuus | 54 |
| Kiusallisuuden mittaus laboratoriossa ja kentällä | 55 |
| Kiusallisuuden mittaus kyselytutkimuksin | 55 |
| Kiusallisuusreaktion syntymekanismi | 56 |
| Mitä kiusallisuus mittaa? | 62 |
| Kiusallisuuden objektiivinen mittaus | 63 |

| | |
|---|---------|
| Muistinvarainen kiusallisuus | 66 |
| Ennakoitu kiusallisuus | 66 |
| Häiritsevyys | 68 |
| Usean melun yhteensä aiheuttama kiusallisuus | 69 |
| Kiusallisuuden ja meluhaittojen ajallisesta kausaalisuhteesta | 75 |
| Melutaso ja muut muuttujat kiusallisuuden selittäjänä | 76 |
| YKSITTÄISEN MELUTAPAHTUMAN HAVAITTAVUUS | 78 |
| KAPEAKAISTAISUUS | 79 |
| IMPULSSIMAISSUUS | 87 |
| Impulssimaisen melun arvioinnissa käytettävät mittayksiköt (suureet) | 89 |
| Impulssimelun haitallisuuskorjaus | 93 |
| KIUSALLISUUS JA HÄIRITSEVYYS VUOROKAUDEN ERI AIKAINA | 95 |
| YÖAIKAISEN MELUN KIUSSALLISUUS JA HÄIRITSEVYYS | 96 |
| KIUSALLISUUS JA HÄIRITSEVYYS ERI VUODENAIKOINA | 98 |
| KADUN JA PIHAN PUOLEN MELUERON VAIKUTUS KIUSSALLISUUTEEN | 100 |
| LABORATORIO- JA KENTTÄTUTKIMUSTEN EROISTA | 101 |
| UNENHÄIRINTÄ | 102 |
| Unihäiriöiden tutkimuskohteista ja -menetelmistä | 102 |
| Melun aiheuttamien unihäiriöiden ja (terveys)vaikutusten syntymekanismi | 106 |
| Unihäiriöiden riippuvuus melutapahtuman voimakkuudesta ja ominaisuuksista | 108 |
| Yöaikaisen ekvivalentti- eli keskiäänitason riippuvuus melutapahtumien äänialtistustasosta | 115 |
| Eräitä erityisnäkökohtia | 116 |
| MUISTA TERVEYSVAIKUTUKSISTA | 117 |
| PUHEENHÄIRINTÄ | 118 |
| PIENI- ELI MATALATAAJUINEN MELU | 119 |
| Pieni- eli matalataajuisen melun kapeakaistaisuus | 123 |
| Pieni- eli matalataajuisen melun impulssimaisuus | 124 |
| C-taajuuspainotus matala- eli pienitaajuisen melun mittauksessa | 125 |
| L_{DEN} - JA $L_{Aeq, 24h}$ -TYYPPISET TASOT MELUHAITTOJEN INDIKAATTORINA | 127 |
| NAAPURISTA KUULUVA MELU | 130 |
| TOTTUMINEN MELUUN | 130 |
| MELUHERKÄT KANSALAISET | 133 |
| Kirjallisuusluettelo | 137 |

Mitä melulla tarkoitetaan?

Melu on ääntä. Ääni puolestaan on väliaineessa – yleisimmin ilmassa – aaltoliikkeenä etenevä väliaineen tilasuureiden (paine/jännitys, tiheys, hiukkasliike, ym.) ”häiriö” tai tällaisen häiriön aikaansaama kuulohavainto.

Lainsäädännön lähtökohtana on se, että ääni ei voi – mutta melu voi – aiheuttaa sellaista haittaa, jonka vuoksi voitaisiin vaatia äänen tai altistuksen vähentämistä.

Melun haitalliset vaikutukset ovat hyvin moninaisia; pahimpana elämistä ja kommunikointia vaikeuttava kuulon pysyvä alentuminen sekä tinnitus eli korvien soiminen tai suhina ilman vastaava ääniärsykettä ja lievimpänä elinympäristön laatua alentava (vähäinen) kiusallisuus ja häiritsevyys, tahi kuulijalleen vähämerkityksellisen ääni-informaation osittainen peittyminen meluun.

Meluksi luokitellun äänen tunnusmerkkinä on se, että ääni on epämiellyttävää tai ei-toivottua. Nämä ovat subjektiivisia, kuulijariippuvaisia käsitteitä. Ei-toivottavuus on usein myös kontekstiriippuvainen. Esimerkiksi ravintolan karaoke-musiikki on ravintolassa oleville usein toivottua ääntä, mutta on yleensä naapuriasunnossa kuultuna ei-toivottua. Palaamme kysymykseen ”mikä ääni on melua?” tarkemmin jäljempänä.

Mitä ympäristömelulla tarkoitetaan?

Ympäristömelulla tarkoitetaan sekä yksittäistä että kaikkea ihmisen asuin- ja elinympäristössä esiintyvää melua, työhön liittyvä melu ja melualtistus pois luettuna.^{84, 18} Euroopan Union ympäristömeludirektiivissä¹⁹ ympäristömelu on määritelty hieman suppeammin. Esimerkiksi sisätilojen ja ns. naapuriston melu ei ole direktiivissä tarkoitettua ympäristömelua.

Englanninkielinen termi ”community noise” tarkoittaa asuinympäristön melua taajamissa. Sen sijasta käytetään usein käsitettä ”ambient noise”, joka tarkoittaa eri etäisyyksiltä ja eri lähteistä peräisin olevan melua yhteensä eli *kokonaismelua*. Englannin termi ”neighborhood noise”, ”naapuriston melu” tarkoittaa naapureiden tuottamaa melua, mukaan luettuna muun muassa ulkoilmakonserttien, urheilupaikkojen ja vastaavien toimintojen melu.

Meluvaikutukset, terveyshaitta

Ympäristömelulla on hyvin monenlaisia vaikutuksia. Osa on ihmisille haitallisia, osa ei. Vaikutuksia ihmiseen on totuttu arvioimaan sen perusteella, kuinka haitallista melu on altistetun, altistettujen tai väestön terveydelle.⁵⁷⁶ Arviointi edellyttää, että pystymme määrittelemään yksikäsitteisesti, mitä terveydellä ja haitallisuudella terveydelle, so. *terveyshaitalla*, tarkoitetaan ja, miten ne mitataan tai arvioidaan. Tavanomaisen asuin ympäristön melun vaikutusta yksilön terveyteen on hyvin vaikea ennustaa kovin tarkasti. Tautien ja erilaisten vaikutusten esiintyvyyden (tai ilmaantuvuuden) ja elinympäristön melun välille voidaan esittää vain tilastollisia riippuvuuksia tai riskejä.^{20, 21}

WHO on määritellyt terveyden seuraavasti: ”Terveys tarkoittaa täydellistä fyysistä, henkistä ja sosiaalista hyvinvoinnin tilaa, ei pelkästään sairauksien ja raihnaisuuden poissaoloa.”²² Ensilukemalta määritelmä näyttää selvältä, mutta esimerkiksi sitä, mitä tässä yhteydessä tarkoitetaan ”täydellisellä”, on mahdotonta konkretisoida, saatikka määritellä sille objektiivinen, yleispätevä mittaustapa.

Lienee itsestään selvää, että valtioilla ja kunnilla ei ole mahdollisuuksia taata kaikille kansalaisilleen edellä mainitun WHO:n määritelmän mukaista täydellistä terveyttä.

Mitattaessa ja ilmoitettaessa terveysvaikutuksia kansanterveyden tasolla mittoina käytetään tautien (vaikutusten) esiintyvyyttä ja ilmaantuvuutta. Tautien *esiintyvyys* eli prevalenssi ilmaisee tautitapausten määrää suhteessa koko väestöön. Tautien *ilmaantuvuus* eli insidenssi tarkoittaa uusien tapausten määrää henkilövuosia (tai muuta aikajännettä) kohden.^{23, 24}

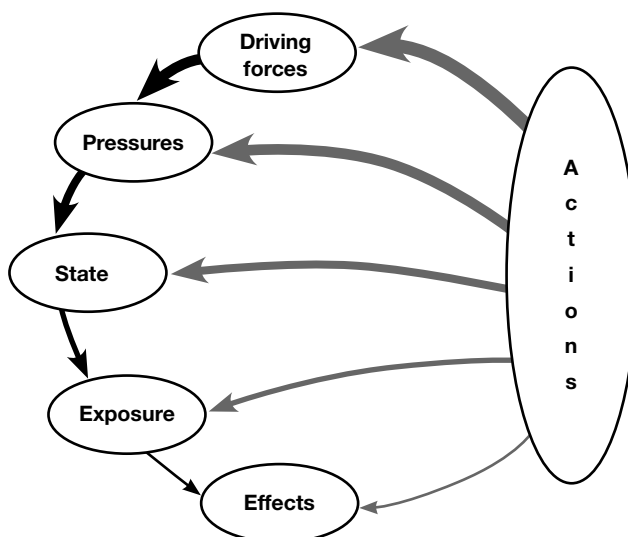
Terveysvaikutusten ilmoittaminen esiintyvyyden ja ilmaantuvuuden perusteella edellyttää, että on määriteltävä, mikä on se melun aiheuttaman henkisen tai fyysisen tilan aste, jonka ylittyessä tai alittuessa tila on katsottava ”taudiksi”, milloin ei. Kun, tai jos, tiedemaailma ei pysty tällaista yksikäsitteistä rajaa määrittämään, raja joudutaan asettamaan yhteiskuntapoliittisen harkinnan perusteella. Kaikessa ympäristövaikutusten arvioinnissa ollaan siirtymässä vaikutusperusteiseen arviointiin. Tämä edellyttää edellä mainittujen rajojen ja tunnusten määrittelyä.

Vain harvat ympäristömelun haitallisuuden kriteereinä tai mittoina meluvaikutukset ovat taudin tapaisia kaksiarvoisia vasteita: henkilöllä joko on tauti tai ei ole tautia. Yleensä vaikutuksia mitataan esiintyvyyden väestövas-teilla, eli haitasta tai vaikutuksesta ”kärsivien” prosenttiosuutena koko väestöstä. Esiintyvyydvasteet ovat yleensä jatkuvia ja monotonisesti melun voimakkuuden funktiona kasvavia.

Yleinen elinympäristön terveysvaikutusten selitysmalli

Maailma terveysjärjestön (WHO) Euroopan aluetuimisto on pitkään kehittänyt ympäristöterveyden arviontimenetelmiä. Lähtökohtana on ollut yleinen ympäristöterveyden syy-seuraus-vaikutusmalli, eli niin sanottu **DPSEEA-malli*** (Driving forces-Pressures-State-Exposure-Effects-Actions).^{25, 26, 27, 28, 29, 30, †}

Tässä mallissa lähtökohtana ovat ”voimat” (engl. Driving forces), kuten yhteiskuntapoliittiset, taloudelliset tai teknologiset päätökset ja toimet, joiden seurauksena syntyy tai, jotka aiheuttavat (”toimeenpanevat”) ympäristöä kuormittavia paineita (Pressures), jotka puolestaan muuttavat ympäristön tilaa (State). Tila (tilasuureet) ja tilan muutokset altistavat ihmistä (Exposure). Altistuminen johtaa erilaisiin vaikutuksiin (Effect). Vaikutuksia voidaan vähentää tai suurentaa ketjun eri osiin kohdistuvien toimenpitein.



Kuva 1: DPSEEA-malli (Driving forces-Pressures-State-Exposure-Effects-Actions) kaaviollisesti esitettyinä.^{27, 25}

WHO:n Euroopan aluetuimisto ja sen työryhmät ovat vuodesta 2000 alkaen²⁶ tehneet selvityksiä ja ehdotuksia ympäristön terveysvaikutusten mittaamiseen sopivista indikaattoreista. Tavoitteena on harmonisoida Euroopan maiden käyttämät ympäristöterveyden indikaattorit. Tässä yhteydessä on selvitetty ja tehty ehdotuksia myös ääniympäristön indikaattoreista.

* lue: diipsii (englannin ääntämys kuten ”deepsea” äännetään)

† Moni muukin kansainvälinen organisaatio on osallistunut DPSEEA-mallin – tai voidaan puhua myös viitekehiksestä – kehittämiseen.

Osa selvityksistä on tehty yhteistyössä EU:n komission ympäristöosaston (DG ENV) ja sen työryhmien kanssa.^{31, 30, 32} Myös EU:ssa on tavoitteena ympäristöterveyden arvioinnissa ja vertailuissa käytettävien indikaattoreiden harmonisointi.^{33, 34} Hankkeeseen on sidottu myös muita tahoja.³⁵

Melureaktion eli -vaikutuksen riippuvuus altistuksesta

Hyvin usein oletetaan, että haitallisen meluvaikutuksen (Effect kuvassa 1), V , voimakkuus riippuu vain melun tai melualtistuksen (Exposure kuvassa 1) voimakkuudesta. Vaikutuksen ja altistuksen välinen riippuvuus voidaan tällöin merkitä symbolisesti

$$(1) \quad V = f(E)$$

jossa E on melun tai altistumisen (meluannoksen) voimakkuutta ja/tai toistuvuutta kuvaava mittaluku. Yleensä lähdetään siitä, että voimakkaampi melu tai suurempi altistuminen (annos) aiheuttaa suuremman kielteisen vaikutuksen.* Aikaisemmin kaavaa (1) nimitettiin *annosvasteeksi* (engl. dose response). Nykyisin suositellaan *altistumisvastetta* (engl. exposure response).³⁶ Vastefunktio (1) on yleensä erilainen eri meluille ja eri vaikutuksille. Yleensä henkilökohtaisen altistuksen, E_i , ja vaikutuksen, V_i , voimakkuutta ei tunneta tarkasti. Ulkomelujen vaikutuksia arvioitaessa käytetään yleensä pitkän ajan keskimääräistä tai tyypillistä melun voimakkuutta, esimerkiksi päivääjän melun vuosikeskiäänitasoa, $L_{Aeq,07-22h,vuosi}$

Hyvin monien ympäristömelujen voimakkuus vaihtelee. Melun voimakkuus on erilainen eri aikoina ja eri paikoissa. Myös se aika, jona henkilö ja eri henkilöt altistuvat tietylle melulle, voi vaihdella tunneittain, päivittäin ja kuukausittain, jopa vuosittain. Tästä vaihtelusta johtuen on syytä erottaa toisistaan lyhytaikaiset, hetkelliset vaikutukset ja pitkäaikaiset, pysyväiseksi katsottavat vaikutukset. *Hetkelliset vaikutukset riippuvat kaavan (1) tavoin hetkellisen melutason (altistuksen) voimakkuudesta ja pitkäaikaiset vaikutukset pitkän ajan keskimääräisen melun voimakkuudesta tai jostakin muusta mittaluvusta, joka kuvaa keskimääräistä altistavaa melua.*

Elinympäristön melu koostuu yleensä hyvin monista meluista, joiden osuus yksilön ja väestön kokonaisaltistumisessa vaihtelee. Erään vanhan tutkimuksen mukaan 70 % koehenkilön kuukauden meluannoksesta oli peräisin melutapahtumista, joiden osuus (esiintymisaika kuukaudessa) oli vain 7 % ajasta. Pääosa altistumisesta (annoksesta) koostui muista meluista, kuin tavanomaisista ympäristömeluista.³⁷

* Kun puhutaan myönteisistä vaikutuksista, esimerkiksi musiikkinautinnosta, niin äänen voimakkuuden kasvu voi huonontaa vaikutusta (nautintoa) ainakin äänen voimakkuuden ylittäessä jonkun raja-arvoalueen.

Jos lähdetään siitä, että mitä suurempi altistuksen voimakkuus (so. annos) on, sitä suurempi on kielteinen vaikutus, niin tämän hypoteesin mukaan vähän kokonaisaltistumista aiheuttavalla melulla, eli edelliseen kappaleeseen viitaten tavanomaisella ympäristömelulla, ei olisi – tai ei voisi olla – oleellista osuutta kielteisiin vaikutuksiin, kuten terveyshaittaan. Yleensä altistumisvaste kuitenkin määritellään melulajikohtaisesti. Vain yleisimpien ympäristömelujen, kuten liikennemelujen ja ampumaratamelun, ja yleisimpien vaikutusten, kuten kiusallisuus ja unenhäirintä, välisistä altistumisvasteista on tieteellisesti riittävän laajaa ja luotettavaa tietoa saatavilla.

On olemassa sellaisiakin meluvaikutuksia, joiden vaste on kaksiarvoinen. Toisin sanoen vaikutus joko ilmaantuu tai ei ilmaannu. Esimerkiksi valittaminen melusta on vasteena kaksiarvoinen: henkilö joko valittaa tai ei valita, kuten myös herääminen meluun: henkilö joko herää melutapahtumaan tai ei herää.

Melun kokeminen sekä erilaisten kokemusten eli vaikutusten voimakkuus riippuu monista muistakin seikoista kuin melun voimakkuudesta ja annoksesta. Enimmillään muiden seikkojen vaihtelu voi vaikuttaa esimerkiksi kiusallisuuteen yhtä paljon kuin 25 dB(A) vaihtelu melutasossa.^{38, 389} Lisäksi on ääniä ja tilanteita, joissa osa kuulijoista tai osallistujista kokee saman äänen miellyttävänä ja toivottuna ja osa epämiellyttävänä ja ei-toivottuna meluna.³⁹ Tällöin ei voida puhua yleisestä, kuulijoille yhteisestä haitallisuutta mittaavasta altistumisvasteesta.*

On syytä korostaa tässä yhteydessä myös sitä, että asiantuntija-arvio altistuksen haitallisuudesta terveydelle voi poiketa merkittävästi altistetun omasta arviosta.⁴⁰

Meluindikaattorit

Ympäristön tilan (State ks. kuva 1) arvioinnissa käytetty indikaattori voi olla pelkkä *ympäristön tilan indikaattori*, jolla ei ole välttämättä suoraa eikä epäsuoraa yhteyttä henkilöiden tai ihmisten hyvinvointiin tai kansanterveyteen. Vaikutuksia ja niiden voimakkuutta tai laajuutta/levinneyttä (Effect, kuvassa 1) karakterisoidaan, kuvataan tai mitataan *ympäristöterveyden indikaattoreilla*. Edellytyksenä on altistuksen ja terveysvaikutuksen välinen (tilastollinen) riippuvuus. Edellä mainitussa DPSEEA-mallissa vaikutus (Effect) tarkoittaa nimenomaan ympäristöterveydellistä vaikutusta. Ihmissä havaittavaa ympäristöterveydellistä vaikutusta ei ole, ellei ole osoittaa kehtään, johon altistus kohdistuu. Tässä mielessä ääniympäristön ympäristöter-

* Koska vastefunktio ei ole olestusarvoisesti yksiarvoinen eikä monotoninen. Saman altistusvoimakkuuden vaste voi olla toiselle nautinnollinen ja toiselle epämiellyttävä. Altistuksen voimakkuuden kasvu lisää toisella nautinnollisuutta, toisella taas epämiellyttävyyttä. Esimerkiksi pop- ja rock-konserteissa ja suurissa yleisötilaisuuksissa tavataan tällaista vastekäyttäytymistä.

veydellinen vaikutus on kuulijariippuvainen muuttuja ja riippuu vaikutuksen voimakkuuden lisäksi kuulijoiden lukumäärästä.

Indikaattori on osoitin tai ilmaisin, jonka tarkoituksena on osoittaa tai ilmaista yhteys yhdestä paikasta, asiasta, tilasta tai ilmiöstä toiseen. Yleisesti määriteltynä ympäristöterveyden indikaattori ilmaisee, mittaa tai kuvaa sellaista ympäristön tilaa, ominaisuutta tai olosuhdetta, joka antaa informaatiota jostakin sellaista toisesta ominaisuudesta tai olosuhteesta, joka ei ole suoraan havaittavissa tai mitattavissa itse ympäristöstä. Esimerkiksi yöaikaista melutasoa, $L_{Aeq, 22-07h}$ pidetään unihäiriöiden esiintyvyyden indikaattorina, koska unihäiriöiden esiintyvyyden ja yöaikaisen melutason voimakkuuden välillä on validi tilastollinen riippuvuus. Indikaattori, so. melutaso, ei kuitenkaan kerro mitään siitä, miksi melu aiheuttaa unihäiriöitä, eikä melutaso kerro (selitä) myöskään, millainen on asukkaiden terveys missäkin ympäristössä tai, mikä osuus väestöstä kärsii minkäkin asteisista unihäiriöistä ja kuinka usein.

Myös kaavan (1) altistuksen voimakkuutta, E , voidaan kutsua meluindikaattoriksi.

Hyvin usein luullaan, että melun tai altistuksen voimakkuus olisi suora melun haitallisuuden tai kielteisyyden mitta.* Näin ei ole. Melutaso – määriteltiinpä ja mitattiinpa se miten tahansa – on vain indikaattori, jonka perusteella voidaan vain arvioida jonkin (haitallisen) vaikutuksen mahdollista esiintyvyyttä tai voimakkuutta.

Meluvaikutusten ja melun yhteydet yksilötasolla

Terveys- ja ympäristövalvonnassa tyypillinen tehtävä on tietyn melun ja altistustilanteen yksilötasolla tai pienryhmässä (esim. perhe) aiheuttamien terveyshaittojen arviointi ja haittojen vähentämiseksi tarvittavien toimenpiteiden yksilöinti. Vaikka toimenpiteiden tarkoituksena on lieventää terveyden kannalta haitalliseksi luokiteltuja meluvaikutuksia eli melureaktioita (kuva 2, alin laatikko), niin käytännössä kontrollointi joudutaan kohdistamaan kuulijaa altistavan melun ja sen ominaisuuksien tai sen esiintymisajan ja keston kontrollointiin (kuva 2, ylin laatikko). Yhdyskuntasuunnittelussa voimme vaikuttaa moniin muihinkin kuvassa mainittuihin muuttujiin, joista melureaktio riippuu.

Kuten kuvassa 2 on esitetty, hyvin monet tekijät vaikuttavat melureaktioiden voimakkuuteen. Eri ihmiset voivat reagoida samaan meluun eri tavoin ja tietty henkilö voi reagoida samanlaiseen meluun eri tavoin eri aikoina tai eri

* Etenkin juristit näyttävät ajattalevan usein näin, kun on esimerkiksi puhe statukseltaan määrästasoisista melutasoista. Arvon alittava melu katsotaan haitattomaksi ja ylittävä melu niin haitalliseksi, että sitä ei voida sallia.

ympäristöissä.⁷¹⁹ Kyselytutkimuksissa asuin ympäristön melutaso, kuten L_{Aeq} - tai L_{AImax} -taso, selittää tyypillisesti korkeintaan 2... 40 % tietyn melun eri henkilöillä (yksilötasolla) aiheuttaman reaktion voimakkuuden (haitallisuuden) vaihtelusta. Monet muut seikat, esimerkiksi kuulijan asenne melulähteeseen ja melun aiheuttajaan, yksilöllinen meluherkkyys ja asuin ympäristön yleinen laatutaso, selittävät yhteensä vähintään yhtä suuren tai suuremman osuuden väestön henkilökohtaisen melureaktion vaihtelusta kuin melutaso.^{41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 314, *} Haittojen ja melutason välinen huono riippuvuus (suuri satunnaishajonta) voi johtua mm. seuraavista seikoista: a) altistavan melutason arviointitapa on epätarkka tai valittu altistuksen voimakkuutta kuvaava suure (indikaattori) ei vastaa sitä melun ominaisuutta, josta yksilön kokeman haitan suuruus todellisuudessa riippuu, b) haitan mittaustapa on epätarkka tai epäluotettava, c) haittavaste ei riipu validisti melun ominaisuuksista.^{48, 49, 50}



Kuva 2: Melun (äänen) ja meluvaikutusten (reaktioiden) välisiä yhteyksiä sekä niitä kuvaavia ja mittaavia suureita ja muuttujia.

* Monissa vastetutkimuksissa käytetään ryhmiteltyä aineistoa, jolloin korrelaatio on parempi ja selitysprosentti on suurempi.

Ulkoiset (kuva 2) ja sisäiset tekijät jaetaan vaikuttajiin (engl. moderator) ja välittäjiin (engl. mediator).⁵¹ Vaikuttajat ovat melusta ja altistumisesta riippumattomia tekijöitä, joilla on tilastollinen vaikutus mitattuun meluvaiikutukseen. Esimerkiksi kyselytutkimuksissa henkilön ikä ja sukupuoli ovat moderaattoreita. Välittäjä on altisteen ja vaikutuksen väliin kytkeytyvä ”suodatin”, joka muuttaa, esimerkiksi herkistää tai epäherkistää, vaikutusta. Esimerkiksi melu voi vaikuttaa henkilön terveyteen ja terveyden muutos puolestaan vaikuttaa melureaktion voimakkuuteen, jolloin terveydentila voi olla vaikutusta muuttava mediaattori. Moderaattoreiden vaikutus on useimmiten paljon merkittävämpi kuin mediaattoreiden.

Meluvaikutuksia tutkittaessa on syytä muistaa ihmisten luontainen tarve ja kyky käyttää erilaisia selviytymiskeinoja ja -toimia elämäntilanteiden hallintaan (engl. coping). Nämä selviytymistoimet, kuten valittaminen melusta, muuttaminen (liian meluisaksi koetusta) asuinympäristöstä hiljaisempaa tai kuulosuojainten tahi taustamusiikin käyttö melussa nukahattamisen helpottamiseksi, on katsottava osin meluvasteiksi, mutta toisaalta myös mediaattoreiden ja moderaattoreiden kaltaisiksi tekijöiksi. Erilaisten selviytymiskeinojen käytön esiintyvyyttä (käytön laajuutta) on käytetty meluvaikutuksen mittana.⁵² Mutta koska elämänhallinnan toimien onnistumisen aste, so. tuloksekkuus, vaikuttaa useimpiin muihin tunnettuihin meluvasteisiin, esimerkiksi kyselytutkimuksin mitattuun kiusallisuuteen tai unihäiriöiden esiintyvyyteen, niin vasteita tutkittaessa olisi selvitettävä, missä määrin elämänhallinnaksi katsottavat toimet ovat vaikuttaneet muihin meluvasteisiin.

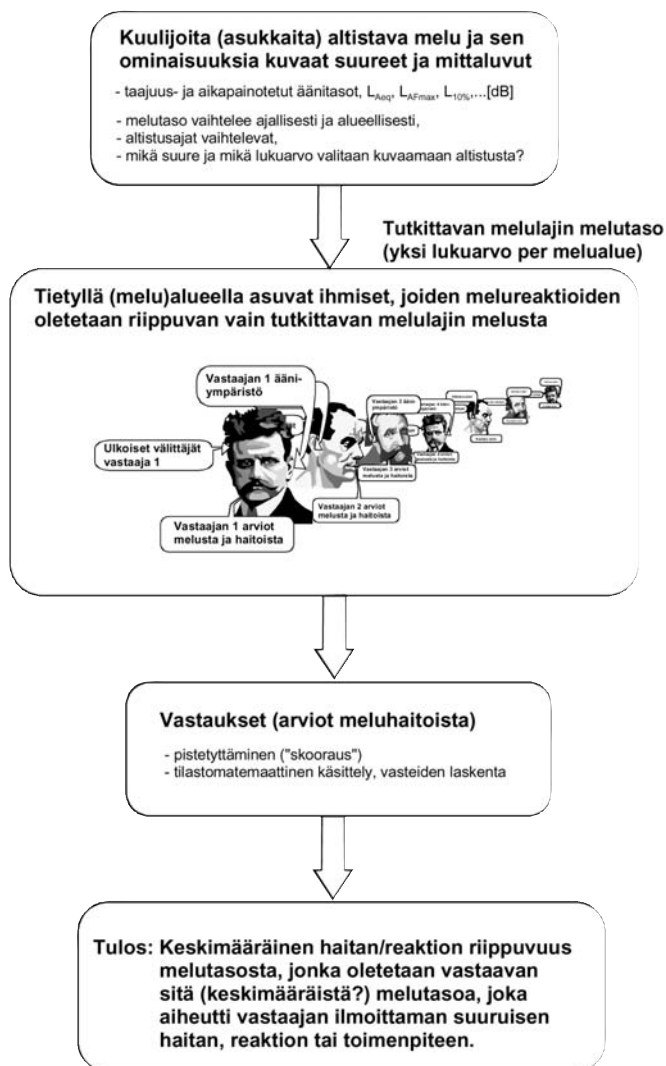
Melun ja melureaktioiden yhteydet joukko- ja yhdyskuntatasolla

Yhdyskuntasuunnittelussa, esimerkiksi kaavoituksessa ja ympäristömeludirektiivin tarkoittamassa muussa strategisessa suunnittelussa, käytössä olevat ympäristön laatukriteerit perustuvat melun osalta suurten ihmisjoukkojen keskimääräisiin vasteisiin (kuva 3) tai jonkun vaikutuksen esiintyvyyttä kuvaavaan tilastolliseen riskiin.

Yhdyskuntasuunnittelussa käytettävät elinympäristön laadun ja meluhaittojen kriteerit perustuvat yleensä tutkimuksiin, joissa on kerätty ja analysoitu kysely- tai haastattelumenetelmällä saadut vähintään 500 ...1000 hengen arviot vastaajien kokemista haitoista. Suuressa tietokannassa voi olla kymmenien eri tutkimusten ja yli 50 000 henkilön vastaukset. Joukkotutkimusten aineistoon perustuvia kriteereitä (”ohjearvoja” ja riippuvuusvasteita) arvioitaessa on syytä muistaa, että vasteet ovat suurten joukkojen, usein jopa eri kulttuureista peräisin olevien joukkojen, vastausten tilastollisia riippuvuuksia altistavasta melutasosta, joka sekin on ymmärrettävä muuttujaksi,

joka vain keskimäärin vastaa sitä melutasoa, joka esiintyi tutkimuksen aikaan vastaajan asuin- tai elinympäristössä.

Kyselytutkimuksissa on yleensä käytetty ulkomelutasoa meluallistuksen mittana. Se on helpompi arvioida (mitata, laskea) kuin sisämelutaso.* Ulko-



Kuva 3: Joukkotutkimuksissa vallitsevia meluallistuksen ja haittareaktioiden välisiä yhteyksiä.

* Ulkoa sisään kuuluvan melun voimakkuus riippuu mm. rakennusten ulkokuoren ääneneristävyydestä ja ikkunoiden aukkipitotavoista. Rakennusten teknisten laitteiden ja asukkaiden itse tuottama melu vaikuttaa ulkoa sisään kuuluvan melun erottuvuuteen ja sisällä mitatun melun voimakkuuteen. Monet melumallit olettavat rakennusten ulkokuoren ääneneristävyyden olevan vakio, tai mallissa on ilmoitettu muutama vakioluokka. Esimerkiksi on ilmoitettu ulko- ja sisä-äänitason eron olevan vanhoissa rakennuksissa 20 dB(A) ja uusissa 30 dB(A) ikkunoiden ollessa kiinni.

melun voimakkuutta käytetään altistavan melun mittana myös siitä syystä, että asukkaiden arviot melun haitallisuudesta korreloivat yleensä paremmin ulkomelun voimakkuuteen kuin ulkoa sisään kuuluvan melun voimakkuuteen.^{14, 15, 16} Tämä tarkoittaa sitä, että vastausten satunnaishajonta on suurempi käytettäessä ulkoa sisään kuuluvan melun voimakkuutta ulkomelun sijasta altistuksen mittana.^{689, 14, 15}

Ensimmäinen tunnettu taajamien melututkimus tehtiin vuonna 1929.⁵³ Ensimmäinen tunnettu meluhaittoja koskeva kyselytutkimus tehtiin vuonna 1943.⁵⁴ 1980-luvulle päästäessä kansainvälisessä kirjallisuudessa oli raportoitu yli 200 tutkimuksen tuloksia.³⁹² Vuonna 1996 kansainvälisessä kirjallisuudessa raportoituja tutkimuksia laskettiin olevan yli 350 ja vuonna 2002 yli 520.^{55, 56}

Tarkasteltaessa melun arviointitapojen kehitystä, niin johtopäätös on: tulevaisuudessa meluoloja koskevan yhteiskunta- ja maankäytön suunnittelun *tavoitteiden* asettelu ja ”onnistumisen” arviointi perustuu aiempaa selvemmin asukkaiden omiin arvioihin asuinympäristön laadusta ja sen parantamistarpeista (so. kyselytutkimuksiin ja/tai niistä johdettuihin vasteisiin). Kuitenkin jo suunnitteluvaiheessa joudutaan vastaisuudessakin hyväksymään hyvin usein, että melultaan hyvälaatuisia asuin- ja elinympäristön ei pystytä esimerkiksi suurissa taajamissa saavuttamaan.

Ympäristö- ja terveysturvassa sekä maankäytön suunnittelussa melun ja meluhaittojen arviointitarve perustuu juridisiin lähtökohtiin. Lainsäätäjät on ensin sanktionnut liiallista haittaa tai rasitusta tuottavan melun aiheuttamisen, tai on säätänyt kansalaisille oikeuden terveyden ja/tai toimintojen ja tehtävistä suoriutumisen kannalta hyväksyttävissä oleviin meluoloihin. Säädösten toteuttamistarve on luonut ”markkinat” melun ja meluhaittojen arviointimenetelmille. Tätä taustaa vasten tarkasteltuna melun ja melun haitallisuuden arviointimenetelmien tulisi täyttää ensisijaisesti juridiset tarpeet. Tällaisia tarpeita ovat mm. oikeudenmukaisuus sekä riittävä oikeusturva ja oikeusvarmuus.

Oikeusopillisesta akustiikasta (engl. forensic acoustics) on tulossa oma erikoisalansa, ellei peräti tieteenala. Tästä esimerkkinä mainittakoon, että USA:n akustisen seuran vuoden 2003 syyskokouksessa oli kaksi oikeusopillisia akustiikan kysymyksiä ja tapauksia käsittelevää sessiota.⁵⁷

Valitukset meluhaittojen indikaattorina ja kriteerinä

Meluvaikutus, eli altistetun reaktio meluun voi ilmetä melun aiheuttajalle tai viranomaiselle tehtynä valituksena. Hyvin pitkälle 1900-lukua valituksia pidettiin tärkeimpänä meluhaittojen kriteerinä tai indikaattorina haittojen olemassa ololle. Karkeasti sanottuna: jollei ollut valituksia, ei ollut haittojakaan. Historiallisista syistä on syytä tarkastella erikseen valituksia meluhaittojen kriteerinä ja indikaattorina ennen kuin edetään meluvaikutusten arvioinnissa ja arviointiperusteissa pidemmälle.

Yleensä lähdetään siitä, että kukaan ei valita aiheetta. Tällä tarkoitetaan sitä, että *spontaanin* melusta valittamisen edellytyksenä on, että altistettu kokee, tai on kokenut, kyseisen melun “riittävän” kielteiseksi elinympäristön tekijäksi.

Nyky-yhteiskunnassa valitusten määrää ei aina indikoi yksikäsitteisesti koettujen meluhaittojen suuruutta tai laajuutta. Esimerkiksi kansalaiset saattavat kirjoittaa nimensä meluavan laitoksen lopettamista vaativaan kansalaisadressiin pelkämästä myötätunnosta, ei siksi, että kyseistä melusta olisi heille henkilökohtaista haittaa jokapäiväisessä elämässä.⁵⁸ Terveysvaikutuksia koskevilla kyselytutkimuksissa on havaittu, että on ihmisiä, joiden valitukset eivät ole riippuvuussuhteessa altistuksen tai objektiivisesti mitattavien terveysvaikutusten voimakkuuteen.^{59, 60.}

Yleensä valitukset kohdistuvat sellaiseen meluun, joka on selvästi erottavissa ja, jonka aiheuttaja on tunnistettavissa, tai sellaiseen meluun, joka on selvästi lisääntynyt. Esimerkiksi brittiläisen teollisuusmelun arviointistandardin mukaan laitoksen melun kasvu 5 dB(A):lla saattaa lisätä meluvalituksia ja kasvu 10 dB(A):lla lisää niitä todennäköisesti.⁶¹

Ympäristölle poikkeuksellisista ja uusista meluista valitetaan herkemmin kuin tavanomaisista meluista, joihin asukkaat ovat tottuneet.^{76, 62} Asuinympäristössä on tyypillistä se, että melun aiheuttajalle tai terveysvalvonnalle esitetyt valitukset kohdistuvat enimmäkseen naapurien tuottamaan meluun. Esimerkiksi monet kerrostaloissa asuvat saattavat valittaa melko herkästi lasten aiheuttamasta melusta, mutta eivät sellaisesta melusta, jonka aiheuttajana on mukana omia lapsia.^{63, 715}

Tilastojen valossa näyttää myös siltä, että nukahtamis- ja yöaikaista lepoa (unta) häiritsevistä melusta valitetaan herkemmin kuin päiväaikaisesta melusta.^{64, 506} Myös lukemista, kirjoittamista ja muita hiljaisuutta edellyttäviä tehtäviä häiritsevistä melusta tehdyt valitukset ovat yleisiä.⁷⁸

On todettu, että melulähteeseen kohdistuvat tai assosioituvat kielteiset asenteet lisäävät valituksia. Esimerkiksi lentoreitin alla asuva henkilö, joka pelkää lentokoneiden putoavan pihaan, valittaa herkemmin lentomelusta kuin henkilö, jolla tällaisia pelkoja ei ole.^{65, 63, 301, 789} Ampumaratameluvalituksia tutkittaessa taustalta löytyy usein pelko (harha)luotien tuottamasta vaarasta.^{66, 67} Kielteisten asenteiden ja meluherkkyyden on todettu vaikuttavan myös altistetun omiin arvioihin siitä, millaisia ja kuinka voimakkaita terveysvaikutuksia odotettavissa oleva melutilanteen muutos tulee aiheuttamaan.^{613, 66, 47}

Usein esitetään, että valitusten puuttuminen olisi luotettava merkki, indikaattori, siitä, että melusta ei ole haittaa altistetuille. Yleisen elämäkokemuksen perusteella voidaan todeta, että jos melua ei ole, tai jos se on riittävän hiljaista, ei ole valituksiakaan. Tältä osin väite valitusten ja haittojen välisestä riippuvuudesta pitänee paikkansa, mutta ei välttämättä toisinpäin.

Valitusten puuttumista (“valitusvajetta”), esimerkiksi sitä, että liikennemelusta ei valiteta, tai valitetaan hyvin vähän, ei voida pitää merkinä siitä, että altistetut eivät kokisi – tai oikeammin: eivät ilmoittaisi kysyttäessä kokevansa – melua haitalliseksi.^{68, 69} Näyttää siltä, että jotkut valitushalukkuutta

lisävää tekijät eivät ole samoja, jotka lisäävät melun kiusallisuutta.³⁰³ Toisaalta, on myös tutkimustuloksia, joiden mukaan meluherkät ihmiset sekä valittavat melusta aktiivisemmin ja ilmoittavat kyselytutkimuksissa kokevansa sen melun, josta valittavat, suuresti kiusalliseksi jopa 20 dB(A) alhaisemmassa äänitasossa, kuin meluherkkydeltään normaalit.⁷⁰

Useissa tutkimuksissa on todettu, että melusta tehtyjen valitusten määrä ja kohteet eivät korreloi kovin hyvin melun voimakkuuden eivätkä meluhaittoja koskevien kyselytutkimusten tulosten kanssa.^{71, 72, 73, 74, 75, 76} Valitusten ja kyselytutkimusten välisen huonon korrelaation ja eron syy on se, että kyselytutkimuksen tulos on yleensä paljon herkempi mittari kuin valitukset.^{76, 303} Huonon korrelaation syynä saattaa olla myös se, että kansalaiset eivät (kaikissa maissa) tiedä kenelle valittaa, tai se, että maassa ei ole viranomaista, jonka toimivaltaan kuuluisi meluolujen (yleinen) valvonta valitusten perusteella.⁷⁷

Valitusten määrä näyttää olevan sidoksissa melulähteeseen. Esimerkiksi australialaisen tutkimuksen⁷² mukaan teollisuusmeluvalitusten määrä oli noin 2,5-kertainen verrattuna valituksiin tieliikennemelusta, vaikka kyselytutkimuksen mukaan noin viisinkertainen määrä ihmisistä koki kyseisen tieliikennemelun kiusallisemmaksi kuin teollisuusmelun. Englannissa n. 42 % asuntomelujen valituksista koskee ilta- ja yöaikaista naapurista tai ulkoa kuuluvia radio- ja tv-ääniä tai musiikkimelua.^{64, 78}

Valitusten määrä näyttää olevan sidoksissa myös asukastiheyteen. Mitä suurempi tiheys, sitä suurempi on valitusten esiintyvyys, per km², mutta ei välttämättä per 1000 asukasta. Yleensä ympäristömelun voimakkuus kasvaa asukastiheyden myötä,^{74, 79, 80, 718} mikä ainakin osin voisi selittää ”valituksia/km²” määrän kasvun riippuvuuden asukastiheydestä, mutta ei selitä ”valituksia/1000 asukasta” määrän pienenemistä. Suhteellinen valitusten määrää, eli valitusten esiintyvyys (valituksia/1000 asukasta) saattaakin olla asukastiheydestä huonosti riippuva meluhaittojen indikaattori.^{74, 81}

Uuden (ja myös oudon) ympäristömelun ja ympäristömelun oleellisen, äkillisen lisääntymisen on todettu lisäävän valituksia.^{82, 506} Esimerkiksi Sydneyn lentokentän kolmannen kiitotien avaaminen lisäsi puhelimitse tehtyjen meluvalitusten määrän 30-kertaiseksi. Ennen laajennusta valituksia tehtiin keskimäärin 200 kuukaudessa, laajennuksen käyttöön oton jälkeisenä kuukautena valitusoittoja oli 6000. Kenttä on viiden kilometrin päässä Sydneyn liikekeskuksesta, ja on kolmelta suunnalta ympäröity asutusalueilla. Lehdistöllä ja tiedotusvälineillä katsottiin olleen suuri vaikutus valitustulvaan.⁸³

Monet tutkimukset päätyvät siihen, että valitusten ja melusta suuresti kiusaantuneiden määrän (HA%, engl. Higly Annoyed) välillä olisi melko validi riippuvuus. Esimerkiksi Yhdysvaltain ympäristövirasto julkaisi vuonna 1974 seuraavan riippuvuuden⁸⁴

$$(2) \quad HA\% = 12,3\sqrt{C\%} + 4,3$$

jossa C% on melusta valittaneiden osuus (% ko. melulle altistetuista). Kaava (2) kertoo yleisesti tunnetun tosiasian: valittajien ja valitusten määrä on pie-

nempi kuin niiden ihmisten määrä, jotka omasta mielestään kokevat melun (suuresti) kiusalliseksi tai haitalliseksi.

Kun suuresti kiusaantuneiden esiintyvyys on 100 henkeä tuhatta altistettua kohden (eli $HA\% = 10\%$), niin kaavan (2) vastaavuuden mukaan tästä melusta valittavia on 22 tuhatta altistettua kohden. Kun suuresti kiusaantuneiden esiintyvyys on alle 43 tuhatta altistettua kohden valittajien määrän pitäisi olla nolla. Muistettakoon, että kaavan (2) validiutta ei ole testattu Suomen oloissa.*

Melun voimakkuudesta riippuen tyypillisesti noin 0,2 – 7 prosenttia asukkaista valittaa joko naapurista tai ulkoa kuuluvasta melusta.^{92, 64, 85, 86} Naapurista kuuluvan melun kiusalliseksi kokevia on joidenkin tutkimusten mukaan 6...30 % asukkaista.⁸⁷

Valitusten ja kyselytutkimusten eroja voisi selittää se, että ihmisillä näyttää oleva vahva uskomus siihen, että melu aiheuttaa suurempaa kiusallisuutta ja häiritsevyyttä kuin, mitä todellisissa oloissa tehdyt tutkimukset osoittavat.^{88, 89, 357} Esimerkiksi arvioitu häiritsevyyys korreloi erittäin hyvin kuviteltuun melun voimakkuuteen (kuvitellun tilanteen tyypilliseen melutasoon) tutkimuksessa, jossa koehenkilöitä ($N = 128$)[†] pyydettiin arvioimaan, miten melu häiritsisi erilaisista tehtävistä ja toiminnoista (11 erilaista tehtävää/ toimintaa) suoriutumista neljässä kuvitteellisessa melutilanteessa. Kentäkokeissa, joissa vastauksia korreloidaan todellisiin, arviointihetken aikaisiin melutasoihin tai asuntojen ja asuntoalueiden keskimääräisiin melutasoihin, ei saavuteta näin hyviä korrelaatioita kuin em. tutkimuksessa.³³¹ Vastaavan tapainen tulos – ihmiset olettavat melun ja meluvaikutusten olevan pahempia kuin ne ovatkaan – saatiin hollantilaisessa tutkimuksessa ($N = 48$), jossa kysyttiin ihmisten suhtautumista suunnitteilla olevaan suurpeusjunarataan.⁹⁰

Näyttää siltä, että tiettyyn meluympäristöön assosioituva muistinvarainen kiusallisuus voi olla paljon suurempi kuin tässä ympäristössä todellisessa altistustilanteessa raportoitu (arvioitu) kiusallisuus. Vastaavan tyyppinen vasteen korostuma saattaa syntyä myös silloin, kun kysytään asuinympäristön melun kiusallisuutta yleensä, ilman aikaviitekehystä.^{91, 235, 505}

Tietystä melusta tehtyjen valitusten määrän perusteella ei pidä tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä todellisista meluhaitoista, kansalaisten valituserkkyudesta eikä valitusten aiheellisuudesta. Esimerkiksi Amsterdamin Schipolin lentokentän melusta tehdään vuosittain noin 100 000 valitussoittoa. Valittajien määrä on luokkaa 10 000.⁹² Helsinki-Vantaan kentällä soittojen lukumäärä on ollut 400...700 vuosittain.⁹³ Sydneyn kentällä valitusten määrä oli ennen kolmannen kiitotien avaamista noin 2 500 vuodessa.

* Kaava (2) tapainen yhteys kiusallisuuden ja valitusten välillä on sikäli oleellinen, että kun yhteiskuntapoliittisesti (ohjearvoista, lupaehdoista yms. päätettäessä) hyväksytään kuinka suuri HA , $\%A$, muu vaikutus tai niitä indikoiva melutaso saa olla, niin samalla hyväksytään, mikä määrä valituksia on katsottava normaaliksi.

† N tarkoittaa tutkimuksessa mukana olleiden henkilöiden määrää. Kirjainta N käytetään myös äänekkyyden symbolina.

Sekä Amsterdamissa että Sydneyssä on yli kertaluokkaa enemmän asukkaita melualueilla kuin Vantaalla. Tyypilliset rakennusten ulkokuoren ääneneristävyydet ovat erilaiset verrattuna Suomeen. Syitä valitusmäärien eroihin on, mutta ei tiedetä, mikä osuus tai vaikutus milläkin syyllä on.

Tiettyä melun aiheuttajaa koskeville valituksille on usein tyypillistä ammattivalittajat, joiden lukumäärä on pieni, mutta osuus valituksista suuri. Esimerkiksi Manchesterin lentokentän vuoden 1998 yhteensä 2 072 lentomeluvalituksesta 41 % oli kolmen henkilön tekemiä.^{94, 506} Amsterdamin Schipolin kentällä lasketaan ammattivalitusten osuudeksi 10...20 %.

Arvioitaessa valitusten merkitystä ja validiutta haittojen indikaattorina, on syytä muistaa, että on monia meluja, joiden olemassaolo paljastuu – ja, joiden mahdollinen haitallisuus voidaan selvittää – vain valitusten perusteella. Tällaisia ovat esimerkiksi:

- naapureiden toimillaan tai elintavoillaan aiheuttamat melut, kuten pianon soiton tai koirakennelin melu,
- yksittäisten meluisten koneiden tai laitteiden melu. Esimerkkinä laakerivivainen huippuimuri tai ympäristömelua aiheuttava uliseva voimalaitoksen savukaasupuhallin,
- ennakoimattomien tai tavanomaisesta poikkeavien olosuhteiden vuoksi syntyvät melut. Esimerkkinä vaikkapa ylämäessä oleva bussipysäkki, jolta liukkaalla kelillä yöaikaan lähtevät bussit herättävät naapuritalon asukkaita.

Meluhaitan mittarina valitukset eroavat useimmista muista meluun reagoivista väitteistä siinä, että valitusväitteellä on vain kaksi arvoa: valitti melusta, ei valittanut melusta. Muiden melureaktioiden väitteitä, esimerkiksi melun aiheuttaman kiusallisuuden, lukemisen häiriintymisen ja unen syvyyden muutoksia, mitataan moniportaisilla asteikoilla. Esimerkkinä vaikkapa kiusallisuuden seitsenportainen lämpömittariasteikko, jonka päät ovat: ei lainkaan kiusallista (0) – äärimmäisen kiusallista (7).

Mikä ääni on melua?

Lainsäädännön lähtökohtana on se, että ääni ei voi – mutta melu voi – aiheuttaa sellaista haittaa, jonka vuoksi voitaisiin vaatia äänen tai altistuksen vähentämistä. Joudumme määrittelemään, milloin ääni on katsottava meluksi, milloin ei. Äänissä ei ole sisäänrakennettuja korvamerkkejä, joiden perusteella ne voitaisiin yksikäsitteisesti luokitella meluksi ja “ei-meluksi”.

Meluksi luokitellun äänen tunnusmerkkinä on se, että ääni on epämiellyttävää tai ei-toivottua.* Molemmat ovat hyvin subjektiivisia käsitteitä. Sa-

* Tällainen negaation (“ei-toivottu”) perustuva luokitus ei ole yksikäsitteinen. Esimerkiksi, jos hedelmä jaetaan omenoihin ja ei-omenoihin, on täysin mahdotonta sanoa onko luokkaan “ei-omena” kuuluva hedelmä myrkyllisempi kuin luokkaan “omena” kuuluva

man äänen epämiellyttävyys ja ei-toivottavuus riippuvat äänen ominaisuuksien lisäksi mm. henkilön mielentilasta, altistuspaikasta ja -ajasta sekä siitä, mitä henkilö on tekemässä. Äänen epämiellyttävyyttä – ja tätä kautta sen ei-toivottavuutta – voidaan vähentää, peittää, ainakin jossain määrin tuomalla kuuluville miellyttävää tai neutraalia ääntä. Useiden äänien miellyttävyys ja epämiellyttävyys ovat sidoksissa kulttuuriin, ammattiin, harrastuksiin ja jopa sukupuoleen.^{95, 96, 97, 130, 168, 297}

Moniselitteisyydestä huolimatta äänillä ja altistustilanteilla on yhteisiä ominaisuuksia, joiden perusteella kuulijat luokittelevat jonkun äänen ja altistustilanteen helpommin meluksi kuin jonkun toisen, ja jonkun melun voimakkaammaksi tai haitallisemmaksi meluksi kuin jonkun toisen. *Erlaiset taajuus- ja aikapainotetut äänenpainetasot, äänekkyyys, meluisuus ja kiusallisuus ovat suureita tai muuttujia, joilla katsotaan voitavan mitata parhaiten niitä äänen ja melun ominaisuuksia, joiden perusteella altistettu luokittelee äänen meluksi ja melun voimakkuuden haitan kannalta*

Melun subjektiivisen voimakkuuden mittarit

Melulla – tai oikeammin melulle altistumisella* – on monenlaisia vaikutuksia. Kuten jo edellä on todettu, näitä vaikutuksia nimitetään melureaktioiksi tai -vasteiksi. Osa vasteista on terveyttä haittaavia tai vaarantavia. Osa ei aiheuta mitään sellaisia elimellisten toimintojen muutoksia, joita hoidettavan lääketieteen kriteereiden mukaan pitäisi katsoa ihmiselle haitalliseksi. Tasapuolisuuden vuoksi on mainittava, että melulla on myös hyödylliseksi katsottavia vaikutuksia.^{98,†}

Melun aiheuttamia haittoja – tai oikeammin: haitallisiksi katsottujen vasteiden voimakkuutta – säädellään meluun ja melu-altistuksiin kohdistuvilla vaatimuksilla ja toimenpiteillä. Tällainen säätely edellyttää – ollakseen järkevää – että on olemassa sellaisia mittavissa olevia melun ja altistustilanteen fysikaalisia ominaisuuksia (suureita) ja niitä vastaavia havaintomaailman muuttujia (ulottuvuuksia, indikaattoreita), joista varsinaiset haitallisiksi luokitellut reaktiot riippuvat. Tarkastellaan lähemmin haitallisuuden ja vasteiden välisiä määrittelytapoja.

* Vanha juridisen kiistelyn kohde on: "Voiko laissa tarkoitettua melua olla olemassa, jos ei ole korvaa kuulemassa?". Lääketieteellisesti katsottuna lienee itsestään selvää, että sellainen melu, joka ei altista ihmistä, ei voi aiheuttaa psyykkisesti terveille mitään somaattista haittaakaan.

† Esimerkkejä hyödyllisistä vaikutuksista: Liikennevälineiden äänet (melu) auttavat jalankulkijoita hahmottamaan ympäristöä ja välttämään onnettomuuksia. Melun perusteella saadaan hyödyllistä informaatiota mm. koneiden ja laitteiden kunnosta. Neutraali melu peittää häiritsevää melua, minkä koetaan vähentävän viimemainitun haitallisuutta. Kolmas esimerkki on se, että alhaisilla äänitasoilla (alle 50 dB(A)) melun (äänen) voimakkuuden lisäys lyhentää kuulijan reaktioaikaa tehtävissä, joissa pitää nopeasti reagoida ko. ääneen.

Meluvasteiden ja melun haitallisuus riippuu tarkastelukulmasta. Kun puhutaan terveyshaitoista, on syytä erottaa hoitavan lääketieteen ja ympäristölääketieteen lähestymistavat toisistaan. Hoitava lääketiede tarkastelee ihmistä ja vasteita – so. ihmistä oireineen ja sairauksineen – kokonaisuutena. *Ympäristölääketieteessä* tarkastellaan mahdollisuutta oireisiin tai sairauksiin riskinä. Ympäristölääketieteessä esimerkiksi tapana katsoa, että ohjearvon ylitys voi aiheuttaa aina terveyshaittoja, mistä syystä ylityksiä ei tule sallia.* Tarkasteluperspektiivi on ennakoiva. *Hoitavassa lääketieteessä* raja terveen ja sairaan välillä ei ole tarkka. Esimerkiksi, arvioitaessa onko jokin melu henkilön terveyttä haittaavaa, tarkastellaan, mitä yksilötason haittoja (vasteita) melu todella aiheutti tai aiheuttaa, ja otetaan huomioon henkilön yksilöllinen reagoititapa ja -herkkyys. Lääke (esim. melun alentamistarve) määrätään yksilöllisten ominaisuuksien ja hoitotarpeiden perusteella. Lääkettä ja hoitotoimia määrättäessä otetaan myös taudin vakavuus huomioon.

Melun aiheuttamat vaikutukset jaetaan *ilmenemis- ja tutkimustapojen*, so. tieteenalan ja tyypillisten tutkimusmenetelmien, puolesta kolmeen luokkaan: fysiologisiin, psykologisiin ja sosiologisiin. Rajat eivät kuitenkaan ole tarkkoja. Esimerkkinä vaikkapa psykosomaattiset vaikutukset, jotka ilmenevät fysiologisina (elimellisinä) reaktioina, joiden suuruus kuitenkin riippuu siitä, miten henkilö melun kokee.

Fysiologisiin vaikutuksiin luetaan esimerkiksi melun nukkuvalle henkilölle aiheuttamat unihäiriöt sekä verenkierron ja hormonitoimintojen muutokset. Psykkiset ja sosiologiset vaikutukset erotetaan toisistaan yleensä vain tutkimusmenetelmän perusteella. Sosiologiassa tutkitaan suurien joukkojen keskimääräisiä vasteita kysely- tai haastattelumenetelmää käyttäen. Psykologisissa tutkimuksissa kohteena on yksilö tai pienryhmä, joiden meluvasteita mitataan kysely- ja haastattelumenetelmän lisäksi mm. observoiden tai ihon sähkönjohtokyvyn tai sormesta mitatun pulssiin ja verenpaineen muutoksista.

Toinen meluvaikutusten jakotapa perustuu vasteen ilmenemismuotoon. Vaikutus voi olla pelkästään elämyksellinen tai vasteena voi olla meluallistuksen aiheuttama jonkin tekemisen tai toiminnon mitattavissa oleva määrän tai laadun muutos. Tehtävä voi olla esimerkiksi keskittymistä edellyttävä työtehtävä tai koululäksyjien teko. Tutkittavana meluvasteena voi olla esimerkiksi tuotteiden virheiden määrä tai se, kuinka hyvin luetut asiat palautuvat muistiin viikon päästä. Nukkuminen tai rentoutuminen on esimerkkejä toiminnoista, joiden meluvasteita voidaan mitata esimerkiksi aivosähkökäyristä.

Äänekkyyys, meluisuus, kiusallisuus

Kuulijan vaikutelmaa tai havaintoa melun voimakkuudesta (engl. perceived magnitude) mitataan ja kuvataan pääasiassa kolmea eri muuttujaa (käsitettä)

* Lähdetään siitä, että ohjearvot on asetettu ennalta päätetyn ja tarkoin tunnetun haittariskin perusteella. Potilaana on tavallaan vain riski. Jos asetettu riski ylittyy, potilas on sairas, jos allittuu potilas on terve.

käyttäen.^{99, 100, 101, 102, 103, 104} Ne ovat: *äänekkyys* (engl. loudness, saks. Lautheit), *meluisuus* (engl. noisiness, saksassa ei ole hyvää käsitevastinetta*) ja *kiusallisuus*[†] (engl. annoyance, saks. Lästigkeit tai Belästigung). Kutakin käsitettä voidaan käyttää kahdessa päämerkityksessä. Käsitteillä voidaan tarkoittaa joko havaintomaailman muuttujaa (kuulijan arviota havaitsemastaan voimakkuudesta eli vaikutusta) tai kyseisen havainnon aiheuttavaa melun ominaisuutta (ks. kuva 1). Psykoakustiikassa tunnetaan muitakin havaittavissa olevia äänen ominaisuuksia – mitattavissa olevia havaintomaailman ulottuvuuksia – kuin voimakkuus, esimerkiksi *äänen korkeus, väri, karheus, ki-meyns ja kirkkaus* (engl. brightness).^{105, 106}

Kuulijan arvioiman äänekkyuden, meluisuuden ja kiusallisuuden mitta-asteikko on joko suhteellinen tai voimakkuuden sanallisesti kuvaileva tai luokitteleva. Suhteellinen asteikko tarkoittaa sitä, että verrataan kahta tai useampaa ääntä ja asetetaan ne keskinäiseen voimakkuusjärjestykseen. Sanallisesti kuvaileva asteikko perustuu voimakkuuden sanallisiin arvoihin. Melu voi olla esimerkiksi kohtuullisen äänekästä tai hyvin äänekästä, tahi ei lainkaan kiusallista tai äärimmäisen kiusallista. Kyselytutkimuksissa voidaan käyttää luokittelevien kategoria-asteikkojen lisäksi esimerkiksi lämpömittariasteikkoja, joiden alaja yläpää on annettu numeroarvoin (esim. 0 ja 100) ja kiinnitetty sanallisesti (esim. 0 vastaa arvoa ”ei lainkaan äänekästä” ja 100 vastaa arvoa ”äärimmäisen äänekästä”). Voimakkuus arvioidaan merkitsemällä kruksi siihen kohtaan asteikkoa, joka vastaa kuulin arvioita voimakkuudesta ko. asteikolla.

Äänekkyyttä, meluisuutta ja kiusallisuutta kutustaan myös äänen attribuuteiksi. *Atribuuttia*, äänen ominaisuutta, nimitetään *kuulijariippuvaksi*, jos ominaisuuden olemassa olon toteaminen[‡] ja ominaisuuden voimakkuuden mittaaminen edellyttävät ajatellun tai todellisen kuulijan arviota. *Kuulijariippumattomaksi* sanotaan attribuuttia, jonka olemassa olo ja suuruus voidaan mitata teknisin laittein.

Äänekkyys pystytään mittaamaan teknisin mittalaittein.^{107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114} Meluisuuden objektiivisen mittaamenetelmän kehittämisessä on saavutettu joitakin tuloksia. Yksi menetelmä on standardoitukin.¹¹⁵ Kiusallisuuden objektiivisten mittaamenetelmien kehittäminen on (edelleenkin) ottamassa ensiaskeleita.^{116, 117, 118, 119, 120, 121, 343} Tosin, ainakin yksi kiusallisuutta mittaava (kvasi)mittalaite on esitelty.^{122, 123} Neuroverkkoihin perustuvia kiusallisuuden objektiivisiä mittaamenetelmiä ollaan kehittämässä.^{124, 125, 126, 127} Nykyisen tietämyksemme perusteella äänekkyyttä voidaan pitää lähes kuulijariippumattomana äänen attribuuttina, kiusallisuuden ollessa mitä suurimmassa määrin kuulijariippuva ominaisuus.

Äänekkyysarvioinnin oletetaan perustuvan melko suoraviivaisesti kuuloaistinelinten välittämään aistimuksen voimakkuuteen. Kiusallisuuden

* Tosin sanaa Lärmigkeit näkyy silloin tälläin käytettävän.

† Kiusallisuus tarkoittaa myös monen muuttujan perusteella määritettyä indeksimuuttujaa, joka on pikemminkin meluvasteen kuin koetun voimakkuuden mitta.

‡ Esimerkiksi onko tietty melu kiusallista vai ei.

voimakkuuden arvioinnissa korostuvat usein sekä kognitiiviset arviot että tunneperäiset vaikuttimet ja asenteet. Erilaisilla äänien miellyttävyys/epämiellyttävyys- ja seuraamusassosiaatioilla on suuri merkitys henkilön koke-malle melun ja melualtistustilanteen kiusallisuudelle, mutta melko vähäinen merkitys arvioitaessa äänekkyyttä.

Meluisuus ja kiusallisuus eivät ole täysin itsenäisiä muuttujia. Useimmissa tapauksissa molemmat riippuvat äänekkyydestä siten, että äänekkyyden kasvu lisää, ja pieneneminen vähentää äänen meluisuutta ja kiusallisuutta.

Mainittakoon tässä yhteydessä myös käsite (*melun*) *häiritsevyys* (engl. disturbance, saks. Störung). Sen tarkoitus on kuvata tai mitata, missä määrin melu vaikeuttaa tai estää altistetun suoriutumista erilaisista tehtävistä ja toimista. Häiritsevyyden mittausta voi perustua altistetun omaan arvioon (kyselytutkimus, haastattelu) tai objektiivisiin suoriin tai epäsuoriin mittauksiin. Esimerkiksi kuulemisen vaikeutumista melussa, eli melun aiheuttamaa puheenhäirintää, voidaan mitata pyytämällä koehenkilöä toistamaan kuulemansa sanat tai lauseet. Häiritsevyyden, *puheenhäirinnän*, mittana on tällöin virheellisesti kuultujen osuus koko sanastosta. Muitakin mittausten menetelmiä on kehitetty.¹²⁸

Pyrin seuraavissa luvuissa esittelemään, mitä käsitteillä äänekkyyks, meluisuus ja kiusallisuus sekä kiusallisuudella ja tavallisimmilla häiritsevyyden lajeilla tarkoitetaan tutkittaessa melua ja sen aiheuttamia haittoja.

Kuten edellä todettiin, melun äänekkyyks, meluisuus ja kiusallisuus ovat melun havaittua eli *subjektiivista voimakkuutta* (engl. perceived magnitude) kuvaavia havaintomaailman muuttujia eli ulottuvuuksia. Meluna pidetään usein ääntä, jonka meluisuus on suurempi kuin äänekkyyks ja kiusallisuus puolestaan suurempi kuin meluisuus.* Jos meluisuus ja kiusallisuus eivät ole (selvästi) äänekkyyttä suurempia, ääni ei ole tämän mittaustavan mukaan melua. Esimerkiksi Berglund *et al.*¹²⁹ ovat tutkimuksessaan päätyneet tähän käsitykseen. Kaikissa kielissä ei kuitenkaan ole sanoja, jotka vastaisivat riittävän tarkasti englanninkielen käsitesarjaa loud/loudness, noise/noisiness ja annoying/annoyance.^{130, 9, 299} Käsitteiden keskinäiseen järjestykseen perustuva mittaustapa voi olla tällaisissa kielissä epävarma. Pulmana on myös se, että henkilökohtaiset mieltymykset, asenteet ja altistustilanne voivat vaikuttaa siihen, kuinka voimakkaaksi äänen herättämää vaikutelmaa kutakin käsitettä käyttäen kuvataan.

Edellä kuvattu käsitejärjestys ei yleensä pidä paikkaansa kyselytutkimuksissa. Vastaajat esimerkiksi kokevat usein asuinympäristönsä melun herkemmin meluisaksi kuin kiusalliseksi.⁷¹⁸ Meluisaksi kokeminen – hiljaisuuden tai ääniympäristön äänen laadullinen huononeminen – ei välttämättä aiheuta suurta kiusallisuutta.¹³¹

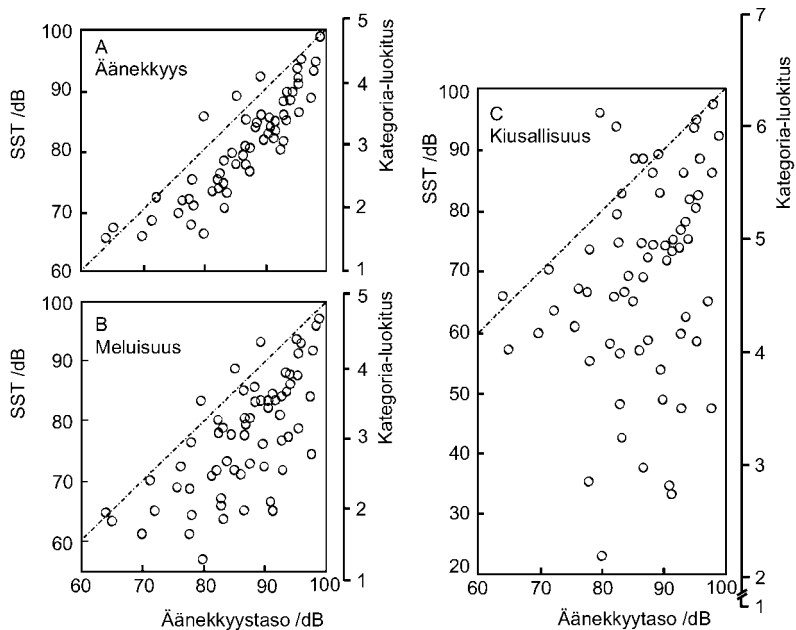
Pääsääntöisesti äänekkyyks, meluisuus ja kiusallisuus kasvavat äänen voimakkuuden kasvaessa. Niiden kasvunopeudet (kulmakertoimet) voivat

* Luokitus tapahtuu siten, että pyydetään henkilöä arvioimaan melu kolmella eri asteikolla, esimerkiksi 10-portaisilla asteikoilla, joiden päät ovat 1) ei lainkaan äänekkästä... äärimmäisen äänekkästä, 2) ei lainkaan meluisaa... äärimmäisen meluisaa ja 3) ei lainkaan kiusallista... äärimmäisen kiusallista.

kuitenkin olla erilaiset. Erilaisesta kasvunopeudesta johtuen tietyn äänen (melun) meluisuus ja kiusallisuus voivat olla hiljaisilla äänillä äänekkyyttä ”pienempiä”, mutta voimakkailla (esim. yli 80... 90 dB(A)) suurempia.⁴¹⁷

Kuvassa 4 on tulokset laboratoriokokeesta¹³², jossa japanilaiset koehenkilöt vertasivat 59 erilaisen lyhytaikaisen (16 s) äänen äänekkyyttä, meluisuutta ja kiusallisuutta. * Vaaka-akseleilla on äänen äänekkyystaso, LL_s , (Stevensin menetelmän mukaan, ISO 532^{133, 134}) ja vasemman puoleisilla pystyakseleilla (SST) sen valkoisen kohinan[†] taso, jonka äänekkyyttä, meluisuutta tai kiusallisuutta kyseessä oleva melu vastasi kuuntelijoiden arvion mukaan. Oikean puoleisilla pystyakseleilla on äänen luokittelu kategoria-asteikolla, esimerkiksi äänekkyys luokiteltuna viisiportaisella asteikolla välillä ei äänekästä (1) – hyvin äänekästä (5). Katkoviiva esittää riippuvuutta $SST = LL_s$.

Kuvan 4A pisteiden vähäinen hajonta ja selvä riippuvuus mitatusta eli objektiivisesta äänekkyystasosta kertoo selvästi sen, että ihmisillä on yhteinen



Kuva 4: 59 erilaisen asuinympäristössä esiintyvän eritasoisen (vaaka-akseli, Stevensin äänekkyystaso, LL_s) äänen äänekkyys, meluisuus ja kiusallisuus arvioituna sen valkoisen kohinan tasona (vasen pystyakseli, $SST =$ subjektiivinen vastavuustaso), jota ne vastasivat ja kategorialuokituksena (oikea pystyakseli).

* Japaninkielessä ei ole englannin annoyance-käsitettä vastaavaa sanaa, jolla voitaisiin kuvata melun laatua ja voimakkuutta. Tutkimuksessa käytettiin 7 portaista asteikkoa: hyvin miellyttävä(1) – hyvin epämiellyttävä (7). Jotkut tutkijat katsovat, että sanat okisa, yakamshisa ja urusasa vastaavat riittävän hyvin englannin käsitteitä loudness, noisiness, annoyance (ks. Izumi K, Inter-Noise 77 Proc. B, 363–368).

† Valkoinen kohina on kohinaa, jonka spektriheys per Hz eli taso per Hz, on vakio. Muut psykoakustisissa kokeissa käytetyt kohinat ovat vaaleanpunainen ja punainen kohina. Vaaleanpunaisen kohinan terssi- ja oktaavitaso on sama eri kaistoilla. Nimet on lainattu vastaavalla tavalla eri taajuuksia korostavien valospektrien nimistä.

äänekkyyden arviointitapa, johon muut äänen ominaisuudet kuin äänenpaine-
netaso ja spektri vaikuttavat melko vähän. Meluisuuden ja kiusallisuuden
arviointissa pisteiden hajonta on suurempi, mikä kertoo sen, että muutkin
tekijät kuin äänekkyyden vaikuttavat arviointiin.

Kuvien 4B ja 4C pisteiden hajonta viittaa siihen, että erilaisten äänien
miellyttävyyden, epämiellyttävyyden, meluisuuden ja kiusallisuuden eivät riipu yksikä-
sitteisesti äänekkyydestä. Yksi tai useampi muu tekijä vaikuttaa hajontaa
lisäävästi. Tiedetään, että saman äänen miellyttävyyden, meluisuuden ja kiusalli-
suuden voi vaihdella muun muassa kuuntelutilanteen tai -ympäristön mukaan.
Esimerkiksi musiikin kuuntelu 90 dB(A) äänitasolla konsertissa on monille
hyvin miellyttävä altistumistapahtuma, mutta saman musiikin kuuleminen
naapurista 40 dB(A) tasolla voi vaikeuttaa suuresti nukauttamista tai häiri-
tä keskittymistä vaativan tehtävän suoritusta. Kuitenkin, mikä tahansa riittä-
vän voimakas (viimeistään 110...130 dB äänitason ylittävä) ääni koetaan aina
epämiellyttäväksi ja meluksi – jopa diskossa. Mainittakoon myös varmuuden
vuoksi, että 1900-luvun alkupuolella tutkijat olettivat, että meluisuus ja
kiusallisuus olivat suoraan verrannollisia koettuun äänekkyyteen.¹³⁵

Eri melujen ja altistustilanteiden häiritsevyys, esimerkiksi koettu puheen-
häirintä, ja kiusallisuus voivat olla myös erilaisia. Esimerkkinä se, että samas-
sa L_{Aeq} -tasossa raideliikennemelu koetaan yleensä vähemmän kiusalliseksi
kuin tieliikennemelu, mutta samalla raideliikennemelu voidaan kokea enem-
män TV-kuuntelua ja keskustelua häiritseväksi kuin tieliikennemelu.¹⁵

Melun voimakkuus ympäristön ”pilaantuneisuuden” mittana

Se, että altistettu ilmoittaa (kyselytutkimuksessa) kokevansa tiettyssä ym-
päristössä esiintyvän melun äänekkääksi, meluisaksi tai kiusalliseksi, ei vält-
tämättä merkitse, että kyseinen melu ”pilaisi” ympäristön tai huonontaisi
merkittävästi sen käyttöarvoa. Esimerkiksi amerikkalaisessa erämaa-alueiden
(kansallispuistojen) melututkimuksessa todettiin, että osa (1...9 %) vieraili-
joista ilmoitti kokevansa lentokoneiden ylilentojen melut suuresti kiusal-
liseksi. Tutkimuksessa ei kuitenkaan löytynyt mitään merkkejä siitä, että
tällaiset kokemukset olisivat vähentäneet vierailujen nautittavuutta (engl.
enjoyment) tai olisivat vähentäneet altistettujen halua palata alueelle tois-
tamiseen.¹³⁶ Tämä tutkimus viittaa siihen, että tällaisilla ”erämaavierailulla”
olevien henkilöiden (lentomelun) kiusallisuusvaste on jonkin verran herkempi
kuin vaste normaalissa asuinympäristössä.

Melun haitallisuuden voimakkuuden arviointi riippuu olosuhteista ja ym-
päristöstä eli kontekstista. Esimerkiksi oman toiminnan tuottama melu saa
olla hyvinkin voimakasta, ilman että se koettaisiin ympäristöä huonontavaksi
tai pilaavaksi.* Koska koettu voimakkuus, esimerkiksi meluisuus ja kiu-

* Jos melu määritellään ”ei toivotuksi ääneksi”, niin saattaa olla, että itse tuotetusta melusta
vain osa on ei toivottua tai, että ”ei-toivottavuuden” aste ja arviointitapa ovat toiset kuin
arvioitaessa muiden tuottamaa melua.

sallisuus, riippuu lähteestä ja sen ominaisuuksista sekä siitä, mitä altistettu on tekemässä, niin meluisuutta ja kiusallisuutta – *sekä melutasoa* – ei voida pitää ympäristön yksikäsitteisinä pilaantuneisuuden mittareina. Aivan kuten yhtä voimakkaiden eri melujen ja saman melun eri altistustilanteiden kiusallisuusvaste voi olla erilainen, niin myös pilaantuneisuuden koettu voimakkuus on katsottava konteksti- ja kuulijariippuvaiseksi muuttujaksi.

Äänekkyys

Äänekkyys* on kuulijan havainto tai vaikutelma (ja niiden perusteella tehty arvio) äänen akustisesta voimakkuudesta. Äänekkyys riippuu äänen voimakkuuden (engl. sound volume) lisäksi mm. energiatiheydestä (engl. sound energy density).[†] Käytännön esimerkin siitä, miten äänekkyuden muutos vaikuttaa äänen ominaisuuksiin, saamme säätämällä (hyvälaatuisen) radion äänenvoimakkuutta pienemmäksi tai suuremmaksi.[‡] Äänekkyys voi riippua myös muista samanaikaisista ärsykkeistä, esimerkiksi ääneen liittyvistä näköhavainnoista.^{137, 241, 242}

Erilaiset äänenpainetasot on tarkoitettu alun perin äänekkyuden mitaksi. Äänekkyys ei kuitenkaan riipu pelkästään äänitasosta. Kuuloaistin herkkyys eri taajuisille äänille vaihtelee (kuva 5). Äänekkyys riippuu myös signaalin ajallisten vaihtelujen luonteesta ja kestosta. Taajuuspainotuksen[§] tarkoitus on ottaa huomioon äänen spektraalisten ominaisuuksien vaikutus äänekkyyyteen ja aikapainotuksen** tarkoitus on ottaa huomioon äänen ajallisesti vaihtelevien ominaisuuksien vaikutus. Hetkellisen äänitason on tarkoitus kuvata hetkellistä äänekkyyttä ja sen vaihtelua ja ekvivalenttitason keskimääräistä äänekkyyttä mittaussajalta. On syytä kuitenkin muistaa, että alun perin (1970-luvulla) ekvivalenttitasoon päädyttiin etsittäessä melusuuretta, jonka perusteella pystyttäisiin ennustamaan työperäisin meluallistuksen aiheuttama kuulovaurioriskiä. Tässä yhteydessä ei kiinnitetty erityistä huomiota ekvivalenttitason kykyyn kuvata äänekkyyttä.

Äänitasomittari on suunniteltu antamaan tulokseksi lukuarvo, joka olisi verrannollinen mitattavan (vakio)äänien äänekkyyyteen ja, jonka perusteella erilaisia (vakio)ääniä voitaisiin asettaa äänekkyysjärjestykseen. Äänitasomittarit mittaavat äänenpainetasoa. Niihin on standardoitu useita taajuus- ja

* Äänekkyydellä, N , tarkoitetaan myös standardoidun menetelmän, esim. ISO 532 standardin¹³³, mukaisesti mitattua äänekkyuden lukuarvoa soneina. Äänekkyystaso, L_N , on äänekkyyttä vastaava taso (desibelin kaltainen suure) foneina.

† Psykoakustiikan ja audiologian kirjallisuudessa äänen fysikaalista voimakkuutta kutsutaan usein intensiteetiksi. Tällöin ei tarkoiteta äänen todellista, fysikaalista intensiteettiä yksiköissä W/m^2 , vaan äänenpaineesta tai esimerkiksi energiatiheydestä määritettyä voimakkuutta.

‡ Joissakin radioissa volyymin säätö vaikuttaa voimakkuuden lisäksi myös taajuusvasteeseen.

§ Standardoituja taajuuspainotuksia ovat mm. A-, B-, C-painotukset.

** Standardoituja aikapainotuksia ovat slow (1 s), fast (125 ms), impulse (35 ms). Ekvivalenttitasoa mitattaessa aikapainotus on mittausajan pituinen.

aikapainotuksia. Suurin osa ympäristömeluista on sellaisia, että eri painotuksia käyttäen mitatut tasot korreloivat erittäin hyvin keskenään^{703, 704, 705} ja äänekkyyteen.¹³⁸

Äänitasomittarin toiminta jäljittelee kuitenkin melko karkeasti kuuloaistin toimintaa, mistä syystä joissakin tapauksissa voi esimerkiksi sattua, että A-äänitason aletessa äänekkyyden kasvaakin tai A-taso on muusta syystä huono äänekkyyden mitta.^{139, 140, 141, 142, 143, 207} Esimerkkinä äänitasomittarin toiminnan vajavaisuudesta voidaan mainita myös se, että ulkona tieliikenteen melun subjektiivisen äänekkyyden ja L_{Aeq} -tason erotus yleensä kasvaa etäännyttäessä tiestä.^{144, 145}

Äänekkyyttä arvioitaessa kapeakaistaisuuden ja impulssimaisuuden vuoksi tehtävien korjausten tarkoitus on antaa tulokseksi paremmin äänekkyyteen (ja myös meluisuuteen ja kiusallisuuteen) verrannollinen lukuarvo kuin, mitä mittarin näyttämä lukema on. Äänekkyydenkorjaus voi olla, tapauksesta riippuen, positiivinen tai negatiivinen. Esimerkiksi impulssipainotteisen enimmäistason äänekkyydenkorjaus voi olla negatiivinen ja slow-painotteisen positiivinen.

Kuvassa 5 on esitetty standardoidut vakioäänekkyydenkäyrät ja kuulokynnys ääneksille vapaakenttäoloissa. Eri laboratorioissa ja eri koehenkilöille mitatut vakioäänekkyydenkäyrät vaihtelevat melko paljon.^{146, 147} Useissa vertailuissa on todettu, että kuuloaisti ei ole 1 kHz pienemmillä taajuuksilla niin herkkä kuin ISO 226:1987 standardissa spesifioidaan.^{148, 628} Standardia ollaan uudistamassa. Vuoden 2003 ehdotuksessa alapään taajuuksien äänekkyydet ovat jopa noin 10 dB korkeammalla (epäherkempiä) kuin kuvassa 5.

Vakiovoimakkuudella esitetyn äänen äänekkyyden, N [soni], on verrannollinen äänenpaineeseen, p [μPa], neliön keskimääräiseen arvoon^{149, 150, 151}

$$(3) \quad N = k(\tilde{p}^2)^n = k(\sqrt{\tilde{p}^2})^{2n} = k p_{rms}^{2n} \approx 0,01^3 \sqrt{p_{rms}^2} \approx 0,01 p_{rms}^{0,6}$$

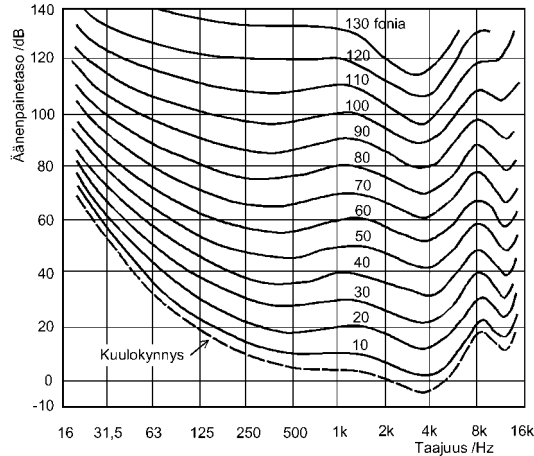
Kaavassa (3) äänenpaineen neliön keskimääräinen arvo integroidaan vähintään kuuloaistin aikavakion (äänekkyyden stabiilisuusajan) ajalle. Kaava (3) olettaa, että äänenpainetaso on vähintään noin 40 dB. Tätä alhaisemilla tasoilla kuuloaisti kompressoit* signaalia vähemmän kuin kuutiojuureen verrannollisesti.

Äänenpaineen neliö on verrannollinen äänen energiaan ("intensiteettiin"), jolloin äänekkyydenkin on verrannollinen korvaan integrointiajan sisällä kohdistuneeseen energiaan. Kaavan (3) eksponentin, n , arvo on noin 1/3 (kuutiojuuri) ja "siirtovakion", k [Soni/Pa]. Arvot riippuvat taajuudesta ja myös äänenpaineen neliön keskimääräisestä arvosta, so. äänen voimakkuudesta. Siir-

* Kuuloalueen dynaaminen laajuus on esim. 1 kHz:llä äänenpainotasona ($L_p = 20 \lg(p/p_0)$) noin 0 – 120 dB. Korvasta aivoille menevän signaalivirran dynaaminen laajuus on paljon pienempi, noin 60 dB. Korva supistaa eli kompressoit 120 dB vaihtelualueen 60 dB laajaksi alueeksi. Jos äänenpainotaso määritellään $L_p = 10 \lg(p/p_0)$, kompressiota ei ole; on vain epälineaarinen vaste.

tovakion k arvo on tyypillisesti 0,01-luokkaa. 40 dB tasoisen 1 kHz taajuisen (1 s kestävä) äänen äänekkyyden on määritetty 1 soniksi.*

Myös muiden aistien välittämä aistimuksen voimakkuus noudattaa kaavaa (3) vastaava eksponenttifunktiota. Eri aisteilla n :n arvo vaihtelee 0,33...3,5.^{153, 154, 155}



Kuva 5: ISO 226:1987-standardin mukainen äänestien vakioäänekkyydkäyrästä vapaa-kestässä. Pystyakselilla todellinen korvaan kohdistuva äänenpainetaso. Käyrien numerot esittävät äänekkyydystasoa foneina.¹⁵²

Tuntemme nykyisin melko hyvin ne kuuloaistin fysiologiset toiminnot, joiden perusteella aistimus (ja havainto) tasoltaan vakiona pysyvän, vaihtelevan jatkuvan ja/tai melko lyhytaikaisen äänen hetkellisestä äänekkyydestä[†] syntyy.¹⁵⁶ Tuntemme myös melko hyvin ne tällaisten äänien mitattavissa olevat ominaisuudet, jotka vaikuttavat äänekkyyteen.¹⁵⁷ Äänenpaine(taso) on näistä merkittävin. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat taajuusjakautuma eli spektri sekä äänen lyhytaikaisen ajallisen vaihtelun luonne.^{158, 159, 160, 161} Saatavilla on melko hyviä analyttisiä kuulomalleja.^{162, 163, 164, 165}

Standardissa ISO 532¹³³ on julkaistu kaksi äänekkyyden laskennallista määrittämenetelmää. Menetelmät on laadittu ajallisesti vakiona pysyvien tai vähän vaihtelevien äänien äänekkyyden arviointiin. Kirjallisuudessa on esitetty myös yksinkertaistettu arviointimenetelmä.¹⁴⁵ Äänekkyyden, N [soni] ja äänekkyydystason, L_N [foni] välillä on (kun $L_N \geq 35 \dots 40$ fonia) mainittu seuraavia (kokeellisiin käyriin perustuvia) yhteyksiä

* Kotimaisten kielten tutkimuskeskus suosittelee soonia ja fonia englannin sone ja phone termien suomenkielisiksi vastineiksi. Akustikot ovat tottuneet käyttämään nimityksiä soni ja foni.

† Hetkellisellä äänekkyydellä tarkoitetaan tässä signaalin kestäessä tai melko pian lyhytkestoisen äänen loppumisesta arvioitua äänekkyyttä. Vastakohtana on *muistinvarainen äänekkyyden*, jolla yleensä tarkoitetaan äänekkyydsarviota äänestä, jonka kuulumisesta on kulunut pitkä aika, esimerkiksi viikko tai kuukausia. Arvioitaessa tulevien tapahtumien äänekkyyttä, puhutaan *ennakoidusta äänekkyydestä*.

$$(4a) \quad N = 2^{(L_N - 40)/10}$$

$$(4b) \quad L_N = 40 + 10 \lg_2 N \approx 40 + 33 \lg N$$

Hyvin monille ympäristömeluille pätee

$$(5) \quad L_N \approx a(m, \mu)L_{pA} + b(m, \mu)$$

jossa L_N on äänekkyystaso [foni], $a(m, \mu)$ ja $b(m, \mu)$ spektrin muodosta riippuvia kertoimia sekä L_{pA} äänen A-painotettu äänenpainetaso [dB]. Tielikennemelun tyyppisille spektreille on saatu $a(m, \mu) \approx 0,89$ ja $b(m, \mu) \approx 24,06$.

Nykyisin äänekkyys halutaan ymmärtää sellaiseksi muuttujaksi, jonka suuruus riippuu pelkästään äänisignaalin ominaisuuksista. Muistettakoon kuitenkin, että eri kielissä sanan "äänekkyys" konnotatiivinen profiili poikkeaa jossain määrin. Esimerkiksi japanissa äänekkyys on merkitykseltään neutraali, mutta saksassa ja englannissa siihen liittyy kielteinen lataus.¹⁶⁶ Eri ihmiset arvioivatkin erilaisten äänien äänekkyyttä *hieman* eri kriteerein. On jopa todettu, että eri kulttuureissa erilaisten äänien ja melujen äänekkyuden arvioinnissa on systemaattisia eroja.^{166, 167, 218, 168, 297} Toisaalta on myös todettu, että esimerkiksi saksalaiset ja japanilaiset koehenkilöt arvioivat lähes samalla tavalla tieliikenteen ja impulssimaisen melun äänekkyuden.¹⁶⁹ Vertailuja siitä, miten suomalaisten äänekkyysarviot mahdollisesti poikkeavat muiden kulttuureiden arviointitavoista, en tiedä tehdyn.

On viitteitä siitä, että äänen informaation sisältö tai merkitys vastaanottajalle vaikuttaisi äänekkyysarvioon.¹⁷⁰ Ainakin kaistapäästettyjen kohinatyyppisten äänien äänekkyys riippuu myös signaalin autokorrelaatiosta eli siitä, miten signaali toistaa itseään.^{171, 172}

Lähteen näkyvyyden (onko näkyvissä vai ei) ja ympäristön visuaalisen esteettisyyden on todettu vaikuttavan äänien koettuihin ominaisuuksiin.^{173, 174, 240, 137, 241} Tutkimukset viittaavat siihen, että äänekkyys ei kuitenkaan riippuisi kovin paljoa siitä, onko lähde näkyvissä vai ei.¹⁷⁵ Kiusallisuuden suhteen on saatu toisenlaisia tuloksia.

Kuulohavainnon äänekkyteen vaikuttava taajuusalue, 10 Hz – 16 kHz, jakaantuu äänekkyuden aistimisessa 24...26* osa-alueeseen, joita kutsutaan kriittisiksi kaistoiksi.^{253, 176, 177} Taajuusalueen alapäässä (kuva 6) kaistaleveys on vakio, noin 100 Hz. Jotkut tutkimukset viittaavat siihen, että kaistaleveys ei olisikaan vakio, vaan kapenisi taajuuden laskiessa.¹⁷⁸ Yläpäässä, noin 0,5 kHz:n terssikaistalta lähtien leveys kasvaa ja noudattaa melko hyvin 1/3-oktaavi- eli terssikaistojen leveyttä. Alun perin äänien taajuusjako oktaaveihin ja tersseihin on peräisin musiikista.

Tällä hetkellä on kaksi keskenään kilpailevaa kriittisen kaistan "taajuuden" eli numeron sekä kaistan kaistaleveyden määrittämis menetelmää. Niin sanotun

* Eri tutkijat ovat päätyneet hieman erilaisiin kaistalevyksiin. Esimerkiksi Fletcherin esittämä kaistaleveys on spektrin alapäässä 1/2...1/3 Zwickerin esittämästä. Yleisin arvo on 24.

Munchenin koulukunnan mukaan kriittisen kaistan numero ("bark-taajuus"), z_f [Bark], on taajuuden f [Hz] ympärissä⁶⁷⁵

$$(6.1) \quad z_f \approx 13,0 \arctan\left(\frac{0,76f}{f_0}\right) + 3,5 \arctan\left(\frac{f}{7,5f_0}\right) \text{ Bark}$$

jossa f on taajuus [kHz] ja $f_0 = 1$ kHz. Kaavan (6.1) tarkkuus on noin $\pm 0,2$ Bark. Cambrigen koulukunnan mukaan¹⁰⁹ vastaava kaistan numero ("Cam-taajuus")

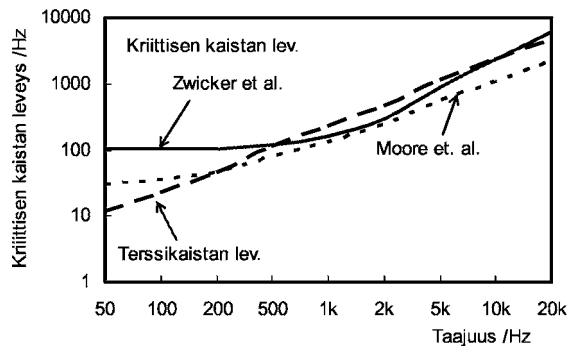
$$(6.2) \quad n_f \approx 21,4 \lg\left(\frac{4,37f}{f_0} + 1\right) \text{ Cam}$$

Vastaavat kriittisten kaistojen leveydet ovat näillä koulukunnilla

$$(7.1) \quad \Delta f_{z_f} = 25 + 75 \left[1 + 1,4 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{0,69} \text{ Hz}$$

$$(7.2) \quad \Delta f_{n_f} = 24,7 \left(4,37 \frac{f}{f_0} + 1 \right) \text{ Hz}$$

Kuten kuvasta 6 voi päätellä, menetelmät eroavat eniten pienitaajuisten melun äänekkyyden laskennassa. Erolla on merkitystä muun muassa ka-peakaistaisuuden arvioinnissa.



Kuva 6: Kuuloaistin kriittinen kaistaleveys (Münchenin koulukunta, Zwicker et. al, ja Cambridgen koulukunta, Moore et al.) verrattuna terssisuodattimen kaistaleveyteen (katkoviiva) taajuuden funktiona.

Kriittisen kaistan sisällä äänekkyyys riippuu komponenttien kokonaisäänitasosta, $L_{pkr,i}$ [dB], mutta ei juuri riipu "spektristä", so. siitä, miten eritaajuis-

ten äänien voimakkuus on jakaantunut kaistan sisällä.^{179, 180, 416} Ääneksen äänekkyyden periaatteessa sama kuin sitä energialtaan vastaavan kohinan, jonka kaistaleveys ei ylitä kriittisen kaistan leveyttä.¹⁸¹ Kun kapeakaistaisen äänisignaaliin kaistaleveyttä kasvatetaan pitäen kokonaisäänitaso vakiona, äänekkyyden alkaa kasvaa vasta, kun kaistaleveys on kriittistä kaistaleveyttä suurempi. Kriittinen kaistaleveys on yksikordinaisesti kuunneltaessa hieman leveämpi kuin kaksikordinaisesti kuunneltaessa. Kuulovammaisten henkilöiden kriittinen kaistaleveys on usein leveämpi kuin normaalikuuloisilla.²⁴⁷

Kriittisten kaistojen ($i = j \dots n$) summaäänekkyuden taso, L_N , on verrannollinen kaistojen äänen kokonais-”energiaan” (kaava 8). Kerroin k_i vaihtelee välillä 0,15...3,6.

$$(8) \quad L_N \sim 10 \lg \left(\sum_{i=j}^n 10^{(L_{pkr,i}/10)/k_i} \right) \text{ fonia}$$

Jos yhden (terssi)kaistan äänenpainetaso on $L_{p,i}$ [dB] ja taajuuspainotus ko. kaistalla $\Delta L_{p,i}$ [dB], on (terssi)kaistojen $i = j \dots n$ taajuuspainotettu äänenpainetaso

$$(9) \quad L_{\Delta} \sim 10 \lg \left(\sum_{i=j}^n 10^{(L_{p,i} - \Delta L_{p,i})/10} \right) \text{ dB}$$

Eräs likiarvokaava tietyn kriittisen kaistan sisään jäävän äänen äänekkyydelle on

$$(10) \quad N^1 = 0,08 \left(10^{L_p/10} \right)^{0,23} \left[\left(0,5 + 0,5 \frac{10^{L_p/10}}{10^{L_{pQ}/10}} \right)^{0,23} - 1 \right]$$

jossa L_p on kuultavan äänen äänenpainetaso [dB] ja L_{pQ} kuulokynnyksen taso [dB] ko. kriittisellä kaistalla.

Monet äänestämättömyyden ja kapeakaistaisuuden arviointimenetelmät perustuvat äänestämättömyyden tai kapeakaistaisuutta aiheuttavien komponenttien äänekkyyden havaitsemis- eli detektointikynnykseen eli siihen pienimpään komponenttiin (tai komponenttien) voimakkuuteen, jolla ne pystytään erottamaan kyseisellä kriittisellä kaistalla. Se, että äänestämättömyys pystytään havaitsemaan, ei vielä merkitse sitä, että melu olisi haitallisempaa kuin vastaavan äänenpainetason omaava melu, jolla tätä ominaisuutta ei ole.

Ajallisesti vaihtelevan signaalin äänekkyyden prosessoinnista

Useimpien ympäristömelujen ja -äänien voimakkuus vaihtelee ajallisesti. Tästä syystä on tärkeää asettaa kysymys: miten vaihtelu vaikuttaa äänekkyy-

teen (ja muihin subjektiivista voimakkuutta mittaaviin muuttujiin)? Toinen tärkeä kysymys on, kuinka hyvin eri ajoilta peräisin oleva muistinvarainen äänekkyys vastaa todellista?

Kuten jo aiemmin todettiin, äänekkyys riippuu spektraalisten ominaisuuksien lisäksi äänen kestosta sekä hetkellisen äänitasontason ja spektrin ajallisesta vaihtelusta. Ajallisesti vaihtelevan äänen kokonaisäänekkyuden* arviointi edellyttää äänekkyystiedon muistissa tapahtuvaa prosessointia (jonkinlaista keskiarvostamista). Äänekkyuden prosessointi jakaantuu hetkellisten erojen tunnistamiseen (miten äänekkyys eroaa aiemmasta) ja hetkellisen äänekkyuden (tai/ja kertyneen kokonaisäänekkyuden?) arviointiin. On olemassa tietyt äänisignaalin hienorakenteen muutosten alarajat, joita lyhyempiä, nopeampia tai pienempiä muutoksia kuuloaisti ei pysty erottamaan. Samoin on löydettävissä tietyt äänisignaalin muutosten aikajänteet, tapahtumien enimmäiskestot, muutosten ”hitaudet” ja viiveet, joiden ylityessä myöhempi tapahtuma tai muutos ei enää vaikuta sitä edeltäneen signaaliosan äänekkyYTEEN tai päinvastoin – aiempi signaalitapahtuma ei enää vaikuta myöhemmän signaaliosan (hetkelliseen) äänekkyYTEEN.

Basilarin kalvolla[†] olevista karvasoluista peräisin oleva hermoimpulssien välittämä tieto äänen hetkellisestä äänekkyudesta¹⁸² varastoituu ainakin kolmeen erityyppiseen muistiin. Ensimmäistä, hyvin lyhytkestoista vaihetta kutsutaan (kuulo)aistivarastoksi. Sen ajallinen pituus on enintään 20...300 ms.^{183, 184} Aistivaraston jälkeen hermosignaalin prosessointi jatkuu työmuistissa.[‡] Aistivarasto ja työmuisti voivat olla joko aivojen erillisiä alueita tai samalla aivoalueella tapahtuvaa signaalin (informaation) erilaisia prosessointitapoja.¹⁸⁴

Työmuistista tiedostettu ja merkittävänä pidetty informaatio siirretään säilö- eli pitkäkestoiseen muistiin. Työmuisti pystyy tyypillisesti varastoimaan ja käsittelemään äänisignaalia – esimerkiksi arvioimaan (”integraamaan”) keskimääräistä äänekkyyttä – enintään noin kolmen sekunnin ajalta. Tätä aiemmin esiintyneiden äänien äänekkyysarviot ovat todennäköisesti peräisin säilömuistista. Toistuvia impulssiääniä tutkittaessa on todettu, että jos toistotiheys on harvempi kuin yksi viidessä sekunnissa, impulssien äänekkyys ei enää vaikuta toisiinsa. Tästä on päätelty, että äänekkyystiedon käsittelyyn osallistuu myös 2...5 sekunnin pituinen ”integraattorin” tapainen työmuisti.^{458, 209} Aiemmissä tutkimuksissa on päädytty sekä huomattavasti lyhyempään¹⁸⁵ (n. 0,5 s) että pitempään^{184, 186, 187} (max. n. 15...20 s) integraattorin luontoiseen tai signaalin piirteitä analysoivaan ja säilyttävään

* Kokonaisäänekkyys on arvio ajallisesti ja spektraalisesti vaihtelevan ääninäytteen tai melun äänekkyudesta. Esimerkiksi koetilanteessa voidaan esittää kaksi (pitkää) ääninäytettä. Kun kuulijaa pyydetään sanomaan, kumpi niistä on äänekkäämpi, katsotaan arvioinnin perustuvan kokonaisäänekkyYTEEN ja sen eroon. Kokonaisäänekkyys voi olla suurempi kuin saman äänen/melun keskimääräinen äänekkyys.

† Sisäkorvassa, simpukan eli koklean sisällä oleva elin, johon kuuloaistin solut, eli karvasolut ovat kiinnittyneet.

‡ Työmusitia kutsutaan joissain tutkimuksissa pitkäkestoiseksi muistiksi. Sen kapasiteetti on 2 - 20 s.

työmuistiin. Muistijälki saattaa säilyä tässä työmuistissa noin 10 s signaalin loppumisen jälkeen.¹⁸⁸

Äänen korkeusarvion muistissa pysymistä tutkittaessa on päädytty samaa suuruusluokkaa, 3...9 s, olevaan työmuistin pituuteen siinä tapauksessa, että muistamisen aikana kuuloaistia kuormitetaan muun taajuisilla äänillä. Jos kuuloa ei kuormiteta, muistijälki pysyy tarkkana muistissa kauemmin.¹⁸⁹ Oppimisella saattaa olla vaikutusta siihen, kuinka kauan ja tarkkaan äänekkyys ja äänenkorkeus säilyvät työmuistissa.^{190, 191}

Yhteenvetona voidaan todeta, että vähintään 20 s aikaisemmin kuultujen äänien äänekkyysarvio perustuu niihin muisti- eli mielikuviin, joita pystymme palauttamaan pitkäkestoisesta muistista tai muodostamaan palautuksen perusteella.

Pystymme palauttamaan mieleen äänten ajallisten ominaisuuksien lisäksi tietoa mm. äänen spektraalisista ominaisuuksista, informaatioisisällöstä ja äänilähteiden sijainnista ja liikkeestä sekä äänen tulosuuntien avaruudellisesta jakautumisesta ja niiden ajallisesta muuttumisesta. Pystymme palauttamaan mielikuvia sekä äskettäin että kauan sitten kuultujen äänien ominaisuuksista. Ei tiedetä, varastoimmeko nämä eri ominaisuudet omiin muistipaikkoihinsa (joista ne palautuvat mieleen), vai arvioimmeko ne mieleen palautuksen yhteydessä luodusta mielikuvaäänimaisemasta.

Äänekkyiden stabiloituminen

Äänekkyiden *stabiloitumisajaksi* sanotaan sitä aikaa, jonka jälkeen samanlaisena jatkuvan signaalin äänekkyys (N) ei enää kasva äänen keston (Δt) pidentyessä.¹⁹² Stabiloitumisaikaa kutsutaan myös *äänekkyiden ajallisen summautumisen kriittiseksi ajaksi*. Yksittäin esitettyjen äänepurskeiden ja impulssien (lyhytkestoisten äänien) stabiloitumisaika on 80...200 ms luokkaa. Eri mittausmenetelmillä ja erilaisia äänien käyttäen saadaan erilaisia stabiloitumisaikoja. Arvot vaihtelevat 70...350 ms. Esimerkiksi tanskalaisessa round-robin-tutkimuksessa päädyttiin 80 ms aikaan.¹⁹³ On mahdollista, että kuuloaisti käyttää erilaisia stabiloitumiseen vaikuttavia analysointitapoja erilaisille äänille.

Stabiloitumisaajan sisällä äänekkyys kasvaa suoraan verrannollisena signaalin keston [eli $N \sim k\Delta t$]. Stabiloitusajan sisällä kuuloaistia voidaan pitää äänienenergian detektorina.¹⁹⁴ Stabiloitumisaika riippuu jossain määrin äänen voimakkuudesta. Hiljaisten, lähellä kuulokynnystä olevien äänien äänekkyiden stabiloitumisaika on pitempi (n. 200...300 ms) ja keston vaikutus niiden äänekkyteen on vähäisempi kuin vähintään 10...20 dB:llä kuulokynnyksen ylittävillä äänillä.^{195, 196, 188, 194}

Kuuloaisti pystyy tunnistamaan stabiloitumisaajan sisällä voimakkuudeltaan tai spektriltään vaihtelevan äänen äänekkyiden muutoksia, joiden kesto on vähintään luokkaa 100 ms.¹⁹⁷

Stabiloitumisen jälkeen samanlaisena jatkuvan äänen äänekkyys ei riipu merkittävästi äänen kestosta. Eräässä laboratorioskokeessa todettiin esimerkiksi, että tieliikennemelun kestolla (eri näytteiden kesto vaihteli 1 – 80 s ja L_{Aeq} -taso 57 – 80 dB(A) välillä) ei ollut oleellista merkitystä äänekkyyyteen.¹⁹⁸

Äänekkyiden adaptoituminen

Stabiloitumisen vastakohta on *äänekkyiden adaptoituminen* eli alentuminen äänen jatkuessa vakiona.¹⁹⁹ Adaptoitumista koskevat tutkimustulokset ovat olleet ristiriitaisia. Nykykäsitys näyttäisi olevan, että hiljaisilla äänillä merkittävän suuruista adaptoitumista tapahtuisi vain tietyissä olosuhteissa.^{200, 203} Sisämelujen haitallisuuden arvioinnin kannalta tällainen erityinen olosuhde on se, että merkittävää äänekkyiden adaptoitumista tapahtuu äänillä ja etenkin ääneksillä, joiden äänitaso on 30...35 dB(A):n tienoilla ja sen alle.^{200, 201} Näyttää myös siltä, että adaptoituminen on yli 8...10 kHz ääneksille huomattavasti voimakkaampaa kuin tätä matalataajuisemmilla äänillä.^{202, 203}

Adaptoitumisen stabiloitumisaika, eli aika, jonka jälkeen äänekkyiden alentuminen pysähtyy ärsykkeen pysyessä vakiona, on 2...6 minuutin luokkaa. Hiljaisten äänien tuottama äänekkyiden aistimisherkkyyden epäherkistyminen palautuu melko nopeasti altistavan äänen hiljettyä. Altistuminen yli 70...80 dB(A) tasoisille äänille voi aiheuttaa äänekkyiden adaptaation lisäksi kuulokynnyksen tilapäisen nousun eli ohimenevään kuulokyvyn huonontumisen.^{204, 205, 206}

Äänekkyiden riippuvuus altistavan äänen kestosta ja voimakkuuden ajallisesta vaihtelusta

Äänitasomittareissa käytetyn nopean eli fast-aikavakion (125 ms) tarkoituksena on mallintaa (matkia) kuuloaistin toimintaa lyhyiden tai nopeasti vaihtelevien äänien hetkellisen äänekkyiden ja sen vaihtelun määrittämisessä. Muut aikavakiot (hidas 1 s, impulssi 35 ms) poikkeavat useimmissa tapauksissa fast-painotusta enemmän kuuloaistin toiminnasta. Slow-tason lukuarvo aliarvioi stabiloitumisaikaa lyhyempien yksittäisten äänien äänekkyiden ja impulssitaso usein yliarvioi sen. Tällaisissa tapauksissa slow-tason perusteella arvioitu äänekkyys on tyypillisesti noin puolet todellisesta ja impulssitasosta arvioitu noin kaksinkertainen todelliseen verrattuna.²⁰⁷ Tutkimukset kokonaisäänekkyiden summautumis- eli integrointiajoista ovat kuitenkin josain määrin ristiriitaisia.²⁰⁸

Kuten edellä todettiin, *lyhyiden* yksittäisten äänien, esimerkiksi yksittäislaukauksen, äänekkyys riippuu voimakkuuden lisäksi äänen kestosta.¹⁹²

Lyhyiden toistuvien äänitapahtumien, kuten jatkuvan, nopea vasaroinnin, äänekkyyden riippuu näiden lisäksi myös tapahtumien toistumisnopeudesta ja tapahtumien väliin jäävän hiljaisen ajan pituudesta.^{209, 454} Jatkuvasti toistuvien transienttien ja lyhytkestoisten yksittäisten äänien ominaisuuksien analysoinnissa kuuloaistin on todettu painottavan äänitason voimakasta muutosta seuraavan ensimmäisen 50 ms:n aikaisia tapahtumia suhteellisesti enemmän kuin sen jälkeen tulevia.²¹⁰ Muutosnopeus vaikuttaa signaalin äänekkyyteen kuitenkin vain äänitason nousu- ja laskunopeuden muutoksen ensimmäisten millisekuntien aikana.²¹¹

Luotettavia tutkimuksia pitkään, esimerkiksi *päiviä ja viikkoja*, kestävien tasoltaan ja spektriltään vaihtelevien, useista erilaisista äänistä koostuvien seosäänten äänekkyyden muodostumisesta ja äänekkyyteen vaikuttavista tekijöistä ei ole. Tutkiminen on vaikeaa, sillä mitä pitempää ajanjaksoa tarkastellaan, sitä vaikeampi on järjestää kontrolloituja kokeita²¹² ja sitä enemmän muutkin tekijät kuin pelkkä fysiologinen ja psykoakustinen äänekkyyden alkaavat vaikuttaa koehenkilöiden arvioihin. Voidaan myös sanoa, että pystymme kuulemaan vain melutapahtumia (tai vakiomelua) ja niiden hetkellisen äänekkyyden vaihtelun, emme esimerkiksi (edes) yhden päivän $L_{Aeq,07-22h}$ -tasoa.*

Laboratorio-oloissa alle tunnin kestävässä kokeissa ajallisesti vaihtelevan (laajakaistaisen, jatkuvan) melun keskimääräisen äänekkyyden on todettu korreloivan (melko) hyvin L_{Aeq} -tasoon.^{213, 214, 215, 216, 217} L_{Aeq} -taso on äänitason ajallinen "keskiarvo", joka ainakin teknisessä mielessä estimoii keskimääräistä äänekkyyttä (hetkellisen äänekkyyden "energia"-keskiarvoa). On kuitenkin tutkimuksia, joiden mukaan kymmeniä minuutteja ja tätä pitempään kestävässä kokeissa vaihtelevan melun, kuten tieliikenne- ja lentomelun (useita erilaisia ohiajoja ja -lentoja) arvioitu altistava kokonaisäännekkyyden voi olla hetkellisen äänekkyyden keskiarvoa merkittävästikin suurempi. Kokonaisäännekkyyden arvio voi vastata jopa hetkellisen äänekkyyden 3 – 5 %:n pysyvyysarvoa[†], $N_{3\%} - N_{5\%}$.^{218, 219, 220} Myös nopeasti perättäin toistuvien impulssisarjojen (kuten vasarointi) kokonaisäännekkyyden voi olla suurempi kuin sarjan yksittäisten impulssien keskimääräinen äänekkyyden.²⁰⁹

Zwicker on tutkimuksissaan tullut tulokseen, että ajallisesti vaihtelevien äänien ja melujen äänekkyyden 10...20 %:n pysyvyysarvo on kohtuullisen hyvät subjektiivisen kokonaisäännekkyyden estimaattori arvioitaessa altistettujen reaktioita liikennemeluun ja puheääniin.^{221, 207} Monissa tapauksissa voimakkuus-

* Äärettömän suuri määrä erilaisia meluja ja altistuksia voi aiheuttaa saman $L_{Aeq,07-22h}$ -tason. Yli 20 sekuntia kestäneiden äänien äänekkyyden arviointi perustuu muistinvaraiseen äänekkyyteen ja mielikuviin.

† Pysyvyysarvo tarkoittaa sitä arvoa, jonka signaalin voimakkuus ylittää kyseisen %-osuuden (ajan) esiintymisaikanaan. Esimerkiksi $N_{4\%}$ tarkoittaa äänekkyyttä, joka ylittyy 4 %:n ajan koko sinä aikana, jona ko. signaali esiintyy. Pysyvyysarvo riippuu suuresti siitä, kuinka pitkä yksittäisten näytteiden tehollisarvon integrointiaika on. Esimerksi fast- ja slow-tasoisista laskeut äänitason pysyvyysarvot ja niiden jakautuma ovat yleensä erilaisia.

deltaan vaihtelevan liikennemelun L_{Aeq} -taso on melun A-painotettujen hetkelisten äänenpainetasojen 10...20 % pysyvyyssarvojen, $L_{A,10\%}\dots L_{A,20\%}$, välillä.

Syyksi sille, että altistuksen jälkeinen kokonaisäänekkyys arvioidaan systemaattisesti hetkellisen äänekkyysarvion keskiarvoa suuremmaksi, katsotaan olevan se, että lyhytaikaisissakin (alle tunnin) altistuksissa epätavallisen voimakkaat äänet vaikuttavat muistiin tallentuvaan informaatioon enemmän tai painotetummin kuin hiljaiset tai keskimääräiset äänet.^{219, 222}

Nykyiset standardoidut äänekkyuden objektiiviset menetelmät pätevät vain stationääriselle, vakiona tai vain vähän ajallisesti vaihtelevalla melulle. Sekä Saksassa että Yhdysvalloissa ollaan laatimassa ajallisesti vaihtelevan äänen äänekkyuden määrittämissä standardia.^{223, 222}

Esitettäessä voimakkuudeltaan vaihtelevia lyhyitä signaaleja perättäin ensinnä ja viimeiseksi tulevat vaikuttavat äänekkyysaistimukseen enemmän kuin niiden väliin jäävä osuus.²²⁴ Vastaavaan tulokseen on päädytty esittäessä koehenkilöille 1 s kestäviä näytesarjoja, joissa voimakkuus vaihteli joka 100 ms päästä. Signaalin alku- ja loppuosan vaikutus oli suurempi kuin keskiarvon.^{225, 226}

Laboratorikokeissa on todettu, että pitkissä näytteissä myöhemmin esitetyt äänet (näytteet, signaalinosat) vaikuttavat enemmän kokonaisäänekkyuden arvioon kuin aiemmin esitetyt äänet.^{227, 228, 229} Ilmiötä kutsutaan äänekkyuden *äskeisyyspainotteisuudeksi* (engl. recency effect). Äskeisyyden vaikutuksen voimakkuus näyttäisi kuitenkin olevan erilainen eri henkilöillä.^{214, 230}

Kun perättäisten lyhyiden äänemäisten koeäänien (purskeiden) aikaero on lyhyt, sekunti tai muutama sekunti, aikaisemmin esitetyt vaikuttavat myöhemmin esitettyjen koettuun äänekkyuteen. Myöhemmin (100 ms...3 s) esiintyvien purskeäänesten koettu äänekkyys voi alentua jopa 10...20 dB. Ilmiöstä käytetään nimitystä *äänekkyuden (väliaikainen) uudelleen kalibroittuminen*.²³¹ Ilmiötä ei pidä sekoittaa jälkipeittoon.

Edellä esitetyt kaksi ilmiötä, äskeisyyspainotteisuus ja väliaikainen äänekkyuden uudelleen kalibroittuminen ovat esimerkkejä niistä monista psykoakustisista ilmiöistä, jotka voivat vaikuttaa siihen, että äänitasomittarin ilmoittama lukuarvo ei aina vastaa kuulijan arvioimaa äänekkyyttä.

Ympäristömeluissa on usein meluisten jaksojen välissä hiljaisia osuuksia eli taukoja melussa. Ekvivalenttitaso ei ole välttämättä kovin hyvä sellaisen melko harvoin toistuvien yksittäisten äänitapahtumien *keskimääräisen* (subjektiivisen kokonais-) äänekkyuden – eikä muidenkaan sellaisten melujen subjektiivista voimakkuutta kuvaavien suureiden – estimaattori, joiden väliin jää pitkiä hiljaisia taukoja.^{232, 233, 460} Osasyynä on todennäköisesti se, että edellä mainittu äskeisyyspainotteisuus sekä voimakkaiden näyteosuuksien korostuminen muistiin tallentuneissa (vastaavien melujen) mielikuvissa vaikuttavat äänekkyuden arviointiin. Toisin sanoen, altistettu ei ”integroi” äänekkyyttä sen laskenta-algoritmin (”kaavan”) mukaisesti, jota äänitasomittareissa käytetään.

Muistinvarainen äänekkyyys

Arviota aiemmin kuullun äänen äänekkyydestä *kutsutaan muistinvaraiseksi äänekkyydeksi* (engl. memory based loudness tai retrospective loudness) Muistinvarainen äänekkyyys on yleensä suurempi kuin hetkellisen (ja todellisen) äänekkyyden keskimääräinen arvo, jota muun muassa päivä- ja yöajan ekvivalenttitasojen on tarkoitus estimoida. Ihmiset pystyvät palauttamaan muistiinsa yllättävän hyvin sellaisten melutapahtumien (altistusten) äänekkyyden, jonka muistavat tapahtumana.²³⁴ Tätä muistin ominaisuutta on verrattu siihen, että monet muusikot pystyvät soittamaan kerran kuulemansa sekä ääntä tuottavalla soittimella (eli kun kuulevat palautteena soittimensa äänen) että soittimella (esim. pianon koskettimistolla), joka ei tuota ääntä.²³⁵

Pitkäaikaisen tai kauan sitten tapahtuneen altistuksen äänekkyyttä tutkittaessa (kysellessä) on syytä ottaa huomioon, että tavanomaisesta poikkeavat merkittävät asiat, esimerkiksi tavanomaista äänekkäämmiksi tai häiritsevimmiksi koetut melutapahtumat, säilyvät muistikuvissa painotetummin kuin tavanomaiset tapahtumat. Vähämerkitykselliset ja tavanomaiset kokemukset "väljähtyvät" näitä nopeammin muistista pois. Meluhaittojen tutkijoille on tuttua se, että melusta valittaneet esittävät mittauksia tehtäessä: "Nyt se on hiljaista. Mittaajan olisi pitänyt olla paikalla edellisellä viikolla, viime kuussa tai viime kesänä/talvena, jolloin melu oli todella voimakasta."⁴²³ Tällaiset käsitykset saattavat ainakin osittain johtua tiedostamatta tapahtuvasta muistikuvien merkittävyyden korostumisesta (ja esimerkiksi siitä, että muistiin painuneen kuulemistapahtuman aikana taustamelu oli alhaista, jolloin melu erottui tavallista selvemmin, mutta ei ollut tavallista voimakkaampaa).

Olettavasti edellä mainittuja tavanomaista paremmin muistissa pysyviä ja korostuvia ulkona olevien melulähteiden ääniä havaitaan enemmän ulkona kuin sisällä, mikä osaltaan saattaisi selittää sen, että hyvin usein asukkaiden arviot asuinympäristönsä meluhaitoista korreloivat paremmin ulkomelun kuin ko. melun tasoon asuntojen sisällä.

Ennakoitu äänekkyyys

Ottaessaan kantaa suunnitelmiin, joiden arvioidaan muuttavan asuinympäristön melua, ihmiset joutuvat muodostamaan mielikuvan tulevasta melutilanteesta (melun subjektiivisesta voimakkuudesta) ja meluvaikutuksista.

Tutkimukset viittaavat siihen, että ihmiset olettavat esimerkiksi tie- ja lentoliikenteen liikennemäärän lisäyksen kasvattavan äänekkyyttä (ja kiusallisuutta) paljon todellista enemmän.^{89, 357}

Sisä- ja ulkomelun äänekkyys ja niiden keskinäinen riippuvuus

Joudumme usein arvioimaan ulkoa sisään kuuluvan melun haittoja, esimerkiksi tietyn ulkomelun aiheuttamia unihäiriötä. Tällöin joudumme kysymään, kuinka validisti ja reliaabelisti sisämelun voimakkuus riippuu ulkomelusta?

On tavallista, että mitatut päiväajan ja koko vuorokauden sisämelutasot korreloivat hyvin huonosti vastaaviin mitattuihin ulkomelutasoihin.¹⁷ Syynä on muun muassa se, että asukkaat aiheuttavat omilla toimillaan ja toimenpiteillään ulkomelusta riippumatonta sisämelua. Kun ulkomelutasot ovat (riittävän) suuria, yöajan ulko- ja sisämelun välillä on usein selvä korrelaatio tiettyyn rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyyteen asti.⁵⁹⁶ Mitä alhaisempi ulkomelun taso ja/tai, mitä parempi ulkokuoren ääneneristävyys, sitä huommin sisämelun voimakkuus korreloi ulkomelun voimakkuuteen.

Saman äänitason omaavan sisä- ja ulkotilan melun äänekkyys ei välttämättä ole yhtä suuri. Esimerkiksi ulkoa sisään kuluviin äänien nousu- ja laskuajat, kestot ja spektrit muuttuvat sekä äänien “välittyessä” rakennuksen ulkokuoren kautta että sisällä tapahtuvan kaiunнан* vuoksi. Yleensä myös äänikentän diffuusius (äänien tulosuuntajakautuma) ja taustamelun suhteellinen osuus on erilainen ulkona ja sisällä. Kaikki mainitut tekijät vaikuttavat ulkoa sisään kuuluvan melun äänekkyteen.^{236, 237, 238} Ulko- ja sisätilojen äänitasoero ei yleensä vastaa tarkasti subjektiivista äänekkyystason eroa.²³⁹ Muu sisämelu saattaa peittää ulkoa kuuluvaan melua. Peitto muuttaa ulkoa kuuluvan melun äänekkyttä. Peiton vuoksi objektiiviset äänekkyysmittaukset saattavat antaa liian suuria ulkoa sisään kuuluvan melun äänekkyysarvioita ainakin L_N -tason ollessa alle 40 fonia.²³⁷

Näköyhteydellä – so. onko kuuntelupaikalta näköyhteys melun aiheuttajaan vai eikö ole – näyttäisi olevan vaikutusta altistettujen arvioihin ulko- ja sisämelun voimakkuudesta sekä rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyydestä.²⁴⁰ Syynä siihen, että visuaalisella ja audioinformaatiolla on yhteisiä vaikutuksia näyttäisi olevan se, että aivoissa on hermoroitoja ja -soluja, jotka ärsyntyvät sekä näkö- että kuulohavainnoista.^{241, 242}

Usean melun yhteensä aiheuttama äänekkyys

Koetilanteessa laboratoriossa pätee se, että arvioitaessa kahden tai useamman äänen kokonaisäänekkyttä, äänekkydet summautuvat. Esimerkiksi kahden yhtä äänekkään riittävästi eritaajuisen äänksen kokonaisäänekkyys on kaksinkertainen verrattuna äänekkyteen yksin esitettäessä. Fletcher ja Munson²⁴³ totesivat kokeellisesti tämän jo vuonna 1933.

* Kaiunnan syynä on edestakaiset heijastukset sekä huonetilan ja rakenteiden ominaismuotojen herääminen resonoivasti. Kaiunnan aikana eritaajuiset äänet vaimentuvat eri nopeudella, mikä myös voi vaikuttaa äänekkyteen.

Myöhemmin on opittu, että kahden tai useamman samanaikaisen äänen äänekkyyden subjektiivinen arviointi voi tapahtua – tilanteesta ja kuulijasta riippuen – joko yksittäin tai kaikkien äänien kokonaisäänekkytenä. Silloin kun äänet ovat peräisin eri suunnissa olevista äänilähteistä, joiden ajalliset ja spektraaliset ominaisuudet ovat erilaisia, kuulija ei yleensä tee automaattisesti arviota kokonaisäänekkydestä, vaan huomioi ja arvioi lähteiden äänet erillisinä ääniympäristön osina. Näiden osien aiheuttamia mielikuvia kutsutaan *auditiivisiksi (äänisignaali)virroiksi* (engl. auditory streams).

Tapauksissa, joissa kuulija arvioi usean samanaikaisen äänen kokonaisäänekkyden, pääsääntönä voidaan pitää sitä, että uuden melun lisääminen aiempien joukkoon kasvattaa kokonaisäänekkyttä. Kahden samanaikaisesti esiintyvän, spektriltään ja ajalliselta vaihtelultaan erilaisen melun yhteinen äänekkyyden ei kuitenkaan ole niiden äänekkyyksien summa, vaan useimmiten jonkin verran pienempi. Summaaäänekkyys voi olla kuitenkin suurempikin kuin A-äänitason kasvusta voi päätellä.²³⁹ Poikkeuksena ovat tapaukset, joissa toinen meluista peittää, vähentää, äänekkäämmän melun kapeakaistaisuutta tai impulssimaisuutta merkittävästi. Tällaisessa tapauksessa mittaustulokseen tehtävän kapeakaistaisuus- tai impulssimaisuuskorjaustakin on syytä pienentää tai jättää ne tekemättä. Ainakin silloin, kun estimoidaan melujen yhteensä aiheuttamaa äänekkyyttä.

Vaikka arvioitu summaaäänekkyys vastaisi todellista ”tekniestä” äänekkyyttä, niin hiljaisemman melun äänekkyyden saatetaan arvioida todellista alhaisemmaksi sen vuoksi, että voimakkaampi melu peittää (vähentää) sen äänekkyyttä.

Hiljaisten, kuulokynnystä lähellä olevien äänien äänekkyyden

Sisätilojen (asuntojen) melut ovat yleensä melko hiljaisia. Terveysvalvonnan tutkimusten mukaan asuntojen sisämelujen äänekkyyden on tyypillisesti alle yhden sonin.* Lisäksi useimmiten ainakin osa spektrin komponenteista on lähellä kuulokynnystä tai jopa sen alle.

Psykoakustisissa mittauksissa pienintä havaittavissa olevaa äänen ominaisuutta, esimerkiksi hiljaisimman kuultavissa olevan äänikkeen äänenpainetasoa, kutsutaan kynnysarvoksi tai kynnystasoksi. Yleensä *kynnysarvo* määritellään siksi ärsyksen voimakkuuden (”intensiteetin”†) arvoksi, jonka koehenkilö havaitsee ”on kuultavissa/ei ole kuultavissa”-testeissä oikein – tutkimuksesta ja tutkijasta riippuen – 50 ...80 %:n todennäköisyydellä.^{244, 245, 246, 247, 248}

* 1 sonin äänekkyyden on määritelty äänekkyydeksi, jonka 1000 Hz taajuinen 40 dB äänenpainetasolla korvaan kohdistuva äänes aiheuttaa. Sen äänekkyydestä on 40 fonia.

† Psykoakustiikassa ja audiologiassa käsite ”äänen intensiteetti” tarkoittaa äänenpainetasoon verrannollista voimakkuutta, ei äänen todellista intensiteettiä (I), joka on äänenpaineen (p) ja hiukkassopeuden (v) tulo kertaa niiden välisen vaihekulman (φ) kosini eli $I = pv \cos \phi$ (skalaarimuodossa).

ISO 389-7 standardissa²⁴⁹ on esitetty kansainvälisesti standardoitu hyväkuuloisten henkilöiden kuulokynnys. ISO 7029 standardissa²⁶² on puolestaan esitetty, miten normaalikuuloisten kuulokyky vaihtelee ikäryhmittäin eri sukupuolilla. ISO 226 standardissa¹⁵² on esitetty vakioäänekkyyskäyrästä ja hyväkuuloisten ihmisten keskimääräinen kuulokynnys. ISO 389 ja 226 standardeja ollaan uusimassa.

Lähellä kuulokynnystä olevien äänien äänekkyyys (ja kiusallisuus) ei riipu signaalin spektraalisista ja ajallisista ominaisuuksista samalla tapaa kuin tapahtuu voimakkaammilla, kuulokynnyksen vähintään 30...35 dB ylittävillä äänillä.^{250, 251, 252} Lähellä kuulokynnystä eritaajuisten komponenttien äänekkyyden summautuminen tapahtuu kuten kriittisä kaistoja olisi vain yksi. Esimerkkinä voidaan mainita, että 20 dB ja sitä hiljaisemmilla äänillä vakiotasoisien kaistarajoitetun valkoisen kohinan (keskitaajuus 1 kHz) äänekkyyys(taso) ei kasva kaistaleveyden ylittäessä kriittisen kaistan, vaan jopa hieman (max. 1...1,5 fonia) alenee, kun kaistaleveys kasvaa suureksi.^{253, 254, 255} Toisena esimerkkinä kuitenkin se, että hiljaisessa melussa kapeakaistaiset komponentit, jotka eivät lisää äänekkyyttä merkittävästi, voivat olla kuitenkin kiusallisuutta lisääviä.

Äänenpainetasen ollessa yli 35...40 dB äänksen äänekkyyys, N [soni], riippuu sen äänenpainetasosta Stevensin²⁵⁶ kaavan mukaan (vrt. kaava (3))

$$(11a) \quad N = kp^{0,6}$$

jossa p on äänenpaine [μPa] ja k taajuudesta riippuva skaalauskerroin [soni/Pa]. Kaava (11a) antaa alle 40 dB äänenpainetasoilla liian suuria äänekkyyden arvoja. Syy on se, että kuuloaisti ei kompressoisi signaalia yhtä voimakkaasti tällä alueella, kuin yli 40 dB-alueella. Kirjallisuudesta löytyy seuraavia kaavoja, jotka pätevät noin 10 dB äänenpainetasosta lähtien

$$(11b) \quad N = k_1(p - p_{th})^{\gamma_1}$$

$$(11c) \quad N = k_2(p^{\gamma_2} - p_{th}^{\gamma_2})$$

$$(11d) \quad N = k_3\left(\frac{p - p_{th}}{p_{th}}\right)^{0,6} \approx k_3\sqrt[3]{\left(\frac{p - p_{th}}{p_{th}}\right)^2}$$

joissa p_{th} on efektiivistä kuulokynnystä vastaava äänenpaine [μPa] ja k_1 , k_2 ja k_3 taajuudesta riippuvia skaalaus- tai siirtovakioita. Eksponentit $\gamma_1 \approx 0,6$ ja $\gamma_2 \approx 0,54$.^{257, 258, 252, 252} 1 kHz äänekselle p_{th} on noin 45 μPa . Kaavojen (11b) – (11d) mukaan hiljaisten äänten äänekkyyys riippuu henkilön kuulokynnyksestä. Sama ääni (paine p) tuottaa sitä suuremman äänekkyyden, mitä parempi kuulo henkilöllä on.

Saman aikaiset muut riittävän voimakkaat äänet voivat peittää tarkasteltavana olevaa ääntä tai sen komponenttia (jotakin spektraalista tai tempo-

raalista osaa siitä). Peitto voi olla niin voimakasta, että tarkasteltavaa ääntä ei kuulla lainkaan. Kun peitto on osittainen, eli kun tarkasteltava äänes tai tunnistettavissa oleva äänikomponentti ei peity täysin, vaan on kuultavissa, sen äänekkyys on alhaisempi kuin esitettäessä sama äänes yksinään.²⁵⁹ Ihmisellä on melko selektiivisesti kyky erottaa ääneksi äänekkyys sitä (osittain) peittävästä kohinasta.^{260, 267}

Kuten edellä todettiin, hiljaisten äänien havaittavuus ja äänekkyys riippuvat henkilön kuulokyvystä. Hiljaisten äänien havaittavuutta, äänekkyyttä ja kiusallisuutta arvioitaessa on otettava huomioon myös se, että kuulokynnys määritellään siksi äänesten tasoksi, jolla kuulija havaitsee äänen tietyllä todennäköisyydellä. Raja-arvona on esimerkiksi ISO 226-standardissa 50 %:n havaitsemistodennäköisyys.* 100 %:n havaitsemistodennäköisyys saavutetaan tyypillisesti vasta kun äänesten taso ylittää henkilökohtaisen kuulokynnyksen 4...10 dB:llä.²⁴⁵ Hyvin lähellä kuulokynnystä äänesyhdistelmään kuuluvan äänoksen havaitsemistodennäköisyys ja äänekkyys ovat suurempia kuin silloin, kun sama äänes esitetään yksinään.²⁵²

Hyväkuuloisiksi luokiteltujen ihmisten yksilöllinen kuulokynnys vaihtelee noin $\pm 8...11$ dB standardoituun (ISO 389-7, ISO 7029) kuulokynnykseen nähden.^{261, 262, 236, 263, 264} Vaihtelu on huomattavasti tätä suurempaa, jos otetaan huomioon, että osalla ihmisiä kuulokyky on alentunut ikä- tai meluhuonokuuloisuuden vuoksi.²⁶⁵ Lisäksi henkilökohtaisissa kuulokynnyksissä esiintyy suuria, jopa 10...15 dB, vaihteluita, herkkiä ja epäherkkiä taajuuksia, melko pienten taajuuserojen sisällä.^{266, 263, 637} Herkkien ja epäherkkien taajuuksien kuulokynnys riippuu alle 0,5 s pituisilla signaaleilla signaalin kestosta.²⁶⁶

Henkilökohtaisen kuulokyvyn suuren vaihtelun vuoksi ihmisten kokemaa saman (hiljaisen) melun äänekkyys voi vaihdella melko paljon.²⁶⁷ Kuvassa 7 on tästä esimerkki. Osin kuulokykyeroista, osin muista tekijöistä johtuen, henkilöiden tavanomaisissa kuunteluoloissa (luokkahuone, auditorio, olohuone) arvioima (suhteellinen) äänekkyys voi vaihdella melko paljon. Arvioiden keskiarvo noudattaa kuitenkin esimerkiksi 1000 Hz ääneksellä 40 dB:tä suuremmilla äänenpainetasoilla hyvin standardoituja arvoja.²⁶⁸

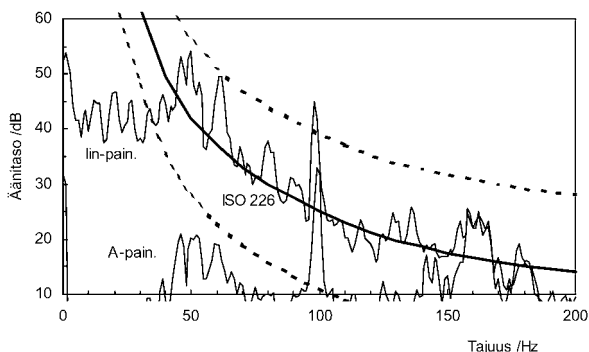
Kuvassa 7 on esitetty erään melun [A-taso noin 35 dB(A)] painottamaton (lin-pain.) ja A-painotettu kapeakaistaspektri ($\Delta f = 1$ Hz) sekä ISO 226 mukainen kaksikorvaisen kuuntelun kuulokynnys (paksu viiva) ja sen vaihtelualue (katkoviivat ± 11 dB) normaalikuuloisiksi luokitelluilla ihmisillä. Melussa on äänemäiseltä ”vaikuttavia” komponentteja noin 50, 60 ja 100 Hz taajuudella.

Kuvassa 7 lähes koko spektri (lin-painotus) jää keskimääräisen kuulokynnyksen yläpuolelle. Kynnyksen yläpuolelle jäävät taajuuskomponentit vaikuttavat äänekkyYTEEN[†] ja hyväkuuloiset erottavat 100 Hz piikin matala-

* Eri mittausmenetelmät tähtävät, tai johtavat, kynnyksen erilaisiin havaitsemistodennäköisyyksiin.

† Kynnyksen alapuolelle jäävät komponentit saattavat myös vaikuttaa kokonaisäänekkyYTEEN ja piikkien havaitsemiseen, mutta todennäköisesti äänekkyYTEEN ja erottumista alentavasti (äänekkyuden inhibitio).

taajuusena ulisevana äänenä äänekkyuden adaptaatiosta huolimatta. Ne ihmiset, joiden kuulokyky on vaihtelun alueen ylärajalla, kokevat melun melko hiljaisena ja 100 Hz komponentti ei todennäköisesti erotu niin selvästi, että mittaustulokseen olisi heidän kannaltaan tarpeen tehdä kapeakaistaisuuskorjaus.



Kuva 7: Erään melun spektrin alapää ja ISO 226 mukainen kuulokynnys (ehyellä viivalta esitetty kaareva käyrä) sekä sen vaihtelualue (katkoviivakäyrien väliin jäävä alue) normaalikuuloisilla.

Kuva 7 kertoo myös A-taajuuspainotuksen tarkoituksen. A-painotetussa spektrissä (alempi spektri) kunkin taajuuskomponentin taso on suurin piirtein samansuuruinen kuin, millä spektrin painottoman taso ylittää kuulokynnyksen.

Useimpien sisämelujen voimakkuus on alueella, jossa kuulosolujen aktiivinen toiminta vahvistaa Basilarinkalvon liikelaajuutta ja tätä kautta kuulua äänen äänekkyyttä (äänen voimakkuutta). Terveessä korvassa aktiivista vahvistusta tapahtuu äänille, joiden voimakkuus ylittää korkeintaan 80 dB:llä kuulokynnyksen. Nisäkkäillä vahvistus on enimmillään 40...80 dB.²⁶⁹ Eri mittausten menetelmillä on saatu erilaisia arvoja. Vahvistus on suurempi hiljaisille äänille kuin voimakkailla. 20 dB:llä kuulokynnyksen ylittävän äänen vahvistus on ihmisillä 40 dB luokkaa.²⁷⁰ Hiljaisten lyhyiden äänien äänekkyys kasvaa aktiivisen vahvistuksen vuoksi keston pidentyessä nopeammin (jyrkemmin) kuin voimakkaiden äänien.¹⁹²

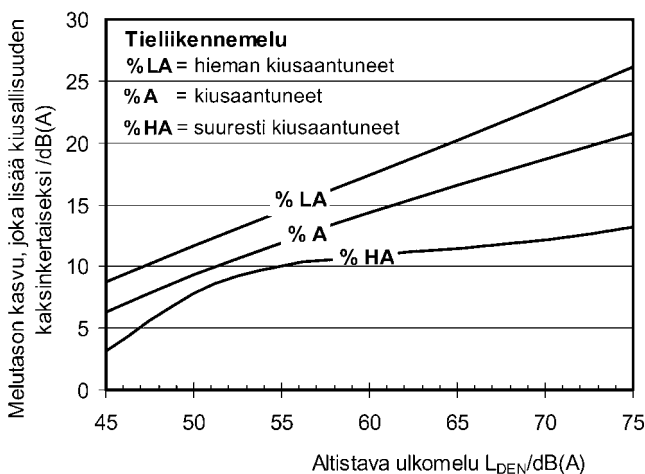
Moniin kuulovammoihin, esimerkiksi meluhuonokuuloisuuteen, liittyy Basilarin kalvolla olevien hiussolujen tuhoutuminen, minkä johdosta aktiivinen vahvistus tuhoutuneiden solujen alueella (taajuuksilla) alenee tai estyy kokonaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mitä hiljaisempi ääni on, sitä enemmän sen äänekkyys on alentunut normaaliarvoihin verrattuna sillä taajuusalueella, joiden kuulemiseen tuhoutuneet solut vaikuttivat.²⁷¹

Äänekkyys melun kiusallisuuden mittana

Hetkellinen äänekkyys kaksinkertaistuu äänenpainetason noustessa noin 10 dB(A) ja suurin piirtein puoliintuu, kun taso laskee 10 dB(A). Jos meluvai-
kus riippuisi suoraan äänekkydestä, tulisi äänitason muutoksen olla mai-
nittu 10 dB(A), jotta vaikutus kaksinkertaistuisi tai puoliintuisi. Oletetaan,
että pitkän ajan keskiarvotasot, esimerkiksi $L_{DEN, vuosi}$, kuvaavat koko vuoden
keskimääräistä äänekkyyttä.

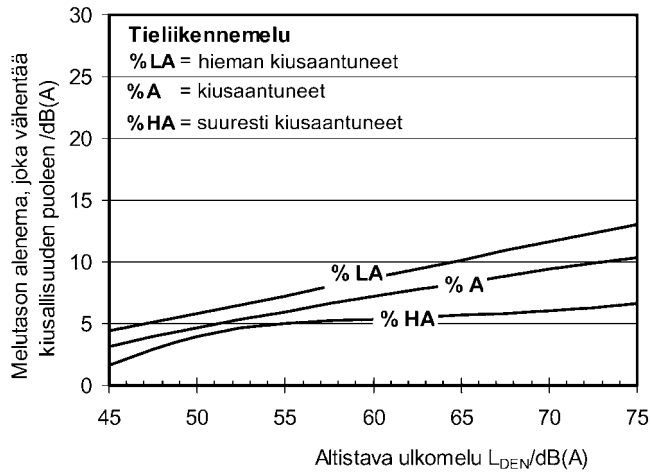
Kuvassa 8 on esitetty EU:n ympäristömeludirektiivin valmistelussa mu-
kana olleen asiantuntijatyöryhmän ”WG2, Vaikutukset” ehdottamien tie-
liikennemelun kiusallisuusvasteiden²⁷², %LA, %A ja %HA, perusteella las-
kettuna* kuinka paljon L_{DEN} -tason tulisi kasvaa, jotta melun kiusalliseksi
kokevien osuus kaksinkertaistuisi eri luokissa. Kuvassa 9 on esitetty, paljon-
ko tason tulisi laskea, jotta melusta kiusaantuneiden osuus puoliintuisi.

Kuvista 8 ja 9 voidaan todeta, että suuresti kiusaantuneiden määrä kas-
vaa (mutta ei pienene) ainoastaan 55 dB(A) ympäristössä edellä mainitun
äänekkyuden kaksinkertaistumisen ”säännön” (10 dB(A)) mukaan. Kiusalli-
suus ei käyrien mukaan riipu yksinkertaisella tavalla pitkän ajan keskimääräi-
sestä äänekkydestä (so. L_{DEN} -tasosta), eikä kiusallisuuden muutokset yksin-
kertaisella tavalla keskimääräisen äänekkyuden muutoksista. Toinen selitys
on se, että nykyisellä tavalla määritetty $L_{DEN, vuosi}$ ei kuvaa sitä keskimääräistä
äänekkyyttä, jonka perusteella arvio kiusallisuudesta tehdään.

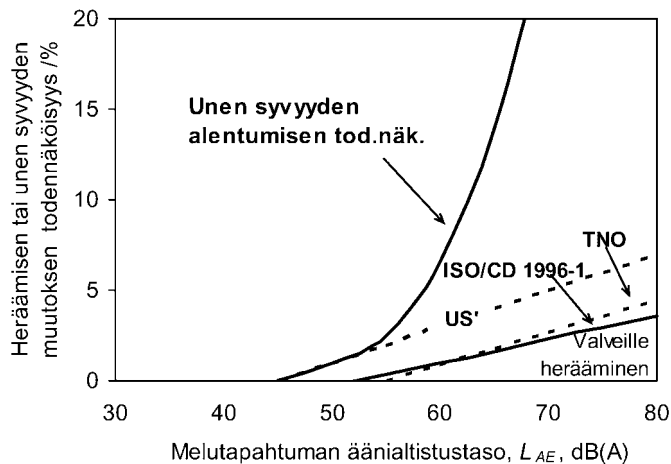


Kuva 8: Pitkän ajan tieliikenteen ulkomelun L_{DEN} -tason kasvu, joka tarvitaan melusta kiu-
saantuneiden osuuden kaksinkertaistumiseen eri kiusallisuusluokissa lähtötason
ollessa x-akselilla.

* Laskenta perustuu kiusallisuusvasteiden paikallisiin derivaattoihin x-akselilla lukuina sittyis-
sä L_{DEN} -tasoissa, joka on myös ollut muutoksen lähtöarvo.



Kuva 9: Pitkän ajan tieliikenteen ulkomelun L_{DEN} -tason alenema, joka tarvitaan melusta kiusaantuneiden osuuden puolittamiseen eri kiusallisuusluokissa lähtötason ollessa x-akselilla.



Kuva 10: Unen syvyyden alentumisen ja valveille heräämisen todennäköisyyden riippuvuus melutapahtuman L_{AE} -tasosta verrattuna tilanteeseen, jossa vaikutus, lähtien 45 dB(A)-tasosta, kaksinkertaistuisi tason kasvaessa 10 dB(A).^{589, 587}

Kuvassa 10 on tarkasteltu, unihäiriövasteiden riippuvuutta melutapahtuman äänialtistustasosta. Kuvaan on lisätty vastekäyrä US', joka kuvaa tapausta, jossa unen syvyyden alentumisen todennäköisyys kasvaisi kaksinkertaiseksi, kun L_{AE} -taso kasvaa 10 dB(A):lla. Voimme päätellä, että unen syvyyden alentuminen kasvaa L_{AE} -tason kasvaessa paljon nopeammin kuin melutapahtuman äänekkyyys, mutta heräämistodennäköisyys kasvaa suu-

rin piirtein kaksinkertaiseksi L_{AE} -tason kasvaessa 10 dB(A) eli äänekkyiden (noin) kaksinkertaistuessa.

Näyttää siltä, että ainakin kun on kyse ennakoidusta äänekkydestä (ja kiusallisuudesta), ihmisten arviot äänekkyiden kasvusta perustuvat enemmän melutapahtumien (ohiajojen, ylilentojen) määrän kasvuun kuin melutapahtumien voimakkuuden (esimerkiksi lentoreitin etäisyyden pienenemisen aiheuttamaan) muutokseen.⁸⁹

Usean melun äänekkyiden yhteisvaikutus kokonaishaitallisuuden kannalta

Vaikka kuulija arvioisikin samanaikaisesti esiintyvien melujen äänekkyiden lähde- tai aiheuttajakohtaisesti, niin äänien peittovaikutus, esimerkiksi se, kuinka ne vaikeuttavat radion kuuntelua, riippuu niiden yhteensä tuottamasta peitosta. Jos melut esiintyvät eri aikoina, niin haitallisuutta on syytä arvioida peittotapahtumien kokonaismäärän ja -keston perusteella. Sama koskee melujen haitallisuutta unihäiriöiden kannalta. Siitä huolimatta, että kuulija arvioisi äänekkyiden vain melulaji-, lähde- tai aiheuttajakohtaisesti, ovat unihäiriöiden esiintyvyys ja vaikeusaste terveyshaittojen kannalta katsottuna kumuloituneita eli yhteisvaikutuksellisia muuttujia.

Oletus tai väite siitä, että samanaikaisesti esiintyvien eri melulajien äänekkyudet eivät kumuloidu elinympäristön kokonaisäänekkyyttä arvioitaessa, sisältää myös oletuksen, että yhden melulajin äänekkyiden alentaminen (meluntorjunta) ei välttämättä vaikuta arvioituun kokonaisäänekkyteen.*

Hyvin hiljaisten, kuulokynnyksen seutuvilla olevien äänen summautuminen saattaa poiketa kuulokynnyksen selvästi ylittävien äänien summautumisesta. Esimerkiksi, jos kahdella eri äänellä on sellainen komponentti tai komponentteja saman kriittisen kaistan sisällä, jotka eivät yksin esitettyinä ole kuultavissa, voi kumpikin ääni olla kuultavissa (erotettavissa) silloin, kun ne esitetään saman aikaisesti.²⁴⁷

Äänekkyiden ja meluhaittojen ajallisista kausaalisuhteista

Edellisissä luvuissa todettiin, että meluallistusten jälkeisissä arvioissa on tyypillistä, että altistuksen aikainen äänekkyys muistetaan merkittävästi todellista keskimääräistä äänekkyyttä suuremmaksi. Joudumme kysymään: Pitääkö melun voimakkuuden[†] mittana käyttää altistetun jälkikäteisarvioita mahdollisimman hyvin vastaavaa vai hetkellistä (keskimääräistä) äänekkyyt-

* Jos äänekkyudet eivät kumuloidu ja ei tiedetä, millä perustein kuulija arvioi kokonaisäänekkyiden (sitä kysyttäessä), niin ei myöskään ole ennalta varmuutta siitä, miten yhden melun vaimentaminen vaikuttaa kokonaisäänekkyteen.

† Äänitasomittarin antaman tuloksen on tarkoitus vasta subjektiivista äänekkyyttä.

tä vastaava melutasoa? Toisin sanoen, pitäisikö mittaustulokseen lisätä jokin korjaus, vai ei, sen vuoksi, että muistinvarainen äänekkyys on yleensä suurempi kuin hetkellisen äänekyyden keskimääräinen arvo?

Jos lähdemme siitä, että melun ja meluhaitan (reaktion) välillä tulee olla selvä ja mahdollisimman yksikäsitteinen syy-seurausyhteys, ajallisesti myöhemmin tapahtuvaa meluallistusta ei voida pitää altistusta edeltävien haittojen syynä. Käytännön esimerkki: Aamulla klo 6.10 – 6.12 esiintyvän lentomelun ei voida katsoa vaikuttavan sitä edeltävän ajan uneen.

Arvioitaessa mittaus- tai laskentatulosten perusteella sellaista meluhaittaa, joka riippuu pääosin vain melun todellisesta tasosta (äänekyydestä), on aiheellista ottaa huomioon haitan ja meluallistuksen välinen ajallinen kausaalisuus. Tällaisia, vain hetkellisestä melutasosta riippuvia haittoja ovat uni-häiriöiden lisäksi mm. melun aiheuttama puheen ja erilaisten toimintojen häirintä. Näitä arvioitaessa on perustellumpaa käyttää todellista äänekkyyttä kuin muistinvaraista äänekkyyttä estimoivaa äänitasoa.

Meluisuus

Vaikka jokapäiväisessä kielenkäytössä erotamme meluisuuden äänekkyyydestä, niin tutkijayhteisössä ei ole täyttä yksimielisyyttä siitä, mitä käsitteellä ”meluisuus” ymmärretään ja, mitä sen pitäisi mitata. Erimielisyyksistä huolimatta yksi meluisuuden mittausmenetelmä on standardoitu ja uusina ollaan kehittämässä. Aikaisemmin monet tutkijat katsoivat Kryterin^{273, 296} tavoin meluisuuden sisältävän sellaisia subjektiiviseen arviointiin perustuvia ominaisuuksia, jotka nykyisin katsotaan kuuluvan kiusallisuus-käsitteeseen.

Meluisuus assosioituu läheisesti äänekkyYTEEN, mutta yhtä äänekkäät tai saman L_{Aeq} -tason omaavat äänet voivat olla meluisuudeltaan erilaisia (tai yhtäläisiä).^{214, 215} Meluisuutta voidaan pitää itsenäisenä äänen ominaisuutena sillä perusteella, että on suuri joukko ääniä, joilla koehenkilöiden asettama äänien meluisuusjärjestys poikkeaa systemaattisesti samojen äänien äänekkyysjärjestyksestä.^{274, 275}

Meluisuus tai subjektiivinen meluisuus (engl. perceived noisiness) on ”kryteriläisen”^{276, 273, 296} määrittelyn mukaan äänen ”ei-toivottavuuden” ja pelästyttävyyden mitta. Ei-toivottavuuden katsotaan voivan aiheutua kahdesta hyvin erilaisesta syystä. Ensimmäinen syy on se, että ääni sisältää sellaista informaatiota, jonka kuulija on tottunut yhdistämään johonkin epämiellyttäväksi kokemaansa ko. äänilähteen ei-akustiseen ominaisuuteen. Toinen syy on ”tungettelevuus” (engl. intrusiveness), jolla tarkoitetaan sitä, että ääni ikään kuin väkisin tunkeutuu kuulijan tietoisuuteen. Pelästyttävyys puolestaan liittyy läheisesti ns. säpsähdysreaktioon. Säpsähdysreaktio tai -vaste ilmenee äkillisen voimakkaan äänen kuulijassaan aiheuttamana tahdottomana säpsähdysliikkeenä ja pakonomaisena tarpeena tunnistaa äänen tulosuunta ja äänen syy. Kryterin käyttämän semantiikan mukaan meluisuus voidaan

ymmärtää havainnoksi (engl. sensation) ja kiusallisuus havainnon aiheuttamaksi tunneperäiseksi vaikutelmaksi.

Viimeaikoina meluisuus on määritelty äänen itsensä aiheuttamaksi epämiellyttävyyden vaikutelmaksi tai akustiseksi ominaisuudeksi, joka huonontaa äänen laatua.^{277, 278} Epämiellyttävyyden aiheuttajia ovat mm. äänen *kimeys*^{279, 280, 106} eli terävyys* (engl. sharpness), *karheus*^{281, 282, 283, 284} (engl. roughness) ja sellainen matalataajuisten fluktuaatioon liittyvä tietyn tyyppinen *kumina*²⁸⁵, jota ei lasketa varsinaiseksi karheudeksi.²⁸⁶

Yleiskielessä meluisuudella tarkoitetaan myös hiljaisuuden vastakohtaa. Hiljainen ei kuitenkaan ole välttämättä "ei lainkaan meluisan" synonyymi eikä "meluisan" vastakohta, mistä syystä esimerkiksi kyselytutkimuksen asteikko "ei lainkaan meluisaa...äärimmäisen meluisaa" ei välttämättä ole hyvä mittari hiljaisuudelle. Kiusallisuutta ja häiritsevyyttä mittaavat muuttujat (asteikot) ovat yleensä meluisuuttakin huonompia hiljaisuuden mittareita.

Meluisuuden riippuvuus laajakaistaisen äänen spektriominaisuuksista on samankaltainen kuin äänekkyyden riippuvuus. Äänemäiset komponentit vaikuttavat useimmiten jonkin verran voimakkaammin äänen melisuuteen kuin äänekkyyteen, samoin impulssimaiset komponentit. Lentomelun melisuudelle on esitetty standardoitu objektiivinen mittaumenetelmä.¹¹⁵ Melisuuden yksikkö on Noy. ISO-standardin Noy-käyrille löytyy matemaattiset likiarvokaavat.²⁸⁷

Melisuudella ei ole niin selvää stabiloitumisaikaa kuin äänekkyydellä. Laboratoriokokeissa on todettu, että monien lyhytkestoisten äänien melisuus ei eroa merkittävästi niiden äänekkyydestä, mutta keston pidentyessä melisuus yleensä kasvaa nopeammin kuin äänekkyyks.²⁷⁵ Melisuuden stabiloitumisaika on yleensä huomattavasti pitempi kuin äänekkyyden stabiloitumisaika.^{288, 103} Äänen keston kasvaessa muutamista sekunneista muutama minuutteihin melisuus voi kasvaa logaritmisesti, vaikka äänekkyyks ei kasva lainkaan.²⁸⁹ Sen jälkeen melisuuden kasvu keston funktiona yleensä hidastuu.

Lyhyiden signaaleiden keston 10-kertaistuminen kasvattaa tyypillisesti melisuutta yhtä paljon kuin äänitason kasvu 7...15 dB:llä. Molemmat lisäävät melisuuden noin kaksinkertaiseksi. Melisuus riippuu huomattavasti enemmän äänen ajallisen vaihtelun yksityiskohdista – kuten signaalin nousu- ja laskuajasta sekä fluktuaatiosta – kuin äänekkyyks. Eräässä Japanilaisessa tutkimuksessa⁴⁶⁵ todettiin, että impulssisarjojen melisuuden stabiloitumisaika oli 3,5 – 5 s. Tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että melisuus korreloi parhaiten L_{AE} -tasoon, jonka aikapainotus oli mainittu 3,5 – 5 s.

Melulajista riippumatta alle 45...50 dB(A) tasoiset sisämelut näytetään arvioitavan radion kuuntelua ja TV:n katselua häiritsevänä tekijänä "ei lainkaan meluisaksi".²⁹⁰

Yleismerkityksessä käsite "melisuus" assosioidaan melulähteiden ominaisuudeksi, kun sen vastakohta, hiljaisuus (engl. quietness), näytetään

* kimeys on eräs äänen värin mitta. Kimeyden vastakohta on kumeus. Kimeys (sharpness) on sitä suurempi, mitä enemmän spektrin energia on keskittynyt korkeisiin ääniin.

assosioitavan vapaa-ajan toimintoihin, uneen, yöaikaan ja sunnuntaipäiviin.²⁹¹ Eriäinen assosioituminen voidaan tulkita siten, että henkilöillä on joko assosioita vastaavaa ympäristöön kohdistuvaa kokemusperäistä tietoa ja/tai tietoa vastaavia odotuksia. Tietojen ja odotusten voimakkuus voi vaikuttaa siihen, miten ympäristön meluisuutta ja hiljaisuutta arvioidaan.

Meluisuuden merkitys äänen karakterisoinnissa on viime vuosina vähentynyt samalla, kun kiusallisuuden merkitys on kasvanut. Nykyisin meluisuus käsitetään yhä useammin vain äänen ominaisuudeksi joka välittää, ”meditoi”, äänekkyyttä kiusallisuudeksi.

Kiusallisuus ja häiritsevyys

Melun aiheuttamat elämykselliset haittavaikutukset on syytä jakaa kahteen luokkaan: I) tehtävistä tai toiminnoista suoriutumisen vaikeutuminen ja II) melun aiheuttamat kielteiset elämykselliset kokemukset. Melu voi aiheuttaa enemmän tai vähemmän kielteisiä elämyksellisiä kokemuksia silloinkin, kun se *ei häiritse* mitenkään tehtävistä tai toiminnoista suoriutumista tai jopa silloinkin, kun melu helpottaa niistä suoriutumista tai parantaa suoriutumistulosta. Melun aiheuttamaa elämyksellistä kokemusta ja sen voimakkuutta kuvaavaa ja mittaavaa muuttujaa kutsutaan *kiusallisuudeksi* etenkin silloin, kun halutaan korostaa, että kiusallisuus (engl. annoyance, saks. Lästigkeit tai Belästigung, norj. støjplage) ja häiritsevyys (engl. disturbance, saks. Störung, norj. forstyrrelse) ovat eri käsitteitä tai eri meluvasteita.²⁹²

Edellä on todettu, että kiusallisuus ja häiritsevyys ovat melun aiheuttamia reaktioita tai vaikutuksia. On kuitenkin tutkijoita, jotka painottavat, että melu ei ole häiritsevyyden eikä kiusallisuuden yksikäsitteinen syy, vaan ainoastaan tekijä tai olosuhde, joka mahdollistaa kyseisen reaktion.²⁹³

Käsite ”häiritsevyys” tai ”kiusallisuus” on mainittu monien maiden lainsäädännössä melun haitallisuuden mitaksi tai kriteeriksi. Monesti säädöksissä käytetään myös paljon yleisempiä haitta-käsitteitä, kuten Suomen naapurussuhdelaisissa käsitettä ”kohtuuton rasitus”. Käsitteiden juridinen merkitys – tai merkitys juristille (so. miten esimerkiksi tuomari tai lautamies sen tulkitsee) – saattaa poiketa suurestikin siitä, mitä esimerkiksi psykoakustikot tai sosiologit niillä ymmärtävät. Joillekin käsitteille ei ole tiedemaailmassa sovittua mittaa ja mittaustapaa lainkaan. Tällainen haitan mitta on esimerkiksi edellä mainittu kohtuuton rasitus.

Mainittakoon, että EU:n ympäristömeludirektiivin englanninkielisessä versiossa meluvaikutusten pääkriteeri on annoyance ja saksalaisessa Belästigung, tanskalaisessa gene, mutta ruotsalaisessa störning. Unihäiriötä mittaavat vasteet ovat samassa kielijärjestyksessä: sleep disturbance, Schlafstörung, svønforstyrrelse, stömnstörning. Ruotsinkielessä ei ole konnotatiivisesti hyviä erotussanoja englannin käsitteille annoyance ja disturbance.

Kiusallisuus

Kuten jo aiemmin on todettu, käsitettä *melun kiusallisuus* (engl. annoyance) ja sen erikielisiä vastineita käytetään kirjallisuudessa monessa merkityksessä.^{294, 295, 296, 297, 298, 299, 329} Näistä mainittakoon:

- Päämerkitys nykyisin: kyselytutkimuksin (yhdenmukaisia asteikkoja ja mitausmenetelmiä käyttäen) mitattu ympäristömelun kielteisyyden väestövaste, eli suuren joukon keskimääräinen vaikutelma tai arvio asuinympäristön melun kielteisistä tai haitallisista ominaisuuksista tahi laadusta (engl. annoyance, community response),
- Kuulijan, altistetun, henkilökohtainen havainto, vaikutelma tai arvio melun kielteisiä tai haitallisia elämyksellisiä vaikutuksia aiheuttavasta voimakkuudesta tai asteesta, so. melun tai äänen ominaisuus ja/tai niiden perusteella tehty arvio [vaikutelmaan tai arvioon ei ole tarkoitus sisällyttää arviota siitä, miten melu vaikeuttaa tehtävistä ja toiminnoista suoriutumista].
- Psykoakustisen vaikutusavaruuden muuttuja, joka kuvaa vaikutuksen voimakkuutta tai astetta,
- Melun häiritsevyyden synonyymi, häiritsevyyden alalaji tai häiritsevyyteen vaikuttava tekijä,*
- Muuttuja tietyllä asteikolla eli mittari, joka mittaa edellä mainitun vaikutelman tilastollista riippuvuutta asuinympäristön melun voimakkuutta estimoivasta melutasosta (so. melun voimakkuuden indikaattorista),
- Melun ominaisuuksia kuvaava suure (engl. unbiased annoyance), jonka avulla voidaan objektiivisesti mitata se osuus subjektiivisesta kiusallisuudesta, joka riippuu melun ominaisuuksista ja “häirintävoimasta” erilaisissa altistustilanteissa.
- Elinkustannusindeksin tapainen eri vaikutusten – mukaan lukien coping-vasteet – tai niitä mittaavien muuttujien, painotettu summa.³⁰⁰

Käsitemaailman sekavuutta lisää vielä se, että kiusallisuus jaetaan usein kahteen alalajiin: a) *epäspesifinen kiusallisuus* (engl. non-specific annoyance tai general annoyance) eli asuinympäristön kokonaismelun (melun yleensä) aiheuttama kiusallisuus tai melun yleensä aiheuttama kielteinen asennoituminen (melulähteeseen tai sen aiheuttajaan) ja b) *spesifinen kiusallisuus* (engl. specific annoyance) eli tietyn melun tیا melulajin tietyssä altistustilanteessa tai -oloissa aiheuttama kiusallisuus tai myös häiritsevyy.^{301, 302} *Piileväksi kiusallisuudeksi* (engl. hidden private annoyance) kutsutaan kiusallisuutta, joka ei manifestoidu valituksiksi tai muiksi toimenpiteiksi melua tai sen aiheuttajaa vastaan.³⁰³ Käsitteiden sekavuutta lisää myös se, että kiusallisuutta on mitattu, ja mitataan, kymmenillä eri tavoilla.³⁰⁴

* melun häiritsevyyden alalajeja: unenhäirintä, puheen tai kommunikoinnin häirintä, keskitymisen ja tehtävien suorituksen häirintä sekä melun esiintymiseen liittyvien äärien ja värähtelöiden aiheuttama häiritsevyyden ja kiusallisuus.

Kun lisäksi otetaan huomioon se, että kaikissa kielissä ei ole hyviä vastineita englanninkielen kiusallisuuskäsitteille^{*,292, 305, 278} ja käsittehierarkialle, niin ei liene ihme, että maallikoiden, jopa asiantuntijoidenkin, on vaikea mieltää, mitä kiusallisuudella (tai melun häiritsevyydellä) milloinkin tarkoitetaan.

Kiusallisuuden mittaus laboratoriossa ja kentällä

Koska altistusympäristö ja hyvin monet muutkin asiat vaikuttavat kiusallisuuteen, niin ”steriileissä” laboratorio-oloissa mitattu kiusallisuus kuvaa huonosti saman melun kotioiloissa aiheuttamaa kiusallisuutta. Kiusallisuustutkimuksia tehtäessä laboratorioympäristö pyritään nykyisin saattamaan kotioiloja vastaavaksi. Laboratorioissa tutkitaan yleensä vain hetkellistä kiusallisuutta tai melko lyhytaikaisten (alle 20 min...30 min) altistusten kiusallisuutta.¹⁰³

Kiusallisuuden mittaus kyselytutkimuksin

Kyselytutkimuksissa kiusallisuutta mitataan pyytämällä altistettu merkitsemään kokemansa kiusallisuuden voimakkuus joko kategoria-asteikolle tai lämpömittarityyppiselle asteikolle, jonka päät on nimetty sanallisesti. Kategoria-asteikko voi olla esimerkiksi neliportainen

ei lainkaan kiusallista
jossain määrin kiusallista
melko kiusallista
erittäin kiusallista.

Alla on esimerkki kymmenportaisesta lämpömittarityyppisestä asteikosta. Vastaaajaa pyydetään merkitsemään kruksi ruutuun, joka parhaiten vastaa ko. asteikolla hänen kokemustaan.

Ei lainkaan kiusallista

Äärimmäisen kiusallista

| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Useimmissa tutkimuksissa raportoidaan melun suuresti kiusalliseksi (engl. highly annoyed) tai hyvin (engl. very annoyed) kokevien osuus kaikista vastauksista. Osuus riippuu mm. siitä, mikä vastaus milläkin asteikolla katsotaan indikoivan melun kokemista (vähintään) suuresti tai hyvin kiusalliseksi. Herkimmissä mittareissa kaikki ne, joiden vastaukset osuvat ylimpään 40 %:iin asteikon kategoriaista tai vaihtelualueesta, luokitellaan

* esim. disturbance: sleep disturbance, interference: speech interference, task related interference, annoyance: spesific annoyance, non-spesific annoyance.

ryhmään ”melun suuresti kiusalliseksi kokevat”. Vähiten herkissä mittareissa (luokittelukriteereissä) alueena on 25... 30 %:a asteikon yläpäästä^{306, 307, 308, 309} tai jopa asteikon yli kategoria.³¹⁰

On syytä huomata, että kyselytutkimuksissa raportoitu meluvaste ”% highly annoyend” (%HA) tai ”% annoyed” (%A) ei kuvaa yksittäisen henkilön kokeman haitallisuuden voimakkuutta, vaan esiintyvyyttä eli niiden ihmisten osuutta, joiden vastaus osuu tietyn ”cut-off/on”-rajan yläpuolelle. Tällaisen mallinnuksen pienenä paradoksina voidaan mainita tilanne, jossa henkilö ilmoittaa kokevansa melun tietyn asteikon ylä- tai alapäätä vastaavaksi. Voidaan kysyä: miten henkilökohtainen vaste muuttuu – tai miten sen pitäisi muuttua – jos esimerkiksi ympäristön melutaso kasvaa siitä, joka jo koettiin asteikon yläpäättä vastaavaksi, tai hiljenee siitä, missä henkilö antoi asteikon alapään arvon?

Kyselytutkimusten yleisenä pulmana on se, että asteikot eivät ole kalibroituja eivätkä jäljitettävissä mihinkään yhteiseen objektiiviseen referenssiin. Toinen pulma on se, että tutkimuksessa joudutaan olettamaan, että on olemassa jatkuva, lineaarinen subjektiivinen kiusallisuusavaruus, mutta kyselyssä käytetty kategoria-asteikko ei kuvaudu sinne jatkuvana toisiaan vastaavana pistejoukkona (koska kategoria-asteikko on epäjatkuva).

Suurimassa osassa kiusallisuustutkimuksia vastaajat ovat olleet aikuisia. Kirjallisuudessa tunnetaan vain muutama lasten kokemaa melun kiusallisuutta koskeva kyselytutkimus.³¹¹

Kiusallisuusreaktion syntymekanismi

Kiusallisuus-reaktion syntymekanismia voidaan tarkastella kahdesta lähestymiskulmasta. Yleinen lähestymistapa on tarkastella vain kiusallisuuden riippuvuutta melun voimakkuudesta. Toisessa lähestymistavassa yritetään löytää teoreettinen selitys kiusallisuusreaktiolle. Tällöin oletetaan, että kaikilla ympäristön äänisignaaleilla on vastaanottajalleen jokin psykologinen funktio, so. sisältö, merkitys tai vaikutus. Esimerkiksi ääni (ja melu) välittää tietoa ympäristön tilasta ja antaa palautetta yksilön oman toiminnan tuloksista. Ääntä käytetään myös viestintään ja ympäristön tilan tarkkailuun. Kiusallisuusreaktion selitetään olevan seuraus siitä, että vastaanotettu äänisignaali ei vastaa sisällöltään, merkitykseltään tai vaikutukseltaan sitä funktiota, joka sillä pitäisi olla, tai odotetaan olevan, tai äänisignaali vaikeuttaa tai estää ko. funktion toteutumista (esim. luetun tekstin mieleen painamista tai muistista palauttamista).^{41, 312, 313, 314, 315}

Kawai *et al.*³¹⁶ tutkimus tukee edellistä psykologiseen funktioon perustuvaa selitystä. Ympäristön äänien luokittelu miellyttäväksi tai toivotuksi ei riippunut kovin paljon ympäristöstä eikä olosuhteista (kontekstista), mutta äänien luokittelu huomiota vaativaksi tai herättäväksi riippui ympäristöstä.

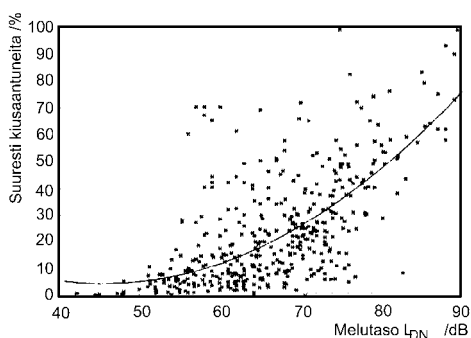
Kun tarkastellaan kiusallisuuden riippuvuutta melun voimakkuudesta, niin kiusallisuus assosioituu läheisesti äänekkyyteen^{317, 318} ja meluisuuteen.⁴²⁷ Kiusallisuus riippuu kuitenkin löyhemmin melun voimakkuudesta,

esim. sen L_{Aeq} -tasosta, kuin äänekkyyden ja meluisuus.^{319, 322} Tästä huolimatta kiusallisuutta voidaan pitää itsenäisenä havaintomaailman ulottuvuutena (muuttujana) sillä perusteella, että on ääniä, joilla koehenkilöiden asettama kiusallisuusjärjestys poikkeaa systemaattisesti samojen äänien äänekkyyden tai meluisuusjärjestyksestä.^{132, 320, 321, 322}

Esimerkki meluisuuden ja kiusallisuuden erosta: Tyypillisesti sama prosentti ihmisiä arvioi asuinympäristönsä tieliikennemelun olevan ”meluisaa” noin 15 dB(A) alhaisemmassa L_{DN} -tasossa kuin arvioivat sen olevan ”suuresti kiusallista”.¹³¹ *

Kiusallisuutta aiheuttavan melun voimakkuudella saattaa olla myös jonkinlainen melun laadusta ja altistumisympäristöstä riippuva kynnysarvo. Melu koetaan kiusalliseksi vasta tämän kynnysarvon ylittyessä.³²³ Tähän vedoten on esitetty, että melumittauksissa ja melun haitallisuutta arvioitaessa pitäisi ottaa huomioon vain se melu, joka ylittää kynnysarvon. Perusteluna on se, että kynnysarvon alittava melu ei kompensoi ylittymisen aikaista kiusallisuutta.

Yksittäisten melutapahtumien kiusallisuus riippuu äänen voimakkuuden lisäksi mm. äänen kestosta. Laboratoriokokeissa kohinatyyppisten äänitapahtumien kiusallisuuden on todettu kasvavan aikavälillä 30 ms – 90 s lineaarisesti verrannollisena kestoajan logaritmiin. Näyttää siltä, että hiljaisten äänien kiusallisuus kasvaa keston funktiona hitaammin kuin voimakkaiden äänien. Toisin sanoen, hiljaisten melutapahtumien kiusallisuuden stabiloitumisaika on pitempi kuin voimakkaiden.^{324, 325} On kuitenkin esitetty myös tuloksia (tieliikennemelua), joissa keston vaikutus kiusallisuuteen, häiritsevyyteen ja epämiellyttävyyteen on ollut melko vähäinen näytteiden keston vaihdeltaessa 1 – 80 s ja L_{Aeq} -tason 57 – 80 dB(A).¹⁹⁸ Keston vaikutus saattaa riippua kuunneltavasta äänestä (ja altistustilanteesta).

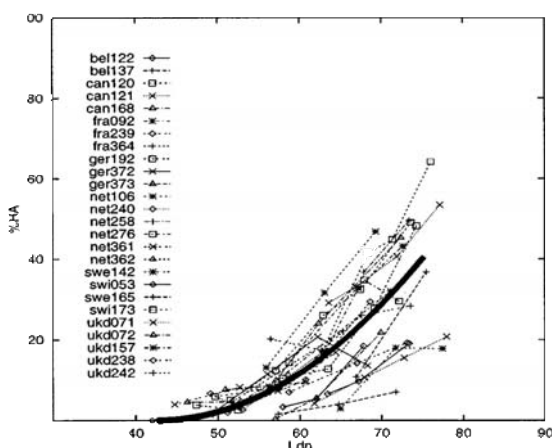


Kuva 11: Liikennemelun suuresti kiusalliseksi kokevien %-osuuden (% highly annoyed) riippuvuus asuinalueen ulkomelun tasosta

* Asteikoiden ollessa 10-portaisia ”ei lainkaan meluisaa (1)...äärimmäisen meluisaa (10)” ja ”ei lainkaan kiusallista (1)...äärimmäisen kiusallista (10)”. Meluisa vastaa arvoa ”vähintään 5” ja suuresti kiusallinen arvoa ”vähintään 7”.

Modulaatiotyyppinen, säännöllinen äänen voimakkuuden vaihtelu, flukтуаatio, saattaa lisätä kiusallisuutta.³²⁶ Toisaalta, lyhytaikaisissa laboratoriokojeissa on todettu, että signaalin vaihtelunopeus (20...200 dB/s), vaihtelutaajuus (0,5...5 Hz), vaihtelulaajuus ja signaalin nousunopeus (25... 1000 dB/s) eivät vaikuttaneet merkittävästi kiusallisuuteen (kun L_{Aeq} -taso pidetään vakiona).³²⁷

Kiusallisuusreaktioiden riippuvuus melusta on, osittain ehkä kiusallisuus-käsitteen epämääräisen ja vaikean määriteltävyyden* vuoksi, hyvin löyhä. Tutkijat eivät ole yksimielisiä kiusallisuuden määritelmästä.^{5, 328, 329} Kuva 11 on hyvä esimerkki löyhästä riippuvuudesta. Siinä on yhteenvedo 27 kyselytutkimuksen tuloksista. Kukin piste esittää ko. melutason melualueilla asuneiden vastaajien arvioiden keskiarvoa.† Yksittäisten vastausten vaihtelu täyttäisi koko kuva-alan pisteillä.



Kuva 12: Yhteenvedo 26 kyselytutkimuksessa. Kuva esittää niiden vastaajien osuutta prosentteina, jotka ilmoittivat kokevansa tieliikennemelun erittäin tai suuresti kiusallisena tai häiritsevänä (engl. highly annoyed, %HA). Paksu viiva esittää tutkimusten perusteella laskettua keskimääräistä vastetta.^{330, ‡}

Kuvassa 12 on esitetty yhteenvedo 26 kyselytutkimuksesta, joissa on tutkittu tieliikennemelun yleistä kiusallisuutta. Asuinalueen (tai vastaajan asu-

* (subjektiivinen) kiusallisuus on käsitteen määrittelyn vaikeuden kannalta rinnastettavissa kauneuteen.

† eri tutkimuksissa on käytetty erilaisia kiusallisuuden mittareita. Melusta suuresti kiusaantuneiksi (highly annoyed) on katsottu ne, joiden vastaus on ollut kulloisenkin mittariasteikon ylimmän kolmanneksen sisällä.

‡ Huomattakoon, että eri tutkimusten ohuilla viivoilla piirretyt vasteet ovat koko joukon (tutkimuksessa vastanneiden henkilöiden) keskimääräisiä (ryhmiteltyjä) vasteita. Yksittäisten henkilöiden vastausten ja eri (asunto)alueilla asuvien joukkojen välinen hajonta on yleensä huomattavan suuri. Melun voimakkuus, esimerkiksi L_{DN} -taso, selittää tyypillisesti vain 5... 30 %:a henkilöiden välisestä kiusallisuuden kokemisen voimakkuuden vaihtelusta.

maan rakennukseen kohdistuva) ulkomelutaso on ilmoitettu päivä-yötasona, L_{DN} , joka määritellään

$$(12) \quad L_{DN} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(15 \cdot 10^{L_{Aeq,07-22h}/10} + 9 \cdot 10^{(L_{Aeq,22-07h}+10)/10} \right) \right]$$

jossa $L_{Aeq,07-22h}$ on päiväajan ekvivalenttitaso [dB(A)] ja $L_{Aeq,22-07h}$ yöajan ekvivalenttitaso [dB(A)]. Tieliikennemelun L_{DN} -taso on tyypillisesti 1,5... 3,5 dB(A) suurempi kuin $L_{Aeq,24h}$ -taso. Mitä suurempi on päivä- ja yöajan ekvivalenttitasojen ero, sitä pienempi on L_{DN} ja $L_{Aeq,24h}$ -tasojen ero. Päivä- ja yöajan ekvivalenttitasojen ero riippuu päivä- ja yöajan liikennetiheyden erosta. Tyypillisesti yöajan keskimääräinen tuntiliikennetiheys on 6...12 %:a päiväajan vastaavasta arvosta. Jos ainoana erona on tuntiliikennetiheys, tuottaisi 6 %:n liikennetiheys 12 dB(A) päivämelun $L_{Aeq,07-22h}$ -tasoa alhaisemman ja 12 %:n liikennetiheys 9 dB(A) päiväarvoa alhaisemman yömelun $L_{Aeq,22-07h}$ -tason.

Kuvan 12 paksun viivan mukainen vaste, melun suuresti kiusalliseksi/häiritseväksi kokevien henkilöiden %-osuuden riippuvuus L_{DN} -tasosta, noudattaa yhtälöä³³⁰

$$(13) \quad \%HA = 0,03(L_{DN} - 42) + 0,0353(L_{DN} - 42)^2$$

Kun oletetaan, että L_{DN} -tason ja $L_{Aeq,24h}$ -tason ero on 2 dB(A), saadaan edellisestä kaavasta

$$(14) \quad \%HA = 0,03(L_{Aeq,24h} - 40) + 0,0353(L_{Aeq,24h} - 40)^2$$

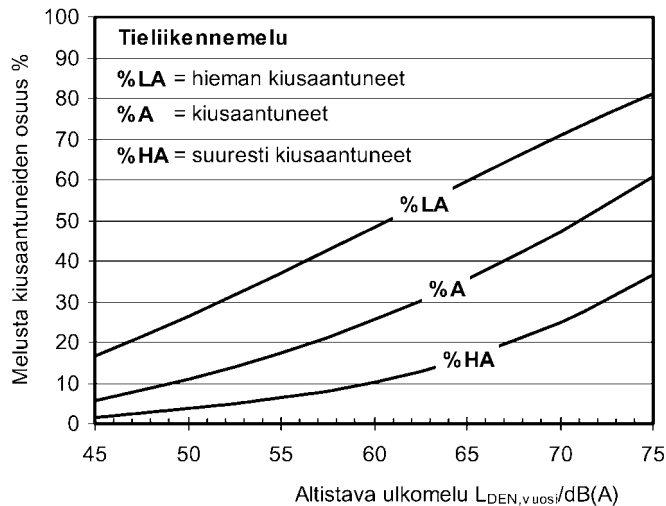
Näyttää siltä, että ihmisillä on vahva uskomus siihen, että melu aiheuttaa suurempaa kiusallisuutta ja häiritsevyyttä kuin, mitä tutkimukset osoittavat. Tutkimuksessa, jossa koehenkilöiden ($N = 128$) pyydettiin arvioimaan, miten melu häiritseisi erilaisista tehtävistä ja toiminnoista (11 erilaista) suoriutumista neljässä kuvitteellisessa melutilanteessa, arvioitu häiritsevyys korreloi erittäin hyvin melun voimakkuuteen (kuvittelun tilanteen tyypilliseen melutasoon).³³¹ Yhtä hyviä korrelaatioita ei saada todellisissa koetilanteissa.

Näyttää myös siltä, että *muistinvarainen*, eli takautuvasti arvioitu, *kiusallisuus* voi olla paljon suurempi kuin todellisessa altistustilanteessa koettu (raportoitu) kiusallisuus.^{91, 234, 235, *} Vastaavan tyyppinen vasteen korostuma saattaa syntyä myös silloin, kun kysytään asuin ympäristön melun kiusallisuutta yleensä, ilman aikaviitekehystä.⁵⁰⁵

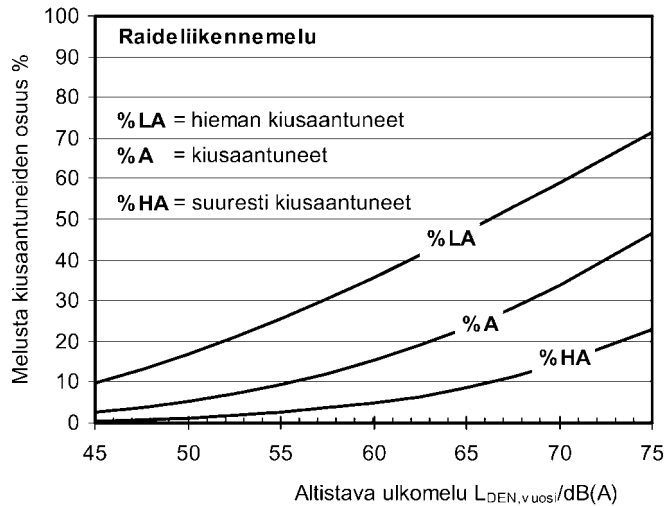
* Todellisessa altitustilanteessa melun voimakkuus voi olla alhaisempi kuin se melu, jota henkilöt muistelevat – tai haluavat muistella – esimerkiksi silloin, kun suhtautuvat kielteisesti melulähteeseen tai asuin ympäristönsä meluun. On myös päinvastaista käyttäytymistä. Ihmiset haluavat sopeutua, tai ovat opineet sopeutumaan so. tottuneet, vallitsevaan tilanteeseen.

Altistavan melun informaatioisisältö vaikuttaa kiusallisuuteen. Melut, joilla on informaatioisisältöä, kuten esimerkiksi naapurista kuuluva puhe ja musiikki, koetaan yleensä jossain määrin tai melko kiusalliseksi jopa 10 dB(A) alhaisemmissa äänitasoissa kuin melut, joiden informaatioisisältö on vähäinen (esim. liikennemelu).^{91, 332} Merkityksellisten äänten kiusallisuusvaste verrattuna merkityksettömien äänien vasteeseen näyttää olevan herkempi asteikon alapäässä (alhaiset äänitasot) kuin yläpäässä. Tutkimukset viittaavat jopa siihen, että aivot prosessoivat puhetta ja musiikkia toisella tavalla kuin varsinaisia meluja. On esitetty, että prosessointierosta johtuen meluksi luokitellun puheen ja musiikin kiusallisuus ja häiritsevyys eivät riipu kovin merkittävästi äänekkyudesta (voimakkuudesta) eikä muista äänen laatuun vaikuttavista akustisista seikoista, kuten äänemäisyydestä tai impulssimaisuudesta.^{333, 334}

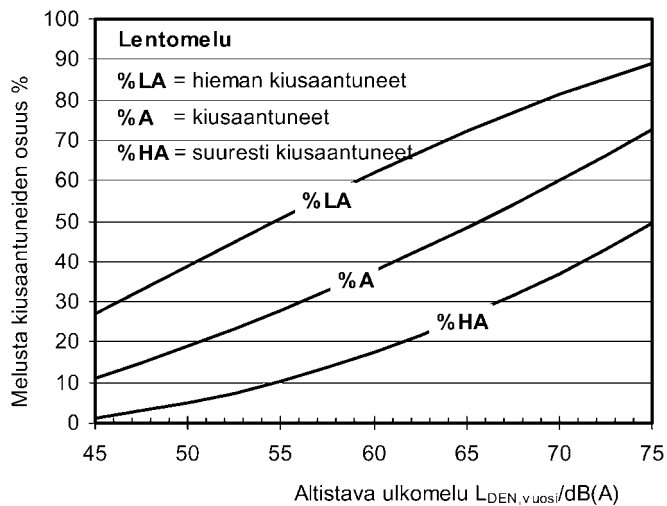
Oletetaan, että ulkomelun $L_{DEN, vuosi}$ -taso mittaa pitkän ajan keskimääräisen äänekkyyttä. Euroopan Unionin ympäristömeludirektiiviä valmistellut meluvaikutuksia selvittänyt työryhmä, WG2, ehdotti eri liikennemuotojen melusta suuresti kiusaantuneiden (%HA, engl. % Highly Annoyed), kiusaantuneiden (%A, engl. % Annoyed) ja lievästi kiusaantuneiden (%LA, engl. % Lightly Annoyed) esiintyvyyden riippuvuudeksi ulkomelun $L_{DEN, vuosi}$ -tasosta seuraavissa kuvissa esitetyjä vasteita.^{335, 272}



Kuva 13: EU:n ympäristömeludirektiivin asiantuntijatyöryhmän WG 2 ehdottamat kiusallisuusvasteet tieliikennemelulle. $N = 17\ 192$.



Kuva 14: EU:n ympäristömeludirektiivin asiantuntijatyöryhmän WG 2 ehdottamat kiusallisuusvasteet raideliikennemelulle. $N = 7\,362$.



Kuva 15: EU:n ympäristömeludirektiivin asiantuntijatyöryhmän WG 2 ehdottamat kiusallisuusvasteet raideliikennemelulle. $N = 27\,081$.

Kuvien 13 – 15 vasteet perustuvat TNO:n (Hollannin ”VTT”) keräämään ympäri maailman tehtyjen kyselytutkimusten tietokantaan. Mukana ei ole suomalaisia tutkimuksia, eikä suomalaisten vasteita ole allekirjoittaneen tietojen mukaan verrattu kuvien 13 – 15 vasteisiin.

Mitä kiusallisuus mittaa?

Mitä kiusallisuuden halutaan mittaavan? Pari esimerkkiä antanee jonkinlaisen kuvan siitä, mitä subjektiivista kokemusta kiusallisuuden pitäisi mitata (erotuksena äänekkyydestä ja meluisuudesta):

Esimerkki 1: Itikan ininä (usein alle 30...35 dB(A)) pimeässä huoneessa voi tuntua erittäin kiusalliselta, vaikka ininän *äänekkyyys ja meluisuus* ovat hyvin pieniä. Esimerkki 2: Ukkosen jyrynä (jopa 90...100 dB(A)) luokitellaan tyypillisesti hyvin äänekkääksi, ei lainkaan tai vain vähän meluisaksi, mutta joissakin tapauksissa hyvin kiusalliseksi. Esimerkki 3: Hyvin voimakkaan sateen rummutus makuuhuoneen ikkunaan tai peltikatolle (40 ...65 dB(A)). Vaikka äkillisesti alkanut yöllinen rummutus herättäisi henkilön, monet katsovat, että ääni ei ole meluisaa eikä kiusallista.

Lukija pystynee itse arvioimaan, mistä syystä itikan ininä koetaan niin sietämättömäksi, että usea meistä ei saa rauhaa "melulta", ennen kuin ääni (äänen aiheuttaja) on eliminoitu? Toinen esimerkki: Mikä aiheuttaa sen, että suhtautuminen ukkosen äänen (ja ukkoseen melun aiheuttajana) riippuu siitä, kuinka lähelle arvioimme salaman lyövän tai lyöneen? Yhteinen nimittäjä molemmissa esimerkeissä on vihastuminen tai pelko niistä seuraamuksista, joita melun aiheuttaja voi tuottaa muulla tavoin kuin äänellään.

Miksi herääminen sateen rummutukseen on siedettävämpää ja hyväksyttävämpää kuin herääminen yhtä voimakkaaseen (äänekkääseen) yöaikaiseen lumen aurauksen tai naapurin suihkussa käynnin meluun? Lumen auraus ja etenkin naapurin yöaikainen suihkussa käynti ovat meluja, joihin assosioituu käsitys siitä, että melun aiheuttaja voisi välttää tai vähentää melua melko pienin toimenpitein. Kuulija kokee, että häiritsevää melua aiheutetaan välinpitämättömyydestä tai tahallaan. Sateen rummutuksella ei ole sellaista aiheuttajaa, joka voisi vaikuttaa melun voimakkuuteen tai esiintymisen ajankohtaan.

Kysyttiinpä meluun kohdistuvan *kielteisen suhtautumisen* voimakkuutta lähes millä tavalla tahansa, vastauksiin sisältyy aina edellä mainitun lievän vihastumisen, pelon tai "vältettävissä olevan tahallisen aiheuttamisen" vaikutus, sikäli kuin meluun tai sen aiheuttajaan näitä assosiaatiota voi liittyä. Tällaisissa tapauksissa on syytä kysyä: Missä määrin arvio koetusta meluhaitasta ja itse haitta lainkaan riippuu melutasosta? Väheneekö esimerkiksi itikan äänen aiheuttama kiusallisuus tai lukemisen häirintä sillä, että äänitaso alenee 38 dB(A):sta 28 dB(A):han, jos ääni on edelleenkin kuultavissa? Poistuuko meluhaitta, jos ääni lakkaa kuulumasta, mutta henkilö tietää, esimerkiksi ihokosketusten perusteella, itikan edelleen "vaanivan saalista" samassa huoneessa?

Edelliset esimerkit osoittavat, että asennoituminen meluun ja sen aiheuttajaan (sekä altistustilanne eli konteksti) voivat vaikuttaa arvioon melun haitallisuudesta enemmän kuin äänen voimakkuus. Subjektiivinen kiusallisuus (engl. perceived annoyance) voidaankin määritellä muuttujaksi, jonka kuvaa vastaajan asennetta* tutkittavaa melua kohtaan.

* Nykysosiologiassa asenne määritellään usein vain henkilön arvioksi jostakin, josta hänellä on tietoa. Asenne tiettyyn meluun, esimerkiksi arvio ampumaratamelun voimakkuudesta ja haitallisuudesta, voi olla yhtä hyvin myönteisten kuin kielteistenkin tunteiden väärittämä.

Saksalaisessa tutkimuksessa⁷¹⁹ todetaan mm. seuraavien tekijöiden korreloivan positiivisesti asuinympäristössä koetun melun kiusallisuuden ja häiritsevyyden voimakkuuteen (so. herkistävän vastetta)

- runsas oleskelu sisällä, erityisesti yksin tai sosiaalisesti eristyneenä elämisen vuoksi,
- usein toistuvat altistumiset voimakkaalle liikennemelulle tai (naapureiden) asumisäänille,
- vähäinen audiovisuaalisten laitteiden (radio, TV, CD-soitin yms.) käyttö joko puhtaasti ajanvietteeksi tai ulkoa sisään kuuluvan melun peittämiseen,
- kasvanut tietoisuus melun kiusallisuudesta tai kasvanut herkkyyys melulle joko melun lisääntymisen vuoksi tai sen vuoksi, että henkilön altistus muualla kuin asuinympäristössä on kasvanut,
- kuinka kielteiseksi altistettu kokee asumistilanteensa hyväksyttävyyden,
- elämisen laadun ja elintason parantuminen ilman, että asuinympäristön melutilanne parantuu (näitä vastaavasti).

Tutkimusten valossa näyttää siltä, että suurissa taajamissa asuvat raportoivat samassa (liikenteen) ulkomelutasossa voimakkaampia kiusaantuneisuusvasteita kuin maaseudulla ja pienissä taajamissa asuvat.^{336, 337, 392} Alueilla, joilla melu on voimakasta, ihmiset näyttävät herkistyvän kaikenlaiselle melulle melutasosta riippumatta.⁷³ Päinvastaiseen reagointiinkin viittaavia tuloksia on esitetty. Monissa tutkimuksissa on päädytty siihenkin, että melun (suuresti) kiusalliseksi kokevien henkilöiden suhteellinen osuus ei riipu taajaman koosta.²⁹⁸ Kuitenkin, esimerkiksi Itävallassa maaseudun asukkaiden vastaiden on todettu olevan taajamissa asuvien vasteita herkempiä.³³⁸

Tutkimuksissa on saatu näyttöjä sille, että monet seikat, kuten asuinympäristö ja ilmasto, perheen koko, työssäkäynti (käy, ei käy) sekä rakennusten ulkokuoren ääneneneristävyys voivat vaikuttaa ympäristömelujen kyselytutkimusten kiusallisuusvasteeseen.^{339, 340}

Kiusallisuuden objektiivinen mittaus

Kiusallisuuden objektiivisen mittaamenetelmän kehityksen voidaan katsoa alkaneen jo 1900-luvun alkupuolella.³⁴¹ Kehitystyössä on kokeellisesti selvitetty, miten kiusallisuus riippuu melun ominaisuuksista. Tällaisia ominaisuuksia ovat mm. impulssimaisuus, kapeakaistaisuus, karheus, kimeys ja matalataajuinen huojunnan (fluktuaation) voimakkuus.*^{342, 116, 343, 344, 345} Näiden ominaisuuksien määrittämiseen löytyy tietokoneohjelmia ja joihin äänitasomittareihin on saatavilla kyseisiä ominaisuuksia mittaavia (laskevia) optioita.^{346, 347, 348}

* Karheuden ja fluktuaation syynä on yleensä joko amplitudi- ja taajuusmodulaatio tai molemmat. Fluktuaation kiusallisuus on suurinta (herkintä) modulaatiotaajuuden ollessa noin 4 Hz. Karheutta aiheuttaa 15...300 Hz välillä olevat signaalin modulaatiokomponentit. Herkin alue on noin 70 Hz seutuvilla.

Voight³⁴⁹ lienee ensimmäisiä objektiivisten kiusallisuusindikaattoreiden esittäjistä. Hän kehitti väitöskirjatyössään tieliikennemelulle kiusallisuusindeksin, AI (engl. Annoyance Index)

$$(15) \quad AI = 0,493L_{A10\%} - 0,248L_{A50\%} + 0,317L_{A90\%} - 19,478$$

jossa $L_{A10\%}$, $L_{A50\%}$ ja $L_{A90\%}$ ovat alaindeksissä ilmoitettuja liikennemelun pysyvyytasoja. Indeksiksi perustui laboratoriotutkimuksiin. Se vaihteli välillä 7 – 21, liikennemelun L_{Aeq} -tason vaihdellessa 46 – 73 dB(A).

Zwicker^{286, 117} nimittää puhtaasti melun akustisista ominaisuuksista johtuvaa kiusallisuuden osuutta *harhattomaksi kiusallisuudeksi* (engl. unbiased annoyance, UBA). Se lasketaan kaavasta

$$(16a) \quad UBA = d \cdot N_{10\%}^{1,3} \left[1 + s_{N_{10\%},S} + f_{N_{10\%},F} \right]$$

jossa

$$(16b) \quad s_{N_{10\%},S} = 0,25(S-1) \left[\lg(N_{10\%} + 1,0) \right]$$

$$(16b) \quad f_{N_{10\%},F} = 0,3F \left(\frac{1,0 + N_{10\%}}{N_{10\%} + 0,3} \right)$$

Edellisissä kaavoissa d on vuorokauden ajan huomioon otettava korjauskertoimen, N äänekkyyys [soni], S kimeys [acum] ja F fluktuaatio voimakkuus [vacil]. $s_{N_{10\%},S}$ ja $f_{N_{10\%},F}$ ovat äänekkyyden 10 % pysyvyyesarvon perusteella määritetty kimeys ja fluktuaation voimakkuus.

Kimeys lasketaan kaavasta³⁵⁰

$$(17) \quad S = 0,11 \frac{\int_{n=0}^{24} z N'(z) g(z) dz}{\int_{n=0}^{24} N'(z) dz}$$

jossa z on kriittisen kaistan numero ($z = 1 \dots 24$), $N'(z)$ kaistan äänekkyyys ja $g(z)$ painotusfunktion arvo kriittisellä kaistalla z . Kapeakaistaisen kohinan, jonka keskitaajuus on 1 kHz, kaistaleveys yksi kriittinen kaista ja äänenpainetaso 60 dB(A) on määritelty olevan kimeydeltään 1 acum.

Widmanin³⁵¹ arviointimenetelmä psykoakustiselle kiusallisuudelle, PA [au],

$$(18) \quad PA = N_{5\%} \left(1 + \sqrt{a_s^2 + a_{fr}^2} \right)$$

jossa $N_{5\%}$ on äänekkyyys [soni], joka ylittyy 5 %:a ajasta, a_s on kimeyden ja a_{fr} on fluktuaation ja karheuden tuoma kiusallisuuden muutos.

$$(19) \quad a_s = 0,25(S - 175) \lg(N_{5\%} + 10), \quad \text{kun } S > 1,75$$

jossa S on kimeys [acum]. Fluktuaation ja karheuden tuoma muutos

$$(20) \quad a_{fr} = \frac{2,18}{N_{5\%}^{0,4}} (0,4F + 0,6R)$$

jossa F on fluktuaation [vacil] ja R karheus [asper]. Karheuden syynä on yleensä äänekset, joiden taajuusero on 12...70 Hz.²⁸⁴

Zwicker on esittänyt myös äänen miellyttävyyden indikaattorin

$$(21) \quad \frac{P_{pl}}{P_{pl,0}} = e^{-0,7R/R_0} e^{-1,08S/S_0} \left(1,24 - e^{-2,43T/T_0}\right) e^{(0,023N/N_0)^2}$$

Uusimista kiusallisuusmalleista mainittakoon Preisin malli.^{352, 353, 354} Hän katsoo kokonaiskiusallisuuden riippuvan kolmesta osatekijästä, joita hän kutsuu äänekkyys-, tungettelevuus*- ja informaationisisältöperusteiseksi kiusallisuudeksi. Kokonaiskiusallisuus on näiden painotettu summa. Kahden viimeisen tekijän voimakkuus ei Preisin mukaan riipu lainkaan äänekkydestä (melun “voimakkuudesta”). Esimerkkeinä meluista, joiden kiusallisuus ei riipu äänekkydestä Preis mainitsee (naapurista) kuuluvan musiikin ja puheen sekä kirs kuvan äänen, joka syntyy vedettäessä sormen kynttä lasin pintaa pitkin.³⁵³ Mallia on kritisoitu.³⁵⁵

Jos kiusallisuus riippuu vain kuullun äänen tai melun informaationisisältöstä, niin – kuten Preisin esittää – kuulijan kokema kiusallisuuden voimakkuus ja eriaistisen kiusallisuuden esiintyvyys on melun voimakkuudesta riippumaton vakio koko sillä voimakkuusalueella, jolla kuulija kuulee selvästi kyseisen informaation. Itikan ääni pimeässä makuuhuoneessa on hyvä esimerkki äänestä, jonka kiusallisuus on kokemusperäisen tiedon mukaan voimakkuudesta melko riippumaton.

Kiusallisuustutkimusten käyttöä terveystieteiden perusteena vaikeuttaa se, että ei ole tarkkaa, yksikäsitteistä tieteellistä perustetta sille kiusallisuuden asteelle, joka pitäisi käyttää haitattoman ja haitallisen melun jaon kriteerinä.[†] Pitäisi muun muassa osata vastata kysymyksiin: “Miten kiusallisuuden

* engl. intrusiveness.

† Sama pulma koskee kaikkia vaikutuksen voimakkuutta mitattavia muuttujia, jotka perustuvat haitan aiheuttajan ja vasteen välisiin tilastollisiin riippuvuuksiin. Kiusallisuuden suhteen pulmaa korostaa se, että meluallistuksen voimakkuus ja melulaji selittävät tyyppillisesti enintään 2...40 %:a yksilötason vasteesta ja se, että saman melun kiusallisuus riippuu mm. altistusajankohdasta, -paikasta ja siitä, mitä altistettu on tekemässä. Kiusallisuuden mittari voi olla myös usean osion perusteella laskettu indeksiluku, joka saa esimerkiksi arvoja 0 – 100. Yleensä on mahdotonta esittää konkreettisesti kuinka suurta todellista haittaa mikin asteikon arvo vastaa.

pitäisi mitata ja mihin kohtaan mitäkin asteikkoa sallitun ja ei-sallitun kiusallisuuden raja tulee asettaa?” ja “Onko oikeampaa asettaa rajaksi esimerkiksi ‘korkeintaan 40 %:a melusta kiusaantuneita’ (eli %A = 40 %) kuin ‘korkeintaan 10 %:a melusta suuresti kiusaantuneita (eli %HA = 10 %)?’”. Lisäksi on syytä huomata, että yleisesti käytetty kiusallisuusvaste “suuresti melusta kiusaantuneiden osuus” ei mittaa kiusallisuuden voimakkuuden riippuvuutta melusta vaan melusta vähintään “suuresti kiusaantuneiden” (engl. highly annoyed) henkilöiden yleisyyttä tai harvinaisuutta (eli esiintyvyyttä) eri melutasoissa.

Verrattaessa eri kiusallisuustutkimuksia on syytä ottaa huomioon muun muassa se, että vaste riippuu ainakin jossain määrin mittaustavasta; esimerkiksi kiusallisuutta mittaavan asteikon portaiden määrä ja niiden nimeäminen vaikuttavat.^{356, 5}

Muistinvarainen kiusallisuus

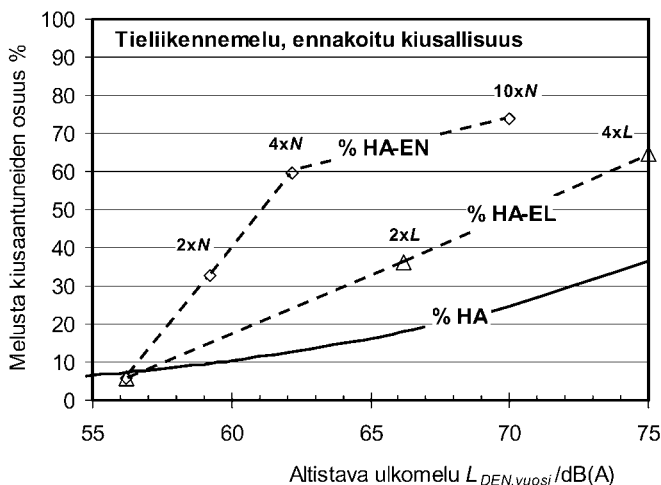
Asuin- ja elinympäristön melun kiusallisuustutkimuksissa viitekehyksenä on nykyisin yleensä edellisen vuoden meluolot. Eli instruktiona on esimerkiksi: ”Seuraava kysymys koskee asuinalueesi ulkomelun melua viimeisen 12 kuukauden ajalta”. Kyseessä on *muistinvarainen kiusallisuus* eli pyydetään vastaajaa palauttamaan mieleensä mielikuva viimeisen vuoden aikana kokemastaan kiusallisuudesta. Nykykäsityksen mukaan kaikki arviot vähintään 20 s aikaisemmin ilmenneen melun kiusallisuudesta ovat äänekkyydsarvioiden tapaan muistinvaraisia, eli säilö- eli pitkäaikaiseen muistiin tallentuneista mielikuvista tai muistijäljistä peräisin. Tutkimusten valossa näyttää siltä, että muistinvarainen kiusallisuus on suurempi kuin todellisessa altistustilanteessa arvioitu.^{91, 229, 234, 235, 498, 331}

Ennakoitu kiusallisuus

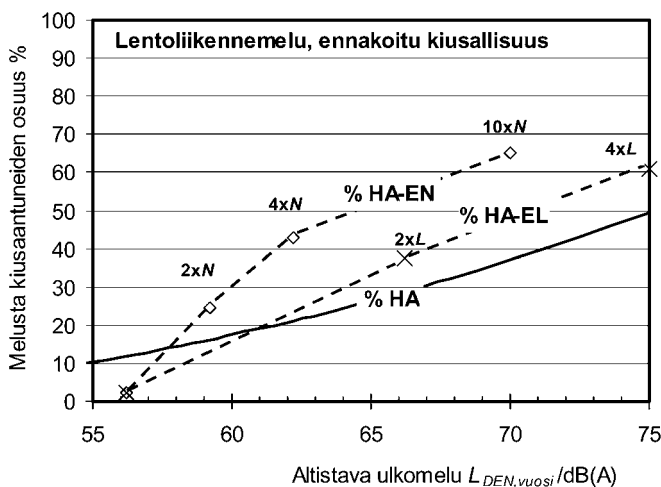
Esimerkiksi ympäristövaikutusselvityksissä ja elinympäristön strategisessa suunnittelussa joudumme ennakoimaan meluvaikutuksia, kuten kiusallisuuden esiintyvyyttä ja ilmaantuvuutta ja niiden muutoksia. Ihmisten, esimerkiksi suunnitelmista valittajien, arviot tulevan melun kiusallisuudesta (ja muista vaikutuksista) yleensä ennakoivat (olettavat) tilanteen olevan merkittävästi pahemman kuin esimerkiksi sen, mitä vastaava melu vanhoilla asuntoalueilla on aiheuttanut.^{726, 357, 358} Käsite *ennakoitu kiusallisuus* (engl. prospective annoyance) tarkoittaa ihmisten uudesta melutilanteesta ennalta arvioimaa kiusallisuutta.

Fidell ja Pearsons⁸⁹ tutkivat ennakoitua kiusallisuutta kyselemällä ihmisten arvioita siitä, miten melutapahtumien, kuten ohiajojen ja ylilentöjen lukumäärän kasvu (liikennemäärä, *N*) ja tapahtumien äänekkyyden (*L*) kasvu vaikuttavat arvioihin kiusallisuudesta. Kuvissa 16 on esitetty tämän tutkimuksen tieliikennemelun ennakoitua kiusallisuusvasteet verrattuna kuvan 13 harmonoistuun %HA-vasteeseen. %HA-EN kuvaa suuresti kiusaantu-

neiden esiintyvyyttä, kun liikenteen määrän (ohiajojen melutapahtumien) arvioidaan kaksinkertaistuvan ($2xN$), nelikertaistuvan ($4xN$) ja 10-kertaituvan ($10xN$) ja %HA-EL vastaavaa vastetta, kun vastaajat olettavat määrän pysyvän vakiona, mutta äänekkyyden kaksinkertaistuvan ($2xL$) tai nelinkertaistuvan ($4xL$). Kuvassa 17 on esitetty vastaavat vasteet lentomelulle. Lähtötilanteessa (so. ennen em. kuviteltuja muutoksia) vastaajien itse arvioima %HA oli tieliikennemelulla 5,8 % ja lentomelulla 2,4 %.



Kuva 16: Tieliikenteen ennakoitu kiusallisuus melutapahtumien (ohiajojen) kaksin-, nelin- ja kymmenkertaituessa tai melutapahtumien äänekkyyden kaksin- tai nelinkertaituessa verrattuna kuvan 13 "harmonisoituun" %HA-vasteeseen.



Kuva 17: Lentomelun ennakoitu kiusallisuus melutapahtumien (yli/ohilentojen) kaksin-, nelin- ja kymmenkertaituessa tai melutapahtumien äänekkyyden kaksin- tai nelinkertaituessa verrattuna kuvan 15 "harmonisoituun" %HA-vasteeseen.

Kuvassa 17 huomion arvoista on se, että alkutilanteessa (L_{DEN} on noin 56 dB(A)) %HA-vasteen kiusallisuuden esiintyminen on huomattavasti alhaisempi (2,4 %), kuin työryhmän WG2 esittämä arvo (noin 12 %).

Kuvien 16 ja 17 sanoma on sikäli mielenkiintoinen, että ne eivät tue tutkimuksia, joiden mukaan erillistä melutapahtumista (kuten ohiajoista tai -lennoista) koostuvien melujen kiusallisuus riippuu ensijaisesti tapahtuman enimmäistasosta (äänekkyydestä) ja hyvin löyhästi tapahtumien määrästä (esim. vuorokauden aikana). Ihmiset näyttävät oletettavan määrän olevan paljon merkittävemmän kiusallisuuden tekijän, kuin vastaavan L_{Aeq} -tason nousun aiheuttavan tason kasvun.

Hollantilaisessa, suunnitteilla olleen suurnopeusradan meluvaikutus-tutkimuksessa päädyttiin siihen, että ihmiset olettavat melun ja meluvaikutusten olevan pahempia kuin ne todellisuudessa ovat.⁹⁰

Häiritsevyys

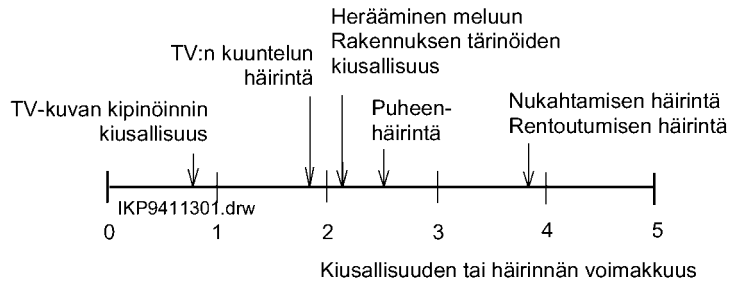
Kuten edellä on esitetty, melun häiritsevyys (engl. disturbance, saks. Störung) on käsite, jota käytetään tarkoittaessa tai kuvattaessa melun kielteisiä vaikutuksia altistetun kykyyn suoriutua erilaisista tehtävistä ja toiminnoista. Melun ja melualtistuksen häiritsevyyden suuruus mitataan joko vertaamalla suoraan, miten tekemisen tulos tai suoriutuminen toiminnosta riippuvat melun voimakkuudesta ja/tai altistusajasta tai kysymällä altistetun omaa arviota vaikutuksista. Häiritsevyys tarvitsee realisoitua tekemisen tai toiminnan, josta suoriutumisen koetaan tai arvioidaan vaikeutuvan melun vuoksi.*

1930-luvun alussa tehdyssä häiritsevyystutkimuksessa – jossa tutkittiin melun vaikutusta japanilaisten kirjainmerkkien tunnistamiseen, pienten lukujen yhteenlaskuun ja tekstin jäljentämiseen – todettiin melun (musiikki, keinoitekoinen melu) vaikuttavan enemmän tehtävistä suoriutumisen laatuun (virheiden määrään) ja suoriutumisenopeuteen kuin työn määrään. Vaikutukset lyhyessä ajassa tapahtuviin suorituksiin olivat pieniä.³⁵⁹

Tietty melu, esimerkiksi tieliikennemelu, häiritsee erilaisista tehtävistä suoriutumista eri tavoin.^{14, 360, 363} Tästä syystä eri tehtävistä suoriutumisen ja melun voimakkuuden väliset riippuvuudet, (annos)vasteet, voivat olla hyvinkin erilaisia.

Kuvassa 18 on esitetty, mihin kohtaan viisiportaista haitallisuusasteikkoa (Likert-asteikkoa) eri häiritsevyyslajien vastausten 50%/50%-pisteet tyypillisesti sijoittuvat. Puolet vastauksista on tällöin ko. pistearvon alapuolella, puolet yläpuolella. Mitä suurempi häiritsevyyden tai kiusallisuuden arvo ko. pisteellä on, sitä merkittävämpänä haittana vastaajien enemmistö kyseistä osatekijää pitää (silloin kun he kokevat melun olevan kyseisen tekemisen tai toiminnon häiritsevyyden syyinä).

* Voidaan tietysti myös tutkia kuvitteellista häiritsevyyttä pyytämällä koehenkilöitä arvioimaan kuvitteellisten melutilanteiden häiritsevyyttä kuvitteellisiin toimintoihin.



Kuva 18: Tyypilliset melun eri häiritsevyyssajien haitallisuusasteet, joiden alapuolelle sijoittuu 50 %:a ja yläpuolelle 50 %:a vastaajien arvioista. 0 = ei lainkaan häiritsevää/kiusallista, 5 = erittäin häiritsevää/kiusallista. [TV-kuvan kipinöinti: Ohi ajavat ajoneuvot voivat aiheuttaa kipinöintiä (lumisadetta) TV-kuvaan, minkä monet kokevat melun häiritsevyyttä lisääväksi tekijäksi.]

Kuvan 18 mukaan melun aiheuttamaksi koettu nukahtamisen ja rentoutumisen vaikeutuminen ovat huomattavasti pahempia haittoja kuin TV:n kuuntelun (puheesta selvän saamisen + tarkkaavaisuuden häiriintyminen) vaikeutuminen melun vuoksi.

Kuten jo aikaisemminkin on todettu, altistetun kokema kiusallisuus voi riippua melun häiritsevyydestä eli siitä, missä määrin hän kokee melun häiritsevän tai vaikeuttavan jonkun tehtävän tai toiminnan suoritusta.³⁶¹ Esimerkiksi puheenhäirintäkokeessa, jossa häiritsevä liikennemelu vaikeutti suuresti puheen ymmärtämistä, koettu hetkellinen kiusallisuus oli lähes 20 % suurempi kuin saman melun aiheuttama kiusallisuus silloin, kun tehtävänä ei ollut puheesta selvän saaminen.³⁶² Kokeen jälkeen arvioitu kokonaiskiusallisuus määräytyi sen mukaan, miten melu vaikeutti puheen ymmärtämistä voimakkaimpien liikennemeluhuippujen aikana.

Yhteenvedona voidaan todeta, että melun häiritsevyyden ja kiusallisuuden välillä on tietty riippuvuus, mutta eri häiritsevyyssajit riippuvat erilaisella herkkyydellä henkilön samanaikaisesti kokemasta melun kiusallisuudesta.^{360, 363, 364} On olemassa myös käänteinen riippuvuus eli koettu kiusallisuus riippuu siitä, miten melun koetaan häiritsevän erilaisista tehtävistä ja toimista suoriutumista.

Usean melun yhteensä aiheuttama kiusallisuus

Yleensä ihmiset altistuvat samanaikaisesti (etenkin, kun tarkastelun aikajänne on päiviä ja vuosia) usealle eri melulle. Suurin osa tutkimuksista on kohdistunut kuitenkin tietyn melulajin vaikutuksiin. Esimerkiksi kyselelytutkimuksissa on tavanomaista, että koko kysely tai yksittäiset kysymykset kohdistuvat kerrallaan vain yhteen melulajiin. Ei pyydetä arvioimaan esimer-

kiksi sitä, miten jokin melu koetaan silloin, kun samanaikaisesti esiintyy/kuullaan muuta/muita meluja.

Usein esitetään, että tapauksessa, jossa useat melut altistavat asukkaita, melut voidaan asettaa – ja tulee asettaa – haittojensa kannalta “pahemmuus”-järjestykseen. Tällainen arviointitarve syntyy esimerkiksi siitä, että meluntorjuntatoimet halutaan luokitella tärkeys- tai kiireellisyysjärjestykseen. *Onnistuneen luokittelun edellytyksenä on, että tiedämme, millä perusteilla luokittelu tulee suorittaa ja millaisia mahdollisia keskinäisvaikutuksia eri meluilla on.* Seuraavassa on tarkastelu kiusallisuuden perusteella tehtävän luokittelun pulmia.

Jo alkuun on syytä korostaa, että ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä teoriaa siitä, miten samanaikaisesti esiintyvä muu melu vaikuttaa kulloinkin tarkasteltavana olevan tietyn melulajin kiusallisuuteen tai, millä perusteilla altistetut luokittelevat toisen melun toista pahemmaksi. Kirjallisuudesta löytyy mm. seuraavia teorioita ja niitä tukevia tutkimustuloksia:

- 1) **Erillisvaikutushypoteesin** mukaan meluilla ei ole yhteis-, eikä keskinäisvaikutuksia. Tämän teorian mukaan altistettujen arviot tietyn melun absoluuttisesta ja eri melujen keskinäisestä kiusallisuudesta eivät riipu paikallisista oloista, eikä toinen toisistaan.
- 2) **Peittovaikutushypoteesi** olettaa, että muu melu peittää, maskeeraa akustisesti, tarkasteltavana olevaan melua. Maskeerauksen oletetaan vähentävän tarkasteltavan melun erottuvuutta ja tätä kautta sen ominaiskiusallisuutta.
- 3) **Hälytysvaikutus eli dominenssihypoteesi** olettaa, että mitä selvemmin tarkasteltava melu erottuu muusta melusta, sitä enemmän se “automaattisesti” vetää huomiota puoleensa ja ylikorostaa (muuhun meluun verrattuna) aiheuttamaansa kiusallisuutta.
- 3) **Ankkurivaikutus- eli normalisointihypoteesi** olettaa, että muu melu toimii “mittanormaaliäänenä”, johon tarkasteltavaa melua* verrataan. Tarkasteltavan melun ominaiskiusallisuus riippuu siitä, miten se eroaa muusta melusta.
- 4) **Herkistymishypoteesi** olettaa, että voimakas kokonaismelu herkistää yleistä kiusallisuusreaktiota siten, että myös kulloinkin tarkasteltava melu koetaan kiusallisempaan kuin tapauksessa, jossa kokonaismelu on hiljaisempaa.

Edelliset teoriat eivät pyri selittämään millään tavalla sitä, että eri asuinalueilla (ja eri kulttuureissa) voidaan päätyä samassa melutasossa suuresti toisistaan poikkeaviin kiusallisuusarvioihin (vrt. kuva 11). Näiden regointierojen selittämiseksi on esitetty mm. seuraavia teorioita tai selityksille:

* esimerkiksi kyselyn kohteena olevaa melua.

- 5) **Hiljaisille alueille hakeutumishypoteesi**, joka lähtee siitä, että hiljaisille alueille on hakeutunut tai valikoitunut keskimääräistä enemmän ihmisiä, joka arvostavat myös keskimääräistä enemmän hiljaisuutta. Toisin sanoen, hiljaisuuden kaipuu tai arvostus³⁶⁵ on eroihin ajavana syynä. Hiljaisuuteen hakeutuvat reagoivat herkemmin melulle kuin henkilöt, jotka jäävät asumaan meluisille alueille.⁷⁴
- 6) **Väljään, luonnonläheiseen asumisympäristöön hakeutumishypoteesi**, joka lähtee siitä, että meluvasteiltaan erilaisten ihmisten erilaisiin asuin ympäristöihin valikoitumisen tai hakeutumisen syynä ei ole varsinaisesti melu, vaan halu tai tarve välttää kansoitettuja tai teollistuneita alueita (so. pako riittävän yksinäisyyden rauhaan ja “saasteettomuuteen”).
- 7) **Ryhmäpainehypoteesi**, joka lähtee siitä, että suhtautuminen asuin ympäristön (-alueen) meluoloihin riippuu suuresti alueen muiden asukkaiden mielipiteistä tai sen viiteryhmän (esimerkiksi sen poliittisen puolueen) ajatusmaailmasta ja arvoista, johon vastaaja kuuluu. Usein näyttää siltä, että meluvalituksiin liitettyjen kansalaisadressien allekirjoittajina on runsaasti ihmisiä, joita ko. melun altistava taso on melko pieni. Toisin sanoen, altistava melutaso ei selitä valitukseen yhtymistä tai sen tukemista.

Monen edellä mainittujen hypoteesien taustalla on osaselittäjänä aikaisemmin mainittu coping-vaste, eli se, että ihmiset pyrkivät hakemaan selviytymiskeinoja elämäntilanteeseensa hallintaan.^{52, 529}

Monet yhteis- ja keskinäisvaikutustutkimukset on tehty laboratoriossa koehenkilöitä altistavan lyhytaikaisen melun L_{Aeq} -tason ollessa 40...80 dB(A). Osa tutkimuksista perustuu kentällä tehtyihin kyselyihin. Tulokset ovat ristiriitaisia. Seuraavat esimerkit valottanevat tutkimusten kirjoa.

Fields³⁶⁶ on esittänyt useita eri tutkimuksia vertailtuaan, että asukkaat arvioivat *kunkin melun erikseen* käyttäen vertailuperusteena jotain ominaisuutta (standardia), joka ei riipu paikallisista oloista.

Miyazono *et al.*³⁶⁷ totesivat laboratorionkokeessa ($N = 10$)*, että muun samanaikaisen melun voimakkuus vaikuttaa kumuloiduvasti kokonaiskisuusallisuuden silloin, kun kuunnellaan radiota tai televisiota kotona ja toinen muusta meluista on sisällöltään merkityksellistä. Muu melu koostui kahdesta komponentista: tieliikennemelusta ja radioäänen kuuntelua häiritsevistä puheesta. Kokonaiskisuusallisuus riippui häiritsevän puheen ja liikennemelun yhteisestä voimakkuudesta. Koehenkilöt kuuluivat kaikki äänet kuulokkeiden kautta, mitä ei voida pitää hyvänä koejärjestelyä.

Berglund *et al.*³⁶⁸ totesivat kolmea eri yhteisvaikutushypoteesia laboratorio-oloissa testatessaan, että *yksinkertaisuuden vuoksi* kokonaisvaikutuksena

* Tämä tutkimus on valittu esimerkiksi siksi, että lukijan huomio kiinnittyisi siihen tosiasiaan, että monissa tutkimuksissa koehenkilöiden määrä on ollut pieni. Tulosten yleistämiseen on syytä suhtautua kriittisesti.

kiusallisuus voidaan katsoa riippuvan vain äänekkäimmästä melusta. Toisena vaihtoehtona hän esittää vektoriresultanttimalleja. Taylor³⁶⁹ päätyi aivan päinvastaiseen tulokseen. Viidestä erilaisesta yhteisvaikutushypoteesista energia-differenssi-malli osoittautui tilastollisesti parhaimmaksi. Vos³⁷⁰ esittää parhaimmaksi yhteisvaikutusten selvittäjäksi melujen yhteistä ekvivalenttitasoa, jossa kunkin osamelun osuuteen on lisätty sen suhteellisesta voimakkuudesta riippuva painotus ("rangaistus", engl. penalty, vastakohta bonus). Yano ja Kobayashi³⁷¹ päätyivät kahden osamelun (teliikenne, paalujunta) vertailuissaan tuloksiin, jotka tukevat selvimmin havaittavan eli prominentteimman melun painottuvan arvioissa.

Vuonna 2001 julkaistussa tutkimuksessa Berglund *et al*³⁷² päätyvät siihen, että erillisvaikutushypoteesi on paras. Melun vaikutus kokonaiskiusallisuuteen on tukijoiden mukaan pienempi silloin, kun muu melu on voimakasta, kuin tilanteessa, jossa muu melu on hiljaista.

Lawrence *et al.*³⁷³ totesivat, että $L_{Aeq} = 55 - 85$ dB(A) alueella oleva tieliikennemelu vähensi lentomelun kiusallisuutta merkittävästi. 15 dB(A) kasvu tieliikenteen melutasossa vähensi lentoliikenteen melun kiusallisuutta kaksi "pykälää" kuusiportaisella asteikolla.

Ebata *et al.*³⁷⁴ (1991) päätyivät siihen, että summamelun L_{Aeq} -taso on kohtuullisen hyvä mittari samanaikaisen impulssimaisen melun ja tasaisen melun yhteensä aiheuttamalle kiusallisuudelle (alueella 40 – 70 dB(A)).

Ricen³⁷⁵ (lab.) tutkimusten tulosten mukaan alhaisilla tasoilla (L_{Aeq} -taso alle 45...50 dB(A)) tieliikenteen ja impulssimelun kiusallisuus kumuloituu. Sama tulos on toistettu muissakin kokeissa.

Van den Berg³⁷⁶ esittää, että kahden ulkomelun yhteinen kiusallisuus on suurempi kuin niistä kiusallisimman yksinään aiheuttama, mutta pienempi kuin niiden ekvivalenttitasoa 3 dB(A) voimakkaamman melun aiheuttama kiusallisuus.

Taylor *et al.* toteavat, että tieliikenteen melun voimakkuudella ei ollut, tai oli vain joissakin tapauksissa, vaikutusta lentomelun kiusallisuuteen.^{75, 369}

Yano ja Kobayashi³⁷¹ päätyivät tutkiessaan tieliikenne- ja paalujunttauksen melun yhteisvaikutusta siihen, että kiusallisuus (jota kutsuvat häiritsevyysdeksi) riippuu parhaiten kulloinkin äänekkäimmän melun voimakkuudesta.

Vos ja Buchta³⁷⁷ päätyivät tutkimuksessaan siihen, että tieliikennemelun L_{DN} -tason kasvu 10 dB(A):lla alensi pienikaliiperisten aseiden (ampumaradan) laukausäänien kiusallisuutta samalla määrällä kuin niiden L_{DN} -tason alentaminen 0,1 dB(A). Toisin sanoen, tieliikenteen ja ampumamelun kiusallisuus ei riippunut toisistaan merkittävästi (kun molemmat olivat edelleen selvästi erotettavissa).

Vuonna 1996 uudistettussa amerkkialaisessa ANSI S12.9-1: standardissa on esitetty menetelmä usean samanaikaisen melun vaikutusten arvioimiseksi. Menetelmässä arvioidaan ensin painotettu kokonaisaltistus, E [Pa²/s]. Kiusallisuus arvioidaan kokonaisaltistuksen perusteella.³⁷⁸

Sisätilojen ohjearvojen mukaiset äänitasot ovat alhaisia. Altistavan melutason ollessa (selvästi) alle 50...65 dB(A) kiusallisuus ei niinkään riipu me-

lun todellisesta voimakkuudesta vaan sen havaittavuudesta ja intrusiivisuudesta.³⁹⁹ Havaittavuus, detektoitavuus, riippuu signaali-kohinaerosta, toisin sanoen siitä, missä määrin muut samanaikaiset melut ja äänet peittävät tarkasteltavaa melua.

Useimmat yhteisvaikutustutkimukset koskevat vain kahden melulajin vaikutusta, esimerkiksi tie- ja lentoliikenteen melun keskinäisvaikutusta. Toisena melulajina on voinut olla “muu melu” eli kaikki muu ympäristömelu kuin tutkittava melu. Tilanne monimutkaistuu ja tutkimus vaikeutuu, kun kohteeksi asetetaan useamman kuin kahden melulajin yhteisvaikutus. Tällöin uudeksi pulmaksi tulee kokonaismelun voimakkuutta kuvaavan muuttujan määrittely.

Tarkastellaan usean melun yhteisvaikutuksen määrittelyn problematiikka vastefunktion avulla. Oletetaan, että tietyn melulajin, i , aiheuttama kiusallisuuden voimakkuus, A_i , riippuu sen altistavasta tasosta, $L_{A,i}$ ja ko. melun sekä altistustilanteen ja -ympäristön ei-akustisista tekijöistä (engl. response bias), B_i ^{379, 384, 392}

$$(22) \quad A_i = f(L_{A,i}) + B_i$$

Olkoon kiusallisuuden voimakkuutta mittaava asteikko $A_i = 0 - 10$. Nolla merkitsee “ei lainkaan kiusallista” ja 10 “äärimmäisen kiusallista”. Sovitaan, että kun $A_i \geq 7$, altistettu kokee melun suuresti kiusallisena (engl. highly annoyed). Se, että henkilö kokee eri melujen kiusallisuuden erilaiseksi, voi johtua periaatteesta kolmesta syystä:

- eri melulajien kiusallisuuden 0-pisteet ovat samat, mutta vastefunktiot erilaisia. Kuvitteellinen esimerkki: Kuorma- ja henkilöautojen melun kiusallisuus on nolla 45 dB(A)-tasoon asti. Sen yläpuolella kuorma-autoliikenteen melun kiusallisuus kasvaa 1,5 yksikköä 10 dB(A) melutason nousua kohden, mutta henkilöautojen melun kiusallisuus vain 1,0 yksikköä.
- eri melulajien kiusallisuuden 0-pisteet eroavat, mutta vastefunktiot ovat muuten samanlaisia. Kuvitteellinen esimerkki: kuorma-auton melu kiusallisuus on nolla 45 dB(A) tasoon asti ja henkilöauton melun 50 dB(A) tasoon asti. Molemmat kasvavat näiden yläpuolella 1,5 kiusallisuusyksikköä jokaista melutason 10 dB(A) nousua kohden.
- eri melulajien ei-akustiset vaikutukset ovat erilaisia. Esimerkiksi tieliikenteen melulle $B_i = -1$ ja lentomelulle $B_i = 2$ ja molemmilla kiusallisuuden riippuvuus altistavasta tasosta on sama.

Olipa vasteiden erojen syy mikä tahansa, voimme hakea kaavan (22) tyyppisten funktioiden avulla eri melujen välille ne melutasot, $L_{A,i}$, jotka vastaavat vaikutukseltaan, esimerkiksi kiusallisuudeltaan, toisiaan. Käytetään yhtä meluista, esimerkiksi tieliikennemelua, referenssinä eli normina. Haetaan se

normimelun melutaso, jota yhdistelmä vastaa ja arvioidaan kokonaiskiusallisuus tämän mukaan.^{380, 381, 382}

Usean samanaikaisesti tai perättäin aikana T vaikuttavan melun yhteensä aiheuttamaa kiusallisuutta on jäljempänä merkitty symbolilla A . Kirjallisuudesta löytyy useita tutkimuksia, joissa on selvitetty A :n riippuvuutta kokonaismelusta. Esimerkkeinä mainittakoon seuraavat^{383, 384, 385, 386, 369,}

- 1) **Kiusallisuuden energiaperusteinen suora kumuloituminen.** Olkoon tietynä altistusaikana, T , kunkin osamelun, $i = 1 \dots n$, ekvivalenttitaso $L_{Aeq,i}$ ja osa-altistuksen kesto t_i . Kokonaiskiusallisuus, A , riippuu tämän selitysmallin mukaan osamelujen aiheuttamasta altistuksesta seuraavasti:

$$(23) \quad A = f \left(10 \lg \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left(10^{L_{Aeq,i}/10} t_i \right) \right] \right)$$

Kaavasta nähdään, että jos eri osamelujen altistus (L_{Aeq} -taso) on sama, niin myös niiden vaikutus on yhtäläinen.

- 2) **Kiusallisuuden melulajeittain korjattu energiaperusteinen kumuloituminen.** Tämä selitysmalli poikkeaa edellisestä siinä, että altistavaa kokonaistasona korjataan melulajikohtaisella painotuksella, K_i , jonka tarkoituksena on parantaa kunkin melulajin riippuvuutta altistusta kuvaavasta tasosta (vrt. impulssimaisuuskorjaus)

$$(24) \quad A = f \left(10 \lg \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left(10^{(L_{Aeq,i} + K_i)/10} t_i \right) \right] \right)$$

- 3) **Kiusallisuuden melulajittainen riippumaton kumuloituminen.** Tämän selityksen mukaan kokonaiskiusallisuus on melulajikohtaisten osakiusallisuuksien summa eli

$$(25) \quad A = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n f_i(L_{A,i}) = f_1(L_{A,1}) + f_2(L_{A,2}) + \dots + f_n(L_{A,n})$$

- 4) **Kiusallisuuden energiadifferenssiperusteinen kumuloituminen.** Altistavan kokonaismelun ekvivalenttitaso on L_{Aeq} ja kokonaisaltistusaika T . Osamelun, i , altistava taso on $L_{A,i}$ ja altistusaika t_i aikana T . Osamelun kokonaisaltistusaikaan normalisoitu altistava taso on

$$(26) \quad L_{AT,i} = L_{A,i} + 10 \lg t_i / T$$

Tällöin osamelun, i , kiusallisuus

$$(27) \quad A_i = f_{i1}(L_{AT,i}) - f_{i2}(L_{Aeq} - L_{AT,i})$$

ja $i = 1 \dots n$ melulajin kokonaiskiusallisuus

5) Kiusallisuuden energiadifferenssiperusteinen painotettu kumuloituminen.

Tässä selitysmallissa vähiten kiusallisuutta aiheuttavan melun kokonaisaltistusajalle, T , normalisoitua ekvivalenttitasoa merkitään $L_{AT,min}$ on L_{Aeq} ja kokonaisaltistusaika T . Osamelun, i , altistava taso on $L_{A,i}$ ja altistusaika t_i aikana T . Osamelun kokonaisaltistusaikaan normalisoitu altistustaso on

$$(28) \quad L_{An,i} = L_{A,i} + 10 \lg t_i / T$$

$$(29) \quad A = f \left(L_{Aeq} + \sum_{i=1}^n \left(D_i 10^{(L_{AT,i} - L_{Aeq})/10} \right) \right)$$

Edellisten lisäksi voidaan mainita ns. dominanssimalli, jossa kokonaiskiusallisuus on sama kuin suurimman kiusallisuuden aiheuttaman melun kiusallisuus. Tämän mallin mukaan kiusallisuus ei muutu muuttuivatpa eiddominoivien melujen voimakkuudet tai omaisuudet miten tahansa, kunhan niistä ei tule dominoivinta melua.

Kuten edellisistä esimerkeistä voidaan päätellä, usean melun yhteisvaikutus kiusallisuuteen on hämärä. Melun puheen- ja unenhäirintäominaisuudet ovat tässä suhteessa paljon selvempiä yhteisvaikutukseen peruvien ohjearvo-
tasojen asettamisperusteita.

Kiusallisuuden ja meluhaittojen ajallisesta kausaalisuhteesta

Kiusallisuuden riippuvuus melun voimakkuudesta perustuu usein kyselytutkimusten tuloksiin. Kun kyselyn kohteena on melun yleensä* tai jonkin melulajin yleensä* aiheuttama vaikutelma, ei tuloksista ole edes tarkoitus saada selville (tarkkaa) ajallista syy-seuraussuhdetta eikä sitä, miten kokemus tai vaste muuttuu tai riippuu mahdollisesta melun ajallisesta esiintymisestä ja vaihtelusta.

* yleensä tarkoittaa tässä "viime viikkoina" tai "koko sinä aikana, jona vastaaja on ko. alueella tai asunnossa asunut".

Tapauksissa, joissa melun ominaisuudet vaihtelevat, vastauksiin todennäköisesti sisältyy muistissa tapahtunutta merkittäviksi koettujen melutapahtumien mielikuvien vahvistumisen vaikutus, mikä muuttaa mielikuvaa melusta haitallisuutta ja melun voimakkuutta korostavaan suuntaan.

Kyselytutkimuksia on pyritty harmonisoimaan asettamalla aikaviitekehyyksi viimeisen vuoden tapahtumat ja kokemukset.^{55, 387} Tavoitteena on saada arvio melun pitkän ajan keskimääräisen tai tyypillisen kiusallisuuden asteesta (voimakkudesta) ja eri asteiden esiintyvyydestä. Pitkän aikaviitekehyyksen tarkoituksena on parantaa valideettia ja pienentää vastausten (satunnais)hajontaa eli parantaa reliabiliteettia.

Kiusallisuustutkimuksia tehdään myös laboratorio-oloissa esittämällä koehenkilöille melko lyhytaikaisia ääninäytteitä. Mitä lyhyempi ääninäyte on, sitä merkittävämmän arvio kiusallisuudesta perustuu hetkelliseen äänekyyteen – tai oikeammin hetkelliseen kiusallisuuteen – tai niiden keskimääräiseen, lyhytkestoiseen muistiin “integroituvaan” arvoon.

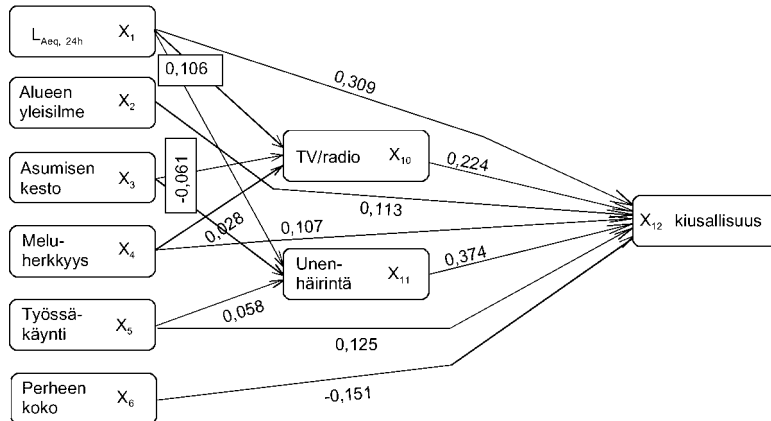
Australialaisessa lentomelututkimuksessa analysoitiin miten lentomelun muutos, a) melutilanteen parantuminen, b) huonontuminen vaikuttivat asukkaiden terveyteen verrattuna niiden ihmisten arvioihin omasta terveydestään, joiden ympäristön melu ei muuttunut ($N = 1005$). Arviot vaikutuksesta terveyteen eivät olleet täysin kausaalisia melun muutoksen suuruuteen. Esimerkiksi ne, jotka olettivat melun voimistuneen enemmän kuin se todellisuudessa kasvoi, arvioivat terveysvaikutukset pahemmiksi kuin ne, jotka muut samoissa meluoloissa asuvat.⁶¹³

Melutaso ja muut muuttujat kiusallisuuden selittäjänä

Edellä on useaan otteeseen todettu, että on tavallista, että arvioitu kiusallisuus riippuu melko löyhästi melutasosta ja että eri henkilöiden arviot voivat poiketa toisistaan paljon. Kuvassa 19 on esitetty tyypillinen multiregression avulla laskettu selitysmalli tieliikennemelun herättämälle kiusallisuudelle.³⁸⁸ Mallissa on esitetty miten kiusallisuus riippuu eri tekijöistä. Nuolien suunta osoittaa mallin ajallisen kausaalisuuden. On esimerkiksi koettava melun häiritsevän nukahtamista, jotta tällä olisi vaikutusta koettuun kiusallisuuteen. Malli ei selitä mahdollista toisensuuntaista syyseuraussuhdetta.

Kuvassa 19 tieliikennemelun $L_{Aeq, 24h}$ -taso selittää suoraan alle 20 %:a kiusallisuuden vaihtelusta. Melun voimakkuus vaikuttaa kiusallisuuteen myös unenhäirinnän (tässä tutkimuksessa nukahtamisen vaikeutuminen) ja puheenhäirinnän kautta. Kun nämä tied otetaan huomioon, $L_{Aeq, 24h}$ -taso selitti noin 40 %:a kiusallisuuden vaihtelusta. Koko malli selittää noin 47 %:a kiusallisuuden vaihtelusta.

Kirjallisuudessa on esitetty laajempiakin multiregressiomalleja kuin kuvan malli, jossa on kahdeksan kiusallisuuden selittäjää.



Kuva 19: Esimerkki siitä, miten eri tekijät selittävät tieliikennemelun keskimääräisen kiusallisuuden. Nuolet osoittavat muuttujien keskinäisen riippuvuuden suunnan. Selittävyyttä kuvaavat lukuarvot on normalisoitu standardipoikkeaman arvoon yksi. $R^2 = 0,465$.

Kiusallisuustutkimuksia tarkasteltaessa on syytä muistaa, että yleensä reaktion ja meluallistuksen välistä riippuvuutta kuvaavat tilastolliset tunnusluvut on laskettu ryhmitettyjen näytteiden ryhmäkeskiarvoista.* Menettely pienentää merkittävästi riippuvuudelle laskettua tilastollista satunnaishajontaa ja parantaa korrelaatiokerrointa verrattuna siihen, että ne laskettaisiin suoraan kunkin vastaajan antamista arvoista. Kun yksilötason vastauksissa altistava melutaso selittää eri tutkimuksissa 2 – 40 %:a kiusallisuuden vaihtelusta, niin ryhmäkeskiarvoilla määritetyt vasteet selittävät 30 – 98 %:a prosenttia vaihtelusta.^{389, 47} Tuloksia arvioitaessa on syytä muistaa, että paremmasta riippuvuudesta huolimatta yksittäisten vastaajien reaktiot eivät muutu miksiäkään.

Asumismuoto- ja ympäristö vaikuttavat kiusallisuuteen.^{390,391,336,337} Esimerkiksi englantilaisessa rautatiemelututkimuksessa todettiin, että kaupungeissa asuvat kokivat (tilastollisesti) saman L_{Aeq} -tasoinen melun kiusallisempina kuin maaseudulla asuvat. Ero vastasi noin 4 dB(A) eroa altistavassa tasossa.³⁹² Joillain meluilla tilanne voi olla päinvastainen. Omakoti- ja rivitaloissa asuvien on todettu kokevan liikennemelun kiusallisempina kuin kerrostaloissa asuvien.³⁹³

* Ryhmittely tarkoittaa sitä, että poimitaan vastauksista kaikki, joita altistava taso on esimerkiksi 52,5 – 57,5 dB(A) välillä ja lasketaan tähän ryhmään kuuluvien vastaajien arvioiman reaktion voimakkuuden keskiarvo. Tämä arvo esittää vastaajien reaktion voimakkuutta 55 dB(A) melulle.

Yksittäisen melutapahtuman havaittavuus

Ympäristömelu voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan. Vakiona tai lähes vakiona pysyvään meluun ja yksittäistä, muusta melusta selvästi erottuvista melutapahtumista koostuvaan meluun. Esimerkiksi monien tehtaiden melu pysyy lähes vakiona sitä kuunneltaessa. Lento- ja raideliikenteen melu taas koostuu yksittäisistä melutapahtumista, ylilennoista tai ohiajoista. Vakio-melun osalta ei voida puhua melutapahtumista eli muutoksista ympäristön tilassa. Havainnon todennäköisyys katsotaan sitä suuremmaksi, mitä suurempi on ympäristön tilan muutos, esimerkiksi infomaatioentropian väheneminen.^{394, 395}

On tavallista, että jokapäiväisessä elämässä ihmiset eivät kiinnitä huomiota kaikkiin ympäristössään esiintyviin melutapahtumiin, vaikka aivojen alemmat kerrokset saattavatkin ne rekisteröidä automaatin tavoin.^{396, 397, 398} Tuntuu loogiselta, että sellaiset melutapahtumat, joita ei tietoisesti huomata tai havaita, koettaisiin vähemmän (tai ei lainkaan) äänekkääksi, meluisaksi ja kiusalliseksi kuin ne tapahtumat, jotka ”tunkeutuvat” tietoisuuteen. Esimerkiksi Fidell *et. al.* päätyivät tällaiseen tulokseen tutkiessaan hiljaisten melujen kiusallisuuden riippuvuutta altistavasta tasosta.³⁹⁹

Yleisesti katsotaan, että vain tietoisesti havaitut melutapahtumat voivat tallentua muistiin. Muistinvaraisen kiusallisuuden riippuvuus havaittavuudesta ei ole viimeaikaisten tutkimusten mukaan kuitenkaan yksikäsitteinen. Näyttää siltä, että osalla ihmisiä melutapahtumien tietoisien havaitsemisen todennäköisyys on melko pieni (noin 10...15 %) ja, että todennäköisyys ei kasva melun voimakkuuden (L_{AE} -tason) lisääntymisen myötä. Tällaisten henkilöiden arvioima muistinvarainen kiusallisuus voi kuitenkin kasvaa hyvin selvästi äänialtistustason funktiona. Osa ihmisistä reagoi täysin päinvastaisesti: Kiusallisuusarvio on melun voimakkuudesta riippumaton, mutta raportoitu tietoisien havaitsemisten määrä (so. havaitsemistodennäköisyys) on sitä suurempi, mitä suurempia melutapahtumien äänialtistustaso ovat.⁴⁰⁰

Kuuloaistin toiminnan kannalta tarkasteltuna yksittäisen melutapahtuman *havaittavuus* (engl. detectability) riippuu siitä, miten paljon havaittavan äänen voimakkuus eroaa taustamelusta sillä kriittisellä kaistalla, jolla kulloinkin havaitsemisherkyys on suurin. Ihminen pystyy erottamaan, detektoimaan, ääniä, joiden äänekkyyys on ko. kaistalla jonkin verran (enintään noin 4...5 dB) taustamelua alhaisempi.^{401, 402, 399} Havaittavuus riippuu myös äänen ajallisen vaihtelun ominaisuuksista, esimerkiksi kestosta,⁴⁰³ ja siitä, montako kertaa ääni ylittää havaittavuuskynnyksen tietyn ajan sisällä. Pelkkää havaittavuus ei kuitenkaan vielä ole riittävä tae sille, että kuulija pystyisi *tunnistamaan* (engl. recognize) äänen (syyn, aiheuttajan) tai esimerkiksi, mikä ääni kahdesta tai useammasta esitetyistä on erilainen, tai mistä ääni on peräisin.⁴⁰⁴ Tunnistaminen edellyttää yleensä voimakkaampaa, pitempään kestäväää, useammin toistuvaa ja/tai enemmän tunnistevihjeitä sisältävää ääntä kuin, mitä havaittavuuteen tarvitaan.⁴⁰⁵

Jokapäiväisessä elämässä vain osa näistä kuuloaistin detektoimista ja keskushermostoon välittämistä aistimuksista päätyy tietoisiksi havainnoiksi. *Tiedostetun havaitsemisen* (engl. noticeability) *todennäköisyys* on henkilön jälkikäteen muistinvaraisesti raportoimien melutapahtumien määrä verrattuna todelliseen melutapahtumien määrään altistusaikana.

Kun henkilö on tekemässä jotakin muuta kuin keskittynyt tietyn melun (äänen) kuulemiseen, tiedostetun havaitseminen kynnystaso on noin 10 dB suurempi kuin havaittavuuskynnys.^{131,406} Esimerkkinä tiedostetun havaitsemisen tyypillisestä todennäköisyydestä “normaalielämässä” voidaan mainita, että todennäköisyys tiedostaa yksittäinen ohiajo tai -lento, jonka L_{AE} -taso on 60...65 dB(A) pienempi, on alle 10 %:a.

Sneddon *et al.*⁴⁰⁷ tekemien laboratoriotutkimusten mukaan koehenkilöt havaitsivat tietoisesti alle 10 %:a melutapahtumista joiden äänitaso oli enintään 8 dB taustamelua voimakkaampi, noin 50 % melutapahtumista, joiden äänitaso ylitti taustamelun 11 dB:llä ja noin 90 %:a tapahtumista, joiden taso ylitti taustamelun 20 dB:llä.

Myös melutapahtumien väliin jäävillä hiljaisilla jaksoilla näyttää olevan tietty havaittavuus sekä tietty hiljaisuuden kesto, jonka jälkeen koettu hiljaisuus tai sen pituus eivät kasva.⁴⁰⁸

Erilaisilla meluilla näyttää olevan erilainen tiedostettu havaittavuus ja havaittujen melujen kiusallisuus on erilainen. Tällaisia päätelmiä voidaan tehdä esimerkiksi tutkimuksista, joissa on verrattu millaisia ääniä henkilöt raportoivat kuulleen asuinympäristössään ja kuinka kiusallisiksi he ne kokevat, niihin tuloksiin, joissa on tutkittu miten kiusalliseksi henkilöt kokevat erilaiset ennalta nimetyt melut.⁴⁰⁹

Kapeakaistaisuus

Kapeakaistaisuus ja äänestäisyys* ovat äänen ominaisuuksia, jotka voivat lisätä – tai vähentää! – melun erottuvuutta, äänekkyyttä, meluisuutta, kiusallisuutta, häiritsevyyttä tai epämiellyttävyyttä verrattuna saman äänitason omaavaan ei-kapeakaistaiseen meluun.^{410, 411, 139, 141} Tämä eron huomioon ottamiseksi mittaustulokseen, esimerkiksi L_{Aeq} -tasoon, tehdään korjaus.^{412, 413, 414}

Tarvittavan korjauksen suuruus riippuu äänen ominaisuuksien lisäksi mittaustavasta. Esimerkiksi mitattaessa kapeakaistaisen äänen äänekkyyden Zwickerin menetelmän mukaisesti suoraan äänekkyytenä, ei tarvita korjausta lainkaan tai se on pienempi, kuin käytettäessä A-äänitasoa äänekkyyden mittana.^{139, 415, 413} On syytä huomata, että kun signaalin kaistaleveys on kriittistä kaistaa kapeampi ja peittävä taustamelua ei ole, niin signaalin detek-

* Äänestäiseksi sanotaan ääntä, jossa kapeakaistaisuuden aiheuttajana on diskreettitaajuinen sinimäinen komponentti. Yleisessä tapauksessa kapeakaistaisuuden aiheuttava “piikki” on jatkuvaspektrinen.

toitavuus (havaittavuus) ja äänekkyyys riippuvat vain signaalin kokonaisenergiasta, ei kaistaleveydestä.^{416, 179, 180}

Yleensä korjaus on positiivinen (lisäys), mutta joissakin tapauksissa äänestämisyyskorjaus voi olla negatiivinen, so. mittaustuloksesta tulisikin vähentää jotakin.^{413, 417, 139} Esimerkiksi soitinten äänet ja musiikki, voivat olla miellyttävämpiä kuin vastaavan voimakkuinen melu tai kohina. Musiikkiäänien ja muiden "soitannallisten" äänien, esimerkiksi laululinnun laulun, kapeakaistaisuutta kutsutaan usein *tonaalisuudeksi*,* joka ymmärretään äänen miellyttävyyden ominaisuudeksi.⁴¹⁸ Erään puhallinmelututkimuksen mukaan (400 puhallinmeluspektriä) saman A-tason omaavien kapeakaistaisista komponentteja sisältävien puhaltimien (laskettu) äänekkyyys oli tyypillisesti alhaisempi kuin laajakaistaista melua tuottavien puhaltimien.¹⁴¹

Kirjallisuudessa esitetyt kapeakaistaisuuden mittausten menetelmät perustuvat yleensä sitä aiheuttavan tai aiheuttavien äänikomponenttien äänekkyyden erotettavuuteen. Määritysmenetelmä on yleensä seuraavan tapainen:

1. Äänen spektrin mitataan. Spektrin erottelutarkkuus on nykyisin vähintään noin 4...5 %:a vastaavan kriittisen kaistan leveydestä.
2. Haetaan ne komponentit, joiden voimakkuus on vähintään 6...7 dB naapurikomponenttien voimakkuutta suurempi.
3. Selvitetään, mitkä komponentit peittyvät naapurikaistojen vuoksi, mitkä eivät. Otetaan jatkoprosessointiin ne, jotka eivät peity.
4. Määritetään kunkin jäljelle jääneen komponentin suhteellinen voimakkuus.
5. Painotetaan kutakin em. komponenttia siten, että otetaan huomioon kuulon herkkyys ko. taajuusalueella.
6. Normalisoidaan komponentit signaalin ja ko. kriittisen kaistan ei-äänestämisen äänen voimakkuuteen.

Kapeakaistainen ääni jaetaan kahteen osaan: kapeakaistaisuutta aiheuttavaan komponenttiin ja kohinaan. Olkoon kapeakaistaisuutta aiheuttavan komponentin "voimakkuus" tietyn kriittisen kaistan sisällä W_t ja jäljelle jäävän kohinan, kun kapeakaistakomponentti on poistettu, W_n . Kapeakaistakomponentin äänes-kohina-suhde tai -ero määritellään tasoksi

$$(30) \quad T_{NR} = 10 \lg \frac{W_t}{W_n} \text{ dB}$$

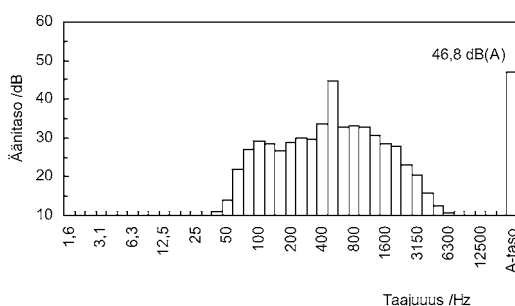
Jos T_{NR} on 6...7 dB tai suurempi, komponenttia kutsutaan esiin pistäväksi (engl. prominent). Kaava on yksinkertainen, mutta sen määrittäminen on usein vaikeaa; esimerkiksi kun kaavan molemmat tekijät tai toinen vaihtelee ajallisesti.

* Englanninkielinen sana tonality tarkoittaa sekä äänestämisyttä että musiikissa tonaalisuutta (vrt. tonal music). Lisäksi sitä on käytetty äänen taajuutta vastaavan muuttujan nimenä kriittisten kaistojen Bark-asteikolla.

Eri henkilöiden arviot äänestäisyyden ja kapeakaistaisuuden kynnysarvosta ja voimakkuudesta vaihtelevat jossain määrin. Kynnysarvo on se äänestäisyyden tai kapeakaistaisuuden määrä (voimakkuus), jonka kuulija arvioi olevan juuri ja juuri äänestäistä tai kapeakaistaista.⁴¹⁹

Äänen äänestäisyys voi riippua muistakin seikoista kuin sen äänenpainetasosta. Esimerkiksi siitä, kuinka tarkkaavaisesti kuulija on keskittynyt ääntä kuulemaan.⁴²⁰ Jos äänestäisyys on voimakkuudeltaan ajallisesti muuttuvaa, niin äänitasoltaan alenevan äänen äänestäisyys on pienempi kuin olisi vastaavan tasoisen vakioäänestän äänestäisyys. Ilmiötä nimitetään dekrummentiksi.⁴²⁰

Kuvassa 20 on esimerkki melun terssispektristä, jossa on sekä kuulohavainnon perusteella että A-taajuuspainotteista terssispektristä arvioituna kapeakaistainen komponentti (piikki 500 Hz kaistalla).



Kuva 20: Esimerkki kapeakaistaisen melun terssispektristä

Kuuloaistin kyky erottaa äänestäisiä komponentteja kohinasta on hyvin selektiivinen ja herkkä. Erottamiskynnys riippuu tarkkaavaisuudesta. Tehostettu tarkkaavaisuus pystytään fokuoimaan samanaikaisesti yhdelle tai useammalle taajuuskaistalle, joiden leveys on alle 1 kHz taajuuksilla noin puolet kriittisen kaistan leveydestä ja yli 1 kHz yläpuolella hieman kriittistä kaistaa suppeampi. Tällainen tarkkaavaisuuden jakaminen selittää mm. sen, että kuulija pystyy erottamaan ja seuraamaan suuren orkesterin äänestä tietyn soittimen ääntä, vaikka se olisi merkittävästi hiljaisempaa kuin muiden soittimien ääni yhteensä.^{421, 422} Fokusointi epäherkistää fokuointikaistojen ulkopuolelle jäävien äänestän äänestäisyyttä noin 7 dB:llä.

Kuuloaisti pystyy erottamaan laajakaistaisesta kohinasta äänen, jonka taso on 4...6 dB alhaisempi kuin ko. kohinan terssipainetaso kyseisellä keski-taajuudella.⁴²³ Toisin sanoen, kuuloaisti pystyy erottamaan äänen, joka ei välttämättä lisää äänen kokonaisäänestäisyyttä. Äänestä voi kuitenkin lisätä melun kiusallisuutta ja häiritsevyyttä, mahdollisesti myös meluisuutta. Kiusallisuuden, häiritsevyyden ja meluisuuden kasvu saattaa johtua ainakin osittain siitä, että kuulija kohdistaa edellä mainitun tehostetun tarkkaavaisuuden tiedostamattaan tai tietoisesti ko. äänestä. Toisaalta on muistettava, että samanaikaisesti esiintyvä melu voi peittää äänen. Mitä voimakkaampaa peittävä melu on, sitä voimakkaamman täytyy äänenkin olla, jotta se erottuisi.⁴²⁴

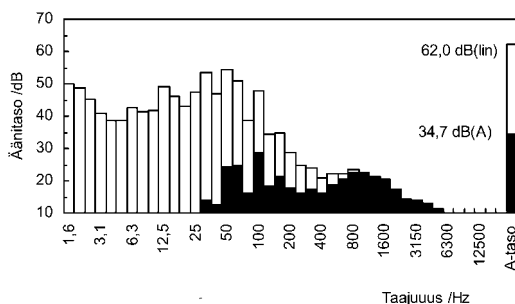
Kun laajakaistainen kohina peittää osittain ääneksen, on ääneksen ”peitetty” äänekkyyks⁴²⁵

$$(31) \quad N_t \approx k \left[I_t^a - (I_n + I_{0,t})^a \right]$$

jossa I_t^a on ääneksen intensiteetti (voimakkuus), I_n peittävään äänen intensiteetti, $I_{0,t}$ kuulokynnystä vastaavan ääneksen intensiteetti (kuuloaistin sisäinen neurokohina), eksponentti a noin 0,3.

Kuvassa 21 on esimerkki terssispektristä, jossa mittaustuloksen perusteella näyttäisi olevan kapeakaistainen komponentti 100 Hz kaistalla ja ”jotakin epäilyttävää” myös 50 Hz ja 63 Hz kaistoilla. Kuvassa on esitetty saman melun painottamaton ja A-painotettu terssispektri. A-taso on melko hiljainen, noin 35 dB(A). Kyseessä on sama melu, jonka kapeakaistaspektri on esitetty aikaisemmin kuvassa 7.

Kuvan 21 tilanne oli sikäli mielenkiintoinen, että kuulohavainnoin oli hyvin vaikea erottaa riittävän selvää kapeakaistaisuuteen viittaavaa ominaisuutta. Syynä oli se, että komponenttien voimakkuus vaihteli ajallisesti ja se, että etenkin alempien komponenttien taajuus huojui, mikä käy ilmi myös kuvasta 7. 50 Hz ja 63 Hz seutuilla olevat piikit eivät ole yhtä teräviä (kapeita) kuin 100 Hz taajuinen piikki, joka sekin on leventynyt huojunnan vuoksi. Mittauksin ja kuulohavainnoin todettiin lisäksi, että jo melko vähäinen liikennemelu, jopa voimakas ulkoa kuuluva tuulikohina, peitti kyseiset piikit alleen.



Kuva 21: Erään melun painottamaton (rasterioimaton) ja A-painotettu terssispektri (rasteroitu).

Melussa voi olla useita kapeakaistaisuuden tekniset kriteerit täyttäviä komponentteja saman kriittisen kaistan sisällä (kuten edellisessä esimerkissä). Tällaisissa tapauksissa on vaikea sanoa mittaustietojen perusteella, miten eri komponentit vaikuttavat kapeakaistaisuuteen; etenkin, jos komponenttien taajuus tai voimakkuus vaihtelee ajallisesti.⁴²⁶

Tarkastellaan lähemmin kapeakaistaisuuden vuoksi tehtävän korjauksen perusteita. Kohteena on tilanne, jossa leveäkaistaiseen ääneen (esim. kuva 20, ilman 500 Hz piikkiä) lisätään kapeakaistainen komponentti (ko. 500 Hz piikki). Lisäys nostaa äänenpainetasoa ΔL dB. Tämän seurauksena äänekkyytys ja äänekkyytystaso kasvavat. Myös meluisuus ja meluisuustaso kasvavat.

Yleensä kapeakaistaisen komponentin lisäys muuttaa myös äänen kiusallisuutta^{427, 428, 429} ja havaittavuutta (erotettavuutta). Jäljempänä tätä kiusallisuuden muutosta on merkitty ΔA .

Ääneksen tuottama äänenpainetason kasvu, ΔL , voidaan todeta äänitasomittarilla. Äänekkyiden ja meluisuuden kasvun toteamiseksi on olemassa kohtuullisen hyviä standardoituja arviointimenetelmiä.^{430, 431} Silloin, kun äänemäisen komponentin taso ei ylitä vähintään 5 dB:llä viereisten terssien tason keskiarvoa, jää sen aiheuttama äänekkyystason kasvu foneina, ΔL_N , ja meluisuustason kasvu PNdB-tasona yleensä pienemmäksi kuin äänenpainetason kasvu desibeileissä.⁴¹² Sama asia voidaan todeta myös sanomalla, että tietyn vakioäänepainetason omaava kohinaääni on noin kolme kertaa äänekkeämpää kuin samantasoinen vakioäänes. Jos kapeakaistaisen komponentin taajuus (äänen korkeus) vaihtelee ajallisesti, sen äänekkyys on suurempi kuin saman äänitason omaavan vakiotaajuisen ääneksen äänekkyys.²²¹

Terssitason eron tulee olla tyypillisesti vähintään edellä mainittu 5 dB, jotta komponentti lisäisi äänekkyystasoa (ja subjektiivista meluisuutta) enemmän kuin äänenpainetasoa. Eron ollessa yli 15...20 dB(A), äänekkyys ja meluisuus määräytyvät pääasiassa ääneksen tason ja keston perusteella.⁴²⁸ On kuitenkin tapauksia, joissa 5 dB suurempi terssitasoero ei lisää äänekkyyttä, mutta lisää kuitenkin kiusallisuutta ja vaikeuttaa esimerkiksi nukahtamista intrusiivisuutensa vuoksi.

Edellä on oletettu, että sekä kapeakaistainen komponentti että muu osa melun spektristä ovat ajallisesti (riittävän) vakioita. Ei kuitenkaan ole harvinaista, että kapeakaistapiikin tai -piikkien voimakkuus ja/tai muun melun voimakkuus vaihtelee hetkellisesti. Tällaisten kapeakaistaisuudeltaan vaihtelevien melujen kapeakaistaisuuden korjaustarvetta ja -menetelmiä on tutkittu hyvin vähän.

Matala- ja keskitaajuiset kapeakaistaiset komponentit voivat aiheuttaa ääneen karheutta (engl. roughness). Karheus voi lisätä äänen kiusallisuutta (epämiellyttävyyttä) enemmän kuin pelkkä ”saman suuruinen” kapeakaistaisuus. Useamman kapeakaistaisen komponentin yhteisvaikutuksen aiheuttaman karheuden voimakkuus riippuu komponenttien voimakkuuden lisäksi niiden keskinäisistä vaihe-eroista.⁴³² Mitatusta terssispektristä ei voi päätellä mahdollisten vaihe-erojen vaikutusta kapeakaistaisen melun karheuden voimakkuuteen.

Kapeakaistaisen komponentin aiheuttamalle *kiusallisuuden muutokselle**, ΔA , ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä psykoakustista teoriaa eikä standardoituja mittausten menetelmiä. Voimme kuitenkin – ainakin periaatteessa – määrittää kokeellisesti kuinka paljon kyseessä olevan leveäkaistaisen äänen†

* Tässä tapauksessa kiusallisuus kasvaa äänen prominenssin tai intrusiivisuuden kasvun vuoksi. Jos komponentin kuulee, huomio kiinnittyy, ”lukkiutuu” helposti siihen.

† Jos vertailuäänenä on jokin muu ääni kuin kyseinen ääni tutkittava kapeakaistainen piikki poistettuna, muutkin seikat kuin ko. piikki vaikuttavat arvioon. Esimerkiksi vertailuäänenä käytettävä (kohina)ääni saattaa olla jo itsessään huomattavasti epämiellyttävämpää (kiusallisempaa) kuin tutkittava ääni.

äänepainetasoa (“voimakkuutta”) tulee lisätä (tai vähentää), jotta koehenkilöt arvioivat sen yhtä kiusalliseksi kuin kyseessä olevan leveäkaistaisen äänen, johon on lisätty kyseessä oleva kapeakaistainen komponentti.⁴³³ Lisäystä (tai vähennystä), K_K [dB], voidaan kutsua äänestäisyyden korjaukseksi. Samaa menetelmää voidaan käyttää äänekyyden ja meluisuuden korjauksen selvittämiseen. Laajakaistaisen ja kapeakaistaisen melun äänekyyden subjektiivinen vertailu voi olla vaikeaa, so. tulokset voi olla epämääräisesti kapeakaistaisuuden voimakkuudesta riippuvia.¹⁴¹

Toinen tapa kapeakaistaisuuskorjauksen määrittämiseen on verrata kapeakaistaista melun vastetta jonkin referenssimelun vasteeseen, esimerkiksi tieliikennemelun. Kapeakaistainen melu koetaan usein haitallisemmaksi (kielteisemmäksi) kuin vastaavan tasoinen ei-kapeakaistainen melu. Oletetaan, että ei-kapeakaistaisen melun, esimerkiksi tieliikennemelun, haitallisuusvasteen voimakkuus, A_{ei-kp} , riippuu sen ekvivalenttitasosta lineaarisesti

$$(32) \quad A_{ei-kp} = a_{ei-kp} + b_{ei-kp} L_{Aeq}$$

ja kapeakaistaisen melun vaste, A_{kp} , samoin

$$(33) \quad A_{kp} = a_{kp} + b_{kp} L_{Aeq}$$

Kapeakaistaisuuskorjaus, ”rangaistus” (engl. penalty), P_{kp} , joka on lisättävä kapeakaistaisen melun L_{Aeq} -tasoon, jotta koettu kapeakaistaisen melun vertailumelua suurempi haitallisuus tulisi huomioon otetuksi

$$(34) \quad P_{kp} = \frac{a_{kp} - a_{ei-kp} + (b_{kp} - b_{ei-kp}) L_{Aeq}}{b_{ei-kp}}$$

Korjauksen suuruus riippuu sekä käytetystä haitallisuuden mittayksiköstä (esim. kiusallisuus tai meluisuus), vertailusuurena käytetystä melusta (esim. tieliikenne tai kohina) ja kapeakaistaisen ominaisuuksista. Esimerkiksi Helmann⁴¹⁷ päätyy tutkimuksessaan siihen, että kun 1 kHz taajuisen ääneksen terssitaso on vähintään 15 dB suurempi kuin viereisten kaistojen taso, äänekkyys on kiusallisuutta suurempi, mutta eron ollessa tätä pienempi kapeakaistaisuus lisää kiusallisuutta enemmän kuin äänekkyyttä.

Tutkimukset viittaavat siihen, että useilla ympäristömeluilla kapeakaistaisuuden aiheuttama kiusallisuuden lisäys saattaa aleta melun voimakkuuden kasvaessa. Esimerkiksi italialaisessa laboratoriotutkimuksessa päätettiin seuraavaan kiusallisuuskorjaukseen, P_{kp} [dB(A)], (engl. penalty)

$$(35) \quad P_{kp} = 18,3 - 0,24 L_{Aeq}$$

jossa L_{Aeq} on kyseisen melun ekvivalenttitaso [dB(A)].⁵⁰²

Kuten edellä viitattaessa kuviin 7 ja 21 on jo todettu, kapeakaistaisuuden yksikäsitteinen toteaminen mittaamalla voi olla vaikeaa. Tiedetään, että “kapeakaistapiikin” terssispektrierotukseen perustuva menetelmä voi antaa virheellisen “tuomion”. Melu saatetaan todeta kapeakaistaiseksi, vaikka se ei sitä psykoakustisesti olekaan tai päinvastoin.

Prominenssisuhde^{434, 435} saattaisi olla hieman parempi menetelmä kuin terssikaistaerotukseen perustuvat menetelmät. Mittaus edellyttää kapeakaista-analysointia, jolla pystytään toteamaan ko. äänneksen äänenpainetaso L_{pk} [dB] ja taajuus f_k [Hz] sekä f_k -keskitaajuuiselle kriittiselle kaistalle jäävän taustamelun äänenpainetaso, L_{pt} , kun äänes on (laskennallisesti) poistettu mitattavasta signaalista. Äänes on katsottava selvästi erottuvaksi ja melu vähintään heikosti äänemäiseksi, jos erotus $L_{pk} - L_{pt} > 6$ dB. Tätä menetelmää käytetään ISO 14605 ja ANSI S12.10-1985 standardissa tieto- ja toimistokoneiden melun äänemäisyyden toteamiseen.^{436, 437} Kansainvälinen standardointijärjestö, ISO, on julkaissut vastaavan standardiehdotuksen.⁴³⁸ ANSI-standardia on kritisoitu mm. siitä, että se ei ota huomioon tapauksia, joissa kapeakaistaisuuden syynä on useampi kuin yksi “piikki”, joiden taajusero on suurempi kuin kriittisen kaista leveys.⁴³⁴

Äänille, joissa on useita äänemäisiä komponentteja (piikkejä) otetaan ANSI S12.10-1985 standardin mukaan huomioon vain se, jonka vaikutus A-äänitasoon on suurin. On mahdollista, että tämä piikki ei täytä ehtoa $L_{pk} - L_{pt} > 6$ dB, mutta jokin sen harmonisista – jota ei standardin mukaan tutkita – täyttää. Saman kriittisen kaistan sisään sattuva toinen hieman eritaajuinen äänes voi standardin mukaan peittää ensimmäitun, jolloin kumpikaan piikki ei täytä kriteeriä $L_{pk} - L_{pt} > 6$ dB, vaikka ääni kuulostaisikin äänemäiseltä.⁴³⁷

Jotta kaksi, taajuuden f [Hz] ympäristössä lähekkäisillä taajuuksilla, f_p ja f_s [Hz], olevaa äänestä erottuisivat eri ääniksi, tulee niiden taajuseron, $f_d = |f_s - f_p|$ [Hz] olla vähintään⁴³⁹

$$(36) \quad f_d = 21 \cdot 10^{1,2 \left(\lg \frac{f}{212} \right)^{1,8}} \text{ Hz}$$

Kapeakaistaisuuden analysointiin on esitetty myös menetelmää, joka ottaa huomioon prominenssin lisäksi äänisignaalin olevien muiden taajuuskomponenttien aiheuttamaa peiton sille kriittiselle kaistalle, jolla kapeakaistainen komponentti on. Esimerkiksi Englannissa on kehitetty peittoilmiöön perustuva tuuligeneraattoreiden äänemäisyyden mittausmenetelmä.⁴⁴⁰ Olakseen äänemäinen, “piikin” on oltava vähintään 6 dB voimakkaampi kuin piikin ympäristössä olevien kriittisten kaistojen peittotas.^{440, 441} Menetelmä edellyttää kapeakaista-analysointia ja on työläs. Menetelmän edellyttämä spektrianalyysin taajuudenerottelu, Δf , on $3 \pm 0,5$ Hz.

Saksassa on esitetty DIN 45681-standardiehdotuksissa samantapainen äänemäisyyden arviointimenetelmä kuin Englannissa tuuligeneraatto-

reiden melulle.^{442, 443} Uudistetut Saksan ympäristöministeriön melunarviointiohjeet [TA Lärm, luku A.3.3.5(2)] viittaavat tähän standardiehdotukseen. Äänemäisyyskorjaus riippuu erotuksesta

$$(37) \quad \Delta L = L_{tone} - L_{mask,kr} - a_{mask,ind}$$

jossa L_{tone} on ääneksen äänenpainetaso [dB], $L_{mask,kr}$ on peittävän äänen taso [dB] sillä kriittisellä kaistalla, jolla äänes on ja $a_{mask,ind}$ on peittoindeksi [dB]. Äänemäisyyskorjaus, K_r , on liukuva 0...6 dB. Esimerkiksi, kun $\Delta L \leq 0$ dB, on $K_r = 0$ dB. Kun $\Delta L \leq 4...6$ dB, on $K_r = 3$ dB ja, kun $\Delta L > 10$ dB, on $K_r = 6$ dB. Menetelmää on kritisoitu vaikeaksi, virhealttiiksi ja virheelliseksi äänille, joissa melussa oleva äänemäisen osa koostuu useista harmonisista komponenteista.^{444, 445}

Melussa voi olla useita kapeakaistaisia komponentteja. Näyttää siltä, että kaksi ja useampi samanaikainen komponentti lisää äänekkyyttä, meluisuutta ja kiusallisuutta vähemmän kuin yksi komponentti.⁴⁴⁶ Komponenttien yhteisvaikutus kiusallisuuteen näyttäisi olevan alhaisin taajuuseron ollessa noin 250 Hz. Kiusallisuus näyttää kasvavan taajuuseron pienentyessä ja suurentuessa.⁴¹⁷

Tapauksissa, joissa spektrissä on runsaasti "piikkejä", joiden taajuusero on melko pieni, auditiivinen "barkkisperktri" eli spektri, jossa taajuusresoluutio noudattaa kriittistä kaistaleveyttä, antaa oikeamman kuvan äänemäisyyden prominenssista kuin pelkkä kaistakohtainen tarkastelu.⁴⁴⁷ Menetelmää ei voida suositella kuitenkaan säveläänien – so. äänien, joissa ääni muodostuu perustaajuudesta ja sen harmonisista kerrannaisista – kapeakaistaisuuden arviointiin. Syynä on se, että on olemassa erittäin vähän tutkimuksia siitä, missä määrin mahdollinen säveläänien (musiikin) kapeakaistaisuus on seikka, joka lisää niiden äänekkyyttä, meluisuutta tai haitallisuutta verrattuna vastaavan A-äänitasoiseen muuhun taajuudeltaan ja voimakkuudeltaan vaihtelevia kapeakaistakomponentteja sisältävään meluun.

Puheen ja musiikin spektri ja voimakkuus vaihtelevat jatkuvasti. Vokaalit ja säveläänet koostuvat perustaajuisesta (f_0) ja sen harmonisista eli monikertaisista (kf_0 , $k = 1, 2, \dots, n$) ääneksistä. Lukuisista harmonisista huolimatta tällaisella äänellä on vain yksi äänen korkeus. Terhardt *et al.*⁴⁴⁸ on esittänyt menetelmän tällaisten seosäänien äänenkorkeuden määrittämiseen. Menetelmään sisältyy myös äänemäisten komponenttien erottaminen signaalista ja äänemäisyyden voimakkuuden tai esiin pistävyyden (engl. salience) arviointi.

Elävän ja tallennetun musiikin äänekkyydessä on se ero, että kun soittaja lisää elävässä musiikissa äänen voimakkuutta, niin spektrin muoto muuttuu, mutta kun lisätään tallennetun musiikin voimakkuutta spektri pysyy saman muotoisena eli eritaajuisten komponenttien voimakkuussuhteet eivät muutu. Spektrin muodon muuttuminen vaikuttaa äänekkyyteen. Yleensä korkea-taajuisten komponenttien voimakkuus kasvaa soittimen äänenvoimakkuutta

lisättäessä suhteellisesti enemmän kuin matalataajuisten. Tämä lisää äänekkyttä enemmän kuin lisättäessä saman verran tallennetun musiikin äänitasa.⁴⁴⁹

Hiljaisten vakiotasoisten sisämelujen, esimerkiksi huippumurin melun, kapeakaistaisuuden tuottaman lisähaitallisuuden arviointia vaikeuttaa se, että äänekkyuden adaptoituminen on merkittävän suurta ääneksillä, joiden voimakkuus on korkeintaan 30 dB kuulokynnystä suurempi. Esimerkiksi 125 Hz taajuinen 15 dB kuulokynnyksen ylittävän ääneksen äänekkyys laskee noin puoleen kuudessa minuutissa.⁴⁵⁰ Kapeakaistaisuus voi olla selvästi kuulohavainnoin erottuvaa heti huoneeseen saapumisen jälkeen, mutta ei erotu lainkaan kuuden minuutin kuluttua.

Kuten edellä on todettu kuuloaisti pystyy erottamaan ääneksen, jonka taso on jonkin verran (n. 4 dB) alhaisempi kuin samalla kriittisellä kaistalla samanaikaisesti esiintyvän muun äänen taso. Joissakin tapauksissa pelkästään selvä erottuminen saattaa riittää siihen, että altistettu kokee äänen niin intrusiiviseksi, että ääni vaikeuttaa suuresti nukahtamista tai lepoa (mutta ei toimintoja, jotka itse aiheuttavat ääntä).*

Kansalaisten kuulokynnys vaihtelee.²³⁶ Osalla ihmisiä on standardia parempi kuulokyky, osalla huonompi. Normaalkuuloisten kuulokynnys on normaalijakautunut suure. Käytännön pulmia ajatellen on todennäköistä, että ne ihmiset, joilla äänekkyuden adaptaatio toimii hyvin ja joiden kuulokyky ei ole standardiarvoja merkittävästi parempi, eivät yleensä valita ("kärsi") sellaisista äänemäisistä meluista, joiden mitattu taso ei ylitä selvästi yöajan ohjearvoa, mutta korjattu taso ylittää ohjearvon 2...4 dB(A). Toisin sanoen, terveysvalvonnalta tultaneen vaatimaan ratkaisuja melko harvoin sellaisissa valitustapauksissa, joissa kapeakaistaisuuskorjaus on aiheellinen mittaustuloksen perusteella, mutta jota altistettu ei erota korostetun kapeakaistaiseksi.

Impulssimaisuus

Impulssimaiseksi tai iskumaiseksi sanotaan yleensä melua, jossa on erotettavissa yksi tai useampia alle yksi sekuntia kestäviä voimakkaita ääniä.⁴⁵¹ Impulssimaisille meluille on tunnusomaista

- nopea ja suuri äänitason kasvu äänen alussa, tyypillisesti 20 dB/ms
- melko lyhyt äänitason vakio-osuus nousun jälkeen. Tyypillisesti 0 – 100 ms,
- vaihtelevan pituinen ja nopeuksinen äänitason vaimentuminen signaalin lopussa. Tyypillisesti 20 dB:n vaimentuminen kestää 30 – 500 ms.

* Hiljaisissa oloissa haitan vähentämiskorjauksena saattaisi olla vähäinen muiden äänien lisääminen (ko. kriittisellä kaistalla), jos kapeakaistaista ääntä ei voida vaimentaa.

Jo yleisen elämäkokemuksen perusteella voidaan lähteä siitä, että jos impulssit ovat samanlaisia, niin haitallisuutta arvioitaessa tulisi ottaa huomioon tavalla tai toisella impulssien määrä ja toistotaajuus.⁴⁸⁰ Jos impulssit ovat voimakkuudeltaan, määrältään tai toistotaajuudeltaan erilaisia, niin olisi löydettävä menetelmät, joilla erilaiset impulssimelut saadaan haitallisuuden – so. kulloinkin kyseessä olevan vaikutuksen – kannalta yhteismitallisiksi.

Impulssimaisen melun äänekkyyys, meluisuus ja kiusallisuus – sekä erilaisiin toimintoihin kohdistuva häirintävoimakkuus – saattavat erota suuresti siitä, mitä vastaavan äänitason omaava jatkuva, tasainen melu aiheuttaa. Yleensä impulssimaisuuden katsotaan lisäävän koettua haitallisuutta tai kielteisyyttä verrattuna saman äänitason omaavaan tasaiseen meluun. Päinvastaisiakin tutkimustuloksia on. Esimerkiksi eräessä japanilaisessa laboratorionkokeessa todettiin saman L_{Aeq} -tason omaavan impulssimaisen melun häiritsevän lukemista ja musiikin kuuntelua vähemmän kuin tasaisen vakiomelun tai ajoittain keskeytyvän melun.⁴⁵² Toisessa japanilaisessa laboratoriotutkimuksessa todettiin, että impulssimaisen rakentamistöiden melun kiusallisuuden arvioinnissa ei tarvita korjauksia $L_{Aeq, 5 \text{ min}}$ -tasoon.⁴⁵³

Yksittäisten impulssiäänien ja impulssisarjojen äänekkyyden stabiloitumisaika saattaa olla jopa noin 400 ms. Esimerkiksi simuloitujen louhimoiden räjäytysäänien äänekkyyys riippui impulssin kestosta ja lyhyiden (n. 25 ms) impulssien lukumäärästä hyvin jyrkästi noin 100 ms asti, minkä jälkeen äänekkyyden kasvu keston ja/tai lukumäärään funktiona hidastui ja saavutti asymptoottisen rajan noin 400 ms jälkeen.⁴⁵⁴ Tanskalaisessa impulssimelututkimuksessa päädyttiin 80 ms stabiloitumisaikaan.¹⁹³

Voimakas impulssimelu, kuten laukausääni, aiheuttaa pelästymisheijasteena tunnetun reaktion. Heijaste ilmenee tahdottomana säpsähdyksen omaisena liikkeenä tai liikesarjana. Jälkireaktioina on usein vahva, tiedostomaton tarve paikantaa ja tunnistaa melun syy. Pelästymisheijasteesta käytetään myös nimitystä säpsähdyksireaktio. Laboratorionkokeissa on todettu, että koehenkiöiden arvioiden mukaan L_{Amax} -tasoltaan alle 60...65 dB(A) laukausäänet eivät aiheuta säpsähdyksireaktiota, mutta 80 dB(A)-tasoiset jo aiheuttavat merkittävän suuren reaktion.⁴⁵⁵

Lyhytaikaisten laboratorionkokeiden ($N \approx 3000$) perusteella Griefan *et al.*⁴⁵⁶ totesivat, että impulssimelun epämiellyttävyyys kasvaa yksittäisten impulssien voimakkuuden ja toistotaajuuden kasvun myötä. Sydämen syketaajuus ei riippunut systemaattisesti voimakkuudesta (L_{Aeq} , L_{Amax}), mutta kasvoi impulssien toistotaajuuden (alue 0,25 – 16 kpl/s) kasvaessa (kasvu tällä alueella n. 2 lyöntiä/min). Verisuonten supistuminen (sormenpäästä mitattu verivirta) riippui L_{Aeq} -tasosta, mutta ei L_{Amax} -tasosta eikä toistotaajuudesta.

Kun impulssimelu eroaa vaikutuksiltaan monista muista melusta, niin joudumme kysymään: mitä mittayksikköä ja mittaustapaa impulssimelun arvioinnissa tulisi käyttää ja millaisia korjauksia tuloksiin pitäisi tehdä, jotta tulokset kuvaisivat impulssimelun subjektiivista voimakkuutta (änekkyyys, meluisuus, kiusallisuus) ja/tai haitallisuutta.

Impulssimaisen melun arvioinnissa käytettävät mittayksiköt (suureet)

Monet signaalin ominaisuudet vaikuttavat impulssimaisuuteen sekä impulssimaisten melujen äänekkyteen, meluisuuteen ja kiusallisuuteen. Esimerkiksi väärin päin (lopusta alkuun) toistetut nauhoitetut laukausäänet koetaan äänekkäämmäksi kuin oikein päin toistetut.⁴⁵⁷

Yksittäin esitettyjen impulssiäänien ja alle kolme sekuntia kestävien impulssisarjojen äänekkyys riippuu melko hyvin äänen A-painotetusta äänialtistustasosta.^{458, 459, 460, 461} L_{AFmax} - ja L_{ASmax} -tasot on todettu laboratorio-oloissa (lähes) yhtä hyväksi tällaisten impulssiäänien äänekkyuden indikaattoreiksi kuin L_{AE} -taso, mutta L_{Almax} -tason todettiin yliestimoivan äänekkyyttä.⁴⁶² Aiemmin mainittu tanskalaistutkimus tukee tätä käsitystä.¹⁹³

Äänialtistustaso saattaa kuitenkin aliarvioida vaimentuvien alle 60 ms pituisten impulssien äänekkyuden.⁴⁶³ Sisätiloissa kaiunta yleensä lisää signaalien pituutta, mistä syystä 60 ms lyhyempien impulssien pitäisi olla harvinaisia. Ulkona ja ulkoa sisään asuntoihin voimakkaana kuuluvan ampumaratamelun ja räjäytysäänien kesto (pituus, taustamelun tason ylittävä aika) on yleensä 0,5...2 s. Äänten kesto lisää metsissä ja maastossa tapahtuva edestakainen sironta sekä heijastukset ja sekä ainakin joissain tapauksissa rakennusosien räminä tai helinä.

Monissa ennen vuotta 1990 tehdyissä tutkimuksissa on päädytty siihen, että enimmäistaso olisi äänialtistustasoa tai ekvivalenttitasoa parempi impulssimelun äänekkyuden, meluisuuden tai/ja kiusallisuuden mitta. Esimerkiksi Kumagai *et al.*⁴⁶⁴ totesivat modifioidun enimmäisäänepainetason, L_{md} [dB],

$$(38) \quad L_{md} = \frac{L_{A,5ms,max} + L_{AFmax}}{2} - 4$$

korreloivan hyvin yksittäisimpulssien äänekkyteen. Kaavassa $L_{A,5ms,max}$ on A-taajuuspainotettu enimmäistaso aikapainotuksen ollessa 5 ms. L_{AFmax} on A-taajuus ja fast-aikapainotettu enimmäistaso.

Impulssisarjojen subjektiivinen meluisuus näyttäisi olevan hieman suurempi kuin niiden äänekkyys.⁴⁶⁵

Viimeaikaisissa tutkimuksissa on yleensä päädytty siihen, että impulssimaisten äänien yhteenlaskettu korjattu äänialtistustaso ja sen avulla määritetty ekvivalenttitaso korreloivat vähintään yhtä hyvin tai paremmin kuin erilaiset maksimitasot subjektiivisiin kokemuksiin, kuten äänekkyteen, meluisuuteen ja kiusallisuuteen.^{694, 489, 465} Esimerkkinä voidaan mainita myös japanilainen tutkimus, jossa todettiin L_E - ja L_{Smax} -aikapainotusta käyttäen mitattujen äänenpainetasojen korreloivan paremmin eritaajuisten yksittäin esitettyjen eksponentiaalisesti vaimentuvien impulssiäänien äänekkyteen kuin impulssi- ja fast-painotusta käyttäen mitattujen.⁴⁶⁶

Monissa tutkimuksissa on todettu, että ainakin laukausäänien kiusallisuus riippuu voimakkuuden lisäksi impulssien päivittäisestä lukumäärästä (N). Muun muassa australialaisen ja hollantilaisen ampumaratamelututkimusten mukaan "10 lg N "-riippuvuus on käyttökelpoinen.^{467, 468}

Impulssimaisten äänien äänekkyyys ja kiusallisuus eivät välttämättä riipu subjektiivisen *impulssimaisuuden* voimakkuudesta.⁴⁶⁹ Tämä tarkoittaa sitä, että toinen yhtä äänekkäästä tai kiusallisesta melusta voidaan arvioida huomattavasti impulssimaisemmaksi (jos siitä arviota kysytään). Näyttää siltä, että yksittäisen impulssin keston pidentäminen lisää äänekkyyttä (ja kiusallisuutta?), mutta pienentää impulssimaisuutta.⁴⁹⁷

Kirjallisuudessa on esitetty myös tutkimuksia, joissa jokin muu yksikkö kuin L_{AE} -taso on todettu samanarvoiseksi tai hieman paremmaksi impulssimelun haitallisuuden mittariksi. Vain harvoissa tutkimuksissa kohteena on ollut sellaiset äänet, joka olivat laadultaan ja melutasoltaan sisätiloille tyypillisiä. Useimmat tutkimukset koskevat ulkomeluja tai laboratorioissa esitettyjä meluja, joiden voimakkuus on ulkomeluille tyypillinen.

Impulssimaisen signaalin ajallisen vaihtelun muoto muuttuu etenemisen aikana, sitä enemmän mitä pitempi etenemismatka on, ja mitä enemmän heijastukset ja sironta vaikuttavat. Esimerkiksi ampuma-aseiden impulssimaisen melun kiusallisuus muuttuu jyrkemmin äänitason noustessa ja laskiessa kuin liikennemelun kiusallisuus. Amerikkalaisessa tutkimuksessa tykkikaliiperisten aseiden ulkomelun L_{CE} -tason 0,5..1,0 dB muutoksen on todettu aiheuttavan saman kiusallisuuden muutoksen kuin autojen ohiajon tai lentokoneiden ylilennon tai valkoisen kohinan purskeen L_{AE} -tason muutos 2 dB:llä. Molemmat aiheuttivat ulkona kuunneltaessa saman kiusallisuuden melutapahtuman äänialtistustason ollessa 103 dB.^{470, 471}

Pieni- eli matalataajuinen impulssimelu, kuten suuri kaliiperisten aseiden ja räjäytysten äänet sekä ylääänipamaukset aiheuttavat yleensä myös ikkunoiden ja rakennusten muiden osien osien räminää (esim. ikkunapuitteiden helisemistä karmeja vasten). Nämä lisäävät kiusallisuutta. C-taajuuspainotettujen tasojen käyttöä melun voimakkuuden mittana perustellaan yleensä sillä, että C-painotettu taso indikoi paremmin odotetavissa olevan äänen ja räminöiden yhteisvaikutusta, kuin A-painotettu taso.⁴⁸⁰ Päinvastaisiakin tuloksia on saatu. C-painotus ei ole A-painotusta parempi.⁴⁷²

Laboratoriotutkimuksissa *impulssimaisuuskorjaukseksi* kutsutaan sitä vertailuäänien voimakkuuden lisäystä, joka tarvitaan, jotta tutkimuksessa käytetty vertailuääni kuulostaisi yhtä äänekkäältä, meluisalta tai kiusalliselta kuin tutkittava impulssimainen ääni. Vertailuääninä voi olla esimerkiksi tieliikennemelu tai kohina. Äänien voimakkuuden mittana on yleensä joko enimmäistaso, äänialtistustaso ja/tai ekvivalenttitaso.* Korjauksen suuruus riippuu mm. melun voimakkuuden mittaustavasta ja käytetystä vertailuäänestä.

* Vertailututkimuksissa yleisimmin käytetyt enimmäistasot ovat $L_{A_{max}}$, $L_{A_{Fmax}}$ ja $L_{C_{peak}}$. Yleisimmin käytetyt äänialtistustasot ovat L_{AE} ja L_{CE} ja yleisimmin käytetyt ekvivalenttitasot $L_{A_{eq,T}}$ ja $L_{CEq,T}$, joissa T on yleensä koeäänien, esimerkiksi impulssisarjan, kokonaiskesto.

Impulssimaisuuskorjaus voi perustua myös kyselytutkimuksiin. Tällöin korjaus on se keskimääräinen vastaajien arvioima melutasoero, jolla vertailuäänän, esimerkiksi tieliikennemelun, kiusallisuus tai häiritsevyys on sama kuin tutkittavan impulssimelun aiheuttama. Korjaus voi olla myös se keskimääräinen melutasoero, joka vallitsee silloin, kun vertailumelu ja impulssimelu ovat melko, hyvin tai erittäin kiusallisia vastaajien enemmistön (50 %:n...80%:n, arvo vaihtelee eri tutkimuksissa) mielestä.

Impulssimaisuuden objektiiviseen toteamiseen on tarjottu vuosien mitaan useita menetelmiä. Aiemmin kriteerinä on käytetty mm. tasoeroja $L_{A_{lmax}} - L_{A_{Smax}} > 4 \text{ dB}$ ⁴⁷³, $L_{A_{leq}} - L_{A_{Feq}} > 5 \text{ dB}$ ja $L_{A_{leq}} - L_{A_{Seq}} > 4 \text{ dB}$ ^{485, 474, 11} ja huippukerrottua eli $L_{A_{peak}} - L_{A_{eq}}$ ^{475, 476}. Ne eivät ole riittävän spesifisiä. Esimerkiksi tasoerokriteerin $L_{A_{lmax}} - L_{A_{Smax}} > 4 \text{ dB}$ on todettu antavan väärän tulokinnan noin 25 %:ssa testitapauksia.⁴⁹¹ Kriteeriksi on ehdotettu myös impulssimelun ekvivalenttitason ja samanaikaisen muun melu ekvivalenttitason eroa $L_{A_{eq, imp}} - L_{A_{eq, muu}}$ ⁴⁷⁷.

Tällä hetkellä parhailta menetelmiltä näyttäisivät $L_{A_{eq, 10ms}}$:n tason vaihtelun suuruuteen* ja yhden sekunnin aikaiseen tasoerotukseen $L_{A_{eq, 10ms, max}} - L_{A_{eq}(1s)}$ perustuvat arviointimenetelmät.^{475, 478} Mitä suurempi ero, sitä impulssimaisempaa ääni on. $L_{A_{eq, 10ms}}$ on ekvivalenttitaso, jossa tason lukuarvo integroidaan ja ilmaistaan 10 ms pituisten näytejaksojen osaekvivalenttitasoista. $L_{A_{eq, 10ms}}$ (10 ms aikapainotus) on toistaiseksi epästandardi, mistä syystä vain harvat mittarinvalmistajat valmistavat mittareita, joilla pystytään mittaamaan edellä mainitut suureet.

Impulssimaisen melun (esim. auton konepellin paukuttelu) äänekkyiden arvioimiseen on esitetty objektiivinenkin menetelmä.⁴⁷⁹

Yhteenvedona voidaan todeta, että yksittäisen impulssin tai impulssisarjan *enimmäistason* ei voida pitää asianmukaisena, yleispätevänä impulssimaisen melun haitallisuuden mittarina. On helppoa osoittaa kokeellisesti, että tiettyjen rajojen sisällä sekä yksittäisen impulssin keston muuttaminen että perättäin esitettyjen impulssien lukumäärän muuttaminen vaikuttavat impulssimelun äänekkyteen, meluisuuteen, kiusallisuuteen sekä häiritsevyyteen erilaisten toimintojen kannalta. Edellytyksenä enimmäistason käytölle olisi joko se, että melureaktiot eivät riipu mainituista tekijöistä tai, että ollaan mainittujen tekijöiden vaikutusalueen rajojen ulkopuolella.

Suurimassa osassa impulssimaisen melun kiusallisuustutkimuksia meluna on ollut laukaus- ja räjäytysäänät tai lentokoneiden aiheuttamat yliaänipaukukset.

Lukuisin tutkimuksin on todettu, että impulssimainen melu on syytä jakaa koetun haitallisuuden perusteella useampaan kuin yhteen luokkaan.^{480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487} Laukausäänien arviointiin on ehdotettu myös dynaamista, jatkuvaa luokittelua, jossa korjaus riippuu impulssiäänän tasosta.^{483, 488, 489}

* Kahden perättäisen $L_{A_{eq, 10ms}}$ -näytteen välinen suurin tasoero impulssin esiintymisen aikana.

Impulssimelut jaetaan usein seuraaviin laatuluokkiin:

1. voimakkaasti impulssimainen melu, jota voivat aiheuttaa mm. pienikaliiperisten aseiden laukaukset, puu- ja metalliesineiden vasarointi, iskupaalujen juntauuskoneet, paineilmakangat ja -vasarat, silloin kun yhden melutapahtuman äänialtistustaso, $L_{AE} > 55...60$ dB ja melu erottuu selvästi taustamelusta. Haitallisuuskorjaus, K_p , kunkin tapahtuman L_{AE} -tasoon on 10 dB.
2. voimakkaan (ilmanpaineen) painevaihtelun aiheuttama impulssimainen melu, kuten lentokoneiden ylääänipamaukset, avolouhimoilta peräisin olevat räjäytysäänet ja suurikaliiperisten aseiden äänet, joille on tunnusomaista se, että $L_{AE} > 65$ dB ja samanaikaisesti $L_{AC} > 85$ dB. Haitallisuuskorjaus, K_p , kunkin tapahtuman L_{AE} -tasoon on 20 dB.
3. (tavallinen) impulssimelu, johon lasketaan kuuluvan sellaiset taustamelusta selvästi erottuvat impulssimelut, jotka eivät kuulu selvästi kahteen edelliseen luokkaan. Haitallisuuskorjaus, K_p , kunkin tapahtuman L_{AE} -tasoon on 5 dB.

Sisätiloissa (asunnoissa) ei yleensä ole luokkiin 1 ja 2 kuuluvaa impulssimelua.

Edellä mainitut luokat ja painotukset ovat samat kuin uusittavana olleessa ISO 1996-2 standardiehdotuksessa esitettiin ensimmäisellä äänestyskierroksella. Lopulliseen äänestykseen tullessa versiossa luokka 2 oli poistettu.

Sisätiloissa saattaisi olla joissain tapauksissa, esimerkiksi samanaikaisten taustäänien tai -melun ollessa hyvin hiljaisia, tarvetta suurempiinkin kuin 5 dB impulssimaisuuskorjauksiin luokan 3 meluille päivä- tai iltapäivä-aikaan.⁴⁹⁰ Useissa tutkimuksissaan nimittäin todettu, että taustamelutason ollessa alhainen, tarvittava (potentiaalinen) kiusallisuuskorjaus riippuu impulssiäänien ja taustamelun erosta.^{491, 492, 493} Äänekkyyskorjauksenkin on todettu riippuvan impulssiäänien ja taustamelun L_{Aeq} -tason erosta.⁴⁹⁴

Myös kuuntelupaikka voi vaikuttaa korjaukseen. Ulkoa sisään kuuluvat impulssiäänet ovat usein sisällä kuultuna kiusallisempia kuin saman äänitason tai äänekkyuden omaava ääni ulkona.^{495, 694}

Testeissä on käytetty impulssiäänien subjektiivisen impulssimaisuuden voimakkuuden mittana käsitettä "impulssimaisuus" (impulsiviness).⁴⁹⁶ Kuten edellä on todettu, yksittäisen impulssin keston pidentyminen lisää äänekkyyttä. Toisaalta, ainakin lyhyiden (10...1000 ms), melko voimakkaiden ($L_{Apeak} = 80$ dB(A)) äänespurskeiden impulssimaisuus sen sijaan vähenee keston pidentymisen myötä.⁴⁹⁷

Tutkiessaan, miten saman L_{Aeq} -tason ja toistotaajuuden (2 ja 8 imp/s) omaavien vakioimpulssisarjojen kiusallisuus riippuu yksittäisten impulssin laskunopeudesta (kestosta), Berry ja Zwicker totesivat, että 100 ms:n vaimentumiskeston omaava impulssisarjan melu oli kiusallisempaa kuin 10 ms:n keston omaavan.⁴⁹⁸

Impulssimelun vaikutuksia arvioidaan usein ekvivalentti- eli keskiäänitason perusteella. Oletaan tarkasteluaikana, esimerkiksi päivässä, olevan n

kappaletta impulssiääni, joiden äänialtistustaso on $L_{AE,i}$ [dB(A)]. Niiden yhteenlaskettu L_{AE} -taso ilman impulssimaisuuskorjauksia

$$(39) \quad L_{AE} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_{AE,i}/10} \right)$$

Päivä- tai yöajan ekvivalenttitaso saadaan vähentämällä edellisen kaavan L_{AE} -tasosta $10 \lg T$, jossa T on tarkasteluajan, esimerkiksi päiväajan pituus sekunteina (54 000 s) tai yöajan pituus (32 400). Päiväajalta vähennys on desibelinä 47,3 dB(A) ja yöajalta 45,1 dB(A).

Turbulenttinen tuuli ja turbulenssisironta sekä heijastukset ja sironta maastosta, rakennuksista ja puustosta saattavat muuttaa suuresti impulssimaisen signaalin ajallisen vaihtelun muotoa. Muodon muuttuminen näkyy mittaustulosten, etenkin enimmäistason (peak, impulse ja fast), hajonnan kasvuna.⁴⁹⁹

Impulssimelun kuulovaurioriskiä on tutki paljon. Kiinalaiset tutkijat ovat päätyneet seuraavaan laukausten peak-tason raja-arvoon pysyvän kuulovaurion kriteerinä tapauksissa, joissa yhden päivän aikana altistutaan monille laukauksille ja altistuspäiviä on vuoden aikana useita

$$(40) \quad L_{peak} = 177 - 6 \lg(Tn) \text{ dB}$$

jossa T on impulssin kesto [ms] ja n impulssien määrä päivässä. Jos T on pitempi kuin 100 ms, käytetään arvoa 100 ms, ja jos T on lyhyempi kuin 1 ms, käytetään arvoa 1 ms. Riippuvuusmalli perustuu eläinkokeisiin (yli 400 altistusryhmää), mutta vakio 177 dB yli 1000 sotilashenkilön altistushistorian ja kuulokyvyn selvitykseen. Kriteerinä on suojata vähintään 95 % altistetuista suuremmalta kuin 8 dB pysyvältä kuulon alenemalta.⁵⁰⁰

Impulssimelun haitallisuuskorjaus

Impulssimainen melu koetaan usein haitallisemmaksi kuin vastaavan tasoinen ei-impulssimainen melu. Oletetaan, että ei-impulssimaisen melun, esimerkiksi tieliikennemelun, haitallisuusvasteen voimakkuus, A_{ei-imp} , riippuu sen ekvivalenttitasosta lineaarisesti

$$(41) \quad A_{ei-imp} = a_{ei-imp} + b_{ei-imp} L_{Aeq}$$

ja impulssimaisen melun vaste, A_{imp} , samoin

$$(42) \quad A_{imp} = a_{imp} + b_{imp} L_{Aeq}$$

Impulssimaisuuskorjaus, ”rangaistus” (engl. penalty), P_{imp} , joka on lisättävä impulssimaisen melun L_{Aeq} -tasoon, jotta koettu impulssimelun vertailumelua suurempi haitallisuus tulisi huomioon otetuksi

$$(43) \quad P_{imp} = \frac{a_{imp} - a_{ei-imp} + (b_{imp} - b_{ei-imp})L_{Aeq}}{b_{ei-imp}}$$

Korjauksen suuruus riippuu sekä käytetystä haitallisuuden mittayksiköstä (esim. kiusallisuus, meluisuus vai äänekkyys), vertailusuurena käytetystä melusta (esim. tieliikenne tai kohina) ja impulssimelun ominaisuuksista.⁵⁰¹

Saksalaisessa tutkimuksessa⁴⁸⁹ päädyttiin laukausäänien liukuvaan impulssimaisuuskorjaukseen, P [dB],

$$(44) \quad P_{imp} = 0,40L_{CE,imp} - 0,92(L_{CF,imp} - L_{AF,imp}) - 21,9$$

jossa $L_{CE,imp}$ on laukausäänien äänialtistustaso [dB] taajuuspainotuksella C, $L_{CF,imp}$ sen C-taajuuspainotettu ja Fast- aikapainotettu enimmäistaso [dB], ja $L_{AF,imp}$ sen A-taajuuspainotettu ja Fast- aikapainotettu enimmäistaso [dB]. Tutkimuksessa päädyttiin siihen, että laukausäänien kanssa saman kiusallisuuden aiheuttaman ajoneuvojen ohiajomelun äänialtistustaso on

$$(45) \quad L_{AE,ajon} = 1,40L_{CE,imp} - 0,92(L_{CF,imp} - L_{AF,imp}) - 21,9$$

jossa $L_{AE,ajon}$ on ajoneuvon ohiajon A-taajuuspainotettu äänialtistustaso [dB(A)].

Monien ympäristömelujen impulssimaisuuden aiheuttaman kiusallisuuden korjauksen on useissa tutkimuksissa todettu riippuvan melun voimakkuudesta.^{468, 485} Esimerkiksi italialaisessa laboratoriotutkimuksessa* päädyttiin seuraavaan korjauksen, P_{imp} [dB(A)], riippuvuuteen

$$(46) \quad P_{imp} = 24,7 - 0,35L_{Aeq}$$

jossa L_{Aeq} on kyseisen melun ekvivalenttitaso [dB(A)].^{485, 502} Tämän kaavan mukaan korjaus riippuu melun voimakkuudesta. Esimerkiksi L_{Aeq} -tason ollessa 35 dB(A), korjaus on 12 dB(A) ja nolla, kun L_{Aeq} on yli 70 dB(A).

Useimmat impulssimaisuuskorjausta koskevat tutkimukset on tehty laboratorioissa. Ääniä on kuunneltu kuulokkeista tai kaiuttimista ja voimakkuutta

* Tutkimus kuului suureen EU:n rahoittamaan impulssimelututkimukseen, johon otti osaa kuusi laboratoriota. Korjaus laskettiin seitsemän erilaisen impulssimelun keskimääräiselle vasteelle verrattuna tieliikennemelun.

on säädetty vahvistusta muuttamalla, jolloin eri voimakkuudella esitettyjen signaalien ajalliset ja spektraaliset ominaisuudet pysyvät samoina. Tämä ei vastaa luonnossa normaalia tilannetta, jossa esimerkiksi signaalien ajalliset ja spektraaliset ominaisuudet muuttuvat etäisyyden kasvaessa impulssimaiseen äänilähteeseen. Käytännön elämässä henkilöt altistuvat usein samanaikaisesti useille erilaisille meluille. Impulssimaista melu esiin vain osan aikaa ja eri melujen L_{Aeq} -tasot voi olla vaikea mitata erikseen.

Joskus melu voi olla samanaikaisesti sekä impulssimaista että äänesmäistä. Brittiläiset standardit BS 4142 ja BS 7445 esittävät, että ei-impulssimaisen melun äänesmäisyyskorjaus on +3 dB(A). Jos melu on lisäksi impulssimaista, lisätään mittaustulokseen toinen 3 dB(A).⁵⁰²

Kiusallisuus ja häiritsevyys vuorokauden eri aikoina

Useimpien ihmisten elämä noudattaa tiettyä, melko säännöllistä vuorokauden aikaan sidottua rytmiä. Suurin osa nukkuu öisin. Päiväaika ollaan töissä (poissa asuinympäristöstä). Iltaisin ollaan kotona, tehdään kotiaskareita, katsotaan televisiota, luetaan tai keskustellaan. Tyypillisessä vuorokausirytmissä voi olla maa- ja vuodenaikakohtaisia eroja. Esimerkiksi kuumissa maissa saatetaan pitää iltapäivällä siestää (levätä) ja ilta, jopa iltayö, käytetään ulkona olemiseen tai vietetään ravintolassa. Ihmisten itse tuottama melu ja hiljaisuuden tarve vaihtelevat toimintojen ja toimintaympäristön vaihtelun myötä.

Hoeger *et al.*⁵⁰³ analysoivat useita saksalaisia kiusallisuustutkimuksia. Loppupäätelmänä oli, että tieliikennemelun yöaikaisen kiusallisuuden riippuvuus melun voimakkuudesta ei eronnut päiväaikaisesta, mutta raide- ja lentoliikenteenyöaikainen kiusallisuus vaste oli päiväaikaista herkempi. Lentomelulla yöaikaisenvasteen herkkyys alkoi kasvaa päiväaikaan heremmäksi ulkomelun L_{Aeq} -tason ylittäessä 50 dB(A).

Izumi⁵⁰⁴ tutki päivä- ja yöajan kiusallisuusvasteen eroja sekä laboratoriossa että kentällä vertaamalla asiantuntijaraadin arvioita samojen melujen (kesto 10 s, 30 koetoistoa) kiusallisuudesta kaupunkialueella kuunneltaessa ja kuunneltaessa samat melut ääninauhalta laboratoriossa. Laboratoriovasteet olivat hieman kenttävasteista herkempiä ja niiden korrelaatio L_{Aeq} -tasoon oli parempi. Kaikkein huonoiten L_{Aeq} -tasoon korreloi yöaikainen kiusallisuus kentällä. Kentällä ja laboratoriossa mitatut (lyhytaikaisen) päiväajan melun kiusallisuusvasteet eivät eronneet oleellisesti. Yöaikaisen melun kiusallisuusvaste oli hieman herkempi kentällä kuin laboratoriossa.

Guski *et al.*⁵⁰⁵ totesi perheenemäntien ($N = 30$) eri vuorokauden aikoina kokemaa kiusallisuutta tutkiessaan, että kiusallisuus seurasi melko hyvin altistavan melutason vaihtelua, mutta aamuisin (klo 6 – 9) kiusallisuusvaste

oli huomattavasti epäherkempi kuin päivällä ja illalla. Iltaisin (klo 19 – 22) vaste taas oli jossain määrin herkempi kuin muuna valveilla olon aikana.

Lambert kumppaneineen toteaa luotijunatutkimuksessaan, että junamelu koettiin aamuisin ja iltaisin kiusallisemmaksi kuin muina vuorokauden aikoina.⁷⁵³

Espanjalaisessa lentomelututkimuksessa ($N = 107$) noin 55 % vastaajista ilmoitti kokevansa päiväajan melun kiusallisemmaksi kuin yöajan melun. Päinvastaisen vastauksen antoi noin 38 % haastatelluista.⁵²⁶

Englannissa analysoitiin Manchesterin lentokentän meluvalituksia vuosien 1991 – 1998 väliltä. Yöaikaisten valitusten määrä per lento, eli valitustiheys, oli yöaikana (klo 23 – 07) noin kaksinkertainen verrattuna päiväaikaan. Suurin osa yöajan valituksista ajoittui loppuiltaan ja alkuyöhön eli nukahtamisaikaan.⁵⁰⁶

Yöaikaisen melun kiusallisuus ja häiritsevyyys

Yöaikainen melu voi aiheuttaa *valveilla olevissa* henkilöissä vastaavia reaktioita (vasteita) kuin päivämelu. Yöajan erona verrattuna päiväaikaan on se, että melu kohdistuu yleensä nukkuvaan ihmiseen. *Melun subjektiivisen voimakkuuden (äänekkyyys, meluisuus, kiusallisuus) arvioinnin katsotaan edellyttävän tietoista, kognitiivista, arvioita.* Oletetaan, että nukkova henkilö ei tee kovin pitkälle meneviä kognitiivisia arvioita melusta.⁵⁰⁷ Esimerkiksi itikan ääni ei voine aiheuttaa samanlaista kiusallisuusreaktiota (assosiaatiota, ajatuksia) nukkuvassa kuin valveilla olevassa henkilössä. On myös oletettu, että yöajan melun kiusallisuus välittyy meluun heräämisten tai nukahtamisen vaikeutumisen kautta tietoisiksi arvioksi melusta. On myös päinvastaisia arvioita. Esimerkiksi suomalaistutkimuksen⁵⁰⁸ mukaan vastasyntyneet oppivat tunnistamaan puheääniä nukkuessaan.

Kanadalaisessa 1978 tehdyssä tutkimuksessa todettiin, että tieliikennemelun kiusallisuusvaste oli yöaikaan noin 5dB(A)-herkempi kuin päiväajan vaste eli sama kiusallisuusaste saavutettiin öisin noin 5 dB(A) alhaisemmissa ulkomelun tasoissa verrattuna päiväajan vasteeseen.³⁹² Vaste-erojen syitä ei analysoitu.

Saksalaisen yhteenvetotutkimuksen mukaan tieliikennemelun yö- ja päiväajan kiusallisuudella ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa, mutta raide liikenteen ja lentomelun kiusallisuudella oli. Raideliikenteen yöaikainen kiusallisuusvaste oli epäherkempi kuin päiväajan vaste. Lentomelulla yöaikainen vaste oli ulkomelun $L_{Aeq,yö} = 50$ dB(A) yläpuolella päiväajan vastetta paljon jyrkemmin nouseva (so. herkempi) melun voimakkuuden kasvaessa.⁵⁰⁹ Ei voida luotettavasti erottaa, miten paljon vaste riippuu valveilla olon (esim. heräämisten) ja unen aikaisista ärsykkeistä, mielikuvista ja arvioista.

Erilaisten äänien aiheuttamien aivosähkökäyrien tyypit tai tyyppijakautumat voivat olla erilaisia.⁵¹⁰ Äänien erilaisuudella tiedetään olevan merki-

tystä heräämisherkkyteen. Outoihin ääniin herätään helpommin kuin tutuihin. Ei kuitenkaan tiedetä, miten pitkälle meneviä arvioita nukkuva tekee unen aikana kuulemistaan äänistä. Ei myöskään tiedetä millaista ennustearvoa aivosähkökäyrien eroilla on unitilan muutoksiin.

On oletettu, että mm. ikkunoiden ääneneristävyys, tuuletustavat, liikenteen melun vuorokausijakautuma sekä ikkunoiden auki pito eri vuodenaikoina eroavat eri maissa, mistä syystä ulko- ja sisämelujen tasoero sekä ulkoa sisään etenkin yöaikana kuuluvan melun voimakkuus samalla ulkomelutasolla vaihtelee. On esitetty, että nämä seikat tulisi ottaa huomioon sovellettaessa yhdessä maassa tehtyjen meluhaittatutkimusten tuloksia toiseen maahan. Nukkuvaa altistavan ulkoa sisään kuuluvan liikennemelun L_{Amax} -tason ja L_{Aeq} -tason ero ja unihäiriöitä aiheuttavien melutapahtumien lukumäärä eivät riipu yksikäsitteisesti rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyydestä. Esimerkiksi ääneneristävyydestä riippumatta liikennemäärä vaikuttaa tyypillisesti enemmän L_{Aeq} -tasoon kuin L_{Amax} -tasoihin ja etäisyys liikenneväylään enemmän L_{Amax} -tasoihin kuin L_{Aeq} -tasoon.

Taulukko 1: Yöaikaisen tieliikennemelun kiusallisuus ja sen yhteys muihin häiritsevyyttä kuvaaviin muuttujiin Ranskassa⁵¹¹

| Raportoidun kiusallisuuden kokemisen aste | Nukkuu ikkunat avoinna | Ei nukahtamisvaikeuksia | Ei herää öisin |
|---|------------------------|-------------------------|----------------|
| Hyvin kiusallista | 25 % | 9 % | 6 % |
| Kiusallista | 42 % | 13 % | 14 % |
| Melko vähän kiusallista | 60 % | 27 % | 25 % |
| Ei lainkaan kiusallista | 82 % | 51 % | 55 % |

Taulukossa 1 on esitetty kiusallisuuden asteen, yöaikaisen ikkunoiden auki pidon ja unihäiriöiden välisiä yhteyksiä Ranskassa tehdyn tutkimuksen mukaan. Makuuhuoneen ikkunaan kohdistuva $L_{Aeq, 00-05h}$ -taso vaihteli 37 – 70 dB(A). Tyypillinen ikkunoiden vaimennus oli 20... 22 dB(A).*

Noin 75 %:a henkilöistä, jotka ilmoittivat kokevansa yöaikainen liikennemelu hyvin kiusalliseksi ilmoittivat saman vastauksen myös päiväaikaisesta melusta, mutta vain 45 %:a päivämelusta hyvin kiusaantuneista ilmoittivat saman arvion yöajan melulle. Tutkimus päättyi siihen, että ainakin silloin, kun päiväajan L_{Aeq} -taso on keskikorkea, 55 – 65 dB(A), päivä- ja yömelun vaikutukset on syytä selvittää erikseen.

* Suomessa ikkunoiden vaimennus on suurempi, jopa 35...40 dB(A), niiden ollessa kiinni. Rakennusmääräyksiin tuli energiakriisin jälkeen, 1976, vähimmäisvaatimus lämmönläpäisykertoimelle (k). Maissa, joissa ei ole yhtä tiukkoja vaatimuksia k-luvulle, ikkunainen ääneneristävyys on yleensä merkittävästi huonompi kuin Suomessa 1976-jlkeen rakennetuissa taloissa.

Meluisan liikenneväylän puolella taloa olevan makuuhuoneen melutaso on yleensä 10...20 dB(A) suurempi kuin ulkoa sisään kuuluva melutaso pihanpuolella taloa olevassa makuuhuoneessa riippumatta siitä onko (tuuletus)ikkuna auki vai kiinni. Tienpuolella rakennusta nukkuvien kiusallisuusarviot korreloivat ulkomelun voimakkuuteen huomattavasti paremmin kuin pihan puolella asuvien arviot.⁵¹² Yleensä vain liikenneväylän puolella taloa olevissa makuuhuoneissa nukkuvien henkilöiden itse arvioimat liikennemelun aiheuttamat nihäiriöt korreloivat edes jossain määrin ulkomelun voimakkuuteen.⁵¹³

Asukkaiden itsensä arvioimasta kiusallisuudesta seuraavat esimerkit: Kun yksittäisten lentomelutapahtumien taso ja kesto jäi alle heräämiskynnyksen lentojen lukumäärällä (ainakin alueella 1...50 lentoa yössä) oli erittäin vähäinen vaikutus ihmisten kokemaan kiusallisuuteen.⁵¹⁴ Päivä- ja ilta-ajan lentomelu koettiin kiusallisemmaksi kuin yöajan melu.⁵¹⁴ Yöaikaiset melutapahtumat voivat vaikuttaa tieliikennemelun kiusallisuuteen suhteellisesti jonkin verran enemmän kuin lentomelun kiusallisuuteen.⁵¹⁵

Tulkittaessa kyselytutkimusten tuloksia on syytä muistaa, että yleensä melkoinen osa (1/3...1/2) vastaajista tekee päivätyötä tai opiskelee, eli on poissa asuinalueeltaan arkisin päiväaikaan. Heidän arvioissaan päiväajan melun vaikutus saattaa olla vähäisempi ja ilta- ja yöajan melun vaikutus suurempi kuin niillä, jotka oleskelevat myös päivisin alueella. Oleskeluerosta voi aiheutua tilastollista harhaa esimerkiksi silloin, kun melutason mittana on koko vuorokauden melutaso, esimerkiksi $L_{Aeq, 24h}$ tai L_{DEN} , ja yhden tai useamman asuinympäristön melun taso tai muut ominaisuudet ovat erilaisia päivä-, ilta- ja yöaikaan.

Kiusallisuus ja häiritsevyyseri vuodenaikoina

Vuodenaikojen vaihtelu on hyvin erilaista eri puolilla maapalloa. Mitä lähemmäksi napa-alueita tullaan sitä enemmän valoisan ajan pituus, lämpötila sekä muut sää- ja ympäristöolot vaihtelevat vuoden aikana. Tiedetään, että vuodenajoilla on vaikutusta mm. mielialaan, uneen, ruokahaluun ja ruoan koostumukseen, vapaa-ajan harrastuksiin ja sosiaaliseen elämään.⁵¹⁹ Tiedetään myös, että pohjoisissa maissa, joissa vuodenaikojen vaihtelut ovat suuria, monet ihmiset kärsivät pimeään vuodenaikaan masennuksesta ja uni-häiriöistä.^{516, 517, 518} On esitetty, että mielialavaihteluiden taustalla olisi ihmisen geneettinen sopeutumattomuus oloihin, joissa vuodenaikojen valon ja lämmön vaihtelu on niin suurta kuin on pohjoisissa oloissa.⁵¹⁹ Toisaalta on todettu, että suurellakaan vuodenaikojen vaihtelulla ei ole merkittävää vaikutusta ihmisten tiedollisiin suoriutumiskykyihin.⁵²⁰

Kokemuksesta tiedetään, että on meluja, joiden esiintyminen ja/tai voimakkuus riippuu vuoden ajasta. Esimerkkinä vaikkapa sisävesiliikenteen ja

huippulämpöläitosten melu sekä liikenteen rengasmelun osuus* Suomessa. Melujen vuodenaikavaihteluista on julkaistu melko vähän systemaattisia tutkimuksia. On joitakin tutkimuksia, joissa ulkomelutasojen on todettu vaihtelevan eri vuodenaikoina.^{521, 522, 523} Koska eri maissa vuodenaikavaihteluiden suuruus ja vaikutus meluun vaihtelee, eri maissa tehtyjen tulosten siirrettävyys maasta toiseen ei ole itsestään selvää.

Kun monien melulähteiden melun tuotto sekä niiden ihmisten määrä, jotka altistuvat eri meluille vaihtelevat vuodenaikojen mukana, niin olisi luonnollista, että tietyn melun kiusalliseksi kokevien ihmisten määrä ja kiusallisuuden voimakkuus voivat olla hyvin erilaisia eri vuodenaikoina. Toisaalta näyttää siltä, että suuri osa ihmisistä ei huomaa kovinkaan helposti esimerkiksi liikennemelun tai etenemisvaimentumisen vaihteluista eri vuodenaikoina tai edes saman viikon eri päivinä.⁵³⁰

Maissa, joissa eri vuodenaikojen ulkolämpötilan erot ovat suuria, ikkunoita pidetään auki vähemmän kylmänä vuodenaikana kuin muina aikoina. Ikkunoiden auki pito vaikuttaa ulkoa sisään kuuluvan melun voimakkuuteen. Japanilaisen tutkimuksen mukaan ilmastollisista eroista johtuva ero ikkunoiden auki pidossa (ja eristävydessä?) vaikutti selvästi tieliikennemelun unenhäirintään, mutta ei selvästi kiusallisuuteen eikä puuehänäirintään. Lämpimässä ilmastossa (Kyushu) ikkunoita pidettiin enemmän auki ja unihäiriöiden kokeminen tietyssä ulkomelun tasossa oli yleisempää kuin kylmässä ilmastossa (Hokkaido). Kylmässä ilmastossa suurin osa ikkunoista oli kaksilasisia ja lämpimässä yksilasisia.^{339, 524}

Monissa tapauksissa ulkomelun osuus koko sisämelun päivä- ja yöajan ekvivalenttitasosta on melko pieni. Ero riippuu rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyyden lisäksi muun muassa sisällä harjoitettavan toiminnan melusta, asukkaiden elintavoista, ja ulkomelun voimakkuudesta. Jo 1930-luvulla Bell-laboratoriot totesivat, että ulkoa sisään kuuluva melu dominoi sisämelussa talviaikaan noin 14 %:a ajasta, mutta kesäaikaan noin 48 %:a ajasta.⁵²⁵ Ikkunoiden aukipitotavat ja rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyys vaikuttanevat dominoinnin osuuteen ja eri vuodenaikojen eroihin.

Japanilaisessa tutkimuksessa⁵⁰⁴ mitattiin kiusallisuusvasteen eroja sekä laboratoriossa että kentällä vertaamalla asiantuntijaraadin arvioita samojen melujen (kesto 10 s, 30 koetoistoa) kiusallisuudesta kaupunkialueella kuunneltaessa ja kuunneltaessa samat melut ääninauhalta laboratoriossa. Mittauksia tehtiin keväällä, kesällä, syksyllä ja talvella. Laboratoriovasteet olivat hie-man kenttävasteista herkempiä, ja niiden korrelaatio L_{Aeq} -tasoon oli parempi. Tulos voidaan tulkita siten, että koehenkilöt reagoivat laboratorio-oloissa herkemmin ja tarkkaavaisemmin. Reagointiherkkyys oli jossain määrin erilainen eri vuodenaikoina, kuten myös ero laboratorio- ja kenttätutkimuksen herkkyydessä. Eniten erosivat toisistaan kesä- ja talviajan vasteet.

* Kesä-, talvi- ja nastarenkaiden melu on erilaista. Talvella on tiukemmat nopeusrajoitukset kuin muina vuodenaikoina. Tien pinnan lämpötila sekä lumi- ja jää tiellä vaikuttavat meluemissioon. Lumipeite ja aurasokinokset vaikuttavat eetenemisvaimentumiseen.

Espanjassa, Madridin esikaupunkialueella tehdyssä tutkimuksessa noin 76 % vastaajista ilmoitti yöaikaisen melun olevan kiusallista kesällä, kun vastaava luku oli talvella noin 35 %. Tanskalaisessa lentomelututkimuksessa vastaajat ilmoittivat kokevansa lentomelun eniten haitalliseksi toukokuun ja elokuun välisenä aikana.⁷²⁵ Samanlaiseen tulokseen päädyttiin espanjalaisessa lentomelututkimuksessa ($N = 107$). Vaikka liikennemäärä ei vaihdellut vuoden mittaan kovin paljon, niin noin 90 % vastaajista ilmoitti kesäajan lentomelun olevan kaikkein kiusallisinta.⁵²⁶ Ranskalaisessa tutkimuksessa todettiin, että 17,4 % vastaajista ilmoitti kokevansa luotijunien melun kesäaikana (ja viikonloppuisin) suuresti kiusalliseksi, kun talviaikana vastaava luku oli 5 %.⁷⁵³

1980-luvulla tehdyssä ranskalaisessa tutkimuksessa todettiin, että tieliikenteen ulkomelun $L_{Aeq,08-20h}$ -tason ollessa alle 72 dB(A) Marseissa asuvat sulkivat ikkunoita merkittävästi harvemmin kuin Lyonissa asuvat. Tutkijat olettavat syyksi sen, että Marseissa on paljon lämpimämpi ilmasto.⁵²⁷ Tämä havainto vahvistaa sitä, että melun lisäksi tuuletustarve tai tuuletusmahdollisuus (esim. vuodenaikojen mukana vaihteleva kuuminen, talven kylmyys) vaikuttaa ikkunoiden auki pitoon.

Saksalaisissa kyselytutkimuksissa on todettu, että kesäaikana, toukokuuskuussa, tehdyissä kyselyissä noin 70 % vastaajista ilmoittaa kokevansa tieliikennemelun kiusalliseksi, kun talviaikana tehdyissä kyselyissä vastaava prosenttiluku on 60 % tai alle.^{528, 529} Toisin sanoen, eri vuodenaikoina tehdyissä kyselyissä voidaan saada erilaisia vasteita vaikei erikseen mainita kyselyn koskevan kiusallisuutta kyseisenä vuodenaikana.

On myös tutkimuksia, joissa ei ole löydetty näyttöä sille, että tietyn melun (liikennemelu) kiusallisuus – tässä tutkimuksessa dissatisfaction eli tyytymättömyys meluun – riippuisi vuodenajasta. Tutkimus tehtiin Lontoossa ($N = 222$). Ikkunoita todettiin pidettävän auki talvisin vähemmän kuin muina vuodenaikoina, mutta ikkunoiden aukkipidon ei todettu vaikuttavan tyytymättömyyteen liikennemeluun. Keskimääräinen päivälämpötila oli talviajan tutkimuksissa (helmikuu) 4,8 °C ja muina kolmena tutkimuskuukautena 9,3, 10,8 ja 14,1 °C.⁵³⁰

Kadun ja pihan puolen melueron vaikutus kiusallisuuteen

Useissa yhteyksissä on esitetty, että meluhaittoja voitaisiin vähentää sillä, että rakennusten suojan eli pihan puolella olisi alhaisemmat melutasot kuin liikenneväylän tai melulähteen puolella. Kaavoitusohjeissa on myös joko suositeltu tai vaadittu, että asunnoissa tulisi olla ainakin yksi huone rakennuksen suojan puolella. EU:n ympäristömeludirektiivissä¹⁹ määritellään hiljainen ulkoseinä rakennuksen seinäksi, johon kohdistuva melu on 20 dB(A) hiljaisem-

paa kuin voimakkain rakennuksen ulkoseiniin kohdistuva melu. Selvityksissä on ilmoitettava paljonko melualueen ihmisistä asuu näiden seinien puolella.

On viitteitä siitä, että ne kiusallisuuden esiintyminen asunnossa, joissa huoneita tai muita tiloja sekä suojan, että melulähteen puolella on hieman vähäisempää, kuin niissä, joissa näitä tiloja on vain melulähteen puolella.^{531, 532, 533} Suojan puoleisen huoneen hyödyllisyys riippuu siitä, missä määrin ja mihin suojan puoleista huonetta voidaan käyttää. Suojan puoleisten huoneiden käytettävyys (esim. riittävyys kaikille perheen jäsenille makuuhuoneiksi) puolestaan riippuu mm. perheen ja asunnon koosta sekä huoneiden määrästä. Suuressa perheessä ja pienessä asunnossa käytettävyys voi jäädä huonoksi.⁵²⁷

Örström⁵³⁴ on todennut, että asunnon ikkunoiden avautumissuunta ei vaikuttanut liikennemelun kiusallisuuteen, mutta liikennemelu vaikutti pihanpuoleisissa asunnoissa asuvien ihmisten depression vähemmän kuin niihin, joiden asunnon ikkunat avautuivat kadulle.

Melumallien tarkkuus laskea taajamissa (umpi)sisäpihojen hiljaisiin ulkoseiniin kohdistuvan melun voimakkuus, voi olla yllättävän huono. On puhuttu jopa 10...15 dB(A) liian optimistista (suurista) arvoista.

Laboratorio- ja kenttätutkimusten eroista

Lyhytaikaisissa laboratoriotutkimuksissa saadaan yleensä huomattavasti parempia korrelaatioita koehenkilöiden reaktioiden ja arvioiden välille kuin kenttätutkimuksissa. Huomion arvoista on myös se, että laboratoriotutkimuksissa saadaan paljon pienempiä eroja eri melujen vaikutuksille kuin kenttätutkimuksissa.^{385, 535}

Laboratoriotutkimuksissa käytetään yleensä nauhoitettuja signaaleja, joiden voimakkuutta säädetään siten, että signaalin spektrin ja ajallisen vaihtelun komponenttien ominaisuudet pysyvät suhteiltaan samanlaisina voimakkuudesta riippumatta. Todellisessa eli ympäristössä sekä spektraaliset että ajalliset melun ominaisuudet ja voimakkuussuhteet muuttuvat kokonaisvoimakkuuden, esimerkiksi A-äänitason, muuttuessa. Esimerkiksi 20 m etäisyydellä tiestä nauhoitetusta melusta ei saa pelkästään voimakkuutta säätämällä samanlaista signaalia, joka vallitsee 100 m päässä ko. tiestä.

Laboratoriotutkimuksissa on todettu, että näytteiden esitysjärjestys voi vaikuttaa arviointeihin.

Jos lähdetään siitä, että kiusallisuuden tulee mitata tietyssä asuinympäristössä jatkuvasti asuvan henkilön kokemaa pitkän ajan (keskimääräistä) vaikeuteltua, niin lienee itsestään selvää, että lyhytaikaisella laboratorioskokeella ei voida simuloida pitkän ajan altistusta eikä saada vastetta pitkän ajan altistukseen. Laboratorioskokeilla voidaan tutkia lyhytaikaisen altistuksen vasteita, kuten (hetkellistä) äänekkyyttä ja karheutta, joille on vaikea määrittellä pitkäkestoisien (kuukausia) melun psykoakustisia vasteita.⁵³⁶

Unenhäirintä

Yöaikaisen (sisä)melun pahin terveyshaitta on sen mahdollisesti aiheuttamat unihäiriöt. Nukahtamisen vaikeutumista ja unen virkistävää vaikutusta vähentäviä muutoksia voidaan kutsua (normaalin unen) *unihäiriöiksi*. Unitalan häiriöiksi nimitetään myös tiettyjä melun aiheuttamia muutoksia aivosähkö- eli EEG-käyrissä*. *Unenhäirintä* puolestaan on nimitys sille prosessille, jossa melu aiheuttaa muutoksia uneen ja sen laatuun. Pahimpana häiriönä pidetään heräämistä valvetilaan ja nukahtamisen estymistä. Säännöllisesti toistuvien unihäiriöiden oletetaan ”vahvistavan” tai pahentavan monia tauteja, minkä katsotaan lisäävän unihäiriöitä aiheuttavan melun terveydellistä haitallisuutta. Oletusta ei kuitenkaan voitu todistaa tieteelliset kriteerit kestävin tutkimuksin.† Toisaalta kokemuksesta tiedetään, että lepo ja uni auttavat, jouduttavat tai varmistavat monista taudeista parantumista, ja että erityisesti moniin mielensairauksiin liittyy (tautia pahentavana) oireena unettomuus.

Uni on aivojen tarvitsema hyödyke. Vaikka unta ja unihäiriöitä on tutkittu pitkään, emme kuitenkaan tiedä, miksi ihmiset ja eläimet nukkuvat. Tiedämme kuitenkin, että riittävän pitkä ja riittävän hyvälaatuinen säännöllinen uni on tarpeen, mutta tutkimuksin ei ole pystytty selvittämään, mikä tai mitkä ovat ne unen elvyttävät mekanismit tai tekijät, jotka aikaansaavat sen, että hyvästä unesta herätään virkistäytyneinä ja valmiina uusiin suorituksiin.⁵³⁷

Yksilöllinen unen tarve vaihtelee, samoin kuin herkkyys unihäiriöille. Ihmisiä, joille riittää kuusi tuntia (n. 10 % aikuisista) tai sitä lyhyempi uni, kutsutaan lyhytuniseksi. Ihmisiä, jotka tarvitsevat yhdeksän tuntia tai enemmän unta vuorokaudessa nimitetään pitkäuniseksi (n. 10 % aikuisista). Vastasyntyneet nukkuvat 15 – 18 tuntia vuorokaudessa. Iän myötä unen tarve yleensä vähenee. Monille yli 70 vuotiaalle riittää alle 6 tunnin yöuni. Vanhukset tosin saattavat nukahdella pitkin päivää lyhyiksi hetkiksi. Tällaiset piilounet lyhentänevät yöunta ja saattavat huonontaa sen laatua.

Unihäiriöiden tutkimuskohteista ja -menetelmistä

Ympäristömelun, lähinnä kuitenkin vain liikennemelun, vaikutuksia uneen on runsaasti tutkimuksia. Tuoreimmista tutkimuksissa on pyritty selvittämään matemaattisessa muodossa esitettäviä riippuvuusvasteita.^{538, 539, 540} Unihäiriöiden ja melun välisten riippuvuuksien määrittämistä vaikeuttaa se, että eri ihmisten herkkyys unihäiriöille vaihtelee suuresti ja saman henkilön

* EEG, engl. ElectroEncephaloGram, koje joka mittaa ihoille kiinnitettyjen antureiden avulla aivosähkökäyriä.

† Esimerkiksi uniapneataudissa unihäiriöiden (vai veren happivajeen?) on todettu mm. lisäävän verenpainetta ja huonontavan muistia, mutta tavanomaisen ympäristömelun aiheuttamille unihäiriöille tällaista ei ole pytytty näyttämään.

herkkyys vaihtelee eri aikoina esimerkiksi elämäntilanteen, sairauksien ja/tai meluun tai unihäiriöihin kohdistuvien asenteiden tai odotusten vaihtelun vuoksi.

Melun vaikutusta uneen on tutkittu pääasiassa kolmella tavalla:

- Kyselemällä altistuneilta heidän omia arviotaan tietyn melun aiheuttamista unihäiriöistä. Puhutaan itse arvioituista tai itse raportoiduista unihäiriöistä, kuten itse raportoitujen (valveille) heräämisten määrästä.
- Mittaamalla *laboratorio-oloissa* unitilaa ja altistavan melun muutoksen (esim. ohilento) jälkeisiä muutoksia aivosähkökäyrästä (EEG-käyrästä), sydämen toiminnasta (ECG-käyrästä), silmän liikkeistä (EOG-käyrästä) tai lihasjännityksestä (EMG-käyrästä) tai liikeantureilla (kehon tai raajojen liikkeet unen aikana). Yleensä koehenkilöitä altistetaan kaiuttimista toistetuille nauhoitetulle melulle, kuten ohilennoille tai ohiajoille, joiden välissä on hiljaisia jaksoja. Tutkimukseen voi myös sisältyä aamulla heti heräämisen jälkeen tai päivällä tehtyjä suorituskyky- tai vireystestejä.
- Mittaamalla *kotiloissa* unitilaa ja sen muutoksia samoilla menetelmillä kuin laboratoriossa. Altistava melu voi olla normaalia asunnon ja asuinalueen melua tai keinotekoisesti tuotettua. Liikeanturi voi olla sängyssä, jolloin tulos on (pääasiassa kehon) unen aikainen liikehdintää. Anturi voi olla myös raajassa, esimerkiksi ranteessa, jolloin unitilan aikaisen liikehdinnän lisäksi valvetilan aikainen liikendintä näkyy tuloksissa.

Edellisten lisäksi on mm. tutkittu, miten melu vaikuttaa nukkuvan verenpaineeseen, eri hormonien pitoisuuteen veressä ja vaikutuksia immunivasteeseen. Esimerkiksi melu, joka ei aiheuta selviä EEG-rytmin muutoksia, voi aiheuttaa verenpaineen (vähäisen) kasvun. On esitetty oletuksia, että usein toistuvat ja/tai pitkään kestävät melko vähäisetkin verenpaineen kasvut (muutama mm Hg) voivat johtaa vuosikausia kestäessään verenkiertoelimistön sairauksiin tai jo olemassa olevan verenpainetaudin hoitovasteen huonontumiseen. Viime aikoina on yritetty löytää yhteyksiä ennen aikaisten kuolemien, esimerkiksi sydän infarktien aiheuttamien, ja ympäristömelun välille.^{20, 21, 566, 541, 606, 542, 543, 738, 544}

Unen laadun huonontuminen voi aiheuttaa myös jälkiseuraamuksia, kuten vireyden ja mielialan tahi suorituskyvyn huonontumisen seuraavana päivänä. Puhutaan seuraavan päivän vasteista.

Melun ja unen välistä riippuvuutta tutkittaessa voidaan mitata, miten melu vaikuttaa aivojen vireystilaan. Tällaisissa tutkimuksissa vireystilaa tarkkaillaan ja arvioidaan aivosähkökäyrästä. Yöaikainen aivojen vireystila luokitellaan karkeasti kolmeen luokkaan: valveilla olo (W), ei-REM-uni* eli NREM ja REM-uni. Paradoksisessa eli REM- eli vilkeudessa (PS tai REM) aivosähkökäyräanalyysi (EEG-käyrät) näyttää aivokuoren aktivoituneen saman tyyppisesti kuten valvetilassa (desynkronoitu EEG).⁵⁴⁵

* REM, engl. Rapid Eye Movements, nopea silmän liike (luomet suljettuna).

Ei-REM uni jaetaan neljään syvyysluokkaan, S1 – S4. S1 on unen ja valveilla olon rajamailla olevaa torkeunta. S3 ja S4 luokitellaan syväksi, virkistävaksi uneksi. Niitä kutsutaan aivosähkökäyrille tunnusomaisen taajuuden perusteella hidasyritykseksi uneksi eli SWS-uneksi.* Ei-REM-unen aikana aivokuorelta voidaan havaita suuriamplitudisia, matalataajuisia EEG-aaltoja, jotka esiintyvät synkronoidusti merkinä aivosolujen yhtäaikaista aktiivisuudesta. Hyvässä unessa vireystilat (S1 – S4, REM-uni) vuorottelevat säännöllisesti läpi yön. Yhden kierroksen kesto on ihmisellä noin 1,5 tuntia.⁵⁴⁶

Unihäiriötutkimuksissa puhutaan kahdenlaisista heräämisistä, EEG-heräämisistä ja tiedostetuista heräämisistä. *EEG-heräämiseksi* kutsutaan sellaista aivosähkökäyrän äkillistä, vähintään kolme sekuntia kestävää muutosta, jonka tuloksena käyrä muistuttaa valvetilan käyrää (ns. alfa-rytmiä, 8...13 Hz⁵⁴⁷).^{548, 728, 549} Unitutkijat puhuvat myös aivokuoren vireystilan perusteella arvioidusta heräämisestä (engl. cortical arousal). Eri tutkimuksissa on käytetty hieman erilaisia EEG-heräämisen kriteereitä.

Tiedostettujen heräämisten (engl. behavioural awakening) määrä mitataan esimerkiksi pyytämällä henkilöä painamaan rekisteröintilaitteen nappia aina kun herää. Melun aiheuttamaksi katsotaan yleensä herääminen, joka tapahtuu korkeintaan viisi minuuttia melutapahtuman jälkeen.⁵⁵⁰ Vanhoissa tutkimuksissa tiedostettujen heräämisten määrä on mitattu myös kysymällä heräämisten määrä koehenkilöltä ylös nousun jälkeen.⁵⁵¹ Kyselymenetelmää pidetään epäluotettavana.

EEG-muutosten ja -heräämisten määrä ja ajankohta korreloivat melko hyvin – mutta ei kuitenkaan yksikäsitteisesti – nukkuvan liikkeisiin (engl. motility), kuten raajan tai kehon asennon vaihtoon tietyn ajan sisällä melutapahtumasta. Monissa tutkimuksissa onkin käytetty sänkyyn tai nukkuvan raajaan kiinnitettyjä liiketila-antureita unihäiriöiden (kääntyilyn) mittaamiseen. Unihäiriöiden mittana on melun aiheuttamaksi katsottujen liikkeiden määrän riippuvuus melusta. Aika, jona liike katsotaan melun aiheuttamaksi vaihtelee eri tutkimuksissa 2...30 (max. 60) sekuntiin melutapahtumasta.^{552, 553} Todennäköisyys melun aiheuttamalle liikkeelle on edellä mainitun ajan sisällä tapahtuvan liikkeen todennäköisyys vähennettynä liikkeiden todennäköisyydellä aikana, jona ei esiinny melutapahtumia. Valveilla ollessa esimerkiksi käden liikuttamistodennäköisyys jokaista 15 sekunnin aikajaksoa kohden oli eräissä tutkimuksissa yli 90 %, kun vastaava luku oli nukkuessa noin 3,7 %.^{554, †}

Joissakin liikevastetutkimuksissa on yritetty parantaa validiutta sillä, että melun aiheuttamiksi katsotaan vain ne noin 5 minuutin sisällä melutapahtumasta tapahtuvat liikkeet, joita seuraa jakso, jolla ei liikettä ole (engl. motility onset).⁵⁴⁰

* SWS, engl. Slow Wave Sleep, hidasaaltouni.

† Esimerkiksi 3,7 % liiketodennäköisyys tarkoittaa sitä, että jos tarkastellaan sataa 15 sekunnin jaksoa, niin 3,7 tapauksessa on odotettavissa käden liikuttaminen. Kahdeksan tunnin yössä liikkeitä olisi tällöin noin 80.

Lyhytaikaisten EEG-heräämisten lukumäärä (aikuisilla) on – tai voi olla – meluttomissakin kotioloissa suuri, 10...50 heräämistä yössä, tyypillisesti kymmenkunta. Näistä noin 60 % on kestoaltaan alle 10...15 s. Jotta ihminen muistaisi aamulla yöaikaisen heräämisensä, valvetilan tulee kestää vähintään 1...2 minuuttia. Tiedostettuja heräämisiä on meluttomissa oloissa normaalisuassa unessa tyypillisesti yksi tai kaksi yössä.*^{555, 556}

Aivosähkökäyrien ja liiketutkimusten tulkintaa vaikeuttaa se, että ei ole olemassa yksikäsitteistä tieteellistä perustetta sille, kuinka suuret ja/tai usein toistuvat aivosähkökäyrien muutokset sekä kuinka usein tapahtuvat ja, kuinka pitkään kestävät valveille heräämiset pitäisi katsoa terveystta haittaaviksi.⁵⁸⁴ Yleensä katsotaan, että alle 30 s kestänyt yöaikainen EEG-valvetila ei huononna unen virkistävää vaikutusta paitsi tapauksissa, joissa niitä on yhden yön aikana hyvin monta.*^{556, †, 557, 558}

Kyselytutkimuksissa on selvitetty sekä meluun heräämisen määrää että melun vaikutuksia unen laatuun. Laadun mittana voidaan käyttää arvioitua unihäiriöiden voimakkuutta. Altistettujen omiin arvioihin perustuva suuresti unihäiriöisten (engl. highly sleep disturbed, mikä selittää myös itse raportoidut heräämiset) esiintyvyys on merkittävästi suurempi, kuin mitä objektiivisilla mittausten menetelmillä (kotioloissa, meluun tottuneilla) mitattujen tiedostettujen heräämisten esiintyvyys on. Esimerkiksi Schipolin lentokentän ympäristössä vuonna 1998 tehdyn kyselytutkimuksen mukaan suuresti unihäiriöisten osuus asukkaista kasvoi yhdeksästä 23 prosenttiin, kun (ulkomelun perusteella arvioitu) sisämelun $L_{Aeq,07-23h}$ -taso kasvoi 22 dB(A)-tasosta (yli/ohilento kerran 1,5 tunnissa) 32 dB(A)-tasoon (n. 7 yli/ohilentoa tunnissa). Vastaavissa melurajoissa tiedostettujen lentomelun aiheuttamien heräämisten määrän pitäisi nykytutkimusten mukaan vaihdella pahimmassakin tapauksessa välillä 1 – 13 heräämistä per altistettu per vuosi. Meluttomissa oloissa tiedostettuja heräämisiä on nykykäsitysten mukaan pahimmassakin tapauksissa keskimäärin noin 500...700 per henkilö per vuosi. Vanhuksilla määrä on voi olla keskimäärin luokka 10 heräämistä yössä eli lähes 4000 vuodessa.⁵⁵⁰

Altistettujen arviota unen laadusta kutsutaan *subjektiiviseksi unen laaduksi*. Subjektiiiviseen unen laatuun eniten vaikuttavat seikat ovat: koettu hyvinvoinnin aste heräämisen jälkeen, arvio todellisesta unen laadusta ja nukahtamisen tarvittu aika.

Kuten edellä todettiin, tutkimuksissa on lähes pääsääntöisesti päädytty siihen, että altistettujen omien arvioiden mukaan melu vaikeuttaa nukahdamista ja häiritsee unta enemmän kuin, mitä tiedostettujen heräämisten vasteet ennustavat, mutta huomattavasti vähemmän kuin (monet) unitutkijat mittariensa perusteella (kun mittana on unen syvyyden muutokset)

* Tiedostettujen heräämisten määrä vaihtelee suuresti eri henkilöillä. Monet sairaudet, tunnetuimpina suurentunut eturauhanen ja uniapnea sekä runsas neste (esim. alkoholin) nautinta ennen nukkumaan menoa lisäävät yöaikaisia heräämisiä.

† Esimerkiksi uniapneatutkimuksissa on todettu yhteys EEG-heräämisten määrän ja unen virkistävän vaikutuksen välillä. Tällöin puhutaan yleensä yli 5...20 EEG-heräämisestä tunnissa.

katsovat tapahtuvan.^{559, 14} Poikkeuksena näyttäisi olevan kuitenkin esimerkiksi naapurista kuuluvat musiikkiäänet. Pelkkä äänen erottuminen voi esittää nukahtamisen.⁵⁶⁰ Toisena poikkeamana voidaan mainita tapaukset, joissa unihäiriöitä aiheuttaa melu, johon altistettu asennoituu hyvin kielteisesti.

Joissain kyselytutkimuksissa on todettu, että yöaikaisen melun kiusalliseksi tai häiritseväksi ilmoittavien henkilöiden määrä voi olla paljon suurempi kuin, mitä objektiiviset unihäiriöiden mittaukset osoittavat.⁵⁶¹ Tämä voidaan tulkita mm. siten, että vähäininkin unenhäirintä voi aiheuttaa suuren kiusallisuuden tai, että yöaikaisen melun kiusallisuuden riippuvuus unihäiriöistä on löyhä.

Huomattakoon, että vakiona pysyvän yöaikaisen melun, esimerkiksi ulkoa sisään kuuluvan tehdasmelun, tuulivoimalan melun, hotellihuoneen tai naapuritalon ilmanvaihdon melun tai etäältä kuuluvan tasaisen liikennekohinan* unenhäirinnästä ei saada luotettavaa tietoa liikevasteiden tai esimerkiksi EEG-käyriä analysoimalla. Syynä on se, että ei ole olemassa mitään yksittäistä muusta melusta erottuvia melutapahtumia ja ei-melutonta aikaa, joiden välisiä vaste-eroja voitaisiin käyttää unihäiriön tai sen riskin esiintyvyyden mittana.

Melun aiheuttamien unihäiriöiden ja (terveys)vaikutusten syntymekanismi

Kuvassa 22 on esitetty eräs monista melun univaikutusten selitysmalleista. Mallien tarkoitus on helpottaa eri tekijöiden ja niiden yhteisvaikutusten esille tuomista sekä asioiden ja vaikutusten ymmärtämistä.

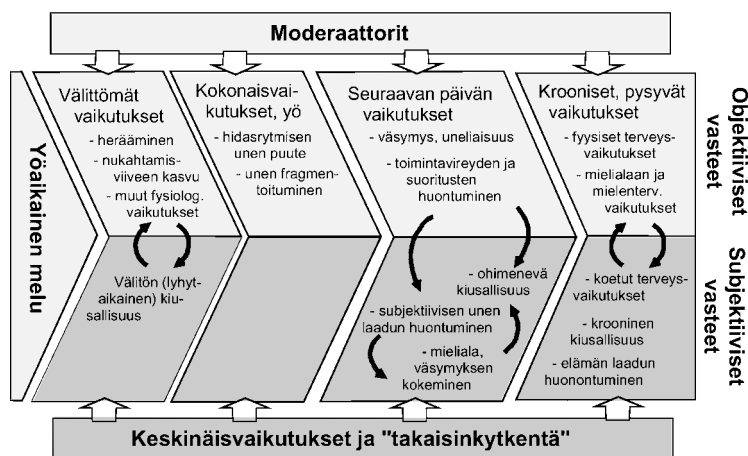
Kuvan 22 selitysmallissa vaikutukset on jaettu kahteen luokkaan: objektiivisiin ja subjektiivisiin. Niiden välillä on keskinäisvaikutuksia ja riippuvuuksia, joita on kuvattu nuolilla.

Moderaattorit ovat ulkoisia ja sisäisiä vaikuttaja-muuttujia tai -olosuhteita (ks. luku ”Meluvaikutusten ja melun yhteydet yksilötasolla”), joilla useimmiten on hyvin suuri melun ja vasteen välisen riippuvuuden satunnais-hajontaa lisäävä vaikutus. Tällaisia ovat mm. sosiaalinen elämäntilanne, ikä, sukupuoli ja kulloinenkin terveydentila, lääkkeiden käyttö, meluherkkyys ja jopa makuuhuoneen lämpötila, kun puhutaan melun vaikutuksista uneen.

Välittömällä eli akuuteilla vaikutuksilla (vasteilla) on suora, ajallisesti välitön syy-seuraus-suhde meluun. Esimerkiksi herääminen meluun, jonka täytyy tapahtua melutapahtuman aikana tai tietyn, lyhyen ajan sisällä tapahtumasta. Muita yöaikaisia fysiologisia meluvaikutuksia, joita on nukkuvilla todettu (riittävän voimakkaassa melualtistuksessa, yleensä L_{AFmax} yli 50 dB(A)) ovat mm. verenpaineen, sydämen syketaajuuden, verisuonten supis-

* Esimerkiksi suurissa taajamissa ns. hiljaisen fasadin (sisäpiha) ulkomelu ja (avoimesta ikkunasta) sisään kuuluvan liikennemelusta ei voi erottaa selvästi erillisiä melutapahtumia.

tumisasteen ja stressihormonien (esim. kortisoli) erittymisen kasvu.^{562, 543, 737, 563, 564} Akuutteja vasteita kutsutaan myös välittömiksi biologisiksi vasteiksi.⁵⁴⁰



Kuva 22: Eräs monista melun univaikutusten ja -vasteiden selitysmalleista. Kyse on mahdollisista vaikutuksista, eli vaikutuksista ja vasteista, joita on tunnistettu ja, joita saattaa esiintyä ja, joilla on todettu tai oletetaan olevan yhteisvaikutuksia.^{565, 562}

Kokonaisvaikutuksilla tarkoitetaan yhden yön (sen ajan, joka nukutaan tai oli tarkoitus nukkua) ajan vaikutuksia yhteensä. Seuraavan päivän vaikutukset, esimerkiksi päiväväsymys, ärtyneisyys ja vireyden huonontuminen, ovat seurausta kahdesta edellisen vastetyhmän vaikutuksista.

Subjekttiivisella unen laadulla tarkoitetaan itse arvioitua edellisen yön (tai öiden) unen laatua. Laadun huononeminen ilmenee usein kiusallisuusvasteen voimistumisena, mikä taas voi vahvistaa käsitystä unen laadun huonontumisesta. Eli kiusallisuus- ja häiritsevyysevasteet vaikuttavat "unipuolellakin" toinen toisiinsa.

Ainakin periaatteessa krooniset, pysyvät vaikutukset riippuvat kolmen edellisen vaikutusluokan vasteiden kokonaisvaikutuksesta. Nämä krooniset vaikutukset pitäisi olla pääkriteereitä arvioitaessa melun pysyviä vaikutuksia uneen asuin- ja elinympäristössä eli arvioitaessa, millaisia väestöön kohdistuvia kansanterveydellisiä vaikutuksia yöaikaisella melulla on. Valitettavasti tiedeyhteisöllä ei ole tutkimustietoa, jonka perusteella voitaisiin riittävän luotettavasti arvioida kroonisten vaikutusten riippuvuus yöaikaisesta melusta, esimerkiksi yömelun vaikutus sydänsairauksien esiintyvyyteen tai ilmaantuvuuteen.^{539, 543, 565, 575, 566}

Melu voi vaikuttaa uneen ja unen laatuun kahdella tavalla, suoraan ja epäsuorasti. Suoraksi vaikutukseksi kutsutaan unihäiriötä, joka riippuu vain melun ominaisuuksista, kuten voimakkuudesta ja informaatioisällöstä. Epä-

suora vaikutus syntyy silloin, kun unihäiriön, esimerkiksi nukahtamisen vaikeutumisen, syynä on melun herättämä ”tunnekuohunta”, kuten voimakas kielteinen asennoituminen meluun tai sen tuottajaan, tai melun tuottama masennus, voimattomuus, stressi tai muu psyykinen reaktio. Usein oletetaan, että melun aiheuttamat unihäiriöt lisäävät koettua melun kiusallisuutta, mutta reaktio voi olla myös – kuten kuvassa 22 esitetään – päin vastainen: koettu kiusallisuus aiheuttaa unihäiriöitä. Esimerkiksi voimakas akuutti kiusallisuus voi vaikeuttaa uudelleen nukahtamista. On myös mahdollista, että jokin kolmas tekijä, esimerkiksi henkilön meluherkkyys tai sairaus, selittää suurimman osan sekä suorien että epäsuorien unihäiriöiden voimakkuudesta (vaikka henkilö itse arvioi unihäiriöt melusta johtuviksi).^{567, 549, 568}

Valveilla oloajan meluallistuksen vaikutusta yöunen laatuun on tutkittu kovin vähän. Yksi tunnettu tutkimus viittaa siihen, että päiväaikaisen meluallistuksen voimakkuudella saattaisi olla vaikutusta yöaikaisen unen laatuun.⁵⁶⁹

Unihäiriöiden riippuvuus melutapahtuman voimakkuudesta ja ominaisuuksista

Yleensä katsotaan, että yksittäisten, muusta melusta selvästi erottuvien melutapahtumien aiheuttama unihäiriön todennäköisyys riippuu parhaiten melutapahtuman äänialtistustasosta (L_{AE}) tai enimmäistasosta (L_{AFmax}). Useimpien kotiloissa mitattujen tutttujen melujen vasteiden kynnsarvo, eli alhaisin melutaso, josta lähtien voidaan osoittaa jokin validi riippuvuus melun ja vasteen välille, on L_{AE} -tasona mitattuna noin 40 dB(A). Tämä vastaa noin 32 dB(A) L_{AFmax} -tasoa.* Yhteen melutapahtumaan valveille heräämisen äänialtistustason kynnsarvo on nykykäsitysten mukaan noin 55 dB(A).^{540, †} Eri tutkimuksissa on käytetty erilaisia kynnsarvojen kriteereitä. Esimerkiksi melko tuoreessa hollantilaisessa tutkimuksessa alimmaksi pahimman tapauksen vasteeksi mainitaan yksi tiedostettu herääminen per altistettu per vuosi.⁵⁵⁰

Monien yksittäisistä melutapahtumista koostuvien melujen, esimerkiksi liikennemelun, tyypillinen ohiajojen äänialtistustaso ja enimmäistaso (ulkona ja tietyssä makuuhuoneessa[‡]) korreloivat hyvin ko. melun ekvivalenttitasoon (ja keskenään).^{570, 571, 572, 573, 574} Tästä syystä myös L_{Aeq} -taso (ja L_{DEN} -taso) on ainakin strategisessa suunnittelussa useimmiten lähes yhtä hyvä (validi) unihäiriöiden indikaattori, kuin äänialtistus- tai enimmäistaso. Nykyisin katsotaan, että äänialtistustaso on enimmäisäänitasoa jonkin verran parempi,

* Yleensä ohiajon tai ylilennon tyypisen melun $L_{AE} - L_{AFmax} = 0...10$ dB(A). Erotus riippuu mm. etäisyydestä melulähteseen, lähteen nopeudesta ja junilla junan pituudesta. Pitkillä tavarajunilla erotus voi olla jopa 20 dB(A).

† Muistettakoon, että kynnsarvo ei ole välttämäärä ole se melutaso, jonka ylittyessä kyseinen vaikutus olisi katsottava terveyshaitaksi.

‡ Kun puhutaan tietystä makuuhuoneesta, niin ulko- ja sisämelun ero katsotaan yleensä vakioksi, koska ulkoseinän ääneneristävyyden on vakio. Ulko- ja sisämelun ero riippuu kuitenkin mm. myös äänen tulokulmasta ja spektristä.

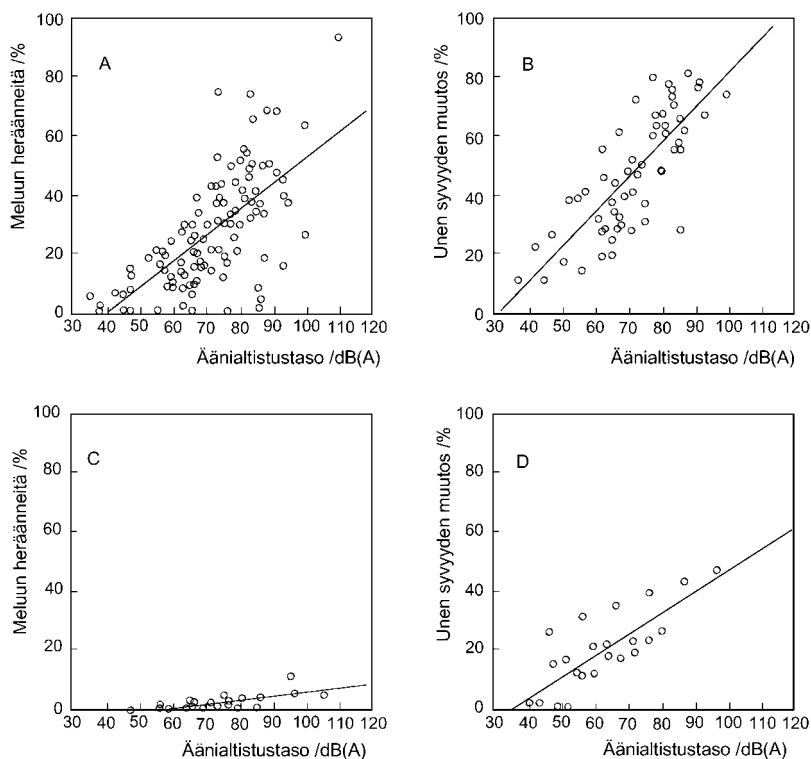
so. validimpi ja pienemmän satunnaishajonnan omaava, yksittäisten melutapahtumien aiheuttamien unihäiriöiden mittari.^{581, 575, 576}

Jo kokemuksesta tiedämme, että samanlaisena toistuvat melutapahtumat eivät aiheuta aina samanlaisia unihäiriöitä. Unihäiriöt riippuvatkin vain tietyllä todennäköisyydellä melun ominaisuuksista, kuten sen äänitasosta, tason ajallisesta vaihtelusta tai informaatioisällöstä. Monissa tutkimuksissa unenhäirinnän pääkriteerinä on tiedostettu, EEG-käyristä tai liikevasteesta arvioitu herääminen meluun. Tutkimusten kohteena on yleensä herääminen yksittäiseen melko lyhytkestoiseen melutapahtumaan, jonka äänitaso on selvästi taustamelua suurempi. Heräämistodennäköisyys pitkälle ajalle jakaantuneeseen, vähän taustamelusta poikkeavaan melutapahtumaan on pienempi kuin saman äänialtistustason omaavaan voimakkaaseen lyhytkestoiseen ääneen. Etenkin kotioiloissa tehtyjä tutkimuksia vertailtaessa onkin syytä ottaa voimakkuuden lisäksi huomioon melun vaihtelulaajuus, eli paljonko ja kuinka nopeasti yksittäisten melutapahtumien aikainen melutaso ylittää taustamelutason ja ekvivalenttitason. Esimerkiksi, mitä vilkkaampi liikenne ja, mitä pitempi matka asunnosta on liikenneväylälle, sitä huonommin liikennemelun yksittäiset melutapahtumat, kuten ohiajot tai ylilennot, erottuvat.

Kuten on jo todettu, eri mittauksilla ja eri tutkimuksissa saadut tulokset vaihtelevat suuresti. Kuvassa 23 on yhteenveto 21 eri tutkimuksesta.⁵⁸¹ Kuvaa 23C vastaava kotioiloissa heräämismvaste todettiin myös USA:n ilmapvoimien toimeksiannosta tehdyssä tutkimuksessa ($N = 1887$ koehenkilöyötä). Parhaiten vaste korreloi heräämistä ennen vallinneeseen $L_{AE, 5 \text{ min}}$ -tasoon. Keskimäärin koehenkilöt heräsivät hieman yli 2 kertaa yössä.⁵⁷⁷ Yhdysvaltain avaruusviraston toimeksiannosta tehdyssä tutkimuksessa päädyttiin myös samaa suuruusluokkaa oleviin heräämismvasteisiin kotioiloissa.⁵⁷⁷ Ratkaisematta on edelleenkin laboratorio- ja kotilojen heräämismvasteiden suurten erojen syyt. Tottuminen (pitkän ajan tottuminen) meluun on yksi syistä.^{578, 579}

Yleensä koehenkilöt heräävät laboratorio-oloissa huomattavasti herkemmin meluun kuin koti-oloissa (kuva 23, A ja C). Heräämisherkkyuden eroa pyritään tasoittamaan totuttamalla koehenkilöt nukkumaan laboratoriohuoneessa ennen varsinaisia kokeita.⁵⁸⁰ Tottumisen on todettu vähentävän merkittävässä määrin valveille heräämisiä. Melutapahtumien aiheuttamiin unen syvyyden muutoksiin totuttamisella on pienempi vaikutus.⁷²⁸ Ainakin ensimmäisinä öinä heräämisiä tapahtuu laboratoriossa noin 10 dB(A) alhaisempiin melutasoihin kuin kotona. Varovaisestikin arvioiden samaan meluun heräämisten todennäköisyys on kotona noin 1/10 siitä, mitä kirjallisuudessa referoidut laboratoriokokeet ovat antaneet tyypillisiksi tuloksiksi.^{556, 581}

Melutapahtumaan heräämisen todennäköisyys on sitä suurempi, mitä pitempi aika on kulunut nukkumaan menosta.⁵⁸² Syynä on yleensä se, että kevyen unen osuus kasvaa aamua kohden ja heräämiskynnys on kevyen unen aikana herkempi kuin syvän unen aikana. Osasyynä heräämistodennäköisyyden kasvuun unen keston myötä saattaa olla myös se, että monilla ihmisillä työmelualtistus aiheuttaa kuulon alenemista päiväaikaan ja kuulon herkkyys palautuu kuulon leväessä yöllä. Tästä ei löytynyt tutkimuksia.

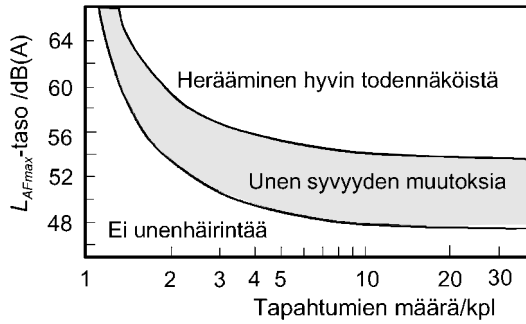


Kuva 23: Yksittäisten melutapahtumien vaikutus uneen laboratoriossa (A, B) ja kotioloissa (C, D). Kuussa A ja C on esitetty meluun heräähneiden osuuden (%) riippuvuus yöaikaisen melun äänialtustustasosta ja kuussa B ja D niiden henkilöiden, joilla melu aiheutti unen syvyyden keventymisen/keventymisiä, osuuden (%) riippuvuus yöaikaisen melun äänialtustustasosta⁵⁸¹

Meluisten katujen varsilla asuvat näyttävät valittavan enemmän liian aikaisista heräämisistä kuin nukahtamisen vaikeutumisista nukkumaan mentäessä.⁵⁸³ Tämä selittyy osin edellä mainitusta heräämisherkkyiden kasvusta, osin siitä, että liikenteen melutapahtumien määrä alkaa kasvaa aamuyöstä. Mitä enemmän tapahtumia on tietyn ajan sisällä, sitä todennäköisempää herääminen on.

Tutkijamaailma ei ole yksimielinen siitä, millaisia ja kuinka usein melun vuoksi tapahtuvia unitilan muutoksia olisi syytä pitää terveydelle haitallisina.⁵⁸⁴ On esitetty hyvin monenlaisia tulkintoja ja kriteereitä.

Griefahn-kriteeri^{585, 586} on ollut yksi usein referoitu ja meluhaittojen arvioinnissa käytetty (kuva 24). Se on muotoiltu seuraavasti: “Kuuden yön tottumisjakson jälkeen korkeintaan 10 %:n valveille heräämisen todennäköisyys (riski) yön aikaisiin melutapahtumiin laboratorio-oloissa kaikkein heräämisherkkimällä väestön osalla (yli 70-vuotiaat) ja siinä unen vaiheessa, jossa herkkyys heräämiselle on suurin (REM-unen aikana, jota on noin ¼ unen ajasta). Heräämisen aikaisen valvetilan on kestettävä vähintään 4 minuuttia. Yksittäisten melutapahtumien kesto enintään 40 s ja tapahtumia enintään 32 kpl yössä.”



Kuva 24: Griefahn-kriteerikäyrät yöaikaiselle sisämelulle.

Griefahn-kriteerin mukainen 10 %:n heräämisriski merkitsisi yhden vuoden aikana noin 40 valveille heräämistä, jotka jakaantuvat tasaisesti koko vuodelle. Useina perättäisinä öinä herääminen ei ole poissuljettu tapahtuma. On kysytty: Pitäisikö riskiä rajoittaa siten, että herääminen perättäisinä öinä olisi "eliminoitu"? Pitäisikö kriteeriä laadittaessa ottaa huomioon vähemmän herkät väestönosat? Viimemainitun kysymyksen perusteluina on mainittu se, että 40 vuotiaille vastaavan riskiprosentin meluraja on noin 5 dB korkeampi ja 10 vuotiaille noin 16 dB korkeampi kuin yli 70-vuotiaille. Kysymyksen yhteydessä on todettu, että asuntoalueilla, joilla lentomelu aiheuttaa unihäiriöitä, yli 70-vuotiaitten osuus on hyvin pieni.

Griefahn-kriteerin perusteella laskettu todennäköisyys, P , herätä yhteen, yhden yön aikaiseen lentomeluun riippuu enimmäistasosta seuraavasti:

$$L_{AF\max} < 53\text{dB(A)}, P = 0\%$$

$$(47) \quad 53\text{dB(A)} < L_{AF\max} < 61\text{dB(A)}, P = \frac{10(L_{AF\max} - 53)}{11,2}\%$$

$$L_{AF\max} > 61\text{dB(A)}, P = 1,32(L_{AF\max} - 61) + 10\%$$

ISO/CD 1996-standardiehdotuksessa⁵⁸⁷ on esitetty seuraava valveille heräämisen todennäköisyys, P [%], melutapahtumaan jonka äänialtistustaso (makuuhuoneen sisä-äänitaso) on L_{AE} [dB(A)]

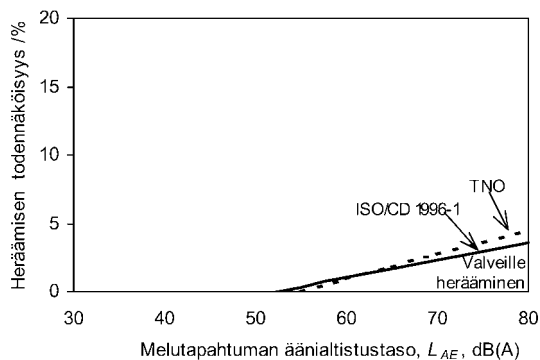
$$(48) \quad P = 0,13L_{AE} - 6,80$$

Pearsons *et al.* ovat päätyneet samaan lineaarisen regression mukaiseen riippuvuuteen, jota en ehdotettu myös amerikkalaiseen ANSI-standardiin.^{588, 581}

Hollannissa on käytössä seuraava valveille heräämisen ennustemalli⁵⁸⁹

$$(49) \quad P = 0,18(L_{AE} - 55) = 0,18L_{AE} - 9,9$$

Edelliset kaavat ennustavat yhden henkilön heräämistodennäköisyyden yhteen ohiajon tai -lennon tyyppiseen melutapahtumaan. Todennäköisyyden oletetaan kasvavan lineaarisessa suhteessa tapahtumien määrään. Kuvassa 25 on vertailtu ISO-ehdotusta ja Hollannin menetelmää.



Kuva 25: Yhden ohiajon tai -lennon tyyppisen melutapahtuman aiheuttama valveille heräämisen todennäköisyys ISO/CD 1996-1:1999 standardiehdotuksen ja Hollannissa käytössä olevan arviointimenetelmän mukaan (TNO).

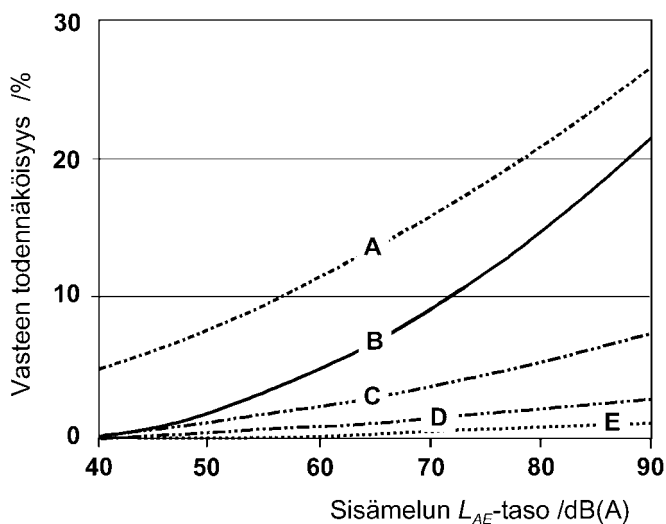
Kaavojen (48) ja (49) heräämistodennäköisyys, P , korreloi lähes yhtä hyvin L_{AE} -tasoon 70...75 dB(A) asti. Tätä ylempillä L_{AE} -tasoilla ero on merkittävä. Koko pätevyysalueella, $L_{AE} = 48...100$ dB(A), jonka ISO/ANSI-kaava (48) peittää, korrelaatiokerroin $r = 0,45$.⁵⁸⁸ Tämä korrelaatio tarkoittaa sitä, että melu ja sen voimakkuus, L_{AE} -taso, selittää noin 20 %:a heräämisistä.*

Kuvassa 26 on esitetty Alankomaiden kansallisen terveystieteiden asiantuntijakomitean vuonna 2004 esittämät yhden ylilennon tai ohiajon tyyppisen melutapahtuman unihäiriövasteet. Kyseessä on vasteen todennäköisyys nukkuvaa altistavan melutapahtuman L_{AE} -tason funktiona. A) unen syvyyden muutos (kevyemmäksi), B) raajojen liike melun vuoksi ainakin yhtenä 30 sekunnin tarkastelujaksona 5 minuutin sisällä melutapahtumasta, C) raajojen liike ainakin yhtenä 30 sekunnin tarkastelujaksona 5 minuutin sisällä melutapahtumasta, jonka jälkeen liikkumatonta aikaa, D) EEG-herääminen, E) tiedostettu herääminen.⁵⁴⁰ Suurin osa kuvan 26 perusteena olevista havainnoista on lentomelun unihäiriötutkimuksista, mistä syystä vasteet eivät ehkä päde kovin hyvin muille meluille.

Kuvan mukaan univaiheen syvyyden muutos on herkin ja tiedostettu herääminen epäherkin vaste. Hollantilais tutkimusten mukaan tottumus (lento)meluun eli nukkuminen asunnossa, jossa on suuri yöaikainen lentomelun $L_{Aeq, yö}$ -taso, epäherkistää merkittävästi kuvan 26 tyyppisiä vasteita. Hollantilaisessa tutkimuksessa todettiin kielteisten asenteiden lentomelua

* Selitysprosentti on korrelaatiokertoimen neliö prosentteina eli $100 \cdot 0,45^2 \approx 20$.

ja Schipolin kentän laajentamista kohtaan herkistäneen unihäiriöitä kuvaavia liikevasteita.⁵⁵⁴ Kielteisten asenteiden todettiin herkistävän unihäiriövasteita myös Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa.⁵⁵³

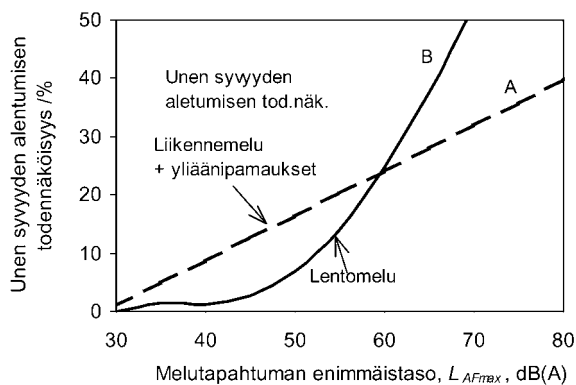


Kuva 26: Alankomaiden kansallisen terveysasioiden asiantuntijakomitean esittämät unihäiriövasteiden riippuvuudet nukkuvaa altistavan (sisämelun) melutapahtuman L_{AE} -tasosta. Selitys tekstissä.⁵⁴⁰

Yhdysvaltain tiedeakatemian työryhmä julkaisi 1970-luvun loppupuolella meluvaikutusindeksiksi (engl. noise impact index. NII) nimetyn suureen.^{590, 591} Tämä indeksi otti huomioon unihäiriöiden esiintyvyyden todennäköisyyden. Esiintyvyyden painokerroin – kerroin jolla melutapahtumalle [tasoltaan L_{AE} dB(A)] altistuneiden asukkaiden määrä tuli kertoa – oli

$$(50) \quad w = 0,01[1,35L_{AE} - 50]$$

Kuvassa 27 on esitetty kahden tutkimuksen arviot melun syvyyden muutoksen (alentumisen) riippuvuudesta melutapahtuman enimmäistasosta. Kuvaa tarkasteltaessa on syytä muistaa, että unen syvyys vaihtelee normaalin unen aikanakin eikä tiedemaailma pysty sanomaan, milloin ja millaiset melun aiheuttamat unen syvyyden muutokset olisi katsottava terveyttä haittaaviksi.



Kuva 27: Unen syvyyden muuttumisen (alentumisen) todennäköisyyden riippuvuus melutapahtuman (sisämelun) enimmäistasosta.^{590, 591}

Yöaikaiset melutapahtumat lisäävät stressihormoneina tunnettujen hormonien, kuten kortisolin, eritystä. Spreng⁵⁴³ suosittelee kortisoli-hormonin eritysvasteeseen perustuvan sallittujen yöaikaisten lentomelun enimmäistason, L_{Amax} [dB(A)], riippuvuudeksi tapahtumien määrästä, n [kpl] ($n > 2$)

$$(51) \quad L_{Amax} = 31,25 \left(\frac{3,257}{n} - \lg n + 0,813 \right) + 53 \text{ dB(A)}$$

Julkaisusta ei käy selville, mitä aikapainotusta pitäisi käyttää.

Tietyn melun unenhäirintä, esimerkiksi nukahtamisen vaikeutuminen, voi riippua ainakin tilastollisesti melutapahtumien välille jäävien hiljaisten jaksosten pituudesta, lukumäärästä ja "hiljaisuuden" aikaisesta melutasosta, eikä niinkään varsinaisten melutapahtumien melusta.⁵⁹²

Japanilaisen tutkimuksen mukaan koehenkilöt eivät raportoineet kokevansa unihäiriöitä nukkumisen aikaisen sisämelun ekvivalenttitason ollessa alle 34 dB(A). Sisämelun kasvusta riippuva unihäiriöitä kokevien asukkaiden lukumäärän kasvu pysähtyi melutasoon 56 dB(A).⁵⁹⁶ Poikkeuksena näyttäisi olevan jo aikaisemmin mainittu musiikkimelu. Noin 20 %:n mielestä [$N = 6$] jo 25 dB(A) tasolla kuuluva karaoke-musiikki esti nukahtamisen.⁵⁶⁰ Koska koehenkilöiden määrä on näin pieni, tulokseen (että 20 %:a ihmisistä ei pysy nukahtamaan 25 dB(A) musiikkimelussa) suhtauduttava varauksin.

Yöaikaisen ekvivalentti- eli keskiäänitason riippuvuus melutapahtumien äänialtistustasosta

Yksittäisen melutapahtuman voimakkuuden mittana käytetään usein A-taajuuspainotettua äänialtistustasoa, L_{AE} . Sen symboleina on käytetty myös merkintöjä SEL ja L_{Ax} .

Oletetaan, että nukkujaa altistaa yön aikana $i = 1 \dots n$ kappaletta melutapahtumia, joiden äänialtistustaso on $L_{AE,i}$ [dB(A)]. $L_{Aeq, 07-22h}$ -tason ja äänialtistustason välille voidaan johtaa kaava

$$(52) \quad L_{Aeq, 07-22h} = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{L_{AE,i}/10} \right] - 45,1 \quad \text{dB(A)}$$

Jos oletetaan, että $i = 1 \dots n$ on nukkujaa koko vuoden aikana altistavien melutapahtumien määrä, niin niiden keskimääräinen koko vuoden öiden ekvivalentti- eli keskiäänitaso on

$$(53) \quad L_{Aeq, 07-22h, vuosi} = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{L_{AE,i}/10} \right] - 70,7 \quad \text{dB(A)}$$

Kaavat yksinkertaistuvat, jos oletetaan, että kaikkien n melutapahtuman äänialtistustaso on sama, $\overline{L_{AE}}$. Tällöin

$$(54) \quad L_{Aeq, 07-22h} = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{\overline{L_{AE}}/10} \right] + 10 \lg n - 45,1 \quad \text{dB(A)}$$

ja

$$(55) \quad L_{Aeq, 07-22h, vuosi} = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{\overline{L_{AE}}/10} \right] + 10 \lg n - 70,7 \quad \text{dB(A)}$$

Tiedetään, että todennäköisyys, jolla melutapahtuma vaikuttaa uneen, riippuu tapahtuman melun voimakkuudesta eli i . tapahtuman todellisesta $L_{AE,i}$ -tasosta, joka on jakautuma. On kysyttävä, millaista keskimääräistä arvoa kuvaavaa lukua olisi käytettävä, jotta se ennustaisi mahdollisimman oikein kaikkien n tapahtuman yhteensä aiheuttamien unihäiriöiden määrään?

Niin sanottu energiakeskiarvo

$$(56) \quad \overline{L_{AE}} = 10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{AE,i}/10} \right]$$

todennäköisesti yliestimoi kokonaismäärää, koska harvinaiset suuret $L_{AE,i}$ -arvot nostavat tätä keskiarvoa

Eräitä erityisnäkökohtia

Melualituksia tutkittaessa on syytä pitää mielessä, että yksittäisten henkilöiden arviot (liikenne)melun vaikutuksesta oman unensa laatuun korreloivat usein paremmin henkilön meluherkkyyteen ja hänen arvioonsa melun kiusallisuudesta kuin melun voimakkuuteen.⁵⁹³

Ikkunoiden aukipito ja/tai huono ääneneristävyys näyttävät huonontavan ainakin koeoloissa unen laatua.^{594, 595} Toisaalta, katujen varsilla olevien rakennusten ulkoseinien ääneneristävyydellä tai ikkunoiden asennolla (auki/kiinni) ei näyttäisi aina olevan kovin selvää vaikutusta niiden melutapahtumien lukumäärään, jotka ylittävät taustamelutason vähintään 10 dB(A). Verrattaessa eri maissa tehtyjä unenhäirintätutkimuksia – etenkin, jos lähtökohtana in ulkomelun voimakkuus – on syytä pitää mielessä, että rakennusten ulkokuoren ääneneristävyys ja ikkunoiden auki pitotavat vaikuttavat ulkoa sisään kuuluvan melun voimakkuuteen.⁵⁹⁶ Esimerkiksi Etelä-Japanissa sekä Keski- ja Etelä-Euroopan maissa asuntojen ulkokuoren ääneneristävyys saattaa olla ikkunoiden ollessa kiinni 15...30 dB(A) huonompi kuin Suomessa on tyypillistä.^{597, 598}

Pidettäköön myös mielessä, että makuuhuoneiden melutasot eivät välttämättä riippuu yksikäsitteisesti ulkomelun tasosta. Kadun (tai melulähteen) puoleisissa makuuhuoneissa on yleensä suurempi melutaso kuin pihan (suojan) puoleisissa. Rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyys riippuu myös kohdistuvan melun spektristä. Matalataajuisten melun eristävyys on pääsääntöisesti alhaisempi kuin korkeataajuisten. Tutkimuksiin, joissa makuuhuoneiden melutaso on arvioitu ulkomelusta laskennallisesti, esimerkiksi olettamalla jokin vakio ääneneristävyyttä kuvaava ulko- ja sisämelun tason ero kadun ja pihan puolella oleviin makuuhuoneisiin, on syytä suhtautua kriittisesti.⁵⁹⁹

Monet lääkkeet ja sairaudet aiheuttavat unihäiriöitä tai herkistävät melun aiheuttamille unihäiriöille.^{600, 601, 602} Unihäiriöitä esiintyy myös ihmisillä, joilla ei ole sairauksia ja, jotka nukkuvat meluttomissa oloissa. Meluttomissa oloissa tiedostettuja heräämisiä on tyypillisesti 1 tai 2 yössä. Noin 80 – 90 %:a unihäiriöistä on todettu johtuvan muusta kuin ulkoa sisään kuuluvasta melusta.^{576, 603} Joissakin meluvaikutustutkimuksissa tällaiset ei-melusta riippuvat unihäiriöt on eliminoitu (normalisoitu pois), mutta monissa tutkimuksissa kaikki yöaikaiset heräämiset ja unihäiriöt selitetään melusta johtuviksi. Esimerkiksi kyselytutkimuksien raporteissa on saatettu korreloida vastaajien arvioimat heräämisten määrät ja unen laatu suoraan melutasoon, ilman että muiden syiden osuutta olisi mitenkään otettu huomioon.

Terveysvalvonnassa voidaan tarkastella haittoja myös suuren joukon, esimerkiksi kokonaisen asuntoalueen, kannalta. Tällöin kriteerinä voisi olla se todennäköisyys, jolla tietty prosentti ihmisistä herää meluun tai koko asuntoalueelle ennustettu heräämisten kokonaismäärä vuodessa. Suunta on, että meluvaikutusten mittana käytetään unihäiriöiden, esimerkiksi EEG-heräämisten, esiintyvyyttä laskettua joko heräämisinä vuodessa 1000 asukasta kohden tai koko tarkastelualueen väestössä.

Yleensä suurin osa ihmisistä nukkuu yöaikana ja käy päivisin töissä. Asuntoalueilla nukkuvia on öisin paljon enemmän kuin päivisin ja iltaisin. Esimerkiksi, jos asuntoalueella olisi yöaikaan kymmenkertainen määrä nukkuvia päiväaikaan verrattuna, kriteerinä on se, että vain tietty prosentti herää meluun, ja oletetaan, että unihäiriöt riippuvat vain melun voimakkuudesta, yöajalle olisi perusteltua asettaa noin 10 dB(A) päiväajan melua alhaisempi ohjearvo heräämiskynnyksen ylittävälle melulle.

Muista terveysvaikutuksista

Tiedeyhteisö hyväksyy yleisesti sen, että voimakas melualtistus voi aiheuttaa epäspesifisiä stressireaktioita, jotka akuutissa vaiheessa voivat ilmetä a) veren seerumin katekolamiinien, kolesterolin ja triglyserolien pitoisuuden muutoksena, b) veren paineen nousuna, c) sydän infarktirikkin kasvuna. Tilastollisesti merkittäviä yhteyksiä stressireaktioiden ja melun välillä esiintyy yleensä tapauksissa, joissa päivittäinen jatkuva melualtistus tai ulkomelu ylittää 60...80 dB(A) ekvivalenttitason.^{604, 605, 541, 606, 607, 544}

Ympäristömelun vaikutuksia lasten verenpaineeseen on tutkittu mm. Bratislavassa ja Australiassa⁶⁰⁸ ($N = 1230$). Tilastolliset erot eri melualueiden altistuvien lasten systolisessa ja diastolisessa verenpaineessa olivat pieniä, korkeintaan muutaman millimetrin luokkaa. Bratislavan tutkimuksessa luokiteltiin meluisaksi alueet, joilla lastentarhojen päivämelun L_{Aeq} -taso ylitti 65 dB(A). Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa, verrattiin vastaa- jien ilmoittamien diagnostoitujen verenpainetauditapausten esiintyvyyttä Arlandan kentän melualueilla ja Tukholman muilla alueilla asuvien välillä. Lentomelun todettiin lisäävän verenpainetaudin esiintyvyyttä jo asunto-alueilla, joilla lentomelun L_{DEN} -taso oli 50 – 55 dB(A) [ns. odds ratio oli 1,1; 95 % varmuusväli 0,7 – 1,9; yli/ohilentojen enimmäistason tuli olla yli 72 dB(A)].⁶⁰⁹ EU:n viidenteen puiteohjelmaan sisältyy neljä vuotta kestävä tutkimus lentomelun vaikutuksista verenpainesairauksiin. Tutkimus päättyi vuonna 2006.⁶¹⁰

Yöaikaisten melutapahtumien on esitetty aluksi kiihdyttävän nukkuvan sykkettä, mutta jonkin ajan kuluttua laskevan sitä.⁶¹¹ On myös esitetty tutkimustuloksia, joiden mukaan (voimakkaat) yöaikaiset melutapahtumat voisivat aiheuttaa sydämen rytmihäiriöitä. Australialaisessa tutkimuksessa⁶¹² ei löydetty todisteita siitä, että sykkeen muutokset ja rytmihäiriöt riippuisivat melun voimakkuudesta.

Australialaisessa lentomelututkimuksessa ($N = 1005$) analysoitiin miten suunniteltu lentokentän uudistuksen tuoma arvioitu melun muutos, a) melutilanteen parantuminen, ja b) melutilanteen huonontuminen, vaikuttivat asukkaiden itsensä arvioimiin terveysvaikutuksiin verrattuna niiden ihmisten arvioihin omasta terveydestään, joiden ympäristön melun ei odotettu muuttuvan. Tutkijat päätyivät siihen, että meluherkkyys ja asenne meluun

selittivät enemmän arvioituja terveysvaikutuksia, kuin arvioitu melun voimakkuuden muuttuminen.⁶¹³

Tutkimustulokset melun vaikutuksista lasten käyttäytymiseen ja oppimiseen ovat ristiriitaisia. Joissakin tutkimuksissa on päädytty mm. siihen, että voimakas melu tai melun kokeminen erittäin kiusalliseksi lisäisi aggressiivistä käyttäytymistä. Toisissa tutkimuksissa ei ole todettu vastaavaa yhteyttä.³¹¹

Puheenhäirintä

Melu, jota yleensä nimitetään kuulemistapahtuman aikaiseksi taustameluksi, voi huonontaa puheen erotettavuutta ja ymmärrettävyyttä* peittämällä eli maskeeraamalla puhesignaalin osittain tai kokonaan.⁶¹⁴

Puheen erotuskynnyksien erilaisissa kuunteluoloissa ja aerilaisille sanastoille määritetään yleensä 50 %:n ymmärrettävyytenä eli sinä puheen voimakkuutena, joka tarvitaan, jotta kuulija ymmärtäisi 50 % puheesta.⁶¹⁵ Ymmärrettävyys riippuu puheen signaali-kohinaerosta (SNR, engl. signal to noise ratio) eli puheen (signaalin) voimakkuuden ja taustamelun tasoerosta ja kuulijan kuulokyvystä. Ymmärrettävyys paranee SNR:n kasvaessa, kuulokyvystä riippuen 0,05 dB⁻¹...0,2 dB⁻¹. Kaikkien huonokuuloisimpien arvo 0,05 dB⁻¹ tarkoittaa sitä, että ymmärrettävyys kasvaa 0,5 % signaali-kohinaeron kasvaessa 1 dB. Hyväkuuloisilla SNR:n kasvu 1 dB:llä lisää ymmärrettävyyttä lähellä erotuskynnystä 20 %:lla.⁶¹⁶

ANSI S3.5:1997 standardin⁶¹⁷ mukainen puheen ymmärrettävyysindeksi, SII (Speech Intelligibility Index), määritellään kaavalla

$$(57) \quad SII = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^n w_i (SNR_i + 15)$$

jossa $i = 1 \dots n$ on taajuuskaista, w_i ko. taajuuskaistan i painokerroin, SNR_i signaalikohinasuhde taajuuskaistalla i ($SNR \in [-15; 15]$). Standardi on laadittu vakiona pysyvälle taustamelulle. Saksalaisessa väitöskirjassa esitetään tästä kehitetty menetelmä taustamelulle, jonka voimakkuus ja spektri vaihtelevat ajallisesti.⁶¹⁸

Peittovaikutus riippuu myös puheen ja peittävän äänen tulosuuntaerosta. Peitto on japanilaisen tutkimuksen mukaan tehokkainta, kun tulosuunnat ovat samat.⁶¹⁹

* Erotettavuus mittaa kuinka hyvin tietyllä puheen voimakkuudella hyvin artikuloivan nuorehkon miehen puheen ääneasut – merkitystä vailla olevat lyhyet tavut – on erotettavissa ko. kuunteluloissa. Ymmärrettävyys mittaa joko sanojen (sanaymmärrettävyys) tai lauseiden (lauseymmmärrettävyys) ymmärrettävyyttä eli sitä, kuinka hyvin kuulija kuulee ja pystyy kuulemansa perusteella täydentämään oikeaksi muun kuullun perusteella sanoja tai lauseita.

Kotioloissa ulkoa sisään kuuluvan melun voimakkuus ja spektri yleensä vaihtelevat ajallisesti, kuten vaihtelee esimerkiksi radioista tai televisiosta kuullun puheen vastaavat suureetkin. Ei ole olemassa hyvää yleistä menetelmää arvioida voimakkuudeltaan ja spektriltään vaihtelevan melun vaikutuksia voimakkuudeltaan ja spektriltään vaihtelevan puheen erotettavuuteen ja ymmärrettävyyteen. Pelkästään se, että puhe peittää itse itseään aiheuttaa pulmia.⁶²⁰

Eräässä vanhassa englantilaisessa laboratoriotutkimuksessa tultiin tulokseen, että ulkoa sisään kuuluvan liikennemelun 10%:n pysyvyytaso eli $L_{A,10\%}$ oli tutkituista 31 vaihtoehdosta paras vilkkaan liikenteen (6000 ajoneuvoa/h) puueenhäirinnän (jota mitattiin yleisellä kiusallisuudella) indikaattori.⁶²¹

Japanilaisessa tutkimuksessa todettiin $L_{A,90\%}$ -tason korreloivan jonkun verran paremmin altistettujen kokemaan radion ja TV:n kuuntelun puueenhäirinnän kiusallisuuteen kuin L_{Aeq} -tason.⁶²² Samassa tutkimuksessa todettiin altistetun oman puheäänien altistavan puhujia ($N = 24$) puheen aikana 76...90 dB(A) L_{Aeq} -tasolla. Koko vuorokauden $L_{Aeq,24h}$ -tasoksi muunnettu oman puheen aiheuttama altistus vaihteli koehenkilöillä 60...80 dB(A).

Englantilaisessa tutkimuksessa ($N = 297$ mittausta) todettiin televisioita kuunneltavan kodeissa keskimäärin noin 57 dB(A) voimakkuudella ($L_{Aeq,10\text{ min}}$ -taso kuuntelun aikana). Vaihtelualue oli 36 – 76 dB(A). Television kuuntelun äänen voimakkuus näyttää korreloivan positiivisesti asunnon ulkomelun voimakkuuteen ainakin, kun ulkomelun $L_{Aeq,5\text{ min}}$ -taso ylittää 50...55 dB(A). Tutkimuksesta ei selvitetty asuntojen ulkokuoren ääneneristävyyttä.⁶²³ Ihmiset lisäävät TV:n äänen voimakkuutta, mikä pienentää ulkoa sisään kuuluvav melun puueenhäirintää. Tätä ei näytetä otetun huomioon esimerkiksi tutkimuksissa, joissa on kysely ihmisiltä ulkomelun aiheuttaman puueenhäirinnän kokemista.

Pieni- eli matalataajuinen melu

Käsitteellä "*matalataajuinen melu*" ei ole yleisesti hyväksytyjä taajuusrajoja. Yleensä matala- eli pienitaajuiseksi kutsutaan taajuusalueella 10 – 250 Hz olevia ääniä. Joskus matalataajuisuuden yläraja on jopa 1 kHz.²³⁶ Ääniä, joiden taajuus on alle 16...20 Hz kutsutaan infraääniksi. Infraäänillä tarkoitetaan varsinaisen kuuloalueen alapuolelle olevia ääniä, joiden aistiminen perustuu ainakin osittain tuntoaistiin. Käsite "*matalataajuinen melu*" kattaa usein myös infraäänit.

Pieni- eli matalataajuisten äänistä tehtyjen valituksia tutkittaessa ei aina löydetä sellaista ääntä/melua, joka olisi syynä kuulohavaintoon ja valitukseen.*⁶²⁴ Hollantilaisen tutkimuksen⁶²⁵ mukaan pienitaajuisesta melusta

* Eri puolilla maailmaan tunnetaan ns. Taos-HUM-eli "humina" meluja, kuten Bristolin humina, Uuden Meksikon Taos-humina ja Vancouverin humina (ks. lisää Internetistä hakusanalla "Taos-Hum"),

valittajien keski-ikä on 55 vuotta. Kaksi kolmasosaa valittajista on naisia. Valittajien enemmistön ikä ja naisten osuus ei poikennut muista meluista valittajien (n. 20 000 valitusta vuosittain) profiilista. Väestön ikääntyessä meluvalitusten, myös matalista äänistä tehtyjen valitusten, oletetaan lisääntyvän.

Pieni- eli matalataajuisten äänneksen erotettavuus ja äänekkyyks riippuvat henkilön kuulokyvyn lisäksi äänen taajuudesta, voimakkuuden mahdollisesta ajallisesta vaihtelusta sekä samanaikaisesti esiintyvän taustamelun ominaisuuksista. Kiusallisuus näyttää usein olevan äänekkyyttä ja meluisuutta suurempi.

Kuuloaistin herkkyys laskee taajuuden pienentyessä. Pienitaajuisien äänien aistiminen voi perustua kuulohavainnoin lisäksi äänen aiheuttamaan kehon tai sen osien värähtelyihin (tuntoaistiin).⁶²⁶ Japanilaisessa tutkimuksessa verrattiin kuurojen ja normaalikuuloisten matalataajuisien äänien aistimiskynnystä taajuusalueella 8 Hz – 1 kHz. Normaalikuuloisten aistimiskynnys oli taajuusalueella 8 – 63 Hz noin 30 ...40 dB herkempi kuin kuurojen. Ainakin lähellä kuulokynnystä (ks. kuva 5) matalataajuisien äänien aistiminen perustuu kuuloon (sisäkorvan toimintaan).⁶²⁷

Useissa yhteyksissä on esitetty, että A-taajuuspainotettu äänitaso antaa väärän kuvan matalataajuisten melun haitallisuudesta tai epämiellyttävyydestä.^{628, 629, 630, 631, 632, 633} Tällaisia väitteitä esitettäessä tarkoitetaan yleensä taajuusalueella 20 – 100 Hz esiintyvää melua. Kuten jäljempänä esitetystä voidaan todeta, tutkimustulokset matalataajuisten melun ominaisuuksista ja vaikutuksista ovat kuitenkin vaikeasti tulkittavissa ja yleistettävissä.

Äänet ja ympäristön äänikentät antavat kuulijalle vihjeitä muun muassa äänen tulosuunnasta sekä lähteen sijainnista ja mahdollisesta liikkeestä kuulijaan nähden. Matalataajuisten äänen syyn, suunnan ja sijainnin tunnistaminen on huomattavasti vaikeampaa kuin keski- ja korkeataajuisten. Tunnistamisvaikeudet tai -virheet voivat olla yhtenä syynä siihen, että henkilö kokee tietyn (hiljaisen) matalataajuisten melun kiusallisemmaksi kuin yhtä voimakkaan muun tyyppisen melun.⁶³⁴ Näyttää myös siltä, että matalataajuisuus lisää enemmän kiusallisuutta kuin äänekkyyttä.⁶³⁵

Ihmisen standardoitu äänestien kuulokynnys (ks. kuvat 5 ja 7) on 100 Hz: n taajuudella noin 40 dB ja kasvaa (”epäherkistyy”) 12...17 dB jokaista taajuuden puoliintumista (so. oktaavia) kohden. Esimerkiksi 20 Hz taajuisten äänneksen voimakkuuden tulisi olla vähintään 80...85 dB jotta se kuuluttaisiin yhtä voimakkaana (äänekkäänä) kuin 0 dB ääni 1 kHz:lla. Arvioitaessa infraääniä koskevia tutkimustuloksia ja äänien haitallisuutta on syytä muistaa, että eri ihmisten kuulokynnys vaihtelee suuresti⁶³⁶ (ks. myös kuva 7). Henkilökohtaisissa kuulokynnyskäyrissä esiintyy lisäksi jopa 10...15 dB vaihteluita melko pienien taajuuserojen sisällä.^{266, 637, 263}

Kompleksisten eli useita pientaajuisia komponentteja sisältävien äänten kuulokynnystä on tutkittu kovin vähän. Tutkimuksia taustamelun vaikutuksesta pientaajuisien äänestien ja äänien kuulokynnukseen on myös vähän. Näyttää siltä, että taustamelun maskeeraava, eri pientaajuisten äänneksen erotettavuutta vähentävä, vaikutus vaihtelee hyvin paljon (jopa 15 dB) eri henkilöillä.⁶³⁸

Persson *et al.*^{639, 640} totesivat käyttäessään herätteenä ääneksiä ja erilaisia puhaltimien ääniä, että koehenkilöiden vakioäänekkyysevasteet eivät poikenneet oleellisesti ISO 226-standardin¹⁵² käyristä. Saman dB(A)-tason omaavan matalataajuisten puhallinmelun todettiin olevan kiusallisempaa kuin korkeataajuisten, mutta vasta, kun molempien tasot olivat yli 45...50 dB(A). 45 dB(A):n ylittävä (jatkuva) puhallinmelu on selvästi yli sisämelujen ohjearvon eli voimakkaampaa kuin sisämelujen tasot yleensä. Monille muillekin tutkimuksille, joissa on todettu A-tason estimoivan huonosti matalataajuisten melun haitallisuutta, on yhteistä se, että melutasot ovat olleet huomattavasti sisätilojen ohjearvoja suurempia.

Ihmisen kuuloaisti näyttää olevan hieman (2...5 dB) herkempi moduloidulle matalataajuiselle melulle kuin ei-moduloidulle vakiomelulle.⁶⁵⁴

Kuulokynnyksen voimakas taajuusriippuvuus ja erotettavuuden riippuvuus modulaatioasteesta aiheuttavat sen, että pienikin taajuusmuutos tai sen modulaatiomainen vaihtelu vaikuttaa suuresti matalataajuisten äänen äänekkyyteen. Tämä matalataajuisten äänien äänekkyyden voimakas taajuusriippuvuus ja se, että 30...200 Hz taajuusalueella äänekkyyden kasvunopeus äänitason funktiona on noin kaksinkertainen verrattuna kasvuun keskitaajuuksilla⁶⁴¹ – ja alle 30...40 Hz taajuusalueella tätä suurempi^{644, 642, 643} (sitä suurempi mitä alhaisempi taajuus) – on omiaan aiheuttamaan melko suuriakin virheitä sen vuoksi, että äänitaso on mitattu väärin (väärästä paikasta, väärään aikaan tai epätarkalla mittarilla) tai huolimattomasti. Moniin tutkimuksiin on syytä suhtautua hyvin kriittisesti jo sen vuoksi, että raporteista ei käy selville, miten hyvin laitteistojen taajuusvasteet on tarkistettu.

Matalataajuiset, alle 20...45 Hz taajuiset äänet, eroavat korkeampitaajuisista siinä, että jo 5...10 dB (henkilön todellisen) kuulo- tai aistimiskynnyksen ylittävät äänet voidaan kokea hyvin epämiellyttäväksi, kiusalliseksi tai ahdistavaksi, kun esimerkiksi 100 Hz:llä vastaavat kokemukset edellyttävät samoilla koeäänillä 50...80 dB kuulokynnystä suurempaa äänenpainetasoa.^{644, 645, 646} Osa ihmisistä näyttää kokevat ainakin jotkut matalataajuiset asuinympäristön melut kiusalliseksi heti, kun voimakkuus ylittää kuulokynnyksen.⁶⁴⁷ On myös tapauksissa, joissa henkilö on valittanut matalataajuisesta melusta, jonka voimakkuus jää ISO 226 kuulokynnyksen alapuolelle.⁶⁴⁸

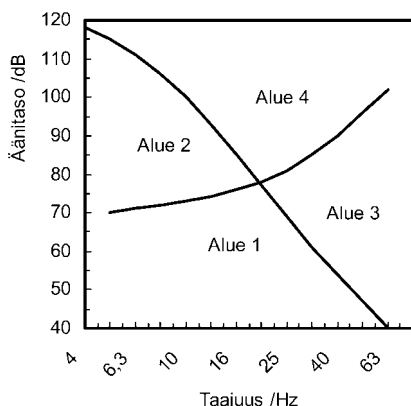
Matalataajuisten (5 – 100 Hz) melun äänekkyyden, meluisuuden ja kiusallisuuden stabiloitumisajat saattavat olla noin kaksinkertaiset verrattuna laajakaistaisen melun vastaaviin aikoihin.^{649, 650} Käytännön kannalta tarkasteltuna pitempi stabiloitumisaika merkitsee sitä, että slow-aikapainotettu enimmäistaso saataisi olla parempi matalataajuisten tasoltaan vaihtelevien melujen hetkellisen enimmäisäänekkyyden, -meluisuuden ja -kiusallisuuden estimaattori kuin fast-aikapainotettu taso.

Osa ihmisistä saattaa olla tavanomaista herkempiä lähellä (matalataajuisten äänen henkilökohtaista) kuulokynnystä olevalla hiljaiselle (28 ...42 dB(A)) *pitkään kestäväälle* matalataajuiselle melulle.^{651, 640, 654, 645} Yksilölliset erot kiusallisuuden voimakkuuden kokemisessa vastaavat jopa 10 dB äänitasoeroa.

Toisaalta on viitteitä siitä, että kuulo olisi herkempi impulssimaisille (lyhytkestoisille) matalataajuisille äänille kuin pitkäkestoisille.⁶⁸⁵

Lyhytaikaisilla (30...60 min) matalataajuisille, noin 20 dB kuulokynnyksen ylittävälle, meluille (110 dB/10 Hz, 97 dB/20 Hz, 89 dB/40 Hz, 68 dB/80 Hz) altistumisilla ei näyttäisi olevan haitallisia fysiologisia vaikutuksia. Vaikutukset ovat elämyksellisiä.⁶⁵² Voimakkaan matalataajuinen melun, esimerkiksi 140 dB, 2 – 20 Hz, aiheuttama TTS (tilapäinen kuulon alenema) ilmenee altistavan taajuusalueen yläpuolella esimerkiksi 1 kHz:n seutuilla tällainen melu saattaa tuottaa 10 dB asymptoottisen TTS₂:n.⁶⁵³

Usein matalataajuiseen meluun liittyy samanaikainen rakennuksen osien – useimmiten ikkunoiden – matalataajuinen värinä tai kuuloalueella oleva värinä. Huomion arvoista on se, että myös huomattavasti kuulo- ja aistinkynnystä hiljaisemmat alle 20...30 Hz taajuiset äänet voivat aiheuttaa kuultavissa olevaa värinää.^{631, 654, 655} Esimerkiksi ikkunoiden ja ovien värinä tai helinä on ilmiö, jossa matalataajuinen äänenpaineheräte aikaansaa korkeampitaajuisia äänensäteilyä värinämään pääsevistä rakennusosista, esimerkiksi löyhästi puitteissaan kiinni olevasta ikkunalasista. Matalataajuiseen meluun assosioituvat värinät ja värinät lisäävät melun kiusallisuutta.^{656, 657, 658, 659, 660, 661, 662} Ne näyttäisivät olevan myös matalataajuisesta melusta valitettaessa merkittävä syy.^{663, 664} Eri tyyppisten rakennusten ja rakenteiden herkkyys värinöille vaihtelee. Kevyet rakenteet ovat herkempiä värinämään kuin raskaat. Näyttää siltä, että A-taajuuspainotusta käyttäen mitattu sisämelun taso aliestimoi ainakin joidenkin sellaisten melujen kiusallisuutta, joihin liittyy rakennusosien värinää.⁶⁶⁵



Kuva 28: Japanilaisen tutkimuksen tuloksia sisämelujen värinäherkkydestä. Alue 1: Matalataajuinen ääni ja värinä eivät ole aistittavissa, alue 2: matalataajuinen ääni ei ole aistittavissa, mutta värinöitä voi esiintyä, alue 3: matalataajuinen ääni on aistittavissa, värinöitä ei esiinny, alue 4: matalataajuinen ääni aistittavissa ja värinöitä esiintyy.⁶⁶⁶

ANSI S12.2 standardin⁶⁶⁷ mukaan värinöitä alkaa sisämelussa erottua, kun äänenpaine taso ylittää ulkona 75 dB 16 tai 31,5 Hz oktaavikaistalla tai 80 dB 63 Hz kaistalla. Amerikkalaisten rakennusten ulkokuoren eristävyys

(ulko- ja sisä-äänitason ero) arvioidaan olevan vain 10 dB näillä kaistoilla.⁶⁶⁸ Arvo viittaa siihen, että rakenteet ovat melko keveitä (ja räminäherkkiä?).

Joissakin tapauksissa rakennusrungon värinä voi kulkeutua sänkyyn. Nukkuaan kohdistuva sängyn äänensäteily voi olla lyhyestä etäisyydestä johtuen voimakkaampaa kuin rakennusrungon säteilemä ääni.

Matalataajuinen jatkuva melu aiheuttaa usein huoneeseen seisovan aallon kentän. Tällaisessa kentässä eri kohdissa huonetta mitattu äänitaso voi vaihdella 5...15 dB. Matalataajuisille äänille on tunnusomaista myös se, että lähellä seinä äänitasot ovat usein jopa 5...10 dB suurempia kuin keskellä huonetta.⁶⁶⁹ Nukuttaessa pää (ja korva) on lähellä seinää, mutta hereillä ollessa ihmiset oleskelevat yleensä vähintään 0,5... 1 m päässä seinistä.

Amerikkalaisessa lentomelututkimuksessa todettiin 25 – 80 Hz terssi-kaistoilla mitatun keskimääräisen sisämelun enimmäistason korreloivan parhaiten matalataajuisen lentomelun kiusallisuuteen.⁶⁷⁰

Ilmanvaihtolaitteet ja -kanavisto voivat aiheuttaa matalataajuisia huminaa tai "rumisevaa pumppausta", mikä lisää äänen kiusallisuutta.⁶⁷¹

Tietyllä voimakkuudella (125 dB(lin)) ja taajuusalueella (6 – 16 Hz) esitettyjen matalataajuisien äänien on todettu alentavan verenpainetta ja pienentävän sydämen syketaajuutta laboratorioskokeissa. Ilmiö on tulkittu yhdessä tutkimuksessa⁶⁷² valvevireyden alenemiseksi, toisessa⁶⁷³ sen on tulkittu parantavan tarkkaavaisuutta edellyttävää suorituskykyä.

Matalataajuisen melun vaikutusta uneen on tutkittu melko vähän. Tuloksista ei voi tehdä selviä johtopäätöksiä.⁶⁷⁴

Voimakas tuuli aiheuttaa pienitaajuisia ääntä ja mahdollisesti myös rakennusosien, kuten löysien ikkunoiden, räminää. Japanin ympäristöministeriön tutkimuksessa, johon sisältyi 166 kohdetta, todettiin tuulen lisäneen matalataajuisia melua noin 30 %:ssa tapauksia.⁶⁶⁴

Vanhimpien käytössä olevien äänitasomittareiden taajuusvasteen tarkkuusvaatimukset ja tarkkuus alle 20 Hz taajuuksilla ovat niin huonoja, että niillä mitattuja tuloksia ei ole syytä käyttää matalataajuisen melu "laillisuusvalvontaan" tarkistamatta taajuusvastetta.

Pieni- eli matalataajuisen melun kapeakaistaisuus

Matalataajuisen (alle 100...150 Hz) melun äänestäisyyden objektiivinen toteaminen on erittäin pulmallista, sillä

- alimman kriittisen kaistan leveys⁶⁷⁵ on noin 100 Hz. Toisin sanoen, yksi kaista peittää koko matalataajuusalueen 0 – 100 Hz,
- kuuloaisti on hyvin epäherkkä matalataajuisille äänille ja
- herkkyyks alenee hyvin jyrkästi alimman kriittisen kaistan sisällä taajuuden pienentyessä,

- yksilölliset arviointierot kapeakaistaisuuden aiheuttamasta äänekkyuden ja kiusallisuuden kasvusta ovat hyvin suuria,^{676, 645}
- alle 10...20 Hz taajuuksilla kuuloaistin toiminta on epälineaarista. Äänestäminen heräte tuottaa harmonisia eli perustaajuuden kerrannaisilla taajuuksilla esiintyviä valeääniä,
- kuuloaistilla on kyky "kuulla" harmonisen äänen, esimerkiksi sävelen, perustaajuus silloinkin, kun perustaajuista komponenttia ei ole tai se on hyvin heikko (esim. vaimennettu).⁶⁷⁷

Joidenkin tutkimusten mukaan alle 100...200 Hz taajuiset kapeakaistaiset komponentit olisivat vähemmän kiusallisuutta lisääviä kuin tätä ylempillä taajuuksilla esiintyvät.^{676, 678} On jopa tultu tuloksiin, joiden mukaan kapeakaistaisuuskorjauksen teko alle 100...200 Hz taajuuksilla esiintyville komponenteille ei ole perusteltua.⁶⁷⁹ Esimerkiksi DIN 45681:1992 standardiehdotuksen⁴³¹ mukaan melussa olevat alle 100 Hz kapeakaistaiset ja äänestäiset komponentit eivät aiheuta kiusallisuutta lisäävää äänestäisyyttä. Näyttää kuitenkin siltä, että ainakin taustaan nähden voimakkaat 50 Hz ja sitä suuritaajuisemmat komponentit voivat aiheuttaa kiusallisuutta lisäävää äänestäisyyttä.⁶⁷⁸

Modifioitu prominenssisuhde⁶⁸⁰ saattaisi toimia matalataajuisen melujen kapeakaistaisuuden objektiivisena toteamismenetelmänä, mutta toimivuus pitäisi tarkistaa psykoakustisin kokein. Ilmanvaihtolaitteiden melussa esiintyy joskus kiusallisuutta lisäävää kuminaa⁶⁸¹ (engl. rumble), joka saattaa olla matalataajuisen kapeakaistaisten äänien aiheuttamaa.

Sisätiloissa matalataajuiset vakiotasoiset kapeakaistaiset äänet herättävät usein seisovanaallonkentän. Tällaisessa kentässä äänitaso voi vaihdella suuresti eri paikoissa huonetta. Kupukohdissa äänitaso voi olla jopa 15...20 dB suurempi kuin solmukohdissa.^{682, 683, 684} Tapauksessa, jossa matalataajuisen äänen äänitaso ja sen subjektiivinen voimakkuus vaihtelevat suuresti eri kohdissa huonetta on usein vaikea perustella, missä kohdassa huonetta mitattua äänitasoa tai miten määritettyä huoneen keskimääräistä tasoa käytetään meluhaittojen arviointiin.

Huoneen koko vaikuttaa ulkoa sisään kuuluvan matalataajuisen melun voimakkuuteen. Mitä pienempi huone, sitä suurempia äänitasot ovat. Esimerkiksi hollantilaisessa tutkimuksessa⁶⁸⁴ todettiin, että huoneiden tyypillisestä kokoerosta johtuen ulkoa sisään kuuluvan matalataajuisen melun voimakkuus oli makuuhuoneissa noin 6 dB suurempi kuin olohuoneissa.

Pieni- eli matalataajuisen melun impulssimaisuus

Kuuloaisti näyttäisi olevan hieman, 0...10 dB, herkempi matalataajuisille (alle 100 Hz) impulssiäänille kuin vastaaville jatkuvakestoisille äänille. Impulssimaisten äänien kuulokynnys todettiin japanilaisessa tutkimuksessa tämän verran alhaisemmaksi.⁶⁸⁵

Scannelin⁶⁸⁶ mukaan matalataajuisten toistuvan impulssimelun L_{Aeq} -tasoon tehtävän kiusallisuuden impulssimaisuuskorjauksen pitäisi olla sitä suurempi, mitä alhaisempi impulssimelun (ja taustamelun) taso on. Alhaisilla melutasoilla korjauksen tulisi olla 5 – 10 dB(A)-luokkaa.

C-taajuuspainotus matala- eli pienitaajuisten melun mittauksessa

Monet tutkimukset ja havainnot viittaavat siihen, että A-taajuuspainotettu äänitaso aliarvioi sellaisten matalataajuisten äänien äänekkyyttä ja kiusallisuutta, joiden äänienergiasta suurin osa on 200 Hz:n alapuolisilla taajuuksilla.^{628, 640, 687} On syytä huomata, että yleisimmin viitteinä käytetyissä tutkimuksissa altistavan melun A-tasot ovat olleet yli 45 dB(A) ja kokeissa käytetyt altistusajat melko lyhyitä, usein vain muutamia minuutteja.

Vuosien mittaan on usein esitetty, että pieni- eli matalataajuisten melun mittaukseen pitäisi käyttää C-taajuuspainotusta A:n asemasta. Esittäjät ovat oletaneet, että C-painotettu taso antaisi paremmin äänekkyyttä ja haittoja luokittelevan lukeman kuin A-painotettu taso. Perusteena on ehkä ollut se, että asuin- ja elinympäristössä C-taso on lähes aina A-tasoa suurempi. Haettaessa tutkimuksia A- ja C-painotuksen eroista tai paremmuudesta, on syytä muistaa, että sellaisia tapauksia, joissa A-äänitaso toimi hyvin, ei uutuusarvon puuttuessa kirjallisuudessa juuri raportoida.¹⁴¹

C- ja A-painotetun tason erotusta on käytetty pieni- eli matalataajuisten melun karkeana indikaattorina tapauksissa, joissa melusta ei ole voitu tehdä tarkkaa taajuusanalyysiä. Tämä on saattanut vahvistaa käsitystä siitä, että C-painotettu taso olisi hyvä pieni- eli matalataajuisten melun äänekkyden, meluisuuden ja/tai kiusallisuuden indikaattori tai mittari. Jäljempänä on referoitu joidenkin tutkimusten tuloksia.

Wattsin^{688, 689} mukaan ulkoa sisään kuuluvan tieliikennemelun C-painotettu enimmäis-, äänialtistus- ja ekvivalenttitaso korreloivat huomattavasti ($r = 0,764, 0,743$ ja $0,796$) meluisuuteen kuin A-painotettu enimmäis-, äänialtistus- ja ekvivalenttitaso ($r = 0,837, 0,804$ ja $0,852$). Meloni ja Rosenheck⁶⁹⁰ päätyivät ulkoa sisään kuuluvien yksittäislaukausten mittaustapaa selvittäessään siihen, että A-painotettu L_{AE} -taso oli L_{CE} -tasoa validimpi kiusallisuuden mittari. Heidän tuloksensa viittaavat myös siihen, että mitä parempi rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyyden on, sitä validimpi kiusallisuuden mittari altistetun pään läheisyydessä mitattu laukauksen L_{AE} -taso on L_{CE} -tasoon verrattuna. Schomer ja Neathammer⁴⁷² päätyivät siihen, että ulkomelun L_{CE} -taso ei ollut sisään kuuluvan helikopterimelun vaikutusten indikaattorina L_{AE} -tasoa parempi. Ulkona eri etäisyyksillä tiestä mitatun liikennemelun C-painotetun L_{eq} -tason hajonta on hieman suurempi kuin samoissa pisteissä mitatun A-painotetun L_{eq} -tason hajonta.¹⁴⁴ Tämän lisäksi ulkoa sisään kuuluvan liikennemelun C-

painotetun L_{eq} -tason (L_{Ceq}) alueellinen vaihtelu huoneen sisällä on suurempaa kuin A-painotetun L_{eq} -tason (L_{Aeq}) vaihtelu. Wattsin^{688, 689} tulos voisi selittyä sillä, että C-painotetun tason vaihtelussa merkittävänä syynä ovat sellaiset hyvin matalataajuiset melukomponentit, joita ei kuulla kunnolla, mutta jotka kuitenkin vaikuttavat C-painotettuun tasoon, mutta eivät vaikuta yhtä merkittävästi A-painotettuun tasoon. Toisin sanoen koehenkilöiden arvioiman (kuuleman) C-painotetun tason meluisuuden satunnaisvaihtelu on suurempi kuin A-painotetun (ks. kuva 7).

Päinvastaisiakin tutkimustuloksia on esitetty. Toisin sanoen, C-painotettu taso onkin ollut parempi äänekkyuden, meluisuuden ja tai kiusallisuuden mittari kuin A-painotettu taso. Näyttäisi siltä, että asuntojen ilmanvaihdon melussa voi esiintyä matalataajuisia kumisevaa ("rumisevaa") ääntä, joka voi lisätä subjektiivista äänekkyyttä ja etenkin kiusallisuutta.⁶⁹¹ Tällaisiin ääniin liittyy usein se, että rakennuksen osissa (katto, seinät, lattiat, ikkunalasit ja/tai ilmanvaihtokanavat) esiintyy samanaikaisesti tärinää, jonka kuulija mieltää olevan peräisin samasta lähteestä kuin melukin. Tiedetään, että meluun assosioituvat rakennusten tärinät ja räminät lisäävät melun kiusallisuutta, so. kielteistä asennetta meluun tai sen aiheuttajaan, ja häiritsevyyttä.^{692, 693} Tapauksissa, joissa räminän ja tärinöiden syynä ovat *hyvin voimakkaat* yksittäiset äänitapahtumat, kuten ylääänipamaukset ja tykin laukaukset, ulkona mitattu C-taajuuspainotettu äänialtistustaso näyttäisi korreloivan ulkona mitattua A-painotettua tasoa paremmin rakennuksessa sisällä olevien henkilöiden meluisuus- ja kiusallisuuskokemuksiin.⁶⁹⁴ C-painotuksen paremmuutta on perusteltu tällaisissa tapauksissa sillä, että tärinöiden aiheuttama rakennusosien matalataajuinen äänensäteily lisää enemmän C-tasoa kuin A-tasoa eli C-taso indikoisi paremmin ilma- ja tärinä-äänien (odotettavissa olevaa) summaa kuin A-taso.⁷⁶ Tällä perusteella A-tason ja C-tason välillä ei olisi oleellista paremmuuseroa silloin, kun räminä-äänissä ei ole voimakkaita matalataajuisia komponentteja.

Painottamatonta eli lineaarista tai C-painotettua tasoa on syytä käyttää mittaauksissa silloin, kun halutaan selvittää impulssiäänien todellinen aaltomuoto tai sen vaimentuminen.⁶⁹⁵ A-suodatus muuttaa eri taajuuksien komponenttien vaihetta eri tavoin, mistä syystä signaalin ajallisen vaihtelun muoto vääristyy.

Kirjallisuudesta löytyy myös tuloksia, joiden mukaan paras matalataajuisen melun taajuuspainotus olisi jossain A- ja C-painotuksen välillä.⁶³²

Yleissääntönä voidaan kuitenkin todeta, että (ainakin) *alhaisilla* äänitasoilla (alle 40...50 dB) C-painotettu äänitaso indikoi yleisesti ottaen A-painotettua tasoa *huonommin* äänekkyyttä, meluisuutta ja kiusallisuutta.⁶⁹⁶ Äänekkyuden osalta A-painotuksen (yleinen) paremmuus on ollut tunnettu asia jo 1930-luvulla.^{697, 698} Yli 60 dB(A)-tasolla C-painotus saattaa olla ainakin joillakin äänillä A-painotusta parempi äänekkyuden estimaattori. On syytä kuitenkin muistaa, että A-taajuuspainotus (ja A-äänitaso) ei vastaa kovin tarkasti kuuloaistin tapaa painottaa eri taajuisia komponentteja äänekkyyttä, meluisuutta ja kiusallisuutta havainnoitaessa.¹³⁹

C-painotusta käyttäen mitatut asuntojen sisämelun mittaustulokset ovat hyvin arkoja matalataajuisille häiriöäänille. Esimerkiksi jo nopeudella 3 – 5 m/s tuulen (rakenteissa, laitteissa, ilmaan) generoimien äänien (painevaihteluiden) aiheuttama C-painotettu sisä-äänitaso saattaa ylittää 50...70 dB(C)-tasoon A-tason jäädessä 25... 45 dB(A) alueelle.^{699, 700, 701, 702}

Terveysvalvonnan äänitasomittareista suurin osa on sellaisia, joissa on A-painotus, mutta ei C-painotusta. Kaikilla mittareilla pystytään mittaamaan A-painotettuja tasoja, mutta vain osalla C-painotettuja.

Kun tavoitteena on että mittaustulos indikoi samaa melun subjektiivista voimakkuutta, niin tyyppillisten sisätilojen melujen C-painotettujen ohje- ja raja-arvojen lukuarvojen tulisi olla suurempia kuin A-tasona annettujen. Esimerkiksi ulkona saman äänekkyyden omaavan tieliikennemelun C-taso on noin 5...8 dB A-tasoa suurempi.¹⁴⁴ Ulkoa sisään kuuluvalla liikennemelulle ero on tätäkin suurempi, sillä rakennuksen ulkokuori vaimentaa (eristää) tehokkaammin keskikorkeita ja korkeita ääniä kuin matalia. Myös meluaitojen vaimennus noudattaa (ns. varjoalueella) samaa sääntöä.

Vuoden 1979 Meluohjekirjettä ja vuoden 2003 Asumisterveysohjetta valmisteltaessa tutkittiin löytyisikö riittävästi perusteita C-painotettujen sisämelujen ohjearvojen antamiseen. Niitä ei löytynyt. Edellä on mainittu joitakin läpikäytyjä julkaisuja. Pieni- eli matalataajuisen melun (yöaikaiset) ohjearvot annettiin vuoden 2003 Asumisterveysohjeessa terssipainetasoina.

L_{DEN} - ja $L_{Aeq, 24h}$ -tyyppiset tasot meluhaittojen indikaattorina

Ympäristömelun voimakkuus vaihtelee ajallisesti ja alueellisesti. Ajallinen vaihtelu tarkoittaa sitä, että samassa paikassa mitattu melu vaihtelee ajan myötä. Alueellinen vaihtelu tarkoittaa sitä, että samanaikaisesti eri pisteissä mitatut arvot ovat eri suuria.

Yleensä lähdetään siitä, että hetkelliset äänitasot indikoivat hetkellisiä vaikutuksia ja pitkän ajan ekvivalentti- eli keskiäänitasot vaikutusten esiintyvyyttä eli odotettavissa olevia pysyviä vaikutuksia. Hetkellisen äänitason, kuten yhden melutapahtuman L_{AFmax} - tai L_{AE} -tason perusteella voidaan esimerkiksi arvioida todennäköisyys herätä kyseiseen meluun, mutta ei esimerkiksi sitä, montako kertaa altistettu herää vuodessa, tai mikä on heräämisten esiintyvyys tietyllä melualueella. $L_{Aeq, vuosi}$ -tyyppisiä melutasoja käytetään vaikutusten esiintyvyyden arviointiin.

Useimpien ympäristömelujen vaihtelu noudattaa pitkällä aikavälillä tiettyä tilastollista säännönmukaisuutta. Ympäristömelujen tilastollisuudelle on tyyppillistä myös se, että erilaisia aika- ja taajuuspainotuksia käyttäen mitatut arvot korreloivat hyvin keskenään.^{703, 704, 705} Huono korrelaatio edellyttäisi esimerkiksi sitä, että L_{AFmax} -tasojen vaihtelulla ei olisi vaikutusta kyseisen

melun L_{Aeq} -tasoon tai, että esimerkiksi liikennemelulla L_{Aeq} -taso satunnaisesti alenisi/kasvaisi, kun ohiajojen tai -lentojen L_{AFmax} -tasot kasvavat. Huomattakoon kuitenkin, että esimerkiksi tapauksissa, joissa äänen etenemismatka on lyhyt ja liikennemäärä vaihtelee, niin L_{eq} -tyyppiset tasot vaihtelevat määrän mukana, mutta L_{max} -tyyppisen tason suurin arvo ei. Yksi liikenneväline voi aiheuttaa saman L_{max} -tason, kuin mikä on suurin taso määrän ollessa 10 000.

Liikenteen aiheuttama ulko- ja sisämelu voidaan suurissa taajamissa jakaa kahteen osaan: 1) lähimmältä liikenneväylältä peräisin oleva liikenteen melu ja 2) kauempaa peräisin oleva (liikenne)melu. Edellisen hetkellinen voimakkuus vaihtelee ajallisesti huomattavasti enemmän kuin jälkimmäisen voimakkuus.

Liikenteen määrä teillä – ja täten myös melun voimakkuus – vaihtelee vuorokauden mittaan. Yöaikainen melu (L_{Aeq} -tyyppiset taso) on yleensä hiljaisempaa kuin päiväaikainen.⁷⁰⁶

Taajamien asukastiheyden ja -määrän sekä ihmisten liikennetarpeiden, -tapojen ja liikenteen tarjonnan välillä on selvä positiivinen syy-yhteys. Liikenteen määrä, etenkin liikennesuorite per km² taajama-aluetta, korreloi yleensä hyvin asukastiheyteen ja seudun koko asukasmäärään. Mitä suurempi liikennesuorite per km² taajama-aluetta on, ja mitä useammalle väylälle se jakaantuu, sitä voimakkaampaa ja vähemmän ajallisesti vaihtelevaa on rakennuksiin kaukaa, ympäri vuorokauden kantautuva melu verrattuna lähimmän liikenneväylän meluun. Alla olevassa kuvasarjassa on esitetty, miten rakennuksiin kohdistuva ulkomelu vaihtelee tyyppillisesti taajamissa, joilla asukastiheys on a) hyvin suuri (noin 80 000 asukasta/km²), b) keskinkertainen (noin 20 000 asukasta/km²) ja c) pieni (noin 2 000 asukasta/km²).

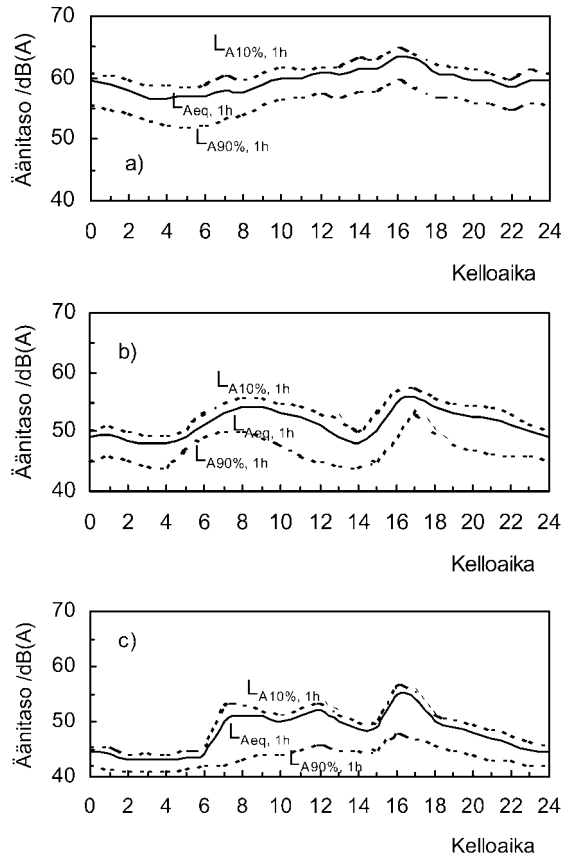
Asukastiheyden kasvaessa yö- ja päiväajan melutason välinen ero pienenee. Pienissä taajamissa taajaman oman liikenteen yöajan melun ekvivalenttitaso on tyyppillisesti 10...15 dB(A) pienempi kuin päiväajan taso. Suurissa taajamissa ero on 4...8 dB(A). Taajaman koon vaikutus näkyy myös siten, että mitä suurempi koko vuorokauden melutaso (L_{DN} , $L_{Aeq, 24h}$) on, sitä pienempi on päivä- ja yöajan melun ero.^{707, 708}

Kuvasarjasta havaitaan myös, että melutason ajallinen lyhytaikainen vaihtelu, jota 10 %:n ja 90 %:n pysyvyystasojen* ero kuvaa, on pienissä taajamissa suurempi kuin suurissa. Vaihtelua kasvattaa se, että liikenteen vähetessä hiljaisten jaksojen osuus kasvaa.

Monissa kyselytutkimuksissa melualtistuksena on asuntoalueelle arvioitu tai laskettu yhden vuorokauden *keskimääräinen* ekvivalenttitaso, esimerkiksi tieliikennemelulle $L_{Aeq, 24 h}$ -tason ja lentomelulle L_{DEN} -taso. $L_{Aeq, 24h}$ -tasoon perustuvien ohjearvojen kriteerinä on yleensä pelkästään kyselytutkimuksin selvitetty kiusallisuusvaste tai yhdistetty kiusallisuus-häiritsevyyssvaste. L_{DEN} - ja L_{DN} -tasoina annettujen ohjearvojen sekä vasteiden päivä- ja iltajan painotuksen (haitallisuuden) perusteena on melun kiusallisuus ja

* 10 %:n pysyvyystaso tarkoittaa melutasoa, joka ylittyy 10 %:a ajasta. Kuvassa 14 pysyvyys- ja ekvivalenttitasot on mitattu tunnin jaksoissa.

tiettyyn toimintaan kohdistuva häiritsevyys (esim. puheenhäirintä), mutta yöajan osalta (+10 dB) unenhäirintä. Perusteet eivät ole yhteismitalliset, mistä syystä on esitetty, että melun vaikutuksia ei pitäisi arvioida pelkästään L_{DN} - tai L_{DEN} -tason perusteella⁷⁰⁹ On esitetty myös, että L_{DN} -taso ei pysty mittaamaan lentomelun aiheuttamaa todellista puheenhäirintää oikein.⁷¹⁰



Kuva 29: Rakennuksiin kohdistuvan $L_{Aeq, 1h}$, $L_{A10\%, 1h}$ - ja $L_{A90\%, 1h}$ - tason tyypillinen vaihtelu yhden vuorokauden aikana taajamissa, joissa asukastiheys on a) suuri, b) keski-suuri ja c) pieni.

Jos oletetaan, että päivä-, ilta-, ja yöajan melutason eron syynä on vain liikennemäärän vaihtelu, niin tapauksissa, joissa liikenne *ei* jakaannu päivä-, ilta- ja yöajalle suhteessa 10:3:1, L_{DEN} -tason perusteet “vääristyvät”. Esimerkiksi, jos päivällä (klo 7 – 19) on neljä lentoperaatioita ja yöaikana (aika-
taulun mukaan klo 6 – 7) kaksi, melualueet ja melutasot lasketaan oletta-
en koko vuorokauden operaatioiden määräksi $4 + 2 \cdot 10 = 24$. Melualueet
määräytyvät kahden klo 6 – 7 välisen operaation perusteella. Unenhäirinnän
vuoksi asetettu yöajan (klo 22 – 7) 10 dB(A) tiukennus “vuotaa” myös päivä-
ajan meluhaittojen kriteeriksi. Useissa tapauksissa voitaneen perustellusti
kysyä: aiheuttaako kaksi asukkaiden normaaliin heräämisaikaan ajoittuvaa

lentoa todella esimerkiksi niin merkittävää unenhäirintää, että koko kentän toiminnan aiheuttamia meluhaittoja on tarkasteltava yksinomaan unenhäirintä (tai muu yöajan melun vaikutus) kriteerinä?

L_{DEN} - ja $L_{Aeq,24h}$ -tyyppisten indikaattoreiden pulmana on epäspesifisyys. Niiden käyttö melun haitallisuuden mittarina edellyttäisi eri tyyppisten liikennevälineiden meluille erisuuret ohjearvot ja erisuuret ohjearvot erilaisiin ympäristöihin.²⁹⁸ Syyksi on esitetty mm. sitä, että $L_{Aeq,24h}$ -taso keskiarvostaa (tasoiittaa) liikaa melutapahtumia koko vuorokauden ajalle.⁷¹¹

Naapurista kuuluva melu

Monissa tutkimuksissa on todettu, että asukkaat kokevat usein naapurista kuuluvan melun pahempana häirtana kuin ulkoa sisään kuuluvan liikenteen ja teollisuuden melun tai rakennuksen teknisten laitteiden melun.⁷¹²

Naapurihuoneistosta seinän tai välipohjan läpi tai ”ulkokautta” (esim. vierisestä rakennuksesta) kuuluvan melun voimakkuus riippuu rakenteiden ääneneristävyyden lisäksi naapurihuoneistossa tuotetun melun voimakkuudesta ja spektristä sekä vastaanottohuoneiden koosta ja kaiuntaisuudesta.

Monissa tutkimuksissa on todettu, että asukkaiden kokemien meluhaittojen suuruus ei korreloi kovin hyvin huoneistojen välinen ilma- ja askelääneneristävyys kanssa. Usein esimerkiksi naapurin elintavoilla (melun tuotolla, tuotetun melun laadulla) on suurempi vaikutus kuin ääneneristävyydellä.^{713, 64, 714, 715, 716, 712}

Tutkimukset viittaavat siihen, että ns. suoran äänen hetkellinen voimakkuus selittää koettua kiusallisuutta paremmin kuin huoneen keskimääräinen taso (äänen voimakkuus kaiuntakentässä).⁷¹⁷

Naapurista tai ulkoa kuuluvien puheäänien on todettu olevan kuulijoilleen kiusallisia. Puheäänit suuresti kiusalliseksi kokevien osuus näyttää kasvavan yleisen ulkomelun voimakkuuden kasvaessa.⁷¹⁸

Englannissa tehdyssä tutkimuksessa todettiin asukkaiden halukkuuden maksaa ääneneristävyyden parantamisesta korreloivan parhaiten rakenteiden ääneneristävyyteen 160 – 400 Hz terssikaistoilla.⁷¹⁷

Tottuminen meluun

Yleisesti kuulee esitettävän väitteet: ”Meluun ei voi tottua” ja ”Meluun tottuu”. Molemmille väittämille löytyy näyttöä. Oikea vastaus riippuu siitä, mitä melun aiheuttamaa reaktiota tarkastellaan ja millaisia muutoksia pidetään tottumisen ja ei-tottumisen merkkeinä. Meluun tottumisen mittana voidaan pitää sitä, missä määrin henkilö tietoisesti tai tiedostamattaan vähentää huomionsa kiinnittämistä tai reagoimistaan altistuksen jatkuessa tai toistuessa.

Tottumista – tai sopeutumista – meluun voidaan pitää altistetulle edullisena käyttäytymisstrategiana eli coping-vasteena. Tottuminen ilmenee mm. kykynä olla (tietoisesti tai tiedostamatta) havaitsematta ääniärsyksiä ja erityisesti kykynä olla tekemättä eroja korostavia vertailuja aiempiin tai samanaikaisiin muihin melukokemuksiin.⁷¹⁹ Vertailuista pidättäytyminen heikentää, jopa estää, ainakin kognitiivisia kiusallisuus- ja häiritsevyysoireita.^{720, 721, 722} Tottumisen helpottamiseksi altistetut kehittävät itselleen erilaisia selviytymisstrategioita ja -tapoja.^{723, 724}

Meluun voidaan tottua myös siinä mielessä, että tuttuun meluun ei kiinnitetä niin helposti huomiota kuin outoon tai harvoin esiintyvään meluun. Esimerkiksi 80 % Kastrupin kentän melualueilla asuvista ilmoittivat, että heidän vieraansa kokevat lentomelun kiusallisena, kun vain 55 % vastaajista itse koki melun jokseenkin tai hyvin kiusalliseksi.⁷²⁵ Näyttää siltä, että osa ihmisistä yliarvioi tottumisen todennäköisyyden, osa aliarvioi.⁷²⁶

Valveilla ollessa tottumus auttaa olemaan kiinnittämättä huomiota usein toistuviin (vaarattomiin) meluihin.⁷²⁹ Nukuttaessa tottumus ilmenee siten, että tuttuun meluun (tutuissa oloissa) ei herätä niin helposti kuin outoon.^{727, 728} Tästä esimerkkinä on se, että kotioloissa samaan tuttuun meluun herätään merkittävästi epäherkemmin kuin laboratorio-oloissa (ks. kuva 23). Huomion herättämisen tai tietoisuuteen tunkeutumisen kannalta katsottuna voimakkuudeltaan ja muilta ominaisuuksiltaan vähän vaihtelevaan meluun on helpompaa tottua kuin suuresti vaihtelevaan.^{729, 730, 731, 732, 719} Tottumisena voidaan pitää myös sitä, että melu häiritsee tai huonontaa laboratorio-oloissa tehdyissä tutkimuksissa meluisilla alueilla asuvien lasten suorituksia vähemmän kuin hiljaisilla alueilla asuvien. Toisin sanoen meluisilla alueilla asuvat lapsilla on tehokkaammat selviytymis- tai sopeutumiskeinot (coping-toiminnot) meluoloissa toimimiseen kuin hiljaisilla alueilla asuneilla.⁷³³

Keskushermosto joutuu jatkuvasti valikoimaan ja karsimaan sitä aistien lähettämää informaatiovirtaa, joka ”päästetään” tai ohjataan tietoisella tasolla arvioitavaksi. Melun tullessa tutummaksi keskushermoston valikoiva ohjaus estää tai vähentää tätä tietoiseen arviointiin päästettävää informaatiovirtaa. Melun luokittelu tutuksi perustuu muun muassa äänen syyn ja lähteen sijainnin (kuulijaan nähden) automaattiseen tunnistamiseen ei-tietoisella tasolla. *Prosessia, joka johtaa tietoisesta huomion kiinnittymisen vähentymiseen voidaan kutsua tottumiseksi.*

Aivosähkömittaukset ovat osoittaneet, että aivot prosessoivat kuuloaistimuksia, vaikka koehenkilöt eivät tekisikään äänistä tietoisia havaintoja.⁷³⁴ Jos ärsykettä toistetaan lyhyin välein samanlaisena, aivosähkökäyrästä mitatun vasteen voimakkuus pienenee.⁷³⁵ Toiston vuoksi tapahtuvaa vasteen voimakkuuden alentumista voidaan nimittää *fysiologiseksi tottumiseksi*. Tottuminen on vähäisempää tai sitä ei tapahdu lainkaan toistojen välisen ajan ollessa pitkä.

Yöaikaisen hormonierityksen (kortisoli, ns. stressihormoni) ja melun välisiä riippuvuuksia tutkittaessa on päädytty siihen, että osa ihmisistä tottuu

(kortisolieritys alenee aikaa myöten) yöaikaiseen (lento)meluun, osa ei totu (kortisolieritys kasvaa aikaa myöten) ja osaan melu ei vaikuta lainkaan (kortisolieritys pysyy vakiona).⁷³⁶ Tätä todennäköistä erilaisuutta ihmisten tottumisreaktiossa ei ole otettu huomioon kaikissa yöaikaisen kortisolierityksen ja melun välisen vasteen tutkimuksissa.^{737, 738}

Väite ”Meluun ei totu” esitetään useimmiten objektiivisiin mittauksiin perustuvien unitutkimusten ja kuulovaurioriskitutkimusten tuloksien tulkinnan yhteydessä. Unitutkimusten yhteydessä ”ei-tottuminen” tarkoittaa useimmiten sitä, että yksittäisten melutapahtumien aiheuttamissa aivosähkökäyrissä tai sydämen sykevasteessa ei ole todettu yhden yön tai perättäisten öiden aikana sellaisia tilastollisesti merkittäviä muutoksia, joiden voitaisiin katsoa osoittavan tottumista.^{728, 739, 740, 741}

Kuulovaurioriskien yhteydessä ei-tottumisella tarkoitetaan sitä, että voimakkaan melun aiheuttama kuulovaurioriski ei pienene altistusajan pidentyessä tai toistojen lisääntyessä, vaan päinvastoin, riski suurenee. Kuuloa voidaan kuitenkin harjoittaa kestävämpään meluallistusta sopivalla esialtistuksella tai harjaannuksella.^{742, 743, 744, 745}

Voimakkaan melun (yli 70...80 dB(A)) aiheuttama puheenhäirintä voi vähentyä jossain määrin tottumisen seurauksena. Tottuminen tarkoittaa sitä, että aivot pystyvät tietyn ajan (n. 20 min...30 h) sisällä optimoimaan toimintansa meluoloihin – spektriin ja sen vaihteluihin – siten, että puheesta (tai muusta audioinformaatiosta) saadaan selvää mahdollisimman hyvin. Melussa tapahtuvan, kuulijalle oudohkon (ammatti)sanaston ”kuulemisen oppiminen”, so. sanastoon ja sanojen foneettisten piirteiden kuulemiseen (”sieppaamiseen”) harjaantuminen vie tyypillisesti vähintään pari viikkoa. Ilmiö on tuttu esimerkiksi pienkoneiden lentäjien koulutuksessa oppilaan harjoittellessa kommunikoidaan lennonjohdon kanssa (radioyhteydet ovat yleensä hyvin kohinaisia ja koneen sisämelu peittää puhetta).^{746, 747, 748}

Kuuloaistin tottumista ja oppimista uusiin olosuhteisiin ja ”uudella tavalla kuulemiseen” on erityisesti tutkittu henkilöillä, jotka ovat saaneet kuulovamman sekä kuulovammaisilla henkilöillä, jotka ovat alkaneet käyttää kuulokojetta. Kuuloaisti on jopa aikuisiässä hyvin plastinen, oppimiskykyinen.⁷⁴⁹

Lyhytaikaisissa laboratoriotutkimuksissa saadut tulokset meluun tottumisesta ovat ristiriitaisia. Tietyn melun kiusallisuus on joissakin kokeissa kasvanut koeallistuksen pidentyessä (tutkittu alue 5 – 60 min) ja joissakin alentunut.⁷⁵⁰

Haastattelu- ja kyselytutkimukset antavat meluun tottumisesta useimmiten toisenlaisia tuloksia kuin objektiiviset mittaukset. Tyypillisesti 10 – 80 %:a vastaajista katsoo tottuvansa meluun helposti tai melko helposti ja 15 – 50 %:a katsoo etteivät totu meluun kohtuullisen tai lainkaan hyvin.^{751, 752, 753, 754, 726} Useissa tutkimuksissa on kysytty vain yleensä tottumista meluun tai tiettyyn nimettyyn meluun. Tällaisissa tapauksissa on epäselvää, mihin melun ominaisuuksiin tai vaikutuksiin tottumista vastaavat ovat ajatelleet. Joissain tutkimuksissa on kysytty tottumista tietyn melureaktion, esimerkiksi kiusallisuuden tai nukahtamisvaikeuksien, suhteen.

Tottumista meluun on arvioitu myös tutkimalla, miten ennen ja jälkeen melumuutosta tehtyjen kyselytutkimusten vastaukset eroavat toisistaan. Tottumista osoittaa esimerkiksi se, jos muutaman kuukauden tai vuoden kulluttua uuden tien tai lentokentän rakentamisen (melun lisääntymisen) jälkeen tehdyissä tutkimuksissa todetaan meluvasteiden tai meluun kielteisen asennoitumisen lieventyneen tai altistettujen meluherkkyyden vähentyneen siitä, mitä se oli aluksi. Tottumiseksi voidaan kutsua myös sitä, että vasteet eivät muutu, kun melu vähentyy tai lisääntyy. Tutkimukset ovat ristiriitaisia. Jotkut osoittavat tottumista esiintyvän, jotkut eivät. Todennäköistä on, että ainakin lievää tottumista tapahtuu.^{755, 756, 757, 758, 759, 15, 726}

Tottuminen meluun näyttää tapahtuvan asennemuutosten välityksellä.⁷⁶⁰ Melun vähentyessä yleiset asenteet meluun voivat muuttua myös aikaisempaa kielteisemmäksi* (tai ”herkemmiksi melulle”), jolloin melun vähentyminen ei vähennä niiden ihmisten määrää, jotka kokevat ko. melun haitalliseksi.⁷⁶¹ Tällainen reagoitavan muuttuminen saattaisi selittää sen, että asuntojen ulkokuoren ääneneristävyyden parantaminen ei alentanut asukkaiden arvioita lentomelun aiheuttamista unihäiriöistä.⁷⁶²

Tottumiselle vastakkainen ilmiö on yli- tai alireagointi melumuutoksiin, joko melun lisääntymiseen tai vähentymiseen. Ylireagointi on tavallista. Hyvin yleistä on, että melun vähennyksen jälkeinen kiusallisuus on pienempi ja melun lisäyksen jälkeinen kiusallisuus suurempi kuin uutta tilannetta vastaavan melun kiusallisuus pitkään kestäneessä vakiotilanteessa.^{755, 756, 757, 760, 759}

Meluherkät kansalaiset

Meluherkillä kansalaisilla tarkoitetaan asiayhteydestä riippuen joko niitä, jotka reagoivat herkästi – monien mielestä joskus jopa lähes sairaalloisen herkästi – meluun tai niitä, joita normaalia alhaisemman ”vastuskyvyn” vuoksi olisi suojeltava melulta. Meluherkkyydelle ei kuitenkaan ole yleistä, kansainvälisesti hyväksyttyä määritelmää, eikä menetelmää sen toteamiseksi. Kyselytutkimuksissa meluherkkyys mitataan pyytämällä vastaajaa arvioimaan se itse esimerkiksi viisiportaisella asteikolla. Meluherkkyyttä ja sen riippuvuutta erilaisista meluista on mitattu myös kysymyssarjojen avulla.^{763, 775, 764} Standardoitujen kysymyssarjoja avulla mitattua tulosta pidetään luottavampana kuin yhdellä kysymyksellä mitattua.^{765, 766} 20 – 40 % melua koskevien kyselytutkimusten vastaajista ilmoittaa olevansa meluherkkiä.^{767, 768}

Ihmisten meluherkkyys merkityksissä ”melunsietokyky” ja ”tietyn meluallistuksen aiheuttama melureaktion voimakkuus”, vaihtelee.^{769, 389, 770, 771} Osan ihmisistä tiedetään olevan normaalia herkempiä kokemaan erilaisia me-

* julkisuuteen saatetaan esittää esimerkiksi mielipiteitä: melua vähennettiin, mutta miksi ei vähenny enempää, vaikka olisi voitu. Tällaiset mielipiteet saattavat muokata asenteita.

luhaittoja. He arvioivat/kokevat systemaattisesti melut äänekkäämmäksi ja epämiellyttävämmäksi kuin ei-meluherkät ihmiset.⁷⁶⁶ Ikääntyminen ja monet psyykkiset sairaudet, kuten depressio ja neuroottisuus, näyttävät lisäävän meluherkkyyttä.^{769, 772, 773, 774, 775, 776, 784, 777} Myös joihinkin elimellisiin sairauksiin liittyy herkistyminen melulle.⁷⁷⁸ Esimerkiksi (melun aiheuttama) pysyvä kuulon aleneminen ja tinnitus näyttäisivät olevan sairauksia, jotka herkistävät melulle.^{779, 780} Tinnitus on tauti, joka ilmenee toisen tai molempien korvien (kuulon) soimisena tai suhisemisena ilman vastaavaa ääniärsykettä. On myös viitteitä siitä, että meluherkkyys lisää psyykkisten sairauksien riskiä.⁷⁸⁴

Meluherkkyys on mediaattori eli sisäinen ”suodatin”, joka muuntaa henkilön melureaktioita verrattuna ei-meluherkän henkilön reaktioihin. Meluherkyyden on mm. todettu vahvistavan henkilön kielteistä asennoitumista meluun. Sen katsotaan myös indikoivan altistetun yleistä asennoitumista meluun ja yleensä kielteistä asennoitumista ympäristöön ja itseensä.^{781, 42, 764, 47} Meluherkkyys voi olla myös lähdekohtaista.⁷⁷⁸ Henkilö voi olla esimerkiksi herkempi lentomelulle kuin tieliikennemelulle.⁷⁶³

Meluherkkyys herkistää kiusallisuusreaktiota. Esimerkiksi, kun meluherkyyden todettiin selittävän noin 10 – 26 % kiusallisuuden yksilöllisestä vaihtelusta, niin melun voimakkuus selitti suoraan vain noin 10 – 12 %.^{389, 724, 782} On esitetty, että kiusallisuusvaste herkistyisi vain tietyn melutason yläpuolella.⁷⁸³ Viimeisin tutkimus viittaa siihen, että meluherkkyys herkistää kiusallisuusvastetta koko vastealueella melun voimakkuudesta riippumatta.⁷⁸² Tämä tarkoittaa muun ohessa sitä, että meluherkyyden vuoksi melun suuresti kiusalliseksi kokevia esiintyy kaikissa meluoloissa, joissa melu voidaan kokea kiusalliseksi.

Sairaalloisen suurta herkkyyttä melulle kutsutaan hyperakusiaksi tai fonofobiaksi. Hyperakusaa sairastavien henkilöiden mielestä kaikki äänet ovat liian voimakkaita ja heidän on lähes mahdotonta kuunnella yli 60 dB(A) olevia ääniä, eli normaali puhekin tuntuu heistä sietämättömän voimakkaalta. Äänien epämiellyttävyyssynnys vaihtelee eri henkilöillä suuresti. Kaikkein herkimmillä hyperakuutikoilla 35...45 dB kuulokynnyksen ylittävät äänetkin alkavat olla epämiellyttäviä, kun melulle kaikkein epäherkimmillä henkilöillä epämiellyttävyyssynnys on noin 110 dB kuulokynnystä korkeammalla.

Joillakin henkilöillä vain toinen korva kuulee hyperakuuttisesti, joillakin molemmat. Hyperakusia voi olla pysyvää (vakaata), ajan mittaan pahenevaa tai tilapäistä. Tilapäisyys tarkoittaa sitä, että hyperakusiasta voi parantua.⁷⁸⁴

Ero ei-sairaalloisen meluherkyyden (hyperakuuttinen kuulo) ja hyperakusian (sairaus) välillä on siinä, että ei-sairaalloisen meluherkät henkilöt voivat kuunnella voimakkaitakin ääniä niiden tuntumatta täysin sietämättömiltä ja ylittämättä kuuloaistin kipukynnystä, mutta hyperakusaa sairastavat eivät voi. Kaikkein meluherkimpiä ihmisiä lasketaan olevan noin 1 % väestöstä. Heistä vain murto-osa sairastaa hyperakusaa. Hyperakusaa esiintyy tavallista enemmän henkilöillä, joilla on jokin kuuloaistin sairaus, esimerkiksi tinnitus.^{785, 778} On myös esitetty, että hyperakusia voisi olla tinnituksen syy. Kaik-

kein meluherkimmille ihmisellä on usein hyvin herkkä kuulo. Kuulokynnys yltää paljon alle standardoidun kuulokynnyksen. Normaalialue paremman kuulon ja meluherkkyyden välillä ei kuitenkaan ole tilastollisesti merkittävää yhteyttä. Toisin sanoen, normaalia parempi kuulokyky ei tee ihmisestä meluherkkää.^{786, 766}

Monet meluhoonokuuloiset henkilöt kärsivät kuulon herkistymisestä melulle. He eivät kuule lainkaan (korkeataajuisia) hiljaisia ääniä. Herkistyminen ilmenee siten, että äänien ylittäessä tietyn tason (joka on erilainen eri tajuuksilla), he yhtäkkiä kuulevatkin äänen, mutta kuulevat sen omasta mielestään aivan liian äänekkäänä. Monet heistä kärsivät myös tinnituksesta.

Fonofobiaksi sanotaan (hyperakuuttista) käyttäytymistä, jossa henkilö sairaalloisen voimakkaasti pelkää tai karttaa tiettyä ääntä tai tietylle äänelle altistumista.

Kuten edellä on todettu, kaikki meluherkät henkilöt eivät kuitenkaan ole psyykkisesti tai muuten sairaita. Heidän osaltaan ei tiedetä onko normaalia suurempi meluherkkyys geneettistä perua, pitkäaikaisen meluallistuksen seurausta vai muiden sairauksien oheisseuraus. Meluherkät henkilöt ovat usein tavanomaista herkemmin reagoivia muillekin ärsykeille kuin meluun.^{790, 787, 788, 778}

Henkilöiden itse arvioima meluherkkyys selittää (korreloi) usein huomattavasti paremmin kuin melutaso henkilön melureaktioiden voimakkuuden. Esimeriksi meluherkät ihmiset ilmoittavat kyselytutkimuksissa kokevansa tietyn melun suuresti kiusallisena alhaisemmissa äänitasoissa (jopa noin 20 dB(A) alhaisemmissa)^{789, 70} kuin meluherkkyydeltään normaalit. Meluherkät henkilöt myös ilmoittavat kärsivänsä enemmän unihäiriöitä,⁷⁶⁸ käyttävät enemmän uni-, kivunpoisto- ja rauhoittavia lääkkeitä kuin henkilöt, jotka luokittelevat itsensä vähemmän meluherkiksi. Meluisissa ympäristöissä* unilääkkeiden käytön on todettu korreloivan hyvin sekä melutasoon, että meluherkkyyteen, kun sen sijaan kivunpoisto-, liikahappoisuus- ja rauhoittavien lääkkeiden käyttö korreloi hyvin meluherkkyyteen, mutta ei kovin selvästi altistavan tieliikenteen (ulko)melutasoon.^{790, 527}

Yksilöllisen meluherkkyyden on todettu selittävän 10...45 % kyselytutkimuksissa ilmoitetun melun kiusallisuuden henkilökohtaisesta vaihtelusta.^{389, 791, 788, 766, 793} Tämä on paljon, jos lukua verrataan siihen, että altistavan melun voimakkuus selittää vaihtelusta tyypillisesti 2... 40 %.³⁸⁹ Laboratoriokokeissa melun voimakkuuden selitysprosentit ovat paljon suurempia kuin asuinympäristössä tehdyissä kyselytutkimuksissa.

On tavallista, että meluherkät ihmiset ilmoittavat kokevansa melko hiljaistenkin melujen aiheuttavan heille unihäiriöitä. Myös objektiivisten unitutkimusten mukaan näyttää siltä, että heidän on vaikeampi nukahtaa melussa ja unen laatu on huonompi kuin henkilöillä, joita ei luokitella meluherkiksi.^{792, 768, 793}

* Ympäristöissä, joissa L_{Aeq} -taso ylittää 55...60 dB(A).

Kuten edellä todettiin, meluherkkyyden katsotaan ilmentävän altistetun yleistä kielteistä asennoitumista meluun. Kielteisesti meluun asennoituvat, mutta myös yleisen kielteisen mielialan tai elämänasenteen omaavat, kokevat myönteisesti asennoituvia herkemmin melun haitalliseksi.^{789, 794} Näyttää myös siltä, että kielteiset meluväittämät lisäävät helpommin meluherkkien kuin ei-meluherkkien henkilöiden kokemaa melun haitallisuutta ja kielteistä suhtautumista meluun.⁷⁸¹

Terveysvalvonnassa ja melutason ohjearvoja asetettaessa joudutaan kysymään, miten ja mihin asti meluherkät ihmiset ja heidän herkistyneet reagoititapansa otetaan huomioon. Verrattaessa eri maiden ohjearvoja¹⁰ siihen, mitä tiedetään (kaikkein) meluherkimpien ihmisten reaktioiden herkkyydestä, on todettava, että ratkaisut näyttävät perustuvat yhteiskuntapoliittiseen harkintaan, eivät (lääke)tieteelliseen argumentointiin. WHO ja jotkut tutkijat ovat painottaneet, että ohjearvot pitäisi asettaa melulle herkimpien ihmisryhmien reagoinnin perusteella.⁷⁹⁵

Meluherkkyyttä on aikaisemmin hoidettu suosittelemalla hypersenttiivisille henkilöille kuulonsuojainten käyttöä ja karttamaan oleskelua ympäristöissä, joissa ääni on heidän mielestään liian voimakasta.^{778, 796} Viime vuosina on hoitokeinoksi on tullut kuulon epäherkistämisterapia.^{797, 771} Kuuloaistin on todettu olevan plastisen, eli äänenkyysaistimuksen voimakkuuden riippuvuutta altistavan melun (äänen) voimakkuudesta voidaan ainakin josain määrin herkistää ja epäherkistää sopivalla kuulon harjaannuttamis- eli totuttamisterapialla. Kahden viikon terapialla on saavutettu 4 – 9 dB(A) muutoksia – joko herkistymistä tai epäherkistymistä – äänekkysherkkyyteen.⁷⁷¹

Viitteet

- 1) Asumisterveysohje, Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät, Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1, 93 s. ISBN 952-00-1301-6
- 2) –, Sisäilmaohje. Asuntojen ja muiden sisätilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 1997:1. Helsinki. 1997. 72 s. ISBN 952-00-0261-8.
- 3) Pesonen K, Lääkintöhallituksen uusi meluyleiskirje 1676/79. Esitelmä terveys-tarkastajille suunnatussa koulutustilaisuudessa Kuopion Korkeakoulussa 8.10. – 10.10.1979.
- 4) Tätä ennen lääkintöhallitus oli julkaissut yleiskirjeen N:o 1551/1973, Terveydenhoitolain (469/65) ja –asetuksen (55/67) nojalla annetut melua koskevat terveydelliset suositukset, Valtion painatuskeskus, Helsinki, 1973. 19 s.
- 5) Pesonen K, Asenteet ja mielipiteet ympäristömelun haitallisuuden mittarina. Insinööritoimisto Kari Pesonen Oy:n sisäinen raportti. 1994.
- 6) Aurola R, Terveydenhoitolain soveltaminen meluntorjunnassa, Ympäristö- ja terveys, 24(1993)4–5, 242 – 252.
- 7) Pesonen K, Kiusallisuus ympäristömelun ohjearvojen perusteena, Ympäristö- ja terveys, 25(1994)6, 35 – 43.
- 8) Pesonen K, Ympäristömelun arvioinnin pulmista: Pitkän aikavälin keskiäänitaso haittojen mittarina, Ympäristö- ja terveys, 27(1996)5, 60 – 65.
- 9) Pesonen K, Onko melu häiritsevää vai kiusallista? Esitelmä melun vaikutuksia käsittelevässä YM:n tilaisuudessa Säätytalolla. 13.12. 1994. Rev. 5. 10.3.1995, 14 s. Kopio esitelmästä saatavissa Kari Pesoselta.
- 10) Pesonen K, Ympäristömelun ohjearvot ja ohjearvojärjestelmät eri maissa. (Target levels and target level systems in different countries) Insinööritoimisto Kari Pesonen Oy:n sisäinen raportti. Ensimmäinen versio vuonna 1993. Sen jälkeen jatkuvasti päivitetty. 92 s. Yli 200 kirjallisuusviitettä.
- 11) Gottlob D, Regulations for community noise, Noise/News International, 3(1995)4, 223 – 226.
- 12) Vallet M, Lambert J, Study related to preparation of a communication on a future EC noise policy. Final report. Inrets LEN Report 9420. 1994. 137 s.
- 13) Kyselytutkimuksissa sisämelutasot on yleensä arvioitu vähentämällä lasketuista tai mitatuista ulkomelutasoista jokin oletettu rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyys. Laskettu arvo saattaa poiketa oikeasta. Erilaiset ikkunoiden arkipitotavat voivat myös vaikuttaa siihen, paljonko ja milloin sisämelu poikkeaa ulkomelusta.
- 14) Birnie S, Hall F, Taylor M, The contribution of indoor and outdoor effects to annoyance at noise in residential areas, Inter-Noise 80 Proc., 975 – 978.
- 15) de Jong R G, Some developments in community response research since the second international workshop on railway and tracked transit system noise in 1978, J. Sound Vibr. 87(1983)2, 297 – 309.
- 16) Job R F S, Bullen R B, Burgess D H, Noise-Induced reaction in a work community adjacent to aircraft runways: The royal Australian airforce, Inter-Noise 91 Proc., 895 – 898.
- 17) Kashima N, Tamura A, 24 hour measurements of A-weighted L_{eq} outside and inside dwellings in Yokohama, Inter-Noise 94 Proc., 1033 – 1036.
- 18) Sone T, Environmental noise and personal exposure, Inter-Noise 2003 Proc, 45 – 52.

- 19) Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/49/EY, annettu 25 päivänä kesäkuuta 2002, ympäristömelun arvioinnista ja hallinnasta. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 189/12, 18.7.2002.
- 20) Nieman H, Maschke C, WHO Lares. Final report. Noise effects and morbidity, WHO Europe. EUR/04/5047477. 2004. 20 s.
- 21) Noise from civilian aircraft in the vicinity of airports – Implications for human health, 1. Noise, stress and cardiovascular disease, Health Canada, 2001. 17 s. ISBN 0-662-30975-8.
- 22) "Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity." Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, New York, 19-22 June, 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 States (Official Records of the World Health Organization, no. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948. <http://www.who.int/about/definition/en/>. Tarkistettu 27.6. 2004.
- 23) Käypä hoito käsikirja, Suomalainen lääkäriseura Duodecim, 2004, 54 s. http://www.duodecim.fi/pls/kotisivut/docs/F10436/KH-kasikirja_2004_net.pdf . Tarkistettu 3.12.2004.
- 24) Auvinen A, Johdatus epidemiologiaan, http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja4/_files/71212550848911518/default/kirja4_06.pdf tarkistettu 3.12.2004.
- 25) Corvalán C, Briggs D, Kjellstrom T, 1996 Development of environmental health indicators. Kirjassa: Linkage methods for environment and health analysis. General guidelines. (D. Briggs, C. Corvalan and M. Nurminen, eds.). Geneva: UNEP, USEPA and WHO, pp.19-53.
- 26) Anon., Environmental health indicators: development of a methodology for the WHO European region, Interim Report, 6 November 2000, 2000 European Health21 targets 10,19, EUR/00/5026344. 111 s.
- 27) http://www.who.dk/EHIndicators/Indicators/20030527_2, tarkistettu 23.5. 2004.
- 28) Beaumont J, Petitjean E, Driving force, pressure and state indicators, Technical meeting on noise indicators, Brussels, April 7 th , 8 th , 9 th 2003. 36 s.
- 29) <http://www.cansee.org/documents/CANSEE%202003/Marko.pdf> tarkistettu 23.5.2004. Tämä esitelmä antaa melko hyvä yleiskuvan DPSEEA-mallin käytöstä liikenteen ympäristövaikutuksiin, joista melu on yksi.
- 30) <http://www.unece.org/trans/doc/2003/wp6/TRANS-WP6-AC3-2003-02e.pdf>, tarkistettu 23.5.2004.
- 31) [Http://europa.eu.int/comm/health/ph_projects/2002/monitoring/fp_monitoring_2002_inter_01_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/health/ph_projects/2002/monitoring/fp_monitoring_2002_inter_01_en.pdf), tarkistettu 23.5.2004.
- 32) http://www.environmentandhealth.org/twgim/twge/documents/e1_EEA_and_E&H_Strategy.doc, tarkistettu 23.5.2004.
- 33) http://europa.eu.int/comm/health/ph_information/indicators/docs/ev_20040219_co02_en.pdf, tarkistettu 23.4.2004
- 34) http://europa.eu.int/comm/environment/health/pdf/indicators_final.pdf, tarkistettu 24.4.2004.
- 35) <http://www.unece.org/stats/documents/ces/ac.36/2004/wp.6.e.pdf>, tarkistettu 24.4.2004.
- 36) Technical meeting on exposure-response relationships of noise on health 19-21 September 2002 Bonn, Germany Meeting report. World Health Organization Regional Office for Europe, European Centre for Environment and Health Bonn Office. 199 s.

- 37) Johnson D L, Farina E R, Description of the measurement of an individual's continuous exposure during a 31-day period, *J. Acoust. Soc. Am.* **62**(1977)6, 1431-1435.
- 38) Schulte-Fortkamp B, Lercher P, Soundscape and community noise annoyance in the context of environmental impact assessment, *Inter-Noise 2002 Proc.*, 2815 – 2824.
- 39) Elizondo-Garza F J, Regulations against the human nature, 147th Meeting, Acoustical Society of America, <http://scitation.aip.org/confst/ASA/data/1/4pNSb7.pdf>. tark. 15.6.2004.
- 40) Milbrath, L W, Sahr, R C, Perceptions of environmental quality. *Social Indicators Research*, 1, 397 – 438, 1974. ref. van Poll R, The perceived quality of the urban residential environment. A multi-attribute evaluation. PhD Thesis. 1997, 228 s. <http://www.ub.rug.nl/eldoc/dis/science/h.f.p.m.van.poll/>. Tark. 15.4.2004.
- 41) Gunn W J, Field and laboratory research on human response to aircraft noise: the need to consider effects on health and welfare, *Noisexpo Proceedings 1977 Chicago March 14 – 17*, 15 – 22.
- 42) Job R F S, Over-reaction to changes in noise exposure: The possible effect of attitude, *J. Sound Vibr.* **126**(1988)3, 550 – 552.
- 43) Fields J M, Effects of errors in specifying noise environments on results from community response surveys, *Inter-Noise 82 Proc.*, 609 – 612.
- 44) Johnsson E, Sörensen S, Relation between annoyance reactions and attitude to the source of annoyance, *Public Health Reports* **85**(1970), 1070 – 1074.
- 45) Job R F S, Hede A J, Community reaction to noise from power stations, *Inter-Noise 89 Proc.*, 865 – 868.
- 46) Schulte-Fortkamp B, Noise from combined sources: How attitudes towards environment and sources influence the assessment, *Inter-Noise 99 Proc.*, 1383 –1386.
- 47) Weinstein N D, Individual differences in critical tendencies and noise annoyance, *J. Sound Vibr.* **68**(1980)2, 241 – 248.
- 48) Kalverman K, The theory of mental testing and the correlation between physical noise level and annoyance. *J. Acoust. Soc. Am.* **101**(1997)5, Pt 2, 3171.
- 49) Hall F, Community response to noise: Is all noise the same, *J. Acoust. Soc. Am.* **76**(1984)4, 1161 – 1168.
- 50) Versfeld N, Vos J, Geurtsen F, Annoyance of individual vehicle pass-by noise for light and heavy vehicles, *J. Acoust. Soc. Am.* **96**(1994)5, Pt. 2, 3335.
- 51) Baron R M, Kenny D A, The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations, *J. Person. Social Psych.* **51**(1986), 1173 – 1182.
- 52) Botteldooren D, Lercher P, Soft-computing base analyses of the relationship between annoyance and coping with noise and odor, *J. Acoust. Soc. Am.* **115**(2004)6, 2974 – 2985.
- 53) Flecher H, Beyer A, Duel A, Noise measurement in city noise, Report of the Noise Abatement Commission, Department of Health, City of New York, 1930. 308 s. esim. jälkipainos s. 111 – 123 kirjassa Crocker M J, Noise control, van Nostrand Reinhold, 1984, 415 s, ss. 369 – 381.

- 54) Fields J M, Designing community surveys to provide a basis for noise policy, report TM-80110, Nasa, 1980.
- 55) Fields J M, Progress toward the use of shared noise reaction questions, Inter-Noise 96 Proc., 2389 – 2394.
- 56) Fields J M, An updated catalogue of 521 social surveys of residents' reactions to environmental noise (1943- 2000), Nasa/CR-2001-211257. 155 s.
- 57) J. Acoust. Soc. Am., **114**(2003)2, Pt. 2, Sessions 3aAA ja 3pAA.
- 58) Olen itse tavannut useita kertoja tällaisia listoja, joita tutkittaessa on todettu, että osa allekirjoittajista on kotoisin toiselta paikkakunnalta tai asuvat niin etäältä melulähteessä, että ko. melu ei heitä altista haittaa aiheuttaen.
- 59) Watson D, Negative affectivity: the disposition to experience aversive emotional states, Psychol. Bulletin **96**(1984), 465 – 490.
- 60) Watson D, Pennebaker J W, Health complaints, stress and distress: exploring the central role of negative affectivity. Psychol. Review **96**(1989), 234 – 254.
- 61) –, BS 4142, Methods for rating industrial noise affecting mixed residential and industrial areas, 1990.
- 62) Kirk A, A noise appraisal of the Fal Eastuary, Inter-Noise 83 Proc., 747 – 750.
- 63) Broadbent D, Noise in relation to annoyance, performance, and mental health, J. Acoust. Soc. Am. **68**(1980)1, 15 – 17.
- 64) Grimwood C, Ling M, Domestic noise complaints, BRE Report no 204732, Department of the Environment, Transport and Regions, 1999. 11 s.
- 65) van Wiechen C M A G *et al.*, Aircraft noise exposure from Schihol airport: A relation with complaints, Noise & Health, **5**(2002)17, 23 – 34.
- 66) Bucta E, Annoyance of residents through low frequency (artillery) and high frequency (small arms) noise, Proc. Noise as a Public Health Prolem, Stochkolm 1988, vol 3, 171 – 174.
- 67) Allekirjoittaneen kokemukset n. 40...50 ampumaraden meluselvitykistä ja meluvalitusten syiden arvioinnista.
- 68) Fidell S, The urban noise surveys, U.S. Environmental Protection Agency, Report 550-9-77-100, 1977.
- 69) Hall F, Birnie S, Taylor M, Noise impact predictions: some comparisons of community response measures and of noise metrics, Inter-Noise 78 Proc., 601 – 604.
- 70) Kastka J, *et al.*, Standings and results of the research on aircraft noise – Longitudinal study at Dusseldorf airport 1987 – 1995, Inter-Noise 96 Proc., 305 – 310.
- 71) McKennel, A, Correlational analysis of survey data, Sociological review, **13**(1965), 157 – 181.
- 72) Avery, G, Comparison of telephone complaints and survey measures of noise annoyance, J. Sound Vibr. **82**(1982), 224.
- 73) Eddington N, Eddington I, Environmental noise disamenity in an Australian provincial city, Proc. Noise as a Public Health Problem, 1988, Stockholm, Vol. 3, 181 – 186.
- 74) Peppin R *et al.* Community noise complaints: Correlation with population density, Inter-Noise 78 Proc., 591 – 596.
- 75) Taylor M, Hall F, Birnie S, Effect of background levels on community responses to aircraft noise, J Sound Vibr. **71**(1980)2, 261 – 270.
- 76) Luz G, Raspet R, Schomer P, An analysis of community complaints, J. Acoust. Soc. Am. **73**(1983)4, 1229 – 1235.
- 77) Guski R, Sorts of noises people complain about, Inter-Noise 76 Proc., 369 – 372.
- 78) Stansfeld S *et al.*, The development of a 'Standardised interview to assess domestic noise complaints and their effects'. Final report Dec. 2000. 58 s.

- 79) Lahti T, Parmanen J, Melukartoituksen esiselvitys. Sisäasiainministeriö, ympäristönsuojeluosaston julkaisu A.16. 1982, 63 s.
- 80) Stewart C, Russel W, Lutz G, Can population density be used to determine ambient noise levels? Proceedings CD, ASA and EAA joint meeting in Berlin March 14 – 19, 1999. Tiedosto 1PNSA-5.pdf.
- 81) Ishi A, Kawashima T, Relation between the occurrence of community noise complaints and the population density in Chiba, Inter-Noise 90 Proc., 275 – 278.
- 82) Luz G A, Raspet R, Schomer P D, An analysis of community complaints to noise, J. Acoust. Soc. Am. **73**(1983)4, 1229 – 1235.
- 83) Carter N *et al.*, Community response to major changes in runway configuration, operation procedures and aircraft noise at Sydney airport, Inter-Noise 96 Proc., 2311 – 2316.
- 84) Anon., Information on levels of environmental noise requisite to protect public health and welfare with an adequate margin of safety, U.S. Environmental Protection Agency, 550/9-74-004, March 1974.
- 85) Michel S, Neighbour and Neighbourhood Noise - A Review of European Legislation and Practices, Defra, March 2002, 178 s.
- 86) <http://www.cieh.org/research/stats/noise02.htm> Vuoden 2002-2003 meluvalitukset Englannissa ja Walesissa.
- 87) <http://www.ehind.nl/info/> . Ks. ALL/Noise-e1/Neighbourhood. Tarkistettu 1.12.2004.
- 88) Hatfield J, *et al.* The influence of psychological factors on self-reported physiological effects of noise, Noise Health, **3**(2001)10, 1 – 13.
- 89) Fidell S, Pearsons K, Sensitivity to prospective transportation noise exposure, Noise Control Engineering J. **51**(2003)2, 106 – 113.
- 90) Schaap D, Local attitudes towards an international project. A study of residents' attitudes towards a future high-speed rail line in general and towards annoyance in particular, J. Sound Vibr. **193**(1996)1, 411 – 415.
- 91) Felscher-Suhr U, On the difference in the evolution of judgements depending on either retrospective or actual noise annoyance measurement, Inter-Noise 97 Proceedings, CD-ROM, 213.pdf.
- 92) van Wiechen C M A G, *et al.*, Aircraft noise exposure from Schipol airport: A relation with complaints, Noise & Health, **5**(2002)17, 23 – 34.
- 93) Ilmailulaitoksen tilastot. Tietoa saatu sähköpostitse ympäristöpäällikkö Mikko Viinikaiselta Ilmailulaitoksesta.
- 94) Hume K *et al.*, Can complaints about aircraft noise be used as an index of annoyance, Inter-Noise 2001 Proc, 1629 – 1632.
- 95) Kuwano S *et al.*, Psychological evaluation of noise in passenger cars: analysis in different group of subjects in nationality, age, and gender, Contributions to Psychological Acoustics, 6th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 1993, 521 – 536.
- 96) Shimai S, Schick A, Hoegel H, A cross-cultural study of identification and pleasantness-unpleasantness of environmental sounds, Inter-Noise 94 Proc., 839 – 844.
- 97) Yamada Y, Survey and analysis of the actual conditions of neighborhood noise in Japan, Inter-Noise 90 Proc., 295 – 298.
- 98) Blauert J, Jekosch U, Sound quality evaluation – A multilayered problem, Acta Acustica **83**(1997), 747 – 753.
- 99) Zwicker E, Feldtkeller R, Das Ohr als Nachrichtempfänger (2. ed.), S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1970. pp. 184 – 203.

- 100) Hellman R P, Growth rate of loudness, annoyance, and noisiness as a function of a tone location within the noise spectrum, *J. Acoust. Soc. Am.* **75**(1984)1, 209 – 218.
- 101) Hellman R P, Perceived magnitude of two-tone-noise complexes: Loudness, annoyance and noisiness, *J. Acoust. Soc. Am.* **77**(1985)4, 1497 – 1504.
- 102) Kuwano S, Namba S, On the definition of loudness, noisiness, and annoyance using selected description method, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Stockholm, Vol. 3, 223 – 228.
- 103) Namba S, Annoyance caused by noise: definition and psychological measurement, <http://www.netsympo.com/2002/namba/Annoyance.pdf>
- 104) Cardozo B L, Veen K G, Estimation of annoyance due to low level sound, *Appl. Acoust.* **12**(1979)5, 389 – 396.
- 105) esim. Stevens S, *Psychophysics. Introduction to its perceptual, neural and social prospects.* Wiley-Interscience, New York, 1975.
- 106) Ueda K, Akagi M, Sharpness and amplitude envelopes of broadband noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **87**(1990)2, 814 – 819.
- 107) Zwicker E, *et. al.*, Loudness meter based on ISO 532B with large dynamic range, *Inter-Noise 85 Proc.*, 1119 –1122.
- 108) Illényi A, Vicsi K, A device measuring loudness and complex acoustical signals, *Inter-Noise 87 Proc.*, 1355 – 1358.
- 109) Moore B, Glasberg B, A revision of Zwicker's loudness model, *Acustica/Acta Acustica*, **82**(1996)2, 335 – 345.
- 110) Stone M, Moore B, Glasberg B, A real-time DSP-based loudness meter, *Contributions to Psychological Acoustics, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics*, 1997, 587 – 601.
- 111) Pflueger M, Hoeldrich R, Riedler W, DB(ELC) – A proposal to modify dB(A), *Inter-Noise 96 Proc.*, 2609 – 2612.
- 112) Ih J-G, Jeong H, Measurement of time varying loudness by using the short time Fourier transform with variable frequency, *Proc. Sound Quality Symposium, Ypsilanti, Michigan*, 1998, 67 –70.
- 113) Paulus E von, Zwicker E, Programme zur automatischen Bestimmung der Lautheit aus Terzpegeln oder Frequenzgruppenpegeln, *Acustica*, **27**(1972)5, 253 - 27.
- 114) Zwicker E, Fastl H, Dallmayr C, Basic-program for calculating the loudness of sounds from their 1/3-oct band spectra according ISO 532 B, *Acustica*, **55**(1984)1, 63 – 67.
- 115) –, ISO 3891:1978 Acoustics – Procedure for describing aircraft noise heard on the ground.
- 116) Beranek, L, A report on the international conference on Acoustics, London 1948, *J. Acoust. Soc. Am.* **21**(1949)3, 264 – 269.
- 117) Zwicker E, On the dependence of unbiased annoyance on loudness, *Inter-Noise 89 Proc.*, 809 – 814.
- 118) Laux P, Davies P, On the use of artificial neural networks to model sound quality, *J. Acoust. Soc. Am.* **95**(1994)5, Pt. 2, 2836.
- 119) Genuit K, Instrumentation and investigation for determining perception of noise annoyance, *Noise-Con 90 Proc.*, 445 – 450.
- 120) Mantel J, General approach to annoyance due to dynamical noise, *Inter-Noise 86 Proc.*, 841 – 848.
- 121) Kerr M, Development of an instrument to measure noise annoyance, <http://www.nursing.umn.edu/facultypages/Kerr.html> . Tarkistettu 10.12.2004.
- 122) Furihata K, Yangisawa T, Sound level meter directly capable of evaluation

- psychological effects with “urusasa” and/or “Hues”-scales, Inter-Noise 94 Proc., 1125 – 1128.
- 123) Furihata K, Yanagisawa T, Comparison between some results measured with an “urusasa & hues” and the conventional sound level meters, Inter-Noise 96 Proc., 2601 – 2604.
- 124) Kuno K, *et al.*, Analysis and prediction of personal reaction to environmental noise, Contributions to Psychological Acoustics, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 1997, 205 – 220.
- 125) Thirard C, Parot J, Vincent B, Vallet M, The use of a neural network in order to estimate the noise annoyance from physical data, Inter-Noise 92 Proc., 1107 – 1110.
- 126) Laux P, Davies P, Using artificial neural networks to model human annoyance to noise, Noise-Con 94 Proc., 745 – 750.
- 127) Prante, H U, Modelling judgements of environmental sounds by means of artificial neural networks, PhD Dissertation vom Fachbereich 6 – Verfahrenstechnik, Umweltechnik, Werkstoffwissenschaften – der Technischen Universität Berlin, 2001, 186 s. <http://www.dissertation.de/PDF/hup507.pdf>
- 128) Haruta C, *et al.*, Information loss: A new index for measuring the effects of noise on understanding Japanese syllables, Inter-Noise 84 Proc., 895 – 898.
- 129) Berglund B, *et al.*, Scaling loudness, noisiness, and annoyance of community noises, J. Acoust. Soc. Am. **60**(1976)5, 1119 – 1125.
- 130) Yamada Y, Loudness, noisiness and annoyance of complex sounds (Comparison of Japanese with German), Inter-Noise 85 Proc., 977 – 980.
- 131) Fidell S, Audibility-related means for assessing community response to noise from outdoors events, Inter-Noise 96 Proc., 2001 – 2005.
- 132) Hiramatsu K, *et al.*, A rating scale experiment on loudness, noisiness and annoyance of environmental sounds, J. Sound Vibr. **127**(1988)3, 467 – 473.
- 133) –, ISO 532 – 1975 (E) Acoustics – Method for calculating loudness level, 18 s.
- 134) Stevens S, The Measurement of loudness, J. Acoust. Soc. Am. **27**(1955)5, 815 – 829.
- 135) Stevens S, Calculations of the loudness of complex noise, J. Acoust. Soc. Am. **28**(1956)3, 807 – 815.?? Sivut.
- 136) Fidell S *et al.*, Effects of aircraft overflights on wilderness recreatinists, J. Acoust. Soc. Am. **100**(1996)5, 2909 – 2918.
- 137) Poremba A, *et al.*, Functional mapping of the primate auditory system, Science, **299**(2003) 24. Jan. 568 – 572. <http://www.psychology.uiowa.edu/Faculty/Poremba/PDFs/poremba3.sci.03.pdf>. Tarkistettu 1.2.2005.
- 138) Weber R, Characterization of complex transportation noise with psychoacoustical parameters, Inter-Noise 96 Proc., 2525 – 2530.
- 139) Hellman R and Zwicker E, Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness? J. Acoust. Soc. Am. **82**(1987)5, 1700 – 1705.
- 140) Quinlan D, A comparative study of Zwicker’s method for calculating the loudness of continuous sounds, Noise Control Eng. J. **42**(1994)3, 117 – 126.
- 141) Smith S *et al.*, Evaluation of fan noise loudness using A-weighted sound level and Zwicker’s model, Inter-Noise 89 Proc., 787 – 792.
- 142) Zwicker E, Fastl H, Sinnvolle Lärmessung un Lärmgrenswerte, Z. f. Lärmbekämpfung **33**(1986), 61 – 67.
- 143) Zwicker W, What is a meaningful value for quantifying noise reduction, Inter-Noise 85 Proc., 47 – 56.
- 144) Flynn D, Yaniv S, Relations among different frequency rating procedures for traffic noise, J. Acoust. Soc. Am. **77**(1985)4, 1436 – 1446.

- 145) Makarewicz R, Jorasz U, Preis A, A simplified model for loudness level calculation of environmental noise, *Noise Control Eng. J.*, **33**(1989)3, 125 – 128.
- 146) Gabriel B, Kollmer B, Mellert V, Influence of individual listener, measurements room and choice of test-tone levels on the shape of equal loudness level contours, *Acta Acustica*, **83**(1997)4, 670 – 683
- 147) Héту R, Lepage B, Quoc H, Individual variability in equal-loudness contours of high level, narrow band impulse noise, *Acta-Acustica* **82**(1996)1, 123 – 131.
- 148) Lydolf M, Frandsen P, Møller H, Psychometric procedures for measurements of equal loudness level contours, *Inter-Noise 96 Proc.*, 3221 – 3224.
- 149) Knaus H P, An empirical formula for the loudness of a 1000-cycle tone, *J. Acoust. Soc. Am.*, **9**(1937)1, 45 – 46.
- 150) Allen J B, Neely S T, Modelling the relation between the intensity just noticeable difference and loudness for pure tones and wideband noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, **102**(1997)6, 3628 – 3646.
- 151) Allen J B, Harvey Fletcher's role in the creation of communication acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.*, **99**(1996)4, Pt.1, 1825 – 1839.
- 152) Anon., ISO 226:1987 (E) Acoustics – Normal equal-loudness level contours. 8 s.
- 153) Stevens S S, Cross-modality validations of subjective scales for loudness, vibration, and electric shock, *J. Exp. Psychology* **51**(1959), 201 – 209.
- 154) Stevens S S, On the psychophysical law, *Psychol. Rev.*, **64**(1957), 153 – 181.
- 155) Susini P, McAdams S, Psychophysical validation of a proprioceptive device by cross-modal matching of loudness, *Acustica - Acta Acustica* **86**(2000)3, 515 – 525.
- 156) Esimekiksi kuulumallit :
<http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/personal/roy.patterson/aim/>, <http://www.acoustics.hut.fi/~aqi/software/HUTear/>
- 157) Howes W, Loudness of steady sounds – A new theory, *Acustica* **41**(1979)5, 277 – 320.
- 158) Zwicker E, Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds, *J. Acoust. Soc. Am.* **62**(1977)3, 675 – 682.
- 159) Dau T, Püschel D, A quantitative model of the effective signal processing in the auditory system. Contributions to psychological acoustics, 6th Oldenburg symposium on psychological acoustics, 1996, 107 – 120.
- 160) Münkner S, Püschel D, A psychoacoustical model for the perception of non-stationary sounds. Contributions to psychological acoustics, 6th Oldenburg symposium on psychological acoustics, 1996, 121 – 134.
- 161) Allen J, Neely S, Modelling the relation between the intensity just-noticeable difference and loudness for pure tones and wideband noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **102**(1997)6, 3628 – 3646.
- 162) Sottek A, Modelle zur Signalverarbeitung in menschlichen gehör, Dissertation, RWTH-Aachen 1992.
- 163) Bollerott, Softwaremodell der natürlichen Cochlea, *Acta-Acustica* **82**(1996)1, 102 – 113.
- 164) Benedetto J J, Teolis A, A wavelet auditory model and data compression, *Appl. Comput. Harm. Anal.* **1**(1993)1, 3 – 28.
- 165) Wan W, Yu X, A digital cochlear model: Transfer function, cochlear map and bandwidth characteristics, *Acustica* **81**(1995)1, 89 – 93.
- 166) Namba S, Kuwano S, The reliability of a cross-cultural study on noise problems, *Inter-Noise 86 Proc.*, 996 – 1000.
- 167) Namba S, Kuwano S, Schick A, A cross-cultural study of noise problems, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, **7**(1986), 279 – 289.

- 168) Kuwano S, Namba S, Florentine M, Introduction to experiences with efforts to standardize social noise surveys, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2047 – 2052.
- 169) Fastl H, Namba S, Kuwano S, Crosscultural study on loudness evaluation of road traffic noise and impulsive noise: actual sounds and simulations, *Inter-Noise 86 Proc.*, 825 – 830.
- 170) Lavandier C *et al.*, Auditory perception of road traffic noise, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 2820 – 2823.
- 171) Merthaysa I, Gide N, Ando Y, Variation in the autocorrelation function of narrow band noises, their effects on loudness judgement, *Proc. 3rd Japanese-Swedish noise symposia on noise effects*, 1996.
- 172) Ando Y, A theory of primary sensations and spatial sensations measuring environmental noise, *J. Sound Vibr.* **241**(2001)1, 3 – 18.
- 173) Abe K *et al.*, The effects of visual information on the impression of environmental sounds, *Inter-Noise 1999 Proc. CD-ROM paper*, 374.pdf.
- 174) Tamura A, Effects of landscaping on the feeling of annoyance of a space, *Contributions to Psychological Acoustics, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics*, 1997, 135 – 161.
- 175) Abe K *et al.*, The effect of visibility of sound sources on the loudness evaluation of an environmental sound, *Inter-Noise 2003 Proc.* 2843 – 2848.
- 176) Bodden M, Modelling human sound-source localization and the cocktail-party-effect, *Acta Acustica*, **1**(1993)1-2, 43 – 55.
- 177) Traunmüller H, Analytical expressions for the tonotopic sensory scale, *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(1990)1, 97 – 100.
- 178) Moore B C, Peters R, Glasberg B, Auditory filter shapes at low center frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(1990)1, 132 – 140.
- 179) Zwicker E, Feldtkeller R, Über die Lautstärke von gleichförmigen Geräuschen, *Acustica* **5**(1955), 303 – 316.
- 180) Florentine M, Buus P, Loudness of complex sounds as function of the standard stimulus and the number of components, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**(1978)4, 1036 – 1040.
- 181) Beranek L L *et al.*, Calculation and measurement of the loudness of sounds, *J. Acoust. Soc. Am.* **23**(1951)3, 261 – 269.
- 182) Hewitt M, Meddis R, An evaluation of eight computer models of mammalian inner hair-cell function, *J. Acoust. Soc. Am.* **90**(1991)2, Pt.1, 904 – 917.
- 183) Huggins, A, Is periodicity detection central? *J. Acoust. Soc. Am.* **71**(1982)4, 963 – 966.
- 184) Cowan N, On short and long auditory stores, *Psychological Bulletin*, **96**(1984)2, 341 – 370.
- 185) Port E, Über die Lautstärke einzelner kurzer Schalimpulse, *Acustica* **13**(1963), 212 – 223.
- 186) Cowan N, *Psychological Bulletin* **96**(1984)341 – 370. (viit. *Inter-Noise 97 Proc.*, 2089 – 2094.)
- 187) Hellbrück J, Zeitler A, Gold M, Continuous loudness scaling of traffic noise in outdoor settings and under laboratory conditions, *Inter-Noise 97 Proc*, paper 055.pdf.
- 188) Loveless N, *et al.*, Temporal integration in auditory sensory memory: neuromagnetic evidence, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **100**(1996)3: 220–228.
- 189) Rakowski A, Short-term memory for pitch, pp. 99 – 129 in *Recent Trends in Hearing Research*, Universität Oldenburg, 1996. 402 s

- 190) Clement S, Demany L, Semal C, Memory for pitch versus memory for loudness, *J. Acoust. Soc. Am.* **106**(1990)5, 2805 – 2811.
- 191) Bailey P, Dobinson S, Pitch and loudness memory in musicians and non musicians, *J. Acoust. Soc. Am.* **112**(2002)5 Pt.2 , 2245.
- 192) Buus S, Florentine M, Poulsen T, Temporal integration of loudness, loudness discrimination, and the form of the loudness function, *J. Acoust. Soc. Am.* **101**(1997)2, 669 – 680.
- 193) Pedersen O J, Lyregaard P E, Poulsen T E, The round robin test on evaluation of loudness level of impulsiv noise, Report 22, Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Copenhagen, 1977.
- 194) Plomp P, Bouman M A, Relation between hearing threshold and duration for noise pulses, *J. Acoust. Soc. Am.* **31**(1959)6, 749 – 758.
- 195) Gerken G, Vishwa K, Hutchison-Glutte B & H, Auditory temporal integration and the power function model, *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(1990)2, 767 – 778.
- 196) Zwislöcki J, Temporal summation of loudness: An analysis, *J. Acoust. Soc. Am.* **46**(1969)2, 431 – 441.
- 197) Schomer P, Suzuki Y, Saito E, A comparison between the use of loudness level weighting and loudness measures to assess environmental noise from combined sources, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 3562 – 3566.
- 198) Paulsen R, On the influence of the stimulus duration on psychophysical judgement of environmental noises taken in the laboratory, *Inter-Noise 97 Proc.* CD - 163.pdf
- 199) Botte M-C, *et al.*, Predicting susceptibility to auditory fatigue on the basis of loudness adaptation, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Vol. 2, 39 – 44.
- 200) Scharf B, Loudness adaptation, pp. 51 – 73 in *Recent Trends in Hearing Research*, Universität Oldenburg, 1996. 402 s.
- 201) Schlauf R, A cognitive influence on the loudness of tones that change continuously level, *J. Acoust. Soc. Am.* **92**(1992)2, Pt.1, 758 – 765.
- 202) Bacon S, Viemesiter N, Intensity discrimination and increment detection at 16 kHz, *J. Acoust. Soc. Am.* **95**(1994)5 Pt 1, 2616 – 2621.
- 203) Miskiewicz A, Scharf B, Hellman R, Meiselman C, Loudness adaptation at high frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.* **94**(1993)3, 1281 – 1294.
- 204) Botte M, Mönikheim S, New data on the short-term effects of tone exposure, *J. Acoust. Soc. Am.* **95**(1994)5 Pt 1, 2598 – 2605.
- 205) Botte M, Charron S, Bouayad H, Temporary threshold and loudness shifts: Frequency patterns and correlations, *J. Acoust. Soc. Am.* **93**(1993)3, 1524 – 1534.
- 206) Botte M-C, Canévet G, Scharf B, Loudness adaptation induced by an intermittent tone, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**(1982)3, 727 – 739.
- 207) Zwicker E, Meaningful noise measurements and effective noise reduction, *Noise Control Eng. J.* **29**(1987)3, 66 – 76.
- 208) Viemeister N, Wakefield G, Temporal integration and multiple looks, *J. Acoust. Soc. Am.* **90**(1991)2, Pt.1, 858 – 865.
- 209) Ogur Y, *et al.*, A temporal model for loudness perception of repeated impulsive sounds, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, **12**(1991), 1 – 11
- 210) Grey J, Gordon J, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, *J. Acoust. Soc. Am.* **63**(1978)5, 1493 – 1500.
- 211) Gjaevens K, Rimstad E, The influence of the rise times on loudness, *J. Acoust. Soc. Am.* **51**(1972)6, 1233 – 1239.

- 212) Oletetaan, että tutkittaisiin vaikkapa kolme erilaista kaksi viikkoa kestäväää äänialtistusta viidellä eri äänekkyystasolla koetoistoinen. Tällaista koetta, jossa koehenkilöiden pitäisi viettää laboratoriossa puolesta vuodesta vuoteen, ei voitane pitää järkevänä, vaikka ulkoiset fyysikaaliset tekijät pystyttäisiinkin pitämään kontrolloituina.
- 213) Namba S, Kuwano S, Psychological study on L_{eq} as a measure of loudness of various kinds of noises. *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, **5**(1984), 135 – 148.
- 214) Kuwano S, Namba S, Miura H, Advantages and disadvantages of A-weighted sound pressure level in relation to subjective impression of environmental noises, *Noise Control Eng. J.* **33**(1989)3, 107 – 115.
- 215) Fujimoto K, Nobusuke S, On the validity of L_{Aeq} as a measure of loudness and noisiness of various kinds of sounds, *Inter-Noise 84 Proc.*, 879 – 886.
- 216) Kuwano S, Namba S, Fastl H, Loudness evaluation of various sounds by Japanese and German subjects, *Inter-Noise 86 Proc.*, 835 – 840.
- 217) Springer N, Weber R, Schick A, Instantaneous and overall loudness of temporally variable pink noise, *Contributions to Psych. Acoust. 7th Oldenburg symposium on psych. Acoust. 1997*, 91– 98.
- 218) Fastl H, Masking effects and loudness evaluation, pp. 29 – 50 in *Recent Trends in Hearing Research*, Universität Oldenburg.
- 219) Kuwano S, Namba S, On the loudness of road traffic noise of longer duration (20 min) in relation to instantaneous judgement, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**(1978)1, 127 – 128.
- 220) Stemplinger I, Fastl H, Accuracy of loudness percentile versus measurement time, *Inter-Noise 97 Proc.*, CD-ROM-tiedosto: 00169.pdf
- 221) Zwicker E, Loudness patterns (ISO 532 B), an excellent guide to noise-reduced design and to expected public reaction, *Noise-Con 88 Proc.*, 15 – 26.
- 222) Gottschling G, On the relations of instantaneous and overall loudness, *Acustica, Acta Acustica* **85**(1999)3, 427 – 432.
- 223) Brines R, May P, The application of loudness measurements to squeak and rattle testing, *Sound & Vibration 1998*:4, 8 – 16.
- 224) Berg B G, Analysis of weights in multiple observation tasks, *J. Acoust. Soc. Am.* **86**(1989)5, 1743 – 1746.
- 225) Ellermeier W, Schrödl S, Temporal weights for loudness comparisons, *J. Acoust. Soc. Am.* **108**(2000)5 Pt 2, 2596.
- 226) Ellermeier W, Werner B, Role of short-term memory in loudness comparisons, *J Acoust. Soc. Am.* **113**(2003)4, 2292 – 2292.
- 227) Höger R, Matthies E, Letzing E, Physikalische versus psychologische Reizintegration: Der Mittelungspegel aus wahrnehmungspsychologischer Sicht, *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* **35**(1988), 163 – 167.
- 228) Hellbrück J, Category-subdivision scaling – A powerful tool in audiometry and noise assessment, in *Recent Trends in Hearing Research*, Universität Oldenburg, ss. 317 – 336.
- 229) Västfjäll D, Gulbol M-A, Kleiner, M, When more noise is preferred than less: Exploring the “peak-end rule” in retrospective judgements of sound quality, *Inter-Noise 2002 Proc.*, CD-ROM, tiedosto IN02_136.pdf.
- 230) Schomer P, Alternative methods to A-weighting for environmental noise assessment, *Inter-Noise 2002 Proc.* CD-ROM tiedosto IN02_475.pdf
- 231) Ariei Y, Marks L E, Time course of loudness recalibration: Implications for loudness enhancement, *J. Acoust. Soc. Am.* **114**(2003)3, 1550 – 1556.
- 232) Kuwano S, Namba S, Evaluation of aircraft noise: Effects of number of flyovers,

- Environmental International, **22**(1996), 131 – 144.
- 233) Looten A, Criticism of the L_{eq} as an index for aircraft noise and other discontinuous noise sources, Inter-Noise 92 Proc., 1003 – 1006.
- 234) Kuwano S, Namba S, Kato T, Memory of the loudness of sounds using sketch methods, Inter-Noise 2003 Proc. 1698 – 1696.
- 235) Namba S, Kuwano S, Kato T, Relation between the image of long-term noise and the perception of short-term noise, Inter-Noise 2003 Proc., 1681 – 1688.
- 236) Berger E, Re-examination of the low-frequency (50-1000 Hz) normal threshold of hearing in free and diffuse sound fields, J. Acoust. Soc. Am. **70**(1980)6, 1635 – 1645.
- 237) Masuda K, Muraishi Y, Aoki F, Loudness of sound transmitted through walls under background noise, Inter-Noise 94 Proc., 1097 – 1100.
- 238) Takeshima H *et al.*, Subjective and objective transformation level between free-field and diffuse-field in equal loudness level contours, Inter-Noise 94 Proc., 1077 – 1080.
- 239) Zwicker E, Fastl H, Examples for the use of loudness: transmission loss and addition of noise sources, Inter-Noise 86 Proc., 861 – 866.
- 240) Furihata K, Yanagisawa T, Psychological evaluation on transmission loss of building materials by road vehicle noise simulator, Inter-Noise 2000 Proc. 3239 – 3243.
- 241) Calvert G A, Thesen T, Multisensory integration: methodological approaches and emerging principles in the human brain, J. Physiology - Paris **98**(2004), 191–205. http://www.physiol.ox.ac.uk/Research_Groups/Multisensory/Papers/Calvert&Thesen_2004.pdf. Tarkistettu 1.2.2005.
- 242) Yaka R, *et al.*, Visual, auditory and bimodal activity in the banks of the lateral suprasylvian sulcus in the cat, 6 s. http://www.tau.ac.il/lifesci/departments/zoology/members/wollberg/documents/Yaka_Notkin_et_al_02.pdf. Tarkistettu 1.2.2005.
- 243) Fletcher H, Munson W A, Loudness, its definition, measurement, and calculation, J. Acoust. Soc. Am. **5**(1933)1, 82 – 108.
- 244) Anon, ISO 389-2:1994, Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 2: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tone and insert earphones. 15.07.1994.
- 245) Green D, A maximum-likelihood method for estimating thresholds in a yes-no task, J. Acoust. Soc. Am. **93**(1993)4, Pt. 1, 2096 – 2105.
- 246) Anon., ISO 8253-1:1989, Acoustics, Audiometric test methods, Part 1: Basic pure tone air and bone conduction threshold audiometry.
- 247) Higging M B, Turner C W, Summation bandwidths at threshold in normal and hearing impaired listeners, J. Acoust. Soc. Am. **88**(1990)6, 2625 – 2630.
- 248) Thurstone L L, A law of comparative judgement, Psych. Rev. **34**(1927) 273 – 286.
- 249) Anon, ISO 389-7:1996 Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions.
- 250) Scharf B, Critical bands and the loudness of complex sounds near threshold, J. Acoust. Soc. Am. **31**(1959)3, 365 – 370.
- 251) Lachs G, Malvin C, A neural-counting model incorporating refractoriness and spread of excitation. Application to loudness estimation, J. Acoust. Soc. Am. **69**(1981)3, 774 – 782.
- 252) Buus S, Müsch H, On loudness at threshold, J. Acoust. Soc. Am. **104**(1998)1, 399 – 410.

- 253) Zwicker E, Scharf B, A model of loudness summation, *Psych. Rev.* **72**(1965)1, 2 – 26.
- 254) Zwicker E, Feldtkeller R, *Das Ohr als Nachrichtempfänger* (2. ed.), S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1970.
- 255) Scharf B, Houtsuma, luku Audition II, kirjassa Boff K, Kaufman L, Thomas J, *Handbook of perception and human performance*, Vol. 1, *Sensory processes and perception*”, John Wiley, New York, 1986.
- 256) Stevens S, Neural events and the psychophysical law, *Science* **170**(1970), 1043 – 1050.
- 257) Sharf B, Stevens J, The form of loudness function near threshold, *Proc. of 3rd ICA Congr.* 1961, 187 – 192.
- 258) Lohner J, Burger J, Form of the loudness function in the presence of masking noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **33**(1961)12, 1705 – 1707.
- 259) Floretine M, Buus S, Robinson M, Temporal integration of loudness, *J. Acoust. Soc. Am.* **104**(1998)2 Pt. 1, 999 – 1007.
- 260) Zwilocki J I, Analysis of some auditory characteristics, *Handbook of Mathematical Psychology*, Vol III, eds. Luce R D, Bush R, Galanter E, Wileys, New York, 1965.
- 261) Betke K, New hearing threshold measurements for pure tones under free field listening conditions, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991)5, 2400 – 2403.
- 262) Anon., ISO 7029:1984, *Acoustics – Threshold of hearing by air conduction as function of age and sex for otologically normal persons.* 8 s.
- 263) Frost G P, An investigation into the microstructure of the low frequency auditory threshold and the loudness function in the near threshold region, *J. Low Freq. Noise and Vibr.*, **6**(1987)1, 34 – 39.
- 264) Poulsen T, Han L, The binaural free field hearing threshold for pure tones from 125 Hz to 16 kHz, *Acustica* **86**(2000)2, 333 – 337.
- 265) Sommers M, Humes L, Auditory filter shapes in normal-hearing, noise masked normal and elderly listeners, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1993)5, 2903 – 2914.
- 266) Cohen M F, Detection threshold microstructure and its effect on temporal integration data, *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**(1982)2, 405 – 409.
- 267) Hellman R P, Meiselman C H, Loudness relations for individuals and groups in normal and impaired hearing, *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(1990)6, 2596 – 2606.
- 268) Canavet G, Hellman R, Scharf B, Group estimation of loudness in sound fields, *Acustica* **60**(1086)4, 269 – 300.
- 269) Schlauch R, DiGiovanni J, Ries D, Basilar membrane nonlinearity and loudness, *J. Acoust. Soc. Am.* **103**(1998)4, 2010 – 2020.
- 270) Dallos P, The active cochlea, *J. Neurosci.* **12**(1992)12, 4575 – 4585.
- 271) Hellman R, Meiselman C, Rate of loudness growth for pure tones in normal and impaired hearing, *J. Acoust. Soc. Am.* **93**(1993)2, 966 – 975.
- 272) Miedema H M E, Oudshoorn C G M, Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics *DNL* and *DENL*, and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives* **109**(2001)4, <http://ehp.niehs.nih.gov/members/2001/109p409-416miedema/miedema.pdf> , tarkistettu elokuu 2004.
- 273) Kryter K, *The effects of noise on man*, Academic Press Inc., New York, 1970. 633 s.
- 274) Jotta kahta äänen ominaisuutta, attribuuttia, voitaisiin pitää toisistaan riippumattomina, toisen ominaisuuksista pitää olla muutettavissa toisen pysyessä vakiona, ks. esim. Stevens S, The attributes of tones, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **20**(1934), 457 – 459.

- 275) Scharf B, Loudness and noisiness – same or different, *Inter-Noise 74 Proc.*, 559 – 564.
- 276) Kryter K J, Scaling human reactions to the sound from aircraft, *Acoust. Soc. Am.*, **31**(1959) 1415 – 1429.
- 277) Namba S, Kuwano S, Global environmental problems and noise, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, **14**(1993)3, 123 –126.
- 278) Namba S, Kuwano S, On the definition of annoyance in social surveys of noise problems in the vase of cross-cultural comparison, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 4082 – 4087.
- 279) von Bismark G, Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds, *Acustica* **30**(1974), 159 – 172.
- 280) Aures W, Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale, *Acustica* **59**(1985)2, 130 – 141.
- 281) von Bekesy G, *Experiments in Hearing*, McGraw Hill, 745 s. ISBN 0-88318-630-6, pp. 344 – 354.
- 282) Aures W, Ein Berechnungsverfahren der Rauhigkeit, *Acustica* **58**(1985)4, 268 – 281.
- 283) Daniel P, Weber R, Calculating psychoacoustical roughness. Contributions to psychological acoustics, 6th Oldenburg symposium on psychological acoustics, 1996, 251 – 265.
- 284) Daniel P, Weber R, Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model, *Acta Acustica*, **83**(1997)1, 113 –123.
- 285) Fastl H, *Hearing sensations and noise quality evaluations*, 119th meeting of the Acoustical Society of America, 1990.
- 286) Zwicker E, Fastl H, *Psychoacoustics, Facts and Models*. Springer-Verlag, New York, 1990.
- 287) Pinker R A, Mathematical formulation of Noy tables. *J. Sound Vibr.* **8**(1968)3, 488 – 493.
- 288) Kryter K, Pearsons K, Some effects of spectral content and duration on perceived noise level, *J. Acoust. Soc. Am.* **35**(1963)3, 866 – 883.
- 289) Kryter K, The meaning and measurement of perceived noise level, *Noise Control*, 1960:6, 12 – 27.
- 290) Kim S, Jang G, Han M, Effects of background noise on the ‘wanted listening level’ of ‘sound media’ in dwelling rooms, *Inter-Noise 96 Proc.*, 1759 – 1764.
- 291) Guski R, First steps towards the concept of quietness and its psychological and acoustical determinants, *Inter-Noise 83 Proc.*, 843 – 846.
- 292) Guski R, Conceptual, methodological, and dose-response problems related to annoyance and disturbance, *Inter-Noise 97 Proc.*, 1077 – 1082.
- 293) Schick A, Noise effects from the psychological viewpoint, *Fourth International Congress on Sound and Vibration 1996 Proc.*, 1357 – 1365. Schick korosti esityksessään sitä, että melu ei ole kiusallisuuden (sisältäen häiritsevyyden) syy, vaan ainoastaan tekijä tai olosuhde, joka mahdollistaa kiusallisuusreaktion.
- 294) Schick A, Different interpretations of the meaning of annoyance, *Inter-Noise 94 Proc.*, 785 – 790.
- 295) Vallet M, Schmeltz P, Cross-cultural differences in annoyance response to traffic noise, *Inter-Noise 94 Proc.*, 809 –814.
- 296) Kryter K, Perception of noisiness, *Noise-Con 91 Proc.*, 29 – 42.
- 297) Florentine M, Namba S, Kuwano S, Concepts of loudness, noisiness, noise, and annoyance in the U.S.A, Japan and England, *Inter-Noise 86 Proc.*, 831 – 834.
- 298) Knall V, Railway noise and vibration: Effects and criteria, *J. Sound Vibr.* **193**(1996)1, 9 – 20.

- 299) Lercher P, The concept of annoyance and its inherent limitations: An epidemiologic appraisal, *Inter-Noise 97 Proc.*, 1083 – 1088.
- 300) Kryter K, Community annoyance from aircraft and ground vehicle noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**(1982)4, 1222.
- 301) Kamp I *et al.*, Indicators of annoyance: a psychometric approach; the measurement of annoyance and interrelations between different measures, *Inter-Noise 2001 Proc.*, 1697 – 1701.
- 302) Hatfield J, What is reaction to noise and how should it be measured, *Inter-Noise 2001 Proc.* 1817 – 1822.
- 303) Fields J M, Explaining community response at low noise levels: Evidence and a theoretical perspective, *Noise-Con 90 Proc.*, 209 – 214.
- 304) Maurin M, The measurement of noise annoyance responses, *Inter-Noise 85 Proc.*, 993 – 996.
- 305) Klæboe R, Fyhri A, Peoples choice of words for describing noise reactions, *Inter-Noise 97 Proc.*, 1095 – 1098.
- 306) Schultz T J, Synthesis of social surveys on noise annoyance, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**(1978)2, 377 – 405.
- 307) Hall F L *et al.*, Direct comparison of community response to road traffic noise and to aircraft noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **70**(1981)6, 1960 – 1968.
- 308) Fidell S, Barber D, Schultz T J, Updating a dosage effect relationship for prevalence of annoyance due to transportation noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991)1, 221 – 233.
- 309) Miedema H M E, Vos H, Exposure response relationships for transportation noise, *TNO Report 96.070*, September 1996. 71 p.
- 310) Baird J C, Harder K, Preis A, Annoyance and community noise: psychophysical model of dose-response relationships, *J. Env. Psych.* **17**(1997), 333 – 343.
- 311) Haines M, Stansfeld S, Measuring annoyance and health in child social surveys, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 1609 – 1614.
- 312) Gibson J, *The ecological approach to visual perception.* Houghton Mifflin Co. Boston, 1979.
- 313) Cutting, D, Two ecological perspectives: Gibson vs. Shaw and Turvey. *American J. Psych.* **95**(1982), 199 – 222.
- 314) Kalveram K, Psychologische Test-theorie und der Zusammenhang zwischen physikalischer Lärm, Menge and Belästigungswirkung, *Z. Lärmbekämpfung* **42**(1995), 131 – 140.
- 315) Kalveram K, Dassow J, Vogt J, How information about the source influences noise annoyance, 137th Meeting of the ASA and 2nd Convention of the EAA, *Forum Acusticum. Paper IpNSa_8.*
- 316) Kawai K, Hirate K, Yasuoka M, An experimental study on the personal evaluation structure of sound environment. *Inter-Noise 2000 Proc.*, 1618 – 1621.
- 317) Berglund B, Preis A, Is perceived annoyance more subject-dependent than perceived loudness, *Acustica* **83**(1997)2, 313 – 319.
- 318) Müller F, Schmidt A, Paulsen R, The influence of stimulus range on the judgements of loudness and annoyance, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2095 – 2098.
- 319) Berry B, L_{Aeq} and subjective reaction to different noise sources, *Inter-Noise 83 Proc.* 993 – 996.
- 320) Clark D M, Subjective study of the sound-transmission class system for rating building partitions, *J. Acoust. Soc. Am.* **48**(1970)3 Part 1, 676 – 682.
- 321) Zwicker E, A contribution to the distinction between loudness and annoyance, *Acustica* **17**(1966), 11 – 15.

- 322) Sasaki M, Experimental results on the annoyance of community noises, *Inter-Noise 84 Proc.*, 887 – 890.
- 323) Gjestland T, Assessment of noise annoyance. The introduction of a threshold level in L_{Aeq} -calculations, *J. Sound Vibr.* **69**(1980)4, 603 – 610.
- 324) Hiramatsu K, Takagi K, Yamamoto T, The effect of sound duration on annoyance. *J. Sound Vibr.* **59**(1978)4, 511 – 520.
- 325) Parry H, Parry J, The interpretation and meaning of laboratory determinations of the effect of duration on the judged acceptability of noise, *J. Sound Vibr.* **20**(1972)1, 51 – 57.
- 326) von Scahaefer P, Selamayer F, Die besondere Lästigkeit schwankender Schallsignale – eine experimentell Untersuchung, *Acustica* **60**(1986)1, 62 – 67.
- 327) Hiramatsu K, Takagi K, Yamamoto T, Experimental investigation on the effect of some temporal factors of non-steady noise on annoyance, *J. Acoust. Soc. Am.* **74**(1983)6, 1782 – 1793.
- 328) Berglund B, Hassmén P, Preis A, Loudness and sharpness as determinants of noise similarity and preference, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2099 – 2104.
- 329) Guski R, Schuemer R, Felscher-Suhr U, The concept of noise annoyance: how international experts see it. *J. Sound Vibr.*, **223**(1999)4, 513 – 527.
- 330) Miedema H M E, Vos H, Exposure-response relationships for transportation noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, **104**(1998)6, 3432 – 3445.
- 331) Dunn B, *et al.*, A new look at noise effects on time sharing tasks, *Inter-Noise 85 Proc.*, 887 – 890.
- 332) Sasaki M, Discussion about the results from hearing tests of rating the difference between the annoyance effects by meaningful sound and meaningless sound, *Inter-Noise 94 Proc.*, 833 – 838.
- 333) Preis A, Environmental approach to noise, *Contributions to Psychological Acoustics*, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 1997, 191 – 204 .
- 334) Handel S, *Listening. An introduction to the perception of auditory events*, The MIT Press, Cambridge, Mass. 1989.
- 335) EU's future noise policy, WG2 – Dose/Effect, Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance, 20 February 2002, 40 s.
- 336) Bradley J, Jonah H, The effects of site selected variable on human response to traffic noise, *J. Sound Vibr.* **66**(1979), 589 – 604.
- 337) Vallet M, Carrere C, Lacoste P, La gêne due au bruit des liaisons interurbaines en rase campagne, 11th ICA Proc. 1983, 155 – 168.
- 338) Keskustelut prof. Peter Lercherin kanssa.
- 339) Yano T Yamashita T, Izumi K, Comparison of community response to road traffic noise in warmer and colder areas in Japan, *Proc. Inter-Noise 91*, 903 – 906.
- 340) Gjestland T, Regional differences in noise annoyance assessments, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD-tiedosto IN980161.pdf.
- 341) Laird D A, Coye K, Psychological measurements of annoyance as related to pitch and loudness, *J. Acoust. Soc. Am.* **1**(1929)2, 158 – 163.
- 342) Zollner M, Calculating annoyance and sound quality with a digital measurements system based on signal processors. *Euro-Noise 92 Proc.*, 809 – 816.
- 343) Canneli G, Santoboni S, Microprocessor-based apparatus for direct evaluation of environmental impulsive sounds, *J. Acoust. Soc. Am.* **90**(1991)3, 1464 – 1468.

- 344) Laux P, Davies P, Long G, The correlation of subjective response data with measured noise indices of low frequency modulated noise, *Noise Control Eng. J.* **40**(1993)3, 241 –253.
- 345) Laux P, Davies P, The correlation of subjective response data with measured noise indices of low frequency modulated white noise, *Inter-Noise 92 Proc.*, 1055 – 1060.
- 346) <http://www.head-acoustics.de/>, tarkistettu 4.12.2004.
- 347) <http://www.cortex-instruments.de/dbsonic.htm>, tarkistettu 7.12.2004.
- 348) <http://www.viacoustics.com/naesqtools.html>, Tarkistettu 7.12.2004.
- 349) Voight P, *Physikalische Immissionsgrößen und subjektive Störung durch Strassenverkehrslärm*, Doctorate Thesis, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1972.
- 350) Esim. http://www.acoustics.salford.ac.uk/research/arc/cox/sound_quality/sharpness.htm. Tarkistettu 17.12.2004.
- 351) Widman U, Aurally adequate evaluation of sounds, *Euro-Noise 98 Proc.*, 29 – 46.
- 352) Preis A, Noise annoyance and its components. *Archives of the Center of Sensory Research 2 (2)*, Stockholm University and Karolinska Institute, 1995. 54 s.
- 353) Preis A, Measurement of annoyance components, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2289 – 2294.
- 354) Preis A, Applications of “sensory consonance” to the estimation of annoyance of intrusive and non-intrusive sounds, *Inter-Noise 88 Proc.*, 883 – 888.
- 355) Schick A, *Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung*. Pabst Science Publishers, 1997, 116 s.
- 356) Yano T, Yamashita T, Izumi K, Social survey on community response to railway noise – Comparison of responses obtained with different annoyance scales, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2299 – 2302.
- 357) Loewenstein G, Schkade D, Wouldn't It Be Nice? Predicting Future Feelings, June 1997, 47 s. <http://elsa.berkeley.edu/eml/nsf97/loewenstein.pdf> . Tarkistettu 15.12.2004.
- 358) Guski R, How to forecast community annoyance in planning noisy facilities, *Noise and Health.* **6**(2004)22, 59 – 64.
- 359) Obata *J et al.*, The effect of noise upon human efficiency, *J. Acoust. Soc. Am.*, **5**(1934)4, 225 – 261.
- 360) Maurin M, Versace R, Peris J-L, Noise annoyance measurement, Category scales and context effect, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Stockholm, Vol. 3, 235 – 240.
- 361) Fidell S, Silvati L, Laboratory tests on hypotheses derived from a decision-theoretical model of noise-induced annoyance, *Inter-Noise 89 Proc.*, 887 – 890.
- 362) Widman U, Scaling annoyance of street traffic noise as a function of loudness and speech intelligibility, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2215 – 2220.
- 363) Furya H, Fujimoto K, Haruta C, Surveys on environmental noise and human response to environmental sounds, *Inter-Noise 94 Proc.*, 1161 –1164.
- 364) Jeon J Y, Fricke F R, Developing sensitivity criteria for road traffic noise in residential areas, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD-tiedosto: IN980489.pdf
- 365) Fujimoto K, How important do people think quiet is for a residential environment, *Inter-Noise 94 Proc.*, 967 – 972.
- 366) Fields J M, Impact of ambient noise on noise annoyance: an assessment of the evidence, *Inter-Noise 92 Proc.*, 1011 – 1016.
- 367) Miyazono H *et al.*, Effects of background noise to annoyance of meaningful sound, *Inter-Noise 95 Proc.*, 893 – 896.

- 368) Berglund B, *et al.*, Loudness (or annoyance) summation of combined community noises, *J. Acoust. Soc. Am.* **70**(1981)6, 1628 – 1634.
- 369) Taylor S, A comparison of models to predict annoyance reactions to noise from mixed sources, *J. Sound Vibr.* **81**(1982)1, 123 – 138.
- 370) Vos H, Annoyance caused by simultaneous impulse, road-traffic, and aircraft sounds: A quantitative model, *J. Acoust. Soc. Am.* **91**(1992)6, 3330 – 3345.
ks. myös Vos H, 13th ICA Proc. 1982, 163 – 166
- 371) Yano T, Kobayashi A, Disturbance caused by impulsive, fluctuating, and combined noises, *Inter-Noise 90 Proc.*, 1189 – 1192.
- 372) Berglund B, Nilsson M E, Total annoyance (or total loudness) models of combined community sounds, *Arch. Center Sensory Res.*, **6**(2001)3, 33 – 59.
- 373) Lawrence A, Putra A, The combined effect of road traffic and aircraft noise on people, *Inter-Noise 89 Proc.*, 891 – 894.
- 374) Ebata M, *et al.*, Noisiness and annoyance of impulsive noise within steady noise, *Inter-Noise 91 Proc.*, 867 – 870. Tutkimus koski L_{Aeq} -tasoja 40 – 70 dB(A). Alle 40 dB(A)-tasoilla kiusallisuus on vähäistä.
- 375) Rice C, CEC joint project on impulse noise: Effect of road noise level on judged annoyance, *Inter-Noise 85 Proc.*, 913 – 916.
- 376) van den Berg M, Cumulatie van geluid in de gewijzigde Wet geluidhinder. *Geluid 1993*:1, 20 – 23.
- 377) Vos J, Buchta E, Quantification of context effects in the determination of source-specific annoyance ratings for shooting and road-traffic sounds, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 1597 – 1602.
- 378) Schomer P, Development of new ANSI standard for assessment of combined noise environments, *Inter-Noise 96 Proc.* 3265 – 3270.
- 379) Green D, Fidell S, Variability in the criterion for reporting annoyance in community noise surveys, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991)1, 234 – 243.
- 380) Miedema H M, Annoyance from combined noise sources, *Dev. Toxicol Environ Sci.* **15**(1987), 313 – 320
- 381) Gjestland T, Miedema H M E, Assessment of annoyance in a multisource environment, *J. Acoust. Soc. Am.* **108**(2000)5, 2523.
- 382) Miedema H M E, Relationship between exposure to multiple noise sources and noise annoyance, *J. Acoust. Soc. Am.* **116**(2004)2, 949 – 957.
- 383) Izumi K, Annoyance due to mixed source noises – A laboratory study and field survey on the annoyance of road traffic and railroad noise, *J. Sound Vibr.* **127**(1988)3, 485 – 489.
- 384) Ollerhead J, Predicting public reaction to noise from mixed sources, *Inter-Noise 78 Proc.*, 579 – 584.
- 385) Ronnebaum T, Schulte-Fortkamp B, Weber R, Synergetic effects of noise from different sources: A literature study, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2241 – 2246.
- 386) Ronnebaum T, Schulte-Fortkamp B, Evaluation of combined sources, Contributions to Psychological Acoustics, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 1997, 171 – 204.
- 387) ISO/TS 15666:2003, Acoustics - Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys, 15 s.
- 388) Izumi, K, Yano, T, Community response to road traffic noise: Social surveys in three cities in Hokkaido, *J. Sound Vibr.* **151**(1991)3, 505 – 512.
- 389) Job R, Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction, *J. Acoust. Soc. Am.* **83**(1988)3, 991 – 1001.

- 390) Foreman J, Dickinson S M, Emmerson M, Noise measurements and attitudinal surveys of the cities of London and Woodstock, Ontario, Canada, Noiseexpo 1974 Proc., Chicago, Illinois, June 4 -6, 1974, 26 – 34.
- 391) Hayashi M *et al.*, Effects of planting on relief of annoyance – field survey at urban roadside, Inter-Noise 94 Proc., 989 – 992.
- 392) Fields J M, Policy-related goals for community response, Proc., Noise as a Public Health Problem, 1988, Stockholm, Vole 5, Part II, 115 – 134.
- 393) Sato T, *et al.*, Comparison of community responses to road traffic noise among residents of different types of housing, Inter-Noise 96 Proc., 1321 – 1326.
- 394) Norwich K H, On the theory of Weber fractions, Percept. Psychophys. **42**(1987), 289 – 298.
- 395) Ward L M, Davidson K P, Where the action is: Weber fractions as a function of sound pressure at low frequencies, J. Acoust. Soc. Am. **94**(1993)5, 2567 – 2594.
- 396) Winkler I, Karmos G, Näätänen R, Adaptive modelling of the unattended acoustic environment reflected in the mismatch negativity event-related potential, Brain Res. **742**(1996)1-2, 239 – 252.
- 397) Näätänen R, Alho K, Mismatch negativity – a unique measure of sensory processing in audition, Int. J. Neurosci. **80**(1995)1–4, 317 – 337.
- 398) Wrigley S N, A theory and computational model of auditory selective attention, Väitöskirja, Department of Computer Science University of Sheffield, 2002, 194 s. <http://www.dcs.shef.ac.uk/research/phdtheses/Wrigley2002.pdf>. Tarkistettu joulukuun 2004.
- 399) Fidell S, *et al.*, Predicting annoyance from detectability of low level sounds, J. Acoust. Soc. Am. **66**(1979)5, 1427 – 1434.
- 400) Schomer P, Wagner L, On the contribution of noticeability of environmental sounds to noise annoyance, Noise Control Eng. J., **44**(1996)6, 294 – 305.
- 401) Fidell S, Pearsons K, Bennet R, Prediction of aural detectability of noise signals, Human factors, **16**(1974)4, 373 – 383.
- 402) Harrison R T *et al.*, Annoyance from aircraft over flight in wilderness, Noise-Con 90 Proc., 327 – 332.
- 403) Irwin R, Purdy S, The minimum detectable duration of auditory signals for normal and hearing impaired listeners, J. Acoust. Soc. Am. **71**(1982)4, 967 – 974.
- 404) McKinley R, Weber D, Detection and recognition of repeated tones and tonal patterns, J. Acoust. Soc. Am. **95**(1994)5 Pt 1, 2642 – 2651.
- 405) Green D M, Weber D L, Duncan J E, Detection and recognition of pure tones in noise, J. Acoust. Soc. Am. **62**(1977)4, 948 – 954.
- 406) Fidell S, Teffeteller S, Scaling the annoyance of intrusive sounds, J. Sound Vibr. **78**(1981)2, 291 – 298.
- 407) Sneddon *et al.*, Laboratory study of the noticeability and annoyance on sounds of low signal-to-noise ratio, NASA Contractor Report 201613, Contract NASA-20101, ref. Schomer P, Comments on “A field survey on the annoyance caused sounds from large firearms and road traffic” [J. Acoust. Soc. Am. **104**(1998), 2890 – 2902], J. Acoust. Soc. Am. **106**(1999)5, Pt.1, 1594 – 1597.
- 408) Wühler K, Perception of quiet periods in intermittent noise: The effect of different pause duration, Inter-Noise 85 Proc., 1005 – 1008.
- 409) de Jong R, Community response surveys and the Dutch noise abatement, Inter-Noise 81 Proc., 787 – 792.
- 410) Bienvenue, G, Psychoacoustic principles underlying the interaction of discrete tones and noise in the phenomenon of annoyance, Inter-Noise 86 Proc., 867 – 878.

- 411) Kryter K, Pearsons K, Judged noisiness of a band of random noise containing audible pure tone, *J. Acoust. Soc. Am.* **38**(1965)1, 106 – 112.
- 412) Suzuki Y *et al.*, An experimental consideration of the evaluation of environmental noise with tonal components, *J. Sound Vibr.* **127**(1988)3, 475 – 484.
- 413) Suzuki Y *et al.*, An experimental consideration on the tone correction (or adjustment) for environmental noise evaluation, *Inter-Noise 86 Proc.*, 849 – 854.
- 414) Robinson D, Annoyance of tonal noise: A parametric study, *Euro-Noise 92 Proc.*, 379 – 404.
- 415) Hellman R P, Prediction the loudness of tone-noise complexes from Stevens's and Zwicker's procedures, *Noise-Con 91 Proc.*, 491 – 498.
- 416) Gässler G, Über die Hörschwelle für Schallereignisse mit Verschiedenen Breiteim Frequenzspektrum, *Acustica* **4**(1954), 408 – 414.
- 417) Hellman, R, Using psychoacoustics to understand annoyance of discrete tones in noise emissions, *Inter-Noise 86 Proc.*, 873 – 878.
- 418) Aures W, Der sensorische Wohlklang als Funktion psychoakustischer Empfindungsgrößen, *Acustica* **58**(1985)4, 282 – 290.
- 419) McKenzie A, Bullmore A, Verification of objective assessment method for tonal noise from wind farms, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2115 – 2120.
- 420) Schlauch R S, A cognitive influence on the loudness of tones that change continuously in level, *J. Acoust. Soc. Am.* **92**(1992)2 Pt1, 758 – 765.
- 421) Huanping D, Scharf B, Buus S, Effective attenuation of signals in noise under focused attention, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991)6, 2837 – 2842.
- 422) Botte M, Auditory attentional bandwidth: Effect of level and frequency, *J. Acoust. Soc. Am.* **98**(1995)5, Pt.1, 2475 – 2485.
- 423) Purdue A, Tonal nuisance – an enforcement view, *Inter-Noise 96 Proc.*, 1925 – 1929.
- 424) Schlauch R, Harveys S, Lanthier N, Intensity resolution and loudness in broadband noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **98**(1995)4, 1895 – 1902.
- 425) Lochner J, Burger J, From the loudness function in the presence of masking noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **33**(1961)6, 1705 – 1707.
- 426) Lee K H, Hastings A, Davies P, Perception of time-varying tonal components, *Inter-Noise 2003 Proc.*, 4419 – 4424.
- 427) Esimerkiksi: Hellman R, Growth rate of loudness, annoyance, and noisiness as a function of tone location within the noise spectrum, *J. Acoust. Soc. Am.* **75**(1984)1, 209 – 218.
- 428) Hellman R, Loudness, annoyance, and noisiness produced by single-tone complexes, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**(1982)1, 62 – 73.
- 429) Hellman R, Using psychoacoustics to understand annoyance of discrete tones in noise emissions, *Inter-Noise 88 Proc.*, 873 – 878.
- 430) Anon., ISO 7779: Acoustics – Measurement of airborne noise emitted by computer and business equipment. (+ANSI S12.10).
- 431) DIN 45681, Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, Entwurf Januar 1992, Berlin.
- 432) Hashimoto T, Inoue M, Hatano S, Phase effect on roughness sensation of complex tones, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2195 – 2198.
- 433) Koehenkilöt voivat kokea vertailun vaikeaksi ja tulosten hajonta voi olla suurta. vrt. esim. Scharf B, Loudness, in *Handbook of Perception*. Vol. IV. Academic Press, Inc. 1978, Chapter 6.

- 434) Bienvenue G *et al.*, Quantifying subjective responses to discrete tones in noise from computer and business equipment, *Inter-Noise 89 Proc.*, 859 – 864.
- 435) Bienvenue G, Nobile M, Prominence ratio for noise spectra with discrete tones: A procedure based on Zwicker's critical band research, *Inter-Noise 91 Proc.*, 53 – 56.
- 436) ANSI S12.10-1985, Measurement and designation of noise emitted by computer and business equipment. Appendix B, Identification of prominent discrete tones.
- 437) Wittig L E, Hellweg R D Jr., Problems with identification of prominent discrete tones, *Noise-Con 87 Proc.*, 733 – 738.
- 438) ISO/DIS 7779 Acoustics -- Measurement of airborne noise emitted by computer and business equipment (formerly ISO/DIS 14605).
- 439) Plomp R, The Ear as a frequency analyzer, *J. Acoust. Soc. Am.* **36**(1964)9, 1628 – 1636.
- 440) Ruffle R, An automated system for wind turbine tonal assessment, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2997 – 3002.
- 441) Bienvenue G *et al.*, Quantifying subjective responses to discrete tones in noise from computer and business equipment, *Inter-Noise 89 Proc.*, 859 – 864.
- 442) Beckenbauer T, Stemplinger I, Seiter A, Basics and use of DIN 45681 'Detection of tonal components and determination of a tone adjustment for the noise assessment', *Inter-Noise 96 Proc.*, 3271 – 3276.
- 443) Sagemühl D, Schmidt L, Revision of DIN 45681 (Tonality), *Inter-Noise 2001 Proc.*, 2665 – 2670.
- 444) Kurtz, J, Anforderungen an ein Messgerät nach der neuen TA Lärm in Zusammenhang mit Bestimmung der Tonhaltigkeit, *Z. Lärmbekämpfung*, **47**(2000)1, 19 – 21.
- 445) Vorman W *et al.*, Factors influencing the subjective rating of tonal components in noise, *Daga 99 esitelmä*.
- 446) Hellman R, Perceived magnitude of noise-tone complexes: Relation to loudness and masking, *Inter-Noise 85 Proc.*, 929 – 932.
- 447) Nobile M *et al.*, The critical band spectrum, *Inter-Noise 92 Proc.*, 1111 – 1114.
- 448) Terhardt E, Stoll G, Seewann M, Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals, *J. Acoust. Soc. Am.* **71**(1982)2, 679 – 688.
- 449) Miskiewicz A, Rakowski A, Loudness level versus sound pressure level: A comparison of musical instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* **96**(1994)6, 3375 – 3379.
- 450) Miskiewicz A, Hellman, R, Sharf, B, Frequency and temporal effects in loudness adaptation, *Proc. of 15th ICA*, **2**(1995), 203 – 206.
- 451) –, ISO 2204 – 1979, Acoustics – Guide to International Standards on the measurement of airborne acoustical noise and evaluation of its effects on human beings. 6.
- 452) Ebata M, Tomihisa A, Okda J, Noise evaluation in broadcast listening, *Inter-Noise 83 Proc.*, 855 – 858.
- 453) Sakai T, Loudness and annoyance of construction noise, *Inter-Noise 86 Proc.*, 751 – 756.
- 454) Niedzwiecki A, Riner H S, Subjective loudness of simulated quarry blast waves with implications for the transition from impulsive to continuous sound, *J. Acoust. Soc. Am.* **65**(1979) 5, 1212 – 1217.
- 455) Vos J, Startle response to shooting sounds, *Inter-Noise 96 Proc.*, 1255 – 1260.
- 456) Griefen B, Bröde P, Schwarzenau, The equivalent sound pressure level – A reliable

- predictor for human responses to impulse noise?, *Applied Acoust.* **38**(1993), 1 – 13.
- 457) Berglund B, Berglund U, Lindberg S, Loudness of impulse sound from different weapons, *Inter-Noise 86 Proc.*, 815 – 820.
- 458) Kuwano S, *et al.*, Evaluation of the loudness of impulsive noises using sound exposure level (L_{AEP}) based results of a round robin test in Japan, *Inter-Noise 84 Proc.*, 809 – 814.
- 459) Ogura Y, Suzuki Y, Sone T, A new method for loudness evaluation of noises with impulsive components, *Noise Control Eng. J.* **40**(1993)3, 231 – 240.
- 460) Namba S, Kuwano S, Temporal factors of hearing in noise research, *Contributions to Psychological Acoustics, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 1997*, 465 – 482.
- 461) Tachibana H, Yoashihisa K, Ishizaki S, Equal loudness relation for impulsive sounds, *Inter-Noise 84 Proc.*, 799 – 802.
- 462) Suzuki Y *et al.*, Loudness of impact sounds: Results of round robin tests in Japan, *Inter-Noise 84 Proc.*, 827 – 832.
- 463) Namba S, Hashimoto T, Rice C, The loudness of decaying impulsive sounds, *J. Sound Vibr.* **116**(1987)3, 491 – 507.
- 464) Kumagai M, Ebata M, Sone T, A study on the evaluation of loudness of impact sound, *Inter-Noise 81 Proc.*, 769 – 774.
- 465) Nakamura T, Nakajima Y, Namba S, The relation of loudness and noisiness to measurement time interval in exposure to impulsive noise trains, *Inter-Noise 84 Proc.*, 871 – 874.
- 466) Ishizaki S, Tachibana H, Loudness sensation for isolated impulsive sounds, *Inter-Noise 85 Proc.*, 933 – 936.
- 467) Bullen R, Hede A, Community reaction to impulsive noise, *Inter-Noise 84 Proc.*, 937 – 940.
- 468) Smoorenburg G, Evaluation of impulse noise, in particular shooting noise, with regard annoyance, *Inter-Noise 81 Proc.*, 779 – 782.
- 469) Rice C, Human response to impulse noise. *Proc. of 13th International Congress on Acoustics, 1989, Vol. 3*, 135 – 138.
- 470) Luz G, Russel W, A case study of adjusting the annoyance of artillery noise to the annoyance of aircraft noise, *Inter-Noise 96 Proc.*, 111 – 114.
- 471) Schomer P, Sias J, A comparative study of human response to blast noise and sonic booms, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2489 – 2494.
- 472) Schomer P D, Neathammer R D, The role of helicopter noise-induced vibration and rattle in human response, *J. Acoust. Soc. Am.* **81**(1987)4, 966 – 975.
- 473) –, ECC Directive 113/1979, Detection of noise of an impulsive character, *Official Journal of the European Communities*, L33/15 – 27.
- 474) –, VDI 2058, Blatt 1, Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft, *Verein Deutsche Ingenieure, 1985*, 15 s.
- 475) Berry B, Bisping R, CEC joint project on impulse noise: Physical quantification methods, *Noise as a Public Health Problem 1988, Proc. Vol. 3*, 153 – 158.
- 476) Erlandson B *et al.*, Estimation of impulse noise from cumulative time distributions with a new sound pressure analyzer, *Proc. International Symposium on Effects of Impulse Noise on Hearing, Malmö, Aug. 25 – 27, 1980*, 33 – 39.
- 477) Ritterstaedt U, Kastka J, CEC joint project on impulse noise: A new definition of impulsiveness of environmental noise, *Inter-Noise 85 Proc.*, 917 – 920.
- 478) Wallis A, Berry B, Using short L_{eq} in the measurement and rating of impulsive noise, *Inter-Noise 89 Proc.*, 951 – 954.

- 479) Otto N, Feng B, Wakefield G, Sound quality research at Ford – Past, Present and Future, *Sound & Vibr.*, 1998:5, 20 –24.
- 480) Schomer P, Assessment of community response to impulsive noise, *J. Acoust. Soc. Am.* 77(1985)2; 520 –535.
- 481) Sasaki M, Kitaiwa K, Loudness judgement of actual impulsive sound, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Stockholm, Vol. 3, 253 – 258.
- 482) Schomer P, Human and community response to military sounds – Part 2: Results from field-laboratory tests of sounds of small arms, 25-mm cannons, helicopters, and blasts, *Noise Control Eng. J.*, 43(1995)1, 1 – 10.
- 483) Vos J, The-level dependent penalty for impulsive sounds, *Inter-Noise 86 Proc.*, 889 – 894.
- 484) Vos J, Annoyance caused by impulse sounds produced by small, medium-large, and large firearms, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2231 – 2236.
- 485) Brambilla G, Carretti M, Evaluation of annoyance due to impulsive sound, *Noise-Con 90 Proc.*, 279 –284.
- 486) Groeneveld Y, de Jong R, CEC joint project on impulse noise: Overall results of the field, *Inter-Noise 85 Proc.*, 905 – 908.
- 487) Izumi K, Two experiments on the perceived noisiness of periodically intermittent sounds, *Noise Contr. Eng. J.* 9(1997)1, 16 – 23.
- 488) Favanger D, Loudness of impulsive weapon noise and dynamic characteristics of hearing, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2511 – 2516.
- 489) Buchta E, Annoyance caused by shooting noise – Determination of the penalty for various weapon calibers, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2495 – 2500.
- 490) Vos J, Annoyance caused by impulse sounds produced by small, medium-large, and large firearms, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2231 – 2236.
- 491) Rice C, Human response effects of impulse noise, *J. Sound Vibr.* 190(1996)3, 525 – 543.
- 492) Vos J, A review of field studies on annoyance due to impulse and road traffic noise, *Inter-Noise 95 Proc.*, 1029 – 1032.
- 493) Flindell I, Rice C, Annoyance due to impulse noise: Laboratory studies, *Noise as a Public Health Problem 1988, Proc.*, Vol. 3, 363 – 368.
- 494) Balant A C, Levitt H, The loudness of quasi continuous impulse noise, *Noise-Con 91 Proc.*, 499 – 506.
- 495) Leatherwood J, Sullivan B, Recent laboratory studies of loudness and annoyance response to sonic booms, *Noise-Con 93 Proc.*, 367 – 372.
- 496) Sone T *et al.*, A model for the impulsivity of noise, *Noise as a Public Health Problem 1988, Proc.* Vol. 3, 357 –362.
- 497) Bisping R, Quality of impulsive sounds, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2221 – 2225.
- 498) Berry B, Zwicker E, Comparison of subjective evaluations of impulsive noise with objective measurements of the loudness-time function given by loudness meter, *Inter-Noise 86 Proc.*, 821 –824.
- 499) Don C, McLeod I, Predicting low-level acoustic pulse amplitudes in an atmosphere supporting wind and temperature gradients, *Inter-Noise 96 Proc.*, 627 –632.
- 500) Cheng M, *et al.*, Investigation of military standard for impulse noise, *Inter-Noise 87 Proc.*, 913 – 916.
- 501) Brambilla G, Carretti M R, Laboratory subjective evaluation of environmental impulsive sounds, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Stockholm, Vol. 3, 159 – 164.
- 502) Brambilla G, Pedrielli F, The assessment of tonal components in the environmental

- noise: Features and limitations of the legislation, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2531 – 2536.
- 503) Hoeager R, *et al.*, Night-time noise annoyance: State of the art, *Noise Health*, **4**(2002)15, 19 – 25.
- 504) Izumi K, Takeuchi H, A comparison of noise annoyance measured in the field and in the laboratory, *Inter-Noise 84 Proc.*, 883 – 886.
- 505) Guski R, Activity interference and noise annoyance: Contradictory results and possible interpretations, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2357 – 2362.
- 506) Hume K, Terranova D, Thomas C, Complaints and annoyance caused by aircraft operations: temporal patterns and individual bias, *Noise Health* **4**(2002)15, 45 – 55.
- 507) di Nisi J, Muzet A, Libert J-P, Cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in man, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Stockholm, Vol. 5, Part II, 47 – 54.
- 508) Cheour M *et al.*, Speech sounds learned by sleeping newborns. *Nature* **415**(2002), 599 – 600.
- 509) Hoeger R *et al.*, Night-time noise annoyance: state of the art, *Noise & Health*, **4**(2002)15, 19 – 25.
- 510) Ogata S, Human EEG responses to classical music and simulated white noise: effects of a musical loudness component on consciousness, *Percept Mot Skills*, **80**(1995)3, Pt 1, 779 – 90.
- 511) Lambert J, Plouguinec M, Day and night annoyance; A comparison, *Inter-Noise 85 Proc.*, 941 – 944.
- 512) Vallet M *et al.*, A road traffic noise index for the night-time, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2345 – 2350.
- 513) Scharnberg T, Sleep impairments caused by road traffic noise in cities, *Inter-Noise 85 Proc.*, 953 – 956.
- 514) Ollerhead J, Variation of community noise sensitivity with time of day, *Inter-Noise 77 Proc.*, B 692 – 697.
- 515) Cops A, *et al.*, Traffic noise measurements and their relation with annoyance, *Inter-Noise 78 Proc.*, 605 – 608.
- 516) Hansen V, Lund E, Smith-Sivertsen T, Self-reported mental distress under the shifting daylight in the high north, *Psychol Med.*, **28**(1998)2, 447 – 452
- 517) Husby R, Lingjaerde O, Prevalence of reported sleeplessness in northern Norway in relation to sex, age and season, *Acta Psychiatr. Scand.* **81**(1990)6, 542 – 547.
- 518) Anderson J L, *et al.*, Sleep in fall/winter seasonal affective disorder: effects of light and changing season, *J. Psychosom Res.*, **38**(1994)4, 323 – 337
- 519) Sher L, The role of genetic factors in the etiology of seasonality and seasonal affective disorder: an evolutionary approach, *Med. Hypotheses*, **54**(2000)5, 704 – 7017.
- 520) Brennen T, Seasonal cognitive rhythms within the Arctic Circle: An individual differences approach, *J. Env. Psych.* **21**(2001)1, 191 – 199.
- 521) Fothergill L C, The variation of environmental noise outside six dwellings between three seasons, *Appl. Acoust.* **10**(1977), 191 – 200.
- 522) Pesonen K, On noise assessment and noise control engineering problems caused by seasonal variations of noise emission and excess attenuation, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 1787 – 1792.
- 523) Björk E, Community noise in different seasons in Kuopio, *Applied Acoustics*, **42**(1994), 137 – 150.

- 524) Yano T, Yamasita T, Izumi K, Community response to road traffic noise in Kumamoto, J. Sound Vibr. **151**(1991)3, 487 – 495.
- 525) Seacord D, Room noise at subscribers' telephone locations, J. Acoust. Soc. Am. **12**(1940)1, 183 – 187.
- 526) Mallebra M *et al.*, Annoyance produced by the noise of the airport of Altet-Alicante, on the cities of Altet, Torremolinos and Elche, Inter-Noise 2000 Proc., 1375 – 1378.
- 527) Lambert J, Simonnet F, Vallet M, Patterns of behaviour in dwellings exposed to road traffic noise, J. Sound Vibr. **92**(1984)2, 159 – 172.
- 528) Anon, Umweltbundesamt, Daten zur Umwelt, Berlin, E Schmidt Verlag, 1997.
- 529) Guski R, Community response to environmental noise, in Environmental urban noise (ed. A. Garsia), Advances in Ecological Sciences 8, 111 – 148.
- 530) Griffiths I D, Langdon F J, Swan M A, Subjective effects of traffic exposure: reliability and seasonal effects, J. Sound Vibr., **71**(1980)2, 227 – 240.
- 531) Gjestland T, Stöfringsdal B, The influence of a quiet façade on road traffic annoyance Inter-Noise 2001 Proc. 1191 – 1194.
- 532) Kihlman T, Possible and impossible goals for soundscapes in cities, International SYLVIE-Conference, Vienna 24 and 25 October 2002, 5 s.
- 533) Kihlman T, E. Öhrström E, Skånberg A, Adverse health effects of noise and the value of access to quietness in residential areas, Inter-Noise 2002 Proc. 7 s. CD-ROM, tiedosto IN02_484.pdf
- 534) Öhrström E, Psycho-social effects of traffic noise exposure, J. Sound Vibr., **151**(1991), 513 – 517.
- 535) Schulte-Fortkamp B, Synergetic noises in residential areas under annoyance evaluation. An interdisciplinary concept, Inter-Noise 1997 Proc. CD-ROM, tiedosto 139.pdf
- 536) Schulte-Fortkamp B, Measurement of noise annoyance: Decisions on appropriate evaluation procedures in field and laboratory settings, Collected Papers CD, 2aNSa4, 137th Meeting of the Acoustical Soc. Am, and the 2nd Forum Acusticum.
- 537) Home J, Why we sleep. The functions of sleep in humans and other mammals. Oxford University Press, 1988.
- 538) Franssen A E M, Kwakkeboom J M I, Effecten van geluid door wegverkeer op de sleep. Een systematische review van studies in woonomgeving, RIVM rapport 71520010/2003, 43 s.
- 539) Miedema H M E, Passchier-Vermeer W, Vos H, Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance, TNO Inro report 2002-59, 2003, 64 s.
- 540) The influence of night-time noise on sleep and health, Health council of the Netherlands, No. 2004/14E, The Hague, 22 July 2004. 196 s.
- 541) Belojevic G, Saric-Tanaskovic M, Prevalence of arterial hypertension and myocardial infarction in relation to subjective ratings of traffic noise exposure, Noise and Health, **4**(2002)16, 33 – 37.
- 542) Babisch W, Stress hormones in research cardiovascular effects of noise, Noise & Health, **5**(2003)18, 13 – 18.
- 543) Spreng M, Cortical excitation, cortisol excretion and estimation of tolerable night over-flight, Noise & Health, **4**(2003)16, 39 – 46.
- 544) <http://dalaerm.de/materialien/ising01.pdf> !tarkistettu 20.8.2005
- 545) Rechtschaffen A, Kales A, A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects, U.S. Government Printing

- Office, Washington DC, 1968.
- 546) Lang H *et al.* (eds.) Sähköiset aivomme, Luku: Unen ja vireyden neurologinen sääteley. Suomen klinisen neurofysiologian yhdistys ry., Turku, 1994, ss. 467 – 482.
- 547) Näytekuvia unen aikaisista erilaisista aivosähkökäyrien rytmeistä löytyy esimerkiksi: <http://www.neuro.uu.se/fysiologi/gu/nbb/lectures/EEGBas.html#Rhythms> Tarkistettu jouluk. 2004.
- 548) Stevenson D, McKellar N, The effect of traffic noise on sleep of young adults in their homes, *J. Acoust. Soc. Am.* **85**(1989)2, 768 – 771.
- 549) Hume K I, Van F, Watson A, Effects of aircraft noise on sleep: EEG-based measurements, Manchester Metropolitan University, June 2003, 52 s.
- 550) Passchier-Vermeer W, Night-time noise events and awakening, TNO Intro Report, 2003-20, July 2003, 59 s.
- 551) Öhrstöm E, Rylander R, Björkman M, Effects of night time road traffic noise – An overview of laboratory and field studies on noise dose and subjective sensitivity, *J. Sound Vibr.* **127**(1988)3, 441 – 448.
- 552) Giefahn B *et al.*, Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Strassen- und Schienenverkehr, *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* **47**(2000)4, 144 – 151.
- 553) Fidell S *et al.*, Field study of noise-induced sleep disturbance, *J. Acoust. Soc. Am.* **98**(1995)2, 1025 – 1033.
- 554) Passchier-Vermeer W *et al.*, Sleep disturbance and aircraft noise. Exposure-effect relationships. Repport 2002.028. 2002. 245 s.
- 555) Ollerhead J, Past and present UK research on aircraft noise effects, *Noise-Con 93 Proc.*, 9 – 18.
- 556) van der Ploeg F, Schuller W, Recent developments with respect to aircraft noise and sleep disturbance, *Inter-Noise 93 Proc.*, 155 – 160.
- 557) Pitson D J, Stradling J R, Autonomic markers of arousal during sleep in patients undergoing investigation for obstructive sleep apnoea, their relationship to EEG arousals, respiratory events and subjective sleepiness, *J. Sleep Res.* **7**(1998)1, 53 – 59.
- 558) Scholle S, Zwacka G, Arousals and obstructive sleep apnea syndrome in children, *Clin Neurophysiol.* **112**(2001)6, 984 – 991.
- 559) Smith R *et al.*, Evaluating sleep disturbance: A review of methods, *Inter-Noise 1996 Proc.*, 2073 – 2078.
- 560) Kuwano S *et al.*, The effect of noise on the effort to sleep, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD-levy, IN980379.pdf.
- 561) Vallet M, Francois J, Evaluation physiologique et psychosociologique de l'effet du bruit d'avion sur le sommeil, *Le travail humain*, **45**(1982)1, 155 – 168. Ref. Vallet, *Inter-Noise Proc.* 1996, 2329 – 2334
- 562) Ising H, Babisch W, Günther T, Work noise as a risk factor in myocardial infarction, *J. Clin. Bas. Cardiol.* **2**(1999), 64 – 68.
- 563) Maschke C, Excretion of cortisol under nocturnal noise and differences due to analytic techniques, *Noise & Health*, **5**(2002)17, 47 – 52.
- 564) Spreng M, Noise induced nocturnal cortisol secretion and tolerable overhead flights, *Noise Health.* **6**(2004)22, 35 – 47.
- 565) Porter N D, Kershaw A D, Ollerhead J B, Adverse effects of night time aircraft noise, R&D report 9964, CAA, Environmental Research and Consultancy Department, 2000, 49 s.
- 566) van Kempen *et al.*, The association between noise exposure and blood pressure

- and ischemic heart disease: A meta-analysis, *Env. Health Persp.* **110**(2002)3, 307 – 317.
- 567) Job R F S *et al.*, Relationship between reactions to aircraft noise, psychological health and sleep disturbance, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD-tiedosto IN980439. pdf.
- 568) Nivison M E, Endresen I M, An analysis of relationships among environmental noise, annoyance and sensitivity to noise, and the consequences for health and sleep, *J Behav Med.* **16**(1993)3, 257 – 276
- 569) Blois R, Debilly G, Mouret J, Daytime noise and its subsequent sleep effects, *Noise as a Publ. Health Probl. Proceedings, 1978*, 425 – 432.
- 570) Connor W K, The behaviour of noise exposure variables in an urban noise study, *Noise Control Eng. J.* **10**(1978)1, 14 – 21.
- 571) Armani A, Abrami B, four dimension environmental noise analysis (4-DENA), *Inter-Noise 1996 Proc.* 2053 – 2056.
- 572) Bisio G *et al.*, Temporal distributions of outdoor noise levels in densely built-up areas, *Inter-Noise 1996 Proc.* 2025 – 2028.
- 573) Don C G, Rees I G, Road traffic sound level distributions, *J. Sound Vibr.* **100**(1985)1, 41 – 53.
- 574) Tang S K, Chu S H K, Noise level distribution functions for outdoor applications, *J. Sound Vibr.* **248**(2001)5, 887 – 911.
- 575) Porter N, Flindell I H, Berry B, Health effect-based noise assessment methods: A review and feasibility study, National Physical Laboratory, United Kingdom, 1998. 35 s + liitteitä.
- 576) Berglund B, Lindvall T, Schwela D E (Eds.), *Guidelines for community noise*, WHO, Geneva, 1999, 159 s.
- 577) Pearsons K, Recent field studies in the United States involving the disturbance of sleep from aircraft noise, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2271 – 2276.
- 578) Thiessen G J, Habituation of behavioural awakening and EEG measures of response to noise, *Proc. ICBEN 1980*, 397 – 400.
- 579) Fidell S *et al.*, Field studies of habituation to change in nighttime aircraft noise and of sleep motility measurement methods, *US Air Force Res. Lab. March 1998*, 120 s. Kovin vähän tietoa tottumisen vaikutuksesta.
- 580) Thiessen G, Lapointe A, Effect of intermittent truck noise on percentage of deep sleep, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**(1978)4, 1078 – 1080.
- 581) Pearsons K *et al.* Predicting noise-induced sleep disturbance, *J. Acoust. Soc. Am.* **97**(1995)1, 331 – 338.
- 582) Fidel S *et al.*, Field study of noise-induced sleep disturbance, *J. Acoust. Soc. Am.* **98**(1995)2 Pt. 1, 1025 – 1033.
- 583) Nemecek J, Wehrli B, Turrian V, Effects of the noise of street traffic in Switzerland, a review of four surveys, *J. Sound Vibr.* **78**(1981), 223 – 234.
- 584) esim. Home J, *Why we sleep*, Oxford University Press, New York, 1990: ”En esimerkiksi tiedetä, mikä merkitys eri univaiheiden keston ja ajoituksen vaihteluilla on ihmiselle terveyden kannalta.”
- 585) Griefahn B, Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. *Z. für Lärmbekämpfung* **37**(1990), 7 – 14.
- 586) Griefahn B, Critical loads for noise exposure during the night. *Inter-Noise 90 Proc.*, 1163 – 1166.
- 587) First ISO/CD 1996-1, *Acoustics – Description, assessment and measurement of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures*, 1999. Poistettu myöhemmistä versioista.

- 588) Pearsons K S, Progress report on a standard for predicting of sleep disturbance associated with noise events, Inter-Noise 98 Proc., CD-levy, IN980168.pdf
- 589) http://www.health.tno.nl/en/about_tno/organisation/divisions/publichealth/piekniveau/reken_en.html
- 590) Anon, Guidelines for preparing environmental impact statements on Noise, report of CHABA working group #69, Feb. 77. National Academy of Sciences, Washington DC.
- 591) Goldstein J, Assessing the impact of transportation noise: Human response measures, Noise-Con 77 Proceedings, 79 – 98.
- 592) Guski R, Is there any need for quiet periods in discontinuous noise, Inter-Noise 85 Proc., 985 – 988.
- 593) Carter N, Approaches to the study of noise induced sleep disturbance, Inter-Noise 96 Proc., 2277 – 2282.
- 594) Jurriëns A *et al.*, Sleeping at home with different sound insulation, Inter-Noise 81 Proc., 783 – 786.
- 595) Öhrström E, Björkman M, Sleep disturbance before and after traffic noise attenuation in an apartment building, J. Acoust. Soc. Am. **73**(1983)3, 877 – 879.
- 596) Kabuto M, Kageyama T, Night-time road traffic noise and sleep quality, Inter-Noise 94 Proc., 1041 – 1046. ks. kuva 1.
- 597) Gerretsen E, Calculation of the sound reduction by facades, Inter-Noise 81 Proc., 405 – 408. Kuva 2 antaa viitteitä eroista.
- 598) Kabuto M, A dose-response between night time indoor sound level due to road traffics and risk for insomnia in Japan, esitelmä WHO, Technical meeting on exposure-response 19 – 21 September 2002 Bonn, Germany, 146 – 156.
- 599) esim. Schanberg T, Sleep impairments caused by road traffic noise in cities, Inter-Noise 85 Proc., 953 – 956.
- 600) Pharmaca Fennica, esim. : <http://www.laaketietokeskus.fi/laakeop.htm>
- 601) Hallam R S, Correlates of sleep disturbance in chronic distressing tinnitus, Scand Audiol **25**(1996), 263 – 266.
- 602) Husby R, Lingjaerde O, Prevalence of reported sleeplessness in northern Norway in relation to sex, age, and season, Acta Psychiatr Scand. **81**(1990)6, 542–547
- 603) Reyner L A, Horne J A, Gender- and age-related differences in sleep determined by home-recorded sleep logs and actimetry from 400 adults, Sleep **18**(1995), 127 – 134.
- 604) Masche C, Verkehrslärm erhöht Stress und gefährdet die Gesundheit, Bundesgesundh – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz, **42**(1999), 354 – 355.
- 605) Kryter, K D, The handbook of hearing & the effects of noise: Physiology, psychology & public health, Orlando, Academic Press, 1994.
- 606) Neus H, Boikat U, Evaluation of traffic noise-related cardiovascular risk, Noise and Health, **2**(2000)7, 65 – 78.
- 607) Babish W, Ising H, Noise induced stress is a risk factor in cardiovascular disease, Inter-Noise 2001 Proc. 1703 – 1712.
- 608) Carter N L *et al.*, Progress report on Sydney airport health studies, phase 1, Inter-Noise 96 Proc., 2165 – 2170.
- 609) Rosenlund M *et al.*, Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise, Occup Environ Med **58**(2001)12, 769 – 773.
- 610) <http://www.hyena.eu.com/>, tarkistettu 31.12.2004.
- 611) Nisi J Di Muzet A, Ehrhart J, Libert H P, Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping, Sleep **13**(1990), 108 – 120.

- 612) Carter N L, Ingham P, Tran K, Hunyor S N, A field study of the effects of traffic noise on heart rate and cardiac arrhythmia during sleep, *J. Sound Vibr.* **169**(1994)2, 211 – 227.
- 613) Hatfield J, Reaction to noise influences physiological responses: evidence supporting causality, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD edition, paper 0440.pdf
- 614) Latham H G, The signal-to-noise ratio for speech intelligibility – An auditorium acoustics design index, *Appl. Acoust.* **12**(1979)4, 253 – 320.
- 615) Plomp P, Mimpen A, Speech-reception threshold for sentences as a function of age and noise level, *J. Acoust. Soc. Am.* **66**(1979)5, 1333 – 1342.
- 616) Brand T, Kollmer B, Efficient adaptive procedures for threshold and concurrent slope estimates for psychophysics and speech intelligibility tests, *J. Acoust. Soc. Am.* **111**(2002)6, 2801 – 2810.
- 617) ANSI S3.5-1997, Methods for calculation of the speech intelligibility index. American National Standards Institute, New York.
- 618) Wagner, K C, Factors influencing sentence intelligibility in noise, PhD dissertation, Universität Oldenburg, 131 s. 13.3.2003.
- 619) Nagatomo M *et al.* Masking effect due to the direction of artificially introduced masking sound, *Inter-Noise 90 Proc.*, 1151 – 1154.
- 620) Hazman I, Richards D L, Whorwood R W, Background masking audiograms of speech, *Acustica* **57**(1985)1, 87 – 95.
- 621) Rice C G, *et al.*, A laboratory study of nuisance due to traffic noise in a speech environment, *J. Sound Vibr.* **37**(1974)1, 87 – 96.
- 622) Sone T, Kono S, Environmental noise, personal noise exposure and personal response to noise, *Inter-Noise 83 Proc.*, 895 – 900.
- 623) Brooks J, Attenborough K, Utley W A, Student-based surveys of noise levels around and inside dwellings in the United Kingdom, *J. Sound Vibr.* **132**(1989)2, 317 – 330.
- 624) Casella-Strager, Report, Low frequency noise: Technical research support for DEFRA noise programme, Department for the Environment, Food and Rural Affairs, London, 2002, 11 s.
- 625) Sloven P, A structured approach to LFS complaints in the Rotterdam region of the Netherlands, *J. Low Freq. Noise* **20**(2001)2, 75 – 84.
- 626) Takahashi Y, Maeda S, The relationship between vibratory sensation and body surface vibration induced by complex low-frequency noise composed of two pure tones, *Inter-Noise 2003 Proc.*, 2776 – 2782.
- 627) Yamada S, Ikuji M, Fujikata S, Sensation of low frequency noise of deaf persons, *Inter-Noise 83 Proc.*, 823 – 826.
- 628) –, Assessing and controlling community noise with low frequency components, *Thema Nord 1996:607*, Nordic Council of Ministers, Copenhagen 1996. ISBN 92 9120 950 3.
- 629) Tempest W, Loudness and annoyance due to low frequency sound. *Acustica* **29**(1973), 205 – 209.
- 630) Ronnebaum T, Weber R, Vergleichende kategoriale Lautstärkewertungen tieffrequenter Geräusche., *DAGA 94 Proc.*, und <http://www.physik.uni-oldenburg.de/daga96.html>
- 631) Tokita Y, Nakamura S, Frequency weighting characteristics for evaluation of low frequency sound, *Inter-Noise 81 Proc.*, 739 – 742. *Myös Inter-Noise 84 Proc.*, 917 – 920.
- 632) Inukai Y *et al.*, A new evaluation method for low frequency noise, *Inter-Noise 90 Proc.*, 1441 – 1444.

- 633) Vasudevan R N, Leventhall H G, Annoyance due to environmental low frequency noise and source location – A case study, *J. Low Freq. Noise* 8(1989)2, 30 – 49.
- 634) Benton S, An investigation into the self-generation of annoyance responses to low level frequency noise, *J. Low Freq. Noise* 10(1991)2, 59 – 62.
- 635) Broner N, Low frequency noise: Loudness versus annoyance, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD-ROM tiedosto IN980358.pdf
- 636) Møller H, Andresen J, Loudness of infrasound, *Inter-Noise 83 Proc.*, 815 – 818.
- 637) Frost G P, The effect of variations in the microstructure of individual low frequency thresholds and loudness functions on noise control criteria, *Inter-Noise 83 Proc.*, 831 – 834.
- 638) Sudeki J K, Yamaguchi H, Matsumoto Y, Application of psychoacoustical model to determine perception threshold of low frequency sound in the presence of background noise, *Inter-Noise 2003 Proc.*, 2768 – 2775.
- 639) Persson K, Björkman M, Rylander R, Annoyance, loudness and dB(A) in evaluating low frequency sounds. *Inter-Noise 90 Proc.*, 1319 – 1322.
- 640) Persson K, Björkman M, Rylander R, Loudness, Annoyance and dBA in evaluating low frequency sounds, *J. Low Freq. Noise* 9(1990)1, 32 – 45.
- 641) Humes L, Jesteadt W, Models of the effects of threshold on loudness growth and summation, *J. Acoust. Soc. Am.* 90(1980)4 Pt1, 1933 – 1943.
- 642) Kirk B, Møller H, Loudness and annoyance of infrasound, *Inter-Noise 81 Proc.*, 761 – 764.
- 643) Møller H, Henningsen P, Andresen J, Annoyance from infrasound – alone and in combination with audio frequency noise, *Inter-Noise 84 Proc.*, 911 – 916.
- 644) Nakamura S, Tokita Y, Frequency characteristics of subjective responses to low frequency sound, *Inter-Noise 81 Proc.*, 735 – 738.
- 645) Vercammen M, Low frequency noise limits, *J. Low Freq. Noise* 11(1992)1, 7 – 13.
- 646) Broner N, Leventhall H G, Low frequency noise annoyance assessment by low frequency noise rating curves, *J. Low Freq. Noise* 2(1983)1, 20 – 28.
- 647) Mirowska M, Mroz E, Effect of low-frequency noise at low levels on human health in light of questionnaire investigation, *Inter-Noise 2000 Proc.* 2809 – 2812.
- 648) van den Berg G, Sound exposure measurements in cases of low frequency noise complaints. *Inter-Noise 98 Proc.*, PCP1d.
- 649) Taya H, Inukai Y, Psychological transient response to low frequency noises, *Inter-Noise 94 Proc.*, 1109 – 1112.
- 650) Müller F, Fichtl E, The measurement of equal loudness contours using a direct scaling procedure and validation by equal time contours, *Inter-Noise 94 Proc.*, 1069 – 1072.
- 651) Yamada S *et al.*, Difference of low frequency noise influence between sufferers and students, *Inter-Noise 85 Proc.*, 1001 – 1004.
- 652) Fuchs G, Verzini A, Skarp O, The effects of low frequency noise on man – two experiments, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2137 – 2140.
- 653) Nixon C W, *Infrasound and hearing*, Int. Congress on Noise as a Public Health Hazard, 1973. Copenhagen.
- 654) Yamada S, Research on concrete examples of low frequency noise problems, *Inter-Noise 82 Proc.*, 601 – 604.
- 655) Okada K, Field surveys and reduction techniques for low freq.- and infrasound from different facilities, *Inter-Noise 86 Proc.*, 787 – 792.
- 656) Sutherland L, Low frequency noise and vibration from sonic booms, *Inter-Noise 89 Proc.*, 847 – 852.

- 657) Brooks B, Low-frequency noise-induced vibration of housing structures, *J. Acoust. Soc. Am.* **94**(1993)3, Pt. 2, 1872.
- 658) Schomer P, Growth function for human response to large-amplitude impulse noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**(1978)6, 1627 – 1632.
- 659) Sato T, Path analyses of the effect of vibration on road traffic and railway noise annoyance, *Inter-Noise 94 Proc.*, 923 – 928.
- 660) Sato T, Two surveys on the effect of vibration on traffic noise annoyance, *Inter-Noise 90 Proc.*, 1339 – 1342.
- 661) Ochiai H, Kimura K, Yamasita M, Study on low frequency sound in living environment, *Inter-Noise 84 Proc.*, 925 – 928.
- 662) Beranek L, Applications of NCB and RC noise criterion curves for specification and evaluation of noise in buildings, *Noise Control Eng. J.* **45**(1997)5, 209 – 216.
- 663) Yamada S, *et al.*, Psychological and physiological effects of low frequency noise, *Inter-Noise 84 Proc.*, 921 – 924.
- 664) Kamigawara K, Community responses to low frequency noise and administrative actions in Japan, *Inter-Noise 2003 Proc.* 1221 – 1226.
- 665) Schomer P, Hoover B, A-weighting – It does not work indoors for helicopter or large gun noises; noises with low frequencies and large amplitudes, *Inter-Noise 89 Proc.*, 853 – 858.
- 666) Ochiai H, Tokita Y, Yamada S, Study on evaluation method of infra and low frequency noise, *Inter-Noise 99 Proc.*, 1153 – 1158.
- 667) ANSI S12.2-1995, American national standard criteria for evaluating noise, Acoustical Society of America, New York, 1995.
- 668) Schomer P D, Loudness-level weighting for environmental noise assessment, *Acustica – Acta Acustica* **86**(2000)1, 49 – 61.
- 669) Mathys J, Low-frequency noise and acoustical standards, *Appl. Acoust.* **40**(1993), 185 – 199.
- 670) Harris A, Low-frequency aircraft noise and its effects on residential land use, *J. Acoust. Soc. Am.* **108**(2000)5, Pt. 2, 2455.
- 671) Blazier W, Ebbing C, Criteria for low-frequency HVAC system noise control in buildings, *Inter-Noise 92 Proc.*, 761 – 766.
- 672) Landström U, Physiological changes produced during exposition to different frequencies and levels of infrasound, *Inter-Noise 93 Proc.*, 863 – 866.
- 673) Sandberg U, Combined effect of noise, infrasound and vibration on drivers performance, *Inter-Noise 83 Proc.*, 887 – 890.
- 674) Yamzaki K, Tokita Y, Effect of infra and low frequency sounds on sleep stages, *Inter-Noise 84 Proc.*, 929 – 932.
- 675) Zwicker E, Terhard E, Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as function of frequency, *J. Acoust. Soc. Am.* **68**(1980)5, 1523 – 1525.
- 676) Holmberg K, Landström U, Kjellberg A, Effects of ventilation noise due to frequency characteristics and sound level, *J. Low Freq. Noise* **12**(1993)4, 115 – 122.
- 677) Vormann M, Psychoakustische Modellierung der virtuellen Tonhöhe, Diplomarbeit, Carl von Ossietzky-Universität, Oldenburg, 1995, 127 s.
- 678) Vormann M, *et al.*, A new approach for the evaluation of tonal noise (tonality), *Psychophysics, Physiology and Models of Hearing*, Edited by Dau T, Hohmann V, Kollmeier B, pp. 109 – 112. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore 1999.

- 679) Landström U *et al.*, The effects of broadband, tonal and masked ventilation noise on performance, wakefulness and annoyance, *J. Low Freq. Noise* **10**(1991)4, 112 – 122.
- 680) Nobile M, Prominence ratio method for discrete tones in noise: Computation of adjacent critical bands. *Noise-Con 94 Proc.*, 729 – 734.
- 681) Broner N, Low frequency noise assessment – what do we know, *Noise-Con 94 Proc.*, 779 – 784.
- 682) Piorr D, Wietlake K, Assessment of low frequency noise in the vicinity of industrial noise sources, *J. Low Freq. Noise* **9**(1990)3, 116 – 119.
- 683) Insinööri-toimisto Kari Pesonen Oy:n arkistotiedot ja kirjoittajan omat mittausko-kemukset.
- 684) Vercammen M, Heringa P, Low frequency noise transmission into dwellings, *Inter-Noise 90 Proc.*, 1331 – 1334.
- 685) Machida N, Thresholds of sensation and effects on human body of impulsive low frequency sound, *Inter-Noise 94 Proc.*, 1113 – 1116.
- 686) Scannell K, Human response to a low frequency repetitive impulsive noise, *J. Low Freq. Noise* **8**(1989)4, 122 – 129.
- 687) Broner N, Leventhall H, A criterion for predicting the annoyance due to low level low frequency noise, *J. Low Freq. Noise* **2**(1983)4, 160 – 168.
- 688) Watts G, Assessing vehicle noisiness. *Inter-Noise 91 Proc.*, 41 – 44. Tutkimus tapahtui laboratorioissa. Ulkomeluko-e kaiuttomassa huoneessa, sisämeluko-e tavanomaisessa huoneessa.
- 689) Watts G, Godfrey N, Berry B, An examination of the relationship between vehicle noise measures and perceived noisiness, *Inter-Noise 90 Proc.*, 1141 – 1144.
- 690) Meloni T, Rosenheck A, Choice of frequency weighting for evaluation of weapon noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **97**(1995)6, 3636 – 3641.
- 691) Iskizaki S, Masuda K, Loudness evaluation of HVAC noise with low frequency components, *Inter-Noise 94 Proc.*, 1105 – 1108.
- 692) Paulsen R and Kastka J, Effects of combined noise and vibration on annoyance, *J. Sound Vibr.* **181**(1995), 295 – 314.
- 693) Schomer P, Decibel annoyance reduction of low frequency blast attenuating windows, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1991)4, Pt1, 1708 – 1713.
- 694) Schomer P, Sias J, A comparative study of human response to blast noise and sonic booms, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2489 – 2494.
- 695) Kerry G, Ford R D, Bandwidth limitations effects on low-frequency impulse noise prediction and assessment, *Applied Acoust.* **47**(1996)4, 331 – 344.
- 696) Wells J, A new method for computing annoyance of steady state noise versus perceived noise level and other subjective measures, *J. Acoust. Soc. Am.* **46**(1969)1 Pt.1, 85 – 90.
- 697) Stanton G, Tweeddale J, The noise survey of the rapid transit lines of New York City, *J. Acoust. Soc. Am.* **3**(1933)3, 371 – 375.
- 698) Anon, Z24.3 – 1936, American tentative standards for sound level meters, *J. Acoust. Soc. Am.* **8**(1936)1, 147 – 152.
- 699) Takakuwa Y *et al.* Static and dynamic state estimation methods using information of wind speed in the low-frequency noise environment contaminated by wind-induced noise. *Inter-Noise 91 Proc.*, 1077 – 1080.
- 700) Hardin J, Prediction of the spectrum of atmospheric microburst noise in the range 2 – 20 Hz: Preliminary results, *J. Acoust. Soc. Am.* **85**(1989)3, 1359 – 1362.
- 701) Griffy T and Hixson E, Atmospheric acoustic noise as a function of altitude, *J. Acoust. Soc. Am.* **85**(1989)3, 1089 – 1091.

- 702) Pesonen K, Hiljaiset alueet, Hiljaisuuteen vaikuttavat tekijät ja hiljaisuuden kriteerit. Julkaistaan vuoden 2005 alussa Ympäristöministeriön toimesta. ks. luku Tuulen ja kasvillisuuden aiheuttama ääni.
- 703) Bishop D E, Simpson M A, Correlation between different community noise measures, *Inter-Noise 72 Proc.*, 35 – 40.
- 704) Carcia A, Garrigues J V, 24 hour measurement of noise levels in urban areas, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2057 – 2060.
- 705) Sánchez J L *et al.*, Descriptive analysis of the temporary evolution of the urban noise, *Inter-Noise 2000 Proc.*, 1299 – 1302.
- 706) Shouichi T, Kazuo K, A study on time interval in measuring urban noises, *Inter-Noise 93 Proc.*, 1293 – 1296..
- 707) Bradley J S, A second generation noise survey, *Inter-Noise 76 Proc.*, 377 – 380.
- 708) Maurin M, Road noise levels: Why to get 24-hour measurements, *Transport Noise 94 Proc.*, 267 – 270.
- 709) Firlé T, L_{DN} dictates local options: Why?, *Inter-Noise 86 Proc.*, 973 – 978.
- 710) Lane S, Airport noise impact analysis problems, *Inter-Noise 89 Proc.*, 909 – 912.
- 711) Hall F, *et al.*, Direct comparison of community response to road traffic noise and to aircraft noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **70**(1981)6, 1690 – 1698.
- 712) Utley W A, Buller I B, A study of complaints about noise from domestic premises, *J. Sound Vibr.* **127**(1988)2, 319 – 330.
- 713) Grimwood C J, Effects of environmental noise on people at home, BRE Information Paper, IP 22/93 Dec. 1993, 4 s.
- 714) Vian J-P, Danner W F, Bauer J W, Assessment of significant acoustical parameters for rating sound insulation of party walls, *J. Acoust. Soc. Am.* **73**(1983)4, 1236 – 1243.
- 715) Alvord L S, Annoyance factors for common neighborhood (stationary) noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **84**(1988)2, 780 – 781.
- 716) Langdon F J, Buller I B, Scholes W W, Noise from neighbours and the sound insulation of party floors and walls in flats, *J. Sound Vibr.* **88**(1983)2, 243 – 270.
- 717) Bradley J, A subjective study of party wall sound insulation, *Inter-Noise 83 Proc.*, 563 – 566.
- 718) Calloway W J, An assessment of the relative importance of sources of urban noise, *Noise Control Eng. J.* **9**(1977)2, 68 – 73.
- 719) Schulte-Fortkamp B, Combined methods to investigate effects of noise exposure and subjective noise assessment, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2351 – 2356.
- 720) Kalveram K T, How acoustical noise can cause physiological and psychological reactions, *Proc. 5th International Symposium on Transport Noise and Vibrations*, 6 - 8 June 2000, St. Petersburg.
- 721) Pulles T, Biesiot W, Stewart R, Adverse effects of environmental noise on health: An interdisciplinary approach, *Proc. Noise as a Public Health Problem*, 1988, Stockholm, Vol. 4, Part I, 337 – 348.
- 722) Cohen S, Evans G W, Krantz D S, Stokols D, Physiological, motivational, and cognitive effects of aircraft noise on children - moving from laboratory to the field, *American Psychologist* **35**(1980), 231 – 243.
- 723) Botteldooren D, Lercher P, Verkeyn, Noise annoyance and coping: A soft analysis, *Proc. of the 8th Int. Congr. on Noise as a Public Health Problem*, CD-ROM: doc.102_t6d.pdf
- 724) Guski R, Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance, *Noise and Health*, **3**(1999), 45-56.

- 725) Andersen T, Noise insulation of residences around Kastrup airport of Copenhagen, Inter-Noise 83 Proc., 681 – 684
- 726) Weinstein N D, Community noise problems: Evidence against adaptation, Journal of Environmental Psych. 2(1982), 87 – 97. Myös Unrealistic optimism about susceptibility to health problems, J. Behav Med., 5(1982)4, 441 – 460.
- 727) Steinicke G, Die Wirkung von Lärm auf den Schlaf des Menschen. Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums, NRW Nr. 416, 1957.
- 728) Thiessen G, Disturbance of sleep by noise, J. Acoust. Soc. Am. 64(1978)1, 216 – 222.
- 729) Kuwano S, Namba S, Nakajima Y, On the noisiness of steady state and intermittent noises, J. Sound Vibr. 72(1980)1, 87 – 96.
- 730) Vanderhei S, Loeb M, Annoyance and behavioural after-effects following interfering and non-interfering aircraft noise, J. Applied Psych. 62(1977), 719 – 726.
- 731) Namba S, Kuwano S, Kinoshita A, Measurement of habituation to noise, J. Sound Vibr. 127(1988)3, 507 – 511.
- 732) Ebenhardt J, Strale L-O, Berlin M, The influence of continuous and intermittent noise on sleep, J. Sound Vibr. 116(1987), 445 – 564.
- 733) Meis M, Habituation to suboptimal environments: the effects of transportation noise on children's task performance, Contributions to Psychological Acoustics, 8th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 2000, 509 – 531.
- 734) Akita T, Hirate K, Yasuoka M, The effect of attention on perception of sound from the viewpoint of auditory evoked potential, Inter-Noise 95 Proc., 839 – 842.
- 735) Lyytinen H, Blomberg A, Näätänen R, Event related potentials and autonomic responses to a change in unattended auditory stimuli, Psychophysiology, 29(1992), 523 – 534.
- 736) Harder J, Maschke C, Nocturnal aircraft noise and adaptation, Euro-Noise 98 Proc. 1207 – 1212.
- 737) Ising H, Ising M, Chronic cortisol increases in the first half of the night caused by road traffic noise, Noise Health. 4(2002)16, 13 – 21.
- 738) Spreng M, Possible health effects of noise induced cortisol increase, Noise Health. 2(2000)7, 59 – 64.
- 739) Öhrström E, Björkman M, Effects of noise-disturbed sleep – A laboratory study on habituation and subjective noise sensitivity, J. Sound Vibr. 122(1988)2, 277 – 290.
- 740) Griefahn B, Gross E, Noise and sleep at home, a field study on primary and after effects, J. Sound Vibr., 105(1986), 373 – 383.
- 741) Griefahn, Environmental noise and sleep. Review – Need for further research, Applied Acoustics 32(1991), 255 – 268.
- 742) Pesonen K, Musiikkimelun vaarallisuus yleisön kuulolle pop- ja rockkonserteissa, diskoissa ja ravintoloissa, Sosiaali- ja terveysministeriön selvityksiä 2002:10. Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki 2002. Edita Prima. ISBN 952- 00 - 1197 - 8, ks. luku Kuulon aleneman pienentyminen meluun tottumisen seurauksena.
- 743) Pukkila M *et al.*, The “toughening” phenomenon in rat's auditory organ, Acta Otolaryngol Suppl, 529(1997), 59 – 62.
- 744) Yoshita N, Liberman M C, Sound conditioning reduces noise-induced permanent threshold shift in mice, Hear Res. 148(2000)1- 2, 213 – 219.
- 745) Miyakita T *et al.*, Effect of low level acoustic simulation on temporary threshold shift in young humans, Hear Res. 60(1992), 149 – 155

- 746) Bryan W, Harter N, Studies in the physiology and psychology of the telegraphic language, *Psychol. Rev.* **6**(1899), 389 – 375.
- 747) Gundy R, Auditory detection of an unspecified signal, *J. Acoust. Soc. Am.* **33**(1961)4, 1008 – 1012.
- 748) Leek M, Watson C, Learning to detect audibility pattern components, *J. Acoust. Soc. Am.* **76**(1984)4, 1037 – 1044.
- 749) Palmer V, The functionally and physiologically plastic adult auditory system, *J. Acoust. Soc. Am.* **103**(1998)4, 1705 – 1721.
- 750) Rylander R, Persson K, Human perception of environmental noise in acute and chronic exposure condition, *Inter-Noise 97 Proc.*, 219 (CD-edition).
- 751) Namba S, *et al.* A cross-cultural study on noise problems: Comparison of the results obtained in Japan, West Germany, The U.S.A., China and Turkey, *J. Sound Vibr.* **151**(1991)3, 471 – 477.
- 752) Zheng D, Noise exposure, pp. 265 – 285 in *Recent Trends in Hearing Research*, Universität Oldenburg, 1996. 402 s
- 753) Lambert J, Champelovier P, Vernet I, Annoyance from high speed train noise: A social survey, *J. Sound Vibr.* **193**(1996)1, 21 – 28.
- 754) Lang J, Annoyance caused by railway noise and counter measures, 6yh Seminar and exhibition on noise control, Pécs, Hungary, 1986.
- 755) Langdon F, Griffiths I, Subjective effects of traffic noise exposure, II: Comparison of noise indices, response scales, and the effects of changes in noise, *J. Sound Vibr.* **83**(1982)3, 171 – 180.
- 756) Griffiths I, Raw G, Adaptation to changes in traffic noise exposure, *J. Sound Vibr.* **132**(1989)2, 331 – 336.
- 757) Raw G, Griffiths I, The Effect of changes in aircraft noise exposure, *J. Sound Vibr.* **101**(1985)2, 273 – 275.
- 758) Klæboe R *et al.*, Changes in noise reactions – evidence for an area-effect?, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD - IN980313.pdf
- 759) Brown A L, Hall A, Kyle-Little J, Response to a reduction in traffic noise exposure, *J. Sound Vibr.* **98**(1985)2, 235 – 246.
- 760) Job R F S, *at al.*, Public reactions to changes in noise levels around Sydney airport, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2419 – 2424.
- 761) Yamada I, Kaku J, Changes in people's attitudes toward airport resulting from decrease in number of flights. *Inter-Noise 96 Proc.*, 2079 – 2084.
- 762) Miyakita T, *et al.*, Is residential sound-proofing an effective measure in reducing the effects of aircraft noise?, *Inter-Noise 98 Proc.*, CD-tiedosto IN980299.pdf.
- 763) Job R F S *et al.*, Reaction to combined noise sources: the roles of general and specific noise sensitivities, *Inter-Noise 99 Proc.*, 1189 – 1194.
- 764) Smith A, The concept of noise sensitivity: Implications for noise control, *Noise Health*, **5**(2003)18, 57 – 59.
- 765) Zimmer K, Ellermeier W, Reliability and validity of four measures of noise sensitivity, *Inter-Noise 97 Proceedings*, CD-ROM, 045.pdf.
- 766) Ellermeier W, Eigenstetter M, Zimmer K, Psychoacoustic correlates of individual noise sensitivity, *J. Acoust. Soc. Am.* **109**(2001) 4, 1464 – 1473.
- 767) Heinonen-Gutzejev M *et al.*, Self-report of transportation noise exposure, annoyance and noise sensitivity in relation to noise map information, *J. Sound Vibr.* **234**(2000)2, 191 – 206.
- 768) http://www.defra.gov.uk/environment/noise/nis0001/pdf/nis_vol2.pdf
- 769) Weinstein N, Individual differences in reactions to noise: A longitudinal study in a college dormitory, *J. Appl. Psychology* **63**(1978), 458 – 466.

- 770) Lercher P, Non-auditory health effects research: A conceptual analysis of recent results and research needs, *Inter-Noise 94 Proc.*, 1053 – 1058.
- 771) Formby C *et al.*, Adaptive plasticity of loudness induced by chronic attenuation and enhancement of the acoustic background, *J. Acoust. Soc. Am.* **114**(2003)6, 55 – 58.
- 772) Grøtvedt L, Neighbour noise annoyance and psychiatric problems/diseases. *Proc. Noise as a Public Health Problem, 1988, Stockholm, Vol. 5, Part II*, 403 – 408.
- 773) Matsumura Y, Rylander R, Noise sensitivity and road traffic annoyance in a population sample, *J. Sound Vibr.* **151**(1991)3, 415 – 419.
- 774) Örström E, Björkman M, Rylander R, Noise annoyance with regard to neurophysiological sensitivity, subjective noise sensitivity and personality variables, *Psych. Med.* **18**(1988), 605 – 613.
- 775) Zimmer K, Ellermeier W, Psychometric procedures of four measures of noise sensitivity: A comparison. *J. Env. Psych.* **19**(1999), 295 – 302.
- 776) Öhrström E, Björkman M, Rylander R, Noise annoyance with regards to neurophysiological sensitivity, subjective noise sensitivity and personality variable, *Psych. Medicine* **18**(1988) 606 – 613.
- 777) Belojevic G, Jakovljevic B, Aleksic O, Subjective reactions to traffic noise with regard to some personality traits, *Environment International*, **23**(1997)2, 221 – 226.
- 778) Anari M, *et al.*, Hypersensitivity to sound, questionnaire data, audiometry and classification, *Scand Audiol* **28**(1999), 219 – 230.
- 779) Peterson Y, Aniansson G, Noise sensitivity and annoyance caused by traffic noise in persons with impaired hearing, *J. Sound Vibr.* **127**(1988)3, 543 – 548.
- 780) Aniansson G, Pettersson K, Peterson Y, Annoyance caused by traffic noise in persons with normal and impaired hearing, *Inter-Noise 80 Proc.*, 971 – 974.
- 781) Nieves Vera M, Vila J, Godoy J, The role of negative statements on the subjective effects of traffic noise, *J. Sound Vibr.* **188**(1995) 3, 347 – 361.
- 782) Kamp I *et al.*, The role of noise sensitivity in the noise–response relation: A comparison of three international airport studies, *J. Acoust. Soc. Am.* **116**(2004)6, 3471 – 3479..
- 783) H. M. E. Miedema and H. Vos, “Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions,” *J. Acoust. Soc. Am.* **113**(2003), 1492–1504
- 784) Stansfeld S A, Noise, noise sensitivity and psychiatric disorder: epidemiological and psychological studies, *Psychol Med.* 1992, Suppl. 22, 1 – 44.
- 785) Vernon J, Pathophysiology of tinnitus: A special case – hyperacusis and a proposed treatment. *Am. J. Otol.* **8**(1987)3, 201 – 202.
- 786) Stansfeld S *et al.*, Sensitivity to noise in a community sample. I. Measurement of psychiatric disorder and personality, *Psychol. Med.* **15**(1985), 243 – 254.
- 787) Hatfield J, *et al.*, General sensitivity to stimulation influences sensitivity to the psychological and physiological effects of noise exposure, *Inter-Noise 96 Proc.*, 1231 – 1236.
- 788) Zimmer K, Ellermeier W, Construction and evaluation of a noise-sensitivity questionnaire, *Contributions to Psychological Acoustics, 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, 1997*, 163 – 170.
- 789) Miedema H, Vos H, Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transport noise, *J. Acoust. Soc. Am.* **105**(1999)6, 3336 – 3344.
- 790) Lercher P, Road traffic noise, self-medication, and prescriptions: a community study, *Inter-Noise 96 Proc.*, 2171 – 2176.

- 791) Langdon F, Noise nuisance caused by road traffic noise in residential areas, Part I and Part II , J. Sound Vibr. 47(1976) 2, 243 – 263, 165 – 282.
- 792) Öhrström E, Björkman M, Rylander R, Primary and after effects of noise during sleep with reference to noise sensitivity and habituation: Studies in laboratory and field, Proc. Noise as a Public Health Problem, 1988, Stockholm, Vol. 5, Part II, 55 – 63.
- 793) Smith A *et al.* Noise and insomnia: A study of community noise exposure, sleep disturbance, noise sensitivity and subjective reports of health, UK Dept. of Health. n. 400 s (julkaistu 2000-luvulla).
- 794) Goto K, Kaneko T, Tokita Y, Annoyance and mental health status of people around and airport in Japan, Inter-Noise 2000 Proc., 1379 – 1385.
- 795) Berglund B, Community noise in a public health perspective, Inter-Noise 98 Proc., CD-IN980539.pdf.
- 796) Katzenell U, Segal S, Hyperacusis, review and clinical guidelines, Otol. Neurotol. 22(2001), 321 – 327
- 797) Formby C, Gold S L, Modification of loudness discomfort level: evidence for adaptive chronic auditory gain and its clinical relevance, Sem. Hear. 23(2000)1, 21 – 34.

- 2005:
- 1 Mielenterveyden häiriöt työkyvyttömyyseläkkeen syynä - ajatuksia ehkäisystä, hoidosta ja kuntoutuksesta.
ISBN 952-00-1593-0
ISBN 952-00-1678-3 (PDF)
 - 2 Anna-Liisa Salminen, Pirjo-Liisa Kotiranta. Eletään hyvää elämää. Itse. Kansallinen ITSE-hanke apuvälineosaamista ja –palveluja kehittämässä.
ISBN 952-00-1611-2 (nid.)
ISBN 952-00-1612-0 (PDF)
 - 3 Asko Rauta. Selvitys maahanmuuttajien mielenterveyspalvelujen tarpeesta ja saatavuudesta. (Julkaistaan ainoastaan verkossa www.stm.fi)
ISBN 952-00-1666-X (nid.)
ISBN 952-00-1667-8 (PDF)
 - 4 Erkki Paara. Vammaispalvelujen järjestäminen ja osaaminen. Selvitys vammaislakien yhdistämisestä.
ISBN 952-00-1636-8 (nid.)
ISBN 952-00-1637-6 (PDF)
 - 5 Työsuojelustrategian seurantaraportti 2004.
ISBN 952-00-1699-6 (nid.)
ISBN 952-00-1700-3 (PDF)
 - 6 Helena Piirainen et al. Työterveyshuollon ammattihenkilöiden ja asiantuntijoiden koulutus ja käyttö vuonna 2003.
ISBN 952-00-1701-1 (nid.)
ISBN 952-00-1702-X (PDF)
 - 7 Petri Virtanen, Jarkko Tonttila. Palvelujärjestelmä toimivaksi. Seutukunnallisten kehittämishankkeiden ja terveydenhuollon palvelujärjestelmän kehittämiskokeilujen arviointi.
ISBN 952-00-1707-0 (nid.)
ISBN 952-00-1708-9 (PDF)
 - 8 Asko Suiikkanen, Ritva Linnakangas, Minna Harjajärvi, Maria Martin. Kokeilusta KIPINÄÄ. Keski-ikäisten pitkäaikaistyöttömien kuntoutuskokeilun arviointi.
ISBN 952-00-1722-4 (nid.)
ISBN 952-00-1723-2 (PDF)
 - 9 Hanna Jurvansuu, Pekka Huuhtanen. Työolojen kehitys työsuojeluhallinnon painoalueilla 1997-2003.
ISBN 952-00-1719-4 (nid.)
ISBN 952-00-1726-7 (PDF)
 - 10 Olli Oosi, Petri Virtanen, Jarkko Tonttila. Työ tekijäänsä kiittää. Työolojen kehittämishankkeiden arviointi.
ISBN 952-00-1746-1 (nid.)
ISBN 952-00-1747-X (PDF)
 - 11 Anna-Mari Ruonakoski, Sakari Somerpalo, Juha Kaakinen, Riitta Kinnunen. Esteettömyys ja ikääntyneiden palvelutarve.
ISBN 952-00-1750-X (nid.)
ISBN 952-00-1751-8 (PDF)
 - 12 Arbetskyddsstrategins uppföljningsrapport 2004.
ISBN 952-00-1758-5 (inh.)
ISBN 952-00-1759-3 (PDF)
 - 13 Occupational Safety and Health Strategy. Follow-up Report 2004.
ISBN 952-00-1760-5 (print)
ISBN 952-00-1761-5 (PDF)
 - 14 Kari Pesonen. Ympäristömelun haittojen arvioinnin perusteita.
ISBN 952-00-1684-8 (nid.)
ISBN 952-00-1685-6 (PDF)