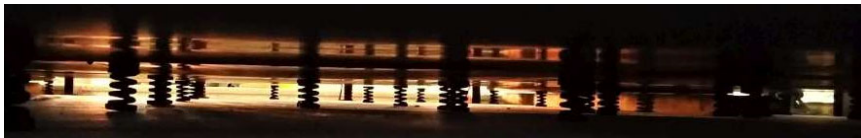


RAKENNUSAKUSTIIKKA JA MELUNTORJUNTA

Oppikirja

Valtteri Hongisto

26.1.2023



SISÄLLYSLUETTELO

1 PERUSTEITA	4	6.2 Askeläänitasoluku ja spektripainotusermi.....	93
1.1 Perussuureet.....	4	6.3 Massiivisen raakaväli­pohjan askelääneneristävyys.....	94
1.2 Tasojen yhteenlasku.....	6	6.4 Lattiapäällysteen askeläänepainetaso­n parannusluku.....	95
1.3 Ekvivalenttitaso.....	8	6.5 Kelluva lattiarakenne.....	97
1.4 Taajuusanalyysi.....	9	6.6 Vaihtoehtoiset askelääniherätteet.....	99
1.5 Kuulokynnys ja vakioään­ekkyyskäyrät.....	11	6.7 Kevyet väli­pohjarakenteet.....	101
1.6 Taajuuspainotukset.....	12	6.8 Asennuslattiat.....	103
1.7 Aikapainotukset.....	14	7 ILMANVAIHTO	105
2 YMPÄRISTÖMELU	16	7.1 Melulähteet.....	105
2.1 Ympäristömelun lajit ja meluntorjuntakeinot.....	16	7.2 Äänitasolaskelmat.....	106
2.2 Melun tunnusluvut.....	17	7.3 Puhaltimen ääni.....	107
2.3 Geometrinen vaimentuminen.....	18	7.4 Sää­telaitteen ääni.....	108
2.4 Suuntakerroin.....	18	7.5 Pää­telaitteen ääni.....	109
2.5 Avaruus­kulma.....	19	7.6 Ilmavirtauksen ääni.....	110
2.6 Ilmakehän absorptio.....	19	7.7 Äänenvaimentimen äänenvaimennus.....	111
2.7 Maaheijastus ja maan­pinnan absorptio.....	20	7.8 Pää­telaitteen äänenvaimennus.....	112
2.8 Kasvillisuus.....	21	7.9 Kanaviston haarojen äänenvaimennus.....	113
2.9 Melu­este.....	21	7.10 Huonevaimennus.....	113
2.10 Sää­olosuhteiden vaikutus.....	22	7.11 Ilmanvaihtokonehuoneen äänenvaimennus.....	114
2.11 Mittausepävarmuus ja tuloksen vertailu ohjearvoon.....	23	7.12 Rajataajuus.....	114
2.13 Melun leviämismallinnus.....	24	7.13 Vaimennus kanavan poikki­pinnan muutoksessa.....	115
3 ÄÄNENABSORPTIO	27	7.14 Vaimennus kanavan yksittäisessä haarassa.....	117
3.1 Äänenabsorptio ja -eristys.....	27	7.15 Pää­tyvän kanavan pääte­vaimennus.....	118
3.2 Aaltoluku ja impedanssi.....	29	7.16 Kanavaseinämän äänenvaimennus.....	119
3.3 Heijastuminen materiaalista.....	29	7.17 Mutkan äänenvaimennus.....	119
3.4 Huokoisuus.....	32	7.18 Passiivisen äänenvaimentimen toiminta.....	120
3.5 Huokoisten materiaalien karakteristiset ominaisuudet.....	32	7.19 Reaktiivisen äänenvaimentimen toiminta.....	122
3.6 Absorptiosuhteen laskenta huokoiselle levyllä.....	33	8 ÄÄNENERISTYS RAKENNUKSESSA	126
3.7 Reikälevyresonaattori.....	36	8.1 Sivutiesiirtymät.....	126
3.8 Ohuet reikälevyt.....	38	8.2 Ilmaa­änen sivutiesiirtymät massiivirakenteissa.....	126
3.9 Mikrorei­titetyt levyt.....	39	8.3 Ilmaa­änen sivutiesiirtymät kevytrakenteissa.....	128
3.10 Levyresonaattorit.....	40	8.4 Askelään sivutiesiirtymien mallintaminen.....	130
3.11 Monikerrorakenteen mallintaminen.....	41	8.5 Esimerkki rakenteellisista sivutiesiirtymistä.....	130
3.12 Tilastollinen absorptiosuhde.....	42	8.6 Yhteisääneneristävyys.....	131
3.13 Absorptiomateriaalien luokitus.....	42	8.7 Rakojen vaikutus ilmaääneneristä­vyyteen.....	131
3.14 Absorptiosuhdearvoja.....	43	8.8 Julkisivun ääneneristyk­sen mitoitus.....	132
4 HUONEAKUSTIIKKA	46	8.9 Ilmaa­änen sivutiesiirtymä kanavistoa pitkin.....	134
4.1 Johdanto.....	46	9 KUULONSUOJAUS	137
4.2 Diffuusin kentän intensiteetti huone­pinnalle.....	46	9.1 Melualtistus.....	137
4.3 Äänenpainetaso diffuusissa äänikentässä.....	48	9.2 Kuulonsuojaimet ja suojaustehokkuus.....	138
4.4 Jälkikaiunta-aika diffuusissa äänikentässä.....	50	9.3 Kuulonsuojainten mitoittaminen.....	139
4.5 Impulssivaste.....	52	9.4 Kuulonsuojaimen käyttöaste.....	140
4.6 Jälkikaiunta-ajan laskenta.....	54	10 TEOLLISUUSMELUNTORJUNTA	142
4.7 Suhteellinen ilmankosteus ja jälkikaiunta-aika.....	55	10.1 Meluntorjunnan keinot.....	142
4.8 Ominais­taajuudet.....	55	10.2 Koneiden melupäästön ilmoittaminen.....	142
4.9 Leviämisvaimennus.....	57	10.3 Koneen meluanalyysi.....	143
4.10 Puheääni.....	59	10.4 Koneiden meluntorjunta.....	145
4.11 Puheensii­rtoindeksi STI.....	60	10.5 Vähä­meluiset tuotantoprosessit.....	146
4.12 Avotoimistojen huoneakustiikka.....	62	10.6 Melukotelointi.....	148
4.13 Auditorion suunnittelu.....	66	10.7 Rakennusakustiset toimenpiteet.....	150
4.14 Leviämisvaimennus teollisuustiloissa.....	67	11 VÄRÄHTELY JA TÄRINÄ	152
5 ILMAÄNENERISTÄVYYS	70	11.1 Johdanto.....	152
5.1 Ilmaa­neneneristä­vyyden määrittäminen.....	70	11.2 Perussuureet.....	152
5.2 Ilmaa­neneneristysluku ja spektripainotusermit.....	71	11.3 Tärinä­altistuksen mittaaminen ja arviointi.....	153
5.3 Värähtelytyypit ja äänensä­teily levyssä.....	72	11.4 Työ­peräisen tärinä­altistuksen raja-arvot.....	154
5.4 Koin­sidenssi.....	73	11.5 Liik­kennetärinän vaikutukset ja arviointi.....	155
5.5 Levyn ominais­taajuudet.....	74	11.6 Värähtelyn eristäminen.....	157
5.6 Äänensä­teily taivutus­aallostasta.....	74	12 MELUN VAIKUTUKSET	161
5.7 Häviö­kerroin.....	76	12.1 Tiivistelmä.....	161
5.8 Yksinkertaisen levyn malli.....	77	12.2 Tilapäinen kuulonalenema.....	161
5.9 Kaksi pääl­lekkäistä ohutta levyä.....	78	12.3 Tinnitus.....	162
5.10 Massiivilevyt.....	79	12.4 Meluperäinen kuulovamma.....	163
5.11 Kaksinkertainen levyrakenne.....	81	12.5 Melun häirit­sevyy­ys.....	165
5.12 Kaksinkertaisen levyrakenteen laskentamalli.....	84	12.6 Puhe­kommunikoinnin vaikeutuminen.....	168
5.13 Sandwich-rakenne.....	88	12.7 Äänihäiriöt eli puhe-elinten vauriot.....	168
5.14 Pinnoitus huokoisella levyllä.....	90	12.8 Her­mojärjestelmän ja vi­reystilan muutokset.....	169
6 ASKELÄÄNENERISTÄVYYS	92	12.9 Fysiologiset vaikutukset.....	170
6.1 Askeläänepainetaso.....	92	12.10 Univaikutukset.....	172

12.11 Työsuoriutumisen muutokset	173	13.3 Kapeakaistainen ääni	180
12.12 Käyttäytymismuutokset (coping)	175	13.4 Impulssimainen ääni	184
12.13 Ympäristöherkkyys	175	13.5 Amplitudimoduloitu ääni	187
13 MELUN HÄIRITSEVYYS.....	178	13.6 Äänen taajuusjakauma	189
13.1 Määritelmä	178	LIITE 1. MÄÄRÄYKSET JA OHJEET.....	192
13.2 Erityispiirteet ja sanktio.....	180		

Esipuhe. Hyödynnän tätä oppikirjaa tai sen osia rakennusakustiikkaan, ympäristöakustiikkaan ja meluntorjuntaan liittyvillä luennoilla. Oppikirjalla ei ole kustantajaa eikä se ole myytävänä. Englanninkielistä versiota ei valitettavasti ole. Kirjassa olevista virheistä tai puutteista otan mielelläni vastaan palautetta ja pyrin huomioimaan sen, kun seuraavaksi oppikirjaa päivitän.

Kiitän dosentti Markku Sainiota, tohtori Pekka Saarista, DI Ville Rajalaa ja tohtori Henna Maulaa heidän erikoisalaansa koskevien lukujen tarkistamisesta.

Valtteri Hongisto

valtteri.hongisto@turkuamk.fi

Kansikuva: ”Arvoitus”, Valtteri Hongisto, 2019

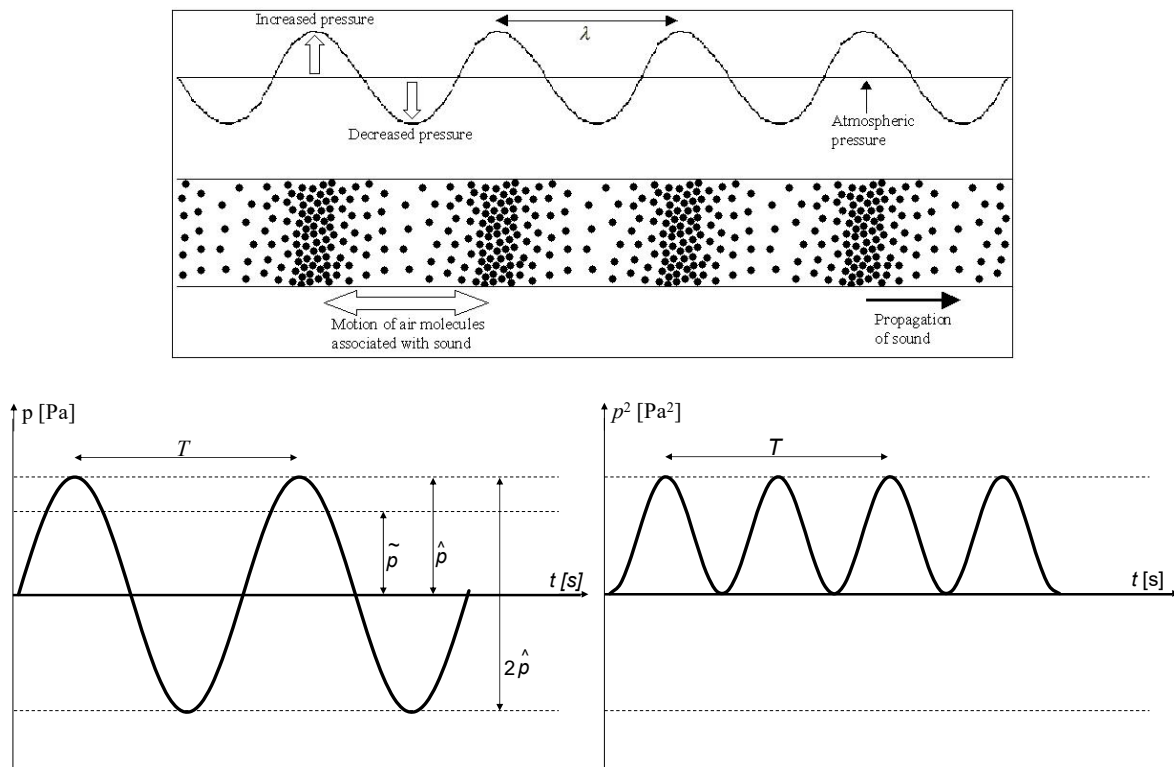
1 Perusteita

1.1 Perussuureet

Äänenvoimakkuutta tarkastellaan pääsääntöisesti äänenpaineen p [Pa] avulla. Ympäristössämme esiintyvien normaalien äänen paineen vaihtelut ovat erittäin pieniä staattiseen ilmanpaineeseen 101300 Pa nähden. Elinympäristössä kuultavan äänen äänenpaineet ovat pääsääntöisesti 20 μ Pa (0 dB) 20 Pa (120 dB) välillä.

Hiukkasnopeus u [m/s] kertoo molekyylien värähtelyn nopeudesta tasapainoakselin suhteen. Hiukkasnopeus tulee erottaa aaltoliikkeen etenemisnopeudesta c [m/s], jota kutsutaan vaihenopeudeksi.

Sähköopin kanssa vallitsee analogia siten, että äänenpaine vastaa jännitettä ja hiukkasnopeus virtaa.



Kuva 1.1.1 (a) Ilmassa etenevä ääni on pitkittäistä aaltoliikettä eli puristus-aaltoliikettä (*longitudinal or compression wave*). Lähde: medium.com. Pitkittäistä aaltoliikettä esitetään graafisesti kuitenkin samoin kuin poikittaista aaltoliikettä (*transverse wave*) (Oliva, 2005). (b) Harmonisen, yhdellä taajuudella tapahtuvan äänisignaalin äänenpaine ajan funktiona ja siitä johdettava huippuarvo (\hat{p}), tehollisarvo (\tilde{p}) ja jakso T . Tässä kurssissa käsitellään ainoastaan harmonisia signaaleja eli signaaleja, jotka voidaan muodostaa sinimäisten aaltojen summana. (c). Edellisen neliö.

Ilmassa etenevä ääni on pitkittäistä aaltoliikettä. Kuvassa 1.1.1 on esitetty sinimuotoinen äänisignaali ja sen tärkeimmät tunnusluvut. Äänenpaineen aikavaihtelu tietyssä tarkastelupisteessä esitetään muodossa

$$(1.1.1) \quad p(t) = \hat{p} \sin(\omega t + \phi)$$

missä $p(t)$ on äänenpaine ajanhetkellä t [s], \hat{p} on äänenpaineen huippuarvo eli amplitudi, $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus, f on taajuus [Hz, tai 1/s] ja ϕ on vaihesiirto.

Äänenpaineen aikakeskiarvo \bar{p} saadaan yhtälöstä

$$(1.1.2) \quad \bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

missä T [s] on aikajakso, jolta keskiarvo halutaan määrittää. Kun tarkasteltava aikajakso on riittävän pitkä, äänenpaineen aikakeskiarvo on nolla.

Paineen aikakeskiarvon sijaan tärkeämpi on äänenpaineen tehollinen arvo \tilde{p} eli rms-arvo (*root mean square*), joka on yhteydessä äänienergiaan. Se määritellään neliöidyn äänenpaineen aikakeskiarvona

$$(1.1.3) \quad \tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

Harmoniselle signaalille pätee seuraava yhteys tehollisarvon ja huippuarvon välillä:

$$(1.1.4) \quad \tilde{p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{p}$$

Äänenpaineen tehollista arvoa käytetään keskimääräisen äänenvoimakkuuden ilmoittamiseen ja tarvitaan muun muassa äänenpainetaso laskennassa. Äänenpainetaso L_p [dB] määritetään tehollisarvon avulla

$$(1.1.5) \quad L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right)$$

missä vertailuäänepaineena on $p_0=20 \mu\text{Pa}$. Tarvittaessa vertailupaine tuodaan dB-yksikön perässä esiin [dB *re* 20 μPa] mutta yleensä tätä ei tarvitse tehdä, koska muiden vertailuäänepaineiden käyttö on erittäin harvinaista. Vertailuäänepaineen 20 μPa tapauksessa $L_p = 0$ dB. Tämä vastaa melko hyvin normaalikuuloisen nuoren aikuisen kuulokynnyksen mukaista äänenpainetta 1000 Hz:n taajuudella.

Tasoaallossa hiukkasnopeus ja äänenpaine ovat samassa vaiheessa. Jos tarkastellaan x -suuntaan etenevää aaltoa, äänenpaine saadaan yhtälöstä

$$(1.1.6) \quad p(x,t) = \rho_0 c_0 u_x(x,t)$$

missä ρ_0 on väliaineen tiheys [kg/m^3] ja u_x [m/s] on hiukkasnopeus suunnassa x .

Väliaineen akustinen ominaisimpedanssi Z (*aaltovastus*) kertoo väliaineen tuottamasta vastuksesta äänen etenemiselle. Se määritellään äänenpaineen ja hiukkasnopeuden suhteesta vastaavasti kun sähköpissa impedanssi määritellään jännitteen ja virran suhteesta (etenemissuunta x):

$$(1.1.7) \quad Z_x = \frac{p(x,t)}{u_x(x,t)}$$

Ilmassa etenee pitkittäinen aaltoliike, jossa äänen nopeus on

$$(1.1.8) \quad c_0 = \sqrt{\gamma R T_0} = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$$

missä R on moolinen kaasuvakio [=8315 J/mol·K], $\gamma=1.4$ ideaalikaasulle kuten ilma, p_0 on staattinen ilmanpaine [= $1.013 \cdot 10^5$ Pa], ρ_0 on ilman tiheys [$1,2041 \text{ kg/m}^3$; 20 °C] ja T_0 on lämpötila [K]. Äänen nopeus ilmassa, c_0 [m/s], riippuu ilman lämpötilasta T [°C] yhtälöllä

$$(1.1.9) \quad c_0 = 331 + 0.6 \cdot T,$$

Ilman akustinen ominaisimpedanssi Z_0 huoneenlämpötilassa (20 °C) on siten $Z_0 = \rho_0 c_0 \approx 412 \text{ kg/m}^2\text{s}$, koska huoneenlämpötilassa $\rho_0 = 1.204 \text{ kg/m}^3$ ja $c_0 = 343 \text{ m/s}$.

Ääniteho W [W, J/s] kertoo äänilähteen tuottaman kokonaisäänienergian [J] aikayksikköä t [s] kohti. Äänilähteen äänitehon mittausta tapahtuu vapaassa äänikentässä, jossa ei ole heijastuksia. Äänilähteen ympärille hahmotellaan hypoteettinen mittauspinta, jonka sisäpuolella äänilähde kokonaisuutenaan sijaitsee eikä mittauspinnan sisäpuolella ole muita äänilähteitä. Äänilähteen ääniteho määritellään tällöin mittauspinnan (pinta-ala S [m^2]) yli integroidun, pintaan nähden normaalin intensiteetin avulla:

$$(1.1.10) \quad W = \int_S I \cdot dS$$

Intensiteetti suunnassa x on myös suunnan x hiukkasnopeuden u_x ja äänenpaineen p tulo:

$$(1.1.11) \quad W_x = \int_S p \cdot u_x dS$$

Vapaassa kentässä hiukkasnopeus on äänenpaineen kanssa samassa vaiheessa ja äänitehon aikakeskiarvo (tehollinen arvo) on yhtälön **1.1.6** nojalla

$$(1.1.12) \quad \tilde{W} = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(x,t)}{\rho_0 c_0} S dt = \frac{\tilde{p}^2 S}{\rho_0 c_0}$$

Äänitehotaso L_W [dB] määritellään yhtälöllä

$$(1.1.13) \quad L_W = 10 \cdot \log_{10} \frac{\tilde{W}}{W_0},$$

missä vertailutehoksi on määritelty $W_0=1$ pW [dB re 1 pW].

Intensiteetti I [W/m^2] määritellään äänitehona pinta-alaa S kohti. Vapaassa kentässä intensiteetti on paineen ja hiukkasnopeuden tulo. Tehollinen intensiteetti saadaan yhtälöllä

$$(1.1.14) \quad \tilde{I} = \frac{\tilde{W}}{S} = \frac{\tilde{p}^2}{\rho_0 c_0}$$

Intensiteettitaso L_I [dB] määritellään yhtälöllä

$$(1.1.15) \quad L_I = 10 \cdot \log_{10} \frac{\tilde{I}}{I_0},$$

missä vertailuintensiteetiksi on määritelty $I_0=1$ pW/ m^2 [dB re 1 pW/ m^2].

Äänitehotaso saadaan määritettyä sulkemalla äänilähde mittauspinnan S [m^2] sisäpuolelle ja määrittämällä pintaan nähden kohtisuora intensiteettitasokeskiarvo L_I [dB]. Äänitehotaso saadaan yhtälöllä

$$(1.1.15) \quad L_W = L_I + 10 \cdot \log_{10} S$$

Jos äänikenttä on heijastukseton (vapaa kenttä), voidaan yhtälön **1.1.14** nojalla intensiteettitaso määrittää äänenpainetasosta, jolloin

$$(1.1.16) \quad L_W = L_p + 10 \cdot \log_{10} S$$

Koska ääniteho-, äänenpaine- ja intensiteettitasolla on sama yksikkö [dB], tunnollinen alaindeksien merkitseminen (L_W , L_p , L_I) on tärkeää kirjallisessa viestinnässä sekaannusten välttämiseksi. Esimerkiksi ekvivalentti A-painotettu äänenpainetaso aikajaksolla 07-22 tulisi merkitä $L_{pAeq,07-22}$.

1.2 Tasojen yhteenlasku

Interferenssillä tarkoitetaan resultanttiaaltoa, joka syntyy, kun vähintään kaksi aaltoa kohtaavat toisensa. Oletetaan, että tarkastelupisteeseen saapuu N kpl ääniaaltoja ajanhetkellä t , joiden kunkin äänenpaine on $p_n(t)$ noudattaen yhtälöä **1.1.1**. Äänenpaineidien interferenssi (resultantti) eli kokonaisäänepaine $p_{tot}(t)$ on

$$(1.2.1) \quad p_{tot}(t) = \sum_{n=1}^N p_n(t)$$

Tästä aiheutuvan äänenpainetaso $L_{p,tot}$ määrittämiseksi pitää tuntea kokonaisäänepaineen tehollisarvo.

Kahden äänenpaineen 1 ja 2 interferenssin tehollisarvon neliö on

$$(1.2.2) \quad \tilde{p}_{tot}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_{tot}^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [p_1(t) + p_2(t)]^2 dt = \tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2 + \frac{2}{T} \int_0^T p_1(t) p_2(t) dt$$

Kaksi ensimmäistä termiä voidaan saada selville mittaamalla aaltojen 1 ja 2 äänenpaine. Kolmannen termin suuruus sen sijaan riippuu aaltojen vaihe-erosta. Voidaan erottaa kolme tapausta riippuen äänilähteiden välisestä korrelaatiosta.

(i) Ei-korreloivat lähteet

Tapauksessa (i) äänilähteet 1 ja 2 ovat toisistaan täysin riippumattomia. Tämä on meluntorjunnassa yleisin ja tärkein tapaus. Äänenpainetulo on keskimäärin nolla, koska vaiheet ovat toisistaan riippumattomia. Siksi saadaan

$$(1.2.3) \quad \tilde{p}_{tot}^2 = \tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2$$

Jos aaltojen äänenpainetaso L_p tunnetaan, saadaan yhtälön 1.1.5 avulla muoto

$$(1.2.4) \quad \tilde{p}_{tot}^2 = \tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2 = p_0^2 \left(10^{L_{p,1}/10} + 10^{L_{p,2}/10} \right)$$

ja edelleen

$$(1.2.5) \quad \frac{\tilde{p}_{tot}^2}{p_0^2} = \left(10^{L_{p,1}/10} + 10^{L_{p,2}/10} \right)$$

josta ottamalla 10-kantainen logaritmi ja kertomalla 10:llä, saadaan kahden aallon kokonaisäänepainetasoksi

$$(1.2.6) \quad L_{p,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{L_{p,1}/10} + 10^{L_{p,2}/10} \right)$$

N kpl korreloimattoman äänilähteen yhteiseksi äänenpainetoksi saadaan

$$(1.2.7) \quad \tilde{p}_{tot}^2 = \sum_{n=1}^N \tilde{p}_n^2$$

ja äänenpainetasoksi

$$(1.2.8) \quad L_{p,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left[\sum_{n=1}^N 10^{L_{p,n}/10} \right]$$

Tätä yhtälöä kutsutaan ”**desibelien yhteenlaskentakaavaksi**”. Yhtälöä sovelletaan, kun halutaan laskea kahden tai useamman äänenpainetason summa. Yhtälöä voi soveltaa mille tahansa tasosuureelle, on sitten kyseessä äänenpaine-, intensiteetti- tai tehotaso. Yhtälöä voidaan soveltaa sekä yksittäisille taajuuskaistoille että samalla taajuuspainotetuksella oleville kokonaistasoille.

(ii) Identtiset lähteet, sama vaihe

Tapaus (ii) vastaa tilannetta, jossa äänilähteet korreloivat keskenään täydellisesti. Esimerkkinä on kaksi pisteäänilähdettä 1 ja 2, jotka tuottavat täsmälleen saman äänenpaineen (amplitudi ja vaihe sama). Tarkastellaan pisteäänilähteiden resultanttiaaltoa tarkastellaan pistelähteiden puolivälissä. Koska

$$(1.2.9) \quad p_1(t) = p_2(t)$$

yhtälön 1.2.2 kolmanneksi termiksi saadaan

$$(1.2.10) \quad \tilde{p}_{tot}^2 = 4 \tilde{p}_1^2$$

Yhtälön mukainen tilanne vastaa *konstruktivista interferenssiä* eli aaltojen täydellistä vahvistumista. Äänenpainetasoksi saadaan

$$(1.2.11) \quad L_{p,tot} = 10 \log_{10} \frac{4 \tilde{p}_1^2}{p_0^2} = L_{p,1} + 6 \text{ dB}$$

Tapauksen 2 tärkeä sovellus on seisova aalto. Jos äänenpaine 1 osuu heijastavaan pintaan, on äänenpainetaso aivan heijastavan pinnan tuntumassa (oltaessa alle 1/10 aallonpituuden etäisyydellä pinnasta) 6 dB suurempi kuin pintaan osuneen aallon äänenpainetaso samassa pisteessä ilman heijastavaa pintaa, koska heijastava pinta tuottaa äänenpaineen 2, jolla on sama amplitudi ja vaihe kuin äänenpaineella 1. Kuuden desibelin

heijastusvahvistus havaitaan sitä etäämmällä heijastavasta pinnasta mitä pienempi on äänen taajuus.

(iii) Identtiset lähteet, vastakkainen vaihe

Tapauksessa (iii) äänilähteiden 1 ja 2 vaihesiirrot φ_1 ja φ_2 poikkeavat 180 astetta. Jos edelleen oletetaan, että äänenpainoiden 1 ja 2 amplitudit ovat samat, vallitsee

$$(1.2.12) \quad p_1(t) = -p_2(t).$$

Äänenpaineeeksi saadaan yhtälöstä 1.2.2 tällöin

$$(1.2.13) \quad \tilde{p}_{tot}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [p_1(t) + p_2(t)]^2 dt = 0$$

ja kokonaisäänepainetasoksi

$$(1.2.14) \quad L_{p,tot} = -\infty$$

Tämä vastaa *destruktiivista interferenssiä*, jossa aallot 1 ja 2 kumoavat toisensa. Tähän pyritään vastaäänisovelluksissa (*active noise control*) ja resonaattoreissa.

1.3 Desibelyhteenlaskun sovelluksia

1.3.1 TASOJEN KESKIJARVO

Tasojen keskiarvoja pitää laskea esimerkiksi seuraavissa tilanteissa:

- Terssikaista-arvoista halutaan määrittää oktaavikaista-arvoja
- Useista äänitasomittauksista halutaan määrittää keskiarvo

Keskiarvo määritetään yhtälöllä

$$(1.3.1) \quad L_{p,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{L_{p,n}/10} \right]$$

1.3.2 TAUSTAMELUKORJAUS

Tarkastellaan äänilähdettä 1, jonka mittaamista häiritsee taustamelu, joka merkitään lähteeksi 2. Jos äänilähteiden 1 ja 2 yhteinen äänenpainetaso on $L_{p,tot}$ [dB], ja taustamelun äänenpainetaso on $L_{p,2}$ [dB], saadaan äänilähteen 1 äänenpainetasoksi

$$(1.3.2) \quad L_{p,1} = 10 \log_{10} \left(10^{L_{p,tot}/10} - 10^{L_{p,2}/10} \right)$$

Taustamelukorjauksen eli äänenpainetasoon $L_{p,tot}$ tehdyn korjauksen suurin sallittu arvo on -3.0 dB (*kartoitustyyppiset mittaukset*) ja -1.3 dB (*tarkkuusmittaukset*).

1.3.3 EKVIVALENTTITASO

Merkittävä osa melua koskevista määräyksistä, ohjeista ja suosituksista koskee ekvivalenttia äänenpainetasoa eli äänenpainetasoajan aikakeskiarvoa tietyllä ajanjaksolla T .

Äänisignaalin ekvivalenttitasolla $L_{eq,T}$ tarkoitetaan tasaisena pysyvän signaalin Y tasoa, joka on energialtaan ekvivalentti äänisignaalin ajanjakson T yli määritetyn tason aikakeskiarvon kanssa. Ekvivalenttitaso äänenpaineeelle saadaan yhtälöstä

$$(1.3.3) \quad L_{p,eq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right)$$

Jos tunnetaan äänenpainetaso ajan funktiona, saadaan ekvivalenttitaso yhtälöstä

$$(1.3.4) \quad L_{p,eq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right)$$

Jos tunnetaan ekvivalenttitaso L_{eq,T_i} aikajaksoilla T_i , ekvivalenttitasoksi saadaan:

$$(1.3.5) \quad L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^N T_i} \sum_{i=1}^N T_i \cdot 10^{L_{eq,T_i}/10} \right]$$

Ekvivalenttitaso voidaan määrittää myös intensiteetti- tai äänitehotasolle.

Esimerkiksi ympäristömelua tarkastellaan Suomen lainsäädännön mukaan erikseen päiväaikaan (klo 07–22, $T=15$ h) ja yöaikaan (klo 22–07, $T=9$ h). Työpaikkamelua taas tarkastellaan yleensä 8 tunnin ajalta.

1.4 Taajuusanalyysi

Tarkastellaan tilannetta, jossa mäntä värähtelee ilmatäytteisessä putkessa harmonisesti f kertaa sekunnissa. Tämä aiheuttaa putkeen pitkittäisen tasoallon (kuva 1.1.1a). Männän liikenopeus vastaa tasoallon värähtelyn hiukkasnopeutta u ja se on vektorisuure. Pitkittäisen aaltoliikkeen aallonpituus λ [m] on

$$(1.4.1) \quad \lambda = c_0 T = \frac{c_0}{f}$$

missä c_0 [m/s] on äänen etenemisnopeus ilmassa ja f on taajuus [Hz].

Ympäristössämme esiintyvät äänet sisältävät yleensä useita taajuuskomponentteja. Vain tietyt vihellysäänet ovat vain yhtä taajuuskomponenttia sisältäviä. Kaikki periodiset signaalit voidaan esittää harmonisten signaalien summana. Periodinen signaali toistaa itseään ajanjaksolla T

$$(1.4.2) \quad p(t) = p(t + nT), n = 1, 2, 3, \dots$$

Likimain periodiset signaalit ovat yleisiä teknisissä sovelluksissa. Esimerkiksi koneiden äänet syntyvät pyörivien osien muodostamista periodisista värähtelyistä sekä jaksollisista painealloista. Vaihtelevakin ääni ovat likimain periodinen, kun ääntä tarkastellaan tarpeeksi lyhyessä aikaikkunassa.

Fourierin periaatteen mukaan jokainen periodinen signaali voidaan ilmaista N kpl harmonisten signaalien summana ns. Fourier -sarjan muodossa

$$(1.4.3) \quad p(t) = \sum_{n=1}^N \hat{p}_n \cos(2\pi n f_0 t + \varphi_n)$$

missä \hat{p}_n on harmonisen signaalikomponentin n huippuarvo ja $f_0 = 1/T$. Yhtälössä $n f_0$ ovat perustaajuuden harmonisia kerrannaisia ja φ_n on komponentin vaihe-ero. FFT-analyysillä (*Fast Fourier Transform*) voidaan selvittää kunkin taajuuden amplitudi.

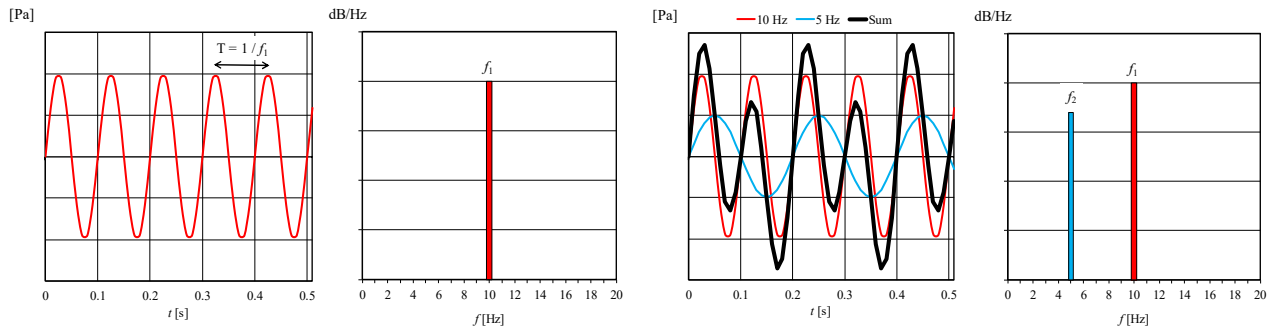
Kuvassa 1.4.1 on esimerkkejä yhden ja kahden siniaallon signaali- ja taajuusanalyyseistä. Jos FFT-analyysin taajuusresoluutioksi valitaan 1 Hz, saadaan 19980 datapistettä, kun analysoidaan tavanomainen kuuloalue 20–20000 Hz. Tällainen informaatiomäärä ei ole raportoitavissa helposti. Meluntorjunnassa tulokset esitetään ensisijaisesti prosenttikaistasuodattimia käyttäen FFT-analyysin sijaan (kuva 1.4.2), jotta informaatiota olisi vähemmän mutta useimpia tarpeita ajatellen riittävästi. Oktaavi- ja kolmasosaoktaavisuodattimet ovat prosenttikaistasuodattimia. Taajuusanalyysaattorilla määritetyt prosenttikaista-arvot perustuvat kuitenkin FFT-analyysiin.

Kuvassa 1.4.2 on esitetty prosenttikaistojen matemaattiset määritelmät, keskitaajuudet ja taajuuskaistat. Yhteen oktaavikaistaan sisältyy kolme kolmasosaoktaavi- eli terssikaistaa. Oktaavikaistan taso L_o voidaan muodostaa oktaavikaistan sisältämien kolmen terssikaistan $L_{t,i}$ tasosta summaamalla

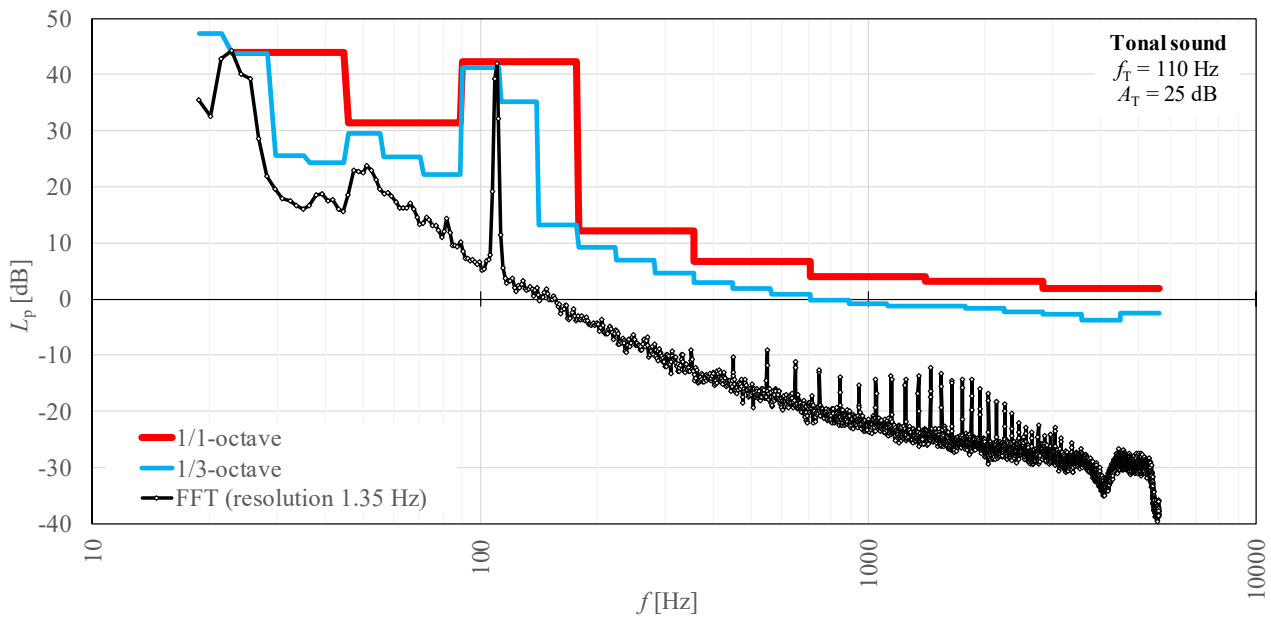
$$(1.4.4) \quad L_o = 10 \log_{10} \sum_{i=n-1}^{n+1} 10^{L_{t,i}/10}$$

Taulukossa 1.4.1 on esitetty standardisoidut keskitaajuudet ja taajuuskaistat, jotka poikkeavat hieman

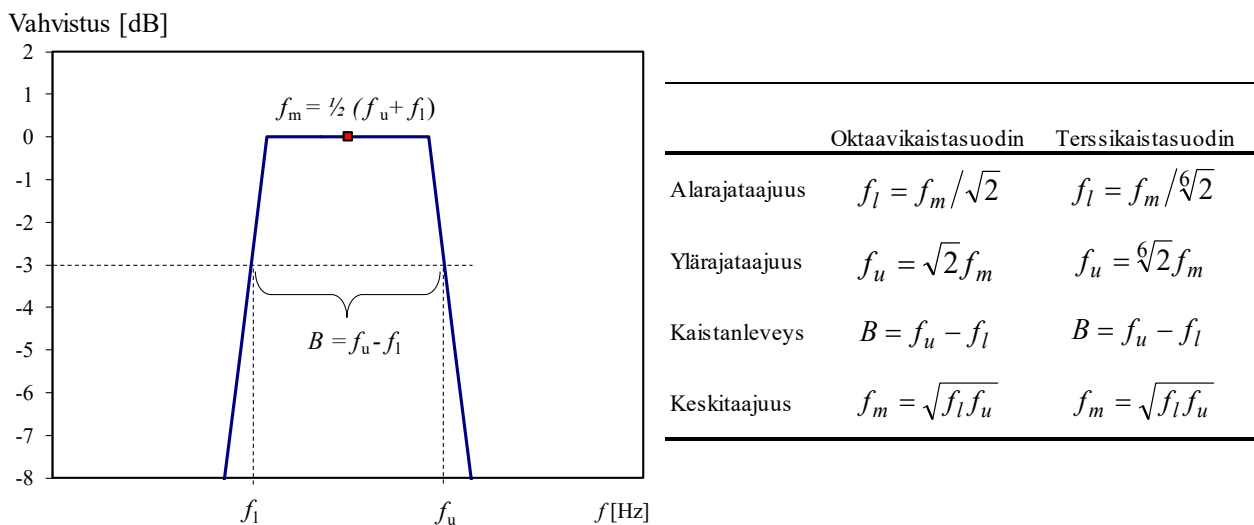
matemaattisista määritelmistä mutta näitä käytetään kaikissa meluntorjunnan sovelluksissa.



Kuva 1.4.1 (Yläriivi) Harmonisen siniaallon (10 Hz) äänenpaine ajan funktiona ja äänenpainetaso taajuuden funktiona. (Alarivi) Kaksi amplitudiltaan ja taajuudeltaan erilaista siniaalloa ja niiden summa.



Kuva 1.4.2 Eräästä tonaalisesta äänestä tehty FFT-, terssikaista- ja oktaavikaista-analyysi.



Kuva 1.4.3 Taajuussuotimen ominaisuuksien kuvaamisessa käytettävät tunnusluvut ovat ylärajataajuus f_u , alarajataajuus f_l , kaistanleveys B ja keskitaajuus f_m .

Taulukko 1.4.1 Oktaavi- ja terssikaistojen nimellisarvot. Perättäiset oktaavikaistat ovat eri taustaväreillä. Oktaavikaistojen keskitaajuudet on lihavoitu.

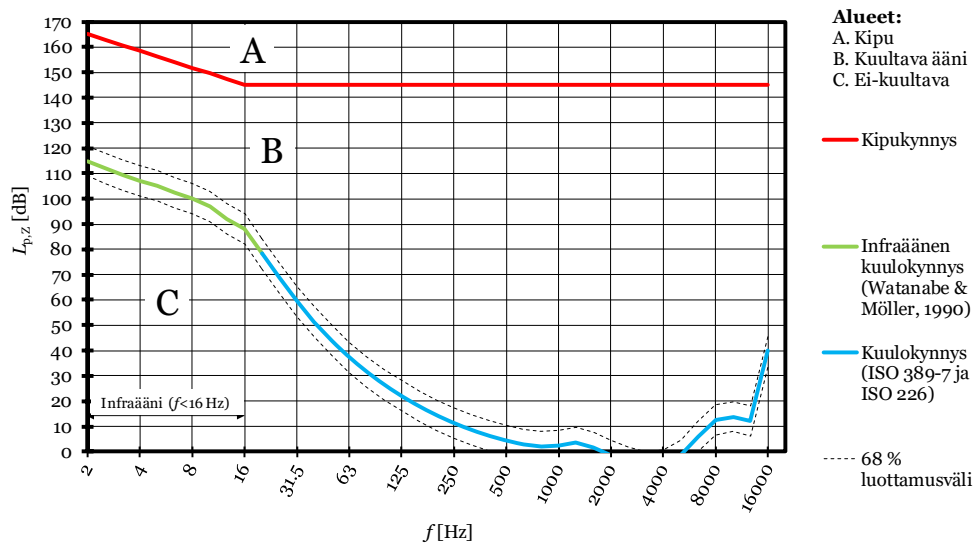
f_m	Terssikaista	Oktaavikaista	f_m	Terssikaista	Oktaavikaista
1.6	1.41 - 1.78		200	178 - 224	
2	1.78 - 2.24	1.41 - 2.82	250	224 - 282	178 - 355
2.5	2.24 - 2.82		315	282 - 355	
3.15	2.82 - 3.55		400	355 - 447	
4	3.55 - 4.47	2.82 - 5.62	500	447 - 562	355 - 708
5	4.47 - 5.62		630	562 - 708	
6.3	5.62 - 7.08		800	708 - 891	
8	7.08 - 8.91	5.62 - 11.2	1000	891 - 1120	708 - 1410
10	8.91 - 11.2		1250	1120 - 1410	
12.5	11.2 - 14.1		1600	1410 - 1780	
16	14.1 - 17.8	11.2 - 22.4	2000	1780 - 2240	1410 - 2820
20	17.8 - 22.4		2500	2240 - 2820	
25	22.4 - 28.2		3150	2820 - 3550	
31.5	28.2 - 35.5	22.4 - 44.7	4000	3550 - 4470	2820 - 5620
40	35.5 - 44.7		5000	4470 - 5620	
50	44.7 - 56.2		6300	5620 - 7080	
63	56.2 - 70.8	44.7 - 89.1	8000	7080 - 8910	5620 - 11200
80	70.8 - 89.1		10000	8910 - 11200	
100	89.1 - 112		12500	11200 - 14100	
125	112 - 141	89.1 - 178	16000	14100 - 17800	11200 - 22400
160	141 - 178		20000	17800 - 22400	

1.5 Kuulokynnys ja vakioäänekkyyskäyrät

Kuulokynnyksellä (*hearing threshold*, HT) tarkoitetaan alinta äänenpainetasoa, jonka ihminen voi kuulla. Eniten kuulokynnystä on tutkittu taajuuksilla 20–16000 Hz. Nämä tulokset on koottu standardiin ISO 389-7 ja ISO 226. Kuulokynnys on kuitenkin määritelty myös taajuusalueelta 2–16 Hz.

Kuvassa **1.5.1** on esitetty standardisoitu kuulokynnys ja infraäänien kuulokynnys. Standardoidut arvot on myös taulukossa **1.5.1**. Kuuloaistin herkkyys on hyvin erilainen eri taajuuksilla. Kuulo on herkimmillään taajuuksilla 250–8000 Hz, johon puheääni pääosin sijoittuu. Tämän alueen ulkopuolella kuulokynnys alkaa nousta. Kuulokynnyksellä tarkoitetaan tässä normaalikuuloisen nuoren aikuisen (18 -vuotias) kuulokynnystä. Iän myötä kuulokynnys nousee erityisesti suurilla taajuuksilla.

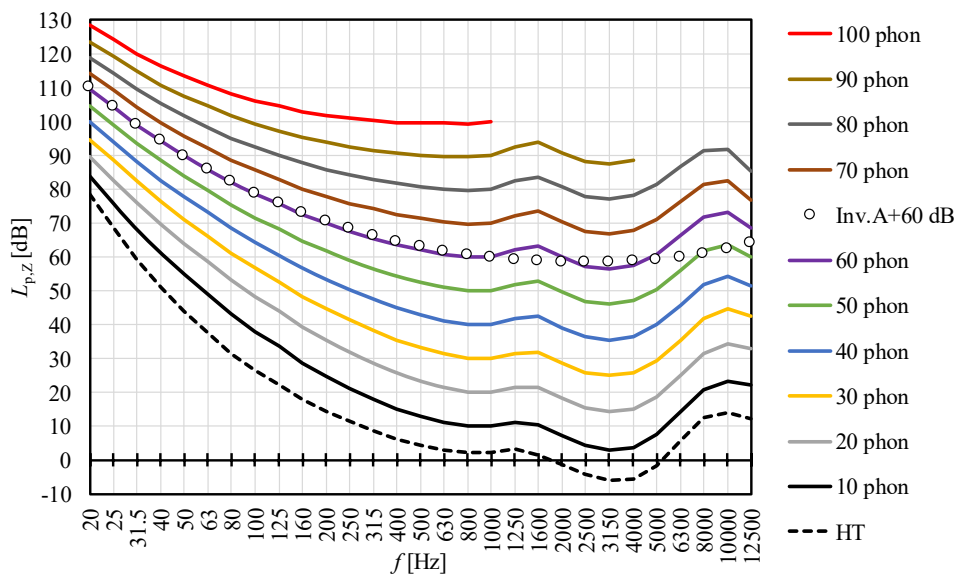
Standardisoidut vakioäänekkyyskäyrät on esitetty kuvassa **1.5.2**. Vakioäänekkyyskäyrä tarkoittaa, että samalla käyrällä sijaitsevat siniäännet koetaan yhtä äänekkäinä. Äänekkyuden yksikkö on foni (*phon*). Vakioäänekkyyskäyrät perustuvat useisiin riippumattomiin psykoakustisiin laboratoriokokeisiin. Tietoa on ollut riittävästi saatavilla taajuusalueelta 20–12500 Hz, joten tämä alue on standardoitu. Kuuloaistia sanotaan epälineaariseksi, koska vakioäänekkyyskäyrät ovat eri äänenvoimakkuuksilla eri muotoisia ja vakioäänekkyyskäyrät sijaitsevat eri taajuuksilla eri etäisyyksillä toisistaan. Esimerkiksi viiden desibelin äänenpainetason korotus 20 Hz:llä tuntuu yhtä voimakkaalta kuin kymmenen desibelin äänenpainetason korotus 1000 Hz:llä. Kipukynnys on erittäin yksilöllinen ja siitä on vähemmän tutkimustietoa kuin kuulokynnyksestä tai vakioäänekkyyskäyrästä.



Kuva 1.5.1. Nuoren normaalikuuloisen aikuisen kuulokynnyksen ja kipukynnyksen painottamaton äänenpainetaso $L_{p,z}$ taajuuden f funktiona. Sinivihreän viivan alapuolinen äänenpainetaso on ”ei-kuultava” (C), sinivihreän alueen yläpuolinen alue punaiseen viivaan asti kuultava äänenpainetaso (B) ja punaisen alueen yläpuolinen kipua tuottava äänenpainetaso (A).

Taulukko 1.5.1. ISO 389-7 mukainen standardisoitu kuulokynnys. Kuulokynnys on määritetty suoraan edestä kuuluvalle siniäänelle, jota kuunnellaan kaksikorvaisesti (*free field listening, frontal incidence*). Jos ääni on laajakaistaista, kuulokynnysarvot ovat tässä esitettyä noin 5 dB korkeampia.

f [Hz]	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
HT [dB]	78.5	68.7	59.5	51.1	44.0	37.5	31.5	26.5	22.1	17.9	14.4	11.4	8.6	6.2	4.4
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000
HT [dB]	3.0	2.2	2.4	3.5	1.7	-1.3	-4.2	-6.0	-5.4	-1.5	6.0	12.6	13.9	12.3	40.2



Kuva 1.5.2. Vakioäänekkyyskäyrien painottamaton äänenpainetaso $L_{p,z}$ taajuuden f funktiona ISO 226 standardin mukaan (viivat). Lisäksi on esitetty kuulokynnys (HT) sekä käänteinen A-painotuskäyrä, johon on lisätty 60 dB (Inv.A+60dB). Se näyttää seuraavan 60 phonin käyrää.

1.6 Taajuuspainotukset

Meluntorjunnassa käytetään taajuuspainotuksia, kun halutaan esittää kokonaisäänepainetaso tietyltä taajuuskaistalta yksilukuarvoa käyttäen. Tärkeimmät painotukset ovat Z, A ja C.

- Z-painotuksella tarkoitetaan lineaarista eli painottamatonta tasoa taajuusvälillä 10–20000 Hz, joten sitä käytetään tässä oppikirjassa aina, kun tarkoitetaan painottamatonta tasoa.
- A-painotusta käytetään, kun halutaan arvioida sitä, miten äänekkäänä ihminen kokee äänen.
- Voimakkaan impulssimelun ja pientaajuisen melun arvioinnissa käytetään joskus C-painotusta.

Muitakin painotuksia on olemassa (B, D, E, F, G) mutta niitä ei käytetä suomalaisissa ohjeistoissa.

A- ja C-painotusarvot on esitetty taulukossa **1.6.1** terssikaistoittain. Taajuuskaistan i A-painotettu arvo saadaan lisäämällä kyseisen taajuuskaistan painotusarvo A_i lineaarisen taajuuskaistan tasoon $L_{Z,i}$:

$$(1.6.1) \quad L_{A,i} = L_{Z,i} + L_{A,i}$$

A-painotettu kokonaisäänepainetaso N -kpl taajuuskaistoja sisältävälle taajuusalueelle lasketaan yhtälöllä

$$(1.6.2) \quad L_{A,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{(L_{A,i})/10} \right)$$

Vastaavasti taajuuskaistan i C-painotettu arvo saadaan lisäämällä kyseisen taajuuskaistan painotusarvo C_i lineaarisen taajuuskaistan tasoon $L_{Z,i}$:

$$(1.6.3) \quad L_{C,i} = L_{Z,i} + L_{C,i}$$

C-painotettu kokonaisäänepainetaso N -kpl taajuuskaistoja sisältävälle taajuusalueelle lasketaan yhtälöllä

$$(1.6.4) \quad L_{C,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{(L_{C,i})/10} \right)$$

A-painotus on kompromissi vakioäänekkyyskäyristä. A-painotus istuu parhaiten 60 phonin käyrään. Tästä johtuen A-painotus ei välttämättä kuvaa koettua äänekkyyttä hyvin 60 phonia hiljaisemmilla tai voimakkaammilla äänillä. C-painotus ei perustu vakioäänekkyyskäyriin.

Melumittarin A- tai C-painotus tarkastelee lähtökohtaisesti taajuusaluetta 20–20000 Hz. Meluntorjunnan eri sovelluksissa ja tuotespesifikaatioissa käytetään usein kapeampia taajuusalueita. Esimerkiksi

- ilmanvaihdon äänilaskelmat: oktaavikaistat 63–8000
- ilma- ja askelääneneristävyysmittaukset: mittaukset terssikaistoilla 50–5000 Hz
- absorptiosuhdemittaukset: terssikaistat 100–5000 Hz, ilmoitusarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz
- puheensiirtoindeksi: oktaavikaistat 125–8000 Hz

Tämän vuoksi on laskelmiin merkittävä, miltä taajuusalueelta painotettu kokonaisäänitaso on määritetty. Jos ääntä esiintyy merkittävästi tarkasteltavan taajuusalueen ulkopuolella, tarkasteltavan taajuusalueen kokonaisäänitaso aliarvioi kuultavaa äänenpainetasoa. Tällainen virhe voi tapahtua esimerkiksi silloin, jos rakennuksen julkisivun ilmaääneneristykseen mitoituslaskelmat on tehty taajuusalueella 50–5000 Hz, josta julkisivurakenteen ilmaääneneristysarvoja on saatavilla, mutta kuultavaa ympäristömelua esiintyy merkittävässä määrin 50 Hz:n alapuolella.

On huomattava, että $L_{A,tot}$ voi olla korkeampi kuin $L_{Z,tot}$, jos melu keskittyy taajuusalueelle 1–5 kHz.

A-painotetun arvon huomioiminen ei ole mielekästä sellaisilla taajuuskaistoilla, joilla lineaarinen äänenpainetaso ei ylitä taulukon **1.5.1** kuulokynnystä. Tällä on merkitystä, kun arvioidaan esimerkiksi hiljaisten laitteiden melupäästöarvojen ilmoittamista tai pientaajuuksiin painottuvan melun mittaustulosten esittämistä. Näistä tilanteista ei ole olemassa standardinmukaista ohjeistusta, joten käytännöt vaihtelevat.

Taulukko 1.6.1. Standardoidut A- ja C-painotuskertoimet eri terssikaistoille f_i . Oktaavikaistoja käytettäessä sovelletaan lihavoituja arvoja. Z-painotuksen painotuskerroin Z_i on kaikilla terssikaistoilla 0 dB.

i	f_n [Hz]	A_i [dB]	C_i [dB]	i	f_n [Hz]	A_i [dB]	C_i [dB]
1	20	-50.4	-6.2	17	800	-0.8	0.0
2	25	-44.7	-4.4	18	1000	0.0	0.0
3	31.50	-39.4	-3.0	19	1250	0.6	0.0
4	40	-34.6	-2.0	20	1600	1.0	-0.1
5	50	-30.2	-1.3	21	2000	1.2	-0.2
6	63	-26.2	-0.8	22	2500	1.3	-0.3
7	80	-22.5	-0.5	23	3150	1.2	-0.5
8	100	-19.1	-0.3	24	4000	1.0	-0.8
9	125	-16.1	-0.2	25	5000	0.5	-1.3
10	160	-13.4	-0.1	26	6300	-0.1	-2.0
11	200	-10.9	0.0	27	8000	-1.1	-3.0
12	250	-8.6	0.0	28	10000	-2.5	-4.4
13	315	-6.6	0.0	29	12500	-4.3	-6.2
14	400	-4.8	0.0	30	16000	-6.6	-8.5
15	500	-3.2	0.0	31	20000	-9.3	-11.2
16	630	-1.9	0.0				

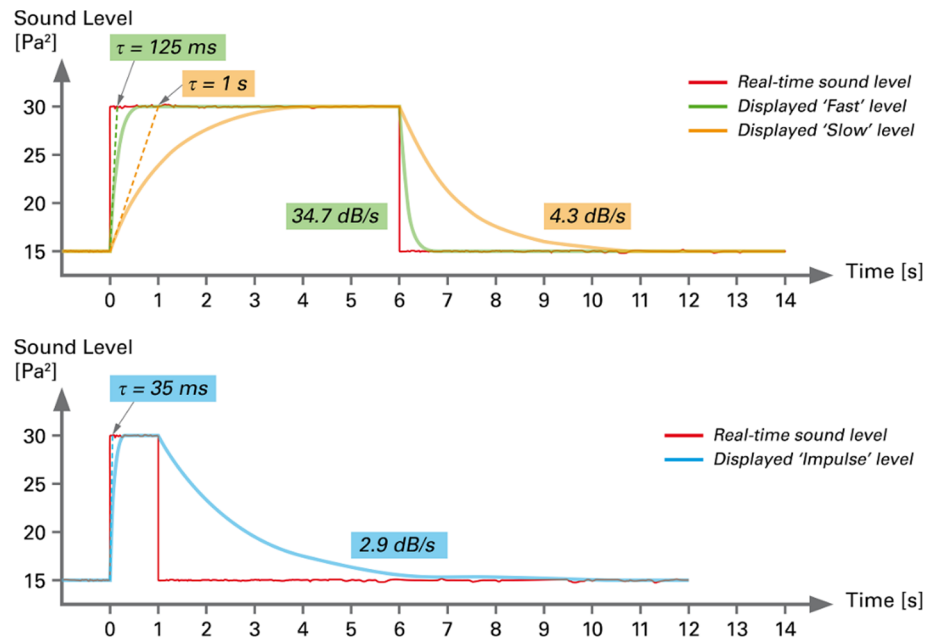
1.7 Aikapainotukset

Äänenpainetason mittauksissa edellytetään usein IEC 61672-1 standardin mukaista aikapainotusta. Vaihtoehdot ovat F (Fast) ja S (Slow). Aikapainotuksiin sisältyvät eripituiset nousu- ja laskuaikavakiot ($\tau=125$ ms ja $\tau=1000$ ms). Aikapainotusten toimintaa on kuvattu kuvassa 1.7.1. Äänenpainetason porrasmuutoksen tapauksessa F-aikapainotuksella kestää noin 0.5 sekuntia ja S-aikapainotuksella noin 4 sekuntia saavuttaa portaan maksimiäänepainetaso. Aikapainotukset ovat symmetrisiä eli nousu- ja laskuaikavakiot ovat samat.

Fast-aikavakion ajatellaan vastaavan hyvin sitä, miten nopeasti ihminen aistii muutoksia äänenpainetasossa. Siksi elinympäristön maksimiäänitasoja mitataan yleensä Fast-aikapainotusta käyttäen. Fast-aikavakiota seuraava äänitasomittari päivittää lukemaa silmän rekisteröintikykyä nopeammin. Hitaampi Slow-aikapainotus kehitettiin, jotta analogimittareiden viisaria olisi helpompi seurata vaihtelevan melun tapauksessa. Slow-aikapainotukselle löytyy edelleen käyttötarkoitus esimerkiksi lyhytkestoisten ja ei-impulssimaisten melutapahtumien, kuten ratakaluston ohiajon äänitason arvioinnissa.

Suuren nousunopeuden omaavan impulssimelun (>100 dB/s) kuulovaurioriskin arviointiin Fast-aikavakio katsottiin liian hitaaksi. Tätä varten kehitettiin I (Imp) aikapainotus, joka on epäsymmetrinen: nousu- ja laskuaikavakiot ovat 35 ja 1500 ms. Impulssiaikavakiota ei tueta enää uusissa äänitasomittareissa. Impulssimelun kuulovaurioriskiä arvioitaessa mittausajalta määritetään huippuäänepainetaso $L_{\text{peak,max}}$ käyttäen näytteenottoväliä 44 kHz eikä erillistä aikapainotusta silloin tarvita.

Aikavakio ja näytteenottoväli eivät ole sama asia. Yleensä Fast-aikavakiolla tehtävä äänitasoseuranta päivitetään 125 ms välein eli näytteenottoväli on sama kuin Fast-aikavakion nousuaikavakio. Näin ei kuitenkaan tarvitse aina olla. Esimerkiksi impulssimaista melua arvioitaessa NT ACOU 112 (Nordtest, 2002) mukaan näytteenoton tulee tapahtua 10–20 ms välein, jotta äänenpainetason nopeita muutoksia voidaan analysoida tarkemmin.



Kuva 1.7.1. Fast, Slow ja Impulse aikavakioiden käytöstä porraskäyrille. NTi-Audio AG is appreciated (nti-audio.com).

KIRJALLISUUS

Boden, H. et al. (2002). Ljud och Vibrationer, Kungl Tekniska Högskolan, Marcus Wallenberg Laboratoriet, Stockholm, Sweden.

RIL 243-1-2007 (2007). Rakennusten akustinen suunnittelu. Akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry., 224 s, Helsinki.

2 Ympäristömelu

Tässä luvussa keskitytään ympäristömelun leviämisen tarkasteluun. Meluntorjuntakeinot luetellaan mutta niitä ei käsitellä yksityiskohtaisemmin.

2.1 Ympäristömelun lajit ja meluntorjuntakeinot

Melulla tarkoitetaan ei-toivottua ääntä. Äänen katsominen meluksi on yksilöllistä ja tilanneriippuvaista. Ääni katsotaan yleensä meluksi, jos se on itselle tarpeetonta ja häiritsee omaa käynnissä olevaa aktiviteettia. Ympäristöstä kuuluva ihmisten tai laitteiden toiminnasta aiheutuva ääni koetaan usein meluksi, jos se ylittää äänenpainetasolle annetut ohjearvot. Tai kääntäen, ohjearvot on laadittu siten, että ohjearvojen alapuolelle sijoittuva ääni koetaan harvoin haitalliseksi meluksi.

Vaikka ympäristömelulle altistutaan työssä, vapaa-ajan ympäristöissä ja asuinrakennuksissa, ympäristömelun vaikutuksia tarkastellaan ensisijaisesti asuinrakennuksissa ja niiden pihamailla.

Ympäristömelun aiheuttajia ovat mm.

- Tieliikenne
- Lentoliikenne
- Raideliikenne
- Vesiliikenne
- Teollisuus ja voimalaitokset
- Infrarakentamisen työmaat: räjäytykset, louhinta, kiviainestuotanto
- Rakennustyömaat
- Ampumaradat ja raskaiden aseiden ampuma-alueet
- Moottoriajoradat
- Logistiikkakeskukset, raide, tie- ja lentoliikenteen asemat, rahtaus, satamat
- Tavanomaisten rakennusten LVIS-laitteet (ympäristöön suuntautuva ääni)
- Yleisötaphtumat

Ääni kantautuu kuulijalle yleensä ilmateitse mutta maanpinnan värähtely voi myös aiheuttaa rakennuksen rungossa niin voimakasta värähtelyä, joka voidaan kuulla (runkoääni).

Kutakin ympäristömelun lajia koskee oma lainsäädäntö sekä mittaus- ja mallinnusmenettelyt. Määräykset ja ohjeet on koottu **liitteeseen 1**. Ympäristömelu ei saa ylittää niissä esitettyjä ohjearvoja.

Meluntorjuntakeinoja ovat mm.

- **Maankäytön suunnittelu.** Uudet äänilähteet sijoitetaan mahdollisimman kauas altistuvista alueista. Uudet altistuvat alueet sijoitetaan mahdollisimman kauas äänilähteistä.
- **Rakennusmassojen sijoittelu.** Altistuvan kohteen ja melulähteen väliin sijoitetaan sellaisia rakennuksia, joissa altistuksen raja-arvoja ei ole tai ne ovat suurempia. Tällaisia ovat esimerkiksi yritysten toimitilat ja autotallit.
- **Käyttöajan rajoitus.** Äänilähteen melupäästöä voidaan rajoittaa asettamalla melupäästön tuottoajankohtiin liittyviä rajoituksia. Tällaisia ovat mm. iltaan, yöhön tai viikonloppuihin liittyvät ympäristöluvassa mainitut toimintakiellot.
- **Ääniemission rajoitus.** Äänilähteen melupäästöä voidaan joissakin tapauksissa pienentää suoraan tuotantotehoa pienentämällä. Tieliikenteen melua voidaan pienentää rajoittamalla liikennemäärää, ajoneuvotyyppejä ja nopeutta.
- **Tekninen meluntorjunta.** Paikallaan pysyvien äänilähteiden melupäästöä on mahdollista vaimentaa paikanpäälle rakennettavilla teknisillä meluntorjuntaratkaisilla kuten melukoteloilla tai äänenvaimentimilla.
- **Hiljaisempien laitteiden valinta tai valintaan kannustaminen.** Meluvaikutusten tehokkain keino on hiljaisempien äänilähteiden hankinta. Esimerkiksi lentokoneiden äänitehotasot ovat pienentyneet jopa 10 dB, koska monet lentokentät ovat asettaneet liikennemaksuja melupäästön mukaan.
- **Melun leviämisen rajoittaminen.** Äänilähteen ja altistuvan alueen väliin voidaan sijoittaa esimerkiksi meluste (melukaide, meluseinä tai maavalli) tai äänilähteen paikka voidaan valita niin,

että olemassaolevilla maanmuodoilla voidaan saavuttaa meluesteen kaltainen vaikutus. Melueste ei saa aiheuttaa ohjearvojen ylittymistä jossain toisessa suunnassa siitä tapahtuvien heijastusten vuoksi.

- **Julkisivun ääneneristys.** Julkisivurakenteella voidaan vaikuttaa rakennuksen sisälle kuuluvaan äänenpainetasoon merkittävästi. Avoin ikkuna vaimentaa melua noin 15 dB. Parhaat mahdolliset ikkunalliset julkisivut vaimentavat ääntä jopa yli 45 dB L_{Aeq} .
- **Parvekkeen ääneneristys.** Parveke katsotaan piha-alueeksi. Parvekelasituksilta voidaan vaatia äänitasoeroja jopa tasoon $\Delta L=15$ dB L_{Aeq} asti (Kovalainen ja Kylliäinen, 2016).
- **Kiinteistön omistajanvaihdos.** Meluntorjunta toteutuu myös, jos altistuvien ihmisten määrä pienenee. Joissakin tapauksissa melun aiheuttaja tai kunta voi ostaa tai pakkolunastaa kiinteistön, jossa meluongelmia on koettu, koska muiden meluntorjuntakeinojen soveltaminen on kalliimpaa tai mahdotonta. Ääni jää mutta meluvaikutukset poistuvat.

2.2 Melun tunnusluvut

Suomalaisessa ympäristömelua ja rakentamista koskevassa lainsäädännössä on käytössä seuraaviin tunnuslukuihin liittyviä ohje- tai toimenpidearvoja:

- $L_{Aeq,T}$, eli A-painotettu keskiäänitaso ajanjaksolla T (**luku 1**);
- L_{prms} , eli slow-aikavakiolla mitattu A-painotettu runkomelun enimmäisäänitaso L_{ASmax} (Ympäristöministeriö, 2017);
- L_{AFmax} , eli fast-aikavakiolla mitattu A-painotettu enimmäisäänitaso (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2015; Ympäristöministeriö, 2017);
- $L_{eq,1h,f}$, painottamaton ekvivalentti tunnin enimmäisäänepainetaso terssikaistalla f (taajuudet 20–200 Hz) (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2015);
- L_{Rden} , eli vuosikeskiäänitaso, joka on vuorokausimelutaso, johon on tehty 15 dB:n impulssimelukurjaus ja 5 dB:n viikonloppukurjaus (Valtioneuvosto, 2017);
- L_{AE} , eli melutapahtuman aiheuttama A-painotettu äänialtistustaso (Valvira 2016);
- L_{CE} , eli raskaiden aseiden ja räjäytystoiminnan aiheuttama C-painotettu äänialtistustaso (Valtioneuvosto, 2017);
- L_{AImax} , eli impulssiaikavakiolla mitattu A-painotettu enimmäisäänepainetaso (Valtioneuvosto, 1997)

Suomessa on asetettu ohjearvoja erikseen yö- ja päiväajan ekvivalentille A-painotetulle äänenpainetasolle. Melun terveysvaikutusten arvioimisessa on edullisinta käyttää yhtä lukuarvoa. Melualtistuksen kuvaamisessa käytetään yhä useammin *vuorokausimelutasoja*, jotka pohjautuvat vuorokauden eri osien A-painotettuihin ekvivalenttitasoihin. Mm. ympäristömeludirektiivin mukaisissa meluselvityksissä käytetään päivä-iltayömelutasoa L_{den} .

Päivä-yö-melutasossa L_{dn} [dB] (*day, night*) yöajan keskiäänitaso sisältää +10 dB:n sanktion (korjaus, *penalty, adjustment*):

$$(2.2.1) \quad L_{dn} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 \cdot 10^{L_{A,eq,07-22}/10} + 9 \cdot 10^{(L_{A,eq,22-07}+10)/10} \right) \right]$$

Päivä-ilta-yömelutasossa L_{den} [dB] (*day, evening, night*) ilta-aikaan (klo 19–22) sisällytetään edellisen lisäksi +5 dB:n sanktio:

$$(2.2.2) \quad L_{den} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{L_{A,eq,07-19}/10} + 3 \cdot 10^{(L_{A,eq,19-22}+5)/10} + 9 \cdot 10^{(L_{A,eq,22-07}+10)/10} \right) \right]$$

Käsitykset päivä-, ilta- ja yöajan kestoista vaihtelevat eri maissa mutta periaate on sama.

Ekvivalenttitaso soveltuu esimerkiksi junan ohiajomelun mittaukseen huonosti. Tietyn junatyypin (tietty nopeus, pituus ja kalusto) melua kuvataan äänialtistustasolla L_{AE} [dB] (*sound exposure level*):

$$(2.2.3) \quad L_{AE} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{t_0} \right)$$

missä $t_0 = 1$ s. Äänialtistustaso kertoo siis A-painotetun äänenpainetason, joka sekunnin kestäväällä äänitapahtumalla tulisi olla, jotta se olisi kokonaisenergialtaan sama, kuin ajanjakson T kestäväällä

äänitapahtumalla, jonka A-painotettu ekvivalenttitaso on $L_{Aeq,T}$ [dB]. Äänialtistustasoa käytetään myös raskaiden aseiden, räjäytysten ja lentokoneiden ylilentojen mittauksissa.

2.3 Geometrinen vaimentuminen

Tässä luvussa ei huomioida ilmakehän absorptiota ja maanpinnan heijastusta.

(i) Pistemäinen äänilähde

Äänilähde voidaan katsoa pistemäiseksi, kun äänilähteen suurin halkaisija on 5–10 kertaa pienempi kuin tarkastelupisteen etäisyys äänilähteen keskipisteeseen. Lisäksi tarkastelupisteen tulee sijaita vähintään aallonpituuden päässä äänilähteestä, koska lähikentässä voi olla pyörteitä. Pyörteet johtuvat säteilevän pinnan eri osien välisestä vuorovaikutuksesta.

Vapaa äänikenttä tarkoittaa, että ääni voi edetä vapaasti eikä äänikenttään liity heijastuksia. Vapaassa äänikentässä pistemäisen äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso vaimenee geometrisista syistä 6 dB, kun etäisyys äänilähteeseen kaksinkertaistuu. Äänenpainetaso etäisyydellä r [m] äänilähteestä lasketaan yhtälöllä

$$(2.3.1) \quad L_p = L_W + D_{ge} = L_W + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{k}{\Omega r^2} \right]$$

missä L_W [dB] on äänilähteen äänitehotaso, D_{ge} [dB] on geometrinen (*geometric*) vaimennustekijä, k on äänilähteen suuntakerroin tarkasteltavassa suunnassa ja Ω on avaruuskulma, johon ääni pistelähteestä säteilee. Kaksi viimeistä määritellään seuraavissa luvuissa.

Jos suuntaavuus kuvataan suuntaindeksillä L_k [dB],

$$(2.3.2) \quad L_k = 10 \cdot \log_{10}(k)$$

yhtälö 2.3.1 voidaan ilmaista muodossa

$$(2.3.3) \quad L_p = L_W + L_k + 10 \log_{10} \left[\frac{1}{\Omega r^2} \right]$$

(ii) Viivamainen äänilähde

Jos äänilähde on viivan muotoinen, kuten esimerkiksi tie, äänilähteen äänitehotason määrittäminen ei ole mielekäästä, koska se riippuu viivan pituudesta. Viivääänilähteellä äänenpainetaso pienenee geometrisista syistä vain 3 dB, kun etäisyys äänilähteeseen tuplaantuu. Äänenpainetaso $L_{p,2}$ [dB] etäisyydellä r_2 [m] äänilähteestä saadaan yhtälöstä

$$(2.3.4) \quad L_{p,2} = L_{p,1} - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right),$$

missä $L_{p,1}$ [dB] on ns. emissioäänepainetaso etäisyydellä r_1 [m] viivalähteestä. Emissioäänepainetaso tarkoittaa vapaassa kentässä suhteellisen lähellä äänilähdettä mitattua äänenpainetasoa, josta on vähennetty pois maan/lattian heijastuksen tuoma 3 dB:n äänenpainetason kasvu.

Viivalähde mallinnetaan laskentaohjelmistoissa viivalle sijoitettujen lähekkäisten pistelähteiden avulla. Kunkin pistelähteen ääniteho asetetaan sellaiseksi, että haluttu emissioäänepainetaso $L_{p,1}$ toteutuu.

2.4 Suuntakerroin

Suuntakerroin suunnassa x , k_x , on suuntaan x säteilevän intensiteetin $I_{x,r}$ (etäisyys äänilähteen keskipisteeseen r) ja kaikkiin suuntiin säteilevän keskimääräisen intensiteetin I_r suhde

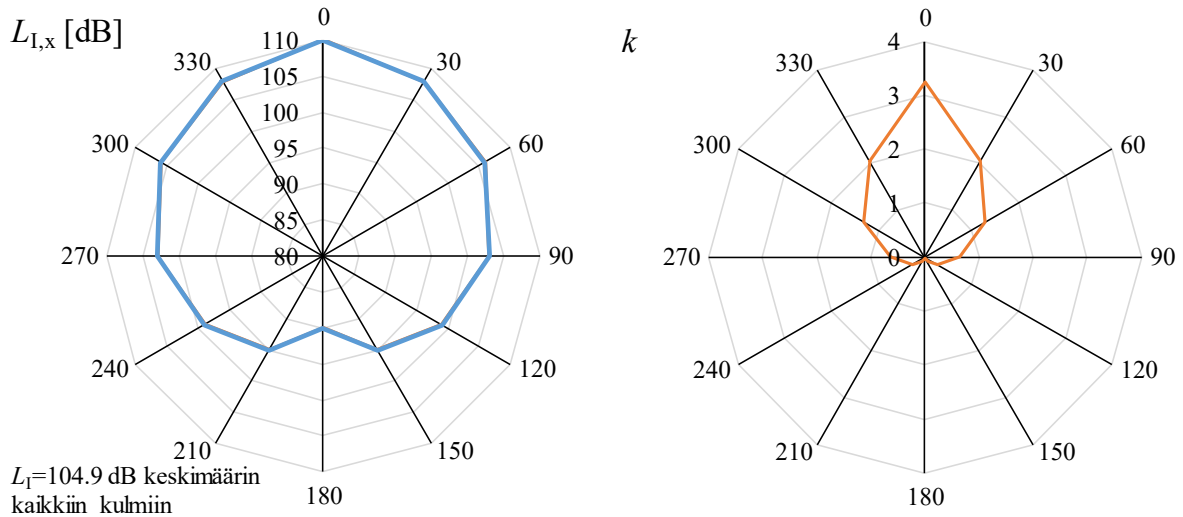
$$(2.4.1) \quad k_x = \frac{I_{x,r}}{I_r}$$

Suuntakerroin on voimakkaasti taajuusriippuva. Tyypillisesti suuntaavuus värähtelevän kappaleen värähtelyakselin suuntaan kasvaa, kun taajuus kasvaa. Suuntakerroin määritetään kaiuttomassa huoneessa tai

vapaassa kentässä.

Suuntakerroin on 1 pistemäiselle äänilähteelle, jolloin äänensäteilyn suuntakuvio on pallosymmetrinen. Esimerkiksi 12 kaiutinelementistä koostuva pallokaiutin, jota käytetään rakennusakustisissa mittauksissa, on pistemäinen äänilähde 5000 Hz:n alapuolella. Tätä suuremmilla taajuuksilla suuntaavuutta esiintyy jokaisen kaiutinelementin värähtelyakselin suunnassa. Kuvassa 2.4.1 on esimerkki suuntakerroimen esitystavasta.

Ympäristömelun lähteille on harvoin valmiiksi saatavilla äänilähteiden suuntainformaatiota. Sen vuoksi suuntakerroin voidaan joutua määrittelemään paikanpäällä tehtävin mittauksin.



Kuva 2.4.1. Erään äänilähteen suuntaavuusominaisuuksia horisontaalitasossa 30 asteen välein. Vasemmalla intensiteettitaso $L_{I,x}$ eri kulmilla x . Oikealla edellisestä johdettu suuntakerroin k eri kulmilla. Kulmassa 0° on $k=3.25$ ja $L_k=5.1$ dB.

2.5 Avaruuskulma

Äänilähde voi aiheuttaa hyvin erilaisen äänenpaineen ympäristöönsä riippuen siitä, miten äänilähde sijaitsee sen välittömässä läheisyydessä sijaitseviin heijastaviin pintoihin nähden. Tämän vuoksi äänenpainelaskelmissa tarvitaan aina tieto avaruuskulmasta, johon äänilähde voi vapaasti säteillä.

Avaruuskulma Ω on tarkasteltavan avaruuden osan ja koko avaruuden suhde kerrottuna vakiolla 4π . Taulukossa 2.5.1 on esitetty tyypillisimmät avaruuskulman arvot ja tästä aiheutuva äänenpainetaso kasvu yhtälössä 2.3.1. Avaruuskulma ottaa siis huomioon äänilähteen lähikentässä olevat heijastukset eikä niitä tarvitse silloin enää erikseen huomioida äänenpainetaso laskelmissa. Avaruuskulma vaikuttaa vain suoraan ääneen. Huonetilassa termin vaikutus ei ulotu kaiuntasädettä kauemmas.

On huomioitava, että jos äänilähteen äänitehotaso on määritetty samassa rajatussa avaruuskulmassa kuin se mallinnettavassa ympäristössäkään on, ja nämä heijastavat pinnat olivat osa äänitehotason hypoteettista mittauspintaa (ks. luku 1), taulukon 2.5.1 vahvistukset sisältyvät jo äänitehotason L_W arvoon. Silloin avaruuskulmaksi asetetaan 4π yhtälössä 2.3.1.

Taulukko 2.5.1. Avaruuskulman Ω yleisimmin käytetyt arvot äänilähteen sijainnin mukaan.

Ω	Äänilähteen sijainti	Vahvistus [dB]
4π	kaukana huonepinoista (yli aallonpituuden matkan) ääni säteilee vapaasti koko avaruuteen	0
2π	huonepinnalla, etäällä nurkista ääni säteilee vapaasti puoliavaruuteen	3
π	2 huonepinnan risteyksessä ääni säteilee vapaasti neljäsosa-avaruuteen	6
$\pi/2$	3 huonepinnan risteyksessä ääni säteilee vapaasti kahdeksasosa-avaruuteen	9

2.6 Ilmakehän absorptio

Ilmakehä (*atmosphere*) absorboi ääntä vakiomäärän metriä kohti. Absorptiosta aiheutuva vaimennus D_{atm} [dB] lasketaan yhtälöllä

$$(7.6.1) \quad D_{atm} = \frac{\alpha r}{1000}$$

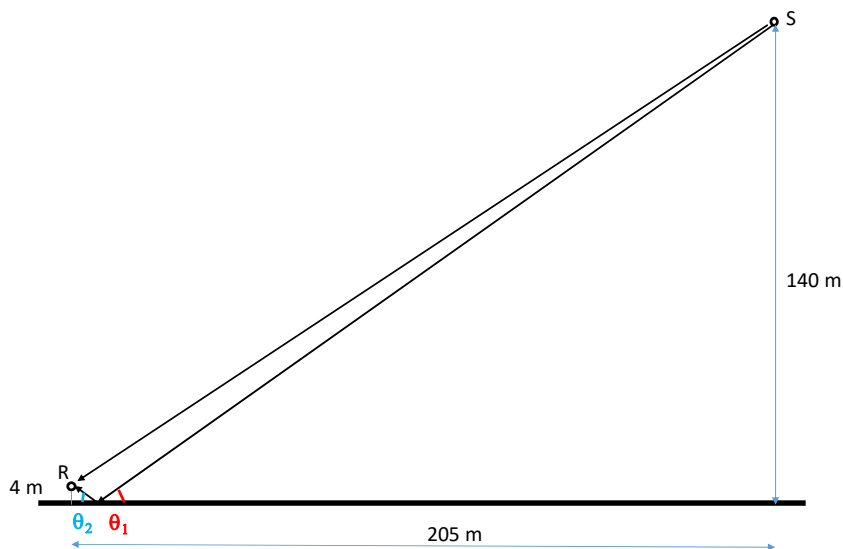
missä r [m] on etäisyys äänilähteeseen ja α [dB/km] on taulukoitu absorptiovaimennus. Joitakin α :n arvoja on esitetty taulukossa **2.6.1**. Ilmakehän absorptio on lähes mitätön pienillä taajuuksilla kun taas suurilla taajuuksilla ilmakehän absorptio on merkittävämpi vaimennustekijä suurilla etäisyyksillä äänilähteestä kuin geometrinen vaimentuminen.

Taulukko 2.6.1. ISO 9613-2 mukaisia ilmakehän absorptioarvoja α eri ilman lämpötilan T ja suhteellisen kosteuden RH arvoilla.

T [°C]	RH [%]	α [dB/km]							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
10	70	0.1	0.4	1	1.9	3.7	9.7	32.8	117
20	70	0.1	0.3	1.1	2.8	5	9	22.9	76.6
30	70	0.1	0.3	1	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3
15	20	0.3	0.6	1.2	2.7	8.2	28.2	88.8	202
15	50	0.1	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129
15	80	0.1	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

2.7 Maaheijastus ja maanpinnan absorptio

Äänilähteen ja kuulijan välillä on aina vähintään yksi maaheijastus, joka huomioidaan laskelmissa (kuva **2.7.1**). Heijastus noudattaa Snellin lakia eli tulokulma on sama kuin heijastuskulma. Jos äänilähde on korkealla, maaheijastus tapahtuu yleensä melko lähellä kuulijaa, joka oletusarvoisesti sijaitsee 4 metrin korkeudella ellei toisin päätetä. Jos taas äänilähde on lähellä maanpintaa, maaheijastus tapahtuu äänilähteen ja kuulijan keskivaiheilla. Maanpinnan muodot määrittelevät heijastuspaikan ja sen vuoksi maanpinnan absorptio pitää tuntea koko tutkittavalla alueella.



Kuva 2.7.1. Esimerkki maaheijastuksen sijainnista, kun äänilähteenä (S) on 140 m korkeudessa oleva tuulivoimala ja kuulija (R) on 4 m korkeudessa 205 m päässä tuulivoimalan juurelta.

Absorptiosuhde määritellään **luvussa 3**. Vaikka absorptiosuhde on taajuudesta riippuva, ympäristömelun malleissa taajuusriippuvuutta ei huomioida vaan maanpinnan absorptiosuhde (α_G) valitaan usein jostakin seuraavista vakioarvoista:

- 0.0: kova (asfalttatie, vesi)
- 0.3: pääosin kova (hiekkakentät, keskusta-alueet)
- 0.7: pääosin pehmeä (väljät taajama-alueet)

- 1.0: pehmeä (pehmeä maa)

Mallinnusohjelmissa taajuusriippumatonta absorptiosuhdetta merkitään usein myös G :llä.

Absorption vuoksi maanpinnasta heijastuneen äänen intensiteettitaso $L_{I,r}$ on määrän D_{gr} [dB] (*ground*) pienempi kuin maanpintaan osuneen äänen intensiteettitaso $L_{I,i}$:

$$(2.7.1) \quad D_{gr} = -10 \cdot \log_{10}(1 - \alpha_G)$$

Esimerkiksi tuulivoimalan maaheijastus tapahtuu lähellä tarkastelupistettä (kuva 2.7.1). Erittäin pienillä taajuuksilla (alle 50 Hz) tarkastelupiste sijaitsee lähempänä maanpintaa kuin aallonpituuden neljäsosa, jolloin tarkastelupiste sijaitsee maahan osuvan seisovan aallon maksimikohdassa, jossa äänenpainetaso on 6 dB korkeampi (samanvaiheisten signaalien konstruktioivinen interferenssi). Tästä johtuen pienillä taajuuksilla käytetään maanpinnan heijastusvaimennukselle taulukon 2.7.1 arvoja. Arvot koskevat tilannetta, jossa mallinnus tehdään korkeudelle 4 m maanpinnasta. Mittaukset tehdään kuitenkin korkeudella 1.5–2.0 m maanpinnasta.

Taulukko 2.7.1. Maanpinnan heijastusvaimennus D_{gr} .

f [Hz]	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
Maa D_{gr} [dB]	5.6	5.4	5.2	5	4.7	4.3	3.7	3	1.8	0	0	0	0	0
Vesi D_{gr} [dB]	6	6	5.9	5.9	5.8	5.7	5.5	5.2	4.7	4	3	3	3	3

f [Hz]	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
Maa D_{gr} [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vesi D_{gr} [dB]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

2.8 Kasvillisuus

Äänilähteen ja tarkastelupisteen väliin jäävä kasvillisuus vaikuttaa tarkastelupisteen äänenpainetasoon merkittävästi, jos kasvillisuus on äänilähdettä ja tarkastelupistettä yhdistävän suoran äänisäteen välissä. Jos äänilähde on erittäin korkealla (tuulivoimala), kasvillisuuden vaikutus on melko pieni. Jos äänilähde on lähellä maanpintaa, kasvillisuuden vaikutus voi olla erittäin suuri.

Fang ja Ling (2003) määrittivät kokeellisesti 35 eri kasvillisuustyypin äänenvaimennuksen (excess attenuation) tieliikennemelun spektrin mukaiselle ääniherätteelle. Äänenvaimennus 20 metriä kasvillisuusvyöhykettä kohti vaihteli 1 ja 9 dB:n välillä. He jakoivat tulokset 3 ryhmään:

- Ryhmä 1: Äänenvaimennus > 6 dB/20 m. Kasvillisuus koostui pensaista. Näkyvyys oli alle 5 metriä.
- Ryhmä 2: Äänenvaimennus 3–6 dB. Kasvillisuus koostui puista ja pensaista. Näkyvyys oli 6–19 m.
- Ryhmä 3: Äänenvaimennus alle 3 dB. Kasvillisuus koostui harvaan sijoitetuista puista ja pensaista. Näkyvyys oli yli 20 metriä.

Tiheä pensaikko vaimensi tieliikennemelua parhaiten. Kasvillisuuden äänenvaimennuskykyä D_{veg} [dB/20m] voitiin ennustaa sillä, mikä on näkyvyys kasvillisuuden läpi V_{veg} [m]:

$$(2.8.1) \quad D_{veg} = -1.9 \ln(V_{veg}) + 9$$

Näkyvyys vaihtelee paikallisesti eikä sopivaa äänenvaimennusryhmää ole mahdollista helposti määrittää isoille maa-alueille. Kasvillisuutta harvennetaan aika ajoin, eikä D_{veg} ole ajan suhteen vakio. Siksi kasvillisuuden äänenvaimennusta ei kannata yliarvioida, jotta äänenpainetasot kasvillisuuden takana eivät aliarvioituisi.

Ääntä myös taittuu kasvillisuuden yli, joten kasvillisuudella ei voida vaimentaa ääntä rajattomasti.

2.9 Meluste

Meluste tarkoittaa rakennelmaa, joka estää äänen suoran kulkeutumisen äänilähteeltä vastaanottajalle. Melusteelle ei voida antaa yksikäsitteistä äänenvaimennusarvoa, koska melusteella saavutettava äänenvaimennus riippuu äänilähteen ja kuulijan paikasta suhteessa melusteeseen. Tämän vuoksi melusteen kokonaisäänenvaimennus määritetään käyttäen lisäsvaimennuksen (*insertion loss*) määritelmää

$$(2.9.1) \quad D_{nb,tot} = L_{p,1} - L_{p,2}$$

missä $L_{p,1}$ on äänenpainetaso kuulijan paikalla, kun meluestettä ei ole, ja $L_{p,2}$, kun melueste on paikallaan. Kummassakin mittauksessa muun ympäristön ja äänilähteen paikan ja äänilähteen äänitehon ja suuntakuvion pitää säilyä samana. Kokonaisäänenvaimennukseen vaikuttaa sekä taittuva ääni (*diffraction*) että meluesteen läpi kulkeutuva ääni.

Pistemäiselle äänilähteelle meluesteen taittuvan äänen äänenvaimennus D_{diff} [dB] voidaan arvioida kaavalla

$$(2.9.2) \quad D_{diff} = 10 \log_{10} \left(1 + 20 \frac{z}{\lambda} \right)$$

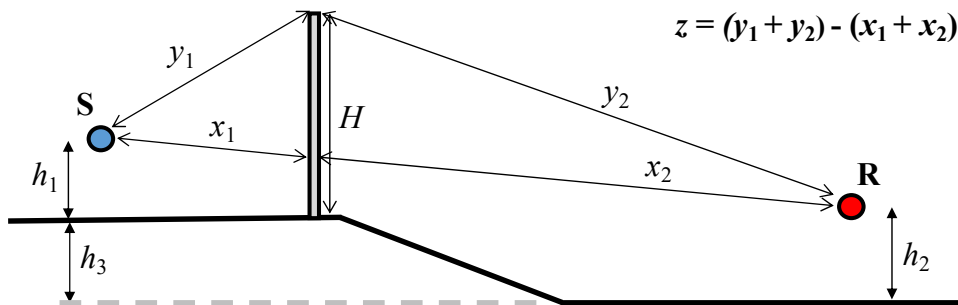
missä z on matkaero [m] ja λ on aallonpituus [m]. Matkaero z määritetään geometrisesti kuvassa 2.9.1 esitetyllä tavalla. Mitä suurempi matkaero, sitä suurempi D_{diff} (kuva 2.9.2). Äänenvaimennusta kasvattaa meluesteen korottaminen mutta myös se, että äänilähde tai tarkastelupiste siirtyvät meluestettä kohti. Meluesteen suurin äänenvaimennus saavutetaan heti meluesteen takana.

Meluesteen akustiset ominaisuudet, eli ilmaääneneristävyyys ja äänenabsorptiosuhde tulee tuntea, jotta meluesteen vaikutukset ympäristöön voidaan kokonaisuudessaan arvioida.

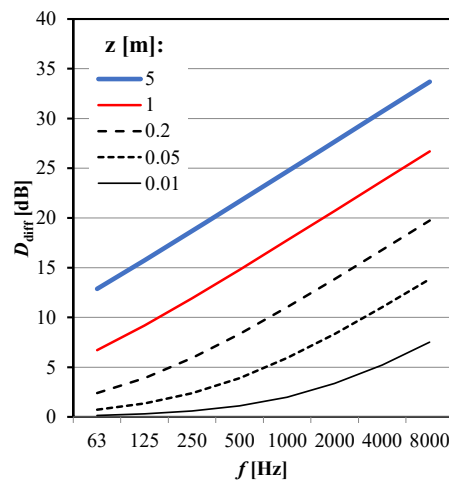
Meluesteen läpi ja yli taittuvan äänen muodostama kokonaisäänenvaimennus lasketaan taajuuksittain yhtälöllä

$$(2.9.3) \quad D_{nb,tot} = -10 \cdot \log_{10} \left(10^{-R/10} + 10^{-D_{diff}/10} \right),$$

missä R [dB] on meluesteen ilmaääneneristävyyys. Sitä käsitellään tarkemmin **luvussa 3**.



Kuva 2.9.1. Meluesteen matkaero z on meluesteen yli taittuvan äänireitin pituuden (y_1+y_2) ja suoran äänireitin pituuden (x_1+x_2) välinen erotus. Matkaero ratkaistaan trigonometrian avulla. S on äänilähde ja R on vastaanottaja.



Kuva 2.9.2. Melusteellä tiettyyn tarkastelupisteeseen aikaansaadun matkaeron z [m] vaikutus äänenvaimennukseen eri taajuuksilla olettaen, että meluesteen läpi tai ohi ei kulkeudu ääntä.

2.10 Sääolosuhteiden vaikutus

Tuulen nopeus ja suunta sekä tuulen nopeuden gradientti korkeussuunnassa vaikuttavat äänen etenemiseen. Samoin tekee lämpötilagradientti. Näitä tekijöitä ei kuitenkaan huomioida. Sen vuoksi mallien tulosten tarkistamiseen tähtäävät mittaukset tulee tehdä, kun tuulen nopeus on alle 3 m/s. Poikkeuksena on tuulivoimalamelu, jossa mallinnus tehdään käyttäen maksimaalista melupäästöä. Tuulivoimalamelu mitataan silloin, kun tuulen nopeus on riittävä aikaansaamaan maksimaalisen sähköntuotantotehon (yleensä 12 m/s voimalan navan korkeudella).

2.11 Mittausepävarmuus ja tuloksen vertailu ohjearvoon

Ympäristömelun mittauksissa, kuten äänenpainetason mittauksissa ylipäätään, tulee ilmoittaa epävarmuus desibeleinä. Mittausepävarmuudella tarkoitetaan sitä hajontaa, joka saman ilmiön mittauksissa esiintyy, jos mittausoimeksiänto toistettaisiin kymmenien eri mittaaajien toimesta.

Kokonaisepävarmuus U [dB] saadaan yhtälöllä

$$(2.11.1) \quad U = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}$$

missä u_i [dB] on osatekijän i arvioitu epävarmuus. Ympäristömelun mittausepävarmuus on suurempi kuin sisämelun mittaus, koska säätila vaikuttaa siihen, miten ääni etenee äänilähteeltä mittauspisteeseen. Osatekijöitä ovat mm.

- mittalaitteiston kalibrointiin liittyvä epävarmuus,
- mittauspisteen valinta,
- taustamelukorjauksen suuruus,
- mittauksen kesto (lyhyt mittaus on epävarmempi kuin pitkä),
- sääolosuhteet,
- etäisyys äänilähteeseen

Epävarmuudet (L_{Aeq}) ovat vähintään seuraavia:

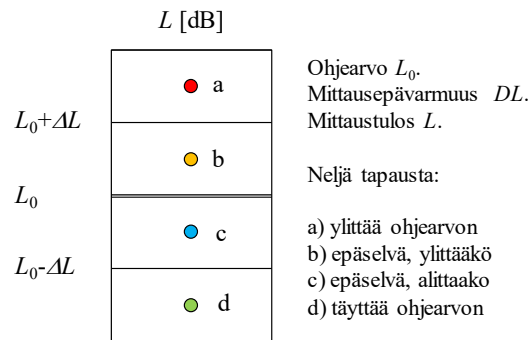
- kaiuttomissa ja kaiuntaisissa laboratoriotiloissa 1.0 dB,
- huonetiloissa 1.5 dB,
- ulkona vapaassa heijastuksettomassa kentässä aivan äänilähteen tuntumassa 1.5 dB,
- ulkona vapaassa heijastuksettomassa kentässä yli 30 metrin päässä äänilähteestä 2 dB.

Kaukana äänilähteestä mittausepävarmuus (L_{Aeq}) on mahdollista arvioida taulukon **2.11.1** mukaan.

Mittaustuloksen luotettava vertaaminen ohjearvoihin edellyttää, että mittausepävarmuus tunnetaan. Kuvassa **2.11.1** on esitetty, miten vertailun voisi tehdä.

Taulukko 2.11.1. A-painotetun ekvivalentin äänenpainetason mittausepävarmuuden arviointi mittausten määrän ja mittausetäisyyden perusteella.

Etäisyys lähteeseen [m]	30	100	500	100	500
Riippumattomien mittausten lukumäärä	1	1	1	6	4
Epävarmuus ΔL [dB]	2	4	7	2	4



Kuva 2.11.1. Mittaustuloksen L vertaaminen ohjearvoon L_0 . Ohjearvon ylittyminen edellyttää, että mittaustulos ylittää arvon $L_0 + \Delta L$. Ohjearvon alittuminen edellyttää, että mittaustulos alittaa arvon $L_0 - \Delta L$.

2.13 Melun leviämismallinnus

Äänenpainetaso laskenta yksittäiseen tarkastelupisteeseen on mahdollista kohtalaisella tarkkuudella soveltamalla edellä kuvattuja yhtälöitä. Ympäristömelun äänenpainetaso halutaan yleensä esittää äänenpainetasokarttojen avulla. Ne laaditaan tätä tarkoitusta varten kehitetyillä melunleviämisen laskentaohjelmalla (myöh: ohjelma), joissa voidaan valita laskentaparametrit, käytettävät standardit ja tulosten esitystavat joustavasti. Alla on kuvattu tiiviisti, miten CadnaA ohjelmalla mallinnus etenee.

Ohjelman käyttö aloitetaan lataamalla siihen tarkasteltavan alueen pohjakartta (mapinfo, .mif) rakennuksineen, teineen ja korkeuskäyrineen. Pohjakartan saa sähköpostiin ilmaiseksi Maanmittauslaitoksen nettisivuilta. Pohjakartan koordinaattijärjestelmän tulee vastata ohjelmiston koordinaattijärjestelmää.

Pohjakartassa jokaisella viivalla on tyyppi (rakennus, korkeuskäyrä, tie, rautatie, vesiraja, jne.). Pohjakartta ei ole suoraan käyttökelpoinen melulaskelmia ajatellen. Heti aluksi Maanmittauslaitoksen käyttämät viivatyyppit konvertoidaan niiden ID-numeron perusteella ohjelman käyttämien viivatyyppien kielelle, jolloin Maanmittauslaitoksen tarkoittama tie vastaa ohjelman ymmärtämää tietä ja niin edelleen.

Pohjakartta ei sisällä rakennusten korkeuksia. Rakennusten korkeudet arvioidaan rakennustyyppin mukaan (kerrosten lukumäärä kerrottuna kolmella metrillä). Maanmittauslaitos tarjoaa vapaasti käytettäväksi laserkeilausaineiston, joka kuvaa maanpintaa ja maanpinnalla olevien kohteiden korkeuksia. Aineisto koostuu mittauspisteistä, joista jokaisella on xyz-koordinaattitieto. Resoluutio on tiheimmillään 0.5 pistettä neliometriä kohti eli korkeustietoa löytyy noin 1.4 m välein tai tiheimmin. Sen avulla rakennuskorkeudet voidaan asettaa suurelle rakennusmäärälle kunkin rakennuksen koordinaattipisteen perusteella. Koordinaattistojen tulee olla yhteneväiset. Rakennukset voidaan myös määritellä ääntä heijastaviksi ja antaa heijastuksessa tapahtuva absorptiosuhde.

Korkeusreferenssi 0 m on yleensä merenpinnan korkeus. Maanpinnan, äänilähteiden, väylien ja tarkastelupisteiden korkeudet tulee tarkistaa, että ne ovat oikeassa korossa suhteessa korkeusreferenssiin.

Maasto mallinnetaan diskretoitujen korkeuskäyrien sisältämien korkeuspisteiden avulla. Lähekkäisistä korkeuspisteistä ohjelma muodostaa kolmioita, jotka kattavat koko mallinnettavan maaston. Korkeuskäyrät ovat ohjelmistossa siis vain havainnollistamisen vuoksi. Mitä pienempiä kolmiot ovat, sitä tarkempi maastomalli on. Tarkkaan maastomalliin tulee pyrkiä silloin, kun äänilähde on matalalla. Erityistä painoarvoa on korkeusresoluutiolla äänilähteen lähellä ja myös tarkastelupisteen lähellä.

Korkeuskäyriä voi tarvittaessa tihentää esimerkiksi liimaamalla kartan päälle tilapäisesti tarkempi maastokartta ja piirtämällä uusia korkeuskäyriä sen avulla. Tihennys on tarpeen, jos sillä arvioidaan saavutettavan luotettavampi mallinnustulos. Näin voi olla esimerkiksi äänilähteen sijaitessa lähellä jyrkännettä tai muuta merkittävästi äänen leviämiseen vaikuttavaa estettä.

Erityistä huomiota tulee antaa äänilähteen ja sen maanpinnan sekä lähialueen kuvaukselle. Jos äänilähde on tie, tulee tienpinnan korkeuden vastata todellista korkeuttaan mahdolliset tienpinnan korotukset mukaan lukien ja jos tien läheisyydessä on kallioseinämiä tai meluesteitä, ne tulee tarkastella erityisen huolellisesti. Tunnelit tulee ottaa erikseen huomioon.

Tarkasteltava alue lähiympäristöineen rajataan maastokartalta ja muu karttatieto karsitaan ohjelmasta pois.

Äänenpainetaso laskentamenetelmä valitaan kutakin tarkoitusta palvelevaksi. Vaihtoehtoina on erilaisia kansainvälisiä standardeja sekä kansallisia tai pohjoismaisia menettelyjä. Nämä sisältävät myös oletukset taajuusalueesta ja –resoluutiosta.

Äänilähteen ominaisuudet (paikka, sijainti, ääniemissio) asetetaan käytettävissä olevan tiedon mukaan. Pisteäänilähteille annetaan äänitehotaso taajuuskaistoittain sillä resoluutiolla, jonka valittu laskentamalli vaatii. Tarvittaessa äänilähteelle voidaan antaa kellonajat, jolloin se on aktiivinen. Jos äänilähteestä tiedetään vain A-painotettu äänitehotaso, pitää oktaavikaista-arvot arvioida parhaan käytettävissä olevan tiedon mukaan (kirjallisuus, aiemmat mittaukset). Jos äänilähteestä on tietoa terssikaistoittain, pitää ne muuttaa oktaaviarvoiksi desibelien yhteenlaskukaavalla.

Tieliikenteen kohdalla kuvataan tuntikohtaisesti ajoneuvojen ohiajojen kokonaislukumäärä eri vuorokaudenaikoina, raskaan liikenteen osuus edellisestä, liikenteen nopeus kummallakin liikennemäärällä sekä tienpinnan tyyppi. Näitä tietoja saa Väylävirastolta tai kunnalta. Lisäksi voidaan merkitä erikseen risteys- ja mäkialueita, jos niistä syntyvä lisämelu halutaan huomioida laskennassa. Tie pilkotaan ominaisuuden muuttuessa eri osiin. Melulähteen korkeus on oletusarvoisesti 0.5 metriä väylän kohdalla olevan maan pinnasta.

Raideliikenteen kohdalla raiteiden sijainnit ja korkeudet hankitaan kaupunkien tiedoista tai laserkeilausaineistosta. Penkereen muoto (tasanne ja luiskat) muotoillaan manuaalisesti. Liikennetiedot, joita ovat junatyypit, pituudet ja nopeudet, hankitaan rataoperaattorilta (VR Track Oy). Junatyypeille on olemassa erilliset melupäästötiedot, jotka asetetaan käyttöön. Ratapiha-alueiden lähellä käytettävät alhaisemmat nopeudet arvioidaan kokemusperäisesti. Siltojen kohdalla melupäästöä korotetaan tarvittava määrä. Esimerkiksi 3 dB korotusta käytetään joidenkin teräsiltojen kohdalla. Paikallinen ja ajoittainen raidekirskunta huomioidaan tapauskohtaisesti. Melulähteen korkeus on oletusarvoisesti 0.5 metriä väylän kohdalla olevan maan pinnasta.

Teollisuuden aiheuttama melu mallinnetaan tunnistamalla merkittävät melulähteet ja asettamalla niille asianmukaiset äänitehotasot perustuen kirjallisuuteen, äänilähdekohtaisiin mittaustietoihin tai kaukokentässä tehdyistä mittauksista tehtyihin arvioihin. Teollisuusrakennusten äänilähteet koostuvat piste-, viiva- sekä pintalähteistä. Pintalähteet ovat yleensä rakennusten ulkoseiniä tai kattoja, jolloin varsinainen äänilähde on rakennuksen sisällä. Tällöin ohjelmalle voidaan syöttää äänitehotaso rakennuksen sisällä sekä seinän absorptiospektri. Jotkin tavalliset teollisuusmelun lähteet, kuten savupiiput, ovat suuntaavia, jolloin suuntakerroin tulee huomioida. Mallinnohjelmissa on laajat sisäänrakennetut kirjastot yleisille teollisille melulähteille, seinärakenteille ja suuntakuvioille. Niitä voidaan hyödyntää, ellei mittaustietoa ole saatavilla (harvemmin on ja piipun nokalle ei voi tai jaksa mennä).

Lentoliikennettä ei tässä käsitellä, koska se on edellisiä merkittävästi monimutkaisempaa ja harvinaisempaa.

Maanpinnan absorptiosuhde asetetaan laskentamenetelmän asettamien vaatimusten mukaan. Ohjelma asettaa oletusarvon, esim. $G=1$, koko alueelle. Poikkeavat alueet pitää erikseen rajata ja määritellä. Näitä ovat mm. ääntä heijastavat vesipinnat.

Ohjelmassa asetetaan laskentaan vaikuttavia parametreja, joita ovat mm. äänilähteen ja laskentapisteen välinen maksimietäisyys ja yksittäisen äänisäteen heijastusten enimmäismäärä. Yleensä oletusarvot ovat hyväksyttäviä mutta oletusten soveltuvuus pitää tarkistaa.

Kasvillisuusvyöhykkeet ja niiden äänenvaimennus asetetaan käytettävissä olevan tiedon mukaan.

Ilmakehän lämpötila ja suhteellinen kosteus asetetaan melulajin ja laskentastandardin vaatimusten mukaisesti riippumatta siitä, mitkä olosuhteet oikeasti vallitsevat.

Melusteet, kuten meluvallit, melukaiteet ja meluseinät asetetaan oikeisiin korkeuksiinsa ja oikealle etäisyydelle äänilähteestä. Meluvallille ilmoitetaan myös harjanteen leveys ja kaiteille ja seinille heijastuskerroin.

Laskentatuloksena haluttava äänenpainetasosuure (L_{den} , $L_{Aeq07-22}$, jne.) valitaan tarkoituksen mukaiseksi. Koska esimerkiksi L_{den} määritellään eri maissa eri tavoin, määritelmä tehdään ohjelmassa erikseen siitä, mille tuntiväleille sanktio annetaan.

Rakennuksiin voidaan tarvittaessa asettaa asukkaiden lukumäärä, jolloin ohjelmalla voidaan esittää analyysi siitä, kuinka moni ihminen altistuu eri äänenpainetasoille. Tähän käytetään kuntien rakennus- ja huoneistorekisteriaineistoja.

Vakioäänepainetasokarttoja laskettaessa on valittava tulosten graafinen esitystapa (viivat, värikartat) ja laskentaverkon tiheys. Tarkastelukorkeus suhteessa maanpinnan korkeuteen asetetaan laskentastandardin ohjeen mukaiseksi tai valitaan tarkoituksenmukaisesti.

Ohjelmalla voidaan saada erityyppisiä tuloksia:

- horisontaaliset vakioäänepainetasokartat halutulla resoluutiolla ja korkeudella
- vertikaaliset vakioäänepainetasokartat
- taulukoidut vakioäänepainetasot halutuissa pisteissä
- äänenpainetasot tiettyjen rakennusten julkisivupinnoilla eri kerroskorkeuksilla
- altistuvien asukkaiden lukumäärät eri äänenpainetasokategorioissa
- maaston värikoodattu korkeuskartta

Lisäksi on mahdollista tehdä yksinkertaisia 3D-kuvia ja ohikulkuanimaatioita. Kussakin tilanteessa voidaan erikseen määrittää, mistä äänenpainetason mittarista on kysymys (L_{den} , $L_{Aeq07-22}$, jne.). Tämä johtaa siihen, että tulosten määrä on erittäin suuri. Tulosten raportoinnissa on sen vuoksi kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että tulostuloksia on ilmoitettu.

Esimerkiksi Turun kaupunki (2017) on julkaissut direktiivin mukaisen selvityksen verkossa.

Myös rakennukset ovat itsessään melulähteitä, koska julkisivussa on ilmanvaihdon päätelaitteita ja muita LVIS-laitteita. Rakennuksen aiheuttamaa LVIS-melua ympäristöön koskevat verrattain tiukat melumääräykset, koska melua syntyy läpi vuorokauden. Rakennuksesta aiheutuva melupäästö lähinaapurien tontille ja julkisivupinnoille voidaan mallintaa helpoiten edellä kuvatulla ohjelmalla.

Hongisto et al. (2017) ovat vertailleet tuulivoimalamelun mallinnustuloksia mittaustuloksiin useissa mittauspisteissä ja useilla tuulivoima-alueilla. Heidän mukaansa mallinnustulokset eivät olennaisesti poikkea mitatuista arvoista.

KIRJALLISUUS

Fang, C-F., Ling, D-L. (2003). Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landsc. Urban Plann.* 63 187-195.

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

Turun kaupunki (2017). Ympäristömeludirektiivin mukainen ympäristömeluselvitys Turussa 2017. Loppuraportti 1.6.2017. https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/eu_raportti_-_koko_raportti_paivatty_1.6.2017.pdf.

Kovalainen, V., Kylliäinen, M. (2016). Lasitettujen parvekkeiden ääneneristävyys liikennemelualueilla. Ympäristöministeriön ohjeita 6-2016. Ympäristöministeriö, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79082>.

Valtioneuvosto (2017). Valtioneuvoston asetus 903/2017 raskaiden aseiden ja räjäytysten melutasoista. 14.12.2017. Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170903>.

Sosiaali- ja terveysministeriö (2015). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 1545-2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 23.4.2015. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>.

Ympäristöministeriö (2017). Ympäristöministeriön asetus 796-2017 rakennuksen ääniympäristöstä, 24.11.2017, Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>.

Valtioneuvosto (1997). Valtioneuvoston päätös 53/1997 ampumaratojen aiheuttaman melutason ohjeista. 16.1.1997. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1997/19970053>.

Valvira (2016). Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Osa II: Asumisterveysasetus § 11-13. Ohje 8/2016. 31.8.2016. Helsinki. <https://www.valvira.fi/-/asumisterveysasetuksen-soveltamisohje-1>.

Ympäristöministeriö (1995). Ympäristömelun mittaaminen. Ohje 1-1995. Helsinki.

3 Äänenabsorptio

3.1 Äänenabsorptio ja -eristys

Jokainen materiaali- tai rakennekerros sekä eristää että absorboi ääntä (kuva 3.1.1). Hyvään äänieristykseen päästään helpoiten massiivisella ja tiiviillä levykerroksella. Hyvä äänieriste heijastaa äänestä suurimman osan takaisin tulosuuntaansa (impedanssi huomattavasti ilman impedanssia korkeampi) ja ääntä kulkeutuu rakenteen läpi läpäisy-suhteen osoittaman minimaalisen määrän. Äänienergiähäviöt ovat pieniä, kun heijastussuhde on suuri.

Hyvään absorptioon päästään helpoiten huokoisilla levykerroksilla, jotka rajautuvat suoraan ilmaan. Hyvä absorbentti päästää äänen lähes vastuksetta sisäänsä (karakteristisen impedanssin arvo lähellä ilman arvoa) ja muuttaa akustisen energian lämpöenergiaksi, jolloin äänen kuljettua materiaalin läpi äänitehon määrä on vähentynyt absorptiosuhteen osoittamalla määrällä. Ääni muuttuu lämmöksi, koska materiaalihuukokset aiheuttavat kitkaa materiaalin sisällä tapahtuvaan hiukkasvärähtelyyn.

Absorptiorakenteita ovat:

1. huokoiset materiaalit, kuten villat, pehmusteet ja kankaat
2. Helmholtz-resonaattorien hilat (reikälevyresonaattorit) ja
3. levyresonaattorit

Absorptiomateriaaleihin liitetään ulkonäköä, kestävyyttä tai muita ominaisuuksia parantavia pinnoitteita. Ne tulisi optimoida siten, etteivät ne heikennä liikaa äänenabsorptiokykyä.

Tässä luvussa esitetään teoriaa ja yhtälöitä, joiden avulla voidaan ymmärtää tavallisimpien absorptiorakenteiden toimintaa.

Tässä luvussa on pyritty lihavoimaan kompleksiluvut.

Materiaalin (tai rakenteen) kaksi keskeisintä akustista ominaisuutta ovat äänenabsorptiosuhde α ja ilmaääneneristävyys R (luku 5). Materiaalin äänen absorptiota käytetään hyväksi kun halutaan vaikuttaa tilan sisäpuolelle muodostuvaan äänikenttään. Absorptiossa äänienergia muuttuu lämpöenergiaksi. Materiaalin ääneneristystä käytetään hyväksi, kun halutaan vaikuttaa äänen siirtymiseen materiaalin (tai rakenteen) toiselle puolelle. Ääneneristyksessä rakenteeseen osuva äänienergia voi muuttua lämmöksi (jos rakenteen sisällä on esimerkiksi absorboivia materiaaleja) tai heijastua takaisin, jolloin energiaa ei häviä.

Tarkastellaan kuvan 3.1.1 mukaista tilannetta, jossa rakenteen pintaan kohdistuu intensiteetti I_i . Rakenteen pinnasta heijastuu takaisin intensiteetti I_r ja rakenteen läpäisee intensiteetti I_t . Äänen absorptiosuhde α määritetään yhtälöllä

$$(3.1.1) \quad \alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i}$$

Äänen absorptiosuhde on dimensioton. Mitä suurempi arvo on, sitä paremmin rakenne absorboi ääntä. Se voi saada arvoja väliltä 0.00 ... 0.99. Absorptiosuhde riippuu yleensä voimakkaasti taajuudesta. Absorptiosuhteen aiheuttama vaimennus D_I [dB] heijastuvan äänen intensiteettitasossa määritetään yhtälöllä

$$(3.1.2) \quad D_I = L_{I_i} - L_{I_r} = -10 \cdot \log_{10}(1 - \alpha)$$

Ilmaääneneristävyys [dB] määritetään yhtälöllä

$$(3.1.3) \quad R = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{I_i}{I_t}\right)$$

missä τ on läpäisy-suhte. Ilmaääneneristävyys riippuu yleensä voimakkaasti taajuudesta. Ilmaääneneristävyys arvo on yleensä 0 ja 70 dB välillä. Yli 70 dB arvot ovat harvinaisia eikä tätä suurempia arvoja voi myöskään luotettavasti mitata.

Ilmaääneneristävyys määritetään logaritmisella dB-asteikolla siitä syystä, että läpäisy-suhteen arvot ovat hyvin pieniä, arvoissa on useiden kertalukujen eroja eikä niiden ilmoittaminen ole kovin käytännöllistä.

Absorptio- ja läpäisy-suhteiden tyypillinen vaihtelualue on esitetty taulukossa 3.1.1. Absorptiossa on yleensä kysymys useita kertalukuja lievemmistä tehohäviöistä kuin ilmasteneristävyydessä. Materiaalien absorptiosuhteiden arvot ovat yleensä alle $\alpha < 0.90$, jolloin vaikutus heijastuvaan äänitehoon on pienempi kuin 10 dB. Rakenteiden ilmasteneristävyyden arvot ovat puolestaan yleensä yli 30 dB, jolloin läpäisy-suhteet ovat alle tuhannesosan.

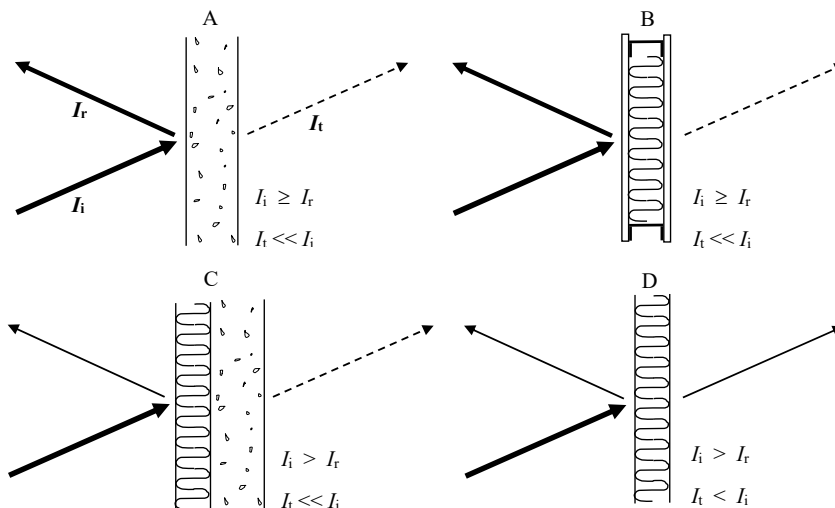
Taulukko 3.1.1. Absorptiosuhteen ja läpäisy-suhteen tyypillinen vaihtelualue sekä niitä vastaavat desibeliarvot.

α	D [dB]	τ	R [dB]
0.00	0.0	1	0
0.10	0.5	0.1	10
0.20	1.0	0.01	20
0.30	1.5	0.001	30
0.40	2.2	0.0001	40
0.50	3.0	0.00001	50
0.60	4.0	0.000001	60
0.70	5.2	0.0000001	70
0.80	7.0	0.00000001	80
0.90	10.0	0.000000001	90
0.99	20.0		
0.999	30.0		

Rakenteissa tapahtuu aina yhtäaikaista sekä ilmasteneristystä että äänenabsorptiota. Absorption ja eristyksen suuruus voi kuitenkin vaihdella merkittävästi riippuen rakennekerroksista ja niiden sijoittelusta. Kuvassa 3.1.1 on esitetty neljä tyypillisintä vaihtoehtoa.

- Molemmilta puolilta kovapintainen ja tiivis levy. Pinnan absorptiosuhde on erittäin alhainen, alle 0.10. Ilmasteneristävyys on pintamassasta riippuen 20–80 dB. (1 kHz)
- Levyrakenteinen seinä, jonka kaviteetissa on absorboivaa materiaalia. Tilanne ei eroa oleellisesti rakennetyypistä A. Kaviteetissa oleva absorptiomateriaali ei paranna pinnalla havaittavaa absorptiosuhdetta, koska materiaali sijaitsee pintalevyn takana. Absorptiomateriaali vähentää kuitenkin kaviteetin kaiuntaa, mikä parantaa ilmasteneristävyyttä.
- Seinä, jonka pinnalla on absorboivaa materiaalia. Tässä tapauksessa saavutetaan sekä korkea absorptiosuhde että korkea ilmasteneristävyys. (1 kHz)
- Pelkkä absorboiva materiaali. Tässä tapauksessa saavutetaan korkea absorptiosuhde mutta huono ilmasteneristävyys. Absorptiomateriaalit ovat yksinään huonoja äänieristeitä (ks. kohta B), koska ne päästävät äänen helposti huokosten läpi rakenteen toiselle puolelle. (1 kHz)

Käsitteenä ilmasteneristys tulee erottaa äänenabsorptiosta vaikka tapauksissa B–D absorptiomateriaali aiheuttaa myös ilmasteneristävyyden kasvua.



Kuva 3.1.1 Absorption ja ilmasteneristys perusrakenteissa A, B ja D sekä yhdistelmä rakenteessa C.

3.2 Aaltoluku ja impedanssi

Materiaalin akustiset ominaisuudet kuvataan karakteristisella etenemisvakiolla Γ_a [1/m]

$$(3.2.1) \quad \Gamma_a = \Gamma'_a + j\Gamma''_a$$

] ja karakteristisella impedanssilla Z_a [Pa·s/m]

$$(3.2.2) \quad Z_a = Z'_a + jZ''_a$$

Materiaalin karakteristinen impedanssi Z_a [Pa·s/m] kertoo paineen ja hiukkasnopeuden suhteen materiaalissa etenevälle tasoallolle:

$$(3.2.7) \quad Z_a = \frac{\mathbf{p}(x,t)}{\mathbf{u}(x,t)}$$

Karakteristinen impedanssi määritetään helpoiten impedanssiputkella.

Ilmassa etenemisvakio on

$$(3.2.3) \quad \Gamma = \Gamma' + j\Gamma'' \cong jk_0$$

missä k_0 on aaltoluku [1/m]

$$(3.2.4) \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0}$$

ja f on taajuus [Hz] ja c_0 on äänen nopeus ilmassa [m/s].

Huoneen ilmatilassa tapahtuvat häviöt ovat hyvin pieniä verrattuna huonepinoissa tapahtuviin häviöihin. Siksi etenemisvakion reaali-osaa voidaan pitää nollassa. Ilmassa positiivisen x-akselin suuntaan etenevä ääniaalto esitetään muodossa

$$(3.2.5) \quad p(x,t) = \hat{p}e^{j(\omega t - k_0 x)}$$

Näin esitetty aalto ei vaimene edetessään.

Huokoisessa materiaalissa on voimakkaita häviöitä, joten pelkkä aaltoluvun käyttö ei riitä. Häviöt esitetään etenemisvakion reaali-osassa. Äänenpaineksi absorboivan materiaalin sisällä muodostuu

$$(3.2.6) \quad p(x,t) = \hat{p}e^{-\Gamma_a x} e^{j\omega t} = \hat{p}e^{-\Gamma'_a x} e^{-j\Gamma''_a x} e^{j\omega t}$$

Ensimmäinen eksponenttitermi on reaalinen eikä värähtelevä. Kaksi seuraavaa termiä ovat värähteleviä aiheuttaen edetessään vaimenevan aaltoliikkeen.

Etenemisvakion reaali-osa Γ' määritetään esimerkiksi mittaamalla äänenpainetason vaimenema paksussa materiaalinäytteessä. Etenemisvakion imaginääriosa Γ'' määritetään mittaamalla vaiheen muutos etäisyyden funktiona.

3.3 Heijastuminen materiaalista

(I) KOHTISUORA TULOKULMA

Tarkastellaan harmonista aaltoliikettä, joka saapuu materiaalista 0 kohtisuoraan toisen elastisen materiaalin 1 rajapintaan (kuva 3.3.1). Materiaalit katsotaan äärettömän suuriksi, jolloin niiden sisällä ei ole muita heijastuksia kuin tässä tarkasteltavat aallot. Asetetaan koordinaatisto siten, että $x=0$ sijaitsee rajapinnassa. Materiaalien karakteristiset impedanssit ovat Z_{a0} ja Z_{a1} . Tasoaalto etenee positiivisen x-akselin suuntaan. Pintaan osuvan (*incident*) aallon äänenpaine on

$$(3.3.1) \quad \mathbf{p}_i(x,t) = \hat{p}_i e^{i(\omega t - k_0 x)}$$

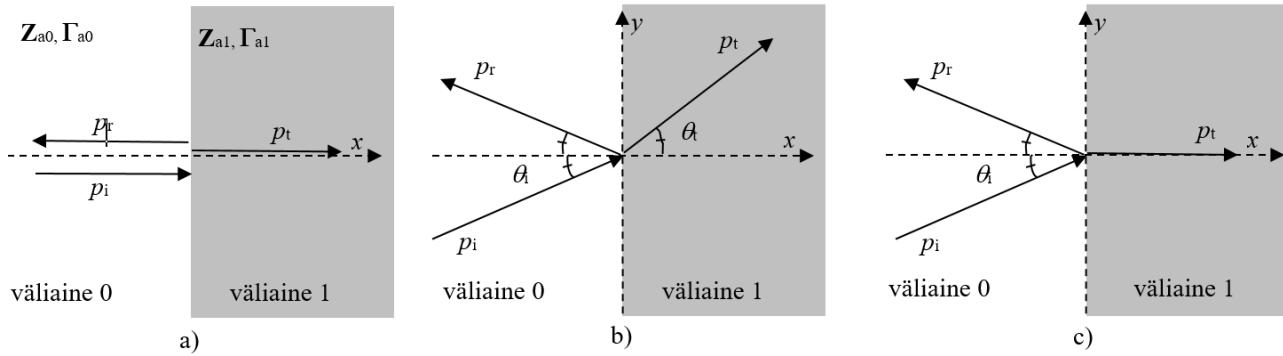
ja hiukkasnopeus (vektorisuure)

$$(3.3.2) \quad \mathbf{u}_i(x,t) = \frac{\hat{p}_i}{Z_{a0}} e^{i(\omega t - k_0 x)}$$

Heijastuneelle (*reflected*) aallolle saadaan vastaavasti

$$(3.3.3) \quad \mathbf{p}_r(x,t) = \hat{p}_r e^{i(\omega t + k_0 x)}$$

$$(3.3.4) \quad \mathbf{u}_r(x,t) = -\frac{\hat{p}_r}{Z_{a0}} e^{i(\omega t + k_0 x)}$$



Kuva 3.3.1 Heijastuminen ja läpäisy kahden materiaalin rajapinnassa. a) Kohtisuora tulokulma, $\theta = 0^\circ$. (b) Vinko tulokulma ja kokonaisuutena reagoiva materiaali (läpäisykulma θ riippuu äänen nopeudesta väliaineessa 1). (c) Vinko tulokulma ja paikallisesti reagoiva materiaali (läpäisykulma on aina 0°).

Rajapinnan läpäisseen (*transmitted*) ääniaallon äänenpaine ja hiukkasnopeus ovat

$$(3.3.5) \quad \mathbf{p}_t(x,t) = \hat{p}_t e^{i(\omega t - k_1 x)}$$

$$(3.3.6) \quad \mathbf{u}_t(x,t) = \frac{\hat{p}_t}{Z_{a1}} e^{i(\omega t - k_1 x)}$$

Rajapinnalla täytyy toteutua kaksi reunaehtoä kaikilla ajanhetkillä:

$$(3.3.7) \quad \mathbf{p}_i(x=0,t) + \mathbf{p}_r(x=0,t) = \mathbf{p}_t(x=0,t)$$

$$(3.3.8) \quad \mathbf{u}_i(x=0,t) + \mathbf{u}_r(x=0,t) = \mathbf{u}_t(x=0,t)$$

Sijoittamalla edellä esitetyt äänenpaineen yhtälöt yhtälöön (5.3.7), saadaan

$$(3.3.9) \quad \hat{p}_i + \hat{p}_r = \hat{p}_t$$

Vastaavasti hiukkasnopeuksille yhtälöstä (5.3.8) saadaan

$$(3.3.10) \quad \frac{\hat{p}_i}{Z_{a0}} - \frac{\hat{p}_r}{Z_{a0}} = \frac{\hat{p}_t}{Z_{a1}}$$

Eliminoimalla \hat{p}_t saadaan äänenpaineen heijastuskerroin \mathbf{R}

$$(3.3.11) \quad \boxed{\frac{\hat{p}_r}{\hat{p}_i} = \frac{Z_{a1} - Z_{a0}}{Z_{a1} + Z_{a0}} = \mathbf{R}}$$

Äänen absorptiosuhteella tarkoitetaan sitä, kuinka suuri osuus materiaaliin 1 osuvasta äänienergiasta W_i imeytyy siihen:

$$(3.3.12) \quad \alpha = \frac{W_t}{W_i} = \frac{W_i - W_r}{W_i} = 1 - \frac{W_r}{W_i}$$

missä W_i on rajapinnan läpäisevä ja W_r on rajapinnasta heijastuva äänienergia. Koska äänen energia riippuu äänen intensiteetistä, joka puolestaan on verrannollinen äänenpaineen neliön aikakeskiarvoon (**luku 1**), saadaan absorptiosuhteeksi

$$(3.3.13) \quad \alpha = 1 - \frac{I_{x,r}}{I_{x,i}} = 1 - \left(\frac{\hat{p}_r}{\hat{p}_i} \right)^2 = 1 - |\mathbf{R}|^2 = 1 - \left| \frac{\mathbf{Z}_{a1} - \mathbf{Z}_{a0}}{\mathbf{Z}_{a1} + \mathbf{Z}_{a0}} \right|^2$$

Absorptiosuhde on reaaliluku 0 ja 1 välillä. Jos \mathbf{Z}_{a0} ja \mathbf{Z}_{a1} poikkeavat toisistaan paljon, on absorptiosuhde pieni ja heijastuminen voimakasta. Hyvään absorptiosuhteeseen päästään, kun impedanssien arvot ovat lähellä toisiaan, jolloin ääni läpäisee rajapinnan.

Yleisimmin tarkasteltavana on tapaus, jossa materiaali 0 on ilma. Sen karakteristinen impedanssi reaaliluku $Z_0 = \rho_0 c_0$ ja saadaan

$$(3.3.14) \quad \alpha = 1 - |\mathbf{R}|^2 = 1 - \left| \frac{\mathbf{Z}_{a1} - Z_0}{\mathbf{Z}_{a1} + Z_0} \right|^2$$

Jos materiaalin 1 karakteristinen impedanssi normalisoidaan ilman karakteristiseen impedanssiin nähden

$$(3.3.15) \quad \mathbf{z}_{a1} = \frac{\mathbf{Z}_{a1}}{Z_0}$$

yhtälö **3.3.14** sievenee muotoon:

$$(3.3.16) \quad \alpha = 1 - \left| \frac{\mathbf{z}_{a1} - 1}{\mathbf{z}_{a1} + 1} \right|^2$$

Edelliset yhtälöt edellyttävät kompleksilukukaavojen käyttöä. Yhtälö **3.3.14** voidaan sieventää muotoon, jossa kompleksilukulaskentaa ei tarvita:

$$(3.3.17) \quad \alpha = 1 - |\mathbf{R}|^2 = \frac{4Z'_{a1} Z_0}{(Z'_{a1} + Z_0)^2 + Z''_{a1}{}^2}$$

On huomattava, että yhtälö johdettiin tilanteessa, jossa materiaali 1 oletettiin äärettömän paksuksi. Tällöin yhtälöissä voitiin käyttää materiaalin 1 karakteristista impedanssia sellaisenaan. Todellisuudessa kiinnostavia ovat tilanteet, joissa materiaalilla 1 on äärellinen paksuus. Tällöin \mathbf{Z}_{a1} korvataan edellisissä absorptiosuhteyhtälöissä materiaalin pintaimpedanssilla \mathbf{Z}_1 . Tällaisille tilanteille esitetään laskentamenetelmiä seuraavissa luvuissa.

(II) VINO TULOKULMA

Vinolla äänen tulokulmalla pitää tehdä ero paikallisesti ja kokonaisuutena reagoivien materiaalien kesken, koska rajapinnan läpäisevä ääni taittuu näissä eri tavoin.

Oletetaan kuvan **3.3.1b** mukainen tilanne, jossa ääni osuu materiaalien 0 ja 1 rajapintaan kulmassa θ_i . Materiaali 1 on kokonaisuutena reagoiva (*bulk reacting*), jos ääni jatkaa matkaa materiaalin sisällä kulmassa θ_t , joka määräytyy Snellin taittumislain mukaan:

$$(3.3.18) \quad \frac{c_0}{\sin \theta_i} = \frac{c_1}{\sin \theta_t}$$

Tällöin heijastuskertoimeksi saadaan

$$(3.3.19) \quad \mathbf{R}(\theta_i) = \frac{\mathbf{Z}_{a1} \cos \theta_i - \mathbf{Z}_{a0} \cos \theta_t}{\mathbf{Z}_{a1} \cos \theta_i + \mathbf{Z}_{a0} \cos \theta_t}$$

Paikallisesti reagoivissa absorptiomateriaaleissa pinnan suuntainen hiukkasvärähtely on estynyt rajapinnan

takana (kuva 3.3.1c). Jos materiaali 1 on paikallisesti reagoiva, eli $\theta=0^\circ$ äänen tulokulmasta riippumatta, saadaan heijastuskertoimen muotoon

$$(3.3.20) \quad \mathbf{R}(\theta_i) = \frac{\mathbf{Z}_{a1} \cos \theta_i - \mathbf{Z}_{a0}}{\mathbf{Z}_{a1} \cos \theta_i + \mathbf{Z}_{a0}}$$

Kummassakin tapauksessa saadaan absorptiosuhteeksi tulokulmalla θ

$$(3.3.21) \quad \alpha_{\theta_i} = 1 - |\mathbf{R}|^2 = 1 - \left| \frac{\mathbf{Z}_{a1} - \mathbf{Z}_{a0} / \cos \theta_i}{\mathbf{Z}_{a1} + \mathbf{Z}_{a0} / \cos \theta_i} \right|^2$$

Paikallisesti reagoiva tarkoittaa, että hiukkasnopeus rajapinnalla riippuu ainoastaan paikallisesta äänenpaineesta. Kokonaisuutena reagoivilla materiaaleilla hiukkasnopeus rajapinnalla riippuu paikallisen äänenpaineen lisäksi äänenpaineen jakaumasta absorptiomateriaalin sisällä.

3.4 Huokoisuus

Huokoisuus on materiaalien absorptiotehokkuutta kuvaava ominaisuus. Se määritellään materiaalin sisältämän ilman tilavuuden V' [m³] ja materiaalin kokonaistilavuuden V [m³] suhteesta:

$$(3.4.1) \quad h = \frac{V'}{V}$$

Tyypillisesti huokoisuus on mineraalivilloilla yli 0.90. Kuitupohjaisen materiaalin huokoisuus voidaan laskea yhtälöstä

$$(3.4.2) \quad h = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_f}$$

missä ρ_f on kuituaineksen tiheys (esim. lasi, kivi tai puu) ja ρ_m on materiaalin kokonaistiheys.

Absorptiosuhde kasvaa huokoisuuden kasvaessa, jos ilma voi virrata helposti materiaalin läpi. Jos huokokset ovat yhteydessä toisiinsa, ääni voi kulkeutua helposti materiaalin sisälle ja kitkahäviöihin perustuvaa äänenabsorptio on mahdollista. Huokosten ollessa umpinaisia ei suurellakaan huokoisuudella saavuteta korkeaa absorptiosuhdetta. Äänen hiukkasnopeus u [m/s] materiaalin sisällä on verrannollinen huokoisuuteen h ja hiukkasnopeuteen u' ilmassa

$$(3.4.3) \quad u \cong s \frac{u'}{h}$$

missä s [] on rakennetekijä (*turtuosity*). Rakennetekijä kertoo, miten huokokset ovat yhteydessä toisiinsa.

3.5 Huokoisten materiaalien karakteristiset ominaisuudet

Materiaalin karakteristinen impedanssi voidaan mitata ns. impedanssiputkella tai seisovan aallon putkella. Jos materiaalin spesifinen virtausresistiivisyys tunnetaan, voidaan karakteristinen impedanssi myös mallintaa melko luotettavasti.

Delany & Bazley (1969) esittivät empiiriseen tutkimukseen perustuvan regressiomallin, jolla voidaan laskea kuitumaisen materiaalin karakteristinen impedanssi \mathbf{Z}_a ja etenemisvakio Γ_a , kun materiaalin spesifinen virtausresistiivisyys r [Pa·s/m²] tunnetaan (Cox & D'Antonio, 2004):

$$(3.5.1) \quad \Gamma_a = \Gamma'_a + j\Gamma''_a = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 0.0978E^{-0.700} - j0.189E^{-0.595} \right]$$

$$(3.5.2) \quad \mathbf{Z}_a = \mathbf{Z}'_a + j\mathbf{Z}''_a = |\mathbf{Z}_a| e^{j\varphi} = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.0571E^{-0.754} - j0.087E^{-0.732} \right]$$

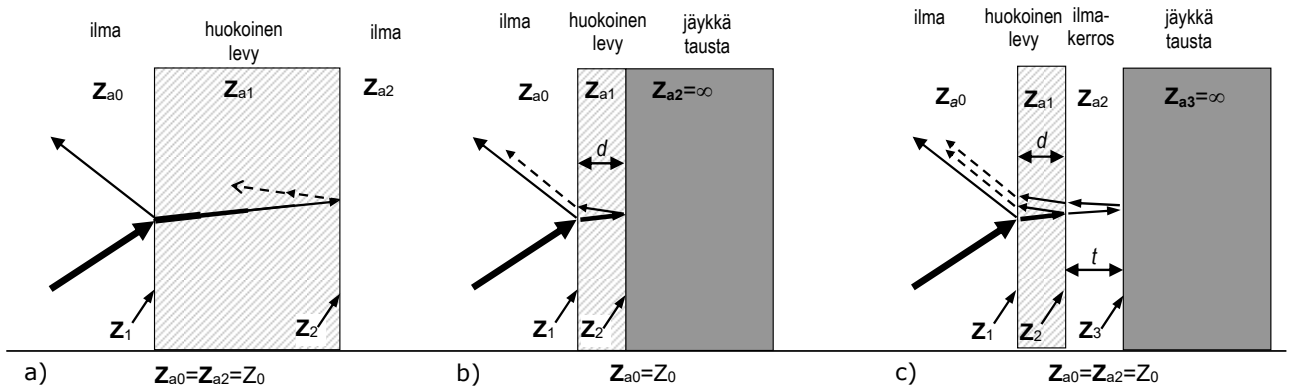
missä φ on vaihekulma ja

$$(3.5.3) \quad E = \frac{\rho_0 f}{r}$$

missä ρ_0 [kg/m³] on ilman tiheys ja f [Hz] on äänen taajuus. Yhtälössä esiintyy 8 kerrointa, jotka soveltuvat hyvin mineraalivillojen ominaisuuksien laskentaan. Hyvän laskentatarkkuuden antavia kertoimia on kehitetty myös muille materiaaleille.

3.6 Absorptiosuhteen laskenta huokoiselle levyllä

Huokoisen levyn absorptiosuhde riippuu levymateriaalin karakteristisista ominaisuuksista, levyn paksuudesta ja levyn sijainnista muihin heijastaviin tai heijastamattomiin rajapintoihin nähden. Tärkeimmät kolme tapaus on esitetty kuvassa 3.6.1. Seuraavassa esitetään mallit normaalin tulokulman absorptiosuhteen laskemiseksi.



Kuva 3.6.1. Kolme huokoisen levyn asennustapaa. Huokoinen levy on merkitty vaaleanharmaalla ja tummanharmaa materiaali on suuri-impedanssinen, täysin heijastava taustaseinä.

(A) PAKSU HUOKOINEN LEVY ILMAN YMPÄRÖIMÄNÄ

Tarkastellaan paksua huokoista levyä (kuva 3.6.1a), jonka karakteristinen impedanssi on Z_{a1} . Levy on ympäröity ilmalla. Levyä voidaan tarkastella "akustisesti paksuna" taajuusalueella, jossa pätee

$$(3.6.1) \quad \Gamma'_{a1} d_1 = \frac{2\pi d_1}{\lambda_{a1}} > 2$$

missä d_1 [m] on levyn paksuus ja λ_{a1} [m] on aallonpituus materiaalin sisällä. "Akustisesti paksu levy" tarkoittaa, että ääni vaimenee materiaalin sisällä kulkiessaan niin paljon, ettei sen takapinnalta syntyvällä heijastuksella ole enää merkitystä etupinnassa havaittaviin äänenpaineisiin. Tällöin levyn pintaimpedanssi on sama kuin materiaalin karakteristinen impedanssi ja absorptiosuhde määritetään yhtälöllä

$$(3.6.2) \quad \alpha = 1 - |\mathbf{R}|^2 = \frac{4Z'_{a1} Z_0}{(Z'_{a1} + Z_0)^2 + Z''_{a1}^2}$$

(B) OHUT HUOKOINEN LEVY HEIJASTAVAA TAUSTAA VASTEN

Tarkastellaan yleisintä levyn asennustapaa, jossa levy sijoitetaan heijastavan taustapinnan päälle (kuva 3.6.1b). Taustapinnan impedanssi oletetaan täysin heijavaksi. Heijastus vaikuttaa levyn pintaimpedanssiin Z_1 erityisesti, jos levy on akustisesti ohut ja takapinnasta heijastuvan äänen amplitudi on edelleen merkittävä sen palatessa ilman ja levyn rajapintaan. Pintaimpedanssi [N·s/m³] riippuu levyn karakteristisista ominaisuuksista (Z_{a1} , Γ_{a1}) ja levyn paksuudesta d_1 [m] seuraavasti:

$$(3.6.3) \quad Z_1 = -jZ_{a1} \cot(\Gamma_{a1} d_1) = Z_{a1} \coth(j\Gamma_{a1} d_1)$$

Hyperbolinen kotangenti kompleksiluvusta voidaan laskea yhtälöllä

$$(3.6.4) \quad \coth \Gamma = \frac{e^{\Gamma} + e^{-\Gamma}}{e^{\Gamma} - e^{-\Gamma}} = \frac{\cos \Gamma'' (e^{\Gamma'} + e^{-\Gamma'}) + j \sin \Gamma'' (e^{\Gamma'} - e^{-\Gamma'})}{\cos \Gamma'' (e^{\Gamma'} - e^{-\Gamma'}) + j \sin \Gamma'' (e^{\Gamma'} + e^{-\Gamma'})}$$

missä aaltoluvun kompleksinen esitystapa on $\Gamma = \Gamma' + j\Gamma''$. Absorptiosuhde lasketaan yhtälöllä

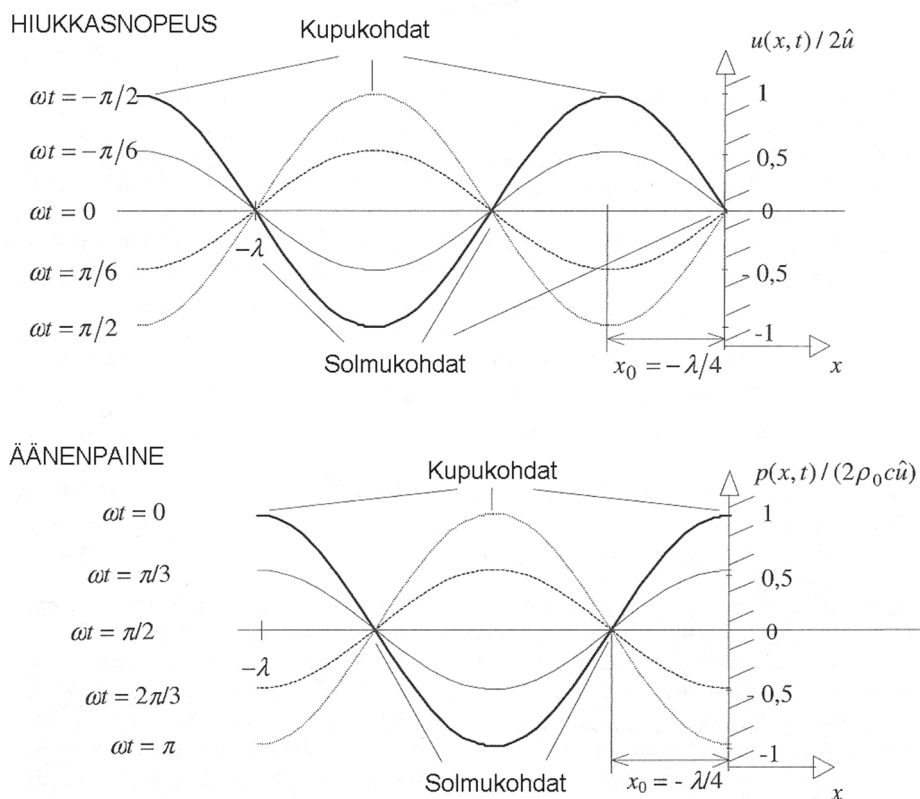
$$(3.6.5) \quad \alpha = 1 - |\mathbf{R}|^2 = \frac{4Z'_1 Z_0}{(Z'_1 + Z_0)^2 + Z''_1{}^2}$$

$\text{Coth}(x)$ lähestyy ääretöntä, kun x lähestyy nollaa ja $\text{Coth}(x)$ lähestyy ykköstä, kun x lähestyy ääretöntä. Levyn paksuus vaikuttaa siten absorptiosuhteeseen ja sen taajuuskäyttäytymiseen merkittävästi. Kun levy on ohut aallonpituuteen nähden ($d_1 \ll \lambda_{a1}/4$), Coth -termin magnitudi on suuri, $Z_1 \gg Z_a$ ja absorptiosuhde jää alhaiseksi. Tämän vuoksi esimerkiksi ohut levy ei absorboi hyvin ääntä kuin suurilla taajuuksilla. Kun $d_1 > \lambda_{a1}/\pi$ ja lisäksi Γ''_{a1} ei ole pieni, Coth -termi lähestyy ykköstä, $Z_1 = Z_a$ ja absorptiosuhde käyttäytyy kuten tapauksessa (a). Tapauksessa (b) voidaan aallonpituuteen nähden suurilla levypaksuuksilla saavuttaa sama absorptiosuhde kuin silloin, jos heijastavaa taustapintaa ei olisi.

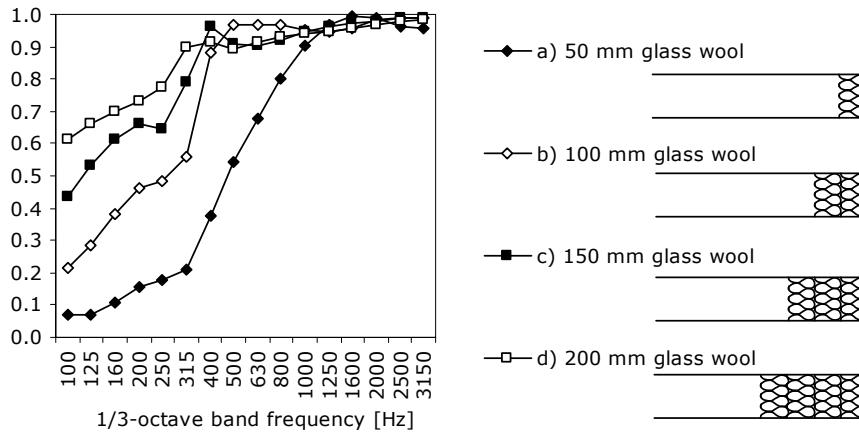
Kuvassa 3.6.2 on esitetty, miten tasoalto käyttäytyy osuttuaan kohtisuoraan rajapintaan. Äänenpaine saavuttaa maksimin seinäpinnalla, jossa hiukkasnopeuden reunaehtona on nolla (reaktiivinen äänikenttä). Pinnasta tapahtuu heijastus ja muodostuu seisova aalto siten, että hiukkasnopeus saavuttaa maksimiarvon $\lambda/4$ etäisyydellä pinnasta. Tarkka etäisyys riippuu hieman pinnan impedanssista ja vaihesiirrosta. Absorptio on tehokkaimmillaan silloin, kun hiukkasnopeus on suuri. Levyllä voidaan saavuttaa normaalilla tulokulmalla täydellinen absorptio vain, jos levy tai osa siitä sijaitsee hiukkasnopeuden maksimikohdassa.

Kuvassa 3.6.3 on esitetty levyn paksuuden vaikutus absorptiosuhteeseen. Paksuuden kasvaessa absorptiosuhde paranee pienillä taajuuksilla.

Huonetilassa ääntä saapuu pintaan kaikilta suunnilta. Tämän vuoksi lähes täydelliseen absorptioon voidaan päästä jo, kun levyn paksuus on vähintään kymmenesosa aallonpituudesta.



Kuva 3.6.2 Hiukkasnopeuden ja äänenpaineen käytös seisovassa aallossa, joka syntyy, kun ääni kohtaa heijastavan pinnan (oikealla). Huokoisen levyn pitää sijaita hiukkasnopeuden kupukohdassa, jotta saavutettaisiin maksimaalinen absorptio. (Kuva: Boden et al. 1999)



Kuva 3.6.3 Mineraalivillan ($d=50$ mm, $\rho=18$ kg/m³, $r=9600$ Pa·s/m²) normaalin tulokulman absorptiosuhteen riippuvuus paksuudesta. (Kuva: Oliva et al., 2010)

(C) OHUT HUOKOINEN LEVY, ILMAKERROS JA HEIJASTAVA TAUSTA

Tarkastellaan kuvan 3.6.1c mukaista tilannetta, jossa huokoinen levy (1) on irti kovasta taustapinnasta, jolloin levyn taakse jää ilmatäytteen kaviteetti (2). Tämä rakenne toteutuu esimerkiksi alaslasketuissa katoissa, joissa huokoisen levyn ja holvin väliin jäävään tilaan sijoitetaan talotekniikkaa. Kaviteetin pintaimpedanssi huokoisen levyn takapinnalla saadaan yhtälöstä

$$(3.6.6) \quad Z_2 = -jZ_0 \cot(k_0 t)$$

missä k_0 on aaltoluku ilmassa ja t [m] on kaviteetin paksuus. Heijastuskerroin huokoisen levyn takapinnasta on

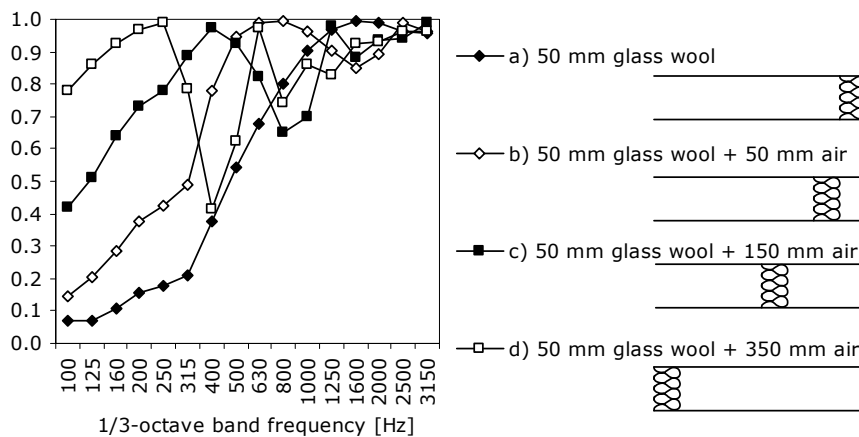
$$(3.6.7) \quad R = \frac{Z_2 - Z_{a,1}}{Z_2 + Z_{a,1}}$$

Huokoisen materiaalikerroksen etupinnan pintaimpedanssiksi saadaan

$$(3.6.8) \quad Z_1 = Z_{a1} \frac{Z_2 \cosh \Gamma_{a1} d + Z_{a1} \sinh \Gamma_{a1} d}{Z_{a1} \cosh \Gamma_{a1} d + Z_2 \sinh \Gamma_{a1} d}$$

Absorptiosuhde lasketaan yhtälöllä 3.3.17.

Kuvassa 3.6.4 on esitetty levyn takana olevan kaviteetin paksuuden vaikutus absorptiosuhteeseen. Kaviteetin paksuutta kasvattamalla parannetaan merkittävästi pientaajuuksien äänenabsorptiota mutta suuremmilla taajuuksilla havaitaan heikentymiä, jotka johtuvat kaviteettiin syntyvistä seisovista aalloista.

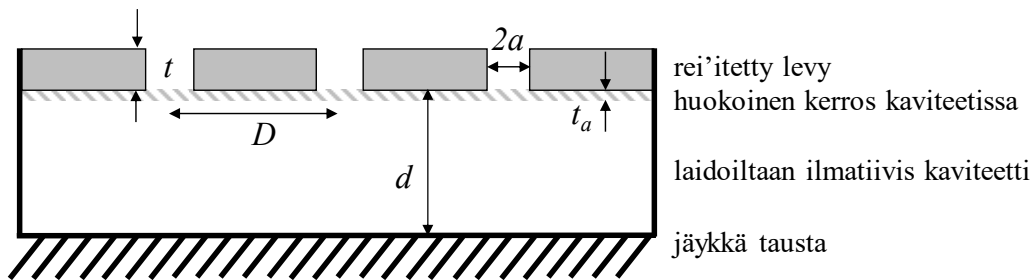


Kuva 3.6.4 Kaviteetin paksuuden t (0, 50, 150, 350 mm) vaikutus taustasta irrotetun mineraalivillan ($d=50$ mm, $\rho=18$ kg/m³, $r=9600$ Pa·s/m²) normaalin tulokulman absorptiosuhteeseen. (Lähde: Oliva et al. 2010)

3.7 Reikälevyresonaattori

Resonaattorityyppit ovat Helmholtz-resonaattori ja levyresonaattori. Reikälevyresonaattori on Helmholtz-resonaattorin yleisin sovellus. Sillä tarkoitetaan kuvan 3.7.1 mukaista kerrosrakennetta, jossa levy on rei'itetty säännöllisen hilan muodossa ja levy ilmatiiviillä kaviteetilla erotettu heijastavasta jäykästä taustapinnasta. Levyn reiässä oleva ilmassa muodostaa Helmholtz-resonaattorin (massa-jousi -systeemin) kaviteetin ilmajousen kanssa. Reikälevyresonaattori on siis Helmholtz-resonaattorien hila. Reikälevyn pintamassalla ei ole rei'itetyn levyn tapauksessa merkitystä. Jos sen sijaan levyssä ei ole reikiä, rakenteesta muodostuu levyresonaattori eli levyn massa ja kaviteetin ilmajousi resonoivat.

Yleensä reiät ovat pyöreitä, nelikulmaisia tai pitkulaisia rakoja. Kaupallisissa tuotteissa reikälevyn takapintaan on liimattu huokoinen kerros, jolla lisätään resonaattorin resistiivisiä häviöitä. Kaviteetissa voi myös olla absorptiomateriaalia muualla kuin levyn takapinnassa. Reikälevyjen absorptiosuhde riippuu mm. kaviteetin paksuudesta, reiän koosta, reiän muodosta, reikäsuhteesta, kaviteetin täyttötavasta sekä täytön spesifisestä virtausresistiivisyydestä. Mallinnustulos on äärettömän herkkä lähtömuuttujan valinnoille. Laskenta tulisi tehdä tiheällä taajuusresoluutiolla käyttäen esimerkiksi 1/9- tai 1/27-oktaavitaajuuksia. Terssikaistan arvo saadaan terssikaistan kuuluvien taajuuksien keskiarvona.



Kuva 3.7.1 Reikälevyresonaattorin rakenne ja merkinnät, jos reiät ovat pyöreitä.

Resonaattorin (reikälevy- tai levyresonaattori) pintaimpedanssi on

$$(3.7.1) \quad Z_1 = Z_1' + jZ_1''$$

Absorptiosuhde lasketaan yhtälöllä 3.3.17, kun pintaimpedanssi on ratkaistu (normaali tulokulma).

Tarkastellaan kuvan 3.7.1 reikälevyresonaattoria. Reikien väli on suuri suhteessa reikien halkaisijaan. Lisäksi reikälevyn paksuus ja reiän säde ovat aallonpituutta selvästi pienempiä. Tällöin resistanssi koostuu ilmareikien resistanssin ja reikälevyn taakse mahdollisesti asetetun huokoinen kerroksen resistanssin summasta. Reikälevyn reikäsuhte ε [] (huokoisuus) on rei'itetyn alueen osuus reikälevystä:

$$(3.7.2) \quad \varepsilon = \frac{\pi a^2}{D^2}$$

missä a [m] on pyöreän reiän säde ja D [m] on reikien välinen etäisyys. Pyöreässä reiässä (halkaisija $2a$) värähtelevän ilman resistanssi on

$$(3.7.3) \quad Z'_{air} = \frac{\rho_0}{\varepsilon} \sqrt{8\nu\omega} \left(1 + \frac{t}{2a} \right)$$

missä $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s on kineettinen viskositeetti, ω [Hz] on kulmataajuus ja t [m] on reikälevyn paksuus. Yhtälö toimii, jos reikähalkaisija on suurempi kuin 1 mm (ei ns. mikrorei'itetty levy).

Jos huokoinen levy (f_{elt}) sijoitetaan kaviteettiin vähintään reikähalkaisijan päähän reikälevystä, huokoinen levyn resistanssi on

$$(3.7.4) \quad Z'_{felt} = r t_a$$

missä r [Pa·s/m²] on levyn spesifinen virtausresistiivisyys ja t_a [m] on levyn paksuus. Jos huokoinen levy sijoitetaan välittömästi reikälevyn taakse, joka toteutuu lähes kaikissa kaupallisissa reikälevytuotteissa, on virtausnopeus huokoisessa levyssä $1/\varepsilon$ kertainen ja resistanssiksi muodostuu

$$(3.7.5) \quad Z'_{felt} = \frac{rt_a}{\varepsilon}$$

Yhtälöön **3.7.1** sijoitettava kokonaisresistanssi on huovan ja reikien ilman resistanssin summa:

$$(3.7.6) \quad Z'_1 = Z'_{felt} + Z'_{air}$$

Reikälevyn reaktanssi on muotoa

$$(3.7.7) \quad Z'_1 = \omega m' - \rho_0 c_0 \cot(kd)$$

missä m' [kg/m²] on reiässä värähtelevän ilman pintamassa

$$(3.7.8) \quad m' = \frac{\rho_0 t'}{\varepsilon}$$

ja t' [m] on reikälevyn reiässä värähtelevän ilmassan tehollinen korkeus (päätykorjattu korkeus):

$$(3.7.9) \quad t' = t + 2\delta a + \sqrt{\frac{8V}{\omega} \left(1 + \frac{t}{2a}\right)}$$

Neliöjuuritermi on merkityksellinen vain mikrorei'itetyissä levyissä, joissa reikähalkaisija on pienempi kuin 1 mm ja viskoosit häviöt reiässä alkavat olla merkittäviä. Päätykorjaus δ [-] on pyöreälle reiälle muotoa

$$(3.7.10) \quad \delta = 0.8(1 - 1.4\sqrt{\varepsilon})$$

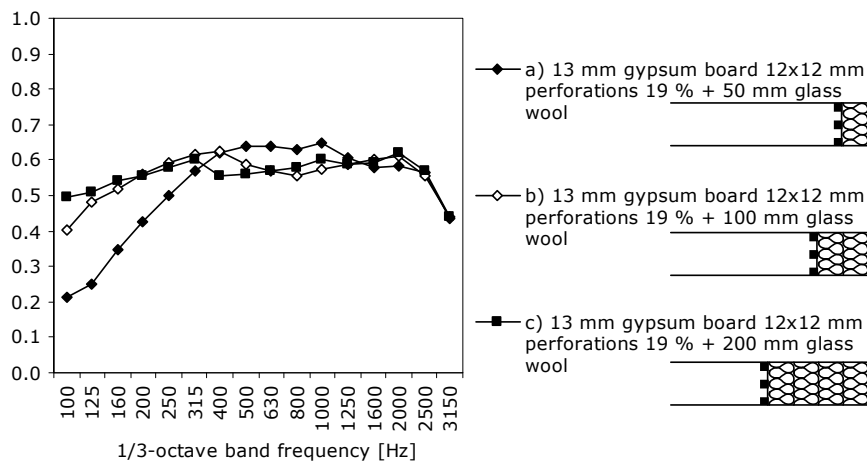
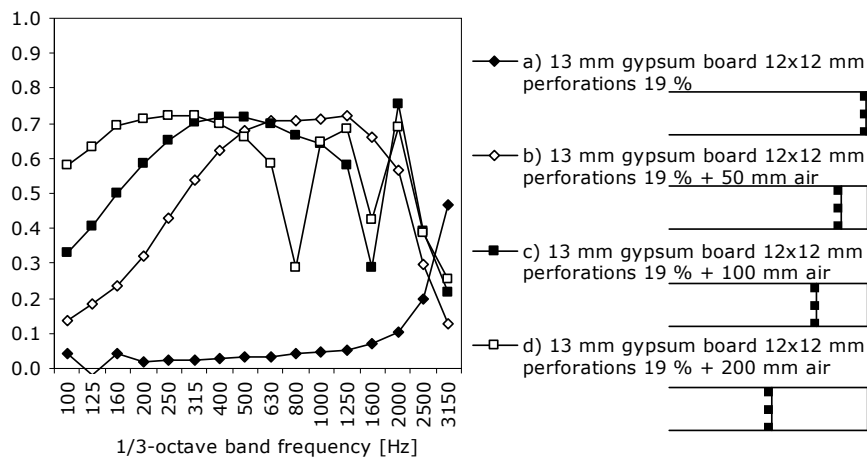
Reikälevyresonaattorin resonanssitaajuudeksi f_0 saadaan

$$(3.7.11) \quad f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{t'd}}$$

jossa t' määritetään yhtälöstä **3.7.9** jättämällä neliöjuuritermi huomioimatta. Resonanssitaajuus tulee voimakkaimmin esiin, kun huopaa ei ole tai sen resistiivisyys on alhainen.

Kuvassa **3.7.2a** on esitetty erään reikäkipsilevyn absorptiosuhdearvoja eri kaviteetin paksuuksilla. Jos reikälevy sijoitetaan kiinni taustapintaan, absorptio on vähäistä, koska resonaattoria ei synny. Absorptiosuhteen maksimi siirtyy kohti pienempiä taajuuksia, kun kaviteetin paksuus kasvaa. Samalla kaviteetin seisovat aallot aiheuttavat absorptiominimejä suurilla taajuuksilla. Jos kaviteetti täytetään kokonaan huokoisella materiaalilla, absorptiokäyrästä poistuvat seisovien aaltojen aiheuttamat absorptiominimit mutta kokonaisuus ei merkittävästi parane (kuva **3.7.2b**).

Huovan ansiosta reikälevyresonaattorien absorptio on melko laajakaistainen eikä merkittäviä resonanssiabsorptiopiikkejä esiinny. Ilman huopaa pelkän reikälevyn absorptio putoaa lähes nolnaan (Oliva et al. 2010).



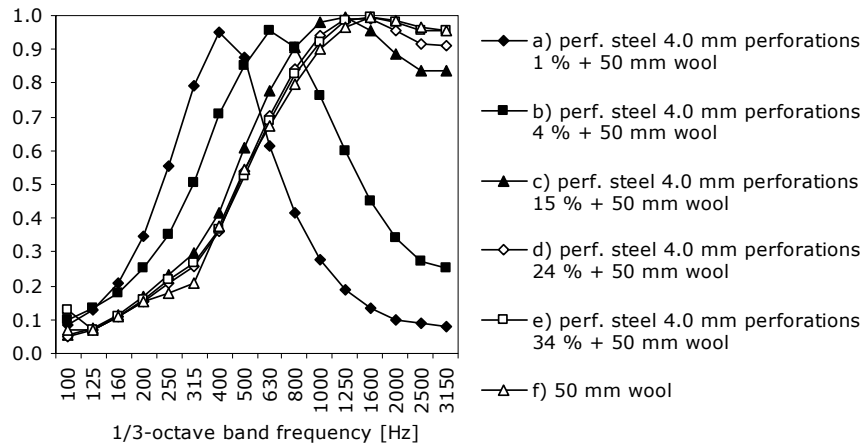
Kuva 3.7.2 Rei'itetyn 13 mm paksun kipsilevyn normaalin tulokulman absorptiosuhteen riippuvuus kaviteetin paksuudesta (0, 50, 100 ja 200 mm), kun (a) kaviteetti on tyhjä tai (b) kaviteetti on täytetty mineraalivillalla ($\rho=18 \text{ kg/m}^3$, $r=9600 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$). Kummassakin kuvassa kipsilevyn takapinnassa oli tuotteen mukainen huopa ($R_s=1183 \text{ Pas/m}$). Reikäsuhde on $\varepsilon=0.19$.

3.8 Ohuet reikälevyt

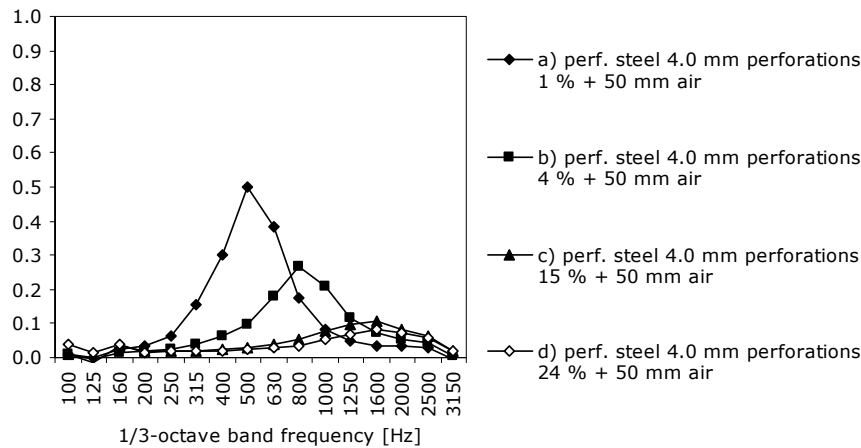
Huokoiset materiaalit peitetään joissakin tilanteissa ohuella, 0.5–1.0 mm paksulla, rei'itetyllä metallilevyllä ulkonäön tai kulutuskestävyyden parantamiseksi ilman, että levyn tarkoituksena on aikaansaada Helmholtz-levyresonaattori. Syntyvän kerrosrakenteen absorptiosuhde voidaan mallintaa **luvun 3.7** yhtälöillä.

Kuvassa **3.8.1** on esitetty ohuen reikälevypinnoituksen reikäsuhteen vaikutus taustalla olevan 50 mm paksun mineraalivillan absorptiosuhteeseen. Suurella reikäsuhdeella ei ole vaikutusta mineraalivillan absorptiokykyyn vaan reikälevy on akustisesti läpinäkyvä. Pienellä reikäsuhdeella suurten taajuuksien absorptiokyky heikkenee merkittävästi ja Helmholtz-resonaattorin ominaisuudet tulevat esiin.

Jos reikälevyn takana ei ole huokoista materiaalia, absorptio esiintyy vain Helmholtz-resonanssitaajuudella (kuva **3.8.2**).



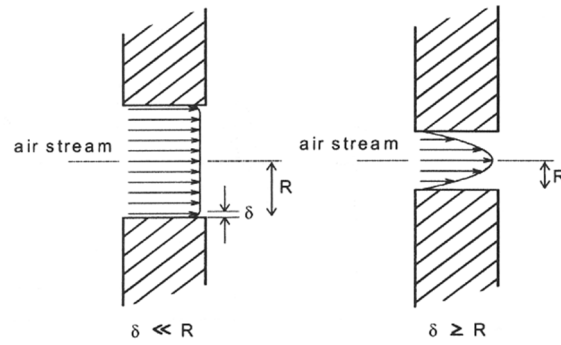
Kuva 3.8.1 Reikäpellin (paksuus 0.9 mm) reikäsuhteen vaikutus sen takana olevan mineraalivillan ($d=50$ mm, $\rho=18$ kg/m³, $r=Pa \cdot s/m^2$) normaalitulokulman absorptiosuhteeseen. Villa on asennettu jäykkää taustaa vasten. Kuvassa esitetyt reikäsuhteet ε ovat 0.01, 0.04, 0.15, 0.24, 0.35 ja 1.00. (Lähde: Oliva et al., 2010)



Kuva 3.8.2 Reikäpellin (paksuus 0.9 mm) reikäsuhteen vaikutus normaalitulokulman absorptiosuhteeseen, kun reikäpellin takana on 50 mm ilmatäytteinen kaviteetti. Kuvassa esitetyt reikäsuhteet ε ovat 0.01, 0.04, 0.15 ja 0.24. (Lähde: Oliva et al., 2010).

3.9 Mikrorei'itetyt levyt

Mikrorei'itetyn levyn absorptiosuhteen laskenta on mahdollista **luvussa 3.7** esitetyllä tavalla mutta reiän aiheuttama resistanssi kannattaa arvioida yhtälöllä **3.7.3** tarkemmalla yhtälöllä, joita on kirjallisuudessa tarjolla. Mikrorei'itetystä levyssä reikien halkaisija on alle 1 mm. Ilman viskositeetin vuoksi hiukkassopeus reiän keskellä on aina suurempi kuin reiän laidoilla mutta reiän ollessa erittäin pieni viskositeetti pienentää hiukkassopeutta lähes koko reiän alalla (kuva **3.9.1**). Ilman viskositeetti aiheuttaa merkittävää kitkahäviötä reiässä mikä tarkoittaa resistanssin kasvua. Muutoin mikrorei'itetyn levyn toimintaperiaate on sama kuin Helmholtz -resonaattorissa eli reiässä oleva ilmamassa resonoi kaviteetin ilmajousen kanssa. Mikrorei'ityksen vuoksi resistiivinen impedanssi on valmiiksi korkea, jolloin ei tarvita erillistä huokoista absorptiomateriaalikerrosta levyn takana. Tästä johtuen voidaan mikrorei'itetyistä levyistä tehdä läpinäkyviä. Mikroperforoitu levy voi antaa kohtalaisen hyvän absorptiosuhteen taajuusalueelle 50–1000 Hz. Yksittäinen reikäkoko-kaviteetti -mitoitus voi antaa hyvän absorptiosuhteen vain noin oktaavin levyiselle taajuuskaistalle. Laajakaistaisen absorptioon saavuttamiseksi tarvitaan useita eri mitoituksia. Tästä johtuen mikrorei'itetyillä levyillä ei voida koskaan saavuttaa pinta-alaansa nähden korkeita absorptiosuhteita mutta läpinäkyvyyden vuoksi mikrorei'itetyillä levyillä voidaan aikaansaada hyviä lopputuloksia huoneissa, joissa ei haluta tai voida käyttää näkyviä absorptiopintoja.

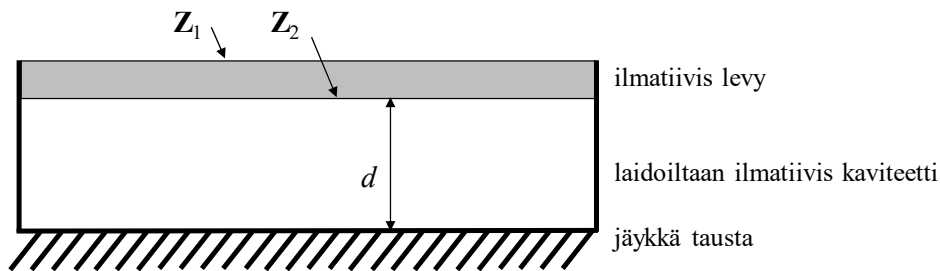


Kuva 3.9.1 Ilman virtaus suuressa ja pienessä reiässä. (Lähde: Mechel and Ver, 1999)

3.10 Levyresonaattorit

Levyresonaattori käsiteltiin epäsuorasti jo **luvussa 3.7**. Siinä kuvatut yhtälöt toimivat myös levyresonaattorille, kun pintamassan m' paikalle asetetaan levyn pintamassa ja reikien ilman resistanssia ei huomioida eli $Z'_{\text{air}} = 0$.

Levyresonaattori koostuu tiiviistä rei'ittämättömästä levystä, ilmatiiviistä kaviteetista levyn takana ja jäykästä heijastavasta taustasta, jonka varaan levy on koolauksin rakennettu (kuva 3.10.1).



Kuva 3.10.1 Levyresonaattorin rakenne. Levy oletetaan koko pinta-alaltaan löysäksi. Kaviteetti on yleensä ilmatäytteinen tai täytetty osin tai kokonaan huokoisella aineella.

Jos levy on löysä ja häviötön, ja se sijaitsee vapaasti avaruudessa, levyn karakteristinen impedanssi on puhtaasti imaginäärinen ja se riippuu pienillä taajuuksilla pääosin levyn pintamassasta m' [kg/m^2]

$$(3.10.1) \quad Z_{a1} = j\omega m'$$

Levy muuttuu resonaattoriksi, kun sen takana on ilmakerros. Tarkastellaan taajuusaluetta, jossa aallonpituus ilmassa on suurempi kuin ilmvälin paksuus, jolloin ilmväliin ei muodostu moodeja. Tällöin ilmakerroksen pintaimpedanssi levyn takapinnassa on

$$(3.10.2) \quad Z_2 = -jZ_0 \cot(k_0 d)$$

missä Z_0 on ilman karakteristinen impedanssi ja d [m] on ilmakerroksen paksuus. Jos kaviteetissa on huokoinen täyte, sovelletaan luvun 3.6b impedanssikaavoja.

Levyresonaattorin pintaimpedanssiksi rakenteen etupinnalla saadaan

$$(3.10.3) \quad Z_1 = Z_2 + Z_{a1}$$

Absorptiosuhde lasketaan yhtälöllä 3.3.17.

Kun imaginaariosien summa menee nolllaksi, ollaan levyresonaattorin resonanssitaajuuksella, jossa absorptio saavuttaa maksimiarvonsa:

$$(3.10.4) \quad f_0 = \frac{62}{\sqrt{m'd}}$$

Jos kaviteetissa on huokoinen täyte, resonanssitaajuus on

$$(3.10.5) \quad f_0 = \frac{50}{\sqrt{m'd}}$$

Levyresonaattorille mitattu resonanssitaajuus poikkeaa yleensä laskennallisesta, koska levy ei ole löysä vaan sillä on tietty taivutusjäykkyys. Lisäksi värähtelevä efektiivinen pintamassa m'' ei ole sama kuin levyn fysikaalinen pintamassa m' , koska levy pitää kiinnittää koolauksiin ruuvaamalla tai liimaamalla ja vain osa levystä voi värähdellä vapaasti.

3.11 Monikerrosrakenteen mallintaminen

Rakennuksissa ja ajoneuvoissa käytetään usein monikerrosratkaisuja pintojen erilaisten ominaisuusvaatimusten optimoimiseksi. Vaatimuksia rakenteelle voivat asettaa reunaehdot, kuten höyrynläpäisy, paloturvallisuus, lämmöneristys, estetiikka, iskunkestävyys, valmistuskustannukset ja kokonaistaloudellisuus. Absorptiosuhteen laskennallinen arviointi edellyttää kunkin kerroksen karakteristisen impedanssin ja etenemisvakion tuntemusta. Tässä luvussa on esitetään yleisempi malli monikerrosrakenteille (Oliva ym., 2009). Malli soveltuu kohtisuoralle äänen tulokulmalle.

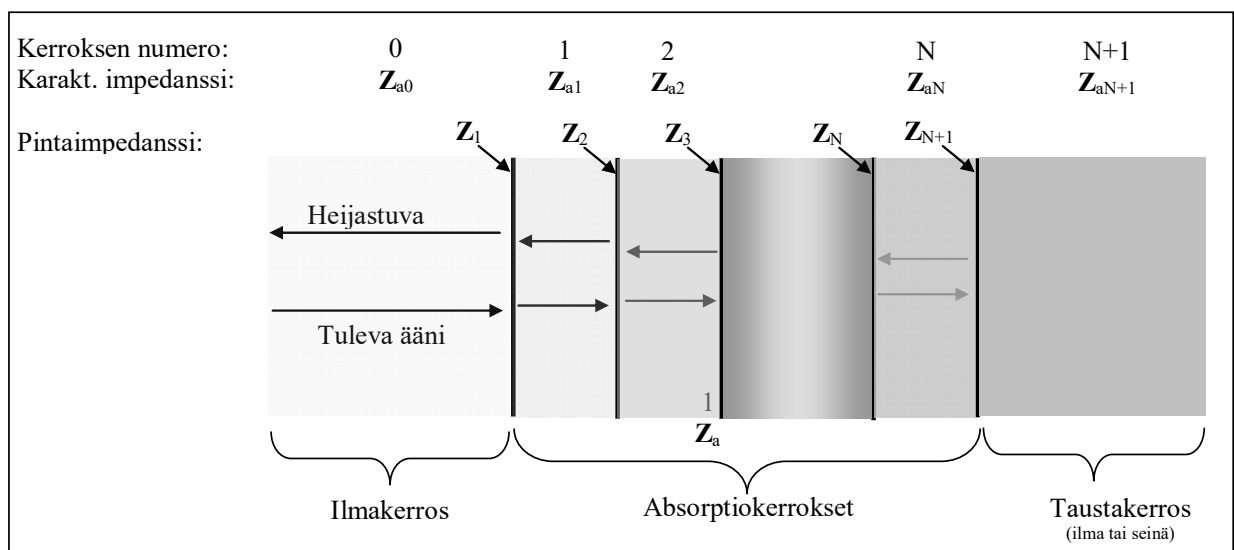
Oletetaan, että absorptiomateriaali koostuu N kerroksesta. Ketjutusmenetelmässä määritetään rekursiivisesti jokaisen materiaalikerroksen etupinnan pintaimpedanssit (kuva 3.11.1). Ääni saapuu materiaalista 0, joka oletetaan ilmaksi, ja saapuu ensimmäisenä materiaalikerroksen 1 pintaan. Mallinnuksen tehtävänä on määrittää rekursiivisesti pinnan 1 pintaimpedanssi Z_1 , josta sitten absorptiosuhde voidaan määrittää aiemmin esitetyllä tavalla. Ketjutus aloitetaan äänen tulosuunnasta katsottuna takimmaisesta kerroksesta ($i=N$). Mallintaminen aloitetaan aina määrittämällä absorptiorakenteen taustakerroksen $N+1$ pintaimpedanssi Z_{N+1} , joka on yleensä jäykkä seinä tai ilma.

Materiaalikerroksen i pintaimpedanssi määritetään rekursiivisesti yhtälöllä

$$(3.11.1) \quad Z_i = \frac{-jZ_{i+1}Z_{a,i} \cot(\Gamma_{a,i}d_i) + Z_i^2}{Z_{i+1} - jZ_{a,i} \cot(\Gamma_{a,i}d_i)}$$

missä $Z_{a,i}$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$] on materiaalin karakteristinen impedanssi, $\Gamma_{a,i}$ [m^{-1}] on materiaalin etenemisvakio, d_i on materiaalin paksuus ja Z_{i+1} on materiaalin takana olevan kerroksen (tai rekursiivisesti määritetyn kerrosyhdistelmän) pintaimpedanssi. Absorptiosuhde lasketaan lopuksi yhtälöstä

$$(3.11.2) \quad \alpha = 1 - |\mathbf{R}|^2 = 1 - \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right|^2$$



Kuva 3.11.1 Monikerroksisen absorptiomateriaalin impedanssin mallintaminen. Mallinnus tapahtuu oikealta vasemmalle. Lopputuloksena saadaan etummaisesta pinnan pintaimpedanssi Z_1 , jonka perusteella koko rakenteen absorptiosuhde määritetään.

Taustakerroksena on yleensä täysin heijastava seinä (rakennettu seinää vasten), jolloin sen pintaimpedanssin Z_{N+1} sekä reaali- että imaginaariosat merkitään äärettömäksi. Jos taustakerroksena on ilma (esim. seinäke tai riippuva levy), on sen pintaimpedanssi sama kuin ilman karakteristinen impedanssi eli $Z_{N+1}=Z_0=443 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ja imaginaariosa on nolla.

Yksinkertaisin tapaus on yksikerrosrakenne ($N=1$), jossa yhtälöä 3.11.1 käytetään vain kerran. Absorptiomateriaalikerros ($i=1$) on tällöin suoraan taustakerrosta ($i=2$) vasten. Monikerrosrakenteeksi katsotaan absorptiorakenne, jossa on vähintään kaksi absorptiokerrosta ($N>2$).

Kerroksina voi olla:

1. huokoinen levy
2. ilmakerros
3. rei'itetty tai rei'ittämätön tiivis levy

Seuraavassa esitetään näiden vaihtoehtojen karakterististen ominaisuuksien määrittäytävät.

(i) Huokoinen materiaali

Huokoisen levyn karakteristinen impedanssi määritetään luvun 3.5 mukaan.

(ii) Ilmakerros

Ilmakerroksen karakteristinen impedanssi on puhdas reaalityyppinen: $Z_a=Z_0=\rho_0c_0=443 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$. Etenemisvakio on puhdas imaginaarityyppinen $\Gamma_a=jk_0 \text{ [1/m]}$.

(iii) Rei'itetty tai rei'ittämätön tiivis levy

Sovelletaan luvun 3.7 yhtälöitä.

3.12 Tilastollinen absorptiosuhde

Huonetilassa ääntä saapuu näytteeseen kaikilta suunnilta eli 180 asteen kulmassa. Tällöin puhutaan diffuusista tulokulmasta. Diffuusin tulokulman absorptiosuhdetta kutsutaan tilastolliseksi absorptiosuhteeksi α_{st} . Materiaalien tuotearvot ilmoitetaan aina tilastollisen absorptiosuhteen arvoina, koska se antaa paremman kuvan tuotteen käyttäytymisestä huoneessa kuin normaalin tulokulman absorptiosuhde.

Kokonaisuutena reagoivilla materiaaleilla (*bulk reacting*) ääni jatkaa rajapinnan takana kutakuinkin samassa etenemiskulmassa kuin pintaan osuva ääni. Tilastollinen absorptiosuhde määritetään Paris -yhtälöllä

$$(3.12.1) \quad \alpha_{st} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

missä kulmariippuva absorptiosuhde $\alpha(\theta)$ saadaan esimerkiksi kokeellisista havainnoista. Jos materiaali on paikallisesti reagoiva (*locally reacting*), ääni etenee rajapinnan jälkeen kohtisuoraan pintaa vasten. Näin tapahtuu reikälevyissä, koska jokainen reikä toimii pistelähteenä. Tilastollinen absorptiosuhde saadaan yhtälöllä (ISO 10534)

$$(3.12.2) \quad \alpha_{st} = 8 \frac{z'}{z'^2+z''^2} \left[1 - \frac{z'}{z'^2+z''^2} \ln(1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{1}{z''} \frac{z'^2 - z''^2}{z'^2 + z''^2} \arctan\left(\frac{z''}{1+z'}\right) \right]$$

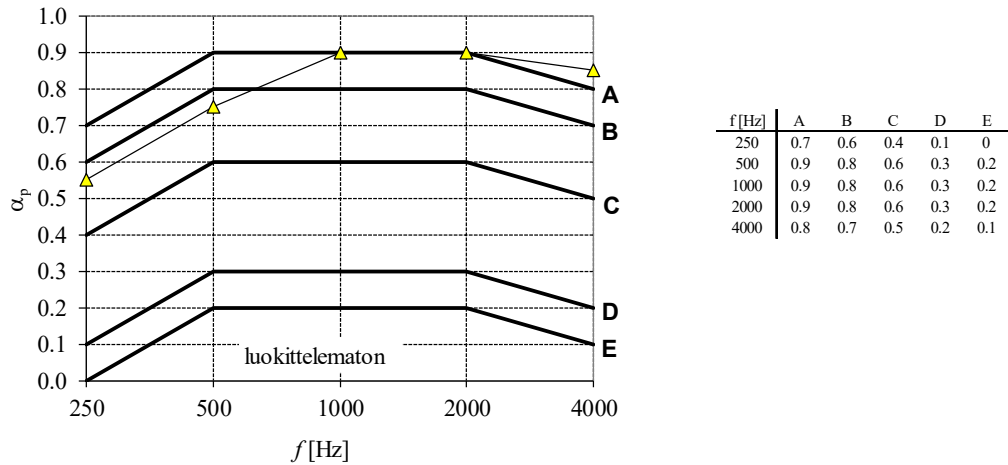
missä z on materiaalin normalisoitu pintaimpedanssi kohtisuorassa kulmassa $\theta=0^\circ$ jaettuna ilman ominaisimpedanssilla

$$(3.12.3) \quad z = z' + jz'' = \frac{Z}{\rho_0 c_0}$$

3.13 Absorptiomateriaalien luokitus

ISO 11654 esittää menetelmän, jolla absorptiomateriaalit voidaan luokitella luokkiin A–E niiden absorptiosuhteen mukaan. Menetelmä on laajassa käytössä, koska se helpottaa tuotteiden valintakriteerien esittämistä esimerkiksi rakennussuunnittelussa, jossa taajuusriippuvia absorptiosuhdevaatimuksia on hankala käyttää. Luokitus soveltuu normaaleihin huonetiloihin sijoitettaville materiaaleille, kun pääasiallisena

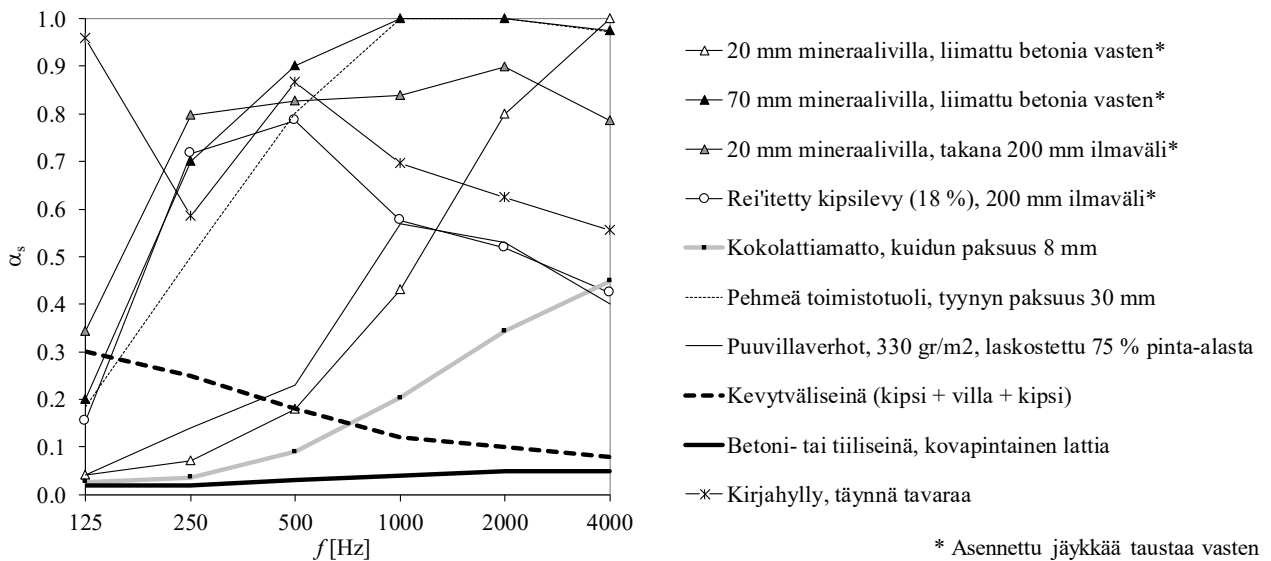
äänilähteenä on puhe. Luokitus perustuu oktaavikaistoihin 250–4000 Hz. Absorptiosuhteen oktaaviarvot pyöristetään ensin 0.05 tarkkuuteen (practical absorption coefficient, α_p). Näitä verrataan kuvan 3.13.1 vertailukäyriin A–E. Luokka X voidaan saavuttaa, jos mitatut oktaavikaista-arvot alittavat luokan X vertailukäyrän oktaavikaista-arvot korkeintaan määrän 0.10. Vertailukäyrän ylityksestä ei saa hyvitystä.



Kuva 3.13.1 ISO 11654 mukaiset vertailukäyrät absorptioluokille A–E. Esimerkkituloksella (kolmiot) saavutetaan luokka B.

3.14 Absorptiosuhdearvoja

Kuvassa 3.14.1 ja taulukossa 3.14.1 on esitetty tilastollisia absorptiosuhteita (diffuusi tulokulma).



Kuva 3.14.1. Tilastollisia absorptiosuhteita α_s oktaavitaajuuskaistoittain.

materiaaliparametreista, Rakenteiden mekaniikka 41(1) 51-57.
http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2008/nro1/RakMek_41_1_2008_8.pdf.

Oliva, D., Häggblom, H., Keränen, J., Virjonen, P., Hongisto, V. (2007). Absorptiosuhteen riippuvuus materiaaliparametreista. Akustiikkapäivät 27-28.9.2007, Espoo, 124-129, Akustinen Seura r.y. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/Oliva_etal.pdf.

Oliva, D., Häggblom, H., Hongisto, V. (2009). Monikerroksisten absorptiorakenteiden mallintaminen. Akustiikkapäivät 2009, Vaasa 14-15.5, 228-233, Akustinen Seura ry, Espoo. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/26_Oliva.pdf.

RIL 129-2003 Ääneneristyksen toteuttaminen, Rakennusinsinöörien liitto r.y., Helsinki, 2003.

4 Huoneakustiikka

4.1 Johdanto

Huoneakustiikka on hyvin moninainen käsite, jonka sisältö riippuu huoneen käyttötarkoituksesta.

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa (Ympäristöministeriö, 2017&2018) huoneakustiikkaan suoraan vaikuttavat vaatimukset esitetään viidellä mitattavalla suureella:

1. jälkikaiunta-aika T , joka määritetään oktaavikaistoilla 250–2000 Hz;
2. puheensirtoindeksi STI , joka määritellään oktaavikaistoilla 125–8000 Hz;
3. taustaäänitaso
 - talotekniikan A-painotettu ekvivalenttiäänienpainetaso* taajuusalueella 20–20000 Hz, L_{Aeq} ;
 - maksimiäänienpainetaso Fast-aikapainotuksella taajuusalueella 20–20000 Hz, L_{AFmax} .
 - A-painotettu ekvivalenttiäänienpainetaso* rakennuksen ulkopuolelta alueella 20–20000 Hz, L_{Aeq} .

* Näihin arvoihin sisältyy tarvittava impulssimaisuus- ja kapeakaistaisuuskorjaus.

Taustaääntä voi aiheutua huoneakustiikkaa haittaavasti myös naapurihuoneista. Tässä mielessä myös huonetta rajaavien rakenteiden ilma- ja askelääneneristys liittyvät huoneakustisiin tavoitteisiin. Tässä luvussa keskitytään kuitenkin suureisiin 1 ja 2, koska taustaäänien hallintaa ja äänieristystä käsitellään muissa luvuissa. Poikkeuksena on puheenpeittoääni.

Jälkikaiunta-aikaan kohdistuu rakentamismääräyksissä vaatimuksia mm. porraskäytävissä, koulujen ja päiväkotien opetustiloissa (luokkahuoneissa), neuvotteluhuoneissa, ruokailuhuoneissa, potilashuoneissa, lääkärin vastaanottohuoneissa, avotoimistoissa, toimistohuoneissa, liikuntatiloissa sekä hoito- ja harrastustiloissa. Jälkikaiunta-aikaa hallitaan absorptiomateriaaleilla. Jälkikaiunta-ajan minimointi on myös keskeinen meluntorjuntakeino esimerkiksi konehuoneissa, miehitetyissä tuotantotiloissa, aulatiloissa, kirjastoissa, ravintoloissa, julkisissa tiloissa ja kaupan alan tiloissa, vaikkakaan näihin tiloihin ei liity varsinaisia määräyksiä.

Esitystiloissa huoneakustiikkasuunnittelu pyrkii siihen, että esittäjän ääni (puhe, soitin, kaiutinääni) saadaan kulkeutumaan mahdollisimman puhtaasti kuulijoille koko huonetilassa. Tämä hoidetaan asettamalla suureille 1–5 asianmukaiset tavoitetasot, joita ovat suuri STI-arvo, sopivan mittainen jälkikaiunta-aika ja mahdollisimman alhainen taustamelutaso. Keskisuurissa ja suurissa tiloissa on lisäksi huoneen geometria suunniteltava tarkoituksenmukaisesti tukemaan esittäjän äänen siirtymistä kuulijoille.

Suuriin esitystiloihin kuten elokuvateattereihin, teattereihin, auditorioihin, monitoimitiloihin, jäähalleihin ja konserttisaleihin ei anneta rakentamismääräyksissä tavoitetasoja, koska tavoitetasot määräytyvät käyttötarkoituksen tai –tarkoitusten mukaan. Akustista suunnittelijaa tarvitaan silloin sekä määrittelemään tavoitetasot että suunnittelemaan toteutus tavoitetasojen mukaisesti. Suurissa tiloissa voidaan asettaa tavoitetasoja myös ns. konserttisalisuureille. Joissakin tilanteissa käytetään myös sirottavia pintoja, kun halutaan olla lisäämättä absorption määrää mutta välttää peiliheijastuminen. Suuriin esitystiloihin liittyy aina sähköinen äänentoisto. Yhä useammin suuriin esitystiloihin liittyy myös sähköinen huoneakustiikan muokkausmahdollisuus, jossa tilan jälkikaiunta-aikaa voidaan keinotekoisesti pidentää, jos esitysmateriaali tätä vaatii.

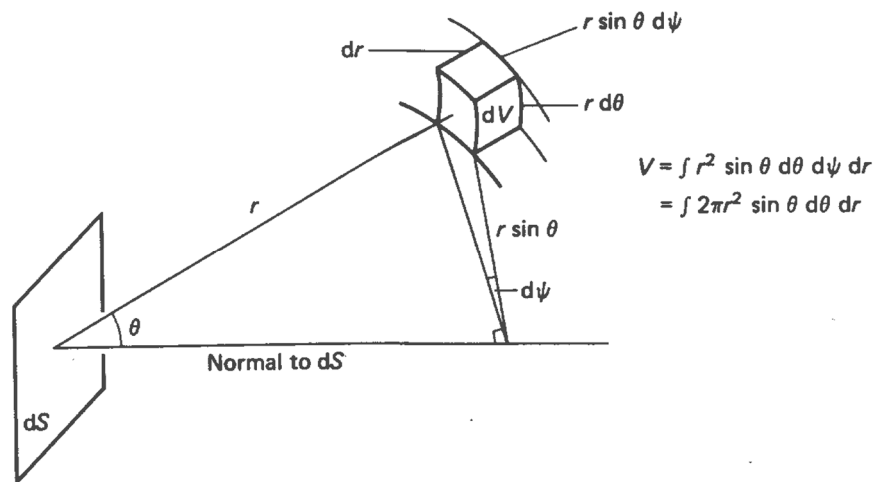
Puhe- ja esitystiloissa on tärkeää huomioida myös esittäjän, ei pelkästään yleisön kokema huoneakustiikka. Esittäjällä tulee olla jatkuvasti se kokemus, että kuulijat kuulevat äänen hyvin, jotta hänen ei tarvitse muuttaa esitystapaansa.

Avotoimistoissa, ryhmäopetustiloissa, kirjastoissa, terveydenhoitotiloissa ja yleisön odotustiloissa on tarkoituksenmukaista, että (luottamukselliset) keskustelut eivät kantaudu normaalia keskusteluetäisyyttä (1–3 m) kauemmaksi. Tämän vuoksi huoneakustiikan käsitettä laajennettiin 2000-luvulla liittämällä siihen puheyksityisyyden käsite. Hyvää puheyksityisyyttä tukee pieni STI-arvo, johon päästään lyhyellä jälkikaiunta-ajalla ja sopivalla taustaäänitasolla. Taustaäänien tasoa korotetaan tarvittaessa keinotekoisesti ns. puheenpeittoäänijärjestelmää käyttäen.

4.2 Diffuusin kentän intensiteetti huonepinnalle

Tarkastellaan huonetta, jossa yksi pisteäänilähde tuottaa tasaisesti äänienergiaa tilaan ja tilassa vallitsee *diffuusi äänikenttä*. Tämä toteutuu, jos absorptiosuhde α on vakio ja verrattain pieni kaikilla huonepinoilla, joiden yhteenlaskettu ala on S . Lisäksi vaatimuksena on, että huone on kuutiomainen ja kaikki huoneimitat ovat selvästi suuremmat kuin tarkasteltavan äänen aallonpituus. Lisäksi ilmassa tapahtuva absorptio on mitätöntä, jolloin se jätetään tarkastelussa huomioimatta. Tämä toteutuu yleensä silloin, kun huonekosteus on suuri, huoneilavuus on rajallinen (alle 1000 m^3) ja äänen taajuus on alle 5 kHz. Huoneessa vallitsee sama äänenpainetaso kaikissa sen pisteissä ja äänen intensiteetti on nolla paitsi äänilähteen lähellä sekä huonepinoilla, joihin absorboituu ääntä teholla $S\alpha I_i$ [W], missä I_i [W/m^2] on pintaan osuva intensiteetti. Tässä luvussa määritetään tämä intensiteetti.

Ajatellaan kuvan 4.2.1 mukaista tilavuusalkiota dV [m^3], jossa vallitsee energiatiheys ε [J/m^3]. Kyseessä ei ole ääntä tuottava pisteäänilähde vaan tilavuusalkio, johon ääni on kantautunut diffuusista äänikentästä. Seuraavassa selvitetään, missä määrin tilavuusalkiosta säteilee ääntä huonepinnan pinta-alkiolle dS , joka on etäisyydellä r tilavuusalkiosta. Diffuusissa huoneessa vallitsee sama energiatiheys huoneen jokaisessa pisteessä ja kokonaisenergia tilavuusalkiossa dV on εdV .



Kuva 4.2.1 Diffuusin äänikentän tilavuusalkio dV säteilee ääntä huonepinta-alkiolle dS . Ilmiötä tarkastellaan pallokoordinaatistossa.

Etäisyydellä r tilavuusalkiosta sijaitsevan pallopinnan pinta-ala on $4\pi r^2$. Koska diffuusissa kentässä ääni säteilee joka suuntaan samalla teholla, pinta-alkiolle dS osuu tilavuusalkion äänienergiasta εdV osuus $dS \cos(\theta)/4\pi r^2$, kun θ on projektiokulma pinta-alkiolle dS . Pinta-alkiolle dS säteilee siten tilavuusalkiosta dV energia-alkio

$$(4.2.1) \quad \Delta E = \frac{\varepsilon dV dS \cos \theta}{4\pi r^2}$$

Pinnalle saapuva kokonaisenergia koko huoneesta saadaan integroimalla tilavuuden suhteen. Integrointiyksikkönä toimii onntto pallokuori, jonka tilavuus on kuvan 4.2.1 perusteella

$$(4.2.2) \quad dV = 2\pi r^2 \sin \theta \, d\theta \, dr$$

Koska pinta-alkio on huonepinnalla, huoneen kokonaistilavuus katetaan integroimalla θ :n suhteen puoliavaruuden yli:

$$(4.2.3) \quad dE = \int_0^{\pi/2} \frac{\varepsilon dS \cos \theta}{4\pi r^2} 2\pi r^2 \sin \theta \, d\theta \, dr = \frac{\varepsilon dS dr}{4}$$

Tämä energia saavuttaa pinnan aika-alkiossa Δt , joka kuluu äänen kulkiessa tilavuusalkion dV ylitse, eli

$$(4.2.4) \quad \Delta t = dr/c_0$$

Siksi ääniteho pinnalle dS on

$$(4.2.5) \quad W_i = \frac{dE}{dt} = \frac{\varepsilon c_0 dS}{4}$$

Pintaan kohdistuva intensiteetti I_i (eli teho pintayksikköä kohti) on siis $\varepsilon c_0/4$. Huonepinnalle osuu siis neljäsosa siitä intensiteetistä, joka vallitsisi tasoallolla, jolla on energiatiheys ε_0 . Koska energiatiheys voidaan laskea tehollisesta äänenpaineesta yhtälöllä

$$(4.2.6) \quad \varepsilon = \frac{\tilde{p}^2}{\rho_0 c_0^2}$$

saadaan intensiteetiksi huoneen seinäpinnalle

$$(4.2.7) \quad I_i = \frac{\varepsilon c_0}{4} = \frac{\tilde{p}^2}{4\rho_0 c_0}$$

Tämä voidaan muuttaa desibelimuotoon jakamalla yhtälö ensin referenssi-intensiteetillä $I_0=1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ja ottamalla molemmipuolinen logaritmi

$$(4.2.8) \quad \log_{10} \left(\frac{I_i}{I_0} \right) = \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{I_0 4\rho_0 c_0} \right).$$

Kun huomioidaan, että $\rho_0 c_0=412 \text{ kg/m}^2\text{s} \sim 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, saadaan

$$(4.2.9) \quad \log_{10} \left(\frac{I_i}{I_0} \right) = \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{4 \cdot 10^{-10}} \right) - \log_{10}(4)$$

Toisen termin nimittäjäksi on rakenneltu vertailuäänepainetaso $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ neliö. Kun yhtälö kerrotaan kymmenellä, saadaan

$$(4.2.10) \quad 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_i}{I_0} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) - 10 \cdot \log_{10}(4)$$

saadaan tästä sieventämällä

$$(4.2.11) \quad L_{I_i} = L_p - 6$$

L_p tarkoittaa diffuusin äänikentän äänenpainetasoa. Diffuusissa äänikentässä äänenpainetaso on vakio. Koska mikään huone ei ole täydellisen diffuusi, äänenpainetaso määritetään huoneen tilavuuskeskiarvona kaiuntasäteen ulkopuolella äänilähteestä mitattuna. Yhtälöä sovelletaan hyvin laajasti rakennus- ja huoneakustiikassa. Esimerkkeinä ovat jälkikaiunta-ajan ja erilaiset ääneneristävyyden määritelmät.

Edellisen yhtälön avulla voidaan myös määrittää huonepinnan tiettyyn rakenneosaan e kohdistuva äänitehotaso $L_{w,e}$ [dB], kun huoneen äänitaso tunnetaan:

$$(4.2.12) \quad \boxed{L_{w,e} = L_{I_i} + 10 \cdot \log_{10}(S_e) = L_p + 10 \cdot \log_{10}(S_e) - 6}$$

missä S_e [m^2] on tarkasteltavan rakenneosan pinta-ala ja L_p [dB] on diffuusin äänikentän äänenpainetaso.

4.3 Äänenpainetaso diffuusissa äänikentässä

Tehdään samat lähtöoletukset kuin **luvussa 4.2**. Diffuusista äänikentästä huonepinnalle saapuva intensiteetti on neljäsosa vastaavan äänenpainetaso omaavan tasoallon intensiteetistä:

$$(4.3.1) \quad \frac{\tilde{p}_r^2}{\rho c} = 4I_i = 4 \frac{W}{A}$$

missä W [W] on äänilähteen teho. Seuraavassa tarkastellaan intensiteettiä I_i , joka saapuu absorboivaan materiaaliin, jota on huoneessa määrä A [m^2] ja se on tasaisesti jakautunut huonepinoille. Äänenpaine p_r [Pa] koskee diffuusin äänikentän (r =reverberant) äänenpainetta. Saavuttaessa riittävän lähelle pisteäänilähdettä (kaiuntasäde) suoraan äänilähteestä säteilevän äänenpaineen suhteellinen osuus kokonaisäänepaineesta alkaa

olla merkittävä. Pisteäänilähteen säteilemä intensiteetti I_d [W/m^2] on käänteisesti verrannollinen pistelähteen ja tarkastelupisteen välisen etäisyyden r neliöön

$$(4.3.2) \quad I_d = \frac{\tilde{p}_d^2}{\rho_0 c_0} = \frac{kW}{\Omega r^2}$$

missä p_d [Pa] on suoran äänen (*direct*) aiheuttama äänenpaine, k [-] on äänilähteen suuntakerroin tarkastelusuunnassa ja Ω [-] on tarkasteltava avaruuskulma (**luku 2**).

Suoran (d) ja kaiuntaisen (r) äänenpaineen summa, p_{tot} [Pa], on

$$(4.3.3) \quad \tilde{p}_{\text{tot}}^2 = \tilde{p}_d^2 + \tilde{p}_r^2$$

ja siten

$$(4.3.4) \quad \frac{\tilde{p}_{\text{tot}}^2}{\rho_0 c_0} = W \left(\frac{k}{\Omega r^2} + \frac{4}{A} \right)$$

Kun otetaan kymmenkantainen logaritmi ja kerrotaan kymmenellä, saadaan yhtälö, joka kertoo äänenpainetaso eri etäisyyksillä r [m] pisteäänilähteestä diffuusissa kentässä:

$$(4.3.5) \quad L_{p,\text{tot}} = L_W + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{k}{\Omega r^2} + \frac{4}{A} \right]$$

Kuvassa **4.3.1a** on esitetty yhtälön käyttäytymistä, kun huomioidaan vain sulussa oleva ensimmäinen termi (direct sound), vain toinen termi (reverberant sound) tai molemmat termit (resultant). Ensimmäinen termi jätetään huomioimatta, jos mittaus tai laskelma suoritetaan kaiuntakentässä eli kaiuntasäteen ulkopuolella.

Kaiuntasäteeksi r_R kutsutaan etäisyyttä, jossa suora ääni ja kaiuntainen ääni ovat yhtä voimakkaat. Kaiuntasädettä vastaavalla etäisyydellä äskeisen sulkulausekkeen termien tulee olla yhtäsuuret:

$$(4.3.6) \quad \frac{k}{\Omega r_R^2} = \frac{4}{A}$$

ja saadaan

$$(4.3.7) \quad r_R = \sqrt{\frac{kA}{4\Omega}}$$

Pinnalla sijaitsevan ympärisäteilevän äänilähteen ($k=1$, $\Omega=2\pi$) tapauksessa yhtälö muuttuu muotoon:

$$(4.3.8) \quad r_R \approx \frac{\sqrt{A}}{5}$$

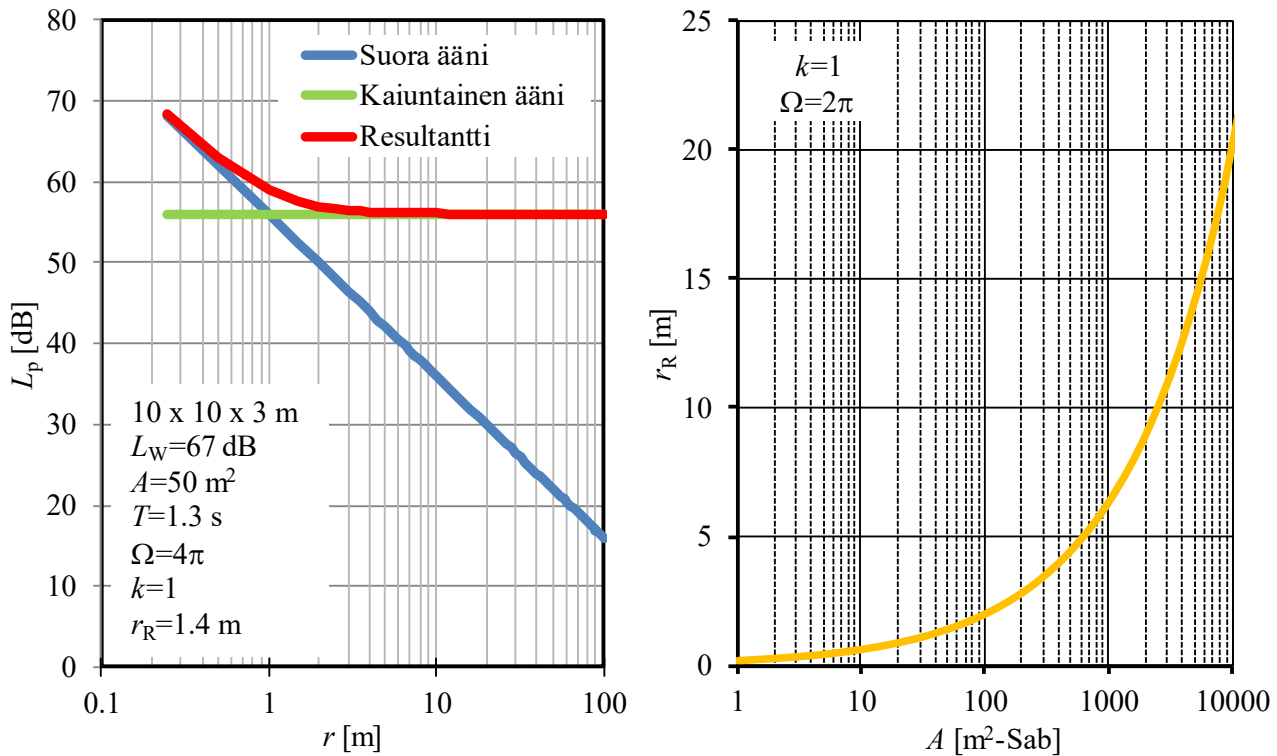
Kuvassa **4.3.1b** on havainnollistettu kaiuntasäteiden arvoa erilaisilla absorptioaloilla. Kaiuntasäde on pitkä, kun A on suuri. Diffuusin äänikentän laskelmat ja mittaukset tehdään yleensä kaiuntasäteiden ulkopuolella. Sen vuoksi kaiuntasäteiden kokoluokasta tulee olla hyvä käsitys. Suuntaavalla äänilähteellä kaiuntasädettä voidaan merkittävästi kasvattaa suuntaavuuden maksimisuunnissa.

Yhtälöä **4.3.5** voidaan myös hyödyntää äänilähteen äänitehotason määrittämiseen kaiuntaisessa huoneessa äänenpainetaso mittaauksilla. Mittaus tehdään kuvitteellisella mittauspinnalla, jonka ala on S [m^2]. Oletetaan ensin, että mittauspinta on pallo, jolloin sen pinta-ala on $S = 4\pi r^2$, missä r on mittauspinnan etäisyys äänilähteen keskipisteeseen. Tällöin yhtälöstä **4.3.5** saadaan äänitehotasoksi

$$(4.3.9) \quad L_W = L_{p,\text{tot}} + 10 \log_{10}(S) - 10 \cdot \log_{10} \left[1 + \frac{4S}{A} \right]$$

missä $L_{p,\text{tot}}$ [dB] on äänenpainetaso keskiarvo mittauspinnalla. Suuntakerroin asetettiin arvoon $k=1$, koska äänenpainetaso on määritetty kaikissa suunnissa. Käytännössä mittauspinnan muodon ei tarvitse olla pallo, kunhan äänilähde sisältyy mittauspinnan sisäpuolelle. Jos äänilähde on kovalla alustalla, alustan pinta-alaa ei huomioida S :n laskennassa. Yhtälö **4.3.9** tarkoittaa, että äänilähteen intensiteettitaso pintaa kohden on kaiuntaisessakin ympäristössä sama kuin se olisi vapaassa kentässä: kolmas termi on nolla, kun kaiuntaa ei

ole. Äänenpainetaso kasvaa mittauspinnalla kaiunnan vuoksi kolmannen termin verran.



Kuva 4.3.1 (a) Suoran äänen, kaiuntaisen äänen ja edellisten resultantin äänenpainetaso L_p äänilähteen etäisyyden r funktiona eräässä huoneessa. (b) Huonepinnalle sijoitetun ympärisäteilevän äänilähteen kaiuntasäde r_R huoneen absorptioalan A funktiona. Kummatkin kuvat riippuvat taajuudesta, koska A riippuu taajuudesta.

4.4 Jälkikaiunta-aika diffuusissa äänikentässä

Oletetaan luvun 4.2 mukainen diffuusi äänikenttä. Huoneen akustinen kokonaisenergia E [J] on energiatiheys ε [J/m³] kerrottuna huonetilavuudella V [m³]:

$$(4.4.1) \quad E = \varepsilon V$$

Syötetään huoneeseen ääntä, joka vaiennetaan hetkellä $t=0$. Tämän jälkeen akustisen energian muutos ajan funktiona riippuu huonepinnoilla tapahtuvasta absorptiotehosta $S\alpha I$ yhtälöllä

$$(4.4.2) \quad -V \frac{d\varepsilon}{dt} = S\alpha I = AI$$

missä $A=\alpha S$ on huoneen yhteenlaskettu absorptioala. Diffuusista äänikentästä huonepinnoille saapuva intensiteetti riippuu energiatihydestä kaavalla (johdettu **luvussa 4.2**)

$$(4.4.3) \quad I = \frac{\varepsilon c_0}{4}$$

Kun tämä derivoidaan ajan suhteen, saadaan

$$(4.4.4) \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{4}{c_0} \frac{\partial I}{\partial t}$$

Yhtälö 4.4.2 saadaan tällöin muotoon

$$(4.4.5) \quad \frac{dI}{dt} = -\frac{Ac_0}{4V} I$$

ja edelleen

$$(4.4.6) \quad \frac{dI}{I} = -\frac{Ac_0}{4V} dt$$

Integrointi molemmin puolin ajan suhteen tuottaa kaavaa $\int \frac{dx}{x} = \ln x$ soveltamalla

$$(4.4.7) \quad \ln I = -\frac{Ac_0}{4V} t + \text{vakio}$$

Vakioksi kirjataan intensiteetin alkuarvo $\ln I_0$ hetkellä t_0 , jolloin saadaan

$$(4.4.8) \quad \ln I - \ln I_0 = \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{Ac_0}{4V} t$$

josta saadaan pinnalle osuvan intensiteetin aikariippuvuudeksi

$$(4.4.9) \quad \frac{I}{I_0} = e^{-\frac{Ac_0}{4V} t}$$

Huoneen absorptioala A voidaan selvittää määrittämällä intensiteetin vaimentuminen ajan funktiona äänen sammuttamisen jälkeen. Tämä tapahtuu määrittämällä jälkikaiunta-aika. Jälkikaiunta-ajaksi T [s] on määritelty aika, jonka kuluessa intensiteetti I pienenee miljoonasosaan alkuperäisestä intensiteetistä I_0 , eli

$$(4.4.10) \quad \frac{I}{I_0} = 10^{-6}$$

ottamalla kymmenkantainen logaritmi ja kertomalla kymmenellä, saadaan intensiteettitaso muutos

$$(4.4.11) \quad 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} = L_I - L_{I_0} = -60$$

eli äänen intensiteetti on pienentynyt 60 dB:llä alkuperäisestä. Kuvassa **4.4.1** on esitetty intensiteetin ja intensiteettitaso pieneneminen ajan funktiona. Koska $\log_a N = \log_b N / \log_b a$, saadaan vasemmanpuoleinen termi muotoon

$$(4.4.12) \quad 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) = \frac{10}{\ln(10)} \cdot \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\frac{10}{2,3} \frac{Ac_0}{4V} T$$

Tästä saadaan ratkaistua jälkikaiunta-aika ja tuloksena on **Sabinen yhtälö**

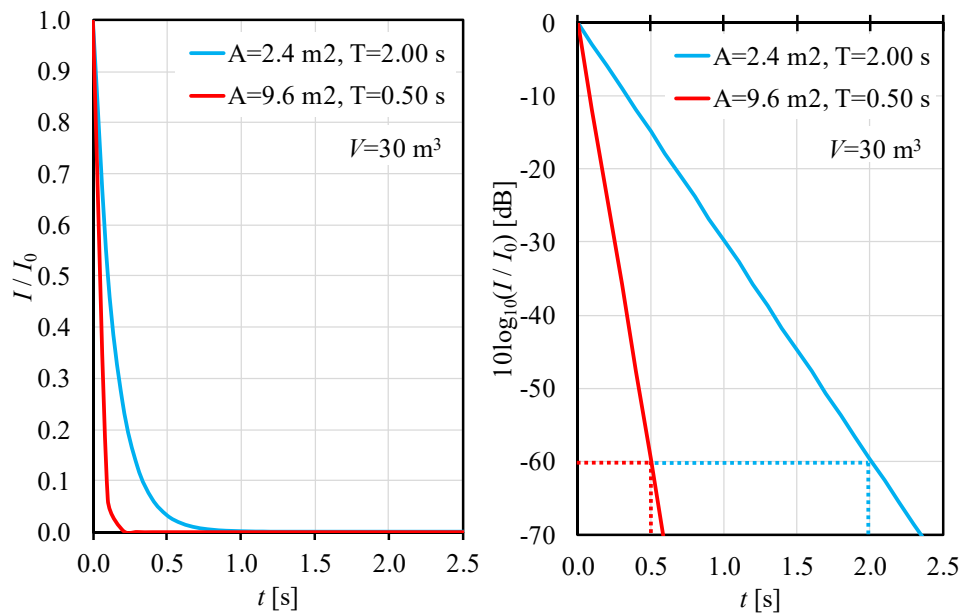
$$(4.4.13) \quad T = \frac{55.3V}{c_0 A}$$

joka on huoneenlämpötilassa 20°C karkeasti

$$(4.4.15) \quad \boxed{T = \frac{0.16V}{A}}$$

Sabinen yhtälöä käytetään jälkikaiunta-ajan arviointiin ja absorptiomateriaalin määrän arviointiin. Lisäksi sitä käytetään absorptiomateriaalien tilastollisen absorptiosuhteen määrittämiseen: mittaamalla huoneen jälkikaiunta-aika ilman materiaalia ja pinta-alaltaan tunnetun materiaalin kanssa saadaan selville absorptioalan muutos ja absorptiosuhde.

Mm. *Eyring, Millington, Cremer, Kuttruff, Fitzroy ja Arau-Puchades* esittävät hyvin perusteltuja, yhtälölle **4.4.5** vaihtoehtoisia jälkikaiunta-ajan laskentayhtälöitä (Keränen and Hongisto, 2010). Näitä ei kuitenkaan esitellä, koska niillä ei yleensä saavuteta merkittävää tarkkuuden parannusta Sabinen yhtälöön nähden ottaen huomioon materiaaleille ilmoitettujen absorptiosuhteiden ja jälkikaiunta-ajan mittausten epävarmuustekijät.



Kuva 4.4.1 Hetkellä $t=0.00$ tuotetun impulssin vaimeneminen ajan t funktiona ideaalisen diffuusin äänikentän omaavassa 30 m^3 huonetilassa. Vasemmalla on esitetty absoluuttisen intensiteetin ja oikealla intensiteettitason [dB] aikaprofiili. Oikealla on esitetty katkoviivoilla jälkikaiunta-ajan T määrittäminen.

4.5 Impulssivaste

Tilan impulssivastefunktio r (myöh: impulssivaste) kertoo, miten signaali a muuttuu, kun se siirtyy äänilähteeltä paikasta A mittauspisteelle paikkaan B. Impulssivaste saadaan, kun mitataan pisteessä A tuotettu impulssi pisteessä B. Impulssina käytetään diracin deltafunktiota δ , joka on nolla kaikkialla muualla paitsi ajanhetkellä nolla, jossa se on teoriassa ääretön:

$$(4.5.1) \quad \delta(t) = \begin{cases} +\infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \quad \text{ja} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

Deltafunktion Fourier-muunnos on vakio eli se sisältää kaikki taajuudet. Käytännön mittauksissa aika diskretoidaan ja impulssin pituus on tällöin näytteenottotaajuuden käänteisluku, eli luokkaa 23 mikrosekuntia, jos näytteenottotaajuus on 44 kHz. Tämän pituinen deltafunktio sisältää kaikki taajuudet 20 kHz asti. Näin lyhyen impulssin tuottaminen riittävän voimakkaana on vaikeaa kaiuttimella. Sen vuoksi impulssivasteen määrittämiseen käytettiin ennen impulssiherätteitä kuten laukausääntä ja nykyään kaiutinta hyödyntäen digitaalisen signaaliprosessoinnin apumenetelmiä, kuten maximum length sequence ja sine sweep. Niitä ei tällä kurssilla käsitellä.

Huoneakustiikassa impulssivaste määritetään mikrofonilla. Impulssivaste kuvaa äänenpainetta p ajan t funktiona pisteessä B, kun heräte on impulssi pisteessä A. Koska impulssivaste on diskreetti funktio (ääninäytteitä otetaan äärellisellä aikaresoluutiolla, yleensä 44 kHz taajuudella tai harvemmin), impulssivaste näyttäytyy läheltä katsoen epäluonnolliselta. Kun impulssivastetta tarkastellaan laajemmassa perspektiivissä (kuva 4.5.1a), siinä nähdään äänenpaineen vaimennus ajan funktiona.

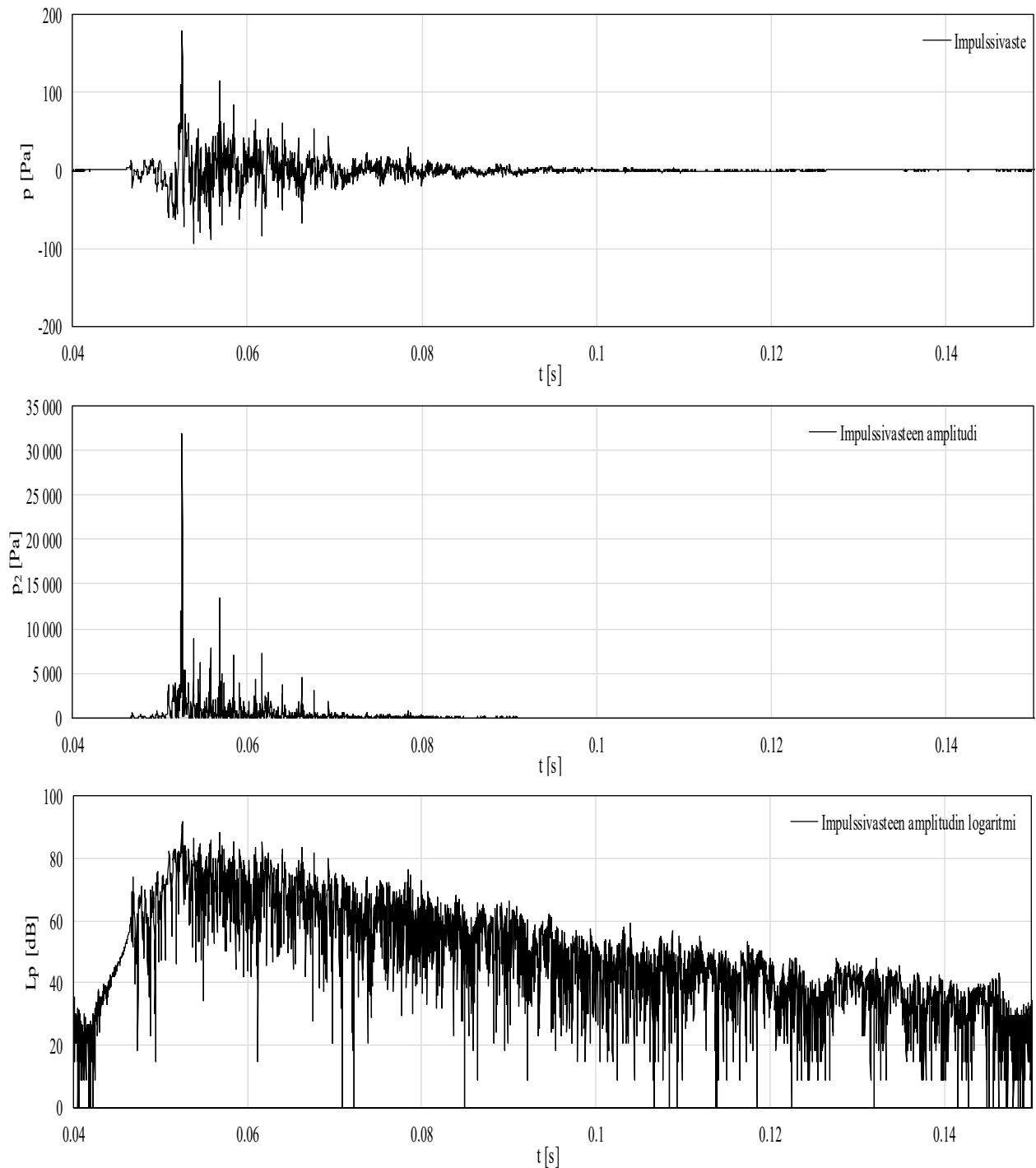
Huoneakustisen tulkinnan kannalta impulssivastetta hyödyllisempi esitystapa on impulssivasteen amplitudi tai neliöity impulssivaste eli p^2 . Sen avulla voidaan tarkastella esimerkiksi sitä, milloin suora ääni ja ensimmäiset heijastukset saapuvat kuulijalle. Kuvassa 4.5.2 on pelkistetty esitys neliöidystä impulssivasteesta. Mitatut vasteet poikkeavat tästä pelkistetystä esityksestä siten, että viivojen väleissä p^2 ei putoa lähellekään nollaa ja maksimit erottuvat heikommin.

Kaikkein yleisin esitystapa on neliöidyn impulssivasteen logaritmi (kuva 4.5.1c), jota kutsutaan usein joko kaiuntakäyräksi (tai virheellisesti impulssivasteeksi). Se saadaan impulssivasteesta soveltamalla signaalin kaikkiin havaintopisteisiin $p(t)$ esimerkiksi äänenpainetasen yhtälöä, jos äänenpaine on kalibroitu:

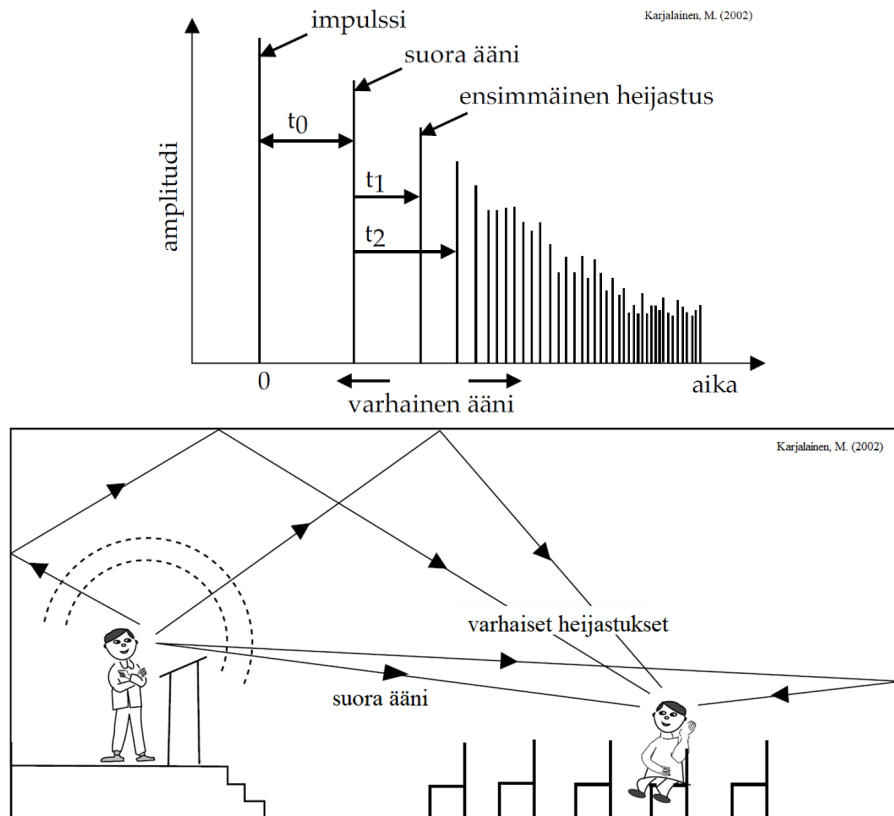
$$(4.5.2) \quad L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right)$$

Impulssivastemittauksessa äänenpaineen ei tarvitse aina olla kalibroitu. Jotkut impulssivasteen tasoesityksestä johdetut suureet tosin edellyttävät kalibroidun äänilähteen käyttöä, jolloin kalibrointi on tarpeen.

Kaiuntakäyrästä voidaan määrittää jälkikaiunta-aika sovittamalla sen suoraan osuuteen suora. Määrittäessä tulee kuitenkin välttää alkupäätä (ensimmäiset heijastukset) ja loppupään kaareutuvaa aluetta, jossa kaiuntakäyrä saavuttaa taustamelun. Yleensä jälkikaiunta-aika määritetään mittaamalla -5 ja -25 dB vaimenemaan kuluva aika ja kertomalla se kolmella. Tämän määrittystavan alamerkinä on T_{20} .



Kuva 4.5.1 Impulssivaste ja siitä johdettu impulssivasteen amplitudi ja amplitudin logaritmi. Mittaus on tehty puolikaiuttomassa vähän kalustetussa huoneessa. Äänilähde A on 3 m päässä mittauspisteestä B. Näytteenottotaajuus on 44100 Hz.



Kuva 4.5.2 Pelkistetty esitys siitä, minkälainen neliöity äänenpaine alakuvan tilassa muodostuu. Ensimmäisenä kuulijalle saapuu suora ääni, tämän jälkeen ensimmäisen asteen huonepintaheijastukset ja lopulta useamman asteen heijastukset, jotka sekoittuvat toisiinsa ja aiheuttavat tilan jälkikaiunnan.

4.6 Jälkikaiunta-ajan laskenta

Sabinen yhtälöä hyödynnetään määrittämään tarvittava absorptiopinta-ala A [m^2], kun tunnetaan huonetilavuus V [m^3] ja tavoitteellinen jälkikaiunta-aika T [s]:

$$(4.6.1) \quad A = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i = \frac{0.16V}{T}$$

Kuvan 4.6.1 esimerkissä esitetään laskelma kalustamattomasta huoneesta. Jos esimerkiksi lattian pinta-ala $S_1 = 69.1 \text{ m}^2$ ja sen absorptiosuhde 125 Hz:n oktaavikaistalla $\alpha_{125} = 0.03$, saadaan lattian absorptioalaksi $A_{1,125} = \alpha_{125} \cdot S = 2,1 \text{ m}^2$. Kuvan 4.6.1 tapauksessa eniten jälkikaiunta-aikaan vaikuttavat katto ja takaseinä. Pelkästään nämä kaksi pintaa huomioimalla päästäisiin melkein samaan tulokseen kuin huomioimalla kaikki 7 pintaa.

Laskentamenetelmän tarkkuus on hyväksyttävä, jos absorptiosuhteet ja pinta-alat on määritetty oikein ja absorptiomateriaali jakautuu useammalle kuin yhdelle pinnalle. Tarkkuus on hyvä, alle ± 0.2 sekuntia, kun tila on pieni, kuutiomainen, avoin, kaikuisa, ja absorptio on jakautunut tasaisesti eri pinnoille. Epäkuutiomaisissa voimakkaasti kalustetuissa tiloissa virhe on tätä suurempi. Samaten jos kaikki absorptiomateriaali on sijoitettu yhdelle huonepinnalle (esim. kattoon) ja huone on muutoin kalustamaton, Sabinen kaava antaa todellisuutta lyhyemmän jälkikaiunta-ajan, koska materiaali ei vaimenna tehokkaasti materiaalipintaan nähden vaakasuuntaista äänikenttää (esim. seinien välillä).

Jälkikaiunta-aikaan vaikuttavat runsaasti myös kalusteet ja ihmiset. Normaalisti sisätiloihin pukeutuneen ihmisen absorptioalana voidaan käyttää arvoa 0.5 m^2 kaikilla taajuuksilla.

HUONEMITAT

Pituus x:	10.0 m	Pohjapinta-ala:	70.0 m ²
Leveys y:	7.0 m	Tilavuus V:	210.0 m ³
korkeus z:	3.0 m		

Pintojen i pinta-alat S_i ja absorptiosuhteet α_i oktaaveittain		f [Hz]						
i	S_i [m ²]	125	250	500	1000	2000	4000	
1	Betonilattia (ei kalusteita)	70.0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
2	Katon alaslaskettu absorptiolevy	70.0	0.60	0.71	0.75	0.58	0.51	0.42
3	Ikkunaseinä (lasi)	21.0	0.30	0.30	0.20	0.17	0.10	0.10
4	Takaseinä (betoni)	21.0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
5	Käytävänpuol. seinä (kipsilevyseinä)	21.0	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
6	Etuseinä (betoni)	21.0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
7	Takaseinän lisäabsorptiolevy	8.4	0.15	0.75	0.97	0.99	0.99	0.96

Pintojen i absorptioalat, $A_i = \alpha_i \cdot S_i$ [m ²]		125	250	500	1000	2000	4000
1	Betonilattia (ei kalusteita)	A_1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.8
2	Katon alaslaskettu absorptiolevy	A_2	42.0	49.7	52.5	40.6	35.7
3	Ikkunaseinä (lasi)	A_3	6.3	6.3	4.2	3.6	2.1
4	Takaseinä (betoni)	A_4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
5	Käytävänpuol. seinä (kipsilevyseinä)	A_5	6.3	4.2	2.1	2.1	2.1
6	Etuseinä (betoni)	A_6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
7	Takaseinän lisäabsorptiolevy	A_7	1.3	6.3	8.1	8.3	8.1
	Kokonaisabsorptioala (edellisten rivien summa)	A	59.2	69.9	70.3	57.9	51.6

Jälkikaiunta-aika, $T = 0.16 \cdot V/A$ [s]	125	250	500	1000	2000	4000
T	0.57	0.48	0.48	0.58	0.66	0.74

Kuva 4.6.1 Esimerkki Sabinen yhtälön soveltamisesta luokkahuoneessa, kun huomioidaan 7 huonepintaa.

4.7 Suhteellinen ilmankosteus ja jälkikaiunta-aika

Huoneilma absorboi ääntä. Mitä kuivempi huoneilma ja mitä suurempi taajuus, sitä enemmän absorptiota tapahtuu. Sabinen yhtälössä tämä voidaan huomioida lisätermillä

$$(4.7.1) \quad T = \frac{55.3V}{c_0(A + 4mV)}$$

missä m [1/m] on huoneilman vaimennuskerroin (taulukko 4.7.1). Suhteellinen ilmankosteus määrittää huoneen maksimaalisen jälkikaiunta-ajan. Pisin mahdollinen diffuusio huoneen jälkikaiunta-aika huoneenlämpötilassa voidaan määrittää myös yhtälöstä (Cremer & Müller, 1978)

$$(4.7.1) \quad T = \frac{2.4 \cdot RH}{f_k^2}$$

missä RH [%] on suhteellinen ilmankosteus ja f_k [kHz] on taajuus kilohertseinä.

Taulukko 4.7.1 Huoneilman vaimennuskerroin m [1/m] huoneenlämpötilassa eri suhteellisilla ilmankosteuksilla RH . Pienemmällä taajuuksilla kertoimella ei ole merkitystä. Pakkasilmalla RH voi alittaa sisällä 10 % (Rindel, 2018).

RH [%]	f [kHz]			
	1	2	4	8
40	0.0011	0.0026	0.0072	0.0237
50	0.001	0.0024	0.0061	0.0192
60	0.0009	0.0023	0.0056	0.0162
70	0.0009	0.0021	0.0053	0.0143
80	0.0008	0.002	0.0051	0.0133

4.8 Ominaistaajuudet

Huonetilan kaiunta syntyy siitä, että tila ”soi” ominaistaajuuksillaan. Eri kokoiset ja muotoiset huoneet kuulostavat erilaisilta, vaikka niiden absorptioala olisi sama, koska niissä on erilaiset ominaistaajuudet. Muilla taajuuksilla kuin ominaistaajuuksilla kaiuntaa ei tapahdu. Koska ominaistaajuuksilla on nollasta poikkeava kaistanleveys, voidaan nollasta poikkeavia jälkikaiunta-aikoja mitata myös ominaistaajuuksien välissä olevilla

taajuuksilla.

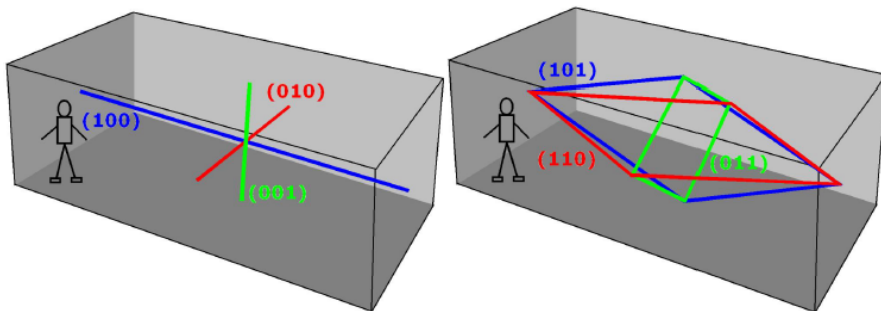
Kuutiomaisen huoneen ominaistajuuudet lasketaan yhtälöllä

$$(4.8.1) \quad f(n_x, n_y, n_z) = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots$$

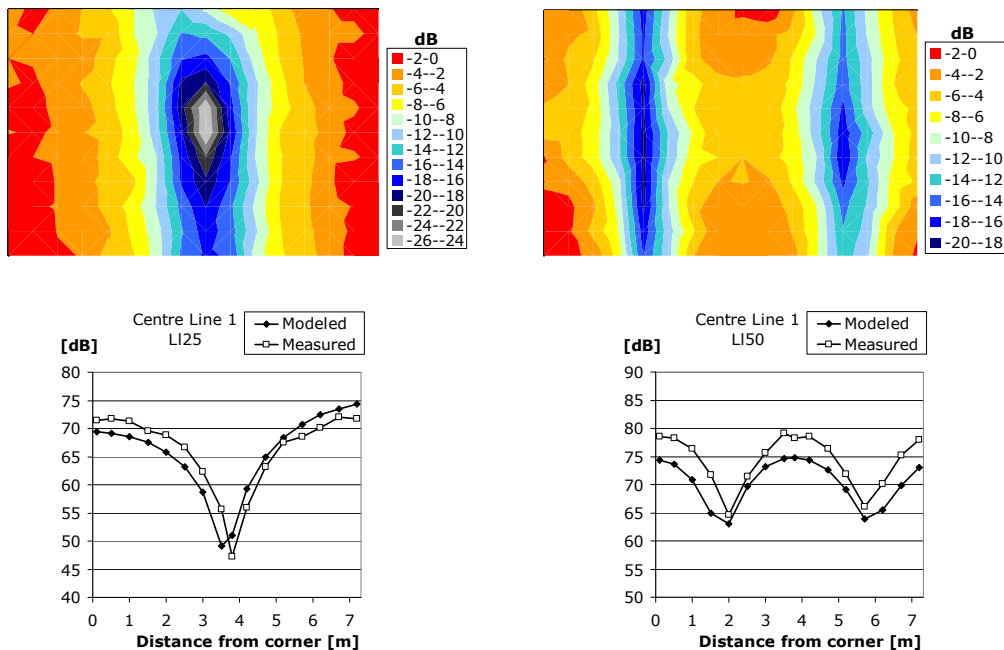
missä l_x , l_y ja l_z [m] ovat huoneen mitat suunnissa x, y ja z. Ominaistajuuksia kutsutaan myös moodeiksi, huonemoodeiksi, huoneresonansseiksi tai karakteristisiksi taajuuksiksi. Seisova aalto ei vaadi muodostukseen suljettua tilavuutta, joten se ei ole paras nimitys. Seisovan aallon kenttä muodostuu myös vapaassa kentässä äänen osuessa yksittäiseen heijastavaan pintaan. Seisova aalto syntyy lisäksi aina kaikilla taajuuksilla, kun taas ominaistajuuus esiintyy vain tietyillä taajuuksilla.

Moodeista voidaan erottaa aksiaaliset (*axial*), tangenciaaliset (*tangential*) ja vinot (*oblique*) moodit (kuva 4.8.1). Spektrissä erottuvimmat moodit ovat aksiaalisia, koska ne esiintyvät alimmilla taajuuksilla ja ne ovat yleensä erillään tangenciaalisista ja varsinkin vinoista moodeista.

Alimman aksiaalimoodin painemaksimi esiintyy huonepinnalla ja paineminimi huoneen keskipisteessä (kuva 4.8.2). Alimman aksiaalimoodilla voidaan havaita jopa 20 dB äänenpainetaso vaihtelua huoneen eri pisteiden välillä kyseisellä taajuudella, jos ääntä on tarjolla kyseisellä taajuudella.



Kuva 4.8.1 Aksiaaliset moodit (100), (010) ja (001) sekä tangenciaaliset moodit (110), (011) ja (101). Alin vino moodi (111) on vaikea kuvata ymmärrettävästi tasopiirustuksen avulla. (Oliva et al., 2011)



Kuva 4.8.2 Äänenpainetaso käyttäytyminen terssikaistoilla 25 ja 50 Hz kaiuntahuoneessa, jonka pituus, leveys ja korkeus olivat 7.5 m, 4.9 m ja 4.2 m (155 m³). Ylärivillä on äänenpainetaso jakauma vaakapinnalla 1.5 m korkeudella lattiasta. Pienimmät äänenpainetasot ovat tumman sinisellä ja suurimmat punaisella. Mallinnus tehtiin COMSOL-ohjelmalla. Vasemmassa kuvassa on moodi (100) ja oikeassa moodi (200). Alarivillä esitetään mallinnettu ja mitattu terssikaistan äänenpainetaso 1.5 m lattiasta sijaitsevalla pituussuuntaisella mittaussuunnalla. Ääni tuli huoneeseen 0.6x1.0

m kokoisesta seinän aukosta (punainen täplä keskellä yläreunassa). (Oliva et al., 2011).

Huone ei resonoi eli kaiu alinta aksiaalimoodia pienemmillä taajuuksilla. Tällöin tila on ns. vakiopainekammio. Huoneeseen muodostuva äänenpaine on tällöin pakkovärähtelyä eikä huone vahvista äänenpainetta ominaistajuuksien puuttuessa. Vakiopainekammiossa äänenpainetaso on sama eri mittauspisteiden välillä.

Moodien voidaan ajatella sijaitsevan moodihilassa kuvan 4.8.3 tapaan. Tällöin yksi moodi vie kyseisessä avaruudessa tilavuuden

$$(4.8.2) \quad V_m = \frac{c_0}{2l_x} \frac{c_0}{2l_y} \frac{c_0}{2l_z}$$

Ominaistajuuksien määrä N minkä tahansa taajuuden f alapuolella saadaan jakamalla ko. taajuuden mukainen tilavuus moodin tilavuudella

$$(4.8.3) \quad N = \frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3} = \frac{4\pi f^3}{3c_0^3} l_x l_y l_z$$

Kaava ei huomioi moodiavaruuden laidoilla olevia moodeja, joilla jokin kokonaislukukertoimista n_x , n_y tai n_z on nolla. Samoin huomioimatta jäävät akselin suuntaiset moodit, joilla kaksi kolmesta kokonaislukukertoimesta on nolla. Tarkempi yhtälö on

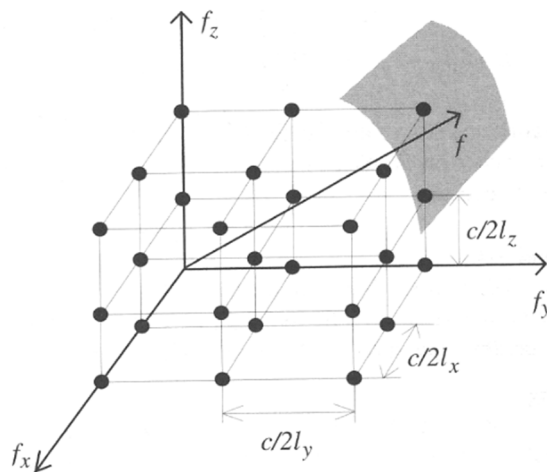
$$(4.8.4) \quad N \approx \frac{4\pi f^3}{3c_0^3} V + \frac{\pi f^2}{4c_0^2} S + \frac{f}{8c_0} L$$

missä V [m³] on huonetilavuus, S [m²] on huonepintojen ala ja L [m] on huoneen särmien yhteispituus.

Diffuusi äänikenttä olettaa, että huoneessa on runsaasti ominaistajuuksia (vähintään kymmenen erillistä) kutakin tarkasteltavaa taajuuskaistaa kohti. Tämä toteutuu vasta Schröderin rajataajuuden f_s yläpuolella

$$(4.8.5) \quad f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

missä V [m³] on huonetilavuus ja T [s] on jälkikaiunta-aika. Rajataajuuden yläpuolella erillisiä moodeja ei enää havaita vaan ne limittyvät toisiinsa ja diffuusin kentän tilastollinen oletus voi toteutua.



Kuva 4.8.3 Moodihila sijaitsee taajuusavaruuden positiivisilla arvoilla.

4.9 Leviämismuunnos

Jälkikaiunta-aika T kuvaa äänen ajallista vaimennusnopeutta paikallisesti. Jälkikaiunta-aika on yhteydessä subjektiiviseen kokemukseen äänenlaadusta (puheen erotus, musiikin laatu) tiloissa, jossa tarkoituksena on kuulla ääntä hyvin. Jälkikaiunta-aikaa käytetään materiaalien absorptiosuhteen ja rakenteiden ääneneristykseen määrittämissä. Jälkikaiunta-aika on levinnyt lähes kaikkiin huoneakustisiin sovelluksiin, koska Sabine ja huonevaimennuksen yhtälöt ovat helppoja soveltaa. Jälkikaiunta-aika kuvaa tilan perusakustisia ominaisuuksia hyvin, jos huone on riittävän diffuusi ja mittaustulokset vastaavat riittävällä tarkkuudella lukujen 4.2–4.4 neliöityjen yhtälöiden ennustemalleja. Nämä ehdot toteutuvat kohtuullisella tarkkuudella mm. tyhjiissä asuinhuoneissa, koululuokissa, pienissä auditorioissa, liikuntasaleissa ja myös suuremmissa vähän kalustetuissa tiloissa.

Diffuusissa äänikentässä äänenpainetaso on vakio kaiuntasäteen ulkopuolella. Ei-diffuusissa äänikentässä äänenpainetaso kuitenkin jatkaa *voimakkaasti* vaimenemistaan etäisyyden kasvaessa äänilähteeseen eikä vakioitu kaiuntasäteen kohdalla tai millään muullakaan etäisyydellä. *Diffuusien kentän olosuhteet eivät tyypillisesti ole voimassa, kun vähintään yksi seuraavista tekijöistä on toteutuu:*

- vähintään yksi huoneen mitta on moninkertainen huonekorkeuteen nähden tai huone ei ole suorakaiteen muotoinen,
- huoneessa on runsaasti absorptiomateriaalia,
- huoneessa on korkea ja tiheä kalustus, joka estää suoran äänen siirtymisen äänilähteeltä kuulijalle osittain tai kokonaan.

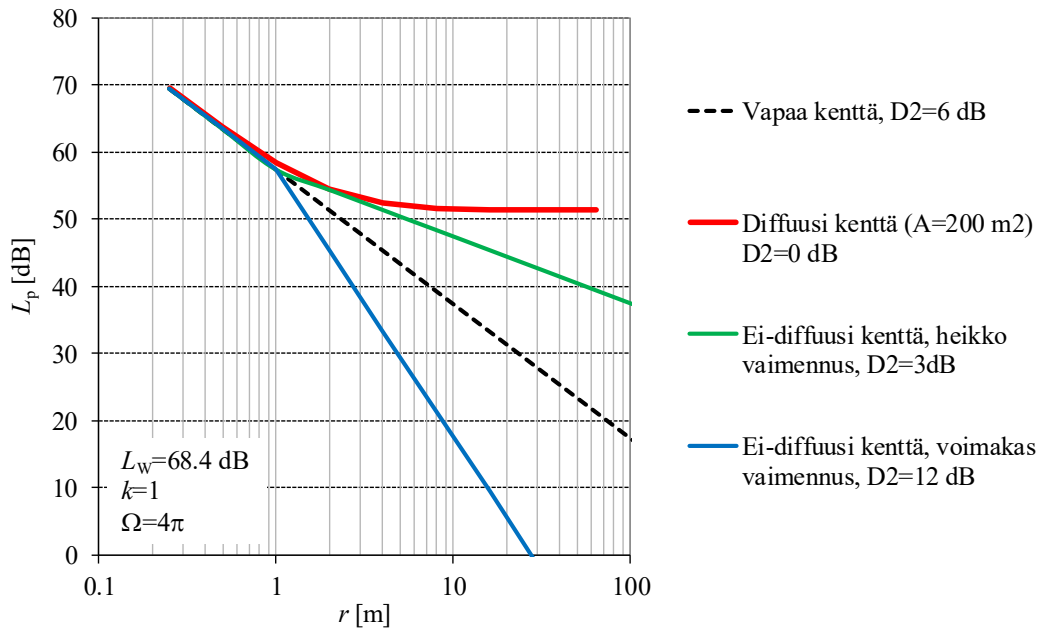
Suurissa työtiloissa kuten avotoimistoissa ja teollisuushalleissa pätevät yleensä kaikki edellä mainitut tekijät. Akustista hyvyyttä arvioidaan subjektiivisesti sen mukaan, miten nopeasti ääni vaimenee etäisyyden kasvaessa melulähteeseen (leviämismvaimennus) eikä sen mukaan, miten nopeasti melu vaimenee ajan suhteen tietyssä pisteessä (jälkikaiunta-aika). Jälkikaiunta-aika ei ole sopiva kuvaamaan suurten työtilojen huoneakustiikkaa, koska tila ei enää käyttäydy yhtenä kokonaisuutena, kuten diffuusi kenttä edellyttää. Äänenpainetaso riippuu voimakkaasti etäisyydestä äänilähteeseen. Esimerkiksi impulssivaste ja siitä määritettävä jälkikaiunta-aika riippuu siitä, mille etäisyydelle äänilähteestä mittaussmikrofoni laitetaan. Kaiuntakäyrän muoto on myös erilainen, jos mittaus tehdään lähellä tai kaukana äänilähteestä.

Selvästi ei-diffuuseissa tiloissa sopivampi suure huoneakustiikan laadun kuvaamiseen on leviämismvaimennus eli äänenpainetason riippuvuus etäisyydestä äänilähteeseen. Tutkimusten mukaan ääni vaimenee tällaisissa tiloissa lineaarisesti logaritmisestä etäisyyden funktiona. Leviämismvaimennuskäyrästä voidaan määrittää *leviämismvaimennusaste*, D_2 [dB], joka kertoo äänenpainetason pienenemän etäisyyden kaksinkertaistuksessa:

$$(4.9.1) \quad D_2 = L_p(r_1) - L_p(r_2)$$

missä $r_2 = 2r_1$. D_2 on aina positiivinen luku ja se määritetään havainnoista tekemällä lineaarinen sovitus äänenpainetason (y : L_p) ja logaritmisestä etäisyyden (x : $\ln r$) välille. Alle 2 metrin päässä äänilähteestä olevat havainnot jätetään huomioimatta, koska tätä lähempänä ääni vaimenee vapaan kentän kaltaisesti.

Esimerkkejä leviämismvaimennusasteista on esitetty kuvassa 4.9.1. Leviämismvaimennusaste voidaan ennustaa joko empiiriseen dataan perustuvilla regressioyhtälömalleilla tai huoneakustisella tietokonemallilla.



Kuva 4.9.1 Leviämismuunnokäyriä erilaisissa ympäristöissä. Diffuusi huone ja vapaa kenttä on laskettu yhtälöllä 4.3.5. Muut leviämiskäyrät ovat ympäristöistä, joissa vaimennus on suuri ja diffuusin kentän oletukset eivät päde. Erittäin suuria leviämismuunnosasteita ($D_2 > 8$ dB) esiintyy avotoimistoissa, jossa lähellä äänilähdettä vaimennus noudattaa vapaata kenttää ensimmäisen korkean seinäkkeen takana kulmakeroon vakiintuu lopulliseen D_2 -arvoonsa.

4.10 Puheääni

Miehen puhe sisältää taajuuksia 100–10000 Hz ja naisen puhe taajuuksia 200–10000 Hz, koska miehen perusääni on noin oktaavin alempana kuin naisella. Vokaalit sijaitsevat keskitaaajuuksilla 500–2000 Hz ja konsonantit pääasiassa suurilla taajuuksilla, yli 2 kHz. Vokaalien äänenvoimakkuus on suurempi kuin konsonanttien tai perusäänen. Hyvän puheen erotettavuuden edellytyksenä on vokaalien ja konsonanttien kuuleminen oikein.

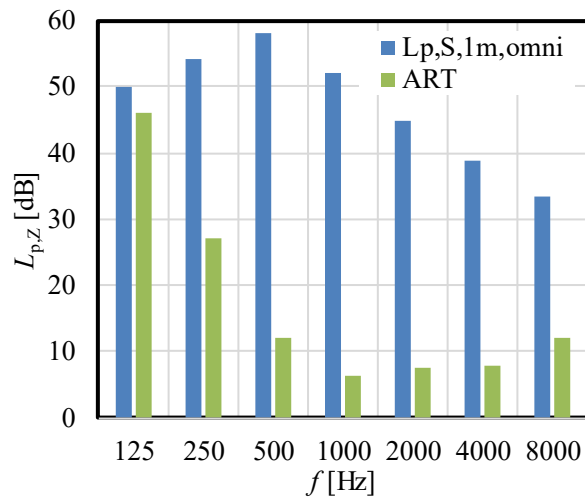
Huoneakustiikkasuunnittelussa käytetään standardipuhetta, jolla on tietty oktaavispektri. Eri standardit tarjoavat hieman erilaisia puheen spektrejä. Lisäksi on tarjolla korotetun ja voimakkaan puheen spektrejä erikoistilanteita varten. Tämän oppikirjan kannalta merkittävin on ISO 3382-3 –standardin spektri kuvassa 4.10.1. Standardi esittää kaksi vaihtoehtoa äänenpainetasolle 1 m päässä vapaassa kentässä:

- normaalisti suuntaavan suun edestä, $L_{p,S,1m,normal}$ ja
- suuntaamattoman eli ympärisäteilevän (*omnidirectional*) suun edestä, $L_{p,S,1m,omni}$.

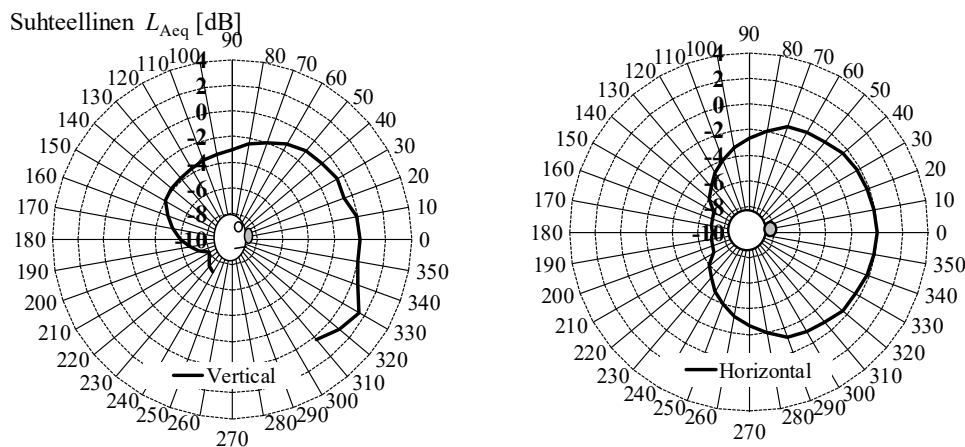
Kummassakin tapauksessa äänitehotaso $L_{W,S,A}$ on sama. Suuntaamattoman puheen tapauksessa äänenpainetasot ovat alhaisempia kuin suuntaavan puheen tapauksessa, koska suuntaavan puhujan takana tasot ovat puolestaan alhaisempia. Suuntaavaa puhetta käytetään puhetiloissa, kun puhujan suunta on tiedossa. Suuntaamatonta puhetta käytetään avotoimistossa ja ryhmäopetustiloissa, kun puhujan suuntaa ei tiedetä. Kuvassa 4.10.1 esitetään myös puheen kuulokynnystaso ART. Arvot ovat 5–20 dB korkeampia kuin luvun 1 audiologiset siniäänien kuulokynnystasot. ART:tä alhaisemmilla äänenpainetasoilla puheella ei katsota olevan enää merkitystä puheen erotettavuuden kannalta. Oktaavikaistan 125 Hz merkitys puheen erotettavuudelle vähenee jo, kun puhe on normaalitasosta 5 dB vaimentunut. Lisäksi 8 kHz äänet vaimenevat helposti muita taajuuksia voimakkaammin ja niiden taso on toisaalta alhaisin. Merkittävimpiä puheen erottumiselle ovat siksi oktaavikaistat 250–4000 Hz.

A-painotetun puheäänien suuntaavuus esitetään kuvassa 4.10.2. Puhe on noin 10 dB hiljaisempi puhujan takana kuin edessä. Suuntaavuus on voimakkainta suurilla taajuuksilla. Pienillä taajuuksilla suuntaavuus on olematonta, koska suu alkaa muistuttaa pistelähdettä eikä pää merkittävästi varjosta äänen kulkua. Huonetiloissa puheen suuntaavuuden merkitys kasvaa, kun kaiunta lyhenee. Mitä enemmän tila kaikuu, sitä vähemmän puhujan suunnalla havaitaan olevan vaikutusta.

f [Hz]	$L_{p,S,1m,omni}$ [dB]	$L_{p,S,1m,normal}$ [dB]	$L_{W,S}$ [dB]	ART [dB]
125	49.9	51.2	60.9	46.0
250	54.3	57.2	65.3	27.0
500	58.0	59.8	69.0	12.0
1000	52.0	53.5	63.0	6.5
2000	44.8	48.8	55.8	7.5
4000	38.8	43.8	49.8	8.0
8000	33.5	38.6	44.5	12.0
A	57.4	59.5	68.4	30.4



Kuva 4.10.1 ISO 3382-3:2012 standardin mukainen puheen äänenpainetaso, kun puhe on suuntaava (normal) tai suuntaamaton (omni). Lisäksi esitetään kumpaakin tilannetta vastaava äänitehotaso $L_{W,S}$ sekä IEC 60268-16:2011 standardin mukainen puheen kuulokynnystaso (ART, *absolute speech reception threshold*).



Kuva 4.10.2 Puheen suuntaavuus horisontaali- ja vertikaalitasossa. Mittaukset on tehty kaiuttomassa huoneessa 1 m päässä suusta. (Chu et al., 2001)

4.11 Puheensirtoindeksi STI

Äidinkielellä esitetyn puheen subjektiivinen erotettavuus huoneessa riippuu käytännön tilanteesta monesta tekijästä:

- puhujan ja kuulijan etäisyydestä,
- puheäänien voimakkuudesta,
- puhujan suunnasta suhteessa kuulijaan,
- puhujan suun ja eleiden näkemisestä,
- puhutavasta ja sen tuttuudesta,
- tilan kaiunnasta,
- tilan geometriasta ja ääniheijasteista,
- taustamelutasosta.

Subjektiivinen puheen erotettavuus puhujan ja kuulijan välillä voidaan objektiivisesti arvioida mittaamalla puheensirtoindeksi, *STI* (*Speech Transmission Index*). Se määritetään akustisilla mittalaitteilla puhujan ja kuulijan välillä IEC 60268-16 mukaan. *STI*:n lukuarvo voi vaihdella välillä 0.00–1.00. Mitä korkeampi *STI* arvo on, sitä parempi on puheen erotettavuus. Arvo 1.00 kertoo täydellisestä tavuerotettavuudesta. Se voidaan yleensä saavuttaa huonetiloissa vain puhujan lähituntumassa. Arvo 0.00 kertoo, että puheesta ei saa tavuakaan selvää. *STI* korreloi melko lineaarisesti subjektiivisen tavuerotettavuuden kanssa.

Puheensiirtoindeksiä käytetään kuvaamaan tilojen akustista laatua opetus- ja puhetiloissa ja avotoimistotyöpisteiden välillä. Taulukossa **4.11.1** on esitetty puheensiirtoindeksin subjektiivinen merkitys. Puhetiloissa pyritään mahdollisimman korkeaan puheensiirtoindeksin arvoon eli hyvään puheenerotettavuuteen. Täydellinen puheen erotettavuus vallitsee, kun $STI > 0.75$.

Toimistotyöpisteiden, neuvotteluhuoneiden tai potilashuoneiden välillä pyritään mahdollisimman alhaiseen STI -arvoon, jotta työhön keskittyminen, luottamuksellisten keskustelujen käyminen tai nukkuminen olisi mahdollista. Alhainen STI -arvo tarkoittaa samaa kuin puheyksityisyys (*speech privacy*). Jos on tarkoitus käydä täysin luottamuksellisia keskusteluja, tulee STI -arvon olla 0.00 siellä, missä muita ihmisiä on.

Taulukko 4.11.1 Puheensiirtoindeksin STI subjektiivinen merkitys puheen erotettavuuden (kommunikaatiotilat) ja puheyksityisyyden (keskittymistä vaativat työtilat) kannalta.

STI alue	Puheen erotettavuus	STI alue	Puheyksityisyys
<0.30	Kelvoton	0.00	Erittäin hyvä
0.30-0.45	Huono	0.00-0.10	Hyvä
0.45-0.60	Kohtuullinen	0.10-0.20	Kohtuullinen
0.60-0.75	Hyvä	0.20-0.35	Huono
>0.75	Erittäin hyvä	>0.35	Kelvoton

Vaikka subjektiivinen puheen erotettavuus riippuu edellä kuvatusti useista tekijöistä, sen objektiivinen vastine, eli STI , voidaan laskennallisesti arvioida hyvällä tarkkuudella Houtgastin ja Steenekenin (1985) menetelmällä, kun tunnetaan jälkikaiunta-aika ja puhekohinasuhde oktaavikaistoilla 125–8000 Hz. Menetelmä soveltuu diffuuseihin äänikenttiin eikä se huomioi puheen kuulokynnystä tai auditorista peittoa.

Puheen signaalikohinasuhde (puhekohinasuhde) määritellään yhtälöllä

$$(4.11.1) \quad L_{SN} = L_S - L_N$$

missä L_S [dB] on puheen äänenpainetaso ja L_N [dB] on stationäärisen taustamelun äänenpainetaso. STI :n laskenta alkaa määrittämällä modulaatiosierrofunktio (MTF, *modulation transfer function*). MTF koostuu modulaation vähennyskertoimesta $m(F, f)$ 14 modulaatiotaajuudella F_i (0.63, 0.80, 1.00, 1.25, 1.60, 2.00, 2.50, 3.15, 4.00, 5.00, 6.30, 8.00, 10.00 ja 12.5 Hz) ja seitsemällä oktaavikaistalla f_j (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 ja 8000 Hz)

$$(4.11.2) \quad m(F, f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (T(f) \cdot 2\pi F / 13.8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-L_{sv}(f)/10}}$$

missä $T(f)$ on jälkikaiunta-aika. Alkuperäisessä STI -menetelmässä mitattiin ns. varhainen jälkikaiunta-aika EDT (*early decay time*) mutta diffuusissa äänikentässä voidaan olettaa, että $T = EDT$.

Näennäinen signaalikohinasuhde lasketaan edellä saaduille 98:lle m -arvolle yhtälöstä

$$(4.11.3) \quad SN_{app} = 10 \log_{10} \frac{m}{1 - m}$$

Jos $SN_{app} > 15$ dB, käytetään $SN_{app} = 15$ dB. Vastaavasti jos $SN_{app} < -15$ dB, käytetään $SN_{app} = -15$ dB. STI lasketaan tämän jälkeen yhtälöstä

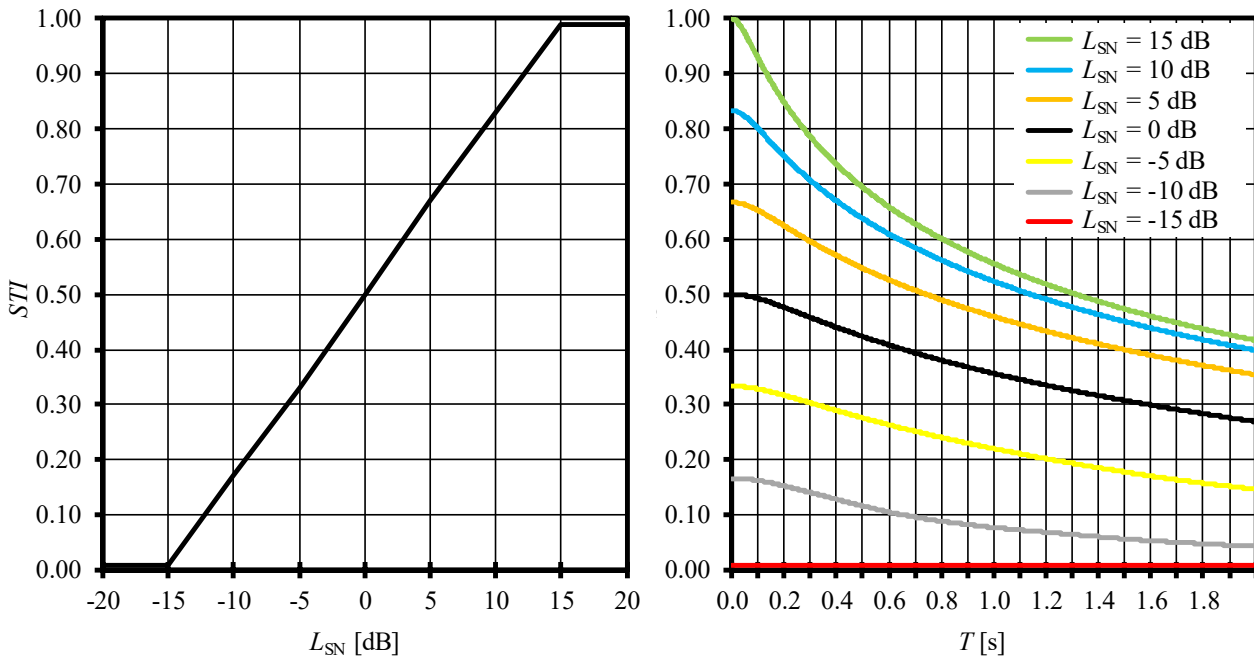
$$(4.11.4) \quad STI = \frac{1}{30} \left\{ 15 + \sum_{j=1}^7 k_j \cdot \left(\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SN_{app}(F_i, f_j) \right) \right\}$$

missä oktaavikaistojen 125–8000 Hz painotuskertoimet k_j ovat 0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17 ja 0.14.

STI :n riippuvuutta puheen signaalikohinasuhteesta esittää kuva **4.11.1a**. Kuvassa **4.11.1b** on esitetty STI :n riippuvuutta sekä jälkikaiunta-ajasta että signaalikohinasuhteesta. Molempiin liittyy rajuja oletuksia mutta niiden kanssa pystyy jo karkeasti arvioimaan lopputuloksen suppeillakin lähtötiedoilla.

Uusimmassa standardin IEC 60268–16:2011 versiossa huomioidaan useita tekijöitä yllä esitettyyn yksinkertaiseen malliin nähden. Niillä on eniten vaikutusta STI :n arvoon, kun puheen taso on alhainen, signaalikohinasuhde on pieni, tai puheen/taustamelun spektrit ovat poikkeavan muotoisia. STI :n

määrittämiseksi mitataan edelleen L_S käyttäen tarkoituksenmukaista puheen tehtasoa ja suuntaavuutta puhujan paikalla ja taustamelu L_N oktaavikaistoilla f_j . Puhujan ja kuulijan väliltä mitataan varhaisen jälkikaiunta-ajan sijaan modulaatiosiirtofunktio impulssivasteen avulla, huomioiden em. modulaatiotaajuudet F_i ja oktaavikaistat f_j . Puhetta peittävinä taustäääninä huomioidaan taustamelun L_N lisäksi auditorinen puheenpeitto (matalat taajuudet peittävät korkeampia) ja puheen kuulokynnys (ART kuvassa 4.10.1). STI :n laskenta on mahdollista tehdä erikseen miehen että naisen puheelle, joita koskevat erilaiset oktaavikaistojen painotus- ja tarpeettomuuskertoimet α_j ja β_j (*redundancy factor*). Kertoimet α_j vastaavat yllä esitettyjä k_j -arvoja mutta poikkeavat niistä. Naisen oktaavipainotuskertoimista puuttuu lisäksi oktaavikaistan 125 Hz arvo. STI suositellaan määrittettävän miehen puheelle, koska se on yleensä huomommin erottuva kuin naisen puhe. Kertoimet β_j huomioivat sen, että jos oktaavikaistalla j puhe ei erotu (suuri kaiku ja/tai peitto), viereisten oktaavikaistojen $j-1$ tai $j+1$ nollassa poikkeava puheen erottuminen kompensoi kaistalta j puuttuvaa puheenerotusta jossain määrin.



Kuva 4.11.1 (a) Puheensiirtoindeksin STI riippuvuus puheen signaalikohinasuhteesta olettaen vapaa kenttä (kaiuton tila, $T=0$ s) ja taajuusriippumaton signaalikohinasuhde. Käytännössä puhe on vielä kuultavissa kun $L_{SN}=-15$ dB mutta siitä ei enää saa mitään selvää. Puhetta ei enää kuulu, kun $L_{SN}<-22$ dB. **(b)** Puheensiirtoindeksin STI riippuvuus jälkikaiunta-ajasta T ja puheen signaalikohinasuhteesta L_{SN} olettaen, että molemmat ovat taajuusriippumattomia oktaavikaistoilla 125–8000 Hz.

4.12 Avotoimistojen huoneakustiikka

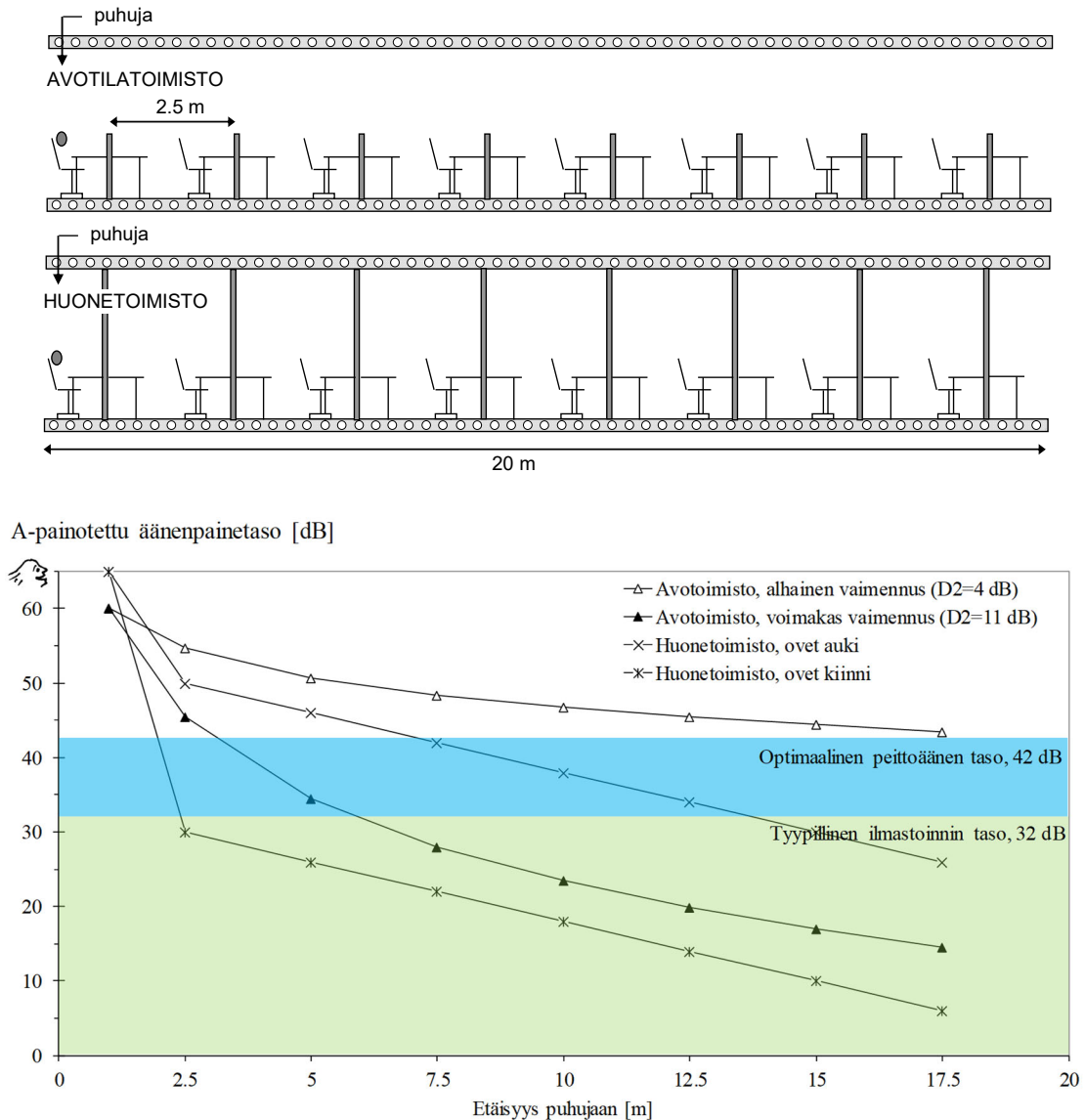
Avotoimistolla tarkoitetaan yhtenäistä huonetilaa, jossa on useita työpisteitä ilman niitä erottavia väliseiniä. Tarkkaa määritelmää avotoimistolle ei ole mutta yleensä yli 5 hengen tilat katsotaan avotoimistoiksi, koska ne on yleensä eritoten tällaista käyttötarkoitusta varten tehtyjä. Työpisteitä voi erottaa sermi tai kaapistot. Kaapistot ja sermit voivat ulottua jopa 2.1 m asti mutta eivät yleensä kattoon. Katosta voi tosin riippua ääntä vaimentavia tai näköesteitä tuottavia kevyitä elementtejä.

Avotoimistojen yleinen ongelma on riittämätön puheyksityisyys ja tarpeettomien puheäänien aiheuttama keskittymishaitta. Huonosti toteutetuissa avotoimistoissa puhe erottuu selvästi ($STI>0.50$) jopa 20 metrin päähän puhujasta. Erittäin hyvin toteutetuissa avotoimistoissa $STI=0.50$ alittuu jo 2–3 metrin päässä puhujasta ja muuttuu täysin epäselväksi ($STI=0.00$) 6–8 metrin päässä puhujasta.

Huoneakustinen karakterisointi tapahtuu standardin ISO 3382-3 mukaan, joka perustuu suomalaiseseen tutkimukseen (Virjonen et al., 2009). Siinä määritetään puheäänien äänitaso ja STI eri etäisyyksillä puhujasta mittauslinjalla, joka ulottuu useiden työpisteiden yli. Sekä puheäänien tuotto että mittaus tapahtuvat työpisteissä 1.20 m korkeudella lattiasta. Mittaus tapahtuu kuvan 4.12.1 mukaisella periaatteella.

Avotoimiston akustinen hyvyys määritetään A-painotetun puheäänien leviämismuunnosasteen $D_{2,s}$ ja

häiritsevyysetäisyyden r_D avulla (kuva 4.12.2). Avotoimistossa $D_{2,S}$ määritetään A-painotetuista puheäänien tasoista sovittamalla suora etäisyysvälin 2–16 m arvoihin. $L_{p,A,S,4m}$ [dB] on A-painotettu äänenpainetaso 4 m päässä puhujasta. Häiritsevyysetäisyys r_D (distraction distance) on etäisyys, jonka ulkopuolella STI alittaa arvon 0.50. Avotoimistoissa olosuhteet vaihtelevat erittäin paljon: $D_{2,S}$ arvoja on mitattu välillä 2–14 dB, $L_{p,A,S,4m}$ arvoja välillä 40–54 dB ja r_D arvoja välillä 2–16 m. Suurin osa havainnoista on kuitenkin edellä lueteltujen vaihteluvälien keskivaiheilla.



Kuva 4.12.1 Puheen A-painotettu äänenpainetaso etäisyyden funktiona. Puheääni tuotetaan vasemmanpuoleisesta työpisteestä. Avotoimistossa ei ole väliseiniä ja huonetoimistossa on. Mittauspisteet 8 kpl sijaitsevat työpisteissä etäisyyksillä 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0 ja 17.5 m.

Lukuisien laboratoriotutkimusten mukaan ihmisen suoriutuminen työmuistia vaativista työtehtävistä paranee, kun puheen STI -arvo pienenee (Haapakangas et al., 2020). Avotoimistoissa tehtyjen tutkimusten mukaan melun erittäin häiritseväksi kokevien osuus pienenee, kun häiritsevyysetäisyys r_D pienenee. Näistä syistä johtuen avotoimistojen akustiikkaa on alettu säätää rakentamismääräyksiin vuodesta 2018 alkaen. Suomessa avotoimistot tulisi suunnitella Ympäristöministeriön (2019) mukaan niin, että

- $STI < 0.50$ yli 8 m puhujasta kalustamattomassa tilassa (yli 5 m puhujasta kalustetussa tilassa), ja
- jälkikaiunta-aika alittaa 0.60 sekuntia oktaavikaistoilla 250–2000 Hz.

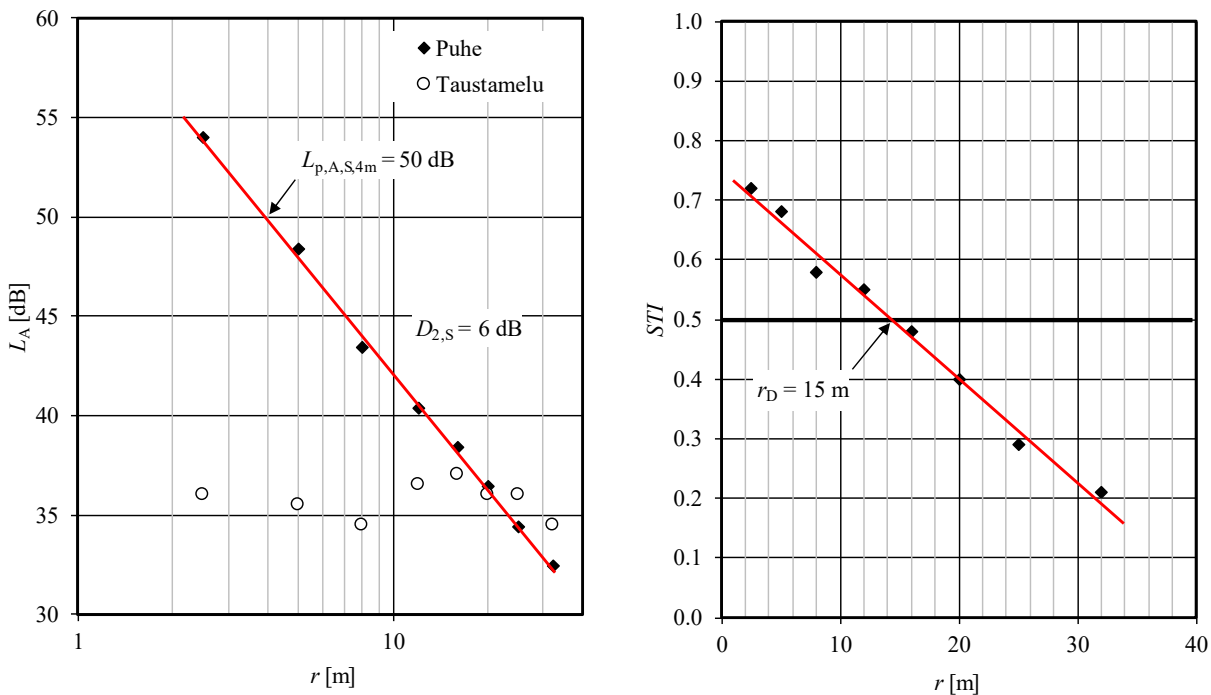
STI :n ohjearvo vastaa häiritsevyysetäisyyden enimmäisarvoa 8 m kalustamattomassa tilassa ja 5 m kalustetussa tilassa (Ympäristöministeriö, 2019). Suureen $D_{2,S}$ -arvoon ja pieneen r_D ja $L_{p,A,S,4m}$ arvoon päästään, kun seuraavat seikat toteutuvat yhtäaikaaisesti:

1. absorptio on maksimoitu sekä huoneen katossa että seinäpinoilla;
2. työpisteiden välillä on mahdollisimman korkeat ja ääntä absorboivat seinäkkeet;
3. tilassa on asianmukainen puheenpeittoäänien taso.

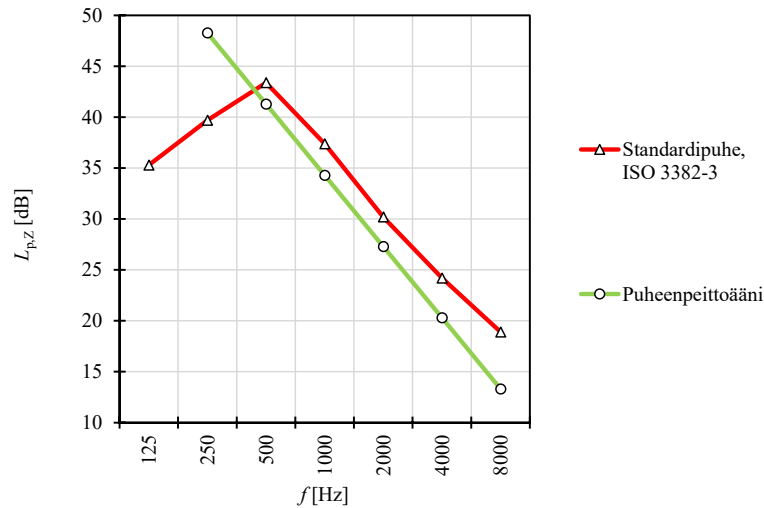
Puheenpeittoääniksi suositellaan kuvan 4.12.3 mukaista laajakaistaista kohinaa. Kyseiseen spektriin on päädytty tutkimuksissa, joissa on selvitetty erilaisia spektrejä ärsyttävyyden ja puheenpeiton näkökulmasta. Äänivoimakkuus säädetään yleensä siten, että työpisteissä äänitaso on 40–45 dB L_{Aeq} . Ääni tuotetaan yleensä kattoon sijoitettavista kaiuttimista, joita tarvitaan noin 1 kpl 10 m² kohti. Äänitaso ei saisi vaihdella yli 3 dB eri työpisteiden kesken.

Ympäristöministeriön julkaisu 2019:28 (Kylliäinen ja Hongisto, 2019) ja ohje RIL 243-3-2008 käsittelevät suunnitteluratkaisuja yksityiskohtaisesti.

Kuvassa 4.12.1 on vertailtu puheen äänitasa akustisesti hyvässä ja huonossa avotoimistossa sekä huonetoimistossa, jossa käytävän ovet ovat auki tai kiinni. Alhaisella vaimennuksella puheääni vaimenee avotoimistossa hitaasti eikä taustaäänitasoa 32 dB saavuteta edes 20 metrin päässä puhujasta. Hyvällä suunnittelulla puheen taso ylittää taustan vain aivan puhujan lähellä. Jos lisäksi taustaäänien taso korotetaan 42 dB:iin käyttämällä peittoäänijärjestelmää, hukkuu puhe taustaan jo 3–5 metrin päässä puhujasta. Jos huonetoimiston ovet ovat avoimia, ja sekä käytävä että huoneet kaikuvat, voi puheääni erottua huonetoimistossa paremmin kuin hyvin suunnitellussa avotoimistossa.



4.12.2 (a) Puheen äänitaso ja (b) puheensirtoindeksi STI puhujan ja kuulijan välisen etäisyyden r funktiona. Puheen leviämismuunnosaste $D_{2,S}$, puheen äänenpainetaso 4 m päässä puhujasta $L_{p,A,S,4m}$ ja puheen häiritsevyysetäisyys r_D selvitetään lineaarisia sovituksia käyttäen.



4.12.3 Painottoman äänenpainetaso $L_{p,z}$ taajuuden f funktiona oktaavikaistoittain puheenpeittoäänelle ja standardipuheelle, kun molempien äänenpainetaso on säädetty arvoon 43 dB L_{Aeq} .

Säteenseurantaan perustuvilla tietokonemalleilla voidaan saavuttaa kohtalaisen hyvä tarkkuus äänitasoille avotoimistossa. Mallintaminen on kuitenkin haasteellista, koska kalusteita on runsaasti. Akustiikkasuunnittelijan riittää yleensä tietää, mitkä ISO-standardin parametriarvot saavutetaan tietyllä suunnitteluratkaisulla. ISO-parametrien nopeaksi arvioimiseksi Keränen ja Hongisto (2013) kehittivät leviämismuunnosta kuvaavan regressiomallin 16 akustisesti erilaisessa avotoimistossa tehtyjen mittausten perusteella. Puheen A-painotettu äänenpainetaso $L_{p,A,S,4m}$ [dB] saadaan yhtälöstä

$$(4.12.1) \quad L_{p,A,S,4m} = L_{p,A,S,1m} - 3 \cdot h - 0.1 \cdot W - 4.6 \cdot \alpha_c - 0.8 \cdot \alpha_f$$

ja puheen leviämismuunnusaste yhtälöstä

$$(4.12.2) \quad D_{2,S} = 8 \cdot \frac{h}{H} + 0.16 \cdot \frac{L}{H} + 4 \cdot \alpha_c + 1.7 \cdot \alpha_f$$

missä $L_{p,A,S,1m} = 57.4$ dB (kuva 4.10.1) on suuntaamattoman normaalipuheen äänenpainetaso 1 m päässä puhujasta vapaassa kentässä, α_c on katon keskimääräinen absorptiosuhde, α_f on kalusteiden ja/tai pystypintojen näennäinen absorptiosuhde, W [m] on huoneleveys, H [m] on huonekorkeus, L [m] on huonepituus ja h [m] on seinäkkeiden tai kaapistojen korkeus. Pystypinnoilla tarkoitetaan seinäpintoja, seinäkkeitä ja kaapistoja. Keskimääräinen absorptiosuhde määritetään oktaavikaistojen 250–4000 Hz keskiarvona. Puheen leviämismuunnusasteen perusteella voidaan laskea puheen A-painotettu äänitaso $L_{A,S}$ millä tahansa etäisyydellä r puhujasta yhtälöllä

$$(4.12.3) \quad L_{p,A,S}(r) = L_{p,A,S,4m} - 3.3 \cdot D_{2,S} [\log_{10}(r) - \log_{10}(4)]$$

Regressiomalli pätee vain, kun ääni tuotetaan ja sitä mitataan työpisteissä 1.2 m korkeudella lattiasta. Malli on havaittu melko tarkaksi mutta lähtödatasta puuttuvat avotoimistot, joissa on absorboivat sermit ja seinät. Näitä ratkaisuja käytetään nykyisin enenevästi ja mallia voisi kehittää.

Häiritsevyysetäisyyden laskemiseksi tarvitaan STI :n leviämismuunnus. STI :n määrittämiseksi tarvitaan puheen signaalikohinasuhde ja jälkikaiunta-aika. A.o. yksinkertaistetulla menetelmällä päästään useissa suunnittelutilanteissa riittävään tarkkuuteen. Puheen signaalikohinasuhde L_{SN} on puheen äänitason $L_{A,S}$ ja taustamelun äänitason $L_{A,B}$ erotus:

$$(4.12.4) \quad L_{SN} = L_{A,S} - L_{A,B}$$

Puheen signaalikohinasuhde määritetään samoilla etäisyyksillä puhujasta kuin puheen äänitaso. Taustamelutaso oletetaan yleensä samaksi kaikissa pisteissä ja siihen asetetaan oletettu ilmastointimelun tai peittoäänien äänitaso. Huonetilan jälkikaiunta-aika T lasketaan huonepintojen ja kalusteiden absorptiomateriaalien perusteella Sabine'n menetelmällä. Taustamelutason tavoin jälkikaiunta-aika oletetaan samaksi kaikissa huoneen pisteissä. STI arvioidaan L_{SN} :n ja T :n perusteella kuvan 4.11.1b diagrammista

etäisyyksillä 1, 2, 4, 8, 16 ja 32 metriä. Häiritsevyysetäisyys voidaan määrittää tämän jälkeen.

4.13 Auditorion suunnittelu

Auditoriolla tarkoitetaan tässä 30–200 hengen tilaa, jossa puhujalla/esittäjällä on melko kiinteä sijainti ja yleisöllä samaten. Katsomo voi sijaita tasaisella lattialla tai se voi olla nouseva. Huoneakustiikalla on tällaisissa tiloissa erittäin tärkeä merkitys, koska niissä ei lähtökohtaisesti haluta käyttää sähköistä äänenvahvistusta.

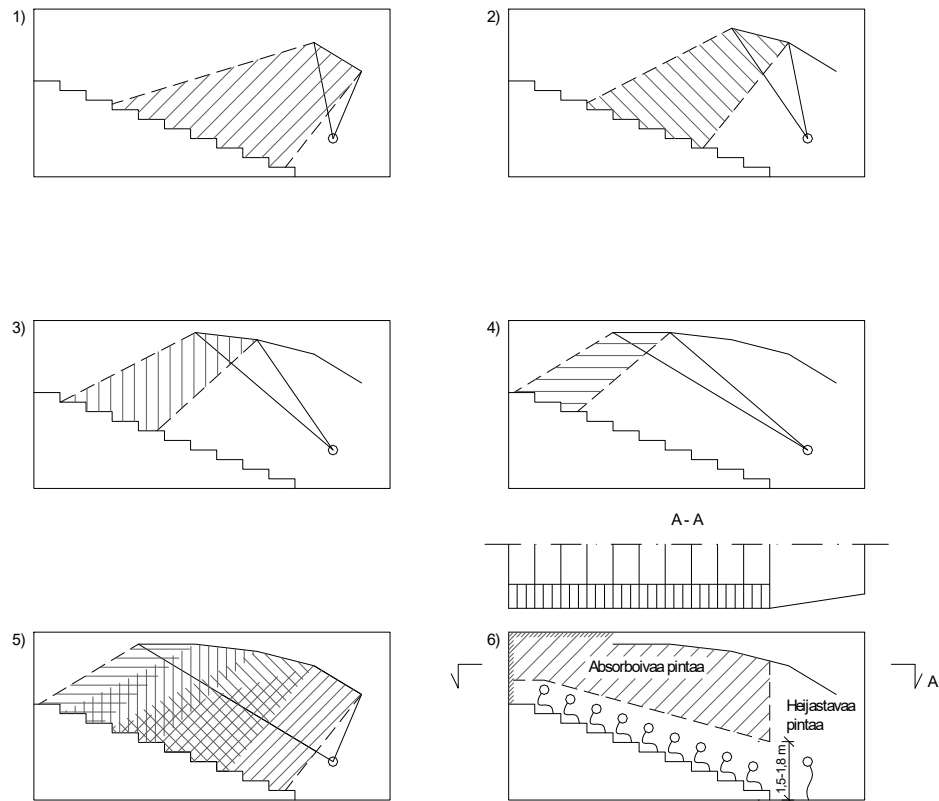
Lähtökohtaisesti tärkein suunnittelutekijä on taustamelun kaikkalainen hallinta. Ilmanvaihdon äänten kuten myös sähköisten apuvälineiden kuten videotykkien ja äänenvahvistinten tulee alittaa 33 dB L_{Aeq} sekä puhujan että yleisön alueilla. Äänieristyksen tulee olla sellainen, etteivät naapuritilojen tai ulkoa kantautuvien äänten tasot myöskään ylitä tätä arvoa.

Kuulo rekisteröi 50 ms aikana saapuvat äänet samaksi ääneksi, joten heijastukset, jotka saapuvat kuulijalle alle 50 ms sisällä suoran äänen jälkeen ovat hyödyllisiä ja niitä tulisi vahvistaa. Yli 50 ms suoran äänen jälkeen saapuvat heijastukset ovat puheakustiikassa haitallisia, koska puheen nopeimmat modulaatiot (12.5 Hz, jakson kesto 80 ms) puuroutuvat. Hitaassa musiikin tapauksessa heijastukset aina 80 ms asti suoran äänen jälkeen ovat hyödyllisiä. Huoneen lämpötilassa ääni kulkee 50 ms kuluessa 17 m.

Tilan koko ja pintakäsittely tulee siis suunnitella niin, että pinnat, joista syntyy ensimmäisen asteen heijastuksia alle 50 ms sisällä suoraan ääneen nähden jätetään koviksi. Muut pinnat voidaan käsitellä ääntä absorboivilla materiaaleilla sen mukaan, mikä on jälkikaiunta-ajan mukainen tarve.

Nouseva katsomo tuottaa akustisesti paremman lopputuloksen, koska sillä taataan suoran äänen kuuluminen takariviin. Vaihtoehtoisesti esittäjä sijaitsee korokkeella. Kuvassa **4.13.1** on esimerkki siitä, miten nousevassa katsomossa saavutetaan optimaalinen puheakustiikka:

- Puhujan yläpuolelle ja kattoon kaartuva kovapintainen katto, jolla katosta heijastuva ääni suunnataan tasapuolisesti katsomon kaikkiin osiin (vaiheet 1–5). Tämä toimenpide ei ole kuitenkaan välttämätön.
- Tilan etuseinä jätetään kovapintaiseksi, koska se sijaitsee lähellä puhujaa ja tuottaa hyötyheijastuksia;
- Yleisön kohdalla sivuseinät jätetään heijastavaksi korkeuteen 1.8 m asti, koska niistä syntyy hyötyheijastuksia;
- Tarvittava absorptiomateriaali sijoitetaan takaseinälle, yleisön alueelle, sivuseinien yläosiin, tässä järjestyksessä. Heijastava takaseinä voi tuottaa erittäin haitallisia heijastuksia tilan etuosiin, paitsi jos se kallistetaan katon suuntaan. Istuimet ovat mielellään ääntä absorboivia, koska yleisön alue ei ole hyötyheijastuksia tuottava ja tilan kaiunta ei silloin riipu yleisön määrästä.
- Jos absorptiomateriaalille tarvitaan lisää sijoittelupaikkoja, aloitetaan katon takaosasta ja katon reuna-alueista: 1–2 metrin alue katon reuna-alueilla ei tuota hyötyheijastuksia.
- Esittäjän kohdalla ei saa syntyä tärykaiunta seinien väliin, joten seinien tulee olla kevyesti ääntä absorboivia tai kallistettu yleisön suuntaan.



Kuva 4.13.1 Esimerkki auditorion huoneakustisesta suunnittelusta. (Kuva: RIL 243-2-2007).

4.14 Leviämisvaimennus teollisuustiloissa

Teollisuustiloissa huoneakustiikka on yksi monista keinoista hallita meluallistusta tai muita meluhaittoja. Huoneakustisen suunnittelun tavoitteena on maksimoida leviämismvaimennusasteen DL_2 arvo. Kansallisia ohjearvoja teollisuustilojen leviämismvaimennusasteelle ei ole julkaistu mutta Työterveyslaitoksen mukaan tavoitearvoiksi tulisi asettaa $DL_2=4-6$ dB huoneen kalustuksesta riippuen. Hyvin usein kuitenkin DL_2 arvot ovat alle 3 dB, jolloin tilat koetaan meluisina ja kommunikoinnin kannalta ongelmallisina.

Teollisuustilat ovat pääsääntöisesti yli 5 metriä korkeita. Pohjamitat ovat muutamista kymmenistä mutamiin satoihin metreihin. Kalustus on yleensä kovapintaista mutta varastoivat materiaalit voivat absorboida ääntä. Yleensä huonevaimennus hoidetaan katto- ja seinäpintojen absorptiokykyä parantamalla. Tilassa voi olla runsaastikin äänen etenemiseen vaikuttavia esteitä kuten esineitä ja hyllyköitä. Nämä tekijät aiheuttavat sen, että diffuusio kentän yhtälöt jälkikäivunta-ajalle ja äänenpainetason leviämismelle eivät toimi teollisuustiloissa. Huoneakustisten toimenpiteiden tarkoituksena on vaikuttaa ennenkaikkeaa melutasoon ja tämä vaikutus on helpoiten määritettävissä regressioyhtälöin.

Keränen ja Hongisto (2010) vertailivat laskentamalleja, joilla voidaan laskea äänenpainetason leviämismvaimennusta teollisuustiloissa. Malleja ovat kehitelleet mm. Friberg, Embleton ja Russel, Heerema, Hodgson, Kuttruff, Osipov, Sabine, Thompson, Wilson ja Zetterling. Mallit perustuvat joko teoreettisiin pelkistykisiin tai empiirisestä aineistosta tilastollisin menetelmin johdettuun tulokseen. Osipovin ym. (1987) mallilla voitiin päästä lähes samaan tarkkuuteen kuin säteenseurantamenetelmällä, jota käytetään kaupallisissa laskentaohjelmissa. Mallin mukaan etäisyysvaimennema DL [dB] etäisyydellä r [m] voidaan laskea yhtälöillä

$$(4.14.1) \quad DL(r) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2\pi r^2} + \frac{(1 - \alpha_{eff})(r + W) \mathbf{J}(\alpha_{eff}, \rho)}{HW(r + H)} \right\}$$

$$(4.14.2) \quad \mathbf{J}(\alpha_{eff}, \rho) = \frac{0.1}{\alpha_{eff} + \rho^2 e^{0.65\rho}}$$

$$(4.14.3) \quad \rho = -\frac{rS \ln(1 - \alpha_{eff})}{4V}$$

missä H [m] on korkeus, W [m] on kapein leveys, V [m³] on tilavuus ja S [m²] on huonepintojen kokonaispinta-ala. Keskimääräinen absorptiosuhde α_{eff} on huoneen absorptioalan ja kokonaispinta-alan suhde.

Leviämismuunnoksen arvo on negatiivinen. Äänitaso L_p etäisyydellä r äänilähteestä, jonka äänitehotaso on L_w saadaan etäisyysmuunnoksen avulla yhtälöstä

$$(4.15.4) \quad L_p(r) = L_w + DL(r)$$

Leviämismuunnoksen avulla voidaan arvioida keskimääräistä melutasoa oltaessa ns. "vapaassa tilassa". Tämä tarkoittaa, että äänilähteen ja tutkittavan pisteen välillä ei ole äänen kulkuun voimakkaasti vaikuttavia esteitä kuten seinäkkeitä.

Jos teollisuustila on muodoltaan monimutkainen, tilassa on runsaasti tarkasteltavia äänilähteitä ja tilassa on merkittäviä äänen kulkeutumiseen vaikuttavia esteitä, suositellaan säteenseurantaan perustuvia mallinnusmenetelmiä (Oliva, 2005; Hongisto ym., 2006). Niiden avulla voidaan arvioida myös seinäkkeiden, absorptiomateriaalien sijoitteluvaihtoehtojen ja layoutmuutosten vaikutuksia.

KIRJALLISUUS

Beranek (1971), Noise and vibration control, 650 sivua, McGraw-Hill, California, USA.

Boden, H., Carlsson, U., Glav, R., Wallin, H.P., Åbom, M. (1999). Ljud och Vibrationer. Kungliga Tekniska Högskolan KTH, Marcus Wallenberg Laboratoriet för Ljud- och Vibrationsforskning, Stockholm, Sweden. (På svenska).

Chu WT, Warnock ACC, Guy J-C, Directivity of human talkers, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, 2001.

Cremer L, Muller LA, Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science Publ., London, 1982.

Haapakangas A, Kankkunen E, Hongisto V, Virjonen P, Oliva D, Keskinen E, Effects of five speech masking sounds on performance and acoustic satisfaction - implications for open-plan offices, *acta acustica united with acustica*, 97(4) 2011 641-655.

Haapakangas, A., Hongisto, V., Eerola, M., Kuusisto, T. (2017). Distraction distance and disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(1) 127–136.

Haapakangas, A., Hongisto, V., Liebl, A. (2020). The relation between the intelligibility of speech and cognitive performance – A revised model based on laboratory studies. *Indoor Air* 30 1130–1146.

Hak, C.C.J.M., Wenmaekers, R.H.C., van Luxemburg, L.C.J. (2012). Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters. *Acta Acust Acust* 98 907-915.

Hongisto V, Effect of sound masking on workers - a longitudinal study in an open office, *Acoustics'08*, paper 1178, Paris June 29-July 4 2008.

Hongisto V, Keränen J, Airo E, Olkinuora P, Akustinen mallintaminen meluntorjuntasuunnittelussa - Mallintamisen tekninen tutkimus ja soveltaminen uusissa työpaikoissa, *Työ ja Ihminen, Tutkimusraportti 20*, Työterveyslaitos, Helsinki, 2001, 80 s.

Houtgast, T., Steeneken, H. J. M. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria, *J. Acoust. Soc. Am.* 77(3) 1069-77.

Hongisto, V., Keränen, J., Larm, P., Oliva, D. (2006). Työtilan ääniympäristön havainnollistaminen - Virtual Space 4D ääniympäristöosion loppuraportti, *Työympäristötutkimuksen raporttisarja 23*, Työterveyslaitos, Helsinki.

Hongisto V, Keränen J, Larm P, Simple model for the acoustical design of open-plan offices, *acta acustica united with acustica*, 90 2004 481-495.

- Hongisto V, Oliva D, Rekola L, Subjective and Objective Rating of Spectrally Different Pseudorandom Noises – Implications for Speech Masking Design, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3) 2015 1344-1355.
- ISO 3382-3:2012 Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 3: Open plan offices. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- IEC 60268-16:2011 Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- Karjalainen M, *Kommunikaatioakustiikka*, Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, 1999.
- Keränen J, Airo E, Olkinuora P, Hongisto V, Validity of ray-tracing method for the application of noise control in workplaces, *acta acustica united with acustica*, 89 2003 863-874.
- Keränen, J., Hongisto, V. (2010). Comparison of simple room acoustic models used for noise control design, *Acta Acustica united with Acustica*, 96 179–194.
- Keränen, J., Hongisto, V. (2013). Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices, *Applied Acoustics* 74 1315–1325.
- Kylliäinen, M., Hongisto, V. (2019). Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:28, 50 pp., Helsinki. ISBN PDF 978-952-361-035-4. ISSN PDF 2490-1024. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161953>.
- Larm P, Keränen J, Helenius R, Hakala J, Hongisto V, Avotoimistojen akustiikka - laboratoriotutkimus, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 6, Työterveyslaitos, 2004.
- Virjonen, P., Keränen, J., Helenius, R., Hakala, J., Hongisto, V. (2007). Speech privacy between neighboring workstations in an open office - a laboratory study. *Acta Acust Acust* 93 771–782.
- Oliva D, Hongisto V, Keränen J, Koskinen V, Measurement of low frequency noise in rooms, *Indoor Environment Laboratory*, Turku, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland, 2011.
- Oliva, D. (2006). Room acoustics modeling using the raytracing method: implementation and evaluation. Licentiate Thesis, University of Turku, Department of Physics, Turku, Finland.
- Osipov GL, Sergeyev MV, Shubin IL, Optimum location of sound absorbing material and estimation of its noise-reduction efficiency in industrial spaces, *Proc. of Inter-Noise '87*, Beijing, China, 1987, pp. 683-686.
- RIL 243-2-2007 (2007). Rakennusten akustinen suunnittelu. Oppilaitokset, auditoriot, liikuntatilat ja kirjastot. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry., 78 s, Helsinki, 2007.
- RIL 243-3-2008 (2008). Rakennusten akustinen suunnittelu. Toimistot. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki.
- Rindel, J.H. (2018). Sound insulation in buildings. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. Florida, USA.
- Virjonen, P., Keränen, J., Hongisto, V. (2009). Determination of acoustical conditions in open-plan offices - Proposal for new measurement method and target values. *Acta Acust Acust* 95 (2) 279-290.
- Ympäristöministeriö (2017). Ympäristöministeriön asetus 796-2017 rakennuksen ääniympäristöstä, 24.11.2017, Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>.
- Ympäristöministeriö (2018). Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 28.6.2018, Helsinki. <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B2852D34E-DA43-4DCA-9CEE-47DBB9EFCB08%7D/138568>.

5 Ilmääneneristävyys

5.1 Ilmääneneristävyuden määrittäminen

Ilmääneneristävyuden R [dB] määritelmä on

$$(5.1.1) \quad R = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)$$

missä τ on läpäisykerroin, ja W_1 [W] on rakenteeseen osuva ja W_2 rakenteen läpäisevä ääniteho. Ilmääneneristävyys riippuu taajuudesta.

I. PAINEMENETELMÄ

Ilmääneneristävyys määritetään tavallisesti laboratoriossa ns. painemenetelmällä, jossa rakenne sijoitetaan kahden diffuusin huoneen väliseen testausaukkoon niin, että ääni kulkeutuu huoneiden välillä vain rakenteen läpi. Mittausta varten tarvittava testiääni tuotetaan huoneeseen 1 kaiuttimilla. Rakenteeseen huoneen 1 äänikentästä osuva ääniteho voidaan määrittää lähetyshuoneen keskimääräisestä tehollisesta äänenpaineesta p_1 [Pa] luvun 3 mukaan yhtälöllä

$$(5.1.2) \quad W_1 = I_1 S = \frac{\tilde{p}_1^2 S}{4 \rho_0 c_0}$$

missä S [m²] on rakenteen pinta-ala, I_1 [W/m²] on pintaan osuva intensiteetti, ρ_0 [kg/m³] on ilman tiheys ja c_0 [m/s] on äänen nopeus ilmassa.

Läpäisevä ääniteho määritetään huoneen 2 äänenpaineen avulla. Tasapainotilanteessa seinästä vastaanottohuoneeseen säteilevä ääniteho W_2 ja huonepintoihin absorboituva ääniteho ovat samat

$$(5.1.3) \quad W_2 = \frac{\tilde{p}_2^2 A_2}{4 \rho_0 c_0}$$

missä p_2 on vastaanottohuoneen tehollinen äänenpaine ja A_2 [m²] on vastaanottohuoneen absorptioala. Lopuksi saadaan

$$(5.1.4) \quad R = 10 \log_{10} \frac{W_1}{W_2} = 10 \log_{10} \frac{\tilde{p}_1^2 S}{\tilde{p}_2^2 A_2}$$

Laboratoriomittauksissa (ISO 10140-5) ja käytännön laskelmissa käytetään siitä johdettua muotoa

$$(5.1.5) \quad R = L_{p,1} - L_{p,2} + 10 \log_{10} \frac{S}{A_2}$$

Pienelle rakennusosalle (*element*: esim. ilmanvaihtoaukko, postiluukku, tarkistusluukku) määritetään pinta-alasta riippumaton suure, ns. normalisoitu yksikköäänitasoero $D_{n,e}$, yhtälöstä

$$(5.1.6) \quad D_{n,e} = L_{p,1} - L_{p,2} + 10 \log_{10} \frac{A_0}{A_2}$$

missä normalisoitu pinta-ala on $A_0 = 10$ m². Yhtälö tuottaa saman tuloksen kuin yhtälö 5.1.5, jos oletetaan pienen rakennusosan pinta-alan olevan 10 m² vaikka näin ei tietenkään ole. Normalisoitua yksikköäänitasoeroa käytetään, jotta pienen rakennusosan suorituskykyä voitaisiin suoraan verrata sen rakenteen ilmääneneristävyuden arvoon, johon pieni rakennusosa sijoitetaan.

II. INTENSITEETTIMENETELMÄ

Painemenetelmä nojautuu diffuusin kentän olettamukseen. Siksi menetelmä yliarvioi tuloksia pientaajuuksilla, yleensä 200 Hz:n alapuolella. Lisäksi laboratorioden väliset erot ovat suuria pientaajuuksilla.

Intensiteettimenetelmässä rakenteen säteilemä ääni mitataan äänen intensiteettiä käyttäen, jolloin ilmaääneneristävyys saadaan yhtälöllä

$$(5.1.7) \quad R = 10 \log_{10}(W_1) - 10 \log_{10}(W_2) = 10 \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}_1^2}{4 \rho_0 c_0 S} \right) - 10 \log_{10}(I_2 S)$$

Laboratoriomittauksissa (ISO 15186-1) käytetään muotoa

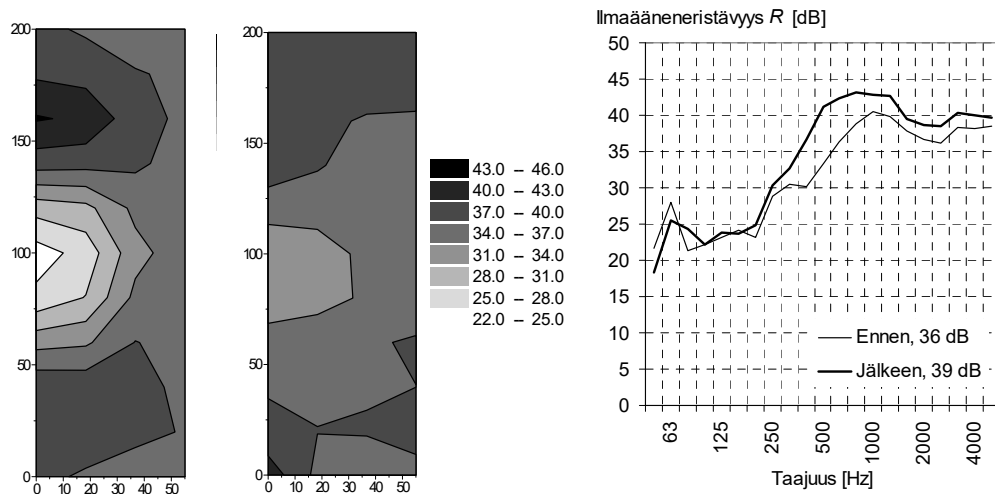
$$(5.1.8) \quad R = L_{p1} - 6 - \left[L_{I2} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_{m2}}{S} \right) \right]$$

missä L_{p1} [dB re 20 μ Pa] on lähetyshuoneen äänenpainetaso ja L_{I2} [dB re 1 pW] on rakenteen säteilemä intensiteettitaso vastaanottohuoneeseen, S_{m2} [m²] on mittauspinnan ala ja S [m²] on rakenteen pinta-ala. Logaritmitermi on tavallisesti nolla. Pientaajuuksilla 50–200 Hz laboratorioden väliset erot ovat pienempiä, jos huoneen 1 äänenpainetaso mitataan alle 20 mm rakenteen pinnasta, L_{p1S} , ja huoneen 2 takaseinä vastapäätä mitattavaa rakennetta on ääntä absorboiva. Laboratoriomittauksissa (ISO 15186-3) käytetään yhtälöä

$$(5.1.9) \quad R = L_{p1S} - 9 - \left[L_{I2} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_{m2}}{S} \right) \right]$$

missä L_{p1S} [dB] on äänenpainetaso rakenteen pinnalla lähetyshuoneessa.

Intensiteettimenetelmä antaa lähempänä teoriaa olevia tuloksia. Sillä voidaan myös mitata luotettavia ilmaääneneristävyys R arvoja kenttäolosuhteissa. Intensiteettimenetelmällä voidaan muodostaa myös äänensäteilystä kertova kuva, jos intensiteetin mittaus tehdään pisteittäin (kuva 5.1.1).



Kuva 5.1.1 Erään ovirakenteen ilmaääneneristävyys ennen ja jälkeen oven lukon tiivistyksen taajuudella 500 Hz. Värit kertovat karkeasti paikallisesta ilmaääneneristävydestä [dB]. Oikealla on esitetty ilmaääneneristävyys. Ennen: tiivistämätön lukko. Jälkeen: tiivistetty lukko. R_w -arvojen ero oli 3 dB.

5.2 Ilmaääneneristysluku ja spektripainotustermit

Ilmaääneneristävyys määritetään yleensä taajuuksilla 100–3150 Hz tai 50–5000 Hz, harvemmin jälkimmäisen taajuuskaistan ulkopuolella. Liiketoiminnassa ja määräyksissä ilmaääneneristävyttä kuvataan yksilukuarvoilla. Yksilukuarvojen (*single-number quantity*) määritelmät esitetään ISO 717-1 standardissa. Tärkein niistä on ilmaääneneristysluku R_w . Sitä käytetään rakennuksen sisällä olevien rakenteiden ilmaääneneristyksen kuvaamiseen. Pienten elementtien osalta määritetään yksikköääneneristysluku $D_{n,e,w}$. Standardi esittää myös erilaisia spektripainotustermejä, joita on 8 kappaletta: $C_{100-3150}$, $C_{100-5000}$, $C_{50-3150}$, $C_{50-5000}$, $C_{tr,100-3150}$, $C_{tr,100-5000}$, $C_{tr,50-3150}$ ja $C_{tr,500-5000}$. Termeistä yleisimmin Suomessa käytetty on C_{tr} , joka on tieliikennemelun spektrikorjaustermi. Yksilukuarvolla $R_w + C_{tr}$ kuvataan Suomessa julkisivurakenteiden ilmaääneneristävyttä tieliikennemelua vastaan.

R_w määritetään ns. vertailukäyrämenetelmällä. Määrittystapa on selitetty kuvassa 5.2.1. Spektripainotustermin

C_j arvo lasketaan yhtälöstä

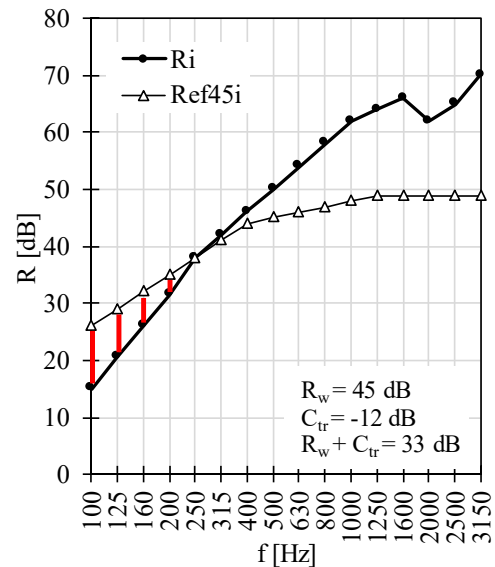
$$(5.2.1) \quad C_j = X_{A_j} - X_W$$

missä j on kyseessä olevan vertailuspektri (joko 1: A-painotettu vaaleanpunainen kohina tai 2: A-painotettu kaupunkiliikenne, tr), X_W on edellä vertailukäyrämenetelmällä määritetyn yksilukuarvon arvo (R_W tai $D_{n,e,w}$)

$$(5.2.2) \quad X_{A_{ji}} = -10 \log_{10} \sum 10^{(L_{ij} - X_i)/10}$$

missä i on taajuuskaistan indeksi, L_{ij} on vertailuspektrin j taajuuskaistan i arvo, ja X_i on mitattu ilmaääneneristävyyssarvo (R tai $D_{n,e}$).

f_i	R_i [dB]	Ref _w [dB]	Ref45 _i [dB]	Dev _i [dB]	L_{i2} [dB]	$L_{i2} - R_i$ [dB]	$10^{(L_{i2}-R_i)/10}$
100	15.0	$R_w - 19$	26	11.0	-20	-35.0	0.0003162
125	20.5	$R_w - 16$	29	8.5	-20	-40.5	0.0000891
160	26.0	$R_w - 13$	32	6.0	-18	-44.0	0.0000398
200	31.5	$R_w - 10$	35	3.5	-16	-47.5	0.0000178
250	38.0	$R_w - 7$	38	0.0	-15	-53.0	0.0000050
315	42.0	$R_w - 4$	41	0.0	-14	-56.0	0.0000025
400	46.0	$R_w - 1$	44	0.0	-13	-59.0	0.0000013
500	50.0	R_w	45	0.0	-12	-62.0	0.0000006
630	54.0	$R_w + 1$	46	0.0	-11	-65.0	0.0000003
800	58.0	$R_w + 2$	47	0.0	-9	-67.0	0.0000002
1000	62.0	$R_w + 3$	48	0.0	-8	-70.0	0.0000001
1250	64.0	$R_w + 4$	49	0.0	-9	-73.0	0.0000001
1600	66.0	$R_w + 4$	49	0.0	-10	-76.0	0.0000000
2000	62.0	$R_w + 4$	49	0.0	-11	-73.0	0.0000001
2500	65.0	$R_w + 4$	49	0.0	-13	-78.0	0.0000000
3150	70.0	$R_w + 4$	49	0.0	-15	-85.0	0.0000000



R: Ilmaääneneristävyyden mittaustulos

Ref: Vertailukäyrän muoto

Ref45: Vertailukäyrä asennossa 45 dB

Dev: Ei-toivottu poikkeama: =Max(0; Ref45_i - R_i)

$$\text{Sum} = \sum [10^{(L_{i2}-R_i)/10}] = 0.000473$$

$$X_{A2} = -10 \cdot \log_{10}(\text{Sum}) = 33.3$$

$$C_{tr} = X_{A2} - R_w = -11.7$$

$$C_{tr} = -12$$

L_{i2} on C_{tr} :n laskennassa käytettävä referenssispektri.

Ei-toivottujen poikkeamien Dev_i summa:

29.0 dB

Korkein sallittu 32.0 dB.

Kuva 5.2.1 Ilmaääneneristysluku R_w määritetään mitatuista R -arvoista vertailukäyrämenetelällä. Vertailukäyrän muoto Ref on aina sama mutta sen sijainti y-suunnassa riippuu siitä, mikä lähtöarvo annetaan ankkuritaajuudelle, joka on 500 Hz. Ankkuritaajuudelle annetaan mahdollisimman suuri arvo siten, että ei-toivottujen poikkeamien summa on korkeintaan 32.0 dB. Ei-toivottu poikkeama tapahtuu, kun vertailukäyrän arvo on mittaustuloksen yläpuolella. Arvauksella 45 dB vertailukäyrä sijoittuu asemaan Ref45. Ei-toivotut poikkeamat tapahtuvat taajuuksilla 100–200 Hz. Koska niiden summa on alle 32.0 dB, on R_w sama kuin vertailukäyrän arvo ankkuritaajuudella.

5.3 Värähtelytyypit ja äänensäteily levyssä

Levyrakenteissa etenee neljänlaisia aaltoja, jotka ovat tärkeysjärjestyksessä taivutusaalto, leikkausaalto, näennäispitkittäinen aalto ja Rayleighin aalto (kuva 5.3.1). Äänen vaihenopeudet (*phase speed*) taivutus-, leikkaus- ja pitkittäisaaltomuodoille levyssä on laskettavissa seuraavista yhtälöistä

$$(5.3.1) \quad c_B = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{m'}} = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 h^2 E}{\rho_m 12(1-\mu^2)}}$$

$$(5.3.2) \quad c_s = \sqrt{\frac{Gh}{m'}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_m 2(1+\mu)}}$$

$$(5.3.3) \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_m(1-\mu^2)}}$$

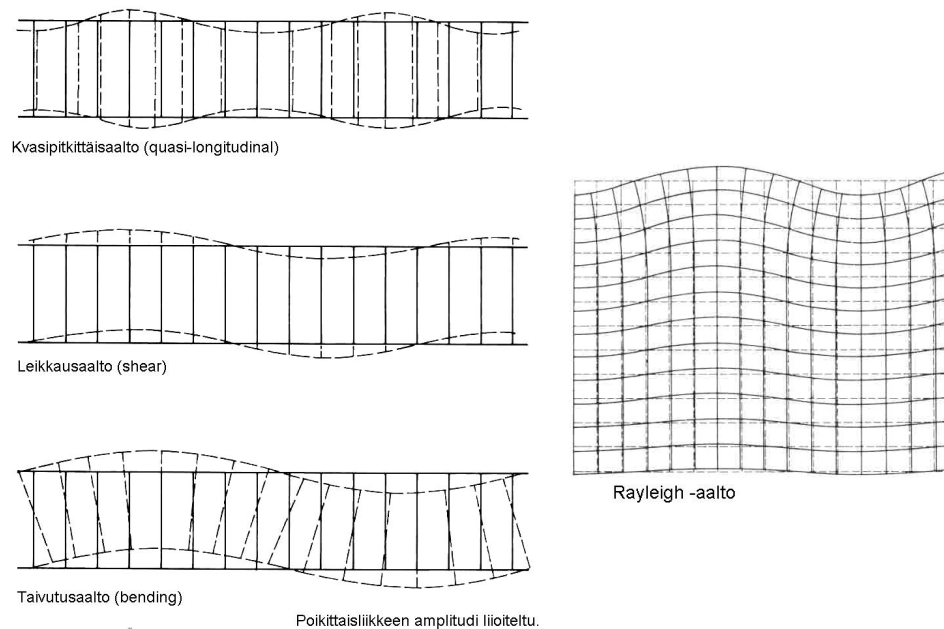
missä ω [Hz] on kulmataajuus, E [Pa] on kimmomoduli, G [Pa] leikkausmoduli, h [m] on levyn paksuus, B

[Nm] taivutusjäykkyys yksikköleveyttä kohti, m' [kg/m²] on pinta-alamassa, μ [] on Poissonin suhde ja ρ_m [kg/m³] on levyn tiheys. Levyllä taivutusjäykkyys on muotoa

$$(5.5.4) \quad B = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)}$$

Poissonin suhde on metalleille $\mu \approx 0.30$ ja kaikille muille materiaaleille $\mu \approx 0.20$ (Craik 1996).

Tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla leikkausaalloilla ei ole merkittävää vaikutusta äänensäteilyyn tai ilmaaneneristävyyteen alle 5 kHz taajuuksilla. Rayleighin aallon nopeus on samaa luokkaa kuin leikkausaallon. Tätä aaltomuotoa ei tarkastella, koska se esiintyy vain hyvin paksuilla levyillä sen pinnalla (*free surface waves*). Levyn äänensäteilyn kannalta merkittäviä aaltomuotoja ovat taivutusaalto ja leikkausaalto, koska niissä tapahtuu merkittävää poikittaista siirtymää ja siten vuorovaikutusta ympäröivään ilmaan. Levyn pitkittäisellä aaltoliikkeellä ei ole merkitystä äänensäteilyn kannalta. Levyn pinnoilla ei ole rajoituksia, jolloin pitkittäinen liike aiheuttaa myös pientä poikittaista liikettä Poissonin kutistumisen takia. Tällöin puhutaan näennäispitkittäisistä aalloista. Kun tarkastellaan alle 5000 Hz taajuuksia, ohuilla levyillä merkitystä on vain taivutusaalloilla. Paksummilla levyillä myös leikkausaalloilla on merkitystä ilmaaneneristävyyden kannalta.



Kuva 5.3.1 Vasemmalla on esitetty levyssä etenevät merkittävät aaltomuodot (Lähde: Fahy 1985). Oikealla on kuva Rayleighin pinta-aalloista, kun materiaali on ylhäällä. (Lähde: Cremer and Heckl, 1988).

5.4 Koinsidenssi

Taivutusaallon nopeus kasvaa taajuuden kasvaessa. Muilla aaltomuodoilla taajuusriippuvuutta ei ole. Äänen nopeus ilmassa on myös vakio ja taajuusriippumaton. Koska taivutusaalto on merkittävin aaltomuoto äänensäteilyn kannalta mutta dispersiivinen, on ilmaaneneristävyyden taajuudesta riippuva ja siksi monimutkainen ilmiö.

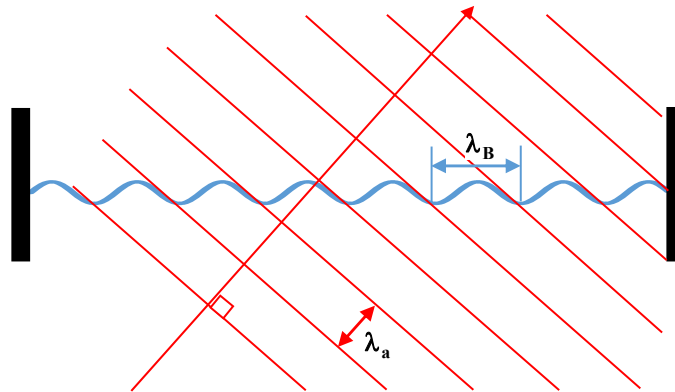
Kun taivutusaallon nopeus saavuttaa äänen nopeuden ilmassa tapahtuu koinsidenssi äänen tulokulmassa 90°. Tätä taajuutta kutsutaan koinsidenssin rajataajuudeksi (tai koinsidenssin kriittiseksi taajuudeksi) ja se saadaan yhtälöstä

$$(5.4.1) \quad f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)m}{E h^3}}$$

Koinsidenssi-ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 5.4.1. Koinsidenssissa tietyllä tulokulmalla saapuva ääniaalto kytkeytyy taivutusaaltoon suorittavaan levyyn täydellisesti ja läpäisee levyn lähes vaimenematta ja ilmaaneneristävyyssä havaitaan tällä taajuudella heikkenemä. Ilmiö on kuitenkin erittäin

kapeakaistainen. Käytännössä levyssä on häviöitä, jonka vuoksi läpäisy ei ole aivan täydellinen.

Alin koinsidenssitaajuus tapahtuu tulokulmalla $\theta=90^\circ$ (*grazing incidence*). Tulokulman pienentyessä koinsidenssitaajuus tapahtuu taajuudella, joka on rajataajuus jaettuna tulokulman sinillä. Kohtisuoralla äänen tulokulmalla koinsidenssitaajuus on siten ääretön.



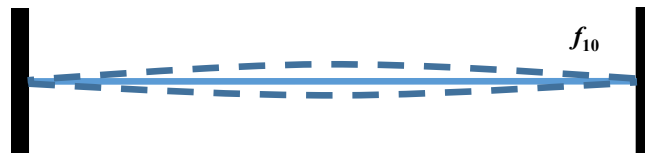
Kuva 5.4.1 Koinsidenssi-ilmiö kuvattuna äänen tulokulmalla $\theta=45^\circ$.

5.5 Levyn ominaistaajuudet

Äärellisellä reunoiltaan jäykästi tuetulla levyllä on ominaistaajuuksia eli moodeja. Ominaistaajuudet määrittyvät yhtälöllä

$$(5.5.1) \quad f_{mn} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left[\left(\frac{m}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n}{L_y} \right)^2 \right] \quad m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

missä c_0 [m/s] on äänen nopeus ilmassa, f_c [Hz] on koinsidenssin rajataajuus, L_x on levyn leveys [m] ja L_y levyn korkeus [m]. Alimmat aksiaalimoodit f_{01} ja f_{10} tapahtuvat silloin, kun levyn toinen mitta on yhtä suuri kuin levyssä etenevän taivutusaallon aallonpituuden λ_b puolikas. Alin ominaistaajuus suunnassa x (f_{10}) on esitetty kuvassa 5.5.1.



Kuva 5.5.1 Alin ominaistaajuus f_{10} , jossa levy värähtelee kokonaisuudessaan sen kiinnityspisteiden suhteen levyn pisimmässä suunnassa.

5.6 Äänensäteily taivutusaallosta

Koinsidenssin rajataajuuden yläpuolella taivutusaallonpituus λ_m on huomattavasti pidempi kuin ilmaäänien aallonpituus λ_a , jolloin levy voi säteillä taivutusaaltojen energiaa tehokkaasti koko pinta-alaltaan. Levyn taivutusvärähtelykenttä ei säteile ilmaääntä koko pinta-alaltaan koinsidenssin rajataajuuden alapuolella. Levyn keskiosissa tapahtuu akustinen oikosulku (kuvat 5.6.1-2), koska ilmassa etenevän ääniaallon aallonpituus λ_a on levyn taivutusaallon aallonpituutta λ_m pidempi ($c_a > c_m$). Taivutusaallon säteilemä positiivinen ja negatiivinen äänenpaine kumoutuvat ilmassa tapahtuvan oikosulun välityksellä.

Taivutusaalto voi säteillä tehokkaasti ääntä koinsidenssitaajuuden alapuolella vain levyn ominaistaajuuksilla. Tällöin vain reunat tai nurkat säteilevät ääntä riippuen moodin tyypistä. Ääntä säteilee laita-alueilla vain noin neljännesaallonpituuden levyiseltä alueelta ja tätä sisempänä tapahtuu akustinen oikosulku.

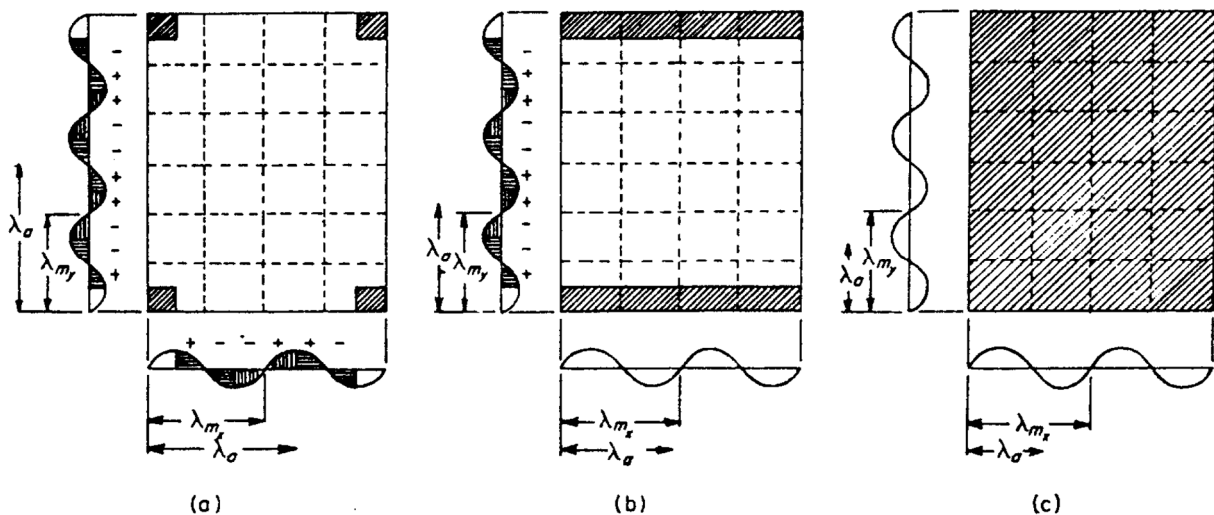
Esimerkiksi tilastollisessa energia-analyysissä (SEA, *statistical energy analysis*), käytetään säteilytehokkuutta σ (säteilykerroin, säteilyosuus, *radiation efficiency*) kuvaamaan edellä kuvattua levyn säteilyominaisuutta:

$$(5.6.1) \quad \sigma = \frac{W}{\langle v^2 \rangle \rho_0 c_0 S}$$

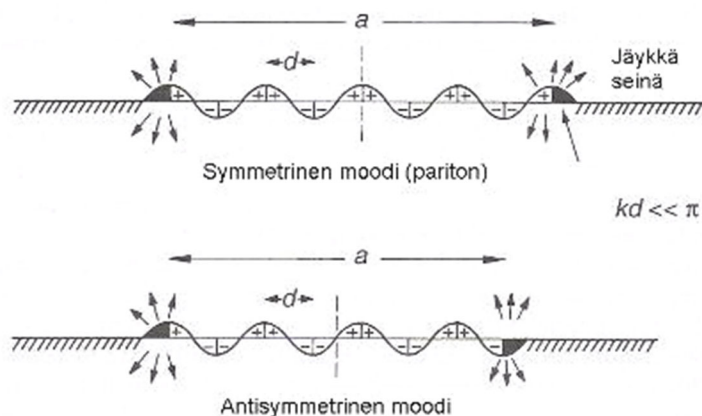
missä W [W] on levyn säteilemä ääniteho, v [m/s] on levyn keskimääräinen värähtelynopeus ja S [m²] on levyn pinta-ala. Säteilytehokkuus voi saada arvoja 0.00 ja 1.00 välillä. Maksimaalinen säteilytehokkuus saavutetaan koinsidenssin rajataajuudella ja sen yläpuolella. Pienemmillä taajuuksilla säteilytehokkuus on moodista ja pinta-alasta riippuen 0 ja 1 välillä ja hyvin vaikeasti laskettavissa.

Koinsidenssin rajataajuuden yläpuolella levyn säteilemä ääniteho voidaan arvioida luotettavasti mittaamalla levyn värähtelynopeus. Esimerkiksi betonirakenteilla koinsidenssin rajataajuus on noin 100 Hz, minkä vuoksi rakenteen säteilemä äänitehotaso voidaan taajuusalueella 100–3150 Hz määrittää värähtelymittauksin. Koinsidenssin alapuolella säteilevä ääniteho kannattaa määrittää intensiteettimenetelmällä. Sitä joudutaan käyttämään kevytväliseinien tapauksessa koko taajuusalueella 100–3150 Hz.

Vaikka taivutusaallon säteilytehokkuus on huono, kun $f < \frac{1}{2}f_c$, levyn ilmaääneneristävyys ei ole ääretön. Äänen säteily koostuu resonoivasta ja ei-resonoivasta värähtelystä. Jälkimmäistä kutsutaan myös pakkovärähtelyksi. Ei-resonoiva värähtely määrittää ilmaääneneristävyyden lähes yksinomaisesti, kun $f < \frac{1}{2}f_c$. Kun $f > \frac{1}{2}f_c$, ei-resonoiva ja resonoiva värähtely yhdessä määrittävät ilmaääneneristävyyden.



Kuva 5.6.1 Resonoivan värähtelyn esiintymismuodot laidoilta jäykästi tuetussa levyssä eri taajuusalueilla. Harmaa alue merkitsee äänensäteilyä resonoivasta kentästä. Katkoviiva levyssä merkitsee puolikasta taivutusaallonpituutta levyssä. a) Nurkkamoodi ($f \ll f_c$). Oikosulku tapahtuu muualla paitsi nurkissa. b) Reunamoodi ($f < f_c$). Oikosulku tapahtuu muualla paitsi moodin suunnassa. c) Pintamoodi ($f \gtrsim f_c$). Oikosulkua ei tapahdu vaan koko levy säteilee tehokkaasti. Aallonpituus ilmassa on λ_a ja taivutusaallon pituus levyssä on λ_m . (Lähde: Fahy 1985)



Kuva 5.6.2 Akustinen oikosulku reunamoodin tapauksessa, kun $f < \frac{1}{2}f_c$. Kuvassa a on levyn mitta tarkasteltavan akselin suunnassa. Oikosulun vuoksi levyn lähikentässä on pyörteisyyttä eikä esimerkiksi intensiteettimittauksia sen vuoksi suositella tehtävän alle 10 cm päässä pinnasta (Lähde: Fahy 1985).

5.7 Häviökerroin

Rakenteen häviökerroin η kertoo, miten nopeasti resonoiva värähtely eli taivutusaaltojen moodikenttä vaimenee. Häviökerroin kertoo, miten suuri osa energiasta häviää yhden jakson aikana. Värähtelyenergia E vaimenee rakenteessa ajan t funktiona yhtälön

$$(5.7.1) \quad E(t) = E_0 e^{-\eta_{tot} \omega t}$$

mukaan, missä E_0 on herätteen rakenteeseen synnyttämä maksimienergia. Kokonaishäviökerroin on sisäisen häviökertoimen, kytkehdäviökertoimen ja säteilyhäviökertoimen summa (kuva 5.7.1)

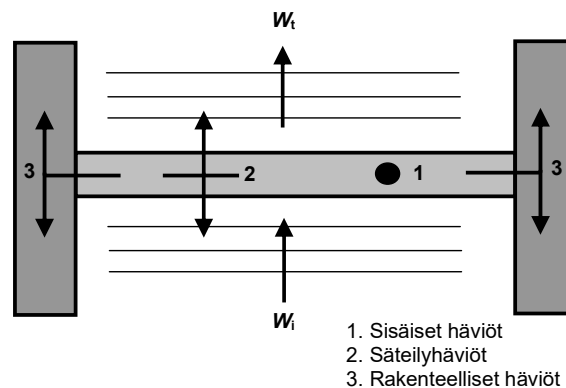
$$(5.7.2) \quad \eta_{tot} = \eta_{sis} + \eta_{sät} + \eta_{kyt} = \eta_{sis} + \frac{Z_0 \sigma}{\pi f m'} + \frac{c_0 \sum_k l_k \alpha_k}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}}$$

missä σ on materiaalin säteilytehokkuus, Z_0 [Pa·s/m] on ilman karakteristinen impedanssi, l_k [m] on liitoksen k pituus, α_k on liitoksen k absorptiokerroin ja S [m²] on rakenteen kokonaispinta-ala. Tyypillisesti lattia- tai seinärakenteella on 4 liitosta (k : 1...4).

Rakenteen kokonaishäviökerroin tietyssä asennuspaikassa voidaan määrittää kokeellisesti yhtälöllä

$$(5.7.3) \quad \eta_{kok} = \frac{2.2}{fT}$$

missä T [s] on rakenteen jälkikaiunta-aika ja f [Hz] on taajuus. Rakenteelle saatu mittaustulos ei päde toiseen asennuspaikkaan, jossa liitokset ja mitat ovat erilaisia.



Kuva 5.7.1 Kokonaishäviökertoimen kolme tekijää. Vaaleanharmaa on tutkittava rakenne (esim. seinä) ja tummanharmaat ovat rakenteita, johon tutkittava rakenne on kiinnitetty (esim. sivuavat seinät ja kytkehdä rakennukseen).

Useimpien materiaalien sisäiset häviökertoimet ovat erittäin pieniä. Niitä ei kannata käyttää laskelmissa, koska rakenteeseen asennettuna sisäinen häviökerroin on kuitenkin vain murto-osan kokonaishäviökertoimesta. Sisäiset häviöt ovat merkittävän suuria esimerkiksi kumissa tai lyijyssä.

Kokonaishäviökerroin on voimakkaasti taajuudesta riippuva. Useimmilla rakenteilla kokonaishäviökertoimen taajuusriippuvuus on muotoa (Trochet, 2000)

$$(5.7.4) \quad \eta(f) = A f^B$$

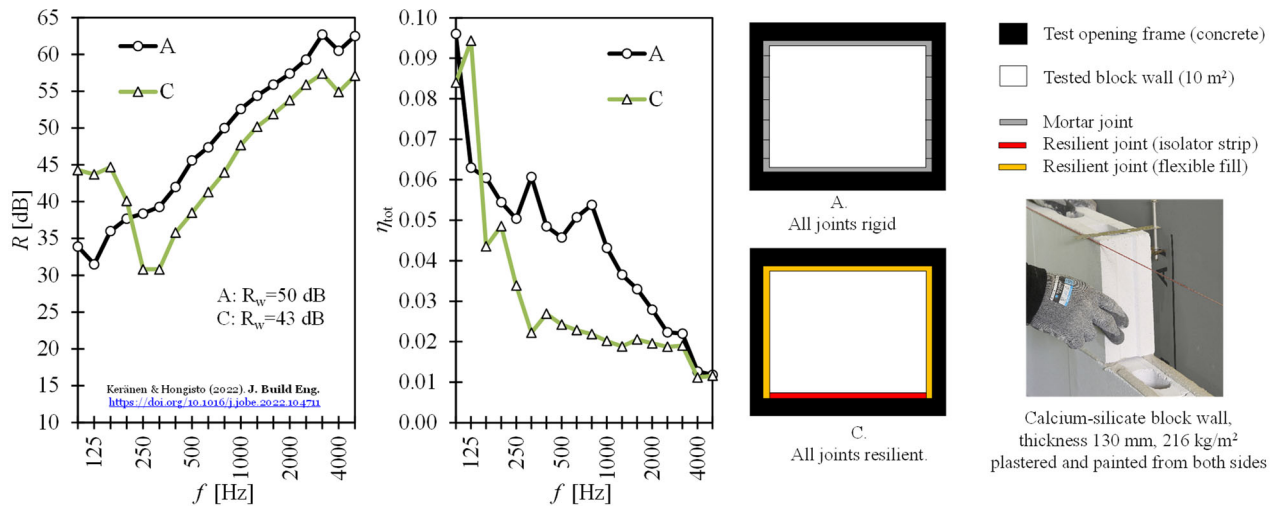
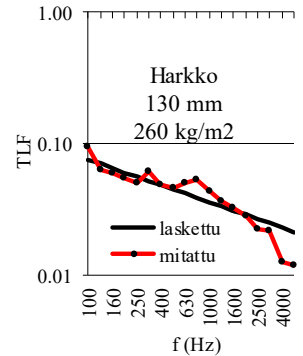
missä A ja B ovat vakioita. Taulukossa 5.7.1 on esitetty joidenkin rakenteiden arvoja.

Kuvassa 5.7.2 esitetään tutkimus, jossa selvitettiin, miten harkkoseinän laitojen joustavuus vaikuttaa kokonaishäviökertoimeen ja ilmaääneneristävyyteen. Joustava asennus tuotti pienemmän R -arvon, koska värähtelyenergia ei voi edetä liitoksia pitkin rakennuksen runkoon, vaan jää kokonaan rakenteeseen korottaen rakenteen värähtelyamplitudia ja siten ilmaääneneristävyyttä. Jos rakenteen ilmaääneneristävyys asennustavalla A ja kokonaishäviökertoimella $\eta_{tot,A}$ on R_A , voidaan ilmaääneneristävyys R_B asennustavalla B ja kokonaishäviökertoimella $\eta_{tot,B}$ laskea yhtälöstä

$$(5.7.5) \quad R_B = R_A + 10 \log_{10} \left(\frac{\eta_{tot,B}}{\eta_{tot,A}} \right)$$

Taulukko 5.7.1 Kokonaishäviökertoimen TLF taajuusriippuvan yhtälön 5.7.4 vakioita A ja B . Arvot on määritetty mittaamalla rakenteellinen jälkikaiunta-aika ja määrittämällä häviökerroin yhtälöllä 5.7.3. Oikealla esimerkki yhtälön 5.7.4 sovituksesta erään harkkoseinän mittaustuloksiin.

Materiaali	Asennustapa	Mitat [m]	A	B
Calsium-silikaatti harkko 130 mm, 260 kg/m ²	Muurattu seinä	3.6 x 2.8	0.33	-0.32
Calsium-silikaatti tiili 200 mm, 360 kg/m ²	Muurattu seinä	3.6 x 2.8	1.09	-0.52
Lecaharkko 150 mm	Muurattu seinä	5.0 x 4.0	0.35	-0.40
Teräsbetoni 180 mm	Muurattu seinä	3.0 x 6.0	0.50	-0.42
Teräsbetoni 160 mm	Laatta teräspalkkikehän päällä	4.1 x 2.5	0.12	-0.30
Kipsi EK 13 mm	Ruuvattu k600	1.2 x 2.2	0.05	-0.10
Kipsi N 13 mm	Ruuvattu k600	1.2 x 2.2	0.04	-0.08
Teräslevy 2 mm	Ruuvattu k1200	1.2 x 2.2	1.66	-0.72
Teräslevy 4 mm	Ruuvattu k1200	1.2 x 2.2	0.07	-0.25



Kuva 5.7.2 Harkkoseinän ilmapääeneristävyyden, R , ja kokonaishäviökerroin, η_{tot} , taajuuden, f , funktiona, kun harkkoseinän liitokset ovat jäykät (A) tai elastiset (B). Jäykkä asennustapa on tavanomainen (Keränen & Hongisto, 2022).

5.8 Yksinkertaisen levyn malli

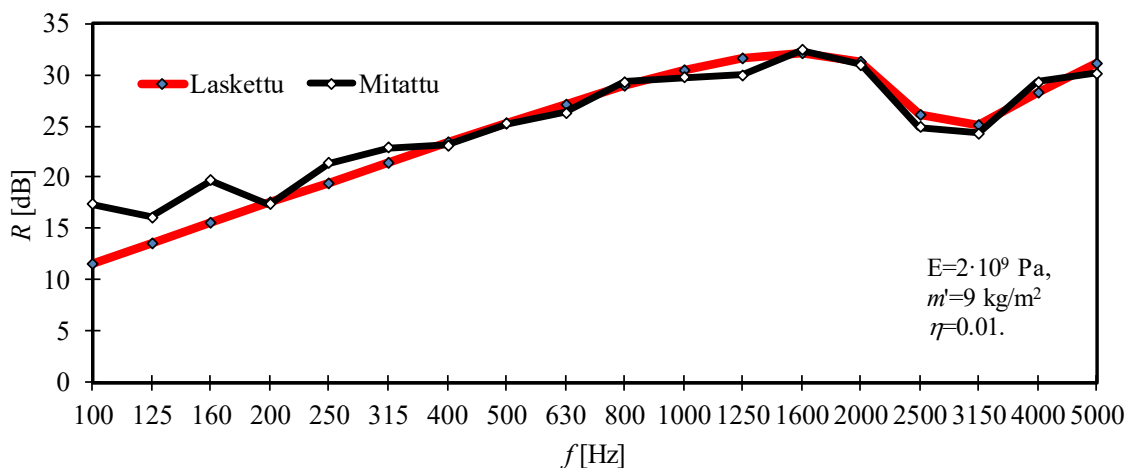
Jos äänikenttä on lähetyshuoneessa diffuusi ja levyn pinta-ala oletetaan äärettömäksi, ilmapääeneristävyyden R [dB] voidaan hyvällä tarkkuudella arvioida yhtälöparilla (Rindel, 2018)

$$(5.8.1) \quad R = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\pi m' f}{\rho_0 c_0} \right) + 20 \cdot \log_{10} \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5, & f < f_c \\ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\pi m' f}{\rho_0 c_0} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\eta f}{\pi f_c} \right), & f \geq f_c \end{cases}$$

missä m' [kg/m²] on pintamassa, f on taajuus [Hz] ja η on kokonaishäviökerroin. Ylempi yhtälö on ns. massalaki ja koskee pakkovärähtelyn eli ei-resonoivan värähtelyn taajuusalueita. Massalain mukaan R kasvaa 6 dB taajuuden tai massan kaksinkertaistuessa. Alempi yhtälö koskee resonoivan värähtelyn taajuusalueita. Ilmapääeneristävyys ei voi kuitenkaan ylittää koinsidenssitajuuden yläpuolellakaan massalain mukaista arvoa millään taajuudella. Kuvassa 5.8.1 on laskentaesimerkki. Taulukossa 5.8.1 on esitetty erilaisten materiaalien parametriarvoja.

Taulukko 5.8.1 Materiaaliarvoja eri rakennusmateriaaleille. (Siikanen, 2001; Larm et al., 2006)

	m' kg/m ²	ρ_m kg/m ³	E GPa	R_w dB
Kipsikartonkilevy				
Saneeraus 6.5 mm	5.9	907.7	5.4	28
Tuulensuoja 9 mm	7.6	844.4	4.8	28
Normaali 13 mm	8.8	676.9	3.0	28
Erikoiskova 13 mm	11.7	900.0	4.5	29
Lattia 15 mm	16.8	1120.0	7.8	31
Selluloosamentti (Minerit)				
Tuulensuoja 4 mm	7.7	1925.0	15	30
Luja A 8 mm	9.8	1225.0	9.6	30
Tuulensuoja 8 mm	13.2	1650.0	15	31
Heavy duty 8 mm	14.7	1837.5	16	33
Pastel 8 mm	14.8	1850.0	15	32
Heavy duty 10 mm	18.4	1840.0	15	32
Puupohjaiset				
Lastulevy 11 mm	7.0	636.4	2.9	29
Vaneri 15 mm	10.4	693.3	11	26
Lastulevy 22 mm	13.9	632.4	3.4	29
Vaneri 21 mm	15.0	714.3	11	28
Puukuitu (Leijona)				
Tuulensuojalevy 12 mm	3.1	258.3	0.3	23
Tuulensuojalevy 25 mm	8.0	320.0	0.2	30
Sementti (Aquapanel)				
Sisä ID 13 mm	14.0	1076.9	7.9	30
Ulko OD 13 mm	15.6	1200.0	3.9	33
Teräs				
2 mm	15.6	7800.0	213	36
4 mm	31.2	7800.0	213	40
Muut				
alumiini		2700	67	
lyijy		11000	alhainen	
bitumi		1000	alhainen	
raskas betoni		2500	26	
huokoinen betoni		600	2	
savitiili*		625 - 2225	2,2 - 24,7	* reikätiili 1400 kg/m ² ; täystiili 1800 kg/m ² .
kalkkikiiekkatiili*		625 - 2225	7,5 - 10,0	* reikätiili 1400 kg/m ² ; täystiili 1800 kg/m ² .
tavallinen rakennuslasi		2500	70	
kevytsoraharkko		650 tai 950		
karkaistu kevytbetoniharkko (mm. siporex)		400-500	1,0 - 1,4	

**Kuva 5.8.1** 13 mm paksun kipsilevyn mitattu ja laskettu ilmaääneneristävyys.

5.9 Kaksi päällekkäistä ohutta levyä

Jos N kpl ohuita levyjä asetetaan päällekkäin ilman, että niiden välillä on kaviteettia, voidaan yhdistelmän ilmaääneneristävyys arvioida yhtälöstä

$$(5.9.1) \quad R_N = 20 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{R_i/20} \right)$$

missä R_i [dB] on levyn i ilmaaneneristävyys. Yhtälö soveltuu tilanteeseen, jossa levyt värähtelevät toisistaan riippumattomasti ja levyjen taivutusjäykkyydet eivät muutu. Tällöin yksittäisten levyjen koinsidenssin rajataajuudet säilyvät ennallaan ja ilmaaneneristävydet voidaan laskea yhteen.

Yleensä yhtälö yliarvioi lopputulosta vähintään 1 dB, koska levyt pitää kiinnittää samoihin tukirankoihin, eivätkä levyt todellisuudessa värähtele toisistaan riippumattomasti.

Jos levyt on kiinnitty toisiinsa esimerkiksi liimaamalla, yhtälö yliarvioi lopputulosta. Kaksi yhteenliimattua levyä muodostavat yhtenäislevyn, jolle on määritettävissä pintamassa ja taivutusjäykkyys. Yhtenäislevyn ilmaaneneristävyys määritetään tämän jälkeen yksinkertaisen levyn yhtälöillä. Liimauksen vuoksi häviökerroin on kuitenkin korkeampi kuin yksittäisellä liimaamattomalla levyllä.

5.10 Massiivilevyt

Massiivilevyillä tarkoitetaan tässä suuren pintamassan omaavia levyjä, joilla f_c on 50–500 Hz, kun ohuilla levyillä se on yli 1000 Hz. Kiviaineksilla massiivilevyillä pintamassa on yleensä 200–700 kg/m² ja puuaineksilla massiivilevyillä 50–250 kg/m². Ohuiden levyrakenteiden ilmaanensäteily ympäröivään ilmaan riippuu pääosin taivutusaaltojen (*bending waves*) ominaisuuksista 10000 Hz alapuolella. Kun levyn paksuus on suurempi kuin taivutusaallon kuudesosa, alkavat leikkausaallot (*shear waves*) hallita rakenteen äänensäteilyä ja siten myös ilmaaneneristävyttä. Leikkausaaltojen auktoriteetti alkaa ns. siirtymätaajuuden f_s (*cross-over frequency*) kohdalla, jonka arvo on tyypillisillä kiviainesrakenteilla noin 2000 Hz alueella. Tämän yläpuolella oleva taajuusalue tulisi mallintaa leikkausaaltojen avulla, koska taivutusaaltomalli antaa liian suuria ilmaaneneristysarvoja.

Korkeilla taajuuksilla taivutusaalto etenee nopeammin kuin matalilla taajuuksilla. Kuvan **5.10.1** dispersiokaavioissa nähdään taivutusaallon suhtautuminen muiden aaltomuotojen nopeuksiin sekä äänen nopeuteen. Merkittäviä kohtia ovat koinsidenssin rajataajuus f_c ja siirtymätaajuus. Siirtymätaajuudella f_s taivutus- ja leikkausaallon nopeudet ovat samat ($c_s=c_B$):

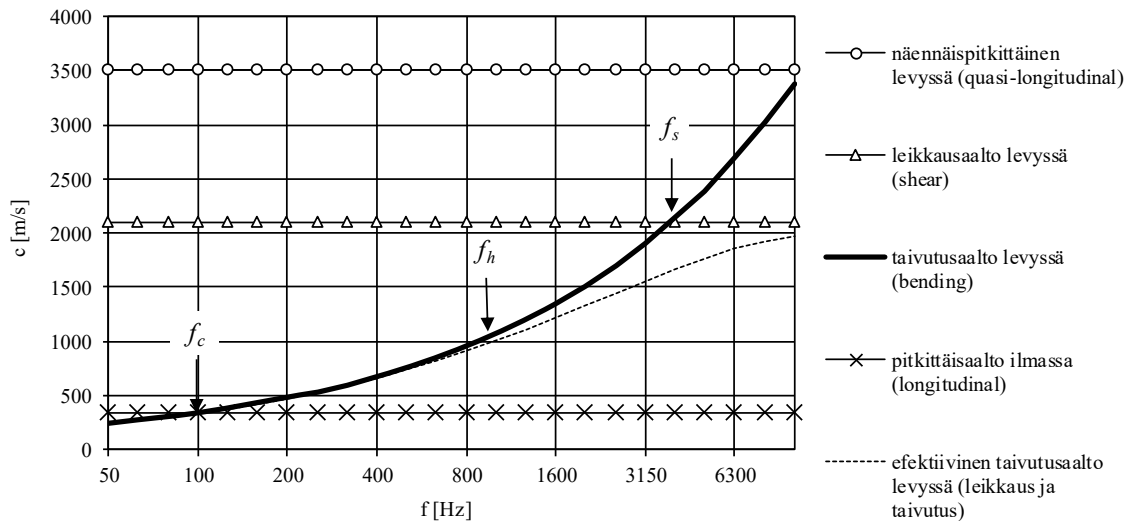
$$(5.10.1) \quad f_s = \frac{c_s^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}}$$

Huomattavasti tämän taajuuden alapuolella säteilyn kannalta merkittävät poikittaisaallot etenevät taivutusaallon nopeudella c_B ja sen yläpuolella leikkausaallon nopeudella c_s . Siirtymä taivutusaallosta leikkausaaltoon tapahtuu asteittain.

Koska poikittaisista aalloista tarkastellaan vain yhtä lajia kerrallaan, eli sitä joka säteilee ääntä tehokkaimmin, käytetään tehollista nopeutta $c_{B,eff}$ kuvaamaan taivutusaaltojen tehollista nopeutta seuraavasti:

$$(5.10.2) \quad c_{B,eff} = \frac{c_B^2}{c_s} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \left(\frac{c_s}{c_B} \right)^4} - \frac{1}{2}}$$

Tässä on katsottu leikkaus- ja taivutusaallon käyttäytyvän kuin sarjaan kytketyt systeemit. Tämä yhtälö on kuvattu kuvassa **5.10.1** katkoviivalla.



Kuva 5.10.1 Dispersiokäyrät ja erilaiset rajataajuudet 180 mm paksun betonilevyn aaltomuodoille.

Levyä pidetään akustisesti katsottuna ohuena, kun levyn paksuus on huomattavasti pienempi kuin aallonpituus levyssä. Rajataajuutena f_h , jonka yläpuolella levy ei enää täytä tätä ehtoa, on

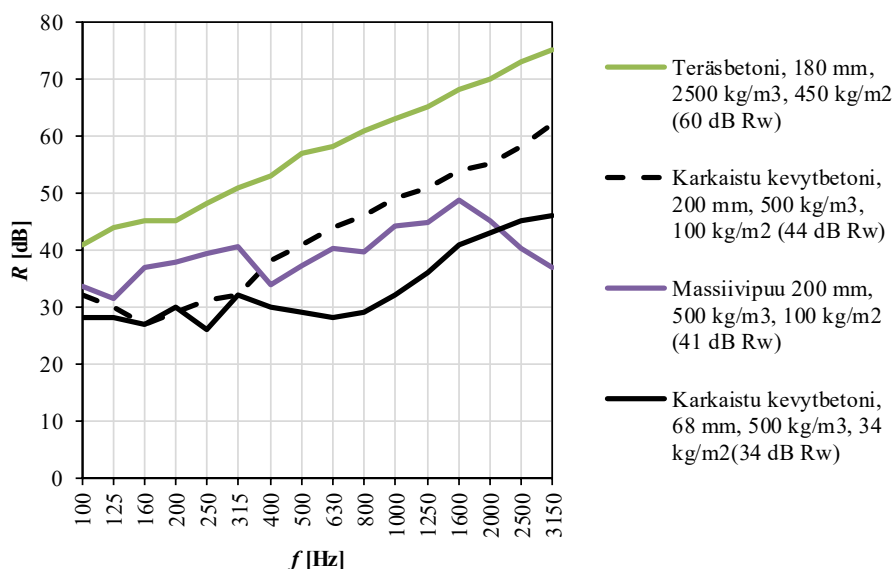
$$(5.10.3) \quad f_h = \frac{1}{f_c} \left(\frac{c_0}{6h} \right)^2$$

eli kun levyn paksuus on suurempi kuin kuudesosa levyn aallonpituudesta. Koska taivutusaallon nopeus kasvaa taajuuden kasvaessa, merkitsee tämä sitä, että f_h :n alapuolella levyä voidaan pitää ohuena ja sen yläpuolella paksuna.

Massiivilevyn ilmapääneneristävyyttä voidaan laskea kriittisen taajuuden yläpuolella yhtälöllä (Cremer and Heckl, 1988)

$$(5.10.4) \quad R = 20 \log_{10} \left(\frac{\alpha m'}{2Z_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{2\eta_{tot}}{\pi} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right)$$

Kokonaishäviökerroin η_{tot} ja kriittinen taajuus f_c lasketaan kuten ohuella levyllä. Kuvassa 5.10.2 on esitetty joidenkin kiviaineksisten massiiviseinien laboratoriotestituloksia.



Kuva 5.10.2 Raskaiden rakenteiden ilmapääneneristävyyksiä taajuuden funktiona. Sulkeissa R_w .

5.11 Kaksinkertainen levyrakente

Kaksinkertaisessa levyrakenteessa kaksi levykerrosta 1 ja 2 laitetaan peräkkäin niin, että levykerrosten väliin jää kaviteetti. Kaviteetissa voi olla levyrakenteiden pintamassaa selvästi kevyempiä materiaaleja, joiden pintamassalla ei ole vaikutusta ilmääneneristävyyteen. Näitä voivat olla äänenabsorptiomateriaalit, lämpöeristeet, paloeristeet, levyjen väliset mekaaniset kytkennät, ilmakerrokset ja näiden yhdistelmät. Levyrakenteen puolisko voi koostua useista levyistä mutta ne ajatellaan yhdeksi levyksi.

Jos kaviteetissa oleva materiaali on liimattu levyihin, on kysymys sandwich -levystä. Tätä käsitellään erikseen.

Kytkemätön kaksinkertainen levyrakente tarkoittaa, että levykerrosten 1 ja 2 välillä ei ole mekaanista kytkentää. Tällaisilla rakenteilla saavutetaan optimaalinen suorituskyky massaansa ja painoonsa nähden. Ilmääneneristävyys paranee, kun

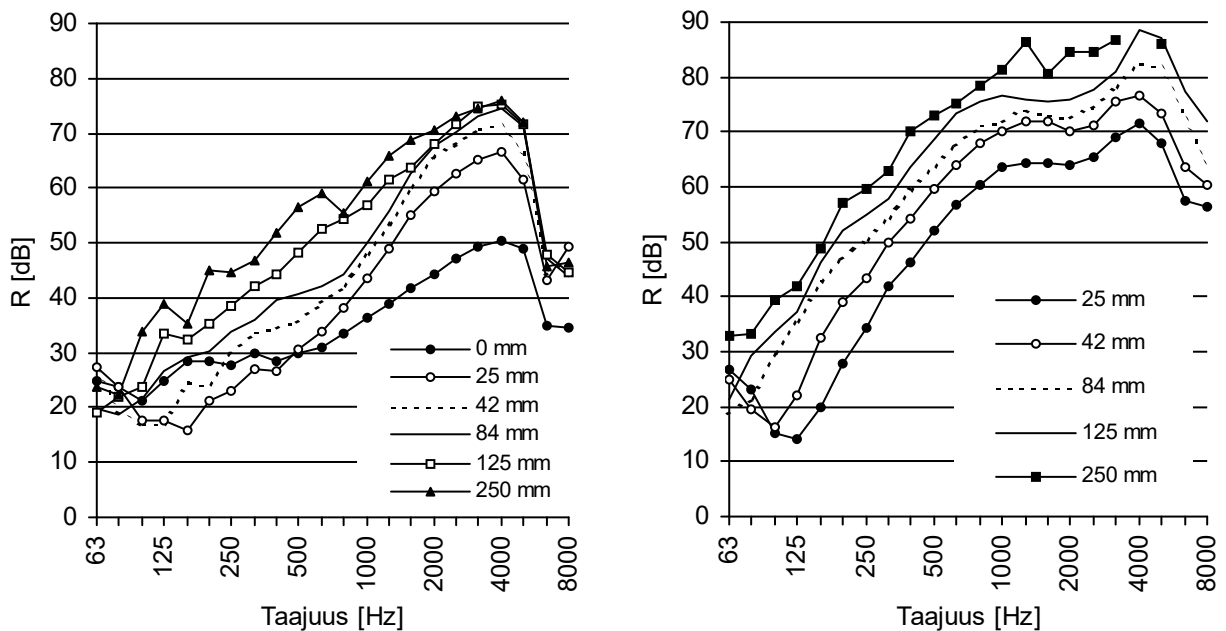
- i. kokonaismassa kasvaa
- ii. kaviteetin paksuus kasvaa ja
- iii. kaviteetin absorptiomateriaalin absorptiosuhde ja määrä kasvavat,
- iv. levykerrosten 1 ja 2 koinsidenssin rajataajuuksien ero kasvaa.

Kytkeyty kaksinkertainen levyrakente tarkoittaa, että levykerroksia 1 ja 2 yhdistää mekaaninen kytkentä. Tällaisia ovat esimerkiksi väliseinissä rangat ja kiskot, alakatoissa ripustusjouset, ikkunoissa ja ovissa puitteet ja lattioissa niskat/palkit. Kytkennot helposti dominoivat äänen läpäisyä. Em. tekijöillä i–iii on edelleen merkitystä selvästi vähemmän. Massan jälkeen kytkentöjen ominaisuudet vaikuttavat ilmääneneristävyyteen eniten. Ilmääneneristävyys paranee, kun

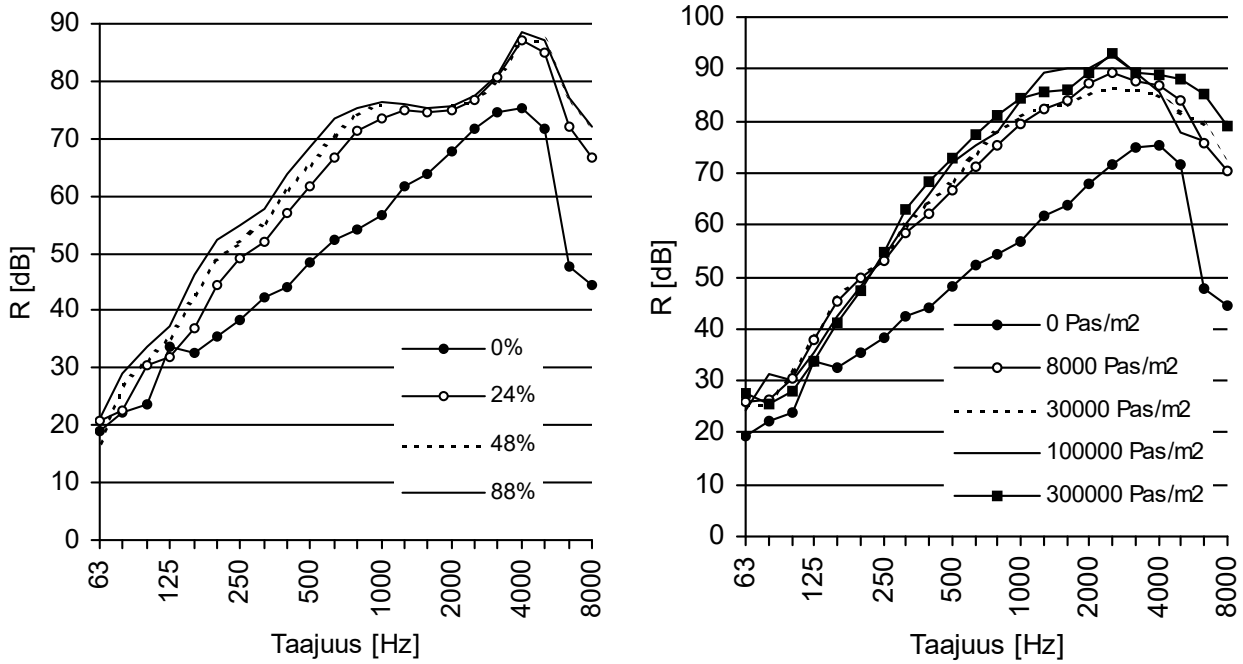
- v. kytkentöjen (rankojen, kiskojen tai pisteripustusten) määrä vähenee
- vi. kytkentöjen joustavuus paranee eli dynaaminen jäykkyys pienenee
- vii. levyn kiinnitys rankoihin heikkenee (ruuvien määrä pienenee tai ruuvauksen kireys pienenee)

Tekijöiden ii–iii vaikutus on lähes mitätön, jos levyjä yhdistää tiheät ja jäykät rangat. Jos kytkennät ovat joustavia, tekijöiden ii–iii merkitys on edelleen suuri.

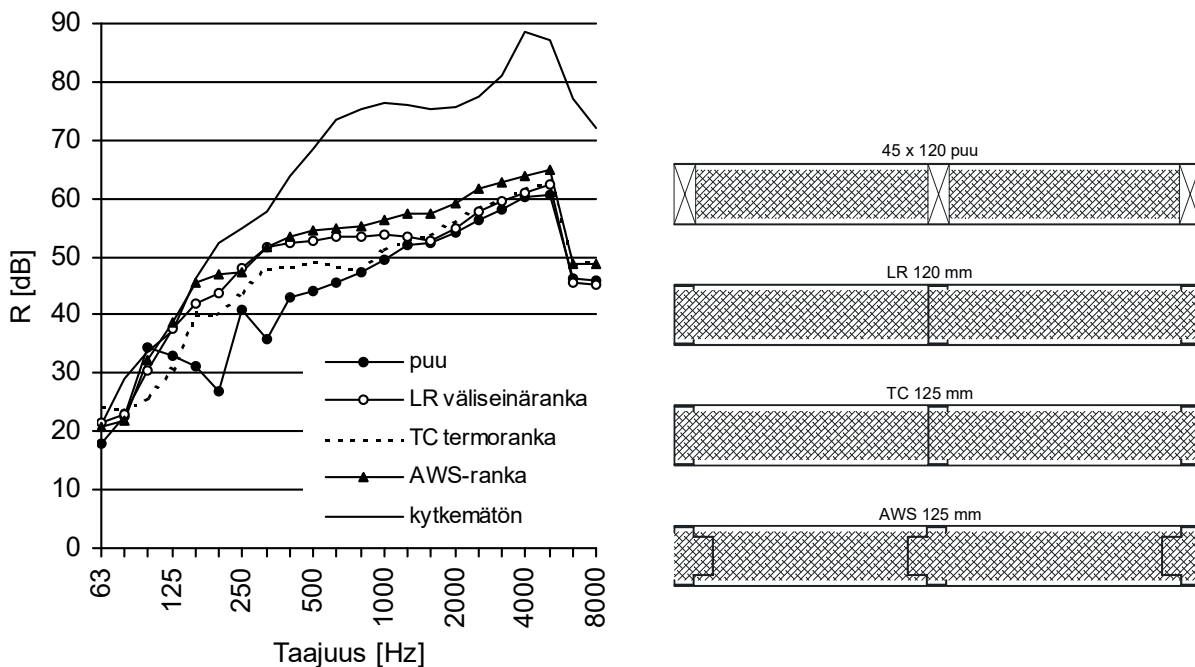
Kuvissa 5.11.1–4 on esitetty kaksinkertaisen levyrakenteen parametrien vaikutuksia laboratoriomittauksiin perustuen.



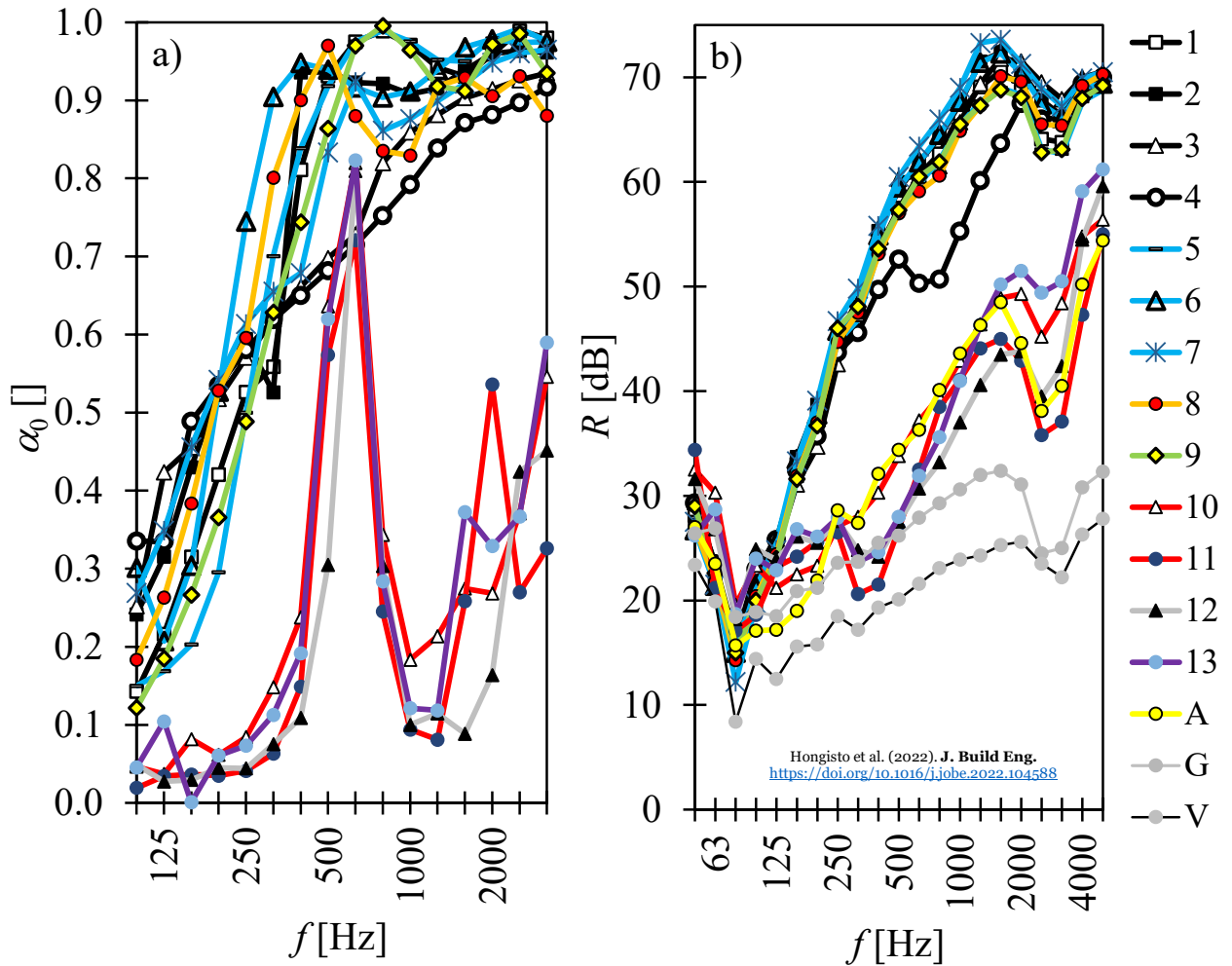
Kuva 5.11.1 Kaviteetin paksuuden d [mm] vaikutus ilmääneneristävyyteen eri taajuuksilla, kun (a) kaviteetti tyhjä ja (b) kaviteetti on täytetty mineraalivillalla (täyttöaste FR välillä 60–88 %). Kummassakin kuvassa pintalevyinä on 2 mm teräslevyt, joiden välillä ei ole kytkentöjä (Hongisto ym., 2002, Hongisto et al., 2002).



Kuva 5.11.2 (a) Kaviteetissa olevan mineraalivillan täyttöasteen FR vaikutus ilmaääneneristävyyteen eri taajuuksilla. (b) Kaviteetin mineraalivillan spesifisen virtausresistiivisyyden r vaikutus, kun täyttöaste $FR > 70\%$. Vertailukohtana on tyhjä kaviteetti (0 Pa·s/m²). Kummassakin kuvassa pintalevyinä on 2 mm teräslevyt, joiden välissä on 125 mm kaviteetti ilman mekaanisia kytkentöjä (Hongisto ym., 2002, Hongisto et al., 2002).



Kuva 5.11.3 Kaviteetissa olevien rankojen dynaamisen jäykkyyden vaikutus ilmaääneneristävyyteen eri taajuuksilla, kun rankajako on $b=600$ mm. Pintalevyinä on 2 mm teräslevyt, joiden välissä on 120 tai 125 mm kaviteetti, joka on täytetty mineraalivillalla ($FR > 75\%$). Rankojen dynaamiset jäykkyydet yksikköpituutta kohti, K' ovat: Puu: ei mitattu, arvio >100 MN/m², LR: 3.3 MN/m², TC: 2.8 MN/m², AWS: 0.2 MN/m². Vertailukohtana on kytkemätön rakenne, jossa ei ole rankoja (ei kuvaa, $b=\infty$) (Hongisto ym., 2002, Hongisto et al., 2002).



		λ	ρ
	Lämpöeristetyyppi (materiaali)	[W/mK]	[kg/m ³]
1	erittäin matalatiheksinen kivivilla (levy)	0.044	25
2	matalatiheksinen kivivilla (levy)	0.036	25
3	tiheä kivivilla (levy)	0.033	75
4	erittäin tiheä kivivilla (levy)	0.037	100
5	erittäin matalatiheksinen lasivilla (matto)	0.040	11
6	matalatiheksinen lasivilla (levy)	0.035	16
7	tiheä lasivilla (levy)	0.033	70
8	selluloosa (levy)	0.039	37
9	puukuitu (levy)	0.038	50
10	EPS (levy)	0.036	18
11	PIR (levy)	0.022	30
12	fenolivaakto (levy)	0.020	30
13	vahtolasi (levy)	0.036	100

Kuva 5.11.4. a) Erialaisten 100 mm paksujen lämpöeristeiden normaalitulokulman absorptiosuhde, α_0 , taajuuden f funktiona, kun eriste on asetettu jäykkää taustaa vasten. b) Kaksinkertaisen levyrakenteen ilmaääneneristävyys, R , taajuuden funktiona 14 kaksinkertaiselle levyrakenteelle, jonka rakenne oli 13 mm kipsilevy (G), 100 mm kaviteetti (täytteenä eriste 1–13 tai ilma A), ja 9 mm vaneri. Vertailuna on esitetty myös vanerin ja kipsin R -arvot yksinään. Eristetyypit 1–9 ovat läpihuokoisia ja loput umpihuokoisia. Edellisten arvot ovat jälkimmäisiä selvästi korkeampia. HUOM: Eristetyyppien 10–13 absorptiopiikki 630 Hz:n taajuudella ei ole todellinen vaan johtuu impedanssiputkitestissä eristeen ja taustalevyn väliin jääneestä ilma-araosta (levyresonaattori-ilmiö). Tämän vahvistaa kuva b, jossa ei nähdä vastaavaa ilmiötä (Hongisto et al., 2022).

5.12 Kaksinkertaisen levyrakenteen laskentamalli

I. JOHDANTO

Kaksinkertaisen levyrakenteen ilmasteneristävyydessä tulee huomioida erikseen ilmasteneristävyyden kaviteetti (R_c , *cavity*) ja rankoja (R_b , *bridge*) pitkin. Näiden kahden reitin yhteisilmasteneristävyys on

$$(5.12.1) \quad R = -10 \cdot \log_{10} \left(10^{-R_c/10} + 10^{-R_b/10} \right)$$

Jos kaviteetti on täysin absorboiva, käytetään kaavaa R_{cl} . Jos kaviteetti on osittain absorboiva, käytetään kaavaa R_{cII} . Jos rakenteessa on jäykkä kytkentä, käytetään kaavaa R_{bl} . Jos rakenteessa on joustavat kytkennät, käytetään kaavaa R_{cII} . Jos rankoja ei ole, on $R_b = \infty$ ja R_c on määrävä.

II. TÄYDELLISESTI ÄÄNTÄ ABSORBOIVA KAVITEETTI

Tarkastellaan ideaalista kaksinkertaista levyrakennetta, jossa puoliskojen välillä ei ole mekaanista kytkentää ja kaviteetti on täysin absorboiva estäen kaiunnen kaviteetissa. Ilmasteneristävyys voidaan laskea yhtälöillä (Sharp, 1978; Rindel, 2018):

$$(5.12.2) \quad R_{cl} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20} \right) + R_{mam}, & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20 \cdot \log_{10} (fd) - 29, & f_{mam} < f < f_d \\ R_1 + R_2 + 6, & f > f_d \end{cases}$$

missä R_1 ja R_2 [dB] ovat pintalevyjen 1 ja 2 ilmasteneristävyydet, d [m] on kaviteetin paksuus ja f [Hz] on taajuus. Massa-ilma-massa -resonanssitaajuudella, f_{mam} [Hz], R saavuttaa pienimmän arvonsa, koska puoliskot 1 ja 2 ja sen välissä oleva ilmajousi resonoiivat. Se lasketaan yhtälöstä

$$(5.12.3) \quad f_{mam} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8 \rho_0 c_0^2 (m'_1 + m'_2)}{d m'_1 m'_2}} = 80 \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d m'_1 m'_2}}$$

missä ρ_0 on ilman tiheys [1.2041 kg/m^3 ; $20 \text{ }^\circ\text{C}$], c_0 [m/s] on äänen nopeus ilmassa (343 m/s) ja m'_1 ja m'_2 [kg/m^2] ovat puoliskojen 1 ja 2 pintamassat. Ilmasteneristävyys on pienillä taajuuksilla ($f < f_{mam}$) sama kuin jos rakenteen levyt olisivat yhdessä ja tarkasteltaisiin yksinkertaista levyä.

Rajataajuus f_d [Hz] lasketaan yhtälöstä:

$$(5.12.4) \quad f_d = \frac{c_0}{2\pi d}$$

Rajataajuus vastaa kaviteetin paksuuden ja taajuuden välillä vallitsevaa ehtoa $kd=1$ eli tilannetta, jossa d on noin 16% aallonpituudesta. Tätä suuremmilla taajuuksilla levyihin nähden poikittainen äänikenttä alkaa muodostua ja kytkentä levyjen välillä hieman voimistuu ja ilmasteneristävyyden kasvu putoaa nopeudesta 18 dB/oktaavi nopeuteen 12 dB/oktaavi.

Massa-ilma-massa -resonanssitaajuuden kohdalla ilmasteneristävyydessä esiintyy kuoppa, joka on erityisen silmiinpistävä, jos kaviteetti on ääntä absorboiva. Jos se halutaan huomioida laskelmissa, voidaan käyttää yhtälöä (Rindel, 2018)

$$(5.12.5) \quad R_{mam} = 20 \cdot \log_{10} \left[1 - \left(\frac{f}{f_{mam}} \right)^2 \right]$$

Massa-ilma-massa resonanssitaajuutta sekä kuopan tarkkaa syvyyttä ja muotoa on vaikea ennustaa, koska ilmiö on kapeakaistainen, mittaukset tehdään 1/3-oktaaveittain ja mittausepävarmuudet ovat pientaajuuksilla suuria. Kuopan syvyys riippuu myös absorptiomateriaalin tyypistä ja määrästä sekä kaviteetin tiiveydestä.

R_1 ja R_2 saadaan joko laskennallisesti tai mittauksista. Painemenetelmällä saatu mittaustulos yliarvioi todellista ilmasteneristävyyttä pientaajuuksilla etenkin jos näyte koko on pieni. Laskennallinen tulos johtaa siksi helposti yliarvion pientaajuuksilla, jos käytetään mittaustuloksia, koska mahdollinen virhe kaksinkertaistuu.

Taajuuden f_{mam} yläpuolella ilmasteneristävyyden kasvu erittäin nopeasti, mallin mukaan 18 dB/oktaavi. Rajataajuuden f_l yläpuolella kasvunopeus hidastuu tasoon 12 dB/oktaavi. Kun levyjen koinsidenssin rajataajuuden puolikas saavutetaan, ilmasteneristävyyden kasvu alkaa heiketä samoin kuin yksinkertaisella levyrakenteella. Rajataajuuden yläpuolella ilmasteneristävyyden kasvu lähtee jälleen jyrkkään kasvuun. Jos levyillä on eri koinsidenssitaajuudet, ei ilmasteneristävyyden heikkenemä tällä taajuudella ole yhtä voimakas.

III. EPÄTÄYDELLISESTI ÄÄNTÄ ABSORBOIVA KAVITEETTI

Jos kaviteetissa ei ole absorptiomateriaalia, laskee ilmasteneristävyyden voimakkaasti kaviteettiin muodostuvan kaiun vuoksi. Moodit voidaan jakaa alempiin ($kd < 1$) ja ylempiin ($kd > 1$). Alemmat moodit tapahtuvat levyjen suunnassa. Ylemmät moodit tapahtuvat levyihin nähden kohtisuorassa (*higher modes*). Ylemmillä moodeilla on paljon vähemmän merkitystä ilmasteneristävyydelle kuin alemmilla moodeilla. Suurilla taajuuksilla ($kd > 1$) kaiuntaa on edellisten lisäksi myös kohtisuoraan levyjä vastaan.

Kaviteetti ei kaiu alinta moodia pienemmillä taajuuksilla, jolloin absorptiomateriaali ei myöskään vaikuta ilmasteneristävyyteen. Kaviteetin alin resonanssi f_{c1} lasketaan yhtälöstä

$$(5.12.6) \quad f_{c1} = \frac{c_0}{2 \cdot \max [L_{x,c}; L_{y,c}; L_{z,c}]}$$

missä $L_{x,c}$, $L_{y,c}$ ja $L_{z,c} = d$ [m] ovat kaviteetin leveys, korkeus ja paksuus. Kuvassa 5.12.1 on esitetty diagrammi, josta saa käsityksen resonanssitaajuuksista eri kaviteetin mitoilla.

Kokeellisten tutkimusten mukaan ilmasteneristävyyden heikkenee logaritmisesti absorptiomateriaalin täyttöasteen suhteen. Ilmasteneristävyyden epätäydellisesti absorboivan kaviteetin tapauksessa lasketaan yhtälöstä

$$(5.12.7) \quad R_{cII} = R_{cI} + \Delta R_{abs}$$

missä kaviteetin absorptiosuhteen mukaan määräytyvä heikkennystermin ΔR_{abs} [dB] saadaan yhtälöstä

$$(5.12.8) \quad \Delta R_{abs} = \begin{cases} 0, & f < f_{c1} \\ 10 \cdot \log_{10}(\alpha_{eff}), & f \geq f_{c1} \end{cases}$$

Jos kaviteetti on vain osittain täytetty absorptiomateriaalilla, saadaan efektiivinen absorptiosuhde kaavalla

$$(5.12.9) \quad \alpha_{eff} = \alpha_c \cdot FR$$

missä α_c on kaviteettimateriaalin absorptiosuhde ja FR on kaviteetin täyttösuhde, joka saa arvoja 0–1. Jos kaviteetti on täynnä absorptiomateriaalia, $FR=1$. Kaviteettimateriaalin absorptiosuhdearvona voidaan käyttää materiaalin paksuussuunnan d mukaan mitattuja tai laskettuja arvoja. Absorptiosuhde voi kuitenkin olla tätä suurempi, koska alemmilla moodeilla rajataajuuden f_d alapuolella äänikenttä esiintyy vain levyjen pinnan suunnassa, ei kohtisuoraan kaviteettimateriaalin pintaa vasten.

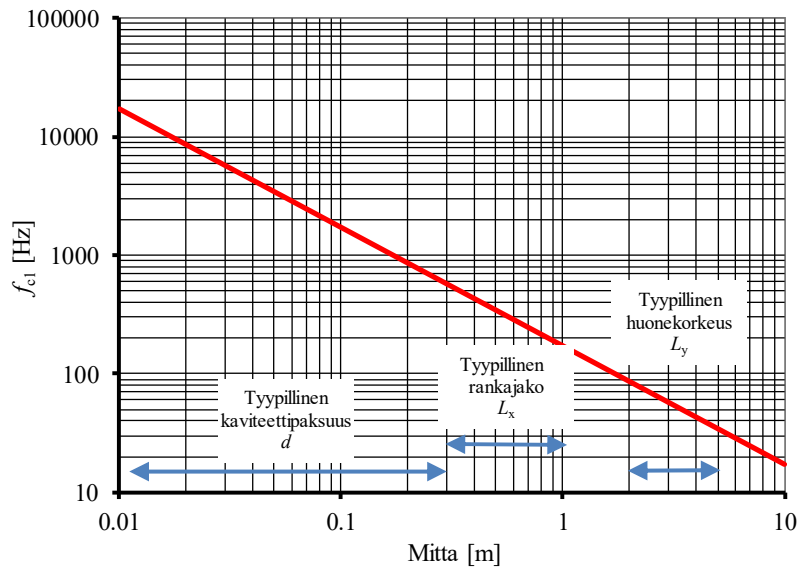
Jos kaviteetissa ei ole erillistä absorptiomateriaalia, jäljelle jää kaksi heikkoa absorptiomekanismia, jonka vuoksi absorptiosuhde ei kaviteetissa koskaan ole nolla:

- kaviteetin kovien sisäpintojen absorptio (kohtisuora tulokulma)
- kaviteetin suurten levypintojen viskoosit kitkahäviöt, kun ääni kulkee pintojen suunnassa.

Eriyisesti pienillä kaviteettipaksuuksilla viskoosit kitkahäviöt ovat merkittäviä, joskaan eivät suuria. Kaviteetin tarkkaa absorptiosuhteen arvoa on vaikea määrittää. Brekke (1980) on ehdottanut oheista approksimaatiota tyhjän kaviteetin absorptiosuhteelle:

$$(5.12.10) \quad \alpha_{eff} = \begin{cases} 0.5, & d \leq 0.02 \text{ m} \\ 0.01/d, & d > 0.02 \text{ m} \end{cases}$$

Efektiiviselle absorptiosuhteelle ei ole olemassa taulukkoarvoja, koska sama materiaali tuottaa erilaisen absorption erilaisissa kaviteeteissa. Ennustelaskelmissa suositeltava yläraja on $\alpha_{eff}=0.95$. Mittausten perusteella tyhjän ja täysin absorboivan kaviteetin erot ovat harvoin yli 15 dB millään taajuudella. Alarajaksi suositellaan arvoa 0.04, jolloin $\Delta R_{abs} = -14$ dB.



Kuva 5.12.1 Kaviteettiin muodostuvan alimman moodin riippuvuus kaviteetin mitasta. Levyn suunnassa olevat moodit ovat yleensä 40–600 Hz taajuuksilla. Levyn suuntaan kohtisuorassa olevat moodit ovat yleensä yli 600 Hz:n taajuuksilla.

IV. JÄYKKÄ KYTKENTÄ LEVYJEN VÄLISSÄ

Jos levyjä 1 ja 2 yhdistää jäykkä kytkentä, kuten puuranka tai jäykät pistekytkenät, on ilmaääneneristävyyden kytkentäreittiä pitkin

$$(5.12.11) \quad R_{bl} = 20 \cdot \log_{10} \left(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20} \right) + \Delta R_b$$

missä on oltava $\Delta R_b > 0$ dB.

Jäykkien viivakytkentöjen, kuten puurankojen tai täysin jäykkien teräsrankojen aikaansaama taajuudesta riippumaton parannus ΔR_b [dB] kahden levyn ilmaääneneristävyyden summaan (logaritmitermi) nähden saadaan yhtälöstä

$$(5.12.12) \quad \Delta R_b = 10 \cdot \log_{10} (b f_{cL}) + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18$$

missä b on viivakytkentöjen eli rankojen välinen etäisyys [m] eli koolausjako ja f_{cL} [Hz] on

$$(5.12.13) \quad f_{cL} = \left[\frac{m'_1 \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right]^2$$

missä f_{ci} [Hz] on levyn i koinsidenssin rajataajuus ja m'_i [kg/m²] on levyn i pintamassa.

Jäykkien pistekytkenöiden tapauksessa

$$(5.12.14) \quad \Delta R_b = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S \pi^3 f_{cP}^2}{N 8 c_0^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S f_{cP}^2}{N} \right) - 45$$

missä S [m²] on rakenteen pinta-ala, N_p [] on pistekytkenöiden lukumäärä rakenteessa ja f_{cP} [Hz] on

$$(5.12.15) \quad f_{cP} = \frac{m'_1 f_{c2} + m'_2 f_{c1}}{m'_1 + m'_2}$$

Jäykkää pistekytkenää edustaa esimerkiksi metallisilla ripustuslangoilla toteutettu alakatto. Jäykän pistekytkenän kaltainen tilanne muodostuu mm. ristikoolauksen tapauksessa, jolloin N on risteysten lukumäärä.

V. JOUSTAVA KYTKENTÄ LEVYJEN VÄLISSÄ

Joustavalla kytkennällä ilmaaneneristävyys on jäykkään kytkentään nähden parempi. Ilmaaneneristävyys jäykkää kytkentää pitkin on tällöin

$$(5.12.16) \quad R_{bII} = R_{bI} + \Delta R_{fb}$$

Joustavan kytkennän tuottama lisäeristys ΔR_{fb} muistuttaa jousen voimaeristyskykyä (Bradley&Birta, 2001):

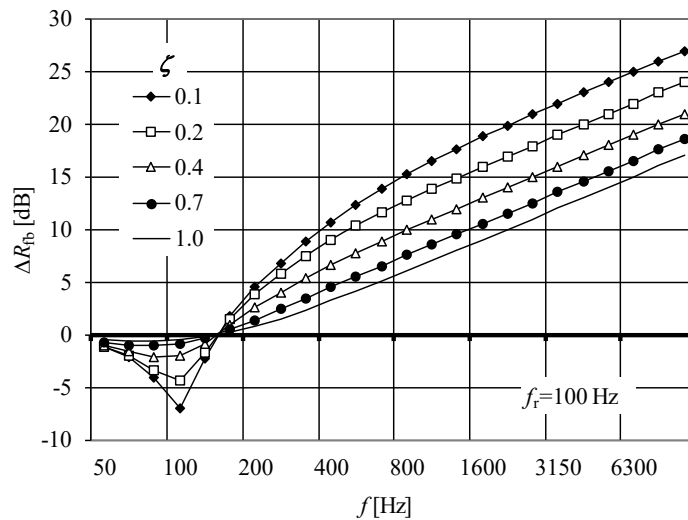
$$(5.12.17) \quad \Delta R_{fb} = -5 \log_{10} \left(\frac{1 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_r} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 \right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_r} \right)^2} \right)$$

missä f_r [Hz] on levyn 1, joustavan kytkennän ja levyn 2 muodostama resonanssitaajuus ja ζ on vaimennussuhde (vakio), jonka arvo on mittausten perusteella yleensä noin 0.30. Kuvassa 5.12.2 on esitetty yhtälön taajuusriippuvuutta eri vaimennussuhteen arvoilla.

Taajuus f_r pitää määrittää erikseen jousien dynaamisen jäykkyyden, jousien määrän ja levyjen massojen perusteella. Se kannattaa mitoittaa niin, ettei se ole sama kuin f_{mam} . Joustavien rankojen tapauksessa f_r saadaan yhtälöstä

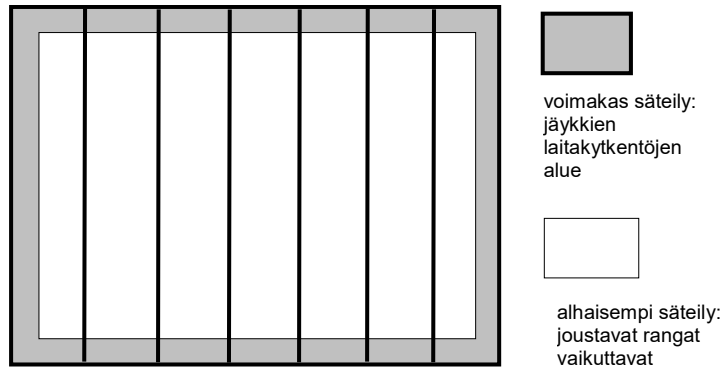
$$(5.12.18) \quad f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K' (m'_1 + m'_2)}{m'_1 m'_2}}$$

missä m'_1 ja m'_2 ovat levypuoliskojen pintamassat [kg/m²], K' [N/m²] on rangan dynaaminen jäykkyys yksikköpituutta kohti ja b [m] on rankajako tarkasteltavassa kaksinkertaisessa levyrakenteessa.



Kuva 5.12.2 Joustavan rangan tuottama lisäeristys ΔR_{fb} kaksinkertaisen levyrakenteen kytkennän kautta muodostuvaan ilmaaneneristävyteen vaimennussuhteen ζ eri arvoilla, kun resonanssitaajuus f_r on vakio.

Laboratoriotutkimuksissa on havaittu, että joustavilla rangoilla varustetussa levyrakenteessa ei saavuteta teoreettista arvoa ΔR_{fb} vaan se rajoittuu tapauksesta riippuen 10–20 dB:iin (Virjonen, 2009). Syyksi on arveltu sitä, että joustavilla rangoilla käytetään ylä- ja alareunassa asennuskiskoja, jotka ovat jäykempiä kuin rakenteen keskellä olevat joustavat rangat. Lisäksi kiskot ovat yleensä jäykästi kiinni lattiassa ja katossa. Myös laitimaiset joustavat rangat kiinnitetään pystyrakenteisiin kiinni, mikä jäykistää niitä. Jäykkyyttä lisää alareunassa erikseen se, jos levyt koskettavat lattiaa eivätkä ole elastisesti kiskoja ja rankojen varassa. Näin muodostuneen jäykän laitakytkennän vuoksi ääntä säteilee muutaman kymmenen sentin leveydeltä laidoiltaan vastaavasti, kuin jos laitoja kiertyisi jäykkä ranka (kuva 5.12.3). Joustavat kiskorakenteet ratkaisisivat ongelman.



Kuva 5.12.3 Joustavilla rangoilla toteutetun kaksinkertaisen levyrakenneseinän ilmasteneristävyyden heikkenee, jos laidoilla on jäykkiä kytkentöjä.

5.13 Sandwich-rakenne

Sandwich-rakenteella (kuva 5.13.1) tarkoitetaan kaksinkertaista levyrakennetta, jossa pintalevyt ovat kytkennässä toisiinsa joustavan ja kevyen ydinaineen välityksellä koko pinta-alaltaan. Sandwich -rakenteet ovat ilmasteneristävyydeltään merkittävästi heikompia kuin vastaavan painoinen levyrakenneseinä, jossa on jäykät rangat. Joillakin ratkaisuilla tai taajuuksilla sandwichrakenteen ilmasteneristävyys on jopa heikompaa kuin saman massaisen yksinkertaisen levyn. Sandwich -rakenteet ovat massaansa nähden erittäin jätkeä ja niihin törmätään rakentamisessa enenevässä määrin etenkin kun mineraalivillaeristeitä korvataan kovilla eristeillä, joiden jäykkyys on suurempi kuin villojen. Sandwich-rakenne toimii kuten massa-jousi-massa systeemi, joka resonoi tietyllä taajuudella voimakkaasti. Sandwich -rakenteita ovat esimerkiksi

- seinä- ja kattoelementit, joissa mineraalivillalamellit on liimattu kahden peltilevyn väliin
- EPS-täytteiset lämpöeristeovet tai
- palo-ovet, joissa pinnalla olevat peltilevyt on liimattu ydinaineena olevaan kivivillakerrokseen.
- "hunajakennotäytteiset" ovet
- kaksinkertainen rakenne, jossa kaviteettiin sullottu villa kytkee levypuoliskot mekaanisesti toisiinsa,
- kelluvat lattiat

Keveyden sandwich-rakenteen ilmasteneristävyydenkäyttämisenä on esimerkkejä kuvassa 5.13.2. Kummassakaan esimerkissä ilmasteneristävyys ei juurikaan parane, kun rakennetta paksunnetaan ydinainetta paksuntamalla, toisin kuin kaksinkertaisen levyrakenteen tapauksessa tapahtuisi. Sandwich-rakenteen dilataatioresonanssi lasketaan yhtälöstä

$$(5.13.1) \quad f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \frac{m'_1 + m'_2}{m'_1 m'_2}}$$

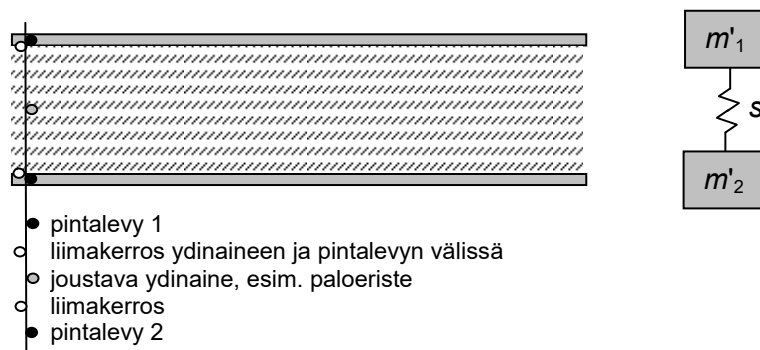
missä s' [N/m³] on ydinaineen dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohti ja m'_1 ja m'_2 [kg/m²] ovat levypuoliskojen pintamassat. Lattianalusvilloilla s' on usein luokkaa 10–30 MN/m³. Kovemmilla eristeillä arvot voivat olla yli 1000 MN/m³. Resonanssitaajuus kasvaa, kun ydinaineen paksuus pienenee, koska jousi jäykistyy.

Ydinaineen dynaamisesta jäykkyydestä riippuen ilmasteneristävyys voi vaihdella erittäin paljon. Kuvan 5.13.1 esimerkeissä levyjen pintamassat eivät poikkea paljon toisistaan mutta tulokset ovat oleellisesti parempia suurilla taajuuksilla, jos ydinaine on löysempi. Tähän on syynä se, että ilmasteneristävyys alkaa kasvaa vasta resonanssitaajuuden yläpuolella.

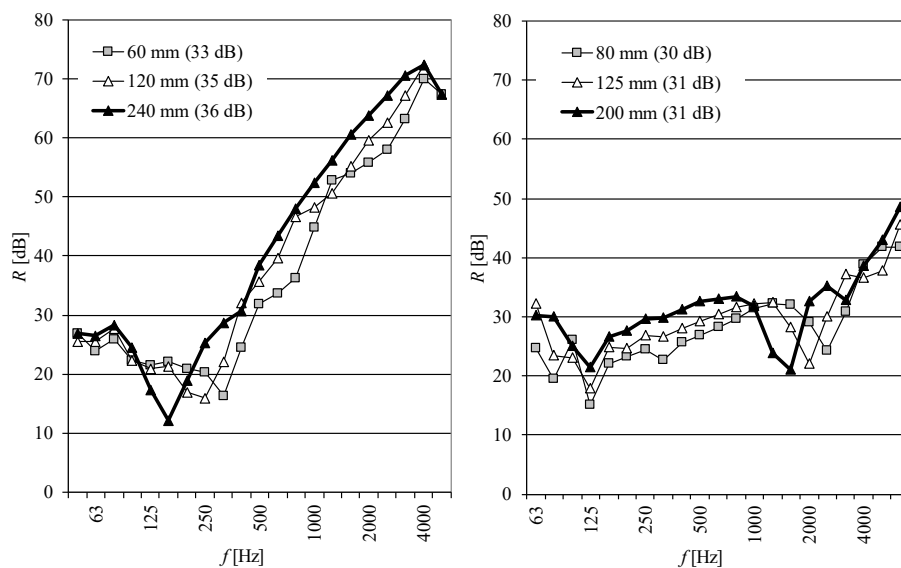
Villamateriaalin kuitujen suunta vaikuttaa sandwich -rakenteen ilmasteneristävyyteen. Tämä johtuu siitä, että villan dynaaminen jäykkyys on huomattavasti suurempi kuitujen suunnassa (ns. poikkivilla) kuin kohtisuorassa niitä vasten (ns. limivilla). Jätkemässä tapauksessa resonanssitaajuus on korkeammalla taajuudella. Kuvassa 5.13.3 on vertailutulos, kun on käytetty muuten samaa rakennetta ja valmistustapaa mutta ydinaineena käytetyn villan kuitujen suuntaa on vaihdettu.

Sandwich -rakenteen ilmasteneristävyyttä ei voida parantaa ilman merkittävää massan kasvutusta tai

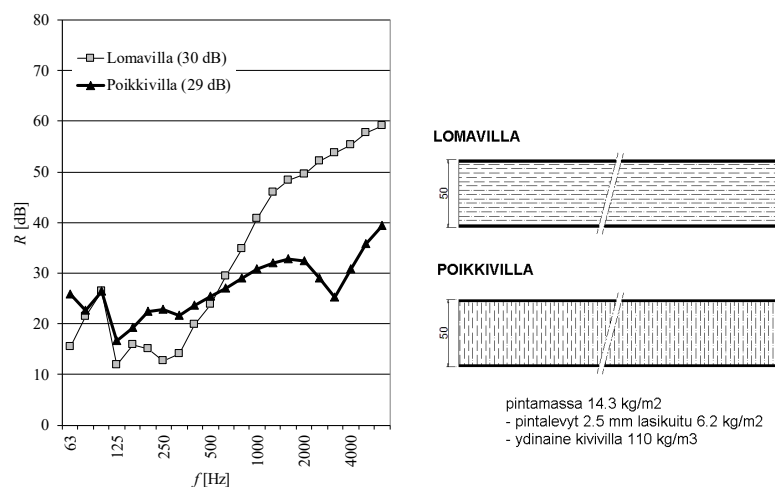
ydinaineen vaihtoa. Ilmaääneneristävyyttä parannetaan usein rakenteen päälle lisätyllä levyrakenneverhouksella.



Kuva 5.13.1 Sandwich-rakenteessa pintalevyt ovat voimakkaasti kiinni ydinaineessa, jolloin koko sandwich -rakente värähtelee kuten yhtenäinen levy.



Kuva 5.13.2 Sandwich-rakenteen ilmaääneneristävyyden riippuvuus ydinmateriaalin paksuudesta. Vasemmalla pintalevynä oli 1 mm teräs ja ydinaineena mineraalivilla (100 kg/m³). Sulkeissa on R_w-arvo. Oikealla pintalevynä on 0.6 mm teräs ja ydinaineena mineraalivilla (125 kg/m³). Vasemmalla villan dynaaminen jäykkyys oli pienempi kuin oikealla.

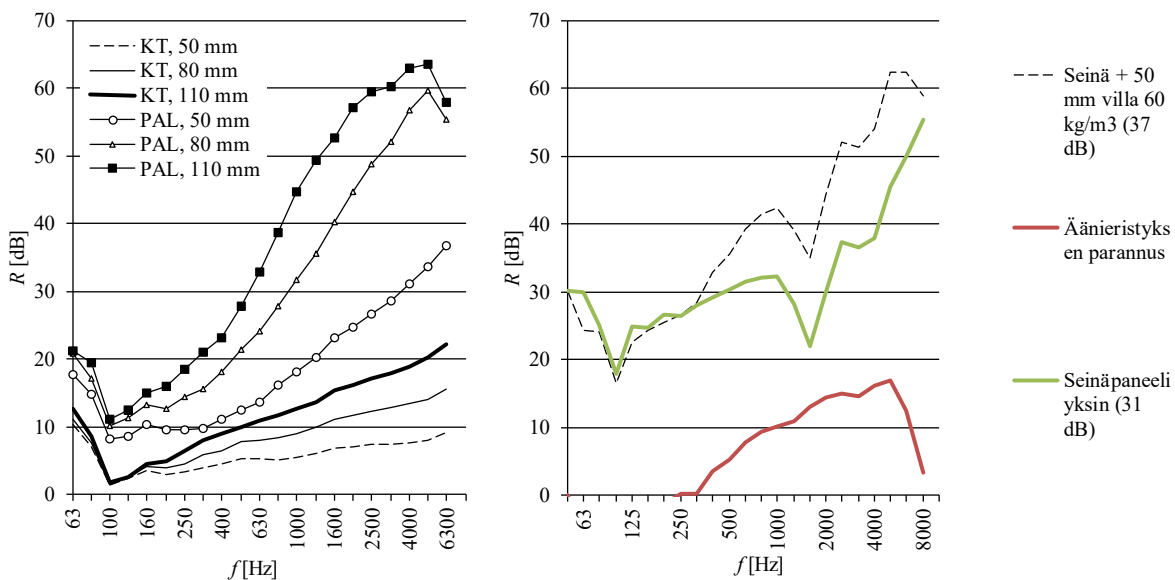


Kuva 5.13.3 Mineraalivillan kuidun suunnan vaihtamisen vaikutus ilmaääneneristävyyteen sandwich-rakenteessa. Kun villan kuidut olivat kohtisuorassa levyä vastaan (poikkivilla), villan dynaaminen jäykkyys oli 90-kertainen verrattuna lomavillaan.

5.14 Pinnoitus huokoisella levyllä

Kuvassa 5.14.1a on esitetty huokoisen levyn ilmasteneristävyyden riippuvuus paksuudesta ja virtausvastuksesta. Mineraalivillan ilmasteneristävyys paranee, kun virtausresistanssi ja tiheys kasvavat. Tiheys vaikuttaa pienten ja virtausresistanssi suurten taajuuksien ilmasteneristävyyteen. Huokoisen levyn ilmasteneristävyys kasvaa suurilla taajuuksilla lähes lineaarisesti paksuuden kasvaessa. Kun huokoisen levyn paksuus kaksinkertaistuu, ilmasteneristävyys lähes kaksinkertaistuu. Tiiviillä rakennuslevyillä massalain mukaan ilmasteneristävyys kasvaa korkeintaan 6 dB massan (paksuuden) kaksinkertaistuessa. Huokoisen levyn ilmasteneristävyys suurilla taajuuksilla perustuu kitkaan huokosissa eikä koko levyn taivutusvärtelyyn. Siksi absorptioilmasteneristävyys riippuu äänen kulkemasta matkasta huokoisen levyn sisällä ja siten huokoisen levyn paksuudesta.

Kuvassa 5.14.1b on esitetty absorboivan pinnoituksen vaikutus seinärakenteen ilmasteneristävyyteen. Absorboivan levyn toimintaperiaate on erilainen levyrakenteen kaviteetissa kuin rakenteen näkyvällä pinnalla. Pinnalla sijaitessaan absorptiolevy parantaa ilmasteneristävyyttä sanan varsinaisessa merkityksessä. Sen sijaan kaviteetissa huokoinen levy eliminoi kaiuntaa. Huokoinen kerros siis estää epäsuotuisan äänitason kasvun kaviteetissa. Levy ei siis "paranna ilmasteneristävyyttä" vaan estää ilmasteneristävyyden heikkenemisen kaiunnan takia.



Kuva 5.14.1 (a) Lasivillan ilmasteneristävyys paksuuden ja tiheyden funktiona. PAL: $\rho=117 \text{ kg/m}^3$, $r=90\,000 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$. KT: $\rho=19 \text{ kg/m}^3$ ja $r=8\,000 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$. (Hongisto et al., 2002) (b) 50 mm paksun mineraalivillalevytyksen vaikutus seinäpaneelin ilmasteneristävyyteen. Sulkeissa on esitetty R_w -arvot. Absorptiopinnoitus paransi ilmasteneristystä lähinnä 200 Hz:n yläpuolella. Vastaava parannus on havaittu myös massiiviseinän päälle asennetulla absorptiolevypinnoituksella. (RIL 243-1-2007)

KIRJALLISUUS

Boden, H., Carlsson, U., Glav, R., Wallin, H.P., Åbom, M. (1999). Ljud och Vibrationer. Kungliga Tekniska Högskolan KTH, Marcus Wallenberg Laboratoriet för Ljud- och Vibrationsforskning, Stockholm, Sweden. (På svenska).

Craik RMJ, Sound transmission through buildings using statistical energy analysis, Gower Publishing Ltd, Hampshire, England, 1996.

Cremer L, Heckl M (transl. Ungar EE), Structure-borne sound, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1988.

Fahy FJ, Sound and Structural Vibration. Radiation, Transmission and Response, Academic Press Limited, London, England 1985.

Fahy FJ, Foundations of Engineering Acoustics, Academic Press, London, UK, 2000

Hongisto V, Helenius R, Lindgren M, Kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristävyys - laboratoriotutkimus,

Työympäristötutkimuksen raporttisarja 1, Työterveyslaitos, Helsinki, 2002.*

Hongisto, V., Lindgren, M., Helenius, R. (2002). Sound insulation of double walls - an experimental parametric study, *Acta Acustica united with Acustica* 88 904–923.

Hongisto V, Monikerroksisen seinärakenteen ääneneristävyyden laskentamalli, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2, Työterveyslaitos, 2003.

Hongisto V, Sound insulation of double panels – Comparison of existing prediction models, *Acta Acustica united with Acustica* 92(1) 2006 61-78.

Hongisto, V., Helenius, R., Lindgren, M. (2002). Kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristävyys - laboratoriotutkimus, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 1, Työterveyslaitos, Helsinki.

Hongisto, V., Keränen, J., Kylliäinen, M., Mahn, J. (2012). Reproducibility of the present and proposed single-number quantities of airborne sound insulation, *Acta Acustica united with Acustica* 98 811–819.

Hongisto, V., Oliva, D., Keränen, J. (2014). Subjective and objective rating of airborne sound insulation – living sounds, *Acta Acustica united with Acustica* 100 848–863.

Hongisto, V., Saarinen, P., Alakoivu R., Hakala J. (2022). Acoustic properties of commercially available thermal insulators – An experimental study. *Journal of Building Engineering* 54 104588. Online at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104588>.

ISO 15186-3:2002 Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity —Part 3: Laboratory measurements at low frequencies.

Keränen, J., Hongisto, V., Hakala, J. (2019). The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz. *Building and Environment* 156 12–20.

Larm P, Hakala J, Hongisto V, Sound insulation of Finnish building boards, Work Environment Research Report Series 22, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland, 2006.

Meier A, Schmitz A, Application of total loss factor measurements for the determination of sound insulation, *Building Acoustics* 6(2) 1999 71-84.

RIL 243-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu. Perusteet. Rakennusinsinöörien liitto R.I.L. r.y., Helsinki, 2007.

Rindel, J. H. (2018). Sound insulation in buildings. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ration, Florida, USA.

Sharp, B. H. (1973). A study of techniques to increase the sound insulation of building elements, US Department of Housing and Urban Development, NTIS PB 222 829/4, USA.

Sharp, B. H. (1978). Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Con. Eng. J.* 11(2) 53-63.

Siikanen U, Rakennusaineoppi, Rakennustieto Oy, Helsinki, 2001.

Troclet, B. (2000). Analysis of vibroacoustic response of launchers in the low and high frequency range. *Proceedings of Novem 2000*.

Ympäristöministeriö (2017). Ympäristöministeriön asetus 796-2017 rakennuksen ääniympäristöstä, 24.11.2017, Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>.

Ympäristöministeriö (2018). Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 28.6.2018, Helsinki. <https://www.ym.fi/download/noname/%7B2852D34E-DA43-4DCA-9CEE-47DBB9EFCB08%7D/138568>.

6 Askelääneneristävyys

6.1 Askeläänepainetaso

Askelääneneristykseen tarkoituksena on vähentää lattiaan sen yläpuolelta kohdistuvien iskujen aiheuttaman runkoäänen tasoa saman rakennuksen muissa huoneissa. Tässä luvussa keskitytään alapuoleiseen huoneeseen, jossa ääni yleensä on voimakkainta. Lisäksi tässä luvussa pysytellään laboratorio-olosuhteissa, eikä sivutiesiirtymiä tarkastella.

Asumisen iskuääniä ovat lattialla kävely, juoksu, leikkiminen tai muu liikunta, esineiden putoilu lattialle, huonekalujen siirtely, imurointi ja muut vastaavat äänet. Iskun myötä rakenne alkaa värähdellä. Värähtelystä osa muuttuu säteilyn kautta ilmaääneksi.

Iskuäänilähteen sisältävään huoneeseen kuuluvaa ääntä kutsutaan rumpuääneksi. Rumpuääntä syntyy eniten parketeilla ja laminaateilla (Johansson & Nilsson, 2005). Sitä ei tässä luvussa käsitellä.

Askelääneneristävyys määritetään kalibroitua äänilähdettä, askeläänikojetta (kuva 6.1.1) käyttäen. Herätteen lähtöteho on vakio eikä sitä tarvitse erikseen mitata. Askeläänikojen tuottama äänenpainetaso naapurihuoneessa on mielenkiinnon kohteena. Rakenteen askelääneneristyskyky on siten sitä parempi, mitä alhaisempia askeläänikojen aiheuttamat äänenpainetasot ovat.

Standardin ISO 10140-5 mukaisessa askeläänikojessa on viisi 0.5 kg painavaa vasaraa, jotka putoavat 40 mm korkeudelta lattialle nopeudella 0.886 m/s kahdesti sekunnissa tasaisin väliajoin, jota merkitään $T_i = 0.1$ s. Lattiaan kohdistuu 10 iskua sekunnissa. Tämä aiheuttaa voimaspektrin, jossa esiintyy maksimi taajuudella $f_i = 1/T_i = 10$ Hz ja sen kokonaislukukerrannaisilla. Askeläänikojen ei saa painaa yli 25 kg, jotta kuormitusvaikutukset olisivat eri koneilla samaa luokkaa.

Tosiasiassa askeläänikojen aiheuttaa erilaisen herätteen koville pinnoille kuin joustaville päällysteille. Lisäksi heräte riippuu myös kuormituksesta askeläänikojen kohdalla.



Kuva 6.1.1 Esimerkit kaupallisista iskuäänilähteistä: askeläänikojen, kumipallon ja paukauskoneen. Kuvat eivät ole keskenään samassa mittakaavassa.

Askeläänikojen aiheuttama normalisoitu askeläänepainetaso L_n (*normalized impact sound pressure level*) määritetään laboratorio-olosuhteissa (ISO 10140-3) yhtälöllä

$$(6.1.1) \quad L_n = L_2 + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_2}{A_0} \right)$$

missä L_2 [dB re 20 μ Pa] on äänenpainetaso vastaanottohuoneessa, A_2 [m^2] on vastaanottohuoneen absorptioala ja $A_0 = 10 m^2$ on referenssiabsorptioala. Mittaus tehdään kolmannesoktaaveittain taajuuksilla 50–5000 Hz tai 100–3150 Hz. Esimerkkejä mittaustuloksista esitetään useissa tämän luvun kuvissa. Kentällä mitattu normalisoitu askeläänepainetaso on L'_n .

Askeläänepainetaso on absoluuttiseen tasoon perustuva suure, kun taas ilmaääneneristävyys on tehovaimennukseen perustuva suure. Mitä pienempi L_n on, sitä parempi on askelääneneristävyys.

Laboratorioympäristössä sivutiesiirtymät on minimoitu, jolloin askeläänikojen ääntä ei kulkeudu merkittävästi muita rakenteellisia reittejä pitkin vastaanottohuoneeseen. Rakennuksessa välipohjan

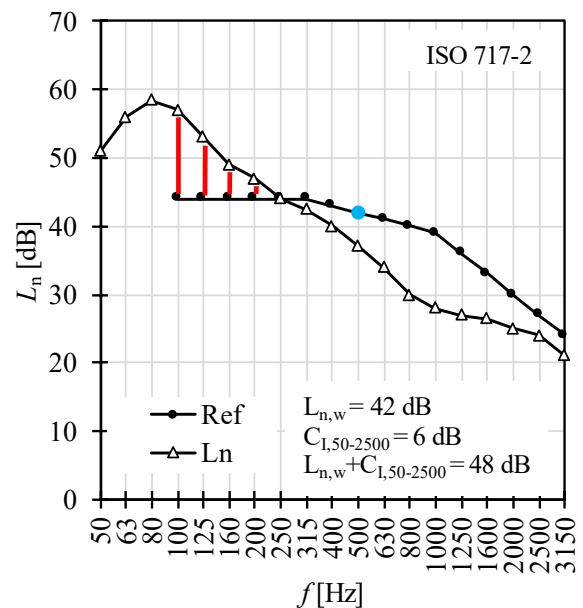
askelääneneristävyys määritetään 1.1.2018 alkaen näennäisen standardisoidun askeläänepainetason $L'_{n,T}$ avulla:

$$(6.1.2) \quad L'_{n,T} = L_2 - 10 \log_{10} \left(\frac{T_2}{T_0} \right)$$

missä T_2 [s] on vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika ja $T_0=0.5$ s on ns. referenssijälkikaiunta-aika. Puoli sekuntia on tyypillinen asuinhuoneen jälkikaiunta-aika tilavuudesta riippumatta (Kylliäinen et al., 2016). Absorptioala kasvaa huonetilavuuden kasvaessa ja yhtälön 6.1.1 korjaustermi riippuu sen vuoksi näennäisesti huonetilavuudesta. $L'_{n,T}$ vastaa siksi paremmin rakennuksen huoneessa havaittavaa askeläänepainetasoa kuin L'_n , jota käytettiin 31.12.2017 asti rakentamismääräyksissä askeläänepainetason kenttämittauksissa.

6.2 Askeläänitasoluku ja spektripainotusermi

f	L_n [dB]	Ref [dB]	Ref [dB]	Dev [dB]	$10^{L_n/10}$
50	51.0				125893
63	56.0				398107
80	58.5				707946
100	57.0	$L_{n,w}+2$	44	13.0	501187
125	53.0	$L_{n,w}+2$	44	9.0	199526
160	49.0	$L_{n,w}+2$	44	5.0	79433
200	47.0	$L_{n,w}+2$	44	3.0	50119
250	44.0	$L_{n,w}+2$	44	0.0	25119
315	42.5	$L_{n,w}+2$	44	0.0	17783
400	40.0	$L_{n,w}+1$	43	0.0	10000
500	37.0	$L_{n,w}$	42	0.0	5012
630	34.0	$L_{n,w}-1$	41	0.0	2512
800	30.0	$L_{n,w}-2$	40	0.0	1000
1000	28.0	$L_{n,w}-3$	39	0.0	631
1250	27.0	$L_{n,w}-6$	36	0.0	501
1600	26.5	$L_{n,w}-9$	33	0.0	447
2000	25.0	$L_{n,w}-12$	30	0.0	316
2500	24.0	$L_{n,w}-15$	27	0.0	251
3150	21.0	$L_{n,w}-18$	24	0.0	



Ei-toivottujen poikkeamien summa:

3.0 dB

(Korkein sallittu 32.0 dB).

L_n : Normalisoitu askeläänepainetaso (mittaustulos)

Ref: Vertailukäyrä asennossa 42 dB (500 Hz on ankkuritaajuus)

Dev: Ei-toivottu poikkeama: $\text{Max}(0; L_n - \text{Ref})$

$$S = \sum [10^{L_{n,i}/10}] = 2125782$$

$$L_{n,\text{sum}} = 10 * \log_{10}(S) = 63.3$$

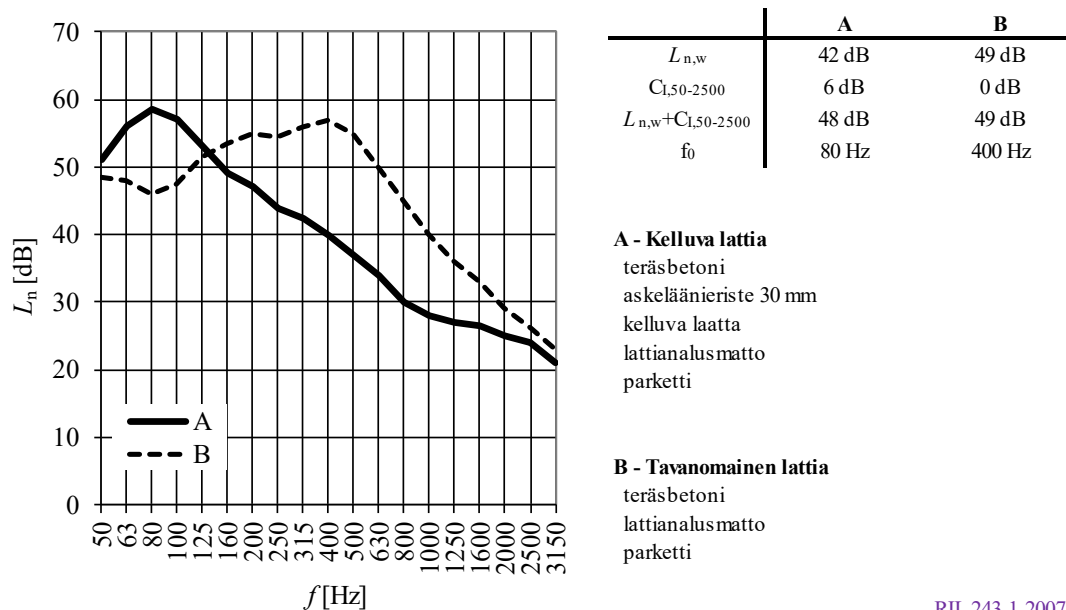
$$C_{1,50-2500} = L_{n,\text{sum}} - 15 - L_{n,w} = 6.3$$

Kuva 6.2.1 Askeläänitasoluku $L_{n,w}$ määritetään mitatuista L_n -arvoista vertailukäyrämenetelyllä. Vertailukäyrän muoto Ref on aina sama mutta sen sijainti y-suunnassa riippuu siitä, mikä lähtöarvo annetaan ankkuritaajuudelle, joka on 500 Hz. Ankkuritaajuudelle annetaan mahdollisimman pieni arvo siten, että ei-toivottujen poikkeamien summa on korkeintaan 32.0 dB. Ei-toivottu poikkeama tapahtuu, kun vertailukäyrän arvo on mittaustuloksen alapuolella. Arvauksella 42 dB vertailukäyrä sijoittuu asemaan Ref42. Ei-toivotut poikkeamat tapahtuvat tässä esimerkissä taajuuksilla 100–200 Hz. Koska niiden summa on alle 32.0 dB, on $L_{n,w}$ sama kuin vertailukäyrän arvo ankkuritaajuudella.

Liiketoiminnassa ja määräyksissä askeläänepainetaso kuvataan yksilukuureiden arvoilla (*single-number quantity, single-number value*). Niiden määritelmät esitetään ISO 717-2 standardissa. Tärkein niistä on normalisoitu askeläänitasoluku $L_{n,w}$. Se määritetään ns. vertailukäyrämenetelmällä kuvan 6.2.1 mukaisesti. Standardi esittää myös kaksi spektripainotusermiä: C_1 ja $C_{1,50-2500}$. Vaikka spektripainotusermit ovat ISO 717-2 mukaan vapaa-ehtoisia, yksilukuarvoa $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ käytetään useissa maissa sitovasti, koska iskuäänet sisältävät usein kuultavia pientaajuisia komponentteja alle 100 Hz:n taajuuksilla. Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$ lasketaan yhtälöstä

$$(6.2.1) \quad C_{1,50-2500} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=50}^{2500} 10^{L_{n,i}/10} \right) - 15 - L_{n,w}$$

Kuvassa 6.2.2 demonstroidaan spektripainotustermin käytöstä kahdella erityyppisellä rakenteella. Jos lattian resonanssi (askeläänepainetason huippukohta) on taajuuden 100 Hz alapuolella ja L_n -arvot ovat resonanssitaajuudella muita taajuuksia suuremmat, spektripainotustermin arvo kasvaa, koska $L_{n,w}$ ei ota tätä taajuuskaistaa huomioon. Jos resonanssi on puolestaan taajuudella 125 Hz tai tämän yläpuolella ja L_n -arvot ovat resonanssitaajuudella muita taajuuksia suuremmat, esiintyvät ei-toivotut poikkeamat tällä taajuudella ja ne heijastuvat myös mittaluvun $L_{n,w}$ arvoon. Tällöin spektripainotustermin arvo jää lähelle nolaa, eikä ”tuplasanktiota” resonanssista muodostu.



RIL 243-1-2007

Kuva 6.2.2 Spektripainotustermin $C_{1,50-2500}$ käytös kahdella erityyppisellä välipohjalla.

6.3 Massiivisen raakavälipohjan askelääneneristävyys

Massiivisella raakavälipohjalla tarkoitetaan yksinkertaista levyrakennetta, jonka pintamassa on suuri ja koinsidenssin rajataajuus on pieni. Normalisoitu askeläänepainetaso voidaan kuvata levyyn kohdistuvan pisteherätteen aiheuttaman äänensäteilyn avulla. Jos käytetään standardisoitua askeläänikojetta, normalisoitu askeläänepainetaso kolmannesosaaktaavikaistoittain voidaan arvioida yhtälöstä (Rindel, 2018)

$$(6.3.1) \quad L_n \cong 82 - 10 \cdot \log_{10} \left(m'^2 \frac{\eta}{f_c} \right), \quad f_c < f < \frac{1}{2} f_s$$

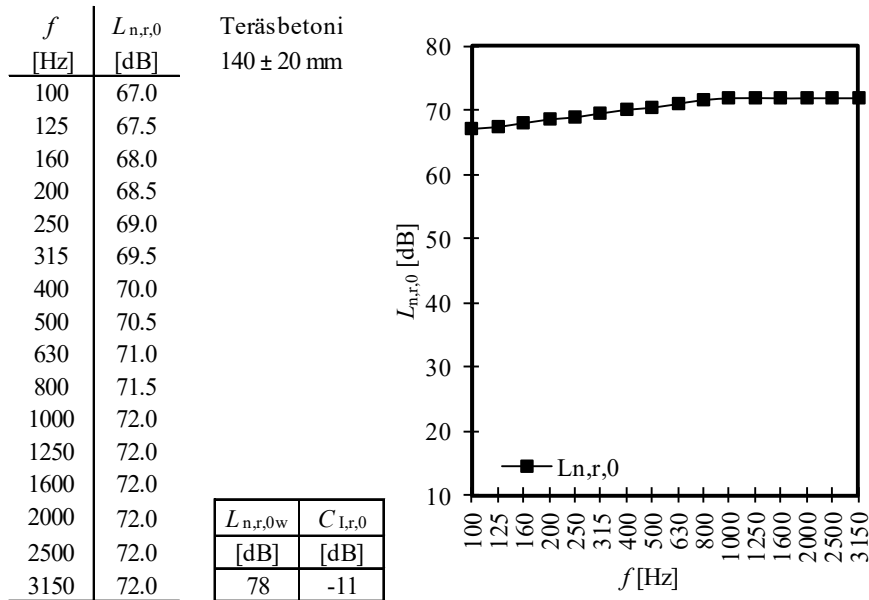
missä η [kg/m²] on kokonaishäviökerroin, m' on pintamassa ja f_c [Hz] on koinsidenssin rajataajuus ja f_s [Hz] on taivutus- ja leikkausaallon rajataajuus. Nämä on määritelty luvussa 5. Koska häviökerroin on taajuusriippuva, riippuu myös L_n taajuudesta. Kriittisen taajuuden yläpuolella levyn paksuuden tuplaus merkitsee 9 dB:n askeläänepainetason laskua.

Taajuuden $\frac{1}{2}f_s$ yläpuolella värähtely aiheutuu pääasiassa leikkausaalloista. Likiarvoyhtälö kolmannesosaaktaavikaistan askeläänepainetasolle on

$$(6.3.2) \quad L_n \cong 82 - 10 \cdot \log_{10} \left(m'^2 \frac{\eta}{f_c} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2f}{f_s} \right), \quad f > \frac{1}{2} f_s$$

Leikkausaaltojen taajuusalueella ($f > f_s$) levyn paksuuden tuplaus merkitsee 12 dB:n askeläänepainetason laskua.

Kuvassa 6.3.1 on esitetty päällystämättömän referenssilattian askeläänepainetaso.



Kuva 6.3.1 Standardinmukaiselta referenssilattialta odotettu askeläänenpainetaso ISO 10140-5 (2010) mukaan.

6.4 Lattiapäällysteen askeläänenpainetason parannusluku

Massiivisen raakavälipohjan askeläänenpainetaso on korkea, koska säteilykerroin on koinsidenssin rajataajuuden yläpuolella yksi (ks. **luku 5**). Paksuuden kasvatus ei ole kustannustehokas keino pienentää L_n -arvoa. Tehokkaampi keino on lattian päälle asennettava joustava päällyste, jolla heikennetään askeläänikojeen vasaran lattiaan aiheuttamaa voimaa. Pehmeitä lattianpäällysteitä ovat mm. vinyyli-, korkki- ja tekstiilimatot.

Vasaran massa, joustavan päällysteen kimmoisuus sekä allaoleva lattia muodostavat massa-jousi-massa -systemin, jonka resonanssitaajuus f_0 [Hz] saadaan yhtälöstä

$$(6.4.1) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_h E_t}{m_h h_t}}$$

missä m_h [kg] on vasaran massa, S_h [m²] on vasaran pinta-ala, E_t [Pa, N/m²] on päällysteen kimmomoduli ja h_t [m] on pinnon paksuus. Standardisoidulle askeläänikojeelle $m_h = 0.500$ kg ja $S_h = 700$ mm². Päällystetyn lattian askeläänenpainetaso alkaa pienentyä resonanssitaajuuden yläpuolella.

Lattiapäällysteen aiheuttama askeläänitason parannus ΔL (kuva **6.4.1**) on

$$(6.4.2) \quad \Delta L = L_{n,0} - L_n$$

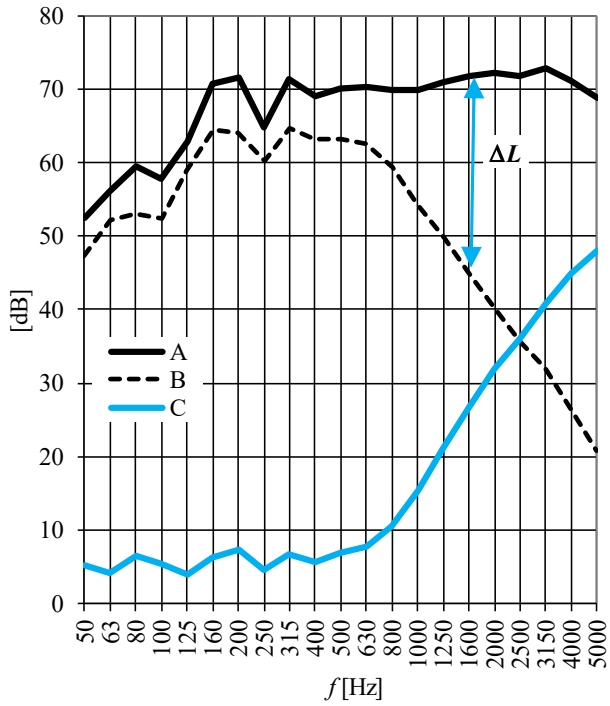
missä $L_{n,0}$ [dB] ja L_n [dB] ovat askeläänenpainetasot ilman päällystettä ja sen kanssa. Standardinmukaisissa mittauksissa käytetään ns. standardivälipohjaa, joka on 140±20 mm paksua teräsbetonia (koko 10–12 m²). Lattianpäällysteen tuottama askeläänenpainetason parannusluku ΔL_w [dB] määritellään em. mittaustulosten mukaisten askeläänitasolukujen erotuksesta

$$(6.4.3) \quad \Delta L_w = L_{n,0,w} - L_{n,w}$$

Parannuslukua ei ole määritelty spektripainotustermin sisältäville yksilukuarvoille, vaikka kuvassa **6.4.1** on esitetty tästä esimerkki.

Lattianpäällysteiden valmistajat ilmoittavat tuotearvoina askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w . Arvo voidaan tällöin vähentää minkä tahansa paksuisen teräsbetonisen raakavälipohjan $L_{n,0,w}$ -arvosta, jos luotettava arvo on tiedossa. Puuvälipohjille ei tule soveltaa betonisella standardivälipohjalla mitattuja ΔL - tai ΔL_w -arvoja.

Kevyen lattianpäällysteen ΔL_w voidaan määrittää myös 1 m² kokoiselle näytteelle ISO 16251-1 mukaan (Keränen et al., 2013).



Merkintä	Suure	Selitys
A	$L_{n,r,0}$	Päällystämättömän raakaväli­pohja
B	L_n	Päällystetty raakaväli­pohja
C	ΔL	Päällysteen aiheuttama askeläänenpainetason parannus

Raakaväli­pohja: 160 mm teräs­betonilaatta
 Päällyste: 30 mm tasoite ja 3 mm vinyylimatto

Päällystämättömän raakaväli­pohja

$L_{n,w}$	$C_{i,50-2500}$
[dB]	[dB]
78	-11

Päällystetty raakaväli­pohja

$L_{n,w}$	$C_{i,50-2500}$
[dB]	[dB]
58	0

Päällysteelle saatu tulos

ΔL_w	$C_{i,\Delta}$
[dB]	[dB]
20	-11

Kuva 6.4.1 Erään lattiapäällysteen askeläänenparannusluvun testaustulos.

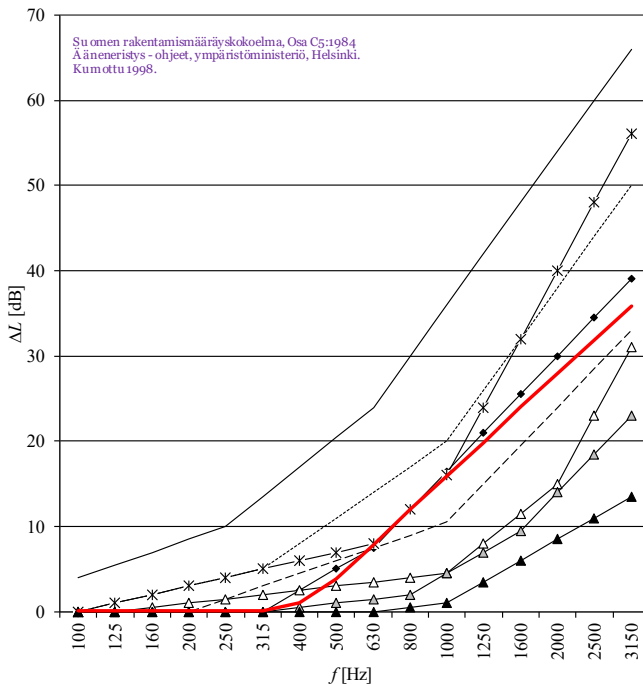
Joustavan päällysteen tuottama parannus kolmannesoktaavikaistoittain voidaan laskea yhtälöstä

$$(6.4.4) \quad \Delta L \cong 40 \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad f > f_0$$

Resonanssitaajuuden alapuolella parannusta ei ole:

$$(6.4.5) \quad \Delta L = 0$$

Kuvassa 6.4.2 on esimerkkejä joidenkin lattiapäällysteiden askeläänitasoluvun parannuksista.

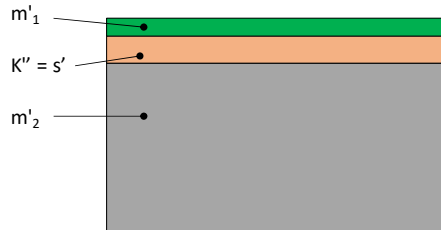


- Vaah­tu­muo­vialustainen neulehuopamatto
- PVC-päällyste, alustana joustava polyesterihuopa 600 g/m2
- PVC-päällyste, alustana joustava pe-huopa 300 g/m2
- ◆ Parketti, alustana aaltopahvi, korkkirahuopa tms.
- ✱ Neulehuopamatto 4-5 mm ilman erityis­alustaa
- △ Korkkilaatta 3 m, alustana kova PVC-kalvo
- △ Kulunut ja vanha huopa-alustainen PVC-päällyste
- ▲ Parketti ilman alustaa, Linoleumi ilman aluskorkkia
- Laskennallinen arvio, kun $f_0=400$ Hz

Kuva 6.4.2 Joidenkin joustavien lattiapäällysteiden tuottamia askeläänenpainetason parannuksia ΔL .

6.5 Kelluva lattiarakenne

Kelluva lattiarakenne koostuu kantavasta laatasta, joustavasta kerroksesta sekä kelluvasta levystä (kuva 6.5.1). Joustava kerros on elastinen mutta levymäinen kerros. Tyypillisiä esimerkkejä ovat mineraalivillainen askeläänieriste, lattialämmityksen vesiputkiurat sisältävä uretaanieriste tai parketinalushuopa. Myös asennuslattia voi olla joustava mutta sitä ei käsitellä tässä. Kelluva levy voi olla paikallaan valettava kiviaineskerros tai rakennuslevy(jä). Kelluvan levyn päälle asennetaan tarvittaessa lattiapäällyste, kuten vinyyli tai parketinalushuopa tai parketti. Kantavan laatan päälle asennettu parketinalushuopa ja parketti (tai laminaatti) katsotaan myös kelluvaksi rakenteeksi mutta sen resonanssitaajuus on korkea, 400–600 Hz, kun massiivisemmilla kelluvilla lattiarakenteilla se on alle 200 Hz.



Kuva 6.5.1 Kelluva lattia käsittää kantavan laatan ($m'2$), joustavan kerroksen (s') ja kelluvan levyn ($m'1$).

Joustava kerros on elastista materiaalia. Sitä karakterisoi mm. elastisuusmoduli K' [N/m^2], joka kertoo jäykkyyden yksikköalaa ja yksikköpaksuutta kohti:

$$(6.5.1) \quad K' = \rho_m c_m^2$$

missä ρ_m [kg/m^3] on joustavan kerroksen tiheys ja c_m [m/s] on äänen nopeus joustavassa kerroksessa. Joustavan kerroksen dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohti K'' [N/m^3] saadaan yhtälöllä

$$(6.5.2) \quad K'' = \frac{K'}{d}$$

missä d [m] on joustavan kerroksen paksuus. Taulukossa 6.5.1 on esitetty joitakin esimerkkejä materiaalien elastisuusmodulin arvoista. Siitä voi myös laskea äänen pitkittäisaallon (puristusaallon) nopeuden eri aineissa. Mittausten mukaan mineraalivilloille on yleensä $c_m=20\text{--}50$ m/s.

Taulukko 6.5.1 Elastisuusmodulin K' arvoja. Materiaalin paksuutta ei ole huomioitu.

Materiaali	MN/m^2
Ilma (ρc^2) huoneenlämmössä	0.14
Mineraalivilla $50\text{--}160$ kg/m^3	0.02 - 0.40
Polystyreenivahto $10\text{--}20$ kg/m^3	0.3 - 3
Korkki	10-30

Jos joustavan kerroksen materiaalissa on ilmahuokosia, sisältää K'' sekä materiaalin, K''_m , että joustavan kerroksen sisältämän ilmajousen, K''_0 , aikaansaaman joustavuuden:

$$(6.5.3) \quad K'' = K''_m + K''_0 = \frac{\rho_m c_m^2}{d} + \frac{\rho_0 c_0^2}{qd}$$

missä ρ_0 [kg/m^3] on ilman tiheys ja c_0 [m/s] on äänen nopeus ilmassa. Huokoisuus q on määritelty **luvussa 3**.

Kelluvan lattian akustisen toiminnan kannalta tärkein ominaisuus on sen ominaistajuus f_0 [Hz]:

$$(6.5.4) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K'' \frac{m'_1 + m'_2}{m'_1 m'_2}}$$

missä m'_1 ja m'_2 [kg/m^2] ovat kelluvan levyn ja kantavan laatan pintamassat (kuva 6.5.1). Useimmiten pätee $m'_1 \ll m'_2$, jolloin saadaan

$$(6.5.5) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K''}{m'_1}}$$

Tästä voidaan johtaa resonanssitaajuuden laskemisen tunnetuin muoto

$$(6.5.6) \quad f_0 = 159 \sqrt{\frac{s'}{m'_1}}$$

missä s' [MN/m^3] on joustavan kerroksen dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohti. Tätä käytetään, koska tuotearvot ilmoitetaan yleensä hakasulkeiden kertaluvulla. Taulukossa 6.5.2 on esimerkkejä joidenkin tuotetyyppien s' -arvoista.

Taulukko 6.5.2 ISO 9052-1 (1989) mukaan määritetty dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohti joillekin lattianalustuotteille ja lattianpäällysteille.

Tuotetyyppi	Paksuus [mm]	Tiheys [kg/m^3]	s' [MN/m^3]
Kevyt lasivilla 50 mm	50	45	3
Lattianalusvilla 50 mm	50	92	12
EPS levy 50 mm	50	18	12
Lattianalusvilla 13 mm	13	115	16
Parketinalushuopa 2.1 mm	2.1	77	68
Pehmeä tekstiilimatto (asuntokäyttöön)	8.2	470	80
Kova tekstiilimatto (julkisiin tiloihin)	3.8	550	230
Pehmeä vinyyliimatto (asuntokäyttöön)	2.4	703	2900
Kova vinyyliimatto (julkisiin tiloihin)	2.2	1420	3400

Kelluvat lattiat voidaan jakaa kahteen tyyppiin. Globaalisti reagoivassa eli resonoivassa tilanteessa kelluva levy säteilee koko alaltaan tehokkaasti ja on siten vuorovaikutuksessa elastisen materiaalin kanssa koko alaltaan. Kelluva levy on resonoiva, kun $f > f_c$. Kiviaineksilla massiivisilla kelluvilla levyillä on yleensä $f_c < 300$ Hz ja ne ovat siksi suurimman osan taajuusalueesta resonoivia. Paikallisesti reagoivassa eli ei-resonoivassa tilanteessa kelluva levy on vuorovaikutuksessa elastisen materiaalin kanssa vain paikallisesti eli impulssin lähistöltä taivutusaallon puolikkaan kokoiselta alueelta, jonka ulkopuolella akustinen oikosulku estää äänensäteilyn. Laatta on paikallisesti reagoiva, kun $f < f_c$. Rakennuslevyillä toteutetuilla kelluvilla levyillä on yleensä $f_c > 1000 \dots 2000$ Hz ja ne ovat askelääneneristävyyden kannalta merkittävimmän taajuusalueen (alle 1000 Hz) tapauksessa paikallisesti reagoivia.

Resonoivan kelluvalle levyn tapauksessa askeläänepainetason parannus ΔL [dB] on (Schiavi, 2018)

$$(6.5.7) \quad \Delta L = -15 \cdot \log_{10} \left(\frac{1 + \eta_m \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}{\eta_m \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^2} \right)$$

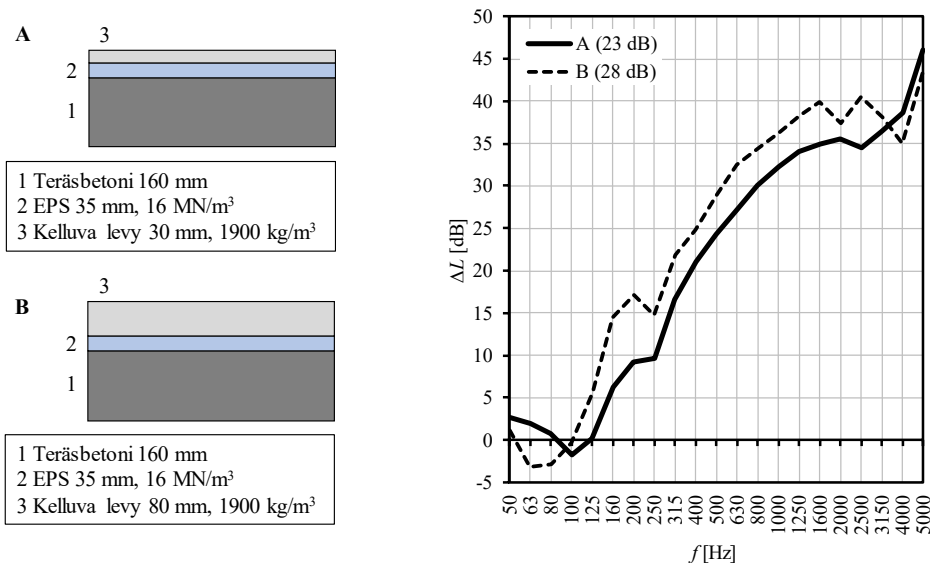
ja ei-resonoivalle kelluvalle laatalle

$$(6.5.8) \quad \Delta L = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1 + \eta_m \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}{\eta_m \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^2} \right)$$

missä η_m on joustavan kerroksen häviökerroin. Se saa tyypillisesti arvoja 0.05 ja 0.30 väliltä. Se voidaan määrittää joustavan kerroksen dynaamisen jäykkyyden määrittämisen yhteydessä resonanssitaajuuden puoliarvovaleveydestä.

Kelluva lattiarakenne tuottaa merkittävän askelääneneristysten parannuksen taajuuksilla, jotka ovat 1.5 kertaa resonanssitaajuutta suuremmat. Jos häviökerroin on pieni, havaitaan resonanssitaajuudella, noin oktaavikaistan levyisellä alueella askelääneneristävyyden heikentymä. Massiivisten kantavien rakenteiden päälle sijoitettavien päällystämättömien kelluvien lattioiden tuottamat askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w ovat yleensä suurempia kuin 25 dB.

Kelluvan lattian päällystäminen joustavalla lattianpäällysteellä pienentää askeläänitasolukua vähemmän kuin lattianpäällysteelle massiivisen kantavan rakenteen yhteydessä mitattu askelääneneristävyyden parannusluku ΔL_w . Tehokkaimpien kelluvien lattioiden tapauksessa lattianpäällysteen vaikutus askeläänitasolukuun on nolla.



Kuva 6.5.2 Esimerkki kahden toisistaan hieman poikkeavan kelluvan lattiarakenteen tuomasta askeläänepainetason parannuksesta ΔL raakaväliopajaan (1) nähden. ΔL_w -arvot ovat sulkeissa.

6.6 Vaihtoehtoiset askelääniherätteet

Askeläänikoje tuottaa ääntä, joka ei spektriltään vastaa yleisimpiä asumisessa syntyviä iskuääniä, joita ovat mm. normaali kävely, lasten pomppiminen, tavaroiden iskeytyminen lattiaan, tavaroiden laahaaminen lattialla ja leikkiminen lattialla. Kuvassa 6.6.1 on vertailtu joidenkin iskuäänten spektrejä.

Askeläänikojeelle on standardeissa olemassa kolme vaihtoehtoa: modifioitu askeläänikoje (*modified tapping machine*), kumipallo (*rubber ball*) ja paukauskone (*bang machine*). Modifioitu askeläänikoje on kuvan 6.1.1 mukainen koje pehmeäkärkisillä vasaroilla. Vaikka sen tuottama spektri muistuttaa enemmän kävelyn ääntä, sen tuottama äänenpainetaso ei riittävä mittaamaan raskaita rakenteita. Kumipallo ja paukauskone (kuva 6.1.1) tuottavat lasten pomppimista muistuttavan äänen. Paukauskone on kookas ja hankalakäyttöinen eikä sitä voi ostaa Eurooppaan. Kumipallo on yleistynyt tutkijoiden parissa ja sen tuottamaa ääntä käytetään sellaisenaan mm. psykoakustisissa tutkimuksissa edustamaan lasten pomppimista. Kumipallo on jo huomioitu myös ISO standardeissa (ISO 10140-5, ISO 10140-3, ISO 16283-2, ISO 717-2), joten menetelmä esitellään seuraavassa.

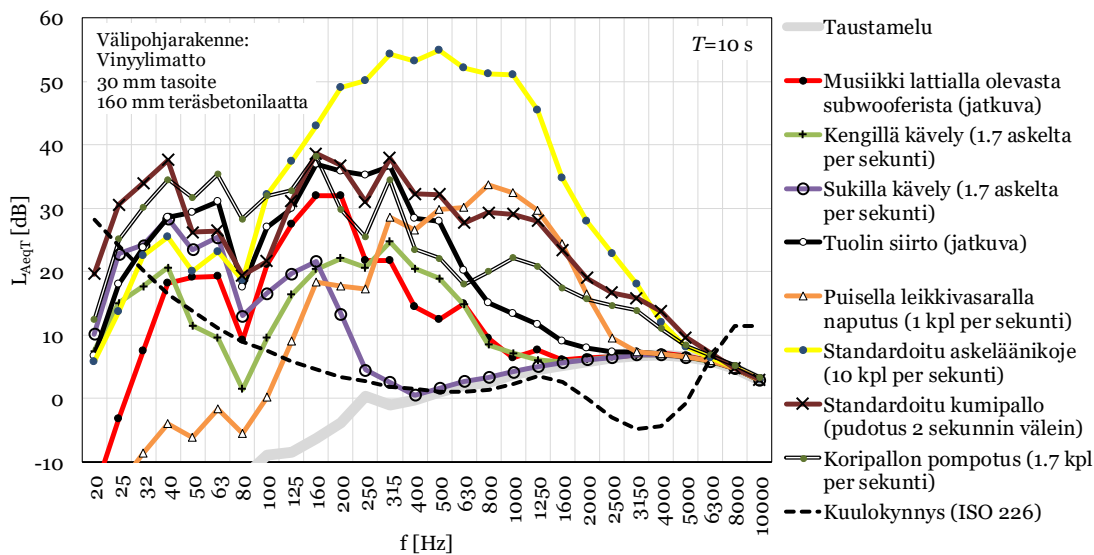
Lattiarakenteen laboratoriomittauksessa määritetään kumipallon aiheuttama maksimaalinen askeläänepainetaso $L_{i,Fmax}$. Tätä varten kumipallolla tuotetaan haluttu askelääni pudottamalla se 1 m korkeudelta, 1.00 m kepin varasta, tutkittavaan lattiaan 4 eri herätepaikassa j ja äänenpainetason mittausta suoritetaan vastaanottohuoneessa kullakin herätepaikalla neljässä paikassa k oktaavikaistoilla 63–500 Hz tai kolmannesoktaavikaistoilla 50–630 Hz. Kullakin herätepaikalla j saadut arvot keskiarvoistetaan energiaperiaatteen mukaan yhtälöllä

$$(6.6.1) \quad L_{i,F\max,j} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m 10^{L_{F\max,k}/10} \right)$$

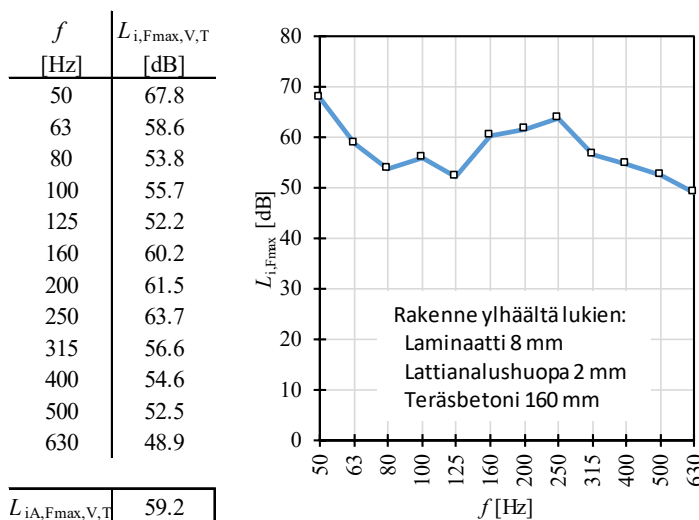
missä $L_{F\max,k}$ [dB] on Fast-aikavakiolla saatu taustamelukorjattu maksimiäänepainetaso paikassa k ($k=1 \dots 4$). Lopputulos $L_{i,F\max}$ saadaan keskiarvoistamalla energiaperiaatteen mukaan kunkin herätepaikan keskiarvot yhtälöllä

$$(6.6.2) \quad L_{i,F\max} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_{i,F\max,j}/10} \right)$$

missä $L_{i,F\max,j}$ [dB] on maksimiäänepainetaso tilakeskiarvo herätepaikassa j ($j=1 \dots 4$). Lopputuloksesta $L_{i,F\max}$ määritetään yksilukuarvo, A-painotettu askeläänepainetaso maksimiarvo, $L_{iA,F\max}$ [dB], ISO 717-2 (2020) mukaan laskemalla A-painotettu kokonaisäänepainetaso $L_{i,F\max}$ -arvoista välillä 50–630 Hz. Kuvassa 6.6.3 on esitetty esimerkki mittaustuloksesta. Yleensä tulos normalisoidaan tilavuuteen $V=50 \text{ m}^3$ ja jälkikaiunta-aikaan $T=0.5 \text{ s}$ ($L_{i,F\max,V,T}$), jolloin samalle rakenteelle saatuja tuloksia eri ympäristöistä voidaan verrata keskenään. Normalisointimenettelyä ei kuitenkaan tässä käsitellä.



Kuva 6.6.1 Välipohjarakenteen yläpintaan kohdistuneiden iskuäänen ekvivalentteja A-painotettuja äänenpainetasoja alapuoleisessa huoneessa. Kuulokynnyksen ylittävät äänet ovat aistittavia. Impulsiivisten askeläänten kuulumista tulee siksi arvioida Fast-aikapainotetun maksimiarvon avulla. Todellisten iskuäänten äänenpainetasoille ei ole ohjearvoja, joten niillä on vain tutkimuksellista merkitystä.



Kuva 6.6.2 Kumipallolla saatu mittaustulos hyvin tavanomaiselle 50-luvun betonivälipohjarakenteelle.

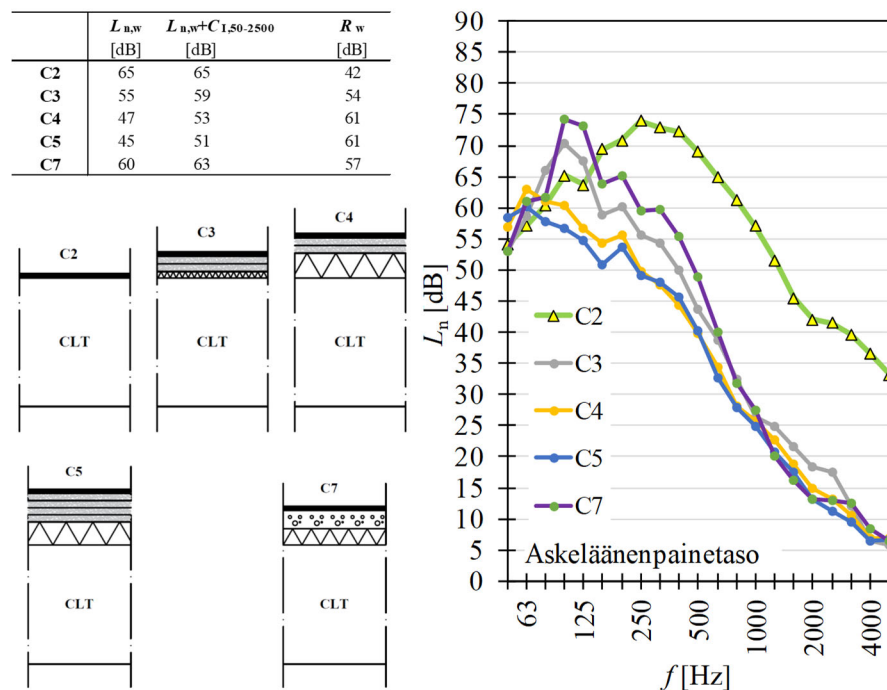
6.7 Kevyet välipohjarakenteet

Kevyet välipohjat määritellään rakenteiksi, joiden kantavana rakenteena on teräsprofiilit, puuvasat, puuristikot, CLT-levyt, LVL-levyt tai vastaavat rakenteet. Tällaisten välipohjarakenteiden massa on kaikkine rakennekerroksineen tavallisesti alle 150 kg/m^2 . Kevyiden välipohjarakenteiden askelääneneristys perustuu erillisten levykerrosten massaan ja kaviteetteihin. Tavoiteltaessa alhaisia askeläänitasolukuja kevyet välipohjat koostuvat yleensä useista rakennekerroksista, joita ovat:

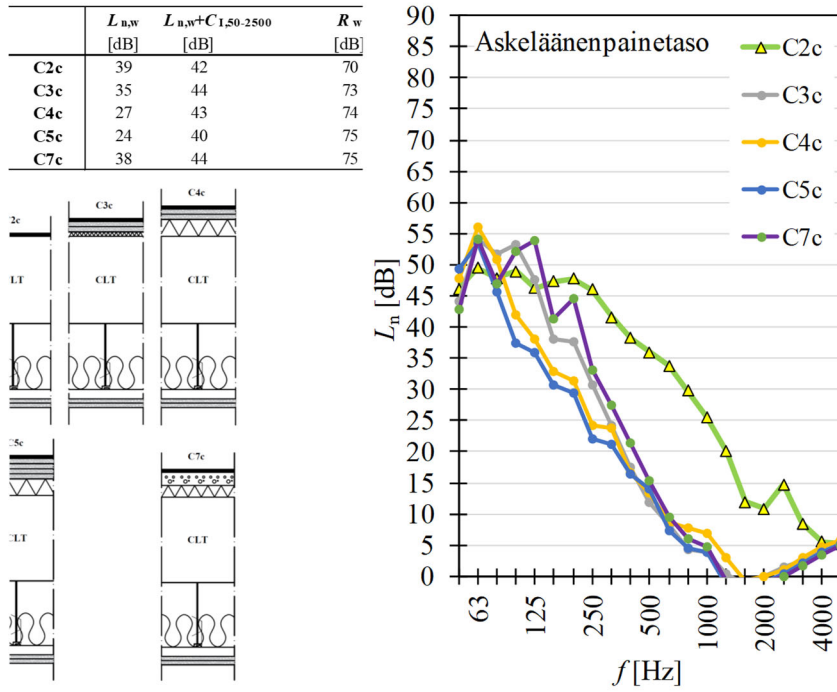
- joustavat lattiapäällysteet
- joustavien lattiaeristeiden päällä kelluvat laatat tai levytykset
- asennuslattiat (joustava tai jäykkä liitos kantavaan rakenteeseen)
- alakatto (joustava tai jäykkä liitos kantavaan rakenteeseen)

Kevytrakenteisen välipohjan askelääneneristykseen vaikuttavat samat tekijät kuin kevytrakenteisen seinän ilmäneristykseen. Kuvissa 6.7.1–5 on esitetty laboratoriomittaustuloksia, miten eri tekijät vaikuttavat puuvälipohjan askelääneneristävyyteen. Erityisen silmiinpistävä parannusvaikutus havaitaan joustavalla alakatolla ja ripustuslanka-alakatolla.

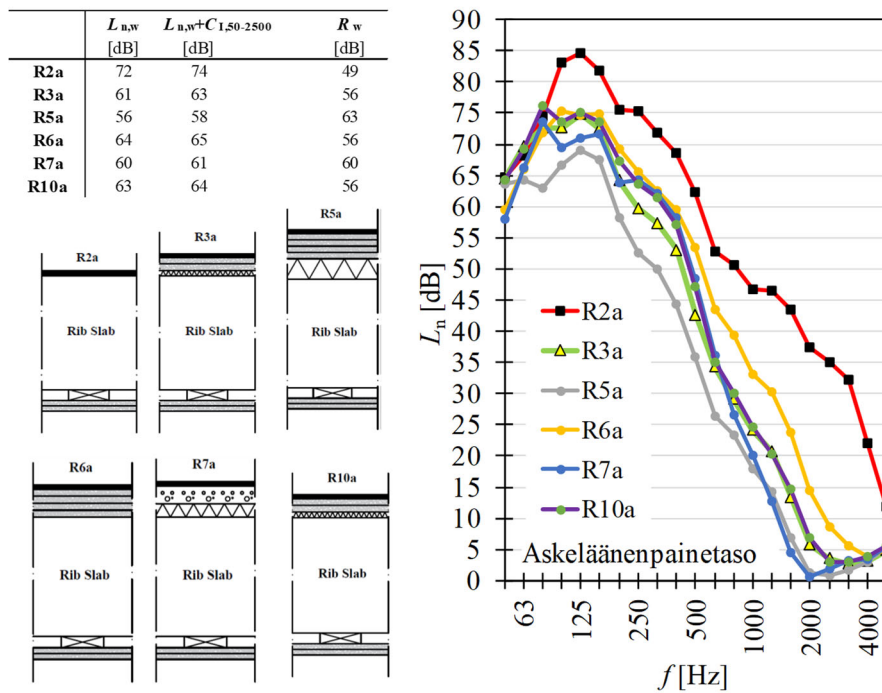
Kävely ja muut lattiaan kohdistuvat iskut aiheuttavat paitsi kuultavaa ääntä, myös värähtelyä kuuloalueen alapuolella taajuuksilla 6–20 Hz. Tällainen värähtely aistitaan tärinänä. Kevyiden rakenteiden värähtely kävelystä on voimakkaampaa kuin massiivisten rakenteiden, koska ihmisen painollaan aiheuttama isku aiheuttaa kevyen rakenteeseen suuremman liikkeen kuin massiiviseen rakenteeseen.



Kuva 6.7.1. Normalisoitu askeläänepainetaso taajuuden funktiona, kun kantava rakenne on 260 mm paksu massiivipuulaatta (CLT) ja laatan päällysteisiin kohdistuu muutoksia.

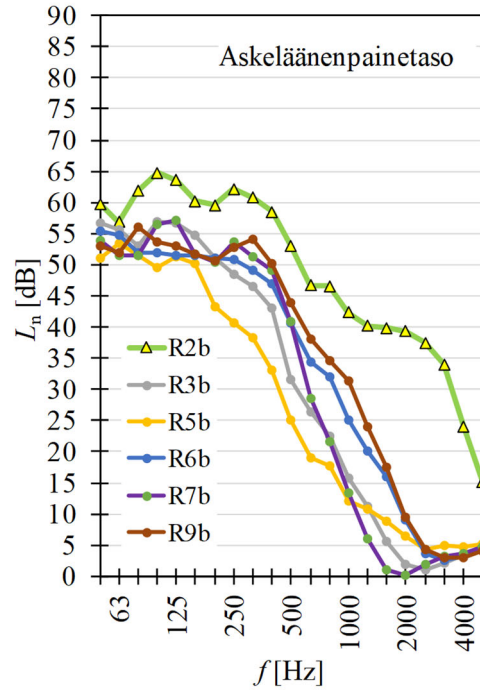
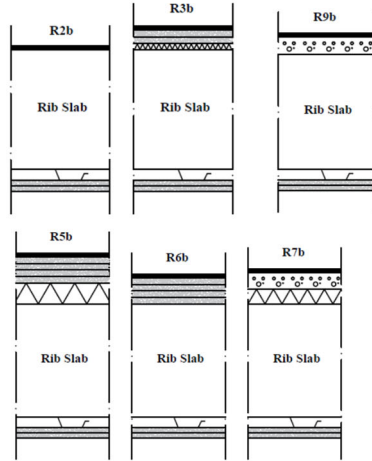


Kuva 6.7.2. Normalisoitu askeläänenpainetaso taajuuden funktiona, kun kantava rakenne on 260 mm paksu massiivipuulaatta (CLT) ripustuslanka-alakatolla ja laatan päällysteisiin kohdistuu muutoksia.

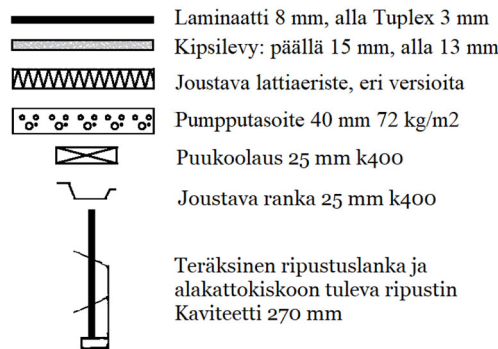


Kuva 6.7.3. Normalisoitu askeläänenpainetaso taajuuden funktiona, kun kantava rakenne on 370 mm paksu puinen avokotelolaatta (Rib Slab) jäykästi koolatulla alakatolla ja laatan päällysteisiin kohdistuu muutoksia.

	$L_{n,w}$ [dB]	$L_{n,w}+C_{1,50-2500}$ [dB]	R_w [dB]
R2b	55	55	62
R3b	46	47	70
R5b	39	41	75
R6b	44	44	71
R7b	47	47	72
R9b	47	47	68



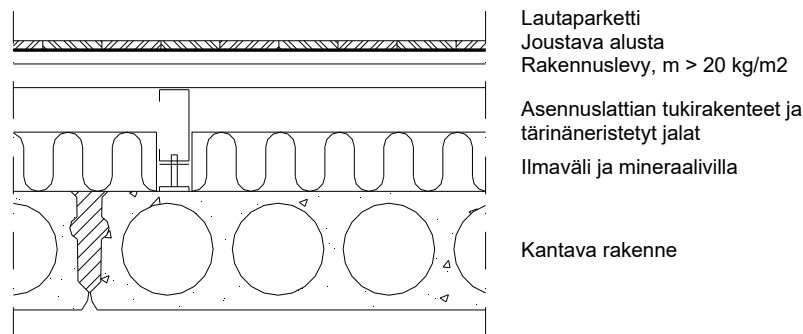
Kuva 6.7.4. Normalisoitu askeläänepainetaso taajuuden funktiona, kun kantava rakenne on 370 mm paksu puinen avokotelolaatta (Rib Slab) joustavasti koolatulla alakatolla ja laatan päällysteisiin kohdistuu muutoksia.



Kuva 6.5.5. Kuvissa 6.7.1–6.7.4 käytettyjen rakennekerrosten selitykset.

6.8 Asennuslattiat

Asennuslattian (kuva 6.8.1) askelääneneristys riippuu pintarakenteen massasta, pintarakenteen ja kantavan rakenteen välissä olevan kaviteetin korkeudesta, kaviteetin absorptiomateriaalista ja pintarakennetta kantavien tukirakenteiden ja kantavan rakenteen väliin mahdollisesti sijoitettujen värähtelyneristimien dynamisesta jäykkyydestä (jousivakiosta).



Kuva 6.8.1 Asennuslattian rakenneperiaate. (Lähde: RIL 243-1:2007)

KIRJALLISUUS

- Betonirakenteiden äänitekniikka, Rakennustuoteteollisuus RTT r.y. Betoniteollisuus, Helsinki, 2000.
- C5:1984 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ääneneristys. Ohjeet. Helsinki, ympäristöministeriö.
- ISO 10140-3:2010 Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 3: Measurement of impact sound insulation.
- ISO 10140-5:2010 Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 5: Requirements for test facilities and equipment.
- ISO 16251-1:2014 Acoustics — Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up — Part 1: Heavyweight compact floor
- ISO 717-2:2013 Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation.
- ISO 9052-1 Acoustics — Determination of dynamic stiffness — Part 1: Materials used under floating floors in dwellings.
- Johansson, A-C, Nilsson, E. (2005). Measurement of drum sound, NT Technical Report TR 573, Nordic Innovation Centre, Oslo, Norway.
- Keränen, J., Lietzén, J., Kylliäinen, M., Hongisto, V. (2013). Improvement of impact sound reduction by floor coverings – measurements using a small floor mock-up and an impact sound laboratory, paper 530, Internoise 2013, 15-18 September, Innsbruck, Austria.
- Kylliäinen, M. (2006). Talonrakentamisen akustiikka, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, Tutkimusraportti 137, Tampere, Suomen tasavalta.
- Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V., Hongisto, V. (2015). Correlation between single-number quantities of impact sound insulation and sound spectra of walking on concrete floors. *Acta Acustica united with Acustica* 101 975-985.
- Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D., Hongisto, V. (2016). Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings, *Applied Acoustics* 102 12–18.
- Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D., Rekola, L. (2017). Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings - a laboratory listening experiment, *Acta Acustica united with Acustica*, 103 236–251.
- Kylliäinen, M., Virjonen, P., Hongisto, V. (2019). Optimized reference spectrum for rating the impact sound insulation of concrete floors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(1) 407–416.
- RIL 243-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu. Perusteet. Rakennusinsinöörien liitto R.I.L. r.y., Helsinki, 2007.
- Schiavi, A. (2018). Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors. *Applied Acoustics* 129 64-71.

7 Ilmanvaihto

7.1 Melulähteet

Rakennuksen LVISA-laitteita (lämpö, vesi, ilmastointi, sähkö, automaatio) ovat esimerkiksi hissit, vesi- ja viemäri-laitteet, kompressorit, ilmanvaihtolaitteet, jäähdytyslaitteet, lämmityslaitteet ja erilaiset sähkölaitteet. Niihin rinnastetaan myös keskuspolynimuri, mattoimuri ja talopesulan laitteet, kuten pesukoneet, lingot, kuivauspuhaltimet ja mankelit.

Tämä luku keskittyy koneellisen ilmanvaihdon meluntorjuntaan, koska ilmanvaihto on yleisin akustista laskentaa edellyttävä vaihe rakentamisessa. Luvussa keskitytään äänen vaimentamiseen ja äänitasojen laskentaan. Ilmanvaihtojärjestelmä aiheuttaa melua mm. seuraavasti:

- ilmanvaihtopuhaltimen ilmaääni etenee kanavistoa pitkin huoneeseen, vaipan läpi konehuoneeseen tai kanavistoa pitkin ulkoilmaan;
- ilman virtaus kanavistossa, mutkissa ja haaroissa sekä pääte- ja säätölaitteissa synnyttää virtausääntä;
- kanavistossa olevat vuotokohdat aiheuttavat ns. vuotoääntä;
- konehuoneen ääni voi kantautua huoneistoon rakenteiden läpi.

Tämän lisäksi ilmanvaihtokanavisto on äänen kulkeutumisreitti, joka tulee huomioida mm. seuraavin osin:

- julkisivuun sijoitetun raitisilmaventtiilin läpi kantautuu ympäristömelua huoneeseen, joka on huomioitava julkisivun ääneneristysmitoituksessa;
- ilmastointikanavistoja pitkin kulkeutuu ilmaääntä huonetilojen välillä päätelaitteesta päätelaitteeseen (ilmaäänien sivutiesiirtymä);
- kanavien ja putkien tiivistämättömät läpiviennit voivat heikentää ympäröivän rakenteen ilmaääneneristystä (äänivuodot);
- voimakas ilmanvaihdon ääni kanavan sisällä voi kantautua kanavaseinän läpi huoneeseen;

Jos ilmanvaihtojärjestelmässä on ilmastointi ja kylmäkoneet sijaitsevat rakennuksessa, kylmäkoneisiin liittyy erillisiä ääni- ja värähtelyeristysaasteita, joita ei käsitellä tässä.

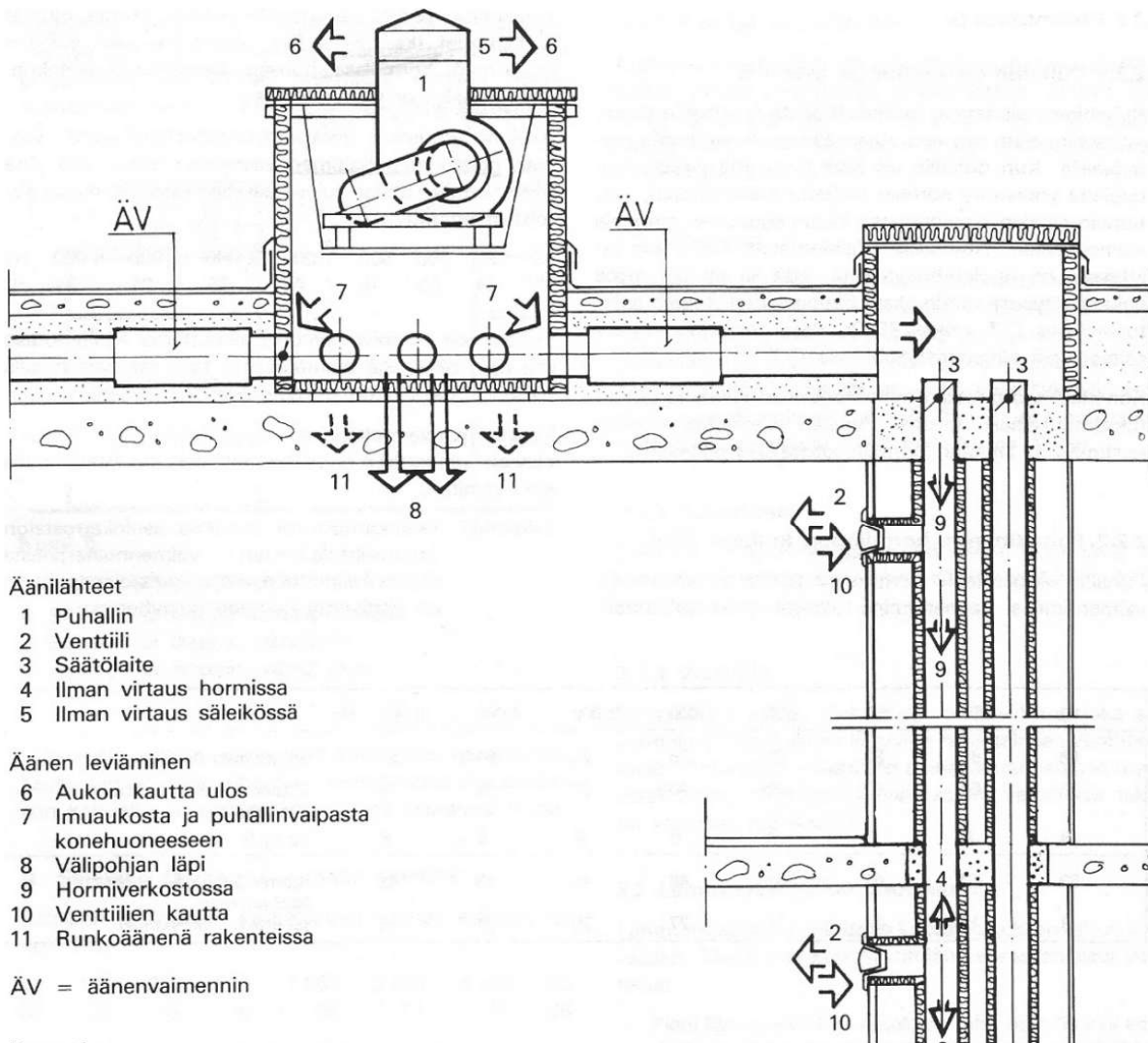
Ilmanvaihtojärjestelmät voivat olla painovoimaisia tai koneellisia. Painovoimaisten järjestelmien etuna on ilmavirran äänettömyys. Meluongelmia voi aiheutua raitisilmaventtiilien kautta kantautuvasta ympäristömelusta.

Tässä luvussa keskitytään koneellisiin järjestelmiin, koska niissä äänenhallinta on keskeisessä roolissa heti ilmanjaon mitoituksen jälkeen. Koneellisia järjestelmiä ovat:

1. Keskitetty poistoilmanvaihto
2. Keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihto
3. Huoneistokohtainen tulo- ja poistoilmanvaihto

Keskitetyissä järjestelmissä on yleensä yhteinen runkokanavisto, johon kaikki huoneet tai huoneistot liittyvät. Vaihtoehtoisesti joka huoneistoon tuodaan runkokanava suoraan konehuoneelta. Jälkimmäinen on kalliimpi ja vie enemmän tilaa mutta mahdollistaa yksilöllisemmän säädön ja mahdollistaa paremman ilmaääneneristyksen huoneistojen välillä.

Kuvassa 7.1.1 on esimerkki ilmanvaihtolaitoksesta, sen äänilähteistä ja äänen kulkeutumisreiteistä.



Kuva 7.1.1. Yhteiskanavoitu ilmastointilaitos. Kuvassa on esitetty vain poistoilmanvaihto. (Suomen RakMk C6:1984)

7.2 Äänitasolaskelmat

Ilmanvaihdon äänilaskelmilla määritetään A-painotettu kokonaisäänepainetaso tarkasteltavassa huoneessa. Laskelmissa tarkasteltavia **äänilähteitä** ovat:

1. puhaltimet (tulo- ja poistopuhallin erikseen);
2. säätölaitteet puhaltimen ja tarkasteltavan huoneen välillä kummassakin kanavistossa;
3. huoneessa olevat päätelaitteet;
4. konehuone: rakenteiden läpi konehuoneesta kantautuva ilmaääni.

Lisäksi ääntä muodostuu huonon suunnittelun tai urakoinnin vuoksi mm. ilman virtauksesta kanavistossa, kanavahaaroissa mutkissa sekä ilmavuodoissa. Näille ei ole olemassa komponenttivalmistajien ilmoittamia lähtöarvoja, joten näitä äänilähteitä ei käsitellä.

Äänenvaimennustekijöitä ovat:

1. Melun jakautuminen kanavahaaroihin D_d
2. Äänenvaimentimet D_s
3. Päätevaimennus D_t
4. Huonevaimennus D_r

Alaindeksit tulevat sanoista *division*, *silencer*, *terminal* ja *room*. Tämän lisäksi ääni vaimenee edetessään kanavistossa (seinien absorptio tai läpäisy) ja mutkissa. Nämä vaimennustekijät ovat heikkoja ja ne jätetään yleensä varmuusvaraksi.

Äänitasolaskelma tehdään kuhunkin huoneeseen laskemalla ensin erikseen kaikkien äänilähteiden 1-4 äänenpainetaso oktaavikaistoilla 63-8000 Hz. Osatulokset summataan yhteen ja tulosta verrataan tavoitearvoon.

Puhaltimen (*fan*) äänenpainetaso, $L_{p,f}$ [dB] huoneessa lasketaan yhtälöllä

$$(7.2.1) \quad L_{p,f} = L_{w,f} - D_d - D_s - D_t + D_r$$

missä $L_{w,f}$ [dB] on puhaltimen äänitehotaso. Puhaltimen äänitehotaso valitaan tuote-esitteestä. Tätä varten tulee tietää puhaltimen painehäviö ja kokonaisilmamäärä.

Säätölaitteen (*damper*) äänenpainetaso, $L_{p,d}$ [dB] huoneessa lasketaan yhtälöllä

$$(7.2.2) \quad L_{p,d} = L_{w,d} - D_s - D_d - D_t + D_r$$

missä $L_{w,d}$ [dB] on säätölaitteen äänitehotaso. Säätölaitteen äänitehotaso valitaan tuote-esitteestä. Tätä varten tulee tietää puhaltimen painehäviö ja kokonaisilmamäärä.

Päätelaitteen eli tulo- tai poistoilmalaitteen (*terminal unit, air supply, exhaust*) äänenpainetaso, $L_{p,t}$ [dB], huoneessa lasketaan yhtälöllä

$$(7.2.3) \quad L_{p,t} = L_{w,t} + D_r$$

missä $L_{w,t}$ [dB] on päätelaitteen äänitehotaso. Päätelaitteen äänitehotaso valitaan tuote-esitteestä. Tätä varten tulee tietää puhaltimen painehäviö ja kokonaisilmamäärä.

Säätö- ja päätelaitteiden tuote-esitteissä annetaan yleensä melupäästö muodossa L_{p10A} , joka tarkoittaa A-painotettua äänenpainetasoa huoneessa, jossa absorptioala on 10 m². Arvo muutetaan A-painotetuksi äänitehotasoksi L_{WA} yhtälöllä

$$(7.2.4) \quad L_{WA} = L_{p10A} + 4$$

7.3 Puhaltimen ääni

Tuloilmapuhallin tuo raittiin ilman rakennukseen ja poistoilmapuhallin poistaa käytetyn ilman rakennuksesta. Puhaltimet aiheuttavat sekä mekaanista ääntä että ilman virtauksen ääntä.

Puhallinvalmistajat ilmoittavat puhaltimen äänitehotason ilmamäärän ja kokonaispaineen funktiona imu- ja painekanavaan sekä vaipan yli ympäristöön (konehuoneeseen). Esimerkki tuote-ervojen esittämisestä on kuvassa 7.3.1. Kun toimintapiste tunnetaan, kaaviosta luetaan A-painotettu äänitehotaso L_{WA} ja pyörimisnopeusalue. Painottamaton äänitehotaso $L_{WZ,okt,i}$ oktaavikaistalla i saadaan yhtälöllä

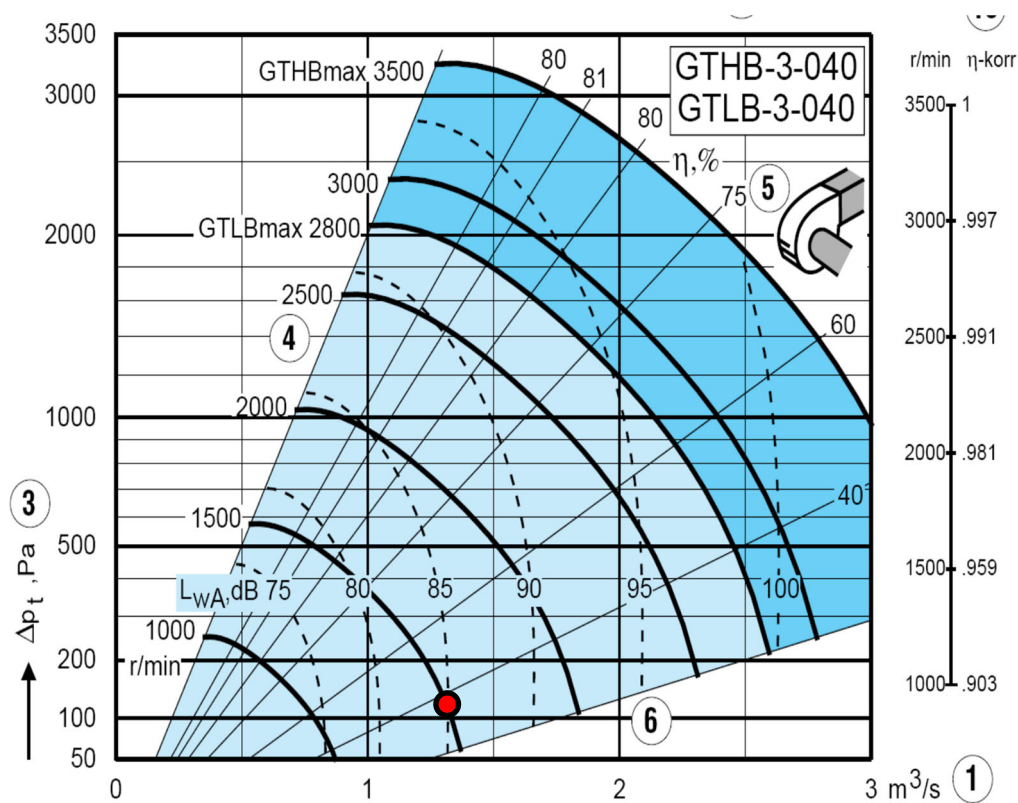
$$(7.3.1) \quad L_{WZ,okt,i} = L_{WA} + K_{okt,i}$$

missä $K_{okt,i}$ [dB] saadaan tuote-ervoista pyörimisnopeusalue tarvittaessa huomioiden.

Integroitu tulopoistokone sisältää kaksi puhallinta (tulo- ja poistoilmapuhaltimet) sekä erilaisia komponentteja (suodatin, lämmöntalteenotto, jäähdytys, lämmitys, kostutus, äänenvaimennin). Integroitu tulopoistokone sisältää neljä kanavaa:

- raitisilman imukanava (ulkoa imettävä raitisilma);
- raitisilman painekanava (huoneeseen menevä raitis ilma);
- jäteilman imukanava (huoneista imettävä jäteilma);
- jäteilman painekanava (ulos puhallettava jäteilma);

Huoneistokohtainen integroitu tulopoistokone voi sisältää viidennen kanavan, jolla imetään kuumaa ilmaa takan luota. Integroiduissa koneissa tuote-ervo ilmoittama äänitehotaso sisältää komponenttien aiheuttaman äänenvaimennuksen.



Äänitie (s)	Pyörimisnopeusalue r/min	Korjaus K_{okt} , dB								$L_{WA(s)}$ - L_{WA} dB	$L_{W(s)}$ - $L_{W(s)}$ dB
		Oktaavikaista, keskitajuus, Hz									
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Painekanavaan (1)	0 – 964	0	5	2	-3	-6	-9	-14	-18	0	8,2
	965 – 1928	-2	-1	3	-3	-6	-9	-14	-17	0	6,4
	1929 – 3200	-3	-4	-4	-1	-6	-8	-13	-16	0	4,1
Imukanavaan (2)	0 – 964	4	3	0	-3	-4	-9	-12	-14	0,4	7,8
	965 – 1928	2	-1	0	-3	-5	-8	-10	-13	0,3	6,2
	1929 – 3200	-2	-5	-6	-2	-4	-7	-9	-14	0,8	3,3
Ympäristöön, kanavaan liitetty puhallin (3)	0 – 964	-8	-5	-6	-8	-11	-15	-22	-33	-6,1	6,1
	965 – 1928	-10	-8	-6	-10	-12	-16	-25	-36	-7,3	5,8
	1929 – 3200	-12	-14	-11	-8	-10	-16	-24	-35	-6,4	3,1
Puhaltimen paine- aukkoon, vapaasti puhaltava puhallin (4)	0 – 964	-9	0	0	-3	-6	-9	-14	-18	-0,6	5,5
	965 – 1928	-13	-6	1	-3	-6	-9	-14	-17	-0,5	4,5
	1929 – 3200	-17	-9	-6	-1	-6	-8	-13	-16	-0,1	2,3

Äänitien kuvaus	Koejärjestely
1 = imukanavaan 2 = imukanavaan 3 = ympäristöön (kanavaan liitetty puhallin)	
4 = puhaltimen paineaukkoon (vapaasti puhaltava puhallin)	

Kuva 7.3.1 Esimerkki ilmanvaihtopuhaltimen tuotearvon ilmoittamisesta (Fläktwoods Centrimaster GT-3). Punaisessa toimintapisteessä ilmamäärä on $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, paine-ero imu- ja painekanavan välillä on 120 Pa, pyörimisnopeus on 1500 rpm ja A-painotettu äänitehotaso on 85 dB.

7.4 Säätlaitteen ääni

Säätlaitteita käytetään pienentämään kanavistossa olevaa painetta. Säätlaitteita voi olla vakioasetuksessa tai se voi olla automaattisesti ilman tarpeen mukaan säätävä. Säätlaitteita ovat mm. säätöpelti ja iiris-säädin.

Puhaltimelta lähtevässä runkkanavassa on yleensä suuri paine. Runkkanavasta ilma haarautuu eri vyöhykkeisiin (esim. kerroksiin tai huoneistoihin) haarakanavia pitkin. Yleensä haarakanavassa on säätlaitte ensimmäisenä, jotta vyöhykkeeseen menevä kokonaisilmamäärä ja ilmanvaihdon melu voidaan hallita. Haarakanavasta ilma haarautuu pääte-eliimiin päätekanavia pitkin. Päätekanavissa voi myös olla säätlaitte, jos ilmamäärää halutaan säätää esimerkiksi käyttöasteen mukaan.

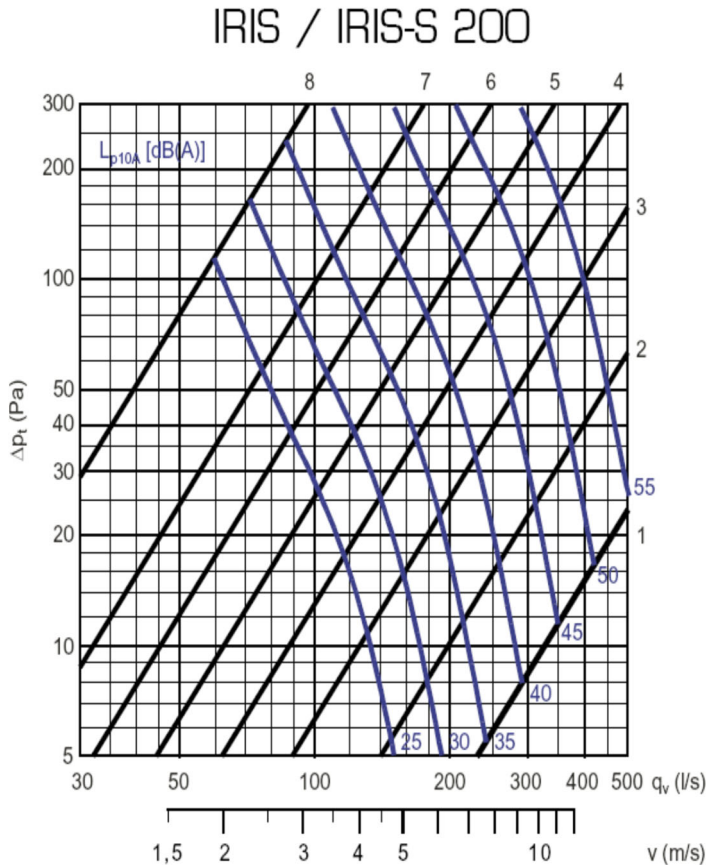
Säätlaitteet ovat yleensä äänekkäitä ja niiden jälkeen tarvitaan yleensä äänenvaimennin. Esimerkki säätlaitteen äänitietojen esittämisestä on kuvassa 7.4.1. Kun toimintapiste tunnetaan, kaaviosta luetaan A-painotettu äänenpainetaso L_{p10A} [dB]. Painottamaton äänitehotaso $L_{WZ,okt,i}$ oktaavikaistalla i saadaan yhtälöllä

$$(7.4.1) \quad L_{WZ,okt,i} = L_{p10A} + K_{okt,i}$$

missä $K_{okt,i}$ [dB] saadaan tuotteen äänitiedoista.

Kaaviossa käytetään äänenpainetasoa, jotta ilmastointisuunnittelija voisi arvioida laitteen soveltuvuutta ja/tai äänenvaimentimen tarvetta säätölaitteen yhteyteen suunnitteluvaiheessa helpommin kuin jos kaaviossa olisi äänitehotaso.

Säätölaite aiheuttaa myös ääntä vaippansa läpi ympäristöön. Säätölaitteiden äänitiedoissa tätä äänireittiä ei aina esitetä.



Äänen tehotaso L_W

IRIS	KORJAUS K_{akt} (dB)							
	Oktaavikaistan keskitajuus (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
80	10	16	12	9	5	-1	-6	-23
100	25	21	16	9	4	-6	-12	-25
125	17	17	13	7	1	-4	-6	-17
150	21	20	14	8	0	-6	-16	-29
160	19	18	14	6	-1	-6	-13	-25
200	20	17	12	5	-2	-5	-14	-26
250	16	12	8	3	1	-4	-17	-32
315	24	12	5	0	1	-2	-13	-27
400	15	9	6	2	-1	-4	-9	-13
500	14	7	4	1	-1	-4	-8	-11
630	15	7	3	2	-1	-5	-9	-11
800	9	5	3	3	-1	-6	-10	-13
Tol.±	6	3	2	2	2	2	2	3

Kuva 7.4.1 Esimerkki säätölaitteen äänitietojen ilmoittamisesta (Fläktwoods IRIS-S 200).

7.5 Päätelaitteen ääni

Yleensä ilmanvaihtokanaviston ja huoneen rajapinnassa on toiminnallinen päätelaite, jotta huoneessa saavutetaan haluttu tulo- tai poistoilmamäärä, visuaalinen ilme, ja äänitaso.

Päätelaitteita ovat esimerkiksi ritilä, venttiili, hajottaja, suutinkanava ja aktiivinen jäähdytyspalkki (kuva 7.5.1). Erillistä päätelaitetta ei aina tarvita vaan kanava voi myös päättyä huoneeseen sellaisenaan.

Ritilätyyppisissä päätelaitteissa (tai päätelaitteettomassa tilanteessa) ei ole ilmavirran säätömahdollisuutta, jolloin säätö tapahtuu kanavassa olevilla säätölaitteilla. Yleensä päätelaitteissa on säätömahdollisuus ja päätelaite säädetään asennusvaiheessa niin, että sillä saavutetaan haluttu ilmamäärä ja painehäviö.

Päätelaitteen tuotearvon esittämisestä on esimerkki kuvassa 7.5.2. Kun toimintapiste tunnetaan, kaaviosta luetaan A-painotettu äänenpainetaso L_{p10A} [dB]. Painottamaton äänitehotaso $L_{WZ,okt,i}$ oktaavikaistalla i saadaan yhtälöllä

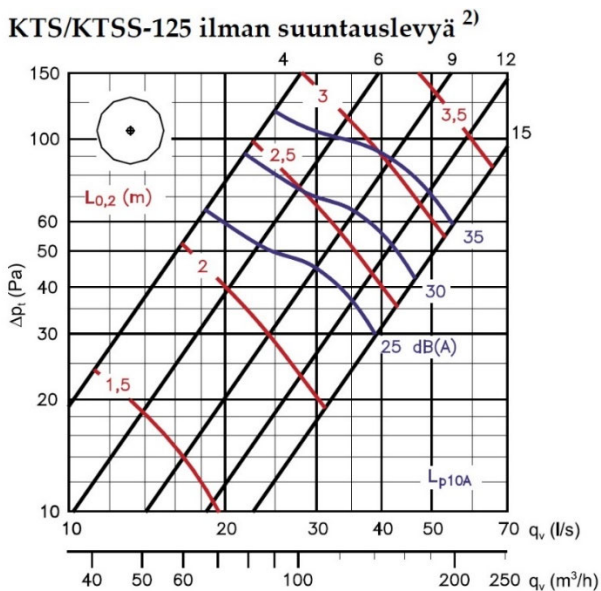
$$(7.5.1) \quad L_{WZ,okt,i} = L_{p10A} + K_{okt,i}$$

missä $K_{okt,i}$ [dB] saadaan tuotearvoista.

Päätelaitteille ilmoitetaan myös äänenvaimennus. Tätä käsitellään myöhemmin.



Kuva 7.5.1 Ylhäällä poistoilmaventtiili. Poistoilmaventtiilien muoto vaihtelee vähemmän kuin tuloilmaventtiilien. Tyypillisimmät tuloilmaventtiilit ovat melko saman näköisiä kuin kuvan poistoilmaventtiili. Jos tuloilmaa halutaan suunnata tehokkaammin, käytetään mm. hajottimia. Alhaalla on suutin-, kartio-, pyörre- ja seinähajotin (Fläkt Woods Oy 2006).



Äänen tehotaso L_w

Ilman suuntauslevyä

KTS KTSS	KORJAUS K_{okt} (dB)						
	Oktaavikaistan keskitäajuus (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
100	-2	2	1	-1	-4	-5	-11
125	4	5	3	-1	-11	-17	-29
160*	7	6	3	-2	-11	-19	-32
Tol. +/-	3	2	2	2	2	2	3

* vain KTS

Äänen tehotasot oktaavikaistoittain saadaan lisäämällä äänen kokonaispainetasoon L_{p10A} , dB(A), taulukossa esitetyt oktaavikaistojen korjaukset K_{okt} seuraavan kaavan mukaan:

$$L_{W_{okt}} = L_{p10A} + K_{okt}$$

Äänenvaimennus ΔL

KTS KTSS	Äänenvaimennus ΔL (dB)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
100	22	18	13	11	9	8	7	8
125	20	16	11	9	9	7	6	5
160*	18	14	10	9	9	7	6	6
Tol. +/-	6	3	2	2	2	2	2	3

* vain KTS

Keskimääräinen äänenvaimennus ΔL kanavasta huoneeseen sisältää liittyvän kanavan pääteväimennuksen kattoasennuksessa.

Kuva 7.5.2 Esimerkki tuloilmalaitteen tuotearvon esittämisestä (Fläktwoods KTS 125). Kyseessä on tavanomainen lautasventtiili, jossa ilmamäärää voi säätää kiertämällä venttiilin lautasesta. Venttiilin avaussäätö millimetreinä on esitetty suorilla viivoilla. Avauksista $s = 4$ mm on pienin arvo (kiinni) ja $s = 15$ mm on suurin arvo (auki). Päätelaitteen äänenvaimennusarvoa käytetään säätölaitteen ja puhaltimen äänilaskennassa mutta ei päätelaitteen äänilaskennassa.

7.6 Ilmavirtauksen ääni

Kanaviston ilmavirtauksessa syntyy ääntä, koska virtaus ei ole laminaarista vaan siinä on pyörteitä ja virtausnopeus on erilainen poikkipinnan eri kohdissa. Sileäpintaissä kanavissa ilmavirtauksen ääni on erityisen alhainen.

Ilmavirta aiheuttaa ääntä erityisesti silloin, kun se osuu epäjatkuvuuskohtaan kuten poikkipinnan muutoskohtaan, haaraan, mutkaan, säätölaitteeseen tai päätelaitteeseen. Mitä enemmän este aiheuttaa painehäviötä, sitä voimakkaampi ääni syntyy.

Geometrialtaan vakiona pysyvässä virtauskentässä virtausäänen äänitehotasoa voidaan arvioida kaavalla

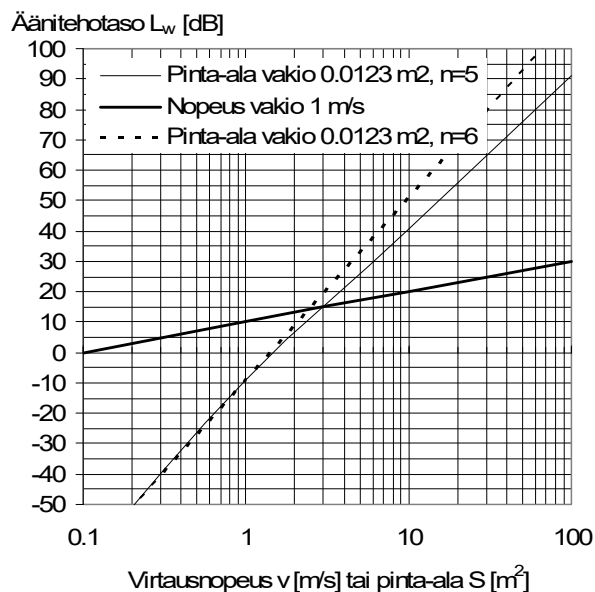
$$(7.6.1) \quad L_w = 10 \cdot \log_{10}(S) + 10 \cdot \log_{10}(v^n) + L_0$$

missä S [m²] on virtauksen poikkileikkauksen ala, v [m/s] on ilman virtausnopeus ja L_0 [dB] on tarkasteltavan kanavaosan geometriasta aiheutuva ominaisäänitehotaso, joka on vakio. Ominaisäänitehotason arvo voidaan määrittää mittaamalla äänitehotaso yhdellä virtausnopeudella. Kokonaisluku n ilmoittaa, miten äänitehotaso on verrannollinen virtausnopeuteen. Pyörteettömässä virtauksessa (pieni nopeus) käytetään $n=5$ ja pyörteellisessä $n=6$ (suuri nopeus).

Huomattakoon, että yhtälössä 7.6.1 ei ole taajuutta. Virtausäänen spektrin muoto ei siis riipu virtausnopeudesta.

Yhtälöllä ei tehdä absoluuttisia äänenkehityslaskelmia. Sitä sovelletaan, kun halutaan arvioida, miten virtausnopeuden ja pinta-alan muutokset vaikuttavat virtausäänen määrään. Kuvassa 7.6.1 on esimerkkilaskelma siitä, miten pinta-alan tai virtausnopeuden muutos vaikuttavat äänitehotasoon.

Oikein suunnitellussa ilmastointilaitoksessa virtausnopeudet paljaassa kanavistossa ovat niin pienet, että virtauksen kanavissa synnyttämä ääni on merkityksetön. Taulukossa 7.6.1 on esitetty suositeltavia virtausnopeuksia kanavistossa tavoitteellisen äänitason mukaan.



Kuva 7.6.1 Äänitehotaso virtausnopeuden tai pinta-alan muuttuessa toisen ollessa vakio. $L_0=10$ dB.

Taulukko 7.6.1 Suurin suositeltu ilman liikenopeus kanavassa [m/s], kun pyritään ohjearvon alittavaan äänitasoon.

	Ohjearvo L_{Aeq} [dB]		
	25	30	35
Kantikkaat kanavat			
Päätekanava (pääte-elimeen saapuva kanava)	2.5	3.0	4.0
Haarakanava (kanava josta päätekanava haaroittuu)	4.0	5.0	6.0
Pyöreät kanavat			
Päätekanava	3.5	4.0	5.0
Haarakanava	5.0	6.5	8.0

Lähde: Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C6:1984

7.7 Äänenvaimentimen äänenvaimennus

Merkittävin osa puhallinmelusta vaimennetaan yleensä ilmanvaihtokoneeseen integroiduilla päääänenvaimentimilla eli primääriäänenvaimentimilla. Primääriäänenvaimentimet ovat yleensä lamellivaimentimia, jossa ilma kulkee absorboivien levyjen (baffleiden) välisistä raoista, jotka ovat yleensä 10–20 cm leveitä. Jos ilmanvaihtokoneessa ei ole integroituna äänenvaimentimia, järjestelmässä tarvitaan yleensä erilliset äänenvaimentimet vaimentamaan puhaltimen ääntä, jotta runko- ja haarakanavisto ei olisi liian äänekkäs.

Kanavistoon asennetaan kanavaäänenvaimentimia eli sekundäärivaimentimia. Ne ovat joko sylinterimäisiä tai kantikkaita, jolloin korkeus on kanavan suuruinen mutta absorptiomateriaali sijaitsee sivusuunnassa (kuva 7.7.1). Äänenvaimentimen äänenvaimennusarvoista on esimerkki kuvassa 7.7.2.



Kuva 7.7.1 a) Suora lamellivaimennin, b) 90 asteen kulman sisältävä lamellivaimennin, c) sylinterimäinen kanavaäänenvaimennin. Lamellit ovat absorboivaa materiaalia. Suorassa äänenvaimentimessa absorptiomateriaali on seinämillä. Yleensä absorptiomateriaali on suojattu esimerkiksi reikäpellillä, jotta absorptiomateriaali ei repeytyisi ilmavirtauksessa tai kanaviston nuohouksessa.



Äänenvaimennus ΔL

Pituus 600 mm

KLT	ÄÄNENVAIMENNUS ΔL (dB)							
	Oktaavikaistan keskitajuus (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
100	9	17	19	36	47	44	40	31
125	11	15	16	35	44	45	42	32
160	15	13	12	32	40	43	37	26
200	15	6	11	23	30	39	29	22
250	12	4	8	17	24	28	15	16
315	5	3	6	15	20	18	14	14
400	5	2	5	15	18	16	15	19
Toler. \pm	6	3	2	2	2	2	2	3

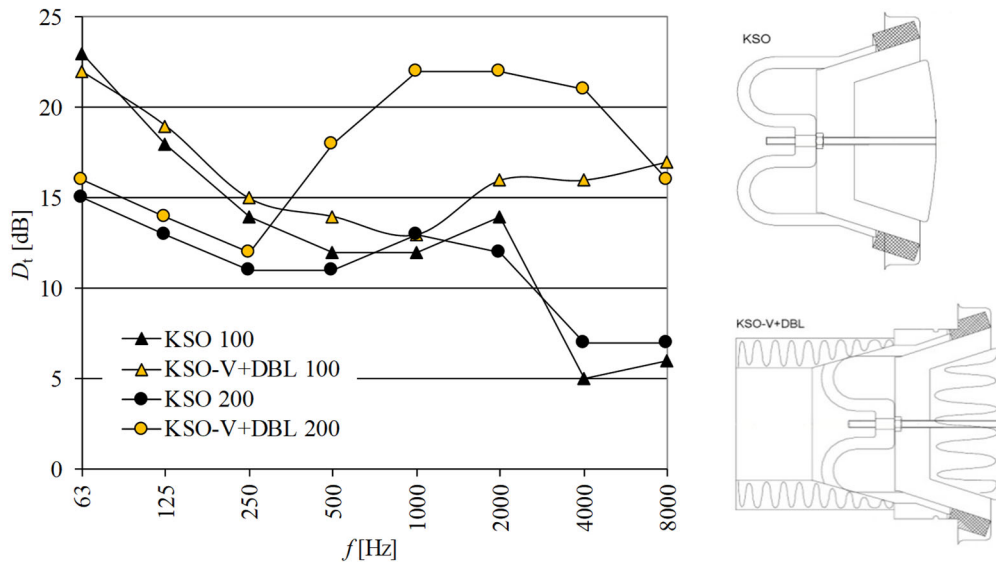
Kuva 7.7.2 Esimerkki kantikkaan äänenvaimentimen äänenvaimennusarvoista.

7.8 Päätelaitteen äänenvaimennus

Päätelaitteen äänenvaimennus koostuu neljästä tekijästä:

1. päättyvän kanavan päätevaimennus (**luku 7.15**): voimakas impedanssimuutos aiheuttaa heijastuksen, kun kanava päättyy, riippumatta siitä, onko päätelaitetta vai ei;
2. heijastus päätelaitteesta: jos päätelaitteesta on ilmavirtauseste, se heijastaa ääntä takaisin kanavan suuntaan;
3. absorptio päätelaitteesta: jos päätelaitteesta on ääntä absorboivia materiaaleja, ääntä vaimenee niihin osuessaan eikä etene tai heijastu takaisin kanavaan;
4. sijainti: nurkassa päätelaite aiheuttaa bassoilla voimakkaamman äänitehotason kuin jos se olisi keskellä (**luku 7.15**).

Jos ilmavirtausesteellä on laaja liikealue, voidaan äänenvaimennus ilmoittaa näillä ääriarvoilla erikseen (auki/kiinni). Kuvassa 7.8.1 on esitetty erään pääte-elimen päätevaimennusarvot kahdella eri kanavaliitännäkoolla. Niistä käy esiin sekä heijastus- että absorptiotekijän vaikutus.



Kuva 7.8.1 Erään valmistajan pääte-elimien äänenvaimennusarvoja kanavasta huoneeseen. Tuote on asennettu seinäpintaan ($\Omega=2\pi$). (Fläkt Woods Oy 2007)

7.9 Kanaviston haarojen äänenvaimennus

Puhaltimen ääni jakautuu kanavistojen haaroissa eri suuntiin, mikä on merkittävä äänenvaimennuslaskelman lopputulokseen vaikuttava tekijä. Äänen heijastuminen kanaviston haarassa on geometrioista ja taajuudesta riippuva ilmiö (**luku 7.14**) eikä yksinkertaisia laskentamenetelmiä äänenvaimennuksen laskelmiseksi koko taajuusalueella ole olemassa.

Kanavahaarojen aiheuttama äänenvaimennus D_d [dB] konehuoneelta tarkasteltavaan huoneeseen arvioidaan tämän vuoksi yksinkertaistetulla tavalla, jossa oletetaan äänen leviävän kanavistossa samassa suhteessa kuin ilmapirran. Kanaviston haarojen äänenvaimennus lähtöpisteestä A tarkastelupisteeseen B saadaan yhtälöstä

$$(7.9.1) \quad D_d = 10 \log_{10} \left(\frac{Q_A}{q_B} \right)$$

missä q_B [m^3/s] on ilmamäärä tarkastelupisteessä B ja Q_A [m^3/s] on ilmamäärä lähtöpisteessä. Yleensä melulaskelmissa lähtöpisteenä on joko puhallin tai säätöpelti.

7.10 Huonevaimennus

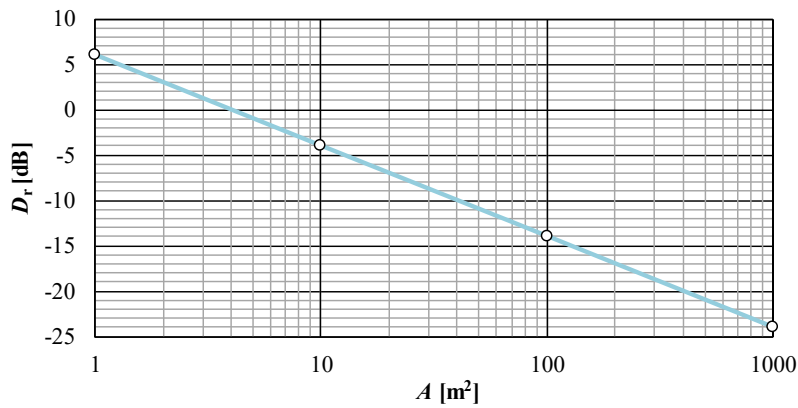
Huonevaimennus D_r lasketaan yhtälöllä

$$(7.10.1) \quad D_r = 10 \log_{10} \left(\frac{4}{A} \right)$$

missä A [m^2] on huoneen absorptiopinta-ala. Jos päätelaite sijaitsee hyvin lähellä jotain merkittävää oleskelupistettä, kuten puhujan paikkaa, voidaan päätelaitteen etäisyys kuulijaan ottaa lisäksi huomioon, jolloin huonevaimennus määritetään yhtälöllä

$$(7.10.2) \quad D_r = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\Omega \cdot r^2} + \frac{4}{A} \right)$$

missä r [m] on tarkastelupisteen etäisyys päätelaitteeseen ja Ω on avaruuskulma, johon päätelaite äänen säteilee. Suuntakertoimelle k käytetään arvoa 1, koska päätelaitteiden valmistajat eivät määritä suuntakertoimen arvoja ja ääni säteilee päätelaitteista yleensä melko pallosymmetrisesti.



Kuva 7.10.1 Huonevaimennus D_r absorptioalan funktiona.

7.11 Ilmanvaihtokonehuoneen äänenvaimennus

Konehuoneeseen muodostuva puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen äänenpainetaso $L_{p,f}$ [dB] arvioidaan diffuusin kentän yhtälöllä

$$(7.11.1) \quad L_{p,f} = L_{W,f} + 10 \log_{10} \left[\frac{4}{A} \right]$$

missä $L_{W,f}$ [dB] on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen äänitehotaso *vaipan läpi ympäristöön* ja A [m²] on konehuoneen absorptiopinta-ala. Äänitehotaso saadaan valitsemalla A-painotettu äänitehotaso L_{WA} puhaltimen toimintapisteen mukaan ja soveltamalla oktaavikaista-arvoja ”ympäristöön” (esim. kuva 7.3.1).

Äänenpainetaso konehuoneen naapurihuoneessa saadaan yhtälöllä

$$(7.11.2) \quad L_{p,2} = L_{p,1} - R + 10 \log_{10} \frac{S}{A_2}$$

missä $L_{p,1}$ [dB] on äänenpainetaso konehuoneessa ja R [dB] on konehuoneen ja sen naapurihuoneen välinen ilmaääneneristävyys.

7.12 Rajataajuus

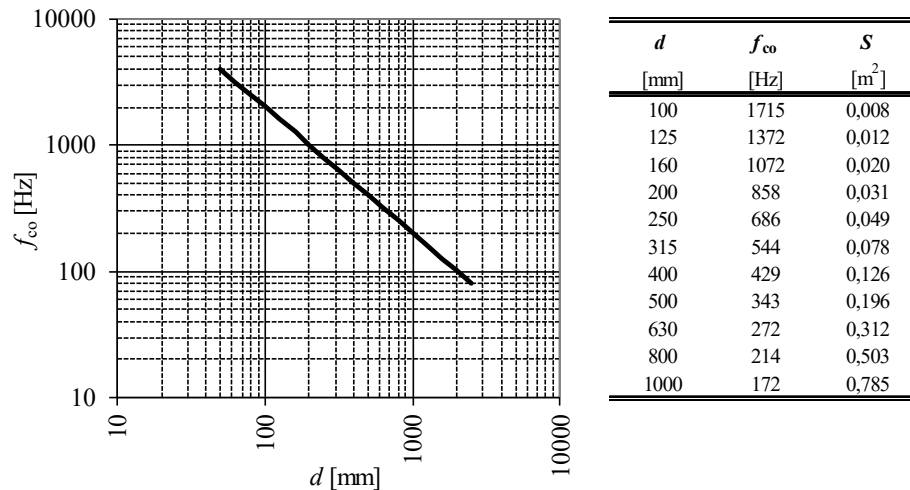
Äänen eteneminen kanavassa on 1-dimensioista rajataajuuteen f_{co} (*cut-off frequency*) asti. Rajataajuuden yläpuolella äänikenttä kanavassa on 3-dimensioinen. Rajataajuus esiintyy, kun kanavan poikkipinnan suurin dimensio d [m] on yhtä suuri kuin aallonpituuden puolikas

$$(7.12.1) \quad f_{co} = \frac{c_0}{2d}$$

missä c_0 on äänen nopeus [m/s]. Rajataajuudet pyöreiden kanavien kanavahalkaisijoille on esitetty kuvassa 7.12.1 huonelämpötilassa. Rajataajuus kasvaa kanavakoon pienentyessä.

Rajataajuuden yläpuolella

- rajataajuuden yläpuolella ääni etenee kanavasta huoneeseen lähes vaimentumattomana,
- Pieningin yhtälö ei toimi, koska se ei huomioi poikittaista äänikenttää,
- mutkat alkavat vaimentaa ääntä,
- suorat äänenvaimentimet eivät ole tehokkaita, koska ääni voi edetä vaimentumattomana niiden läpi.



Kuva 7.12.1 Pyöreän kanavan rajataajuus f_{co} kanavahalkaisijan d funktiona. Oikealla on taulukoitu kanavan pinta-ala S kanavan halkaisijan d [mm] mukaan.

7.13 Vaimennus kanavan poikkipinnan muutoksessa

Tässä luvussa esitetään fysikaalinen selitys sille, miten poikkipinnan muutos vaimentaa ääntä. Poikkipinnan muutoksen vaikutusta ei tarvitse huomioida ilmanvaihdon äänilaskelmissa.

Kun kanaviston poikkipinta-ala muuttuu pinta-alasta S_1 pinta-alaan S_2 , tapahtuu muutoskohdassa heijastus ja ääniteho vaimenee muutoskohdan takana. Äänenvaimennus tapahtuu eri tavoin rajataajuuden ylä- ja alapuolella.

Tapaus (i): $f > f_{co}$

Kun aallonpituus on pieni kanavan poikkipinnan dimensioihin nähden, kanavan keskiosassa kanavan suuntaan etenevä ääniaalto ei havaitse kanavan reunoja vaan aalto etenee kuin se olisi vapaassa kentässä. Jos kanavan pinta-ala kasvaa ($S_1 < S_2$), aaltorintaman muoto ei juurikaan muutu poikkipinta-alan muutoskohdassa vaan rintama etenee alasta 1 alaan 2 ilman heijastusta ja äänenvaimennus on nolla:

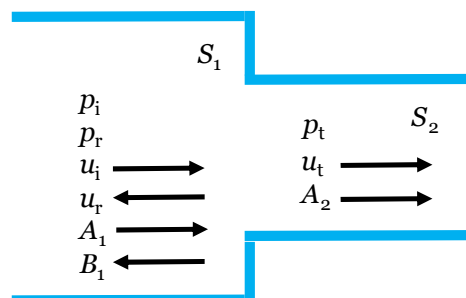
$$(7.13.1) \quad D_{ac} = 0$$

Jos sen sijaan pinta-ala pienenee ($S_1 > S_2$), osuu muutoskohtaan osuneesta äänestä S_1 osa S_1 - S_2 seinään ja osa S_2 etenee muutoskohdan ohi. Äänenvaimennukseksi saadaan

$$(7.13.2) \quad D_{ac} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)$$

Tapaus (ii): $f < f_{co}$

Rajataajuuden alapuolella aallonpituus on suuri kanavan poikkipinnan dimensioihin nähden. Aaltorintaman muoto muuttuu kokonaisuudessaan sen osuessa kanavan pinta-alan epäjatkuvuuskohtaan. Siksi joudutaan muuttamaan jatkuvuuksia, jotta tilavuusvirta pysyisi samana epäjatkuvuuskohtan eri puolin.



Kuva 7.13.1 Poikkipinta-alan muutoksen raja-alueen reunaehdot.

Kuvan 7.13.1 mukaan reunaehdoiksi saadaan äänenpaineelle

$$(7.13.3) \quad p_i + p_r = p_t$$

ja tilavuusvirralle

$$(7.13.4) \quad S_1 \mathbf{u}_i + S_1 \mathbf{u}_r = S_2 \mathbf{u}_t$$

Äänenpaineet ovat muotoa

$$(7.13.5) \quad p_i = A_1 \cos(\omega t - k_1 x)$$

$$(7.13.6) \quad p_r = B_1 \cos(\omega t + k_1 x)$$

$$(7.13.7) \quad p_t = A_2 \cos(\omega t - k_2 x)$$

ja hiukkasnopeudet muotoa

$$(7.13.8) \quad \mathbf{u}_i = \left(\frac{A_1}{\rho_0 c_0} \right) \cos(\omega t - k_1 x)$$

$$(7.13.9) \quad \mathbf{u}_r = \left(-\frac{B_1}{\rho_0 c_0} \right) \cos(\omega t + k_1 x)$$

$$(7.13.10) \quad \mathbf{u}_t = \left(\frac{A_2}{\rho_0 c_0} \right) \cos(\omega t - k_2 x)$$

Koska tasoallolle pätee ilmassa vapaassa heijastuksettomassa äänikentässä

$$(7.13.11) \quad \frac{p}{u} = \rho_0 c_0$$

saadaan

$$(7.13.12) \quad \left(\frac{S_1}{\rho_0 c_0} \right) p_i - \left(\frac{S_1}{\rho_0 c_0} \right) p_r = \left(\frac{S_2}{\rho_0 c_0} \right) p_t$$

koska heijastuneen äänen hiukkasnopeusvektori osoittaa vastakkaiseen suuntaan kuin tulevan äänen. Asetetaan nyt $x=0$ ja $t=0$, jolloin kosinitermi asettuvat ykköseksi. Tämän johdosta saadaan äänenpaineen ja hiukkasnopeuden reunaehdot uuteen muotoon, jotka riippuvat vain amplitudeista ja pinta-aloista

$$(7.13.13) \quad A_1 + B_1 = A_2$$

$$(7.13.14) \quad \frac{A_1}{S_1} - \frac{B_1}{S_1} = \frac{A_2}{S_2}$$

Koska äänitehosaadaan vapaassa kentässä äänenpaineesta yhtälöllä

$$(7.13.15) \quad W = IS = \frac{p^2}{\rho_0 c_0} S$$

voidaan läpäisykertoimeksi johtaa yhtälö

$$(7.13.16) \quad \tau = \frac{4S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2}$$

ja äänenvaimennukseksi

$$(7.13.17) \quad D_{ac} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{(S_1 + S_2)^2}{4S_1S_2} \right]$$

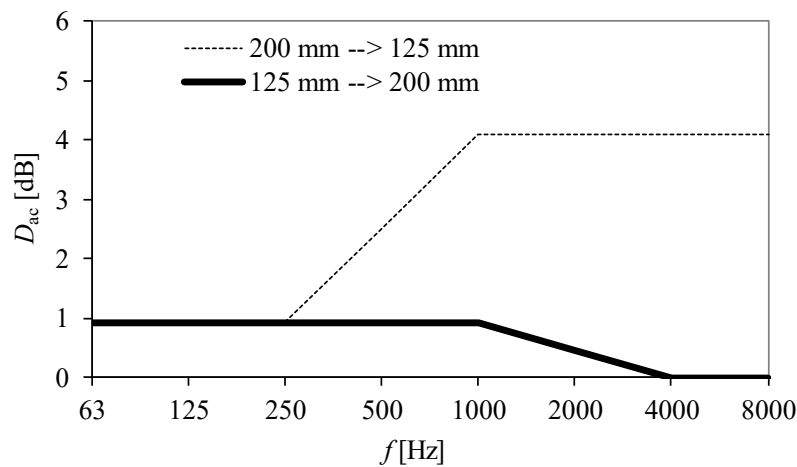
Sama yhtälö pätee sekä kanaviston pinta-alan kasvaessa että pienentyessä.

Tapaus (iii): $f \approx f_c$

Rajataajuuden alueella äänenvaimennus arvioidaan interpoloimalla.

Kuvassa 7.13.2 on esitetty äänenvaimennuslaskelmat kanaviston pienentyessä tai suurentuessa. Suurilla taajuuksilla äänenvaimennusta syntyy, kun siirrytään suuremmasta pienempään kanavaan, koska osa äänestä osuu seinämään ja heijastuu takaisin.

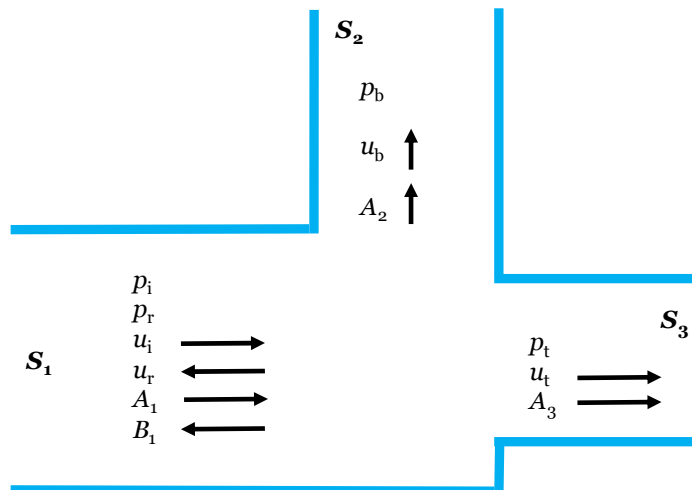
Yleensä poikkipinta-aloja pyritään muuttamaan liukuvasti (transitioelementti, suppari) eikä yhtäkkisesti, jotta välttyttäisiin voimakkaalta painehäviöiltä ja virtausmelulta. Tämän luvun yhtälöt eivät päde, jos muutoskohta on liukuva.



Kuva 7.13.2 Äänenvaimennus pyöreän ilmanvaihdon kanavan yhtäkkisessä muutoskohdassa, kun kanava pienenee (ohut viiva) tai kasvaa (paksu viiva). Mitat ovat kanavahalkaisijoita.

7.14 Vaimennus kanavan yksittäisessä haarassa

Yksittäisen haaran tuottaman äänenvaimennuksen tarkastelussa lähdetään kuvan 7.14.1 mukaisesta tilanteesta. Siinä oletetaan, että lähtevän haaran pinta-ala ja haaraumien yhteenlaskettu pinta-ala ovat likimain samat, eli $S_1 \approx S_2 + S_3$. Muussa tapauksessa pitää huomioida edellä esitetty pinta-alan muutoskaava tässä esitettyjen lisäksi.



Kuva 7.14.1 Tarkastellaan äänen siirtymistä haarasta 1 haaraan 2.

Suoritetaan jälleen tarkastelu rajataajuuden f_{co} ylä- ja alapuolella.

Tapaus (i): $f > f_{co}$

Suurilla taajuuksilla kaikki äänienergia jatkaa matkaansa haaroittuviin kanaviin 2 ja 3 ja äänenvaimennukseksi haaraan 2 saadaan

$$(7.14.1) \quad D_{d,2} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum S - S_1}{S_2} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_2 + S_3}{S_2} \right)$$

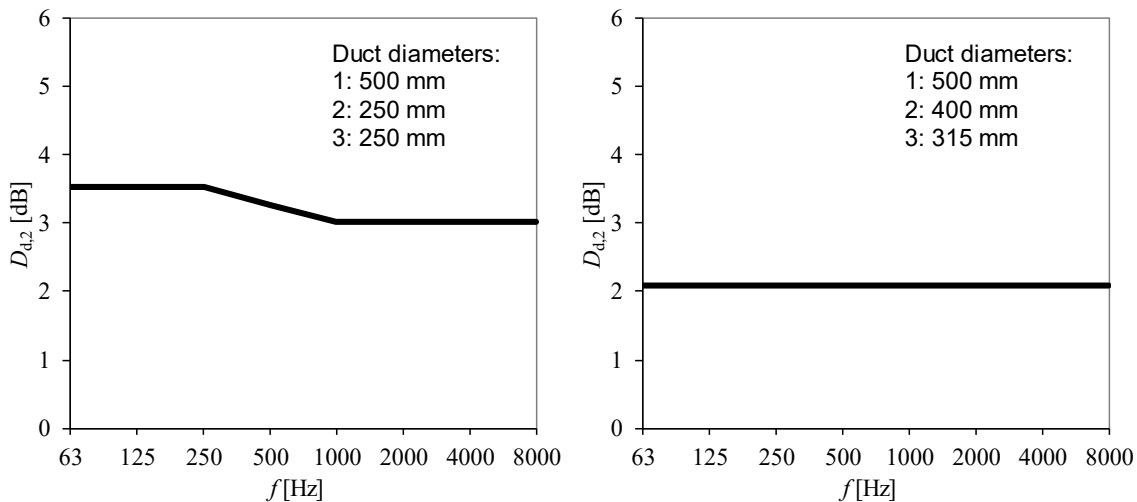
Tapaus (ii): $f < f_{co}$

Pienillä taajuuksilla äänenvaimennus haaraan 2 on joko sama kuin edellä tai hieman sitä suurempi

$$(7.14.2) \quad D_{d,2} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{(\sum S)^2}{4S_1S_2} \right]$$

Kuvassa 7.14.2 on demonstroitu haaran vaimennusta. Jos haarojen 2 ja 3 pinta-ala on pienempi tai suurempi kuin haaran 1 pinta-ala, nähdään pienillä taajuuksilla suurempi vaimennus kuin suurilla taajuuksilla, koska impedanssi muuttuu.

Jos kokonaispinta-ala ei oleellisesti muutu haaran jälkeen ($S_1 \approx S_2 + S_3$) voidaan koko taajuusalueella käyttää yhtälöä 7.14.2.



Kuva 7.14.2 Äänenvaimennus haarassa kahdessa perustilanteessa. Vasemmalla kokonaispinta-ala puolittuu haaran jälkeen ja oikealla se ei muutu lainkaan.

7.15 Päättävän kanavan päätevaimennus

Kun kanava päättyy huoneeseen, poikkipinta-alan muutos on erittäin suuri. Jos kanavan päättymiskohdassa ei ole päätte-elintä, päättävän kanavan päätevaimennus $D_{t,0}$ lasketaan yhtälöstä

$$(7.15.1) \quad D_{t,0} = 10 \cdot \log_{10} \left[1 + \left(\frac{c_0}{4\pi f} \right)^2 \frac{\Omega}{S} \right]$$

missä c_0 [m/s] on äänen nopeus, f [Hz] on taajuus, Ω on äänen säteilyn avaruuskulma ja S [m²] on päättävän kanavan pinta-ala.

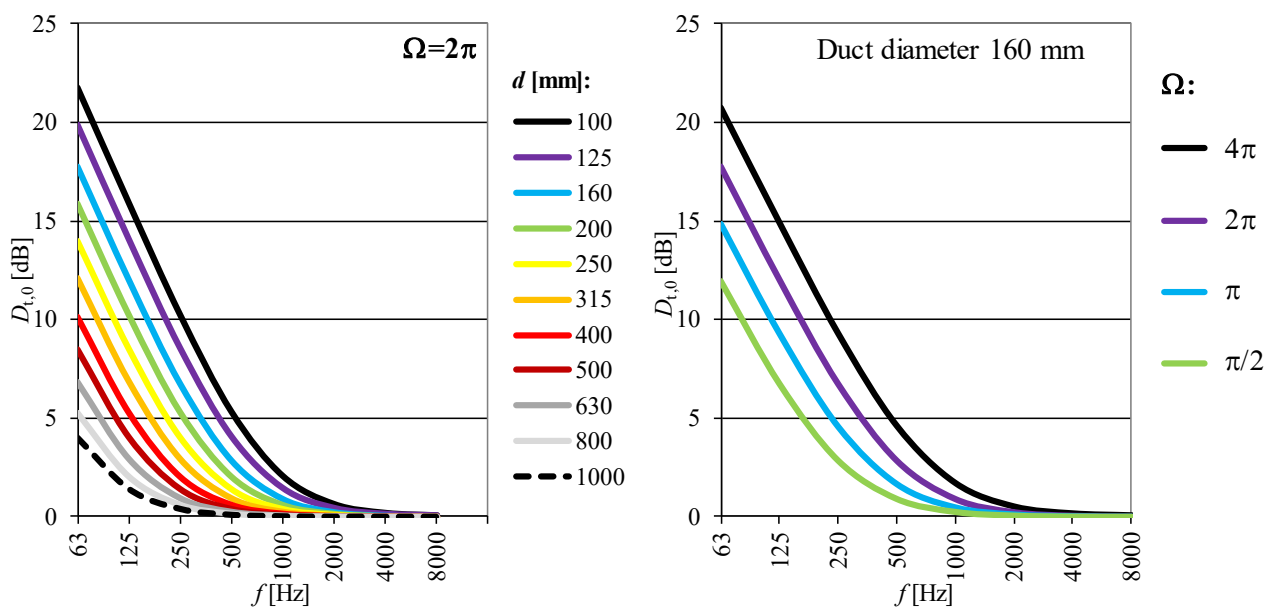
Avoimen kanavan päätevaimennuksen riippuvuus taajuudesta ja kanavan poikkipinta-alasta on esitetty kuvassa 7.15.1.

Rajataajuutta selvästi pienemmillä taajuuksilla ($f < f_{co}$) äänenpaine on vakio koko kanavan poikkipinta-alalla ja poikkipinnan muutos vaikuttaa kanavassa etenevään tasoaaltoon. Kanavan päätekohtassa on voimakas impedanssin muutos ja tästä aiheutuu heijastus joka näkyy huoneeseen äänenvaimennuksena.

Kanavan päässä tapahtuu myös diffraktio, jonka voimakkuus riippuu taajuudesta. Päätekohtassa diffraktio vaikuttaa kanavassa etenevän tasoallon siihen osaan, joka sijaitsee alle puolikkaan aallonpituuden päässä kanavan reunasta. Pientaajuuksilla kanavan halkaisija on aallonpituuteen nähden pieni, jolloin diffraktio vaikuttaa koko kanavan poikkipinta-alalle ja diffraktio on erittäin voimakas: ennen muutoskohtaa kanavassa etenee tasoaalto ja muutoskohdan jälkeen etenee palloaalto. Sen sijaan suurtaajuuksilla diffraktiota tapahtuu kanavan päässä vain kanavan reuna-alueella ja tasoallon keskiosa jatkaa huoneeseen ilman, että kanavan päässä tapahtuu aaltomuodon muutosta.

Jos kanavan pää on nurkassa ($\Omega = \pi/2$), $D_{t,0}$ pienenee, koska poikkipinta-alan muutos ei ole yhtä jyrkkä kuin kanavan pään ollessa huoneen keskellä ($\Omega = 4\pi$). Suurtaajuuksilla kanavan pään sijainti ei vaikuta mitään.

Päätelaitteiden äänenvaimennuksen tuotearvoon sisältyy tässä kuvattu avoimen kanavan pään päätevaimennus $D_{t,0}$ vaikka se ei johdu itse päätelaitteesta vaan kanavan päättymisestä.



Kuva 7.15.1 (a) Avoimen kanavan päätevaimennus $D_{t,0}$ seinäpinta-asennuksella ($\Omega = 2\pi$). (b) Päätelaitteen sijainnin eli avaruuskulman vaikutus avoimen kanavan päätevaimennukseen.

7.16 Kanavaseinämän äänenvaimennus

Ilmanvaihtokanavan seinät ovat esimerkiksi sinkittyä terästä tai polypropeenaa. Seinissä tapahtuu sekä äänen absorptiota että äänen läpäisyä kanavan läpi.

Äänenvaimennus on tyypillisesti seuraava (Halme ja Seppänen, 2003):

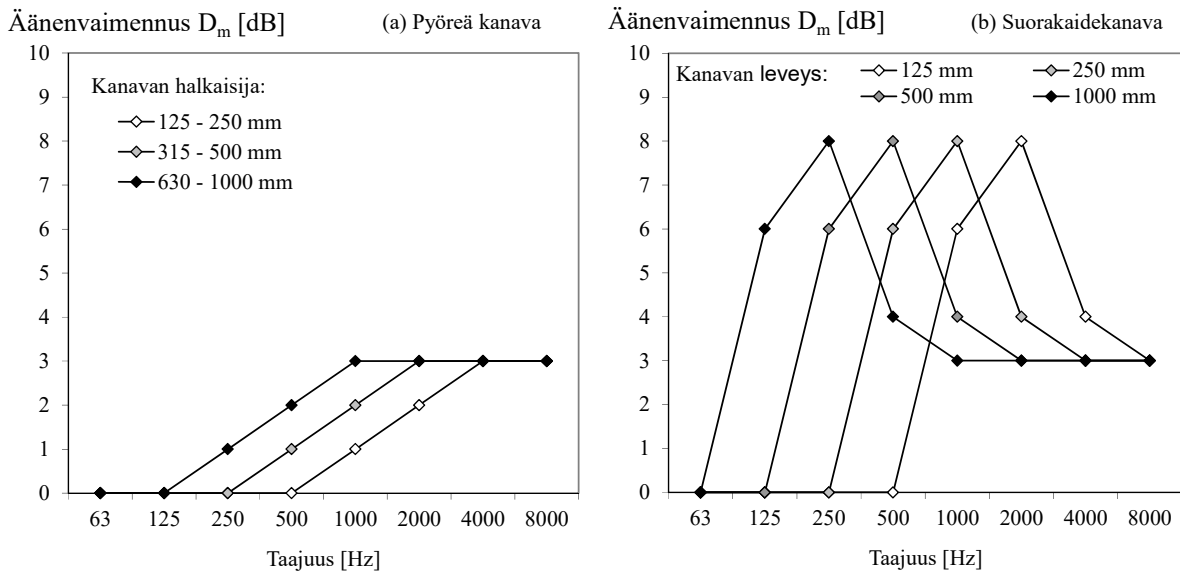
- pyöreissä kanavissa 0.30 dB/m taajuudella 63 Hz pienentyen arvoon 0.05 dB/m taajuudella 8 kHz,
- suorakaidekanavissa 0.60 dB/m taajuudella 63 Hz pienentyen arvoon 0.05 dB/m taajuudella 8 kHz,
- villakerroksella ja ulkopuolisella peltikerroksella eristetyssä suorakaidekanavassa 1.20 dB/m taajuudella 63 Hz pienentyen arvoon 0.05 dB/m taajuudella 8 kHz,

Kanavaseinämän äänenvaimennus jätetään yleensä laskelmissa huomioimatta.

7.17 Mutkan äänenvaimennus

Kuvassa 7.17.1 on esitetty vaimentamattoman mutkan äänenvaimennusarvoja. Kanavan mutkan tuottamalle äänenvaimennukselle D_m ei ole yksinkertaista laskentakaavaa. Rajataajuuden alapuolella ($f < f_{co}$) ääni taipuu diffraktion vuoksi helposti mutkan ohi ja mutkan äänenvaimennus on pieni. Suurilla taajuuksilla ($f > f_{co}$) ääni törmää kanavan seinään ja pääosa äänestä heijastuu takaisin ja vain pieni osa taipuu tai heijastuu mutkan taakse.

Ilmastoinnin äänenvaimennuslaskelmissa mutkien vaikutus äänitehon alenemiseen jätetään usein huomioimatta. Taustalla on oletus, että äänenvaimennus ei ole ongelma suurilla taajuuksilla, koska vaimennusta on kanavistossa jo muutenkin runsaasti. Mutkavaimennuksen laiminlyönti äänitasolaskelmissa voi aiheuttaa näennäistä lisävaimennuksen tarvetta toisaalla.



Kuva 7.17.1 (a) Pyöreästä kanavasta tehdyn 90 asteen mutkan äänenvaimennus. Pyörityssäteen tulee olla pienempi kuin 2 kanavan halkaisijaa, jotta virtausääni ei olisi liian voimakas. (b) Suorakaidekanavasta tehdyn 90 asteen mutkan äänenvaimennus (Lähde: VDI 2081:1983).

7.18 Passiivisen äänenvaimentimen toiminta

Passiivinen äänenvaimennin on elementti, jossa on huokoista ääntä absorboivaa materiaalia joko sisäseinillä tai sen keskiosissa. Tyypilliset rakenteet on esitetty kuvassa 7.18.1. Kuvat 7.18.1 ja 7.18.2 esittävät äänenvaimentimien perusparametrien vaikutuksia äänenvaimennukseen. Äänenvaimennus paranee, kun

- absorptiomateriaalin absorptiosuhde paranee,
- äänenvaimennin pitenee,
- vapaan poikkipinnan osuus pienenee ja
- äänenvaimennin on mutkamallinen (kulmavaimennin).

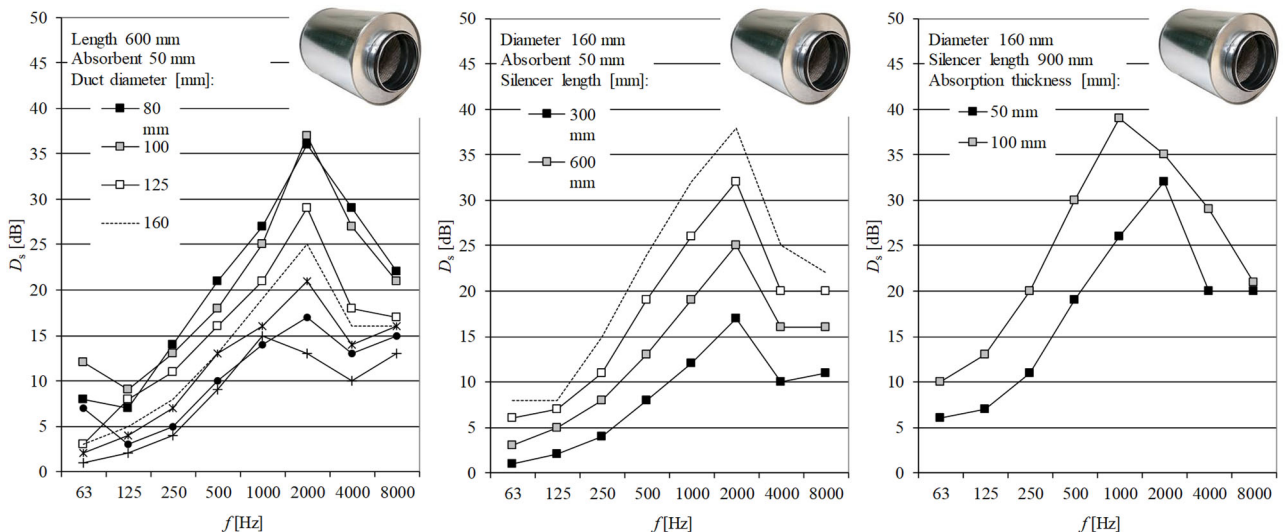
Absorptiomateriaalin paksuuden kasvatus havaitaan erityisesti pienten taajuuksien äänenvaimennuksen paranemisena. Poikkipinnan osuuden pienennys kasvattaa painehäviötä.

Lamelliäänenvaimentimen äänenvaimennus ei merkittävästi riipu leveydestä, toisin sanoen lamellien lukumäärästä, koska äänen kulkureitin geometria ja kanavan absorptioehdot säilyvät samana.

Kulman muotoinen lamelliäänenvaimennin vaimentaa 0–8 dB enemmän ääntä kuin saman kokoinen suora äänenvaimennin. Vähiten kulma vaikuttaa pienillä taajuuksilla.



Kuva 7.18.1 Tavanomaisia passiivisia äänenvaimentimien (ÄV) tyyppejä: suorakulmainen lamelli ÄV, kulmaan asennettava lamelli ÄV, suora kanava ÄV, käyrä kanava ÄV, matala kanava ÄV, matala kulma kanava ÄV.



Kuva 7.18.2 Suoran kanavaäänenvaimentimen äänenvaimennuksen riippuvuus eri tekijöistä. a) Kanavahalkaisijan vaikutus, kun vaimentimen pituus on $L=600$ mm ja seinämässä on 50 mm mineraalivilla. b) Äänenvaimentimen pituuden vaikutus, kun seinämässä on 50 mm mineraalivilla ja kanavahalkaisija on 160 mm. (c) Absorptiomateriaalin paksuuden vaikutus, kun vaimentimen pituus on 900 mm ja kanavahalkaisija on 160 mm (Fläktwoods Oy, 2019).

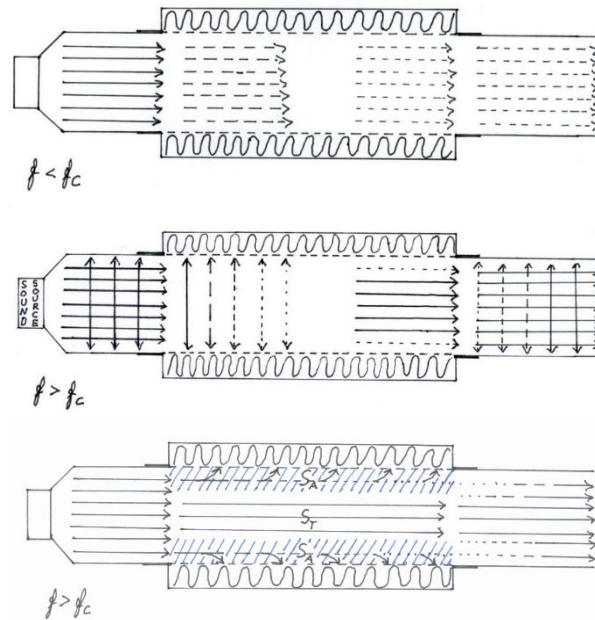
Rajataajuuden alapuolella ääni etenee ilmapirran tavoin kanavan suunnassa eikä kanavan suuntaan nähden poikittaista aaltoliikettä ole (kuva 7.18.3a). Koska äänen aallonpituus on huomattavasti suurempi kuin kanavan halkaisija, vallitsee sama äänenpaine kanavan koko poikkipinta-alalla.

Rajataajuuden yläpuolella kanavassa etenee sekä tasoaalto (kanavan pituussuuntainen) että poikittainen aalto (kuva 7.18.3b). Äänenvaimennusmekanismi pitää tällöin huomioida erikseen pituus- ja poikittaissuunnissa. Käytännössä poikittainen ääniaalto vaimenee hyvin nopeasti tavanomaisissa äänenvaimentimissa, jolloin äänenvaimentimeen jää vain pituussuuntainen äänikenttä. Poikittainen äänikenttä kehittyy jälleen äänen saavuttua kovaseinämäiseen kanavaan.

Pituussuuntaisen äänikentän äänenvaimennuksella on suurin merkitys äänenvaimentimen äänenvaimennusarvoon. Äänenvaimennus D voidaan ennustaa noin 2000 Hz asti kohtalaisella tarkkuudella *Piening*in yhtälöllä

$$(7.18.1) \quad D_{\text{pit}} = 1.5 \cdot \frac{P}{S} \cdot \alpha \cdot L$$

missä P [m] on kanavan piirin mitta, S [m²] on kanavan poikkipinta-ala, α on seinämällä olevan materiaalin taajuusriippuva absorptiosuhde ja L [m] on äänenvaimentimen pituus. Taajuuden 2000 Hz yläpuolella äänenvaimennus heikkenee voimakkaasti taajuuden kasvaessa. Mitä lyhyempi on aallonpituus, sitä suurempi osa tasoaalosta vaimentimen keskiosassa voi edetä äänenvaimentimen läpi osumatta absorboiviin seinämiin (7.18.3c).



Kuva 7.18.3 Vasemmalla äänilähde syöttää kanavaan ääntä. Keskellä äänenvaimennin ja sen molemmiin puolin kovaseinäistä kanavaa. (a) Rajataajuuden f_c alapuolella vallitseva äänikenttä. (b) Rajataajuuden yläpuolella vallitseva äänikenttä. (c) Tasoallon absorboituminen rajataajuuden yläpuolella. Vyöhykkeellä S_T tasoalto etenee vaimentimen läpi ja vyöhykkeellä S_A tasoalto absorboituu seinämiin.

7.19 Reaktiivisen äänenvaimentimen toiminta

Reaktiivisten vaimentimien tyypit ovat kammio-, Helmholtz- ja neljännesaaltoresonaattori. Aidosti reaktiivisen äänenvaimentimen äänenvaimennus perustuu geometrian aiheuttamaan reaktiiviseen impedanssiin. Vaimennus saavuttaa maksimin taajuudella (tai taajuuksilla), jossa kammion sisämitat aiheuttavat resonanssin. Antiresonanssissa vaimennusta ei esiinny. Reaktiiviset vaimentimet toimivat tehokkaimmin rajataajuuden alapuolella eli kun pääkanavassa etenee tasoalto.

Reaktiivisia äänenvaimentimia käytetään tavanomaisissa ilmastointijärjestelmissä harvoin, koska järjestelmien tuottama melu voidaan vaimentaa passiivisilla äänenvaimentimilla. Reaktiivisia vaimentimia käytetään erityisesti jaksollisten ja erittäin pientaajuisten äänten (alle 50 Hz) vaimentamiseen, koska passiiviset vaimentimet eivät tuota riittävää äänenvaimennusta kohtuullisilla ainevahvuuksilla ja painehäviöillä. Reaktiivisia vaimentimia käytetään yleensä pakokaasukanavissa vaimentamaan koneesta tulevia kapeakaistaisia herätteitä. Reaktiivinen vaimennin kestää hyvin suuria virtausnopeuksia, kemikaaleja ja korkeita lämpötiloja toisin kuin passiiviset vaimentimet.

Reaktiivisiin vaimentimiin voidaan asentaa huokoisia materiaaleja, jolloin äänenvaimennus muuttuu laajakaistaisemmaksi mutta toisaalta resonanssitaajuudella äänenvaimennus heikkenee.

Kammioresonaattori (kuva 7.19.1) koostuu tulevasta kanavasta, jonka pinta-ala on S_1 , laajennusosasta, jonka pituus on L ja poikkipinta-ala S_2 , sekä lähtevästä kanavasta, jonka pinta-ala oletetaan tässä samaksi kuin tulevan kanavan. Äänenvaimennus voidaan arvioida pienillä taajuuksilla ($f < f_{co}$) yhtälöllä

$$(7.19.1) \quad D = 10 \cdot \log_{10} \left[1 + \left(\frac{S_1}{2S_2} - \frac{S_2}{2S_1} \right)^2 \sin^2(kL) \right]$$

Rajataajuuden yläpuolella vaimennus on vähäistä ja aiheutuu kanavan poikkipinta-alan muutoksesta.

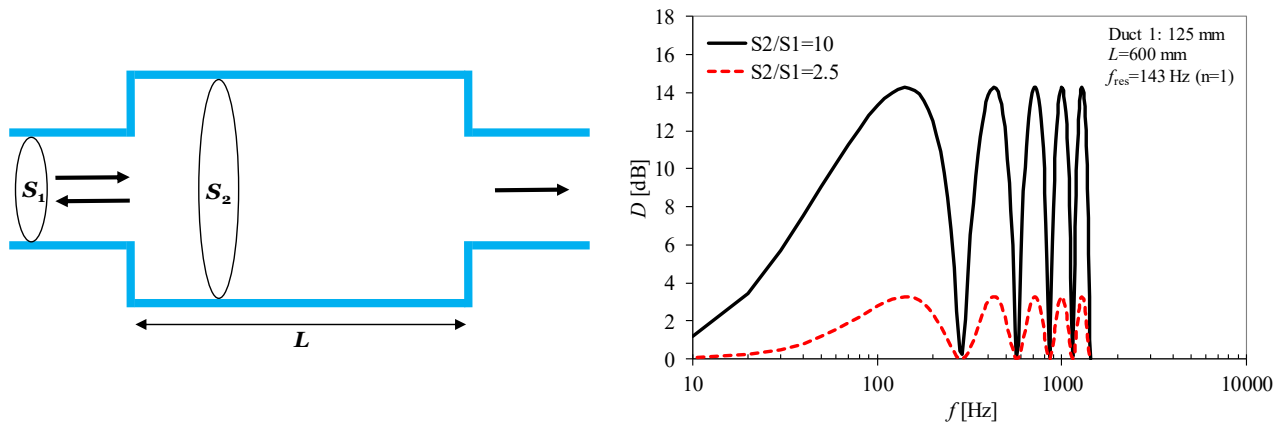
Kuvassa 7.19.1 on esitetty eräällä geometrialla varustetun kammion laskennallinen äänenvaimennus. Äänenvaimennus riippuu voimakkaasti taajuudesta. Ensimmäinen vaimennusmaksimi havaitaan resonanssitaajuudella, jossa kammion pituus vastaa aallonpituuden neljäsosaa. Resonanssitaajuus esiintyy tämän parittomilla monikerroilla

$$(7.19.2) \quad f_{res} = \frac{nc_0}{4L}; \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Äänenvaimennuksen maksimiarvo resonanssitaajuudella riippuu pinta-alojen suhteesta

$$(7.19.3) \quad D_{max} \approx 20 \log_{10} \frac{S_2}{2S_1}$$

Arvo kasvaa aina 6 dB suhteen S_2/S_1 kaksinkertaistuessa.

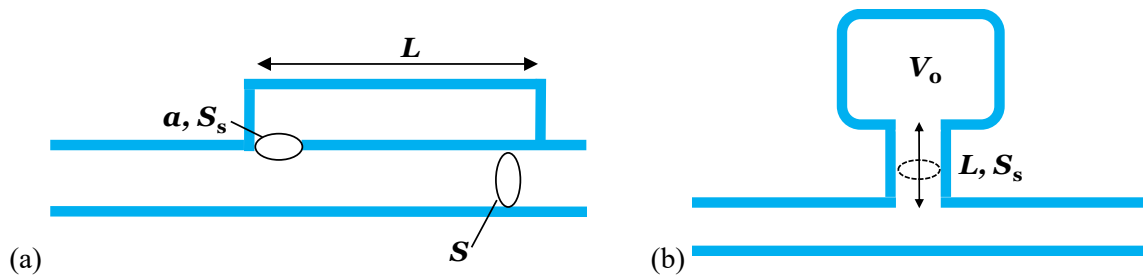


Kuva 7.19.1 (a) Kammiovaimennin ja (b) esimerkki sen äänenvaimennuksesta.

Sivuhaaralla tarkoitetaan kuvan 7.19.2 mukaisia tilanteita, jossa kanavan kyljessä on reaktiivisen impedanssin omaava elementti. Oletetaan, että elementin suuaukko on huomattavasti aallonpituutta pienempi, eli $ka \ll 1$, missä k on aaltoluku ja a on suuaukon halkaisija. Äänenvaimennus on tällöin

$$(7.19.4) \quad D = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{S_s \rho_0 c_0}{2SZ_s} \right|^2$$

Yhtälö pätee mille tahansa sivuhaaralle, jonka tuloimpedanssi Z_s tunnetaan. Yleisimpien sivuhaarojen Z_s on johdettu alla. Äänenvaimennus on suurimmillaan, kun impedanssi on nolla. Tämä vallitsee, kun sivuhaarassa on resonanssi. Kaavan mukaan vaimennus on äärettömän suuri resonanssin kohdalla mutta käytännössä elementissä on aina häviöitä, joten äänenvaimennus ei yleensä ylitä 20 dB:ä.



Kuva 7.19.2 (a) Neljännesaaltoresonaattori. (b) Helmholtz -resonaattori.

Neljännesaaltoresonaattorissa (kuva 7.19.2a) on sivuhaara, jonka pituus on L ja sen poikkipinta-ala on vakio. Sen tuloimpedanssi on

$$(7.19.5) \quad \mathbf{Z}_s = -i\rho_0 c_0 \cot kL$$

Suurin vaimennus saadaan, kun tämä on nolla, mikä toteutuu ehdolla

$$(7.19.6) \quad kL = \frac{n\pi}{2}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Alin resonanssitaajuus tapahtuu aallonpituudella $\lambda = L/4$.

Helmholz-resonaattori (kuva 7.19.2b) on jousi-massa -systeemi, jossa suuaukon ilma muodostaa massan ja sen takana olevan tiiviin kammion ilma jousen. Oletetaan resonaattorin mittojen olevan huomattavasti aallonpituutta pienempiä, jolloin kaikissa sen osissa vaikuttaa vakioäänepaine ja suuaukon massa käyttäytyy yhtenäisenä massana (*lumped mass system*). Helmholz-resonaattorin tuloimpedanssi on muotoa

$$(7.19.7) \quad \mathbf{Z}_s = \frac{p_s}{u_s} = i\omega\rho_0 L + \frac{\rho_0 c_0^2 S_s}{i\omega V_0}$$

missä L [m] on suuaukon pituus, S_s [m²] on suuaukon poikkipinta-ala ja V_0 [m³] on suuaukon takana olevan kammion tilavuus. Maksimaalinen vaimennus saavutetaan ominaistajuudella

$$(7.19.8) \quad f_{res} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_s}{LV_0}}$$

Riippuen siitä, miten resonaattorin suuaukko liittyy kanavaan ja resonaattoritulavuuteen muodostuu suuaukon molempiin päihin lähikenttä, joka akustiselta kannalta kasvattaa kurkun pituutta L määrällä ΔL_i kurkun kummassakin päässä. Lähikentän merkitys on suuri, jos kurkun poikkipinnan halkaisija d alkaa olla kurkun pituuden L luokkaa. Termiä ΔL kutsutaan päätykorjaukseksi (*end correction*). Kurkun tehollinen pituus L' on siten

$$(7.19.9) \quad L' = L + \Delta L_1 + \Delta L_2$$

Päätykorjaus riippuu monesta tekijästä mutta poikkipinnaltaan pyöreässä kurkussa riittävä tarkkuus saavutetaan kun tunnetaan kurkun halkaisija d . Jos kurkun suuaukko on seinämässä (*baffle*), mikä on yleisin tilanne kanavassa, voidaan käyttää yhtälöä

$$(7.19.10) \quad \Delta L = 0.82 \frac{d}{2}$$

Päätykorjauksen vuoksi Helmholz-resonaattorin suuaukon pituus voi olla olematon, koska suuaukon efektiivinen pituus riippuu halkaisijasta. Pelkästään reikä kanavan seinämässä (seinämävahvuus on useimmiten vain $L=0.005$ m) ja sen takana oleva äärellinen tilavuus muodostavat Helmholz-resonaattorin.

Äskeisissä tarkasteluissa komponentit oletettiin kokonaan reaktiivisiksi eli spesifinen impedanssin reaali-osa oli nolla. Imaginääriosa riippui voimakkaasti taajuudesta ja tietyillä erikoistaajuuksilla impedanssi vaipti nolnaan.

Käytännössä mikään reaalinen systeemi ei ole häviötön, sillä kaikissa seinämissä on jonkin verran absorptiota, äänenläpäisyä ja kurkkujen seinämällä tapahtuu kitkaa ilmapirtauksen hankautuessa seinämiä vasten. Myös kaasussa tapahtuu lämpöhäviöitä. Nämä häviöt ovat resistiivisiä eli ääni muuttuu lämmöksi.

Esimerkiksi Helmholz-resonaattorin kurkkuosan kitka pienentää hiukkasnopeutta ja tuloimpedanssiksi saadaan

$$(7.19.11) \quad \mathbf{Z}_s = R + i\omega\rho_0 L + \frac{\rho_0 c_0^2 S_s}{i\omega V_0}$$

Häviöiden vuoksi maksimaalinen vaimennus resonanssitaajuudella pienenee mutta vaimennusta on myös antiresonansseissa. Vaimennus on siten laajakaistaisempaa eli vaimentimen kaistanleveys B kasvaa.

KIRJALLISUUS

Bies DA, Hansen CH, Engineering Noise Control, 2nd Ed, E&FN Spon, New York, USA, 1997.

Boden H et al., Ljud och Vibrationer, Kungl Tekniska Högskolan, Marcus Wallenberg Laboratoriet, Stockholm, Sweden, 2002.

Halme, A. & Seppänen, O. (2002). Ilmastoinnin ääniteknikka. Jyväskylä, Suomen LVI-liitto ry.

Holmberg, R. & Laine, J. 1984. Ilmanvaihtolaitoksen äänitekniset perusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 360.

Hongisto, V. (2004). Simple model for predicting the insertion loss of a straight silencer. Acta Acust Acust 90 976-981.

LVI 30-10333. 2002. Ilmanvaihtolaitteiden äänitekninen suunnittelu ja äänen vaimennus asuinrakennuksissa. Helsinki, Rakennustieto Oy.

Puhallintekninen käsikirja, Toim. Olli Pukkila, Ilmateollisuus Oy Teollisuuspuhaltimet, 1986.

RIL 129 (2003). Ääneneristyksen toteuttaminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry., Helsinki.

RIL 243-1-2007 (2007). Rakennusten akustinen suunnittelu. Perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry., Helsinki.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa C6:1984, Ohjeet, Asuinrakennusten LVI-laitteiden ääniteknikka, Ympäristöministeriö, Helsinki (kumottu).

VDI 2081 Geräuscherzeugung und Lärminderung in Raumluftechnischen Anlagen, Association of German Engineers, 1983 (vanhentunut versio).

8 Ääneneristys rakennuksessa

8.1 Sivutiesiirtymät

Rakennuksessa huoneiden välillä mitattu ilmaääneneristävyys on käytännössä aina alhaisempi kuin huoneita erottavan rakennusosan laboratorioarvo, sillä ääntä siirtyy myös rakennusosaa sivuavia rakenteita (ulkoseinät, sisäseinät, välipohjat), ilmareittejä pitkin (ilmastointikanavat, putkiläpiviennit, raot) ja LVIS-putkistojen rakenneseinämiä pitkin. Sivutiesiirtymää voi tapahtua myös ulkokautta ilmaitse rakenteiden läpi, jos esimerkiksi viereisten huoneistojen identtiset ulko-ovet tai ikkunat sijaitsevat lähekkäin ja niiden ilmaääneneristävyys on (esimerkiksi resonanssitaajuudella) alhainen.

Sama koskee askelääneneristävyyttä sillä erotuksella, että sivutiesiirtymät tapahtuvat vain rakenteita pitkin.

Huoneesta toiseen siirtyy em. sivuteitä pitkin usein enemmän äänienergiaa kuin huoneita erottavan rakenteen läpi. Tämä toteutuu, jos ilmaääneneristävyys kohteessa on yli 3 dB pienempi kuin niitä erottavan rakennusosan ilmaääneneristävyys. Ilmareittejä pitkin tapahtuvan sivutiesiirtymän vaimentaminen on yleensä helppoa (tiivistys, ilmanvaihtokanaviston äänenvaimennus) mutta rakenteellisten sivutiesiirtymien vähentäminen valmiissa kohteessa on yleensä vaikeaa tai joskus jopa mahdotonta. Tämän vuoksi sivutiesiirtymät tulee ennakoita suunnitteluvaiheessa.

8.2 Ilmaääneneristys sivutiesiirtymät massiivirakenteissa

Rakenteellisten sivutiesiirtymien mallintaminen tapahtuu ilmaääneneristysluvun R'_w tai äänitasoeron $D_{nT,w}$ määräävällä taajuusalueella 100–3150 Hz. Massiivisen yksikerrosrakenteen mallintaminen insinöörlaskelmien edellyttämällä tarkkuudella on melko yksinkertaista, koska massiivirakenteiden värähtelykäyttäytyminen on helposti ennustettavaa tällä taajuusalueella. Värähtelynopeus on sama mitataan se sitten missä tahansa rakenteen pisteessä, kunhan ei mennä rakenneliitoksen yli. Esimerkiksi 160 mm ja tätä paksumpien teräsbetonirakenteiden koinsidenssin rajataajuus esiintyy 100 Hz:n alueella. Silloin 100 Hz:n yläpuolinen rakennevärähtely on resonoivaa (koinssidenssialue). Resonoiva värähtely etenee liitosten yli tavalla, joka on kohtalaisen helppo mallintaa.

Mallintaminen on edelleen mahdollista, jos massiivirakenteen päälle sijoitetaan ilmaääneneristävyyttä parantava kevyt rakennekerros. Kevyiden kerrosten tuottama ilmaääneneristysten parannus ΔR_w voidaan lisätä suoraan massiivisen osan ilmaääneneristysluvun päälle, jos arvo on määritetty laboratoriossa.

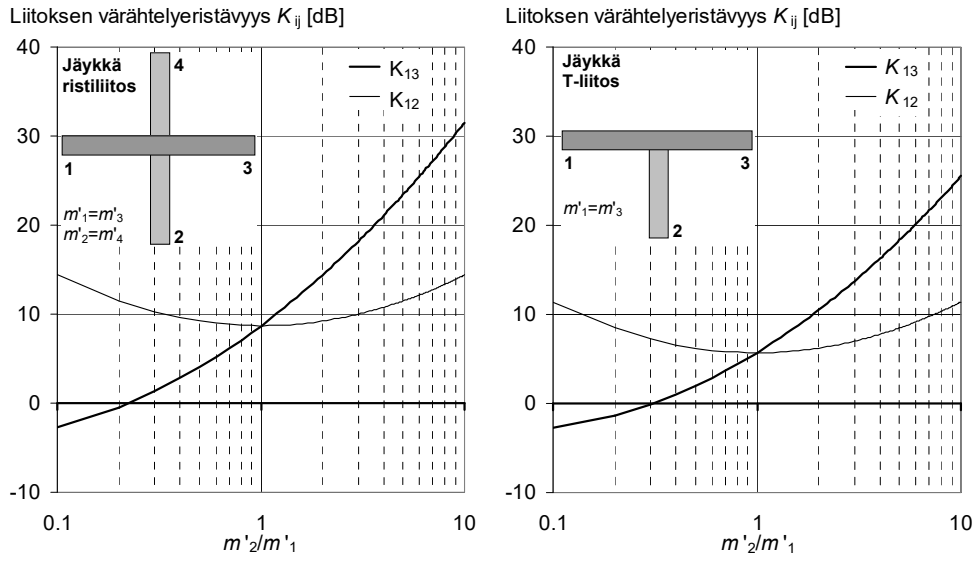
Sivutiesiirtymän voimakkuuden kannalta keskeisessä roolissa on liitoksen tyyppi. Liitoksesta pitää tuntea värähtelyeristävyys K [dB], joka kertoo, paljonko liitos eristää värähtelyä edettäessä liitoksen ylitse. Kuvassa 8.2.1 on esitetty tavallisimpien jäykkien liitosten värähtelyeristävyys. Massiivirakenteilla arvot eivät riipu merkittävästi taajuudesta resonoivalla taajuusalueella. Liitoksen eristävyys paranee kun liittyvien rakenteiden määrä kasvaa ja/tai liitoksen rakenteiden pintamassojen välinen ero kasvaa.

Huoneistojen välejä tarkasteltaessa massaerot liitoksien yli ovat usein pieniä ja voidaan tarkastella kohtaa $m'_2/m'_1=1$. Nyrkkisääntönä on, että ristiliitoksen värähtelyeristys on 9 dB ja T-liitoksen 6 dB.

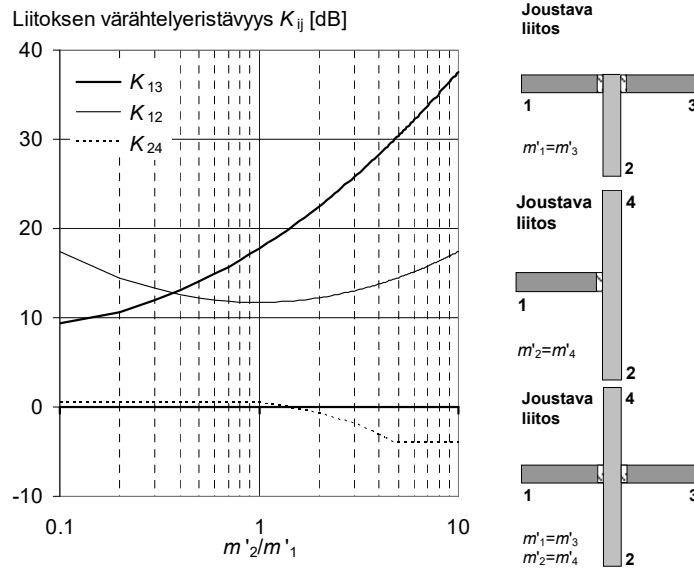
Kuvassa 8.2.2 on esitetty vertailun vuoksi joustavalla materiaalilla saatavia värähtelyeristävyksiä. Arvot joustavan materiaalin ylitse ovat jopa 10 dB korkeampia kuin jäykässä liitoksessa. On huomattavaa, että joustava liitos on hyödyllinen vain sellaiselle värähtelyn etenemisreitille, jossa joustava materiaali joudutaan ylittämään. Joustavan liitoksen kohdalla äänienergia jää lähetykspuolelle, jolloin kyseinen rakenne säteilee voimakkaammin ääntä ympäristöönsä. Jäykät liitokset siten parantavat ääneneristystä paikallisesti mutta aiheuttavat voimakkaampia sivutiesiirtymiä kuin joustavat liitokset.

Kuvassa 8.2.3 on esitetty standardin EN 12354-1 mukainen sivutiesiirtymien merkintätapa. Erottavaa rakennetta (väliseinä) merkitään D:llä lähetyshuoneesta katsottuna ja d:llä vastaanottohuoneesta katsottuna. Lähetykspuolelta katsottuna sivuavia rakenteita F on yleensä neljä (2 seinää, katto ja lattia). Vastaanottohuoneen puolelta sivuavia rakenteita f on myös neljä.

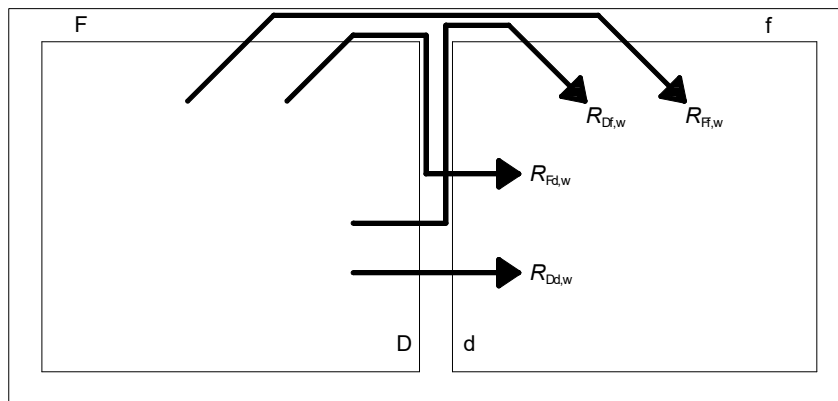
Normaalisti mallinnettavana on 13 ensimmäisen kertaluvun äänireittiä. Suoria äänireittejä on 1 kpl (Dd). Puhtaasti sivuavia rakenteita pitkin eteneviä äänireittejä on 4 kpl (Ff), väliseinästä sivuavaan rakenteeseen kulkeutuvia äänireittejä on 4 kpl (Df) ja sivuavasta rakenteesta väliseinään eteneviä 4 kpl (Fd).



Kuva 8.2.1. Jäykkien liitosten värähtelyeristävyyksiä.



Kuva 8.2.2. Joustavien liitosten värähtelyeristävyyksiä.



Kuva 8.2.3. Sivutiesiirtymäreittien merkintätavat EN 12354-1 mukaan yhdelle sivuavalle rakenteelle. Lähetys huone on vasemmalla ja vastaanottohuone oikealla.

Kahden liitoksen yli menevät äänireitit jätetään EN mallissa huomioimatta. Esimerkiksi takaseinää ei tarkastella lainkaan vaikka sieltäkin ääntä säteilee. Kokemusten mukaan toisen kertaluokan ja tätä pidempien äänireittien pois jättäminen aiheuttaa sivutiesiirtymien aliarvioinnin 1–2 dB:llä. Muut virhelähteet ovat tätä suurempia, joten kuvan 8.2.3 tarkastelutapa on käytännön laskelmia ajatellen riittävä.

Huoneita erottavan väliseinän eli suoran reitin ääneneristävyys saadaan yhtälöstä

$$(8.2.1) \quad R_{Dd,W} = R_{s,W} + \Delta R_{Dd,W}$$

missä $R_{s,W}$ [dB] on erottavan massiiviseinän ilmaääneneristysluku, $\Delta R_{Dd,w}$ [dB] on edellisen päälle joko lähetys tai vastaanottohuoneen puolelle rakennetun lisäkerroksen tuottama parannusvaikutus ilmaääneneristyslukuun.

Sivutiesiirtymäreitin "ilmaääneneristysluku" kolmelle eri sivutiesiirtymätyypille saadaan yhtälöillä

$$(8.2.2) \quad R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f}$$

$$(8.2.3) \quad R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{d,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f}$$

$$(8.2.4) \quad R_{Df,w} = \frac{R_{D,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f}$$

missä

- $R_{F,w}$ [dB] on lähetyshuoneessa rakenteen F ilmaääneneristysluku,
- $R_{f,w}$ [dB] on vastaanottohuoneessa rakenteen f ilmaääneneristysluku,
- $\Delta R_{Ff,w}$ [dB] on lähetys- ja/tai vastaanottohuoneen sivuavan rakenteen pinnalle rakennetun kevyen lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun,
- $\Delta R_{Fd,w}$ [dB] on lähetyshuoneen sivuavan rakenteen ja/tai erottavan seinän vastaanottohuoneen puolelle rakennetun kevyen lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun,
- $\Delta R_{Df,w}$ [dB] on erottavan seinän lähetyshuoneen puolelle ja/tai vastaanottohuoneen sivuavan rakenteen pinnalle rakennetun kevyen lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun,
- K_{Ff} [dB] on värähtelyeristävyys reitille Ff,
- K_{Fd} [dB] on värähtelyeristävyys reitille Fd,
- K_{Df} [dB] on värähtelyeristävyys reitille Df,
- S_s [m²] on erottavan väliseinän pinta-ala, ja
- l_f [m] on erottavan väliseinän ja liittyvän rakenteen yhteinen liitospituus.

Ilmaääneneristysluku R'_w lasketaan yhtälöstä

$$(8.2.5) \quad R'_w = -10 \log_{10} \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^4 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^4 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^4 10^{-R_{Fd,w}/10} \right]$$

Kaikki ilmaääneneristyslukujen lähtöarvot ovat laboratorioarvoja (ei pilkkua) mutta lopputulos esitetään pilkullisena, koska laskennan kohde sijaitsee kentällä.

Jos väliseinä on kevytrakenteinen, voidaan termit Df ja Fd jättää tarkastelussa pois ja tarkastellaan vain suoraa reittiä Dd sekä aitoja sivuavia rakenteita Ff.

8.3 Ilmaääneneristys sivutiesiirtymät kevytrakenteissa

Kevyitä rakennusosia pitkin tapahtuvien sivutiesiirtymien arviointi on huomattavasti vaikeampaa kuin massiivisia rakennusosia pitkin tapahtuvien. Kevyillä rakenteilla koinsidenssin rajataajuus on yli 2000 Hz

(esim. 13 mm kipsilevyllä 2500 Hz), joten suurella osalla tarkasteltavaa taajuusalueetta 100–3150 Hz kevytrakenteissa esiintyy vain ns. pakkovärähtelyä. Pakkovärähtely tarkoittaa sitä, että rakenne pakotetaan liikkeeseen vaikka siinä ei vielä esiinny värähtelymuotoja (moodeja) kuin joillakin taajuuksilla. Pakkovärähtelyn voimakkuus heikkenee massan kasvaessa, kuten massalaki ennustaa.

Lisäksi kevytrakenteet ovat aina periodisia erilaisten jäykistimien ja rankojen vuoksi. Sen seurauksena värähtelynopeus muuttuu voimakkaasti, kun ylitetään tukipiste tai ranka. Rankojen suunnassakin pakkovärähtely vaimenee etäisyyden funktiona kun taas massiivisissa rakenteissa näin ei ole.

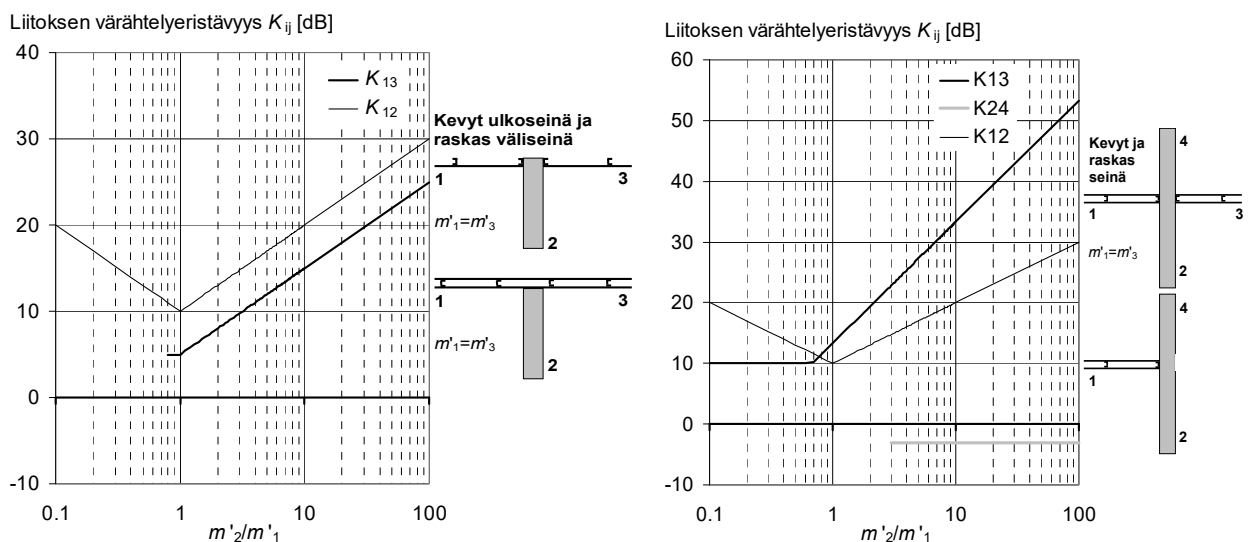
Kevyissä rakenteissa vallitseva ääneneneristävyyteen vaikuttava värähtelymuoto taajuuksilla 100–3150 Hz (pakkovärähtely) ei ole samalla tavoin rakenteessa pituussuunnassa etenevää värähtelyä kuin resonoiva värähtely massiivirakenteissa. Pakkovärähtely ei etene liitosten yli läheskään yhtä helposti kuin massiivirakenteissa. Värähtelyeristysarvot ovat suurempia kuin massiivirakenteilla. Kevytrakenteet eivät siten aiheuta sivutiesiirtymiä samalla mekanismilla kuin massiiviset rakenteet. Kevytrakenteen säteilee sivutiesiirtymän ääntä lähinnä liitoksen lähietäisyydeltä nurkasta ja sekin on vähäistä. Värähtelyn voimakkuus vaimenee nopeasti etäännyttäessä nurkasta. Tämä on voitu osoittaa intensiteettimittauksin käytännön rakennuksissa. Eniten ääntä säteilee liitoksen ja ensimmäisen koolauksen tai lattiavasas väliseltä pinnalta, joka on 400–600 mm leveä.

Kuvassa 8.3.1 on esitetty yleisimpien kevyiden ja raskaiden rakenteiden liitosten liitosääneneristävyyksiä. On huomattava, että jos raskailla rakenteilla vallitsee useimmiten tilanne $m'_2/m'_1 \approx 1$, vallitsee kevyen ja massiivisen rakenteen liitoksessa useimmiten tilanne $m'_2/m'_1 > 10$ tai jopa $m'_2/m'_1 > 30$. Liitosääneneristävyyssarvot arvioidaan siten aivan eri kohdasta kuviota ja arvot ovat huomattavasti suurempia mihin raskaiden rakenteiden liitoksissa on totuttu.

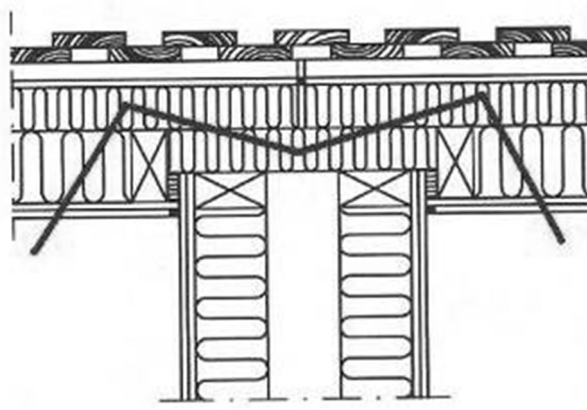
Kevytrakenteet eivät kuitenkaan ole vapaita sivutiesiirtymistä. Vaikka kevytrakenteisen seinän liitos vaimentaisikin hyvin ääntä, on kevytrakenteisen seinän värähtelynopeus sen keveyden vuoksi suuri etenkin pienillä taajuuksilla. Pakkovärähtelyn muodossa tapahtuva värähtely kantautuu siksi myös sivuavia rakenteita pitkin.

Jos raskas ja kevyt rakenne kohtaavat liitoksessa, raskaassa rakenteessa ei tapahdu mitään liitosääneneristystä syystä, että äänienergia ei jakaudu liitoksessa eri suuntiin vähäisen kytkennän vuoksi.

Kevytrakenteissa sivutiesiirtymät voivat myös olla kaviteetin kautta tapahtuvaa äänienergian kulkeutumista, kuten kuvassa 8.3.2 on esitetty. Esimerkiksi ulkoseinissä on usein tällainen tilanne.



Kuva 8.3.1. Kevyen ja raskaan rakenteen liitosääneneristävyyksiä.



Kuva 8.3.2. Julkisivurakenteen ilmareitissä etenevä sivutiesiirtymä.

8.4 Askeläänen sivutiesiirtymien mallintaminen

Askeläänten sivutiesiirtymiä mallinnetaan yleensä EN 12354-2 mukaan. Askeläänten sivutiesiirtymiä on yksinkertaisempaa käsitellä kuin ilmaäänten, koska heräte kohdistuu vain lattiaan ja primäärisiä sivutiesiirtymäreittejä on vähemmän (kuva 8.4.1). Vaakasuuntaisen sivutiesiirtymän osalta primäärien äänireittien määrä rajautuu kahteen ja pystysuunnassa niitä on viisi.

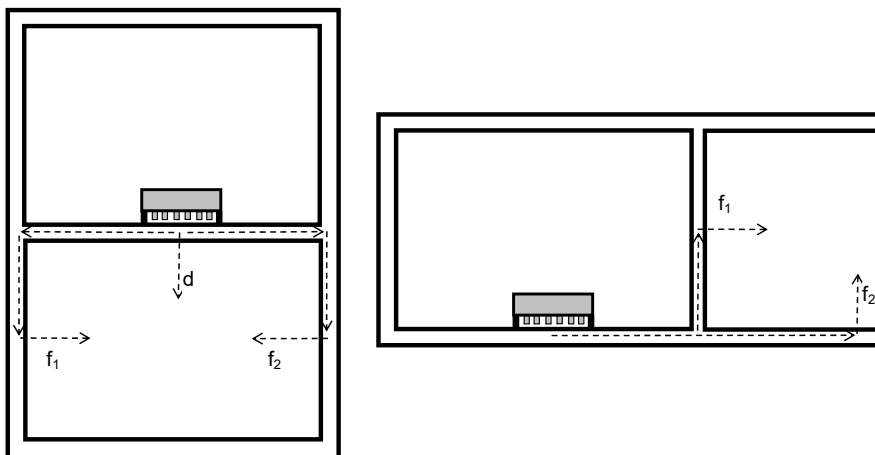
Pystysuuntaan askeläänenpainetasoksi L'_n [dB] saadaan

$$(8.4.1) \quad L'_n = 10 \log_{10} \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right)$$

missä $L_{n,d}$ [dB] on erottavan välipohjan muodostama askeläänenpainetaso ja $L_{n,ij}$ [dB] on vastaanottohuoneen pinnan j kautta muodostuva askeläänenpainetaso. Vaakasuuntaan askeläänenpainetasoksi saadaan vastaavasti

$$(8.4.2) \quad L'_n = 10 \log_{10} \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10}$$

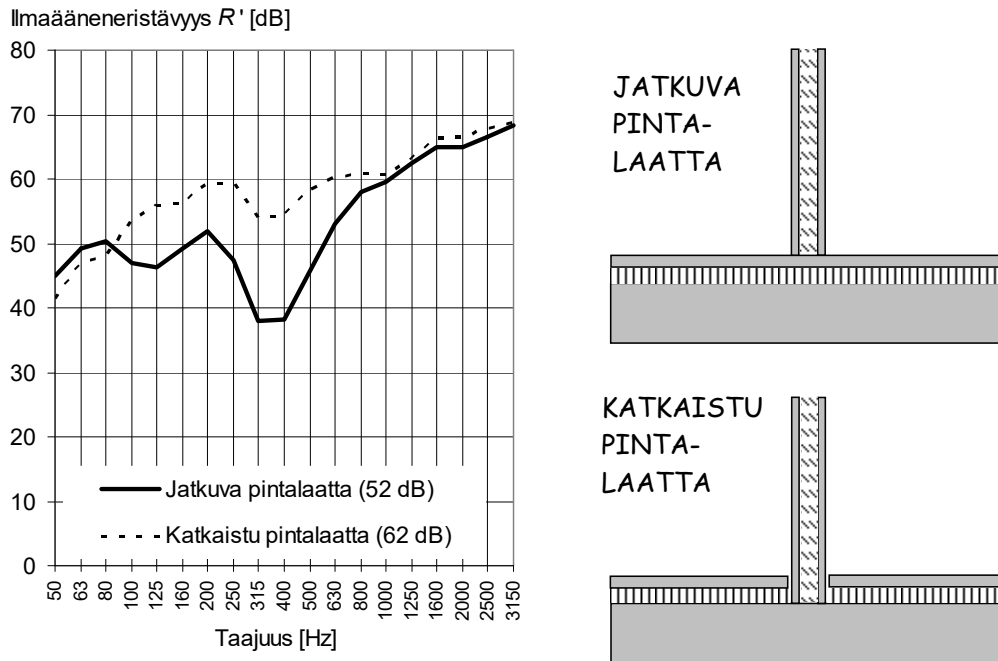
Pystysuuntaan käytetään yleensä $n=4$ ja vaakasuuntaan $n=2$. Laskentamenetelmää ei tässä esitetä.



Kuva 8.4.1. Pystysuuntaisen ja vaakasuuntaisen askeläänenpainetaso muodostuminen 2 dimensiossa.

8.5 Esimerkki rakenteellisista sivutiesiirtymistä

Kelluvia lattioita käytetään pystysuuntaisen ilma- ja askelääneneristyksen parantamiseksi. Kelluvan lattian pintalaatta on aina suhteellisen kevyt sen alla olevaan kantavaan rakenteeseen verrattuna. Sen vuoksi kelluva pintarakenne on katkaistava huoneistojen väliseinän kohdalla vaakasuuntaisen sivutiesiirtymän estämiseksi. Jos katkaisua ei tehdä, tapahtuu sivutiesiirtymä vaakasuunnassa (kuva 8.5.1).



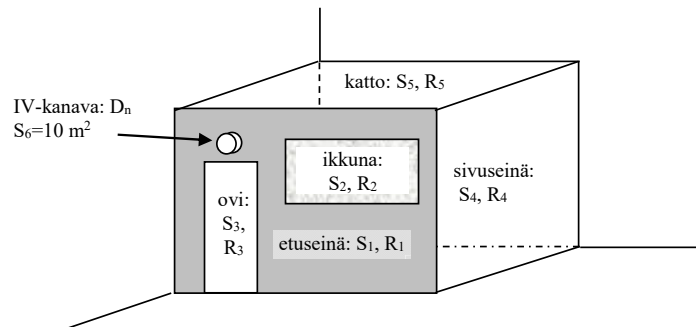
Kuva 8.5.1. Pintalaatan (60 mm betoni) katkaisun vaikutus ilmaääneneristävyyteen (RIL 243-1:2007).

8.6 Yhteisääneneristävyys

Tiloja erottava rakenne voi koostua useasta eri komponentista kuten seinästä, ikkunasta, ovesta ja ilman läpivientielementistä (kuva 8.6.1). Eri osista koostuvan seinän kokonaisääneneristävyys R_{tot} lasketaan yhteisääneneristävyyden (tai resultoivan ääneneristävyyden) yhtälöstä

$$(8.6.1) \quad R_{tot} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i S_i \cdot 10^{-R_i/10}} \right)$$

missä S_i [m²] on komponentin i pinta-ala ja R_i [dB] on komponentin i ilmaääneneristävyys.



Kuva 8.6.1. Valvomo, joka on rakennettu 6 rakenneosasta.

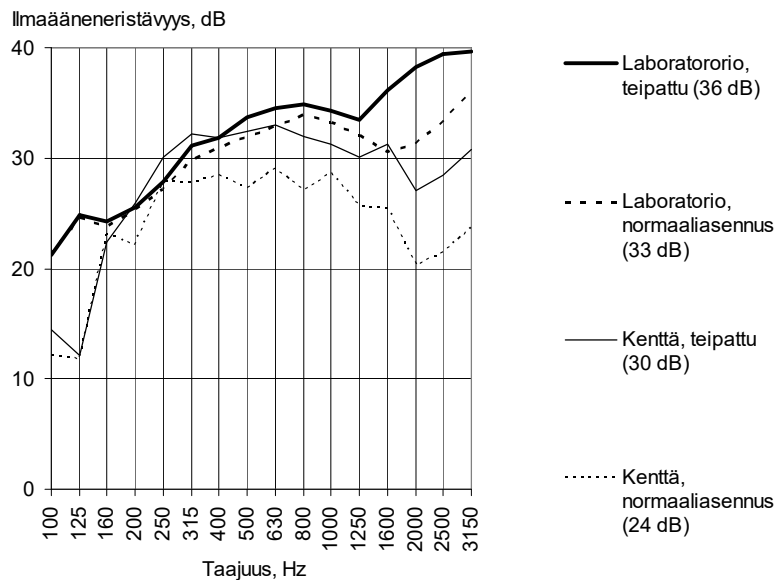
8.7 Rakojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen

Useimmat rakenteet ja tuotteet on tarkoitettu tiiviiksi ja niiden laboratoriotestaus tapahtuu ideaalitulanteessa, jossa testattavaan näytteeseen ei jätetä rakoja. Käytännössä rakoja jää rakentamisvaiheessa (asennusvirheet) tai niitä muodostuu elinkaaren aikana (elementtien liike, tiivisteiden kuluminen). Kuvassa 8.7.1 on esitetty erään oven ilmaääneneristävyyssarvot sekä laboratoriossa että rakennuksessa mitattuna.

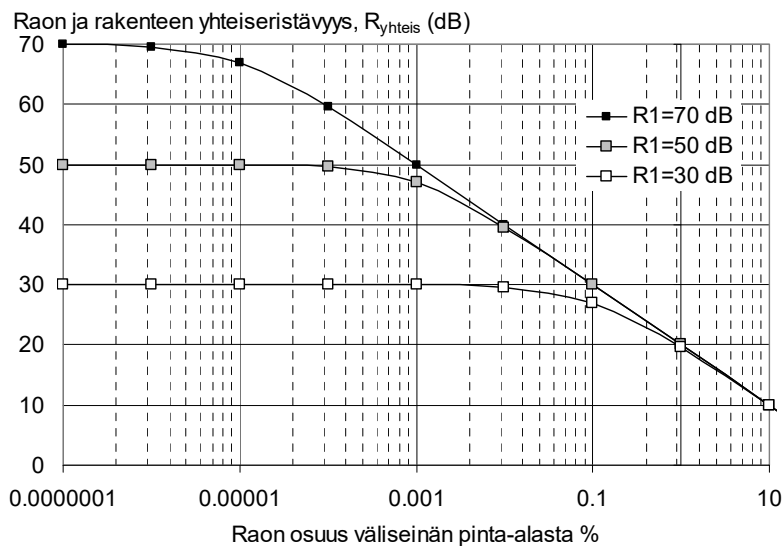
Raon suhteellinen vaikutus ilmaääneneristävyyteen kasvaa rakenteen ilmaääneneristävyyden kasvaessa. Jos rakenteen kokonaispinta-ala on S_1 ja ääneneristävyys R_1 , ja raon vastaavasti S_2 ja R_2 , saadaan raon ja rakenteen yhteisääneneristävyys R_{yhteis} arvioitua yhteisääneneristävyyden yhtälöllä

$$(8.7.1) \quad R_{tot} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{S_1 + S_2}{S_1 \cdot 10^{-R_1/10} + S_2 \cdot 10^{-R_2/10}} \right]$$

Jos rako on kovaseinäinen, voidaan ensimmäisessä approksimaatiossa asettaa raon ilmääneneristävyydeksi nolaksi, eli $R_2=0$ dB. Tätä on havainnollistettu kuvassa 8.7.2. Jos raossa on mutkia, absorboivaa materiaalia tai tiivisteitä, on raon ilmääneneristävyys korkeampi.



Kuva 8.7.1. Erään desibelioiven (oviluokka 30 dB) ilmääneneristävyys laboratoriossa ja kentällä rakennuskohteessa. Mittaus tehtiin normaaliasennuksen lisäksi saumat teipattuna, jolloin nähdään vuotojen osuus. Sulkeissa R_w / R'_w -arvot.



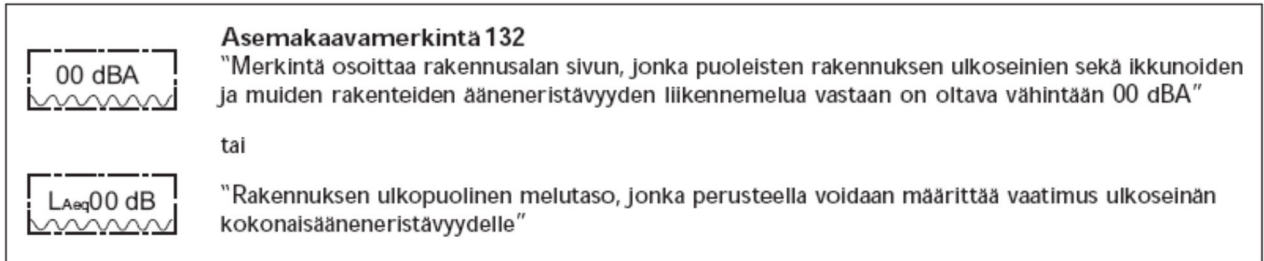
Kuva 8.7.2. Raon ja rakenteen yhteiseristävyys erilaisilla raon pinta-aloilla, kun tiiviin rakenteen ilmääneneristävyys on 30, 50 tai 70 dB. Esimerkiksi 10 m² kokoisessa rakenteessa 0.0001 % tarkoittaa 1x10 mm kokoista rakoja.

8.8 Julkisivun ääneneristykseen mitoitus

Julkisivulta edellytetyn ääneneristävyyden tieliikennemelua vastaan määrittää yleensä kaavoitusarkkitehti ja/tai akustinen konsultti. Kaavoitusmerkinnälle käytetään yleensä jompaakumpaa kuvan 8.8.1 merkinnöistä. Yleensä kaavaan määritellään valmiiksi julkisivun ääneneristysvaatimus (ΔL), jos rakennuksen käyttötarkoitus on tiedossa. (Huom: Ääneneristys on yleistermi eikä tarkoita suuretta ilmääneneristävyys, joka tulee luvussa myöhemmin esiin.) Ylemmässä vaihtoehdossa on valmiiksi vähennettynä huoneiston sisäpuolisen melutason

vaatimus ulkomelutasosta eli $\Delta L = L_{A,eq,u} - L_{A,eq,s}$. Tämä edellyttää kaavoittajalta ulkomelutason $L_{A,eq,u}$ ja sisätilaa koskevan enimmäisäänitason $L_{A,eq,s}$ tuntemista.

Kuvan 8.8.1 alempi vaihtoehto sisältää vain ulkomelutason arvon $L_{A,eq,u}$ jättäen ääneneristävyystarpeen ΔL laskemisen arkkitehdin vastuulle. Hänen tulee selvittää enimmäistaso sisämelulle $L_{A,eq,s}$ tilan myöhemmin päätettävän käyttötarkoituksen mukaan. Vaihtoehto tulee kyseeseen tilanteissa, joissa rakennukselle on kaavan tekovaiheessa vielä sallittu useita käyttötarkoituksia, esimerkiksi asuinhuoneisto, päiväkotitila, toimistotila tai liikehuoneisto mutta lopullinen käyttötarkoitus selviää vasta kun käyttäjä on tiedossa tai rakennuslupaa on haettu.



Kuva 8.8.1. Kaavamerkintöjä. Ylempi merkintä on ulko- ja sisämelutason erotus, ΔL , ja alempi on ulkomelutaso $L_{A,eq,u}$.

Julkisivun ääneneristävydessä tulee huomioida kaikki rakennusosat, jotka ovat yleensä seinä, ikkuna, korvausilmaventtiili, parvekeovi ja tuuletusikkuna. Yläpohja, keskusilmanvaihdon hormit tai savuhormi on otettava huomioon erityisesti lentomelualueilla.

Valmiille julkisivuille ei suoriteta äänieristysmittauksia laboratorioissa. Sen sijaan laboratoriomittauksia on olemassa komponenteille. Jos mittaustuloksia ei ole käytettävissä, voidaan käyttää myös laskennallisia arvoja, jos ne ovat riittävän luotettavia.

Korvausilmaventtiilien ääneneristävyys riippuu venttiilin asennosta. Jos ikkunassa on korvausilmaventtiili, tulee laskelmissa käyttää ääneneristävyysarvoa, jossa venttiili on kokonaan avoinna.

Julkisivurakenteen äänitekniinen suunnittelu käsittää seuraavat tavoitteet:

- kokonaisuus täyttää asetetun ääneneristysvaatimuksen ja
- julkisivurakenteen komponentit valitaan siten, ettei synny suuria eroja eri komponenttien välityksellä siirtyvän äänitehon kesken

Ympäristöministeriö (2003) on julkaissut mallin, jonka avulla julkisivun ilmaääneneristävyys voidaan mitoittaa. Mitoitusmallin erityinen ominaisuus on pyrkimys optimaaliseen kokonaisratkaisuun. Malli on esitetty pääpiirteittäin alla. Laskelmat on tehtävä erikseen sekä yö- että päiväajalle, koska melutasot ja ohjearvot ovat näille ajoille erilaiset.

Vaatimus ulkomelun ja sallittavan sisämelun erotukselle ΔL (ääneneristysvaatimus) saadaan yhtälöstä

$$(8.8.1) \quad \Delta L = L_{A,eq,u} - L_{A,eq,s}$$

missä $L_{A,eq,u}$ [dB] on ekvivalentti A-painotettu äänenpainetaso julkisivupinnalla ilman rakennuksen heijastavaa vaikutusta ja $L_{A,eq,s}$ [dB] on korkein sallittu ympäristömelun ekvivalentti A-painotettu äänenpainetaso sisätilassa. Usein ympäristömelutaso mitataan aivan julkisivupinnan tuntumassa (alle 10 mm pinnalta), jolloin välttyään seisovilta aalloilta ja mikrofonin kiinnitys on helpompaa. Taso seinäpinnalla on noin 6 dB suurempi kuin samassa pisteessä vapaassa kentässä (ilman rakennuksen heijastavaa vaikutusta) mitattava arvo $L_{A,eq,u}$.

Koko julkisivun **ilmaääneneristävyys** vaatimus $R_{tr,vaad}$ [dB] määritetään yhtälöstä

$$(8.8.2) \quad R_{tr,vaad} = \Delta L + K_1 + 7$$

missä korjaustermi K_1 huomioi huoneen muodon. Sen määrittäminen on esitetty taulukossa 8.8.1. Koko julkisivun ilmaääneneristävyys vaatimus, $R_{A,tr,kok}$ [dB], saadaan yhtälöstä

$$(8.8.3) \quad R_{A,tr,kok} \geq R_{tr,vaad}$$

Ikkunan ilmaääneneristävyys vaatimukseksi, $R_{A,tr,ikk}$ [dB], asetetaan

$$(8.8.4) \quad R_{A,tr,ikk} \geq R_{tr,vaad} + K_2$$

missä korjaustermi K_2 [dB] (taulukko 8.8.1) huomioi ikkunoiden suhteellisen pinta-alan. Seinäosan ilmaääneneristävyyksivaatimus $R_{A,tr,seinä}$ [dB] määritetään kaavasta

$$(8.8.5) \quad R_{A,tr,seinä} \geq R_{tr,vaad} + 3$$

Pienten elementtien yksikkönormalisoitu äänitasoero, $D_{n,e,A,tr}$ [dB], on

$$(8.8.6) \quad D_{n,e,A,tr} \geq R_{tr,vaad} + 5$$

Edellä kaikki R_{Atr} tarkoittaa laboratorioarvoa $R_w + C_{tr}$.

Mitoitusmenetelmä sisältää jo varmuusmarginaalin 4 dB jolloin pienet rakennusaikaiset virheet ja mittausvirheet eivät vielä johda tilanteeseen, jossa ääneneristystavoitteeseen ei päästäisi.

Ympäristöministeriön (2003) mallissa ei anneta keinoja arvioida sitä, miten yhden komponentin tavoitearvosta jäämistä voitaisiin kompensoida toisen komponentin paremmalla arvolla. Siksi käytännössä sovelletaan usein ns. äänitasoeromenetelmää (RIL 243-1-2007). Se tuottaa kiinteillä valinnoilla samanlaisia tuloksia kuin ympäristöministeriön malli (Kylliäinen, 2005).

Taulukko 8.8.1. Korjauskertoimien K_1 ja K_2 määrittäminen.

S/S _H	2.5	2	1.6	1.3	1	0.8	0.6	0.5	0.4
K ₁ (dB)	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3
(ΣS _i)/S	0.1	0.13	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	
K ₂ (dB)	-6	-5	-4	-3	-3	-2	-1	0	

S = julkisivuseinän pinta-ala huoneessa, m²

S_H = huoneen lattiapinta-aa

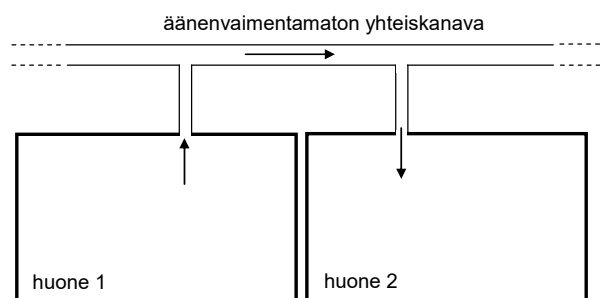
ΣS_i = julkisivussa olevien ovien ja ikkunoiden yhteispinta-ala

8.9 Ilmaäänän sivutiesiirtymä kanavistoa pitkin

Jos huoneiden välillä on yhteys ilmanvaihtokanavistoa pitkin, voi kanavistoa pitkin kantautua ilmaääntä huoneesta toiseen merkittävästi enemmän kuin huoneita erottavien rakenteiden läpi (**kuva 8.9.1**).

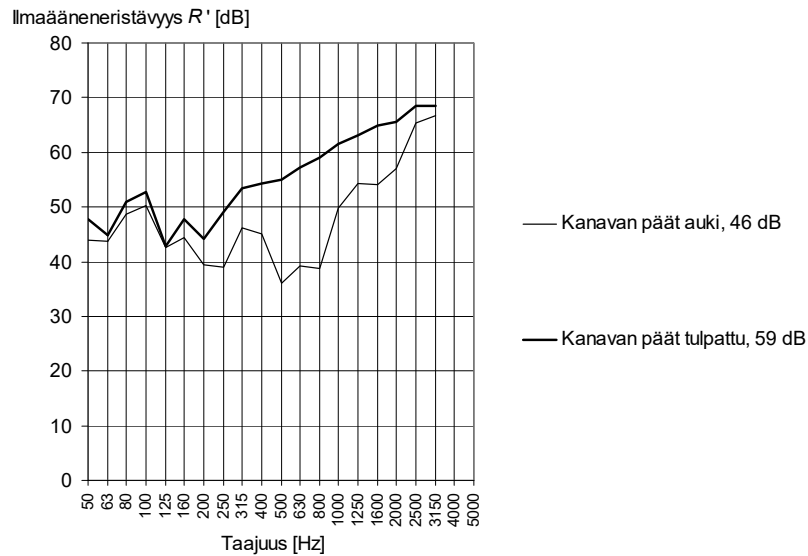
Yleensä kanavistoa pitkin kulkeutuvan sivutiesiirtymän tunnistaa äänenväristä, koska ääni kuulostaa "putkimaiselta". Äänenlaatu selittyy vaimentamattoman kanaviston poikittaisresonansseista, joista merkittävin esiintyy kanavan rajataajuudella. Sivutiesiirtymä kanavistossa pitää yleensä ottaa huomioon, jos huoneiden välillä on ilmaääneneristysvaatimus yli 35 dB (R'_w). Sivutiesiirtymä estetään äänenvaimentimella.

Kuvassa 8.9.2 on esitetty mittausesimerkki yhteiskanavajärjestelmästä, jossa ei ole äänenvaimentimia asuinhuoneistojen välillä. Pöytähuoneiden välillä ilmaääneneristyslukuksi mitattiin 46 dB. Kun kanavien päätelaitteet tukittiin, ilmaääneneristysluku parani arvoon 59 dB, joka vastasi välipohjan ilmaääneneristyslukua. Ääniongelmia voitiin ratkaista asentamalla lisä-äänenvaimennin kanavistoon.



Kuva 8.9.1. Ilmanvaihtokanaviston kautta tapahtuva äänen siirtyminen tilojen välillä. Esimerkissä ei ole päätelaitteita,

jotka vaimentavat ääntä enemmän huoneen ja kanavan välillä kuin avoin kanava.



Kuva 8.9.2. Mittaustulos asuinhuoneistojen välillä, jossa ilmanvaihtokanaviston kautta tapahtuva sivutiesiirtymä heikensi rakenteiden sallimaa ilmaääneneristyslukua 13 dB.

Huoneen 1 ja 2 välisen ilmanvaihtokanavan ilmaääneneristävyys, R_d [dB], voidaan arvioida yhtälöstä

$$(8.9.1) \quad R_d = D_1 + D_s + D_d + D_2$$

Lähtövaimennus D_1 [dB] riippuu huoneen 1 pääte-elimien vaimennuskyvystä. Lähtövaimennuksen tuotearvoja ei ole saatavana, koska testistandardia ei ole kehitetty. Lähtövaimennuksen arvona voi kyseisen tuotteen päätevaimennusarvoa, D_t [dB], joka mitataan kuitenkin kanavasta huoneen suuntaan eli tässä tapauksessa väärään suuntaan.

Kanavareitillä mahdollisesti olevan äänenvaimentimen vaikutus huomioidaan termillä D_s [dB]. Kanavareitillä olevien mutkien ja haarojen äänenvaimennus sisällytetään termiin D_d . Äänen siirtyessä kanavasta huoneeseen sovelletaan D_2 :n arvona päätelaitteen päätevaimennusarvoa D_t .

Yhtälön 8.9.1 mukaan määritetty ilmaääneneristävyys koskee kanavan poikkipinta-alalla tapahtunutta ääneneristyksen määritelmän mukaista tehohäviötä.

Oletetaan, että huoneiden välillä on kanavareitti, jonka ilmaääneneristävyys on edellä esitetyllä tavalla laskettuna R_d . Jos tiloja erottavan rakenteen ilmaääneneristävyys on R_p ja rakenteen pinta-ala on S_p [m²], on huoneiden välinen yhteisääneneristävyys

$$(8.9.2) \quad R_{tot} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{S_d + S_p}{S_d 10^{-R_d/10} + S_p \cdot 10^{-R_p/10}} \right]$$

missä S_d [m²] on kanaviston poikkipinta-ala.

KIRJALLISUUS

Betoniteollisuus (2000). Betonirakenteiden ääniteknikka, Rakennustuoteteollisuus RTT r.y. Betoniteollisuus, Helsinki.

EN 12354-1:2000 Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms

EN 12354-2:2000 Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms

Hongisto V, Häggblom H (2009). Toimistojen mallinnettu ja koettu sisäympäristö - MAKSI hankkeen loppuraportti, Työterveyslaitos, Helsinki.

Kylliäinen, M. (2005). Rakennuksen ulkokuoren rakennusosilta vaadittava ääneneristävyys. Akustiikkapäivät 2005. 26–27.9, Kuopio, Akustinen Seura ry., Espoo. <http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/kylliainen.pdf>.

RIL 243-1-2007. Rakennusten akustinen suunnittelu. Perusteet. Rakennusinsinöörien liitto R.I.L. r.y., Helsinki.

Ympäristöministeriö (2003). Rakennuksen julkisivun ääneneristävyuden mitoittaminen. Ympäristöopas 108. Helsinki.

9 Kuulonsuojaus

9.1 Meluallistus

Kuulonsuojauksen kannalta olennaisinta on tietää äänen kokonaisenergia, joka saapuu korvakäytävään, koska kokonaisenergian on voitu osoittaa olevan yhteydessä meluperäisiin kuulovaurioihin. Kokonaisenergian määrittämiseksi pitää tuntea äänenpainetaso ajan funktiona eli melun keskiäänitaso ja altistus aika. Meluperäisen kuulovaurioriskin arvioimiseksi pitää tuntea kyseinen keskiäänitaso useiden vuosien ajalta, koska ko. riski on yleensä merkittävä vasta, kun voimakkaalle melulle altistutaan pitkiä aikoja. Joskus tosin yksittäinen impulssikin voi sisältää niin suuren kokonaisenergian, että pysyvä kuulovaurio on mahdollinen.

Valtioneuvoston asetuksen 85/2006 mukaan korvakäytävään ei saa kohdistua yli 87 dB:n meluallistusta. Asetus sisältää lisäksi ns. alemmat toimenpiderajat 80 dB ja 85 dB, joilla pyritään estämään 87 dB:n meluallistus etukäteen.

Päivittäisellä meluallistuksella tarkoitetaan sitä A-painotettua äänitasa, joka 8 tunnin nimellisen työpäivän aikana antaa saman altistuksen kuin altistava melu. Päivittäinen meluallistus L_{pAeq,T_0} [dB] määritetään yhtälöllä

$$(9.1.1) \quad L_{pAeq,T_0} = L_{pAeq,T_e} + 10 \log_{10} \left(\frac{T_e}{T_0} \right) \text{dB}$$

missä L_{pAeq,T_e} [dB] on henkilön korvakäytävään kohdistuva keskiäänitaso altistusajalta T_e [s] ja $T_0=28800$ s.

Meluallistus määritetään yleisimmin tallentavalla meluannosmittarilla (kuva 9.1.1). Kuulonsuojaimen tyypin selvittäminen on osa meluallistuksen mittausta. Jos suojaimen käyttöaste ei ole 100 %, pyydetään työntekijää usein pitämään suojainpäiväkirjaa, jotta voidaan arvioida suojaimen todellinen vaikutus meluallistukseen.

Meluntorjunnassa ja kuulonsuojauksessa käytetään seuraavia käsitteitä/suureita kuvaamaan melua:

- Emissio; melulähteen melupäästö, joka kuvaa, minkä energian äänilähde tuottaa ympäristöönsä.
- Immissio; oleskelupisteessä (tai työpisteessä) vallitseva äänitaso eli taso, jonka melulähde tai useat äänilähteet aiheuttavat tiettyyn pisteeseen
- Henkilökohtainen meluallistus; melun keskiäänitaso koko ajalta, jolla melulle on altistuttu.

Emissio ilmoitetaan yleensä äänitehotason muodossa. Immissio riippuu etäisyydestä melulähteisiin, melulähteiden melupäästöstä sekä kuuntelupisteen ja melulähteen välisistä vaimennustekijöistä. Immissio voi vaihdella paljon ajan suhteen riippuen melulähteiden käymisestä. Meluallistus puolestaan riippuu siitä, missä pisteissä henkilö on aikaansa viettänyt, kuinka kauan on niissä viipynyt sekä minkälaisia kuulonsuojaimia on käyttänyt. Suojainten suojaustehokkuus [dB] ja käyttöaste [% ajasta] pitää ottaa huomioon.

Jos työntekijän oleskelupisteet i työpäivän aikana ja oleskeluajat T_i [h] niissä ovat hyvin tiedossa, ja paikoissa vallitsee tasainen äänitaso $L_{pA,i}$ [dB], keskiäänitasa voidaan arvioida lyhyiden äänitasomittausten perusteella. Tämä edellyttää, että äänitaso on tasainen ja lyhyt näyte edustaa pitkän aikajakson äänitasa suurella varmuudella. Tällöin keskiäänitaso voidaan laskea yhtälöllä

$$(9.1.2) \quad L_{pAeq,8h} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\sum_i T_i} \sum_i T_i \cdot 10^{L_{pA,i}/10} \right)$$

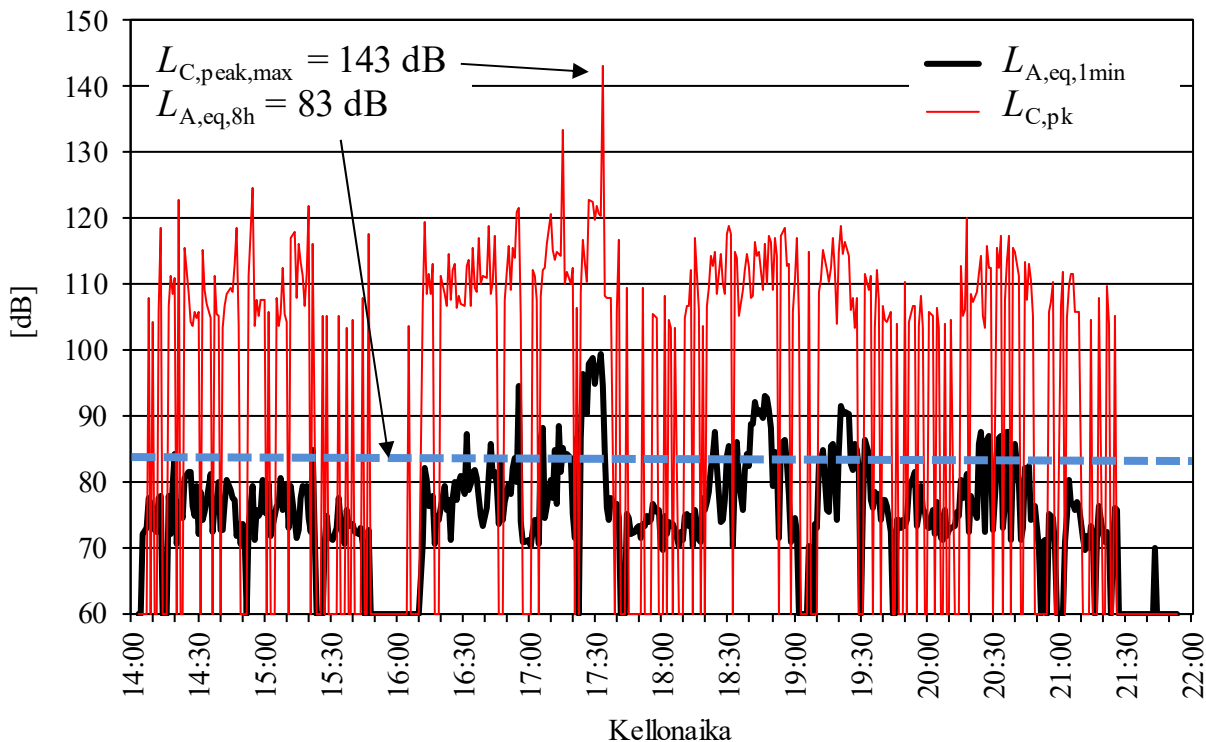
missä aikajaksojen $T_i = 8$ h.

Jos melu on lyhytkestoista, käytetään meluallistuksen tarkastelussa joskus äänialtistustasa (*Exposure level*). Äänialtistustasa on sama kuin melun ekvivalenttitaso normalisoituna yhden sekunnin kestoiseksi äänitapahtumaksi:

$$(9.1.3) \quad L_E = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{t_0} \int_{t=0}^T \frac{\tilde{p}^2(t)}{p_0^2(t)} dt \right]$$

missä $t_0 = 1$ s ja $p_0 = 20$ μ Pa. Äänialtistustason avulla voidaan vertailla keskenään eri kestoisia melutapahtumia

kuulovaurioriskin tai häiritsevyyden kannalta. Yleisimmin määritetään A-painotettu äänenpainetaso, jolloin merkintä on L_{AE} .



Kuva 9.1.1. Meluallistusta mitataan työpaikoilla meluannosmittarilla, joka koostuu korvan läheisyyteen sijoitettavasta mikrofonista sekä taskuun sopivasta tallentimesta. Käyrä esittää suureen $L_{p,A,eq,1min}$ arvoja ajan funktiona. Mittausajalta määritetään vähintään ekvivalenttitaso $L_{p,A,eq}$ sekä huippuäänitaso $L_{C,peak,max}$.

9.2 Kuulonsuojaimet ja suojaustehokkuus

Jos päivittäinen meluallistus ylittää 80 dB, on kuulovaurion riski ilmeinen ja kuulonsuojaus tulisi viimeistään aloittaa. Suojaintyyppejä on kehitetty erilaisia käyttötarkoituksia varten, koska kuulonsuojainten käyttömukavuuden tulisi olla mahdollisimman hyvä. Käyttömukavuutta parantamalla voidaan parantaa kuulonsuojaimen käyttöastetta, jonka merkitys on kriittinen suojaustehokkuuden kannalta. Tuotteina hankittavat kuulonsuojaintyyppit ovat

- kupusuojain
- tulppasuojain
- kypäräsuojain

Jos kuulonsuojaimissa ei ole elektroniikkaa, suojaimia kutsutaan passiivisiksi. Elektroniikan perusteella suojaimet voidaan jakaa esimerkiksi neljään ryhmään:

- Tasoriippuvat kommunikaatiokuulonsuojaimet: suojain vahvistaa suojaimen ulkoisia ääniä, kun niiden taso alittaa kynnsarvon (esim. metsästyskäyttö).
- Turvallisuuden liittyvät kommunikaatiokuulonsuojaimet: kommunikaatio on mahdollista suojainten välillä, tai suojain on yhdistetty esim. puhelimeen. Kommunikaation taso suojaimen sisällä ei ole rajoitettu.
- Viihde-elektroniikkakuulonsuojaimet: tarkoitettu esim. musiikin kuunteluun radion tai puhelimen kautta. Äänitaso on rajoitettu tasoon 82 dB L_A .
- Vastamelukuulonsuojaimet: soveltuvat meluun, jossa on voimakkaita matalataajuuskomponentteja.

Kuulonsuojainten suojaustehokkuus D [dB] määritetään laboratorio-olosuhteissa oktaavikaistoilla 125–8000 Hz. Se määritetään subjektiivisella menetelmällä. Koehenkilöiltä mitataan kuulokynnys (alin kuultava äänitaso) vaaleanpunaiselle oktaavikohinalle tunnetussa äänikentässä ilman suojaimia ja suojaimen kanssa ja suojaustehokkuus saadaan näiden kuulokynnysten erotuksesta.

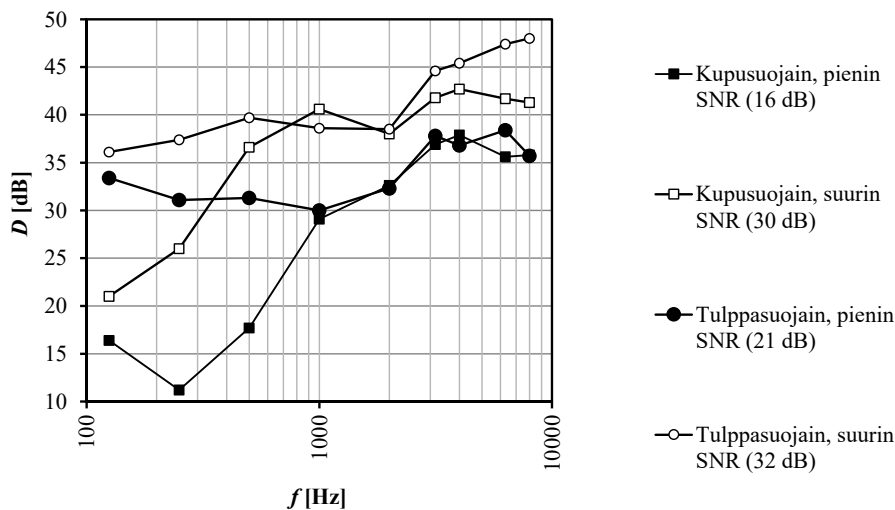
Kuvassa 9.2.1 on esitetty yleisimpien suojaintyyppien eli kuppi- ja tulppasuojainten äänenvaimennusarvoja eri taajuuksilla. Äänenvaimennus yleensä kasvaa taajuuden kasvaessa. Yli 50 desibelin arvoja ei kuitenkaan näytetä saavutettavan. Tähän on syynä luujohtuminen (sivutiesiirtymä pääkallon ja sen aukkojen kautta kuuloelimiin).

Kuppusuojaimen vaimennuskykyyn vaikuttaa pitkälti kupin massa ja tiiveys. Suojaimen sisätila toimii käytännössä vakiopainekammiona tiettyyn rajataajuuteen asti. Rajataajuuden alapuolella suojaimen vaimennuskykyyn määrää pitkälti suojaimen seinämän massa. Rajataajuuden yläpuolella vaimennukseen vaikuttaa myös suojaimen sisätilan absorptio.

Laboratoriossa olosuhteet ovat tarkoin kontrolloituja ja suojainten asetus päähän on huolellisesti tehty. Käytännössä suojainten käytön aikaista suojaustehokkuutta pienentävät useat käyttöön liittyvät tekijät, kuten

- väärä asennus päähän tai korvakäytävään.
- epätiiveys: suojaimen ja ihon välissä hiuksia, partaa, päähine tai silmälasien sangat.
- suojainten tiivisteiden huono kunto tai jäätyminen

Äänivuotojen seurauksena suojaustehokkuus voi pudota tulppasuojaimilla lähes nolnaan. Suojaimen suojaustehokkuutta käytön aikana voidaan arvioida korvakäytävään mahtuvilla pienmikrofoneilla. Tutkimusten mukaan työpaikoilla, joissa on järjestetty suojainten käyttökoulutus, on saavutettu parempi suojaustehokkuus kuin työpaikoilla, joissa koulutusta ei ole järjestetty.



Kuva 9.2.1. Erään tuotevalmistajan pienimmän ja suurimman vaimennuskyvyn omaavien tuotteiden taajuusriippuvat suojaustehokkuusarvot.

9.3 Kuulonsuojainten mitoittaminen

Kuulonsuojain tulisi pyrkiä valitsemaan siten, että korvakäytävän suuaukolla vallitsee äänitaso $L'_A = 75 \pm 5$ dB. Jos A-äänitaso korvakäytävän suuaukolla painuu alle tason 70 dB, puhekommunikaatio alkaa vaikeutua ja elintoiminnan äänet (purenta, verenkierto) alkavat kuulua laskien käyttömukavuutta. Lisäksi pitää varata 3–5 dB varmuusvaraa, jolla kompensoidaan lievän väärinkäytön aiheuttama suojaustehokkuuden lasku.

Jos työpiste on vaihteleva, olisi hyvä, jos käytössä olisi useita suojaimia erilaisiin ympäristöihin. Tämä ei useinkaan ole mahdollista. Silloin suojaimen mitoitus tulisi tehdä voimakkaimman meluimmission mukaan.

Sopivan kuulonsuojaimen valitsemiseksi pitää tuntea melu, jolle altistutaan sekä tarjolla olevien suojainvaihtoehtojen suojaustehokkuusarvot. Kuvassa 9.3.1 on esitetty tyypillinen tuoteseloste, josta löytyvät tiedot erilaisten laskentamenetelmien tekemiseksi. Käytössä on yleisesti oktaavikaista- ja SNR-menetelmät.

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Mean Attenuation (dB)	17.0	24.0	29.5	36.9	37.3	39.3	35.4
Std. deviation (dB)	3.2	2.0	2.6	3.3	4.9	3.2	3.9
Assumed Protection Value (dB)	13.8	22.0	26.9	33.6	32.4	36.1	31.5

EN 352-1:2002

SNR=32 dB H=34 dB M=29 dB L=22 dB

Kuva 9.3.1. Tuoteselosteen äänenvaimennuserittely eräälle kuulonsuojaimelle.

Oktaavikaistamenetelmä. Oktaavikaistamenetelmä on mitoitusmenetelmistä tarkin. Se edellyttää, että melu tunnetaan oktaavikaistoittain. Menetelmää sovelletaan, kun halutaan suojautua tietyn tyyppiseltä erityisen voimakkaalta melulta kuten tiettyä taajuutta tuottavan koneen melulta tietyssä kiinteässä työpisteessä. Suojaimen sisäpuolinen äänenpainetaso saadaan yhtälöstä

$$(9.3.1) \quad L'_A = 10 \cdot \log_{10} \left[\sum_{i=1}^7 10^{(L_{Z,i} + L_{A,i} - D_i)/10} \right]$$

missä $L_{Z,i}$ = ulkopuolinen melutaso taajuudella i , $L_{A,i}$ = A-suodattimen painotus taajuudella i ja D_i (tuoteselosteissa APV) on suojaimen suojaustehokkuus taajuudella i .

SNR-menetelmä on epätarkin mutta helpoin ja useimmiten riittävä mitoitusmenetelmä. SNR-vaimennusarvo kuvaa suojaimen vaimennusta keskimääräistä teollisuusmelua vastaan. Suojaimen sisäpuolinen arvo saadaan kaavalla

$$(9.3.2) \quad L'_{A,eq} = L_{C,eq} - SNR$$

9.4 Kuulonsuojaimen käyttöaste

Kuulonsuojaimen käyttöasteella tarkoitetaan kuulonsuojaimen käyttöajan ja altistusajan suhdetta prosentteina. Jos melussa ollaan aika T , ja siitä ajanjakso T_D käytetään suojaimia, joiden nimellistehokkuus on D [dB], on käyttöaste U [%]

$$(9.4.1) \quad U = 100 \frac{T_D}{T}$$

Ekvivalentti äänenpainetaso saadaan yhtälöllä

$$(9.4.2) \quad L_{eq,T} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T} \sum_i T_i 10^{L_i/10} \right]$$

missä T_i [s] on kussakin melutilanteessa vietetty aika ja L_i [dB] on tätä aikaa vastaava äänitaso. Tarkastellaan ideaalitapausta, jossa henkilön ympäristössä vallitsee koko ajan T sama äänitaso $L_{eq,out}$. Tällöin ekvivalenttitasoksi saadaan korvakäytävässä ilman suojaimia $L_{eq,out}$. Jos henkilö käyttää kuulonsuojaimia ajan T_D koko melussaoloajasta T ($T_D < T$) saadaan ekvivalenttitasoksi korvakäytävässä ajalla T , $L_{eq,ear}$ [dB] kahden äänitason summa

$$(9.4.3) \quad L_{eq,ear} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T} \left(T_D 10^{(L_{eq,out} - D)/10} + (T - T_D) 10^{L_{eq,out}/10} \right) \right]$$

Todellinen korvakäytävässä saavutettava suojaustehokkuus D' [dB] ajalla T on energiaperiaatteen mukaisesti muotoa

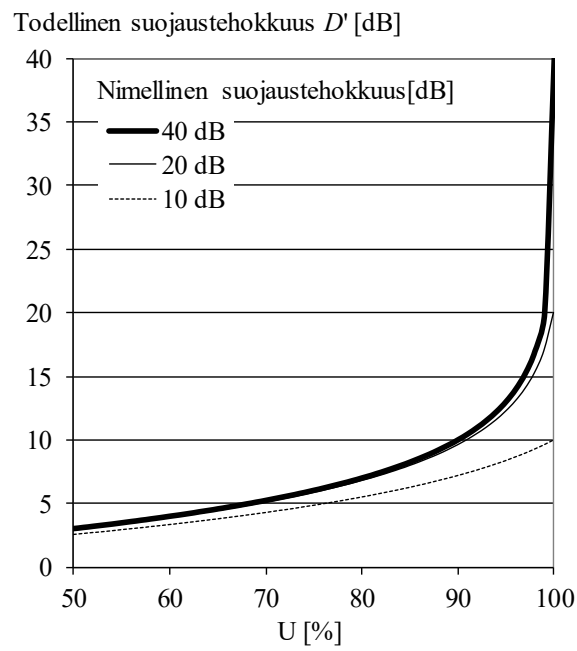
$$(9.4.4) \quad D' = L_{eq,out} - L_{eq,ear}$$

Se voidaan esittää myös muodossa

$$(9.4.5) \quad D' = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T} \left(T_D 10^{-D/10} + T - T_D \right) \right]$$

Kuvassa 9.4.1 on esitetty suojaimella saavutettava todellinen suojaustehokkuus kolmella eri nimellissuojaustehokkuuden arvolla. Nimellissuojaustehokkuuteen päästään vain, jos käyttöaste on 100 %.

Suojaintyyppillä ei ole juurikaan merkitystä, jos käyttöaste on alle 90 %. Jos käyttöaste on alle 50 %, millään suojaimella ei saavuteta yli 3 dB:n todellista suojaustehokkuutta.



Kuva 9.4.1. Kuulonsuojaimen käyttöasteen U [% altistusajasta] vaikutus todelliseen suojaustehokkuuteen.

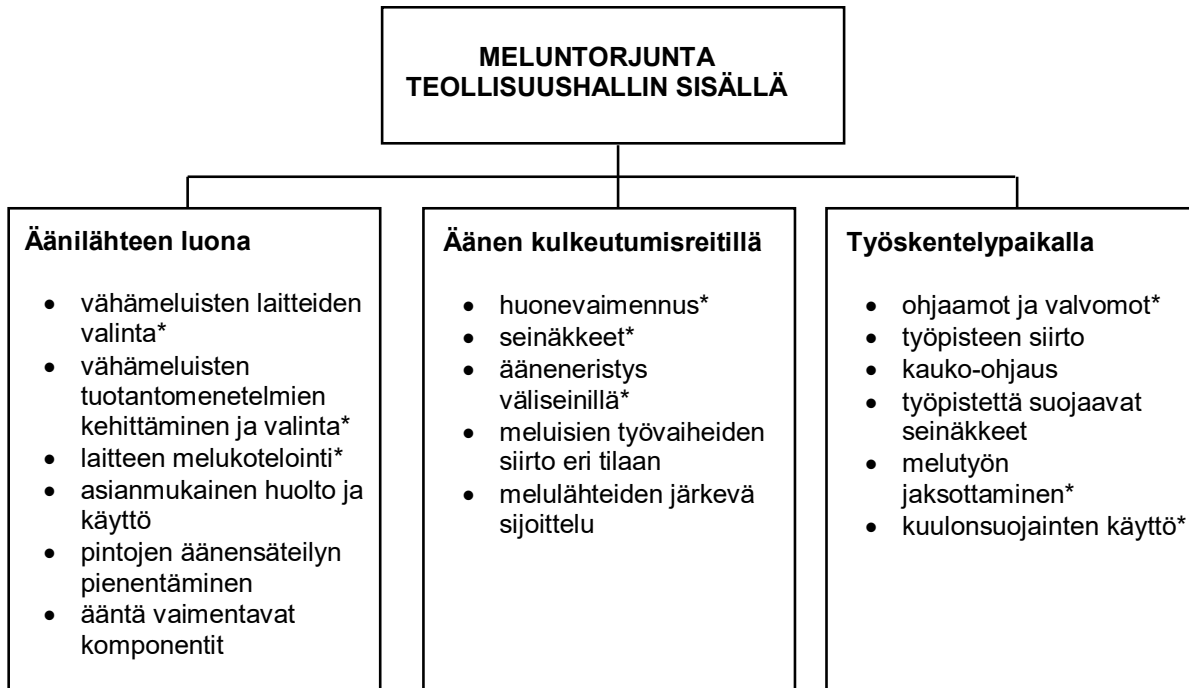
KIRJALLISUUS

-

10 Teollisuusmeluntorjunta

10.1 Meluntorjunnan keinot

Tämä luku tarkastelee meluntorjuntaa teollisuushallien sisätiloissa. Meluntorjunta voidaan kohdistaa äänilähteeseen, äänen kulkeutumisreittiin tai kuuntelualueelle (kuva 10.1.1). Seuraavissa luvuissa tarkastellaan tämän kuvan mukaisia meluntorjuntakeinoja.



Kuva 10.1.1. Teknisten meluntorjuntakeinojen jaottelu.

10.2 Koneiden melupäästön ilmoittaminen

Vähämeluisten koneiden hankinta on meluntorjuntakeinoista luultavasti tehokkain, jos vähämeluisia koneita on tarjolla. Melupäästön pienentäminen vaikuttaa suoraan myös meluallistukseen.

Koneen melupäästö ilmoitetaan ensisijaisesti äänitehotason L_W avulla. Suurikokoisilla laitteilla ilmoitetaan usein päästöäänepainetaso, L_p , käyttäjän paikalla (*operator's position*) tai muulla yksilöidyllä paikalla.

Melupäästöilmoitus (*noise emission declaration*) tulee laatia ISO 4871 mukaan. Melupäästöilmoitus voidaan antaa yksi- tai kaksilukuisena melupäästön ilmoitusarvona.

Mitattu melupäästö L on joko A-painotettu äänitehotaso, A-painotetun päästöäänepainetason keskiarvo tai C-painotettu päästöäänepainetaso huippuarvo, joka on määritetty mittausten perusteella. Mitatut arvot voidaan määrittää joko yksittäiselle koneelle tai usean koneen keskiarvona.

Epävarmuus K on mitattuun melupäästöarvoon liittyvän mittausepävarmuuden lukuarvo. K :n lukuarvo voi olla välillä 1–5 dB riippuen mitattujen laitteiden lukumäärästä ja mittausstandardin sisäisestä tarkkuudesta.

Yksilukuinen melupäästön ilmoitusarvo L_d on mitatun melupäästön ja siihen liittyvän epävarmuuden summa pyöristettynä lähimpään desibeliin: $L_d = L + K$. Kaksilukuinen melupäästön ilmoitusarvo tarkoittaa, että L ja K ilmoitetaan erikseen. Kuvassa 10.2.1 on esimerkki melupäästöilmoituksesta.

Machine model number, operating conditions, and other identifying information:				
Analyzer, serial number: xxxxxx				
DECLARED DUAL-NUMBER NOISE EMISSION VALUES in accordance with ISO 4871				
operating mode	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4
A-weighted emission sound pressure level, L_{pA} (ref. 20 μ Pa) at operator's position, in decibels	52	54	54	55
Uncertainty K_{pA} in decibels	4	4	4	4
A-weighted emission sound pressure level, L_{pA} (ref. 20 μ Pa) at bystander position (behind the analyzer), in decibels	55	56	56	56
Uncertainty K_{pA} in decibels	4	4	4	4
Mode 1: Startup and initialization Mode 2: Action 1 Mode 3: Analyzation process Mode 4: Shutdown and sleep Values determined according to noise test code given in ISO 11202.				
NOTES: 1. The sum of measured noise emission value and its associated uncertainty represents an upper boundary of the range of values which is likely to occur in measurements. 2. The declared L_{pA} values include the background noise correction $K_{1A} = 0$ dB (no correction needed) 3. The declared L_{pA} values include the local environmental correction $K_{3A} = 2$ dB which was determined using the measured reverberation time of the test room (ISO 11202 Annex A).				

Kuva 10.2.1. Esimerkki erään kemiallisen analyysilaitteen melupäästöilmoituksesta. Melupäästöilmoitus voi ilmoittaa usean laitteen äänitason yhteisvaikutuksen. Tulokset on esitetty kaksilukuisena ilmoitusarvona.

10.3 Koneen meluanalyysi

Jos vähämeluista konetta ei voida hankkia, on sovellettava meluntorjuntatoimia paikanpäällä. Teknillisesti ja taloudellisesti järkevä meluntorjuntasuunnittelu edellyttää tietoa siitä, mitkä äänilähteet ovat äänekkäimpiä ja missä määrin millekin äänilähteelle altistutaan. Meluntorjuntatoimia on helppoa perustella, jos toimenpiteillä vaimennetaan mahdollisimman monen työntekijän henkilökohtaista meluallistusta. Useimmiten tehokkain melunvaimennus saadaan aikaan, jos itse konetta voidaan vaimentaa. Tällöin pitää tuntea, mistä ääni säteilee työtilaan ja mikä saa melun aikaan. Melulähteestä pitää selvittää:

- tärkeimmät sisäiset lähteet;
- tärkeimmät etenemisreitit näistä lähteistä;
- tärkeimmät ääntä säteilevät osat koneessa.

10.3.1 SISÄISET LÄHTEET

Ensimmäinen analyysi sisäisistä lähteistä voidaan suorittaa säteilevän äänen spektrin perusteella yhdistettynä tietoon koneen rakenteesta ja toiminnasta (mahdolliset sisäiset lähteet, pyörimisnopeudet, siipien, napojen ja hammaspyörän hampaiden lukumäärät, jne.). Spektrissä esiintyvien piikkien aiheuttaja voidaan usein tunnistaa tällä tavalla. Lisätietoa voidaan saada säteilevän äänen aikahistoriasta. Molemmissa lähestymistavoissa koneen käyttöparametrien, ja erityisesti käyntinopeuden, vaihtelevuus voi olla erittäin hyödyllinen tapa ymmärtää signaalien lähdettä. Kuulovarainen arviointi on usein nopeampi tapa saada tietoa melulähteestä kuin mittaaminen.

Jos spektristä ja aikahistoriasta ei voida vielä vetää johtopäätöstä sisäisestä äänilähteestä, seuraavat vaiheet voivat olla

- sisäisten lähteiden perättäinen kytkentä pois päältä (jos mahdollista);
- perättäinen äänen etenemisen katkaiseminen sisäisistä lähteistä koneen rajapinnoille (eristämällä ilmaääni, nesteääni tai runkoääni)

Lähestymistapoja esittää Taulukko 10.3.1.

10.3.2 ETENEMISREITIT

Suoraviivaisin keino saada tietoa eri äänireittien suhteellisesta merkityksestä on kasvattaa peräkkäisesti eristystä näillä reiteillä esimerkiksi lisäämällä tehokkaampia verhoiluja, eristeitä tai vaimentimia. Nämä eivät

kuitenkaan ole tehokkaita keinoja pienillä taajuuksilla. Kvantitatiivista tietoa etenemisreiteistä voi saada kokeellisesti käyttäen teoreettisia malleja apuna tai käyttäen sekoitettua lähestymistapaa (Taulukko 10.3.2).

10.3.3 SÄTEILY

Analyysi voi liittyä ilmaan tapahtuvaan säteilyyn, putkessa olevaan kaasuun, putkessa olevaan nesteeseen, rakenteeseen tai näiden yhdistelmään. Analysoitaessa säteilyä konetta ympäröivään ilmaan voidaan soveltaa taulukon 10.3.3 menetelmiä.

Taulukko 10.3.1. Sisäisten lähteiden analysointi.

	Nimitys	Kuvaus	Huomiot
1	Taajuusspektrin analyysi	Äänen spektrin määrittäminen mielivaltaisessa kaukokentän jossain pisteessä.	Jos koneen mekaaninen rakenne ja toimintaperiaatteet tunnetaan, taajuusanalyysi voi osoittaa mitkä sisäiset lähteet ovat tärkeitä.
2	Säteilevän äänen-paineen aika-analyysi	Äänenpaineen määrittäminen ajan funktiona kaukokentän jossain pisteessä.	Taajuusanalyysin lisäksi aika-avaruuden analyysi voi antaa lisätietoa liittyen herätmekanismeihin.
3	Osälähteiden sammuttaminen	Toisinaan on mahdollista käyttää konetta pitäen tietyt sisäiset lähteet sammutettuina. Jos äänenpainetta mitataan kaukokentässä (ajan ja/tai taajuuden funktiona), voidaan osälähteen osuus kokonaisuudesta määrittää.	
4	Sisäisten osälähteiden perättäinen peittäminen tai katkaiseminen	Usein on mahdollista vähentää äänen etenemistä tietyistä osälähteistä koneen rajapinnoille. Mittaa toimenpiteen vaikutus äänenpaineeseen (joko ajan ja/tai taajuuden funktiona) sopivassa ympäristössä.	Ilmaääntä tuottava osäänilähde voidaan asentaa jonkin sopivan kotelon sisään. Runkoääntä tuottava osälähde voidaan eristää koneen rakenteesta sopivalla joustavalla elementillä.
5	Toimintaparametrien vaihtelevuus	Kuorman tai nopeuden vaihtelevuus. Mittaa toimenpiteen vaikutus äänenpaineeseen (joko ajan ja/tai taajuuden funktiona) sopivassa ympäristössä.	
6	Kepstrianalyysi	Mittaa kiihtyvyys koneen rajapinnan pisteessä, synkronoi mittaus pyörivän akselin kanssa. Käytä analyysissä sopivaa ohjelmistoa.	Pyörivillä koneilla tämä on erittäin sopiva menetelmä erottamaan sisäiset lähteet koneen rakenteen vakiovasteesta.
7	Suora korvaamismenetelmä	Korvaa osälähde keinotekoisella lähteellä, jonka ominaisuudet tunnetaan. Mittaa säteilevä äänitaso.	Menetelmä jolla määritetään osälähteen (ekvivalentti) lähteen voimakkuus (ilmaääni tai runkoääni)
8	Käänteinen korvaamismenetelmä	Kohdan 7 käänteinen menetelmä, käyttäen kuitintä vastaanottopisteessä ja mikrofonina tai kiihtyvyyssanturia sisäisen lähteen paikalla.	Mukava vaihtoehto kun sisäistä lähettä ei voida korvata keinotekoisella lähteellä. Oletuksena on systeemin lineaarisuus.
9	Korrelaatio- tai koherenssimenetelmä	Määritä korrelaatio säteilevän äänenpaineen ja osälähteestä saatavan referenssisignaalin välillä.	Tämän menetelmän hyödyllisyys voi olla rajoitettu koska käytännössä voi olla vaikeaa saada sopivaa referenssisignaalia
10	Äänen intensiteetin mittaukset	Määritä osittaisäänitohot mahdollisista sisäisistä äänilähteistä.	Sopiva menetelmä eri komponenttien suoran ilmaäänen säteilyn määrittämisessä.

Taulukko 10.3.2. Koneen sisällä tapahtuvan äänen etenemisen analysointimenetelmät.

	Nimitys	Kuvaus	Huomiot
1	Suora siirtofunktion mittaus	Käytä keinotekoisista lähettä sisäisen lähteen paikalla ja mittaa kiihtyvyys koneen rajapinnoilla tai äänenpaineet kaukokentässä	
2	Käänteinen siirtofunktion mittaus	Kohdan 1 käänteinen menetelmä. Lähteen ja vastaanottajan paikat vaihdetaan keskenään.	Käyttökelpoinen kun on mahdotonta asentaa keinotekoisista lähettä koneen sisälle
3	Perättäinen siirtymäreittien katkaisu koneen sisällä	Käytä eristystekniikkoja äänen eri etenemisreiteillä	Menetelmä on sopiva tärkeiden äänireittien tunnistamiseksi
4	Tehon virtaaman mittaus	Käytä erityistekniikoita ilma-, neste- tai runkoäänen tehon virtauksen määrittämiseksi tietyllä reitillä	Monimutkaisia menetelmiä; erityisasiantuntemusta vaativa.
5	Moodianalyysi (kokeellinen)	Mittaa rakenteen värähtelykäyttäytyminen deterministisesti.	Ei sovellu resonoivan vasteen taajuusalueelle

Taulukko 10.3.3. Äänen säteilyn analysointimenetelmät.

	Nimitys	Kuvaus	Huomiot
1	Ääntä säteilevien, valittujen osien peittäminen	Peittää perätysten säteilevät koneenosat ja mittaa säteilevä äänenpaine	Sopiva eri koneen osien suorien ilmaäänen osuuksien määrittämiseen
2	Äänen intensiteetin mittaukset	Ota intensiteettianturin kanssa näytteitä koneen pinnalta	
3	Äänenpaineen lähikenttämittaukset	Mittaa äänenpaine läheltä säteilevää pintaa	Helpompi suorittaa kuin 2 mutta epätarkempi
4	Suuntaavat äänenpainemittaukset	Mittaa äänenpaine vapaassa kentässä voimakkaasti suuntaavalla mikrofonilla tai mikrofoniverkolla	Suoraviivainen menetelmä mutta harvoin käytetty
5	Värähtelymittaukset ilmaääntä säteilevillä pinnoilla	Mittaa värähtely säteilevällä pinnalla. Säteilyteho saadaan yhtälöstä $W = \rho c S v^2 \sigma \omega$	Sopiva jos säteilytehokkuudesta σ on olemassa hyvä arvio
6	Moodianalyysi	Analysoi ulommaisten rajapintojen deterministinen käyttäytyminen	Sopiva pienillä taajuuksilla jos säteilytehokkuus tunnetaan

10.4 Koneiden meluntorjunta

Äänen synty- ja etenemismekanismin ymmärtämisen helpottamiseksi on välttämätöntä luoda yksinkertaisia akustisia malleja. Mallit muodostavat perustan meluntorjuntatoimenpiteille suunnitteluvaiheessa. Yleispätevä lähestymistapa on tehdä erottelu seuraavasti:

- sisäiset lähteet;
- etenemisreitit koneen sisällä;
- säteily sen rajapinnoilta.

Sisäiset lähteet ja läpäisyreitit voidaan kumpikin jakaa kolmeen kategoriaan väliaineen mukaan:

- ilmaääni
- nesteääni
- runkoääni

Säteilyn katsotaan tässä luvussa rajautuvan ilmaan.

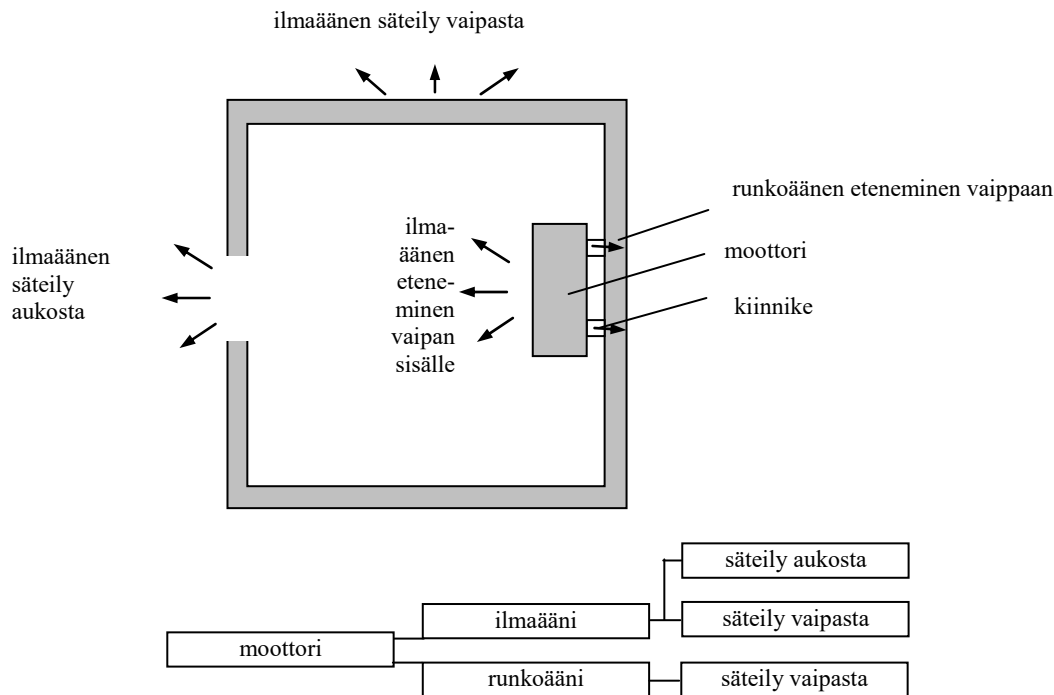
Kuva 10.4.1 esittää koneen akustisen mallintamisen periaatetta. Moottori on ainoa sisäinen lähde. Se synnyttää ilmaääntä ja runkoääntä. Voidaan erottaa kolme sisäistä läpäisyreittiä:

- ilman välityksellä rungon sisällä aukkoon;
- ilman välityksellä rungon sisällä rungon seinämiin;
- seinän kiinnikkeiden läpi runkoon.

Säteily tapahtuu aukosta ja rungon seinämistä. Koneen säteilemä kokonaisääniteho on näiden kolmen osatekijän summa.

Systemaattinen lähestymistapa alkaa edellämainittujen osatekijöiden suhteellisen tärkeysjärjestyksen arvioinnilla. Seuraava vaihe on kuvan **10.4.1** lohkojen tutkiminen etsien mahdollisuuksia vähentää lähteen voimakkuutta, läpäisyä ja/tai säteilyä. Tämä pitäisi tehdä ottaen huomioon koneen suunnitteluprosessin muut osatekijät.

Tarkasteltaessa konemelua on erotettava kaksi melun syntytapaa: *virtausdynaaminen* (kaasu ja/tai neste) ja *mekaaninen* syntyminen. Virtausdynaaminen melu johtuu fluidin paineen ja nopeuden satunnaisista vaihteluista. Esimerkkeinä ovat palamisprosessit, puhaltimet, purkautumisputket ja hydrauliset systeemit. Mekaaninen melu johtuu koneen osien värähtelistä, jonka synnyttävät esimerkiksi iskujen tai epätasapainossa olevien massojen aiheuttamat dynaamiset voimat. Värähtelyt kulkeutuvat melua säteileville pinnoille kuten koneen koteloon tai työstettävään kappaleeseen. Esimerkkeinä ovat hammaspyörästöt, sähkömoottorit, vasarat, tärstimet ja mekaaniset painokoneet.



Kuva 10.4.1. Yksinkertaistettu kone, joka käsittää sähkömoottorin ja rungon, jossa on aukko.

Esimerkkeinä virtausdynaamisen melun vaimentamisesta ovat:

- jaksollisen painevaihtelun vaimentaminen virityspisteessä
- virtausnopeuksien vähentäminen
- yht'äkkisten painevaihteluiden välttäminen
- läpivirtauskomponenttien tehokas suunnittelu

Esimerkkeinä mekaanisesti generoituvan melun vaimentamisesta ovat:

- virittävien dynaamisten voimien vähentäminen esim. käyttämällä elastisia kerroksia iskun aiheuttaman impulssin kestoajan pidentämiseksi
- koneen värähtelyn nopeuden vähentäminen virityspisteessä tietyllä dynaamisella voimalla esimerkiksi käyttämällä jäykistimiä tai lisämassoja (hitauskappale)
- värähtelyn siirtymisen vaimentaminen (runkoääni) virityspisteestä ääntä säteileville pinnoille esimerkiksi käyttämällä elastisia materiaaleja, joilla on voimakas sisäinen vaimennus
- ääntäeristävien verhouksien käyttäminen
- värähtelevän rakenteen säteilemän äänen vaimentaminen esimerkiksi käyttämällä
 - ohuita runkorakenteisia seiniä jäykkien paksujen seinien sijaan
 - vaimennuskerroksia ohuiden metallilevyjen pinnalla
 - rei'itettyjä metallilevyjä edellyttäen, ettei levyiltä vaadita ääneneristävyttä;

10.5 Vähämeluiset tuotantoprosessit

Seuraavia menettelytapoja suositellaan, kun halutaan vähämeluisampia tuotantoprosesseja:

- Vältä iskuja ja nopeita liikkeitä käyttäen tasaista liikettä (hidasta edistyvää liikettä) ja rajoita iskuääntä vähentämällä iskunopeuksia (esim. pienennä pudotuskorkeutta, käytä pienempiä massoja) ja käytä vaimennusmateriaaleja iskupinnoilla (kuva **10.5.1**)
- Vältä käyttämästä kanavistoja, joissa on virtausta rajoittavia esteitä; valitse suurisäteisiä mutkia tai suunnittele poikkipinta-alaltaan jatkuva systeemi epäjatkuvan sijaan
- Käytä purkausaukoissa useita suuttimia yhden suuttimen sijaan, mikä vähentää turbulenssia virtauksen reuna-alueilla
- Vältä äänen nopeutta lähellä olevia nopeuksia ja ehkäise kavitaatiota käyttämällä useita paineenalennusventtiilejä
- Käytä muovisia käyttöpyöriä metallisten sijaan, mikäli mekaaninen kuormitusvaatimus tämän sallii.

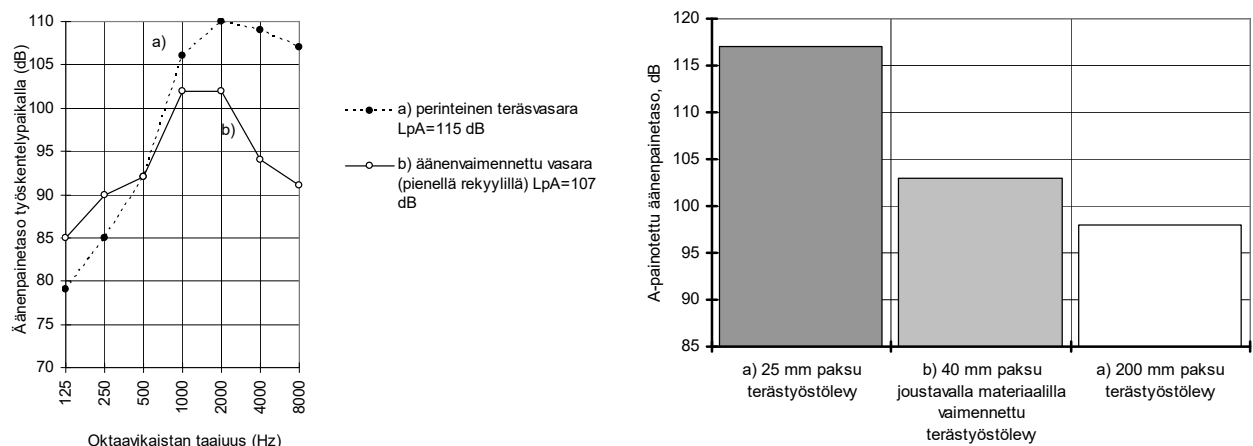
- Asenna vinohampainen hammaspyörästö suoran hammaspyörästön sijaan
- Varmista, että kaikki pyörivät massat ovat tasapainossa
- Valitse vähämeluisia laakereita (kitkalaakerit ovat tavallisesti hiljaisempia kuin rullalaakerit)
- Valitse materiaaleja, jotka antavat parhaan yhdistelmän (esim. muovi/teräs) ja kitkakontaktissa olevien elementtien pintavoitelun
- Käytä materiaaleja, joilla on korkea sisäinen vaimennus (esim. harmaa valurauta, sandwich-levyt, muovit)
- Rajoita runkomelun etenemistä ääntä säteileville pinnoille

Joissakin tapauksissa on asianmukaisempaa korvata vanha meluinen kone vähämeluisella sen sijaan, että toteutettaisiin näitä jälkikäteen tehtäviä meluntorjuntatoimenpiteitä (taulukko 10.5.1).

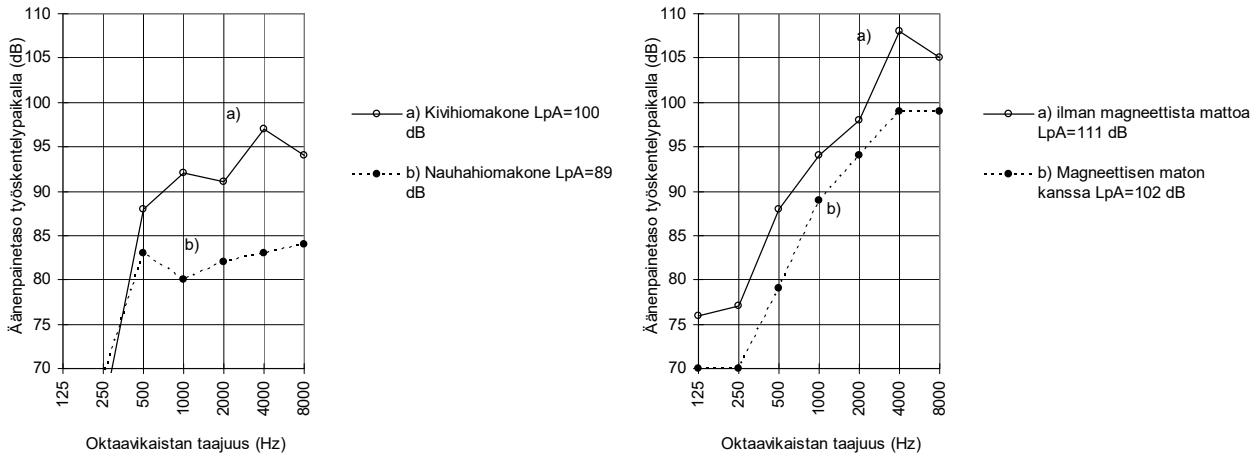
On myös olemassa meluisia toimintoja, jotka eivät liity kiinteisiin koneisiin, esimerkiksi käsikoneiden käytöstä aiheutuvat äänet. Nämä voivat usein olla työhuoneessa dominoivia äänilähteitä. Valittaessa huolellisesti työkalut tai työn järjestelyt (esim. äänenvaimennetut vasarat, pehmustetut työpöydät, vähämeluiset jauhinlevyt, magneettiset vaimennusmatot, jne.) voidaan saavuttaa huomattavaa melun vaimennusta (kuva 10.5.2).

Taulukko 10.5.1. Esimerkkejä vaihtoehdoista vähämeluisemmista prosesseista

Voimakasmeluiset prosessit	Vähämeluisemmat prosessit
lyöntiniittäus	paine- tai rullaniittäus
paineilma- tai polttomootorivälitys	sähkökäyttöinen välitys
reikien tekeminen tai leikkaaminen esim. kiveen tai betoniin iskukoneella	poraan tai timanttihampailla varustetun pyörösaahan terään sovitettavien koneiden käyttö
tyssäysmeisti	kartio- tai suorapuristus
työntöleikkaus	vetoleikkaus
virtauskuivaaminen	säteilykuivaaminen
plasma-happileikkaus	vedenalainen plasmaleikkaus
iskuleikkaus, stanssaus	laserleikkaus
perinteinen TIG/TAG hitsaus	TIG/TAG-suojakaasuhihtaus
liekkikarkaisu	laserkarkaisu
niittikiinnitys	painekiinnitys
iskumuotoilu	hydraulinen puristus
pistehitsaus	saumahitsaus
hionta kivilaikalla	nauhahionta
ketjuvälitys	hihnävälitys
niittäminen	liimaaminen
sahaaminen	leikkaaminen
leikkaaminen	poraaminen
takominen	valaminen
vierittäminen tai pudottaminen	nostaminen tai laskeminen
sovittaminen lekalla	tuotannon suunnittelu siten, ettei lekaa tarvita



Kuva 10.5.1. Esimerkkejä vasaroinnin meluntorjunnasta vasaratyyppiä vaihtamalla tai työstettävän kohtion massaa kasvattamalla.



Kuva 10.5.2. Vasemmalla esimerkki hionnan aikaisesta äänenpainetasosta puhdistettaessa valurautaisen sähkömoottorin runkoa. Oikealla esimerkki hiottavan kappaleen sisäisen vaimennuksen kasvattamisen vaikutus.

10.6 Melukotelointi

Koneen äänieristäminen koteloimalla on erittäin yleinen äänenvaimennuskeino. Koska kotelointi on usein kallis ja kookas ratkaisu, tulisi harkita, voidaanko konetta uusimalla, siirtämällä tai osastoimalla saavuttaa edullisempi lopputulos. Koteloinnin suunnittelussa tulee huomioida seuraavat reunaehdot:

- kotelarakenteen vaikutus tuotantoon, nopeus ja laatu
- huoltotoimien helppous; purettavuus ja avattavuus
- ergonomia esimerkiksi valaistusolosuhteiden tai kotelon liikkuvien osien kohdalla
- kulkeutumisen vaikeutuminen
- ilmanvaihto ylikuumentumisen estämiseksi
- muut turvallisuustekijät
- äänilähteen järkevän paikan valinta
- koteloinnin vaikutukset ympäristöön
- sähkö- ja automaatio suunnittelu
- läpivientien paikat ja määrät
- ovien ja ikkunoiden tarve ja paikat

Kotelointi tulisi suunnitella siten, että sillä saavutettava äänenvaimennus on riittävä kaikilla taajuuksilla. Riittävän äänenvaimennuksen arvioimiseksi tarvitaan tieto ympäristön taustäänitasosta tyypillisellä käyttöajankohdalla. Kotelon äänenvaimennusta ei kannata mitoittaa yli 10 dB ympäristön tuottamaa äänitasoa alemmaksi.

Äänenvaimennukseen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- kiinteän seinärakenteen ääneneristävyys R_w ja tästä saatava läpäisyysuhde τ_w
- kotelon sisäpinnan keskimääräinen absorptiosuhde α_w
- (läpivienti)aukkojen kokonaispinta-alan S_a ja kotelon seinäpinta-alan S_w suhde
- aukon (*aperture*) läpäisyysuhde τ_a

Koska kotelossa on yleensä seinän lisäksi ainakin yksi ikkuna ja ovi, arvioidaan yhteisääneneristävyys R_{tot} .

Seuraavassa esitetään yksinkertainen malli, jolla voidaan arvioida kotelolla muodostuva äänenvaimennus (kuva 10.6.1). Oletetaan, että kone on asennettu tärinäeristimien päälle, jolloin runkoääniä ei tarvitse huomioida. Lisäksi oletetaan, että kotelon sisällä vallitsee diffuusi äänikenttä. Tällöin seinäpinnalle osuu äänen intensiteetti I

$$(10.6.1) \quad I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho_0c_0}$$

missä p on äänenpaineen keskiarvo kotelon sisällä. Jos äänilähteen teho on W , on tasapainotilanteessa seinäpinnoille absorboituva, seinäpinnat läpäisevä ja aukon läpäisevä ääniteho yhtä suuri kuin äänilähteen

teho:

$$(10.6.2) \quad W \approx I[S_w(\alpha_w + \tau_w) + S_a\tau_a]$$

Reiän läpäisee ääniteho W_a

$$(10.6.3) \quad W_a = S_a I \tau_a = \frac{S_a W \tau_a}{S_w(\alpha_w + \tau_w) + S_a \tau_a}$$

Seinän läpäisee ääniteho

$$(10.6.4) \quad W_w = S_w I \tau_w = \frac{S_w W \tau_w}{S_w(\alpha_w + \tau_w) + S_a \tau_a}$$

Läpäisyasteeksi koko kotelolle muodostuu

$$(10.6.5) \quad \frac{W_t}{W} = \frac{S_a \tau_a + S_w \tau_w}{S_w(\alpha_w + \tau_w) + S_a \tau_a}$$

ja äänenvaimennukseksi muodostuu

$$(10.6.6) \quad D = 10 \log_{10} \frac{W}{W_t} = 10 \log_{10} \frac{S_w(\alpha_w + \tau_w) + S_a \tau_a}{S_a \tau_a + S_w \tau_w} = 10 \log_{10} \frac{\frac{S_w}{S_a}(\alpha_w + \tau_w) + \tau_a}{\frac{S_w}{S_a} \tau_w + \tau_a}$$

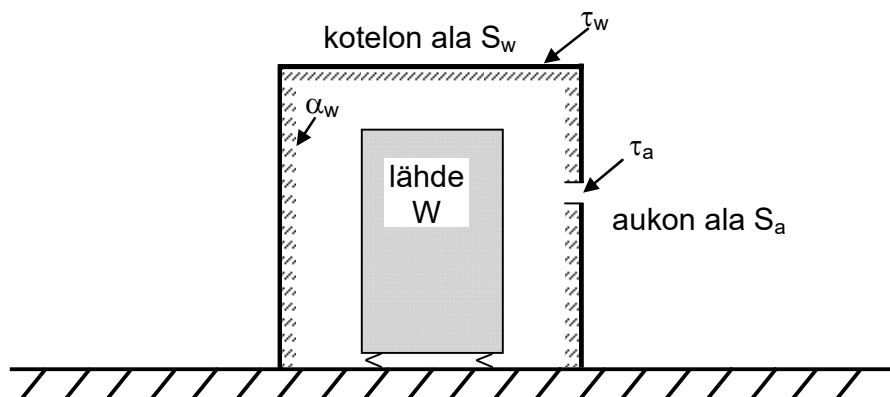
Yleensä laskelmissa on turvallista olettaa, että aukkojen ääneneristys on mitätön, ts. $\tau_a=1$. Tämä pätee hyvin aukkoille, joiden seinämät ovat kovapintaisia.

Aukot tulisi pyrkiä toteuttamaan siten, että seinämät ovat ääntä absorboivia. Parhaassa tapauksessa aukossa on myös mutkia, jolloin seinämiin osuu enemmän ääntä.

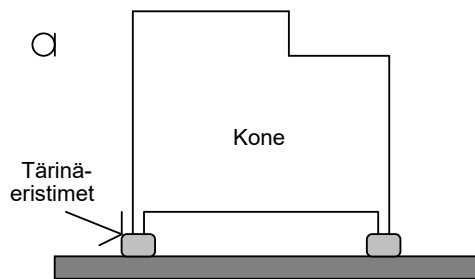
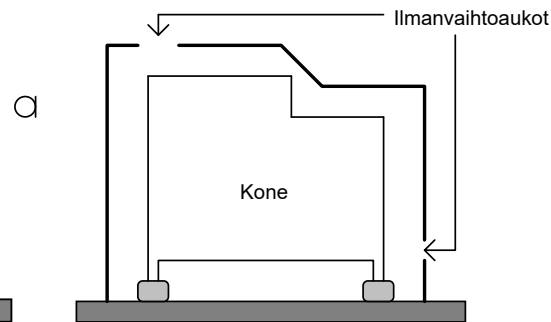
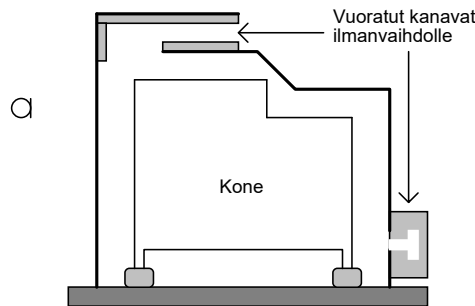
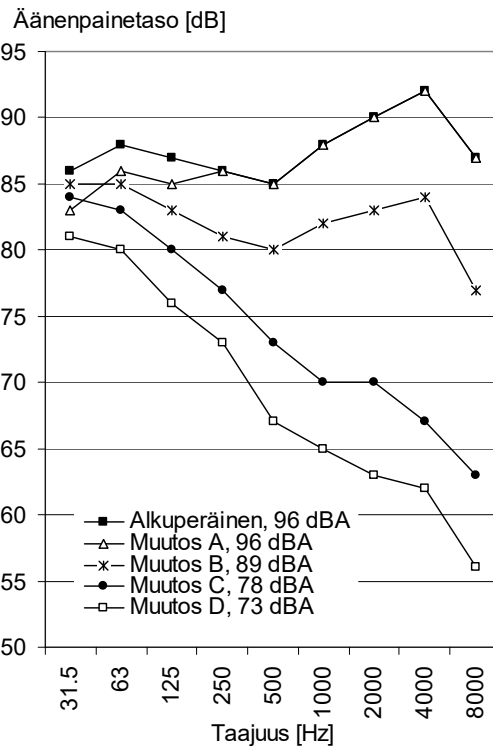
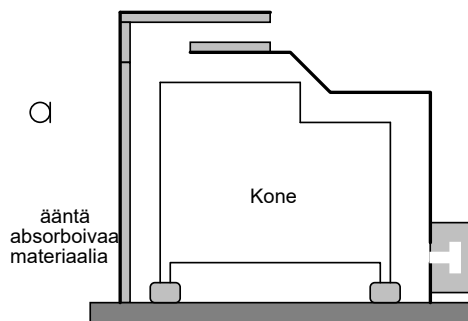
Aukon läpäisykerroin saadaan aukon äänenvaimennuksesta D_a yhtälöllä

$$(10.6.7) \quad \tau_a = 10^{-D_a/10}$$

Mitä pidempi ja mutkaisempi läpivientiaukko on, sitä parempi äänenvaimennus saavutetaan. Ääntä absorboivan ja mutkaisen läpiviennin äänenvaimennus paranee taajuuden kasvaessa. Jos seinämiltään absorboivassa läpiviennissä ei ole mutkia, äänenvaimennus heikkenee hieman suurilla taajuuksilla.



Kuva 10.6.1. Yksinkertaisen melukotelon parametrit.

Muutos A: Tärinäeristys**Muutos B:** Kotelointi, läpivientiaukot suuria**Muutos C:** Koteloinnin läpivientien parannus**Muutos D:** Koteloinnin sisäpintojen lisäabsorptio

Kuva 10.6.2. Tyypillisesti saavutettavia melunvaimennuksia erilaisilla koneen ja koteloinnin järjestelyillä.

Äänikenttä kotelon sisällä ei todellisuudessa ole lähelläkään diffuusia äänikenttää, koska seinät voivat olla absorboivia ja koteloiden tilavuus on pieni. Kotelon seinäpinoille osuu lisäksi epätasainen äänen intensiteetti. Läpiviennit tulisi sijoittaa mahdollisuuksien mukaan kohtiin, jossa äänen intensiteetti on pieni.

Kuvassa 10.6.2 on esimerkki erilaisilla kotelotarkoituksilla saavutettavasta äänenvaimennuksesta. Äänenvaimennus alkaa esimerkissä tärinäeristimisestä ja etenee kovapintaisen koteloiden kautta absorboivaan koteloon mukaanlukien ääntä vaimentavat aukot. Parhaassa tapauksessa äänenvaimennus on 25 dB L_A . Harvoin päästään käytännössä tältä parempaan tulokseen, jos kotelossa on aukkoja.

Kotelointi kannattaa mitoittaa järkevälle tasolle. Äänenvaimennusta ei tule mitoittaa suuremmaksi, mikä on tilan taustamelutaso ilman koteloitavaa konetta. Liiallinen äänenvaimennus kasvattaa turhaan kustannuksia. Esimerkiksi seinämän äänieristykseen riittää yleensä ohut peltirakenne ja sisäpinnalle ääntä absorboiva pinnoitus.

10.7 Rakennusakustiset toimenpiteet

Rakennusakustisia toimenpiteitä ovat mm. seinäkkeet, huonepintojen pinnoittaminen absorptiomateriaaleilla sekä osastointi seinillä. Voimakasmeluiset koneet olisi äänieristettävä eri osastoon vähämeluisista koneista, kun tuotantoprosessit tämän sallivat.

Rakennusakustisten toimenpiteiden kustannukset ovat yleensä suuria, koska materiaalien tai rakenteiden määrä on suuri. Seinien ja seinäkkeiden suunnittelussa pitää ottaa huomioon mm. tuotannon materiaalivirtojen

hoitaminen.

Usein hallinosturit tai trukki liikenne estävät kokonaisten seinien tai seinäkkeiden rakentamisen ja niihin jää aukkoja, jolloin äänenvaimennus harvoin ylittää 10 dB.

Rakennusakustisia toimenpiteitä on käsitelty oppikirjan muissa luvuissa:

- Huoneabsorption lisäys
- Seinärakenteiden ilmaääneneristys
- Meluseinäkkeet
- Tärinäneristys

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että huoneabsorptiolla ja meluseinillä voidaan vaikuttaa äänitasoihin 3-15 dB riippuen etäisyydestä äänilähteeseen. Lähellä äänilähdettä melunvaimennus voi olla mitätön. Jos äänilähteitä on runsaasti, äänenvaimennusvaikutusta ei havaita yhtä hyvin. Tästä esitetään esimerkkejä kirjassa RIL 243-4-2011.

KIRJALLISUUS

RIL 243-4-2011 Rakennusten akustinen suunnittelu. Teollisuustilat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry., 96 s, Helsinki, 2011 (sisältää laajan kirjallisuusluettelon).

Saarinen K, Tanttari J, Työkoneiden melun vähentäminen - perusteet, MET Tekninen tiedotus 4/95, Metalliteollisuuden keskusliitto, Helsinki, 1995.

Mantovaara U, Vähämeluiset konepajatuotteet, MET Tekninen tiedotus 27/86, Metalliteollisuuden keskusliitto, Helsinki, 1986.

Stig Ingemansson, Hans Elvhammar, Melu ja sen torjunta. Periaatteita ja sovelluksia. Työturvallisuuskeskus, 1979.

ISO 11690 Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise workplaces containing machinery - Part 1: Noise control strategies, Part 2: Noise control measures

ISO/TR 11688-1:1995 Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment - Part 1: Planning

ISO/TR 11688-2:1998 Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment - Part 2: Introduction to the physics of low-noise design

11 Värähtely ja värinä

11.1 Johdanto

Värähtelyllä tarkoitetaan yleensä kiinteässä kappaleessa tapahtuvia värähtelyjä, kun sitä tarkastellaan tekniseltä kannalta. Runkoäänet ovat värähtelyä, mutta runkoäänistä puhutaan, kun kappale toimii ilmaäänien välittäjänä tai säteilijänä. Värähtely muuttuu **tärinä**ksi, kun se voidaan aistia kappaleen liikkeenä. Tärinä on subjektiivinen kokemus värähtelystä. Runkoääntä on kuultava ääni, joka on syntynyt rakenteeseen suoraan kohdistuvasta värähtelystä. **Räminä**ksi kutsutaan värähtelyn aiheuttamaa sekundääristä runkoääntä, jonka taajuus on suurempi kuin värähtelyn. Räminää on esimerkiksi viinilasien kilinä kaapissa junan ohiajaessa.

Pienikin värähtely voi vaurioittaa rakennuksia, koneita ja laitteita. Värähtelyllä on terveyshaittaa vain, jos se on aistittavissa tärinä. Pienitaajuinen, alle 1 Hz tärinä koetaan heilumisena tai huojumisena. Voimakas tärinäaltistus voi aiheuttaa ihmiselle suoraa elimistöistä terveyshaittaa. Rakennuksissa esiintyvä heikompi tärinä voi aiheuttaa viihtyvyyshaittaa ja häiritsevyyttä.

Tässä luvussa käsitellään perusasioita värähtelystä, sen eristämisestä sekä tärinän arvioinnista ja torjunnasta.

11.2 Perussuureet

Värähtely on kappaleen edestakaista harmonista liikettä. Harmonisessa värähtelyssä kappaleen poikkeama s [m], joka vastaa siis etäisyyttä tasapainoasentoon $s=0$ nähden, tapahtuu yhtälön

$$(11.2.1) \quad \mathbf{s}(t) = \hat{s} e^{i(\omega t + \varphi_s)}$$

mukaan, missä φ_s on vaihesiirto, ω on kulmataajuus [Hz] ja t on aika [s].

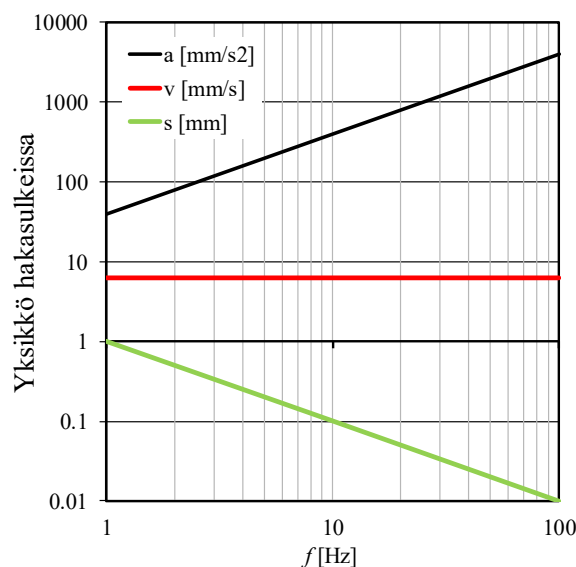
Värähtelylle käytetään sovelluksesta riippuen jotakin seuraavista suureista: poikkeama s [m], nopeus v [m/s] tai kiihtyvyys a [m/s²]. Näiden suureiden välillä vallitsee perinteinen *Newtonilainen* riippuvuus:

$$(11.2.2) \quad \mathbf{a}(t) = \frac{d}{dt} \mathbf{v}(t) = \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{s}(t)$$

joten

$$(11.2.3) \quad \mathbf{a} = i\omega \mathbf{v} = -\omega^2 \mathbf{s}$$

Sama värähtelysignaali voidaan siis esittää kolmella eri tavalla, jotka voidaan johtaa toinen toisistaan. Kuvassa **11.2.1** on esitetty suureiden keskinäistä suhdetta erään värähtelysignaalin tapauksessa.



Kuva 11.2.1. Värähtelyn poikkeama-, nopeus- ja kiihtyvyysspektrit riippuvat toisistaan.

11.3 Tärinäaltistuksen mittaaminen ja arviointi

Tärinälle esitetään ohjearvot yleensä absoluuttisina arvoina. Desibeliesitystä käytetään lähinnä värähtelyn eristystä arvioitaessa.

Ihmiseen kohdistuvaa tärinäaltistusta mitataan kiihtyvyyden avulla. Mittaus tehdään 3D -antureita käyttäen tai määrittämällä vuoronperään 1D -anturilla eri suunnissa. Kolmen dimension vektorisumma saadaan Pythagoraan lauseen avulla kiihtyvyyden tehollisarvojen x-, y- ja z-komponenteista

$$(11.3.1) \quad \tilde{a}_v = \sqrt{\tilde{a}_{w,x}^2 + \tilde{a}_{w,y}^2 + \tilde{a}_{w,z}^2}$$

Värähtelykiihtyvyyden tehollisarvo saadaan värähtelykiihtyvyydestä yhtälöllä

$$(11.3.2) \quad \tilde{a} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

*Kokovartalotärinä*llä tarkoitetaan koko kehoon kohdistuvaa tärinää. Tärinä kohdistuu ihmiseen joko lattiasta tai istuimesta. Kokovartalotärinän vaikutusten arvioinnissa tehollisarvoon tehdään spektriavaruudessa painotus, jolloin tulos vastaa subjektiivista kokemusta värähtelystä (vertaa äänenpainetason A-painotus):

$$(11.3.3) \quad \tilde{a}_w = \sqrt{\sum_{n=1}^N (W_n \tilde{a}_n)^2}$$

missä W_n tarkoittaa joko painotuserrointa W_d tai W_k taajuudella n kuvan **11.3.1** mukaan. Vakio n koskee summattavia taajuuskaistoja.

*Käsitärinä*llä tarkoitetaan yksinomaan käsiin kohdistuvaa tärinää. Käsitärinän vaikutusten arvioinnissa tehdään myös painotus

$$(11.3.4) \quad \tilde{a}_{h,w} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (K_n \tilde{a}_{h,n})^2}$$

missä K_n on käsitärinän arvioinnissa käytettävä painotuserroin (h=hand, w=weighted, **kuva 11.3.1**). Käsitärinäaltistusta arvioidaan määrittämällä ekvivalentti painotettu kiihtyvyys 8 tunnin työpäivän kestolle:

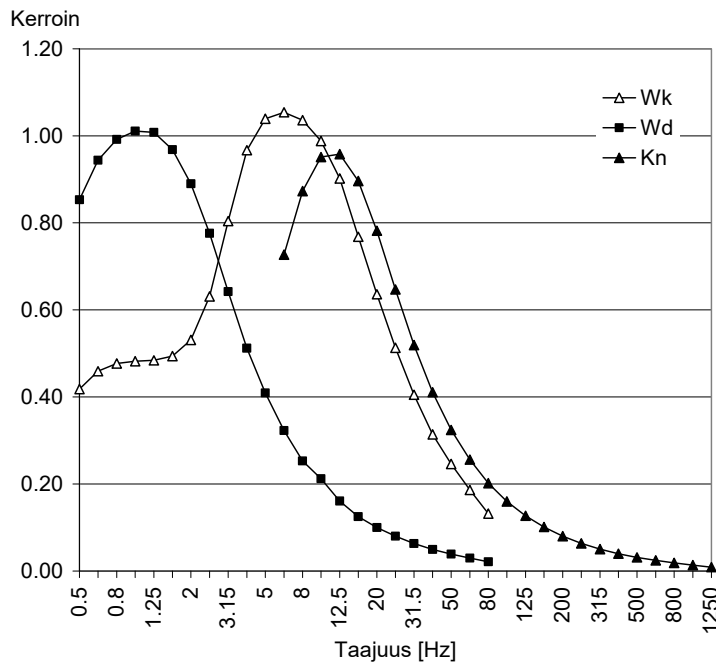
$$(11.3.5) \quad \tilde{a}_{h,w,eq(8)} = \sqrt{\frac{1}{T_8} \int_0^{\tau} \tilde{a}_{h,w}^2(t) dt}$$

missä $\tilde{a}_{h,w}(t)$ on painotetun tärinän tehollisarvo ajan funktiona ja T_8 on 8 tuntia. Jos altistuminen ei kestä 8:tuntia päivässä vaan ajan T , arvioidaan energialtaan ekvivalentti 8 tuntia kestävä tärinä kaavasta

$$(11.3.6) \quad \tilde{a}_{h,w,eq(8)} = \tilde{a}_{h,w,eq(T)} \sqrt{\frac{T}{T_8}}$$

Havaintokynnys on esitetty kuvassa **11.3.2**.

	W_k	W_d	K_n
0.5	0.418	0.853	
0.63	0.459	0.944	
0.8	0.477	0.992	
1	0.482	1.011	
1.25	0.484	1.008	
1.6	0.494	0.968	
2	0.531	0.890	
2.5	0.631	0.776	
3.15	0.804	0.642	
4	0.967	0.512	
5	1.039	0.409	
6.3	1.054	0.323	0.727
8	1.036	0.253	0.873
10	0.988	0.212	0.951
12.5	0.902	0.161	0.958
16	0.768	0.125	0.896
20	0.636	0.100	0.782
25	0.513	0.080	0.647
31.5	0.405	0.063	0.519
40	0.314	0.049	0.411
50	0.246	0.039	0.324
63	0.186	0.030	0.256
80	0.132	0.021	0.202
100			0.160
125			0.127
160			0.101
200			0.0799
250			0.0634
315			0.0503
400			0.0398
500			0.0314
630			0.0245
800			0.0186
1000			0.0135
1250			0.0089



Kuva 11.3.1. Kokokeho- ja käsitärinäaltistuksen arvioinnissa käytettävät painotustermit ISO 2631 ja ISO 5349 mukaan. Standardeissa painotuskertoimia on vielä lisää. Painotuskerrointa W_d käytetään x - ja y - suunnissa. Painotuskerrointa W_k käytetään z -suunnassa.

	a [mm/s^2]	v [mm/s]
5	15	0.48
10	18	0.29
20	20	0.16
40	25	0.10
80	28	0.06
160	40	0.04

Kuva 11.3.2. Istuvan henkilön keskimääräinen aistimiskynnys pystysuuntaiselle värähtelylle perustuen useisiin laboratoriokeksiin (Schwendicke & Altinsoy, 2020).

11.4 Työperäisen tärinäaltistuksen raja-arvot

Käsitärinä aiheuttaa terveyshaittoja erityisesti verenkierrolle, tuki- ja liikuntaelimille tai hermostolle. Käsitärinälle altistutaan erilaisia käsikoneita käytettäessä. Kehotärinä aiheuttaa erityisesti alaselän sairauksia ja selkärangan vammoja. Kehotärinälle altistutaan mm. ajoneuvoissa ja työkonoiden ohjaamoissa.

Työperäisen tärinäaltistuksen arvioinnissa käytetään Valtioneuvoston asetusta 48-2005, joka on harmoninen euroopan yhteisön "tärinädirektiivin" (2002/44/EY) kanssa. Menettely on yhtenäinen Euroopassa.

Tärinäaltistukselle on esitetty asetuksessa toiminta- ja raja-arvot. Toiminta-arvojen ylittyminen velvoittaa työnantajan tiettyihin torjuntatoimenpiteisiin kun taas raja-arvo on ns. ehdoton yläraja, jonka ylittymistä ei saa lainkaan tapahtua.

Käsitärinäaltistuksen raja-arvo on kahdeksan tunnin vertailu aikaan suhteutettuna 5 m/s^2 ja toiminta-arvo $2,5 \text{ m/s}^2$. Kehotärinäaltistuksen raja-arvo on kahdeksan tunnin vertailu aikaan suhteutettuna $1,15 \text{ m/s}^2$ ja toiminta-arvo vastaavasti $0,5 \text{ m/s}^2$. Jos tärinälle altistuminen on hyvin lyhytaikaista, käytetään kehotärinälle raja-arvoa 7 m/s^2 ja käsitärinälle raja-arvoa 35 m/s^2 .

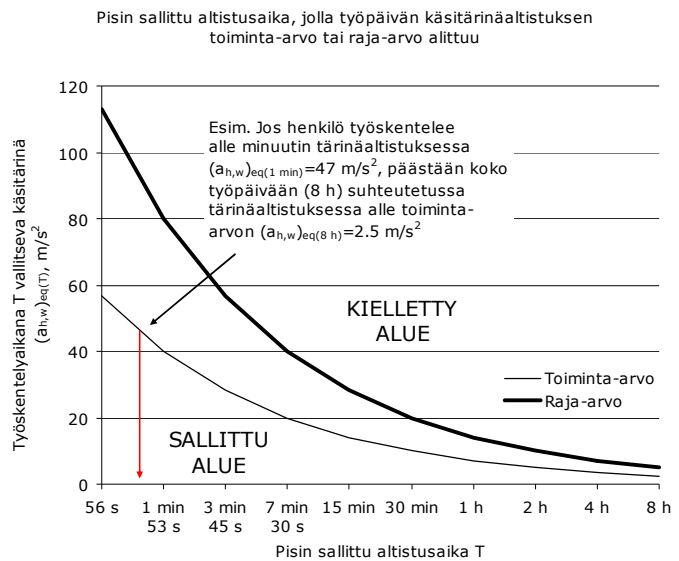
Käsitärinäaltistuksen arviointi perustuu kahdeksaan tuntiin suhteutetun päivittäisen altistuksen eli käsiin välittyvän tärinän nimellisen 8 tunnin keskiarvon $A(8)$ laskemiseen. Päivittäinen altistus ilmoitetaan taajuuspainotetun kiihtyvyyden tehollisarvojen vektorisummana eli ns. kokonaisarvona. Tehollisarvot a_{hwk} ,

a_{hwy} ja a_{hwz} määritetään toisiaan vastaan kohtisuorissa suunnissa. Altistusta arvioidaan standardin ISO 5349-1 (2001) luvuissa 4 ja 5 ja liitteessä A määritellyllä tavalla. Altistus voidaan arvioida käytettävien työvälineiden valmistajien toimittamien tärinäpäästötietojen ja työskentelyajoista ja -tavoista tehtyjen havaintojen perusteella tai mittaamalla.

Kehotärinäaltistuksen arviointi perustuu kahdeksaan tuntiin suhteutetun päivittäisen altistuksen nimellisen keskiarvon laskemiseen. Altistus ilmoitetaan istuvan tai seisovan työntekijän osalta suurimpana arvona luvuista $1,4 a_{wx}$, $1,4 a_{wy}$, a_{wz} , missä x ja y tarkoittavat vaakasuuntaista tärinää ja z pystysuuntaista tärinää standardin ISO 2631-1 mukaisesti. Altistus voidaan arvioida käytettävien työvälineiden valmistajien antamien tärinäpäästötietojen ja työskentelyajoista ja -tavoista tehtyjen havaintojen perusteella tai mittaamalla.

Kehotärinän kohdalla pitemmät mittausajat ovat mahdollisia, varsinkin jos henkilö istuu ajoneuvon ohjaamossa koko työpäivän mutta mittaus on periaatteessa samanlaista.

Kuvassa 11.4.1 on esitetty käsitärinän mittaustapahtumaa ja käsitärinän raja-arvo eri altistusajoille.



Kuva 11.4.1. Käsitärinäaltistusta mitataan asettamalla käden ja kahvan väliin rauta, johon 3D-anturi kiinnitetään. Oikealla on käsitärinäaltistuksen toiminta-arvo eri tärinäaltistusajoilla laskettuna.

11.5 Liikennetärinän vaikutukset ja arviointi

Rakennuksessa havaittavaa ympäristöstä tulevaa tärinää aiheutuu useimmin raide- tai tieliikenteestä. Rakennustärinää mitataan värähtelynopeuden avulla.

Suomessa ei ole tärinää koskevia raja-arvoja rakennuksia koskien. Rakentamismääräysten edellyttämän asumisviihtyvyyden saavuttamiseksi tärinän voimakkuuden tulisi sellainen, että tärinästä valitetaan mahdollisimman vähän. VTT on koonnut ulkomaisia ohjeita ja niitä sovelletaan yleisesti väylien ja rakennusten suunnittelussa (Törnqvist ja Talja, 2006; Talja ym., 2008; Talja ja Saarinen, 2009).

Tärinä voi heikentää asumismukavuutta sekä vaurioittaa rakennuksia. Tärinän haittoja ovat mm.

- asumismukavuuden väheneminen
- keskittymiskyvyn ja nukkumisen häiriintyminen
- pelko rakennevaurioista tai kiinteistön arvon alenemisesta.

Yleensä asumismukavuuteen liittyvät haitat ilmenevät huomattavasti pienemmillä värähtelynopeuksilla kuin rakenteelliset vauriot.

Liikenteen tärinä aiheutuu pääasiassa siitä, että tien väylässä on epätasaisuuksia. Renkaiden osuessa epätasaisuuksiin, ajoneuvon iskunvaimentajat alkavat resonoimaan. Voimakkainta resonanssi on 10–16 Hz:n alueella, missä havaitaan yleensä voimakkaimmat tärinäamplitudit. Tärinän voimakkuus rakennuksessa riippuu voimakkaasti rakennuksen rakennustavasta sekä rakenteiden omista resonansseista. Vaikein tilanne on silloin, kun rakenteilla on resonansseja samalla taajuusalueella, missä liikenteen tärinä on voimakkainta.

Esimerkiksi välipohjien resonanssit sijaitsevat 5 ja 20 Hz:n välillä, missä myös tieliikenteen tärinää eniten ilmenee.

Mitä kevyempi rakennus on, sitä herkemmin se lähtee värähtelemään. Hankalimpia ovat savipatjalle rakennetut paaluttamattomat rakennukset, joissa on kevytvälipohjia. Kerrostalossa tärinän amplitudi pienenee 4–10 dB kerrosta kohden, joten suurimmat haitat koetaan yleensä alimmissa kerroksissa. Ylimmissä kerroksissa havaitaan sen sijaan helpommin huojuntaa, joka voi olla rakenteille haitallista.

Tieliikenteen tärinätorjuntaa on mm.

- teiden linjaaminen riittävän kauas taloista varsinkin savipohjaisilla alueilla,
- tienpinnan tasaisuuden ylläpito,
- normaalia paksumpi tienpinta,
- nopeuden rajoittaminen,
- raskaan liikenteen ohjaaminen vähemmän tärinähaittaa aiheuttavalle tielle,
- rakennuksen perustuksien vahvistaminen, tai ääritapauksissa,
- rakennuksen "tärinäeristäminen" ns. maakatkolla.

Liikennetärinän arvioinnissa värähtelyanturi sijoitetaan tarkoituksenmukaiseen paikkaan:

- tärinävalituskohteessa sen huoneen lattiaan, jossa tärinähaitta koetaan;
- rakennuslupavaiheessa paikkaan, johon rakennus tulee ja/tai läheiseen rakennukseen, jossa liikennetärinä on samanlaista.

Värähtelynopeutta mitataan xyz-suunnissa. Tavanomaisesti tarkasteltava ylärajataajuus on 100 Hz. Kussakin suunnassa värähtelynopeutta tarkastellaan erikseen, eli ei määritetä xyz-resultanttiarvoa. Värähtelynopeuteen tehdään ensin taajuuspainotus yhtälöllä

$$(11.5.1) \quad W_v(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}}$$

missä $f_0=5.6$ Hz, jonka jälkeen saadaan painotettu värähtelynopeus tarkasteltavalla taajuuskaistalla v_w yhtälöllä

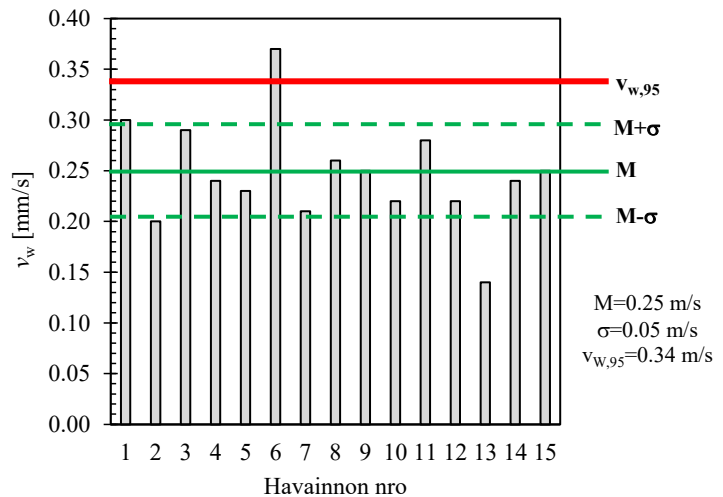
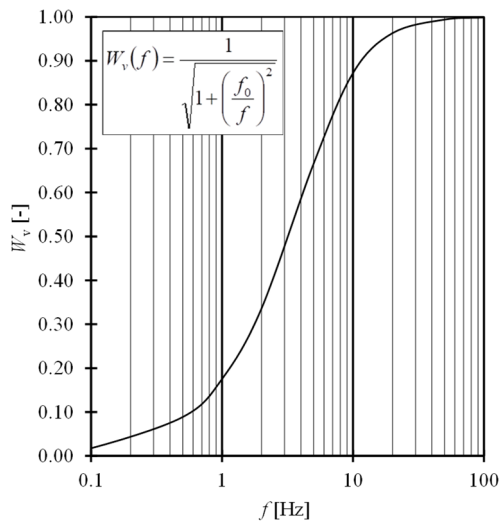
$$(11.5.2) \quad v_w = \sqrt{\sum_i (W_{v,i} v_i)^2}$$

missä i käsittää tarkasteltavan taajuuskaistan taajuuspisteiden (esim. terssikaistojen) lukumäärän.

Värähtelyä seurataan jakso, jonka aikana saadaan edustava määrä värähtelytapahtumia. Esimerkiksi tieliikenteellä riittää yleensä vuorokauden seuranta, kun rautatieliikenteellä voidaan tarvita viikon jakso. Jaksolta valitaan 15 voimakkainta sekunnin mittaista v_w -arvoa ($v_{w,1s}$). Näistä lasketaan keskiarvo, M , ja keskiahajonta SD . Lopputuloksena esitetään taajuuspainotettujen värähtelynopeusmaksimien 95 % persentiilin ylärajaarvo, $v_{w,95}$, joka saadaan yhtälöllä

$$(11.5.3) \quad v_{w,95} = M + 1.8 \cdot SD$$

Suomessa sovelletaan uudisrakennuksiin ohjetta, jonka mukaan $v_{w,95} \leq 0.30$ mm/s (Ympäristöministeriö, 2018). Tällaisissa olosuhteissa arvioidaan, että korkeintaan 15 % väestöstä kokisi tärinätapaukset häiritsevinä.



Kuva 11.5.1. Vasemmalla yhtälön 11.5.1 mukainen taajuuspainotus. Oikealla viidentoista voimakkaimman värähtelytapauksen tilastollinen tarkastelu.

11.6 Värähtelyn eristäminen

Kuvassa **11.6.1** on esitetty tilanne, jossa alustaan m kohdistuu sinimuotoinen voima F , jonka kulmataajuus on ω ja massa m . Jos laite asennetaan jäykästi lattiaan kiinni, laitteen värähtely siirtyy suoraan lattiaan ja voi aiheuttaa haittaa lähitiloissa. Värähtelyn eristykseen tarkoituksena on, että jäykkä asennus korvataan joustavalla asennuksella, jolloin laitteen värähtely lisääntyy mutta lattiaan kohdistuu vähemmän voimia.

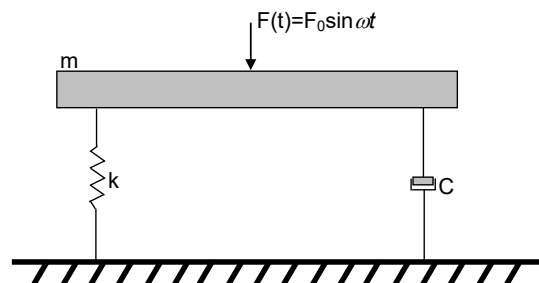
Eristäminen perustuu jousi-massa -muodostelmaan, jossa laite edustaa massaa ja eristin joustaa. Järjestelmässä vaikuttaa 4 voimaa. Massan hitausvoiman, jousivoiman ja liikkeen nopeudesta aiheutuvan vaimentavan voiman summan pitää olla yhtä suuri kuin pyörivän koneen häiriövoima:

$$(11.6.1) \quad m \frac{d^2x}{dt^2} + kx + C \frac{dx}{dt} = F(t)$$

missä m on koko systeemin massa [kg], k on jousivakio [N/m] ja C on jousen vaimennus [Ns/m].

Järjestelmän ominaistaajuus f_0 saadaan selville asettamalla häiriövoima nolaksi, poikkeuttamalla järjestelmä lepotilastaan ja päästämällä järjestelmä irti värähtelemään vapaasti. Tämän jälkeen järjestelmä jatkaa vaimenevaa värähtelyliikettä vakiotajuudella f_0 . Oletetaan, että vaimennusta ei ole. Olettamalla, että värähtely on sinimuotoista $x = \hat{x} \sin \omega t$, saadaan

$$(11.6.2) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



Kuva 11.6.1. Järjestelmä, joka koostuu koneesta, jonka massa alustarakenteineen on m . Kone aiheuttaa massaan m voiman F ja alustaan voiman F .

Tavallisille teräsjousille jousivoiman ja massan aiheuttaman puristuman Δx [m] välillä vallitsee yhteys

$$(11.6.3) \quad k \cdot \Delta x = m \cdot g$$

eli puristuma saadaan yhtälöstä

$$(11.6.4) \quad \Delta x = \frac{mg}{k}$$

joten ominaistaajuus on

$$(11.6.5) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta x}} \approx \frac{1}{2\sqrt{\Delta x}}$$

Systeemin ominaistaajuus voidaan siis silmämääräisesti arvioida tarkastelemalla jousen tai eristimen puristumaa tasapainoasemaan nähden.

Jos massaan vaikuttaa häiriövoima F ja jousien välityksellä alustaan vaikuttaa voima F' , saadaan energian siirtosuhteeksi

$$(11.6.6) \quad e = \left(\frac{F'}{F} \right)^2$$

Sen käänteisluku on eristävyys:

$$(11.6.7) \quad D = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{F}{F'} \right)$$

Jos järjestelmässä ei ole häviöitä, eristävyys saadaan kaavasta

$$(11.6.8) \quad D = 20 \cdot \log_{10} (1 - n^2)$$

missä n on taajuussuhde

$$(11.6.9) \quad n = \frac{f}{f_0}$$

Yleensä jousissa on häviöitä tai jousissa on iskunvaimennus, joka on verrannollinen liikkeen nopeuteen

$$(11.6.10) \quad F = kx + C \frac{dx}{dt}$$

Vaimennussuhteeksi on määritelty

$$(11.6.11) \quad \gamma = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2\sqrt{km}}$$

missä C_c on kriittinen vaimennuskerroin. Eristävyys on tällöin muotoa

$$(11.6.12) \quad D = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{(2\gamma n)^2 + (1 - n^2)^2}{1 + (2\gamma n)^2} \right]$$

Käytännössä tärinäeristys on kuitenkin lähempänä kuvan **11.6.2** käyrää.

Vaimennussuhde eli häviökerroin voidaan määrittää eristyskäyrästä puoliarvoveveysmenetelmällä

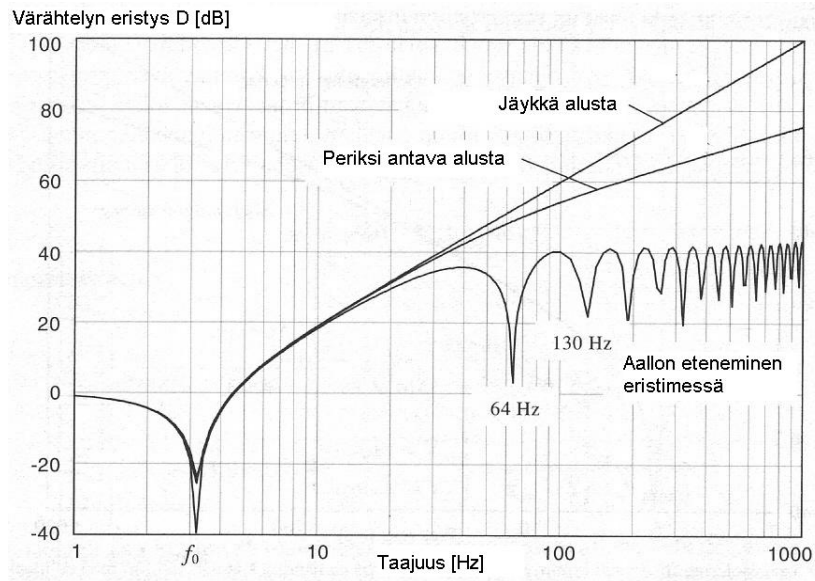
$$(11.6.13) \quad \gamma = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

missä f_0 [Hz] on resonanssitaajuus, jossa saavutetaan suurin negatiivinen eristävyys, ja f_1 [Hz] ja f_2 [Hz] ovat taajuudet, jossa eristävyys on 3 dB taajuutta f_0 parempi ($f_1 < f_2$).

Värähtelyn eristäminen tapahtuu pääpiirteittäin seuraavasti:

- selvitetään koneen kierrosluku ja lasketaan käyntitaajuus f , vaihtoehtoisesti suoritetaan mittaus ja päätetään alin taajuus f , joka vielä halutaan eristää
- selvitetään koneikon alle asennettavissa olevien eristimien järkevä lukumäärä

- selvitetään systeemin massa ja painojakauma
- tarkastellaan kutakin eristintä ja sille kohdistuvaa massaa: valitaan eristin siten, että alin eristettävä taajuus f ei osu massa-jousi -systeemin ominaistajuuden kohdalle vaan vähintään kohtaan $2f_0$, jolloin voidaan saavuttaa yli 10 dB eristävyys.



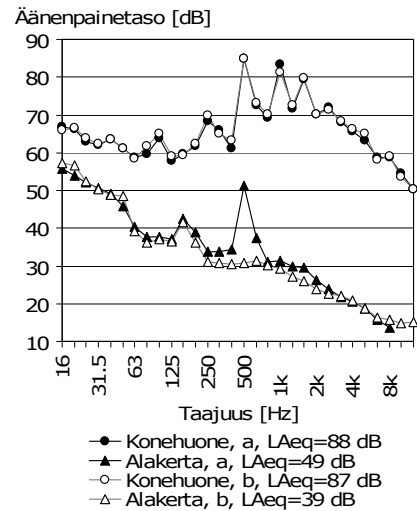
Kuva 11.6.2. Käytännössä värinäeristys kasvaa harvoin yli 30 dB:n, koska eristimessä on resonansseja. (Boden et al., 1999)

Edellä on oletettu, että alustassa ei tapahdu liikehdintää herätevoiman vuoksi eli perustuksen jousivakio on äärettömän suuri. Käytännössä alusta voidaan katsoa riittävän jäykäksi, jos perustuksen massa on kymmenkertainen eristettävään kohteeseen nähden ja perustus ei heilu.

Jos värähtelevä kone on massiivinen, sitä ei voida eristää eristimillä. Käytännössä "eristäminen" tapahtuu siten, että koneen alle valetaan vähintään kymmenen kertaa sitä painavampi betoniantura, johon kone kiinnitetään jäykästi. Antura eristetään liikuntasaumalla muusta rakennuksesta.

Jos koneesta lähtee jäykästi asennettuja putkistoja, putkistot pitää eristää rungosta samoin periaattein kuin edellä tai putkiston ja koneen väliin tulee asentaa joustava liitos.

Yhtälön **11.6.5** mukaan värähtelevän järjestelmän resonanssitaajuus voidaan arvioida jo pelkän puristuman perusteella. Kuvassa **11.6.3** on esimerkki huonosti ja hyvin toteutetusta värähtelyneristyksestä. Ohuella eristimellä resonanssitaajuus on korkea, minkä johdosta värähtelevän koneen pyörimisääni siirtyy lähes vaimentumattomana rakennuksen runkoon aiheuttaen äänen alakerrassa. Kun eristimen puristumaa kasvatetaan, systeemin resonanssitaajuus putoaa merkittävästi koneen pyörimistaajuuden alapuolelle, jolloin eristyskyky on 20 dB.



Kuva 11.6.3. Valokuvissa on sijoitettu elastinen värinäneristys teräksestä tehdyn koneikon rungon ja lattian väliin. a) Väärän tyyppinen värinäneristin, joka ei puristu riittävästi. b) Oikeantyyppinen värinäneristin, jossa puristuma on riittävä. c) Äänenpainetasot konehuoneessa ja sen alapuolisessa toimistossa kummallakin eristintyyppillä. Tyypin b eristimellä saavutetaan haluttu vaimennus 500 Hz:llä.

KIRJALLISUUS

Boden, H. et al. (2002). Ljud och Vibrationer, Kungl Tekniska Högskolan, Marcus Wallenberg Laboratoriet, Stockholm, Sweden.

SFS EN 1299 Mekaaninen värähtely ja isku. Koneiden värinäneristys. Ohjeita värinälähteen eristämiseksi. Suomen standardisoimisliitto SFS r.y., Helsinki, 2009.

Schwendicke, A., Altinsoy, M. E. (2020). Frequency Masking Effects for Vertical Whole-Body Vibration for Seated Subjects. *Vibration* 3 357–370. Online at: <https://www.mdpi.com/2571-631X/3/4/24>.

Talja, A. (2004). Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta, VTT Tiedotteita 2278, Espoo.

Törnqvist, J., Talja, A. (2006). Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working Papers 50, Espoo.

Ympäristöministeriö (2018). Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 28.6.2018, Helsinki. <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B2852D34E-DA43-4DCA-9CEE-47DBB9EFCB08%7D/138568>.

12 Melun vaikutukset

12.1 Tiivistelmä

Melu on ei-toivottua, tarpeetonta tai terveydelle haitallista ääntä.

Melun vaikutukset voidaan jakaa auditorisiin tai ei-auditorisiin. Melun auditoriset eli kuuloelimiin suoraan liittyvät vaikutukset ovat mm.

- meluperäinen kuulovamma,
- tinnitus ja
- tilapäinen kuulonalenema.

Melun ei-auditoriset vaikutukset ovat mm.

- Melun häiritsevyys
- Puhekommunikoinnin vaikeutuminen
- Äänihäiriöt eli puhe-elinten vauriot
- Hermojärjestelmän ja vireystilan muutokset
- Fysiologiset vaikutukset
- Univaikutukset
- Työsuoriutumisen muutokset
- Käyttäytymismuutokset (coping)

Äänen kokeminen meluksi riippuu ympäristöstä ja sen hetkisen toiminnon edellyttämistä vaatimuksista. Melun vaikutukset, sekä kehoon liittyvät että psykologiset, ovat yksilöllisiä ja yksilötasolla vaikeasti ennustettavia. Normaalkuuloisen väestön keskimääräisiä meluvaikutuksia kyetään kuitenkin ennustamaan kohtalaisella tarkkuudella.

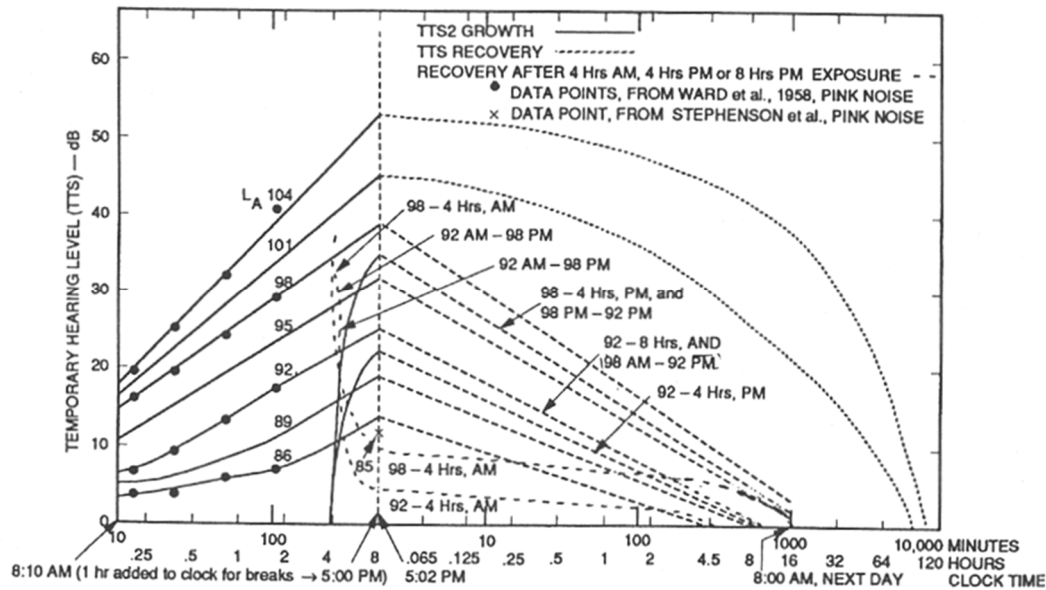
Ainoastaan puhekommunikoinnin vaikeutuminen voidaan ennustaa melko hyvin äänitasolla L_{Aeq} . Kaikkia muita vaikutuksia muut tekijät (ns. ei-akustiset tekijät) selittävät paremmin kuin äänitaso.

Melun häiritsevyys on yleisin ja useimmin mitattu meluvaikutus. Häiritsevyyttä selittäviä, objektiivisesti mitattavia akustisia erityispiirteitä käsitellään luvussa **13**.

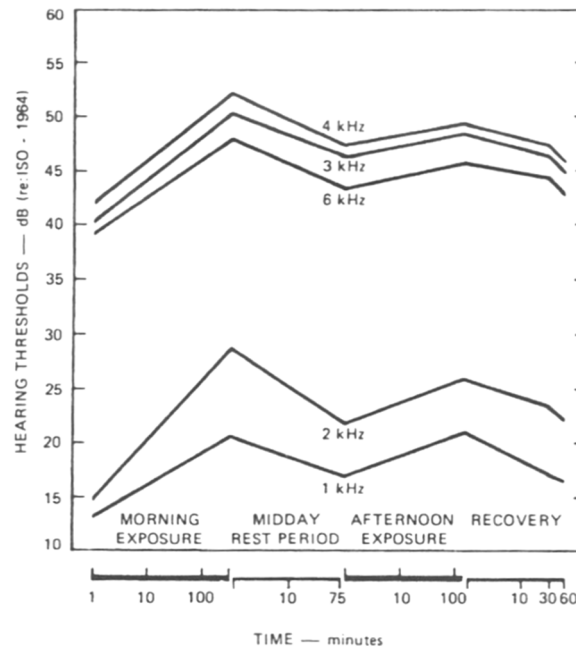
12.2 Tilapäinen kuulonalenema

Voimakas meluallistutus voi aiheuttaa tinnituksen lisäksi tai sijaan kuulokynnyksen tilapäisen nousun eli tilapäisen kuulonaleneman (TTS, temporary threshold shift). Palautuminen vie sitä pidemmän ajan, mitä suurempi tilapäinen kuulonalenema on. Jos meluallistutus jatkuu ennen toipumista, voi kuulonalenema tai osa siitä muuttua pysyvän laatuiseksi. Tällöin puhutaan meluperäisestä pysyvästä kuulonalenemasta (NIPTS, noise-induced permanent threshold shift). NIPTS on yleensä meluperäisen kuulovamman edeltäjä, jos kuulovamma on seurausta vuosia kestäneestä meluallistuksesta eikä esimerkiksi yhtäkkisestä impulssista. Kuvassa **12.2.1** on esitetty empiiristä aineistoa TTS:ään liittyen. Huomaa logaritminen aika-akseli.

Kuvassa **12.2.2** on esimerkki melun aiheuttamasta pysyvästä kuulonalenemasta kärsivän kuulokynnyksestä kahden työpäivän aikana. Kuulokynnys ei ehdi palautumaan normaaliin ja kuulovaurio todennäköisesti jatkaa pahenemistaan.



Kuva 12.2.1. Tilapäisen kuulonaleneman muodostuminen ja palautuminen, kun meluallistus on ollut tasaista ja kestänyt koko työpäivän ilman taukoja. Y-akselin TTS on määritetty 4 kHz:n taajuudella (Kuva: Kryter, 1994).



Kuva 12.2.2 Pysyvän kuulovaurion omaavan henkilön kuulokynnyksen muuttuminen työpäivän eri ajanhetkinä mitattuna. Henkilöllä on NIPTS, koska kuulonalenema on jo aamulla merkittävä (Kuva: Kryter, 1985).

12.3 Tinnitus

Tinnitus tarkoittaa korvien soimista ilman ulkoista syytä. Tinnitus kuullaan useimmiten korkeataajuisena siniäänenä, jonka äänenpainetaso voi vastata 10–100 dB ulkopuolista äänitasoa. Tinnituksen taajuuksia voi olla useita samaan aikaan. Yleensä taajuus on yli 2000 Hz. Tinnituksen taajuudella esiintyviä todellisia ääniä, joiden taso on tinnituksen tason alapuolella on vaikea kuulla, koska tinnitus peittää niitä alleen.

Arvion mukaan Suomessa on noin 700 000 huonokuuloista henkilöä. Huonokuuloisista noin 30–80 %:lla arvioidaan olevan pysyvä tinnitus. Tinnituksen yhteydessä esiintyy usein herkkäkuuloisuutta. Tinnituksen voimakkuudella ja kuulovamman asteella ei kuitenkaan ole selvää yhteyttä.

Tinnitus on yleistä normaalikuuloisillakin tilapäisen voimakkaan meluallistuksen jälkeen. Yleensä tinnitus häviää muutaman minuutin tai tunnin jälkeen voimakkaan meluallistuksen loputtua mutta jos meluallistus

jatkuu, voi tinnitus jäädä pysyväksi. Siitä voi tulla krooninen ongelma loppuiksi. Tinnituksen yhteydessä esiintyy usein hyperakusaa eli herkkäkuuloisuutta.

Yhtenä selityksenä tinnitukselle voi olla se, että aistinsoluja on kuollut ja niiden alla olevat hermosolut jäävät ”tyhjäkäynnille”.

Tinnitus johtuu useimmiten korvaperäisistä sairauksista/vammoista mutta myös verenkiertohäiriöistä, lihasjännityksestä niska- hartiaseudulla tai vääranlaisesta purennasta.

Tinnituksella on kolme vaikeusastetta:

1. Lievä tinnitus, jolloin vaivoista selvitään ilman suurempia ongelmia.
2. Kohtalainen tinnitus, jolloin esiintyy jo haittoja kuten nukahtamisvaikeuksia.
3. Vakava tinnitus, jolloin päivittäinen elämä häiriintyy, keskittymisvaikeuksia ja uniongelmia esiintyy paljon ja työelämä ja sosiaalinen elämä vaikeutuvat, jolloin myös masennusta esiintyy, millä voi olla vakavia seurauksia.

Tinnitusta voi yrittää hoitaa peiteäänellä, kuulolaitteella tai keksimällä aktiviteetteja, jotka vievät huomion tinnituksesta toisaalle. Lisäksi on kehitetty yksilöllisiä sopeutumisvalmennusmenetelmiä.

12.4 Meluperäinen kuulovamma

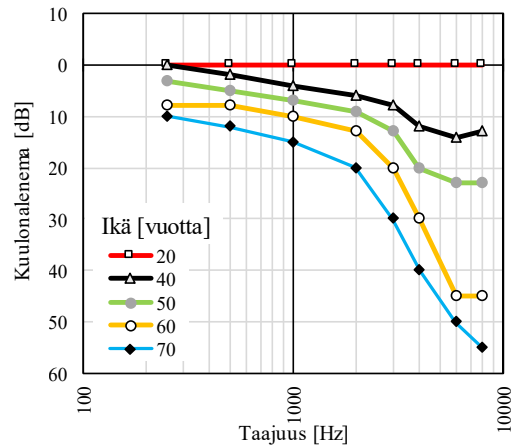
Kuuloaistimuksen aiheuttaa sisäkorvan basilaarikalvon värähtely. Värähtely liikuttaa kuuloaistinsoluina toimivia karvasoluja. Syntymähetkellä ihmisellä on aistinsoluja noin 16 000 kappaletta. Kuulo on herkimmillään noin 12 vuoden iässä. Joka vuosi pieni osa karvasoluista tuhoutuu itsestään. Tämä ns. ohjelmoitu solukuolema hävittää nuoruusvuosina arviolta 10–100 solua vuodessa, vanhemmiten vauhti kiihtyy ja kuulo heikkenee. Karvasolut eivät uusiudu. Altistuttaessa esimerkiksi kiväärin laukaukselle ilman suojaimia tuhoutuu karvasoluja pysyvästi ja kuuloaistimus perustuu jäljelle jääneiden karvasolujen varaan. Siksi kuulonsuojelu on tärkeä aloittaa jo nuorena.

Yksilöllisellä kuulokynnyksellä tarkoitetaan pienintä äänenvoimakkuutta, jonka ihminen voi kuulla. Kuulokynnys määritetään audiometritutkimuksella. Kuulotutkimus tapahtuu hiljaisessa ympäristössä, jotta hiljaisimpien testiäänien kuuleminen olisi mahdollista.

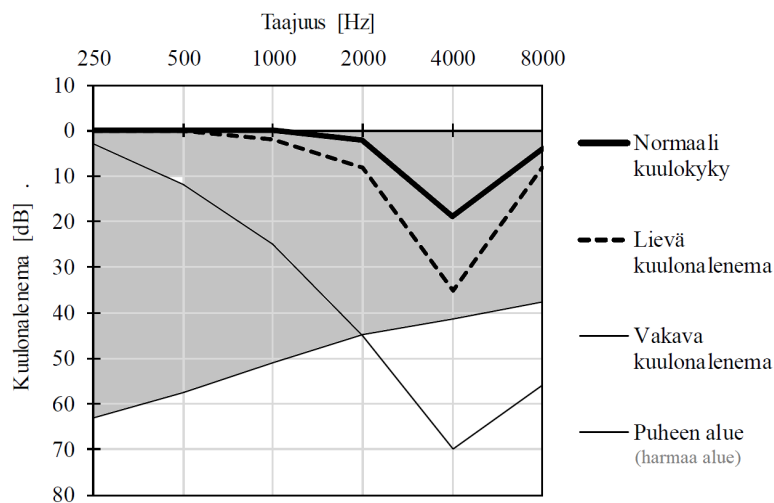
Kuulokynnys riippuu joka iässä taajuudesta. Audiologisen tutkimuksen kohdalla terveen 18 vuotiaan henkilön kuulonalenemaksi merkitään 0 dB ja se toimii ns. referenssinä kuulotutkimuksissa. Normaalikuuloiseksi katsotaan henkilö, jonka kuulonalenema on kummassakin korvassa alle 20 dB.

Kuulotutkimuksia tehdään työpaikoilla kahdella eri tarkkuustasolla. Tarkka kuulotutkimus tulee tehdä yrityksen työterveyshuollon toimesta ennen melutyön alkamista. Tutkimus käsittää taajuudet 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 ja 8000 Hz. Määräaikaistarkistuksia tehdään meluallistumisen alussa kerran vuodessa neljän vuoden ajan ja sen jälkeen kerran kolmessa vuodessa (Savolainen, 2006). Alussa tiheiden tarkastusten tarkoituksena on löytää melulle herkimmät henkilöt. Määräaikaistarkastus on seurantatyyppinen, joka on hieman epätarkempi menetelmä ja se tapahtuu vain taajuuksilla 500-8000 Hz. Kuulokynnystä ei tällöin testata alle 20 dB tasoilla, koska tason 20 dB kuuleminen luokitellaan vielä normaaliksi kuulokyvvyksi. Kuuloseulan perusteella määritetään kuuloluokka I–IV, joka määrittelee haitta-asteen työoloissa.

Ikähuonokuuloisuuden tapauksessa kuulokynnys nousee taajuuden kasvaessa (kuva 12.4.1), joten se voidaan erottaa meluperäisestä kuulovauriosta (kuva 12.4.2), kun vaurio on kehittynyt riittävän pitkälle.



Kuva 12.4.1. Ikähuonokuuloisuudelle tyypillinen kuulonaleneman taajuusriippuvuus (*presbycusis*) (Kuva: Toivanen, 1976).



Kuva 12.4.2. Meluperäinen kuulonalenema (*sociocusis*). Harmaan alueen alareuna kuvaa puheen äänenpainetasoa 1 m päässä puhujasta. Vakavan kuulonaleneman tapauksessa puheen sisältämistä taajuuksista osa leikkaantuu pois, koska kuulokynnystaso on korkeampi kuin puheen taso.

Pysyvän kuulovaurion eli kuulovamman osasyynä voi olla altistuminen voimakkaalle melulle, ikääntyminen, epäedullinen perimä, synnynnäinen kuulovaurio, altistuminen tietyille kemiallisille aineille, korkea verenpaine tai muu yksilöllinen tekijä. Kaikista kuulovammoista arviolta

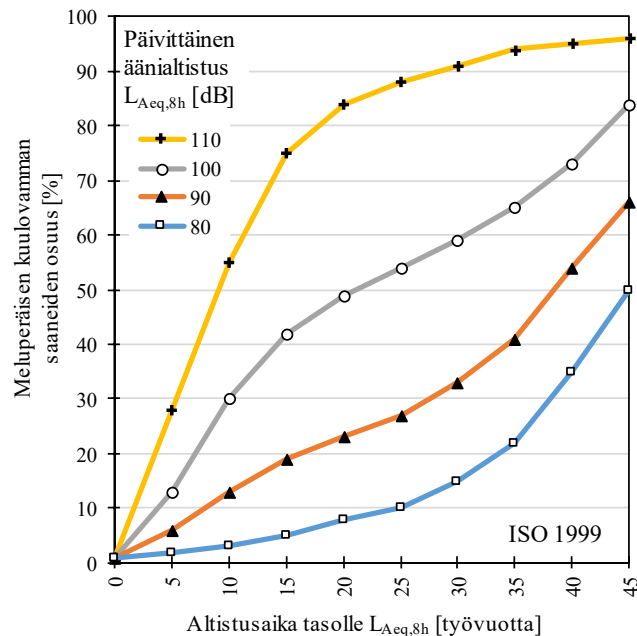
- 50 % selittyy perinnöllisistä tekijöistä kuten ikähuonokuuloisuus tai perinnöllinen kuulovamma,
- 20 % selittyy meluallistuksesta,
- 30 % selittyy muista riskitekijöistä, joista yleisimpiä ovat kohonnut kolesteroli, kohonnut verenpaine, tupakointi, särkylääkkeet, verenkiertohäiriöt tai meluallistuksen kanssa samanaikainen altistuminen sisäkorvalle myrkyllisille aineille tai tärinälle.

Meluperäinen kuulovaurio voi syntyä pitkäaikaisesta meluallistuksesta hitaasti tai yhtäkkiä voimakkaasta impulssista välittömästi kuten laukauksesta tai räjähdyksestä. Standardin ISO 1999 (1990) mukaan kuulovamman todennäköisyys melko tasaiselle melulle voidaan ennustaa altistusajan ja meluallistuksen perusteella (kuvan 12.4.3). Meluperäisen kuulovamman muodostumisherkkyudessa on kuitenkin suuria yksilöllisiä eroja. Meluallistusta vähiten sietävät yksilöt saavat kuulovamman jo hyvin pienellä meluallistuksella kun taas meluallistusta paljon sietäville kuulonalenemaa ei välttämättä synny suurellakaan meluallistuksella. Tämän vuoksi kuulotutkimuksissa keskitytään melulle herkimpien yksilöiden tunnistamiseen seulontatutkimuksilla.

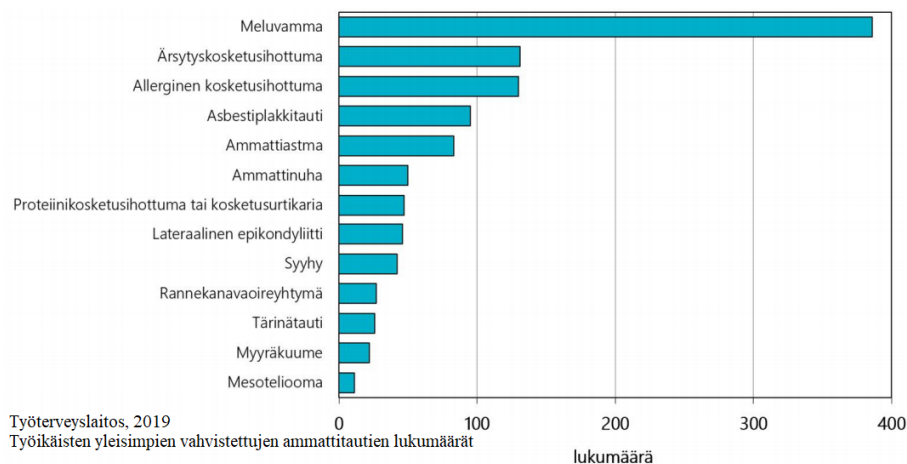
Meluperäinen kuulovamma aiheuttaa voimakkaimman kuulonaleneman aina ensin taajuuksille 3–6 kHz (kuva 12.4.4) riippumatta melun taajuussisällöstä. Meluallistuksen jatkuessa kuulonalenema kasvaa ja ulottuu

vähitellen myös matalille taajuuksille. Kun kuulonalenema on riittävän suuri, puhekommunikointi alkaa vaikeutua, koska osa puheen taajuuksista jää kuulokynnyksen alapuolelle.

Meluperäinen kuulovamma (meluvamma) on vuosi toisensa jälkeen yleisin yksittäinen ammattitauti (kuva 12.4.3), vaikka melutyötä tekevien osuus onkin saattanut vähentyä vuosien saatossa ja kuulonsuojeluun kiinnitetään yhä enemmän huomiota. Kuulovammojen haitta-aste on kuitenkin pienentynyt, mikä on luultavasti aiheutunut meluntorjunnan lisääntymisestä työpaikoilla.



Kuva 12.4.3. Kuulovammaisten osuus ja melualtistus (ISO, 1999).



Kuva 12.4.4. Vahvistetut yleisimmät ammattitaudit vuonna 2015 (Työterveyslaitos, 2019). Meluvammoista vain 10 todettiin naisilla, loput 370 miehillä.

12.5 Melun häiritsevyys

Psykologisen hyvinvoinnin näkökulmasta melu voidaan määritellä ääneksi, joka haittaa käynnissä olevaa tehtävää, on tarpeettoman voimakasta tai on muulla tavoin ristiriidassa oletetun tai toivotun äänimaiseman kanssa. Häiritsevyys on tietyn äänen aiheuttamaa epämukavuuden tunnetta, kun tiedetään tai uskotaan, että ääni vaikuttaa negatiivisesti yksilöön tai ryhmään.

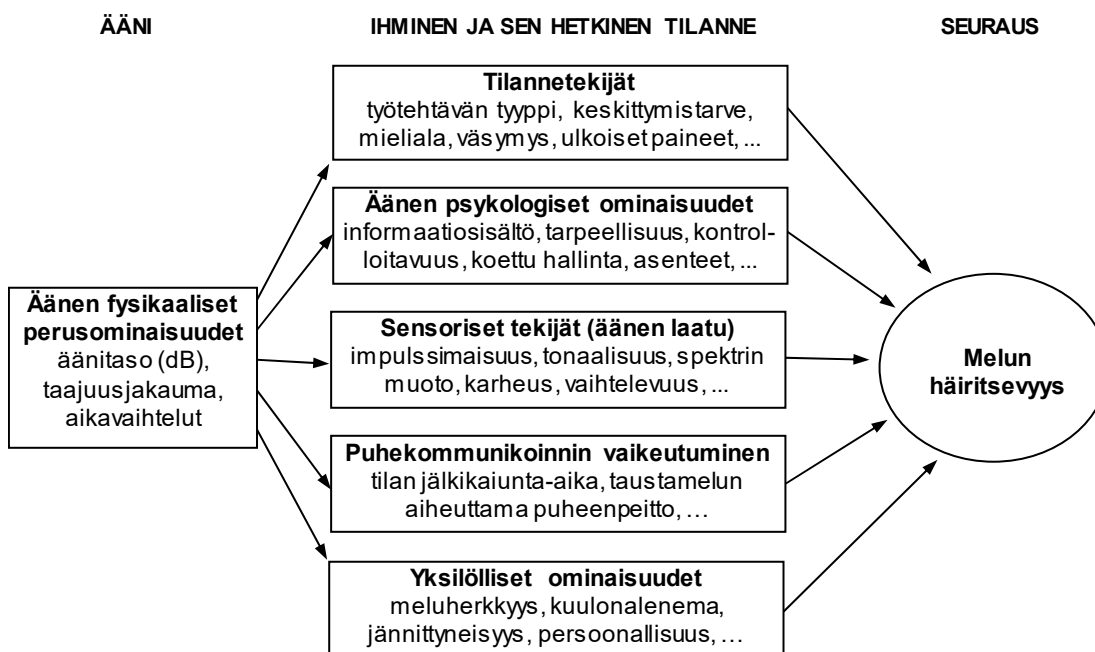
Häiritsevyys ei ole ainoa tunne, jota melu aiheuttaa. Muita melusta aiheutuvia tunteita ovat mm. viha, pettymys, tyytymättömyys, vetäytyminen, avuttomuus, masennus, levottomuus, distraktio, kiihottuminen tai uupumus. Termiä häiritsevyys kuitenkin käytetään yleisesti yhdistämään näitä tekijöitä.

Melun häiritsevyyttä mitataan kyselyllä käyttäen yleensä 5-portaista verbaalista asteikkoa tai 11-portaista numeerista asteikkoa. Luku 13 käsittelee tätä tarkemmin.

Äänen luokittelu meluksi tai miellyttäväksi ääneksi ei tapahdu yksistään äänenvoimakkuutta arvioimalla, koska äänen kokeminen on aina subjektiivista:

- Kovaääninen rock-konsertti voi olla yhdelle mitä hirvittäväntä melua kun taas toiselle se on odotusten täyttymys sekä musikaalisesti että sosiaalisesti. Selityksinä erilaisiin reaktioihin voivat olla mm. erot henkilöiden arvomaailmoissa ja asenteissa koskien itse ääntä ja/tai sen tuottajaa kohtaan.
- Työtoverien puheääntä toimistossa ei koeta meluksi silloin, kun itse osallistutaan keskusteluun. Sama keskustelu voi olla ulkopuoliselle pelkästään melua etenkin, jos hän samanaikaisesti yrittää keskittyä vaativaan työhön tai toiseen keskusteluun.
- Tehtaassa tuotantokoneen 1 käyttäjä saa koneen äänen eri vivahteista palautetta työn onnistumisesta ja koneen toimivuudesta, eikä ääni haittaa käyttäjää. Käyttäjä myös osaa suojata kuuloaan oikealla hetkellä. Viereisen hiljaisemman tuotantokoneen 2 työntekijä taas kokee tuotantokoneen 1 äänen meluksi, koska se edellyttää häneltäkin kuulonsuojainten käyttöä ja ääni peittää tuotantokoneen 2 äänen alleen heikentäen oman työn laatua. Ohi kävelevä yrityksen omistaja sen sijaan ei koe kumpaakaan ääntä meluksi vaan merkiksi siitä, että työt etenevät aikataulussa (koneen ääni = kassavirran ääni).

Kuva 12.5.1 esittää erästä mallia siitä mitkä tekijät vaikuttavat kokemukseen jostain äänestä tai äänimaailmasta. Kuvan laatikoita on havainnollistettu sen alla.



Kuva 12.5.1. Melun häiritsevyyss päätöksen tekee ihminen, ei melumittari. Melun fysikaaliset ominaisuudet selittävät vain osan kokemuksista.

Tilannetekijät. Ihmisen työtehtävä tai toiminta asettaa vaatimukset asianmukaiselle ääniympäristölle. Nukkuessa edellytetään alhaista äänitasoa kun taas rock-konsertissa tilanne on päinvastainen. Keskittymistä vaativat työtehtävät edellyttävät tasaista äänimaisemaa kun taas rutiininomaiset tehtävät sujuvat paremmin, jos ympäristössä tapahtuu jotain. Jos tehtävällä tai tilanteella on aikapaine, ovat vaatimukset ääniympäristön asianmukaisuudelle suuret. Odotukset voivat myös vaihdella väsymyksen ja mielialan mukaan.

Äänen psykologiset ominaisuudet. Toimistoissa häiriötä aiheuttavat eniten itselle tarpeettomat puheäänit. Ajoittain puhutaan tai kuunnellaan itse, jolloin tilassa kuuluva puhe ei enää olekaan melua. Ääni luokitellaan usein meluksi, jos sen informaatiosta ei ole hyötyä. Esimerkiksi kuorma-auton peruutusääni koetaan hyödylliseksi oltaessa ulkona ajoneuvon lähellä mutta samaan aikaan erittäin häiritseväksi läheisessä makuuhuoneessa nukkuvan mielestä, vaikka sen taso on yli 50 dB pienempi. Yllättävät äänet koetaan häiritseviksi, koska ne vievät hetkeksi kaiken huomion. Tällöin stressireaktiot ovat yleisiä, koska ihminen voi

jännittää etukäteen äänen vuoksi. Jos melulähdettä voidaan kontrolloida, häiritsevyys yleensä pienenee. Esimerkiksi tieto siitä, että melu vaimenee huomauttamalla siitä sen aiheuttajalle, aiheuttaa yleensä sen, ettei melu häiritse yhtä paljon, kuin jos melua ei saa vaimenemaan mainitsemalla tästä melun aiheuttajalle. Negatiivinen asenne äänen tuottajaa kohtaan merkitsee yleensä suurempaa äänen häiritsevyyttä. On helpompaa hyväksyä ääni, jos äänen syy tiedetään ja se on yleisesti tai itselle hyödyksi. Persoonaltaan epämiellyttävän naapurin meluaminen voi haitata enemmän kuin mukavan naapurin. Ensimmäisessä kerroksessa asuva voi häiriintyä hissien äänistä erityisen paljon, koska hän ei itse käytä sitä. Tuulivoima-alueen ääni ei yleensä häiritse alueen niitä asukkaita, jotka omistavat osuuden voimaloista. Ihmiset, jotka tietävät, että melua voi vaimentaa, mutta sitä ei jostain syystä tehdä, kokevat melun häiritsevämpänä kuin ne, jotka tietävät tai luulevat, että kaikki voitava on jo tehty. Esimerkiksi henkilöautojen sisämelusta ei yleensä valiteta, koska tiedetään, että äänettä autoja on mahdotonta kehittää.

Sensoriset tekijät (äänen laatu). Äänessä voi olla erityispiirteitä, jotka lisäävät häiritsevyyttä. Tätä käsitellään luvussa 13.

Puhekommunikoinnin vaikeutuminen. Ääni muuttuu häiritseväksi, jos kommunikointi vaikeutuu eli oman puheäänien tasoa joutuu korottamaan tilanteeseen nähden tarpeettoman voimakkaaksi saadakseen viestin toiselle tai toisen puheesta ei saa selvää.

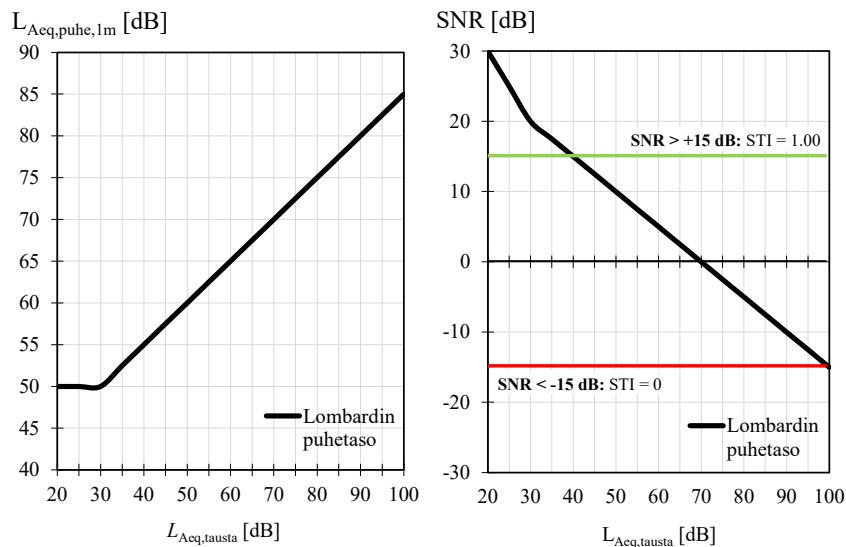
Yksilölliset ominaisuudet. Ääniolosuhteiden vaikutukset voivat riippua mm. meluherkkyydestä, persoonallisuuspieriteistä, kuulokyvystä ja aiemmista kokemuksista.

- *Meluherkkyys:* Meluherkkyys ennakoii korkeampaa melun häiritsevyyttä ja on usein osoitus herkkyydestä stressitekijöille yleensä. Meluherkkyyttä mitataan kyselyillä. Sukupuolella tai iällä ei ennusteta meluherkkyyttä. Meluherkkyys on yhteydessä joihinkin persoonallisuuspieriteisiin.
- *Persoonallisuuspieriteet:* Psykologian tutkijat ovat jossain määrin yksimielisiä siitä, että psyyken peruspieriteitä voi kuvata viiden perusfaktorin avulla (Big 5). Nämä ovat neuroottisuus (tunne-elämän tasa-painoisuus), ekstraversio/introversio (ulos- tai sisäänpäinsuuntautuneisuus), sovinnollisuus (vuorovaikutuksen myönteisyys/kielteisyys), tunnollisuus (kyky keskittyä olennaiseen ja itsekontrolli) ja avoimuus (älyllinen uteliaisuus, avoimuus uusille kokemuksille). Näistä kahdella on havaittu yhteys melukokemuksiin. Neuroottinen persoonallisuus merkitsee alhaisempaa stressinsietokykyä ja ahdistuneisuutta, mikä ennustaa tiettyä herkkyyttä myös melulle. Neuroottisten ja tuskasten henkilöiden on erityisen vaikeaa suorittaa muistamis- ja oppimistehtäviä melussa (Nurmi ja von Wright, 1983; von Wright ja Vauras, 1980). Melu on ympäristön stressori, joka vaikuttaa vireystilaan. Ekstroverteilla on introvertejä parempi kyky säädellä omaa vireystilaansa, mikä helpottaa pärjäämistä melussa. Ekstrovertit henkilöt ovat enemmän riippuvaisia ulkopuolelta tulevista signaaleista kuin introvertit (Eysenck, 1967). Ekstroverttien henkilöiden on vaikeampaa ylläpitää aktivaatiotasoaan tarpeeksi korkeana ilman ulkopuolisia stimulaatioita kuin introverttien (Green, 1984). Esimerkiksi autoradio auttaa ekstrovertejä pysymään hereillä pitkällä automatkoilla kun introverteille radiolla ei ollut vaikutusta (Fagerström ja Lisper, 1977). Introverttien suorituskyky on todettu olevan parhaimmillaan alemmilla äänitasoilla kuin ekstroverteillä. Ekstrovertit sietävät usein paremmin melua kuin introvertit. Osa tutkijoista yhdistää temperamentin ihmisen sisäeritysjärjestelmään, osa taas hermojärjestelmän ominaisuuksiin. Persoonallisuus on aivojen ominaisuus, jolle on tyypillistä tietynlainen reaktiotapa ja se heijastuu kehon toimintoihin. Iän myötä reaktiotavat muovautuvat kokemuksen ja ympäristön palautteen vaikutuksesta. Persoonallisuus on ainakin osittain perinnöllistä mutta vanhemmiten persoonallisuus voi muuttua. Persoonallisuustekijät selittävät osan yksilöllisten häiritsevyykokemusten eroista.
- *Kuulonalenema:* Suurin yksittäinen ryhmä, joka valittaa melun häiritsevyydestä, ovat huonokuuloiset, joita on yhteensä 10 % ihmisistä. Huonokuuloiset valittavat esimerkiksi toimistojen ääniolosuhteista herkemmin, koska heidän on vaikeampaa arvioida äänen tulosuuntia. Lisäksi kuulolaitteet toimivat huonosti hälyisissä ympäristöissä. Valittaminen johtuu korvan herkistymisestä äänille, kuulovamman syntyyn liittyvästä säröstä, negatiivisesta asenteesta meluun, varsinkin jos omasta kuulovammasta ollaan tietoisia, sekä huonosta puheen erotettavuudesta taustamelussa. Ihmisten, joilla on kohtalainen tai voimakas kuulonalenema, on tavallista vaikeampaa saada selvää puheesta, koska kuulokäyrässä on yleensä voimakas kuoppa 4 kHz alueella. Konsonantit erottuvat tällöin huonosti. Suuntakuulo on huonompi kuin normaalikuuloisilla varsinkin, jos kuulonalenemat eivät ole samat molemmissa korvissa. Puheesta ei saada yhtä hyvin selvää hälyisässä tilassa. Huonokuuloisuus kasvaa iän mukana.
- *Kulttuurisidonnaiset tekijät:* Tietyissä kulttuureissa hyväksytään melua paremmin kuin toisissa. Esimerkiksi tiheän asutuksen alueilla on totuttu suurempaan meluun ja siksi sitä voidaan sietää paremmin harvaan asutuilla hiljaisilla alueilla.

12.6 Puhekommunikoinnin vaikeutuminen

Puhekommunikointi vaikeutuu taustamelutason kasvaessa, jälkikaiunta-ajan pidentyessä ja puheen äänitason pienentyessä. Puhekommunikaation vaikeutuminen aiheuttaa kommunikoinnin välttämistä, oppimisvaikeuksia, väärinkäsityksiä, tapaturmariskejä, laskevaa työkapasiteettia, eristäytymisen tunnetta, sosiaalisen vuorovaikutuksen ja ihmissuhteiden huononemista sekä erilaisia stressireaktioita. Puheilmaisua joudutaan voimakkaassa taustamelussa tiivistämään, jolloin ei-verbaalisen viestinnän kuten eleiden, tunnetilojen, asenteiden sekä työpaikkakulttuurin ja kokemuksen merkitys vuorovaikutuksessa korostuu ja väärinkäsitysten mahdollisuus kasvaa.

Puhekommunikointia taustamelussa voidaan helpottaa korottamalla puheäänen voimakkuutta tai siirtymällä lähemmäs puhujaa/kuulijaa (kuva 12.6.1). Hiljaisessa ympäristössä normaali puheäänen taso on 50 dB L_{Aeq} oltaessa 1 m päässä puhujasta suoraan edessä. Ammattitaitoiset pystyvät puhumaan 30 dB tätä voimakkaammin pitkiäkin aikoja äänen kärsimättä.



Kuva 12.6.1. Vasemmallalla on esitetty puheen A-painotettu äänenpainetaso $L_{Aeq,puhe}$ (1 m päässä puhujasta vapaassa kentässä) erilaisilla taustamelun A-äänitasoilla $L_{Aeq,tausta}$. Oikealla on vastaava puhekohinasuhde SNR ($L_{Aeq,puhe} - L_{Aeq,tausta}$), kun puhuja on 1 m päässä suoraan edessä. Puhekommunikointi alkaa olla tällä etäisyydellä mahdotonta, kun taustamelutaso kohoaa yli 100 desibelin, koska puhekohinasuhde painuu alle -15 dB:n. Siirtymällä 10–20 cm päähän huutavan puhujan suusta äänitaso kasvaa jopa 20 dB. Näin täytyy monesti toimia rock-konserteissa ja tanssiravintoloissa.

12.7 Äänihäiriöt eli puhe-elinten vauriot

Jatkuva kommunikointi korotetulla puheäänenvoimakkuudella voi aiheuttaa äänihäiriöitä ja kurkunpään sairauksia (Sala, 1995). Äänihäiriöstä koituvat oireet ovat mm. seuraavia: ääni väsyä tai rasittuu, ääni käheyyä tai madaltuu, ääni pettää, katkeilee, katoaa, ääntä on vaikea saada kuuluviin tai laulaminen on vaikeaa. Kurkkuoireita ovat mm. limaisuus, rykimisen tarve, palan tunne, karheus, poltto ja kipu. Äänihäiriöt ovat luonteeltaan useimmiten elimellisiä (esim. äänihuulikyhy) eli äänihuulissa on jokin rakenteellinen vika, joka tulee esiin ääntä käytettäessä. Tällöin äänihuulen limakalvo ei värähtele enää pienellä vaivalla nopeasti ja säännöllisesti. Toiminnallisissa äänihäiriöissä äänihuulet ovat terveet, mutta äänielimistön toiminnan säätelyssä on puutteita. Neurologisissa häiriöissä niin ikään äänihuulet näyttävät normaaleilta, mutta äänihuulien toiminta on puutteellinen neurologisista syistä. Toiminnallisen ja neurologisen äänihäiriön erottaminen tuottaakin kliinisessä työssä monesti päänvaivaa. Myös pääasiassa psyykkisperäisiä äänihäiriöitä esiintyy.

Äänihäiriöt ovat yleisiä puheammateissa (opettajat, laulajat, päiväkotihenkilöstö) mutta voivat esiintyä myös teollisuusympäristöissä, joissa tarvitaan jatkuvaa puhekommunikaatiota. Rontal ym. (1979) totesivat teollisuudessa työskentelevistä 8 %:lla kurkunpään fysiologisia muutoksia.

Työperäisiä kurkunpään sairauksia voivat olla äänihuulikyhyt ja -polyypit, laryngiitti ja krooninen haavauma sekä granulaatio. Äänihuulikyhyt syntyvät pitkäaikaisen kovalla äänellä puhumisen seurauksena. Äänihäiriöissä ja kurkunpään sairauksissa kurkunpään toiminta äänilähteenä heikentyy. Ääntä ei saada

riittävän kuuluvaksi, eikä ääni kestä kyllin kauan. Ääni on laadultaan huono ja käheä, ja puheen ymmärrettävyys erityisesti vaikeissa viestintäympäristöissä huononee. Puhuja pyrkii tällöin usein tietoisesti tai tiedostamattaan muuttamaan työskentelytapojaan vähemmän äänenkäyttöä rasittaviksi ja puheviestintää vaativiksi. Elleivät nämä toimenpiteet riitä palauttamaan tasapainoa vaatimusten ja suoriutumisen välillä, alkaa työtehtävistä suoriutuminen kärsiä. Äänihäiriöitä voivat aiheuttaa huonojen ääniolosuhteiden lisäksi myös herkistävät aineet, kemikaalit, kuiva huoneilma ja muut ilman epäpuhtaudet. Myös väärä puhumistapa voi olla syynä äänihäiriöihin, jolloin siihen auttaa äänenkäytön kuntouttaminen.

Äänihäiriöiden yleisin hoitokeino on sairausloma ja kuntouttaminen. Äänihäiriön riskin vähentäminen on toiminnanharjoittajan kannalta tärkeä opetus- ja hoitotilojen akustisen suunnittelun perustelu, koska äänihäiriöistä johtuvat sairauslomat ovat yleensä pitkiä ja aiheuttavat sille suuria kustannuksia.

Poikkeava puheäänien laatu voi kiinnittää kuulijan huomion. Kuulija alkaa kuuntelemaan itse ääntä eikä sanomaa. Pahimmillaan poikkeava ääni aiheuttaa puhujan aliarvioimista ja jopa syrjintää.

Äänihäiriön haittavaikutukset riippuvat siitä, kuinka vaativaa puheäänenkäyttö on työssä tai vapaa-aikana. Muutos äänihuulessa voi tehdä opettajan kokonaan työkyvyttömäksi, kun taas esimerkiksi rakennustyömies, jolla on äänihuulestaan samanlainen muutos, ei huomaa välttämättä mitään haittaa työnteolle, koska puhumisen tarve ei ole jatkuvaa.

Ammateissa, joissa työ edellyttää runsasta tai voimistetun äänen käyttöä, äänihuulikyhmyjä voidaan pitää ammattitaudin kriteerit täyttävänä. Äänihäiriöiden korvaaminen ammattitaitteina ei ole kuitenkaan vakiintunut.

Ääniergonomia tarkoittaa kaikkia niitä toimenpiteitä, jotka parantavat mahdollisuuksia hyvään äänen tuottoon ja puhumiseen, puheen kuulemiseen ja erottamiseen eli puheviestintään (Sala, 2004).

12.8 Hermojärjestelmän ja vireystilan muutokset

Fysikaalisten ärsykkeiden, kuten äänen, sisältämä informaatio voi laukaista monia hermoston toimintoja, jotka taas puolestaan voivat vaikuttaa ihmisen fysiologisiin ja psyykkisiin toimintoihin ja käyttäytymiseen. Hermostoperäinen vaikutusketju kokonaisuudessaan on seuraava:

ääniärsyke → *aistinelin* → *aivohermorata* → **keskushermosto** → *hermorata* → *vaste-elin* → **vaste**

Vaikutusketjun pituus vaihtelee äänen ja yksilön ominaisuuksista riippuen yksinkertaisesta refleksikaaresta monimuotoiseen tietojenkäsittelyyn, johon osallistuu useita eri aivoalueita.

Säikähdysrefleksi, orientoitumis- ja puolustusreaktiot ovat hetkellisen äkillisen informaation aiheuttamat vaistomaiset reaktiot. Ihmisellä näitä vaistomaisia reaktioita säätelee tai hillitsee huomattava oppimiseen ja tahtoon perustuva mukautumiskyky. Reaktio on kiinni sen voimakkuudesta ja merkityksestä. Keskushermoston ohjaama vaste välittyy kehoon autonomisen hermoston ja HPA-akselin stressihormonien välityksellä. Elimistön vaste voi olla laaja- tai kapea-alainen, esim. paniikkivaste tai lihasnykäisy. Useimmiten vaste on vain joko jonkin rauhastoiminnan aloittamista tai pelkästään aivoissa tapahtuvia prosesseja.

Vain osa ääniärsykkeiden tuottamista aistimuksista saavuttaa tietoisuuden tason ja tulee havaituksi. Kun havainto vielä assosioidaan aikaisempiin kokemuksiin, tulee ärsykkeen sisältämä tieto ymmärretyksi tavalla tai toisella. Ärsykkeen aikaansaama reaktio voi välittyä tietoisuuden eri tasoilta. Se, mitkä ärsykkeet havaitaan, riippuu ulkoisista ja sisäisistä seikoista. Ulkoisia seikkoja ovat ärsykkeen voimakkuus ja laadulliset ominaisuudet. Ne vaikuttavat siihen, suuntautuuko tarkkaavaisuus ääneen. Myös muut ympäristöolosuhteet eli kilpailevat ärsykkeet (näkö, tunto, valaistus, muut äänet) vaikuttavat äänen havaitsemiseen.

Aistinelimen adaptaatiosta riippuu millaisen aistimuksen ärsyke saa aikaan. Henkilön vireys ja muu emotionaalinen tila, aikaisemmat kokemukset ärsykkeestä ja tarvetila ovat myös niitä sisäisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat siihen, minkä merkityksen aistimus hermojärjestelmässä saa ja minkä vasteen ärsyke aiheuttaa.

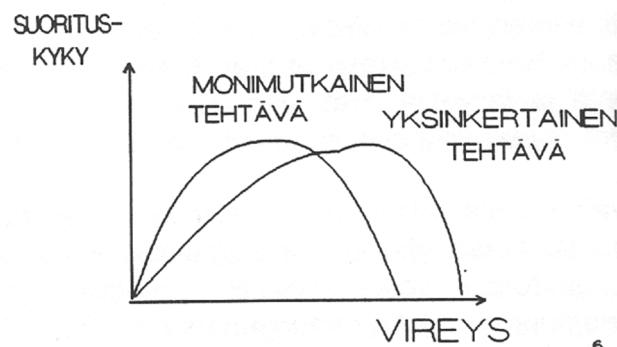
Ns. *stokastisessa dominanssimallissa* kaikki ärsykkeet pääsevät keskushermostoon. Relevantit ärsykkeet havaitaan ja muut kilpailevat jatkuvasti huomiosta. Tällaisen systeemin kokonaiskapasiteetti jakaantuu vireystilan funktiona ympäristön valvontaan, työhön ja keskittymiseen siten, että työhön jäävällä kapasiteetilla on optimiarvonsa tietyllä vireystilalla. Havaintosysteemin suorituskyky noudattaa mallissa ns. Yerkes-Dodsonin lakia (kuva 12.8.1).

Ekstroverteilla henkilöillä vireystila on lähtökohtaisesti alhaisempi kuin introverteilla, jolloin suoriutuminen voi parantua, kun vireystilaa korotetaan esimerkiksi taustamelulla. Introverteilla vireystila on lähtökohtaisesti

korkeampi, jolloin taustamelu johtaakin suorituskyvyn laskuun. Tästä johtuen eri persoonallisuudet voivat kokea saman ääniympäristön eri tavoin tehdessään työtä tai muutoinkin.

Tarkkaavaisuus eli tapa valita informaatiota ympäristöstä riippuu vireystilasta. Vireystila on alimmillaan yöllä, alhainen aikaisin aamulla ja korkea myöhään iltapäivällä. Vireystilaa voi myös säädellä itse. Melu kohottaa vireystilaa mutta loputon vireystilan korottaminen johtaa Yerkes-Dodsonin mallin mukaan suorituskyvyn laskuun.

Eri työtehtävät edellyttävät hyvin suoriutuakseen erilaisia vireystiloja. Liian korkeassa vireystilassa ihminen on tarkkaavaisimmillaan ja siten herkkä käsittelemään kaikki ulkopuoliset signaalit, jolloin keskittymiskyky päätehtävään alkaa laskea. Hyperaktiivisessa tilassa työnteko ei enää onnistu lainkaan. Optimaalisella vireystilalla osataan valita juuri keskeisin informaatio käsiteltäväksi ja suorituskyky on parhaimmillaan. Mitä vaikeampi ja monipuolisempi tehtävä on, sitä alhaisempi vireystilan tulisi olla, jotta tarkkaavaisuus pysyisi riittävän laaja-alaisena ja selektiivisenä. Koska ihminen automaattisesti keskittyy aistien kautta tuleviin signaaleihin, vie varsinkin vaihteleva ääni osan aivokapasiteetista ja tarkkaavaisuus muuttuu.



Kuva 12.8.1 Yerkes-Dodsonin hypoteesin mukaan vireystila kasvaa mm. äänitason kohotessa. Suorituskyky on parhaimmillaan, kun vireystila on sopiva. Yksinkertaiset tehtävät hoituvat melussakin hyvin mutta monimutkaiset tehtävät vaativat alemman melutason ja vireystilan.

12.9 Fysiologiset vaikutukset

Äänen vaikutukset fysiologisiin toimintoihin välittyvät kuulojärjestelmän kautta. Vaikutus perustuu keskushermoston kuuloradan ja elintoimintoja ohjaavien motoristen, kognitiivisten sekä autonomisten keskusten välisiin lukuisiin yhteyksiin. Meluna koettu ääni aikaansaa retikulaariaktivaatiojärjestelmässä kaikkiin keskushermoston toimintoihin vaikuttavan valpastumisreaktion (Heinonen-Guzejev ym., 2012). Keskushermostossa tapahtuva signaalin modulaatio voi vahvistaa tai vaimentaa äänen vaikutuksia fysiologisiin toimintoihin riippuen siitä, minkä merkityksen keskushermosto äänelle antaa.

Häiritsevä melu, eli sellainen melu, jolle keskushermosto antaa negatiivisen merkityksen, voi vaikuttaa autonomisen hermoston ja umpieritysrauhasten toimintaan. Melulla voi olla sekä lyhytaikaisia että pitkäaikaisia vaikutuksia sydän- ja verenkiertoelimistöön. Melun aiheuttaman stressin vaikutus näkyy pääasiassa kahden fysiologisen mekanismin kautta. Äkillinen melu aktivoi

- autonomisen hermoston sympaattista osaa ja
- lisämunuaisen ydintä eli sympatikoadreno-medullaarista akselia (SAM-akseli).

Melun jatkuessa hypotalamus-aivolisäke-lisämunuaiskuoriakseli (HPA-akseli) aktivoituu (kuva 12.9.1). Seurauksena on fysiologisia muutoksia:

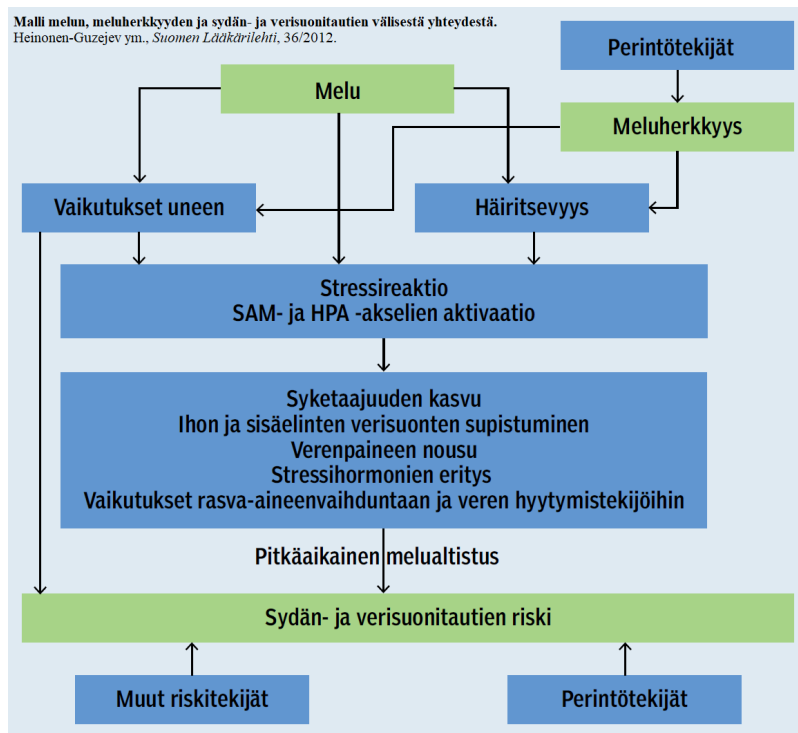
- pulssin nopeutuminen,
- ihon ja sisäelinten verisuonten supistuminen,
- verenpaineen nousu,
- stressihormonipitoisuuksien kasvu veressä,
- vaikutukset rasva-aineenvaihduntaan ja veren hyytymistekijöihin.

Melun aiheuttama stressimekanismien aktivaatio lisää autonomisen hermoston aktivaation ja stressihormonien välityksellä verenpainetta, sykettä, rytmihäiriöalttiutta, jotka voivat myötävaikuttaa sydän ja

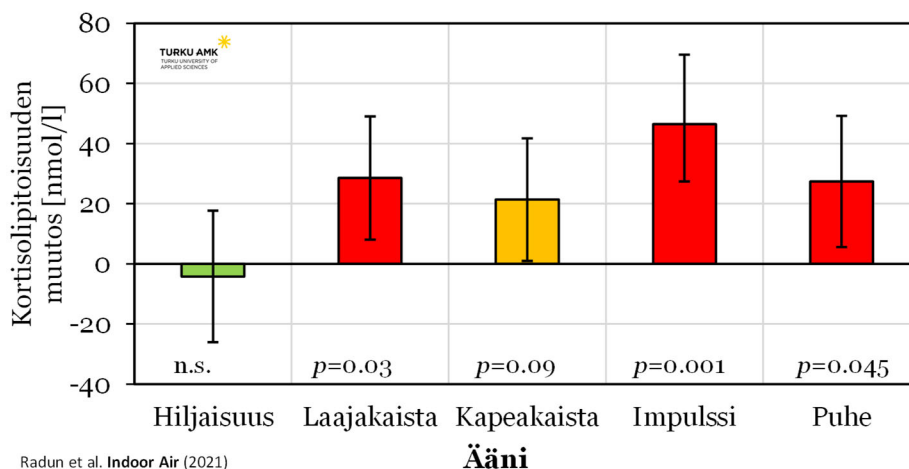
verisuonisairauksien riskeihin. Äänen häiritsevyys voi johtaa unen häiriintymiseen, ahdistuneisuuteen, toiminnallisiin oireisiin ja vastaaviin terveysvaikutuksiin. Siksi pitkään jatkunut meluallistutus voi lisätä sydän- ja verisuonitautien, kuten verenpainetaudin, sepelvaltimotaudin ja sydäninfarktin riskiä.

Meluperäisen vireystilan noususta aiheutuva stressihormonitason (kortisoli, adrenaliini, noradrenaliini) kasvu voidaan mitata veriplasmasta ja syljestä. Pitkäaikainen stressi voidaan analysoida myös hiustuposta. Tuoreessa suomalaisessa tutkimuksessa voitiin havaita stressihormonipitoisuuden kasvaneen 65 dB:n melussa jo 45 minuutin altistuksen jälkeen (Kuva).

Meluallistutus voi olla peräisin esimerkiksi yöaikaisesta liikennemelusta tai työpaikan meluallistuksesta. Päiväaikaiseen yli 60 dB:n liikennemelun (asunnon julkisivun ulkopuolella) äänitasoon liittyy lisääntynyt sepelvaltimotaudin ja sydäninfarktin riski. Pitkäaikaisen yli 85 dB:n työpaikkamelun (korvakäytävässä vallitseva taso) on todettu olevan yhteydessä korkeampaan sydäninfarktikuolleisuuteen. Korkeampi yksilöllinen meluherkkyys lisää näitä riskejä.



Kuva 12.9.1. Malli melun, meluherkkyiden ja sydän- ja verisuonitautien välisestä yhteydestä.



Kuva 12.9.2. Radun et al. (2020) havaitsivat, että jo 45 minuutin altistuminen melulle kohotti merkittävästi ($p < 0.05$) veriplasman kortisolipitoisuutta koetilannetta seuranneeseen hiljaiseen periodiin nähden. Altistuttaessa hiljaisuuteen 45 minuuttia efektiä ei löytynyt. Hiljaisuus: 35 dB L_{Aeq} ilmanvaihdon ääni. Laajakaista: 65 dB L_{Aeq} ilmanvaihdon ääni. Kapeakaista: 65 dB L_{Aeq} ujeltava kone. Impulssi: 65 dB L_{Aeq} paalutusjuntan ääni. Puhe: 65 dB L_{Aeq} puheohjelma radiosta.

12.10 Univaikutukset

Uni voidaan jakaa seuraaviin luokkiin:

- valve,
- uni (Ei REM-uni) tai
- vilkeuni (REM-uni, unien näkemisen vaihe).

Hyvinvoinnin kannalta on tärkeää, että näiden tilojen määrä ja kesto päivän aikana on henkilölle sopiva. Pitkäaikainen poikkeaminen tästä tasapainosta on terveydelle haitallista.

Nukahtaminen kestää tavallisesti 5–20 minuuttia. Sen jälkeen ihminen vaipuu kevyiden univaiheiden (N1–N2) kautta syvään (N3–N4) uneen. Ensimmäinen REM-univaihe alkaa terveellä aikuisella tavallisimmin noin 90 minuuttia nukahtamisen jälkeen. REM-univaiheella on etenkin aivojen toimintaa elvyttävä vaikutus. REM-uni on yhteydessä mm opitun tiedon käsittelyyn, muistitoimintoihin ja mielenterveyden säätelyyn. Voimakkaan ruumiillisen rasituksen jälkeen syvän unen suhteellinen määrä lisääntyy.

Toipumisen kannalta tärkeimmät ovat syvä uni (N3–N4) sekä REM-uni, edellinen fyysisen toipumisen ja jälkimmäinen henkisen ja emotionaalisen sekä oppimisen kannalta.

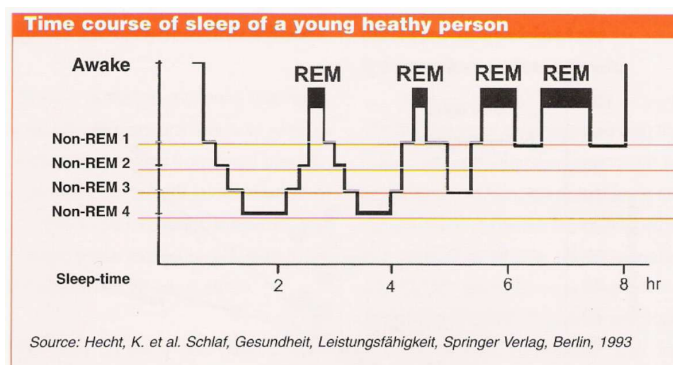
Unenaikainen melualtistus aiheuttaa hermoston ja hormonitoimintojen (umpierityksen) aktivoitumista. Vaihteleva melu aiheuttaa unen katkonaisuutta kun taas tasainen melu muuttaa unen pinnalliseksi. Molemmissa syväuni (N3 ja N4) sekä REM-uni vähenevät. Nukahtaminen jokaisen valvejaksen jälkeen vaikeutuu. Heräämisen yhteydessä mieliala voi muuttua ja usein ollaan päivän mittaan väsyneitä ja voidaan kärsiä päänsärkyistä. Kuvassa **12.10.1** on esimerkki hyvälaatuisen yöunen unen syvyysrakenteista.

Melu heikentää erityisesti syvän unen kestoja. Suomalainen tutkimus havaitsi syvän unen N3 määrän vähentyvän nuorilla terveillä aikuisilla keskimäärin 10 % (kuva **12.10.2**), kun heidät altistettiin tavanomaiselle yöajan tieliikennemelulle (Myllyntausta et al., 2020; Varjo ym., 2015). Tämä tapahtui, vaikka tutkittavat oli valittu kokeeseen sen perusteella, että heidän elinympäristössään oli tieliikenteen ääntä. Tutkittu tieliikennemelun taso oli sellainen (37 dB L_{Aeq}), jota havaitaan yleisesti kaupunkikeskustojen asunnoissa.

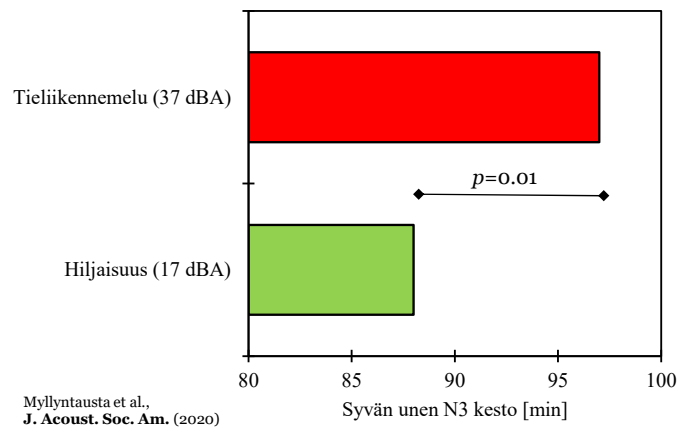
Keskiaänitaso ei yksinään kerro melun vaikutuksen voimakkuudesta uneen vaan myös melun informaattiosältö ja äänen laatu (vaihtelevuus, tuttuus) vaikuttavat. Kuuloaisti voi asettaa kehon hälytystilaan ja aiheuttaa ihmisen heräämisen jopa hyvin alhaisilla äänitasoilla. Esimerkiksi vastasyntyttännyt äiti voi herätä pieneenkin vauvan äännähdykseen tai liikkeeseen.

On huomattava, että äänitason vaihtelut heikentävät enemmän unen laatua kuin pelkästään korkea äänitaso. Esimerkiksi aikuinen ihminen saa helposti unen päästä kiinni kovassakin (yli 75 dB L_{Aeq}) melussa, jos melu on tasaista ja ennustettavaa. Uni voi jatkua laadukkaana pitkäänkin. Näin tapahtuu esimerkiksi autossa, jos nukkumisasento on muuten mukava. Havahtuminen tapahtuu yleensä silloinkin, jos äänitaso muuttuu.

Suomalaisissa elinympäristöissä melun vaikutuksia uneen on selvitetty mm. kyselytutkimuksessa, joka tehtiin 28 asuinkerrostalossa erilaisilla ympäristömelualueilla. Naapurien ja tieliikenteen tuottama melu aiheuttavat vastausten mukaan nukahtamisvaikeuksia ja heräämisiä keskimäärin vain ajoittain. Haitta-aste ei ollut mitenkään hälyttävän korkea (Hongisto *et al.*, 2013). Melun unihaitat lienevät suurempia lämpimien maiden suurkaupungeissa, joissa julkisivurakenteiden eristys on lämmöneristystarpeen vähäisyyden vuoksi luontaisesti pienempi ja samalla ympäristön melutasot korkeampia suuremman liikennemäärän vuoksi.



Kuva 12.10.1. Esimerkki 8 tunnin yöunen rakenteesta, jossa ei näy melun aiheuttamia häiriöitä.



Kuva 12.10.2. Suomalaisessa laboratoriotutkimuksessa syvän unen kesto lyheni 10 % melun vuoksi.

12.11 Työsuoriutumisen muutokset

Työsuoriutumista voidaan mitata laboratoriotutkimuksissa käyttämällä erilaisia psykologisia testejä. Yleisimpiä testejä ovat tietyn muistitoimintoon keskittyvät testit kuten tarkkaavaisuuden, luovuuden, työmuistin pituuden tai pitkäkestoisen muistin toimintaa mittaavat testit.

Tasaisten (ja voimakkaan) äänen vaikutuksia työsuoriutumiseen tutkittiin erittäin paljon 1970-luvulle asti. Tutkimuksissa huomattiin, että tasainen voimakas melu ei vaikuta työsuoriutumiseen suoraan. Se vaikuttaa lähinnä strategiavalintoihin. Melu on ylimääräinen kuormitustekijä ja sen kompensoimiseksi yleensä keskittymiskyky pääasialliseen työtehtävään voi jopa parantua. Sen sijaan laaja-alainen tarkkaavaisuus heikkenee, jolloin suoriutuminen sekundäärisissä tehtävissä voi kärsiä. Pitkäaikainen pinnistely melussa aiheuttaa väsymystä ym. myöhemmin lueteltavia haittoja.

1970-luvulla havaittiin, että ei-toivotuilla puheäänillä on huomattavasti tasaista ääntä voimakkaampi vaikutus työsuoriutumiseen. Vaikutus nähtiin työmuistitehtävissä. Rutiinitehtävissä efektiä ei ole. Tämän jälkeen tutkimuksen painopiste on siirtynyt puheäänien vaikutuksiin.

Puheäänien vaikutusta työsuoriutumiseen on tutkittu Suomessa runsaasti (ks. review: Hongisto and Keränen, 2018). Kaikki suomalaiset ja ulkomaiset tutkimukset tukevat Hongiston (2005) mallia siitä, että kognitiivisesti vaativissa, ja erityisesti työmuistia vaativissa tehtävissä hyvin erottuva puhe laskee työsuoriutumista tutkimuksista riippuen vähintään 10 %. Työsuoriutumisen muutos riippuu puheen erotettavuudesta, jota voidaan mitata puheensirtoindeksin STI avulla (kuva 12.11.2). Työsuoriutuminen alkaa heikentyä, kun STI ylittää arvon 0.20 ja maksimiheikennys saavutetaan, kun STI ylittää arvon 0.50.

Puhe aiheuttaa eri melulajeista suurimman vaikutuksen työsuoriutumiseen. Tähän on useita syitä:

- Puhe voi sisältää informaatiota. Ihmisen tarkkaavaisuus suuntautuu siihen herkästi ja pysyvästi.
- Puhe on äänitasoltaan erittäin vaihtelevaa ja monimutkaista verrattuna mihinkään toiseen ääneen.
- Puheinformaation sisältöä ei voi ennakoita.
- Vaikka puheessa toistettaisiin samoja sanoja, työmuisti rekisteröi silti sanat automaattisesti vieden resursseja työmuistia vaativalta työtehtävältä.

Nykytietämyksen mukaan aivoissa on kaksi keskeistä muistilohkoa: työmuisti ja säilömuisti. Säilömuistin eli pitkäaikaisen muistin koko on rajoittamaton mutta tieto kulkee sinne ja sieltä aina työmuistin kautta.

Työmuistissa voidaan erottaa kolme päälohkoa (kognitiivista toimintoa): lyhytkestoinen visuospatiaalinen muisti (myöh: näkömuisti), lyhytkestoinen sanamuisti ja keskusyksikkö. Keskusyksikkö käsittelee tietoa, ohjaa mielensisäisiä resursseja tehtävän edellyttämiin toimintoihin sekä hakee tietoa säilömuistista. Keskusyksikkö pitää siis tarkkavaisuuden yllä ja ohjaa ajattelua. Sana- ja näkömuistin tehtävänä on tiedon väliaikainen taltiointi, jotta yksittäisistä asioista voidaan muodostaa kokonaisuuksia eli ymmärtää asioita. Tässä yhteydessä ollaan eniten kiinnostuneita sanamuistista, koska puheen on todettu haittaavan nimenomaan tätä työmuistin osaa eniten.

Sanamuistissa pysyy kerrallaan 4–8 sanaa. Tällä tietomäärällä voidaan muodostaa tavanomainen lause ja asiasisältö, johon voidaan liittää tarvittaessa asian ymmärrys tai assosiaatio. Jälkimmäisiä tarvitaan tekemään

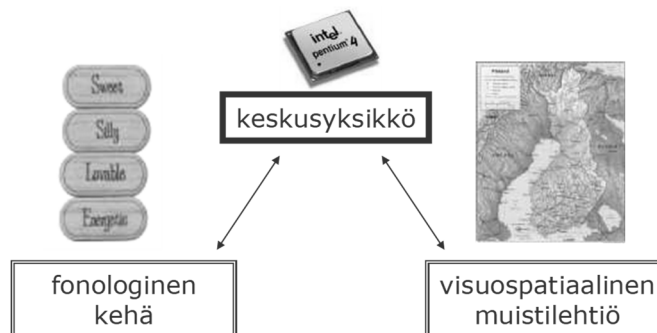
päätös siitä, halutaanko se muistaa vai onko tieto tarpeeton. Sanamuisti koostuu kahdesta osasta: sanaltiota ja toistomekanismista. Kaikki puheen muodossa esitetty informaatio pääsee automaattisesti sanaltioon, jossa se säilyy ”sisäisen puheen” kaltaisena automaattisesti muutamia sekunteja. Toistomekanismin avulla sanaltion sisältöä voidaan virkistää. Toistomekanismi on käytännössä sisäisellä puheella tai ääneen tapahtuvaa ”hokemista”. Toiston avulla sana syötetään uudelleen sanaltioon.

Puheen muodossa esitetty informaatio etenee korvasta suoraan sanaltioon kun taas kirjoitettu informaatio edellyttää ensin sen koodaamista sisäiseksi puheeksi. *Siksi kuultu puhe ohittaa luetun tekstin ja häiritsee lukemista tai verbaalisia tehtäviä ylipäättään.* Koska kuuloaistia ei voi kytkeä pois päältä, on puhemelu suuri haitta työtehtäville, jotka vaativat työmuistin jatkuvaa ja tehokasta käyttöä.

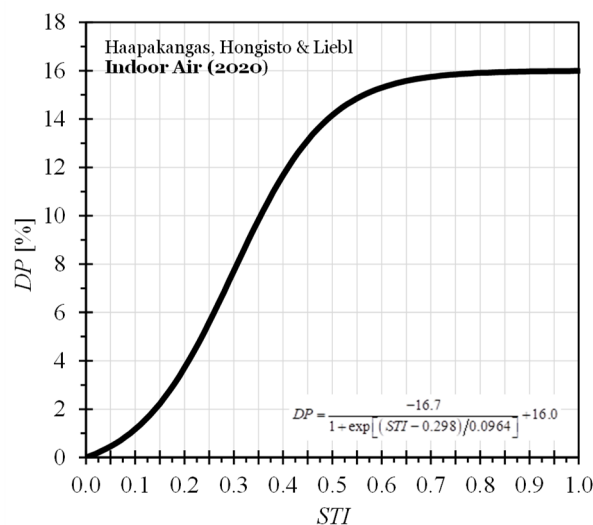
Oppimisen myötä keskussyksikön käytön tarve tiettyjä tehtäviä tehtäessä vähenee tai sitä käytetään vain aika ajoin. Tämän vuoksi tehtävät, jotka ovat rutinoituneet, eivät yleensä häiriinny puhemelusta. Sama pätee kaikkiin tehtäviin, jotka eivät vaadi henkilöltä erityistä keskittymistä.

Ihminen voi säädellä jossain määrin tarkkaavaisuuttaan. Ihminen voi pyrkiä olemaan välittämättä melusta ja myöskin onnistuukin tässä pinnistelyssään useimmiten tiettyin rajoituksin. Melun on todettu muuttavan työtehtävien suorittamiseksi käytettäviä strategioita. Melu voi suosia tiettyjen strategioiden valintaa toisten kustannuksella tai aiheuttaa joustamattomuutta kognitiivisen strategian valinnassa. Melun alentaessa tehtävään suunnattuja voimavaroja, kohdennetaan jäljelle jäävä kapasiteetti tehtävän tärkeimpiin osiin vähemmän tärkeiden osien kustannuksella. Tehtävästä riippuen tällainen strategia voi olla joko tehtäväsuoriutumista ylläpitävä tai tehtäväsuoriutumista heikentävä.

Pääsääntöisesti voidaan todeta, että tehtävän kognitiivisen vaikeusasteen lisääntyessä sen tekeminen puhemelussa vaikeutuu. Tällaisia ovat tehtävät, joiden vaatimukset eivät ole ennakoitavissa tai jotka vaativat monimutkaisia päättelytoimintoja ja jaettua tarkkaavaisuutta.



Kuva 12.11.1. Erään mallin mukaan työmuisti jakautuisi kolmeen yksikköön.



Kuva 12.11.2. Suoriutuminen työmuistia vaativasta tehtävistä heikkenee yli 15 %, jos taustapuheäännet erottuvat hyvin (STI>0.50) verrattuna tilanteeseen, jossa puhe ei erotu (STI<0.20) (Hongisto, 2005; Haapakangas et al., 2020).

12.12 Käyttäytymismuutokset (coping)

Ihmisellä on käytössään itsesäätelyyn liittyviä selviytymis- ja hallitsemiskeinoja eli ns. coping-keinoja. Niiden avulla voidaan säädellä emotionaalisia reaktioita ja hallita tai muuttaa ulkoista ongelmaa. Näiden itsesäätelykeinojen on todettu kompensoivan melun häiritsevyyttä.

Esimerkiksi toimistotyössä häiritsevällä melulla on lukuisia sosiaalisia ja käyttäytymiseen liittyviä vaikutuksia. Niihin kuuluvat jokapäiväisten toimintojen muutokset kuten ovien sulkeminen, radion äänenvoimakkuuden lisääminen, epäystävällisyys, auttamishalun vähentyminen, työpisteen vaihtaminen ja melusta valittaminen. Häiritsevä melu aiheuttaa ärsyyntymistä, työtehtävien siirtämistä työajan ulkopuolelle tai kotiin, ja työpisteestä poistumista. Näillä tekijöillä on luonnollisesti vaikutusta työtehoon. Pinnistely ja työnteon strategioiden muuttaminen ovat yleisiä kompensatorisia hallintakeinoja meluisilla työpaikoilla. Tämä on seurausta siitä, että lukunopeus tai keskittymiskyky yleensä laskee informaatiota sisältävien taustäänien, esimerkiksi työtovereiden keskustelun vuoksi. Myös meluongelmasta puhuminen ja mahdollinen meluntorjuntasuunnittelu vievät työpaikan resursseja. Työhön hyvin motivoituneet (A-tyypin persoonallisuus) pystyvät pinnistelemällä kompensoimaan meluhaittoja. Vaikka melussa työskentelevä henkilö pystyisi pitämään yllä tarkkaavaisuuttaan tehtävän suorittamiseen vaaditun ajan verran, hän joka tapauksessa kuormittuu. Tällöin vaikutukset voivat näkyä vasta tehtävän lopettamisen jälkeen. Seuraukset vaihtelevat väsymyksestä kognitiivisen suorituskyvyn laskuun ja sosiaalisten kanssakäymisen heikentymiseen. Meluisa työympäristö turhauttaa työntekijää, jos tämä ei melun vuoksi saavuta omia tai esimiehensä asettamia tavoitteita.

Häiritsevä ympäristömelu voi aiheuttaa muuttamisia, ikkunoiden sulkemista, parvekkeen käytön välttämistä, television äänen koventamista, makuuhuoneen paikan vaihtamista, sosiaalisten suhteiden heikentymistä tai meluvalitusten tekemistä. Melu tai sen haittojen välttämisyrittäykset voivat aiheuttaa aggressioita, epäystävällisyyttä, joutilaisuutta, yhteistyöhalukkuuden laskua tai osallistumishalun puutetta.

12.13 Ympäristöherkkyys

Ympäristöherkkyydellä (*Idiopathic Environmental Intolerance*) tarkoitetaan tilaa, jossa henkilö saa toiminnallista haittaa tai elämäntavan rajoittumista aiheuttavia oireita tietystä työ- tai elinympäristössä, vaikka sama ympäristö ei suurimmalle osalle ihmisiä aiheuta oireita. Ympäristöherkkyys selittää sellaiset elinvaikutukset, jotka eivät aiheudu ympäristötekijöiden suorilla elinvaikutuksilla. Keskeisinä mekanismeina ovat keskushermostossa syntyvät reaktiot ja sieltä johdetut elimistövasteet. Siksi oireet ovat hyvin moninaisia ja yleisluonteisia ja ne ovat usein yhteneväisiä eri ympäristöherkkyyksissä. Ympäristöherkkyys voi kehittyä lähes mille tahansa tekijälle, joka on saanut kielteisen tai jopa uhkamerkityksen ja voi siten ilmetä pienille määrille tai jopa vihjeille haittatekijöitä, kuten tuoksut, sähkömagneettiset kentät, sisäilma, ruoka-aineet, äännet ja tuulivoimalan infraäänit.

Ympäristöherkkydestä on kyse, jos oireiden ei ole voitu osoittaa syntyneen altisteiden suorilla fysikaalisilla, kemiallisilla tai biologisilla elinvaikutuksilla, eikä ole löydetty varsinaista sairautta, joka selittäisi oireita. Oireisto selittyy elimistön puolustusjärjestelmien vasteilla keskushermostossa, tahdosta riippumattomassa hermostossa ja immunologisessa järjestelmässä. Vastaavia oireita esiintyy monissa muissakin tiloissa, joissa elimistön hälytysjärjestelmät aktivoituvat.

Tuulivoimaloista oireilevista osa liittyy oireensa infraääneen. Kun arvioidaan altisteen vaikutusta ihmiseen, on oleellista selvittää altistumisen taso, kesto ja vaikutusmekanismi. Luvun 1 mukaan myös infraäänellä on kuulokynnys, jota suuremmilla desibeliarvoilla infraääni on kuultavaa. Tämä on havaittu myös suomalaisessa tutkimuksessa (Rajala *et al.*, 2022). Infraäänen on havaittu aiheuttavan negatiivisia terveysvaikutuksia vasta, kun taso on yli 140 dB. Vastaavia vaikutuksia havaitaan myös 140 dB äänillä, joiden taajuus ylittää 20 Hz. Infraääni tasolla 140 dB on kuitenkin jo kuultavaa. Tuulivoimaloiden infraäänien taso on kymmeniä desibelejä infraäänien kuulokynnyksen alapuolella. Normaalisissa elinympäristöissä havaitaan jatkuvasti paljon tuulivoimaloiden infraääntä voimakkaampia infraääniä eikä niistä ole havaittu olevan terveyshaittoja (Hongisto ja Oliva, 2017).

Kun kehittyä ympäristöherkkyys jollekin tekijälle, esim. tuulivoimalan infraäänelle, oireet laukeavat refleksinomaisesti, kun henkilö olettaa altistuvansa haitalliselle tekijälle. Tämä on osoitettu lukuisissa kaksoissokkokeissa sähköherkillä, jotka eivät kyenneet havaitsemaan sähköaltistusta, mutta oireilivat, kun olettivat altistuvansa sille. Ympäristöherkkydessä keskushermosto on ehdollistunut tietuille olosuhteille,

ympäristötekijöille tai niiden vihjeille, mikä selittää syntyvät reaktiot ja elimistön vasteet. Ympäristöherkyydestä voi palautua sitkeän harjoittelun ja poisoppimisen avulla.

Tällä hetkellä ei ole tutkimustietoa, joka tukisi sitä käsitystä, että ei-kuuluva infraääni tahi tuulivoimaloiden infraääni aiheuttaisi terveyshaittoja (Hongisto ja Oliva, 2017; TEM, 2017). Tästä huolimatta useilla tuulivoima-alueiden lähellä asuvilla henkilöillä (tai tulevan tuulivoima-alueen lähellä olevilla) on käsitys siitä, että tuulivoimaloiden infraääni heikentää terveyttä. Tämä negatiivinen käsitys tuulivoimaloista ja niiden aiheuttamasta terveyshaitasta synnyttää riskin ympäristöherkyyteen, joka voi pahimmillaan olla merkittävästi elämää ja elinpiiriä rajoittavaa. Nykyään tällaiset oirekuvat pystytään tunnistamaan entistä paremmin. Ympäristöherkkyys on lisätty vuoden 2015 alusta suomalaisen ICD-10-tautiluokitukseen nimikkeellä *R68.81: Jatkuva tai toistuva poikkeuksellinen herkkyys ympäristön tavanomaisille tekijöille*. Tunnistamisen parantuessa siitä toipumista voidaan tukea terveydenhuollon ammattilaisten puolesta.

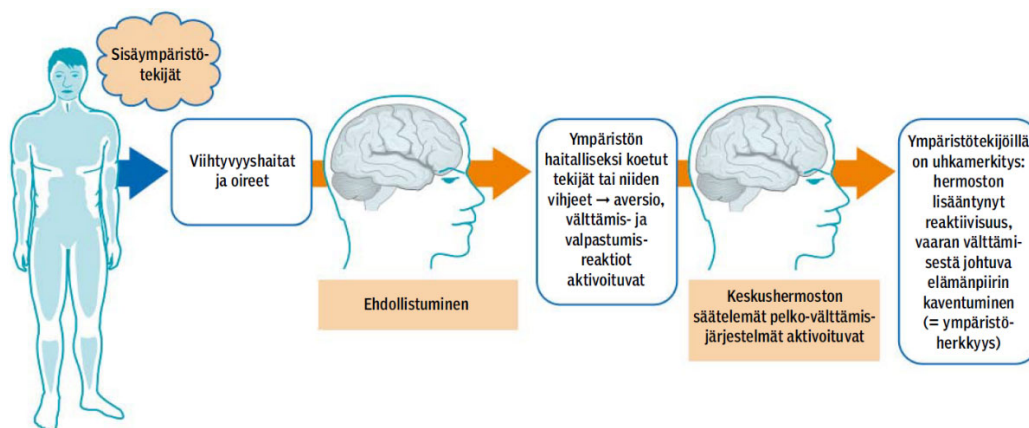
Ympäristöherkkyttä infraäänille lisää ulkomailla lanseerattu tuuliturbiinisyndrooman käsite (Hongisto ja Oliva, 2017). Siihen on liitetty seuraavia epäspesifejä oireita, jotka ovat samankaltaisia kuin muissakin ympäristöherkkyksissä eivätkä selity millään sairaudella:

- migreeniä tai päänsärkyä mukaan lukien pahoinvointi, oksentelu sekä herkkyys valolle ja äänille,
- huimaus,
- soiva, viheltävä tai muu ääni korvissa ilman mitään syytä (esim. tinnitus),
- kuulokyvyn heikentyminen,
- korvien lukkiutuminen tai paineen tunne korvissa,
- ihottuma tai ihon kutina,
- selkäkipu tai selkäsärky,
- toistuvat vatsavaivat,
- näön sumentuminen,
- sydämen tiheälyöntisyys tai tykytys,
- ongelmia keskittyä tai muistaa asioita,
- paniikkikohtauksia tai sen tapaisia tuntemuksia.

Ympäristöherkyyden syntymistä on havainnollistettu kuvassa 12.13.1. Ympäristöherkkyys kehittyy fysiologisena stressivasteena koettuun uhkaan ja sen taustalla voi olla monenlaista kuormitusta ja yksilöllistä alttiutta. Ympäristöherkkyys lähtee yleensä liikkeelle viihtyvyshaitasta. Viihtyvyshaittaa voi aiheuttaa jokin todellinen altiste ja pelkästään käsitys siitä, että jokin läheinen tekijä aiheuttaisi terveyshaittaa. Viihtyvyshaittaa seuraa altistuksen välttäminen (aversio), uhasta aiheutuva keskushermoston aktivoituminen (stressi) ja tätä kautta stressioireiden syntyminen. Kyseessä on aivojen ehdollistuminen, joka voidaan purkaa kognitiivisen käyttäytymisterapian avulla.

Ympäristöherkyyteen liittyy vahvasti ns. nosebo-vaikutus, joka on plasebon vastakohta. Nosebo-vaikutuksella tarkoitetaan sitä, että negatiiviset odotukset vaikuttavat tulkintaamme ja vasteisiin, jota siitä seuraa. Negatiiviset käsitykset voivat syntyä omista tai muiden kokemuksista, mediasta, muiden puheista tai käytöksestä. Ympäristöherkkyys voi myös seurata, kun omat oireet saavat selityksen oletetusta haittatekijästä, jonka jälkeen tämä tekijä tai sen oletettu läsnäolo alkaa synnyttää reaktioita ja vasteita.

Lääkäreillä ja asiantuntijoilla sekä poliitikoilla ja medialla on suuri vastuu ympäristötekijöihin liittyvässä riskiviestinnässä, koska haittojen perusteeton korostaminen lisää yleistä huolta ja provosoi ympäristöherkkyttä. Tällöin huoli itsessään on oireiden aiheuttaja eikä itse altiste.



Kuva 12.13.1. Ympäristöherkyyden kehittyminen (Sainio ja Karvala, 2017).

KIRJALLISUUS

- Haapakangas, A., Hongisto, V., Liebl, A. (2020). The relation between the intelligibility of speech and cognitive performance – A revised model based on laboratory studies. *Indoor Air* 30 1130–1146.
- Heinonen-Guzejev, M., Jauhianen, T., Sala, E., Ström, U., Vuorinen, HS. (2012). Melulla on monia vaikutuksia terveyteen. *Suomen Lääkärilehti* 36 vsk 67 2445–2450b.
- Hongisto, V. (2005). A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance, *Indoor Air* 15 458-468.
- Hongisto, V., Keränen, J. (2018). Open-plan offices - New Finnish room acoustic regulations. Conf. Proc. Euronoise 2018. 1147-1152. ISSN 1116-5147. 27-31 May 2018, Hersonissos, Crete, Greece. Open access at: http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/195_Euronoise2018.pdf.
- Hongisto V. ja Oliva D. (2017). Tuulivoimaloiden infraäänit ja niiden terveysvaikutukset. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 239, Turku. ISBN PDF 978-952-216-653-1. Available at: <http://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522166531.pdf>.
- ISO 1999 (1990). Acoustics — Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment.
- Kryter K (1985). Effects of noise on man. 2nd edition. Academic Press, London, UK.
- Kryter K (1994). The Handbook of Hearing and the Effects of Noise. Physiology, Psychology, and Public Health. Academic Press, San Diego, USA.
- Myllyntausta, S., Virkkala, J., Salo, P., Varjo, J., Rekola, L., Hongisto, V. (2020). Effect of the frequency spectrum of road traffic noise on sleep: A polysomnographic study. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 147(4) 2139–2149.
- Radun, J., Maula, H., Rajala, V., Scheinin, M., Hongisto, V. (2021). Speech is Special. The Stress Effects of Speech, Noise, and Silence during Tasks Requiring Concentration. *Indoor Air* 31(1) 264–274.
- Rajala, V., Hakala, J., Alakoivu, R., Koskela, V., Hongisto, V. (2022). Hearing threshold, loudness, and annoyance of infrasonic versus non-infrasonic frequencies. *Applied Acoustics* 198 108981 13+6 pp. Open access at: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108981>.
- Rontal E, Rontal M, Jacob H, Rolnicl M (1979). Vocal cord dysfunction - an industrial health hazard. *Ann Otol* 88: 818-821.
- Sainio, M., Karvala, K. (2017). Sisäilma ja ympäristöherkkyys. *Suomen Lääkärilehti* 13 vsk 72 848–857.
- Sala E (2004), Äänihäiriöiden diagnostiikka ja hoito, *Työterveyslääkäri* 2.
- Sala E (1995), Työ ja ääni, *Duodecim* 111(6):554.
- Savolainen S (2006), Meluvamma, *Duodecim*;122:2092-3.
- Starck J, Voutilainen R (2005), Terveystarkastukset työterveyshuollossa, *Työterveyslaitos*, Helsinki.
- Takala J, Suomalaisten asuinhuoneiden ääniolosuhteet ja ääneneneristävyyden mittaustapa, *Diplomityö*, Tampereen teknillinen yliopisto, Marraskuu 2013, Tampere.
- TEM (2017). Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia, 28/2017, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/80067>.
- Työterveyslaitos (2019). Ammattitaudit ja ammattitautiepäilyt 2015. Helsinki. (Julkaistaan vuosittain verkossa samalla otsikolla).
- Varjo J, Hongisto V, Karjalainen S, Virkkala J, Oliva D, Salo P, Tieliikennemelun taajuusjakauman vaikutus unen laatuun – laboratoriotutkimus, *Akustiikkapäivät 2015*, 1-2.9.2015 Kuopio, 212-215, Akustinen Seura ry. Espoo. Open access at: http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2015/09/AP2015_Paperin_palautus_4.pdf.
- WHO (2018). Environmental noise guidelines for the European region. World Health Organization, Regional office for Europe, Copenhagen, Denmark. Katso sivusto: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise>.

13 Melun häiritsevyys

13.1 Määritelmä

Ääni koetaan meluksi, jos se on tarpeetonta tai häiritsevää. Ääntä sanotaan yleisesti meluksi, jos sen arvioidaan aiheuttavan terveyshaittaa tai kuulon vaurioitumista.

Melun häiritsevyys on melun yleisin häirtavaikutus. Maailman terveysjärjestön WHO:n määritelmän mukaan ”terveys on täydellisen fyysisen, psyykkisen ja sosiaalisen hyvinvoinnin tila eikä tarkoita pelkästään sairauden tai heikkouden poissaoloa.” Melun häiritsevyyden kokeminen on WHO:n määritelmän valossa terveyshaitta, jota tulisi välttää hyvinvoinnin ylläpitämiseksi. Melun häiritsevyys on terveyshaitta siksi, koska psyykkinen hyvinvointi ei ole häiritsevyyden vuoksi tasapainossa. Tästä johtuen melun häiritsevyyden mittaaminen on keskeisessä roolissa melun terveysvaikutusten tutkimuksessa. Sitä mitataan sekä elinympäristöön kohdistuvissa tutkimuksissa että psykologisissa laboratoriotutkimuksissa.

Häiritsevyyttä mitataan ISO/TS 15666 (2003) mukaisilla kysymyksillä, johon on liitetty kolme verbiä: kiusata (*bother*), häiritä (*disturb*) ja ärsyttää (*annoy*). Standardin kysymykset ja vastausvaihtoehdot ovat kuvassa 13.1.1. Tutkittaessa melukokemuksia elinympäristössä, voidaan kysymykseen sisällyttää aikajakso (esim. standardin mukainen 12 kuukautta, tai tarvittaessa lyhempi). Laboratoriotutkimuksissa aikajakso jätetään pois.

Melun häiritsevyyden annosvastesuhteella (*dose-response-relationship*) tarkoitetaan relaatiota, jossa esitetään melun erittäin häiritseväksi kokevien (%HA, *highly annoyed*) tai häiritseväksi kokevien (%A, *annoyed*) osuus kaikista vastaajista äänitason funktiona. Annosvastesuhteet määritetään elinympäristössä tehtävillä kyselytutkimuksilla ja liittämällä vastauksiin mallinnettu äänitaso, jolle vastaaja pihamaallaan tai parvekkeellaan altistuu. Jos vastausaste on tarpeeksi korkea, vastauksista johdettu annosvastesuhde edustaa luultavasti koko väestön kokemusta. Annosvastesuhteen %A ja %HA arvojen määrittämiseksi sovelletaan kuvassa 13.1.2 esitettyä menetelmää.

Kuvassa 13.1.2 on esitetty joitakin suomalaisia ympäristömelun annosvastesuhteita asuinympäristöissä. On tavanomaista, että annosvastesuhteissa esitettävä äänitaso koskee pihamaan äänitasoa, koska sisätilan äänitasoa ei voida määrittää. Tämä aiheuttaa luonnollisesti suurta epätarkkuutta tuloksiin, koska julkisivun ääneneristys ja asuinhuoneiden sijainti suhteessa melun tulosuuntaan vaihtelevat eri vastaajilla. Eri maissa julkisivun ääneneristävyydet ovat lämmöneristystarpeen tai ympäristömelumäärysten erojen vuoksi eri tasoilla ja ikkunoiden aukkipitämisen määrä vaihtelee. Nämä virheet ovat ympäristöepidemiologisille tutkimuksille ominaisia ja sen vuoksi yhdessä maassa saatu annosvastesuhde ei välttämättä sovellu suoraan toiseen maahan. Annosvastesuhteet vaihtelevat myös eri alueiden ja asuntotyyppien kesken, koska eri alueilla on erilaiset maankäytön tarinat ja asukkailla erilaisia odotuksia elinympäristönsä äänitason suhteen.

Kun olet kotona/pihalla, kuinka paljon äänilähteen X melu kiusaa, häiritsee tai ärsyttää sinua?

Ajattele viimeistä 12 kuukautta.

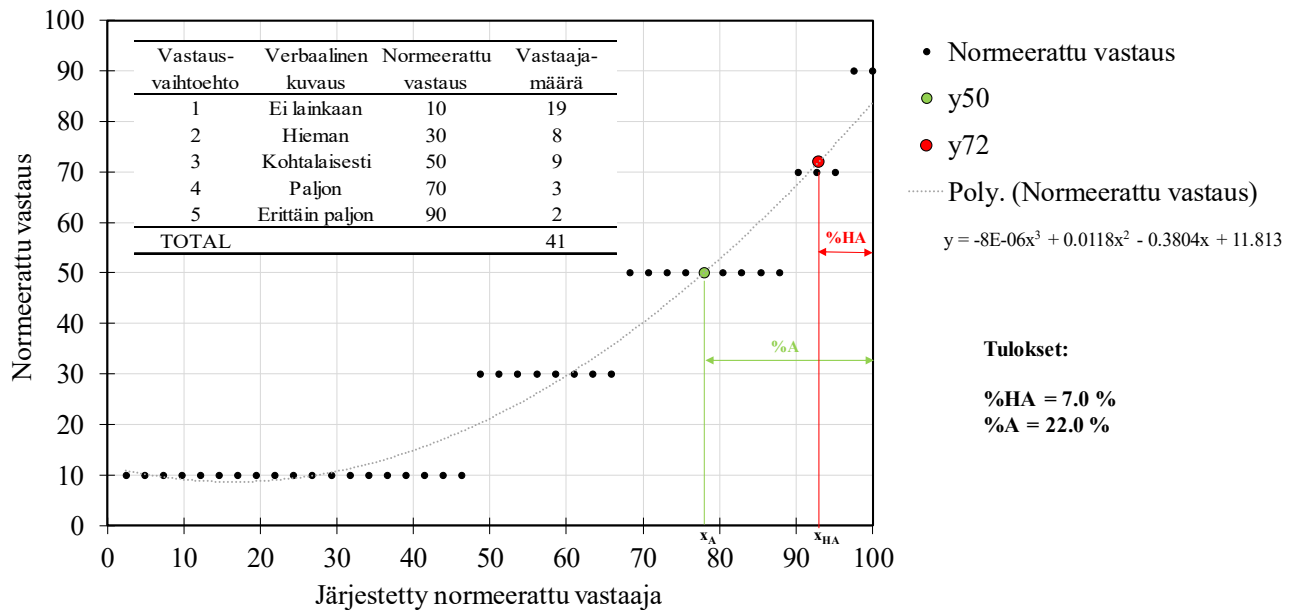
5-portainen verbaalinen vastausasteikko

Ei lainkaan	Hieman	Kohtalaisesti	Paljon	Erittäin paljon
-------------	--------	---------------	--------	-----------------

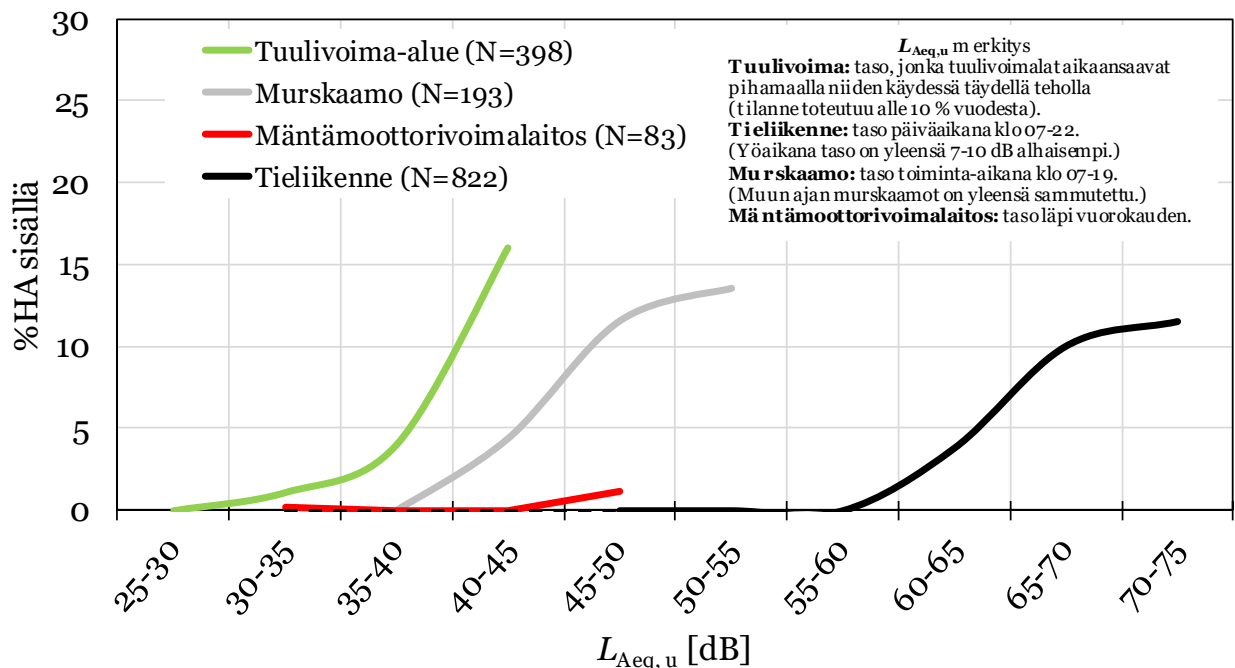
11-portainen numeerinen asteikko

Ei lainkaan										Erittäin paljon
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Kuva 13.1.1. Melun häiritsevyyden mittaaminen ISO/TS 15666 (2003) mukaan.



Kuva 13.1.2. Esimerkki annosvastesuhteen määrittämisestä, kun käytössä on 5-portainen vastausasteikko. Esimerkissä on käytetty taulukon kuvitteellisia dataa 41 vastaajalta, joiden pihamaalla äänitaso on 40–45 dB L_{Aeq} (äänitasovyöhyke). Vastaavaa menettelyä sovelletaan kaikilla äänitasovyöhykkeillä erikseen. Vastaajat järjestetään ensin kasvavan vastausnumeron mukaan. Vastauksille annetaan asteikolle 0–100 normeerattu arvo. Normeerauksessa 100 jaetaan vastausvaihtoehtojen lukumäärällä. Viisiportaisella vastausvaihtoehdolla leveydeksi tulee 20, jolloin vastausvaihtoehto 1 sijoittuu sen keskelle arvoon 10. Tämän jälkeen saadaan ylläoleva kuvaaja, jossa näkyvät mustat pallot. Saatuaan kuvaajaan sovitetaan kolmannen asteen polynomifunktio. Funktiolta haetaan y-arvoa y_{50} vastaava x_A -arvo, josta $\%A = 100 - x_A$. Vastaavasti funktiolta haetaan y-arvoa y_{72} vastaava x_{HA} -arvo, josta $\%HA = 100 - x_{HA}$.



Kuva 13.1.3. Ympäristömelun annosvastesuhteita neljälle eri ympäristömelun lajille. Kysymyksenä käytettiin kuvan 13.1.1 mukaista verbaalista kysymystä mutta vastausasteikko oli neliportainen (vaihtoehto 1 oli korvattu kuvauksella ”Ääni ei kuulu”). Vaaka-akselilla on A-painotettu ekvivalenttitaso vastaajan asuinrakennuksen pihamaalla, $L_{Aeq,u}$. Pystyakselilla todennäköisyys sille (prosentteina, asteikko 0–100%), että asukas kokee melun erittäin häiritseväksi sisätiloissa, %HA. Kukin tutkimus tehtiin eri alueilla, jossa kyseinen ympäristömelun tuottaja oli lähistöllä (Hongisto et al., 2017; Maula ym., 2019a; Maula ym., 2019b). Sulkeissa on kyselyyn osallistuneiden lukumäärä.

13.2 Erityispiirteet ja sanktio

Ääntä voidaan luonnehtia erilaisilla adjektiiveilla tai teknisillä piirteillä. Psykoakustiikassa yleisimmin mainittuja äänenlaatuja tai erityispiirteitä ovat mm.

1. **Taajuuskaista:** taajuudet, jotka tutkittavassa äänessä ylipäättään esiintyvät kuulokynnyksen (tai taustamelun) yläpuolella, esimerkiksi puheella yleensä 100–10000 Hz tai vihellyksellä pelkästään vihellyksen taajuudet.
2. **Äänen taajuusjakauma:** äänenpainetaso taajuuden funktiona. Äänen väri voidaan kokea esimerkiksi jyriäväksi, kohiseväksi, sihiseväksi tai teräväksi.
3. **Kapeakaistaisuus (*narrowband sound, tonality*):** äänessä on yksi tai useampi erottuva taajuus, joka dominoi.
4. **Impulssimaisuus (*impulsivity*):** äänessä on iskuja tai nopeita nousukohtia, jotka vaimenevat hitaammin kuin nousevat.
5. **Amplitudimodulaatio (*amplitude modulation*):** äänen voimakkuus vaihtelee joko jaksollisesti tai satunnaisella jaksolla, jonka taajuus on alle 15 Hz. Tätä kutsutaan joskus myös merkitykselliseksi sykinnäksi tai vaihteluvoimakkuudeksi (*fluctuation strength*).
6. **Karheus (*roughness*):** sykintä on tiheää (yli 15 Hz), esimerkiksi sateen ropina.
7. **Ajoittaisuus (*intermittency*):** äänen voimakkuus vaihtelee mutta jakso on pitkä, esimerkiksi liikennevalojen ryhmittämä tieliikenne.
8. **Informaatioisältö:** äänen pidemmät kokonaisuudet muodostavat verbaalisen informaation, emotion tai muun assosiaation, kuten puhe tai musiikki.
9. **Äänimaisema (*soundscape*):** tiettyyn ympäristöön luonteenomainen äänikokonaisuus, joka tuottaa vahvoja muistikuvia mutta ei sisällä välttämättä erityistä informaatiota. Tällaisia ovat esimerkiksi kauppakeskuksen, merenrannan, metsän, liekin tai päiväkodin äänet.

Rakennusakustiikan ja meluntorjunnan kannalta tärkeimmät ovat piirteet 3–4, koska niitä koskee tapauksesta riippuen 3–10 desibelin sanktio suomalaisessa lainsäädännössä (Taulukko 13.2.1). Sanktiolla tarkoitetaan, että mitattuun A-painotettuun keskiäänitasoon L_{Aeq} lisätään sanktio k ja mittausepävarmuus K ennen tuloksen vertaamista äänitason ohjearvoon. Asumisterveysohjeen kohdalla sanktiota sovelletaan vain sille ajalle, jona erityispiirrettä esiintyy. Ääniympäristöasetuksen ja ympäristömelun ohjearvojen kohdalla sanktiota sovelletaan täysmääräisesti heti, jos voidaan osoittaa, että piirre aiheutuu tarkasteltavasta melulähteestä.

Lisäksi pientaajuuiselle melulle esitetään toimenpiderajat asumisterveysohjeessa. Siksi myös piirre 2 on tärkeä. Yöaikaiseen (22–07) ympäristömeluun liittyy 5–10 dB sanktio mutta se jätetään tässä tarkastelussa pois, samoin kuin raskaita aseita ja räjäytyksiä (Valtioneuvosto, 2017) koskeva 5 dB:n ilta-ajan (19–22) ja viikonlopun korjaus.

Seuraavissa luvuissa käsitellään tutkimustietoa keskeisten erityispiirteiden todentamisesta ja erityispiirteiden vaikutuksista melun häiritsevyyteen.

Taulukko 13.2.1. Keskeisessä lainsäädännössä noudatetut sanktiot äänen erityispiirteistä.

	Sanktio k [dB]	
	Kapeakaistaisuus	Impulssimaisuus
Ääniympäristöasetus		
Ympäristöministeriön asetus 796/2017	3-5	3-5
Ympäristömelun ohje arvot		
Valtioneuvoston päätös 993/1992	5	5
Ympäristöministeriön asetus 1107/2015 (tuulivoimalat)	5	5
Asumisterveysasetus		
Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545/2015	3 tai 6	5 tai 10

13.3 Kapeakaistainen ääni

13.3.1 TODENTAMINEN

Suomessa kapeakaistaisuus todetaan rakennuksissa ja ympäristössä jollakin seuraavista menetelmistä:

- Valvira (2016): asumisterveysasetuksen (STM, 2015) mukaiset terveyshaittaselvitykset

- Ääniympäristöohje (2018): ääniympäristöasetuksen (YM, 2017) mukaiset taloteknisten laitteiden äänet
- ISO 1996-2 (2007, 2017) ja ISO PAS 20065 (2016): melutason ohjearvojen (VN, 1992) mukaiset mittaukset
- IEC 61400-11: tuulivoimalamelun ohjearvojen (VN, 2015) mukaiset mittaukset

Valviran (2016) menetelmässä kapeakaistaisuus todetaan seuraavasti:

1. Jos kapeakaistaisuus erottuu heikosti, korjaus on 3 dB. Tähän riittää subjektiivinen arvio.
2. Jos se on selvästi kuultavissa, korjaus on 6 dB. Kapeakaistaisuus voidaan yleensä katsoa selvästi kuuluvaksi, jos seuraavat ehdot toteutuvat:
 - komponentti tai komponentit aiheuttavat sen, että komponentin voimakkuus ylittää kuulokynnyksen,
 - taajuuspainottamattomassa terssispektrissä ko. komponentin terssipainetaso on vähintään 5 dB suurempi kuin taajuudeltaan sitä alemman ja ylemmän terssin terssipainetasojen keskiarvo, ja
 - samanaikaisesti vallitsevan kokonaismelun keskiäänitaso on alle 55 – 60 dB.

Valviran menetelmän ongelmana on, että 3 dB:n sanktion voi antaa subjektiivisin perustein, mikä voi johtaa ristiriitaisiin tuloksiin. Lisäksi 6 dB:n sanktiota edellyttävä äänes ei johda sanktioon, jos äänes sijaitsee terssikaistojen rajalla, jolloin äänes nostaa molempien terssikaistojen tasoa yhtä paljon

Ääniympäristöohjeessa (2018) kapeakaistaisuus poissuljetaan kuulohavainnoin tai määritetään objektiivisesti ISO 1996-2 mukaan.

ISO 1996-2 (2017) menetelmässä kapeakaistaisuus todetaan joko karkealla survey–menetelmällä tai tarkalla engineering –menetelmällä, joka tehdään puolestaan ISO PAS 20065 (2016) mukaan. Survey –menetelmässä tonaalisuuden olemassaolo todetaan tekemällä äänestä terssikaista-analyysi. Siitä määritetään kapeakaistaiseksi epäillyn ääneksen terssikaistan tason ja sitä ympäröivien terssikaistojen tason keskiarvon erotus. Kapeakaistaisuus esiintyy, jos erotus on suurempi kuin

- 15 dB (25–125 Hz)
- 8 dB (160–400 Hz)
- 5 dB (500–10000 Hz).

Suurilla taajuuksilla kapeakaistaisuus muodostuu siis helpommin kuin pienillä taajuuksilla. Survey –menetelmään liittyy sama puute kuin Valviran menetelmässä.

Menetelmää ISO PAS 20065 (2016) edeltänyt menetelmä ISO 1996-2 (2007) toimii pääpiirteittäin seuraavasti (**kuva 13.3.1**):

- äänenpainetaso analysoidaan FFT:llä kapeakaistaisesti (esim. 1 Hz resoluutiolla), jolloin saadaan spektri eli äänenpainetaso taajuuden funktiona,
- spektri A-painotetaan,
- spektristä etsitään melupaussit eli äänesehdokkaat, jotka ovat vähintään 6 dB korkuisia,
- analysoitu taajuuskaista jaetaan kriittisiin kaistoihin, jotka mallintavat kuulon taajuuskaistojen leveyttä, ja kriittisen taajuuskaistan keskitaajuudet (f_c) sijoitetaan erottuvimpien äänesehdokkaiden kohdalle,
- äänesehdokas on äänes, jos -3 dB kaistanleveys on alle 10 % kriittisen kaistan leveydestä,
- sovitetaan lineaarinen regressio niihin taajuuksiin, jotka eivät sisälly äänekseen, josta peittoäänen äänenpainetaso kriittisellä taajuuskaistalla (L_{pn}) saadaan summaamalla sovituksen mukaiset äänenpainetasot koko kriittisellä kaistalla (myös melupaussin alue),
- lasketaan ääneksen kokonaistaso L_{pt} ääneksen -6 dB kaistanleveydestä,
- jos ääneksen äänenpainetaso on kuulokynnyksen yläpuolella, määritetään ääneksen erotettavuus, A_T , (*tonal audibility*) yhtälöllä,

$$(13.3.1) \quad A_T = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log_{10} \left[1 + \left(\frac{f_c}{502} \right)^{2.5} \right]$$

ISO-menetelmällä ei voi tunnistaa (ilman itse määriteltyjä lisävaiheita) alle 50 Hz:n ääneksiä, joten sen soveltaminen pientaajuiselle kapeakaistaiselle äänelle on kyseenalaista. ISO-menetelmä esittää portaittaisen

sanktiointimallin (kuva 13.3.2) mutta sitä ei sovelleta Suomessa. Kapeakaistaisuuden määrittäminen esitetään nykyisin standardissa ISO PAS 20065 (2016) mutta se muistuttaa tässä esitettyä.

IEC-menetelmä muistuttaa periaatteiltaan ISO-menetelmää mutta sitä on muokattu tuulivoimamelun mittaustarpeisiin.

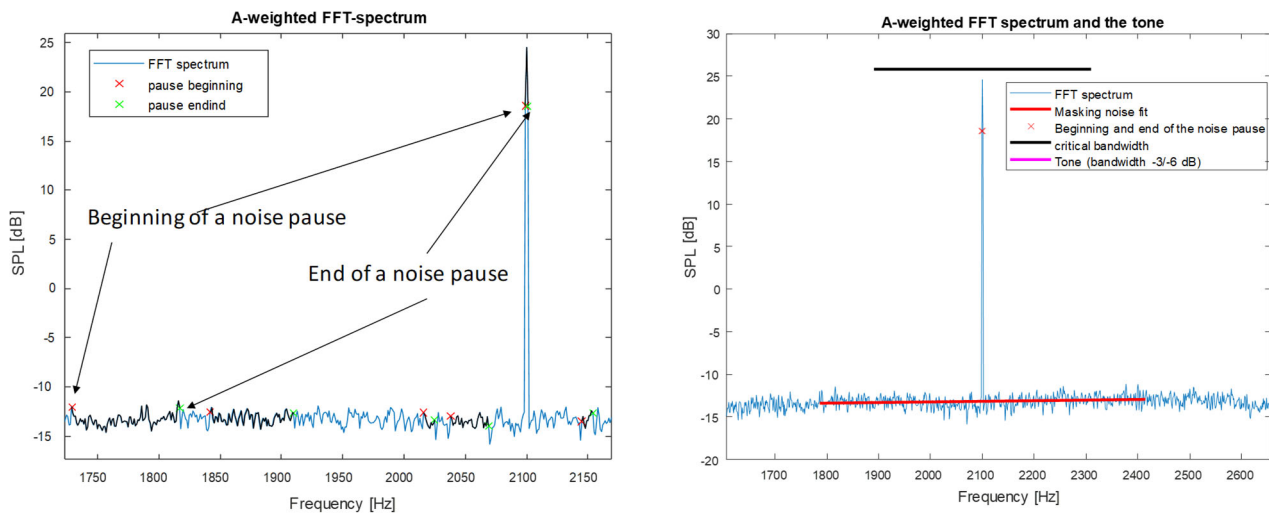
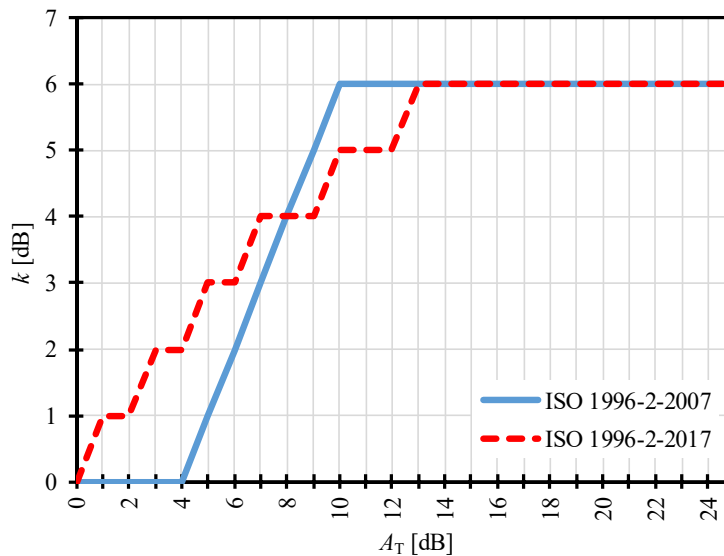


Table C.1 — Widths of critical bands

Centre frequency, f_c , Hz	50 to 500	Above 500
Bandwidth, Hz	100	20 % of f_c

Kuva 13.3.1. ISO-menetelmä. Melupaussien haku, peittoäänien sovitus ja kriittisten taajuuskaistojen määritelmät.



13.3.2. ISO 1996-2 standardin portaittainen sanktiointimalli ei saanut tukea psykoakustisessa tutkimuksessa (Hongisto et al., 2019).

13.3.2 HÄIRITSEVYYS

Alla on esitetty tiivistelmä tähän asti laajimmasta, psykoakustisesta laboratoriotutkimuksesta, joka käsitteli kapeakaistaisen äänen häiritsevyyssanktiota (Oliva et al., 2017; Hongisto et al., 2019). Sen mukaan kapeakaistaisuuden sanktio vaihteli 0 ja 12 dB:n välillä ja arvo riippuu voimakkaasti ISO 1996-2 mukaisten objektiivisten muuttujien arvoista, joita ovat äänen taajuus, f_T [Hz] (piikin keskitaajuus) ja äänen erotettavuus, A_T [dB]. Kokeessa käytettiin lyhyitä ääniä, joten saadut sanktiot eivät välttämättä ole samoja, kuin elinympäristössä, jossa altistusta voi tapahtua jatkuvana. Tulokset todennäköisesti pätevät hyvin siihen, mikä keskinäinen merkitys objektiivisilla muuttujilla f_T ja A_T on sanktioon.

Tarve. Standardi ISO 1996-2:2007 esittää yksityiskohtaisen menetelmän kapeakaistaisuuden määrittämiseksi

äänen FFT-spektristä. Standardissa kapeakaistaisuutta kuvataan kahdella muuttujalla: ääneksen taajuus, f_T [Hz] (piikin keskitaajuus), ja ääneksen erotettavuus, A_T [dB] (taajuuspiikin korkeus). Standardin mukaan sanktio riippuisi vain A_T :n arvosta, eivätkä kansallisiin määräyksissä esiintyvät vakiosanktiot olisi perusteltuja. Standardin sanktiomallin tieteelliset perusteet ovat löyhät. Kirjallisuudessa ei ole tutkimuksia siitä, mistä tekijöistä kapeakaistamelun sanktio riippuu etenkin hiljaisilla äänitasoilla (25–35 dB L_{Aeq}). Tämä on olennainen äänitasoalue, kun ollaan sisätiloissa ja arvioidaan melun terveystvaikutuksia.

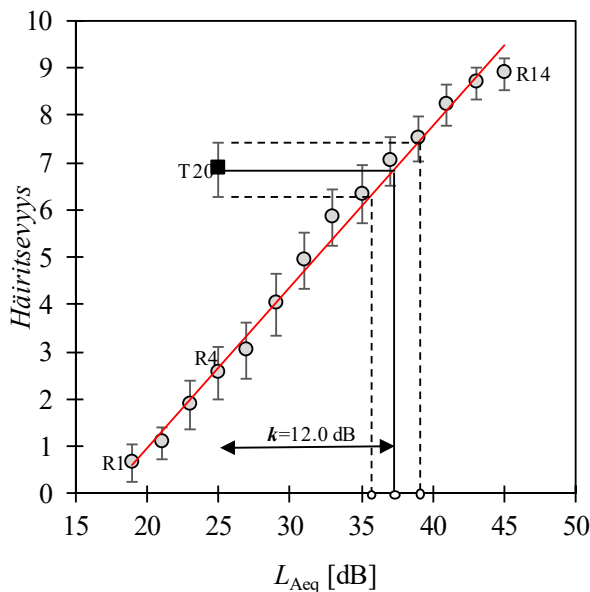
Tavoite. Tavoitteena oli selvittää, miten melun kapeakaistaisuudesta tulisi sanktioida, jotta se vastaisi subjektiivista häiritsevyyden kokemusta. Yksityiskohtaisena tavoitteena oli määrittää, miten f_T ja A_T vaikuttavat kapeakaistaisen äänen sanktioon, kun äänitaso on alhainen vastaten asuinhuoneiston tyypillistä äänitasa.

Menetelmät. Psykoakustiseen kokeeseen rekrytoitiin 40 tutkittavaa. Tutkittavia kapeakaistaisia ääniä oli 20 kpl. Tutkitut äänestaajuudet olivat 50, 110, 290, 850 ja 2100 Hz. Äänesten erottuvuudet olivat 5, 10, 18 ja 25 dB ja ääneksen taustalla oli laajakaistainen kohina, jonka spektrinä oli käänteinen A-painotus. Kaikkien tonaalisten äänten taso oli $L_{Aeq} = 25$ dB. Lisäksi kokeessa oli 14 laajakaistaista referenssiääntä tasoilla 19–45 dB L_{Aeq} , joiden avulla voitiin määrittää sanktio. Referenssiäänät olivat niin ikään laajakaistaista kohinaa, jonka spektrinä oli käänteinen A-painotus. Sanktion määrittelytapa on esitetty kuvassa 13.3.3. Tutkittavat arvioivat kunkin äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10.

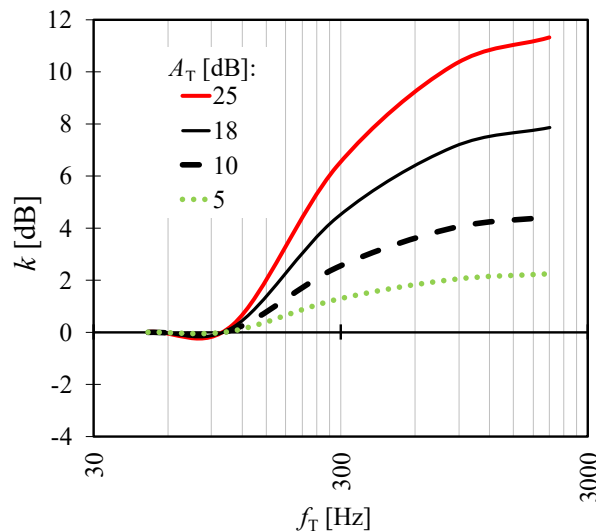
Tulokset. Kokeessa saatu sanktion riippui eri f_T ja A_T arvoista kuvan 13.3.4 mukaisesti. Sanktio oli korkeimmillaan jopa 12 dB. Tämä tarkoittaa sitä, että tietynlainen kapeakaistainen ääni, jonka äänitaso on 25 dB L_{Aeq} , koettiin yhtä häiritsevänä kuin laajakaistainen ääni, jonka äänitaso on 37 dB L_{Aeq} ja joka ei sisällä kapeakaistaisuutta. Suurimmat sanktiot havaittiin suurilla f_T :n arvoilla. Pienillä f_T -arvoilla sanktiota ei havaittu, vaikka A_T oli suuri. Tutkimus ei tue kapeakaistaisen melun vakiosanktiointia. Kuvan 13.3.4 saatu sanktio k voitiin laskea yhtälöllä

$$(13.3.2) \quad k = A_T \left[-0.361 + 0.326 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{6f_T}{1000} - 0.5148 \right) \right]$$

Johtopäätökset. Kapeakaistainen ääni voi lisätä äänen häiritsevyyttä, mutta häiritsevyyttä kuvaava sanktio k [dB] riippuu f_T :n ja A_T :n arvoista. Tulokset näyttävät siltä, että suurilla taajuuksilla esiintyvä kapeakaistaisuus olisi suurempi häiritsevyyden riskitekijä kuin pienillä taajuuksilla esiintyvä kapeakaistaisuus. Asuinympäristössä melun häiritsevyyteen vaikuttavat kuitenkin myös muut tekijät kuin äänestä mitattavat ominaisuudet. Jos ääni on esimerkiksi vaihteleva, itselle tarpeettomasta lähteestä peräisin, muusta taustäänestä selvästi erottuva, tai kokonaan uusi ja ennen kokematon, se voidaan kokea eri tavoin häiritseväksi kuin tässä tutkimuksessa havaittiin.



Kuva 13.3.3. Sanktio k määritettiin tässä kuvatulla tavalla. R1–R14 (ympyrät) kertovat referenssiäänten häiritsevyykeskiarvon ja viikset 95 % luottamusvälin. Punainen suora kuvaa ensimmäisen asteen sovitusta referenssiääniin. T20 (musta neliö) edustaa yhtä kapeakaistaista ääntä, jonka äänitaso on $L_{Aeq} = 25$ dB. Äänelle T20 on saatu häiritsevyykeskiarvoksi noin 7. Referenssiääni koettiin yhtä häiritseväksi, jos sen äänitaso on $L_{Aeq} = 37$ dB. Tästä johtuen sanktio on $k = 37 - 25 = 12$ dB. Katkoviivojen avulla määritetään sanktion 95 % luottamusväli.



Kuva 13.3.4. Kapeakaistaisen äänen häiritsevyysanktion k riippuvuus ääneksen taajuudesta f_T ja ääneksen erottuvuudesta A_T yhtälön 13.3.2 mukaan (Hongisto et al., 2019).

13.4 Impulssimainen ääni

13.4.1 TODENTAMINEN

Impulssimaisuus todetaan Suomessa yleensä jollakin seuraavista menetelmistä:

- Valvira (2016): asumisterveysohjeen mukaiset mittaukset
- Nordtest (2002): ympäristömelun mittaukset

Kummassakin menetelmässä esitetään sanktiomallit. Sanktio sovelletaan kuitenkin vain jaksolle, jona impulssimaisuutta esiintyy. Koska impulsseja ei välttämättä esiinny jatkuvasti, on sanktion soveltaminen työlästä ja laskentaa vaativaa.

Valviran menetelmän mukaan impulssimaista tai iskumaista on melu, jossa on erotettavissa yksi tai useampia alle yksi sekuntia kestäviä voimakkaita ääniä. Impulssimaisille meluille on tunnusomaista:

- Nopea ja suuri äänitason kasvu äänitapahtuman alussa, tyypillisesti 20 dB/s (Valviran ohjeessa on ”ms” mutta se on virhe, koska impulssien nousunopeus on yleensä aina alle 2 dB/ms).
- Melko lyhyt äänitason vakio-osuus nousun jälkeen; tyypillisesti 0–100 ms.
- Vaihtelevan pituinen ja nopeuksinen äänitason vaimentuminen signaalin lopussa. Tyypillisesti 20 dB vaimentumiseen kuluu 30 - 500 millisekuntia. Kaiuntaisissa oloissa ja suurissa tiloissa 20 dB vaimentumisaika voi olla pitempi.
- Toistuvuus harvempi kuin 30 tapahtumaa (iskuääntä) sekunnissa.

Impulssimaisuuden vuoksi tehtävä korjaus vaihtelee ja on impulssimelun laadun mukaan 5 tai 10 dB. Impulssimelut on jaettu laadun suhteen kahteen *laatuiluokkaan*:

- Voimakkaasti impulssimainen melu, jota voivat aiheuttaa mm. pienikaliiperisten aseiden laukaukset, puu- ja metalliesineiden vasarointi, iskupaalujen juntauuskoneet sekä paineilmakangat ja -vasarat silloin, kun yhden melutapahtuman äänialtistustaso (A-taajuuspainotettu) $L_{AE} > 55 - 60$ dB ja melu erottuu selvästi taustamelusta. Haitallisuuskorjaus kunkin tapahtuman L_{AE} -tasoon on 10 dB.
- (Tavallinen) impulssimelu, johon lasketaan kuuluvan sellaiset taustamelusta selvästi erottuvat impulssimelut, jotka eivät kuulu selvästi edelliseen luokkaan esimerkiksi siksi, että ovat L_{AE} -tasoltaan alhaisempia. Haitallisuuskorjaus kunkin melutapahtuman L_{AE} -tasoon on 5 dB. Tyypillisesti ulkoa sisään kuuluva impulssimainen melu kuuluu luokkaan 2.

Valviran menetelmän soveltamista on hahmoteltu kuvassa 13.4.1.

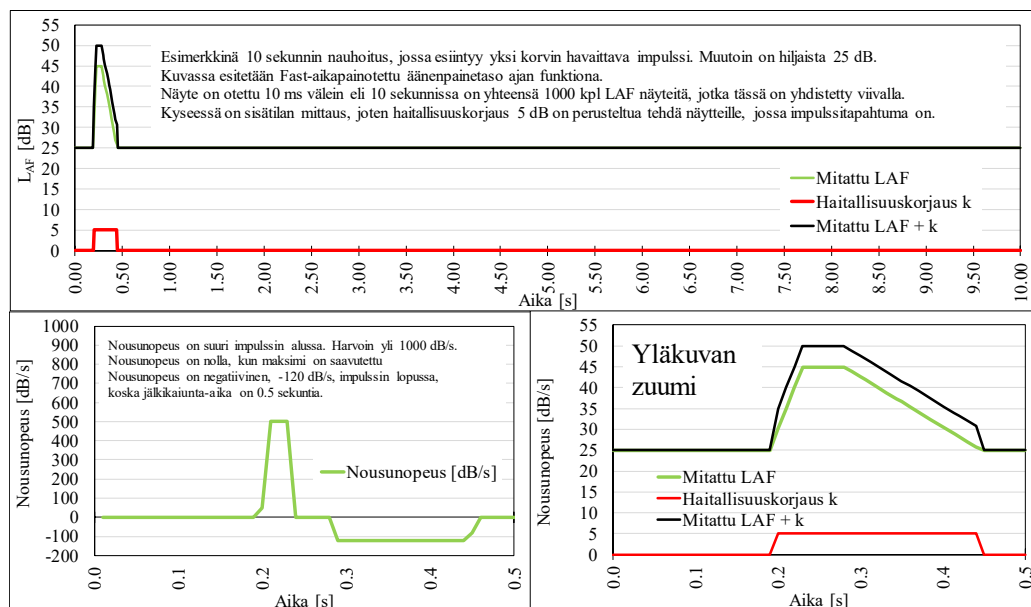
Nordtest -menetelmässä Kutakin impulssia kuvaa kaksi parametria: nousunopeus R_{on} [dB/s], joka kuvaa impulssin nousun nopeutta ja tasoero D_L [dB], joka kertoo miten paljon impulssin maksimikohta eroaa taustasta. Impulssimaisuus todetaan pääpiirteittäin seuraavasti (kuva 13.4.2):

1. Äänisignaali A-painotetaan. A-painotetusta äänisignaalista määritetään fast-aikavakiolla L_{AF} -aikaprofiili 10 ms aikaresoluutiolla.
2. Nousu alkaa ($L_{AF,start}$), kun kahden peräkkäisen L_{AF} -arvon välille sovitetun suoran jyrkkyys ylittää arvon 10 dB/s.
3. Nousu päättyy ($L_{AF,end}$), kun kahden peräkkäisen L_{AF} -arvon välille sovitetun suoran jyrkkyys alittaa arvon 10 dB/s.
4. Jos uusi nousu alkaa alle 50 ms päässä edellisen nousun päättymisestä, nousut voidaan yhdistää.
5. Nousunopeus R_{on} on nousuun sovitetun ensimmäisen asteen sovitussuoran kulmakerroin.
6. Impulssin tasoeroksi kirjataan $D_L = L_{AF,end} - L_{AF,start}$.
7. Impulssin merkittävyys on P (*prominence*) yhtälöllä 13.4.1.
8. Sanktio k lasketaan yhtälöllä 13.4.2.

$$(13.4.1) \quad P = 3 \cdot \log_{10}(R_{on}) + 2 \cdot \log_{10}(D_L)$$

$$(13.4.2) \quad k = \begin{cases} 1.8 \cdot (P - 5), & P > 5 \\ 0, & P \leq 5 \end{cases}$$

Sanktio ehdotetaan sovellettavan 30 minuutin keskiarvoon $L_{Aeq,30min}$ ja sanktio määritetään suurimman 30 minuutin aikana havaitun merkittävyyden perusteella. Sanktion määrittämiselle on hyvin löyhät psykoakustiset perusteet (Pedersen, 2000) mutta se näyttäisi toimivan kohtalaisen hyvin alla esitetyn psykoakustien tutkimuksen mukaan (Rajala & Hongisto, 2019&2020).

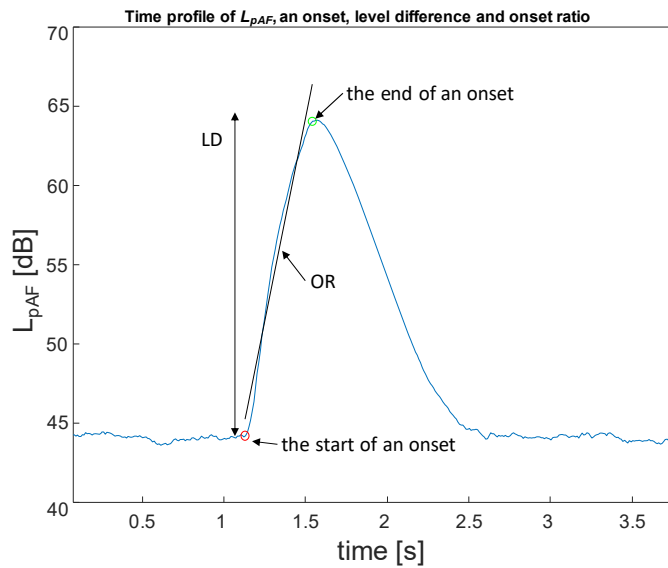


$$L_{AE} = L_{Aeq,T} + 10 \lg \left(\frac{T}{t_0} \right)$$

	Vain impulssiosuus		Koko ääninäyte	
	$L_{Aeq,0.26s}$ [dB]	$L_{AE,0.26s}$ [dB]	$L_{Aeq,10s}$ [dB]	$L_{AE,10s}$ [dB]
T [s]	0.26	0.26	10	10
Mitattu LAF	40.7	34.8	27.9	37.9
Mitattu LAF + k	45.7	39.8	31	41
Edellisten ero	5.0	5.0	3.1	3.1

Kuva 13.4.1. Valviran menetelmän soveltaminen yksittäiselle impulssille, kun mittauksen kesto on 10 sekuntia (yläkuva). Ilman sanktiota keskiäänitaso on $L_{Aeq,10s} = 27.9$ dB. Nousunopeuden kriteeri 20 dB/s ylittyy (vasen alakuva), impulssieja on sekunnissa alle 30 kpl, impulssi kestää alle sekunnin, ja maksimi kestää alle 100 ms, joten kyseessä on impulssi. Mittaus on tehty sisätilassa, jolloin sanktio (haitallisuuskorjaus) on $k=5$ dB. Koska asumisterveysasetuksen mukainen

korjaus (sanktio k) annetaan vain impulssin ajalle (oikea alakuva), ja impulssivapaalle ajalle sanktiota ei sovelleta, vaikutus keskiäänitasoon ei ole täydet 5 dB vaan 3.1 dB. Haitallisuuskorjattu arvo on $L_{Aeq,10s} = 31.0$ dB. Jos sen sijaan mittaustuloksia verrataan ympäristömelun ohjearvoihin tai ääniympäristöasetukseen, sanktiota 5 dB sovelletaan koko ajalle ja korjattu arvo on $27.9 + 5.0 = 32.9$ dB.



Kuva 13.4.2. Impulssin etsintä aikaprofilista. Kuvan impulssille tasoero (LD, *level difference*) on $D_L=20$ dB ja nousunopeus (OR, *onset rate*) on $R_{on}=66$ dB/s.

13.4.2 HÄIRITSEVYYS

Alla on esitetty tiivistelmä tähän asti laajimmasta psykoakustisesta laboratoriotutkimuksesta, joka käsitteli impulssiäänien häiritsevyysanktiota (Rajala & Hongisto, 2019&2020). Impulssit esitettiin säännöllisesti 3 sekunnin välein. Impulssimaisuuden sanktio vaihteli 0 ja 8 dB:n välillä. Arvo riippui voimakkaasti Nordtest-menetelmän mukaisten objektiivisten muuttujien, R_{on} (nousunopeus) ja D_L (tasoero), arvoista. Kokeessa käytettiin lyhyitä ääniä, joten saadut sanktiot eivät välttämättä ole samoja, kuin elinympäristössä, jossa altistusta voi tapahtua jatkuvana, mutta tulokset kertovat hyvin siitä, mikä keskinäinen merkitys objektiivisilla muuttujilla R_{on} ja D_L on sanktioon.

Tarve. Suomalainen melulainsäädäntö sisältää vakiosanktioita 3, 5 ja 10 dB impulssimelulle. ISO 1996-1 (2016) mukaan sanktio on joko 5 tai 12 dB. Arvot perustuvat laajoihin ampumamelun tutkimuksiin 80- ja 90-luvuilta (Rice, 1996). Nordtest (2002) esittää johdonmukaisen menetelmän impulssimaisuuden toteamiseksi äänisignaalista sekä myös sanktiomallin. Sanktiomallin tieteelliset perusteet ovat kuitenkin löyhät.

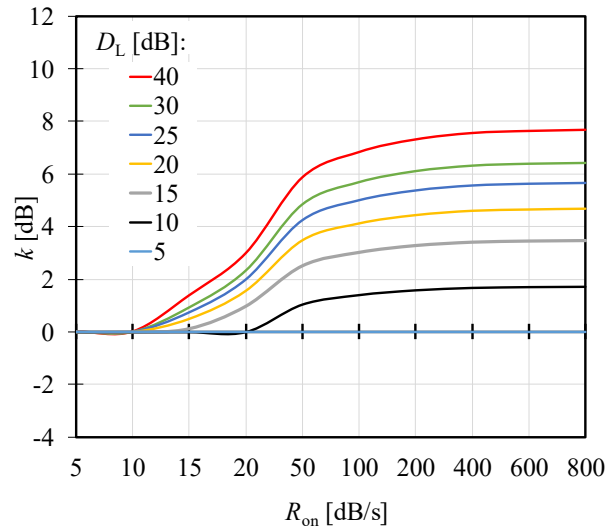
Tavoite. Tavoitteena oli määrittää, miten Nordtest –menetelmän muuttujat R_{on} ja D_L vaikuttavat impulssimelun häiritsevyysanktioon, kun äänitaso on ulkomelun ohjearvon tuntumassa.

Menetelmät. Psykoakustiseen kokeeseen rekrytoitiin 32 tutkittavaa. Tutkittavia impulssiääniä oli 33 kpl spektrillä S1 (ilmanvaihdon kaltainen laajakaistaääni) ja 33 kpl spektrillä S2 (korkeataajuisempi laajakaistaääni). Impulssien nousunopeudet R_{on} olivat 5 ja 800 dB/s välillä. Impulssien tasoerot D_L olivat 5 ja 40 dB välillä. Kaikkien impulssimaisten äänten taso oli $L_{Aeq} = 55$ dB. Lisäksi kokeessa oli 8 laajakaistaista referenssiääntä spektrillä S1 tasoilla 49–70 dB L_{Aeq} , joiden avulla voitiin määrittää impulssimaisten äänten sanktio (ks kuva 13.3.3). Tutkittavat arvioivat kunkin äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10.

Tulokset. Sanktion riippuvuus R_{on} ja D_L arvoista on esitetty kuvassa 13.4.3. Sanktio oli korkeimmillaan jopa 8 dB. Tämä tarkoittaa sitä, että tietynlainen impulssimainen ääni, jonka äänitaso on 55 dB L_{Aeq} , koettiin yhtä häiritsevänä kuin laajakaistainen ääni, jonka äänitaso on 63 dB L_{Aeq} ja joka ei ole impulssimaista. Suurimmat sanktiot havaittiin suurilla R_{on} ja D_L arvoilla. Pienillä R_{on} -arvoilla sanktiota ei havaittu, vaikka D_L oli suuri. Nordtestin malli antoi havaintoja selvästi suurempia sanktioarvoja, kun $R_{on} \geq 200$ dB/s.

Johtopäätökset. Impulssimainen ääni voi lisätä äänen häiritsevyyttä mutta häiritsevyyttä kuvaava sanktio k [dB] riippuu R_{on} ja D_L arvoista. Suurilla nousunopeuksilla esiintyvä impulssimelun olisi suurempi häiritsevyyden riskitekijä kuin pienen nousunopeuden impulssimelun. Asuinympäristössä melun

häiritsevyyteen vaikuttavat kuitenkin myös muut tekijät kuin äänestä mitattavat ominaisuudet. Jos ääni on esimerkiksi vaihteleva, itselle tarpeettomasta lähteestä peräisin, muusta taustäänestä selvästi erottuva, tai kokonaan uusi ja ennen kokematon, se voidaan kokea eri tavoin häiritseväksi kuin tässä tutkimuksessa havaittiin.

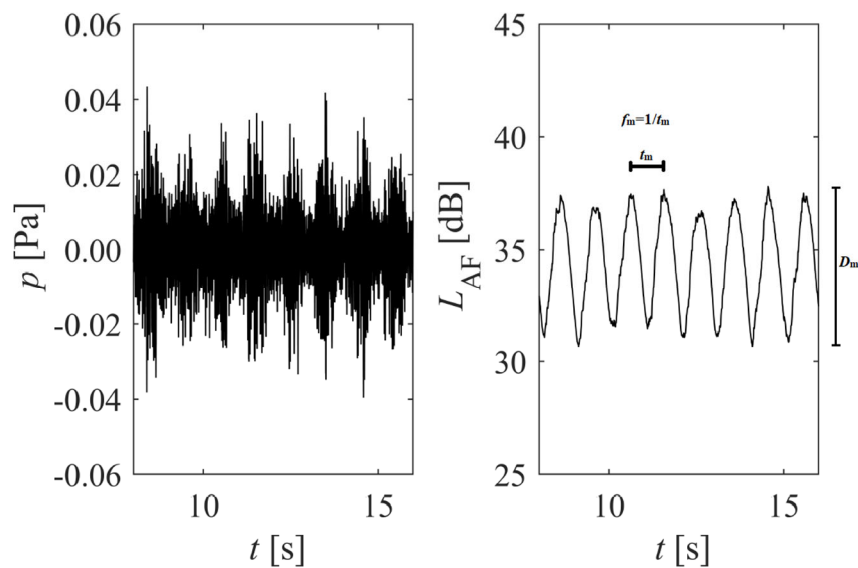


Kuva 13.4.3. Impulssimaisen melun häiritsevyyssanktio k Nordtestin (2002) mukaan määritettyjen impulssimaisuusparametrien R_{on} (nousunopeus) ja D_L (tasoero) funktiona. Käyrät on johdettu datasta (Rajala & Hongisto, 2019&2020).

13.5 Amplitudimoduloitu ääni

13.5.1 TODENTAMINEN

Amplitudimodulaatio eli jaksollinen sykintä on noussut erääksi ajankohtaiseksi erityispiirteeksi vasta 2010-luvulla, kun tuulivoimalat alkoivat yleistyä. Tuulivoimalat aiheuttavat jaksollista sykintää taajuudella, joka riippuu pyörimisnopeudesta ja siipien lukumäärästä. Amplitudimodulaatiota kuvaavat modulaatiotaajuus f_m [Hz] ja modulaatiosyvyys D_m [dB], jotka on määritelty kuvassa **13.5.1**. Modulaatio voi koskea äänen koko taajuuskaistaa tai tiettyä osaa siitä.



Kuva 13.5.1. Amplitudimoduloitu ääni tarkoittaa, että äänenvoimakkuutta vaihdellaan jaksollisesti. Kuvassa on sinimuotoinen amplitudimodulaatio ja sen kuvaajat f_m ja D_m (Virjonen et al., 2019).

Amplitudimoduloidulle tuulivoimalaäänelle on ehdotettu sanktiointia, koska useissa psykoakustisissa kokeissa on havaittu amplitudimoduloidun tuulivoimalaäänen olevan häiritsevämpää kuin tasaisen tuulivoimalaäänen, jolla on sama L_{Aeq} . Sanktiointi ei toistaiseksi ole vielä minkään maan lainsäädännössä, koska amplitudimodulaation mittaamiselle ei ole standardisoitua menetelmää. Häiritsevyyttä on huomioitu siten, että tuulivoimalamelua koskevat äänitason ohjearvot ovat muita melulajeja 5–10 dB tiukemmat. Ympäristöministeriön (2014) ohje tuulivoimalamelun mittaamisesta sisältää maininnan amplitudimodulaatiosta eli merkityksellisestä sykinnästä tehtävästä sanktiosta, joskaan asetus 1107/2017 ei sitä edellytä tehtävän. Ohje sanoo, että varovaisuusperiaate huomioiden voidaan arvioida, että tuulivoimalan tuottaman äänen modulaatiosyvyyden ollessa yli 3 dB ja modulaatiotaajuuden ollessa 0,5–30 Hz, melu on luonteeltaan merkityksellisesti sykkivää (amplitudimoduloitunutta) ja sanktio on tarkoituksenmukaista huomioida mittaustuloksessa. Säädökset eivät kuitenkaan sanktiota sisällä, joten sykinnästä ei toistaiseksi sanktiota anneta.

13.5.2 HÄIRITSEVYYS

Alla on esitetty tiivistelmä tähän asti laajimmasta psykoakustisesta laboratoriotutkimuksesta, joka käsitteli amplitudimoduloidun äänen häiritsevyyssanktiota (Virjonen et al., 2019). Sen mukaan sanktio riippuu voimakkaasti sekä f_m ja D_L arvoista vaihdellen 0–12 dB välillä. Kokeessa käytettiin lyhyitä ääniä, joten saadut sanktiot eivät välttämättä ole samoja, kuin elinympäristössä, jossa altistusta voi tapahtua jatkuvana, mutta tulokset kertovat hyvin siitä, mikä keskinäinen merkitys objektiivisilla muuttujilla f_m ja D_L on sanktioon.

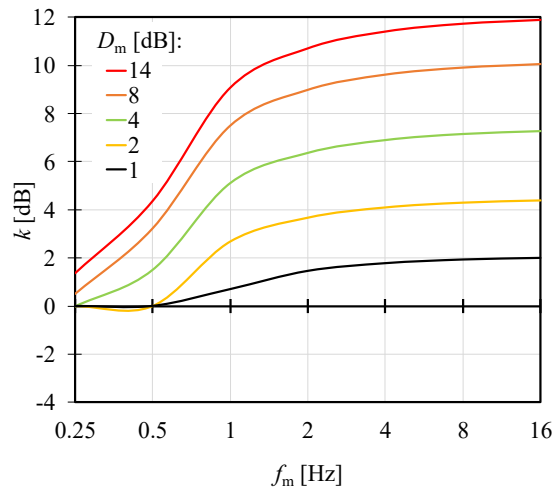
Tarve. Tuulivoimalamelu on usein amplitudimoduloitua (AM). AM tarkoittaa, että äänessä on jaksollista voimakkuuden vaihtelua, jolloin ääni erottuu helpommin taustasta ja tämä voi lisätä häiritsevyyttä. AM äänellä tärkeimmät ominaisuudet ovat modulaatiotaajuus f_m [dB] (vaihtelun nopeus) ja modulaatiosyvyys D_m [dB] (vaihtelun voimakkuus). Sanktiota on vaikea perustella, koska tieteellinen näyttö on vähäistä ja mittaamiselle ei ole standardisoitua menetelmää.

Tavoite. Tavoitteena oli määrittää, miten f_m ja D_m vaikuttavat AM:n äänen häiritsevyyssanktioon, kun äänitaso on alhainen vastaten asuinympäristöissä esiintyviä äänitasoja.

Menetelmät. Psykoakustiseen kokeeseen rekrytoitiin 40 tutkittavaa. Tutkittavia AM ääniä oli 35 kpl spektrillä S1 (tuulivoimalaääntä muistuttava spektri) ja 35 kpl spektrillä S2 (tieliikenneääntä muistuttava spektri). Tutkitut modulaatiotaajuudet olivat 0,25, 0,50, 1, 2, 4, 8 ja 16 Hz. Tutkitut modulaatiosyvyydet olivat 1, 2, 4, 8 ja 14 dB. Kaikkien AM äänen taso oli $L_{Aeq} = 35$ dB. Lisäksi kokeessa oli kumpaakin spektriä kohden 11 laajakaistaista referenssiääntä tasoilla 19–49 dB L_{Aeq} , joiden avulla voitiin määrittää sanktio samoin kuin kuvassa 13.3.3. Tutkittavat arvioivat kunkin äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10.

Tulokset. Sanktion riippuvuus eri f_m ja D_m arvoista on esitetty kuvassa 13.5.2. Sanktio oli korkeimmillaan 12 dB. Tämä tarkoittaa sitä, että tietynlainen amplitudimoduloitu ääni, jonka äänitaso on 35 dB L_{Aeq} , koettiin yhtä häiritsevänä kuin laajakaistainen ääni, jonka äänitaso on 47 dB L_{Aeq} ja joka ei ole amplitudimoduloitu. Vakiosanktiointia on vaikea perustella, koska alhaisilla f_m arvoilla sanktiota ei havaittu, vaikka D_m oli suuri. Spektrillä S1 ja S2 saatiin samankaltaisia sanktioarvoja.

Johtopäätökset. Amplitudimoduloitu ääni voi lisätä äänen häiritsevyyttä mutta häiritsevyyttä kuvaava sanktio k [dB] riippuu f_m :n ja D_m :n arvoista. Tuloksista voidaan myös arvioida tuulivoimalamelun sanktio, kun f_m ja D_m tunnetaan. Tulokset näyttävät siltä, että suuritaajuinen AM olisi suurempi häiritsevyyden riskitekijä kuin pienitaajuinen AM. Asuinympäristössä melun häiritsevyyteen vaikuttavat kuitenkin myös muut tekijät kuin äänestä mitattavat ominaisuudet. Jos ääni on esimerkiksi vaihteleva, itselle tarpeettomasta lähteestä peräisin, muusta taustaaänestä selvästi erottuva, tai kokonaan uusi ja ennen kokematon, se voidaan kokea eri tavoin häiritseväksi kuin tässä tutkimuksessa on havaittu.

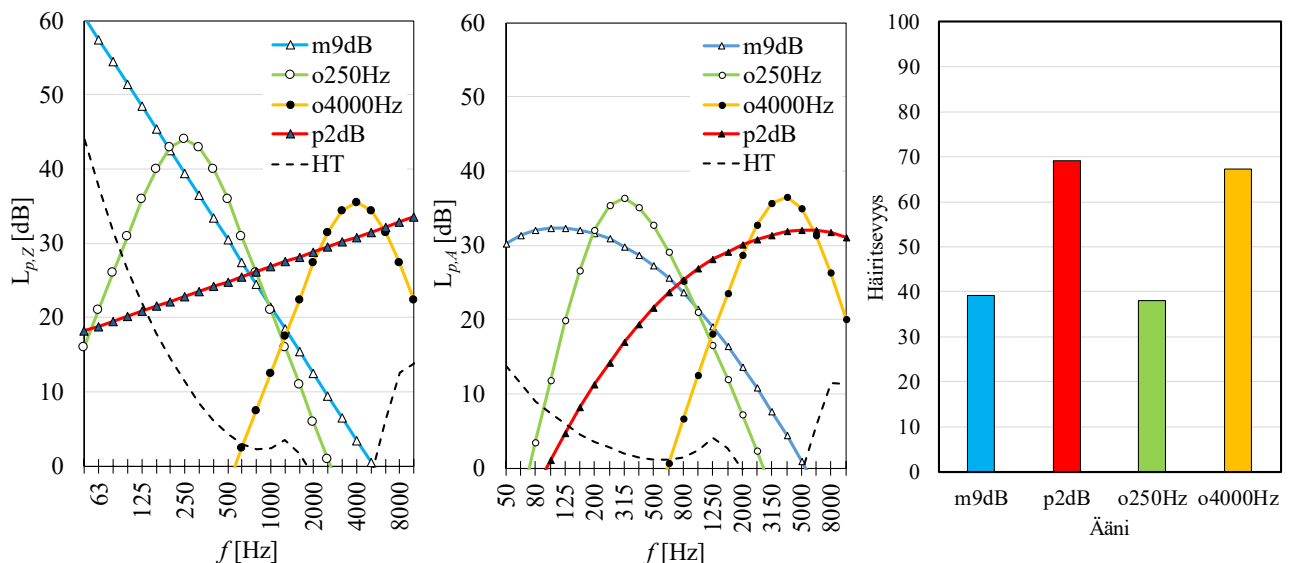


Kuva 13.5.2. Amplitudimoduloidun äänen häiritsevyyssanktio k parametrien f_m ja D_m funktiona (Virjonen et al., 2019).

13.6 Äänen taajuusjakauma

Äänen taajuusjakaumat vaihtelevat erittäin paljon vaikka äänet eivät olisi kapeakaistaisia. Äänen taajuusjakaumalle ei voida luoda yksikäsitteisiä mittalukuja tai muutaman mittaluvun yhdistelmiä, koska samoja arvoja voidaan saada hyvin erilaisilla spektreillä. Tunnetuimmat mittaluvut ovat A-painotettu äänenpainetaso L_{pA} ja äänekkyyys L_N (loudness). Sama mittaluvun arvo voidaan kuitenkin saavuttaa spektriltään (ja häiritsevyydeltäänkin) hyvin erilaisilla äänillä. Tästä johtuen spektristä aiheutuvaa häiritsevyydestä on tehty yllättävän vähän geneerisellä tasolla vaikka spektri on keskiäänitason jälkeen yleisin äänenlaadun mittausta.

Hongisto ym. (2015) tutkivat laboratoriossa 11 spektriltään erilaisen, mutta A-äänitasoltaan samanlaisen (42 dB L_{Aeq}) tasaisen laajakaistaäänien häiritsevyyttä käyttäen 90 sekunnin altistusajaa. He havaitsivat, että äänet, jotka olivat pääosin suurtaajuisia, olivat merkittävästi häiritsevempiä kuin äänet, jotka olivat pääosin pientaajuisia (Kuva 13.6.1). Pientaajuisia ääniä kuvattiin mieluiten adjektiivilla ”jyrisevä” ja suurtaajuisia mieluiten adjektiivilla ”sihisevä”. Sihisevyyden on havaittu olevan häiritsevyyttä lisäävä tekijä myös muissa tutkimuksissa. Kun kokonaistaso poikkeaa merkittävästi tutkimuksessa käytetystä (42 dB L_{Aeq}), voidaan saada erilainen tulos äänen välillä johtuen osittain siitä, että vakioäännekkyysskäyrien muoto riippuu äänekkyydestä.



Kuva 13.6.1. Tutkimuksen mukaan suurtaajuisiin painottuva laajakaistaääni (p2dB) oli häiritsevempi kuin pientaajuisiin painottuva laajakaistaääni (m9dB). Samoin suurtaajuinen oktaavikohina (o4000Hz) oli häiritsevempi kuin pientaajuinen oktaavikohina (o250Hz). HT on ISO 226 mukainen kuulokynnys.

KIRJALLISUUS

- Hongisto V, Oliva D, Keränen J, Tuulivoimamelun häiritsevyyden riippuvuus äänitasosta, Akustiikkapäivät 2017, s. 164-169, 24-25.8.2017 Espoo, Akustinen Seura ry., Espoo, 2017 (ISBN 978-952-60-3734-9). Open access at: http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2017/08/akustiikkapaivat_2017_s164.pdf.
- Hongisto, V., Keränen, J., Oliva, D. (2017). Indoor noise annoyance due to 3–5 MW wind turbines - an exposure-response relationship, *The Journal of the Acoustical Society of America* 142(4) 2185–2196. Open access at: <http://dx.doi.org/10.1121/1.5006903>.
- Hongisto, V., Oliva, D. (2015). Millä mittaluvulla asuinhuoneistojen välinen ilmasteneristys pitäisi ilmoittaa? Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 166-169, Akustinen Seura ry. Espoo. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2015/09/AP2015_Paperin_palautus_20.pdf.
- Hongisto, V., Oliva, D., Keränen, J. (2014). Subjective and objective rating of airborne sound insulation – living sounds, *Acta Acustica united with Acustica* 100 848–863.
- Hongisto, V., Oliva, D., Rekola, L. (2015). Julkisivun koettu ääneneristys tiemelua vastaan – Mitä mittalukua tulisi käyttää? Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 162-165, Akustinen Seura ry. Espoo. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2015/09/AP2015_Paperin_palautus_23.pdf.
- Hongisto, V., Oliva, D., Rekola, L. (2015). Subjective and Objective Rating of Spectrally Different Pseudorandom Noises – Implications for Speech Masking Design, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3) 1344–1355.
- Hongisto, V., Oliva, D., Rekola, L. (2018). Subjective and objective rating of the sound insulation of residential building façades against road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2) 1100–1112.
- Hongisto, V., Saarinen, P., Oliva, D. (2019). Annoyance of low-level tonal sounds – A penalty model. *Applied Acoustics* 145 358–361.
- Hongisto, V., Virjonen, P. (2019). Amplitudimoduloidun äänen häiritsevyys ja sanktiointi. Akustiikkapäivät 2019, Oulu, 28-29.10.2019, 284-287, Akustinen Seura ry., Espoo. ISBN 978-952-60-3784-4. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2019/10/akustiikkapaivat_2019_s284.pdf.
- IEC 61400-11:2012 Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
- ISO 1996-1:2016. Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures. International Organization for Standardization, 2016, Geneva, Switzerland.
- ISO 1996-2:2007 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels. Replaced by ISO 1996-2:2017.
- ISO 226 (2003) Acoustics — Normal equal-loudness-level contours.
- ISO/PAS 20065:2016 Acoustics — Objective method for assessing the audibility of tones in noise — Engineering method.
- ISO/TS 15666:2003 Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys.
- Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D., Rekola, L. (2017). Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings - a laboratory listening experiment, *Acta Acustica united with Acustica*, 103 236–251.
- Kylliäinen, M., Oliva, D., Rekola, L., Hongisto, V. (2015). Asuinhuoneistojen betonivälipohjien askelääneneristuksen subjektiivinen ja objektiivinen arviointi. Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 204-207, Akustinen Seura ry. Espoo. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2015/09/AP2015_Paperin_palautus_11.pdf.
- Maula, H., Hongisto, V., Keränen, J., Saarinen, P. (2019b). Murskaamomelun häiritsevyys elinympäristöissä. Akustiikkapäivät 2019, Oulu, 28-29.10.2019, 293-296, Akustinen Seura ry., Espoo. ISBN 978-952-60-3784-4. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2019/10/akustiikkapaivat_2019_s293.pdf.
- Maula, H., Hongisto, V., Saarinen, P. (2019a). Tieliikennemelun häiritsevyys elinympäristöissä eri äänitasoilla. Akustiikkapäivät 2019, Oulu, 28-29.10.2019, 288-292, Akustinen Seura ry., Espoo. ISBN 978-952-60-3784-4. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2019/10/akustiikkapaivat_2019_s288.pdf.

- Nordtest (2002). NT ACOU 112:2002 – Acoustics – Prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq. Approved 2002-05, Taastrup, Denmark.
- Oliva, D., Hongisto, V., Haapakangas, A. (2017). Annoyance of low-level tonal sounds - factors affecting the penalty, *Building and Environment*, 123 404–414.
- Pedersen, T. H. (2000). Audibility of impulsive sounds in environmental noise. *Proc. Internoise 2000*, 27-30 August, 2000, Nice, France. Amendment: Pedersen, T. H. (2000). Delta report AV 1533/00. Prominence of Impulsive Sounds – Latest Results and a Measuring Method, 2000-08-15. 4 pp., Delta, Denmark.
- Rajala, V., Hongisto, V. (2019). Impulssimaisen melun sanktiointi. *Akustiikkapäivät 2019*, Oulu, 28-29.10.2019, 307-312, Akustinen Seura ry., Espoo. ISBN 978-952-60-3784-4. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2019/10/akustiikkapaivat_2019_s307.pdf.
- Rajala, V., Hongisto, V. (2020). Annoyance penalty of impulsive noise – the effect of impulse onset. *Building and Environment* 168, 106539.
- Rice, C. G. (1996). Human response effects of impulse noise. *J. Sound Vib.* 190(3) 525-543.
- STM (2015). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 1545-2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 23.4.2015. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>.
- VN (1992). Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista. 29.10.1992. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993>.
- VN (2015). Valtioneuvoston asetus 1107-2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. 27.8.2015. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151107>.
- VN (2017). Valtioneuvoston asetus 903/2017 raskaiden aseiden ja räjäytysten melutasoista. 14.12.2017. Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170903>.
- Virjonen, P., Hongisto, V., Radun, J. (2019). Annoyance penalty of periodically amplitude-modulated wide-band sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(6) 4159–4170.
- YM (2014c). Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. *Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014*, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/42939>.
- Ympäristöministeriö (2017). Ympäristöministeriön asetus 796-2017 rakennuksen ääniympäristöstä, 24.11.2017, Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>.
- YM (2018). Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 28.6.2018, Helsinki. <https://www.ym.fi/download/noname/%7B2852D34E-DA43-4DCA-9CEE-47DBB9EFCB08%7D/138568>.

Liite 1. Määräykset ja ohjeet

Tämä luku sisältää lainsäädäntöön viittaavan kirjallisuusluettelon sekä kirjallisuusluettelon julkisten yhdistysten julkaisemista suositusarvoista ja suunnitteluohjeista. Useimpiin liittyy vielä perustelumuistio, joka voi löytyä verkosta sopivalla haulla.

Lainsäädäntö

Valtioneuvosto (2018). Valtioneuvoston asetus 823-2018 meluselvityksistä ja meluntorjunnan toimintasuunnitelmista. 11.10.2018, Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180823>.

Ympäristöministeriö (2017). Ympäristöministeriön asetus 796-2017 rakennuksen ääniympäristöstä, 24.11.2017, Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>.

Valtioneuvosto (2017). Valtioneuvoston asetus 903/2017 raskaiden aseiden ja räjäytysten melutasoista. 14.12.2017. Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170903>.

Sosiaali- ja terveysministeriö (2015). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 1545-2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 23.4.2015. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>.

Valtioneuvosto (2015). Valtioneuvoston asetus 1107-2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. 27.8.2015. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151107>.

Valtioneuvosto (2010). Valtioneuvoston asetus 800/2010 kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta. 9.9.2010. Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100800>.

Valtioneuvosto (2008). Valtioneuvoston asetus 400/2008 koneiden turvallisuudesta. 12.6.2008. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2008/20080400>.

Valtioneuvosto (2006). Valtioneuvoston asetus 85/2006 työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuvilta vaaroilta. 26.1.2006. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060085>.

Valtioneuvosto (2005). Valtioneuvoston asetus 48/2005 työntekijöiden suojelemisesta tärinästä aiheutuvilta vaaroilta. 27.1.2005. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2005/20050048>

Valtioneuvosto (2001). Valtioneuvoston asetus 621/2001 ulkona käytettävien laitteiden melupäästöistä. 5.2.2001. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2001/20010621>.

Valtioneuvosto (1997). Valtioneuvoston päätös 53/1997 ampumaratojen aiheuttaman melutason ohjearvoista. 16.1.1997. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1997/19970053>.

Valtioneuvosto (1992). Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista. 29.10.1992. Helsinki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993>.

Muut ohjeet

Valvira (2016). Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Osa II: Asumisterveysasetus § 11–13. Ohje 8/2016. 31.8.2016. Helsinki. <https://www.valvira.fi/-/asumisterveysasetuksen-soveltamisoh-1>.

Ympäristöministeriö (2018). Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 28.6.2018, Helsinki. <https://www.ymp.fi/download/noname/%7B2852D34E-DA43-4DCA-9CEE-47DBB9EFCB08%7D/138568>.

Ympäristöministeriö (2019). Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:28, 50 pp., Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161953>.

Ympäristöministeriö (1999). Ampumamelun mittaaminen. Ympäristöopas 61-1999, Helsinki. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42692/Ymp%C3%A4rist%C3%B6melun%20mittaaminen.pdf?sequence=1>.

Ympäristöministeriö (2016). Lasitettujen parvekkeiden ääneneristävyys liikennemelualueilla. Ympäristöhallinnon ohjeita 6/2016, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79082>.

Ympäristöministeriö (2014). Tuulivoimaloiden melun mallintaminen. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2014, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/42937>.

Ympäristöministeriö (2014). Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla. Ympäristöhallinnon ohjeita 3/2014, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/42938>

Ympäristöministeriö (2014). Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/42939>.

Ympäristöministeriö (1995). Ympäristömelun mittaaminen. Ohje 1/1995. Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/42692>.

Suosituksien ja suunnittelun

Nämä ovat maksullisia ja lainattavissa kirjastoista.

RIL (2003). RIL 129:2003 Ääneneristyksen toteuttaminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL (2007a). RIL 243-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu. Akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 224 s, Helsinki, 2007.

RIL (2007b). RIL 243-2-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu. Oppilaitokset, auditoriot, liikuntatilat ja kirjastot. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 78 s, Helsinki, 2007.

RIL (2008). RIL 243-3-2008 Rakennusten akustinen suunnittelu. Toimistot. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 96 s, Helsinki, 2008.

RIL (2011). RIL 243-4-2011 Rakennusten akustinen suunnittelu. Teollisuustilat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry., 96 s, Helsinki, 2011.

SFS (2004) SFS 5907:2004. Rakennusten akustinen luokitus. 2004. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Rakennustieto (2018). RT 07-11299, Sisäilmaluokitus 2018, Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset, Rakennustieto ry., Helsinki. (Saatavana myös kortistoissa LVI 05-10627, KH 27-00659, SIT 05-610148 ja Ratu 443-T).

Rakennustieto (2014a). RT 95-11151 Toimistotilat. Yleiset suunnitteluperusteet. Rakennustietosäätiö RTS ry., Helsinki.

Rakennustieto (2014b). RT 95-11152 Toimistotilat. Tilasuunnittelu. Rakennustietosäätiö RTS ry., Helsinki.

Rakennustieto (2014c). RT 95-11152 Toimistotilat. Työpistesuunnittelu. Rakennustietosäätiö RTS ry., Helsinki.