



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 137
Institute of Structural Engineering. Research Report 137

Mikko Kylliäinen

Talonrakentamisen akustiikka



Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos.
Tutkimusraportti 137
Tampere University of Technology. Institute of Structural Engineering.
Research Report 137

Mikko Kylliäinen

Talonrakentamisen akustiikka

Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos
Tampere 2006

ISBN 952-15-1650-X (nid.)
ISBN 978-952-15-2712-8 (PDF)
ISSN 1796-3206

Lukijalle

Suomenkielistä kirjallisuutta akustiikasta on julkaistu varsin vähän. Etenkään rakennustekniikan opiskelijoille sopivia ajan tasalla olevia oppikirjoja ei ole käytettävissä. Siksi olen koonnut oheisen tekstin käytettäväksi apuvälineenä Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan osaston akustiikan opetuksessa.

Tarkoitukseni on ollut esittää asioita, jotka auttavat ymmärtämään sitä, miksi erilaiset ääntä eristävät tai absorboivat rakenteet ovat sellaisia kuin ne ovat ja mitä niitä suunniteltaessa ja toteutettaessa on otettava huomioon. Esimerkiksi rakennuslevyjen tai ikkunalasien paksuudet eivät ole sattumaa, vaan ne perustuvat – monen muun asian ohella – akustisiin ilmiöihin. Suunnittelutyötä varten teksti tarjoilee joukon akustiikan kaavoja. Niiden sisältämien muuttujien vaikutusta havainnollistavat kuvat, jotka vastaavat myös suunnittelu- ja työmaakokouksissa usein esille tuleviin kysymyksiin.

Käytännön rakenneratkaisuja olen esittänyt lähinnä yksittäisinä esimerkkeinä, sillä suunnittelutyössä käytetään paljon vakioratkaisuja, joista on olemassa rakennusalan järjestöjen julkaisemia ohjeita. Vakioiduista ratkaisuista kuitenkin joudutaan poikkeamaan varsin usein, jolloin rakenteiden akustisen toiminnan ymmärtäminen on tarpeellista suunnittelu- ja rakennusvirheiden välttämiseksi. Kirjassa esitettävä kokonaisuus katkaakin akustiikan alueet, jotka esimerkiksi rakennusliikkeiden suunnittelunohjauksen tulee ottaa huomioon.

Lähteinä olen pyrkinyt käyttämään kirjallisuutta, joka on asiasta enemmän kiinnostuneen lukijan helposti hankittavissa, kuten suomenkielisiä tutkimusraportteja, viranomaismääräyksiä ja –ohjeita sekä standardeja. Suomenkielisen kirjallisuuden puuttuessa tämä ei kuitenkaan ole ollut mahdollista kaikkien lukujen osalta. Kuvissa esitettävät mittaustulokset ovat peräisin Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n tekemistä kenttämittauksista ja kokoamista tietokannoista.

Kirjoitustyötäni on tukenut Rakennustietosäätiö myöntämällä stipendillä. Esitän siitä säätiölle parhaat kiitokseni. Kiitän myös Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitosta, joka on ottanut tekstini julkaistavakseen tutkimusraporttisarjassaan.

Tampereella 26.7.2006

Mikko Kylliäinen

”Huoneen hyvällä akustiikalla tarkoitetaan sellaisia äänisuhteitten ominaisuuksia, että huoneessa esitetty puhe ja musiikki kuuluu korvaan kauniina, luonnollisena ja selvänä huoneen jokaisessa kohdassa.”

Diplomi-insinööri U. Varjo 1938

Sisällys

Lukijalle.....	3
Sisällys.....	5
1 Johdanto.....	9
1.1 Talonrakentamisen akustiikka	11
1.1.1 Akustiikka tieteen ja tekniikan alana	11
1.1.2 Akustisen suunnittelun tavoitteet	13
1.1.3 Akustiikka osana rakennushanketta	15
1.2 Määräykset ja ohjeet	19
1.2.1 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C1	19
1.2.2 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2.....	20
1.2.3 Asumisterveysohje	20
1.2.4 Rakennusten akustinen luokitus SFS 5907	22
1.2.5 Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista.....	23
2 Äänen eteneminen ja vaimeneminen	25
2.1 Äänen ominaisuuksia	27
2.1.1 Taajuus	27
2.1.2 Äänenpainetaso	28
2.1.3 A-painotus ja äänitaso	31
2.1.4 Äänitehotaso	33
2.1.5 Etäisyysvaimennus	34
2.2 Äänenpainetaso huoneessa.....	37
2.2.1 Absorptio.....	37
2.2.2 Jälkikaiunta-aika	39
2.2.3 Huoneen äänikentän muodostuminen	41
3 Ilmaääneneristys.....	45
3.1 Yksinkertaiset rakenteet	47
3.1.1 Ilmaääneneristävyys	47
3.1.2 Rajataajuudet.....	48
3.1.3 Rakennuslevyt	53
3.1.4 Kevyet kivrakenteet	54
3.1.5 Raskaat kivrakenteet	55
3.2 Kaksinkertaiset rakenteet	57
3.2.1 Rajataajuudet.....	57
3.2.2 Rankojen vaikutus.....	62
3.2.3 Ilmavälin kaiunta	63
3.3 Ilmaääneneristävyden mittaaminen.....	65

3.3.1 Ilmaääneneristysluku	65
3.3.2 Spektripainotusermit	70
3.4 Rakenteellinen sivutiesiirtymä	72
3.4.1 Sivutiesiirtymien laskenta	72
3.4.2 Kivirakenteiden liitoseristävytydet	75
3.4.3 Kivirakenteiden ja levyrakenteiden liitosten liitoseristävytydet	77
3.4.4 Sivutiesiirtymä levyrakenteissa	80
3.5 Rakennusosien yhdistelmät	81
3.5.1 Useasta rakennusosasta koostuva rakenne	81
3.5.2 Rakojen vaikutus ilmaääneneristävytyteen	82
3.6 Ilmaääneneristystyksen suunnittelu	84
3.6.1 Äänitasoihin perustuva suunnittelu	84
3.6.2 Rakennetyypin valinta ilmaääneneristysluvun perusteella	85
4 Askelääneneristys	89
4.1 Askelääneneristystyksen arviointi	91
4.1.1 Askeläänitasoluku	91
4.1.2 Spektripainotusermit	95
4.1.3 Askelääneneristävytyden parannusluku	97
4.2 Välipohjien askelääneneristys	99
4.2.1 Joustavat lattianpäällysteet	99
4.2.2 Kelluvat lattiat	100
4.2.3 Asennuslattiat	103
4.2.4 Alakatot	103
4.2.5 Askelääneneristys vaakasuunnassa	105
4.2.6 Kevyet välipohjat	105
4.3 Askelääneneristystyksen suunnittelu	108
4.3.1 Askeläänitasolukujen laskenta	108
4.3.2 Askelääneneristystä koskevat määräykset ja ohjeet	109
4.3.3 Lattianpäällysteen liitokset muihin rakenteisiin	112
5 Huoneakustiikka	113
5.1 Huoneakustiikan merkitys	115
5.1.1 Suunnittelun tavoitteet	115
5.1.2 Huoneakustiset suunnittelukriteerit	117
5.2 Äänen heijastuminen	120
5.2.1 Heijastusten merkitys	120
5.2.2 Tilan muoto	123
5.2.3 Pinnan muoto ja rakenne	124
5.3 Absorptiomateriaalit	126
5.3.1 Huokoiset materiaalit	126
5.3.2 Reikälevyt	129
5.3.3 Levyresonaattorit	130
5.3.4 Kovat pinnat	131
5.3.5 Kalusteet ja yleisö	132
5.3.6 Ilma	132
5.4 Huoneakustinen suunnittelu	134

5.4.1 Jälkikaiunta-ajan valinta	134
5.4.2 Auditorio.....	136
5.4.3 Opetustila	139
6 LVIS-järjestelmien meluntorjunta	141
6.1 LVIS-tekniikan vaikutus äänilosuhteisiin	143
6.1.1 Äänilähteet.....	143
6.1.2 LVIS-tekniikan äänitasoja koskevat määräykset	144
6.2 Ilmanvaihdon meluntorjunta.....	147
6.2.1 Ilmanvaihdon äänilähteet.....	147
6.2.2 Puhallinäänen siirtyminen kanavistossa	149
6.2.3 Ilmavirtauksen synnyttämä ääni	152
6.2.4 Huonetilan äänitason muodostuminen	155
6.2.5 Ilmanvaihtolaitteiden äänenkehitys ympäristöön.....	156
6.2.6 Ilmanvaihtolaitteiden äänenkehitys ulos	159
6.2.7 Ilmanvaihtokanavien vaikutus ääneneristykseen	163
6.3 Tärinäneristys.....	167
6.3.1 Tärinäneristyksen tavoitteet	167
6.3.2 Tärinäneristyksen suunnittelu	168
6.4 Muut LVIS-järjestelmät	172
6.4.1 Lämmitysjärjestelmä.....	172
6.4.2 Käyttövesijärjestelmä	172
6.4.3 Viemärijärjestelmä	172
7 Liikennemelun torjunta.....	175
7.1 Liikennemelun merkitys.....	177
7.1.1 Liikennemelun torjunta osana rakennushanketta	177
7.1.2 Liikennemelua koskevat määräykset.....	179
7.2 Äänilähteet	181
7.2.1 Tieliikennemelu	181
7.2.2 Raideliikennemelu	183
7.2.3 Lentomelu	184
7.2.4 Melun mallintaminen.....	184
7.3 Meluntorjuntakeinot.....	186
7.3.1 Ennaltaehkäisy.....	186
7.3.2 Rakennussuunnittelu.....	187
7.3.3 Meluesteet.....	188
7.3.4 Parvekelasit	190
7.3.5 Ulkokuoren ääneneristys	190
7.4 Ulkokuoren ääneneristyksen suunnittelu	195
7.4.1 Laskentamenetelmät	195
7.4.2 Ympäristöopas 108	195
7.4.3 Äänitasoeromenetelmä.....	197
8 Lähdekirjallisuus	199

1



Johdanto

”Ääneneristys ja meluntorjunta ovat vain osittain teknillisiä kysymyksiä. Melun aiheuttaman häiriön määrittäminen on vaikeaa, koska se on riippuvainen henkilöiden häiriintymisherkyydestä ja ympäristötekijöistä.”

Ääneneristysnormit 1967

1.1 Talonrakentamisen akustiikka

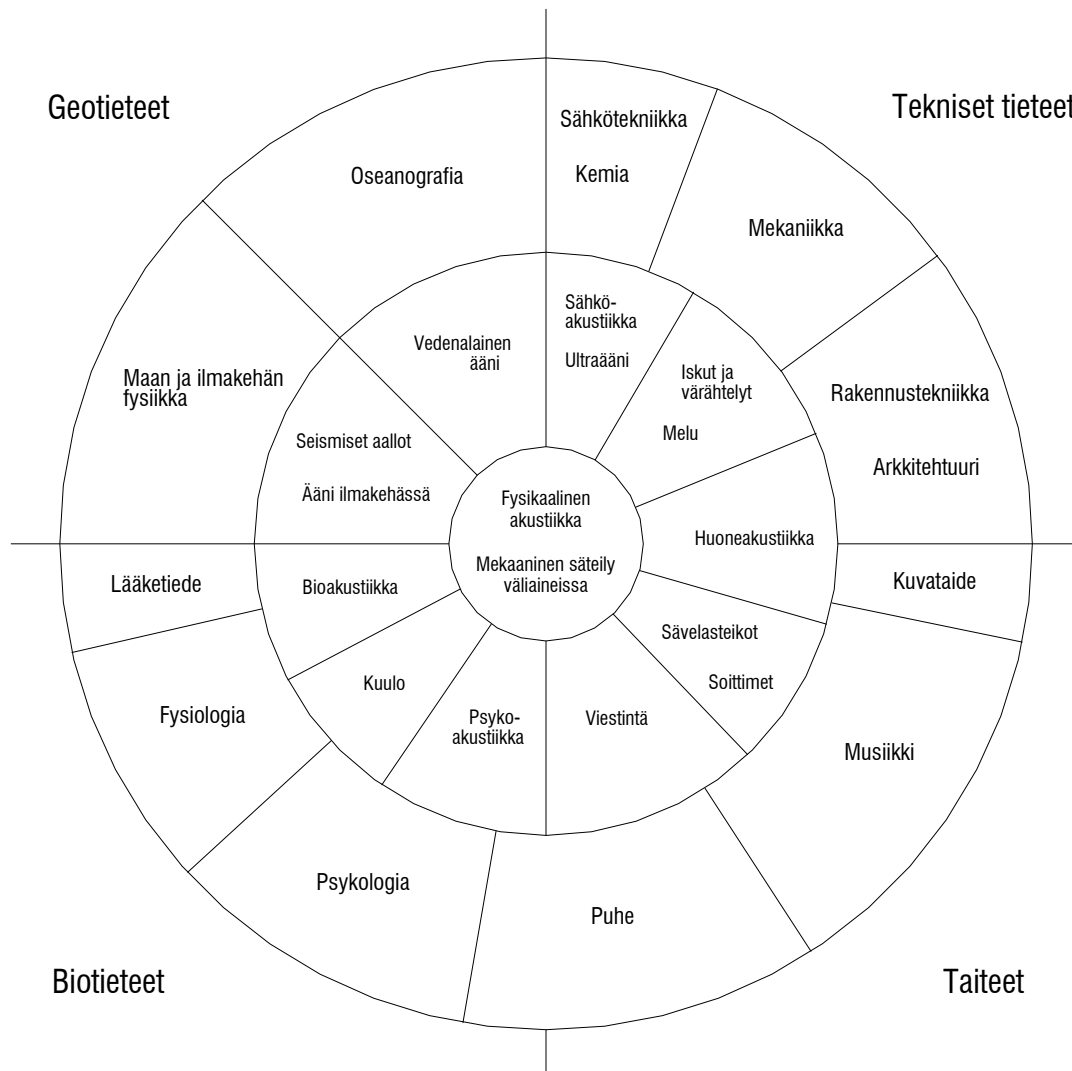
1.1.1 Akustiikka tieteen ja tekniikan alana

Ääni on tärkeä osa inhimillistä kokemusmaailmaa. Kuuloaisti on kehittynyt aluksi ilmeisesti varoituskeinoksi, mutta se mahdollistaa ihmisten kommunikaation puheen välityksellä. Ihminen on kautta aikain myös tuottanut ääniä esimerkiksi pilleillä, torvilla ja rummuilla erilaisiin viestintätarkoituksiin, mutta myös musiikkia miellyttääkseen toisia ihmisiä. Siksi ei ole yllättävää, että ääni on ollut tutkimuksen kohteena ainakin antiikin ajasta saakka. Ääni-ilmiöitä tutkivasta tieteenalasta alettiin 1700-luvulla käyttää nimitystä akustiikka. Termin alkuperä on kreikan kielen kuulemista tarkoittavassa sanassa. Akustiikka on säilynyt alan nimityksenä, vaikka kuultavissa oleva ääni muodostaa vain osan akustiikan alueesta. [20, 40]

Tieteen tehtävä on auttaa ihmisiä ymmärtämään kokemusmaailmaansa. Akustiikka on laaja tieteenala, joka etsii säännönmukaisuuksia ja järjestystä äänimaailmasta ja pyrkii esittämään ne luonnonlakeina. Akustiikka paljastaa kokeellisesti aiemmin tuntemattomia ääni-ilmiöitä ja luo teorioita selittämään niitä. Erityisesti akustiikka on yrittänyt selittää, mitä ääni on, kuinka se leviää ja miten kuuloaistimus tapahtuu. Akustiikalle on ominaista se, että se yhdistelee muiden tieteenalojen tutkimustuloksia. Esimerkiksi kuuloaistimus edellyttää värähtelevää kappaletta ja väliainetta, jonka välityksellä äänilähteen synnyttämä ääni etenee korvaan. Värähtelevän kappaleen liikkeiden ymmärtäminen edellyttää tietämystä mekaniikasta, äänen eteneminen ilmassa liittyy hydrodynamikkaan ja termodynamiikkaan, kuuloaistin toiminta puolestaan fysiologiaan ja psykologiaan. Tarkasteltaessa äänen vaikutuksia laajemmin akustiikka voidaan liittää myös esimerkiksi filosofiaan, sosiaalitieteisiin ja ympäristötieteisiin. Akustiikka liittyy myös taiteisiin: akustiikan varhaisvaiheissa tarve ymmärtää soitinten toimintaa johti yrityksiin soveltaa mekaniikan perusperiaatteita niiden selittämiseen. Nykyisinkin akustiikka tuottaa tieteellistä tietoa, jota voidaan soveltaa paitsi soitinrakennuksessa, myös konserttisalien tai muiden esiintymistilojen suunnittelussa. [20, 40]

Ennen 1900-lukua akustiikka oli vielä jokseenkin merkityksetön ihmisten elinympäristön ja -olosuhteiden kannalta. Akustiikan edistyminen edellytti matemaattisten analyyssimenetelmien kehittymistä riittävän pitkälle. Akustiikan kehittymistä hidasti myös mittalaitteiden puute: 1800-luvulla ei ollut vakioäänilähteitä eikä keinoja äänen voimakkuuden mittaamiseksi. Sähköakustiikan edistyminen 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alkuvuosikymmeninä johti nopeaan muutokseen: sähköiset äänilähteet ja mittalaitteet mahdollistivat objektiivisen tieteellisen tutkimuksen, mutta niiden myötä mah-

dolliseksi tuli kokonaan uudentyylinen tekniikka, kuten puhelin, radio, äänielokuva sekä äänentallennus ja -toisto. Nämä asettivat vaatimuksia tiloille, joissa äänentallennus tai -toisto tapahtui: 1900-luvun alussa akustiikka synnytti myös materiaaliteollisuuden, testauksen ja mittaustoiminnan sekä akustiseen suunnitteluun erikoistuneen insinöörin kunnan. 1930-luvulla eri maissa laadittiin ehdotuksia rakennusten ääneneristysmääräyk- siksi ja suurkaupungeissa mitattiin liikenteen aiheuttamaa melua ja pohdittiin keinoja sen vähentämiseksi. Tekniikan alana akustiikka auttaa ihmistä muokkaamaan ympäris- töään ja saamaan aikaan paremmat elin- tai työskentelyolosuhteet, kuten viihtyisän ym- päristön tai tarkoituksenmukaisen esiintymistilan. Nykyisin tuskin on elämäntilaa, jota akustiikka ei jollain tavalla koskettaisi (kuva 1.1): esimerkiksi lääketieteessä ultraääni on mahdollistanut monia tärkeitä tutkimusmenetelmiä. [40, 61]



Kuva 1.1. Akustiikka on viimeisen sadan vuoden aikana jakautunut moniin osa-alueisiin, jotka puolestaan liittyvät läheisesti muihin tieteenaloihin, tekniikkaan ja taiteisiin. Akustiikan osa-alueet eivät ole toisistaan erillisiä, vaan ne ovat yhteydessä toisiinsa [40].

Suomessa tieteellisiin teorioihin perustuvaa akustiikan suunnittelua on harjoitettu 1920-luvulta saakka. Ensimmäisenä rakennuksena, jonka akustiikkaa on tutkittu ja suunniteltu, pidetään vuonna 1931 valmistunutta Eduskuntataloa, joka suunniteltiin 1920-luvun lopulla. Eduskuntatalon istuntosalin kupoli on verhoiltu Yhdysvalloista tuodulla sokeriruo'osta valmistetulla absorptiomateriaalilla. Akustiikan suunnittelijakunta kehittyi Suomessa aluksi Yleisradion ympärille. Vuonna 1926 lähetyksensä aloittanut Yleisradio tarvitsi erilaisia lähetystiloja ja studioita, joita sen insinöörit ryhtyivät suunnittelemaan. Näistä töistä syntynyt kokemus johti 1940-luvun lopulla ensimmäisen suomenkielisen akustiikan oppikirjan julkaisemiseen; lisäksi Yleisradion insinöörien akustiikan tunte-
musta hyödynnettiin konserttisalien rakentamisessa sodan jälkeen. [11, 21, 43]

Ääneneristyksen arvioiminen objektiivisesti mittaamalla tuli mahdolliseksi 1930-luvulla. Suomessa ei vielä tuolloin ollut teknisinä lukuarvoina annettuja määräyksiä rakennusten akustisista olosuhteista, mutta eduskunnan vuonna 1920 säätämä laki eräistä naapurussuhteista vaati [37]: ”Älköön kukaan, mikäli ei jäljempänä toisin sanota, pitäkö varastoa tai käyttäkö kiinteistöä niin, että naapuri taikka muu, joka lähistössä omistaa maan tai huoneuston tahi sellaista nautintaoikeudella hallitsee taikka jonka etuihin se muuten saattaa koskea, kärsii siitä pysyväistä kohtuutonta rasitusta, kuten kipinöiden, tuhkan, noen, savun, lämmön, löyhkän, kaasujen, höyryn, tärinän, jyskeen taikka muun sellaisen kautta.” Lain nojalla nostettiin äänen aiheuttamaa häiriötä koskevia oikeusjuttuja, joita käsiteltiin korkeimmassa oikeudessa saakka.

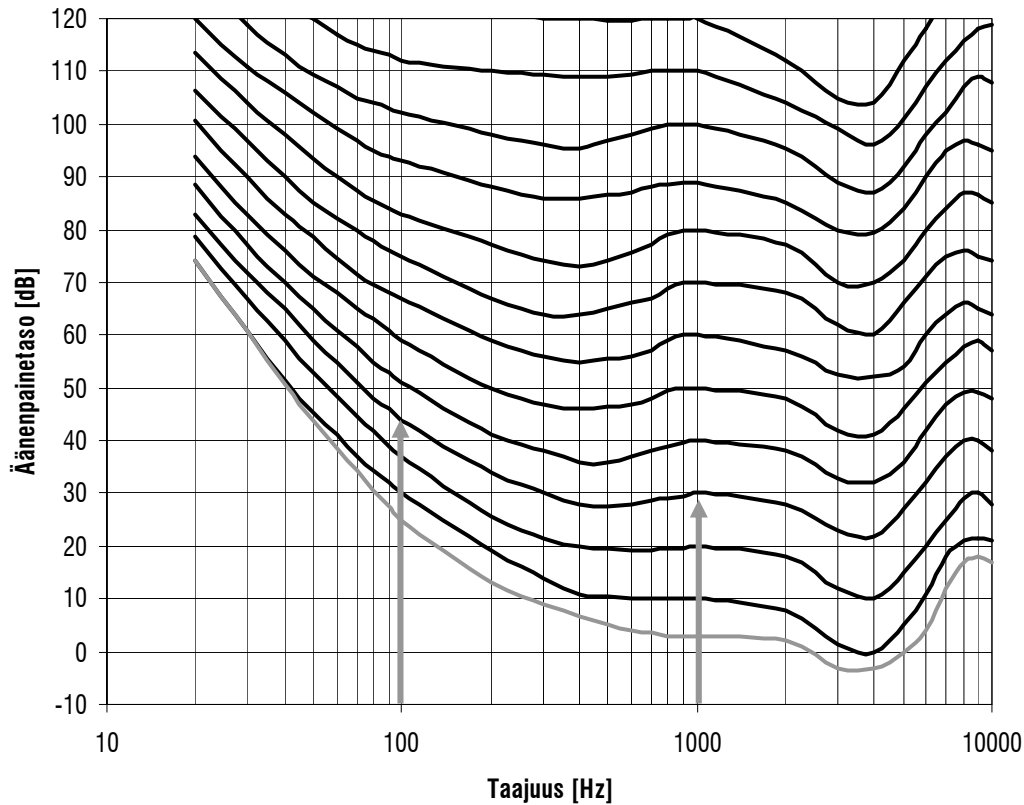
Suomessa tutkittiin asuinrakennusten ääneneristystä laajemmin 1950-luvun lopulla, jolloin VTT laati laajan tutkimushankkeensa ja mittausten perusteella ehdotuksen ääneneristysmääräyksiksi. Sitä ei kuitenkaan otettu käyttöön, vaan ensimmäiset suositukset laati Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, joka julkaisi vuonna 1967 Ääneneristysnormit. Ääneneristysnormit eivät olleet viranomaismääräyksiä, mutta käytännössä niitä edellytettiin noudatettavan. 1970-luvun puolivälissä rakentamista koskevat viranomaismääräykset koottiin Suomen rakentamismääräyskokoelmaksi, jolloin myös rakennusten akustiset olosuhteet tulivat viranomaismääräysten piiriin. Samaan aikaan asuinkerrostalojen runkorakenteet standardoinut BES-järjestelmä merkitsi huomattavaa parannusta ihmisten asuinympäristön ääniolosuhteissa. [32]

1.1.2 Akustisen suunnittelun tavoitteet

Ihminen voi aistia äänenä ilmanpaineen vaihtelun, jonka taajuus on noin 20 Hz ja 20000 Hz välillä. Alle 20 Hz taajuudet aistitaan tärinänä. Kuulon herkkyyys ei ole vakio, vaan se riippuu taajuudesta (kuva 1.2). Ääni on fysikaalista ilmiötä kuvaava neutraali käsite; ihmistä häiritsevä, haitallinen tai tarpeeton ääni on melua. Melun käsitteessä yhdistyvät fysikaalinen ilmiö sekä sen aiheuttama ihmisen subjektiivinen kokemus. Ääni voi olla häiritsevää monesta syystä: esimerkiksi ympäristön muista äänistä voimakkaasti poik-

keava tai niistä selvästi erottuva ääni koetaan yleensä häiritseväksi; ääni voi olla häiritsevää, jos se sisältää informaatiota, joka ei ole toivottua tai tarpeellista. Tilanteesta riippuen sama ääni voi olla tavoiteltava tai häiritsevä, jolloin se on melua. Rakentamiseen liittyvän akustisen suunnittelun tavoitteet seuraavat kuuloaistin ominaisuuksista, puheella tapahtuvan kommunikaation edellytyksistä ja tilan käyttötarkoituksesta:

- akustisen suunnittelun yhtenä lähtökohtana on terveellisyys. Vakavin melun aiheuttamista terveysvaikutuksista on kuulovaurio. Kuulovaurioriski edellyttää korkeita äänitasoja, mutta paljon alhaisemmatkin äänitasot aiheuttavat terveyshaittaa, sillä melu vaikeuttaa nukahtamista, vähentää unen syvyyttä ja aiheuttaa ylimääräisiä tai ennenaikaisia heräämisiä. Melun vaikutus unen laatuun riippuu melun äänitason lisäksi sen kestosta ja toistuvuudesta sekä taustamelun äänitasosta. Ihmisten yksilöllinen herkkyys melulle vaihtelee paljon; lisäksi sama ihminen voi reagoida samanlaiseen meluun eri tavalla eri ympäristössä ja eri vuorokaudenaikoina. Meluun on mahdollista myös tottua. Melu, johon yksilö on totunut, on siten yleensä vähemmän häiritsevää kuin normaalista ääniympäristöstä poikkeava melu. Puutteelliset akustiset olosuhteet voivat johtaa terveyshaittaan myös toisella tavalla: meluisa, liian kaiuntainen tai liian vaimennettu tila pakottaa puhujan korottamaan ääntään, jolloin seurauksena voi olla äänihäiriö. [2, 53]
- akustisen suunnittelun tulee tuottaa tiloja ja ympäristöjä, jotka ovat viihtyisiä. Vaikka melu ei aiheuttaisi terveyshaittaa, se haittaa viihtyisyyttä esimerkiksi asuinhuoneistoissa ja virkistysalueilla. Työpaikoilla melu haittaa keskittymistä edellyttävien työtehtävien suorittamista. Avotoimistoissa melua on muista työpisteistä kuuluva puhe tai puhelinkeskustelu, joka on häiritsevää etenkin informaation sisältönsä vuoksi. Viihtyisyys liittyy siihen, miten ihmiset kokevat ääniolosuhteet ympäristössään [54, 56].
- erilaisten tilojen tulee olla käyttötarkoitukseensa sopivia. Siten yksi akustisen suunnittelun tavoite on tarkoituksenmukaisuus. Esimerkiksi neuvottelutila, johon kuuluu puhe viereisestä neuvottelutilasta, ei ole tarkoituksenmukainen, jos tiloissa halutaan käydä luottamuksellisia keskusteluja. Tarkoituksenmukainen ei ole myöskään auditorio, jossa puheesta ei ole mahdollista saada selvää liiallisen kaiunnon vuoksi. Tällaisen auditorion korjaaminen 1890-luvun lopulla johti jälkikaiunta-ajan kaavan kehittämiseen, mikä on yksi nykyaikaisen akustiikan tutkimuksen ja suunnittelun lähtökohta [61].



Kuva 1.2. Äänen voimakkuuden kokeminen riippuu taajuudesta. Vakioäänekkyyskäyristä nähdään, kuinka voimakkaita äänten pitää olla eri taajuuksilla, jotta ääni koetaan yhtä voimakkaaksi. Esimerkiksi 100 Hz taajuudella 45 dB äänenpainetaso koetaan yhtä voimakkaaksi kuin 30 dB äänitaso 1000 Hz taajuudella. Alin käyrä osoittaa kuulokynnystä eri taajuuksilla.

Akustisen suunnittelun tavoitteena olevilla terveellisyydellä, viihtyisyydellä ja tarkoituksenmukaisuudella on taloudellista merkitystä kansanterveyden, menetetyt työajan ja epätarkoituksenmukaisten tilojen korjaamisen aiheuttamien kustannusten vuoksi. Niiden johdosta akustinen suunnittelu kiinnostaa myös yhteiskuntaa ja lainsäätäjiä. Euroopan unionin rakennustuotedirektiivi määrittelee rakentamiselle ja rakennustuotteille kuusi niin sanottua olennaista vaatimusta, joiden joukossa ovat terveys ja meluntorjunta. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan terveyden ja viihtyisyyden huomioon ottava meluntorjuntaa koskeva olennainen vaatimus edellyttää rakennuksen suunnittelua ja rakentamista siten, että melu, jolla rakennuksessa tai sen lähellä olevat altistuvat, pysyy niin alhaisena, ettei se vaaranna näiden henkilöiden terveyttä ja että se antaa mahdollisuuden nukkua, levätä ja työskennellä riittävän hyvissä olosuhteissa [56].

1.1.3 Akustiikka osana rakennushanketta

Yleiskielessä akustiikasta puhuttaessa tarkoitetaan useimmiten tilojen huoneakustiikkaa eli sitä, miten selvää puhe tai musiikki tilassa on ja miten ihmiset sen kokevat. Useimmiten akustiikka liitetään huoneakustiikaltaan vaativiin kohteisiin, kuten konserttisalei-

hin, teattereihin, elokuvateattereihin tai auditorioihin. Näissä rakennuksissa huoneakustiikka on vain yksi osa akustisen suunnittelun kokonaisuutta. Talonrakentamisen akustiikka kattaa yleensä neljä osa-aluetta (kuva 1.3):

- huoneakustiikka koskee äänen heijastumista, vaimenemista, etenemistä ja muuta käyttäytymistä saman tilan sisällä. Tarkoituksena on tilassa olevan äänilähteen, kuten puhujan tai orkesterikokoonpanon, saaminen kuulostamaan siltä, mitä tilan käyttötarkoitus edellyttää.
- rakennusakustiikka tutkii äänen siirtymistä eri tilojen välillä rakenteiden kautta. Äänilähteen luonteen perusteella puhutaan ilmaääneneristyksestä ja askel- tai runkoääneneristyksestä.
- meluntorjunnan tarkoituksena on vähentää rakennuksen ulkopuolisen melun, kuten tie-, raide- tai lentoliikenteen ja teollisuuden aiheuttaman melun, syntymistä tai estää sen etenemistä erilaisin meluestein tai ääntä eristävin rakentein. Rakennuksen sisällä meluntorjunnan tarkoituksena on vähentää koneiden tai rakennuksen teknisten laitteiden aiheuttamaa melua vaikuttamalla melun syntymiseen tai estämällä sen leviämistä ääntä eristävin rakentein, erilaisin äänenvaimentimin tai huoneakustiikan keinoin.
- värinäneristys liittyy läheisesti konedynamiikkaan, mutta myös akustiikkaan: rakennuksen runkoon jäykästi kiinnitetty laite, jossa on liikkuvia osia, saa rakenteet värähtelemään ja synnyttää siten ääntä. Värinäneristyksen tarkoituksena on vähentää laitteen aiheuttaman energian siirtymistä rakennuksen runkoon eristämällä laite rungosta joustavilla rakenneosilla.

Talonrakentamisen akustiikan osa-alueet limittyvät paljolti toisiinsa. Esimerkiksi rakennuksen teknisiä laitteita vaimennettaessa puhutaan meluntorjunnasta, vaikka keinona olisi äänen vaimentaminen huoneakustiikan keinoin. Talonrakentamisen akustiikan osa-alueet tarkastelevat myös hieman erilaisia taajuusalueita (kuva 1.4). Esimerkiksi meluntorjunnan kattama taajuusalue on laajempi kuin rakennus- ja huoneakustiikan, jotka tarkastelevat puheen ja musiikin kannalta oleellisinta taajuusaluetta, jolla kuulon herkkyys on suurimmillaan.

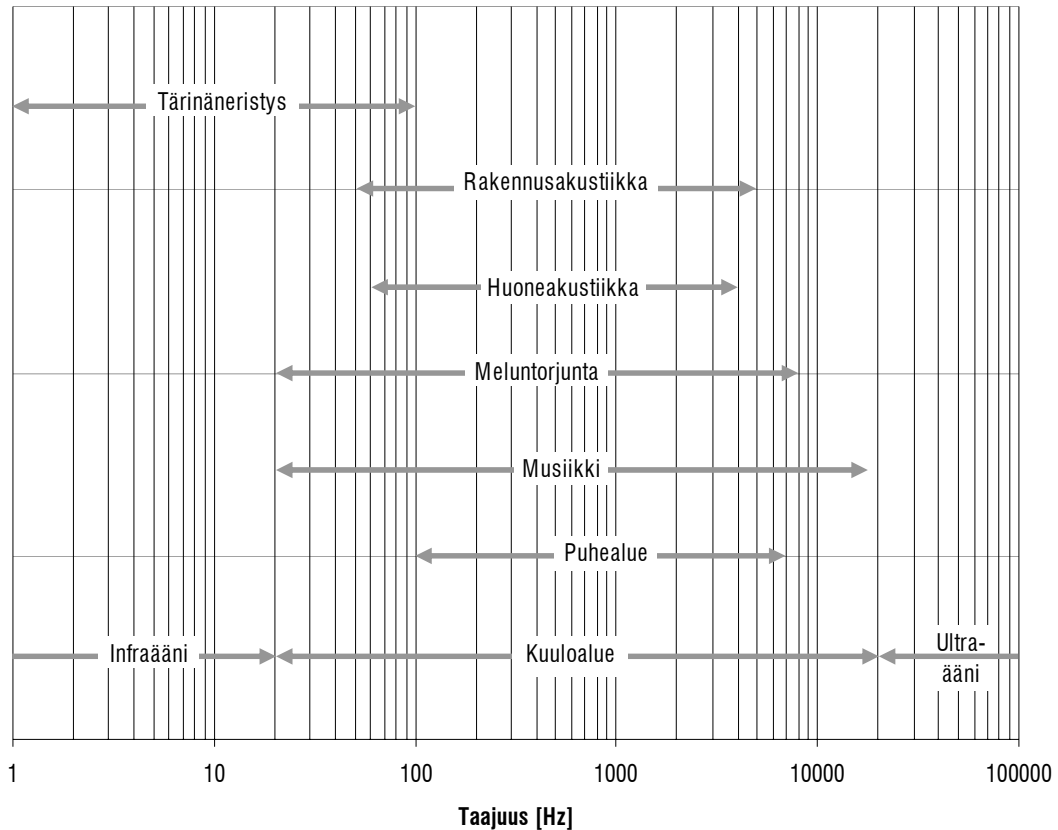
Akustisen suunnittelun tarve ei koske pelkästään vaativia rakennustyyppejä. Tosiasiallisesti akustista suunnittelua tarvitaan ja sitä tehdään käytännössä kaikissa rakennushankkeissa. Esimerkiksi tiloja erottavan ääntä eristävän väliseinän rakennetyypin valinta on akustista suunnittelua, jota tehdään esimerkiksi asuinrakennuksia, kouluja, terveyskeskuksia ja toimistorakennuksia suunniteltaessa. Rakennuksessa saavutettavien ääniolosuhteiden kannalta ratkaisevat valinnat tehdään suunnitteluvaiheessa. Jokaisessa hankkeessa ei välttämättä tarvita erityistä akustiikan suunnittelijaa, sillä monissa tapauksissa

ratkaistavat asiat eivät ole teknisesti tai taloudellisesti ylivoimaisia; edullisin lopputulos saavutetaan, kun akustiikka otetaan huomioon mahdollisimman aikaisin. Esimerkiksi liikennemelualueelle rakennettaessa on varsinkin julkisivun ääneneristystä koskevan asemakaavamääräyksen ollessa korkea syytä ottaa huomioon, että ikkunoiden pinta-ala ja niiltä vaadittava ääneneristyskyky on sitä korkeampi, mitä heikompi ulko-seinä rakenteen ääneneristyskyky on. Usein ikkunoiden ääneneristyskykyä ryhdytään tutkimaan siinä vaiheessa, kun ikkunoita ollaan tilaamassa. Pahimmassa tapauksessa tämä menettely johtaa kalliisiin erikoisratkaisuihin. Samoin rakennusten ja tilojen sijoittelulla on suuri merkitys huoneisiin ulkoa kantautuvan melun kannalta.

Nykyisin turhan yleinen tapa rakennusten akustiikan toteutuksessa on se, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan ensin ja valmiista rakennuksesta saatujen valitusten perusteella ryhdytään parantamaan ääneneristystä, huoneakustiikkaa tai taloteknisten laitteiden äänenvaimennusta ja tärinäneristystä. Tässä vaiheessa kustannukset ovat aina suuret verrattuna siihen, että ratkaisuihin olisi varauduttu suunnitteluvaiheessa. Asuinrakennusten korjaukset on kuitenkin pakko tehdä takuutöinä; puutteet toimisto- ja liikerakennusten akustiikassa puolestaan voivat johtaa vuokratulojen menetyksiin. Asiakastytyväisyyden kannalta akustiikan merkitys on suuri, sillä asiakkaat havaitsevat virheet usein jo muuttopäivänään.



Kuva 1.3. Talonrakentamisen akustiikka käsittää huoneakustiikan, rakennusakustiikan eli ääneneristyksen, meluntorjunnan ja tärinäneristyksen suunnittelun.



Kuva 1.4. Talonrakentamisen akustiikan osa-alueiden kannalta kiinnostavat taajuusalueet [10].

Asuinrakennuksia suunniteltaessa on noudatettava rakentamismääräyskokoelman osan C1 määräyksiä, mutta muiden rakennustyyppien osalta hankkeen suunnittelu- ja toteutusorganisaation vastuulla on määrittellä tavoitteet rakennuksen ääneneristykselle, huoneakustiikalle ja taloteknisten järjestelmien äänitasoille tilojen käyttötarkoituksen perusteella. Ratkaisevassa asemassa ovat tällöin rakennusliikkeiden suunnittelunohjaus, arkkitehti pääsuunnittelijana tai rakennuttajakonsultti. Myös LVI-, sähkö- ja rakennesuunnittelijoiden työ vaikuttaa rakennuksen ääniolosuhteisiin. Akustiikka voidaan ottaa huomioon esimerkiksi niin, suunnittelukohteesta laaditaan erillinen akustiikkasuunnitelma, joka liitetään urakka-asiakirjoihin muiden suunnitelmien tavoin [54]. Erillisen akustiikkasuunnitelman laatiminen kaikissa kohteissa olisi valmiissa rakennuksissa saavutettavien ääniolosuhteiden kannalta perusteltua, sillä tavallisesti esimerkiksi ilmastoinnin äänenhallintaa, rakenteiden läpivientidetalleja, liitosten tiivistyksiä ja muita akustiikan kannalta ratkaisevia tekijöitä ei esitetä missään suunnitelmissa.

1.2 Määräykset ja ohjeet

1.2.1 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C1

Uudisrakennusten ilma- ja askelääneneristystä, äänitasoja ja jälkikaiunta-aikaa koskevat viranomaismääräykset ja ohjeet on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 vuodelta 1998 [56]. Rakentamismääräyskokoelman ääneneristysmääräykset koskevat vain asuinrakennuksia, muiden rakennustyyppien akustiikkaa varten on kokoelman osassa C1 annettu ohjeita. Uudisrakentamisen lisäksi rakentamismääräyskokoelman osan C1 määräykset koskevat myös vanhoja rakennuksia, kun niiden käyttötarkoitus muuttuu. Esimerkiksi muutettaessa toimisto- tai teollisuusrakennus asuinrakennukseksi rakennuksen on täytettävä uudisrakentamista koskevat ääneneristysmääräykset.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1-1998 annetut ilma- ja askelääneneristysvaatimukset koskevat ääneneristystä asuinhuoneistojen välillä, mittausta porrashuoneesta asuinhuoneistoon sekä ääneneristystä asuinhuoneistojen ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä. Kun asuinrakennuksessa on meluisa tila, kuten ravintola, yökerho, disko, esiintymistila, elokuvateatteri tai vastaava, rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa ei voida noudattaa asuinhuoneistojen ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä vaadittavaa eristystasoa. Jo kerhohuone tai päivittäistavara kauppa edellyttää parempaa ääneneristystä. Vaatimusta tällaisessa tilanteessa ei ole esitetty teknisinä lukuarvoina, vaan sanallisesti: ”Mikäli tilassa, jossa melu syntyy, enimmäisäänitaso $L_{A,max}$ voi toistuvasti olla suurempi kuin 80 dB, ympäröivien tilojen tarvittava suojaus melulta määritellään ja suunnitellaan tapauskohtaisesti. Meluisien tilojen, kuten ravintoloiden, diskojen, konserttisalien ja melua aiheuttavien työ- tai tuotantotilojen sijoittamista asuin- ja vastaavien tilojen viereen tulee välttää. Mikäli meluinen tila kuitenkin sijoitetaan niin, että se voi vaarantaa riittävän hyvien ääniolosuhteiden saavuttamisen asuin- ja vastaavissa tiloissa, on tilat, rakenteet ja muut äänitekniset toimenpiteet suunniteltava ja toteutettava niin, että äänen leviäminen meluisasta tilasta asuntoihin ja muihin melulle herkkiin tiloihin riittävästi rajoitetaan.”

Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 on esitetty määräykset rakennuksen LVIS-laitteiden ja muiden niihin rinnastettavien laitteiden aiheuttamista äänistä asunnoissa. Rakennuksen LVIS-laitteita ovat esimerkiksi hissit, vesi- ja viemärlaitteet, kompressorit, ilmanvaihtolaitteet, jäähdytyslaitteet ja lämmityslaitteet. Niihin rinnastetaan myös keskuspolynimuri, mattoimuri ja talopesulan laitteet, kuten pesukoneet, lingot, kuivauspuhaltimet ja mankelit.

Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 on esitetty lisäksi ohjeita teknisten laitteiden aiheuttamasta äänestä sairaaloiden ja terveyskeskusten potilashuoneissa, päiväkotien lepo- ja luokahuoneissa, toimistohuoneissa. Rakentamismääräyskokoelman osan C1 määräys rakennuksen tai rakennusta palvelevien LVIS-laitteiden äänistä saman tai läheisen rakennuksen ikkunan ulkopuolella, parvekkeella, pihamaalla tai muussa melulle herkässä paikassa koskee kaikkia rakennuksia, joissa äänilähteitä on.

1.2.2 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2

Rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta on annettu määräyksiä ja ohjeita Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 [57]. Se määrittelee tilakohtaisesti eri tiloissa sallittavan äänen rakennuksen LVIS-laitteista. Ohjearvoja on annettu asuinrakennusten tiloille, joista rakentamismääräyskokoelman osassa C1 ei ole määräyksiä, kuten vaatehuoneille, kylpyhuoneille, kodinhoitohuoneille ja huoneistosaunoille sekä asuinrakennusten yhteistiloille, kuten porrashuoneille, varastoille, kylmäkellareille, puku- ja pesuhuoneille sekä talosaunoille, talopesuloille kuivaushuoneineen ja askartelu- ja kerho- huoneille. Rakentamismääräyskokoelman osassa D2 annetaan ohjearvoja myös muiden muassa toimistorakennuksille, oppilaitoksille, ravintoloille, hotelleille, myymälöille, urheiluhalleille, kirjastoille ja kirkkoille.

Vaativimpien kohteiden, kuten äänitysstudioiden, äänitarkkaamoiden, konserttisalien, teatterien ja elokuvateatterien, suunnitteluun osallistuu akustiikkaan perehtynyt konsultti, joka tavallisesti huolehtii ilmastointilaitoksen äänenhallinnan suunnittelusta ja määrittelee eri tiloissa tavoiteltavat ääniolosuhteet myös teknisten laitteiden osalta. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 elokuvateattereille, teattereiden katsomoille ja näyttämöille sekä konserttisaleille annetut ohjearvot ovat nykyiseen suunnittelukäytäntöön verrattuna turhan korkeita. Elokuvateatterien suunnittelua määräävät myös kaupalliset äänentoistoa koskevat standardit.

1.2.3 Asumisterveysohje

Ympäristöministeriön julkaiseman rakentamismääräyskokoelman akustiikkaa koskevat määräykset ottavat huomioon melun terveysvaikutusten lisäksi myös viihtyisyyteen liittyviä tekijöitä. Jos melulle asetetaan raja-arvoja pelkästään sen terveysvaikutusten perusteella, päädytään lievempiin vaatimuksiin. Sosiaali- ja terveysministeriö antaa melulle sen terveysvaikutusten perusteella raja-arvoja Asumisterveysohjeessa, joka viimeksi on uudistettu vuonna 2003 [2]. Asuinrakennusten lisäksi Asumisterveysohjeessa on annettu raja-arvoja myös muiden rakennusten ääniolosuhteille. Asumisterveysohje koskee melun osalta kaikkia rakennuksen teknisiä laitteita sekä asuinrakennuksessa olevaa liiketoimintaa, kuten päivittäistavarakauppoja, ravintoloita, elokuvateattereita ja

muita tiloja, jotka voivat aiheuttaa asuntoihin äänihaittaa. Luonnonilmiöiden luonnossa aiheuttama ääni on rajattu pois, mutta terveystahaittaa voi syntyä tuulen, sateen tai aaltojen rakenteisiin aiheuttamasta melusta.

Pienitaajuinen melu taajuusalueella 20-200 Hz voi hiljaisessa ympäristössä erottua selvästi taustamelusta ja vaikeuttaa nukahtamista. Koska kuuloaistin herkkyys on matalalla taajuusalueella heikompi kuin keskitaajuuksilla, pienitaajuisen äänen on oltava melko voimakkaita ennen kuin ne ylittävät kuulokynnyksen. Kun kuulokynnys on ylittynyt, kuuloaisti voi havaita hyvinkin herkästi muutokset. Asumisterveysohjeessa on määritetty raja-arvot pienitaajuisen melun keskiäänitasolle yhden tunnin ajalle. Niitä noudatetaan vain arvioitaessa meluhaittaa tiloissa, joissa nukutaan.

Erityisen häiritseväksi useimmat ihmiset kokevat asuntoihinsa toistuvasti kuuluvan musiikkimelun, joka vaikeuttaa nukahtamista. Asumisterveysohje antaa raja-arvon alkuyönä sallittavalle musiikkimelulle. Musiikkimelua ei saa ylittää tätä ohjearvoa makuuhuoneessa, kun taustamelu ei peitä musiikkimelua. Musiikkimelua arvioitaessa noudatetaan myös pienitaajuisen melun ohjearvoja.

Laajakaistainen kohina, jota esimerkiksi ilmastoinnin aiheuttama ääni tai kaukana sijaitsevan liikenneväylän aiheuttama ääni yleensä koetaan vähemmän häiritseväksi kuin taustamelusta erottuva kapeakaistainen ääni. Tyypillinen kapeakaistainen ääni on esimerkiksi ilmastoinnin tulo- tai poistoilmaventtiilin vihellys tai lämpöpatterin venttiilin sihinä, joka välttämättä ei kuitenkaan ylitä rakentamismääräyskokoelmassa esitettyjä sallittuja äänitasoja. Tällaisten äänten terveystahaittaa arvioitaessa otetaan huomioon kapeakaistaisuus, jonka perusteella mittaustulosta korjataan.

Asumisterveysohje on otettava huomioon rakennuksen suunnitteluvaiheessa, sillä rakennuksen valmistuttua terveystarkastaja voi asettaa terveystahaitan perusteella korjausvelvoitteen, jos ohjeessa esitetyt raja-arvot ylitetään. Rakennuksen valmistuttua ääneneristykseen parantaminen on aina vaikeampaa ja tavallisesti erittäin kallista. Korjauksen tekeminen aiheuttaa lisäksi liikkeenharjoittajalle tulonmenetyksiä. Melun ja rakennuskustannusten kannalta riittävän edullisen lopputuloksen saavuttamiseksi on tarkoin selvitettävä, millaista toimintaa asuinrakennukseen suunniteltavassa liiketilassa tai ravintolassa aiotaan harjoittaa. Myös tilan käyttäjälle on selvitettävä, millainen toiminta tilassa on mahdollista.

Asumisterveysohje ei ota suoraan kantaa rakenteiden ilma- tai askelääneneristykseen. Siinä annettujen melutasojen perusteella voidaan määrittää rakenteilta edellytettävä ääneneristyskyky, jos rakennuksessa olevan äänilähteen tuottamasta melusta on tietoa. Jos asuinrakennuksessa on esimerkiksi yökerho, tanssiravintola tai muu vastaava meluista tila, äänilähteen tuottama melu voidaan mitata.

1.2.4 Rakennusten akustinen luokitus SFS 5907

1990-luvulla rakentamismääräyksiä on muutettu ns. toiminnalliseen suuntaan. Ääneneristyksen osalta tämä on merkinnyt sitä, että rakentamismääräyskokoelman osassa C1 vuodelta 1998 on määräyksiä vain asuinrakennusten ääniolosuhteista. Samanaikaisesti myös rakennusvalvonnan velvollisuudet ovat muuttuneet. Suunnitelmia ei enää tarkasteta yhtä laajasti kuin aiemmin. Sen sijaan rakennusvalvonnan tehtäväksi on tullut valvoa sitä, että rakennushankkeen suunnittelu- ja toteutusorganisaatiolla on riittävä pätevyys hankkeen läpiviemiseksi. Muiden kuin asuinrakennusten ääneneristyksen, huoneakustiikan ja meluntorjunnan suunnittelu ja tavoitearvojen määrittely on siten siirtynyt kokonaan suunnittelu- toteutusorganisaation vastuulle.

Standardin SFS 5907 [54] yksi tarkoitus on vastata suunnitteluohjeiden tarpeeseen, joka on syntynyt viranomaismääräysten supistumisesta. Standardissa SFS 5907 on määritelty akustiikan ohjearvoja erilaisille tiloille ja rakennustyypeille, joita ovat asunnot, majoitustilat, vanhusten palvelutalot, toimistorakennukset, koulut, oppilaitokset, päiväkodit, terveydenhoitoalan rakennukset ja teollisuustyöpaikat. Ohjearvot koskevat ilma- ja askelääneneristystä, rakennuksen LVIS-laitteiden meluntorjuntaa rakennuksen sisä- ja ulkopuolella, liikennemelun torjuntaa sekä huoneakustiikkaa. Standardi ei ole luonteeltaan määräys, vaan suositus. Se on tarkoitettu opastavaksi asiakirjaksi, jonka käyttö on vapaaehtoista.

Varsin yleinen käsitys akustiikkaa koskevien rakentamismääräysten merkityksestä on se, että niiden tulisi taata, että asuinrakennuksissa naapurista ei koskaan kuulu mitään. Määräyksillä voidaan kuitenkin vaikuttaa vain rakenteiden teknisiin ominaisuuksiin, mutta ei äänilähteisiin. Niinpä normaaleista asumisen äänistä poikkeavat äänet kuuluvat, vaikka rakenteet olisivatkin määräysten mukaiset. Teknisesti ja taloudellisesti on kuitenkin mahdollista toteuttaa määräysten tasoa parempia asuntoja. Rakennusten ilma- ja askelääneneristystä sekä LVIS-laitteiden meluntorjuntaa on tarkasteltava kokonaisuutena: jos halutaan ääneneristyksen kannalta tavallista parempi rakennus, yhden eristysarvon parantaminen ei riitä. Käytännössä tämä on ollut vaikeaa, sillä ohjeita rakennusten ääniolosuhteiden parantamisesta kokonaisuutena ei ole ollut.

Standardissa SFS 5907 on otettu käyttöön erilaisten rakennusten akustinen luokitus, jonka tarkoituksena on helpottaa suunnittelijoiden, rakennuttajien, rakennusten käyttäjien ja kiinteistönomistajien työtä akustisesti tarkoituksenmukaisten tilojen aikaansaamiseksi ja valintojen tekemiseksi suunnittelun alkuvaiheessa. Standardi jakaa tilat neljään luokkaan, joista luokka C vastaa viranomaismääräysten tasoa niiltä osin kuin viranomaismääräyksiä on olemassa. Luokka D koskee vain vanhoja rakennuksia, joiden rakennusaikana ei ole ollut teknisinä mittalukuina annettuja ääneneristysmääräyksiä ja joissa on vähemmän tyydyttävät olosuhteet. Luokka D on tarkoitettu käytettäväksi vain silloin, kun halutaan selvittää vanhan rakennuksen akustiset ominaisuudet. Uudisraken-

tamisessa tulee aina saavuttaa vähintään luokan C edellyttämät olosuhteet. Luokat A ja B puolestaan mahdollistavat akustiikaltaan viranomaisvaatimuksia parempien rakennusten suunnittelun.

Rakentamismääräykset eivät edellytä ääneneristyksen toteutumisen varmistamista, vaan rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan rakennuksen ääneneristysvaatimuksen katsotaan täyttyvän, kun rakennus suunnitellaan ja rakennetaan määräyksissä esitetyllä tavalla. Vaatimuksen täytyminen voidaan osoittaa käyttämällä ”aikaisemmin hyväksytyjä rakenneratkaisuja ja teknisissä eritelmissä esitettyjä ratkaisuja”. Tämä ei vielä takaa sitä, että valmis rakennus kokonaisuutena täyttäisi vaatimukset; rakentamismääräyskokoelman mukaan määräykset kuitenkin koskevat ääneneristystä nimenomaan rakennuksessa. Standardi SFS 5907 edellyttää, että luokituksessa määriteltyjen arvojen on todettu täyttyvän valmiissa rakennuksessa tehdyin akustisin kenttämittauksin. Vain tällöin rakennuksen voidaan todeta kuuluvan johonkin standardissa määriteltyyn akustiseen luokkaan. Standardissa esitettyjen akustisten luokkien vaatimuksia voidaan käyttää suunnitteluohjeena aina, vaikka standardissa määriteltyjä akustisia mittauksia ei tehtäisikään. Rakennuksen tai tilan voidaan kuitenkin todeta kuuluvan johonkin standardissa määriteltyyn akustiseen luokkaan vain, kun luokituksessa määriteltyjen arvojen on todettu täyttyvän valmiissa rakennuksessa tehdyin akustisin kenttämittauksin.

1.2.5 Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista

Edellä mainitut määräykset ja ohjeet käsittelevät lähinnä äänenhallintaa ja ääneneristystä rakennuksen sisällä. Äänilähde voi olla myös rakennuksen ulkopuolella, esimerkiksi rakennettaessa vilkasliikenteisen kadun, tien tai rautatien varrelle tai lentokenttien läheisyyteen. Rakennuksen ulkopuolisesta äänilähteestä sisätiloissa ja ulkona sallittavat melutasot on esitetty valtioneuvoston päätöksessä 993 vuodelta 1992 [63]. Sen tarkoitus on meluhaittojen ehkäiseminen ja ympäristön viihtyisyyden turvaaminen maankäytön, liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa sekä rakentamisen lupamenettelyissä. Päätös koskee erilaisten liikenneväylien ja teollisuuden aiheuttamaa melua.

Valtioneuvoston päätöksen ohjearvot ulkona vallitsevasta melusta koskevat asumiseen käytettäviä alueita, virkistysalueita taajamissa ja taajamien välittömässä läheisyydessä sekä hoito- ja oppilaitoksia palvelevia alueita, loma-asumiseen käytettäviä alueita, leirintäalueita, taajamien ulkopuolella olevia alueita ja luonnonsuojelualueilla. Ohjearvot on annettu erikseen päivä- ja yöajalle.

Rakennuksen ulkopuoliset melulähteet eivät saa tuottaa terveyttä vaarantavaa melua rakennusten sisälle. Valtioneuvoston päätöksessä annetaan ohjearvot melutasosta rakennuksen sisällä asuin-, potilas- ja majoitushuoneissa, opetus- ja kokoontumistiloissa sekä liike- ja toimistohuoneissa. Myös sisällä sallittavan melun ohjearvot on annettu

erikseen päivä- ja yöajalle. Nämä ohjearvot ovat perustana asemakaavassa annettaville kaavamääräyksille rakennusten ulkokuoren ääneneristyksestä.

Erityisesti rautatien varrelle rakennettaessa äänihaittaa voi aiheuttaa myös rautatien tärinä ja siitä aiheutuva runkoääni. Suomessa ei ole viranomaismääräyksiä, jotka suoraan koskisivat tärinää, mutta VTT on laatinut suositukset tärinän mittaamisesta ja sen ottamisesta huomioon rakennusten suunnittelussa [59]. Koska tärinä riippuu radan perustamisesta ja rakennettavan tontin maapohjasta, suunnittelun lähtökohdaksi on aina tuotettava tietoa mittauksin.

2

Äänen eteneminen ja vaimeneminen

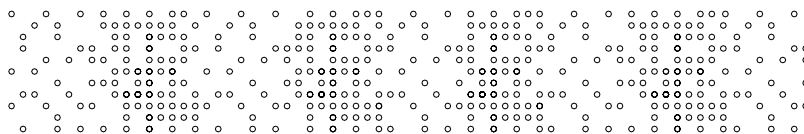
”Akustiikassa on esitettävä suureita, joiden suuruudet ja väliset suhteet vaihtelevat erittäin paljon. Tämän johdosta on otettu käyttöön logaritminen asteikko, johon meidän nyt on tutustuttava, ennen kuin voimme jatkaa.”

Yli-insinööri Paavo Arni 1949

2.1 Äänen ominaisuuksia

2.1.1 Taajuus

Fysikaalisesti ääni on ilmanpaineen vaihtelua staattiseen ilmanpaineeseen nähden. Värähtelevä kappale, kuten ihmisen äänihuulet, saa ympäristössään aikaan ilman tihtentymä ja harventumia. Ilmahiukkasten liike saa seuraavat hiukkaset liikkeeseen, ja näin ääni etenee pitkittäisaallona äänilähteestä ympäristöön (kuva 2.1).



Kuva 2.1. Ääni etenee ilmassa pitkittäisaallona, jossa ilmahiukkasten tihtentymät ja harventumat seuraavat toisiaan. Niiden aiheuttama ilmanpaineen vaihtelu synnyttää kuuloaistimuksen.

Kuuloaistimus syntyy, kun ilmanpaineen vaihtelu saa korvan rumpukalvon värähtelemään. Jos värähtely on tiheää, ääni koetaan korkeaksi. Harvaan tapahtuvat värähtelyt ovat matalia ääniä. Äänen taajuus f [Hz] värähtelyiden määrä n jaettuna aikajaksolla T [s], jonka kuluessa värähtelyt on havaittu:

$$f = \frac{n}{T} \quad (2.1)$$

Ääni tarvitsee edetäkseen väliaineen: tyhjiössä ääni ei voi edetä. Ilmassa etenevästä äänestä käytetään nimitystä ilmaääni. Sitä aiheuttavat esimerkiksi puhe, musiikki, äänen-toistolaitteet, rakennuksen LVIS-laitteet ja erilaiset koneet. Äänen nopeus ilmassa on riippumaton taajuudesta, mutta lämpötila t [°C] vaikuttaa äänen nopeuteen c [m/s]:

$$c = 331 + 0,6t \quad (2.2)$$

Huoneen lämpötilassa äänen nopeus ilmassa on noin 340-345 m/s. Äänen nopeudella, taajuudella ja ilmaäänen pitkittäisaallon aallonpituudella λ [m] on yhteys:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Äänen etenemisen väliaineena voi olla myös kiinteä aine, kuten rakennuksen runkorakenteet. Ilmääni saa ympäristön rakenteet värähtelemään, jolloin ääni etenee rakennuksen rungossa erityisesti taivutusaaltona. Taivutusaallossa rakenteeseen syntyy taipumia äänen etenemissuuntaan kohtisuorassa suunnassa. Rakenteissa etenevä ääni on runkoääntä, jonka voi synnyttää myös rakenteeseen kiinnitetty laite värähtelyllään tai rakenteeseen kohdistuvat iskut. Runkoääntä synnyttäviä iskuja aiheuttavat esimerkiksi kävely, esineiden putoaminen, lasten leikkiminen ja huonekalujen siirtely. Näiden äänilähteiden aiheuttamia runkoääniä sanotaan askelääniksi. Runkoäänen vaikutuksesta värähtelevä rakenne saa ympäristössään olevan ilman värähtelemään, mikä voidaan aistia ilmaääninä. Toisin kuin ilmaäänen nopeus, taivutusaallon nopeus rakenteessa ei ole vakio, vaan se riippuu taajuudesta sekä materiaaliominaisuuksista.

2.1.2 Äänenpainetaso

Äänenä aistittavat ilmanpaineen vaihtelut ovat staattiseen ilmanpaineeseen verrattuna hyvin pieniä. Ilmakehän ilmanpaine on noin 100 kPa, mutta kuulokynnys eli pienin ilmanpaineen muutos, jonka ihminen pystyy aistimaan, on 20 μ Pa. Äänenä aistittavasta ilmanpaineen muutoksesta käytetään nimitystä äänenpaine p [Pa]. Ääniaistimus muuttuu kipuaistimukseksi, kun äänenpaine on noin 20 Pa. Koska äänenpaineet ovat lukuarvoina hyvin pieniä, mutta kuulokynnyksen ja kipukynnyksen ero suhteellisesti hyvin suuri, äänenpaineita olisi hankalaa käyttää käytännön suunnittelu- ja laskentatyössä. Siksi tarkasteltavaa äänenpainetta p verrataan vertailuäänepaineeksi otettuun kuulokynnykseen p_0 . Tällöin äänen voimakkuutta voidaan kuvata äänenpainetasona L_p [dB]:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (2.4)$$

Äänenpainetason määritelmän mukaan pienimmän kuultavissa olevan äänenpaineen äänenpainetaso on 0 dB ja kipukynnyksen äänenpaineen äänenpainetaso on noin 120 dB (taulukko 2.1).

Taulukko 2.1. Erilaisten äänilähteiden äänenpainetasoja.

Äänenpainetaso L_p	Äänilähde
25 dB	Hiljainen asuinhuoneisto
30 dB	Kuiskaus
45 dB	Toimistotyöympäristö
55 dB	Keskustelu
65 dB	Kovaääninen puhe
80 dB	Vilkas katuliikenne
100 dB	Piikkaus
110 dB	Oopperalaulaja
120 dB	Kipukynnys
140 dB	Suihkukone

Äänenpainetason määritelmästä seuraa, että äänenpaineen kaksinkertaistuminen kasvattaa äänenpainetasoa 6 dB. Jos tilassa on kaksi laitetta, jotka tuottavat saman äänenpainetason toimiessaan yksin, niiden samanaikaisesti toimiessa äänenpainetaso on 3 dB korkeampi kuin laitteiden yksinään tuottama äänenpainetaso. Äänenpainetason määritelmästä seuraa myös se, että haluttaessa alentaa jonkin tilan äänenpainetasoa ensimmäisenä on vaimennettava suurimman äänenpainetason tuottava laite. Jos tilassa on esimerkiksi yksi laite, jonka äänenpainetaso on 60 dB, ja kymmenen laitetta, jotka kukin yksinään tuottavat 30 dB äänenpainetasoa, tilan äänenpainetaso on laitteiden toimiessa samanaikaisesti noin 60 dB. Jos äänekkäin laite poistetaan, tilan äänenpainetaso on 40 dB. Usean äänilähteen yhdessä tuottama äänenpainetaso $L_{p,tot}$ on

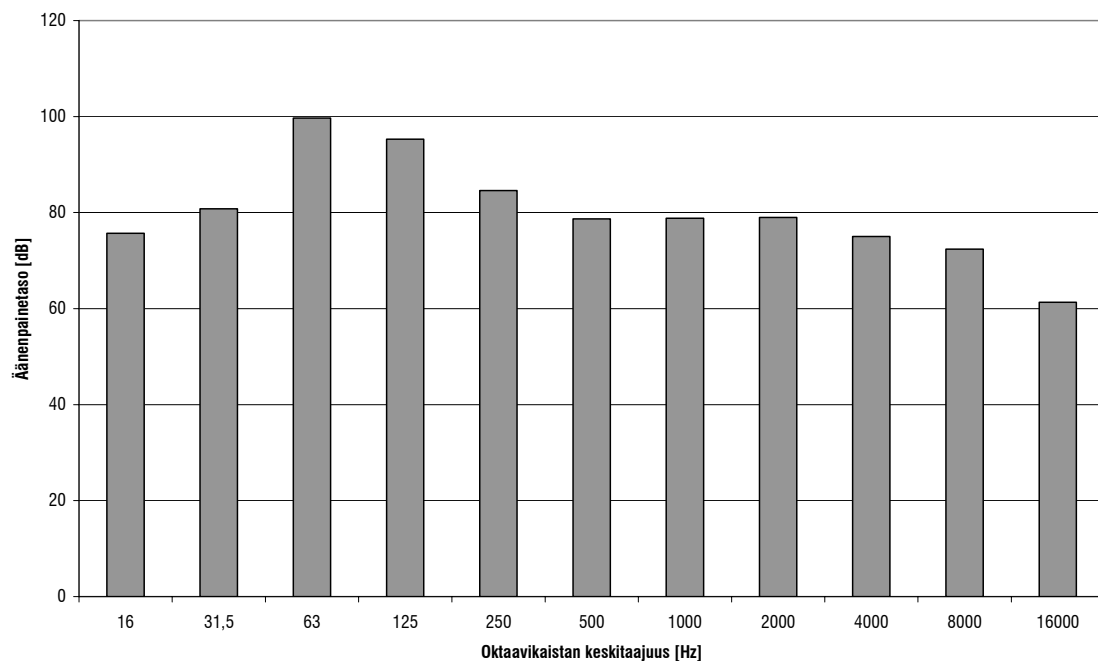
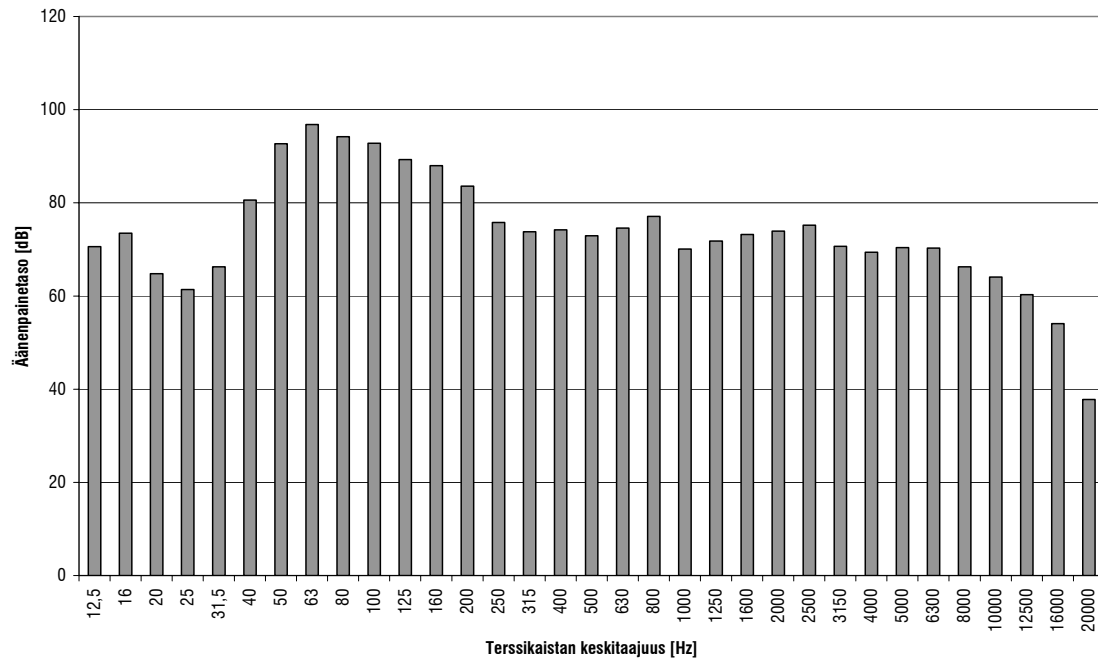
$$L_{p,tot} = 10 \lg(10^{L_{p,1}/10} + 10^{L_{p,2}/10} + \dots) = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{L_{p,i}/10} \quad (2.5)$$

Jos äänilähteiden aiheuttamalle äänenpainetasolle on määritelty jokin sallittu arvo $L_{p,sall}$ ja tilassa tai ulkoalueella on n yhtä voimakasta äänilähdettä, yhdestä äänilähteestä sallittava äänenpainetaso on

$$L_p = L_{p,sall} - 10 \lg n \quad (2.6)$$

Äänilähteiden tuottamat äänenpainetasot ovat erilaisia yksittäisillä taajuuksilla. Siksi akustiikassa äänen taajuusjakauma eli äänispektri jaetaan pienempiin osiin eli taajuuskaistoihin. Tavallisesti käytetään oktaavikaistoja tai terssi- eli kolmannesoktaavikaistoja (kuva 2.2). Kaistanleveys eli taajuusalue, jolta mitattua ääntä sisältyy tietyllä taajuuskaistalla ilmoitettuun äänenpainetasoon, on aina suhteellisesti sama osuus keskitaajuudesta. Oktaavikaistan kaistanleveys on noin 70 % keskitaajuudesta ja terssikaistan kaistanleveys noin 23 % keskitaajuudesta. Taajuuskaistojen määrittely näin johtuu kuulouis-

tin ominaisuuksista. Kun esimerkiksi musiikissa säveln äänenkorkeus kasvaa oktaavin, taajuus kaksinkertaistuu. Kahden oktaavin kasvu tarkoittaa taajuuden nelinkertaistumista. Kuuloaistimuksena yhden oktaavin suhteellinen muutos taajuudessa tuntuu kuitenkin yhtä suurelta huolimatta siitä, että taajuuksien erotus kasvaa jokaisen muutoksen yhteydessä.

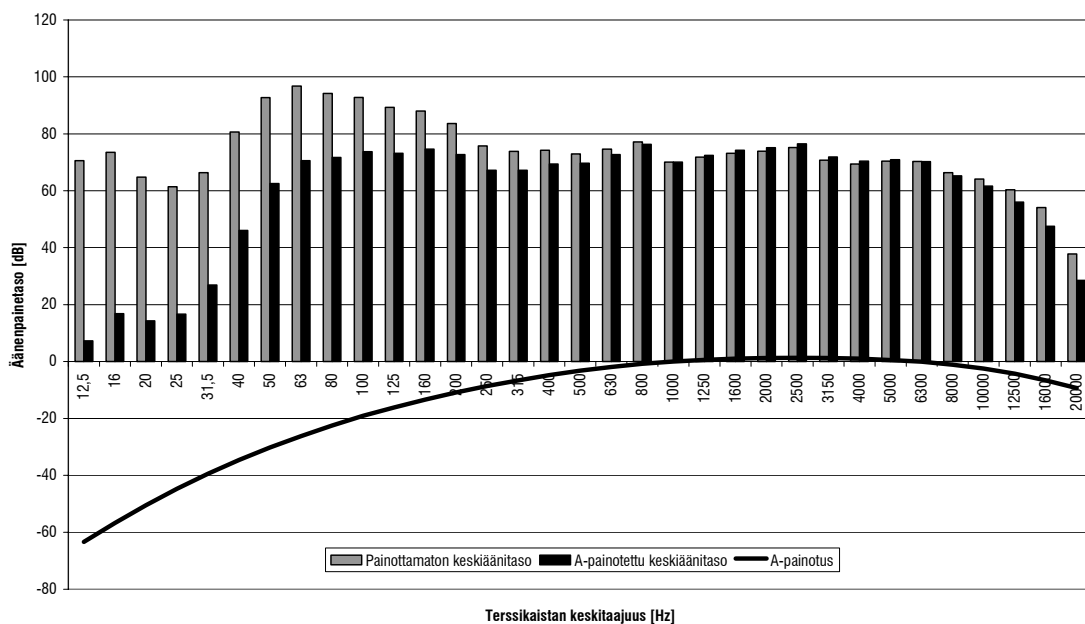


Kuva 2.2. Saman äänispektrin äänenpainetasojen ilmoittaminen terssikaistoittain (yllä) kuvaa tutkittavan ääniympäristön ja äänilähteiden ominaisuuksia tarkemmin kuin mittaaminen oktaavikaistoittain (alla).

Rakenteiden ja rakennusten ääneneristysmittaukset tehdään kolmannesoktaavikaistoin keskitäajuudesta 50 tai 100 Hz keskitäajuuteen 3150 Hz tai 5000 Hz. Erilaisten koneiden ja LVIS-laitteiden äänitiedot ilmoitetaan sitä vastoin oktaavikaistoin, samoin rakennusmateriaalien absorptio-ominaisuudet. Nykyisin laitteiden äänitiedot ja materiaalien ominaisuudet ilmoitetaan keskitäajuuksilla 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ja 4000 Hz. Melumittauksissa terssikaistoin ilmoitetut tulokset antavat tarkemman käsityksen melusta kuin oktaavikaistoin tehdyt mittaukset (kuva 2.2). Terssikaistoin mitatut äänenpainetasot muutetaan oktaavikaistaisiksi laskemalla oktaavikaistan keskitäajuutta vastaavan terssikaistan äänenpainetaso kaavan 2.5 mukaisesti yhteen edellisen ja seuraavan terssikaistan äänenpainetason kanssa.

2.1.3 A-painotus ja äänitaso

Äänenpainetaso L_p kuvaa fysikaalisen äänenpaineen voimakkuutta. Ihmisen kuuloaisti ei kuitenkaan ole yhtä herkkä koko taajuusalueella. Herkimmillään kuulo on taajuusalueella 2000-5000 Hz; tämän alueen molemmilla puolilla kuulon herkkyys alenee. Äänen häiritsevyyttä arvioitaessa ei siksi olisi järkevää arvostella kaikkia taajuusalueita samalla tavalla. Kuuloaistin herkkyys otetaan huomioon A-painotuksella (taulukko 2.2 ja kuva 2.3). A-painotus lisätään keskitäajuuksittain äänenpainetasoihin L_p . Kuulon herkkyys riippuu myös äänen voimakkuudesta. Sen ottamiseksi huomioon on olemassa A-painotuksen lisäksi myös muita painotuksia, mutta A-painotus on vakiintunut käytettäväksi riippumatta äänen voimakkuudesta.



Kuva 2.3. A-painotus ottaa huomioon kuuloaistin herkkyuden vähentämällä kuvan 1 terssikaistaisesta mittaus-tuloksesta matalien ja korkeiden taajuuksien vaikutusta. A-äänitaso on 86 dB.

Taulukko 2.2. Kuvan 2.3 oktaavikaistoittain mitattujen äänenpainetasojen muuttaminen A-painotetuiksi äänitasoiksi.

Oktaavikaistan keskitajuus [Hz]	Äänenpainetaso L_p [dB]	A-painotus [dB]	A-äänitaso L_A [dB]
16	75,7	-56,7	19,0
31,5	80,8	-39,4	41,4
63	99,7	-26,2	73,5
125	95,3	-16,1	79,2
250	84,6	-8,6	76,0
500	78,7	-3,2	75,5
1000	78,8	0	78,8
2000	79	1,2	80,2
4000	75	1	76,0
8000	72,4	-1,1	71,3
16000	61,3	-6,6	54,7

Rakentamismääräykset perustuvat sallittujen äänitasojen ilmoittamiseen yksilukuisina arvoina. Käytännössä tämän voi ajatella tarkoittavan sitä, että kaistanleveys käsittää koko taajuusalueen. Äänenpainetasoja laskettaessa tämä taajuusalue kattaa tavallisesti oktaavikaistat alkaen 63 Hz:stä 4000 Hz:iin tai 8000 Hz:iin. Äänitasmittareiden mitta-alue on yleensä 20 Hz – 20 000 Hz, joten niiden tuottamiin mittaustuloksiin sisältyy ääni koko kuuloalueelta. Oktaavi- tai terssikaistaisista äänitasoista taajuuskaistalla saadaan yksilukuinen arvo laskemalla energieettinen summa, josta käytetään lyhyesti nimitystä äänitaso, L_A :

$$L_A = 10 \lg \sum 10^{L_{A,i}/10} \quad (2.6)$$

Osa rakennetussa ympäristössä toimivista äänilähteistä tuottaa melua jatkuvasti eikä niiden kehittämä ääni juuri muutu ajan suhteen. Esimerkiksi rakennuksen ilmanvaihto ja vilkasliikenteinen liikenneväylä tuottavat suunnilleen samanlaisen äänitason ajasta riippumatta. Toiset äänilähteet vaikuttavat hetkellisesti tai jaksoittain, kuten hissi. Ihmisen subjektiivinen kokemus äänestä riippuu äänen kestoajasta. Hetkellinen voimakas ääni koetaan häiritsevämpänä kuin pitkäkestoinen tasainen ja hiljainen kohina. Äänilähteiden äänenhallinnassa on siksi otettava huomioon sekä pitkäaikainen keskiäänitaso $L_{A,eq,T}$ [dB] ja hetkellinen enimmäisäänitaso $L_{A,max}$ [dB]. Keskiäänitaso tarkoittaa jatkuvaa äänitasa, jonka tehollisarvo on sama kuin vaihtelevan äänitason tehollisarvo jollakin tietyllä mittausaikavälillä T . Keskiäänitaso ei ole vaihtelevan äänitason keskiarvo eikä aikapainotettu keskiarvokaan, vaan hetkelliset äänitason huiput korostuvat keskiäänitasa laskettaessa:

$$L_{A,eq,T} = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt} \quad (2.7)$$

Keskiäänitason arvo riippuu äänilähteen tuottaman äänen kestoajasta ja sen mittaamiseen käytetystä ajasta. Mitä pidempi mittausaika on melulähteen toiminta-aikaan verrattuna, sitä alhaisempi keskiäänitaso on. Jos äänitaso on minuutin ajan 60 dB ja muulloin 30 dB, keskiäänitaso laskettuna 10 minuutin ajalta on 50 dB; tunnin ajalta laskettuna keskiäänitaso on 42 dB.

Enimmäisäänitاسoa $L_{A,max}$ mitattaessa käytetään F- eli fast-aikapainotusta. Tällöin äänitasomittari laskee vaihtelevan äänitason keskiäänitاسoa 250 ms jaksoissa. Tämän on todettu vastaavan varsin hyvin sitä, kuinka kuuloaisti arvioi lyhytaikaisten äänten voimakkuutta. Vaihtelevaa ääntä tuottavan äänilähteen enimmäisäänitaso on suurin mittausajanjakson kuluessa havaittu hetkellinen enimmäisäänitaso.

2.1.4 Äänitehotaso

Äänilähteen kyky tuottaa ääntä ilmoitetaan äänitehona W [W]. Kuulokynnystä vastaavan äänitehon suuruus W_0 on 1 pW. Suunnittelussa käytettävien lukuarvojen yksinkertaistamiseksi käytetään äänitehotاسoa L_W [dB], jossa laitteen äänitehoa verrataan kuulokynnystä vastaavaan vertailuäänitehoon W_0 :

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (2.8)$$

Äänenpainetasojen ja A-painotettujen äänitasojen tavoin laitteiden äänitehotaso määritetään terssi- tai oktaavikaistoittain, joista jälkimmäinen tapa on yleisempi. Äänitehoa tai äänitehotاسoa ei ole mahdollista mitata suoraan, vaan se on määritettävä laskennallisesti esimerkiksi laitteen ympäristössä tunnetulla etäisyydellä mitatusta äänenpainetasosta eri taajuuskaistoilla. Ulkona sijaitsevan äänilähteen äänitehotason perusteella voidaan laskea sen aiheuttama äänenpainetaso kiinnostavalla etäisyydellä äänilähteestä. Samoin sisällä olevan äänilähteen huoneeseen aiheuttama äänitaso voidaan laskea sen äänitehotاسojen perusteella. Äänitehotاسosta ei voida suoraan päätellä, millaiselta jokin äänilähde tietyissä tilassa tai ympäristössä kuulostaa, vaan tilan ja ympäristön ominaisuudet vaikuttavat äänilähteen synnyttämiin äänenpainetasoihin.

2.1.5 Etäisyysvaimennus

Äänilähteen äänitehotason perusteella voidaan laskea sen aiheuttama äänenpainetaso kiinnostavalla etäisyydellä äänilähteestä. Jos pistemäinen äänilähde sijaitsee avaruudessa, jossa ääni pääsee etenemään esteettä samalla tavalla joka suuntaan, äänilähteen tuottama ääniteho jakautuu pallon pinta-alalle, joka on sitä suurempi mitä kauempana äänilähteestä tarkastelupiste on. Tällaisessa palloallossa äänenpainetaso L_p pallon säteen suunnassa etäisyydellä r [m] on

$$L_p = L_w - 10 \lg(4\pi r^2) = L_w - 20 \lg r - 11 \quad (2.9)$$

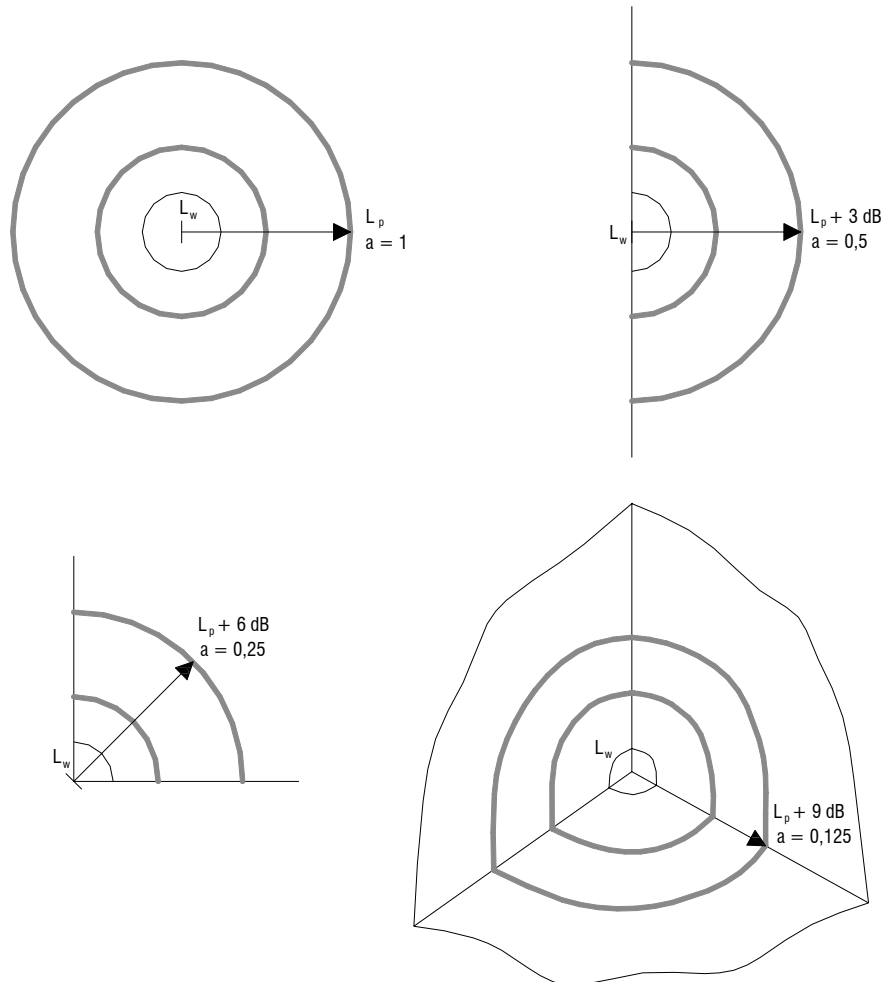
Palloallossa äänenpainetaso L_p laskee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Äänenpainetaso alenemisesta siirryttäessä äänilähteestä kauemmaksi eli kaavan 9 jälkimmäisestä termistä $10 \lg(4\pi r^2)$ käytetään nimitystä etäisyysvaimennus. Vaimennus on tässä esityksessä aina positiivinen luku. Kaavat 9 ja 10 pätevät silloin, kun ääni voi levitä vapaasti joka suuntaan palloaaltona. Rakennetussa ympäristössä on kuitenkin epätodennäköistä, että ääni leviäisi pallon pinta-alalle, vaan pistemäisen äänilähteen ääniteho jakautuu edellä olevan perusteella pallon pinnan jollekin osalle S . Jos tämän pinnan osuus koko pallon pinta-alasta on $a = S / (4\pi r^2)$, pistemäisen äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso L_p etäisyydellä r on

$$L_p = L_w - 10 \lg(a \cdot 4\pi r^2) = L_w - 20 \lg r - 11 - \lg a \quad (2.10)$$

Useimmissa suunnittelutapauksissa äänenpainetaso L_p saadaan lasketuksi muutamasta perustapauksesta. Esimerkiksi pinta-ala, jolle jollain laajalla tasolla, kuten katolla sijaitsevan äänilähteen aiheuttama ääniteho jakautuu, on puolipallo. Puolipallon pinta-alalle jakautuva ääniteho johtaa 3 dB korkeampaan äänenpainetasoon kuin koko pallon alalle jakautuva ääniteho ($-10 \lg(0,5) = 3$). Vastaavasti kahden seinän muodostamassa kulmassa olevan äänilähteen ääniteho jakautuu neljännespallon alalle, jolloin sen aiheuttama äänenpainetaso on 6 dB korkeampi kuin äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso, kun ääniteho jakautuu koko pallon alalle. Eri tavoin sijaitsevien äänilähteiden aiheuttama äänitaso tai äänenpainetaso jollakin etäisyydellä voidaan määrittää laskemalla ensin äänenpainetaso kokonaisessa palloallossa kaavalla 9 tai 10. Tämän jälkeen tulokseen lisätään äänitehon palloaaltoa pienemmälle alalle tapahtuvasta jakautumisesta johtuva korjaus seuraavasti (kuva 2.4):

- äänilähteen sijaitessa tasolla (puolipallo) kaavan 9 tai 10 mukaan laskettuun ääni- tai äänenpainetasoon lisätään 3 dB.
- äänilähteen sijaitessa kahden toisiaan vastaan kohtisuoraan olevan pinnan muodostamassa kulmassa (neljännespallo) kaavan 9 tai 10 mukaan laskettuun ääni- tai äänenpainetasoon lisätään 6 dB.

- äänilähteen sijaitessa kolmen toisiaan vastaan kohtisuorassa olevan pinnan muodostamassa nurkassa (pallon kahdeksasosa) kaavan 9 tai 10 mukaan laskettuun ääni- tai äänenpainetasoon lisätään 9 dB.



Kuva 2.4. Pistemäisen äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso riippuu pinta-alasta, jolle äänilähteen ääniteho jakautuu. Kuvasta nähdään pinta-alan pienenemisen vaikutus verrattuna äänenpainetasoon L_p , joka vallitsee silloin, kun ääniteho jakautuu palloallossa pallon koko pinta-alalle.

Äänenpainetaso jollakin etäisyydellä äänilähteestä riippuu myös äänilähteen suuntaavuudesta, joka ilmoitetaan suuntakertoimena k . Tämä tarkoittaa sitä, että äänilähde voi lähettää äänitehoa eri tavalla eri suuntiin. Suuntakertoimen arvo vaihtelee taajuudesta ja vastaanottopisteen ja äänilähteen välisestä kulmasta. Palloallossa äänenpainetaso suuntaavuus huomioon otettuna on

$$L_p = L_w - 10 \lg(a \cdot 4\pi r^2) + 10 \lg k = L_w - 20 \lg r - 11 - 10 \lg a + 10 \lg k \quad (2.11)$$

Äänilähteen suuntaavuus siten korottaa äänenpainetasoa palloaallossa. Suuntaavuustietoja ei esimerkiksi rakennusten LVIS-laitteista useinkaan ole saatavilla, joten usein niitä käsitellään pistemäisinä äänilähteinä, joiden ympärille syntyy palloaalto, jossa suuntakerroin on 1. Erikokoisten ja –muotoisten aukkojen suuntakertoimia on annettu alan kirjallisuudessa. Jos otetaan käyttöön avaruuskulman Q käsite – pallopinnalla avaruuskulma on 4π , puolipallopinnalla 2π – ja otetaan huomioon äänilähteen suuntaavuus, äänenpainetaso palloaallossa on

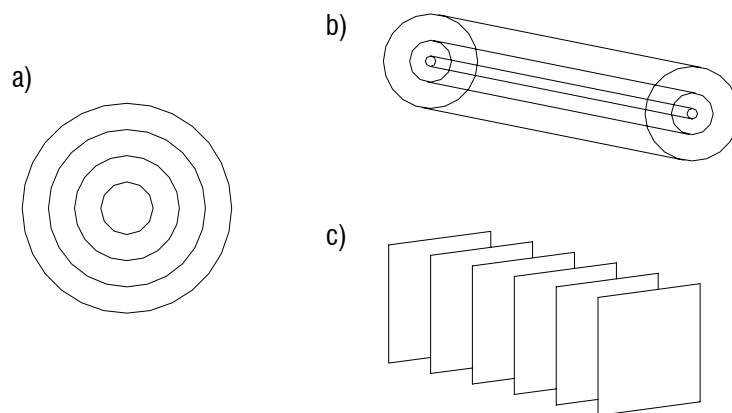
$$L_p = L_w - 10 \lg\left(\frac{Qr^2}{k}\right) \quad (2.12)$$

Palloaallon lisäksi toinen yleinen tapa kuvata ulkona sijaitsevan äänilähteen toimintaa on sylinteriaalto (kuva 2.5), jollaisena voidaan pitää vilkasliikenteistä liikenneväylää. Äänenpainetaso sylinteriaallossa on

$$L_p = L_w - 10 \lg(2\pi r) = L_w - 10 \lg r - 8 \quad (2.13)$$

Kaava 13 perustuu siihen, että ääniteho jakautuu sylinterin koko vaipan alalle. Jos sylinterilähde sijaitsee tasolla, äänenpainetaso on 3 dB korkeampi. Sylinteriaallossa äänenpainetaso laskee 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa.

Pinta-alaltaan suuresta tasomaisesta äänilähteestä, esimerkiksi ilmanvaihtokonehuoneen tai teollisuushallin seinästä, leviävä ääni muistuttaa tasoaaltoa, jossa hyvin lyhyillä etäisyyksillä äänenpainetaso ei laske lainkaan etäisyyden vaikutuksesta. Ilmanvaihtokonehuoneen tapauksessa lyhyt etäisyys tarkoittaa noin 1 m etäisyyttä. Hieman kauempana tasoaalto alkaa vaimentua sylinteriaalton tavoin (konehuoneen tapauksessa tyypillisesti noin 1-5 m) ja vielä kauempana palloaallon tavoin.



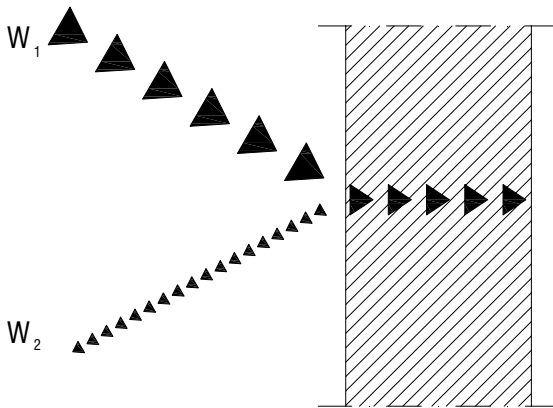
Kuva 2.5. Äänen leviäminen palloaaltona (a), sylinteriaaltona (b) ja tasoaaltona (c).

2.2 Äänenpainetaso huoneessa

2.2.1 Absorptio

Huoneessa äänilähteen synnyttämä ääniaalto kohtaa seinä-, lattia- ja kattorakenteita, joista se heijastuu takaisin huonetilaan. Pinnasta heijastuneen ääniaallon ääniteho ei ole yhtä suuri kuin pinnan kohdanneen ääniaallon ääniteho: vain osa äänitehosta heijastuu ja osa siirtyy pinnan kautta rakenteeseen. Rakenteeseen siirtynyt ääniteho muuttuu lämmöksi tai ääniaallon liike-energia muuttuu muotoaan: hiukkasten liike saa rakenteen värähtelemään. Heijastumatta jäänyt ääniteho on absorboitunut (kuva 2.6). Materiaalin kykyä absorboida äänitehoa kuvaa absorptiosuhde α , joka on materiaalin pinnan kohdanneen äänitehon W_1 ja pinnasta heijastumatta jääneen äänitehon $W_1 - W_2$ suhde:

$$\alpha = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (2.14)$$



Kuva 2.6. Ääni heijastuu ilman ja toisen aineen rajapinnassa, mutta osa äänitehosta jää heijastumatta ja absorboituu toiseen aineeseen.

Absorptiosuhde on positiivinen luku, jonka arvo on pienempi kuin 1. Kunkin materiaalin absorptiosuhteen arvo ei ole vakio, vaan se riippuu taajuudesta: materiaalien absorptiosuhteet mitataan oktaavikaistoittain 125-4000 Hz keskitäajuuksilla, nykyisin yleensä myös 63 Hz keskitäajudella (kuva 2.7). Erilaisista absorptiomateriaaleista kerrotaan tarkemmin huoneakustiikkaa käsittelevän luvun yhteydessä. Materiaalien absorptioky-

kyä käytetään hyväksi, kun halutaan alentaa äänitasoa tilassa, jossa äänilähde sijaitsee. Esimerkiksi teollisuuslaitoksissa, joissa on äänekkäitä koneita, tarvitaan paljon absorptiota äänitason alentamiseksi. Samoin absorptioon avulla luodaan puheelle tai musiikkiesityksille suotuisat olosuhteet esimerkiksi luokkahuoneissa, auditorioissa, teattereissa ja konserttisaleissa.

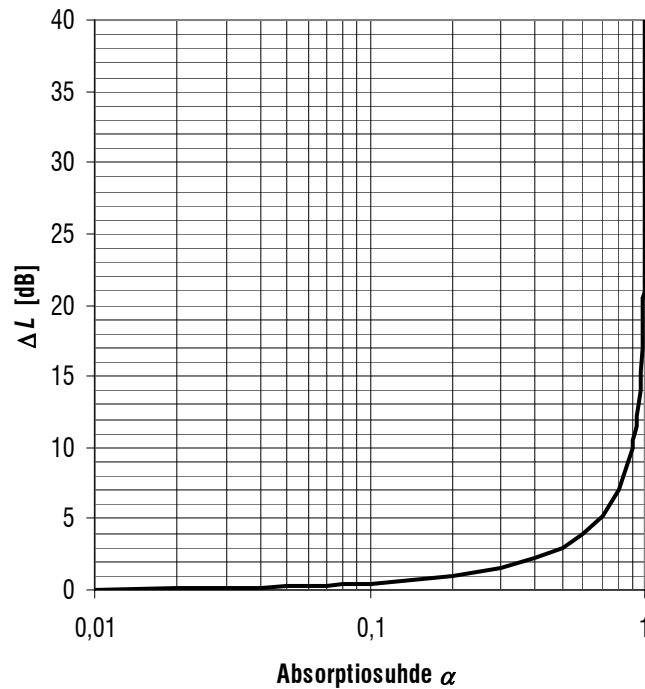
Äänen heijastuessa pinnasta ääniteho alenee absorptioon vaikutuksesta. Pinnan kohdanneen ja pinnasta heijastuneen äänitehotason alenema desibeleissä on ΔL :

$$\Delta L = 10 \lg \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2.15)$$

Absorptiosuhteen ollessa 0 äänitehotaso ei alene lainkaan, vaan heijastus on täydellinen (kuva 2.8). Alenema ΔL on alle 1 dB, kun absorptiosuhde on 0,2. Absorptiosuhteen lähestyessä arvoa 1 ΔL on useita kymmeniä desibelejä. Materiaalien valinta ja absorptioon määrä erilaisissa huonetiloissa riippuu käyttötarkoituksesta: mahdollisimman suuri absorptiosuhde ei välttämättä tarkoita sitä, että huoneen ääniolosuhteet olisivat hyvät, sillä esimerkiksi puhetiloissa pitää olla pintoja, joista puhujan ääni heijastuu kuulijalle.



Kuva 2.7. Materiaalien absorptiosuhteet mitataan laboratoriossa, jonka seinät ovat kovia, lähes täysin heijastavia pintoja.



Kuva 2.8. Äänen heijastuessa tapahtuvan äänitehotason aleneman ΔL riippuvuus absorptiosuhteesta.

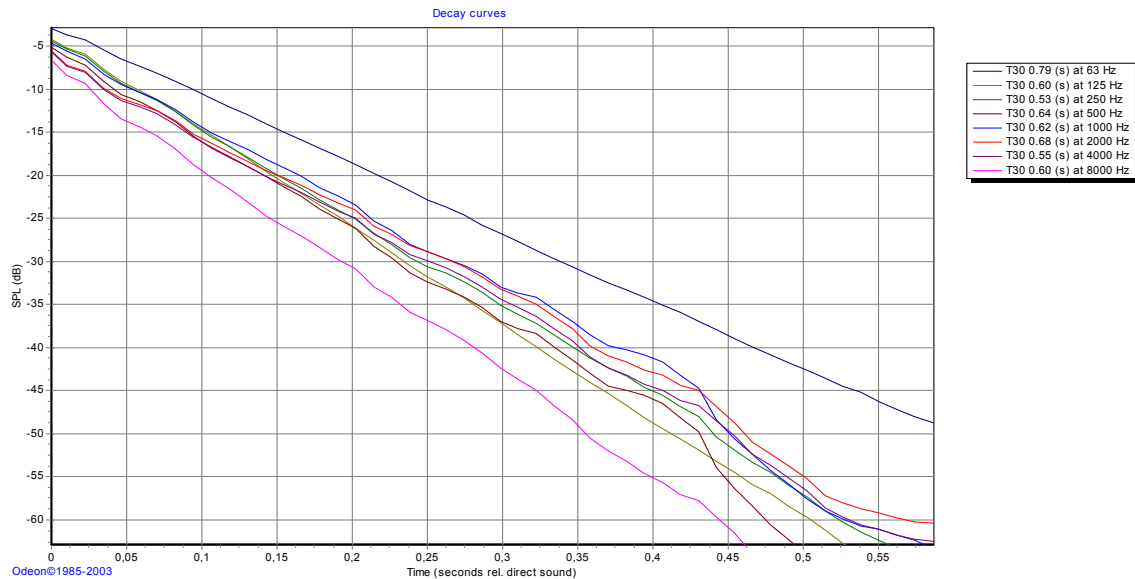
2.2.2 Jälkikaiunta-aika

Huoneen pinnoilla olevien materiaalien absorptiosuhteiden α_i ja niiden pinta-alojen S_i [m²] perusteella voidaan laskea huoneen absorptioala kullakin oktaavikaistan keskitajuudella. Yhden huoneessa olevan materiaalin absorptioala on materiaalin absorptiosuhteen ja sen pinta-alan tulo. Koko huoneen absorptioala on sen kaikkien pintamateriaalien absorptioalojen summa:

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2.16)$$

Jälkikaiunta-aika T [s] kuvaa, kuinka nopeasti äänilähteen tilaan synnyttämä äänenpainetaso laskee, kun äänilähde lopettaa toimintansa. Mitä lyhyempi jälkikaiunta-aika on, sitä nopeammin puheen tavut vaimenevat; mitä pitempi jälkikaiunta-aika on, sitä enemmän tavut jäävät soimaan toistensa päälle ja puheen selvyys kärsii. Puhe- ja muissa esiintymistiloissa jälkikaiunta-ajan lyhentäminen parantaa ääniolosuhteita tiettyyn raajaan saakka: jos absorptioala on liian suuri, puheen äänitaso laskee, mikä puolestaan heikentää puheen selvyyttä. Jälkikaiunta-ajan kuluessa äänenpainetaso tilassa alenee 60 dB. Olemassa olevan tilan jälkikaiunta-aika voidaan määrittää voimakkaan äänilähteen avulla niin, että äänilähde sammutetaan äkillisesti ja äänenpainetason laskuun kuluva aika mitataan (kuva 2.9). Jälkikaiunta-ajalla, tilavuudella V [m³] ja absorptioalalla on alkuaan kokeellisesti johdetun Sabine kaavan mukainen yhteys:

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (2.17)$$



Kuva 2.9. Äänen vaimeneminen tilassa riippuu taajuudesta. Pystyakseli kuvaa äänenpainetasoa alkuperäiseen äänenpainetasoon verrattuna, vaaka-akseli osoittaa aikaa.

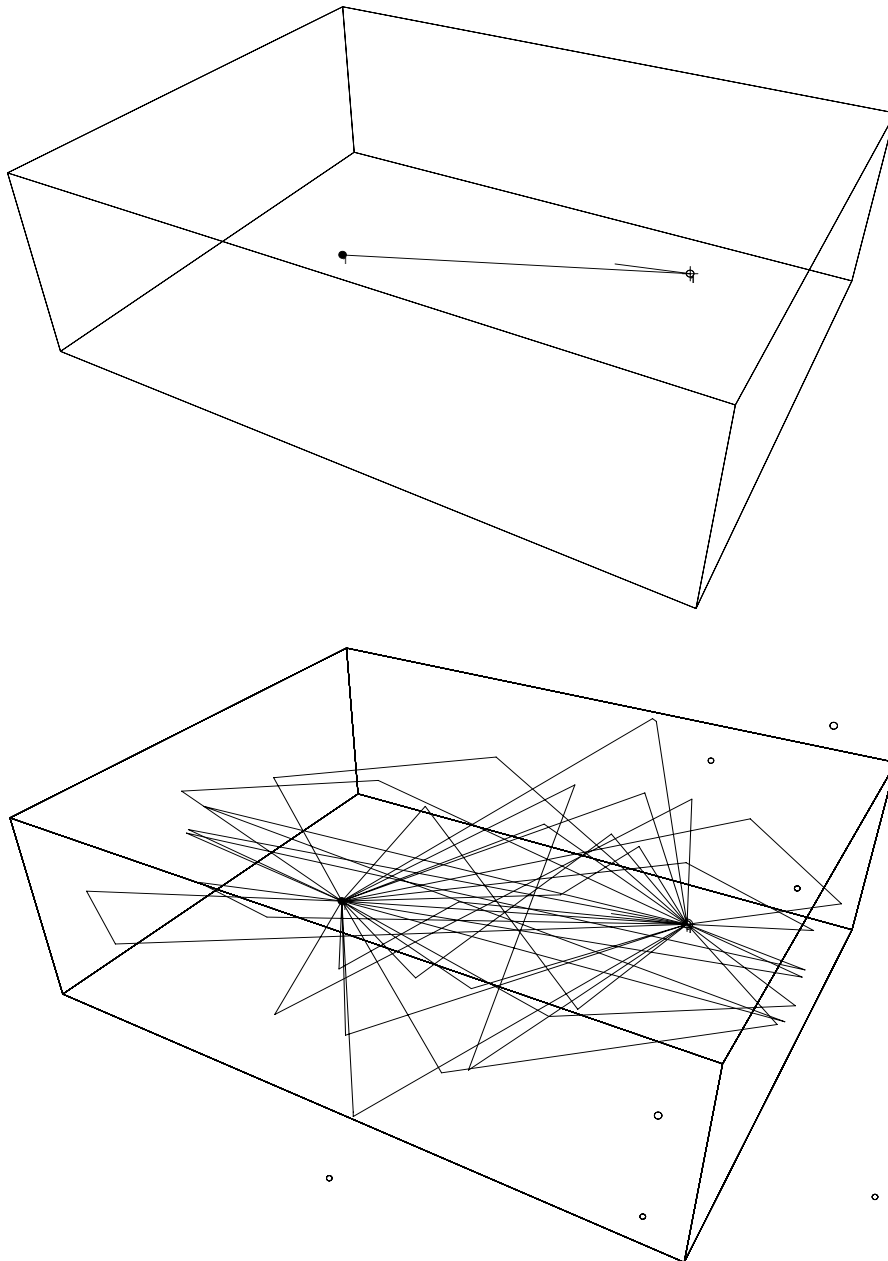
Sabinen kaavaa käytetään suunnittelussa, kun määritetään tilan käyttötarkoituksen perusteella tavoiteltavan jälkikaiunta-ajan saavuttamiseksi tarvittava absorptio-ala taajuuskaistoittain. Muiden akustiikan suureiden tavoin jälkikaiunta-aika riippuu taajuudesta (kuva 2.9). Monimutkaisissa tiloissa ja tiloissa, joissa absorptioala on erittäin suuri, Sabinen kaava ei päde. Sen antamat tulokset eivät ole oikeat siinäkään tapauksessa, että tilan koko absorptioala on keskitetty yhteen pintaan ja muut ovat lähes täysin heijastavia. Esimerkkejä erilaisten tilojen jälkikaiunta-ajoista on taulukossa 2.3.

Taulukko 2.3. Erilaisten tilojen jälkikaiunta-aikoja 500 Hz keskitaajuudella.

Jälkikaiunta-aika	Esimerkki tilasta
> 5 s	Tampereen tuomiokirkko tyhjänä
2 s...3 s	Suuri aula, jossa ei vaimennusta
1,8 s	Tampere-talon iso sali
1,5 s	Kalustamaton makuuhuone
1,0 s...1,2 s	Teatteri, auditorio
0,6 s...0,8 s	Hyvin suunniteltu luokkahuone
0,5 s	Kalustettu makuuhuone
0,3 s...0,8 s	Elokuvateatteri tilavuudesta riippuen
0,2 s...0,3 s	Äänitarkkaamo tilavuudesta riippuen

2.2.3 Huoneen äänikentän muodostuminen

Äänilähteen aloittaessa toimintansa huoneessa kuulija havaitsee ensimmäisenä suoraan äänilähteestä korvaan tulleen äänen (kuva 2.10). Pian tämän jälkeen kuulijan korvaan saapuvat ensimmäiset heijastukset seinistä, katosta ja lattiasta. Huoneen kaikista pinnoista heijastuvat äänet korottavat äänenpainetasoa suoraan tulleen äänen äänenpainetasoon verrattuna. Jos huoneen pinnat olisivat täydellisesti heijastavia eikä äänilähteen ääniteho absorboituisi lainkaan edes ilman vaikutuksesta, äänenpainetaso kasvaisi huoneessa äärettömän suureksi.

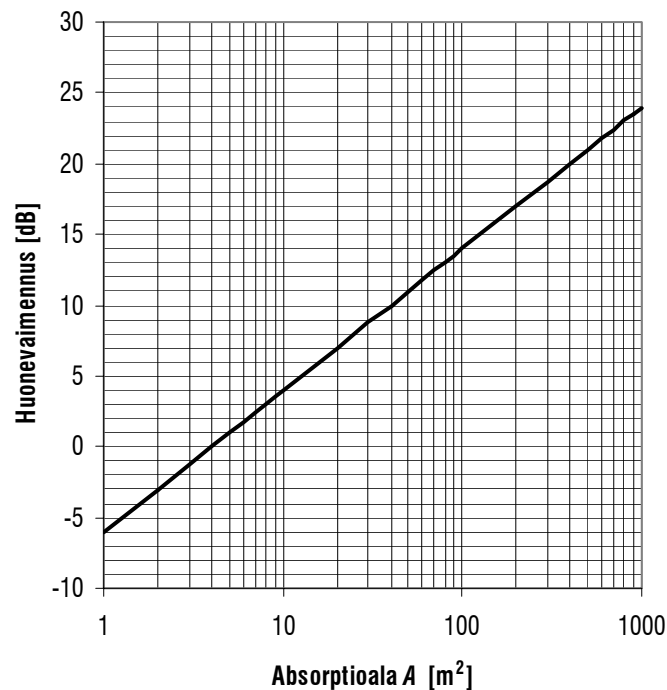


Kuva 2.10. Ääni saapuu vastaanottopisteeseen ensimmäisenä suoraan äänilähteestä. Sen jälkeen vastaanottopisteessä havaitaan heijastuksia huoneen eri pinnoista.

Äänilähteen huoneeseen tuottamaa äänenpainetasoa määritettäessä huoneen äänikenttä oletetaan diffuusiksi. Diffuusissa äänikentässä jatkuvasti samalla ääniteholla toimiva äänilähde tuottaa tarkastelupisteeseen ääntä yhtä paljon kaikista suunnista, ja tilanne säilyy samana ajan suhteen ja muutettaessa tarkastelupisteen paikkaa. Diffuusissa äänikentässä äänenpainetaso riippuu absorptioalasta:

$$L_p = L_w - 10 \lg\left(\frac{A}{4}\right) \quad (2.18)$$

Kaavan jälkimmäistä termiä $10 \lg(A/4)$ sanotaan usein huonevaimennukseksi. Tiloissa, joissa absorptioala on enemmän kuin 4 m^2 , huonevaimennus on positiivinen. Kun tilan pinnat ovat lähes täysin heijastavia, huonevaimennus on negatiivinen: tällöin ääniteho ei pääse absorboitumaan ja äänenpainetaso kasvaa äänitehotasoa suuremmaksi (kuva 2.11).



Kuva 2.11. Absorptioalan kaksinkertaistuessa huonevaimennus kasvaa 3 dB eli äänenpainetaso huoneessa vastaavasti alenee 3 dB.

Kaava 2.18 ottaa huomioon vain huoneen pinnoista heijastuneen äänen. Lähellä äänilähdettä myös suoraan äänilähteestä tarkastelupisteeseen saapuneella äänellä on vaikutusta äänenpainetasoon. Kun otetaan huomioon sekä huonevaimennus diffuusissa kentässä että suoraan tarkastelupisteeseen tullut ääni, äänenpainetaso on

$$L_p = L_w - 10 \lg \left(\frac{1}{\frac{k}{Qr^2} + \frac{4}{A}} \right) \quad (2.19)$$

Suoraan tulevan äänen vaikutus äänenpainetasoon on kaavan 2.18 mukaan varsin pieni eikä sitä ole yleensä tarpeen ottaa huomioon. Tavallisesti huoneeseen syntyvä äänenpainetaso voidaan laskea huonevaimennuksen perusteella olettamalla huoneen äänikenttä diffuusiksi.

3

Ilmaääneneristys

”Eri rakennusaineiden äänenjohtokyky on erilainen ja asia mutkistuu sen vuoksi, että sama aine johtaa erijaksoisia ääniä eri tavoin; lisäksi on otettava huomioon, onko rakenne yksinkertainen vai yhdistetty.”

Diplomi-insinööri U. Varjo 1938

3.1 Yksinkertaiset rakenteet

3.1.1 Ilmaääneneristävyys

Ilmaääneneristyksen tarkoituksena on vähentää puheen, musiikin, soitinten, äänentoiston tai teknisten laitteiden huonetilaan synnyttämän ilmaäänien siirtymistä toiseen huonetilaan. Ilmaääntä tuottava äänilähde saa ympärillään olevan ilman värähtelemään. Huonetta rajaavat seinä-, katto- ja lattiapinnat värähtelevät niihin kohdistuvan äänitehon vaikutuksesta. Rakenteen värähtely saa sen toisella puolella olevan huonetilan ilman värähtelemään, jolloin toiseen huonetilaan välittyy jokin ääniteho. Ilmaääneneristävyys R [dB] määritellään rakenteen kohdanneen äänitehon W_1 ja sen toiselle puolelle siirtyneen äänitehon W_2 suhteen perusteella (kuva 3.1):

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \quad (3.1)$$

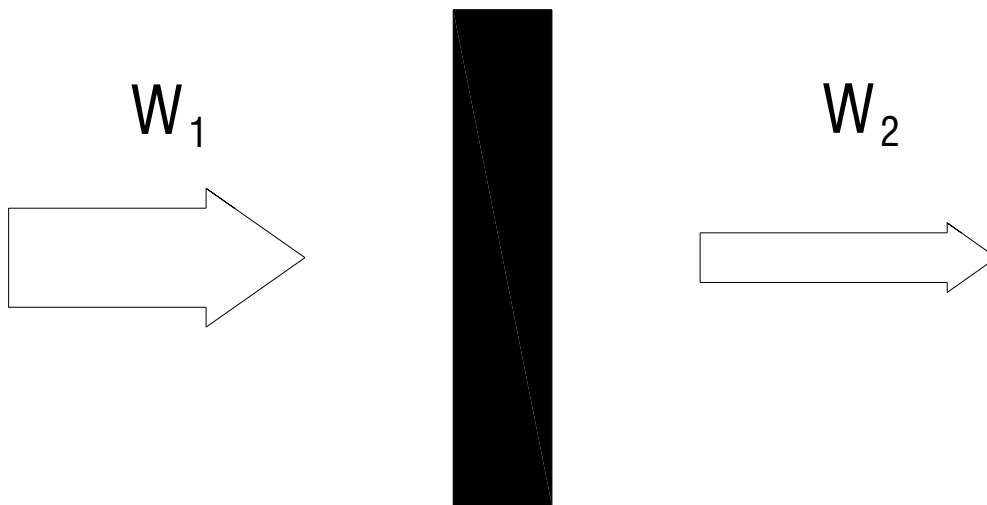
Ilmaääneneristävyuden määritelmä tarkoittaa, että rakenteen ilmaääneneristävyuden ollessa 10 dB toiseen tilaan välittyy yksi kymmenesosa rakenteen kohdanneesta äänitehosta. Äänitehosta välittyy rakenteen toiselle puolelle yksi tuhannesosa äänitehosta, kun ilmaääneneristävyys on 30 dB ja yksi miljoonasosa, kun ilmaääneneristävyys on 60 dB.

Ilmaääneneristävyys ei ole taajuudesta riippumaton, vaan muiden akustiikan suureiden tavoin rakenteen käyttäytyminen riippuu taajuudesta. Jokaisen rakenteen ilmaääneneristävydessä on erotettavissa rajataajuuksia, joilla niiden käyttäytyminen muuttuu. Rajataajuudet riippuvat rakenteiden massasta, paksuudesta ja jäykkyydestä. Samat ääneneristävyteen liittyvät ilmiöt esiintyvät kaikilla rakenteilla, mutta rajataajuuksien paikat ovat erilaisia.

Ilmaääneneristävyys on rakennusosan tai rakennusosien muodostaman kokonaisuuden ominaisuus. Tilaan syntyvä äänenpainetaso ja viereisestä tilasta siirtyvän äänitehon kuuluminen riippuu monesta muustakin tekijästä. Ensinnäkin tilaan välittyvä ääniteho W_2 riippuu paitsi ilmaääneneristävydestä, myös viereisessä tilassa olevasta äänitehosta W_1 . Tilaan toisesta tilasta välittynyt ääniteho W_2 vaimenee sitä enemmän, mitä suurempi absorptioala tilassa on. Absorption lisääminen ei kuitenkaan kasvata ilmaääneneristävyttä, vaan se vaikuttaa pelkästään tilaan syntyvään äänenpainetasoon. Viereisestä tilasta tulevan äänitehon vaimentaminen absorptiota lisäämällä on ääneneristykseen verrattuna melko tehoton keino: absorptioalan kaksinkertaistaminen alentaa äänenpaine-

tasoa 3 dB, mutta ääntä eristävien rakenteiden ilmaääneneristävyydet ovat taajuudesta riippuen yleensä 20-70 dB.

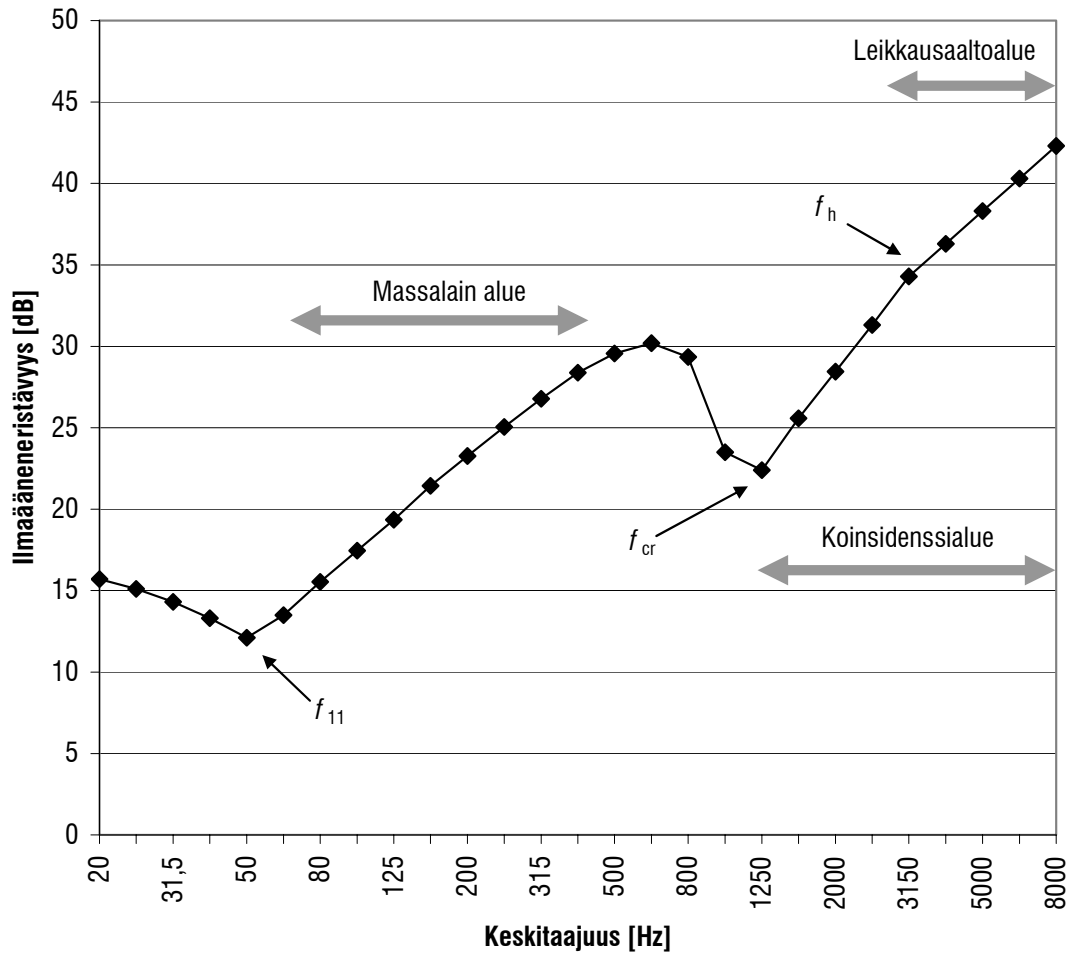
Viereisestä tilasta välittyvän äänen kuuluminen riippuu lisäksi siitä, kuin paljon tilassa jo on ääntä: mitä enemmän taustääntä on, sitä enemmän se peittää viereisestä tilasta välittyvää ääntä. Pelkästään rakenteiden ilmaääneneristävyyksien perusteella ei siten voida päätellä tilaan muodostuvia ääniolosuhteita. Ääneneristysmääräykset perustuvat kuitenkin rakennusten ilmaääneneristävyyden arvioimiseen, koska esimerkiksi asuinrakennuksissa kalustus on joka huoneistossa erilainen eikä sen absorptiota voida ottaa huomioon määräysarvoja asetettaessa.



Kuva 3.1. Ilmaääneneristävyys R määritellään rakenteen kohdanneen äänitehon W_1 ja sen toiselle puolelle siirtyneen äänitehon W_2 suhteen perusteella.

3.1.2 Rajataajuudet [30]

Kuvassa 3.2 on esitetty esimerkkirakenteen ilmaääneneristävyys kolmannesoktaavikaisesti taajuuksilla 20-8000 Hz. Kuvasta voidaan erottaa kolme rajataajuutta, joilla rakenteen ääneneristävyys heikkenee ja rakenteen käyttäytyminen muuttuu. Tavallisesti nämä rajataajuudet sijoittuvat kuvassa esitetyllä tavalla: matalin on rakenteen alin ominaistajuus f_{11} , keskimmäisenä on koinsidenssin rajataajuus f_c ja korkein leikkausaaltoalueen rajataajuus f_h . Rajataajuuksista tärkein on koinsidenssin rajataajuus, koska usein sijaitsee ilmaääneneristykseen kannalta kiinnostavalla taajuusalueella 50-3150 Hz.



Kuva 3.2. Yksinkertaisen rakenteen ilmäeneneristävyys riippuvuus taajuudesta. Rajataajuuksien paikat riippuvat rakenteen massasta ja jäykkyydestä. Matalien äänten eristäminen on aina vaikeampaa kuin korkeiden.

Suorakaiteen muotoisen levymäisen rakenteen alin ominaistajuus riippuu sen kiinnityksistä ympäröiviin rakenteisiin ja sivumitoista l_x ja l_y [m]. Se voidaan laskea koinsidenssin rajataajuuden f_c perusteella. Reunoiltaan nivelin tuetun levyn alin ominaistajuus on

$$f_{11} = \frac{c^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right) \quad (3.2)$$

Tavallisesti rakenteiden alimmat ominaistajuudet ovat niin alhaisia, että ne ovat ääneneristykseen kannalta kiinnostavan taajuusalueen ulkopuolella. Alimman ominaistajuuden yläpuolella rakenteen ilmäeneneristävyys noudattaa massalakea, jonka mukaan ilmäeneneristävyys riippuu rakenteen pintamassasta m' [kg/m²] ja taajuudesta f :

$$R_0 = 20 \lg m' + 20 \lg f - 47 \quad (3.3)$$

Pienillä taajuuksilla ilmaääneneristävyys voidaan laskea tarkemmin, kun otetaan huomioon, että matalalla taajuusalueella ääntä kohdistuu rakenteen pinta-alalle vähemmän kuin korkeilla taajuuksilla. Massalakiin voidaan tehdä korjaus, joka riippuu taajuudesta sekä rakenteen sivumitoista l_x ja l_y . Korjaus on sitä pienempi, mitä suurempi rakenteen pinta-ala on [18]:

$$R_0 = 20 \lg m' + 20 \lg f - 42 - 10 \lg \left(\ln \left(\frac{2\pi f}{c} \sqrt{l_x l_y} \right) \right) \quad (3.4)$$

Massalain mukaan ilmaääneneristävyys paranee 6 dB rakenteen pintamassan tai taajuuden kaksinkertaistuessa. Ilmaääneneristävyys lisääntyy taajuuden kasvaessa massalain mukaisesti, kunnes taajuus on noin puolet koinsidenssin rajataajuudesta f_c (kuvat 3.2 ja 3.3) Tällöin ilmaääneneristävyden kasvu hidastuu ja rajataajuutta lähestyttäessä ilmaääneneristävyys heikkenee, kunnes koinsidenssin rajataajuudella saavutetaan minimi. Rakenteeseen kohdistuva ääniteho taivuttaa rakennetta, jolloin rakenteeseen syntyy taivutusaalto. Toisin kuin äänen nopeus ilmassa, taivutusaallon nopeus rakenteessa riippuu taajuudesta. Koinsidenssin rajataajuudella f_c äänen nopeus ilmassa on yhtä suuri kuin taivutusaallon nopeus rakenteessa. Rajataajuus riippuu laatan taivutusjäykkyydestä B ja pintamassasta m' [kg/m^2]:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad (3.5)$$

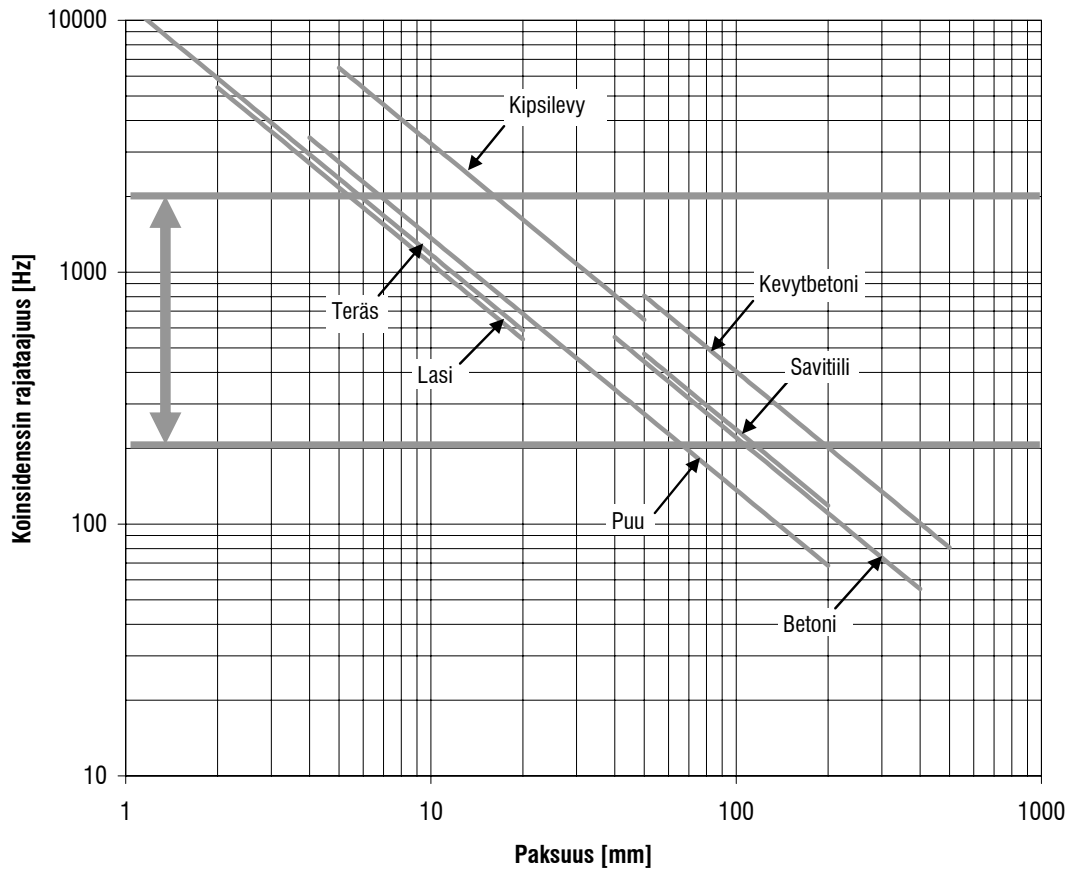
Äänen nopeutena ilmassa c [m/s] käytetään arvoa 340 m/s . Laatan taivutusjäykkyys lasketaan kimmomoduulin E [N/m^2], Poisson'n vakion ν ja rakenteen paksuuden h [m] perusteella:

$$B = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{h^3}{12} \quad (3.6)$$

Koinsidenssin rajataajuus on sitä alhaisempi, mitä suurempi rakenteen kimmomoduuli ja rakennepaksuus ovat ja mitä pienempi rakenteen pintamassa on. Raskaan ja jäykän rakenteen, kuten paksun betoniseinän, koinsidenssin rajataajuus on pieni; kevyen ja joustavan rakenteen, kuten kipsilevyn, rajataajuus on suuri.

Koinsidenssi-ilmiö on suurimmillaan rajataajuudella f_c , jota korkeammilla taajuuksilla rakenteen ilmaääneneristävyys alkaa lähestyä massalain mukaista eristävyttä. Taivutusaaltojen lisäksi rakenteessa esiintyy leikkausaaltoja, kun rakenteen paksuus h [m] on suuri. Leikkausaalto vaikuttaa ilmaääneneristävyyteen rajataajuuden f_h yläpuolella. Rajataajuus riippuu koinsidenssitaajuudesta ja rakenteen paksuudesta:

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left(\frac{c}{6h} \right)^2 \quad (3.7)$$



Kuva 3.3. Rakennusaineiden koinsidenssin rajataajuuksia f_c rakenteen paksuuden funktiona. Kuvaan on merkitty vaakasuorilla viivoilla taajuusalue, jonka ulkopuolella rajataajuuden tulisi yleensä olla.

Rakenteen ilmasteneristävyyden laskenta jakautuu kolmeen osaan rajataajuuksien perusteella. Neljäs osa voisi olla ilmasteneristävyyden laskenta alimman ominaistajuuden alapuolella, mutta koska alin ominaistajuus yleensä on matalampi kuin rakennusakustiikassa käsiteltävän taajuusalueen alaraja, sitä matalampia taajuuksia ei yleensä ole tarpeen käsitellä. Esitettävät laskentakaavat eivät sisällä rakennetta tukevien rankojen, palkkien tai muiden rakennetta jäykistävien tukien vaikutusta. Rakenteen ilmasteneristävyys on eri taajuusalueilla

$$R = R_0 + 20 \lg \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) \quad f < f_c \quad (3.8)$$

$$R = R_0 + 10 \lg \eta + 10 \lg \frac{f}{f_c} + 3 \quad f \geq f_c \quad (3.9)$$

$$R = R_0 + 10 \lg \eta + 10 \lg \frac{f}{f_c} - 10 \lg \left(\frac{f}{5f_h} + \sqrt{\left(\frac{5}{f_h} \right)^2 + 1} \right) + 3 \quad f > f_h \quad (3.10)$$

Kaavoissa 3.9 ja 3.10 η on rakenteen häviökerroin, joka kuvaa kuinka värähtely rakenteessa vaimenee. Häviökerroin koostuu muun muassa materiaalin sisäisestä häviökertoimesta η_{int} , joka on materiaaliominaisuus, ja rakenteen kytkennöistä muihin rakenteisiin. Kun rakenteen pintamassa m' on enintään 800 kg/m^2 , häviökertoimelle voidaan käyttää arvoa [7]

$$\eta = \eta_{\text{int}} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (3.11)$$

Häviökerroin vaikuttaa erityisesti siihen, kuinka suuri ilmaaneneristävyyden heikennys on koinsidenssin kriittisellä taajuudella. Rakennusaineiden materiaaliominaisuuksia on esitetty taulukossa 3.1. Materiaalitietojen puuttuessa kohtuullisen hyvä oletus on valita Poisson'n vakion arvoksi $0,2 \dots 0,3$ ja sisäisen häviökertoimen arvoksi $0,01$.

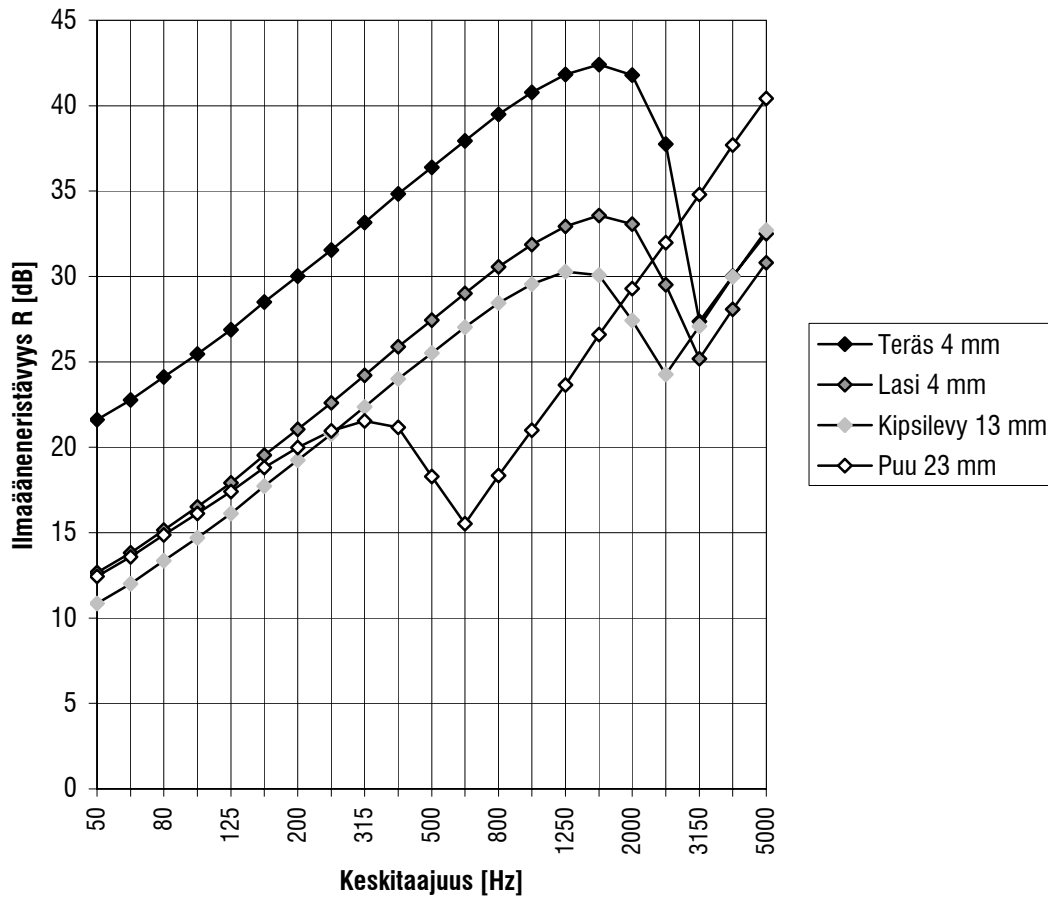
Taulukko 3.1. Yleisimpien rakennusaineiden materiaaliominaisuuksia. [7, 18, 30]

Rakennusaine	Tiheys ρ [kg/m ³]	Kimmomoduuli E [MPa]	Poisson'n vakio ν	Sisäinen häviökerroin η_{int}
Betoni	2400...2500	20000...40000	0...0,2	0,005...0,02
Kevytbetoni	400...600	1000...1400		0,01...0,015
Kevytsorabetoniharkko	650	3000		
Savitiili	1200...1800	5000...25000		0,01
Kalkkikiikkakivi	1800...2000	7500...10000		
Kipsilevy N	700	2000...3000		0,006...0,022
Kipsilevy EK	880	3200		
Ikkunalasi	2500...3000	70000...75000	0,24	0,006...0,02
Teräs	7850	210000	0,3	0,0001...0,0006
Alumiini	2700	70000	0,33	0,0001...0,0006
Lyijy	11300	17000	0,45	0,05...0,3
Puu	350...600	5500...10000		0,01...0,02
Lastulevy	600...800	2500...3500		0,01

3.1.3 Rakennuslevyt

Ääntä eristävissä rakenteissa käytettävien rakennuslevyjen ja muiden levymäisten tuotteiden pintamassa on noin 5-35 kg/m². Akustiselta toiminnaltaan ne ovat yksinkertaisia ohuita levyrakenteita, joiden koinsidenssin rajataajuus on yleensä yli 2000 Hz. Esi-merkkejä tällaisista rakennusaineista ovat kipsilevy, puukipsilevy, lasi ja teräs. Koska pintamassa on pieni, massan lisäyksellä saavutetaan selvä parannus rakennuslevyjen ääneneristävyyteen, kunhan koinsidenssitaajuus ei muutu. Tavoiteltava koinsidenssin rajataajuus ratkaisee, kuinka paksuja levyjä kustakin rakennusmateriaalista kannattaa tehdä. Kuvasta 3.3 nähdään, millaisia rakenteiden paksuuksien tulisi olla, kun tavoitellaan ääneneristystä:

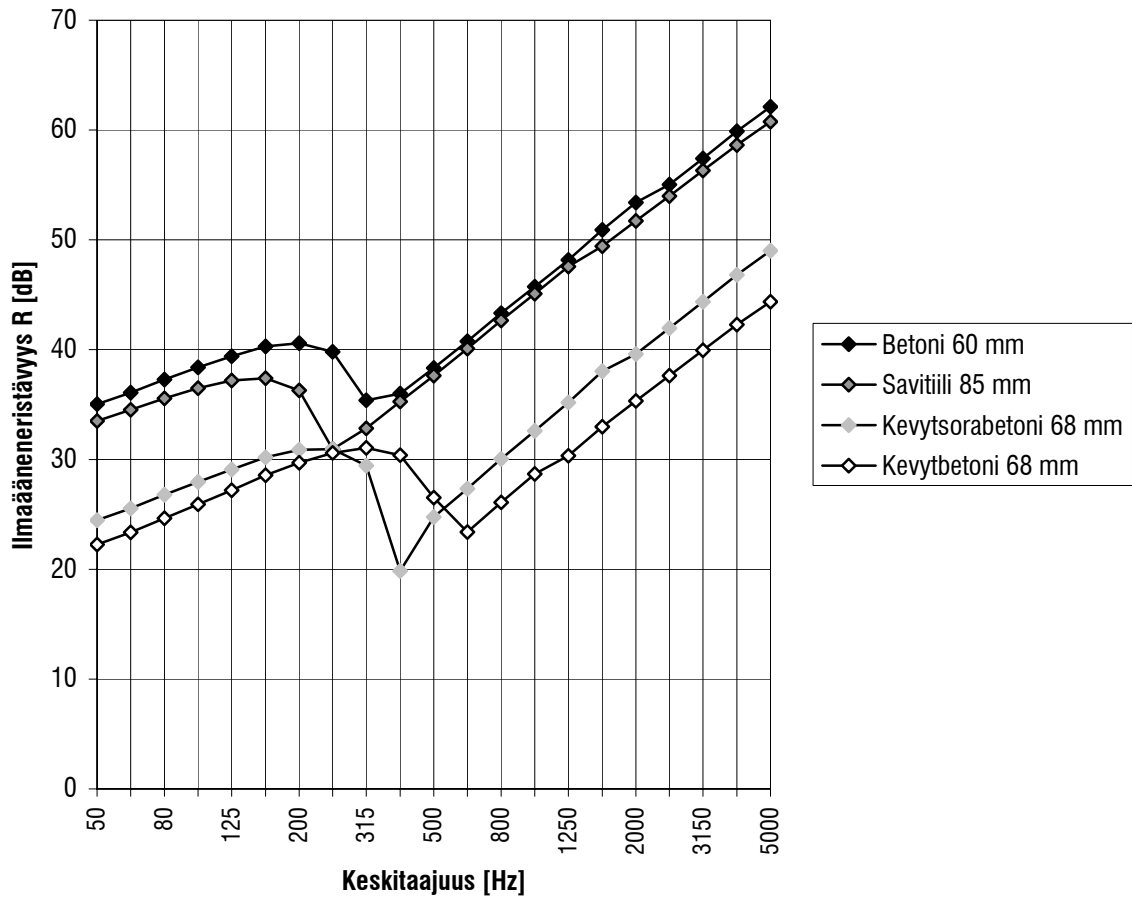
- ääntä eristävää lasia ei kannata tehdä 6 mm paksummaksi. Jos yksinkertaisen lasituksen ilmaääneneristävyyttä halutaan parantaa, lasi voidaan laminoida. Tällöin lasitukselle saadaan lisää massaa, mutta koinsidenssitaajuus jää yli 2000 Hz:n.
- haluttaessa hyvin ääntä eristävä rakenne, jonka rakennepaksuus on pieni, käytetään rakenteen massan kasvattamiseen teräslevyjä. Niiden paksuus ei yleensä ole enempää kuin 4 mm, koska tällöin koinsidenssi heikentää yksittäisen levyn ilmaääneneristyskykyä.
- yleinen materiaali ääntä eristävissä rakenteissa on kipsilevy. Kipsilevyjen paksuudet vaihtelevat tuulensuojalevyjen 6 mm ja lattiarakenteissa käytettävien 15 mm välillä. Tämä ei ole sattumaa, vaan alle 15 mm paksujen kipsilevyjen koinsidenssin rajataajuus on yli 2000 Hz. Tällöin saavutetaan ilmaääneneristävyyttä koko rakennusakustiikan kannalta tärkeällä taajuusalueella. Seinien päällekkäisiä kipsilevyjä ei pidä kiinnittää toisiinsa liimaamalla, vaan ruuveilla, koska liimaaminen alentaisi koinsidenssin rajataajuuden noin 1200 Hz:iin.
- rakentamisessa käytettävän puutavaran ja puupohjaisten levyjen paksuudet vaihtelevat 4 mm paksusta vanerista 200 mm paksuun hirsiseinään. Puun koinsidenssin rajataajuus on lähes kaikilla poikkileikkauksilla alueella, jota ääntä eristäviä rakenteita suunniteltaessa pitäisi välttää: alle 7 mm paksun puulevyn koinsidenssin rajataajuus on yli 2000 Hz ja yli 100 mm paksun alle 150 Hz. Alle 7 mm paksun levyn massa on jo niin vähäinen, että sillä ei voida massalain perusteella saavuttaa merkittävää ääneneristystä. Nämä ilmiöt selittävät sen, että puupohjaisia levyjä ei käytetä ääntä eristävissä rakenteissa (kuva 3.4).



Kuva 3.4. Kaavoilla 3.8-3.10 laskettuja rakennuslevyjen ilmaääneneristävyyksiä. Kuvissa 3.4-3.6 rakenteen pinta-ala on 10 m^2 .

3.1.4 Kevyet kivirakenteet

Kevyitä kivirakenteita ovat esimerkiksi alle 100 mm paksut betoniseinät ja -laatat, alle 130 mm paksut savitiilet ja kalkkihiekkakivet sekä kevytsorabetoniharkot ja kevytbetoniharkot ja -elementit, joiden paksuus on 60-150 mm. Niiden pintamassa on yleensä $30\text{-}150 \text{ kg/m}^2$. Kevyiden kivirakenteiden koinsidenssin rajataajuudet ovat tyypillisesti 200-400 Hz. Koska näiden rakenteiden pintamassa on suhteellisen suuri esimerkiksi puuhun verrattuna, niiden ilmaääneneristyskyky on kohtuullinen (kuva 3.5x), mutta koinsidenssin rajataajuus on puheäänien eristämisen kannalta tärkeällä taajuualueella. Tämä on otettava huomioon suunniteltaessa puhetilojen tai asuinhuoneistojen ääneneristystä. Korkeimmilla taajuuksilla leikkausaallot alkavat vaikuttaa ohuiden kivirakenteiden ilmaääneneristyskykyyn.



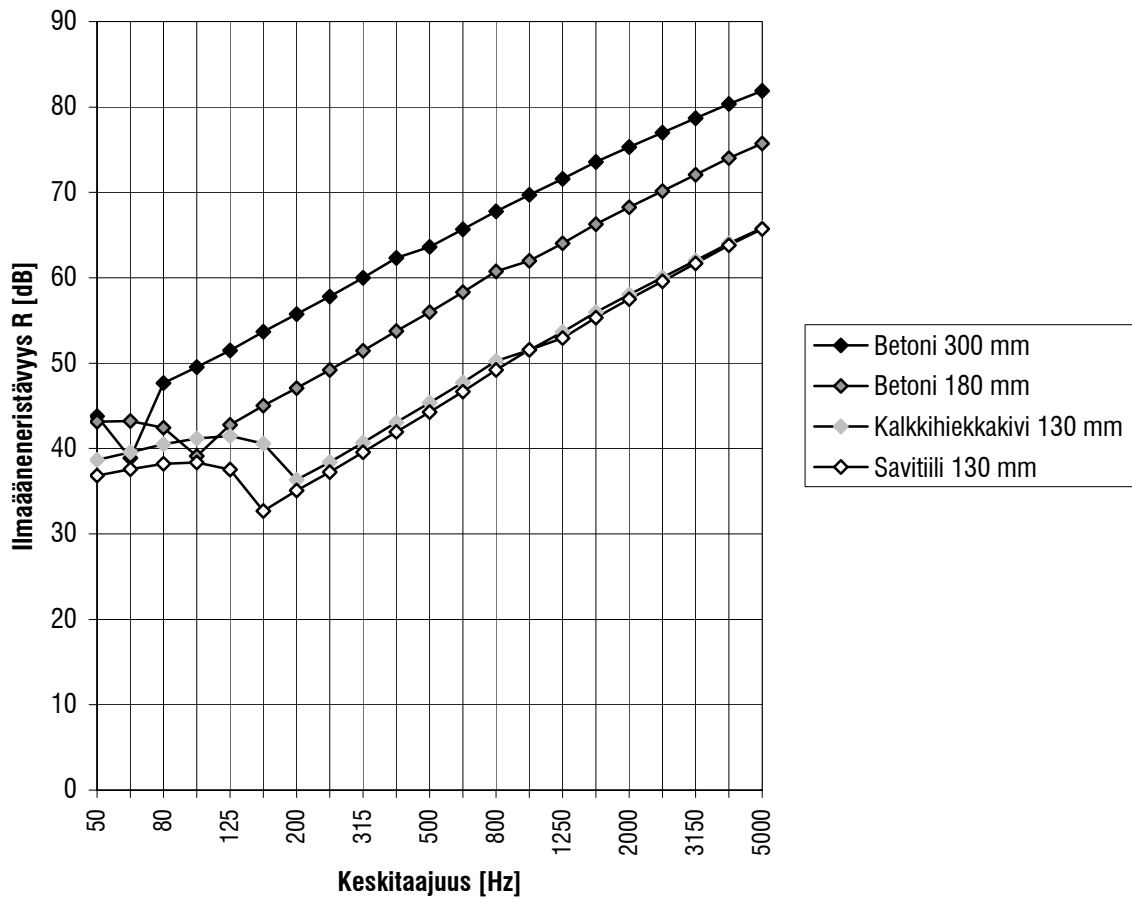
Kuva 3.5. Kaavoilla 3.8-3.10 laskettuja kevyiden kivirakenteiden ilmasteneristävyyksiä.

3.1.5 Raskaat kivirakenteet

Raskaiden kivirakenteiden pintamassa on noin 200 kg/m^2 tai enemmän. Koinsidenssitaajuudet asettuvat rakenteiden paksuuden ja jäykkyyden johdosta 200 Hz alhaisemmille taajuuksille, jolloin rakenteiden ilmasteneristävyys seuraa melko tarkasti massalakiä suurella osalla rakennusakustiikan kannalta kiinnostavaa taajuusaluetta: pintamassan ja taajuuden kaksinkertaistuminen lisää rakenteen ilmasteneristävyyttä 6 dB. Esimerkkejä raskaista kivirakenteista ovat vähintään 120 mm paksut betonirakenteet ja vähintään 130 mm paksut savitiili- ja kalkkihiekkakiviseinät. Myös kevytbetoni- ja kevytsoraharkkorakenteet toimivat raskaiden kivirakenteiden tavoin, kun niiden paksuus ylittää 250 mm. Tällöin niiden koinsidenssitaajuus on alle 200 Hz. Korkeilla taajuuksilla leikkausaallot vaikuttavat raskaiden kivirakenteiden ilmasteneristävyyteen niin, että eristävyys ei kasva enää massalain mukaisesti (kuva 3.6).

Raskaiden kivirakenteiden massasta seuraa se, että niiden ilmasteneristävyys on matalilla taajuuksilla muihin yksinkertaisiin rakenteisiin verrattuna hyvä ja sitä parempi, mitä suurempi rakenteen pintamassa on. Suuren pintamassan vuoksi massan lisääminen

parantaa raskaiden kivirakenteiden ilmaääneneristävyyttä suhteellisesti paljon vähemmän esimerkiksi rakennuslevyihin verrattuna.

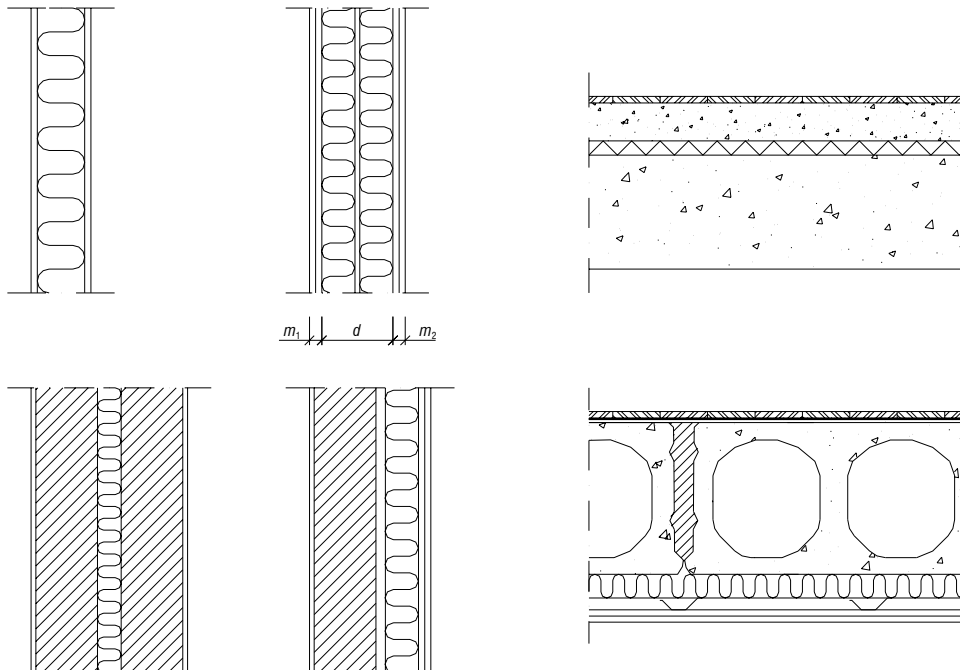


Kuva 3.6. Kaavoilla 3.8-3.10 laskettuja raskaiden kivirakenteiden ilmaääneneristävyyksiä.

3.2 Kaksinkertaiset rakenteet

3.2.1 Rajataajuudet

Kevyiden rakenteiden ilmajäneneristävyyttä voidaan kasvattaa helposti lisäämällä rakenteiden pintamassaa. Jos pintamassa on jo suuri, pienikin parannus ilmajäneneristävyydessä edellyttäisi suurta massan lisäystä. Massan lisääminen rajattomasti asettaa vaatimuksia muiden rakenteiden kantavuudelle ja lisää kustannuksia, joten suurempi lisäys eristävyydessä saadaan aikaan jakamalla rakenne kahdeksi osaksi, joiden välissä on ilmapäli tai absorptiomateriaalilla täytetty ilmapäli. Akustisen toimintansa kannalta tällainen rakenne on kaksinkertainen. Esimerkkejä kaksinkertaisista rakenteista ovat molemmin puolin levytetyt kipsilevyseinät, kaksinkertaiset tiiliseinät ja betonivälipohjat, joihin liittyy levyrakenteinen alakatto tai asennuslattia (kuva 3.7). Myös kantavan välipohjarakenteen päälle tehty kelluva lattia muodostaa rakenteesta kaksinkertaisen, mutta kelluva lattia toimii kelluvan rakenteen alla olevan eristekerroksen johdosta akustisesti hieman toisella tavalla kuin massojen ja ilmapälin muodostava rakenne. Kelluvia lattiaita käsitellään askelääneneristyksen yhteydessä tarkemmin.



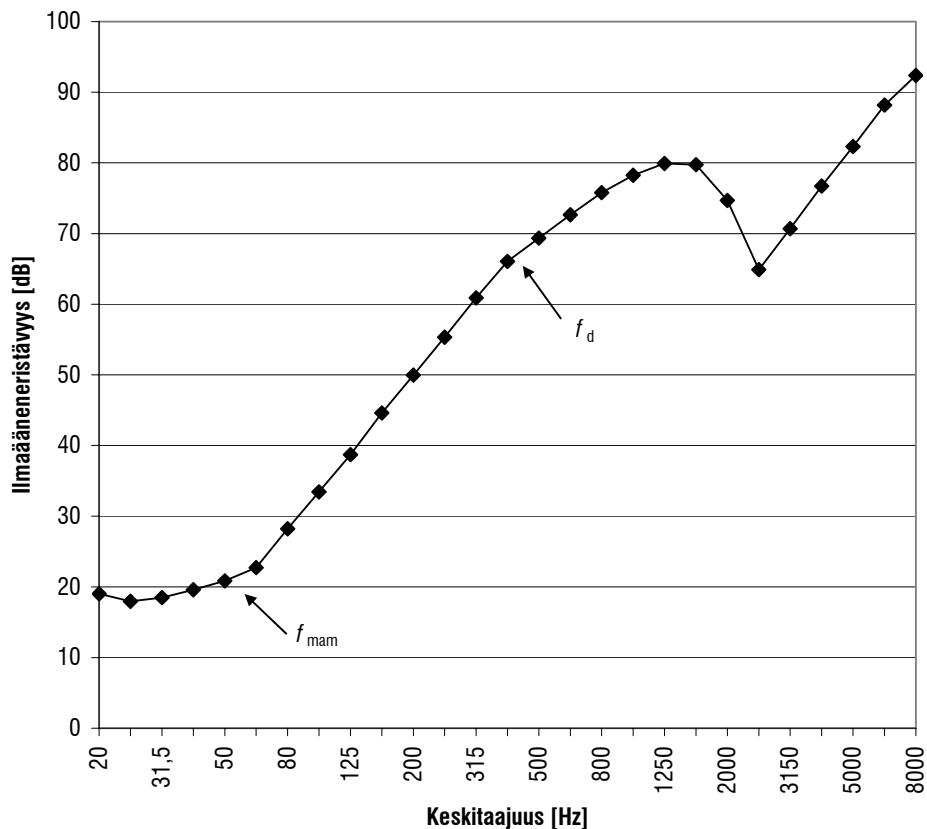
Kuva 3.7. Esimerkkejä kaksinkertaisista rakenteista.

Kaksinkertaisen rakenteen puoliskot ja ilmapäli muodostavat massa-jousi-massajärjestelmän, jossa rakenteen puoliskojen välissä oleva massa toimii jousena. Tällaisella rakenteella on ominaistajuus f_{mam} , jonka yläpuolella ilmapälieneristävyyttä kasvaa nopeasti (kuva 3.8). Ominaisuus riippuu rakenteen puolikkaiden pintamassoista m_1 ja m_2 [kg/m²] ja ilmapälin suuruudesta d [m]:

$$f_{mam} = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (3.12)$$

Ilmapälieneristävyyttä ei kasva rajattomasti, vaan rajataajuudella f_d rakenteen toiminta muuttuu. Tällöin äänen aallonpituus on pieni verrattuna ilmapäliin, eikä ilmapäli enää toimi jousena. Rakenteen puoliskojen ilmapälieneristävyydet voidaan tällöin laskea yhteen. Rajataajuudella rakenteen ilmapäli d on noin kuudesosa äänen aallonpituudesta [30]:

$$f_d = \frac{c}{2\pi d} \quad (3.13)$$



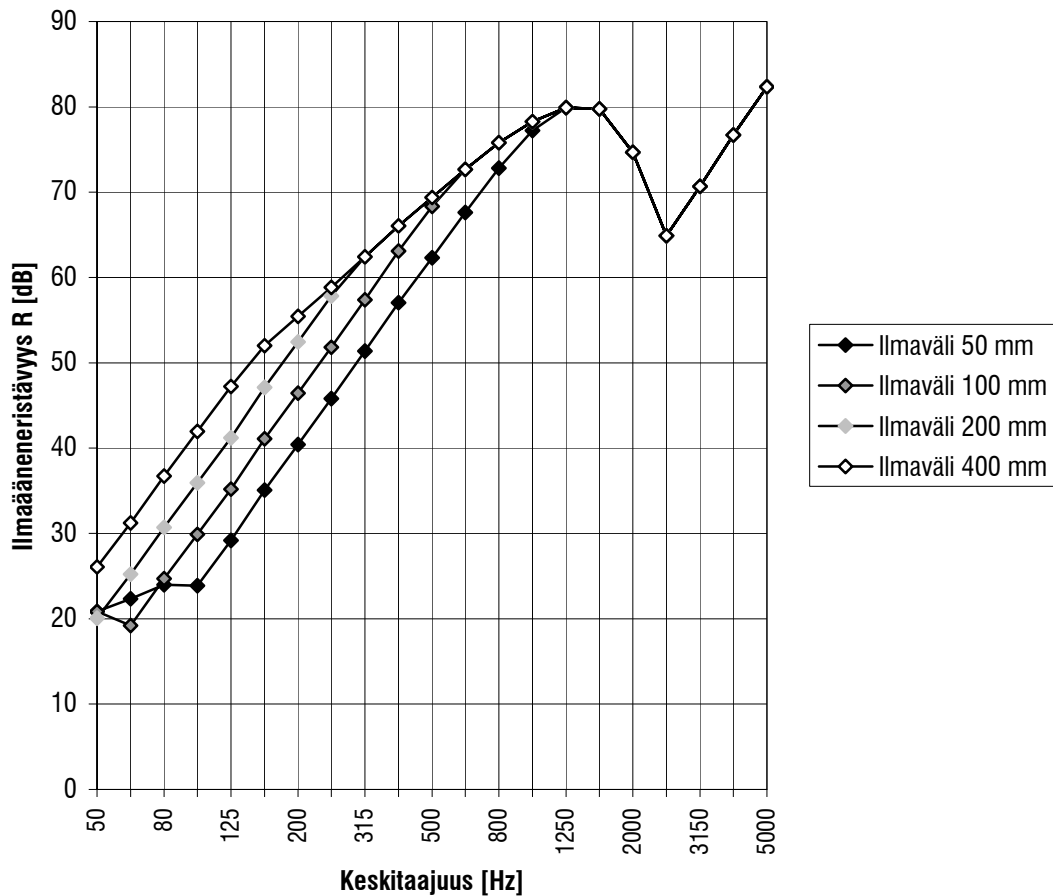
Kuva 3.8. Kaksinkertaisen rakenteen rajataajuudet jakavat ilmapälieneristävyyden kolmeen alueeseen. Kaksinkertaisen rakenteen käyttäytymisessä näkyvät myös sen yksinkertaisten puoliskojen ominaisuudet, tässä tapauksessa muun muassa koinsidenssin rajataajuus noin 2500 Hz ja leikkausaallon vaikutus aivan korkeimmilla taajuuksilla.

Kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyyden perustuu sen puoliskojen ilmasteneristävyyteen sekä niiden massoista ja ilmastävälisestä seuraavaan resonanssitaajuuteen. Kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyyden laskemiseksi on ensin selvitettävä kaavoilla 3.8-3.10 sen kummankin puoliskon ilmasteneristävyyden yksinkertaisina rakenteina; puoliskojen eristävyyksistä käytetään alla merkintöjä R_1 ja R_2 . Laskettaessa puoliskojen eristävyyksiä on huomattava, että kaavan 4 mukainen korjaus massalakiin tehdään vain toisen puoliskon eristävyyttä laskettaessa, sillä muussa tapauksessa korjaus kertaantuu ja ilmasteneristävyys tulee matalalla taajuusalueella yliarvioituksi ja korkealla taajuusalueella aliarvioituksi. Vaihtoehtoisesti kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen ääneneristävyyksinä voidaan käyttää niiden mittaustuloksia. Rajataajuudet jakavat kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyyden laskennan kolmeen osaan [18, 30]:

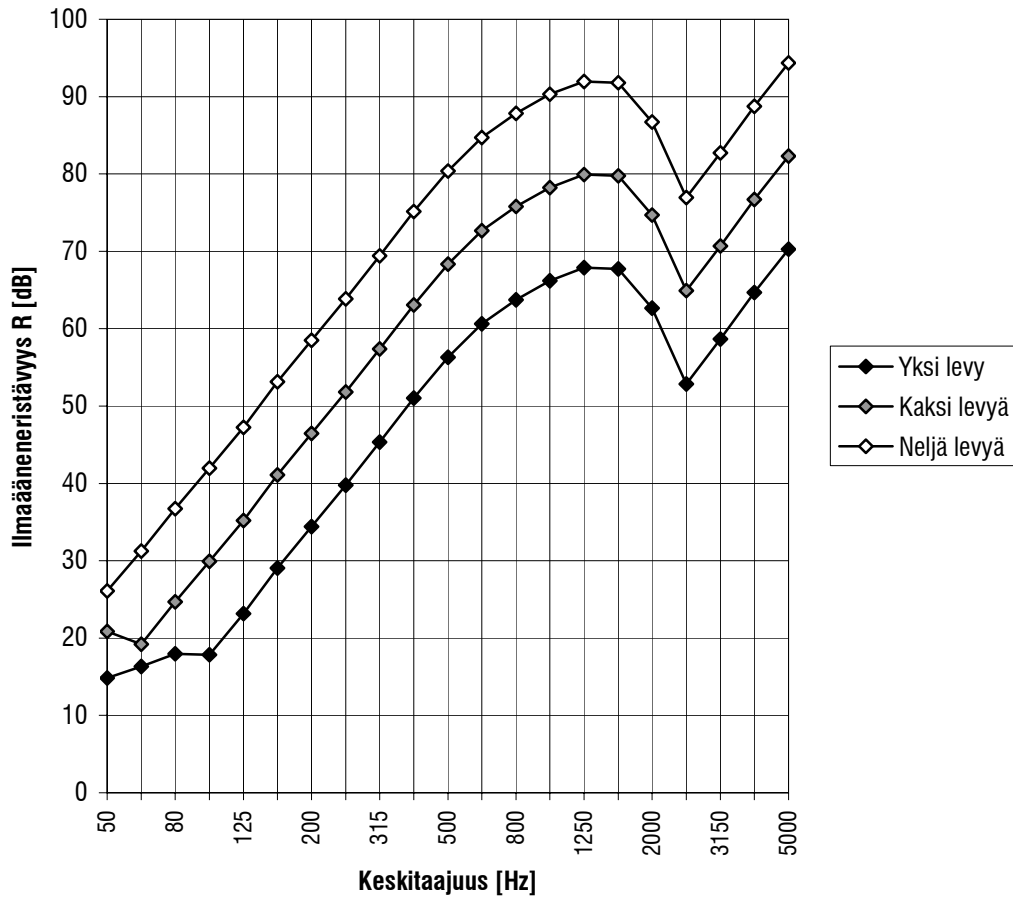
$$R = 20 \lg(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20}) \quad f < f_{\text{mam}} \quad (3.14)$$

$$R = R_1 + R_2 + 20 \lg fd - 29 \quad f_{\text{mam}} < f < f_d \quad (3.15)$$

$$R = R_1 + R_2 + 6 \quad f < f_d \quad (3.16)$$



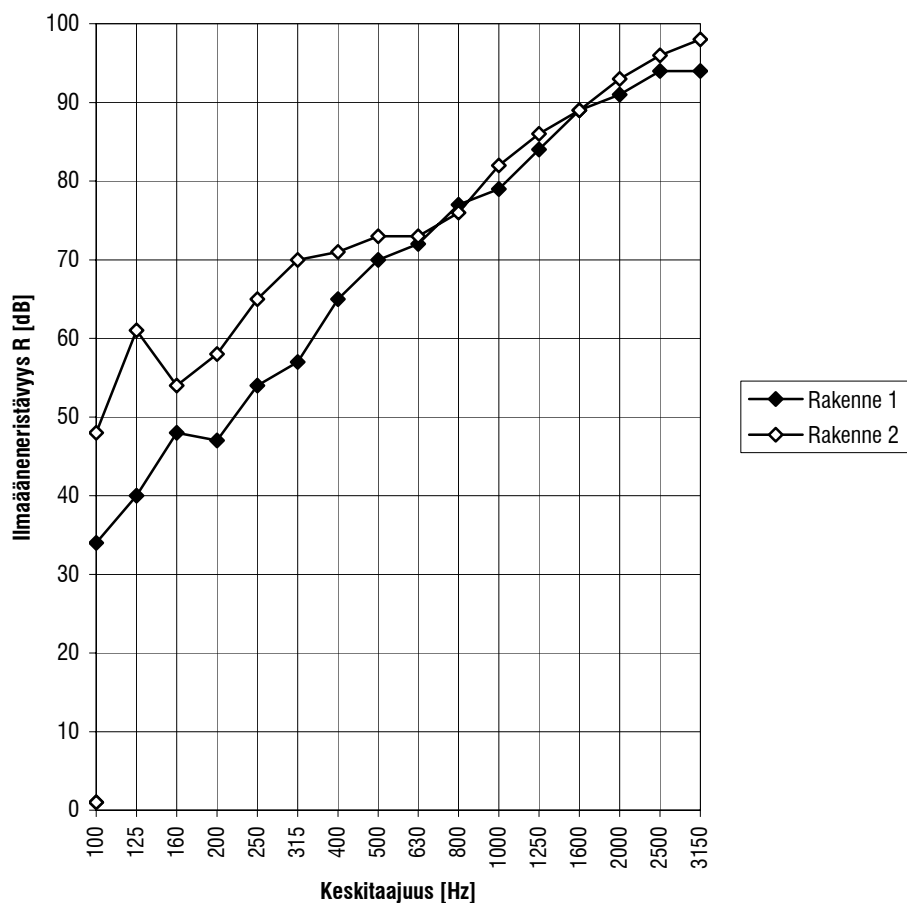
Kuva 3.9. Kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen etäisyyden vaikutus ilmasteneristävyyteen laskennallisesti. Rakenteen puoliskoina on kaksinkertainen kipsilevy 13 mm.



Kuva 3.10. Kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen massan vaikutus ilmasteneristävyyteen laskennallisesti. Rakenteen ilmaväli on 100 mm.

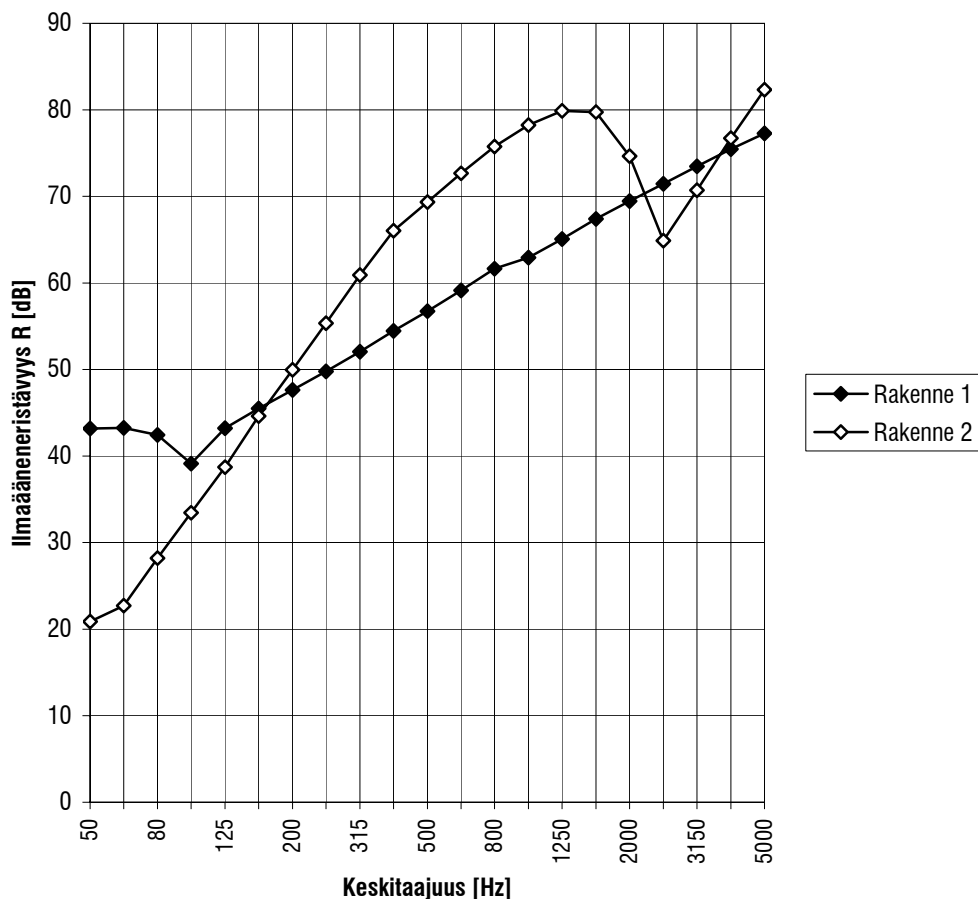
Ominaistaajuudella f_{mam} rakenne on resonanssissa ja sen ilmasteneristävyydellä on minimikohta. Mitä suurempia rakenteen puoliskojen pintamassat m_1 ja m_2 ovat ja mitä suurempi niiden etäisyys d on, sitä matalampi ominaistaajuus on (kuvat 3.9 ja 3.10). Ääneneristystä suunniteltaessa kaksinkertaisten rakenteiden puoliskojen massat ja niiden etäisyys toisistaan on valittava niin, että ominaistaajuus f_{mam} on enintään 100 Hz, mieluiten alle 50 Hz.

Laskentamenetelmä soveltuu lähinnä levyrakenteisten kaksinkertaisten seinien ilmasteneristävyyden laskemiseen. Laskentamallien toimivuutta kaksinkertaisten kivrakenteiden ilmasteneristävyyden laskemisessa ei ole juuri tutkittu, sillä niiden ilmasteneristävyys korkeilla taajuuksilla on yleensä niin suuri, että sitä ei ole helppoa saada selville laboratoriomittauksin (kuva 3.11). Siten laskentamallien toimivuuttakaan ei ole voitu tarkistaa.



Kuva 3.11. Kivirakenteisten kaksinkertaisten seinien mitattuja ilmaääneneristävyyksiä [17]. Rakenne 1: rapattu savitiili 110 mm, mineraalivillalla täytetty ilmaväli 50 mm, rapattu savitiili 110 mm. Rakenne 2: rapattu savitiili 220 mm, mineraalivillalla täytetty ilmaväli 230 mm, rapattu tiili 68 mm.

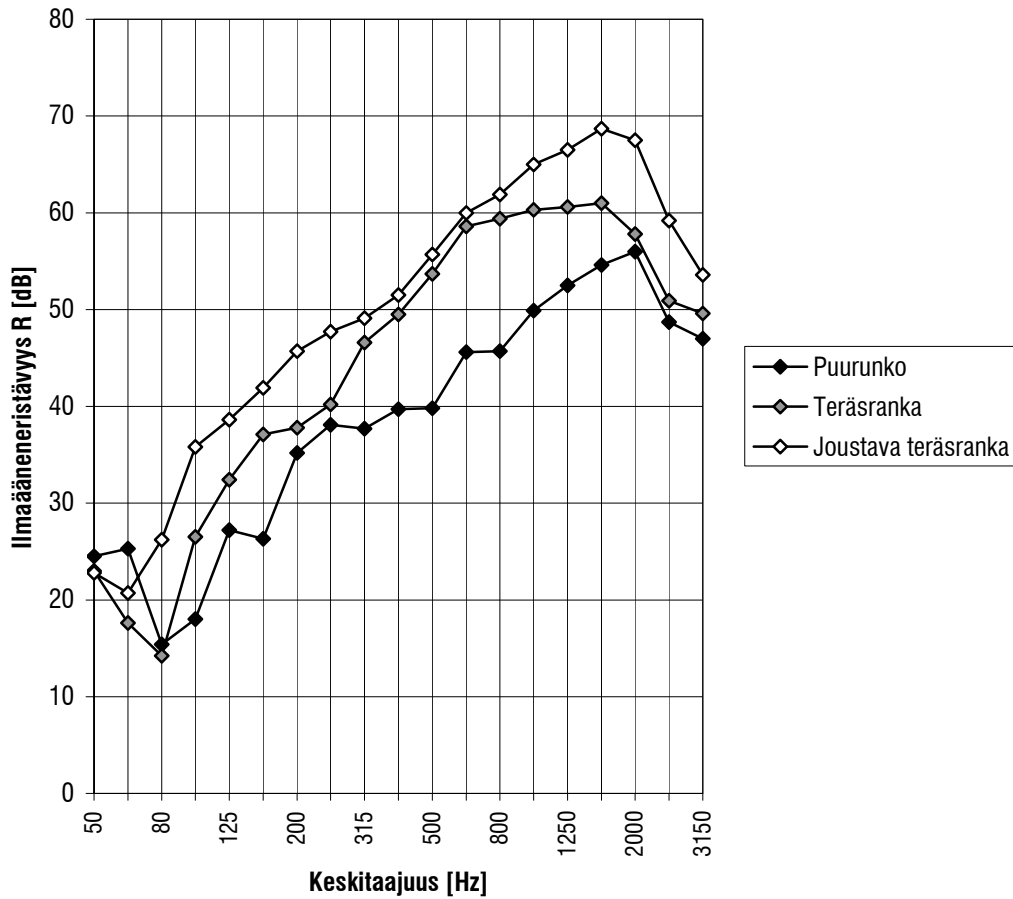
Massa-jousi-massajärjestelmän ominaistaajuuden f_{mam} vuoksi levyrakenteisten kaksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyys matalalla taajuusalueella on heikompi kuin raskaiden yksinkertaisten kivirakenteiden (kuva 3.12). Matalia ääniä eristettäessä massa on välttämätön. Samasta syystä ääneneristyksessä ei yleensä ole syytä käyttää kolminkertaisia rakenteita, sillä niiden ilmaääneneristävyys on kaksinkertaisia rakenteitakin heikompi matalalla taajuusalueella, koska massa-jousi-massaresonansseja on enemmän. Poikkeuksena ovat ikkunat, joiden lämmöneristysvaatimukset johtavat siihen, että on käytettävä kolminkertaisia lasituksia. Ikkunoiden ilmaääneneristävyyteen voidaan vaikuttaa valitsemalla eri paksuiset lasit, jolloin lasien koinsidenssitäajuuudet poikkeavat toisistaan. Lasien ilmavälien tulee myös olla erilaiset – toinen suuri, toinen pieni – jotta massa-jousi-massajärjestelmän ominaistaajuudet olisivat mahdollisimman kaukana toisistaan. Ikkunan ilmaääneneristävyys on sitä parempi, mitä paksumpi suurempi ilmaväli on.



Kuva 3.12. Massa-jousi-massaresonanssin vuoksi kaksinkertaisten levyrakenteiden ilmaääneneristävyyks on matalalla taajuusalueella heikempi kuin yksinkertaisten kivirakenteiden. Ilmaääneneristävyydet on laskettu: rakenne 1, 180 mm paksu betoniseinä; rakenne 2, kaksinkertainen kipsilevy 13 mm, mineraalivillalla täytetty ilmaväli 150 mm, kaksinkertainen kipsilevy 13 mm.

3.2.2 Rankojen vaikutus

Kaavat 14-16 eivät ota huomioon sitä, että käytännön rakenteissa rakennuslevyjä on tukemassa puu- tai teräsrankoja, jolloin saavutettava ilmaääneneristävyyks on käytännössä jonkin verran heikempi kuin kaavojen tuottamat tulokset. Käytännön rakenteista lähimmäksi kaavojen tuottamia ilmaääneneristävyyksiä sijoittuvat rakenteet, joiden puoliskoilla on erilliset rungot. Levytysten kiinnittäminen samaan runkoon tuottaa selvästi heikomman eristävyyden. Rankojen jäykkyys vaikuttaa lisäksi siten, että saavutettava ilmaääneneristävyyks heikkenee, kun rangat tulevat jäykemmiksi (kuva 3.13). Kaavat eivät ota huomioon myöskään rakenteen puoliskojen kytkentöjä ympäröiviin rakenteisiin.



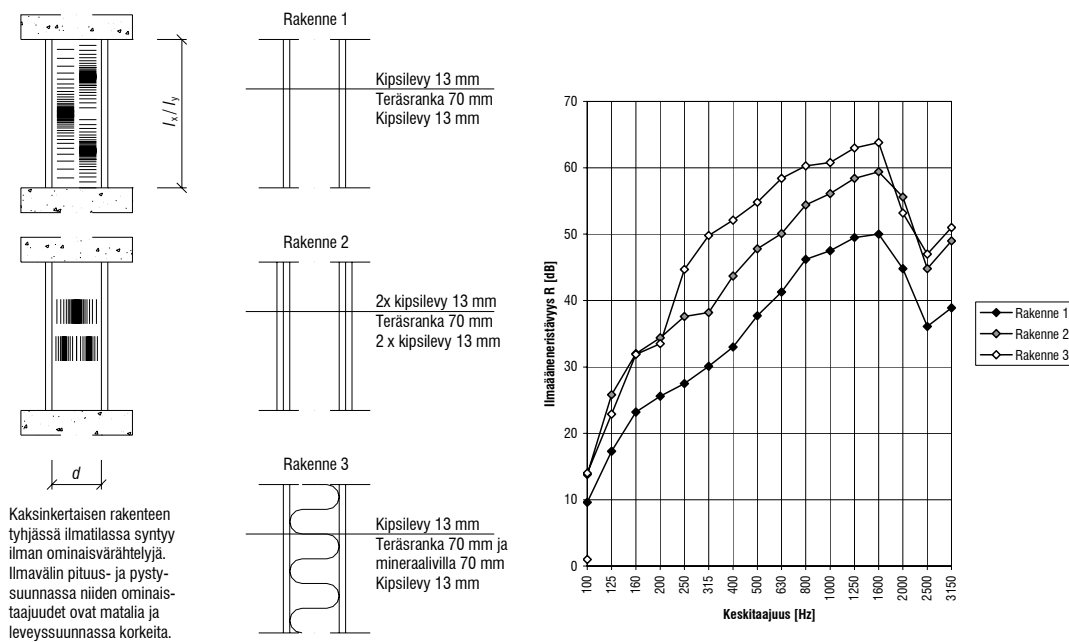
Kuva 3.13. Mitattuja ilmastäneristävyyksiä seinärakenteesta, jossa 100 mm leveän rungon molemmin puolin on kaksinkertainen kipsilevy 13 mm. Ilmatila levyjen välillä on täytetty mineraalivillalla. Ilmastäneristävyys on sitä parempi, mitä joustavampi seinän runko on.

3.2.3 Ilmastälin kaiunta

Kaavojen 14-16 lähtökohtana on se, että kaksinkertaisen rakenteen ilmastälin on täytetty kokonaan hyvin absorboivalla materiaalilla. Jos täyttöä ei ole, ilmastäliniin syntyy kaiuntakenttä, joka heikentää rakenteen ilmastäneristävyyttä [18, 30]. Seinärakenteen pituus- ja korkeussuunnassa ilman ominaisvärähtelyiden alimmat ominaistääjuudet ovat matalia ja ilmastälin suunnassa korkeita (kuva 3.14). Ilmastälin ominaisvärähtelyiden alimmat ominaistääjuudet vastaavat aallonpituuksia, joiden puolikas on yhtä suuri kuin seinän ilmastälin leveys l_x , korkeus l_y ja paksuus d . Kun näistä mitoista käytetään yhteistä merkintää l [m], eri suunnissa tapahtuvan ominaisvärähtelyn ominaistääjuus on

$$f_r = \frac{340}{2l} \tag{3.17}$$

Jos seinän leveys l_x on 4 m, korkeus l_y 2,5 m ja ilmvälin paksuus 150 mm, alimmat ominaistaajuudet ovat vastaavasti 43 Hz, 68 Hz ja 1130 Hz. Ominaisvärähtelyitä esiintyy myös näiden taajuuksien monikerroilla, joten ilmvälin kaiunta vaikuttaa rakenteen ilmaääneneristävyyteen koko taajuusalueella. Tavoiteltaessa hyvää ilmaääneneristävyyttä kaiunta on aina poistettava täyttämällä kaksinkertaisen rakenteen ilmvälin paksuudesta vähintään puolet absorptiomateriaalilla, jonka absorptiosuhde α on 500 Hz ja korkeammilla taajuuksilla vähintään lähellä noin 0,9.



Kuva 3.14. Tyhjästä ilmatilasta syntyvän kaiunnan vaikutus kipsilevyseinän ilmaääneneristävyyteen näkyy selvästi mittaustuloksissa. Kaiunnan merkitys on niin suuri, että sen poistaminen vaikuttaa ilmaääneneristävyyteen enemmän kuin levyjen massan kaksinkertaistaminen.

3.3 Ilmaääneneristävyyden mittaaminen

3.3.1 Ilmaääneneristysluku [22, 23, 27]

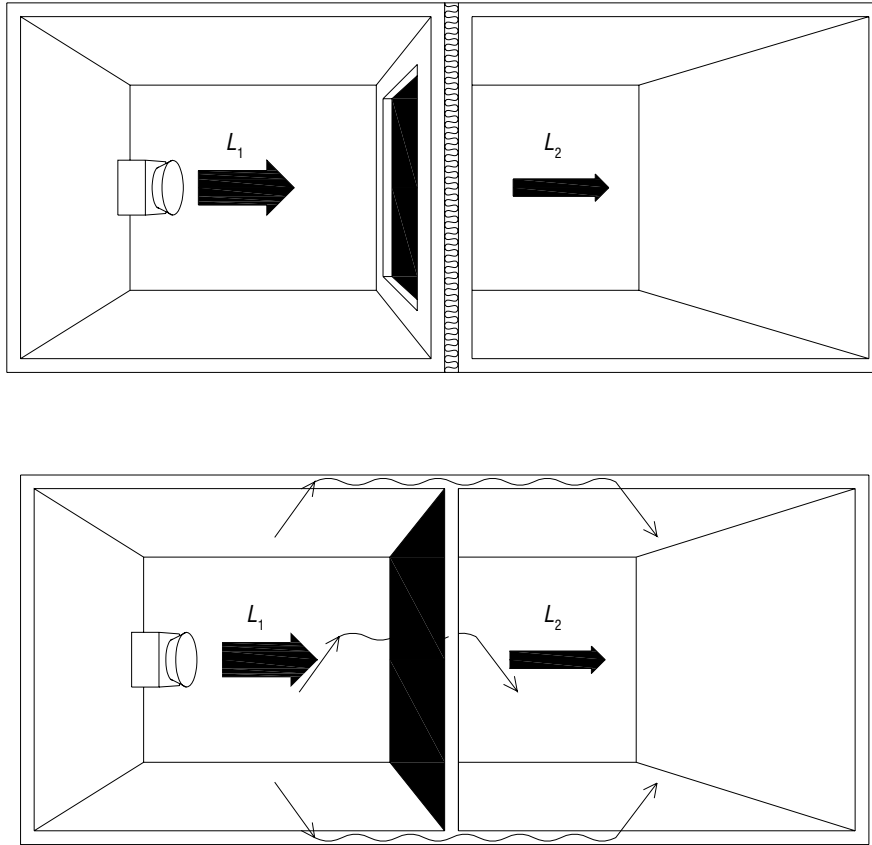
Ilmaääneneristävyys R on määritelty rakenteen kohdanneen ja sen välityksellä toiseen huoneeseen siirtyneen äänitehon avulla (kaava 3.1). Äänitehoja ei ole kuitenkaan mahdollista mitata suoraan, vaan ilmaääneneristävyyden määritelmästä on johdettu menetelmä, jonka avulla ilmaääneneristävyys voidaan laskea rakenteen erottamissa huoneissa vallitsevien äänenpainetasojen L_p avulla. Lähetyshuoneessa (kuva 3.15) käytetään äänilähteenä kohinageneraattoria ja kaiutinta, joka tuottaa huoneeseen vaaleanpunaista kohinaa, jolloin äänenpainetaso on suunnilleen sama kaikilla taajuuskaistoilla 100-3150 Hz. Lähetyshuoneen äänenpainetasojen L_1 pitää asuinhuoneistojen välistä ilmaääneneristävyyttä mitattaessa olla noin 90-100 dB, jotta lähetyshuoneen äänen toiseen asuinhuoneistoon eli vastaanottohuoneeseen synnyttämä äänenpainetaso L_2 on mitattavissa.

Ilmaääneneristävyyttä mitattaessa äänilähde tulee sijoittaa vähintään kahteen paikkaan lähetyshuoneessa. Äänenpainetasot mitataan sekä lähetys- että vastaanottohuoneessa vähintään viidessä pisteessä, joiden etäisyydet toisistaan ja huoneen seinistä on määritelty standardeissa ISO 140-3 ja ISO 140-4. Lähetys- ja vastaanottohuoneessa mitataan siten äänenpainetasot L_j vähintään kymmenessä pisteessä. Niiden perusteella lasketaan äänenpainetason paikkakeskiarvo:

$$L = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{n=1}^j 10^{L_j/10} \quad (3.18)$$

Äänenpainetasojen lisäksi mitataan vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T . Jälkikaiunta-aikaa mitattaessa äänilähde on sijoitettava vähintään yhteen paikkaan ja mikrofoni vähintään kolmeen paikkaan, joista kustakin jälkikaiunta-aika mitataan vähintään kahdesti. Näistä vähintään kuudesta mittaustuloksesta lasketaan jälkikaiunta-ajan keskiarvo. Sabine kaavalla saadaan jälkikaiunta-ajan keskiarvon ja vastaanottohuoneen tilavuuden perusteella lasketuksi vastaanottohuoneen absorptioala A . Ilmaääneneristävyys saadaan lasketuksi lähetys- ja vastaanottohuoneiden äänenpainetasojen, lähetyshuoneen absorptioalan ja tiloja erottavan rakenteen pinta-alan S [m²] perusteella:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (3.19)$$



Kuva 3.15. Laboratoriomittauksilla saadaan selville yksittäisen rakennusosan ilmääneneristävyys, kenttämittaukseen rakennuksessa sisältyy tiloja erottavan rakennusosan ilmääneneristävyuden lisäksi sitä sivuavien rakennusosien ilmääneneristävyys.

Ilmääneneristävyyttä voidaan mitata sekä laboratoriossa että kenttämittauksin rakennuksessa (kuva 3.15). Laboratoriomittauksin saadaan selville yksittäisen rakennusosan, kuten väliseinän, välipohjan, tai ikkunan ilmääneneristävyys. Kenttämittaukseen rakennuksessa sisältyy paitsi tiloja erottavan rakenteen ilmääneneristävyys, myös sitä sivuavien rakenteiden ilmääneneristävyys. Laboratoriossa mitatuista ilmääneneristävyyksistä käytetään merkintää R ja kentällä mitatuista merkintää R' . Rakentamismääräykset koskevat ilmääneneristävyyttä rakennuksessa, koska rakennus on erilaisten rakennusosien muodostama kokonaisuus ja kenttämittaustulos kuvaa paremmin äänen siirtymistä tilasta toiseen.

Ilmääneneristysmittausten tulos on rakennusosan tai tilojen välinen ilmääneneristävyys 16 kolmannesoktaavikaistalla. Mittaustuloksista piirretty käyrä on tarkin tapa ilmoittaa rakennusosan tai tilojen välinen ilmääneneristyskyky. Koska ilmääneneristysvaatimusten esittäminen ja suunnitteluarvojen esittäminen käyrinä olisi melko hankalaa, mittaustulokset esitetään yhtenä lukuna, ilmääneneristyslukuna. Laboratoriossa mitatusta ilmääneneristysluvusta käytetään merkintää R_w ja rakennuksessa mitatusta merkintää R'_w . Ilmääneneristysluku määritetään kolmannesoktaavikaistoittain mitatuis-

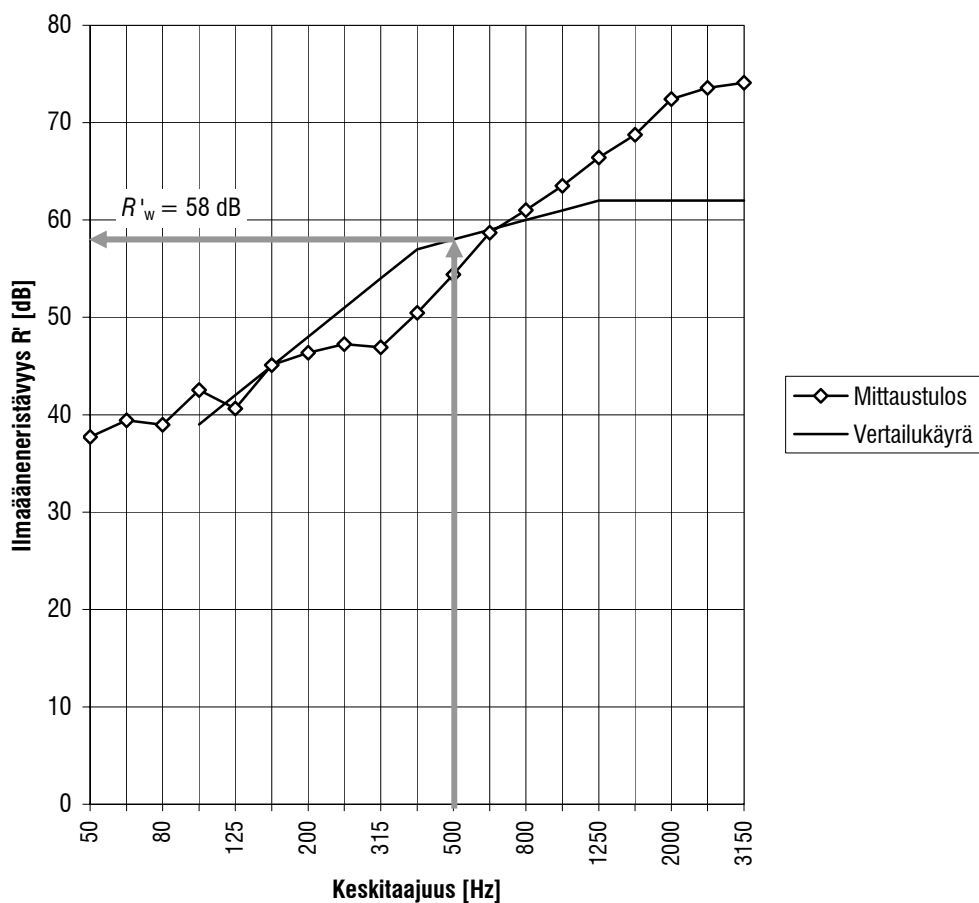
ta ilmaääneneristävyyksistä vertailukäyrämenettelyllä. Vertailukäyrän muoto (kuva 3.16) perustuu kuuloaistiin herkkyyteen kuulla eri taajuuksisia ääniä sekä puheen äänispektriin. Vertailukäyrä on esitetty standardissa ISO 717-1 [27].

Ilmaääneneristysluku määritetään vertailukäyrämenettelyllä siten, että vertailukäyrää (taulukko 3.2) siirretään sen muotoa muuttamatta 1 dB portain sellaiseen asemaan, että kolmannesoktaavikaistoittain mitattujen ilmaääneneristävyyksien epäsuotuiset poikkeamat vertailukäyrästä ovat yhteensä enintään 32 dB. Epäsuotuinen poikkeama tarkoittaa sitä, että mitattu ilmaääneneristävyys on pienempi kuin vertailukäyrän arvo. Vertailukäyrän aseman määräävät siten vertailukäyrän arvoja pienemmät ilmaääneneristävyydet. Kun vertailukäyrä on saatu sijoitetuksi ylimpään mahdollisimpaan asemaan, jossa epäsuotuisten poikkeamien summa on enintään 32 dB, ilmaääneneristysluku luetaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta.

Rakenteen ilmaääneneristävyys on sitä parempi, mitä suurempi ilmaääneneristysluku on. Pelkästään ilmaääneneristysluvun perusteella ei kuitenkaan ole mahdollista päätellä rakenteen ilmaääneneristävyyttä jollain tietyllä taajuudella, vaan ilmaääneneristysluku mahdollistaa erilaisten rakenteiden vertailemisen toisiinsa ja rakentamismääräysten ääneneristysvaatimuksiin. Standardien mukainen mittaustapa kuitenkin edellyttää, että laboratorio tai kenttämittaaja ilmoittaa mittaustuloksen yhteydessä myös ilmaääneneristävyydet kolmannesoktaavikaistoittain.

Taulukko 3.2. Vertailukäyrän arvot ilmaääneneristysluvun ollessa 55 dB.

Keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]	Keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]
100	36	630	56
125	39	800	57
160	42	1000	58
200	45	1250	59
250	48	1600	59
315	51	2000	59
400	54	2500	59
500	55	3150	59



Kuva 3.16. Rakennuksessa mitatut 240 mm paksun paikalla valetun betonivälipohjan ilmasteneristävyydet ja vertailukäyrä. Ilmasteneristysluku on 58 dB.

Taulukko 3.3. Ilmasteneristysluvun R'_w ja taustamelun äänitason $L_{A,eq}$ vaikutus äänen kuuluvuuteen.

R'_w	$L_{A,eq}$	Kuluvuus
> 60 dB	20 dB	Tavanomainen keskusteluääni ei kuulu
> 55 dB	25 dB	Tavanomainen keskusteluääni ei kuulu
> 50 dB	25 dB	Tavanomainen keskusteluääni kuuluu vaimeana, sanoista ei saa selvää
> 45 dB	30 dB	Tavanomainen keskusteluääni kuuluu vaimeana, sanoista ei saa selvää
> 45 dB	25 dB	Tavanomaisesta keskusteluäänestä voi saada selvän
> 40 dB	35 dB	Tavanomainen keskusteluääni kuuluu vaimeana, sanoista ei saa selvää
> 40 dB	30 dB	Tavanomaisesta keskusteluäänestä voi saada selvän
> 35 dB	40 dB	Tavanomainen keskusteluääni kuuluu vaimeana, sanoista ei saa selvää
> 35 dB	35 dB	Tavanomaisesta keskusteluäänestä voi saada selvän
< 30 dB	< 35 dB	Rakenne ei estä seuraamasta tapahtumia sen toisella puolella

Ilmaääneneristysluvun ja viereisestä tilasta kuuluvan äänen kuuluvuutta on havainnollistettu taulukossa 3.3. Aiemmin on jo todettu, että vastaanottohuoneen taustääänen äänitaso vaikuttaa siihen, kuinka hyvin lähetyshuoneesta siirtyvä ääni erottuu. Asuinrakennuksissa erilaisten teknisten laitteiden tai liikenteen aiheuttama taustäääni koetaan häiritseväksi, joten sen äänitason tulee olla alhainen ja ilmaääneneristysluvun asuinhuoneistojen välillä vastaavasti suuri. Ilmaääneneristysluvuksi R'_w asuinhuoneistojen välille vaaditaan uudisrakentamisessa vähintään 55 dB [56]. Toimistorakennuksissa sitä vastoin voidaan sallia korkeampia äänitasoja, jolloin viereisestä huoneesta kuuluva ääni peittyy, vaikka ilmaääneneristysluku olisi suhteellisen alhainen.

Tavallisesti ilmaääneneristävyydet mitataan kolmannesoktaavikaistoittain, koska näin saadaan tarkempi käsitys rakenteen akustisesta toiminnasta. Monet akustiikkaan liittyvät laskelmat tehdään kuitenkin oktaavikaistoittain, koska monien materiaalien ominaisuudet ja laitteiden äänenkehitykseen liittyvät tiedot mitataan ja ilmoitetaan oktaavikaistoittain. Siksi myös ilmaääneneristävyydet on tiedettävä oktaavikaistoittain. Ne voidaan laskea kolmannesoktaavikaistoittain mitatuista ilmaääneneristävyyksistä:

$$R_{1/1} = -10 \lg \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 10^{-R_{1/3,j}/10} \right) \quad (3.20)$$

Laskettaessa ilmaääneneristysluku oktaavikaistoittain määritellyistä ilmaääneneristysluvuista vertailukäyrämenettely muuttuu myös. Vertailukäyrälle on erikseen määriteltä arvot oktaavikaistoittain (taulukko 3.4). Vertailukäyrän paikkaa määritettäessä epäsuolisten poikkeamien summa on 10 dB. Ilmaääneneristysluku luetaan 500 Hz kohdalta.

Tavallisesti rakennusosien ilmaääneneristyskyky ilmoitetaan ilmaääneneristyslukuina R_w . Poikkeuksena ovat ovet, joille on määriteltä ääneneristysluokat [54]. Ääneneristysluokkien ja laboratoriossa mitattujen ilmaääneneristyslukujen yhteys on esitetty taulukossa 3.5. Ovia valittaessa pitäisi kuitenkin ensisijaisesti selvittää ilmaääneneristysluku, sillä ulkomailla käytetään Suomen ääneneristysluokista poikkeavia luokitusjärjestelmiä.

Taulukko 3.4. Vertailukäyrän arvot oktaavikaistoittain ilmaääneneristysluvun ollessa 55 dB.

Oktaavikaistan keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]
125	39
250	48
500	55
1000	58
2000	59

Taulukko 3.5. Ovien ääneneristysluokan ja laboratoriossa mitatun ilmaääneneristysluvun vastaavuus.

Ääneneristysluokka	Ilmaääneneristysluku R_w
25 dB	30 dB
30 dB	37 dB
35 dB	42 dB
40 dB	48 dB
45 dB	53 dB

3.3.2 Spektripainotustermit [27]

Ilmaääneneristysluvun vertailukäyrä perustuu osittain puheen äänispektriin. Se ei sovel-
lu siten parhaalla mahdollisella tavalla rakenteen ilmaääneneristyskyvyn arvioimiseen,
jos äänilähteenä on jokin muu kuin puhe. Standardissa ISO 717-1 on määritelty spektri-
painotustermit, joiden avulla äänilähteen äänispektri voidaan ottaa huomioon. Spektri-
painotustermi C on tarkoitettu muun muassa raideliikennemelua ja lentoliikennemelua
varten. Spektripainotustermiä C_{tr} käytetään arvioitaessa rakenteen ilmaääneneristyskyky
tieliikennemelua vastaan. Spektripainotustermien käyttö perustuu siihen, että lähtökoh-
tana on ilmaääneneristysluku R_w tai R'_w . Rakenteen ilmaääneneristyskyky esimerkiksi
liikennemelua vastaan ilmoitetaan ilmaääneneristysluvun ja spektripainotusterman
summana $R_w + C_{tr}$. Yleisimmin spektripainotustermit lasketaan taajuusalueella 100-
3150 Hz, mutta ne voidaan määrittää myös taajuusalueilla 50-3150 Hz tai 50-5000 Hz.
Jos taajuusalue on muu kuin 100-3150, se merkitään spektrisoitusterman alaindeksiin,
esimerkiksi $C_{50-3150}$.

Spektripainotustermit lasketaan joko rakennuksessa tai laboratoriossa määritetystä ilma-
ääneneristysluvusta sekä taulukossa 3.6 esitetyistä spektreistä, joista käytetään seuraa-
vassa merkintää L_{ij} . Alaindeksi i viittaa keskitaajuuteen ja taulukossa esitettyihin spekt-
reihin 1-4. Spektripainotustermi on

$$C_i = -10 \lg \sum 10^{(L_{ij} - R_i)/10} - R_w \quad (3.21)$$

Spektripainotusterman C arvo on tyypillisesti noin 0...-2 dB raskaille rakenteille ja -
2...-5 dB levyrakenteille. Spektripainotusterman C_{tr} arvot ovat vastaavasti -2...-5 dB ja
-5...-15 dB. Jos mitattava taajuusalue laajennetaan 50 Hz saakka, spektripainotusterman
 $C_{50-3150}$ ja $C_{tr,50-3150}$ arvot pienenevät noin 2...5 dB.

Vaativammissa kohteissa äänen siirtymistä tilojen välillä tutkitaan taajuuskaistoittain
määriteltyjen äänilähteen äänitehojen tai äänilähteen tuottamien äänenpainetasojen ja
rakenteiden ilmaääneneristävyyksien perusteella. Spektripainotustermit antavat lähinnä

yleiskäsityksen rakenteiden ilmaääneneristyskyvystä erityyppisiä äänispektrejä vastaan eri taajuusalueilla.

Taulukko 3.6. *Spektripainotustermien laskennassa käytettävät äänispektrit.*

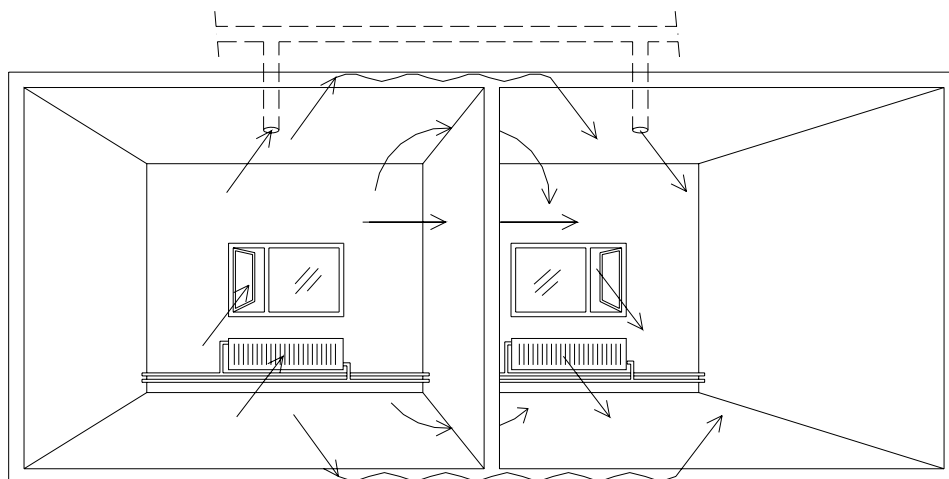
Keski­taajuus [Hz]	C	C ₅₀₋₃₁₅₀	C ₅₀₋₅₀₀₀	C _{tr}
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄
50	-	-40	-41	-25
63	-	-36	-37	-23
80	-	-33	-34	-21
100	-29	-29	-30	-20
125	-26	-26	-27	-20
160	-23	-23	-24	-18
200	-21	-21	-22	-16
250	-19	-19	-20	-15
315	-17	-17	-18	-14
400	-15	-15	-16	-13
500	-13	-13	-14	-12
630	-12	-12	-13	-11
800	-11	-11	-12	-9
1000	-10	-10	-11	-8
1250	-9	-9	-10	-9
1600	-9	-9	-10	-10
2000	-9	-9	-10	-11
2500	-9	-9	-10	-13
3150	-9	-9	-10	-15
4000	-	-	-10	-16
5000	-	-	-10	-18

3.4 Rakenteellinen sivutiesiirtymä

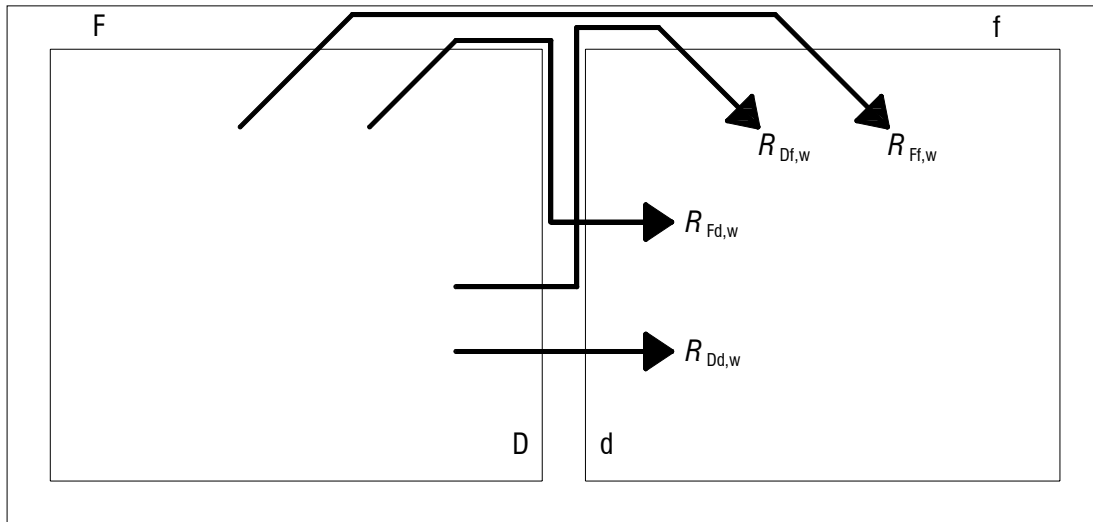
3.4.1 Sivutiesiirtymien laskenta [7]

Ilmaääneneristysmittausten yhteydessä todettiin, että ääntä siirtyy siirtyy tilasta toiseen paitsi tiloja erottavan rakenteen kautta, myös erottavaa rakennetta sivuavien rakenteiden kautta. Ääni voi siirtyä myös LVIS-järjestelmän putkien, kanavien ja johtojen kautta (kuva 3.17). Sivutiesiirtymä tarkoittaa kaikkea äänen siirtymistä, joka tapahtuu muuta reittiä kuin suoraan tiloja erottavan rakenteen välityksellä. LVIS-järjestelmän, ja erityisesti ilmanvaihtokanaviston kautta tapahtuvaa sivutiesiirtymää tarkastellaan lähemmin LVIS-järjestelmien äänenhallintaa koskevassa luvussa, sillä äänen kulkumeکانismi on toisenlainen kuin rakenteiden kautta tapahtuvan rakenteellisen sivutiesiirtymän.

Rakenteellisen sivutiesiirtymän vuoksi ilmaääneneristävyys rakennuksessa on jokseenkin aina heikompi kuin yksittäisen rakennusosan laboratorioissa mitattu ilmaääneneristysluku. Siksi rakentamismääräykset koskevat ilmaääneneristävyyttä rakennuksessa. Rakenteellinen sivutiesiirtymä heikentää myös askelääneneristävyyttä samalla tavalla kuin ilmaääneneristävyyttä.



Kuva 3.17. Ääni siirtyy rakennuksessa tilasta toiseen tiloja erottavien rakenteiden kautta, mutta myös monia muita reittejä rakenteellisena sivutiesiirtymänä tai rakennusten teknisten järjestelmien välityksellä.



Kuva 3.18. Ääni siirtyy tilojen välillä suoraan tiloja erottavan rakenteen kautta (reitti Dd), mutta lisäksi sillä on lukuisia rakenteellisia sivutiesiirtymäreittejä.

Rakenteellinen sivutiesiirtymää syntyy rakennuksissa aina: tilassa toimiva äänilähde saa kaikki tilaa rajaavat pinnat värähtelemään. Ilmaäänien aiheuttama värähtely etenee rakenteissa runkoäänenä rakennuksen kaikkiin osiin vaimentuen muun muassa rakennusosien liitoksissa. Värähtelyn vaimeneminen liitoksissa riippuu liittyvien rakennusosien massasta ja liitoksen jäykkyydestä. Massan ja jäykkyyden lisäksi runkoäänien etenemistä voidaan estää tekemällä rakenteisiin saumoja, joissa rakenne katkaistaan esimerkiksi ilma-, mineraalivilla- tai kumikerroksella.

Tavallisesti tiloja erottavaa rakennetta sivuaa neljä muuta rakennetta, joiden kautta rakenteellista sivutiesiirtymää voi tapahtua. Sivutiesiirtymäreittejä tilojen välillä on näiden rakenteiden kautta lukemattomia, mutta suuri osa niistä on merkityksettömiä. Tärkeimmät reitit äänen siirtymiselle tilojen välillä ovat suora reitti tiloja erottavan rakenteen välityksellä (kuva 3.18, ilmaääneneristysluku $R_{Dd,w}$), tiloja erottavan rakenteen välityksellä sivuaviin rakenteisiin ($R_{Df,w}$), sivuavien rakenteiden välityksellä tiloja erottavaan rakenteeseen ($R_{Fd,w}$) ja sivuavien rakenteiden välityksellä ($R_{Ff,w}$). Jos sivuavia rakenteita on neljä, äänellä on suoran reitin lisäksi siten yhteensä 12 sivutiesiirtymäreittiä tilojen välillä. Jos halutaan laskea ilmaääneneristysluku rakennuksessa R'_w , on selvitetävä ilmaääneneristysluku kaikkien sivutiesiirtymäreittien kautta. Vaikka tulos on laskennallinen, käytetään kenttämittausta tarkoittavaa merkintää R'_w , koska tulos vastaa sivutiesiirtymineen kenttämittaustulosta, kunhan rakennuksessa ei ole rakennusvirheitä.

Standardissa EN 12354-1 on esitetty tarkka sekä yksinkertaistettu menetelmä ilmaääneneristysluvun laskemiseksi rakennuksessa. Se perustuu tiloja erottavien rakenteiden ja tiloja sivuavien rakenteiden ilmaääneneristyslukuihin, jotka voivat olla laboratoriossa mitattuja tai laskettuja, sekä liitosten liitoseristävyys K_{ij} . Liitoseristävyys K_{ij} ei ole

vakio taajuuden tai rakennusosien massojen ja liitosten jäykkyyksien suhteen. Yksinkertaistettu menetelmä perustuu siihen, että taajuuden vaikutus liitoseristävyysiin jätetään huomiotta, jolloin ne riippuvat pelkästään liittyvien rakennusosien massoista ja liitosta-vasta. Erilaisten liitostyyppien liitoseristävyudet esitetään kappaleissa 3.4.2 ja 3.4.3. Menetelmä soveltuu ilmääneneristyslukujen laskemiseen, kun liittyvät rakennusosat ovat raskaita kivirakenteita tai niihin liittyy kevyt levyrakenne.

Raskaiden kivirakenteiden ilmääneneristävyyttä voidaan parantaa tekemällä rakenteisiin levyverhous, jossa on mineraalivillalla täytetty ilmäväli ja rakennuslevy. Rakenne muodostuu tällöin kaksin- tai kolminkertaiseksi rakenteeksi riippuen siitä, onko levyverhous molemmilla vai ainoastaan toisella puolella kivirakennetta. Sivutiesiirtymiä laskettaessa levyverhous otetaan huomioon ilmääneneristävyuden parannuslukuna ΔR_w , joka riippuu kivirakenteen, ilmävälin ja levyjen muodostaman massa-jousi-massajärjestelmän ominaistajuudesta f_{mam} . Ominaistajuus lasketaan kaavan 3.12 mukaisesti. Parannusluku saadaan tämän jälkeen taulukosta 3.7. Jos kivirakenteen molemmiin puolin on levyverhous, niistä paremmin eristävän parannusluku otetaan huomioon täysimääräisenä ja huonommin eristävän parannusluvusta puolet:

$$\Delta R_{Dd,w} = \text{Max}[\Delta R_{D,w}, \Delta R_{d,w}] + \frac{\text{Min}[\Delta R_{D,w}, \Delta R_{d,w}]}{2} \quad (3.22)$$

Kun levyverhousten parannusluvut ovat selvillä, lasketaan ilmääneneristysluku tiloja erottavan rakenteen kautta $R_{Dd,w}$ tiloja erottavan kivirakenteen ilmääneneristysluvun $R_{s,w}$ ja parannusluvun perusteella:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (3.23)$$

Taulukko 3.7. Levyverhouksen ilmääneneristävyuden parannusluku ΔR_w [dB] levyverhouksen ja seinärakenteen muodostaman massa-jousi-massajärjestelmän ominaistajuuden funktiona. Ilmääneneristysluku R_w tarkoittaa verhotun rakenteen ilmääneneristyslukua

Ominaistajuus f_{mam} [Hz]	ΔR_w
≤ 80	$35 - R_w/2 \geq 0$
100	$32 - R_w/2 \geq 0$
125	$30 - R_w/2 \geq 0$
160	$28 - R_w/2 \geq 0$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
630-1600	-10
> 1600	-5

Ilmaääneneristysluvut kuvan 3.18 sivutiesiirtymäreittien kautta lasketaan tiloja erottavan rakenteen ilmaääneneristysluvun $R_{s,w}$ ja sivuavien rakenteiden ilmaääneneristyslukujen $R_{f,w}$ sekä eri reiteille mahdollisesti osuvien levyverhousten tuottamien ilmaääneneristävyyden parannuslukujen perusteella. Lisäksi tarvitaan liitoseristävyydet, joita määritettäessä otetaan huomioon suunta, johon ääni kulkee. Kaavojen 3.24-3.26 viimeinen termi ottaa huomioon tiloja erottavan rakenteen pinta-alan S_s [m²] ja sivuavan rakenteen ja erottavan rakenteen liitoksen pituuden l_f [m]:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (3.24)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (3.25)$$

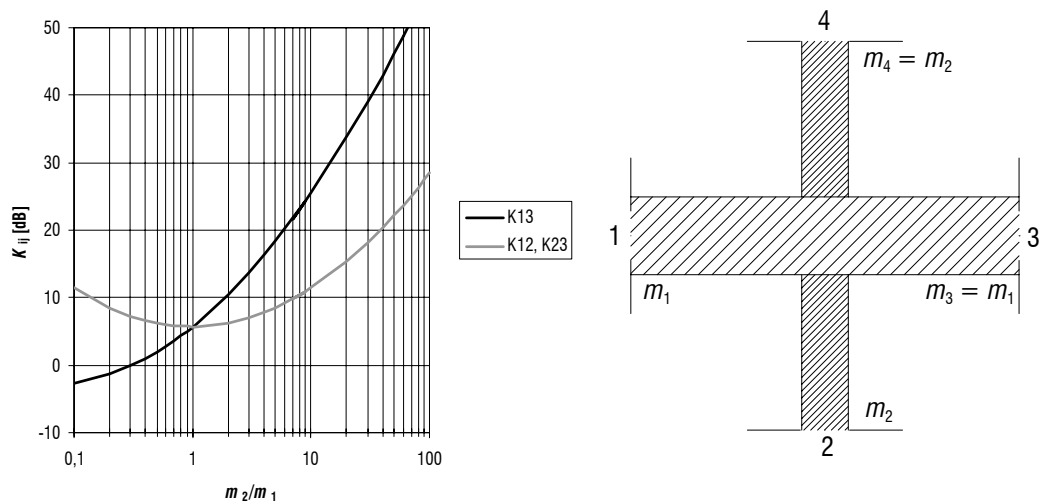
$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (3.26)$$

Kaavojen 3.24-3.26 alaindeksit viittaavat kuvassa 3.18 esitettyihin äänen suoraan kulku-reittiin ja sivutiesiirtymäreitteihin. Kun ilmaääneneristysluku erottavan rakenteen kautta ja ilmaääneneristysluvut kaikkien 12 sivutiesiirtymäreitin kautta ovat tulleet määritetyiksi, saadaan lasketuksi ilmaääneneristysluku tilojen välillä R'_w :

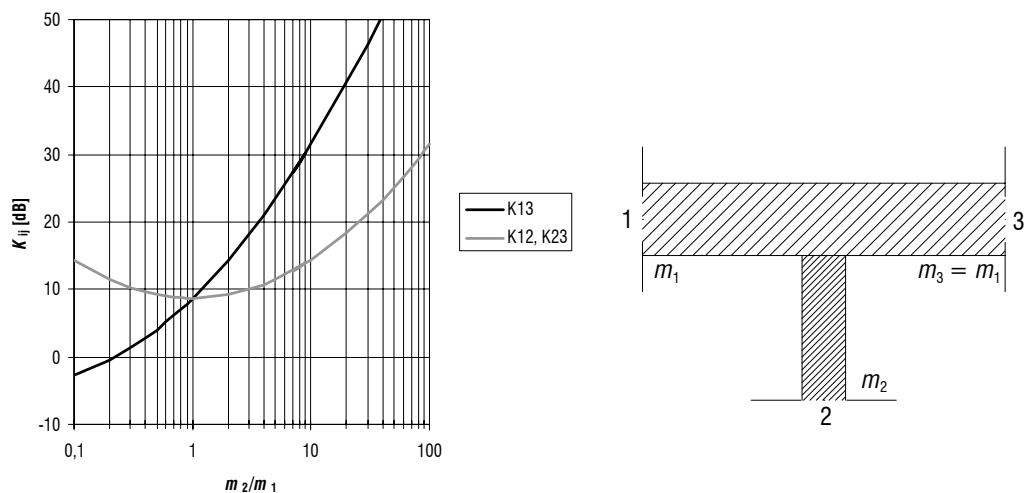
$$R'_w = -10 \lg \left(10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} \right) \quad (3.27)$$

3.4.2 Kivirakenteiden liitoseristävyydet

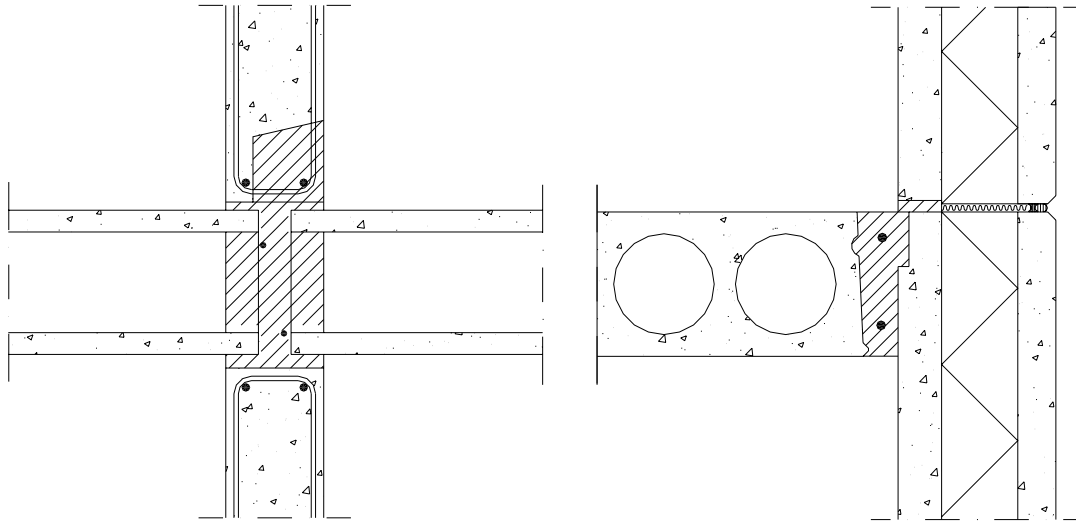
Raskaiden kivirakenteiden liitoseristävyydet perustuvat rakenteiden massaan ja liitosten jäykkyyteen. Kun tiloja erottava rakenne on sitä sivuavaa rakennetta raskaampi eli tiloja erottavan rakenteen pintamassan m_2 ja sivuavan rakenteen pintamassan m_1 suhteen ollessa yli 1 liitoseristävyys on sitä parempi mitä pienempi sivuavan rakenteen pintamassa on. Kuvissa 3.19 ja 3.20 on esitetty kahden tyyppillisen betoni- ja muiden kivirakenteiden liitostyyppien liitoseristävyyksiä. Kuvassa 3.21 on kivirakenteiden liitoseristävyyksiä, kun liitos on joustava. Joustavia liitoksia käytettäessä on huomattava, että joustava liitos parantaa liitoseristävyyttä vain suunnassa, jossa ääni kulkee joustavan liitoksen kautta. Muissa suunnissa liitoseristävyys heikkenee jäykkiin liitoksiin verrattuna, koska liitoksessa ei tapahdu yhtä paljon energiahäviöitä (kuva 3.22).



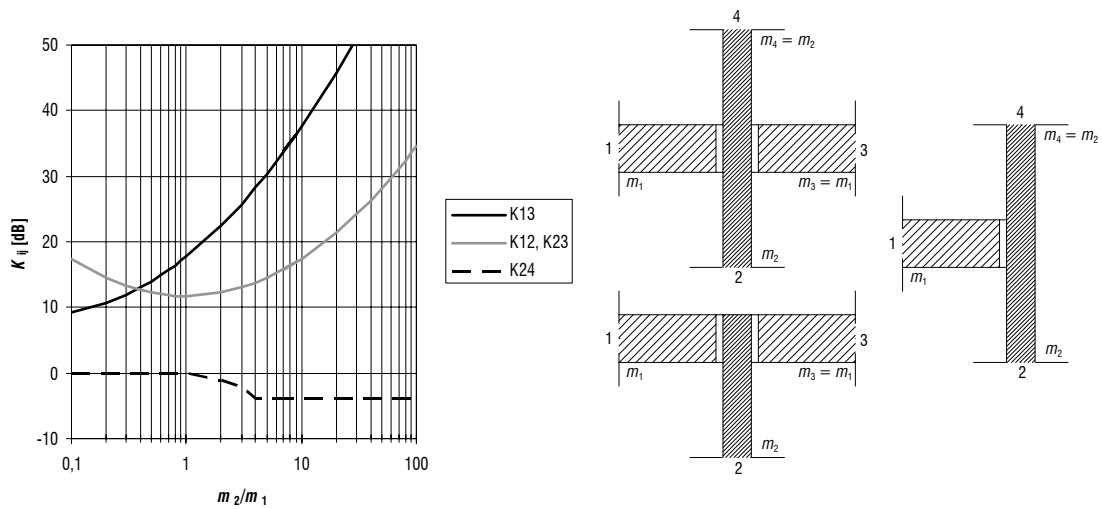
Kuva 3.19. Raskaiden kivirakenteiden jäykän ristiliitoksen liitoseristävyksiä. Tällaisia liitoksia ovat esimerkiksi betoniväliseinä- ja välipohjaelementtien liitokset. [7]



Kuva 3.20. Raskaiden kivirakenteiden jäykän T-liitoksen liitoseristävyksiä. Tällaisia liitoksia ovat esimerkiksi betoniväliseinäelementin liitokset ulkoseinän sandwich-elementteihin. [7]



Kuva 3.21. Esimerkkejä jäykistä liitoksista: betoniväliseinäelementin ja ontelolaataston liitos, betoniväliseinäelementin ja ulkoseinän sandwich-elementin liitos. [5]

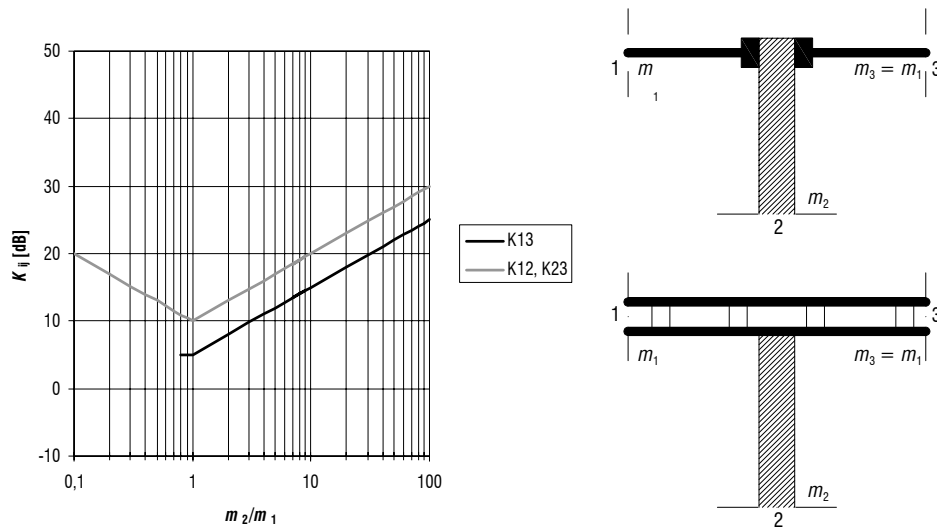


Kuva 3.22. Raskaiden kivirakenteiden joustavien liitosten liitoseristävyyksiä. Joustavilla liitoksilla savutetaan liitoseristävyyttä vain siinä suunnassa, jossa ääni kulkee joustavan liitoksen kautta. Muissa suunnissa liitoseristävyys heikkenee jäykkiin liitoksiin verrattuna. [7]

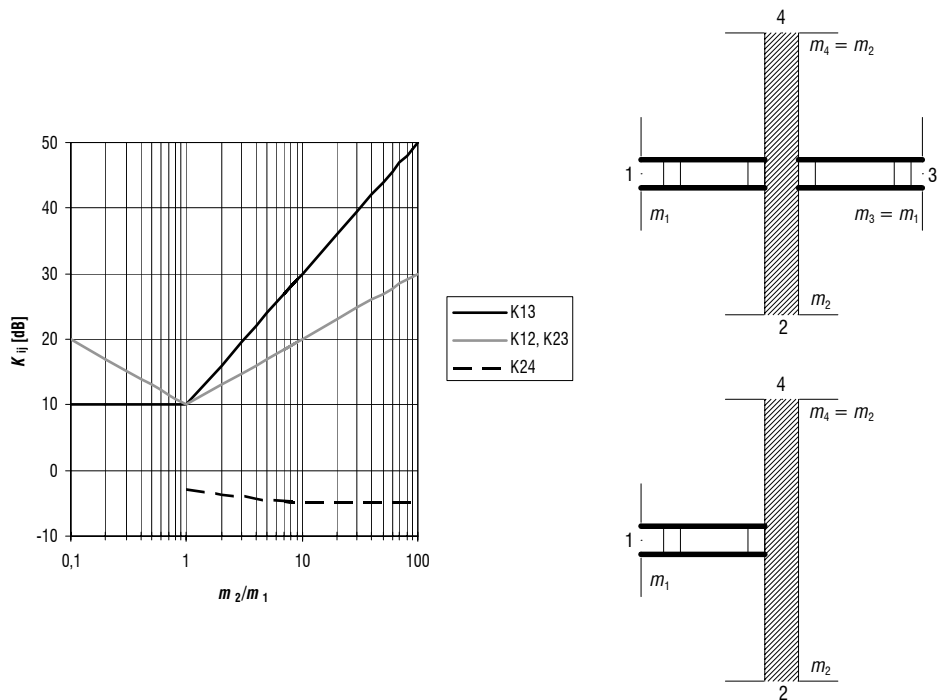
3.4.3 Kivirakenteiden ja levyrakenteiden liitosten liitoseristävyydet

Raskaan kivirakenteen ja kevyen levyrakenteen liitoksessa rakennusosien massojen suhde on huomattavasti suurempi kuin raskaiden rakennusosien liitoksissa. Siten liitoseristävyydet äänen kulkiessa kevyestä raskaaseen rakenteeseen tai päinvastoin ovat suurempia kuin raskaiden rakennusosien liitoseristävyydet. Toisaalta äänen kulkiessa

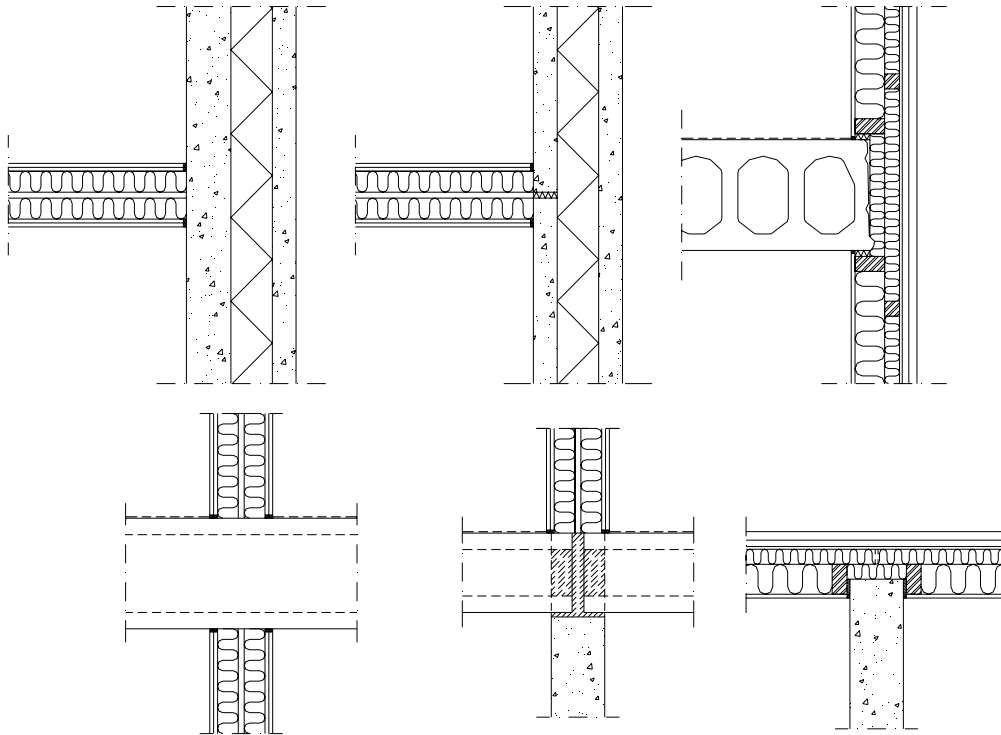
raskasta rakennetta pitkin siihen liittyvän kevyen rakenteen ohi liitoseristävyyys on heikompi kuin vastaavassa tilanteessa raskaiden rakenteiden liitoksessa (kuvat 3.23 ja 3.24). Kevyet rakennusosat ovat hyvää ilmaääneneristävyyttä tavoiteltaessa kaksinkertaisia rakenteita, joissa levyt on kiinnitetty joko samaan runkoon tai erillisiin runkoihin. Kaksinkertaisen rakenteen yhden puoliskon ilmaääneneristävyyys on melko vähäinen. Vaikka tällaisen rakenteen ja raskaan rakenteen liitoksessa liitoseristävyyys on hyvä, sivutiesiirtymää voi syntyä siksi, että yksinkertaisen levytyksen ilmaääneneristävyyys on heikko. Siksi tiloja erottavia raskaita rakenteita sivuavat kevyet rakenteet on yleensä katkaistava. Jos tiloja erottavaan levyrakenteeseen liittyvä ohut kivirakenne on myös katkaistava, jos tavoitellaan hyvää ilmaääneneristävyyttä (kuvat 3.25 ja 3.26).



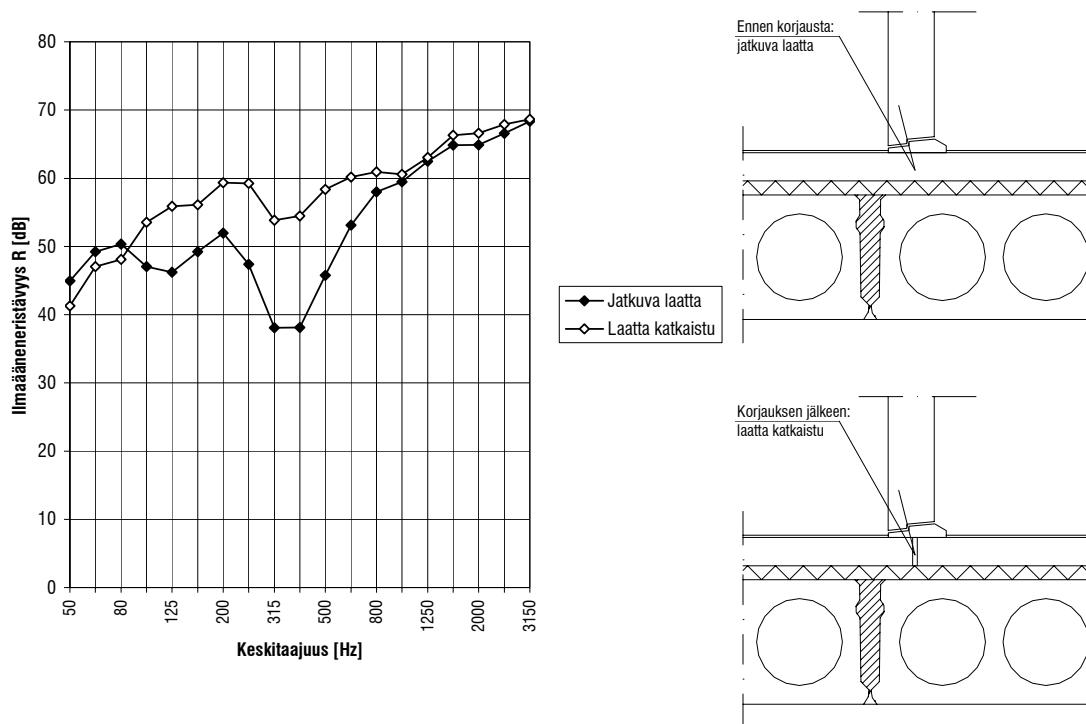
Kuva 3.23. Kivirakenteiden ja levyrakenteiden liitosten liitoseristävyyksiä. [7]



Kuva 3.24. Kivirakenteiden ja levyrakenteiden liitosten liitoseristävyyksiä. [7]



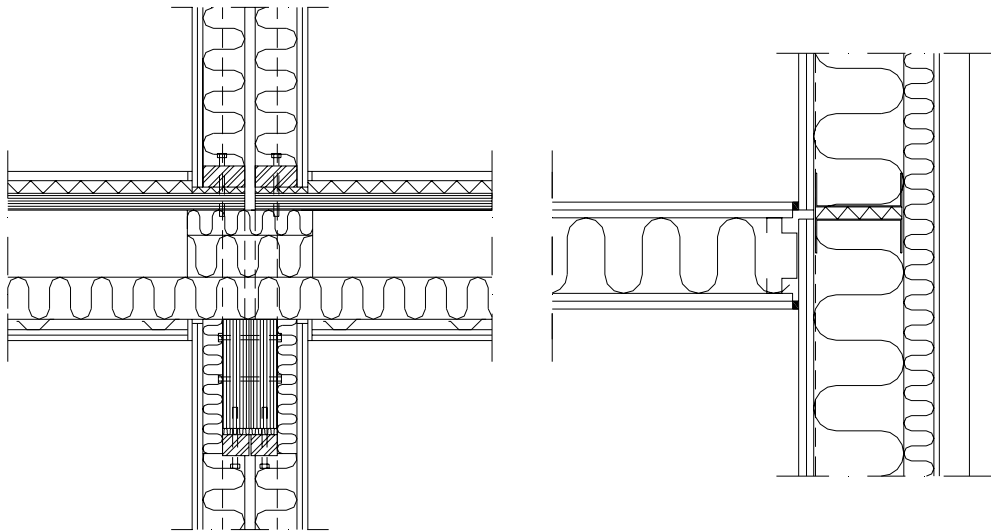
Kuva 3.25. Kivirakenteiden ja levyrakenteiden sivutiesiirtymää vähentäviä liitoksia. [5, 46]



Kuva 3.26. Kahden tilan välillä on varasto, jonka levyseinien ilmajääneneristysluku on 48 dB. Tilojen välille tavoiteltiin ilmajääneneristyslukuksi R'_w 60 dB. Kelluvan lattian 60 mm paksu betonilaatta oli rakennettu jatkuvaksi tilojen välillä, mikä aiheutti runsaasti sivutiesiirtymää tilasta toiseen: ilmajääneneristyslukuksi mitattiin 52 dB. 60 mm paksun betonilaatan koinsidenssitaajuus on noin 370 Hz. Tällä taajuusalueella jatkuva laatta heikensi ilmajääneneristävyyttä enimmillään 16 dB. Katkaisemalla laatta tiloja erottavan väliseinän kohdalla ilmajääneneristysluku R'_w parani arvoon 62 dB.

3.4.4 Sivutiesiirtymä levyrakenteissa

Kevyiden levyrakenteiden liitoksissa toisiinsa liittyvien rakenteiden pintamassat ovat suunnilleen yhtä suuret. Liitoseristävyydet ovat samaa luokkaa kuin kivrakenteisten rakennusosan liitoksissa. Koska kevyiden levyrakenteiden yksittäisten levykerrosten ilmääneneristävyydet ovat alhaisia, sivutiesiirtymää syntyy, jos tällainen rakenne on jatkuva tiloja erottavan rakenteen ohi. Siksi kevyissä rakenteissa tärkein keino estää sivutiesiirtymää on katkaista levyt tiloja erottavien rakenteiden kohdalla (kuva 3.27).



Kuva 3.27. Esimerkkejä sivutiesiirtymää estävistä kevyiden levyrakenteiden liitoksista: puukerrostalon huoneistoja erottavien välipohjan ja väliseinän liitos, huoneistoja erottavan yksirunkoisen väliseinän liitos ulkoseinään. [29, 58]

3.5 Rakennusosien yhdistelmät

3.5.1 Useasta rakennusosasta koostuva rakenne

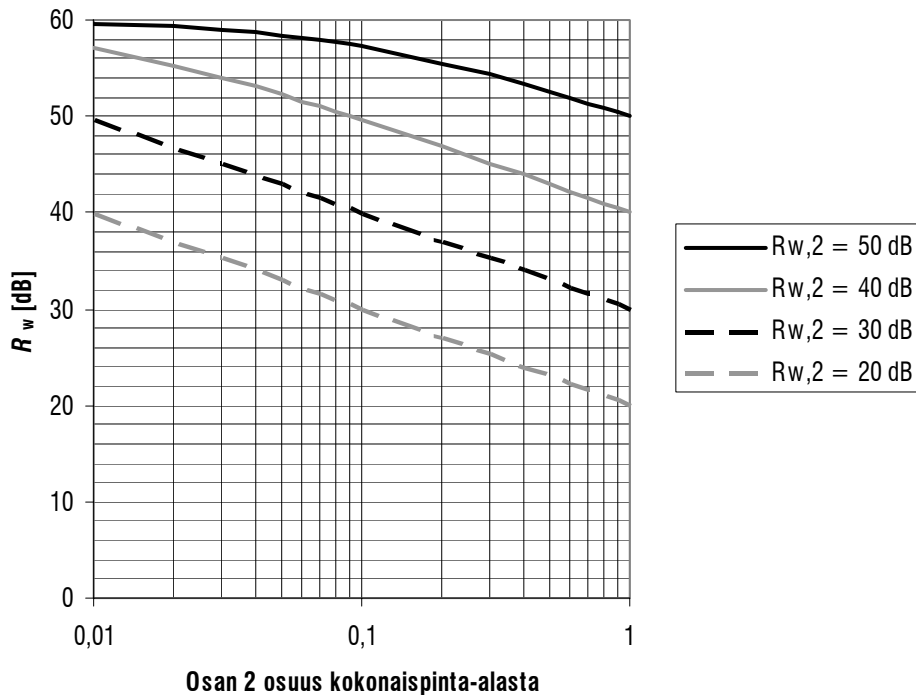
Tiloja erottava rakenne koostuu usein monesta rakennusosasta, joilla on erilainen ilmaääneneristyskyky. Esimerkiksi opetustilaa käytävästä erottavassa väliseinässä voi olla varsinaisen väliseinärakenteen lisäksi ovi ja lasiosia. Muita yleisiä tapauksia, joissa on selvitettävä usean rakennusosan muodostaman kokonaisuuden ilmaääneneristyskyky ovat muiden muassa toimistohuoneen ja käytävän välinen rakenne ovineen, terveyskeskuksen vastaanottohuoneen ja käytävän välinen rakenne ovineen ja asuinhuoneiston ja porrashuoneen välinen rakenne ovineen.

Useasta rakennusosasta koostuvan rakenteen yhteiseristävyys voidaan laskea, kun äänitehon oletetaan jakautuvan rakenteelle sen osien i pinta-alojen S_i suhteessa. Tällöin rakennusosien muodostaman kokonaisuuden ilmaääneneristävyys on osien ilmaääneneristävyyksien R_i perusteella

$$R = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-R_i/10}} \right) \quad (3.28)$$

Kaavalla 28 voidaan laskea yhteiseristävydet kolmannesoktaavi- tai oktaavikaistoittaisista ilmaääneneristävyyksistä. Kokonaisuuden ilmaääneneristysluku voidaan tällöin laskea yhteiseristävyksistä vertailukäyrämenettelyllä. Yleensä tavanomaisten kohteiden suunnittelun kannalta riittävän tarkka tulos saadaan, kun yhteiseristävyys lasketaan rakennusosien ilmaääneneristyslukujen perusteella (kuva 3.28). Tällöin kaava 3.28 voidaan kirjoittaa muotoon

$$R_w = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-R_{w,i}/10}} \right) \quad (3.29)$$

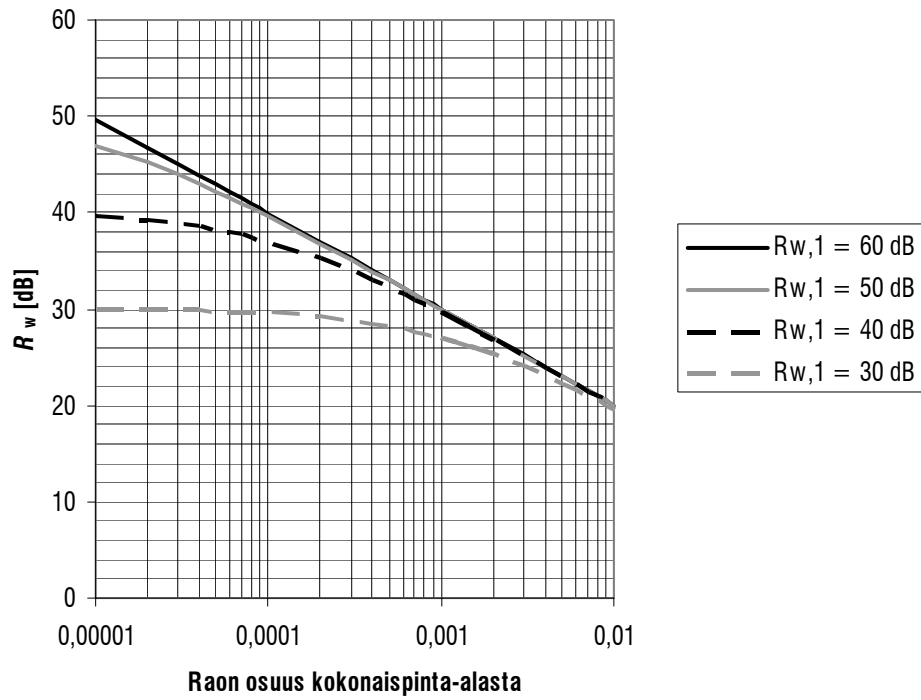


Kuva 3.28. Kahden rakennusosan muodostaman kokonaisuuden ilmastäneristysluku, kun toisen rakennusosan ilmastäneristysluku R_1 on 60 dB ja toisen rakennusosan ilmastäneristysluku R_2 vaihtelee. Osan 2 pinta-ala on esitetty sen osuutena koko rakenteen pinta-alasta.

3.5.2 Rakojen vaikutus ilmastäneristävyyteen

Ehdoton edellytys sille, että ilmastäneristävyyttä voidaan saavuttaa, on rakenteiden tiiviys. Jo pienikin rako heikentää rakenteen ilmastäneristyskykyä paljon. Tätä voidaan tutkia kaavojen 3.28 ja 3.29 avulla merkitsemällä raon ilmastäneristävyys nollassi. Tarkalleen ottaen tämä ei kaikissa tapauksissa pidä paikkaansa, koska pienten rakojen ilmastäneristävyys ei ole nolla, vaan ääni vaimenee jonkin verran kulkiessaan raon kautta tilasta toiseen. Käytännössä rako tiloja erottavassa rakenteessa kuitenkin tarkoittaa sitä, että suunniteltua ilmastäneristävyyttä ei voida saavuttaa (kuva 3.29).

Raon suhteellinen vaikutus rakennusosan ilmastäneristävyyteen on sitä suurempi, mitä suurempi ehjän rakennusosan ilmastäneristävyys on. Jos tilojen välille tavoitellaan alhaista ilmastäneristävyyttä, tiloja erottavassa rakenteessa voi olla pieniä rakoja. Jos ilmastäneristystavoite on korkea, rakenteessa ei sallita käytännössä lainkaan rakoja, sillä jo mitättömän pieni rako voi heikentää rakenteen ilmastäneristävyyttä yli 10 dB. Raot vaikuttavat esimerkiksi ikkunoiden ja yksinkertaisten ovien ääneneristyskykyyn: vaikka lasitus ja ovilevy voidaan suunnitella erittäin hyvin eristäväksi, tiivistäminen on vaikeaa, ja käytännössä saavutettava ilmastäneristysluku jää alle 50 dB.



Kuva 3.29. Raon vaikutus ilmasteneristävyydeltään erilaisiin rakenteisiin. Tiiviin rakenteen ilmasteneristysluku on annettu selitteessä. Raon pinta-ala on esitetty sen osuutena rakenteen kokonaispinta-alasta.

3.6 Ilmaääneneristyksen suunnittelu

3.6.1 Äänitasoihin perustuva suunnittelu

Vaativammissa kohteissa tilan käyttötarkoitus määrittelee äänitason, jonka ympäröivissä tiloissa tapahtuva toiminta saa synnyttää. Tällöin tiloja erottavan rakenteen ilmaääneneristävyys määräytyy viereisessä tilassa vallitsevan äänenpainetason L_1 ja vastaanottilassa sallittavan äänenpainetason L_2 perusteella. Kaavan 3.30 perusteella voidaan laskea taajuuskaistoittain vaadittava ilmaääneneristävyys. Kaavalla 3.30 voidaan myös laskea äänenpainetaso L_2 , kun tiloja erottavan rakenteen ilmaääneneristävyys R tai R' tunnetaan:

$$L_2 = L_1 - R + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (3.30)$$

Eristettävä äänenpainetaso L_1 mitataan tai lasketaan, jos tilassa on laitteita, joiden äänitehotasot tunnetaan. Sallittava äänenpainetaso voi perustua tilan käyttötarkoitukseen, jolloin sen määrittelee akustiikan asiantuntija. Se voi perustua myös rakentamismääräyksiin. Esimerkiksi asuinrakennuksen ilmanvaihtokonehuoneessa olevien laitteiden ympäristöönsä kehittämän äänen viereiseen asuinhuoneistoon aiheuttama A-painotettu keskiäänitaso saa olla enintään 28 dB kaikkien muiden äänilähteiden aiheuttama ääni mukaan lukien [56]. Tällöin on ensin selvitettävä ilmanvaihtokoneiden äänitehotasoista konehuoneeseen syntyvä äänenpainetaso L_2 oktaavikaistoittain. Sen jälkeen lasketaan asuinhuoneeseen syntyvät äänenpainetasot L_1 oktaavikaistoittain. Lopuksi suoritetaan A-painotus ja lasketaan A-äänitaso kaavan 2.6 mukaisesti. Eri tiloissa sallittavia äänitasoja on annettu Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 [57].

Taulukko 3.8. Asumisterveysohjeessa annetut pienitaajuisen melun 1 h keskiäänitason $L_{eq,1h}$ ohjearvot kolmannesoktaavikaistoittain tiloissa, joissa nukutaan. Ohjearvot eivät ole A-painotettuja äänitasoja, vaan painottamattomia äänenpainetasoja.

Kolmannesoktaavikaistan keskitaajuus [Hz]										
20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
74 dB	64 dB	56 dB	49 dB	44 dB	42 dB	40 dB	38 dB	36 dB	34 dB	32 dB

Asumisterveysohjeessa [2] on annettu raja-arvoja äänenpainetasoille ja äänitasoille, jotka aiheutuvat asuinrakennuksessa sijaitsevasta meluisasta tilasta, kuten tanssiravintolasta tai yökerhosta. Musiikkimelusta makuuhuoneisiin syntyvä alkuyön (klo 22-02) keskiäänitaso tunnin ajalta $L_{A,eq,1h}$ saa olla enintään 25 dB. Lisäksi pienitaajuiselle me-

lulle on määritelty kolmannesoktaavikaistoittain sallitut tunnin keskiäänepainetasot $L_{eq,1h}$ (taulukko 3.8).

3.6.2 Rakennetyypin valinta ilmaääneneristysluvun perusteella

Monet melulajit ovat sellaisia, että niiden keski- tai enimmäisäänitasoa on vaikeaa arvioida tai se vaihtelee jatkuvasti. Esimerkiksi asumisen äänet sisältävät puhetta, äänentoistolaitteiden ääntä, kävelyä, huonekalujen siirtelyä ja lasten leikkimistä, joiden aiheuttama äänitaso on kaikissa huoneistoissa erilainen, eikä rakenteiden suunnittelu voi silloin perustua keskiäänitasoihin. Siksi rakentamismääräyskokoelmassa [56] on määritelty vaadittavat ilmaääneneristysluvut asuinhuoneistojen välille (taulukko 3.9). Rakentamismääräyskokoelmaa täydentää standardi SFS 5907 [54], jossa on ohjeita ilmaääneneristysluvuista asuinhuoneistojen välille luokissa A-D sekä muiden rakennustyyppien tilojen välille. Taulukossa 3.10 on lueteltu tavallisimpien tilojen välille tavoiteltavia ilmaääneneristyslukuja. Asuinrakennusten ja majoitustilojen ilmaääneneristyslukuja määritettäessä standardi SFS 5907 edellyttää spektripainotustermin $C_{50-3150}$ ottamista huomioon luokissa A ja B; luokassa C sen käyttö on suositeltavaa.

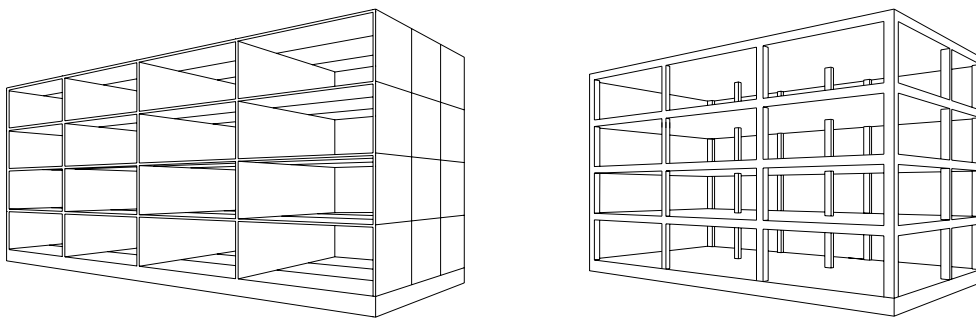
Rakentamismääräyskokoelman mukaan rakennusten ääneneristyksen vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa mittauksin, laskentamenetelmin tai käyttämällä aikaisemmin hyväksytyjä rakenneratkaisuja. Yleisin tapa tavanomaisessa rakentamisessa on aikaisemmin hyväksytyjen rakenneratkaisujen käyttö. Tällöin suunnittelijoiden tehtävänä on valita vaaditun ilmaääneneristysluvun perusteella sopiva rakennetyyppi ja sivutiesiirtymää riittävästi estävät liitokset. Tällaisia mittauksin toimiviksi osoitettuja ratkaisuja on esitetty esimerkiksi rakennusalan järjestöjen julkaisemissa suunnitteluohjeissa [5, 36, 46].

Suunnitteluohjeet perustuvat lähinnä kahteen betonirunkojärjestelmään. Asuinkerrosten runkojärjestelmä vakiintui BES-järjestelmän myötä 1970-luvun alkupuolella seinä-laattarungoksi (kuva 3.30). Rakennejärjestelmässä on kantavat betoniväliseinät, jotka ovat vähintään 180 mm paksuja. Ulkoseinät ovat päätyjä lukuun ottamatta ei-kantavia rakenteita, joko betonisandwich-elementtejä tai sisäkuorielementtejä, jolloin ulkokuori muurataan työmaalla. Välipohjassa käytettiin pitkään lähes yksinomaan ontelolaattoja, mutta viimeisten viiden vuoden aikana paikalla valetut välipohjalaatat ovat yleistyneet jälleen. Jonkin verran käytetään myös kuorilaattaelementtejä. Välipohjalaatan paksuus ja kelluvan lattian tarve riippuu lattianpäällysteestä. Yleensä välipohjalaatta on 370 mm paksu ontelolaatasto tai vähintään 240 mm paksu paikalla valettu teräsbetonilaatta. Seinä-laattarungon ilmaääneneristävyys perustuu rakenteiden massaan ja liitosten jäykkyyteen, jotka vähentävät sivutiesiirtymää riittävästi.

Taulukko 3.9. Standardin SFS 5907 suositukset asuinrakennusten tilojen väliseksi ilmasteneristysluvuiksi R'_w . Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 määräykset asuinhuoneistojen välisistä ilmasteneristyslukuista on esitetty lihavoituina. Luokissa A ja B lukuarvoon sisältyy spektripainotusermi $C_{50-3150}$. Oven tai oviyhdistelmän ääneneristysluokan tulee olla vähintään 30 dB.

Tila	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
Asuinhuoneiston ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä	63 dB	58 dB	55 dB	49 dB
Asuinhuoneiston ja toista asuinhuoneistoa palvelevan uloskäytävän välillä, kun välissä on ovi	44 dB	39 dB	39 dB	34 dB

Toimistorakennusten, terveyskeskusten, koulujen ja hotellien yleinen runkojärjestelmä on pilari-laattarunko (kuva 3.30). Myös asuinkeuhkalo voidaan toteuttaa pilari-laattajärjestelmällä. Pilari-laattarunko voidaan rakentaa kokonaan paikalla valaen tai kokonaan elementeistä, jolloin laattoja kantamaan tarvitaan pilareihin tukeutuvat palkit. Väliseinät ovat ei-kantavia rakenteita, samoin ulkoseinät. Pilari-laattarunko toteutetaan usein myös niin, että ulkoseinät ovat kantavia, ja rakennuksen keskellä kulkee pilari-palkkilinja. Jos käytetään levyrakenteisia väli- ja ulkoseinärakenteita, sivutiesiirtymä on pystysuunnassa vähäistä suurten liitoseristävyyksien johdosta. Tästä syystä pilari-laattarunkoisessa rakennuksessa ilmasteneristävyys pystysuunnassa on yleensä parempi kuin seinä-laattarunkoisessa rakennuksessa, kun välipohjarakenne on sama. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että sivutiesiirtymä ulkoseinärakenteen kautta on estetty katkaisemalla rakenne. Vaakasuunnassa ilmasteneristävyys on eri runkojärjestelmillä toteutetuissa rakennuksissa suunnilleen sama, mutta pilari-laattarunkoisissa taloissa eristävyys on matalilla taajuuksilla yleensä heikompi, kun käytetään levyrakenteisia väliseiniä. Välipohjalaatta on yleensä vähintään 265 mm paksu ontelolaatasto (380 kg/m^2).



Kuva 3.30. Asuinkeuhkalojen seinä-laattarunko ja toimistorakennuksissa, terveyskeskuksissa, kouluissa ja hotelleissa tavallinen pilari-laatta-palkkirunko, joka voidaan tehdä kokonaan elementeistä tai valaa välipohjalaatasto paikalla. [5]

Taulukko 3.10. Standardin SFS 5907 suosituksia tilojen väliseksi ilmaääneneristyslukuiksi. Standardissa ohjearvoja on runsaammin.

Tila	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
Majoitushuoneen ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä	60	55	52	48
Majoitushuoneen ja käytävän välillä, kun välissä on ovi	44	39	39	34
Yhden hengen toimistohuoneiden välillä	44	40	35	35
Neuvotteluhuoneen ja muun tilan välillä yleensä	48	44	40	40
Luottamuksellisuutta edellyttävän neuvotteluhuoneen ja muun tilan välillä	60	55	52	48
Luokkahuoneiden välillä	48	48	44	-
Luokkahuoneen ja käytävän välillä, kun välissä on ovi	39	39	34	-
Musiikkiluokan, teknisen työn luokan ja käsityöluokan ja muun tilan välillä	65	65	57	-
Koulukuraattorin, psykologin, lääkärin ja terveydenhoitajan huoneen ja muun tilan välillä	52	52	48	-
Koulukuraattorin, psykologin, lääkärin ja terveydenhoitajan huoneen ja muun tilan välillä, kun välissä on ovi	44	44	39	-
Potilashuoneen ja muun tilan välillä	52	52	48	-
Potilashuoneen ja käytävän välillä, kun välissä on ovi	39	39	34	-
Vastaanottohuoneen ja muun tilan välillä	52	52	48	-
Vastaanottohuoneen ja muun tilan välillä, kun välissä on ovi	52	52	48	-

Taulukossa 3.11 on lueteltu joitakin rakenteita, joita käytetään tiloja erottavina välipohja- ja väliseinärakenteissa pilari-laatta- ja seinä-laattarunkoisissa taloissa. Taulukon ilmaääneneristysluvut perustuvat siihen, että välipohjalaataston massa on vähintään 380 kg/m², jos välipohja on ontelolaatasto, tai vähintään 500 kg/m², jos välipohja on paikalla valettu betonilaatta. Mahdollisten kevyiden ulkoseinärakenteiden kautta tapahtuvan sivutiesiirtymän pitää olla estetty.

Taulukko 3.11. Väliseinä- ja välipohjarakenteiden ilmaääneneristyslukuja laboratorio- ja kenttämittauksissa.

R_w	R'_w	Rakenne
≥ 65 dB	≥ 60 dB	Betonilaatta 300 mm
		Betoni 100 mm, mineraalivilla 50 mm, betoni 100 mm
		2 x kipsilevy, teräsranka 70 mm ja mineraalivilla, väli 10 mm, teräsranka 70 mm ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy 13 mm
		Rappaus, tiili 130 mm, mineraalivilla 50 mm, tiili 130 mm, rappaus
≥ 60 dB	≥ 58 dB	Betonilaatta 240 mm
		Ontelolaatasto 370 mm (510 kg/m ²)
		Ontelolaatasto 265 mm (380 kg/m ²) ja pintavalu 60 mm
		2 x kipsilevy, puurunko 70 mm ja mineraalivilla, väli 10 mm, puurunko 70 mm ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy 13 mm
≥ 58 dB	≥ 55 dB	Betoni 180 mm
		Ontelolaatasto 265 mm (380 kg/m ²)
		Rappaus, tiili 200 mm, rappaus
		Rappaus, tiili 130 mm, ilmaväli 20 mm, teräsranka 70 mm ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy 13 mm
≥ 52 dB	≥ 48 dB	Betoni 120 mm
		Rappaus, tiili 130 mm, rappaus
		2 x kipsilevy 13 mm, teräsranka 70 mm ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy 13 mm
		Tasote, kevytbetoni 375 mm, tasote
≥ 48 dB	≥ 44 dB	Betoni 80 mm
		Tiiviisti muurattu tiili 130 mm
		Rappaus, tiili 85 mm, rappaus
		2 x kipsilevy 13 mm, teräsranka 70 mm ja mineraalivilla, 1 x kipsilevy 13 mm

4

Askelääneneristys

”Kun halutaan parantaa jonkin valmiin välipermannon iskuääneneristys, on lähimpänä kovan lattian peittäminen pehmeällä, huokoisella matolla tms.”

Yli-insinööri Paavo Arni 1949

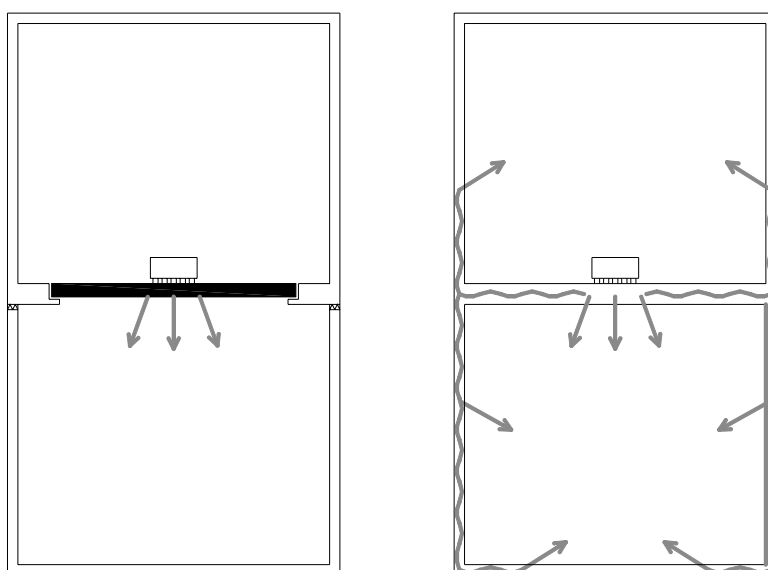
4.1 Askelääneneristykseen arviointi

4.1.1 Askeläänitasoluku [24-25, 28]

Askeläänit ovat kävelystä, esineiden putoilemisesta, huonekalujen siirtelystä ja muista vastaavista tapahtumista syntyviä runkoääniä. Tällaisen iskun saanut rakenne saa ympärillään olevan ilman värähtelemään, jolloin isku havaitaan rakenteen toisella puolella ilmaääninä. Askelääneneristykseen tarkoituksena on vähentää rakenteisiin kohdistuvien iskujen aiheuttamaa ääntä. Rakenteen askelääneneristävyyteen vaikuttavat samat ilmiöt kuin ilmaääneneristävyyteen, mutta äänen syntymekanismi on erilainen. Siksi myös keinot, joilla askelääneneristys toteutetaan, ovat osittain erilaiset kuin ilmaääneneristyksessä.

Askelääneneristystä ei voida arvioida lähetystilassa ja vastaanottotilassa havaittavan äänitehon suhteen perusteella kuten ilmaääneneristystä, vaan sitä arvioidaan epäsuorasti: äänilähteenä on standardoitu askeläänikoje, jonka toiseen tilaan tuottamat äänenpainetasot mitataan taajuuskaistoittain. Rakenteiden askelääneneristyskyky on siten sitä parempi, mitä alhaisempia mitatut äänenpainetasot ovat. Useimmiten äänenpainetasot mitataan lähetystilan alapuolella sijaitsevassa huoneessa, mutta ne voidaan mitata vierisissä tai yläpuolisissa tiloissa. Esimerkiksi rivitaloissa vierekkäisten huoneistojen tulee täyttää määräykset askelääneneristyksestä. Kun asuinkerrostalon kellarikerroksessa on päivittäistavara-kauppa, askelääneneristystä voidaan mitata niin, että askeläänikoje on kaupassa ja äänenpainetasot mitataan kaupan yläpuolella olevassa huoneistossa.

Askelääneneristystä voidaan ilmaääneneristykseen tavoin arvioida sekä laboratoriossa että kenttämittauksin valmiissa rakennuksissa tehtävin mittauksin (kuva 4.1). Laboratoriomittauksin saadaan tietoa yksittäisten rakenteiden askelääneneristyskyvystä. Äänen siirtyminen rakennuksen tilasta toiseen tilaan on monimutkainen ilmiö, johon sisältyy äänen siirtyminen suoraan tiloja erottavan rakenteen kautta sekä kaikkien muiden reittien kautta sivutiesiirtymänä. Rakentamismääräykset koskevat askelääneneristystä rakennuksessa, joka voidaan varmuudella selvittää vain mittauksin rakennuksessa. Suunnitelu perustuu rakennuksessa tehtyihin mittauksiin toimivien rakenneratkaisujen käyttöön tai laskentamenetelmiin, joiden lähtötietoina käytetään laboratoriomittausten tuloksia.



Kuva 4.1. Laboratoriomittauksin saadaan selville yksittäisen rakennusosan askelääneneristyskyky. Mittaukseen rakennuksessa sisältyy sivutiesiirtymä tiloja erottavaa rakennetta sivuavien rakenteiden kautta.

Askeläänikojeessa on viisi 0,5 kg painavaa vasaraa, jotka putoavat 40 mm korkeudelta lattialle (kuva 4.2). Kukin vasara aiheuttaa lattiaan iskun kahdesti sekunnissa, jolloin koko koje kohdistaa lattiaan 10 iskua sekunnissa. Äänenpainetasot mitataan vastaanottilassa kolmannesoktaavikaistoittain 16 keskitajuudella 100-3150 Hz. Laboratoriossa mitatusta askeläänikojeen aiheuttamasta äänenpainetasosta käytetään merkintää L ja rakennuksessa mitatusta merkintää L' . Standardit edellyttävät, että askeläänikojeella on lähetyshuoneessa vähintään neljä paikkaa ja sen tuottamaa ääntä mitataan vastaanottohuoneessa vähintään neljästä kohdasta. Mittausten vähimmäismäärä on kuusi, mutta on suositeltavaa sisällyttää mittauksiin enemmän kuin kuusi mittausta luotettavamman tuloksen saamiseksi. Eri kohdista mitatuista äänenpainetasoista L_j [dB] lasketaan energia-keskiarvo

$$L = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (4.1)$$

Tilaan syntyvä äänenpainetaso riippuu tilan absorptioalasta A [m²], jonka määrittämiseksi mitataan vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T [s] sekä tilavuus V [m³]. Absorptioala lasketaan Sabineen kaavalla. Absorptioalan avulla erilaisissa tiloissa mitatut tulokset saadaan riippumattomiksi tilan kalustuksesta ja tilavuudesta ja siten vertailukelpoisiksi. Mitattu äänenpainetasojen energiakeskiarvo normalisoidaan suhteessa vertailuabsorptioalaan A_0 , jonka arvo on 10 m². Vertailuabsorptioala vastaa puolen sekunnin jälkikaiunta-aikaa huoneessa, jonka tilavuus on 30 m³. Tällaisia huoneita ovat tyypillisesti

kalustetut makuuhuoneet. Normalisoitu askeläänenpainetaso eli askeläänitaso tietyllä taajuudella on tällöin laboratoriossa

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad (4.2)$$

ja kenttämittauksessa rakennuksessa

$$L'_n = L'_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad (4.3)$$

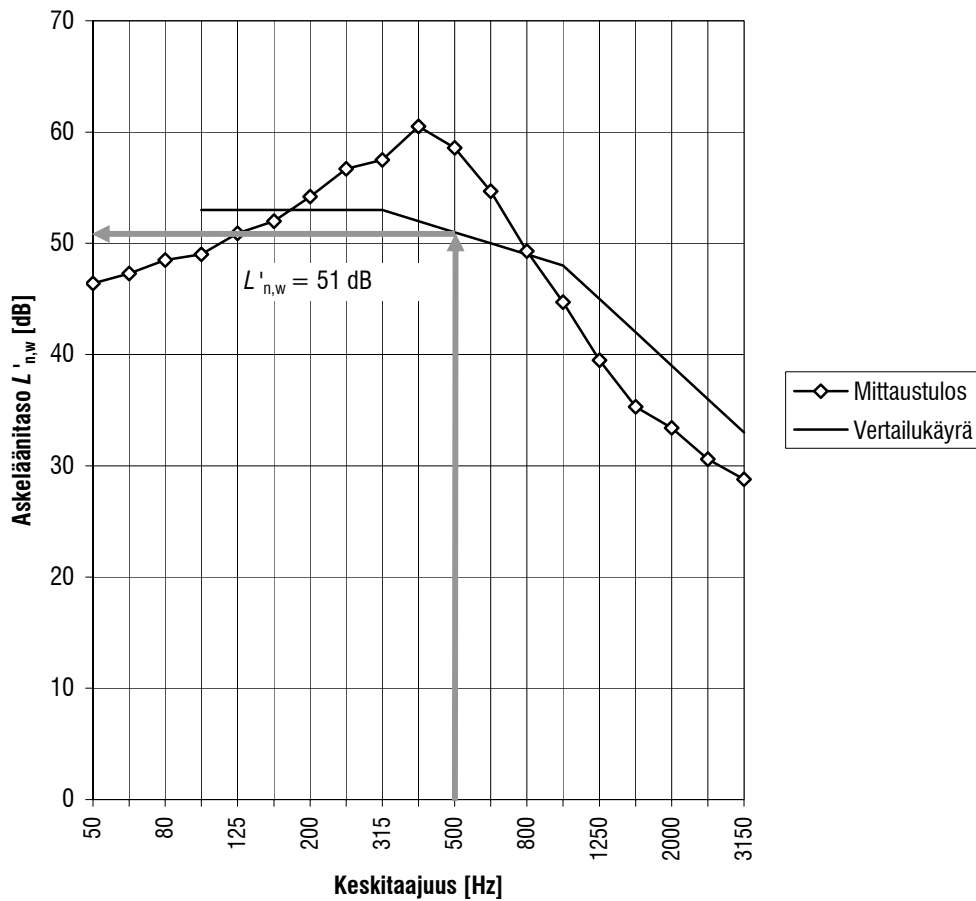
Ilmaääneneristävyyden tavoin myös askelääneneristykseen mittaustulos ja vaatimus esitetään yhtenä lukuna (kuva 4.3). Taajuuskaistoittain mitattuja askeläänitasoja verrataan vertailukäyrään (taulukko 4.1) siten, että vertailukäyrää siirretään 1 dB portain sellaiseen asemaan, että taajuuskaistoittain mitattujen askeläänitasojen epäsuotuisien poikkeamien summa vertailukäyrän arvoihin on enintään 32 dB. Epäsuotuinen poikkeama tarkoittaa sitä, että mitattu askeläänitaso on suurempi kuin vertailukäyrän arvo. Vertailukäyrän sijainnin määräävät siten vertailukäyrän arvoja korkeammat askeläänitasot. Kun vertailukäyrä on saatu sijoitetuksi alimpaan mahdollisimpaan asemaan, jossa poikkeamien summa ei ylitä 32 dB, askeläänitasoluku luetaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta. Laboratoriossa mitatusta askeläänitasoluvusta käytetään merkintää $L_{n,w}$ ja rakennuksessa mitatusta merkintää $L'_{n,w}$.



Kuva 4.2. Standardoidun askeläänikojeen viisi teräsvasaraa lyövät välipohjaan 10 iskua sekunnissa.

Taulukko 4.1. Vertailukäyrän arvot kolmannesoktaavikaistoittain, kun askeläänitasoluvun arvo on 53 dB.

Keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]	Keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]
100	55	630	52
125	55	800	51
160	55	1000	50
200	55	1250	47
250	55	1600	44
315	55	2000	41
400	54	2500	38
500	53	3150	35

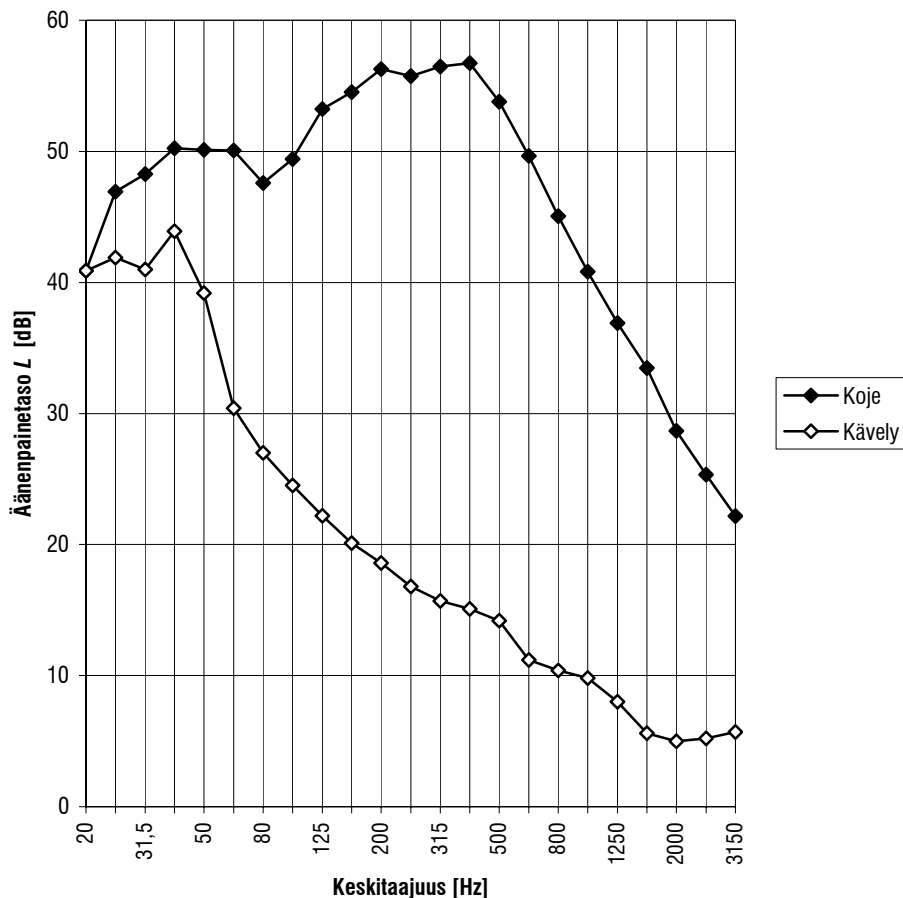


Kuva 4.3. Asuinkerrostalon lautaparketilla päällystetyn välipohjarakenteen (ontelolaatasto, massa 510 kg/m²) askeläänitasot mitattuna rakennuksessa. Askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ on 51 dB.

4.1.2 Spektripainotusermit

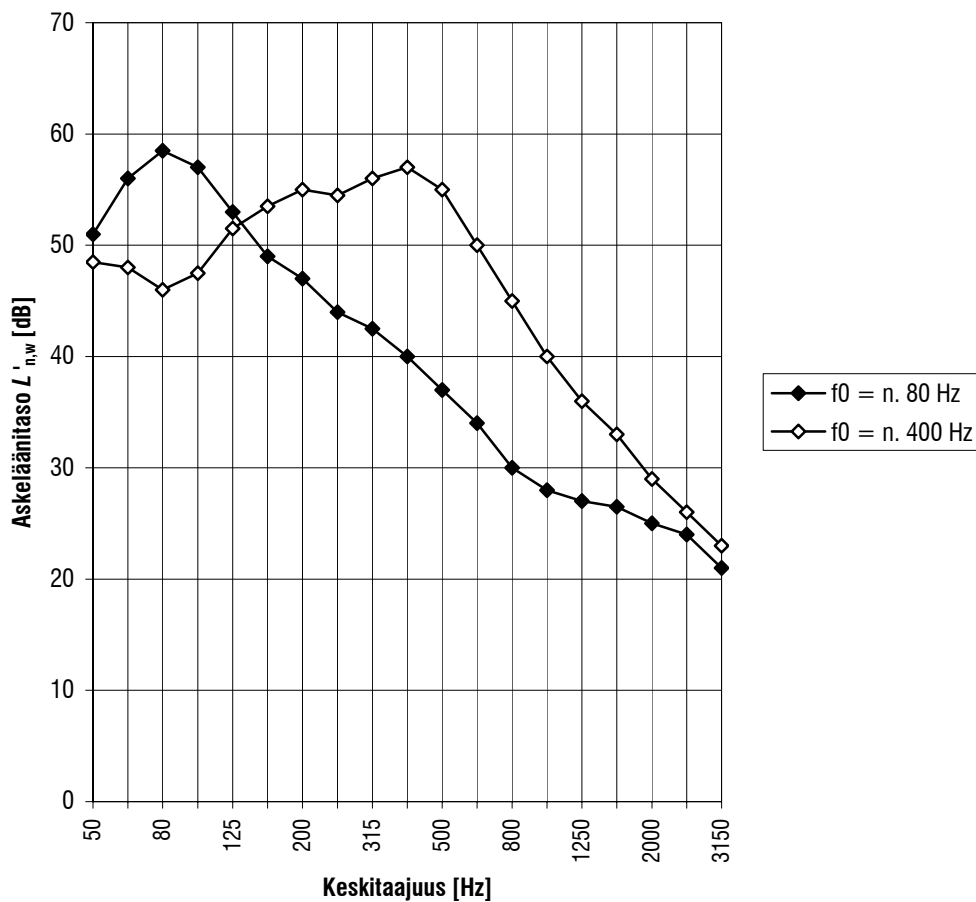
Askelääneneristystä arvioitaessa äänilähteinä ei voida käyttää kävelyä tai putoilevia esineitä, sillä tällaisten äänilähteiden aiheuttama äänenpainetaso on aina erilainen eikä niiden perusteella ole mahdollista tehdä objektiivista mittausta. Siksi niiden sijasta käytetään objektiivista äänilähdettä, standardoitua askeläänikojetta. Askeläänikojeen tuottamista äänenpainetasoista tai askeläänitasoluista ei kuitenkaan voida päätellä, millaisia äänenpainetasoja rakennuksessa tapahtuvasta toiminnasta syntyy: esimerkiksi kävely ja askeläänikoje tuottavat taajuusjakaumaltaan ja voimakkuudeltaan erilaiset äänenpainetasot (kuva 4.4).

Kävelyn ja kojeen tuottamien äänenpainetasojen eron lisäksi kuvasta 4.4 nähdään muitakin rakenteen akustiseen toimintaan liittyviä seikkoja. Kuvan rakenteen lattianpäällysteen ominaistaajuus eli taajuus, jolla rakenne herkimmin värähtelee, on noin 400 Hz. Sen yläpuolella kojeen aiheuttamat askeläänitasot alenevat jyrkästi. Standardin mukaisesta mittauksesta voidaan siten päätellä rakenteen akustisen toiminnan periaate. Kävely sitä vastoin ei herätä lattianpäällysteen ominaistaajuutta, vaan kävelyn aiheuttamat äänenpainetasot ovat suurimmillaan alle 80 Hz keskitäajuuksilla.



Kuva 4.4. Askeläänikojeen ja kävelyn aiheuttamat äänenpainetasot lautaparketilla ja joustavalla alustalla päällystetyn 300 mm paksun betonilaatan alapuolella olevassa huoneessa.

Välipohjan kantavan rakenteen päällä olevan lattianpäällysteen ja siihen liittyvien rakenteiden ominaistajuus on asuinrakennuksissa yleensä 30-500 Hz (kuva 4.5). Ominaisuuden ollessa alhainen kävelyn aiheuttama heräte voi johtaa siihen, että kävely kuuluu toisessa tilassa matalana äänenä. Monet pitävät tällaista ääntä häiritsevänä. Usein tämä ilmiö esiintyy matalammilla taajuuksilla kuin 100 Hz, josta standardin mukainen mitta-alue alkaa. Pelkästään askeläänitasoluvun $L_{n,w}$ tai $L'_{n,w}$ perusteella ei siten kaikissa tapauksissa ole mahdollista arvioida rakenteen käyttökelpoisuutta. [33, 45, 55]



Kuva 4.5. Askelääneneristysmittauksessa näkyy ero kahden välipohjarakenteen akustisessa toiminnassa: mustilla pisteillä merkityn rakenteen lattianpäällysteen ominaistajuus f_0 on noin 80 Hz ja valkoisilla merkityn noin 400 Hz. Askeläänitasoluvut $L'_{n,w}$ ovat vastaavasti 42 ja 49 dB. Kun otetaan huomioon spektrisovitustermi $C_{1,50-2500}$, rakenteiden ero pienenee: askeläänitasoluvun ja spektrisovitustermin summat ovat 48 dB ja 49 dB.

Kuulon herkkyys on matalalla taajuusalueella heikompi kuin keskitaajuuksilla, mutta siitä huolimatta matalataajuiset askeläänet voivat olla ihmisten subjektiivisen kokemuksen kannalta erittäin merkittäviä. Siksi standardissa SFS 5907 [54] suositellaan mitattavan taajuusalueen laajentamista keskitaajuuksille 50, 63 ja 80 Hz. Standardissa ISO 717-2 on määritelty spektripainotustermi C_1 taajuuskaistoille 100-2500 Hz ja $C_{1,50-2500}$ taajuuskaistoilla 50-2500 Hz. Mitatut spektrisovitustermit ilmoitetaan ISO-standardin

mukaan askeläänitasoluvun kanssa seuraavasti: $L'_{n,w}(C_1; C_{1,50-2500}) = 49 (1; 3)$ dB. SFS-standardissa askelääneneristysvaatimukset ilmoitetaan askeläänitasoluvun ja spektripainotusermin $C_{1,50-2500}$ summana. Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$ lasketaan taajuuskaistoilla 50-2500 Hz mitatuista normalisoiduista äänenpainetasoista ja askeläänitasoluvusta [28]:

$$C_1 = 10 \lg \sum_{i=50}^{2500} 10^{L_{n,i}/10} - 15 - L'_{n,w} \quad (4.4)$$

Askeläänitasoluvun ja spektripainotusermin summan $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$ on todettu vastaavan paremmin ihmisten subjektiivista kokemusta askelääneneristyksestä ja välipohjarakenteiden keskinäisestä järjestyksestä kuin pelkän askeläänitasoluvun. Ääneneristysmittauksiin sisältyy aina epävarmuutta, joka riippuu mittalaitteiden tarkkuudesta, mittausolosuhteista sekä äänikentästä tilassa. Matalilla taajuuksilla epävarmuus kasvaa, mutta äänikentästä johtuvat erot taajuusalueella 50-250 Hz ovat niin pieniä, että mittausepävarmuus ei estä laajentamasta mitattavaa taajuusaluetta 50 Hz keskitaajuuteen saakka. Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ mittausepävarmuus on noin ± 2 dB; summan $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$ mittausepävarmuus on noin ± 3 dB. Spektripainotusermin $C_{1,50-2500}$ arvo voi ylittää 10 dB, joten 1 dB lisäys mittausepävarmuuteen verrattuna ihmisen subjektiiviseen kokemukseen rakenteesta on vähäinen. [33, 45]

4.1.3 Askelääneneristävyiden parannusluku [26, 28]

Erilaisten lattianpäällysteiden askelääneneristyskyky voidaan ilmoittaa askelääneneristysmittauksiin perustuvina tunnuslukuina standardien ISO 717-2 ja ISO 140-8 mukaisesti. Tunnusluvut perustuvat siihen, että massiivisen betonisen välipohjalaatan askeläänitasot mitataan päällystettynä ja päällystämättöminä. Mittaustulosten erotuksena saadaan askeläänitasojen alenemat ΔL kolmannesoktaavikaistoittain (kuva 4.6). Lattianpäällyste on sitä parempi, mitä suurempia sen tuottamat askeläänitasojen alenemat ovat.

Askeläänitasojen alenemat ovat riippumattomia päällystämättömän välipohjan tuottamista askeläänitasoista, mutta päällystetyn välipohjan askeläänitasoluku $L_{n,w}$ riippuu jonkin verran päällystämättömän välipohjan tuottamista askeläänitasoista. Tämä on otettava huomioon, jos lattianpäällysteen askelääneneristävyttä parantava vaikutus halutaan ilmoittaa yhdellä luvulla. Tämä luku, askelääneneristävyiden parannusluku ΔL_w saadaan vähentämällä päällystämättömän standardoidun välipohjan askeläänitasoista taajuuskaistoittain mitatut askeläänitasojen alenemat ΔL . Näin saaduista askeläänitasoista lasketaan askeläänitasoluku $L_{n,w}$. Askelääneneristävyiden parannusluku on ΔL_w standardoidun päällystämättömän välipohjan askeläänitasoluvun $L_{n,eq,0,w}$ ja sen ja askeläänitasojen perusteella lasketun askeläänitasoluvun erotus:

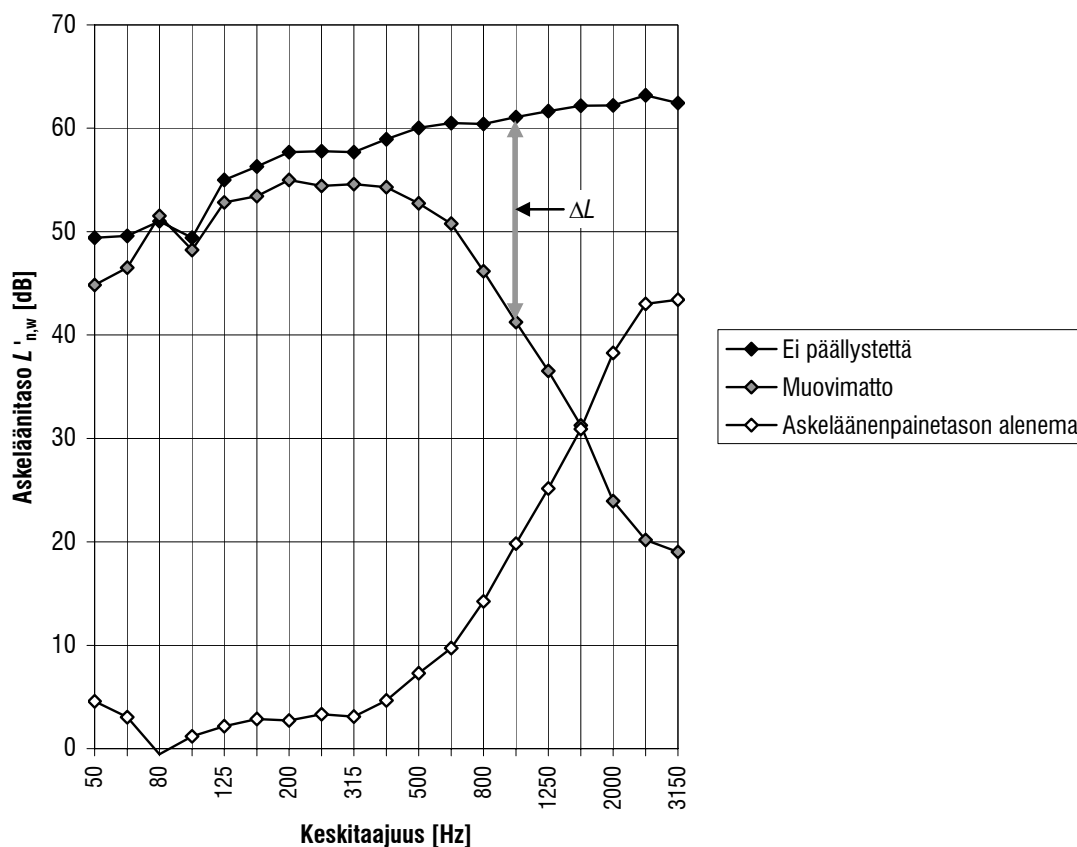
$$\Delta L_w = L_{n,eq,0,w} - L_{n,w} \quad (4.5)$$

Lattianpäällysteiden valmistajat ilmoittavat tuotteistaan askelääneneristävyyden parannusluvun ΔL_w . Tavanomaisissa suunnittelukohteissa sen käyttö johtaa laskennallisesti riittävän tarkkaan askeläänitasolukuun.

4.2 Välipohjien askelääneneristys

4.2.1 Joustavat lattianpäällysteet

Ontelolaatastojen ja paikalla valettujen betonilaattojen hyvä askelääneneristys perustuu niiden suureen massaan. Tällaisten rakenteiden massan kasvattaminen on käytännön syistä mahdollista vain tiettyyn rajaan saakka: rakenteiden oma paino vaikuttaa kantavien seinien ja pilareiden paksuuksiin ja raudoituksiin eikä välipohjan massan kasvattaminen siten ole taloudellisesti järkevää. Tehokas keino askelääneneristykseen parantamiseksi eli askelista ja muista vastaavista äänistä syntyvien äänitasojen alentamiseksi on rakenteeseen kohdistuvien iskujen vaimentaminen pehmeillä lattianpäällysteillä (kuva 4.7).



Kuva 4.7. Päällystämättömän ja joustavalla muovimatolla päällystetyn 240 mm paksun betonilaatan tuottamat askeläänitasot rakennuksessa mitattuina. Päällystämättömän välipohjan askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ on 69 dB ja päällystetyn 49 dB.

Pehmeiksi lattiapäällysteiksi luetaan pehmeät muovimatot ja lautaparketit joustavine alusmateriaaleineen. Nämä päällysteet toimivat akustisesti hieman eri tavalla, mutta lautaparketti ja muovimatto, joiden askelääneneristävyyden parannusluku ΔL_w on yhtä suuri, johtavat suunnilleen samanlaiseen askeläänitasolukuun ja samanmuotoiseen äänispektriin. Asuinrakennuksissa asuinhuoneiden lattiapäällysteinä käytettävien pehmeiden muovimattojen askelääneneristävyyden parannusluvut ovat yleensä noin 17-20 dB. Lautaparkettien askelääneneristävyyden parannusluvut ovat 17-18 dB käytettäessä yleisiä joustavia alusmateriaaleja. Porrashuoneisiin tarkoitettujen lattiapäällysteiden askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w ovat yleensä 6-14 dB. Lattiapäällysteiden valmistajat ilmoittavat tuotteidensa mittauksiin perustuvat askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w . Pehmeisiin lattiapäällysteisiin perustuvia välipohjaratkaisuja suunniteltaessa pitää käyttää vain sellaisia lattiapäällysteitä, joiden parannusluvut tunnetaan. [5]

4.2.2 Kelluvat lattiat

Asuinrakennusten nykyiset askelääneneristysvaatimukset edellyttävät kelluvan lattian käyttöä massiivisen välipohjarakenteen päällä, jos lattiapäällysteenä on alustaansa liimattava parketti, luonnonkivi, keraaminen laatta tai vastaava kova pinnoite. Kelluvia lattioita käytetään riittävän askelääneneristyksen saavuttamiseksi myös sijoitettaessa asuinrakennuksiin meluisia tiloja tai tavoiteltaessa askelääneneristyksen lisäksi hyvää ilmaääneneristystä, kuten teattereissa, elokuvateattereissa, studioissa, äänitarkkaamoissa ja koulujen musiikkiluokissa. Asuinhuoneistoja erottavassa välipohjassa on aina käytettävä kelluvaa lattiaa, jos kantava rakenne on kevyt kivirakenne, kuten kevytbetonilaatta.

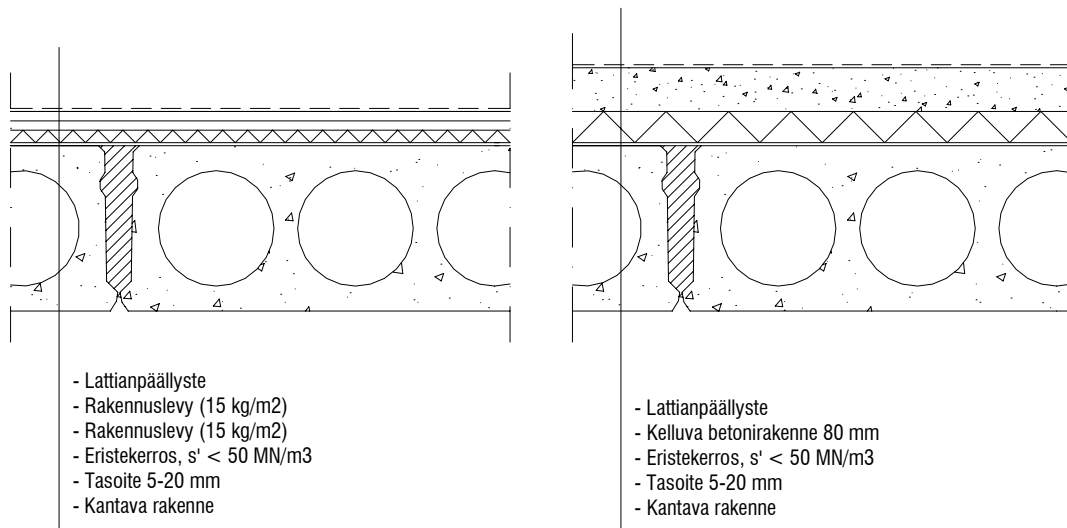
Kelluvassa lattiassa on pehmeä eristekerros sekä sen päälle tehtävä rakenne, joka voi olla rakennuslevy, pumpattava tasoite tai paikalla valettava betonilaatta (kuva 4.8). Eristekerroksena voi olla mineraalivilla, elastisoitu polystyreeni tai tärinäeristimet, jotka yleensä jaetaan kaistoiksi ja asetetaan kelluvan kerroksen alle tietyllä k-jaolla. Kelluvan lattian akustisen toiminnan kannalta tärkein ominaisuus on sen ominaistajuus f_0 [Hz], joka riippuu kelluvan rakenteen pintamassasta m' [kg/m²] ja eristekerroksen dynaamisesta jäykkyydestä s' [MN/m³]. Ominaisajuuteen vaikuttaa myös kantavan rakenteen massa ja jäykkyys. Tosiasiallisesti kantava rakenne ja kelluva rakenne muodostavat kaksinkertaisen rakenteen, mutta kantavan betonivälipohjan massa ja jäykkyys ovat yleensä niin suuria, että kelluvaa rakennetta on yleensä mahdollista tarkastella yksinkertaisena rakenteena. Sen ominaistajuus on

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (4.6)$$

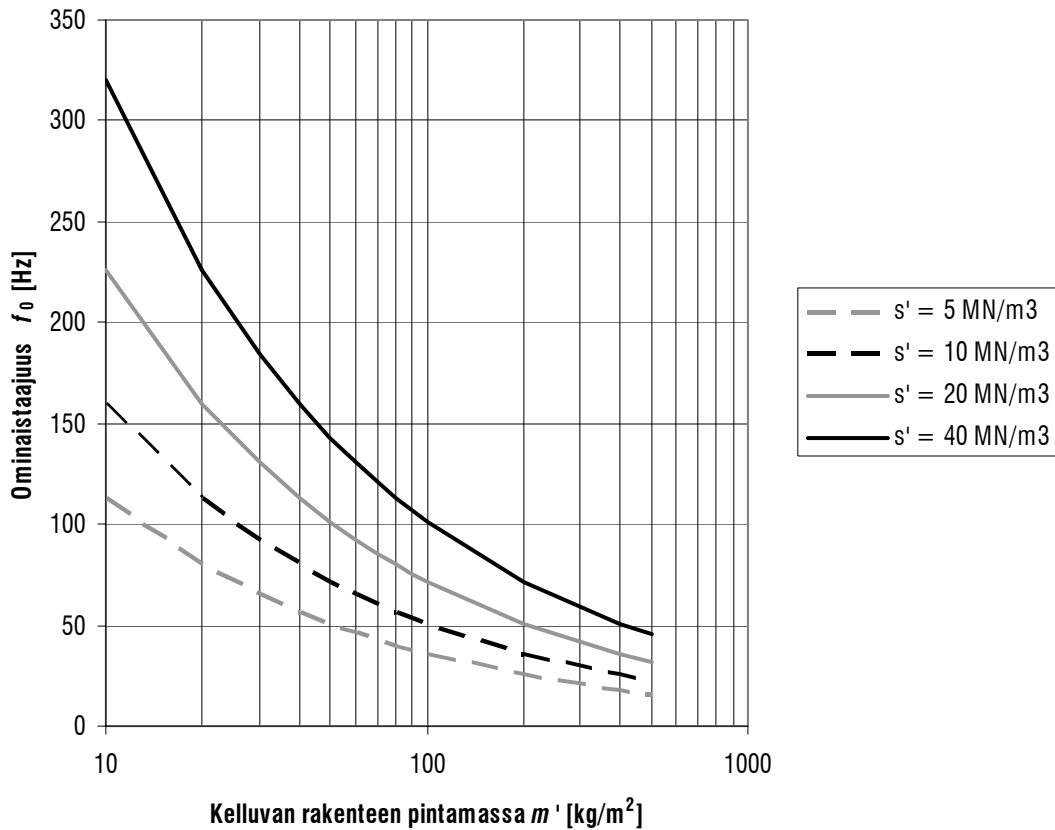
Jos kelluvan lattian alla oleva eristekerros koostuu useasta ainekerroksesta, kerrosten yhteinen dynaaminen jäykkyys lasketaan yksittäisten kerrosten dynaamisista jäykkyyksistä s'_i . Jos kaksi samanlaista eristekerrosta asetetaan päällekkäin, koko eristekerroksen dynaaminen jäykkyys on puolet yhden kerroksen dynaamisesta jäykkyydestä [8]:

$$s' = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i}} \quad (4.7)$$

Kelluva lattia toimii akustisesti sitä paremmin, mitä alhaisempi ominaistajuus on. Ominaistajuutta voidaan alentaa eristekerroksen dynaamista jäykkyyttä pienentämällä tai kelluvan rakenteen massaa lisäämällä (kuva 4.9). Asuinrakentamisessa käytettävien eristekerrosten dynaamiset jäykkyydet ovat noin 8-50 MN/m³. Asuinrakentamisessa kelluvan rakenteen ominaistajuuden tulisi olla korkeintaan 100 Hz ja mieluiten alle 50 Hz, jotta kelluvan rakenteen askelääneneristyskyky olisi asukkaista subjektiivisesti hyväksyttävissä. Kelluvien lattioiden akustista hyvyttä arvioitaessa on suositeltavaa aina ulottaa askelääneneristysmittaukset 50 Hz asti ja laskea spektripainotusermi $C_{L,50-2500}$. Pelkästään askeläänitasolukuun $L'_{n,w}$ tai $L_{n,w}$ perustuva arvio voi antaa harhaanjohtavan käsityksen kelluvan lattiarakenteen askelääneneristyskyvystä muihin ratkaisuihin verrattuna.



Kuva 4.8. Esimerkkejä kelluvista lattiarakenteista. Oikealla oleva rakenne on kelluvan rakenteensa suuremman pintamassan johdosta askelääneneristykseltään parempi sekä objektiivisesti että subjektiivisesti.



Kuva 4.9. Esimerkki massan ja dynaamisen jäykkyyden vaikutuksesta kelluvan lattian ominaistaajuuteen.

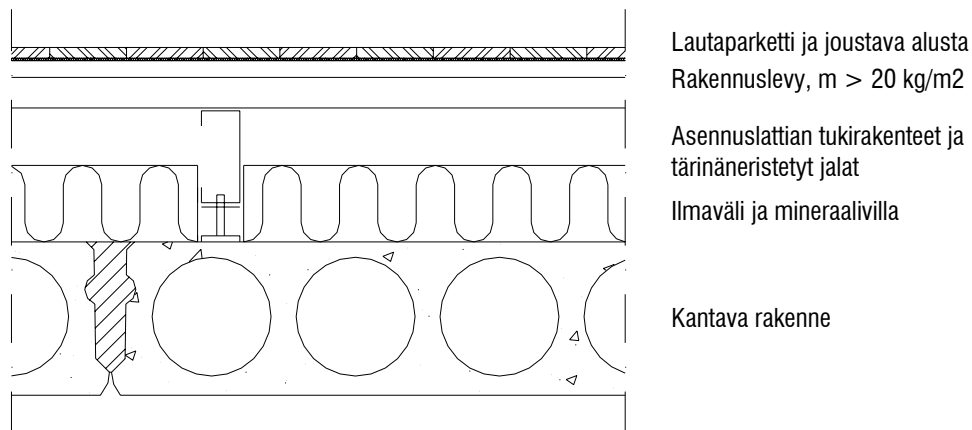
Kelluvia lattiaita suunniteltaessa on lattian akustisen toiminnan lisäksi otettava huomioon rakennusteknisiä ja rakennusfysikaalisia tekijöitä. Betoninen kelluva laatta kuivuu pinnastaan nopeammin kuin eristekerrosta vastaan olevasta pinnastaan. Epätasainen kuivumiskutistuma johtaa siihen, että laatta pyrkii kaareutumaan nurkistaan ja reunoiltaan ylös. Betonisen kelluvan laatan paksuudeksi suositellaan nykyisin 80 mm, sillä tällöin laatan massa estää kaareutumista. Kaareutumiseen voidaan vaikuttaa myös betonimassan valinnalla ja laatan raudoituksen sijoituksella. Kelluvien lattioiden yhteydessä on arvioitava myös eristetilassa vallitsevien kosteusolosuhteiden aiheuttamaa riskiä sekä eristetilän kuivatusmahdollisuuksia rakennusaikana mahdollisesti sattuvan vesivahingon aikana. [15]

Massiivisten kantavien rakenteiden päälle sijoitettavien päällystämättömien kelluvien lattioiden tuottamat askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w ovat yleensä suurempia kuin 25 dB. Kelluvan lattian päällystäminen lattianpäällysteellä vaikuttaa askeläänitasoihin paljon vähemmän kuin lattianpäällysteen massiivisen kantavan rakenteen yhteydessä mitattu askelääneneristävyyden parannusluku ΔL_w . Lattianpäällysteen parannuslukuja ei siten ole mahdollista vähentää päällystämättömän kelluvan lattiarakenteen tuottamista askeläänitasoluista, koska rakenne toimii akustisesti toisin kuin rakenne, johon parannuslukujen määrittäminen perustuu.

4.2.3 Asennuslattiat

Asennuslattiat (kuva 4.10) mahdollistavat rakennusten LVIS-asennusten tekemisen lattian pintarakenteen ja välipohjan kantavan rakenteen välissä olevaan ilmatilaan. Tällöin LVIS-tekniikan huolto ja korjaaminen helpottuvat ja rakennuksen muuntojoustavuus myös paranee. Asennuslattian askelääneneristys perustuu sen pintarakenteen massaan, pintarakenteen ja kantavan rakenteen välissä olevan ilmapölyn korkeuteen ja pintarakennetta kantavien tukirakenteiden erottamiseen kantavasta rakenteesta tärinäneristimin.

Asennuslattian ilmatilaa rajaavat kantava rakenne ja pintarakenne ovat kovia pintoja, joiden väliin syntyy kaiuntaa pintarakenteeseen kohdistuvasta iskusta. Tämä voidaan kuulla matalana kuminana käveltäessä tilassa, jossa asennuslattia on. Kantavan rakenteen toisella puolella olevaan tilaan tämä ääni ei yleensä siirry. Ilmiötä voidaan vähentää sijoittamalla ilmatilaan mineraalivillakerros absorboivaksi materiaaliksi. Mineraalivillakerroksen paksuuden tulee olla vähintään puolet ilmapölyn korkeudesta.

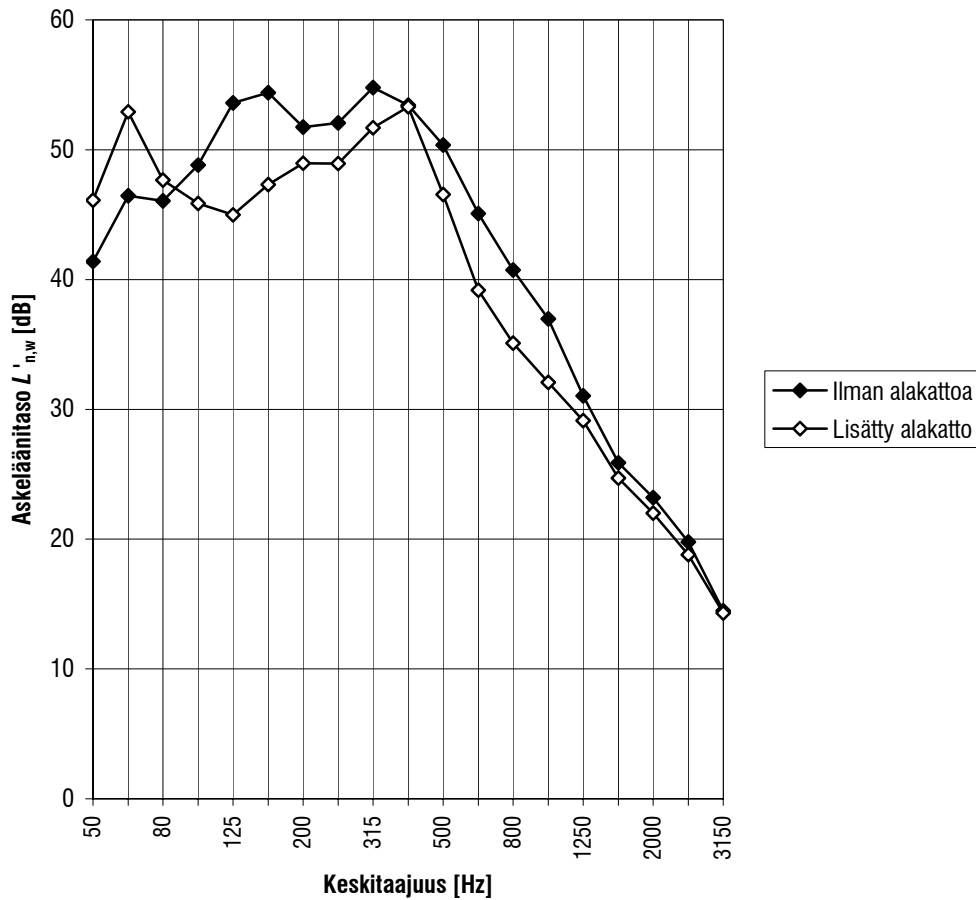


Kuva 4.10. Asennuslattian rakenneperiaate.

4.2.4 Alakatot

Levyrakenteisen alakaton vaikutus askelääneneristykseen on vähäisempi kuin pehmeiden lattianpäällysteiden tai kelluvien lattioiden. Alakatto ei vaikuta rakenteeseen kohdistuvaan iskuun, vaan vähentää iskun välipohjan kantavaan rakenteeseen aiheuttaman värähtelyn vaikutusta välipohjan alapuolisessa huoneessa. Osa iskun aiheuttamasta värähtelystä siirtyy sivutiesiirtymänä huoneesta toiseen huoneeseen, eikä alakatto vaikuta näihin äänen kulkureitteihin lainkaan. Tilanteissa, joissa ääneneristysvaatimukset ovat suuret, alakatto on usein välttämätön, mutta tällöin sivutiesiirtymiä seinien kautta estetään tekemällä seinistä kaksinkertaisia rakenteita.

Alakattolevytyksenä käytetään rakennuslevyjä, joiden massa yleensä on noin 10 kg/m^2 tai enemmän. Ilmaväli levytyksen ja kantavan rakenteen välillä on yleensä vähintään 50 mm. Ilmavälin kaiun vähentämiseksi ja alakaton ääneneristävyyden parantamiseksi ilmaväliin sijoitetaan mineraalivillaa. Alakattolevyt kiinnitetään joko jäykästi rangoin kiinni kantavaan rakenteeseen, mutta myös joustavia ripustusratkaisuja voidaan käyttää. Alakatosta ei asuinrakentamisessa kannata kuitenkaan tehdä liian hyvin eristävää, sillä sivutiesiirtymän vuoksi alakatto alentaa askeläänitasolukua $L'_{n,w}$ yleensä enintään noin 3-5 dB (kuva 4.11).



Kuva 4.11. Alakaton vaikutus lautaparketilla päällystetyn 240 mm paksun betonilaatan askeläänitasoihin. Alakattorakenteena yksinkertainen rakennuslevy, teräsranat 70 mm, joiden välissä on mineraalivillaa. Matalalla taajuusalueella alakatto voi johtaa askeläänitasojen kohoamiseen, koska alakaton levytyksen ja ilmavälin sekä kantavan rakenteen muodostaman kaksinkertaisen rakenteen ominaistajuus f_{mam} on rakenteesta ja ripustusta-
vasta riippuen yleensä alle 200 Hz.

4.2.5 Askelääneneristys vaakasuunnassa

Kerrostalossa, jossa väliseinät ja välipohjat ovat massiivisia betonirakenteita, askeläänitasoluvut mitattuna vaakasuuntaan vierekkäisten huoneistojen välillä ovat jonkin verran parempia kuin pystysuuntaan päällekkäisten huoneistojen välillä mitatut. Tämä johtuu siitä, että vaakasuuntaan mitattaessa mikään viereisen huoneiston pinnoista ei ole sellainen, johon askeläänikojeen iskut kohdistuisivat suoraan, vaan askelääni siirtyy vaakasuunnassa lähinnä sivutiesiirtymänä. Kaksikerroksisia rivitaloja rakennettaessa tätä ilmiötä voidaan hyödyntää siten, että välipohjien kantavan rakenteen massa voi olla hie-
man pienempi kuin kerrostaloissa.

Rakennusten ensimmäisessä kerroksessa askelääneneristys viereisten tilojen välillä ja ensimmäisen ja ylempien kerrosten välillä voidaan toteuttaa käyttämällä maanvaraista laattaa. Maanvarainen laatta toimii kelluvan lattian tavoin, joskin niiden alla oleva polystyreenikerros on jäykempi kuin kelluvien laattojen alla käytettävät eristeet. Maanvarainen laatta toimii kuitenkin akustisesti riittävän hyvin, koska sen alla ei ole rakennuksen kantavaa rakennetta, joka johtaisi ääntä muihin tiloihin.

4.2.6 Kevyet välipohjat

Kevyet välipohjat määritellään rakenteiksi, joiden kantavana rakenteena on teräsprofiilit, puuvasat, puuristikot tai vastaavat rakenteet. Tällaisten välipohjarakenteiden massa on kaikkine rakennekerroksineen tavallisesti alle 100 kg/m^2 . Kevyiden välipohjarakenteiden askelääneneristys ei siten voi perustua rakenteen massaan eikä lattianpäällysteisiin, vaan se perustuu levykerrosten massaan ja ilmaväleihin. Tavoiteltaessa alhaisia askeläänitasolukuja kevyet välipohjat koostuvat seuraavista rakennekerroksista (kuva 4.12):

- kelluva lattia, joka voi olla levy- tai betonirakenteinen
- kantavan rakenteen päällä oleva rakennuslevy tms.
- kantavat palkit, vasat yms., joiden välissä on absorboivaa materiaalia
- joustavasti ripustettu alakatto.

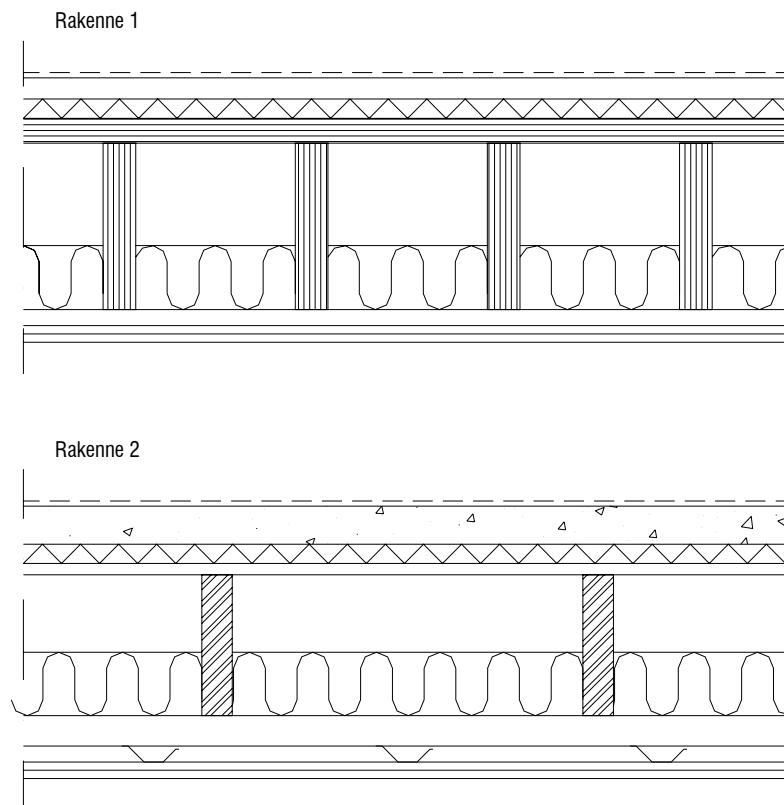
Kantavan rakenteen korkeus on yleensä noin 300-400 mm. Korkeuden kasvattaminen parantaa askelääneneristävyttä. Sijoittamalla kantavan rakenteen väleihin jäävään ilma-tilaan absorboivaa materiaalia estetään ilmatilaan syntyvä kaiunta. Yleensä mineraalivillakerroksen paksuus on vähintään 100 mm. Koko ilmavälin täyttäminen mineraalivillalla parantaa askelääneneristävyttä jonkin verran verrattuna siihen, että vain osa ilmatilasta on täytetty. Kevyen rakenteen askelääneneristävyys on sitä parempi, mitä alhaisempia kelluvan rakenteen ja alakaton ominaistuuksudet ovat. Näiden rakennekerrosten massalla on siten vaikutusta saavutettavaan askeläänitasolukuun. Kuvassa 4.13 on esi-

tetty kelluvan rakenteen ja alakaton vaikutus kevyen välipohjarakenteen askeläänitasolukuun.

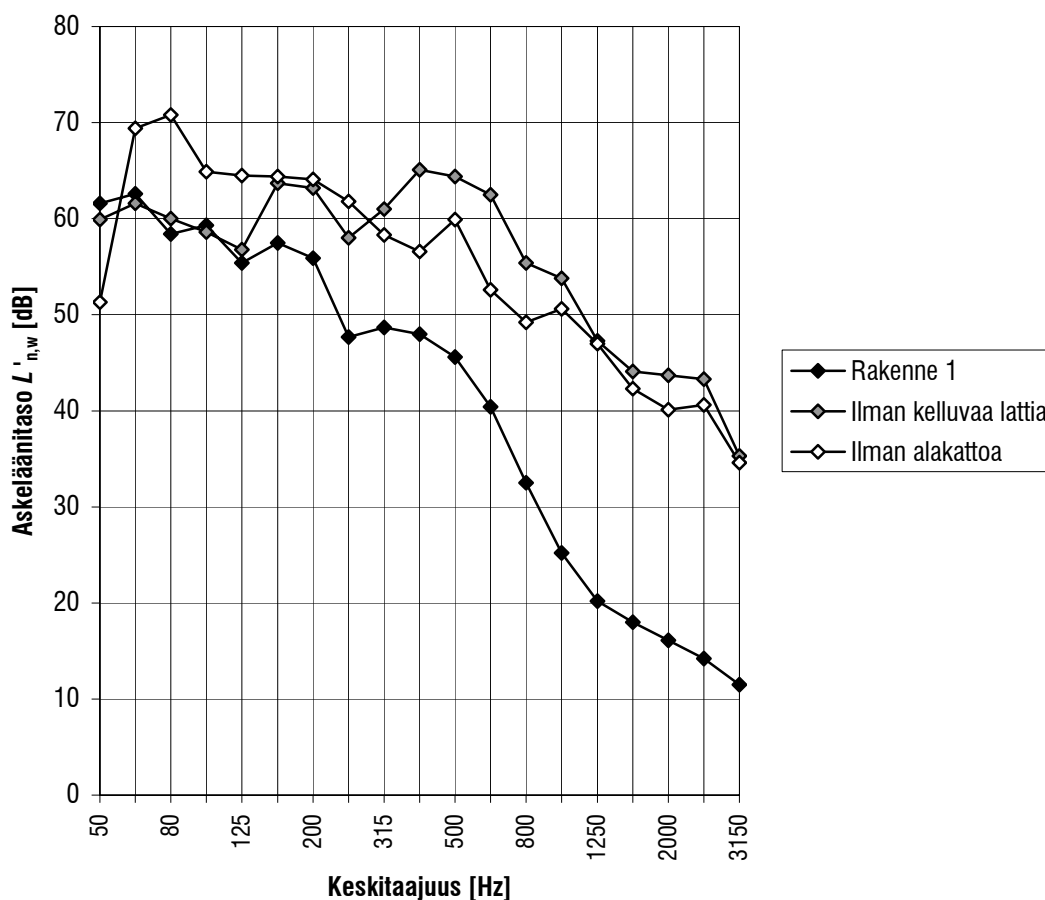
Kevyiden välipohjien askelääneneristystä arvioitaessa on otettava huomioon askelääneneristävyys matalalla taajuusalueella, koska rakenteen toiminta perustuu sen rakennekerrosten resonanssitaajuuksiin. Kevyille rakenteille on tyypillistä, että askeläänitasot ovat korkeimmillaan matalalla taajuusalueella. Siksi niiden askelääneneristävyyden arviointia varten tulee mittauksin määrittää myös spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$.

Kevytrakenteisten välipohjien askelääneneristystä ei ole mahdollista suunnitella askeläänitasojen alenemien ΔL tai askelääneneristävyyden parannuslukujen ΔL_w perusteella, sillä kevyiden rakenteiden akustinen toiminta on erilainen kuin massiivisen betonirakenteen, johon aleneman ja parannusluvun mittaukset perustuvat.

Kivirakenteisissa rakennuksissa sivutiesiirtymän vähentäminen perustuu sivuavien rakenteiden massaan ja rakennusosien liitosten jäykkyyteen. Kevytrakenteisissa rakennuksissa sivutiesiirtymä on estettävä rakennusosien liitoksiin niin, että rakennusosat eivät ole jatkuvia tilasta toiseen, jolloin rakenteissa etenevä taivutusvärähtely ei voi siirtyä liitoksen kautta tilojen välillä.



Kuva 4.12. Esimerkkejä Suomessa käytetyistä kevyistä välipohjarakenteista. Rakenteen 1 askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ on 47 dB ja spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$ on 6 dB. Rakenteen 2 askeläänitasoluku on myös 47 dB, mutta spektripainotusermi on kelluvan pintarakenteen suuremman massan ansiosta pienempi, 2 dB. [29, 36]



Kuva 4.13. Kelluvan lattian ja alakaton vaikutus kuvassa 4.12 esitetyn välipohjarakenteen 1 askeläänitasoihin. Ilman kelluvaa lattiaa askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ on 58 dB ja spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$ on 0 dB; ilman alakattoa nämä arvot ovat vastaavasti 57 dB ja 4 dB.

Kävely ja muut lattiaan kohdistuvat iskut aiheuttavat paitsi ääntä, myös värähtelyä kuu-
loalueen alapuolella taajuuksilla 6-20 Hz. Tällainen värähtely aistitaan tärinänä. Kevyi-
den rakenteiden värähtely kävelystä on voimakkaampaa kuin massiivisten kivirakentei-
den. Tämä johtuu lähinnä siitä, että ihmisen painolla aiheuttama isku aiheuttaa kevy-
een rakenteeseen suuremman liikkeen kuin massiiviseen rakenteeseen. Kevyitä välipoh-
jia suunniteltaessa on aina tehtävä myös värähtelymitoitus. Menetelmiä kevyiden väli-
pohjien värähtelyn tarkastelemiseksi on esitetty alan kirjallisuudessa [47-48].

4.3 Askelääneneristyksen suunnittelu

4.3.1 Askeläänitasolukujen laskenta

Standardissa EN 12354-2 [8] on esitetty kaksi menetelmää askeläänitasolukujen $L'_{n,w}$ laskemiseksi betonirakenteisissa rakennuksissa. Tarkempi yksityiskohtainen menetelmä ottaa huomioon muiden muassa rakennusosien akustiset ominaisuudet, liitosten jäykyyden, sivutiesiirtymän ja lattianpäällysteet. Askeläänitasolukujen määrittäminen standardin yksityiskohtaisella menetelmällä edellyttää menetelmän monimutkaisuuden vuoksi käytännössä laskentaohjelmien käyttöä.

Standardissa on esitetty myös yksinkertaistettu malli askeläänitasolukujen määrittämiseksi. Menetelmän lähtökohtana on laskennallisesti välipohjan massan m' [kg/m^2] perusteella arvioitava päällystämättömän välipohjan ekvivalentti askeläänitasoluku $L_{n,w,eq}$ [dB]:

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \lg \frac{m'}{1 \text{ kg/m}^2} \quad (4.8)$$

Standardin mukaan kaava (4.8) pätee melko tarkasti, kun välipohjan massa on 100-600 kg/m^2 . Askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ rakennuksessa saadaan lattianpäällysteen askelääneneristävyyden parannusluvun ΔL_w ja sivutiesiirtymän huomioon ottavan tekijän K perusteella:

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \quad (4.9)$$

Sivutiesiirtymän huomioon ottavan tekijän K arvo (taulukko 4.2) riippuu välipohjan massasta sekä välipohjaa sivuavien seinärakenteiden keskimääräisestä massasta [kg/m^2]. Keskimääräistä massaa laskettaessa ei oteta huomioon kivirakenteisia seiniä, joihin on tehty levyverhous, jonka ominaistajuus f_0 on alle 125 Hz. Samoin kevyiden väli- ja ulkoseinien massa jätetään ottamatta huomioon.

Yksinkertaistettu menetelmä sopii lähinnä pehmeillä lattianpäällysteillä päällystettyjen välipohjien askeläänitasolukujen arviointiin. Kelluvien lattiarakenteiden askeläänitasoluvut on suositeltavaa laskea tarkalla menetelmällä tai vaihtoehtoisesti ne todettava laboratorio- tai kenttämittauksin.

Taulukko 4.2. Sivutiesiirtymän huomioon ottavan tekijän K [dB] arvo välipohjan massasta ja sivuavien rakenteiden massasta riippuen.

Välipohjalaatan massa [kg/m ²]	Sivuavien rakenteiden massa [kg/m ²] keskimäärin								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Standardin mukaisesti lasketun askeläänitasoluvun ja sallitun askeläänitasoluvun välille on jätettävä varmuusvara, sillä standardin ilmoitetaan ennustavan askeläänitasoluvut ± 2 dB tarkkuudella mittaustuloksiin verrattuna 60 % tapauksista. Kaikissa tapauksissa mittaustuloksen ja lasketun askeläänitasoluvun ero on ollut ± 4 dB. Standardin laskentamalli ei ota huomioon esimerkiksi sitä, että ontelolaatta välipohjan kantavana rakenteena johtaa tavallisesti jonkin verran parempiin askeläänitasolukuihin kuin paikallavalettu betonilaatta, jonka massa on sama. Standardin mukaisella laskentatavalla ei ole mahdollista arvioida spektripainotusermiä $C_{1,50-2500}$.

Kevyiden välipohjien askeläänitasolukujen laskemiseksi ei ole olemassa luotettavaa ja yleisesti hyväksyttyä menetelmää. Kevyitä välipohjia valittaessa käytetään rakenteita, joiden askeläänitasoluvut $L'_{n,w}$ on mittauksin todettu kunkin rakennuksen käyttötarkoitukseen nähden riittäväksi. Tällöin on otettava huomioon myös rakenteiden liitosten ja sivutiesiirtymän vaikutus askeläänitasolukuihin.

4.3.2 Askelääneneristystä koskevat määräykset ja ohjeet

Asuinrakentamisessa Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 [56] esitetyt askeläänitasolukuvaatimukset edellyttävät yleensä hieman raskaampaa välipohjalaattaa kuin ilmaääneneristyslukuvaatimukset (taulukko 4.3). Poikkeuksena ovat pehmeät muovimatot, joilla päällystettyjen välipohjalaattojen paksuus ei edellytä ilmaääneneristysluku-

kuvaatimusta toteuttavaa kantavaa rakennetta paksumpaa rakennetta. Vaaditun ilmaääneneristysluvun saavuttamiseksi tarvittavat liitoseristävytydet riittävät yleensä askeläänitasolukuvaatimuksen saavuttamiseen. Vaativimmissa kohteissa sekä ilma- että askelääneneristys perustuu runkoäänen katkaisemiseen: rakenteet ovat raskaita kaksinkertaisia kivirakenteita, jolloin on olemassa edellytykset hyvälle askelääneneristykselle. Standardissa SFS 5907 [54] on suosituksia erilaisten tilojen väliselle askelääneneristykselle (taulukko 4.4). Asuinrakennusten ja majoitustilojen välistä askelääneneristystä määrittäessä standardi SFS 5907 edellyttää spektripainotustermin $C_{1,50-2500}$ ottamista huomioon luokissa A ja B; luokassa C sen käyttö on suositeltavaa.

Kohdassa 4.3.1 esitetty askeläänitasolukujen laskentamenetelmä tuottaa varsin tarkan tuloksen verrattuna kenttämittauksiin. Rakennusalan järjestöjen julkaisemissa suunniteluohjeissa ja joissakin tutkimuksissa on esitetty rakennetyyppejä [5, 33], joiden askeläänitasoluvut on mitattu kentällä (taulukko 4.5). Taulukossa 4.5 esitetyt askeläänitasoluvut perustuvat siihen, että rakennuksen runkojärjestelmänä on joko betonirakenteinen seinä-laattarunko tai pilari-laattarunko ja sivutiesiirtymä on estetty ilmaääneneristyksen yhteydessä esitetyillä tavoilla.

Taulukko 4.3. Standardin SFS 5907 suositukset asuinrakennusten tilojen väliseksi askeläänitasoluvuiksi $L'_{n,w}$ Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 määräykset asuinhuoneistojen välisistä ilmaääneneristysluvuista on esitetty lihavoituina. Luokissa A ja B lukuarvoon sisältyy spektripainotustermi $C_{1,50-2500}$.

Tila	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
Asuinhuoneistoa ympäröivistä tiloista keittiöön tai muuhun asuinhuoneeseen yleensä	43 dB	49 dB	53 dB	63 dB
Uloskäytävästä asuinhuoneeseen	49 dB	53 dB	63 dB	68 dB

Taulukko 4.4. Standardin SFS 5907 suosituksia tilojen väliseksi askeläänitasoluvuiksi. Standardissa ohjearvoja on runsaammin.

Tila	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
Majoitushuoneen ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä	49	53	58	63
Majoitushuoneen ja käytävän välillä, kun välissä on ovi	53	58	63	63
Musiikkiluokan, teknisen työn luokan ja käsityöluokan ja muun tilan välillä	49	49	49	-

Taulukko 4.5. Betonivälipohjien askeläänitasolukuja mitattuna pystysuuntaan.

$L'_{n,w}$	Rakenne
≤ 43 dB	Lattianpäällyste, kelluva betonilaatta vähintään 80 mm, eristekerros vähintään 30 mm ($s' \leq 10$ MN/m ³), betonilaatta 240 mm
	Lattianpäällyste, kelluva betonilaatta vähintään 80 mm, eristekerros vähintään 30 mm ($s' \leq 10$ MN/m ³), ontelolaatasto vähintään 265 mm (380 kg/m ²)
≤ 49 dB	Lattianpäällyste, kelluva betonilaatta vähintään 60 mm, eristekerros vähintään 30 mm ($s' \leq 10$ MN/m ³), ontelolaatasto vähintään 265 mm (380 kg/m ²)
	Lautaparketti alusmateriaaleineen tai muovimatto ($\Delta L_w \geq 18$ dB), betonilaatta 300 mm
	Muovimatto ($\Delta L_w \geq 18$ dB), ontelolaatasto 370 mm (510 kg/m ²)
	Lautaparketti alusmateriaaleineen ($\Delta L_w \geq 18$ dB), ontelolaatasto 370 mm (510 kg/m ²), koolaus 50 mm ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy 13 mm
≤ 53 dB	Asennuslattia, jonka pintalevyn massa vähintään 20 kg/m ² ja jalat tärinäneristetty, ilma- väli vähintään 200 mm (mineraalivilla 100 mm) ja ontelolaatasto vähintään 265 mm (380 kg/m ²)
	Lautaparketti alusmateriaaleineen tai muovimatto ($\Delta L_w \geq 18$ dB), betonilaatta 240 mm
	Lautaparketti alusmateriaaleineen tai muovimatto ($\Delta L_w \geq 18$ dB), ontelolaatasto 370 mm (510 kg/m ²)
	Lautaparketti alusmateriaaleineen tai muovimatto ($\Delta L_w \geq 18$ dB), betonilaatta 190 mm
	Lautaparketti alusmateriaaleineen tai muovimatto ($\Delta L_w \geq 18$ dB), ontelolaatasto 265 mm (380 kg/m ²)

Porraskäytävissä on huolehdittava lepo- ja kerrostasojen sekä porraselementtien askelääneneristyksestä. Rakentamismääräyskokoelman vaatimukset asuinrakennusten porrashuoneiden askelääneneristyksestä ovat täytettävissä seuraavilla periaatteilla [5]:

- kerros- ja lepotasot kannatetaan porrashuoneen seinistä konsoleilla, joiden ympärillä on neopreeniholkki. Kerros- ja lepotasojen lattianpäällyste voidaan valita vapaasti. Porraselementit kiinnitetään jäykästi kerros- ja lepotasoihin.
- kerros- ja lepotasojen kantavan rakenteen päälle tehdään kelluva lattia. Kerros- ja lepotasojen lattianpäällyste voidaan valita vapaasti, mutta porraselementit joko kiinnitetään joustavasti tasoihin tai porraskankun ja portaan rungon välissä on neopreenikumi.
- kerros- ja lepotasojen lattianpäällyste on muovilaatta. Kerros- ja lepotasot voidaan kiinnittää jäykästi porrashuoneiden seiniin. Porraselementit joko kiinnitetään joustavasti tasoihin tai porraskankun ja portaan rungon välissä on neopreenikumi.

Rivitalojen puu- tai teräsrunkoisten portaiden tai kerrostalohuoneistojen sisäisten portaiden askelääneneristysvaatimukset täyttävistä rakenteista ei ole olemassa yleispäteviä

ohjeita. Tällaisissa rakennuksissa on käytettävä porrarakenteita, joiden askeläänitasoluvut on mitattu rakennuksessa.

4.3.3 Lattianpäällysteen liitokset muihin rakenteisiin

Joustavan alusmateriaalin päällä lepäävä lautaparketti, asennuslattian pintarakenne ja kelluvan lattian pintarakenne alkavat värähdellä niihin kohdistuvasta iskusta. Värähtely etenee rakenteen koko alalle. Jos pintarakenne tai lautaparketti kytkeytyy mekaanisesti esimerkiksi ympäröivään seinään tai lämpöjohtonousuun, värähtely siirtyy niiden kautta rakennuksen runkoon eikä tavoiteltua askelääneneristävyttä saavuteta. Lautaparketin ja kelluvan lattian akustinen toiminta perustuu siihen, että pintarakenne lepää vapaasti eristekerroksen tai alusmateriaalin päällä. Nämä rakenteet tulee irrottaa kaikista seinärakenteista, pilareista sekä LVIS-asennusten läpivienneistä. Kiviaineista kelluvaa lattiaa valettaessa on huolehdittava myös siitä, että valettavaa massaa ei pääse vuotamaan niin, että syntyy mekaaninen kytkentä pintarakenteen ja kantavan rakenteen välille.

Kelluvat lattiat ovat aina tilakohtaisia: kelluva pintarakenne on katkaistava ääneneristystä edellyttäviä tiloja erottavan rakenteen kohdalla vaakasuuntaisen sivutiesiirtymän estämiseksi. Tilasta toiseen jatkuva kelluva rakenne pilaa paitsi askelääneneristävyden, myös ilmaääneneristävyden tilojen välillä.

Maanvarainen laatta toimii vaakasuunnassa ääntä eristävänä rakenteena kelluvan lattian tavoin. Tämä on otettava huomioon suunniteltaessa rakennusten ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevia tiloja, joiden välille on asetettu ääneneristysvaatimus: laatta ei saa jatkua yhtenäisenä tilasta toiseen, koska tällöin jatkuvan laattarakenteen kautta tapahtuisi runsaasti äänen sivutiesiirtymää tilojen välillä eikä niiden väliset askel- ja ilmaääneneristysvaatimukset täytyisi. Kelluvan lattian tapaan maanvarainen laatta on irrotettava ympäröivistä seinistä ja pilareista.

5

Huoneakustiikka

”Huoneakustisessa suunnittelussa pyritään luomaan niin hyvät akustiset olosuhteet kuin mahdollista huoneen normaalikäyttöä ajatellen. Jotta tämä saavutetaan, on akustinen suunnittelu suoritettava samanaikaisesti yleisen suunnittelutyön yhteydessä, jotta saadaan estetyksi sellaiset ratkaisut, jotka estävät optimaalisten akustisten tulosten saavuttamisen.”

Tekniikan lisensiaatti Eero Lampio 1962

5.1 Huoneakustiikan merkitys

5.1.1 Suunnittelun tavoitteet

Huoneakustiikan tarkoituksena on hallita äänen kulkua, heijastumista ja vaimenemista tilan sisällä. Usein huoneakustisella suunnittelulla tavoitellaan hyviä olosuhteita erilaisille puhe- tai musiikkiesityksille. Tarkoituksenmukaisessa tilassa esiintyjän on helppo puhua ääntään rasittamatta niin, että yleisö saa puheesta selvän. Tällöin tilassa tulee olla sekä heijastavia että vaimentavia pintoja. Heijastavien pintojen tarkoituksena on suunnata esiintyjän ääntä yleisölle. Puhesalin vaimentavien pintojen tarkoituksena on vähentää tilan kaiuntaa niin, että puheen tavut erottuvat toisistaan hyvin.

Puheen selvyys ei riipu pelkästään tilan huoneakustiikasta, vaan rakennuksen teknisten järjestelmien ääni tai viereisistä tiloista siirtyvä ääni voi peittää puhujan ääntä. Siten puhe- ja muita tiloja on suunniteltava kokonaisuutena: rakenteiden ilma- ja askelääneneristykseen pitää olla tarkoituksenmukaisia ja rakennusten teknisten järjestelmien aiheuttaman äänitason pitää olla oikealla tasolla.

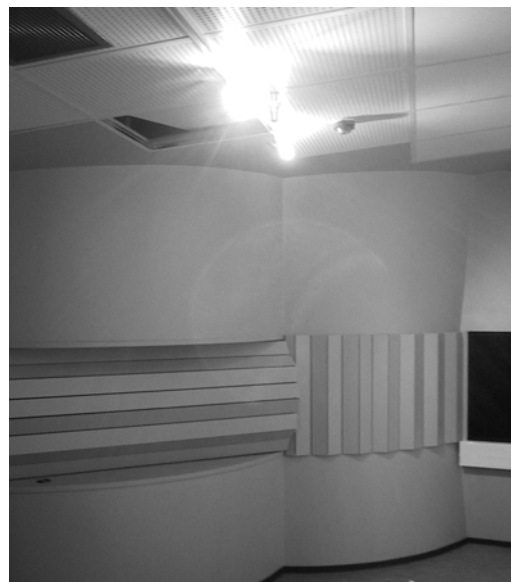
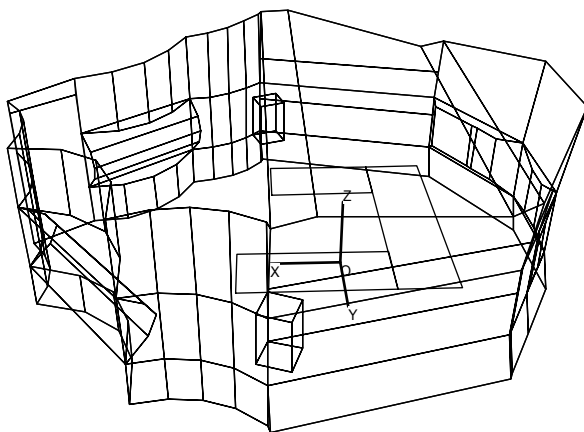
Huoneakustista suunnittelua tarvitaan monenlaisissa tiloissa puhe- tai musiikkitulojen lisäksi. Siten huoneakustisella suunnittelulla on monenlaisia tavoitteita: sen avulla voidaan pyrkiä mahdollisimman hyvään puheen selvyyteen, mutta toisissa kohteissa puheäänen äänitaso pyritään saamaan mahdollisimman alhaiseksi puheen aiheuttaman häiriön vähentämiseksi. Käytettäessä puhetilassa äänentoistoa luonnolliseen vaikutelmaan päästään, kun kuulija aistii ensimmäisenä suoran äänen puhujalta ja sen jälkeen puhujan äänen äänentoiston kautta. Tällöin jälkikaiunta-ajan tulee olla melko lyhyt ja heijastuksia pinnoista pyritään välttämään. Tilojen käyttötarkoituksesta riippuen huoneakustisella suunnittelulla voi olla esimerkiksi seuraavia tavoitteita:

- elokuvateatterissa katsojan tulee voida kuulla elokuvan ääni niin kuin elokuvantekijät ovat sen suunnitelleet. Salin kaiunnan pitää vaikuttaa toistettuun äänen mahdollisimman vähän. Siksi jälkikaiunta-ajat nykyaikaisissa elokuvateattereissa ovat lyhyitä ja käytännössä salin kaikki pinnat ovat voimakkaasti absorboivia. Katsoja aistii lähinnä suoraan kaiuttimista tulevaa ääntä, sillä heijastukset absorboivista pinnoista ovat vähäisiä.
- konserttitalissa jälkikaiunta-ajan tulee olla melko pitkä. Koska yleisön alue on voimakkaasti absorboiva, kaikkien muiden pintojen tulee olla kovia ja heijas-

tavia. Musiikin kokemisen ja tilantunnon kannalta tärkeitä ovat suoran äänen lisäksi varhaiset heijastukset erityisesti sivusuunnasta.

- auloissa, odotushuoneissa, ruokaloissa, ravintoloissa ja muissa vastaavissa tiloissa toiminta tapahtuu koko tilassa ja kommunikaatio pääasiassa lähietäisyydellä. Näissä tiloissa absorptioala jaetaan tasaisesti koko tilaan. Sen tarkoituksena on tehdä tilasta ääniolosuhteiltaan rauhallinen.
- avotoimistossa muista työpisteistä kuuluvaa puhetta pidetään häiritseväenä. Pintojen voimakkaalla absorptiolla vähennetään äänen heijastuksia työpisteiden välillä. Lisäksi työpisteiden välisillä seinäkkeillä estetään suora ääni työpisteestä toiseen. Paras tulos saavutetaan, jos avotoimiston taustääänen tai keinoitekoisen peittoäänen äänenpainetaso on yli 40 dB. Tällöin se peittää viereisestä työpisteestä tulevaa puheääntä. [19]
- teollisuushallissa voi olla runsaasti äänekkäitä koneita, joiden synnyttämä äänitaso voi aiheuttaa kuulovaurioriskin. Tilan äänitasoa saadaan alennetuksi järjestämällä sinne suuri absorptioala. Tällöin huoneakustiikan keinoja käytetään meluntorjuntaan.

Huoneakustisen suunnittelun lähtökohtana on edellä olevan perusteella tilan käyttötarkoitus. Suunnittelun osa-alueita ovat heijastavien pintojen suunnittelu, tilan muodon valinta ja tarvittavan absorptioalan määrittäminen (kuva 5.1).



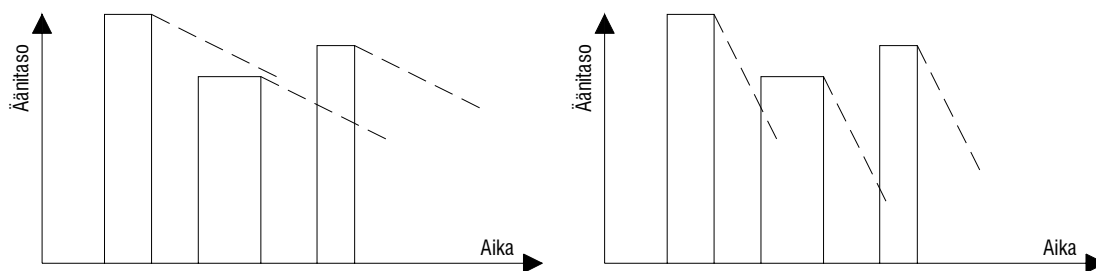
Kuva 5.1. Esimerkki huoneakustisesta suunnittelusta: äänitarkkaamon pintojen sijainnit ja muodot, kaltevuudet ja absorptiosuhteet on valittu niin, että heijastukset eivät häiritse kaiutinten kautta toistettavaa ääntä. Mikkelin ammattikorkeakoulu.

5.1.2 Huoneakustiset suunnittelukriteerit

Huoneakustiikan suunnittelulle on akustiikkaa koskevassa kirjallisuudessa esitetty lukuisia kriteereitä. Useimmat niistä ovat matemaattisesti monimutkaisia ja edellyttävät käytännössä huoneakustisten mallinnusohjelmien käyttöä [3, 4]. Niitä käytetään erityisesti vaativimpien tilojen, kuten suurten luentosalien, konferenssisalien, monikäyttösalien, puhe- ja musiikkiteattereiden ja konserttisalien suunnittelussa. Näiden tilojen suunnittelu on niin vaativaa, että niissä tavallisesti käytetään akustiikkaan perehtynyttä asiantuntijaa. Kaikkien näiden tilojen sekä vähemmän vaativien tilojen suunnittelussa yhtenä kriteerinä on jälkikaiunta-aika. Käyttötarkoitukseltaan erilaisia tiloja on lukematon määrä eikä kaikkia varten voida antaa tarkkoja ohjeita. Lisäksi toimiva tila voidaan toteuttaa monella vaihtoehtoisella tavalla. Jäljempänä tarkastellaan kahta yleistä tilaa, joissa huoneakustiikan suunnittelun merkitys on suuri: auditoriota ja luokkahuonetta.

Jälkikaiunta-ajan merkitys on siinä, että se korreloi kohtalaisesti puheen tai musiikin selvyyden kanssa: mitä pidempi jälkikaiunta-aika on, sitä hitaammin puheen tavut vaimenevat tilassa ja sitä enemmän ne peittävät toisiaan, jolloin puheen selvyys kärsii (kuva 5.2). Tilan käyttötarkoituksen edellyttämät vaatimukset edellyttävät sopivan jälkikaiunta-ajan lisäksi myös sitä, että tila on oikean kokoinen ja sopivan muotoinen ja absorptiomateriaalit ja heijastavat pinnat on sijoitettu oikein, jotta esiintyjältä yleisölle saadaan hyödyllisiä heijastuksia. Liian lyhyt jälkikaiunta-aika johtaa siihen, että suurin osa tilan pinnoista on peitetty absorptiomateriaalilla eikä hyödyllisiä heijastuksia synny lainkaan. Puheen selvyyden toteutumista voidaan kontrolloida puheensiirtoindeksillä *STI*, joka on otettu luokkahuoneiden suunnittelukriteeriksi standardissa SFS 5907, jossa annetaan ohjearvoja erilaisten tilojen huoneakustiikan toteutukselle.

Puheensiirtoindeksi *STI* ottaa huomioon puheen äänitason, jälkikaiunta-ajan ja heijastukset, etäisyyden puhujan ja kuulijan välillä sekä tilassa olevan taustamelun äänitason vaikutuksen puheen selvyyteen. Siihen vaikuttavat myös tilan muoto ja absorptiomateriaalin sijoittelu tilassa. Indeksien laskenta- ja mittausmenetelmä on monimutkainen, mutta se perustuu tavujen erotettavuuteen tilassa. Kun puheensiirtoindeksin arvo on 1, kuulija kuulee kaikki tilassa satunnaisesti luetellut tavut oikein. Tällainen tilanne voidaan saavuttaa vain aivan lähellä puhujaa. Puheensiirtoindeksin ollessa 0 yhtään tavuita ei kuulla oikein. Tällainen tilanne tarkoittaa lähinnä sitä, että tilan taustaaänen äänitaso on puheäänen äänitasoa korkeampi. Puheensiirtoindeksin ja puheen erotettavuuden suhde on esitetty taulukossa 5.1. Puheensiirtoindeksiä *STI* voidaan käyttää myös käänteisesti puheenpeiton arvioimiseen (taulukko 5.2). Puheenpeitto on tärkeää avotoimitoissa, jotta yleisesti keskittymistä häiritsevänä pidetty puhe viereisistä työpisteistä olisi äänitasoltaan mahdollisimman alhainen. [54]



Kuva 5.2. Jälkikaiunta-ajan ollessa pitkä puheen tavut vaimenevat tilassa hitaasti ja peittävät toisiaan. Tavut erottuvat toisistaan hyvin ja puheen selvyys paranee, kun jälkikaiunta-aika on sopivan lyhyt. [3]

Taulukko 5.1. Puheensirtoindeksin STI merkitys ihmisen kokeman puheen erotettavuuden kannalta puhetiloissa [54].

STI	Puheen erotettavuus	Esimerkkejä tiloista
< 0,30	Kelvoton	
0,30...0,45	Huono	Vanha kirkko
0,45...0,60	Välttävä	Konserttisali tai kaikuisa auditorio
0,60...0,75	Hyvä	Hyvin suunniteltu suuri auditorio
> 0,75	Erinomainen	Hyvin suunniteltu luokkahuone tai pieni auditorio

Taulukko 5.2. Puheensirtoindeksin STI merkitys ihmisen kokeman häiriön kannalta tavoiteltaessa ääneneristystä ja puheenpeittoa [54].

STI	Puheenpeitto	Esimerkkejä tiloista
< 0,05	Täydellinen	Hyvin ääneneristettyjen työhuoneiden välillä, ovet kiinni
0,05...0,20	Riittävä	Normaalisti ääneneristettyjen työhuoneiden välillä, ovet kiinni
0,20...0,40	Hyvä	Työhuoneiden välillä, ovet auki käytävälle
0,40...0,55	Kohtalainen	Akustisesti hyvin suunniteltu avotoimisto
0,55...0,70	Välttävä	Avotoimisto, suunnittelussa pieniä puutteita
0,70...0,85	Huono	Avotoimisto, suunnittelussa merkittäviä puutteita
> 0,85	Ei ole	Avotoimisto, jonka akustiikka suunnittelematta

Jälkikaiunta-aika on määritelty diffuusissa äänikentässä. Se muodostuu äänen herättämisestä huoneen ominaisvärähtelyistä. Korkeilla taajuuksilla ominaisvärähtelyiden ominaistaajuuudet ovat niin lähellä toisiaan, että niitä ei ole mahdollista erottaa toisistaan. Matalilla taajuuksilla ominaisvärähtelyitä on vähän, ja jälkikaiunta-aika ja äänitaso huo-

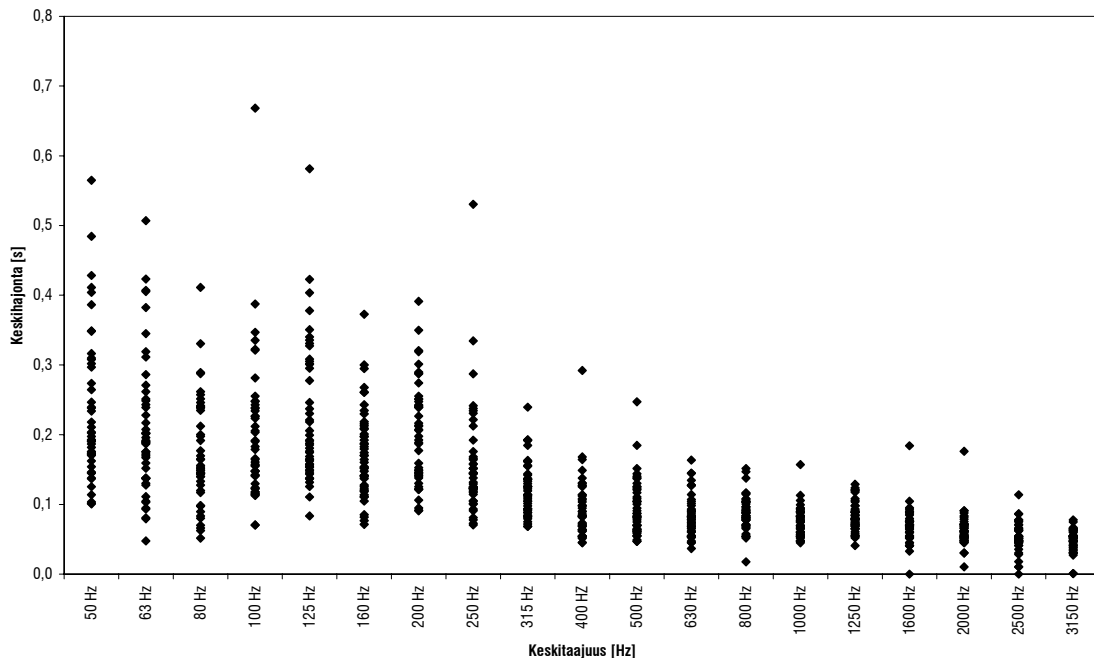
neessa voivat vaihdella suuresti tilan eri kohdissa (kuva 5.3). Taajuus, jonka alapuolella äänikenttä ei ole diffuusi, riippuu jälkikaiunta-ajasta ja tilavuudesta [31]:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (5.1)$$

Suorakulmaisen särmiön muotoisessa huoneessa sen ominaisvärähtelyjen ominaistajuuudet f_{lmn} voidaan laskea huoneen mittojen L_x , L_y ja L_z avulla muuttamalla kokonaislukuja l , m ja n :

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{l}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{m}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n}{L_z} \right)^2 \right] \quad (5.2)$$

Kaavan 5.1 mukaisesti epädiffuusin äänikentän taajuusalue laajenee matalilta taajuuksilta lähtien ylöspäin tilavuuden pienentyessä. Esimerkiksi huoneessa, jonka jälkikaiunta-aika on 0,5 s ja tilavuus 30 m³, taajuus f_s on noin 260 Hz. Huoneen ominaisvärähtelyt ovat sitä helpommin erotettavissa, mitä pienempi huoneen tilavuus on, mikä on haitallinen ilmiö. Kun toiminnalliset vaatimukset pienen tilan huoneakustiikalle ovat korkeat, tilan suunnittelu on vaativa tehtävä. Huoneen ominaisvärähtelyillä on merkitystä esimerkiksi äänitarkkaamoissa ja pienissä äänitysstudioissa.



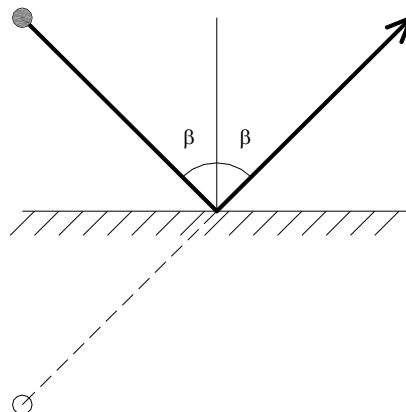
Kuva 5.3. Pienissä tiloissa äänikenttä ei ole matalilla taajuuksilla diffuusi, joten eri paikoista mitatuissa jälkikaiunta-ajoissa on hajontaa enemmän kuin korkeilla taajuuksilla. Kuvassa on keskijonnot 50 tyhjässä asuinhuoneessa mitatusta jälkikaiunta-ajasta. Kukin piste edustaa keskijointaa yhdessä huoneessa laskettuna 12 pisteessä mitatusta jälkikaiunta-ajasta.

5.2 Äänen heijastuminen

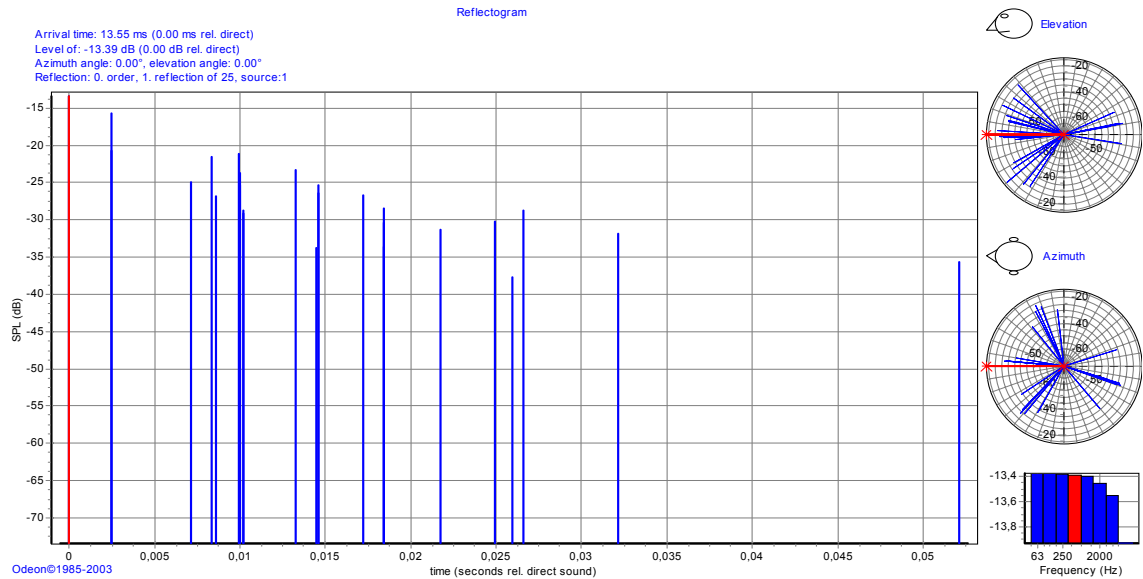
5.2.1 Heijastusten merkitys [3]

Suljetussa huonetilassa suurin osa äänienergiasta, joka havaitaan kuuloaistimuksena, on heijastunut huoneen seinä-, katto- ja lattiapinnoista. Kun äänilähde sammutetaan suuressa konserttisalissa, kuulija aistii noin sekunnin kuluttua siitä ääntä, joka on heijastunut noin 20 kertaa. Heijastusten määrä yhden sekunnin kuluessa on noin 8000. Ääni heijastuu tietyissä olosuhteissa samalla tavalla kuin valo: kulma, jolla ääniaalto kohtaa pinnan, on yhtä suuri kuin kulma, jolla se heijastuu pinnasta pois (kuva 5.4). Heijastukseen pinnasta ääniaalto menettää energiastaan osan, joka absorboituu. Koska heijastuneen äänen kulkema matka on pidempi kuin äänilähteestä suoraan kuulijalle kulkeneen äänen kulkema reitti, heijastuneen äänen äänenpainetaso on alhaisempi kuin suoran äänen (kuva 5.5). Heijastusten määrä on kuitenkin niin suuri, että tarkastelupisteessä havaittavasta äänienergiasta suurin osa syntyy heijastuksista.

Heijastusten määrän kasvaessa yksittäisiä heijastuksia ei enää ole mahdollista erottaa toisistaan. Suurissa tiloissa tällainen tilanne saavutetaan noin 100 ms jälkeen. Tällöin tilassa on kaiuntainen äänikenttä, jonka äänenpainetaso vaimenee jälkikaiunta-ajan enustamalla tavalla lineaarisesti: äänenpainetaso on alentunut 20 dB, 30 dB ja 40 dB, kun jälkikaiunta-ajasta on vastaavasti kulunut kolmannes, puolet ja kaksi kolmannesta. Kuulijan aistimaa ääntä voidaan siten tarkastella kolmessa osassa: ensin kuulija aistii suoraan äänilähteestä tulleen äänen, jota seuraavat aikaiset heijastukset, ja lopuksi havaitaan vaimeneva kaiuntaääni.



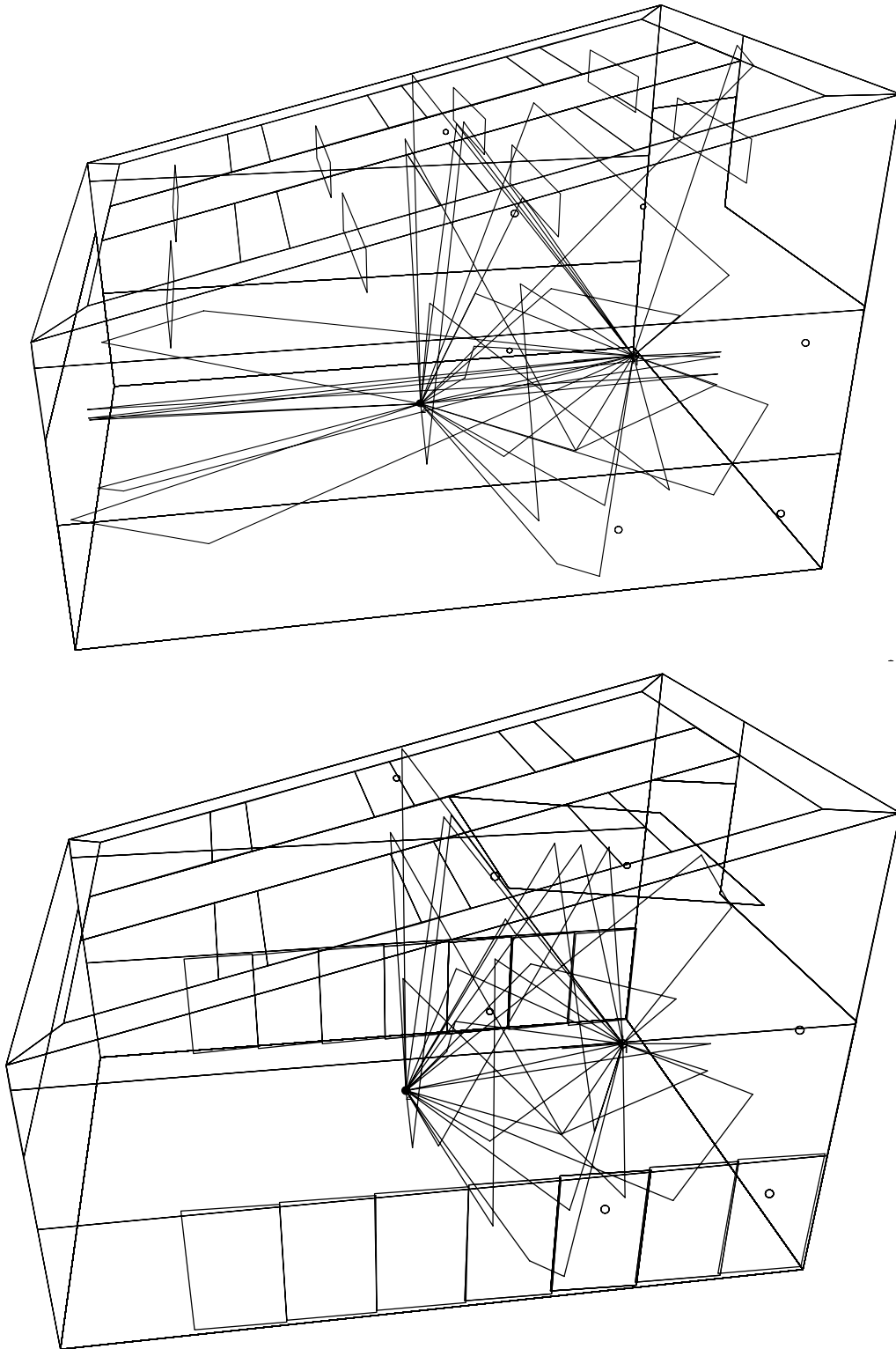
Kuva 5.4. Ääni heijastuu pinnasta samalla tavalla kuin valo, kun heijastavan pinnan pinta-ala on suuri verrattuna äänen aallonpituuteen.



Kuva 5.5. Tarkastelupisteessä havaitaan ensimmäisenä suoraan äänilähteestä tullut ääni. Sen jälkeen pisteessä havaitaan huoneen pinnoista eri suunnista tulleita heijastuksia.

Suoran äänen äänenpainetaso on sitä alempi mitä kauemmaksi äänilähteestä siirrytään. Kuuloaisti pystyy kuitenkin yhdistämään suoran äänen ja varhaisen heijastuneen äänen yhdeksi ääneksi; lisäksi kuulo pystyy paikallistamaan äänen suoran äänen perusteella, vaikka se olisi selvästi heikompi kuin heijastuneiden äänten energia. Kuulemisen kannalta hyödyllisiä ovat heijastukset, jotka saapuvat korvaan 50 ms kuluessa. Musiikissa aikaraja on 80 ms. Myöhemmin saapuvat äänet kuuloaisti tulkitsee eri ääneksi. Ääni kulkee 50 ms kuluessa huoneenlämpötilassa noin 17 m. Siten suoraan äänilähteestä kuulijalle kulkeneen ja heijastuneen äänen reittien pituusero ei saisi olla enempää kuin 17 m. Tästä seuraa muun muassa se, että puhe- tai esiintymistilana pitkä ja kapea sali on yleensä parempi kuin lyhyt ja leveä.

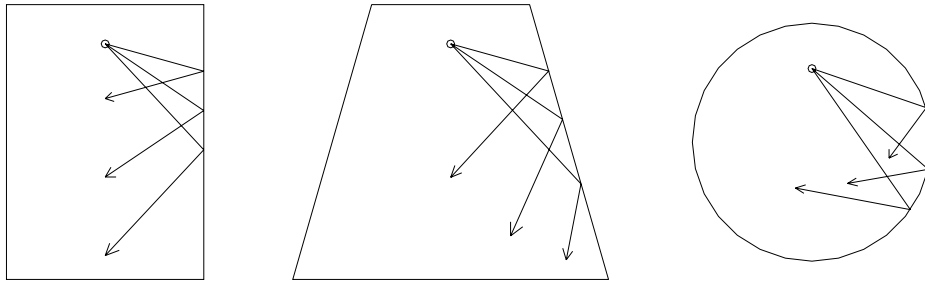
Heijastuksia voidaan ohjata tilan muodolla ja erilaisilla heijastinrakenteilla. Puhe- ja musiikkitiloissa tulee välttää erityisesti tärykaikua (kuva 5.6), joka syntyy kahden samansuuntaisen kovan pinnan väliin. Tärykaiku tarkoittaa sitä, että ääni heijastuu useita kertoja peräkkäin vastakkaisista pinnoista, ja se kuullaan monta kertaa eri äänenä. Tärykaiku voi olla myös kiertävä, jolloin heijastus tapahtuu esimerkiksi neljän pinnan kautta. Tärykaiku voidaan estää tekemällä tilan pinnoista hieman eri suuntaiset tai tekemällä toisesta pinnasta voimakkaasti absorboivan. Tärykaiku on mahdollinen kuitenkin myös tiloissa, joissa absorption määrä on suuri. Esimerkiksi elokuvateattereissa on otettava huomioon tärykaiku matalilla taajuuksilla, joilla materiaalien absorptiosuhteet ovat alhaisia.



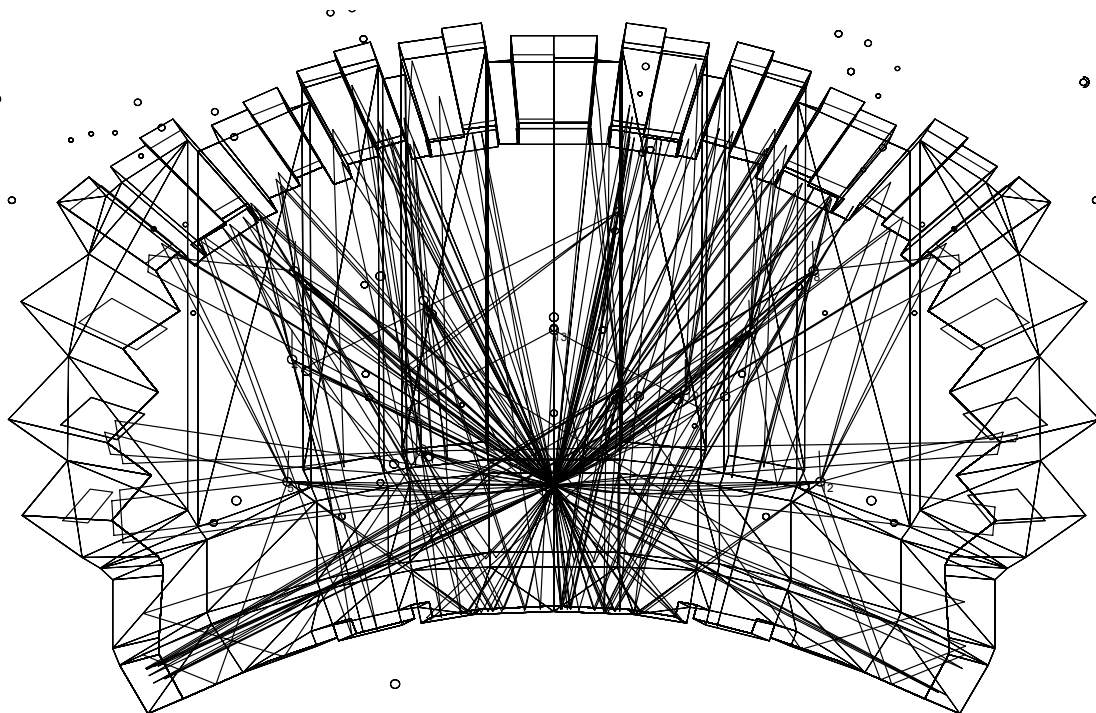
Kuva 5.6. Puheen selvyttä auditoriossa heikensi pituussuuntainen tärykaiku (yllä). Lisäksi edestä taakse laskeutuva katto käänsi kattoheijastukset tilan etuosaan. Auditorion tilavuus oli myös kokoonsa nähden turhan suuri, jolloin jälkikaiunta-aika oli melko pitkä. Tärykaiku poistettiin lisäämällä takaseinään absorptiota, jolloin jälkikaiunta-aika lyheni. Kuulijoille saatiin enemmän varhaisia heijastuksia puhujan yläpuolelle suunnitellun heijastusrakenteen kautta, mikä näkyy auditorion huoneakustisessa mallissa (alla).

5.2.2 Tilan muoto

Tilan perusmuoto vaikuttaa suuresti siihen, millainen puheen selvyys tai millaiset olosuhteet esiintyjille saadaan aikaan. Yhtenä tilan huoneakustisena kriteerinä voidaan pitää aikaeroa suoraan kulkeneen äänen ja ensimmäisen heijastuksen välillä. Parhaina pidetyissä konserttisaleissa tänä aikaero on noin 15 ms [4]. Näin lyhyt ero suoran äänen ja ensimmäisen heijastuksen välillä voidaan saavuttaa lähinnä tiloissa, jotka ovat suorakaiteen muotoisia. Suorakaiteen muotoisessa tilassa heijastuksia saadaan yleensäkin tasaisesti sivuseiniltä koko tilassa. Viuhkan muotoisessa tilassa heijastukset hajautuvat ja tilaan voi jäädä paikkoja, joissa heijastusten määrä on vähäinen. Pyöreää tilaa ja kaarevia pintoja on syytä välttää, koska tällöin saadaan aikaan äänten voimakkaita äänten keskittymiä (kuvat 5.7 ja 5.8).



Kuva 5.7. Äänten heijastuminen eri muotoisissa tiloissa.



Kuva 5.8. Tilan muoto voi synnyttää voimakkaita äänen keskittymiä tai ohjata heijastukset siten, että äänilähde kuulostaa sijaitsevan toisessa paikassa kuin missä se todellisuudessa on [35].



Kuva 5.9. Suorakaiteen muotoinen konserttisali (Musikverein, Wien, 1870) ja kuusikulmainen viuhka, jossa orkesteri on sijoitettu salin keskiosaan, jolloin yleisö ymöröi orkesteria lähes joka puolelta (Gewandhaus, Leipzig, 1981).

Tilan vaakaleikkauksen lisäksi on otettava huomioon pystyleikkaus: katon kaltevuus ja sen suunta vaikuttaa huoneakustiikkaan (kuva 5.6). Vaikka suorakaiteenmuotoinen pohjaratkaisu on akustiikan kannalta toimiva, suurissa tiloissa se ei välttämättä ole käytännössä paras mahdollinen, sillä etäisyys tilan etuosasta viimeisille riveille tulee suureksi. Puhe- ja esiintymistilat voidaan toteuttaa myös muita pohjaratkaisuja käyttämällä (kuva 5.9), mutta tämä tekee suunnittelusta vaikeampaa.

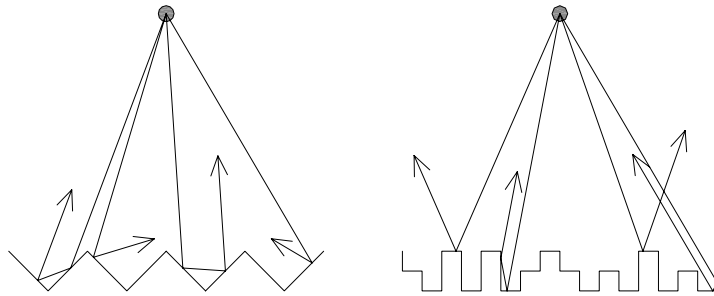
5.2.3 Pinnan muoto ja rakenne [3]

Äänen heijastuminen on erilaista eri taajuuksilla: mitä matalampi äänen taajuus on ja mitä pidempi sen aallonpituus on, sitä suurempi heijastavan pinnan tulee olla, jotta heijastus tapahtuisi. Pieni pinta ei aiheuta juuri minkäänlaista häiriötä matalataajuiseen äänialtoon, joka sen kohtaa. Heijastumisen riippuvuus taajuudesta on monimutkainen ilmiö, mutta joitakin yleisiä periaatteita voidaan todeta.

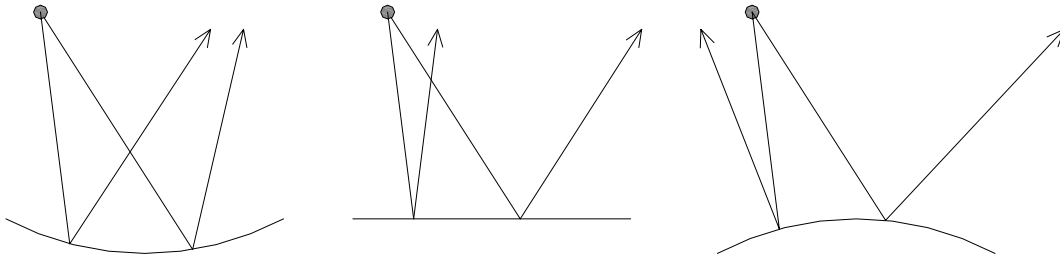
Pinnan muodon lisäksi sen karkeus ja rakenne vaikuttavat heijastuksiin. Sileä pinta heijastaa ääntä samalla tavalla kuin peili valoa, mutta rikkomalla pintaa voidaan ääntä hajottaa (kuva 5.10). Pinta hajottaa ääntä laajalla taajuusalueella, kun sen kuviointi ei ole säännöllinen. Tätä ilmiötä voidaan hyödyntää esimerkiksi silloin, kun halutaan välttää haitallinen heijastus, mutta absorptioalaa ei voida lisätä. Ääntä hajottamallakin jälkikäikunta-aika laskee, mutta ei yhtä paljon kuin se laskisi lisäämällä absorptiota. Myös tilan kalusteet hajottavat ääntä samalla tavalla kuin rikutut pinnat.

Kovera muoto on heijastusten kannalta vaikea (kuva 5.11), kun äänilähde sijaitsee lähellä pintaa. Tällöin kovera pinta saa aikaan äänen keskittymistä. Kovera pinta hajottaa ääntä, kun äänilähde sijaitsee kaukana siitä. Kupera pinta sitä vastoin toimii aina ääntä

hajottavana rakenteena. Koveria ja kuperia pintoja voidaan yhdistellä haluttaessa hajottaa ääntä (kuva 5.12).



Kuva 5.10. Pinnan rakenne ja karkeus vaikuttaa äänen heijastumiseen.



Kuva 5.11. Äänen heijastuminen koverasta, tasaisesta ja kuperasta pinnasta.



Kuva 5.12. Ääntä hajottavia pintoja konserttisalissa. Savonlinnasali.

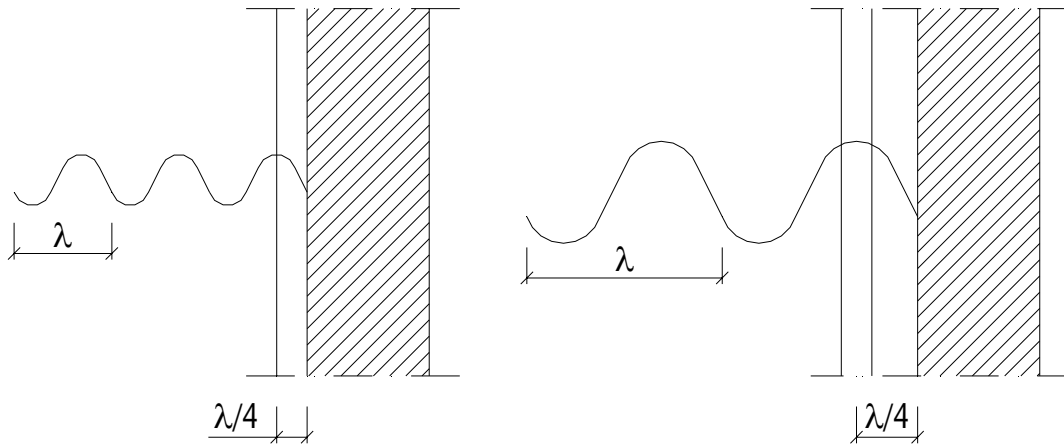
5.3 Absorptiomateriaalit

5.3.1 Huokoiset materiaalit

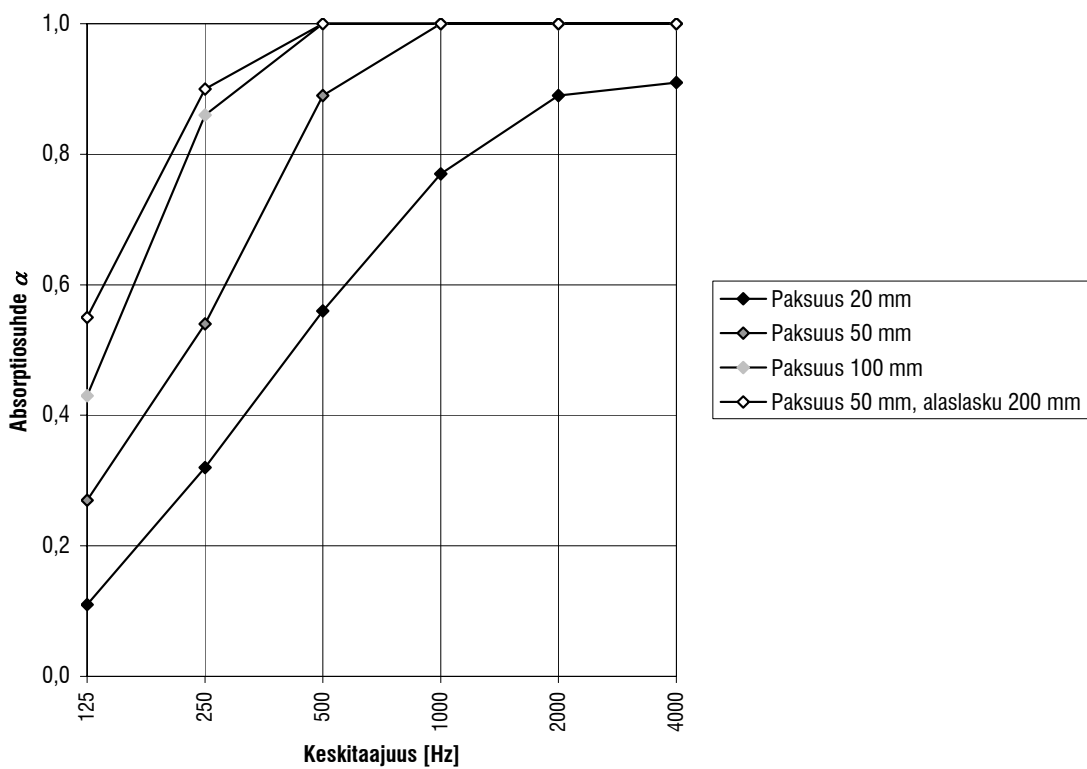
Huokoisten materiaalien, kuten mineraalivillojen, paksujen tekstiilien ja ruiskutteen absorptio perustuu siihen, että ääniaallon äänienergia muuttuu pääasiassa lämmöksi. Rakenteesta heijastuvan ääniaallon hiukkasnopeus on pienimmillään rakenteen kohdalla, mutta aallonpituuden λ neljänneksen kohdalla se on suurimmillaan (kuva 5.13). Huokoinen materiaali absorboi tehokkaimmin taajuuksia, joiden aallonpituus on nelinkertainen materiaalin paksuuteen verrattuna: 20 mm paksu mineraalivillakerros absorboi eniten ääniä, joiden aallonpituus on yli 80 mm ja taajuus yli 4000 Hz. Paksuuden lisäksi huokoisten materiaalien absorptiosuhteet riippuvat monesta ominaisuudesta, kuten pintakäsittelystä; materiaalin tiheyden tulee olla riittävän suuri, jotta absorptiota tapahtuisi. Materiaalin absorptiosuhteet on aina tarkistettava valmistajien luetteloista. [10]

Matalien äänien aallonpituudet ovat pitkiä. Esimerkiksi 100 Hz taajuudella aallonpituus on 3,4 m ja sen neljännes 0,85 m. Materiaalikerrokset eivät yleensä voi olla näin paksuja, joten huokoiset materiaalit absorboivat eniten keskitaajuuksia ja korkeita ääniä. Matalien taajuuksien absorptiosuhteet ovat matalilla taajuuksilla sitä parempia, mitä paksumpia ainepaksuudet ovat (kuva 5.14). Absorptiosuhdetta voidaan parantaa myös jättämällä huokoisen materiaalin ja sen takana olevan materiaalin väliin ilmarako, jolloin materiaalikerros osuus matalampien äänten aallonpituuden neljänneksen kohdalle (kuva 5.13). Esimerkiksi monet alakattorakenteet toimivat tällä tavalla.

Mineraalivillan tyyppiset materiaalit voidaan päällystää hyvin ilmaa läpäisevällä pinnotteella, jolloin pinnasta tulee tasainen ja saumaton. Hyvin absorboiva huokoisen materiaalin päälle voidaan myös tehdä pintarakenne, jossa on paljon ilmarakoja. Tällaisia ovat esimerkiksi puurimoitus, metallisäleet tai sementtilastulevyt (kuvat 5.15 ja 5.16).



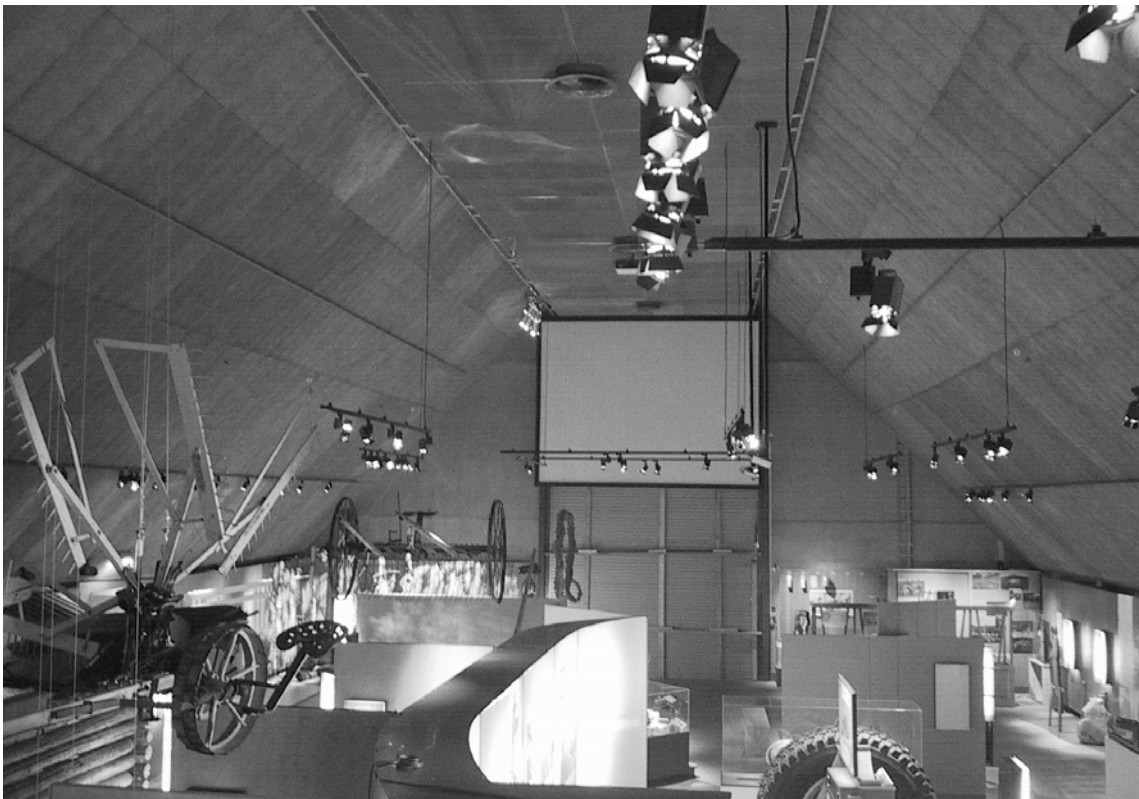
Kuva 5.13. Ohut huokoinen materiaalikerros absorboi tehokkaasti korkeita taajuuksia, joiden aallonpituus on lyhyt (vasemmalla). Materiaalin absorptiosuhdetta matalilla taajuuksilla voidaan nostaa jättämällä materiaalin ja seinä- tai kattorakenteen välille ilmarako (oikealla).



Kuva 5.14. Huokoisen materiaalin absorptiosuhteet riippuvat rakennekerroksen paksuudesta. Esimerkkejä mineraalivillojen absorptiosuhteista.



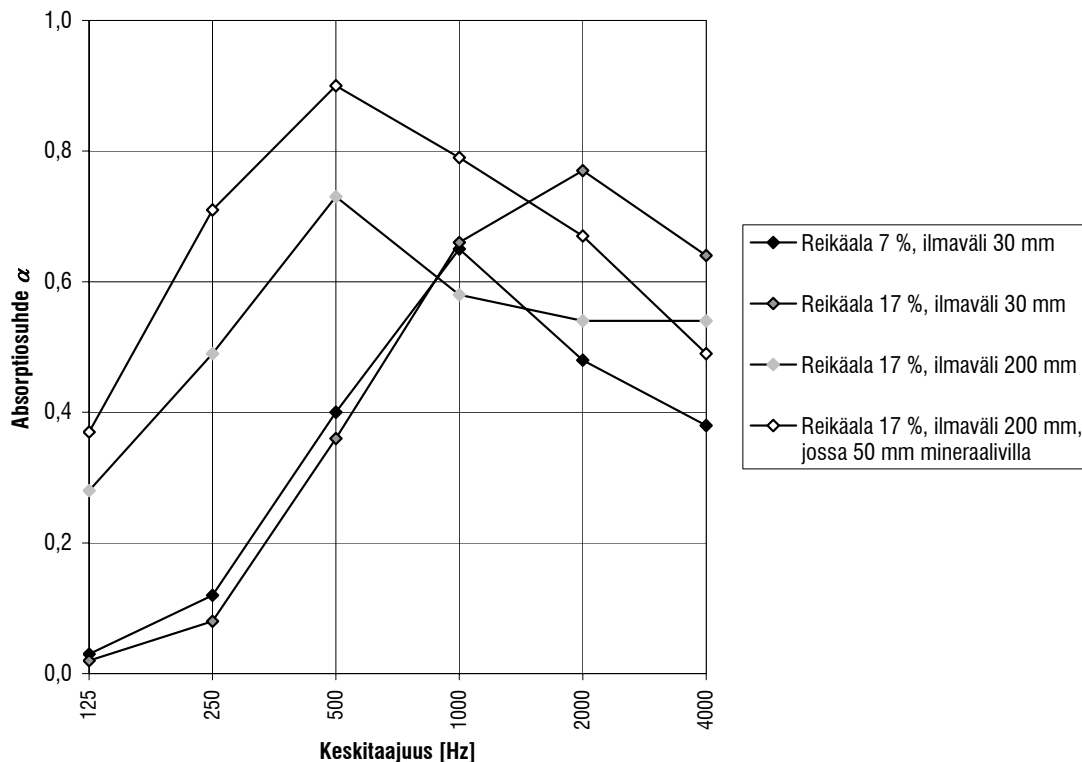
Kuva 5.15. Lukion kaikkea sisäistä liikennettä välittää neljä kerrosta korkea keskusaula, johon on yhdistetty ruokala, kirjasto ja ryhmätyötiloja. Aulan kaikki seinä- ja kattopinnat on vaimennettu. Mineraalivilla on päällystetty ruiskutteella, jolloin on saatu aikaan tasaisia saumattomia pintoja. Järvenpään lukio.



Kuva 5.16. Nykyaikaisten museoiden näyttelyissä käytetään paljon äänitehosteita. Museon näyttelyhallin jälkikaiunta-aika on saatu lyhyeksi käyttämällä katossa absorptiomateriaalina mineraalivillaa, joka on päällystetty sementtilastulevyllä. Suomen maatalousmuseo, Loimaa.

5.3.2 Reikälevyt

Rakenteita, joissa rei'itetyn rakennuslevyn takana on ilmapäli, käytetään erityisesti matalien ja keskitaajuuksien absorboimiseen. Niiden absorptiokyky perustuu siihen, että rei'ässä oleva ilma toimii massana ja ilmapäliässä oleva ilma jousena, jotka muodostavat massa-jousijärjestelmän. Kun rei'itettyyn levyyn kohdistuu ääntä, sen äänitehoa absorboituu eniten reikälevyn massa-jousijärjestelmän ominaistajuudella. Ominaisajuus ja absorptiosuhde riippuvat ilmapälin paksuudesta, rei'än koosta, reikien määrästä, rei'än muodosta ja rakennuslevyn paksuudesta (kuva 5.17). Rei'itettyjen levyjen absorptiosuhteet ovat suurimmillaan ominaistajuuden ympäristössä ja alempia muilla taajuuksilla. Absorptiosuhdetta voidaan kasvattaa täyttämällä rakenteen ilmapäliä huokoisella absorptiomateriaalilla. Tällöin voidaan saada koko taajuusalueelle melko korkea absorptiosuhde. Tavallisesti rei'itetyn levyn taustalla on ilmaa läpäisevä huopa. Levyrakenne voi olla mitä tahansa rakentamisessa käytettävää rakennuslevyä, kuten kipsilevyä, vaneria tai puukipsilevyä. Aiemmin on käytetty myös paljon reikätiiliä, joiden takana on ilmapäli. [10]

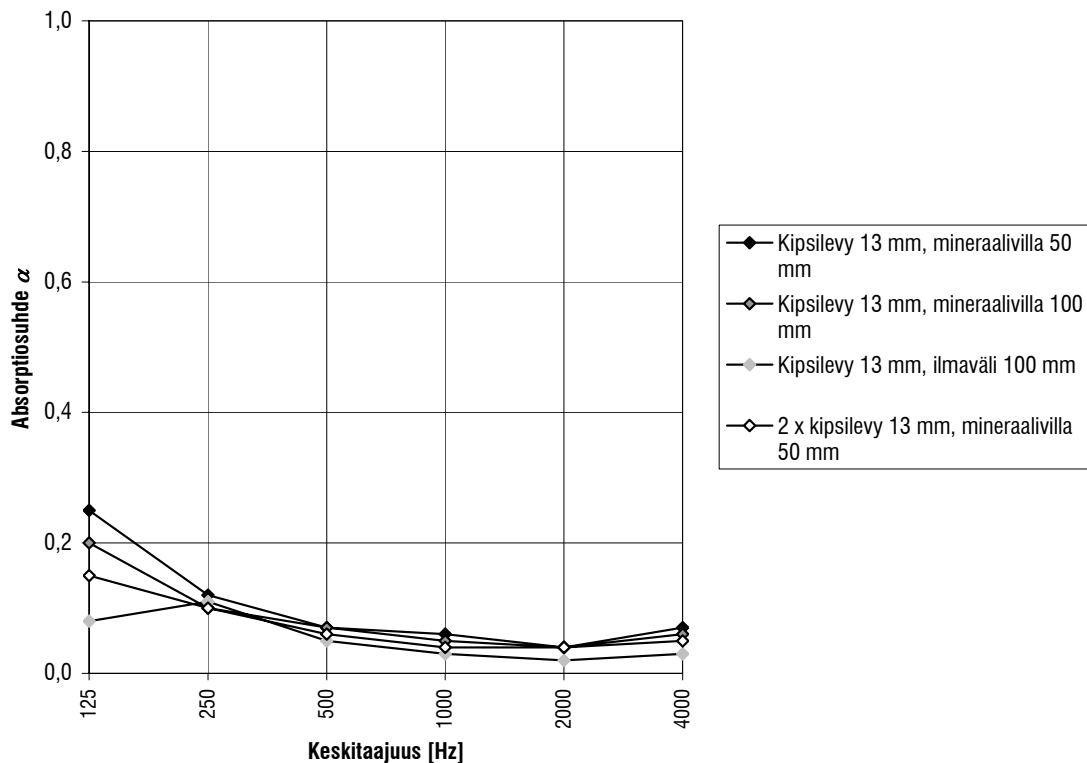


Kuva 5.17. Rei'itettyjen levyjen absorptiosuhde riippuu ilmapälin paksuudesta, rei'än muodosta ja reikien määrästä sekä ilmapälin täytöstä mineraalivillalla. Kuvassa on esimerkkejä 12 mm paksun puukipsilevyn absorptiosuhteista, kun rei'ät ovat pyöreitä. Kaikissa rakenteissa reikälevyn takana on ilmaa läpäisevä taustahuopa.

5.3.3 Levyresonaattorit

Levyresonaattorit ovat rakenteita, joissa ehjän rakennuslevyn takana on tyhjä tai mineraalivillalla täytetty ilmväli. Levyresonaattoreilla voidaan absorboida matalia taajuuksia; korkeilla taajuuksilla levyrakenteet ovat heijastavia (kuva 5.18). Levyresonaattoreita ovat esimerkiksi kaikki levyrakenteiset seinät, ikkunat ja ovet ja useimmat ohuet rakennuslevyt, kuten vaneri, puu ja lastulevy: niiden absorptiosuhteet ovat korkeimmillaan matalilla taajuuksilla, joilla niiden ilmaääneneristävyys on vastaavasti alimmillaan. Erityisesti vaativampien tilojen huoneakustiikkaa suunniteltaessa levyrakenteisten seinien absorptiokyky on otettava huomioon, jotta jälkikaiunta-aika matalilla taajuuksilla ei tulisi liian alhaiseksi. Levyrakenteita käytetään myös äänen heijastamiseen. Tällöin levykerroksen massa ja ilmväli on valittava niin, että rakenteen ominaistaajuus on mahdollisimman alhainen. Jos levyn takana oleva rakenne oletetaan erittäin jäykäksi ja massiiviseksi levyyn verrattuna, levyresonaattorin ominaistaajuus voidaan laskea levyn pintamassan m' [kg/m^2] ja ilmvälin d [m] perusteella:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad (5.3)$$

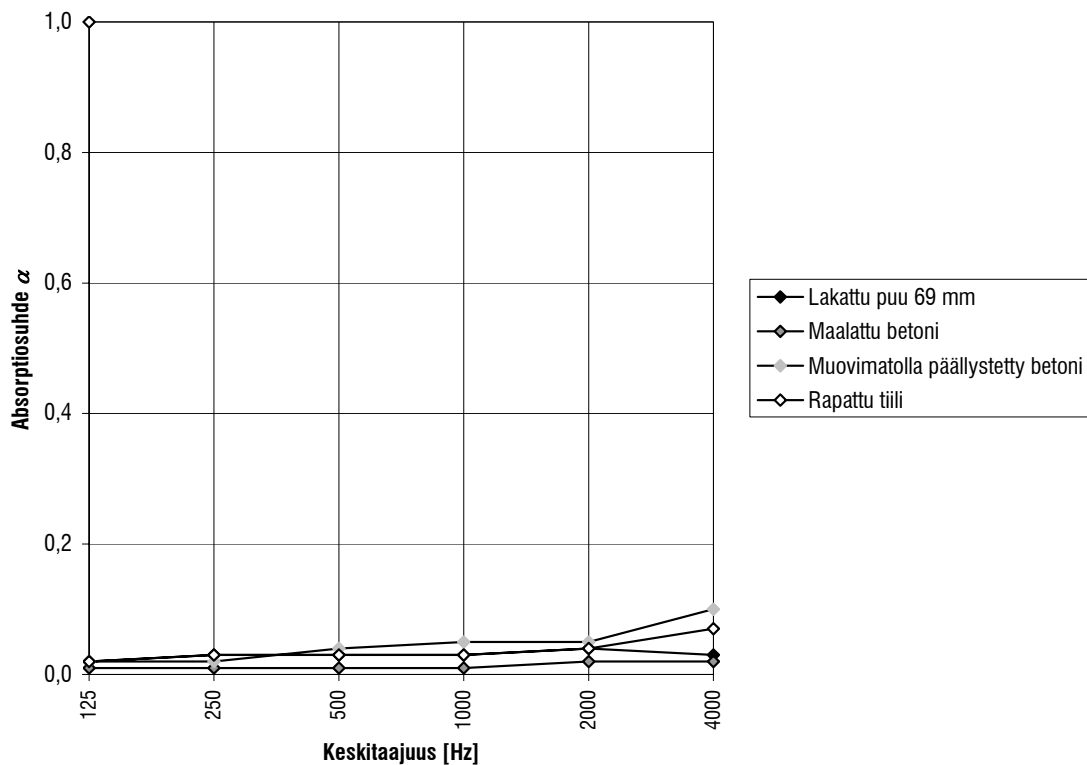


Kuva 5.18. Levyrakenteiden absorptiosuhteita.

Levyresonaattoreiden ominaistajuus on sitä alhaisempi, mitä suurempi levyn pintamassa on ja mitä suurempi ilmväli on. Tavallisesti levyrakenteisten seinien ja alakattojen ominaistajuus on alle 100 Hz. Absorptiosuhteeseen vaikuttaa ominaistajuuden lisäksi ilmvälin täyttö huokoisella materiaalilla: tällöin absorptiosuhteet ovat yleensä hieman korkeampia. [10, 60]

5.3.4 Kovat pinnat

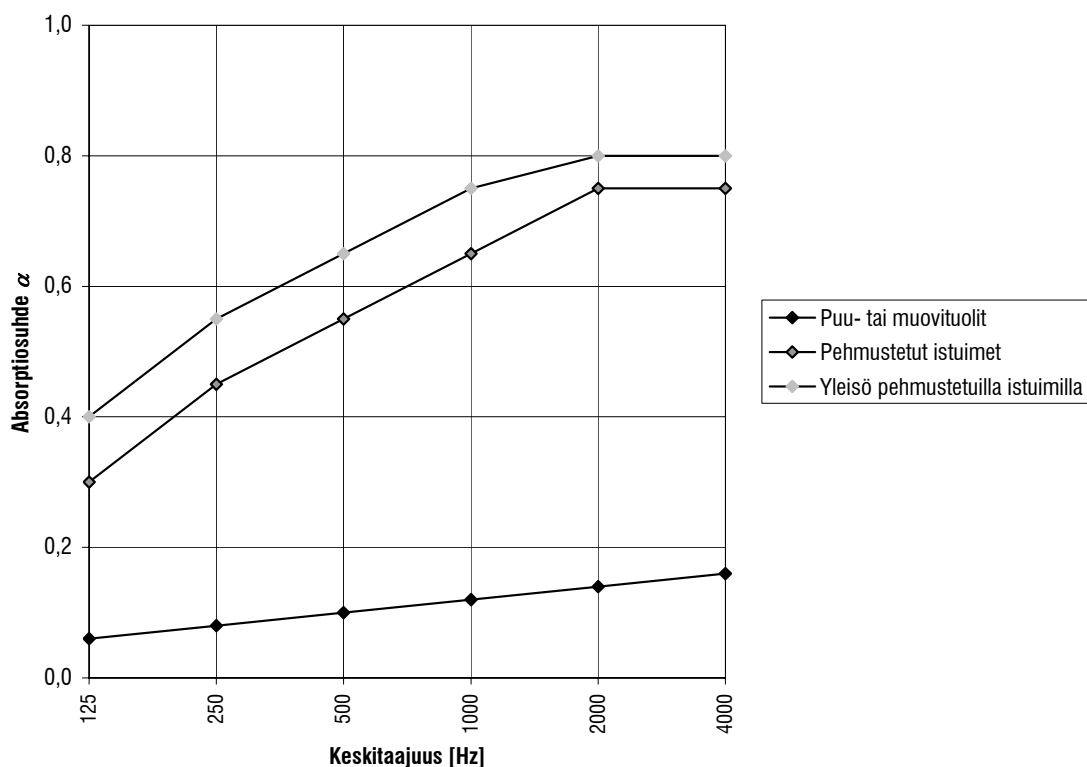
Kun rakenteen massa on suuri, rakenteen ominaistajuus on alhainen eikä rakenne enää toimi levyresonaattorina huoneakustiikan kannalta tärkeällä taajuusalueella. Kun rakenteen pinta on lisäksi kova ja tiivis, rakenne heijastaa äänitehosta suurimman osan itseltään pois. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi tiiliseinät, betonirakenteet ja massiivinen puu (kuva 5.19).



Kuva 5.19. Raskaiden kova- ja tiivispintaisten materiaalien absorptiosuhteita.

5.3.5 Kalusteet ja yleisö

Rakentamismääräyksissä ja erilaisissa ohjeissa annetut tavanomaisten tilojen, kuten luokkahuoneiden, pienten neuvottelutilojen ja toimistohuoneiden, jälkikaiunta-ajat koskevat tyhjiä huoneita, joissa ei ole kalusteita tai ihmisiä. Vaativampia tiloja, kuten auditorioita, isoja luentosaleja, puheteattereita tai musiikkitiloja, varten ei ole mahdollista antaa määräyksiä, koska vaadittava huoneakustiikka riippuu tilan käyttötarkoituksesta. Näissä tiloissa kalustuksella ja yleisöllä on suuri vaikutus jälkikaiunta-aikaan ja ne on aina otettava huomioon. Kaikkein vaativimmat tilat suunnitellaan niin, että tilan akustiset olosuhteet ovat suunnillaan samat riippumatta siitä, onko tilassa yleisöä vai ei. Kuvassa 5.20 on esitetty yleisön alueen keskimääräisiä absorptiosuhteita.

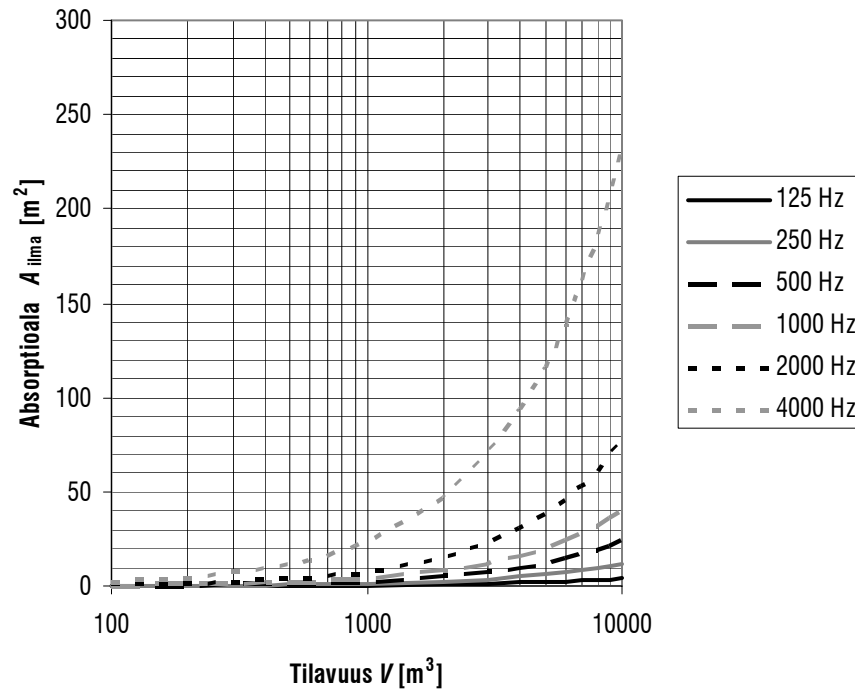


Kuva 5.20. Yleisön alueen keskimääräisiä absorptiosuhteita. Penkkirivien väli on 0,9-1,2 m. [9]

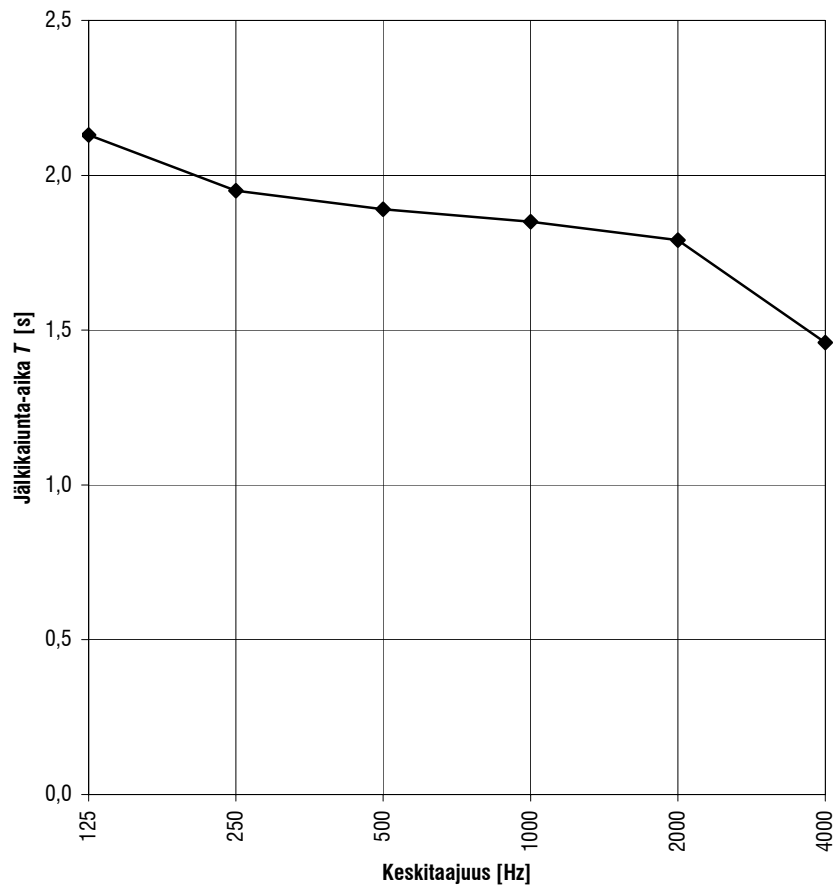
5.3.6 Ilma

Ilma absorboi ääntä, mutta sen vaikutus on merkittävä lähinnä korkeimmilla oktaavikaistoilla, kun huoneen tilavuus on suuri. Ilman vaikutus voidaan laskea absorptioalana taajuuden ja tilavuuden perusteella. Ilman absorptioala riippuu lisäksi lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. Kuvassa 5.21 on esitetty ilman absorptioala oktaavikaistoittain tilavuuden funktiona. Käytännössä ilman absorptiolla on merkitystä vain hyvin suurissa tiloissa, kuten monitoimihalleissa, suurissa luento- ja konferenssisaleissa,

konserttisaleissa ja teattereissa. Mitattaessa näiden jälkikaiunta-aikaa ilman absorptio näkyy jälkikaiunta-ajan lyhenemisenä korkeimmilla oktaavikaistoilla (kuva 5.22).



Kuva 5.21. Ilman absorptioala 20 °C lämpötilassa ja 50 % suhteellisessa ilmankosteudessa.



Kuva 5.22. Ilman absorptio näkyy suurissa tiloissa jälkikaiunta-ajan lyhenemisenä korkeimmalla keskitaajuudella. Savonlinnasalin mitatut jälkikaiunta-ajat [14].

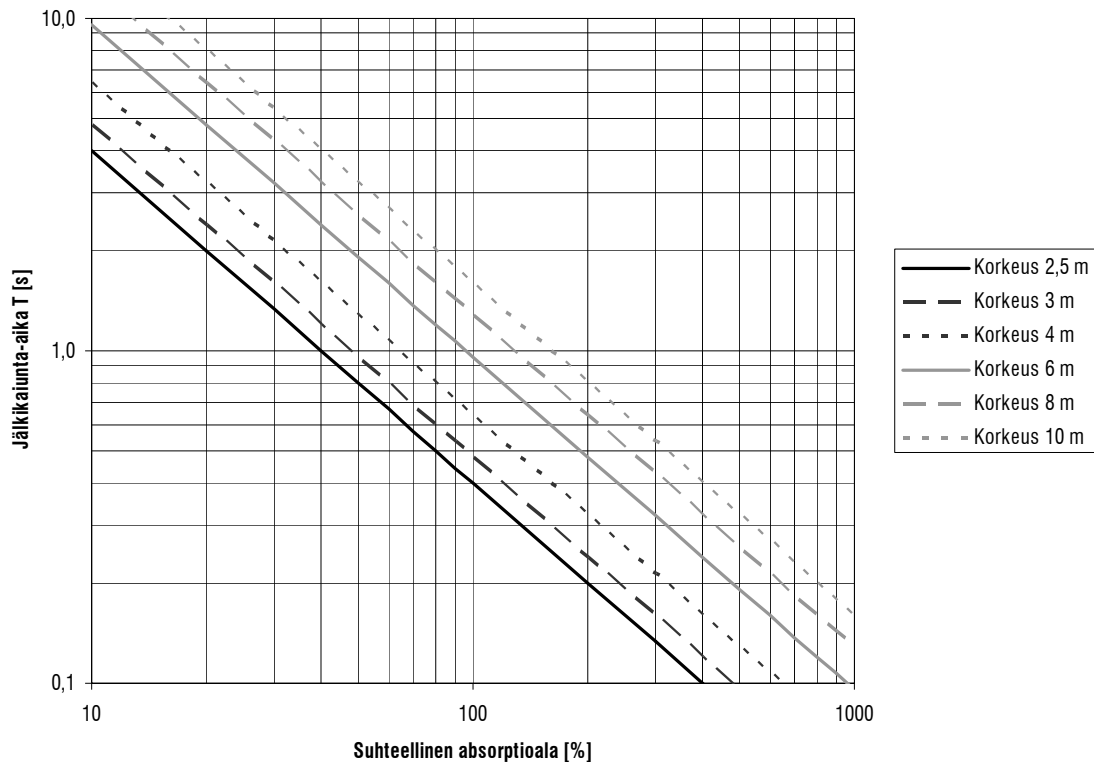
5.4 Huoneakustinen suunnittelu

5.4.1 Jälkikaiunta-ajan valinta

Tavallisimpien tilojen jälkikaiunta-ajoista on annettu suosituksia standardissa SFS 5907 [54]. Lisäksi joidenkin tilojen jälkikaiunta-ajoista on annettu määräyksiä ja ohjeita Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 [56]. Esimerkkejä standardin suosittelamista jälkikaiunta-ajoista on taulukossa 5.3. Standardi sallii 250-4000 Hz keskitajuuksilla $\pm 0,1$ s poikkeaman taulukon mukaisista arvoista; 125 Hz oktaavikaistalla sallittu poikkeama on $\pm 0,3$ s. Poikkeuksena ovat luokkahuoneet, joiden jälkikaiunta-ajalle standardi määrittelee sallitun vaihteluvälin. Standardin suosittamat jälkikaiunta-ajan arvot koskevat tilaa, joka on tyhjä ja jossa on vain arkkitehdin suunnittelemat kiintokalusteet. Tavallisimpien tilojen suunnittelussa voidaan käyttää apuna kuvaa 5.23, jossa on esitetty tilassa vaadittavan absorptioalan suhteellinen määrä prosentteina tilan lattiapinta-alasta. Kunkin absorptiomateriaalin määrää voidaan arvioida jakamalla kuvasta saava prosenttimäärä materiaalin absorptiosuhteella.

Taulukko 5.3. Esimerkkejä eri tiloissa suositeltavista jälkikaiunta-ajoista standardin SFS 5907 mukaan [54].

Tila	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
Asuinkerrostalon porrashuone	1,0 s	1,0 s	1,3 s	1,3 s
Toimistohuone	0,5 s	0,6 s	0,7 s	0,9 s
Neuvotteluhuone	0,5 s	0,6 s	0,7 s	0,9 s
Ruokala, ravintola	0,7 s	0,8 s	0,9 s	1,0 s
Avotoimisto, korkeus alle 3 m	0,35 s	0,4 s	0,45 s	0,55 s
Avotoimisto, korkeus yli 3 m	0,4 s	0,45 s	0,5 s	0,6 s
Luokkahuone	0,5...0,6 s	0,5...0,6 s	0,6...0,8 s	-
Musiikkiluokka	0,8...0,9 s	0,8...0,9 s	< 1,0 s	-
Liikuntasali, korkeus alle 5 m	< 1,1 s	< 1,1 s	< 1,5 s	-
Liikuntasali, korkeus yli 5 m	< 1,3 s	< 1,3 s	< 1,9 s	-
Päiväkodin leikki- ja lepo huone	0,5 s	0,5 s	0,6 s	-
Potilas- tai vastaanottohuone	0,6 s	0,6 s	0,8 s	-

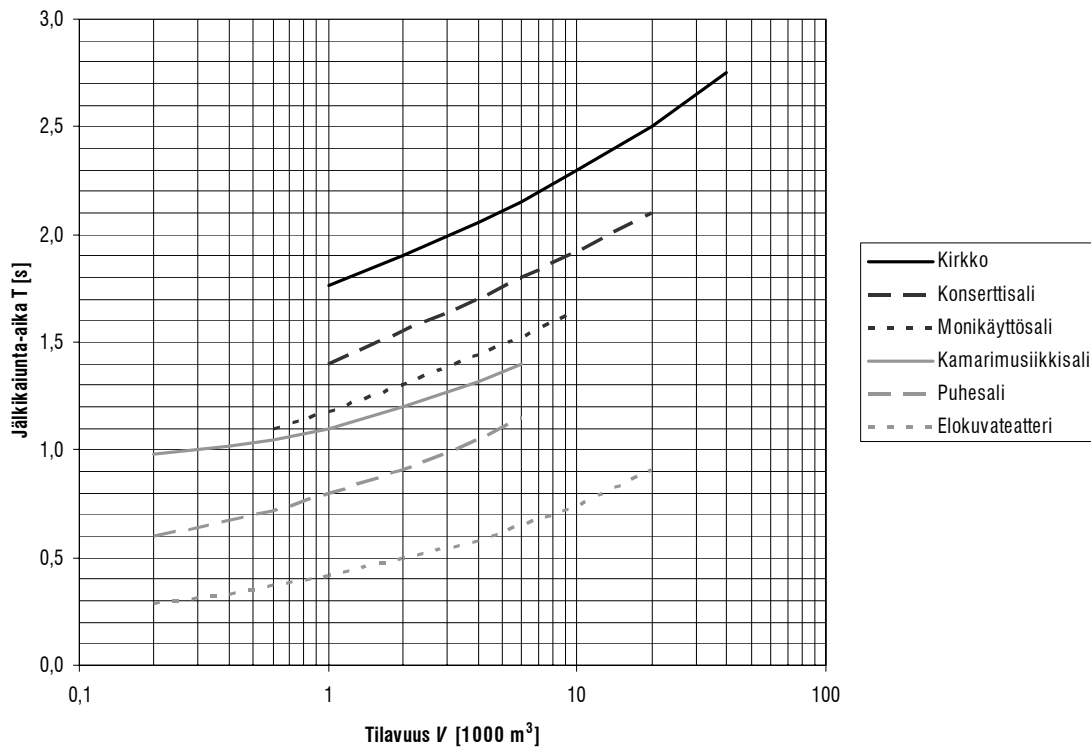


Kuva 5.23. Sabine'n kaavan mukainen absorptioala [%] suhteessa tilan lattiapinta-alaan huonekorkeuden ja jälkikaiunta-ajan vaihdella, kun absorptiomateriaalin absorptiosuhde on 1.

Vaativampien tilojen, kuten auditorioiden suunnittelun lähtökohtana on tilan oikea muoto ja sopiva tilavuus. Taulukossa 5.4 on suositeltavia tilavuuksia erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltuville tiloille. Kuvassa 5.24 puolestaan on esitetty näihin tiloihin sopivia jälkikaiunta-aikoja. Musiikkitiloissa absorptioala muodostuu pääasiassa yleisön alueesta, joten jälkikaiunta-ajalla ja tilavuudella on melko suora yhteys: jos yhden ihmisen absorptioala on noin 1 m^2 , konserttisalin 2 s jälkikaiunta-aika edellyttää noin 10 m^3 tilavuutta henkeä kohti.

Taulukko 5.4. Tilan käyttötarkoitukseen perustuvia suositeltavia tilavuuksia henkeä kohti ja tilan suurimmat suositeltavat tilavuudet. [10]

Käyttötarkoitus	Tilavuus henkeä kohti [m^3]	Suurin tilavuus V [m^3]
Kokoustila, seminaarihuone	3...5	1000
Auditorio, luentosali, konferenssisali, puheteatteri	4...6	5000
Monikäyttösali (puhe ja musiikki)	4...7	8000
Musiikkiteatteri ja ooppera	5...8	15000
Kamarimusiikkisali	6...10	10000
Konserttisali sinfoniamusiikille	8...12	25000
Kirkko	10...14	30000



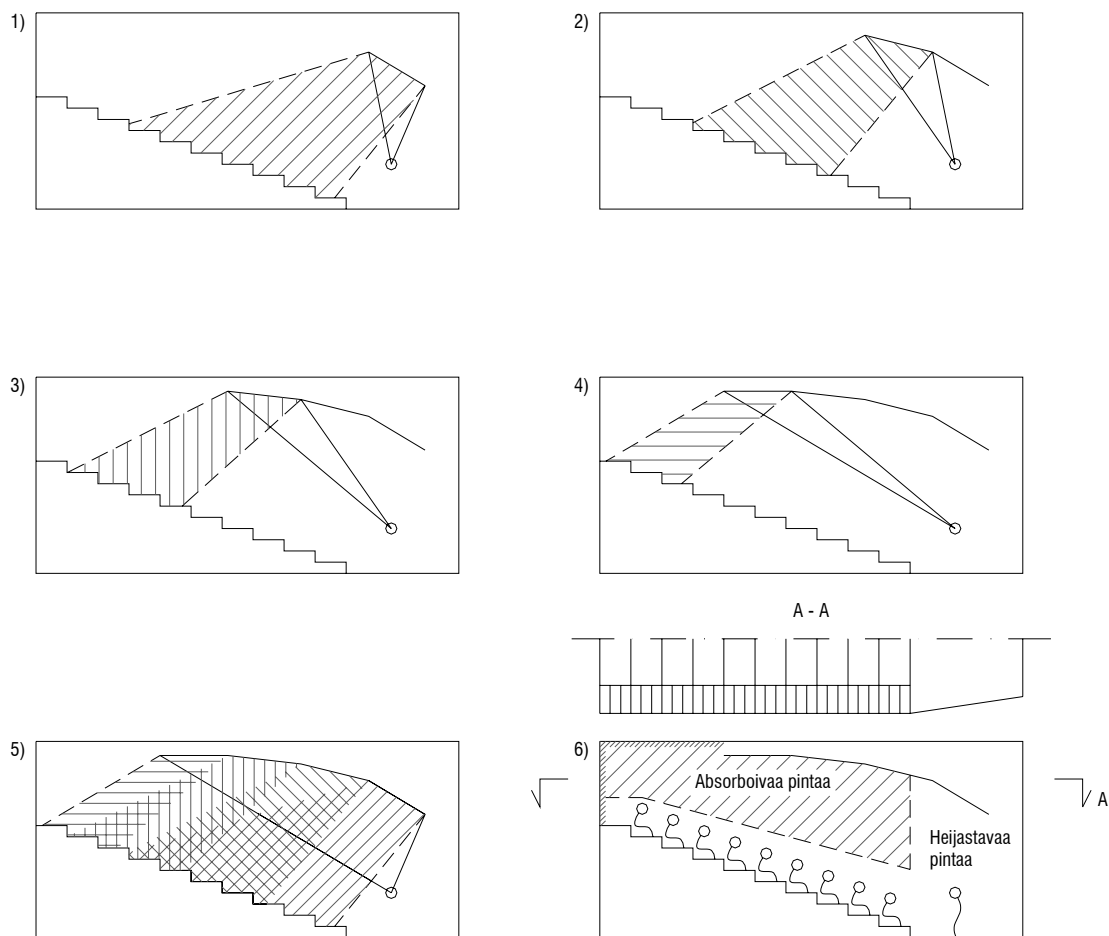
Kuva 5.24. Huoneakustisesti vaativien tilojen suositeltavia jälkikaiunta-aikoja 500-1000 Hz taajuuksilla [4, 10, 60].

5.4.2 Auditorio

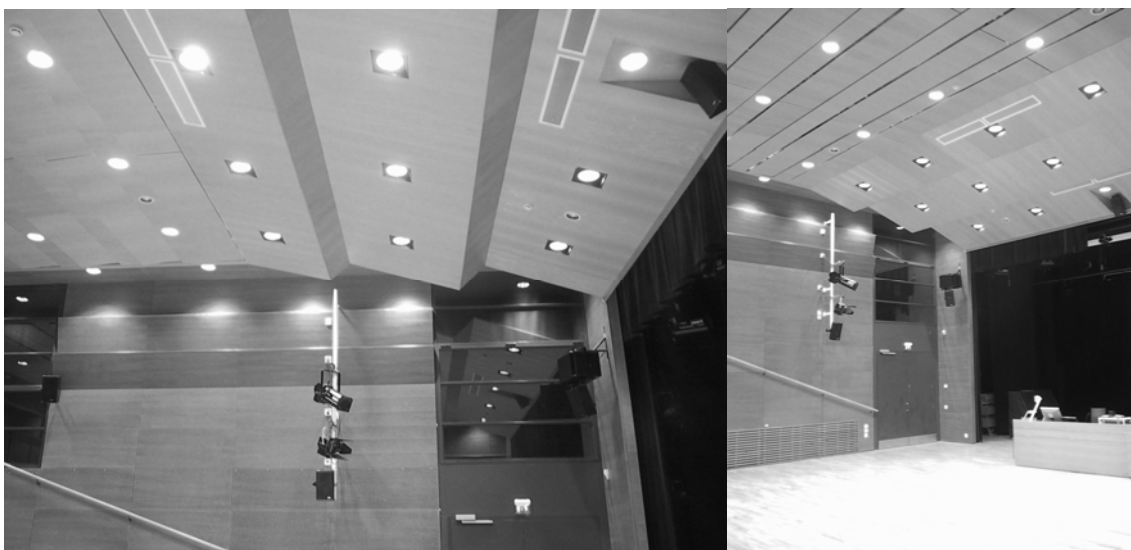
Suurissa auditorioissa puheen selvyyden kannalta oleellista on, että muut kuulijat eivät ole puhujalta vastaanottajalle kulkevan suoran äänen tiellä. Auditorioihin – samoin kuin teattereihin, konserttisaleihin ja muihin vastaaviin tiloihin – ei siten tehdä nousevaa katsomoa pelkästään näköyhteyden, vaan myös kuulemisen vuoksi [3]. Toinen tärkeä seikka auditorion akustiikan kannalta on aikaisten heijastusten suuntaaminen yleisön alueelle. Tämä edellyttää heijastavien tasojen ja absorptiomateriaalien sijoittamista sopiviin paikkoihin. Lisäksi jälkikaiunta-ajan tulee olla sopivan mittainen. Kuvassa 5.25 on esimerkki auditorion heijastavien ja absorboivien pintojen suunnittelusta, kun tilassa ei ole äänentoistoa [60]:

- puhujan yläpuolelle järjestetään jyrkästi kallistettu heijastava taso, joka kääntää puhujan äänen nousevan katsomon etu- ja keskiosaan (vaihe 1). Tason alareunan paikka määräytyy saliin tehtävän valkokankaan yläreunan perusteella siten, että sekä tarkkaamosta että viimeiseltä istuinriviltä on näköyhteys valkokankaalle.

- salin keski- ja takaosiin sijoitetaan myös heijastavat tasot, joiden kaltevuus loivenee sitä enemmän, mitä kauempana esiintyjän alueesta ne sijaitsevat. Salin keskiosan jälkeen heijastava taso on vaakasuorassa (vaiheet 2-5). Sijoittamalla tasot sopivasti koko yleisön alueella saadaan katosta hyödyllisiä heijastuksia.
- esiintyjien alueella salin sivuseinät tehdään vinoiksi siten, että niiden välille ei synny tärykaikua (vaihe 6). Salin etuosan seinäpinnat ovat heijastavia. Yleisön alueella seinien alaosat tehdään heijastaviksi, jolloin ääni heijastuu katon lisäksi myös sivulta. Auditorion absorptioala muodostuu yleisön alueesta, jonne tehdään hyvin pehmustetut istuimet, ja mahdollisesti tarvittavasta absorptiomateriaalista. Absorptiomateriaali sijoitetaan sivuseinien yläosaan sekä katon takaosaan. Päälystämällä takaseinä absorptiomateriaalilla estetään myöhempien heijastusten kulkeutuminen tilan auditorion etuosaan tai puhujalle. Heijastus auditorion takaosasta voidaan kääntää myös katsomon takariveille tekemällä auditorion takaosan katto takaseinää kohti alaspäin viettäväksi. Heijastukset takaseinästä voidaan myös kääntää absorboivaan kattoon.
- puhujan kannalta on edullista, jos hän kuulee oman äänensä aikaisia heijastuksia auditoriosta. Katon heijastaviin rakenteisiin voidaan tehdä tasoja, joiden kautta puhujan on mahdollista saada palautetta (kuva 5.26).



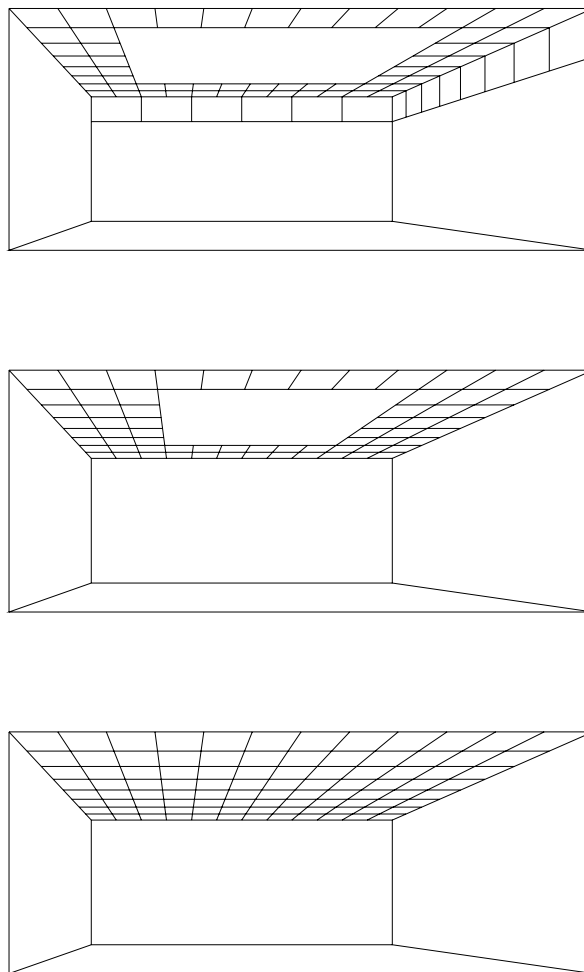
Kuva 5.25. Esimerkki auditorion heijastavien ja absorboivien pintojen suunnittelusta.



Kuva 5.26. Auditorion etuosan katto heijastaa ääntä yleisölle. Katon taitekohdissa olevat jyrkät tasot palauttavat ääntä puhujalle. Järvenpään lukio.

5.4.3 Opetustila

Luokkahuoneet ja muut pienet opetustilat ovat puhesaleja tai auditorioita pienoiskoossa. Riittävän puheen selvyuden saavuttamiseksi jälkikaiunta-ajan tulee olla melko lyhyt. Koska lattia on tasainen, ääni ei välttämättä pääse etenemään suoraan puhujalta tilan takaosaan. Siksi opetustiloissa heijastukset muista pinnoista ovat tärkeitä. Käytännössä ainoa pinta, josta heijastuksia voidaan saada tehokkaasti, on katto. Siksi opetustilan suunnitteluperiaatteena on, että katon keskiosaan jätetään heijastava kova pinta, esimerkiksi maalattu betoni tai kipsilevyalakatto, ja absorptiomateriaali sijoitetaan katon reunoille tai osittain seinien yläosaan [35]. Näin menetellään silloin, kun käytetään absorptiomateriaaleja, joiden absorptiosuhteet ovat 500 Hz ja korkeammilla oktaavikaistoilla yli 0,9. Jos käytetään absorptiomateriaalia, jonka absorptiosuhde on 0,6-0,7, koko katon ala voidaan päällystää sillä, koska materiaali on puoliheijastavaa (kuva 5.27). Standardi SFS 5907 suosittelee puheensirtoindeksin *STI* arvoksi vähintään 0,70, mutta mieluummin yli 0,80. Kuvassa 5.27 esitetyt ratkaisut yleensä täyttävät tämän suosituksen.



Kuva 5.27. Luokkahuoneen kattoon jätetään heijastava alue, kun absorptiomateriaalin absorptiosuhde on 0,9 (yllä ja keskellä). Materiaalia, jonka absorptiosuhde on 0,6-0,7, sijoitetaan katon koko alalle (alla).

6

LVIS-järjestelmien meluntorjunta

”Kun vielä otamme huomioon esim. tavallisen liike- ja asuinrakennuksen sellaiset ääntä synnyttävät koneelliset laitteet, joita nykyaikainen rakennustekniikka on luonut, kuten hissit, tuuletuslaitteet, keskuslämpöjohdot, ym., sekä ennen kaikkea sopimattomat rakennustavat, joita on käytetty tietämättömyydestä ja kokemuksen puutteessa, niin ei ole ihmettelemistä, että äänen eristysprobleemi on edessämme vielä lopullista ratkaisua vailla.”

Diplomi-insinööri U. Varjo 1938

6.1 LVIS-tekniikan vaikutus ääniolosuhteisiin

6.1.1 Äänilähteet

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan rakennuksen LVIS-laitteita ovat esimerkiksi hissit, vesi- ja viemärlaitteet, kompressorit, ilmanvaihtolaitteet, jäähdytyslaitteet ja lämmityslaitteet. Niihin rinnastetaan myös keskuspölynimuri, mattoimuri ja talopesulan laitteet, kuten pesukoneet, lingot, kuivauspuhaltimet ja mankelit [56]. Nämä rakennuksen tekniset järjestelmät vaikuttavat rakennuksen ääniolosuhteisiin lähinnä kolmella tavalla:

- ilmanvaihtokoneiden puhaltimet saavat ilman pyörteilemään, samoin ilman virtaus ilmanvaihtokanavistossa sekä pääte- ja säätölaitteissa synnyttää virtausääntä, joka siirtyy näistä äänilähteistä kanaviston kautta huonetiloihin. Ilmanvaihtojärjestelmän äänenkehitys voidaan hallita parhaiten valitsemalla puhaltimet ja kaikki ilmankäsittelyosat sekä kanavakoot oikein ja käyttämällä hyviä äänenvaimentimia. Myös vesi- ja viemärlaitteissa syntyy virtausääntä, mutta se aiheuttaa lähinnä runkoääntä, jota voidaan vähentää tärinäneristysten keinoin.
- rakennuksen runkoon kiinnitetyt tekniset laitteet, joissa on liikkuvia osia, saavat rakenteet värähtelemään. Näin syntynyt runkoääni etenee rakenteita pitkin ja saa ympäröivän ilman värähtelemään synnyttäen näin ilmaääntä. Tekniset laitteet edellyttävät lähes poikkeuksetta tärinäneristimiä.
- ilmastointijärjestelmän kanavat, lämmitys- ja vesijärjestelmän putket ja muut vastaavat on johdettava konehuoneista rakennuksen muihin tiloihin. Jossain kohdassa ne on yleensä vietävä ääntä eristäväksi suunnitellun rakenteen läpi. Läpiviennit on suunniteltava sellaisiksi, että ne eivät heikennä rakenteiden ilma- tai askelääneneristyskykyä: niiden on oltava tiiviitä eivätkä ne saa kytkeä kaksirunkoisten rakenteiden puoliskoja toisiinsa.

Monissa tapauksissa äänenhallinta on rakennuksen LVIS-järjestelmän suunnittelun määräävä tekijä: järjestelmän muiden teknisten vaatimusten, kuten ilmanvaihdon edellyttämien ilmamäärien saavuttaminen vaatii usein vähemmän suunnittelutyötä kuin määräysten mukaisten äänitasojen saavuttaminen. Asuinrakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelu tarkoittaakin tai sen pitäisi tarkoittaa pitkälti samaa kuin ilmanvaihtojärjestelmän äänenhallinnan suunnittelu. Sama pätee useiden muidenkin LVIS-

laitteiden toiminnan ja äänenhallinnan suunnitteluun: esimerkiksi autotallien moottoroitujen ovien suunnittelun lähtökohtana tulee olla oven mekaniikan lisäksi oven tärinäneristys, jotta ovi ei synnyttäisi häiritsevää runkoääntä. Rakennusten LVIS-järjestelmien äänenhallinnassa tärkeä keino on laitevalinta: mitä hiljaisempi äänilähde on, sitä vähemmän se edellyttää äänenvaimennuksen- ja eristyksen tai tärinäneristykseen suunnittelua. Halvin laite ei välttämättä ole edullisin, jos sallittujen äänitasojen saavuttamiseksi on erikseen suunniteltava tärinäneristystä ja äänenvaimennus- tai ääneneristysrakenteita.

6.1.2 LVIS-tekniikan äänitasoja koskevat määräykset

Viranomaismääräyksiä on olemassa vain asuinrakennusten LVIS-järjestelmien asuinhuoneisiin ja keittiöihin aiheuttamasta äänitasosta. Määräykset on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 [56]. Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 on esitetty lisäksi ohjeita äänitasosta sairaaloiden ja terveystieteiden potilashuoneissa, päiväkotien lepo- ja huoneissa, luokkahuoneissa ja toimistohuoneissa (taulukko 6.1). Rakentamismääräyskokoelmassa äänitasoille määritetään kaksi sallittua arvoa, keskiäänitaso $L_{A,eq}$ ja enimmäisäänitaso $L_{A,max}$. Kaikkien rakennusten LVIS-järjestelmiä koskeva määräys, jonka mukaan rakennusta palvelevien tai rakennuksen LVIS-laitteiden aiheuttama keskiäänitaso $L_{A,eq}$ saa olla enintään 45 dB saman tai läheisen rakennuksen ikkunan ulkopuolella, parvekkeella, pihamaalla tai muussa vastaavassa paikassa asuinalueella ja muilla melulle herkillä alueilla.

Rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta on annettu määräyksiä ja ohjeita Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 [57]. Se määrittelee tulo- ja poistoilmavirrat tilakohtaisesti, samoin eri tiloissa sallittavat äänitasot. Äänitasojen ohjearvoja on annettu asuinrakennusten tiloille, joita rakentamismääräyskokoelman osa C1 ei koske, kuten vaatehuoneille, kylpyhuoneille, kodinhoitohuoneille ja huoneistosaunoille sekä asuinrakennusten yhteistiloille, kuten porrashuoneille, varastoille, kylmäkellareille, puku- ja pesuhuoneille sekä talosaunoille, talopesuloille kuivaushuoneineen ja askartelu- ja kerhuhuoneille. Rakentamismääräyskokoelman osassa D2 annetaan äänitasojen ohjearvoja myös muun muassa toimistorakennusten, oppilaitosten, ravintoloiden, hotellien, myymälöiden, urheiluhallien, kirjastojen ja kirkkojen äänitasoille (taulukko 6.2).

Ohjeita määräystasoa alhaisempien äänitasojen valitsemiseksi erilaisissa tiloissa on annettu standardissa SFS 5907 [54]. Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 ja D2 vaadittujen tai suositeltujen äänitasojen saavuttaminen ei tarkoita sitä, että rakennuksen LVIS-laitteet olisivat täysin hiljaisia tai eivät häiritseisi. Pientalojen sisäilmastoa tutkittaessa on todettu, että asukkaat säätävät talojensa ilmanvaihtokoneet pienemmälle teholle kuin suositellut ilmamäärät edellyttäisivät, jotta koneiden äänitaso olisi alhaisempi. Pientaloasukkaat näyttävät yleisesti pitävän ilmanvaihdon aiheuttamaa melutasoa sopi-

vana, kun keskiäänitaso on alle 24 dB [64]. Rakennuksen LVIS-järjestelmien suunniteltu niin, että äänitasot ovat määräystasoa alhaisempia, on siten perusteltua.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 annetut äänitasot ovat elokuvateattereiden ja teatterien katsomoiden ja näyttämöiden sekä konserttisalien osalta nykyisen suunnittelukäytännön mukaan turhan korkeita. Konserttisaleja on suunniteltu viime aikoina niin, että ilmastoinnista aiheutuva taustamelun keskiäänitaso $L_{A,eq}$ on enintään 20 dB. Joitakin musiikkioppilaitosten yhteydessä olevia konserttisaleja on myös suunniteltu niin, että sallittu taustamelun keskiäänitaso on 25 dB A-painotettuna. Elokuvateattereiden suunnittelua määräävät myös kaupalliset äänentoistoa koskevat standardit, jotka määrittelevät muun muassa vierekkäisten elokuvasalien välillä vaadittavan ilmaääneneristävyyden, jälkikaiunta-ajan sekä ilmastoinnista sallittavan taustamelutason.

Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisema Asumisterveysohje [2] koskee melun osalta kaikkia rakennuksen teknisiä laitteita sekä asuinrakennuksessa olevaa liiketoimintaa, kuten ravintoloita, elokuvateattereita ja muita tiloja, jotka aiheuttavat asuntoihin äänihaittaa. LVIS-järjestelmät aiheuttavat myös matalataajuisia ääntä, jonka eristäminen rakenteilla ja vaimentaminen kanavistossa on vaikeampaa kuin korkean äänen. Asumisterveysohjeessa annetut yöaikaisen pienitaajuisen melun ohjearvot koskevat myös ilmastoinnin ääntä. Niitä noudatetaan kuitenkin vain arvioitaessa meluhaittaa tiloissa, joissa nukutaan. Pienitaajuisen melun ohjearvot perustuvat siihen, että pienitaajuinen melu voi hiljaisessa ympäristössä erottua selvästi taustamelusta ja vaikeuttaa nukahtamista.

Laajakaistainen kohina, jota ilmastoinnin aiheuttama ääni yleensä on, koetaan vähemmän häiritseväksi kuin taustamelusta erottuva kapeakaistainen ääni. Tyypillinen kapeakaistainen ääni on esimerkiksi tulo- tai poistoilmaventtiilin vihellys, joka välttämättä ei kuitenkaan ylitä rakentamismääräyskokoelmassa esitettyjä sallittuja äänitasoja. A-painotettu äänitaso ei välttämättä kuvaa tällaisessa tilanteessa melun häiritsevyyttä, joten mittauksia tehtäessä mittaustulokseen lisätään kapeakaistaisuuskorjaus. Korjaus on 3 dB, kun kapeakaistaisuus erottuu heikosti. Kun kapeakaistaisuus erottuu selvästi, korjaus on 6 dB. Äänen kapeakaistainen komponentti katsotaan selvästi erottuvaksi, kun se ylittää kuulokynnyksen ja taajuuspainottamattomia äänenpainetasoja kolmannesoktaavikaistoittain mitattaessa sen äänenpainetaso on 5 dB korkeampi kuin äänenpainetasot viereisillä kolmannesoktaavikaistoilla. Lisäksi melun keskiäänitason $L_{A,eq}$ tulee olla alle 55-60 dB.

Useimmiten ilmastoinnin aiheuttamaa ääni ajatellaan haittatekijäksi. Edellä esiteltyjen määräystenkin lähtökohtana on lähinnä äänen aiheuttama häiriö. Joissakin tapauksissa kohtuullisesta taustamelusta on kuitenkin hyötyä. Esimerkiksi erilaisten virastojen ja liikelaitosten palvelutiloissa taustamelu vähentää kuuluvuutta palvelupisteiden välillä ja palvelupisteistä odotustiloihin. Avotoimistoissa taustamelu on suorastaan välttämätön,

jotta eri työpisteissä saataisiin aikaan mahdollisimman hyvät työolosuhteet eikä puhe viereisestä työpisteestä häiritsisi kohtuuttomasti. Erillisten toimistohuoneiden työrauhaa ei hyvinkään suunnitellussa avotoimistossa voida silti saavuttaa.

Taulukko 6.1. Rakennuksen LVIS-laitteista ja niihin rinnastettavista laitteista sallittavien äänitasojen määräys- ja ohjearvot Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan.

Tila	Keskiäänitaso $L_{A,eq}$	Enimmäisäänitaso $L_{A,max}$
Asuinrakennusten asuinhuoneissa	28 dB	33 dB
Asuinrakennusten keittiöissä	33 dB	38 dB
Potilashuoneissa, lasten lepo- huoneissa ja vastaavissa tiloissa	28 dB	33 dB
Luokahuoneissa, toimistohu- neissa ja vastaavissa tiloissa	33 dB	38 dB

Taulukko 6.2. Esimerkkejä rakennuksen LVIS-laitteista ja niihin rinnastettavista laitteista sallittavien äänitasojen ohjearvoista Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan.

Tila	Keskiäänitaso $L_{A,eq}$	Enimmäisäänitaso $L_{A,max}$
Asuinhuoneiston vaatehuoneessa, varastossa, WC:ssä, kodinhoito- huoneessa ja saunassa	33 dB	38 dB
Asuinhuoneiston kylpyhuoneessa	38 dB	43 dB
Asuinrakennuksen talosaunan pukuhuoneessa ja löylyhuoneessa, askartelu- ja kerhuhuoneessa	33 dB	38 dB
Asuinrakennuksen porrashuonees- sa	38 dB	43 dB
Asuinrakennuksen varastossa, kylmäkellarissa, talosaunan pesu- huoneessa, talopesulassa ja kuiva- ushuoneessa	43 dB	48 dB
Toimistorakennuksen toimisto- ja neuvotteluhuoneessa	33 dB	38 dB
Oppilaitosten ruokalassa	33 dB	38 dB
Hotellihuoneessa	28 dB	33 dB
Ravintolassa	38 dB	43 dB
Liikuntasaleissa ja -halleissa	38 dB	43 dB
Sairaalan potilashuoneissa	28 dB	33 dB
Sairaalan ja terveyskeskuksen vastaanotto- ja toimenpidehuo- neissa	33 dB	38 dB
Päiväkodin leikkihuoneessa	33 dB	38 dB

6.2 Ilmanvaihdon meluntorjunta

6.2.1 Ilmanvaihdon äänilähteet [16, 42]

Ilmastointilaitos on ilmanvaihto-, jäähdytys-, lämmitys- ja kosteudensäätlaitteiden ja mahdollisesti joidenkin muidenkin sisäilmaolosuhteiden säätämiseen tarkoitettujen laitteiden muodostama kokonaisuus. Ilmastointi on yksi yleisimmistä valitusten aiheuttajista sekä työpaikoilla että asuinrakennuksissa. Tyytymättömyyttä, häiriintymistä ja pahimmassa tapauksessa erilaista oireilua aiheuttaa vedon lisäksi ilmastointilaitoksen kehittämä ääni ja ilmanvaihtokanavien kautta tilasta toiseen siirtyvä ääni. Asuinrakennuksissa korkea äänitaso vaikeuttaa nukahtamista ja heikentää unen laatua. Liian korkea äänitaso työtilassa vaikeuttaa keskittymistä vaativaan työhön ja haittaa puheen ymmärtämistä: puhujan on korotettava ääntään, mikä puhetyöntekijöillä voi johtaa äänihäiriöihin. Joissakin tapauksissa toimistorakennuksen ilmanvaihtokonehuonetta lähellä sijaitsevia huoneita on jopa pidetty vuosia tyhjillään konehuoneen aiheuttaman melun vuoksi – vuokratulojen menetyksillä kiinteistönomistaja olisi voinut korjata konehuoneen useammankin kerran.

Tiloja erottavilta rakenteilta vaadittava ääneneristyskyky määräytyy tiloissa tapahtuvan toiminnan perusteella. Vaadittavan ääneneristyksen saavuttamiseksi ei kuitenkaan riitä pelkästään oikeiden rakennetyyppien valinta ja niiden huolellinen toteutus. Jo varsin pieni rako tiloja erottavassa seinä- tai välipohjarakenteessa riittää heikentämään ääneneristystä paljon. Rakennuksissa ilmanvaihtokanavien halkaisijat ovat vähintään 100 mm, joten on selvää, että kanavilla on suuri vaikutus tilojen väliseen ääneneristykseen. Jos ääni siirtyy tilasta toiseen ilmanvaihtokanavan kautta, luottamukselliset keskustelut esimerkiksi toimistorakennuksen neuvotteluhuoneessa eivät ole mahdollisia, vaikka seinärakenteet olisivat erittäin hyvin ääntä eristäviä.

Asuinkerrostaloissa, joissa on yhteiskanavajärjestelmä eli sama ilmanvaihtokone palvelee useita huoneistoja, yleinen ongelma on naapurin puheen kuuluminen keittiön liesikuvun kautta. Tällöin on kyse siitä, että asuinhuoneistoja yhdistävässä ilmanvaihdon poistokanavan venttiilien äänenvaimennuskyky ei ole riittävä, jolloin ilmaääneneristysluku kanavan kautta jää heikommaksi kuin huoneistoja erottavien rakenteiden ääneneristyskyky. Ilmiö olisi helposti vältettävissä määrittelemällä ilmanvaihtosuunnitelmissa kanaviin äänenvaimennin huoneistojen välille. Ääneneristyksen parantaminen rakennuksen valmistuttuakaan ei ole teknisesti vaikeaa: kanavaan voidaan asentaa äänenvaimennin, mutta kustannukset tulevat suuriksi, sillä kalusteita joudutaan purkamaan.

Ääni on ihmisen kuuloalueella tapahtuvaa ilmassa etenevää värähtelyä. Fysikaalisesti ääni on ilmanpaineen vaihtelua staattiseen ilmanpaineeseen nähden. Ilmastointilaitosten ilmanvaihtokoneissa puhaltimet aiheuttavat ilmaan pyörteilyä ja paineen vaihteluita, jotka aistitaan äänenä. Siirtyessään kanavistossa ilma liikkuu erilaisten säätöpeltien, ilmamääräsäätimien ja päätelaitteiden läpi. Näillä kanavaosilla säädetään virtauksen painetta. Kun kanavan pinta-ala säätölaitteen kohdalla pienenee, paine ja virtausnopeus kasvaa. Samalla kanavistoon syntyy lisää ääntä. Mitä suurempia paineenmuutokset ja virtausnopeus kanavistossa ovat, sitä enemmän melua ilmanvaihdosta syntyy. Tilaan syntyvään melutasoon voidaan vaikuttaa puhallinten ja muiden kanavaosien valinnalla ja suunnittelemalla virtausnopeudet hitaiksi. Näillä keinoilla voidaan kuitenkin vaikuttaa äänenkehitykseen vain rajallisesti. Tärkein keino äänitasojen hallitsemiseksi on kanavien äänenvaimennuksen suunnittelu.

Ilmanvaihtokoneen ääni syntyy pääasiassa puhaltimesta. Moottori aiheuttaa myös käyntiääntä, mutta se on yleensä merkityksetön, sillä siirrettävät ilmamäärät ovat niin suuria, että virtauksesta aiheutuu paljon enemmän ääntä kuin moottorista. Puhaltimen ääni etenee koneen imu- ja paineaukkoon. Poistoilmakoneen ääni siirtyy siis poistoilmakanavan kautta huonetiloihin sekä jäteilmakanavan kautta rakennuksen ulkopuolelle. Tuloilmakoneen ääni siirtyy vastaavasti tuloilmakanavan kautta huonetiloihin ja raitisilmakanavan kautta ulos. Lisäksi kone kehittää ääntä ympäristöönsä vaippansa läpi. Puhallin synnyttää myös runkoääntä, joka voi siirtyä koneen jalkojen kautta rakennuksen runkoon ja ilmanvaihtokanavien peltiä pitkin huonetiloihin. Suurimpien laitevalmistajien ilmanvaihtokoneissa puhaltimilla on valmiiksi suunniteltu tärinäneristys ja tavallisesti koneen paineaukot on liitetty koneen vaippaan joustavilla liitosnauhoilla, jolloin koneiden runkoääneneristystä ei tarvitse erikseen suunnitella. Koneiden runkoääneneristyksestä on kuitenkin syytä koneita tilattaessa varmistua, sillä eri valmistajien suunnittelu- ja toimituskäytännöt ovat erilaiset.

Ilmanvaihtokoneiden lisäksi konehuoneissa on muita laitteita, jotka tuottavat runko- tai ilmaääntä tai molempia. Kun rakennuksessa on ilmastointi, ilmanvaihtokonehuoneeseen sijoitetaan kompressori ja vedenjäähdytyskone. Näiden toimitukseen ei yleensä kuulu valmiiksi suunniteltua tärinäneristystä. Kompressori on yleensä konehuoneen laitteista se, joka tuottaa eniten ääntä ympäristöönsä. Rakennuksen katolle tavallisesti sijoitettava lauhdutin tuottaa sekä ilma- että runkoääntä. Ilmastointilaitokseen liittyy usein myös pumppuja, taajuusmuuttajia ja muita laitteita. Nämä laitteet tuottavat ilmanvaihtokoneisiin, kompressoreihin ja vedenjäähdytyskoneisiin verrattuna vähän ilmaääntä, mutta pääsääntö niiden asennuksessa on, että mitään laitetta ei saa kiinnittää jäykästi rakennuksen runkoon, vaan niille on suunniteltava tärinäneristys.

6.2.2 Puhallinäänen siirtyminen kanavistossa

Ilmastointikoneiden valmistajat ilmoittavat puhallinten äänenkehityksen kanaviin äänitehotasoina L_w oktaavikaistoilla 63-8000 Hz. Tavallisesti äänitasot lasketaan kuitenkin vain oktaavikaistoilla 63-4000 Hz, sillä korkeimmalla taajuudella vaimennukset ovat lähes poikkeuksetta riittävän suuria. Suunnittelun aluksi on tarkistettava, onko äänitehotasot ilmoitettu A-painotettuina vai painottamattomina arvoina. Jälkimmäinen tapa on yleisempi. Tavallisesti koneissa on äänenvaimentimet, ja äänitehotaso on ilmoitettu tulo- tai poistoilmakanavissa koneiden äänenvaimenninten jälkeen. Yleensä myös koneissa olevien ilmapölykäsittelyosien, kuten suodattimien ja jäähdytys- ja lämmityspatterien, aikaansaama äänenvaimennus sisältyy valmistajien ilmoittamiin äänitehotasoihin.

Siirtyessään ilmastointikoneesta kanavistoon ääni jakautuu kanavien haaroihin samalla tavalla kuin ilma. Kun ilmapvirta etenee kanavan haaraan, se jakautuu osiin. Myös puhaltimelta tuleva ääniteho jakautuu haarassa olevien kanavien pinta-alojen suhteessa. Jos kanava haarautuu kahteen poikkileikkaukseltaan yhtä suureen osaan, äänitehotaso kummassakin haarassa on 3 dB alempi kuin ennen haaraa. Äänitehotason alenema D_q kanavan haarassa voidaan laskea kanavan pinta-alan S ja haaran pinta-alan S' perusteella

$$D_q = 10 \lg \left(\frac{S + S'}{S} \right) \quad (6.1)$$

Kaikkia vaimennusarvoja käsitellään tässä esityksessä positiivisina lukuina. Jos kanavisto suunnitellaan niin, että ilmapvirtauksen nopeus säilyy kanavan haarojen jälkeen muuttumattomana eli kanavan haarojen pinta-alat jakautuvat samassa suhteessa kuin kussakin tilassa tarvittava ilman tilavuusvirta, päädytään kaikissa haaroissa laskettujen äänitehon alenemien jälkeen tilanteeseen, jossa kuhunkin tilaan johtavan kanavan ääniteho on alentunut tilan ilmamäärän q [m^3/s] ja puhaltimen kokonaisilmamäärän Q [m^3/s] suhteessa

$$D_q = 10 \lg \left(\frac{Q}{q} \right) \quad (6.2)$$

Edetessään kanavistossa ääni vaimenee kanavan seinämien ja mutkien vaikutuksesta, samoin kanavan poikkipinta-alan muuttuessa suuremmasta pienempään. Vaimennuksen määrä kanavan pituusyksikköä kohti on kuitenkin niin vähäinen, että sillä ei ilmastointilaitoksen äänenhallinnan kannalta ole juuri merkitystä ja se jätetään käytännön suunnittelutyössä tavallisesti varmuusvaraksi. Vaimennusta voitaisiin saada aikaan käyttämällä vaimennettuja kanavia, joiden sisäpinnassa on ääntä absorboivaa materiaalia, lähinnä mineraalivillaa. Vaimennettujen kanavien liittäminen haaroissa ja erilaisten säätö- ja

päätelaitteiden yhteydessä on hankalaa, mistä seuraavien kustannuksien vuoksi vaimennettuja kanavia ei yleensä käytetä, vaan on edullisempaa käyttää äänenvaimentimia. Kanavien mutkat vaimentavat ääntä lähinnä korkeilla taajuuksilla. Mutkien vaimennuksella on merkitystä lähinnä silloin, kun mutka on suorakulmainen ja se on pinnoitettu sisäpuolelta absorptiomateriaalilla. Koska mutkat vaimentavat lisäksi lähinnä korkeita taajuuksia, joilla vaimennusta saadaan aikaan muissakin kanavaosissa, mutkien vaikutus äänitehon alenemiseen jätetään tavallisesti ottamatta huomioon. Kanavan poikkipinta-alan muutoksella on merkitystä vain, kun pienemmän kanavan pinta-ala on paljon pienempi kuin suuremman. Kanavistossa olevat kammiot, joissa kanavia haarautuu useisiin suuntiin, toimivat tehokkaina vaimentimina, kun niiden tilavuus on suuri ja niiden sisällä on absorboivaa materiaalia. [16]

Puhallinäänen vaimentaminen hallitaan pääasiassa kanavaan asennettavilla äänenvaimentimilla ja kanavien päätelaitteiden päätevaimennuksella. Äänenvaimenninten äänenvaimennuskyky mitataan laboratoriossa oktaavikaistoittain. Laboratoriossa olevaan kaiuntahuoneeseen on liitetty ilmanvaihtokanava, jonka toisessa päässä on äänilähde. Kaiuntahuoneessa mitataan äänilähteen tuottamat äänenpainetasot, minkä jälkeen kanavaan asennetaan äänenvaimennin ja mittaus toistetaan. Äänenvaimentimen äänenvaimennus D_{av} ilmoitetaan näiden äänitasojen erotuksena. Puhallinäänen vaimentamista suunniteltaessa äänenvaimenninten äänenvaimennusarvot saadaan vaimenninten valmistajilta.

Tavallisimmat vaimennintyyppit ovat lamellivaimennin ja sylinterivaimennin. Ne vaimentavat korkeita ääniä paremmin kuin matalia. Lamellivaimennin on suorakaidekanava, jonka sisällä on huokoisia absorptiolevyjä. Tavallisesti absorptiolevyt ovat mineraalivillaa, joka on päällystetty kuitujen irtoamisen estävällä pinnoitteella. Absorptiolevyjen välissä on ilmapälejä, joiden välissä ilma kulkee vaimentimen läpi. Lamellivaimennin vaimentaa ääntä sitä enemmän, mitä paksummat vaimennuslevyt ovat, mitä ohuemmat niiden välissä olevat raot ovat ja mitä pidempi vaimennin on. Tavallisesti lamellivaimentimet ovat 600-2400 mm pitkiä. Vaimentimen pituutta ei kannata kasvat-
taa yli 2400 mm, vaan tarvittaessa kanavaan asennetaan useampi vaimennin. Sylinterivaimentimia käytetään pyöreissä kanavissa. Sylinterivaimennin on pyöreä kanava, jonka vaipassa on absorboivaa materiaalia. Sylinterivaimentimen keskelle voidaan asentaa absorboivasta materiaalista tehty lieriö, joka parantaa vaimennusta korkeilla taajuuksilla.

Äänenvaimentimien valinnassa tulee aina ottaa huomioon äänenvaimennustarve kullakin oktaavikaistalla. Vaimentimen sijoituspaikka ja tila asettaa usein rajoituksia vaimenninten valinnalle: vaimennustarve tulisi siten ottaa huomioon varhaisessa suunnitteluvaiheessa. Lamellivaimentimia käytettäessä on otettava huomioon, että ääntä voi siirtyä kanavistoon vaimentimen laipan läpi. Tarvittaessa äänenvaimentimet on asennettava äänenvaimennettuun koteloon. Ilmanvaihtosuunnitelmissa on aina määriteltävä yksise-

litteisesti ja tarkasti äänenvaimenninten tyypit, jotta kanavistoon ei asennettaisi halpoja vaimentimia, jotka ovat liian lyhyitä ja joissa absorptiokerroksen paksuus on hyvin ohut. Tällaisten vaimentimien äänenvaimennuskyky on yleensä liian heikko.

Päätevaimennusta $D_{\text{pääte}}$ syntyy kanavan päättyessä huonetilaan, kun osa äänestä heijastuu kanavan päästä takaisin. Päätevaimennus riippuu kanavan halkaisijasta, äänen taajuudesta ja päätelaitteen sijainnista huonetilassa. Pelkkää tyhjää kanavan aukkoa ei käytetä kanavan päätteenä, vaan kanavaan asennetaan säleikkö, tulo- tai poistoilmaventtiili, hajotin, piennopeuslaite tai muu päätelaite. Niiden päätevaimennusarvot saadaan valmistajien esitteistä. Päätelaitteiden vaimennusarvot ovat tavallisesti suurimmillaan matalilla taajuuksilla ja heikommalla korkeammilla taajuuksilla. Päätelaitteiden vaimennusarvot määritetään laboratoriossa niin, että laite on vapaasti keskellä kaiutonta huonetta, jolloin seinistä ei tule juuri lainkaan heijastuksia eikä tilaan muodostu diffuusioäänikenttää. Kun päätelaite on seinällä tai katossa, vaimennusarvot ovat 3 dB huonompia, sillä päätelaitteesta tuleva ääni jakautuu tilassa tällöin puolta pienemmälle alalle. Kun laite sijaitsee kahden pinnan muodostamassa kulmassa, vaimennusarvot ovat 6 dB valmistajan ilmoittamia heikompia. Kolmen pinnan muodostamassa nurkassa valmistajan ilmoittamista arvoista vähennetään 9 dB. Vain nollaa suuremmat vaimennusarvot otetaan huomioon. [16]

Siirryttyään päätelaitteen kautta huonetilaan ääni vaimenee tilassa sen huonevaimennuksesta riippuen. Huonevaimennus D_A lasketaan oktaavikaistoittain tilan absorptioalasta A , joka saadaan tilassa olevien materiaalien pinta-alojen S ja absorptiokerrointen α perusteella. Huoneeseen syntyvä äänitaso L_A lasketaan seuraavasti (taulukko 6.3):

- selvitetään puhaltimen äänitehotasot L_w oktaavikaistoittain valmistajan esitteestä
- vähennetään puhaltimen äänitehotasoista ilmapvirran jakautumisesta aiheutuva vaimennus D_q , äänenvaimenninten vaimennusarvot $D_{\text{äv}}$ ja päätevaimennus $D_{\text{pääte}}$
- lasketaan huonevaimennus D_A ja vähennetään se äänitehotasoista
- vähennetään A-painotus
- lasketaan oktaavikaistaisten äänitasojen energieettinen summa eli A-painotettu äänitaso

Taulukko 6.3. Esimerkki poistoilmakoneen puhaltimen äänitasolaskelmasta. Puhaltimen kokonaisilmamäärä on 6000 l/s. Huonetiila on neuvotteluhuone, jonka pinta-ala on 20 m². Huoneen ilmamäärä on 50 l/s. Huoneeseen johtaa pyöreä kanava, jonka halkaisija on 125 mm. Tilan katossa on 14 m² mineraalivillaa, jonka paksuus on 40 mm. Puhaltimen neuvotteluhuoneeseen tuottama äänitaso alittaa keskiäänitason ohjearvon 33 dB. Ilman äänenvaimenninta keskiäänitaso neuvotteluhuoneessa olisi 48 dB.

Oktaavikaistan keskitajuus [Hz]							Lähtöarvo (dB)
63	125	250	500	1000	2000	4000	
86	88	84	79	74	68	64	Puhaltimen ääniteho L_w (dB)
-21	-21	-21	-21	-21	-21	-21	Vaimennus ilmavirran jakautumisesta D_q
-3	-7	-10	-17	-41	-39	-25	Äänenvaimennin D_{av}
-20	-16	-12	-13	-12	-9	-6	Päätelaitteen vaimennus $D_{pääte}$
3	3	3	3	3	3	3	Päätelaite seinällä
-1	-4	-5	-6	-7	-7	-7	Huonevaimennus D_A
-26	-16	-9	-3	0	1	1	A-painotus
18	27	30	22	-4	-4	9	Äänitaso huoneessa $L_A = 32$ dB

6.2.3 Ilmavirtauksen synnyttämä ääni

Ilman virtauksesta kanavassa ja siinä olevien säätö- ja päätelaitteiden läpi syntyy ääntä, joka riippuu virtausnopeudesta ja paineen muutoksista. Oikein suunnitellussa ilmastointilaitoksessa virtausnopeudet kanavissa ovat niin pienet, että virtauksen kanavissa synnyttämä ääni on merkityksetön. Sitä vastoin pääte- ja säätölaitteissa, joissa muutetaan ilmavirran painetta, virtausnopeus kasvaa ja laitteet synnyttävät ääntä. Säätö- ja päätelaitteiden kehittämä ääniteho on aina otettava huomioon puhallinäänen lisäksi määrittäessä huonetiilaan syntyvää äänitasa. [16]

Ilmanvaihtokoneen puhallin kehittää kanavistoon tietyn paineen. Kanavissa ja sen mutkissa, äänenvaimentimissa, säätölaitteissa ja päätelaitteissa syntyy painehäviötä Δp : kitka, poikkipinnan muutokset kuristettaessa ilmavirtausta ja muut tekijät pyrkivät vastustamaan ilmavirran kulkua kanavassa. Jos ilmanvaihtokone syöttää kahta yhtä pitkää ja täysin samanlaista kanavan haaraa pitkin saman ilmamäärän kahteen huoneeseen samanlaisten päätelaitteiden kautta, painehäviö kanaviston kummassakin haarassa on yhtä suuri ja kanavisto on tasapainossa. Jos kanaviston toinen haara onkin merkittävästi pidempi kuin toinen tai sen päässä on erilainen päätelaite, joka tuottaa samalla ilmamäärällä suuremman painehäviön, vastaava painehäviö on kanaviston tasapainottamiseksi saatava aikaan myös toiseen kanavan haaraan, sillä muuten haaroihin ei saada haluttua ilmamäärää: ilmaa virtaa enemmän kanavaan, jossa painehäviö on pienempi. Tarvittava painehäviö voidaan saada aikaan seuraavasti:

- säädetään päätelaitetta niin, että se tuottaa suuremman painehäviön. Seurauksena on virtausnopeuden kasvu päätelaitteessa, mistä seuraa suurempi äänenkehitys. Kanaviston painehäviötä on mahdollista säätää päätelaitteilla vain rajallisesti, sillä päätelaitteiden säätövara on rajattu, koska ne sijaitsevat haarakanavan päässä, niiden tuottamaa äänitehoa ei ole mahdollista vaimentaa äänenvaimentimilla.
- asennetaan toiseen haaraan säätöpelti tai muu säätölaite, jonka säätöasennolla saadaan aikaan tarvittava painehäviö. Säätölaitteessa virtausnopeus kasvaa, mistä syntyy kanavistoon lisää äänitehoa. Useimmiten säätölaitteen jälkeen on asennettava äänenvaimennin säätölaitteen aiheuttaman äänitehon vaimentamiseksi. Huonetilojen äänitasoja määritettäessä on huomattava, että säätölaitteen tuottama ääniteho etenee kanavassa kumpaankin suuntaan.

Säätölaitteiden äänitehotasot saadaan valmistajien esitteistä. Ne riippuvat tarvittavasta painehäviöstä ja virtausnopeudesta. Oletetaan, että taulukon 6.3 esimerkissä neuvotteluhuoneeseen johtavan haarakanavan tasapainottamiseksi haaraan tarvitaan 150 Pa painehäviö, jonka aikaansaamiseksi haaraan asennetaan säätöpelti. Koska kanavassa on jo äänenvaimennin, säätöpelti asennetaan kanavaan ennen sitä. Säätöpellin tuottama äänitehotaso vaimenee äänenvaimentimessa, päätelaitteessa ja huonetilassa. Sitä voidaan tarkastella erillään puhallinäänestä (taulukko 6.4):

- selvitetään säätölaitteen äänitehotasot L_w oktaavikaistoittain valmistajan esitteestä virtausnopeuden ja painehäviön mukaan
- vähennetään säätölaitteen äänitehotasoista ilmavirran jakautumisesta aiheutuva vaimennus D_q , äänenvaimenninten vaimennusarvot $D_{äv}$ ja päätevaimennus $D_{pääte}$
- lisätään päätelaitteen paikasta aiheutuva korjaus
- vähennetään huonevaimennus
- vähennetään A-painotus, ellei säätölaitteen valmistaja ole ilmoittanut äänitehotasojen A-painotettuina
- lasketaan oktaavikaistaisten äänitasojen energieettinen summa eli A-painotettu äänitaso

Taulukko 6.4. Taulukossa 6.3 esitettyyn haarakanavaan lisätään säätöpelti, jonka painehäviö on 150 Pa. Ilman virtausnopeus kanavassa on 4 m/s. Äänenvaimennin on tarpeellinen, sillä ilman sitä säätöpelti aiheuttaisi neuvotteluhuoneeseen keskiäänitason 41 dB.

Oktaavikaistan keskitajuus [Hz]							Lähtöarvo (dB)
63	125	250	500	1000	2000	4000	
64	61	59	55	49	46	46	Säätöpellin äänitehotaso L_w (dB)
-3	-7	-10	-17	-41	-39	-25	Äänenvaimennin D_{av}
-20	-16	-12	-13	-12	-9	-6	Päätevaimennus $D_{pääte}$
3	3	3	3	3	3	3	Päätelaite seinällä
-1	-4	-5	-6	-7	-7	-7	Huonevaimennus D_A
-26	-16	-9	-3	0	1	1	A-painotus
17	21	26	19	-8	-5	12	Äänitaso huoneessa $L_A = 28$ dB

Päätelaitteiden äänenkehitys riippuu säätöasennosta ja ilmavirrasta. Päätelaitteiden äänenkehitys ilmoitetaan kahdella tavalla. Yksinkertaisempi tapa on ilmoittaa laitteen tuottama A-painotettu äänitaso $L_{A,10}$ diffuusissa äänikentässä tilassa, jonka absorptioala on 10 m^2 ja huonevaimennus siten 4 dB. Päätelaitteen aiheuttama äänitaso määritetään oktaavikaistoittain seuraavasti:

- selvitetään päätelaitteen äänitehotaso L_w oktaavikaistoittain valmistajan esitteestä päätelaitteen painehäviön ja virtausnopeuden mukaan
- jos valmistaja ilmoittaa äänitehotasot normalisoituina 10 m^2 absorptioalaan, äänitehotasoihin lisätään 4 dB
- vähennetään tilan todellinen huonevaimennus
- oktaavikaistaisista äänenpainetasoista vähennetään A-painotus, ellei valmistaja ole ilmoittanut päätelaitteiden äänitehotasoja A-painotettuina
- lasketaan oktaavikaistaisien äänitasojen energettinen summa eli A-painotettu äänitaso

Esimerkin neuvotteluhuoneessa on tyypillinen pienten ilmavirtojen poistoventtiiliksi tarkoitettu päätelaite, jonka äänitasoksi $L_{A,10}$ valmistaja ilmoittaa venttiilin ollessa säädettynä täysin avoimeksi 50 l/s ilmavirralla 30 dB. Tähän arvoon on lisättävä ilmoitettuun arvoon sisältyvä 4 dB huonevaimennus, jolloin päädytään äänitehotason arvoon 34 dB. Lopuksi vähennetään tarkasteltavan tilan huonevaimennus. Huonevaimennuksena voidaan käyttää oktaavikaistan 500 Hz arvoa, joka on 6 dB. Päätelaitteesta syntyy siten huoneeseen keskiäänitasoksi $L_{A,eq}$ 28 dB. Päätelaitteiden äänenkehitys voidaan ilmoittaa myös äänitehotasoina oktaavikaistoittain. Taulukossa 6.5 on laskettu neuvotteluhuoneeseen syntyvä äänitaso oktaavikaistoittain ilmoitetuista päätelaitteen äänitehotasoista. Koska päätelaitteesta syntyvä äänitaso on alhainen, osa haarakanavassa tarvittavasta painehäviöstä olisi voitu saada aikaan myös säätämällä päätelaitetta. Säätövaraa olisi kuitenkin vain noin 70 Pa, joten säätöpelti olisi asennettava kanavaan joka tapauksessa.

Poistoilmaventtiilin painehäviön säätäminen 70 Pa korkeammaksi merkitsisi 5 dB lisäystä venttiilin äänitehotasoihin.

Painehäviölaskelmia ei nykyisin yleensä laadita, vaikka ilmastonin säätö perustuu juuri niihin. Tämä johtuu siitä, että viranomaismääräyksissä ei vaadita ilmastointilaitoksen painehäviölaskelmien laatimista. Lisäksi laskelmat ovat työläitä laatia: painehäviöt on laskettava kanaviston jokaiseen haaraan erikseen. Urakka-asiakirjoihin ilmastointisuunnittelija määrittelee ilmastonin esimerkkikoneet ja muut laitteet, mutta tarjouksessa urakoitsija useimmiten esittää toisenlaisia koneita, joiden ilmastointiarvot vastaavat esimerkkikoneita. Äänitekniset arvot tällöin useimmiten muuttuvat. Näin ollen vastuu äänitasojen saavuttamisesta onkin siirtynyt urakoitsijalle. Koska näin on, urakka-asiakirjoihin tulisi aina sisällyttää vaatimus siitä, että urakoitsija vastaa äänitasojen saavuttamisesta ja on velvollinen kustannuksellaan tarkistuttamaan ilmastointilaitoksen ääniteknisen toiminnan, toisin sanoen puhallinten, säätölaitteiden ja päätelaitteiden jokaiseen tilaan tuottamat äänitasot, äänenvaimenninten tarpeen sekä ääneneristyksen ilmanvaihtokanavien kautta. Jos äänitasot valmiissa rakennuksessa ylittyvät, virheiden korjaaminen ja äänenvaimenninten lisääminen kanavistoon voi olla jälkeinpäin vaikeaa, joskus mahdotontakin. Joka tapauksessa se on kallista. Lähtökohtana ilmastointilaitoksen äänitekniselle suunnittelulle pitäisi kuitenkin olla se, että rakennuksen käyttäjä sa muiden sisäilmasto-olosuhteiden lisäksi myös haluamansa ääniolosuhteet. Varmimmin ne saavutetaan, kun äänenhallinta on lähtökohtana ilmastointilaitoksen suunnittelun ja toteutuksen kaikissa vaiheissa.

Taulukko 6.5. Taulukoissa 6.3 ja 6.4 esitetyn haarakanavaan päässä on päätelaitteena tyypillinen pienten ilma-
virtojen poistoventtiili.

Oktaavikaistan keskitaajuus [Hz]							Lähtöarvo (dB)
63	125	250	500	1000	2000	4000	
22	27	28	29	26	30	22	Päätelaitteen äänitehotaso L_w (dB)
-1	-4	-5	-6	-7	-7	-7	Huonevaimennus D_A
-26	-16	-9	-3	0	1	1	A-painotus
-5	7	14	20	19	24	16	Äänitaso huoneessa $L_A = 27$ dB

6.2.4 Huonetilan äänitason muodostuminen

Edellä on tarkasteltu erikseen ilmastointilaitoksen poisto- tuloilmakoneiden puhallinten, säätölaitteiden ja päätelaitteiden huonetilaan synnyttämiä äänitasoja. Huonetilan äänitaso muodostuu kaikista näistä ja lisäksi runkoäänen aiheuttamasta äänitasosta, joten niiden äänilähteiden yhdessä tuottamia äänitasoja vasta voidaan verrata sallittuihin äänitasoihin. Yhteenlasku tehdään energieettisenä summana joko oktaavikaistoittain tai kus-

takin yksilukuisesta A-painotetusta äänitasosta erikseen. Usean samanaikaisesti toimivan äänilähteen tilaan muodostama äänitaso $L_{A,tot}$ voidaan laskea, kun tiedetään äänilähteiden tilaan yksinään tuottamat äänitasot $L_{A,i}$:

$$L_{A,tot} = 10 \lg \left(10^{L_{A,1}/10} + 10^{L_{A,2}/10} + \dots + 10^{L_{A,n}/10} \right) = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{L_{A,i}/10} \quad (6.3)$$

Jos eri äänilähteiden yhdessä tuottama äänitaso ylittää sallitun arvon, on ensin pyrittävä vaimentamaan voimakkainta äänilähdettä. Taulukoiden 6.3-6.5 esimerkissä se on puhallinääni, jonka vaimentamiseen pitäisi käyttää matalia taajuuksia tehokkaammin vaimentavaa äänen vaimenninta (taulukko 6.6).

Taulukko 6.6. Taulukoissa 6.3-6.5 esitettyjen äänilähteiden neuvottelutilaan yhdessä tuottama äänitaso. Esimerkin tapauksessa puhallinääntä tulee vain poistokanavasta, mutta tavallisesti tilassa on sekä poisto- että tuloilmakanava. Äänitaso ylittää neuvotteluhuoneessa sallitun arvon 33 dB.

Oktaavikaistan keskitäajuus [Hz]							Äänitaso neuvottelutilassa (dB)
63	125	250	500	1000	2000	4000	
18	27	30	22	-4	-4	9	Puhaltimen $L_A = 32$ dB
17	21	26	19	-8	-5	12	Päätelaitteen $L_A = 28$ dB
-5	7	14	20	19	24	16	Päätelaitteen $L_A = 27$ dB
21	28	32	25	19	24	18	Äänitaso yhteensä 34 dB

6.2.5 Ilmanvaihtolaitteiden äänenkehitys ympäristöön

Ilmastointikone kehittää ääntä myös ympäristöönsä. Äänenhallinnan kannalta hyvin suunnitellun ilmastointikoneen sisällä tulisi olla ääntä vaimentavaa materiaalia. Koneen vaipan rakenteen tulisi olla ääntä eristävä. Tavallisesti vaipan rakenne on pelti – mineraalivilla – pelti. Tällainen rakenne eristää ääntä, mutta jos mineraalivilla korvataan polyuretaanilla, solupolystyreenillä tai muulla jäykällä lämmöneristysmateriaalilla, koneen vaipan äänen eristyskyky menetetään. Koneiden valmistajat ilmoittavat myös koneiden äänenkehityksen ympäristöönsä yleensä äänitehotasoina oktaavikaistoittain. Joissakin tapauksissa valmistajat voivat ilmoittaa ääniarvot myös äänenpainetasoina 10 m^2 huoneabsorptioon normalisoituina. Konehuoneeseen syntyviä äänenpainetasoja määritettäessä on aluksi varmistettava siitä, miten valmistaja on ilmoittanut koneen ääniarvot.

Ilmanvaihtokonehuoneeseen pyritään äänitasojen alentamiseksi sijoittamaan mahdollisimman paljon ääntä vaimentavaa materiaalia. Yleensä vähintään ilmanvaihtokonehuoneen koko katto ja mahdollisimman suuri osa seinistä verhoillaan absorptiomateriaalilla. Yleisin ilmanvaihtokonehuoneen absorptioratkaisu on 50 mm paksu mineraalivillaker-

ros, joka on päällystetty rei'itetyllä peltilevyllä. Huoneen absorptioalan perusteella voidaan laskea huonevaimennukset oktaavikaistoittain ja konehuoneeseen syntyvät äänenpainetasot.

Jos konehuone sijaitsee työ-, asuin- tai muun oleskelutilan päällä, äänen siirtyminen tiloja erottavien rakenteiden kautta korottaa tilan äänitasoa. Se on otettava huomioon puhallinäänen sekä säätö- ja päätelaitteiden aiheuttaman äänen lisäksi verrattaessa tilan äänitasoa sallittuihin arvoihin.

Konehuoneesta muihin tiloihin siirtyvä äänenpainetaso riippuu konehuoneen rakenteiden ääneneristävyydestä. Rakennusten katolla sijaitsevien konehuoneiden seinä- ja kattorakenteet ovat tavallisesti kevytrakenteisia eikä niiden ääneneristyskyky ole kovinkaan suuri. Näin ollen äänen siirtyminen konehuoneesta ulkoilmaan on myös otettava huomioon. Konehuoneiden lattiarakenteet ovat tavallisesti vähintään 265 mm paksuja ontelolaatastoja tai vähintään 200 mm paksuja paikalla valettuja betonilaattoja. Niiden ääneneristävyyden riittävyys riippuu alla olevasta tilasta. Jos ääneneristävyys ei ole riittävä, ääneneristystä on parannettava laatan alapuolella. Konehuoneeseen ei voida tehdä kelluvaa lattiaa, sillä koneissa olevan värinäneristysten toiminta perustuu siihen, että koneiden puhaltimet ovat yhden vapausasteen värähtelijöitä. Koneen sijoittaminen kelluvan lattian päälle johtaisi järjestelmän muuttumiseen kahden vapausasteen värähtelijäksi, jolloin koneissa valmiina olevat värinäneristimet eivät enää toimisi suunnitellusti.

Ilmaääneneristävyyden kaavalla saadaan lasketuksi lasketuksi äänenpainetaso L_2 vastaanottohuoneessa, kun tiedetään erottavan rakenteen ilmaääneneristävyys ja lähetys- huoneen äänenpainetaso L_1 :

$$L_2 = L_1 - R + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (6.4)$$

Jos ilmanvaihtokonehuoneessa on useita ilmastointikoneita ja muita laitteita, niiden ympäristöönsä aiheuttamista äänitehoista lasketaan ensin energettinen summa. Erityisen äänekkäitä laitteita ilmanvaihtokonehuoneissa ovat vedenjäähdyttimet ja kompressorit. Joissakin tapauksissa niille on järjestettävä konehuoneeseen erillinen ääneneristetty tila. Taulukossa 6.7 on laskettu taulukoissa 6.3-6.6 käsitellyn neuvotteluhuoneen päällä olevan ilmanvaihtokoneen ympäristöönsä kehittämän äänen siirtyminen neuvotteluhuoneeseen.

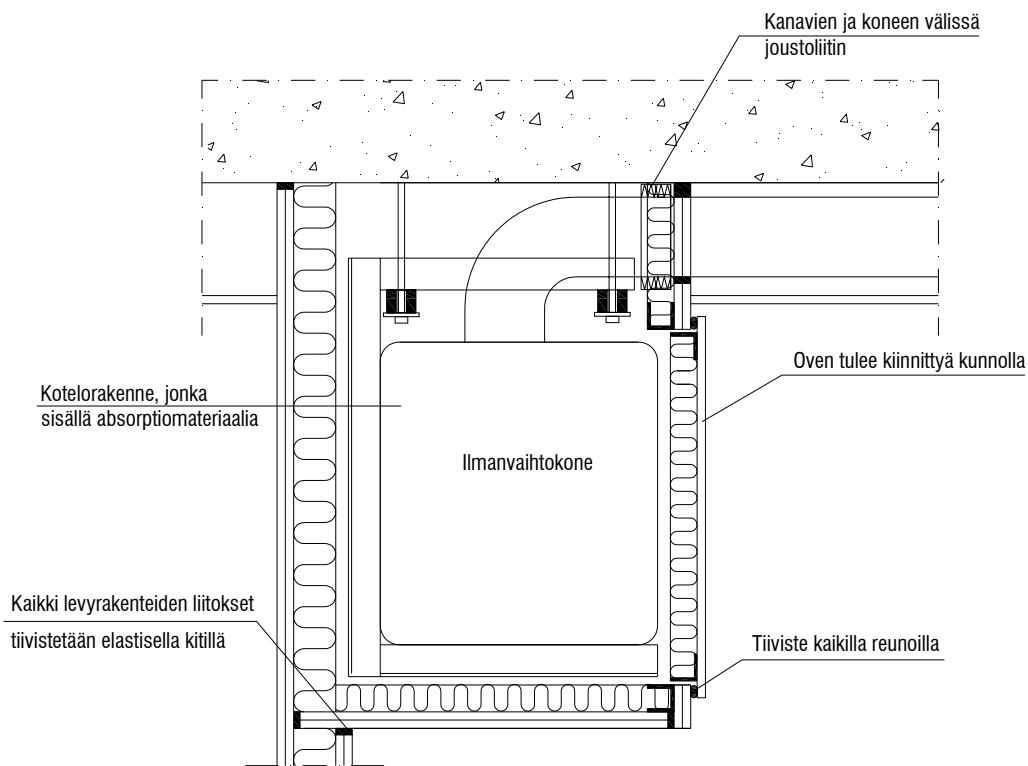
Taulukko 6.7. Taulukoiden 6.3-6.6 esimerkin neuvotteluhuoneen päällä on ilmanvaihtokonehuone. Tiloja erottava pinta-ala on 20 m². Konehuoneen katossa on 20 m² mineraalivillaa, jonka paksuus on 50 mm. Villan päällä on lisäksi rei'itetty peltilevy. Konehuoneen lattiarakenteena on 265 mm paksu ontelolaatasto (massa 380 kg/m²).

Oktaavikaistan keskitajuus [Hz]							Lähtöarvo (dB)
63	125	250	500	1000	2000	4000	
82	84	80	75	71	67	60	Koneen äänitehotaso ympäristöönsä L_w (dB)
0,11	0,22	0,69	1	1	1	1	Absorptiomateriaalin absorptiokertoimet α
2,2	4,4	13,8	20	20	20	20	Konehuoneen absorptioala A (m ²)
-3	1	5	7	7	7	7	Konehuoneen huonevaimennus (dB)
85	83	75	68	64	60	53	Konehuoneen äänenpainetasot L_1
36	48	50	53	59	64	70	Ontelolaataston ääneneristävyys R (dB)
6	10	14	18	19	18	19	Neuvotteluhuoneen absorptioala A (m ²)
54	42	27	16	5	-4	-6	Neuvotteluhuoneen äänenpainetasot L_2
-26	-16	-9	-3	0	1	1	A-painotus
28	26	18	13	5	-3	-5	Äänitaso huoneessa $L_A = 30$ dB

Aiemmin asuinhuoneistojen ilmanvaihto järjestettiin yleensä niin, että vain poistoilmanvaihto oli koneellinen. Tuloilma saatiin ikkunoiden karmeihin, tilkerakoihin tai seinille sijoitettavien korvausilmaventtiileiden kautta. Kiristyneiden lämmöneristysmääräysten ja lämmöntalteenoton järjestämistä koskevien vaatimusten johdosta korvausilmaventtiilien käyttö on loppunut uudisrakentamisessa käytännössä kokonaan. Uusiin asuinkeuhkaloihin on tehty jonkin verran yhteiskanavajärjestelmiä, mutta vallitsevaksi järjestelmäksi näyttää tulevan huoneistokohtainen lämmöntalteenottokone. Vaikka koneet ovat pieniä ja palvelevat vain yhtä huoneistoa, niitä koskevat samat määräykset kuin yhteiskanavajärjestelmän koko taloa palvelevia koneita – vaatehuoneeseen, kodinhoituhuoneeseen, WC:hen tai pesuhuoneeseen tavallisesti sijoitettu lämmöntalteenottokone on kuin ilmanvaihtokonehuone pienoiskoossa. Lämmöntalteenottokoneet eivät saa tuottaa huoneistoon liikaa ääntä.

Lämmöntalteenottokone kehittää ääntä samalla tavalla kuin ilmastointilaitos yleensäkin: puhallinaani siirtyy kanavia pitkin päätelaitteiden kautta huoneistoon, päätelaitteet ja mahdolliset säätölaitteet aiheuttavat virtausääntä ja laite säteilee ääntä ympäristöönsä vaippansa kautta. Nämä yhdessä eivät saa ylittää asuinhuoneissa ja muissa huoneiston tiloissa sallittavia äänitasoja. Koneiden valmistajat ilmoittavat kanavien äänitehotasot, joiden perusteella voidaan laskea puhallinaänen aiheuttama äänitaso huoneissa. Useim-

missä tapauksissa puhallinääni edellyttää 600-1200 mm pitkiä äänenvaimentimia kanavistoon. Koneen ympäristöönsä aiheuttama äänitaso ilmoitetaan joko äänitehotasoina oktaavikaistoittain tai A-painotettuna äänitasona. Jälkimmäinen on tavallisesti normalisoitu vastaamaan huonetilaa, jonka absorptioala on 10 m^2 ja huonevaimennus 4 dB. Nämä arvot vastaavat normaalisti kalustettua asuinhuonetta. Kodinhoitohuoneessa, pesuhuoneessa tai WC:ssä ei ole vastaavaa absorptioalaa, jolloin äänitaso näissä tiloissa voi olla jopa 10 dB valmistajan ilmoittamaa arvoa korkeampi. Koneen ympäristöönsä tuottamasta äänitasosta riippuen kone voidaan asentaa huoneistoon sellaisenaan tai se on koteloitava. Kotelon vaikutus lasketaan taulukossa 6.7 esitetyllä tavalla. Kotelon sisäpuoli verhoillaan yleensä 50 mm paksulla mineraalivillalla, mutta koska kotelon tilavuus on pieni, matalilla taajuuksilla ei synny huonevaimennusta, vaan pienen absorptioalan vuoksi ääni vahvistuu kotelon sisällä (kuva 6.1).



Kuva 6.1. Huoneistokohtaisen lämmöntalteenottokoneen kotelointi.

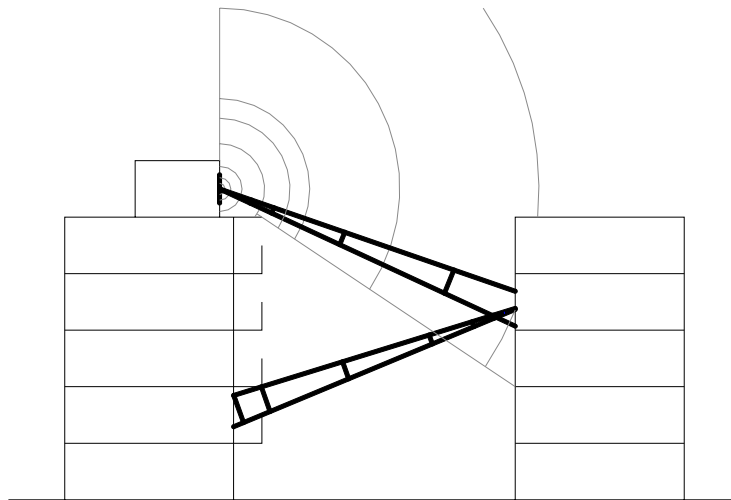
6.2.6 Ilmanvaihtolaitteiden äänenkehitys ulos

Rakennuksen katolla olevat ilmanvaihtokonehuoneet levittävät ääntä ympäristöönsä ulos. Vaativammissa kohteissa äänen leviäminen on selvitettävä tarkemmilla menetelmillä, mutta tarkasteltavan pisteen sijaitessa kohtisuoraan konehuoneen seinää vasten etäisyydellä r [m] äänenpainetasot L_2 tarkasteltavassa pisteessä saadaan lasketuksi oktaavikaistoittain konehuoneen seinärakenteen ilmaääneneristävyyden R ja pinta-alan S [m^2] ja konehuoneessa vallitsevien äänenpainetasojen L_1 perusteella seuraavasti [60]:

$$L_2 = L_1 - R + 10 \lg S - 20 \lg r - 14 \quad (6.5)$$

Ulkona sijaitsevien laitteiden, kuten lauhduttimien tai huippuimurien, äänenkehitys ympäristöönsä ilmoitetaan usein A-painotettuna äänitasona, joka on mitattu tietyllä etäisyydellä laitteesta, joka on ollut sijoitettuna heijastavalle pinnalle. Äänitaso jollakin muulla etäisyydellä saadaan lasketuksi luvussa 2 esitetyillä menetelmillä.

Edetessään ulkona ääni kohtaa pintoja, joista osa on pehmeitä ja osa kovia. Kovan pinnan kohdatessaan ääni heijastuu pinnasta käytännössä lähes vaimenematta samalla tavalla kuin valo: lähtökulma on yhtä suuri kuin tulokulma. Tällaisia kovia pintoja ovat rakennetussa ympäristössä rakennusten julkisivut ja katot sekä päällystetyt tiet, betonirakenteet ja vesialueet. Tarkasteltaessa äänen etenemistä rakennetussa ympäristössä äänen heijastuminen on aina otettava huomioon (kuva 6.2). Esimerkiksi kadun varrella on mahdollista, että rakennuksen katolla tai julkisivulla olevan LVIS-laitteen aiheuttama ääni heijastuu kadun toisella puolella olevan rakennuksen julkisivusta takaisin. Samoin talojen välissä kulkevan kadun liikennemelu kulkee rakennusten julkisivuille suoraan, mutta lisäksi se voi heijastua kadun pinnasta ja rakennusten julkisivuista. Laskettaessa äänenpainetasoa etäisyytenä r on tällöin heijastuneen äänen kulkema matka.



Kuva 6.2. Rakennetussa ympäristössä ääni heijastuu rakennusten julkisivuista.

Jos tarkastelupiste on lähellä rakennuksen ulkoseinää tai muuta heijastavaa pintaa, pinnasta tuleva heijastus korottaa äänenpainetasoa 3 dB, kun pinnan absorptiokertoimet oletetaan nollassa. Useimpien ulkoseinärakenteiden osalta tämä oletus pitää varsin hyvin paikkansa. Usein heijastusreitit ovat kuitenkin monimutkaisempia.

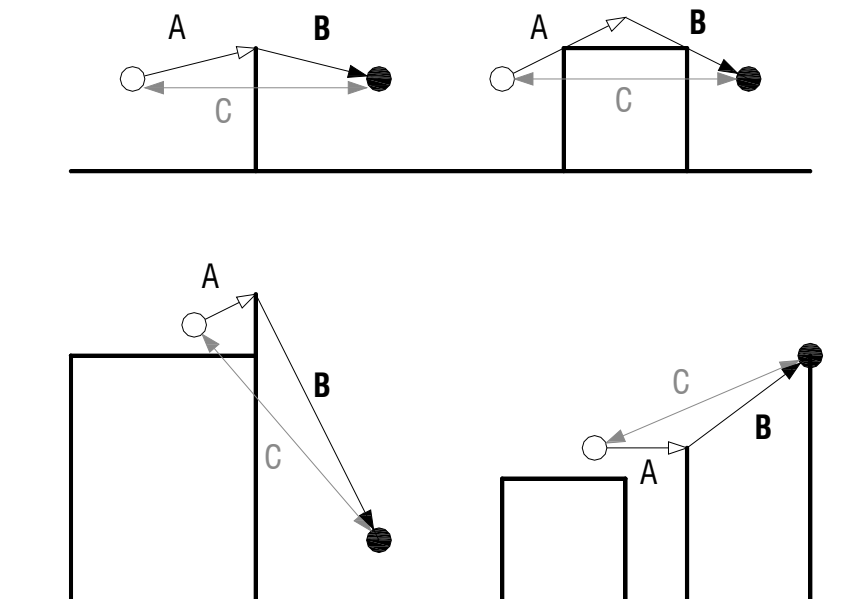
Meluesteet ovat rakenteita, joiden tehtävänä on estää äänen eteneminen suoraan suojattavaan kohteeseen. Meluesteen korkeuden vaikutusta äänenpainetason L_p alenemiseen

voidaan tutkia, kun tiedetään etäisyys melulähteestä meluesteen harjalle A , etäisyys esteen harjalta suojattavaan kohteeseen B sekä etäisyys C suoraan melulähteestä suojattavaan kohteeseen (kuva 6.3). Meluesteen harjalla tapahtuu äänen diffraktiota. Diffraktoituneen äänen kulkureitin pituus melulähteestä suojattavaan kohteeseen on $A + B$. Ero diffraktioreitin ja suoran reitin välillä on $z = A + B - C$. Sen perusteella voidaan laskea äänenpainetaso alenema eli estevaimennus D_{este} :

$$D_{\text{este}} = 10 \lg(3 + 0,06zf) \quad (6.6)$$

Kaavan antamista arvoista vain positiiviset otetaan huomioon. Äänenpainetaso alenema D merkitään nolllaksi silloin, kun kaava johtaa negatiiviseen arvoon. Este toimii tehokkaimmin silloin, kun se on joko mahdollisimman lähellä melulähdettä tai mahdollisimman lähellä suojattavaa kohdetta. Jälkimmäisessä tapauksessa alue, joka melulta voidaan suojata, on huomattavasti pienempi kuin tehtäessä este melulähteen läheisyyteen. Esteen ollessa kaukana sekä lähteestä että kohteesta estevaimennus jää aina vähäiseksi.

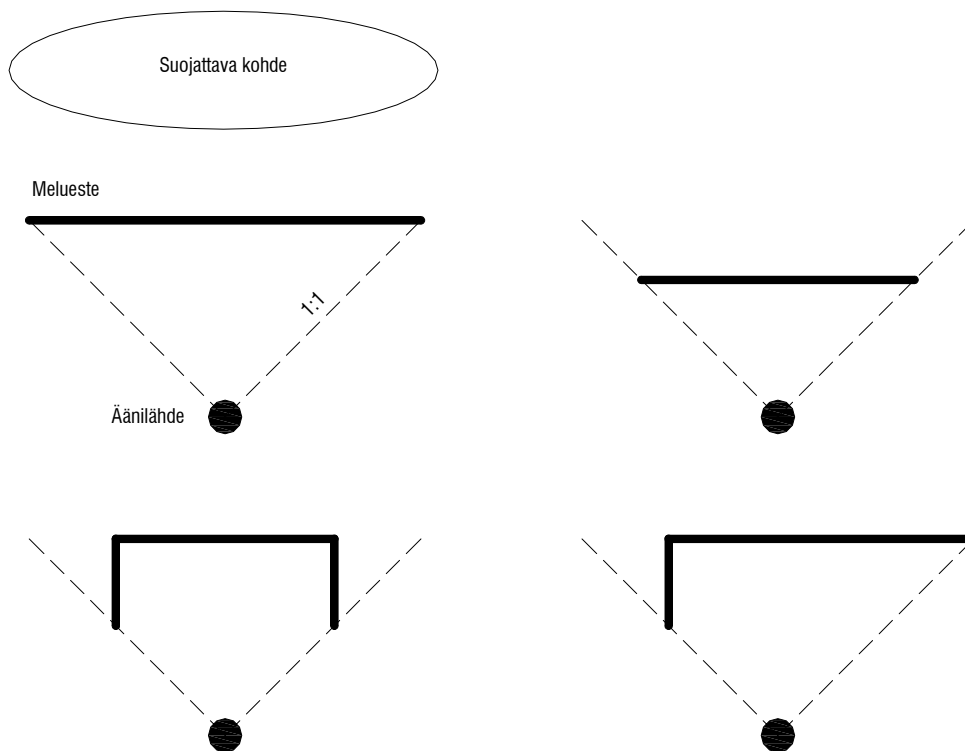
Meluesteen tulee olla riittävän leveä, sillä kapealla esteellä ei käytännössä ole vaikutusta äänen leviämiseen. Yksinkertainen periaate meluesteen pituuden määrittämiseksi on se, että melueste peittää suojattavan kohteen suuntaan vähintään 90° näkökulman (kuva 6.4) melulähteen suunnasta katsottuna. Este on sitä tehokkaampi mitä suuremman näkökulman se peittää. Estettä sijoitettaessa on otettava huomioon se, että melulähteen takana ei voi olla pystysuoraa heijastavaa pintaa, koska ääni voi tällöin kiertää esteen heijastumalla. Tarkempia meluesteiden mitoitusmenetelmiä on esitetty alan kirjallisuudessa.



Kuva 6.3. Meluesteen vaikutusta äänenpainetasoihin voidaan arvioida, kun tunnetaan etäisyys A äänilähteestä esteen harjalle, etäisyys B esteen harjalta suojattavaan kohteeseen sekä etäisyys C suoraan äänilähteestä suojattavaan kohteeseen.

Meluesteen tulee olla rakenteeltaan ääntä eristävä. Jotta esteellä olisi merkitystä, sen ilmaääneneristyskyvyn tulee olla suurempi kuin sen korkeudella tavoiteltava äänenpainetasen alenema D_{este} . Meluste voidaan tehdä puusta, betonista, tiilestä, harkoista, metallikaseteista ja erilaisista rakennuslevyistä. Toimiakseen tehokkaasti meluesteen tulee olla rakenteeltaan ääntä eristävä eli tiivis. Sen tulee ulottua alustaansa saakka yhtenäisenä rakenteena. Esimerkiksi puu- tai metallisäleikkö ei toimi meluaitana. Meluste heijastaa ääntä itsestään pois päin, mikä voi vaikuttaa äänitasoon suojattavaan kohteeseen nähden vastakkaisessa suunnassa. Heijastuvaa ääntä voidaan vähentää pinnoittamalla meluesteen pinta ääntä absorboivalla materiaalilla.

Äänen etenemiseen ulkona vaikuttavat myös tuulennopeuden ja lämpötilan muutokset ilmakerroksissa: ääni voi kaartua ylös tai alas, jolloin ääni ikään kuin ohittaa meluesteen. Ilmiöllä on merkitystä tarkasteltaessa melun leviämistä suurilla etäisyyksillä, esimerkiksi laadittaessa melukarttaa asemakaavoitusta varten liikennemelualueella tai teollisuuden ympäristömeluselvityksiä laadittaessa. Rakennusten LVIS-laitteiden melun leviämisen kannalta näiden ilmiöiden vaikutus on vähäinen, sillä tarkasteltavat etäisyydet ovat yleensä lyhyitä eikä kaartumista ennätä tapahtua merkittävästi.



Kuva 6.4. Meluesteen pituuden tulee yleensä olla niin suuri, että se peittää 90° näkökulman katsottaessa melulähteen suunnasta suojattavaa kohdetta. Esteen vaikutus on sitä suurempi, mitä pidempi se on.

6.2.7 Ilmanvaihtokanavien vaikutus ääneneristykseen

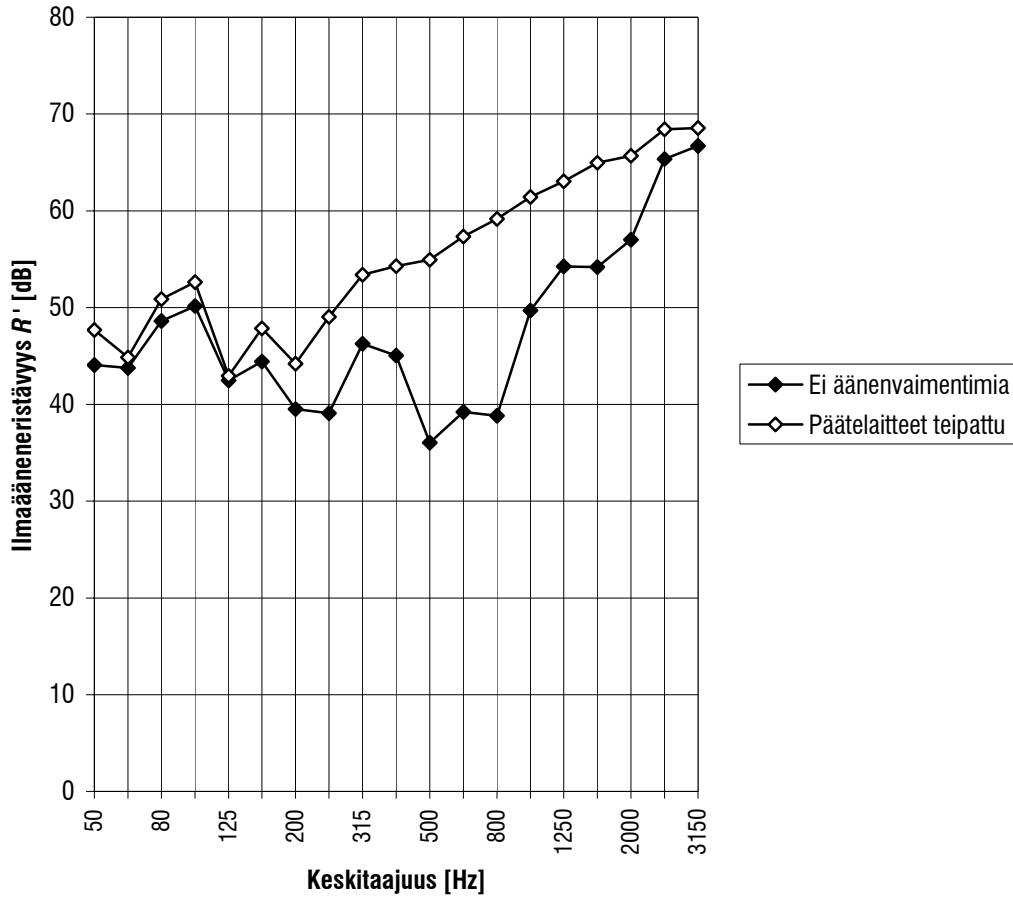
Kun tilassa toimii kaksi laitetta, jotka tuottavat tilaan saman äänenpainetason yksinään toimiessaan, äänenpainetaso on 3 dB korkeampi, kun laitteet toimivat yhtä aikaa. Ilmaääneneristävyys R on määritelty rakenteen kohdanneen äänitehon W_1 ja sen kautta toiseen tilaan siirtyneen äänitehon W_2 suhteena. Kun vastaanottotilaan johtaa toisesta lähestytilasta kaksi erillistä reittiä, joita pitkin ääni voi siirtyä tilojen välillä ja joiden ääneneristävyys on sama, tilaan siirtyvä ääniteho on $2 \times W_2$. Tällöin vastaanottotilan äänenpainetaso nousee 3 dB. Lopputulos voidaan ilmaista ilmaääneneristävyden kaavan perusteella myös niin, että ilmaääneneristävyys tilojen välillä heikkenee 3 dB. Yleisessä tapauksessa, kun äänellä on n siirtymäreittiä tilojen välillä ja ilmaääneneristävyys R_i kunkin reitin kautta tunnetaan, kaikkien reittien yhdessä tuottama ääneneristävyys on

$$R = 10 \lg \frac{1}{\sum_{i=1}^n 10^{-R_i/10}} \quad (6.7)$$

Kaavalla voidaan käytännön suunnittelutyössä vaadittavalla tarkkuudella laskea yhteiseristävyys myös ilmaääneneristysluvusta R_w tai R'_w . Ääneneristystä suunniteltaessa rakennusosien ilmaääneneristävyden tulee sivutiesiirtymien, mahdollisten työvirheiden ja muiden tekijöiden aiheuttamien heikkennysten vuoksi aina valita jonkin verran paremmaksi kuin tilojen välille asetettu ilmaääneneristyslukuvaatimus. Jos ilmanvaihtokanavien sallitaan heikentävän ilmaääneneristystä 0,5 dB pelkästään rakennusosan tuottamaan ilmaääneneristykseen verrattuna, ilmaääneneristävyden tai ilmaääneneristysluvun kunkin kanavan kautta tulee olla tiloja erottavaa rakenteen arvoa vähintään

- 10 dB korkeampi, kun tilojen välillä on 1 kanava,
- 13 dB korkeampi, kun tilojen välillä on 2 kanavaa,
- 16 dB korkeampi, kun tilojen välillä on 4 kanavaa,
- 19 dB korkeampi, kun tilojen välillä on 8 kanavaa.

Jos samassa kanavassa on useita venttiileitä, kukin venttiili katsotaan aina yhdeksi kanavaksi, ja kanavien ääneneristys mitoitetaan täyttämään edellä luetellut vaatimukset. Erilaisten rakennusten suunnittelussa lähtökohtana tulee olla se, että tiloja erottavia ilmanvaihtokanavia ei voida toteuttaa ilman äänenvaimentimia, kun ilmaääneneristysluvuksi tilojen välillä vaaditaan 40 dB tai enemmän (kuva 6.5). Ilmanvaihtokanavien ääneneristys on siten suunniteltava useimmissa toimistorakennuksissa, kaikissa kouluissa, terveyskeskuksissa, sairaaloissa, hotelleissa ja asuinrakennuksissa, joissa on yhteiskanavajärjestelmä. Erityisen suuria vaatimuksia ilmanvaihtokanavien ääneneristykselle syntyy vaativimmissa tiloissa, kuten elokuvateattereissa, teattereissa ja konserttisaleissa.



Kuva 6.5. Asuinkerrostalossa on yhteiskanavajärjestelmä, jossa ei ole äänenvaimentimia huoneistojen välillä. Ilmaääneneristysluvun asuinhuoneistojen välillä tulisi Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan olla vähintään 55 dB. Pällekkäisten makuuhuoneiden välillä ilmaääneneristyslukuksi mitattiin 46 dB. Kun kanavien päätelaitteet teipattiin umpeen, ilmaääneneristysluku parani arvoon 59 dB, joka vastaa rakennuksessa käytetyn 370 mm paksun ontelolaataston (massa 510 kg/m²) ilmaääneneristyslukua kenttämittauksissa. Ääneneristykseen parantamiseksi kanaviin oli asennettava 1000 mm pitkät äänenvaimentimet.

Äänen siirtyessä kanavan kautta tilasta toiseen tapahtuu vaimenemista äänen kulkiessa huonetilasta päätelaitteen kautta kanavaan. Lähtövaimennus voidaan yleensä olettaa yhtä suureksi kuin päätelaitteen päätevaimennus. Kanavan ääneneristävyys muodostuu lähtövaimennuksen lisäksi äänitason jakautumisesta kanavan haaroissa syntyvästä vaimennuksesta D_q , huoneita yhdistävässä kanavassa huoneiden välillä olevien äänenvaimentimien vaimennuksesta $D_{äv}$ ja päätelaitteiden vaimennuksesta $D_{pääte}$. Päätelaitteiden äänenvaimennusta määritettäessä otetaan huomioon päätteen paikka. Lisäksi vaimennusta syntyy kanavien mutkista sekä kanavan pituusyksikköä kohti. Näitä ei yleensä oteta laskelmissa huomioon, sillä ne vaikuttavat lähinnä korkeilla taajuuksilla, joilla ääneneristävyys muodostuu vaimentimien johdosta muutenkin yleensä suureksi. Ilmanvaihtokanavan ääneneristävyys tietyllä oktaavikaistalla on

$$R = D_{\text{lähtö}} + D_q + D_{äv} + D_{\text{pääte}} \quad (6.8)$$

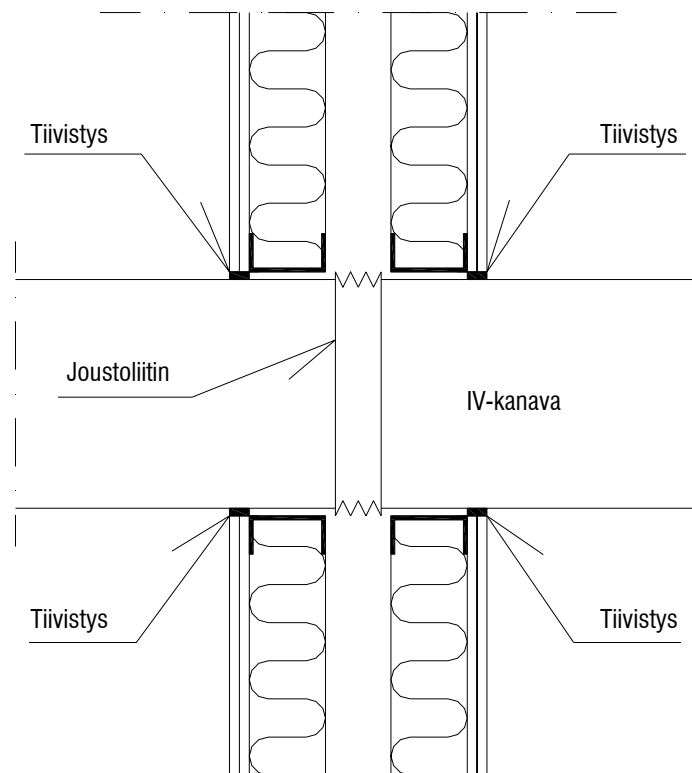
Ilmaääneneristävyydet lasketaan oktaavikaistoittain, minkä jälkeen määritetään oktaavikaistaisista arvoista ilmaääneneristysluku (taulukko 6.8). Kun kaikkien tulo- ja poistokanavien ilmaääneneristysluvut on laskettu, yhteiseristävyys tilojen välillä määritetään kaavalla 6.7 kanavien ilmaääneneristysluvuista ja tiloja erottavat rakennusosan ilmaääneneristysluvusta.

Ääni siirtyy kanavien välityksellä tilasta toiseen paitsi päätelaitteiden ja kanavan ilmatilan kautta, myös kanavan seinämän kautta joko taivutusvärähtelynä tai seinämän kautta kanavan ilmatilaan tai sieltä kanavan seinämän kautta huonetilaan. Pyöreiden kanavien seinämän ääneneristyskyky on yleensä erittäin hyvä, eikä sivutiesiirtymä niiden kautta yleensä vaikuta ääneneristykseen tavanomaisissa kohteissa, kun ilmaääneneristyslukuksi tilojen välillä ei vaadita enempää kuin 40 dB. Vaativammissa kohteissa myös pyöreiden kanavien seinämän kautta siirtyvä ääni on otettava huomioon. Suorakaidekanavien ääneneristyskyky puolestaan on jokseenkin heikko.

Taulukko 6.8. Taulukoiden 6,3-6,7 esimerkissä neuvotteluhuoneeseen johtaa pyöreä poistoilmakanava, jonka halkaisija on 125 mm. Neuvotteluhuoneen vieressä on toinen samanlainen huone, johon sama kanava jatkuu halkaisijaltaan 100 mm paksuna. Päätelaite sijaitsee seinällä. Ilmaääneneristyslukuksi saadaan 48 dB. Neuvotteluhuoneita erottaa seinä, jonka ilmaääneneristysluku on 48 dB. Jos tulokanava eristää ääntä yhtä hyvin kuin poistokanava, ilmaääneneristysluku tilojen välillä on 43 dB.

Oktaavikaistan keskitaajuus							Lähtöarvo (dB)
63	125	250	500	1000	2000	4000	
20	16	12	13	12	9	6	Lähtövaimennus, kanava 125 mm
4	4	4	4	4	4	4	Vaimennus ilmapinnan jakautumisesta D_q
3	7	10	17	41	39	25	Äänenvaimennin D_{av}
20	16	12	13	12	9	6	Päätevaimennus $D_{pääte}$
-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	Päätelaite seinällä
44	40	35	44	66	58	38	Ääneneristävyys R
-	39	48	55	58	59	-	Vertailukäyrä
-	32	41	48	51	52	-	Vertailukäyrän asema, kun R_w on 48 dB
-	-	-6	-4	-	-	-	Poikkeama vertailukäyrästä

Kanavan seinämän kautta taivutusvärähtelynä etenevää ääntä voidaan vähentää katkaisemalla kanavan pelti seinän kohdalla, jolloin katkaisukohtaan asennetaan joustava liitin. Tätä tapaa käytetään, kun kanava kulkee levyrakenteisen seinän läpi. Jos kanava kulkee kivirakenteisen seinän läpi, taivutusvärähtely voidaan katkaista valamalla kanava jäykästi seinään kiinni. Jos kanavan seinämä on kaksinkertainen, taivutusvärähtelyä saadaan estetyksi myös katkaisemalla ulompi pelti seinän kohdalla (kuva 6.6). Liitosten tulee lisäksi olla tiiviitä. Levyrakenteiden liitokset kanavaan tiivistetään elastisella kitillä. Äänen sivutiesiirtymää taivutusvärähtelynä kanavapeltiä pitkin voidaan estää myös koteloimalla kanavat rakennuslevyllä. Koteloinnilla voidaan estää myös äänen siirtymistä kanavapellin kautta kanavan ilmatilaan tai sieltä ympäristöön.



Kuva 6.6. Kanavapellin kautta etenevän taivutusvärähtelyn estäminen, kun tilojen välinen ilmaääneneristysluku on yli 60 dB ja kanava on pyöreä.

6.3 Tärinäneristys

6.3.1 Tärinäneristyksen tavoitteet

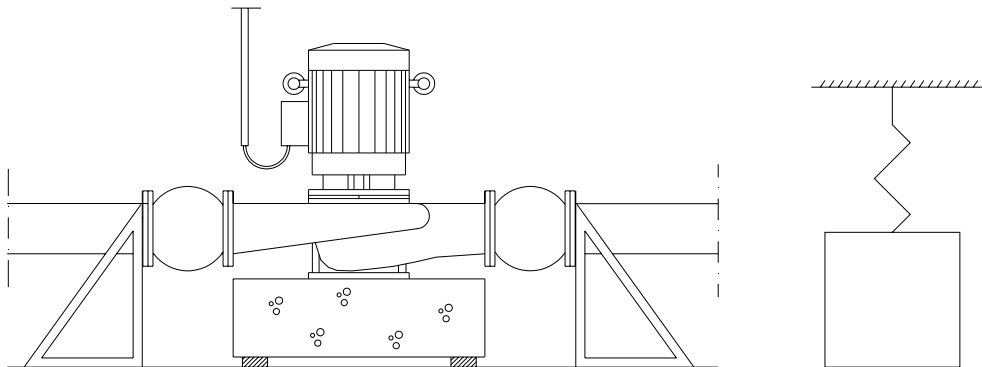
Kaikki rakenteisiin kiinnitetyt laitteet, joissa on liikkuvia tai pyöriviä osia, aiheuttavat runkoääntä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi ilmanvaihtokoneet, jäähdytyskoneet, kompressorit, lauhduttimet, pumput, taajuusmuuttajat, sähkökäyttöiset ovet ja hissit. Myös viemärit ja vesijohdot synnyttävät runkoääntä. Monien laitevalmistajien ilmanvaihtokoneissa puhaltimilla on valmiiksi suunniteltu tärinäneristys ja tavallisesti koneen paineaukot on liitetty koneen vaippaan joustavilla liitosnauhoilla, jolloin koneiden runkoääneneristystä ei tarvitse erikseen suunnitella. Koneiden runkoääneneristyksestä on kuitenkin syytä koneita tilattaessa varmistua, sillä eri valmistajien suunnittelu- ja toimituskäytännöt ovat erilaiset. Ilmastointilaitokseen liittyy usein myös pumppuja, taajuusmuuttajia ja muita laitteita. Nämä laitteet tuottavat ilmanvaihtokoneisiin, kompressoreihin ja vedenjäähdytyskoneisiin verrattuna vähän ilmaääntä, mutta pääsääntö niiden asennuksessa on, että mitään laitetta ei saa kiinnittää jäykästi rakennuksen runkoon, vaan niille on suunniteltava tärinäneristys. Näiden laitteiden toimitukseen ei välttämättä kuulu valmiiksi suunniteltua tärinäneristystä.

Laitteen liikkeestä syntyvän runkoäänien voimakkuus riippuu siitä, kuinka raskaaseen rakenteeseen laite on kiinnitetty. Joissakin tapauksissa rakenteen massa on riittävän suuri estämään runkoäänien äänitason muodostumista sallittuja äänitasoja suuremmaksi. Rakenteiden massa ei ole riittävä useimpien laitteiden aiheuttaman runkoäänien eristämiseksi, joten laitteille on suunniteltava tärinäneristys.

Puutteellisesta tärinäneristyksestä aiheutuva runkoääni on yleensä kyseessä silloin, kun rakennuksessa kuuluu epämääräisestä suunnasta tai kaikkialta teknisen laitteen aiheuttamaa ääntä. Se voi olla häiritsevän voimakasta, ja istuessa tai seisoessa saattaa tuntua tärinää. Runkoäänien voi aiheuttaa myös jokin talotekninen asennus ilman värähtelevää laitetta, esimerkiksi vesijohto kiinnitettynä levyrakenteeseen tai sadevesiviemäri, jonka kannake osuu hormirakenteeseen. Runkoääniongelmiä aiheuttavat myös virheet tärinäneristinten asennuksessa ja suunnittelussa: liian jäykät tai ylikuormitetut tärinäneristimet eivät toimi oikein; tärinäneristimistä ei ole hyötyä, jos eristettävän laitteen ja rakennuksen rungon välissä on osa, joka kytkee laitteen rakenteisiin.

Tärinäneristettyä LVIS-laitetta tarkastellaan yleensä yhden vapausasteen värähtelyjärjestelmänä (kuva 6.7), jossa on yksi massa ja yksi jousi. Tämä yhden massan värähtelyjärjestelmä on yksinkertaisin mitoittaa ja toimii tehokkaasti. Järjestelmässä tärinää aihe-

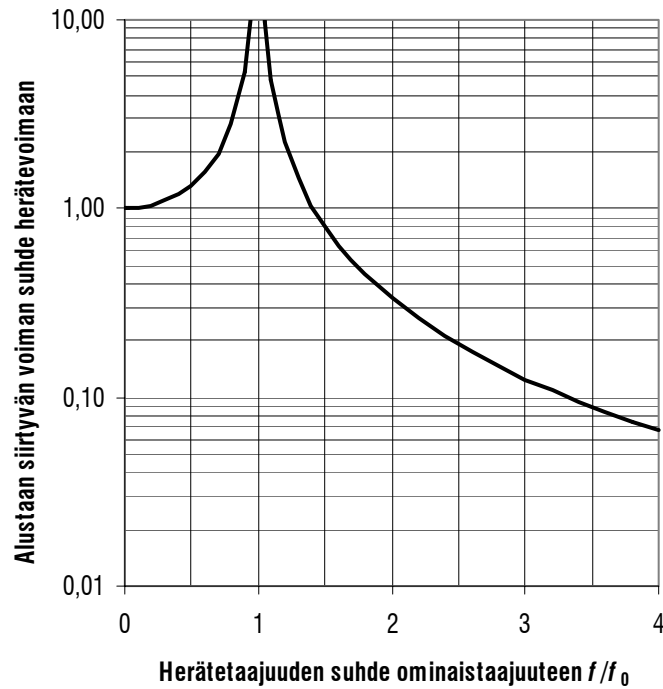
uttava laite muodostaa massan, joka värähtelee laitteen pyörimisnopeuden mukana. Laitteen alla on tärinäneristimet ja joustamaton alusta.



Kuva 6.7. Yhden vapausasteen värähtelyjärjestelmäksi (oikealla) idealisoitu tärinäneristimin tuettu pumppu.

6.3.2 Tärinäneristyksen suunnittelu

Laitteessa olevan pyörivän osan liike aiheuttaa voiman, joka kohdistuu laitteen alustaan. Laitteen kierrosluvun noustessa alustaan välittyy pyörimisliikkeestä yhä suurempi voima, joka on suurimmillaan silloin, kun laitteen kierrosluku on yhtä suuri kuin värähtelyjärjestelmän ominaistajuus f_0 [Hz]. Tärinäneristyksen aiheuttamista energiahäviöistä riippuu, kuinka suureksi alustaan vaikuttava voima kasvaa. Jos häviöitä ei ole, alustaan siirtyvä voima kasvaa resonanssitaajuudella hyvin suureksi. Kun kierrosluku vielä kasvaa, alustaan siirtyvä voima alkaa pienentyä. Taajuuden ollessa enemmän kuin 1,4-kertainen ominaistajuuteen f_0 verrattuna saadaan aikaan tärinäneristystä (kuva 6.8). Kun laite mitoitetetaan siten, että sen kierrosluku on vähintään kaksinkertainen järjestelmän ominaistajuuteen nähden, järjestelmää sanotaan ylikriittisesti mitoitetuksi tärinäneristykseksi.



Kuva 6.8. Esimerkki pyörivän laitteen aiheuttaman voiman siirtymisestä värähtelevän laitteen alustaan laitteen käyntitaajuuden f vaihdellessa suhteessa massa-jousijärjestelmän ominaistajuuteen f_0 nähden.

Tärinäneristys suunnitellaan kullekin laitteelle sen alimman kierrosnopeuden ja massan perusteella. Tärinäneristiminä voidaan käyttää kumi-, muovi- tai teräsjoisia. Tärinäneristymisen periaatteena on se, että koneen alimman herätetaajuuden f ja eristysjoisten ja niiden varassa olevan massan muodostaman järjestelmän ominaistajuuden f_0 suhde f/f_0 on vähintään 2,5. Kuitenkin ominaistajuuden f_0 tulee olla enintään 8 Hz, jolloin saavutetaan runkoääneneristystä koko kuuloalueella eli 20 Hz yläpuolella. Tästä seuraa, että tärinäneristimen puristuman tulee olla vähintään 4 mm. Yhden massan värähtelyjärjestelmän ominaistajuudella f_0 ja laitteen oman painon eristimiin aiheuttamalla puristumalla δ [m] on yhteys

$$f_0 = \sqrt{\frac{1}{4\delta}} \quad (6.9)$$

tai

$$\delta = \frac{1}{4f_0^2} \quad (6.10)$$

Yhden massan värähtelyjärjestelmäksi oletetun laitteen tärinäneristimet mitoitetaan seuraavasti:

- selvitetään värinäneneristettävän laitteen alin kierrosluku
- muutetaan kierrosluku taajuudeksi jakamalla se 60:llä (esimerkiksi 600 r/min / 60 = 10 Hz).
- järjestelmän ominaistaajuuden tulee olla 2,5-3 kertaa matalampi (esimerkiksi $10/3 = 3,3$ Hz).
- lasketaan kaavalla 6.10 värinäneneristinten vähimmäispuristuma (esimerkkitapauksessa 23 mm).
- valitaan värinäneristimet joka tukipisteeseen erikseen ottaen huomioon kaikki vaikuttavat voimat siten, että puristumat ovat joka pisteessä vähintään yhtä suuret kuin vaadittu vähimmäispuristuma.
- jos laitteen massa ei ole riittävä vaaditun puristuman saavuttamiseksi, laitteelle on suunniteltava lisämassa. Värinäneristimille asennetaan laite ja lisämassa yhdessä (esimerkki kuvassa 6.7).

Edellä on oletettu, että pahin värinää välittävä suunta on pystysuuntainen värähtely. Usein tämä oletus on riittävä värinäneneristysten suunnittelemiseksi, mutta värähtelysuuntia on jo neljästä nurkasta värinäneneristimien tuetulla värähtelyjärjestelmällä kuusi kappaletta (yksi pystysuunta, kaksi vaakasuuntaa ja kolme kiertosuuntaa). Jokaisella värähtelysuunnalla on oma ominaistaajuutensa. Värinäneneristysten toimimattomuus saattaa johtua siitä, ettei värinäneneristystä ole mitoitettu eri värähtelyjärjestelmien yhteisvaikutukselle. Asennuksissa onkin huomioitava kaikki laitteeseen vaikuttavat voimat. Värinäneristimet sijoitetaan seuraavasti:

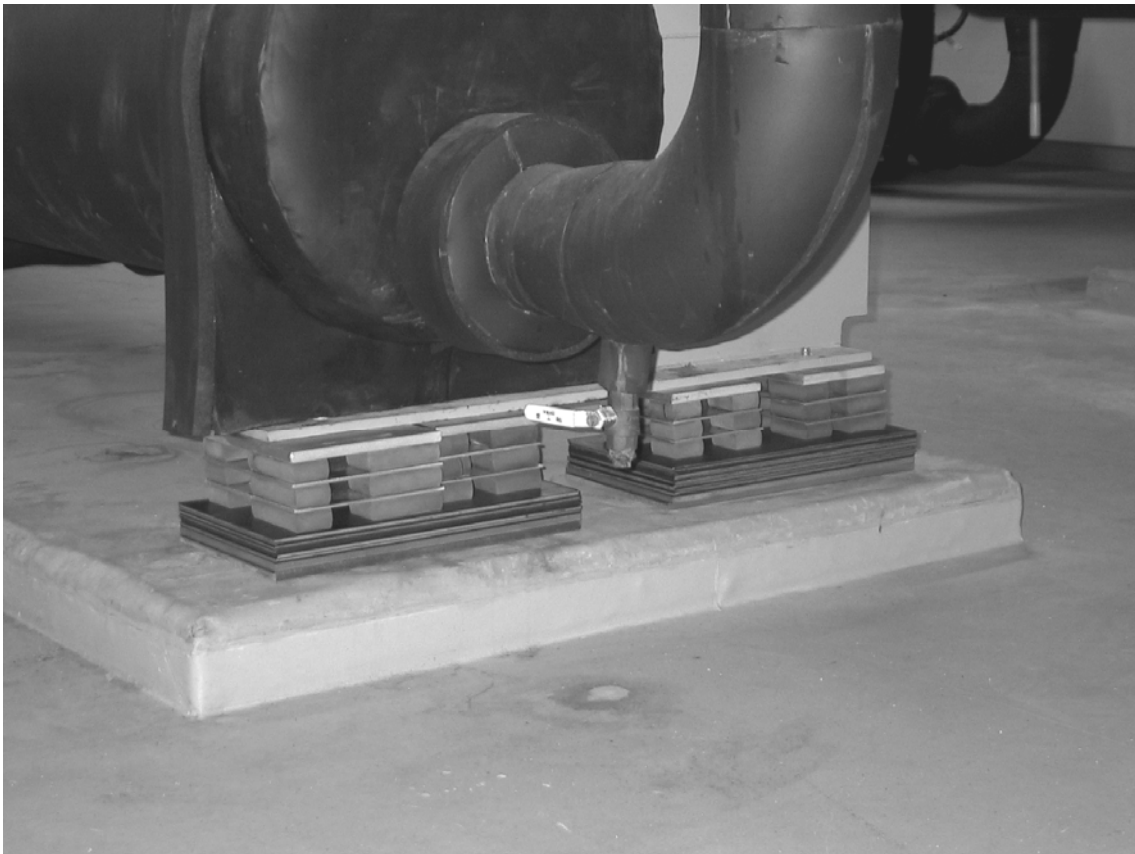
- värinäneristimet sijoitetaan mahdollisimman kauas massakeskipisteestä, jotta asennuksesta saadaan tukeva
- värinäneneristysten vaakasuuntaisen jäykkyyden tulee olla yhtä suuri kuin pystysuuntainen jäykkyys
- järjestelmän massakeskipisteen tulee olla mahdollisimman lähellä tasoa, jonka muodostavat värinäneneristimien tukipisteet värinäneneristettävässä massassa
- värinän pääakselin tulee kulkea mahdollisimman läheltä järjestelmän massakeskipistettä

Värinäneneristetyistä koneista ei saa olla mitään kiinteitä kytkentöjä rakennuksen runkoon, jotta rakennuksen runkoon ei välittyisi runkoääntä tai värinää. Putkiin asennetaan joustavat putkenosat, sähköjohdot toteutetaan vapaasti riippuvana lenkinä, ilmastointikanaviin asennetaan tarvittaessa joustavat liitinnauhat.

Edellä on oletettu että värinäneneristysten alusta on jäykkä ja lähes joustamaton, esimerkiksi peruskallio tai massiivinen betonilaatta. Käytännössä näin ei aina ole. Koska myös alusta joustaa, sen vaikutus tulee aina tarkistaa. Jos värinää aiheuttava laite sijoitetaan alustalle, joka joustaa, järjestelmästä muodostuu kahden tai useamman vapausasteen värähtelyjärjestelmä. Kahden massan järjestelmä on kyseessä myös silloin, jos laitteessa

itsessään on kaksi erillistä värähtelevää massaa (kuva 6.9). Joustavia alustoja ovat mm. kaikki puu- ja teräsrakenteet sekä ohuet betonilaatat. Useimmat vanhat rakenteet ovat myös joustavia alustoja. Kahden massan värähtelyjärjestelmässä on kaksi pystysuuntaista resonanssitaajuutta eikä järjestelmän eristävyys kasva herätetaajuuden noustessa. Taso, jolle eristävyys jää, riippuu järjestelmän jousivakioiden suhteesta.

Kantaville rakenteille sallitaan $1/200 - 1/400$ suuruinen taipuma verrattuna jänneväliin, puisten välipohjarakenteiden sallittu taipuma on 12 mm. Jotta tällaisen alustan päällä oleva värähtelyjärjestelmä toimisi, puristuman värähtelyjärjestelmässä tulisi olla vähintään 10-kertainen, mieluiten 100-kertainen alustan taipumaan verrattuna. Markkinoilla on värähtelyjärjestelmiä, joiden puristuma on 50 mm, mutta tätä suuremmat puristumat johtavat kalliisiin erityisratkaisuihin. Käytännössä on pyrittävä järjestämään värähtelyjärjestelmän alle mahdollisimman massiivinen ja jäykkä rakenne. Värähtelyjärjestelmä edellyttävien laitteiden alle ei samasta syystä saa koskaan tehdä kelluvaa lattiaa.



Kuva 6.9. Kahden vapausasteen värähtelijän värähtelyjärjestelmän tulee olla korkeita, jotta niihin syntyy riittävän suuri puristuma.

6.4 Muut LVIS-järjestelmät [41]

6.4.1 Lämmitysjärjestelmä

Rakennuksen lämmitysjärjestelmän äänenhallinnan suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota järjestelmävalintoihin sekä putkien ja laitteiden mitoitukseen siten, että niistä aiheutuu huonetiloihin mahdollisimman vähän ääntä tilan käyttötarkoitukseen nähden. Lämmitysjärjestelmät saattavat myös heikentää sekä ilma- että askelääneneristävyyttä. Lämmitysjärjestelmän tuottamat äänitasot riippuvat putkiston mitoituksesta, laitevalinnoista, verkostosuunnittelusta eli laitteiden ja putkien sijoittelusta ja kannakoinnista sekä lämmönjakohuoneen sijainnista ja siellä olevien laitteiden tärinäneristyksestä.

6.4.2 Käyttövesijärjestelmä

Asuinrakennuksen vesijärjestelmän äänenhallinnan suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota erityisesti putkien ja laitteiden mitoitukseen siten, että ne tuottavat huonetiloihin mahdollisimman vähän ääntä tilan käyttötarkoitukseen nähden. Putkien läpiviennit voivat heikentää sekä ilma- että askelääneneristävyyttä.

Käyttövesijärjestelmän tuottamiin äänitasoihin voidaan vaikuttaa suunnittelemalla painetasot kohtuullisiksi, kannatteleamalla putket oikealla tavalla ja valitsemalla hiljaisia osia järjestelmään. Joissakin tapauksissa käyttövesijärjestelmän aiheuttamien äänien hallitsemiseksi on tehtävä myös rakenneteknisiä ratkaisuja, kuten ääntä eristäviä alakattoja. Suunnittelun osa-alueista äänenhallinnan kannalta oleellisia ovat putkistojen mitoitukset, laitevalinnat ja putkien ja laitteiden sijoittelu.

6.4.3 Viemärijärjestelmä

Rakennuksen viemärijärjestelmän äänenhallinnan suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomioita putkien sijoitteluun ja ääneneristyksen mitoitukseen siten, että viemärit tuottavat huonetiloihin mahdollisimman vähän ääntä tilan käyttötarkoitukseen nähden. Viemärien ääniin vaikuttavat erityisesti kannatusjärjestelmä ja viemäriinjojen suoruus. Äänenhallinta tulee ottaa huomioon putkistomitoituksessa, putkiston materiaalivalinnoissa, laite- ja kalustavalinnoissa sekä putkien ja laitteiden sijoittelussa.

Asuinkerrostaloissa käytetään yleensä muovi- tai valurautaviemäreitä. Yleensä ras-
kaamman viemäriin ääneneristyskyky on kevyttä viemäriä parempi. Ääneneristyskyky
vaikuttaa siihen, kuinka paljon ilmassa oleva viemäri synnyttää ympäristöönsä ääntä.
Runkoäänen syntyminen riippuu viemäriputkien asennuksesta. Asuinrakennusten vie-
märöinnin asennukseen on olemassa kaksi periaatetta:

- rakenteisiin jäykästi kiinnitetty viemärien asennusjärjestelmä, jossa viemärit
kiinnitetään massiivisiin betonirakenteisiin mahdollisimman jäykästi ja este-
tään siten viemäriin vaipan värähtelyn aiheuttaman runkoäänen eteneminen.
Myös viemäriin pohjakulma valetaan betonin sisään.
- rakenteista tärinäneristimin irrotettu valurautaviemärien testattu ja tarkastettu
asennusjärjestelmä, jossa koko viemärijärjestelmä irrotetaan rakennuksen run-
gosta tehokkailla tärinäneristimillä, jotka estävät viemäriin värähtelyn siirtymi-
sen rakennuksen runkoon. Viemäriin pohjakulmaa ei valeta betonin sisään,
vaan sen tulee olla irti rungosta.

Asuinrakennuksissa pystyviemäriinjoihin ei saa tehdä vaakasiirtoja. Muissakin raken-
nuksissa niistä voi aiheutua äänihaittoja. Viemäriinjoit tulee molemmissa järjestelmissä
tuoda suoraan ylhäältä alas. Pystyviemäreissä ei saa olla vaakasiirtoja. Viemäriinjoit
tulee sijoittaa sellaisten tilojen läheisyyteen, joissa ei ole kovia äänitasovaatimuksia.

7

Liikennemelun torjunta

”Voimakas teknillinen kehitys on manannut esiin ääniä, jotka ovat vieroksuttuja ja joita pidetään meluna. Tämän päivän melusta näyttää tulevan vaikea yhteiskunnallinen probleema, jonka merkityksestä ei kaikilla ihmisillä ole edes miellekuvaa. Melu ei ole tämän päivän tuotetta, sillä jo sata vuotta sitten oli huolestuneita ihmisiä, jotka kirjoittivat melusta ja hälystä. Mutta heidän päiviensä rattaiden kolinasta mukulakivikadulla on suuri askel nykypäivän liikennekohinaan.”

Tekniikan lisenjaatti Eero Lampio 1962

7.1 Liikennemelun merkitys

7.1.1 Liikennemelun torjunta osana rakennushanketta

Ääneneristystä tai meluntorjuntaa aiheuttava äänilähde voi olla paitsi rakennuksen sisäpuolella, myös ulkona. Vilkkaiden liikenneväylien läheisyyteen, lentoreittien melualueelle tai melua aiheuttavien tuotantolaitosten läheisyyteen rakennettaessa on huolehdittava siitä, että ulkoa sisälle siirtyvän melun keskiäänitaso säilyy riittävän alhaisena terveyshaitan ehkäisemiseksi ja viihtyisyyden takaamiseksi. Myös ulkona asuinrakennusten oleskelualueilla, virkistysalueilla ja oppilaitosten piha-alueilla melun keskiäänitasoa rajoitetaan viranomais määräyksin.

Suomessa on parhaillaan käynnissä useita yhteiskunnallisia muutoksia, jotka vaikuttavat siihen, että melu on kasvava ympäristöongelma. Kansantalouden kasvaminen yleensäkin johtaa teollisuuden ja kaupan kuljetusten lisääntymiseen ja liikennemäärien kasvuun; 1990-luvun lamavuodet näkyivät myös siinä, että liikennemäärät eivät kasvaneet tai kääntyivät jopa laskuun. Muuttoliike kaupunkeihin ja erityisesti kasvukeskuksiin ja pääkaupunkiseudulle merkitsee liikenteen lisääntymistä näillä alueilla. Yhdyskuntasuunnittelussa pyritään nykyisin välttämään yhdyskuntarakenteen hajoamista ja uusien, entisestä yhdyskuntarakenteesta irrallisten asuinalueiden suunnittelua, jolloin kunnallistekniikan ja joukkoliikenteen kustannukset jäävät alhaisemmiksi ja etäisyydet ja liikennesuoritteet vähäisemmiksi. Tiivis yhdyskuntarakenne mahdollistaa paremmin myös työmatkakävelyn ja –pyöräilyn. [12, 38, 65]

Etsittäessä uusia rakennuspaikkoja olemassa olevan yhdyskuntarakenteen sisältä päädytään usein liikenneväylien varrella sijaitseviin alueisiin. Ne on voitu alun perin varata teollisuus-, liike- ja toimistorakentamiselle, joilla liikennemelun aiheuttama haitta on vähäisempää kuin asuinalueilla. Meluntorjunnan tehokkuuden kannalta edullisin keino on ennaltaehkäisy. Meluntorjuntatarpeen syntymiseen yksittäisillä tonteilla voidaan vaikuttaa jo maakunta- ja yleiskaavatasolla selvittämällä pääliikenneväylien aiheuttamat meluhaitat ja melulle altistuvien asukkaiden määrät sekä liikennettä runsaasti aiheuttavien kohteiden sijainnit. Sijoitettaessa uusia asuinalueita olemassa olevan yhdyskuntarakenteen sisälle liikennemelun torjuminen tulee usein yhdeksi suunnittelun lähtökohdaksi, sillä runsaasti melua tuottavien toimintojen ja asuinalueiden sijoittaminen toisistaan erilleen ei välttämättä ole mahdollista.

Uusien alueiden tai olemassa olevan yhdyskuntarakenteen sisällä erilaisten melulähteiden läheisyydessä sijaitsevien alueiden meluntorjuntatoimenpiteet esitetään yksityiskoh-

taisesti alueen asemakaavassa. Asemakaavoitusta varten on tehtävä meluselvitys, josta käy ilmi melulähteiden aiheuttaman melun leviäminen ja meluntorjuntaratkaisujen vaikutus melun leviämiseen. Sen perusteella asemakaavassa esitetään rakennuksen sijainti ja muoto, joilla voidaan vaikuttaa melun leviämiseen, pihojen oleskelualueiden sijoitus, rakennuksen ulkokuorelta vaadittava ääneneristävyys, melusteiden tai -vallien sijainti ja korkeus ja parvekelasitusten tarve.

Meluselvityksiä asemakaavoitusta varten laativat kunnat itse tai teettävät niitä alan konsulteilla. Meluselvityksiä tarvitsevat usein myös rakennusliikkeet. Rakennusliike voi hakea esimerkiksi omistamalleen toimisto-, liike- tai teollisuusrakennusten alueeksi kaavoitetulle tontille asemakaavamuutosta asuinrakennusten alueeksi. Tontit sijaitsevat tällöin yleensä välittömästi vilkasliikenteisten moottori- ja valtateiden tai rautatien varrella. Meluselvityksen tarkoituksena on tällöin tutkia, millaisia melusuojaustoimenpiteitä asuinrakentaminen korttelille tai tontille edellyttää. Usein kaavamuutosta haetaan myös tilanteessa, jossa vilkkaan liikenneväylän varressa oleva asuinalue on asemakaavassa ajateltu suojattavaksi melulta liikenneväylän varteen tehtävillä toimisto- tai liikerakennuksilla. Toimisto-, liike- ja asuinrakennusten kysyntä riippuu suhdanteista, joten monesti rakennusliike haluaakin rakentaa asuinalueen ensin, jolloin meluselvityksen tarkoituksena on tutkia, onko tämä mahdollista ja millaisia melusuojaustoimenpiteitä asuinrakentaminen ennen melusuojeiksi ajateltujen rakennusten valmistumista edellyttää (kuva 7.1).

Asemakaavassa esitettyjen meluntorjuntaratkaisujen toteutumista valvotaan rakennuslupavaiheessa. Tällöin on yleensä esitettävä vähintään selvitys siitä, että rakennuksen julkisivun rakennusosat – ikkunat, ikkunaovet, korvausilmaventtiilit ja ulkoseinärakenteet – täyttävät kokonaisuutena asemakaavassa esitetyn rakennuksen ulkokuoren ääneneristysvaatimuksen. Jos vilkkaan liikenneväylän läheisyydessä sijaitsevan alueen asemakaavassa ei syystä tai toisesta ole meluntorjuntaa koskevia kaavamääräyksiä, esimerkiksi jos kaava on vanha, meluselvitys on tehtävä rakennuslupaan liittyen.

Melualueelle rakennettaessa meluselvitys on edullista tehdä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, jotta suunnittelussa voidaan varautua meluntorjuntaan. Jos rakennusten sijainnit määrätään ensimmäiseksi, rakennukset eivät välttämättä toimi piha-alueiden melusteina ja rakennusten ulkokuorelle asetettavat vaatimukset voivat muodostua kohtuuttomiksi.



Kuva 7.1. Asemakaavoitusta varten laadittu kuntakeskuksen melukartta.

7.1.2 Liikennemelua koskevat määräykset

Rakennuksen ulkopuolisesta äänilähteestä sallittavat melutasot on esitetty valtioneuvoston päätöksessä 993 vuodelta 1992 [63]. Sen tarkoitus on meluhaittojen ehkäiseminen ja ympäristön viihtyisyyden turvaaminen maankäytön, liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa sekä rakentamisen lupamenettelyissä. Päätös koskee erilaisten liikenneväylien aiheuttamaa melua, teollisuuden aiheuttamaa melua, mutta ei ampuma- ja moottoriurheiluratojen aiheuttamaa melua. Niistä on olemassa erilliset päätökset.

Valtioneuvoston päätöksen mukaan asumiseen käytettävillä alueilla, virkistysalueilla taajamissa ja taajamien välittömässä läheisyydessä sekä hoito- tai oppilaitoksia palvele-

villa alueilla on ohjeena, että melutaso ei saa ylittää ulkona melun A-painotetun keskiäänitason $L_{A,eq}$ päiväohjearvoa (klo 7-22) 55 dB eikä yöohjearvoa (klo 22-7) 50 dB. Uu-silla alueilla on melutason yöohjearvo kuitenkin 45 dB, jonka saavuttaminen kaupunkiympäristössä on erittäin vaikeaa. Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoja. Ohjearvot perustuvat muun muassa siihen, että melu ei häiritse puhetta eikä haittaa pihalla leikkivien lasten kielellistä kehitystä. Tavallisesti katsotaan, että asumiseen käytettävillä alueilla riittää, että valtioneuvoston päätöksen mukaiset ohjearvot täyttyvät pihojen oleskelu- ja leikkialueilla. Oleskelualueiksi katsotaan myös asuinrakennusten parvekkeet.

Loma-asumiseen käytettävillä alueilla, leirintäalueilla, taajamien ulkopuolella olevilla virkistysalueilla ja luonnonsuojelualueilla on ohjeena, että melutaso ei saa ylittää päiväohjearvoa 45 dB eikä yöohjearvoa 40 dB. Loma-asumiseen käytettävillä alueilla taajamassa voidaan kuitenkin soveltaa asuinalueiden ohjearvoja. Yöohjearvoa ei sovelleta sellaisilla luonnonsuojelualueilla, joita ei yleisesti käytetä oleskeluun tai luonnon harrastamiseen yöllä.

Rakennuksen ulkopuoliset melulähteet eivät saa tuottaa terveyttä vaarantavaa melua rakennusten sisälle. Asuin-, potilas- ja majoitushuoneissa on ohjeena, että ulkoa kantautuvasta melusta aiheutuva melutaso sisällä alittaa melun A-painotetun keskiäänitason $L_{A,eq}$ päiväohjearvon (klo 7-22) 35 dB ja yöohjearvon (klo 22-7) 30 dB. Opetus- ja koontumistiloissa sovelletaan ainoastaan melutason päiväohjearvoa 35 dB sekä liike- ja toimistohuoneissa päiväohjearvoa 45 dB. Valtioneuvoston päätöksen mukaiset melutason ohjearvot perustuvat melun terveystaakoihin. Siten ne eivät takaa viihtyisyyttä melualueille rakennettaessa. Haluttaessa alentaa liikenteen aiheuttamaa äänitason rakennusten sisällä voidaan noudattaa standardin SFS 5907 suosituksia [54].

Erityisesti rautatien varrelle rakennettaessa äänihaittaa voi aiheuttaa myös rautatien tärinä ja siitä aiheutuva runkoääni. Suomessa ei ole viranomaismääräyksiä, jotka suoraan koskisivat tärinää, mutta VTT on laatinut suositukset tärinän mittaamisesta ja sen ottamisesta huomioon rakennusten suunnittelussa [59]. Koska tärinä riippuu radan perustamisesta ja rakennettavan tontin maapohjasta, suunnittelun lähtökohdaksi on aina tuotettava tietoa mittauksin.

7.2 Äänilähteet

7.2.1 Tieliikennemelu

Tieliikennemelu muodostuu monesta äänilähteestä, joiden vaikutus riippuu ajonopeudesta. Kun ajonopeus on alhainen, tieliikennemelun tärkein osa syntyy moottorinäänestä. Henkilöautojen melu on pääasiassa moottoriääntä, kun ajonopeus on alle 40 km/h. Raskaiden ajoneuvojen melu voi olla moottoriääntä noin 60 km/h nopeuteen saakka. Moottorimeluun vaikuttaa myös kuljettajan ajotapa: melua syntyy sitä enemmän, mitä pienemmällä vaihteella ajetaan. Moottorimelun lisäksi myös auton voimansiirto ja korin värähtely aiheuttavat ääntä. Raskaissa ajoneuvoissa on lisäksi erilaisia laitteita, jotka aiheuttavat melua. Esimerkiksi päivittäistavarakaupan tavaraliikenteessä tärkein melulähde on usein kuorma-auton kuormatilan jäähdytyskompressori.

Ajonopeuden noustessa rengasmelun merkitys kasvaa. Kun henkilöauton ajonopeus ylittää 40-50 km/h, rengasmelusta tulee moottorimelua tärkeämpi tekijä. Raskaiden ajoneuvojen rengasmelu ylittää moottorimelun yli 60 km/h ajonopeuksilla. Rengasmelu syntyy renkaan pyöriessä renkaan ja tien kosketuskohdassa, kun ilma puristuu renkaan kuvioinnista ulos renkaan etupuolella ja vastaavasti ilman imeytymisestä kuvioinnin sisään renkaan takapuolella. Rengasmelun äänitaso riippuu renkaiden kuvioinnista ja leveydestä, tien kunnosta ja kelistä: märällä tiellä rengasmelua syntyy enemmän. Talvella rengasmelua syntyy enemmän nastarenkaiden kosketuksesta tien pintaan. Myös renkaan värähtelystä syntyy ääntä, joka voi olla voimakasta, kun tienpäällyste on epätasainen, esimerkiksi mukulakiveä. Ääntä syntyy myös auton aiheuttamasta ilmavirtauksesta, mutta virtausmelun merkitys on suurimmillaan vasta, kun ajonopeus on yli 120 km/h. [6, 38]

Vilkkaasti liikennöidyn tien varrella äänitaso vaihtelee ajan suhteen vain vähän. Tietä voidaan verrata säteensä suunnassa värähtelevään putkeen, joka synnyttää ympärilleen sylinteriaallon. Liikennemelun etäisyysvaimennus noudattaa sylinteriaaltoa: etäisyyden kaksinkertaistuessa äänitaso alenee 3 dB. Myös liikennemäärän puolittuminen alentaa äänitasoa 3 dB. Nopeus vaikuttaa rengas- ja moottorimeluun, joten esimerkiksi ajonopeuden laskeminen 100 km/h nopeudesta 80 km/h nopeuteen alentaa keskiäänitasoa tieliikennemelun laskentamallin mukaan noin 2 dB. Nopeuden laskeminen 60 km/h nopeuteen alentaa keskiäänitasoa 3,5 dB lisää.

Edetessään mastossa ääni heijastuu maasta, jonka koostumus vaikuttaa heijastuneen äänen äänitasoon. Alueella, jolla maaperä on pehmeää, äänitaso voi olla useita desibele-

jä alhaisempi kuin alueella, jolla maa on kovaa tai se on päällystetty esimerkiksi asfaltilla. Kaupunkien katukuiluissa käytännössä kaikki pinnat ovat kovia ja ääni heijastelee myös rakennusten seinistä. Tieliikenteen aiheuttamaan äänitasoon voidaan vaikuttaa päällysteellä. Ns. hiljainen asfaltti, joka on huokoista, voi vaimentaa äänitasoa 3 dB tai enemmänkin. Meluselvityksissä esitetään usein keskiäänitaso 2 m korkeudella. Julkisivun ääneneristysvaatimusta määritettäessä on kuitenkin huomattava, että keskiäänitaso ei yleensä ole 2 m korkeudessa suurimmillaan, sillä maanpinnan muodot toimivat meluesteinä. Julkisivun ääneneristysvaatimuksen määrittämiseksi tuleekin määrittää keskiäänitaso myös ylemmissä kerroksissa.

Liikenteen aiheuttama keskiäänitaso lasketaan tavallisesti syksyn keskimääräisen arki-
vuorokausiliikenteen (KAVL) perusteella. Ajonopeutena käytetään teiden ja katujen nopeusrajoituksia. Liikennemäärät saadaan kuntien liikennesuunnitteluyksiköistä tai tiepiiristä. Koska valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista määrittelee erikseen ohjearvot päivä- ja yöajalle, tulee meluselvitystä varten saada tieto liikennemäärän jakautumisesta vuorokauden ajalle. Tätä tietoa ei välttämättä ole aina saatavissa; yleisesti käytettävä arvio on, että liikennevirrasta 10 % kulkee yöllä ja 90 % päivällä. Liikennemäärästä tulee tietää myös raskaan liikenteen osuus, sillä liikennemelun keskiäänitaso on sitä korkeampi mitä enemmän raskasta liikennettä on.

Liikennemelun keskiäänitaso mallinnetaan sekä nykyisen että ennustetun liikennemäärän perusteella. Ennustetilanne valitaan yleensä vuoteen 2020 tai 2030. Kasvukeskuk-
sissa liikennemäärät ovat kasvaneet 1990-luvun puolivälistä saakka. Koko valtakunnan mittakaavassa kasvun ennustetaan edelleen jatkuvan, mutta vuoden 2020 jälkeen se hidastuu väestön vanhetessa ja alkaessa vähetä. Alueelliset erot ovat suuret, sillä monilla paikkakunnilla etenkin Itä- ja Pohjois-Suomessa liikenteen arvioidaan vähenevän tai säilyvän suunnilleen ennallaan. Helsingin kantakaupungin alueella liikennemäärä ei juuri ole kasvanut viimeisten kymmenen vuoden aikana, vaikka se pääkaupunkiseudulla muuten on kasvanut paljon. Tampereella Tiehallinto arvioi liikennemäärän kasvavan vuoteen 2030 mennessä 1,7-kertaiseksi vuoden 1997 liikennemäärään verrattuna. [39, 49]

Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista määrittelee raja-arvot liikennemelun aiheuttamalle keskiäänitasolle. Monissa tapauksissa häiritsevimmäksi koetaan kuitenkin yksittäisen ajoneuvon ohiajo, josta syntyy meluhuippu. Jos äänitaso asuinhuoneessa on esimerkiksi 1 minuutin aikana 50 dB ja 59 minuutin aikana 30 dB, keskiäänitaso on 34 dB. Keskiäänitasoon perustuvat määräykset eivät näin ollen tarkoita sitä, että asuinhuoneissa ei koskaan kuuluisi ulkoa mitään, edes silloin, kun keskiäänitaso on valtioneuvoston päätöksessä määriteltyä ohjearvoa selvästi alhaisempi. Keskiäänitason merkitystä meluhaitan arvioimisessa on arvosteltu, mutta toistaiseksi ei ole päätetty antaa melun enimmäisäänitasoja koskevia ohjearvoja tai muita kriteerejä. Rakennusten sisälle

muodostuvaan äänitasoon voidaan kuitenkin vaikuttaa yksinkertaisestikin valitsemalla parempia rakennusosia kuin valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista edellyttäisi.

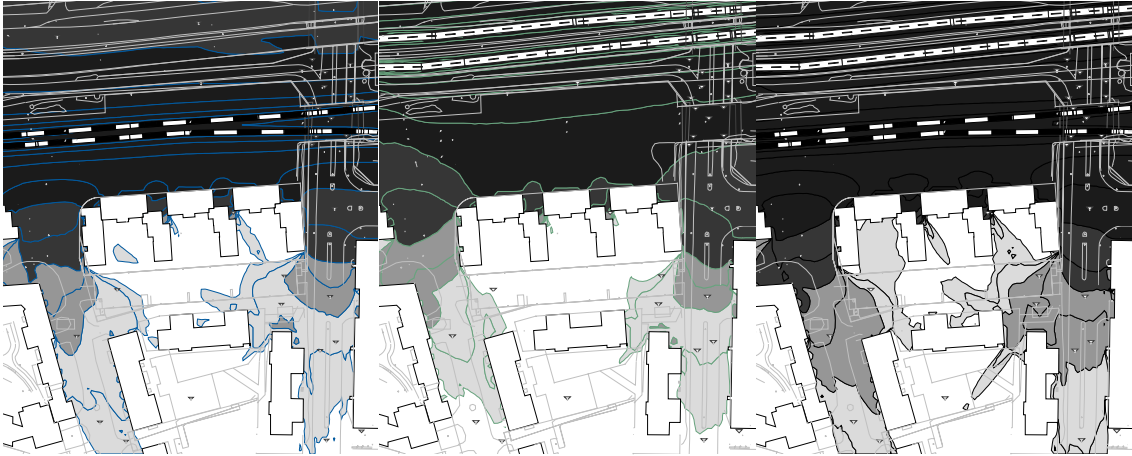
7.2.2 Raideliikennemelu

Valtakunnallisesti ajatellen raideliikennemelu on tieliikennemeluun verrattuna pienempi ympäristöongelma (kuva 7.2). Noin 30 000 ihmisen arvioidaan asuvan alueella, jolla raideliikennemelun päiväaikainen keskiäänitaso 2 m korkeudella ylittää ohjearvon 55 dB; pelkästään pääkaupunkiseudulla arvioidaan asuvan yli 200 000 tie- ja katuliikennemelulle altistuvaa ihmistä. On myös esitetty, että raideliikennemelua ei koeta yhtä häiritseväksi kuin tie- tai katuliikennemelua. Raideliikennemelu on hetkellisempää; sen aiheuttamaa äänihaittaa arvioidaan keskiäänitasolla, mutta häiriö syntyy hyvin lyhyistä junien ohiajoista, mutta muulloin radan varrella sijaitsevilla alueilla voi olla hyvinkin hiljaista. Vilkkaiden teiden läheisyydessä liikenteen aiheuttama taustamelu on jatkuvaa. [38, 50, 65]

Raideliikennemelu syntyy lähinnä junan pyörän ja kiskon kosketuksesta, joka synnyttää laajakaistaista melua. Tieliikennemeluun verrattuna raideliikennemelu sisältää enemmän äänienergiaa korkealla taajuusalueella. Osa raideliikennemelusta syntyy myös diesel- ja sähkömoottoreista, etenkin nopeuksien ollessa hiljaisia. [6]

Raideliikennemelun mallintamiseksi tarvitaan tiedot kunkin junatyypin määrästä radalla päivä- ja yöaikana sekä junien pituudet ja ajonopeudet. Raideliikenteen ennustetaan kasvavan huomattavasti etenkin pääradalla ja pääkaupunkiseudun paikallisliikenteessä. Nykyisen ja vuoden 2020 liikennemäärän perusteella mallinnetun raidemelun aiheuttamissa keskiäänitasoissa ei kuitenkaan ole juuri eroa, sillä tulevaisuudessa liikennöivä kalusto on selvästi vanhempaa kalustoa hiljaisempaa.

Raideliikennemelun laskentamalli koskee vain junien tai metrovaunujen aiheuttamaa ilmaääntä. Junat voivat aiheuttaa maaperästä ja radan perustamistavasta riippuen myös runkoääntä ja tärinää. Runkoäänen siirtymistä läheisiin rakennuksiin voidaan estää toteuttamalla rata tärinäneristettynä. Joissakin tapauksissa pääkaupunkiseudulla tärinäneristys on tehty rakennusten anturoiden ja sokkelien väliin.



Kuva 7.2. Suomessa tieliikennemelun merkitys on suurempi kuin raideliikennemelun. Vilkkaimmataan rataosuudet eivät tuota melua juuri enempää kuin kaupunkikeskustojen pääkadut. Vasemmalla rautatien aiheuttaman melun leviäminen, keskellä taajaman pääväylän melun leviäminen ja oikealla niiden yhteisvaikutus.

7.2.3 Lentomelu

Lentomelun äänitason ilmoittamiseen on Suomessa otettu kansainvälisen käytännön mukaisesti ns. päivä-ilta-yömelutaso L_{DEN} . Siihen sisältyy koko vuorokauden keskiäänitaso siten, että illan (klo 19-22) melutapahtumien keskiäänitasoon lisätään 5 dB ja yön (klo 22-7) keskiäänitasoon lisätään 10 dB. Tämä johtuu siitä, että vilkkailla lentoasemilla liikennehuiput ajoittuvat tie- ja raideliikenteestä poiketen iltaan. Määritettäessä asemakaavamääräyksiä L_{DEN} -arvojen perusteella käytetään vertailukohtana valtioneuvoston päätöksen mukaisia päiväajan ohjearvoja. Suosituksena on, että uusia asuinrakennuksia ei tulisi sijoittaa alueille, joilla L_{DEN} on enemmän kuin 60 dB. Lentoliikenteen kasvusta huolimatta lentomelulle altistuvien ihmisten määrä on Suomessa vähentynyt. Tämä johtuu erityisesti siitä, että lentokoneet ovat kehittyneet hiljaisemmiksi. Lentomelun leviämiseen asuntoalueille on voitu vaikuttaa myös lentoreittien ja kiitoratojen käytön suunnittelulla. Lentokoneiden melupäästöä säädelään myös kansainvälisin määräyksin. [6, 65]

7.2.4 Melun mallintaminen

Tie-, raide- ja lentoliikenteen aiheuttamaa melua voidaan arvioida laskennallisesti, kun tiedetään liikenneväylän liikennemäärä, ajonopeudet ja liikenneväylän kaluston tyyppi. Asemakaavoitukseen liittyvissä meluselvityksissä harvemmin arvioidaan lentomelua, sillä Ilmailulaitos ja lentomelualueilla sijaitsevat kunnat ovat laatineet selvityksiä lentomelun leviämisestä.

Tie- ja raideliikennemelun arvioimiseksi Pohjoismaat ovat laatineet yhdessä laskentamalleja [51, 62]. Laskentamalleilla voidaan laskea melun keskiäänitaso missä tahansa tarkastelupisteessä käsinkin, mutta tavallisesti melun leviämistä halutaan havainnollistaa laatimalla koko tarkasteltavalta alueelta melukartta. Jos tarkasteltavana on hehtaarin ala ja melun keskiäänitaso halutaan tietää 5 m välein, laskelma pitäisi suorittaa 400 kertaa. Siksi melukartat laaditaan poikkeuksetta tietokoneohjelmistoilla. Markkinoilla on useita melumallinnusohjelmistoja, joihin sisältyy tieliikennemelun ja raideliikennemelun pohjoismainen laskentamalli. Ohjelmistot laskevat melukartat niille syötettyjen kolmiulotteisten maastomallien perusteella. Laskennassa ne ottavat huomioon mm. liikenneväylien liikennemäärät, maastomuodot, rakennusten sijainnin ja korkeuden ja muut melun leviämiseen vaikuttavat tekijät.

Liikennemelun leviämistä voidaan arvioida myös mittauksin, mutta tavallisesti se on mahdollista vain haluttaessa selvittää melun keskiäänitaso jossakin tietyssä pisteessä tai rajallisessa määrässä pisteitä. Koska valtioneuvoston päätöksen mukaiset ohjeet koskevat koko vuorokautta, tulisi liikennemelua periaatteessa mitata koko vuorokauden ajalta. Tämä on harvoin kuitenkaan mahdollista, sillä mitattavan melun lisäksi mittaus-tulokseen sisältyy myös kaikki muu alueella mittausajanjakson kuluessa esiintynyt melu, esimerkiksi luonnonäänet ja työkoneiden äänet. Siksi mittaus tehdään tavallisesti lyhyemmältä jaksolta, jolta lasketaan myös liikennemäärä. Mittausjakson liikennemäärän ja liikenneväylän vuorokausiliikenteen perusteella lyhyemmältä ajanjaksolta mitattu keskiäänitaso voidaan muuntaa vastaamaan päivä- ja yöajan keskiäänitasoja. Mittauksia tehdään yleensä lähinnä meluntorjuntaratkaisujen toimivuuden toteamiseksi. Asema-kaavaa varten tarvittavat meluselvitykset perustuvat melumallinnusohjelmistojen kehitettyä lähes poikkeuksetta mallinnukseen.

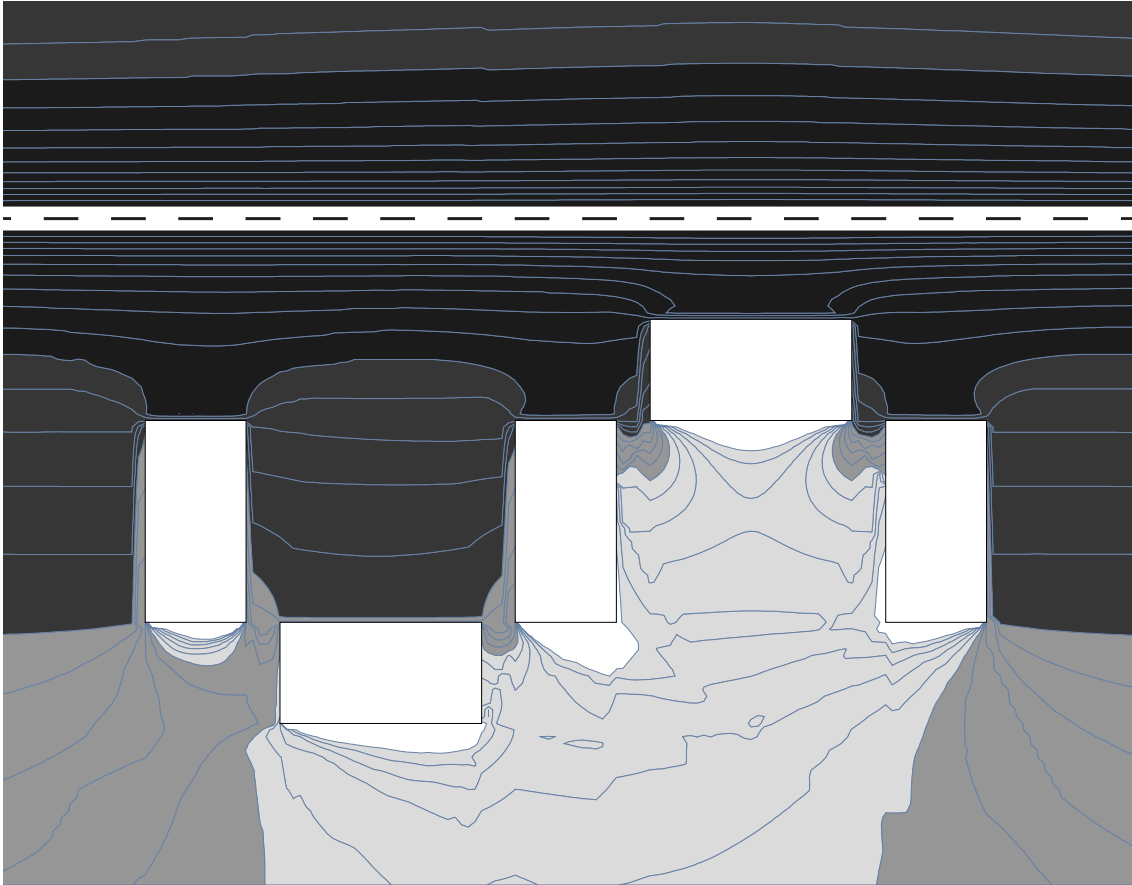
7.3 Meluntorjuntakeinot

7.3.1 Ennaltaehkäisy

Meluntorjuntakeinoista tärkein ja tehokkain on ennaltaehkäisy, jonka tulisi olla myös ensisijainen keino. Estämällä melua leviämistä meluntorjuntaa edellyttävälle alueelle saavutetaan aina paremmat olosuhteet kuin meluntorjunnan teknisin keinoin, kuten meluestein tai rakennuksen ulkokuoren ääneneristyksen suunnittelulla. Ennaltaehkäisevän melun torjunnan kannalta tärkeimmässä asemassa ovat ylemmät kaavatasot maakunta-kaava ja yleiskaava. Niitä laadittaessa on mahdollista vaikuttaa melua tuottavien ja hiljaisuutta edellyttävien alueiden erottamiseen toisistaan ja liikenteen pääväylien reitteihin. Asuntoalueella tehokkaita meluntorjuntakeinoja ovat esimerkiksi mutkien, hidaste-töyssyjen, liikenneympyröiden ja kavennusten suunnittelu alueiden kokoojakaduille. Melua voidaan vähentää myös suunnittelemalla kokoojakadut niin, että asuntoalueelle ei synny läpiajoa. [38, 44]

Asemakaavoituksessa mahdollisuudet melun ennaltaehkäisyyn ovat rajallisemmat. Tällöin ennalta ehkäisevänä meluntorjuntakeinona on lähinnä erilaisten toimintojen sijoittaminen kortteleihin niin, että vähiten meluntorjuntaa tarvitsevat toiminnot sijoitetaan suojaamaan eniten meluntorjuntaa edellyttäviä toimintoja. Meluntorjuntaa edellyttävät eniten asuinrakennusten lisäksi päiväkodit, koulut, vanhainkodit ja sairaalat. Vieläkin alhaisempia äänitasoja tulisi järjestää virkistysalueille. Niitä voidaan suojata myymälöillä, virastoilla, toimistoilla ja vastaavilla rakennuksilla (kuva 7.3). Usein käytetty tapa on suojata moottoritien tai valtatie varteen kaavoitettava asuinalue toimisto- tai liikerrakennuksin, jotka sijaitsevat lähimpänä tietä. Kun liikenneväylä on hiljaisempi, voidaan asuinrakennuksilla suojata pihojen oleskelualueita melulta.

Meluntorjuntaa edellyttäviä alueita on mahdollista suojata myös järjestämällä niiden ja melulähteen väliin suojavyöhykkeitä, toisin sanoen sijoittamalla esimerkiksi asuinrakennukset riittävän kauaksi vilkkaasta liikenneväylästä. Tämä ei kuitenkaan ole kovin tehokas meluntorjuntakeino, sillä etäisyyden kasvaessa kaksinkertaiseksi äänitaso alenee 3 dB. Jos meluntorjuntatarve on suuri, suojaetäisyydestäkin tulee silloin niin suuri, että sen toteuttaminen ei välttämättä ole mahdollista.



Kuva 7.3. Rakennusten sijoitus vaikuttaa kortteleiden sisälle syntyviin äänitasoihin. Tien keskimääräinen arki-
vuorokausiliikenne on 6000 ajoneuvoa ja nopeusrajoitus 60 km/h. Lähimmän rakennuksen etäisyys tien keski-
linjaan on 15 m. Melukartan tummimmalla alueella päivän keskiäänitaso on yli 65 dB, toiseksi tummimmalla yli
60 dB, kolmanneksi tummimmalla yli 55 dB ja neljänneksi tummimmalla yli 50 dB. Oikeanpuoleisella pihalla
melun keskiäänitaso on lähes koko pihan alueella alle 55 dB, sillä lähimpänä tietä sijaitseva rakennus suoja-
aa sitä melulta.

7.3.2 Rakennussuunnittelu

Kun ennaltaehkäisevä meluntorjunta ei ole mahdollista, meluhaittaa voidaan vähentää myös rakennussuunnittelun keinoin. Melulähteen puolelle voidaan sijoittaa esimerkiksi asuinrakennuksen porraskäytävät, kodinhoitohuoneet, keittiöt, pesutilat ja yhteiset tilat, jolloin melun häiritsevyyden kannalta tärkeämmät tilat eli makuuhuone ja olohuone voidaan sijoittaa rakennuksen hiljaisemmalle puolelle.

Usein käytetty melusuojaustapa on luhtikäytävän sijoittaminen melulähteen puolelle. Meluntorjunnan vuoksi toteutettava luhtikäytävä on lasitettava kauttaaltaan, sillä muuten sillä ei ole juuri mitään vaikutusta ulkoa sisälle pyrkivän melun äänitasoon.

7.3.3 Melusteet

Melusteet ovat liikenneväylien varsille tai korttelialueille tehtäviä rakenteita, joiden tehtävänä on estää äänen eteneminen suoraan suojattavaan kohteeseen. Melusteita tulisi tehdä vain siinä tapauksessa, että ennaltaehkäisevä meluntorjunta ei ole mahdollista tai riittävää. Meluste voidaan toteuttaa monella tavalla. Esteenä voi toimia meluaita, -valli ja kaide, jotka tavallisesti sijoitetaan liikenneväylän varrelle. Korttelialueella melusteina voivat toimia niiden meluvallin ja –aidan lisäksi myös piharakennukset, jätekatokset ja autotallit. [38, 44]

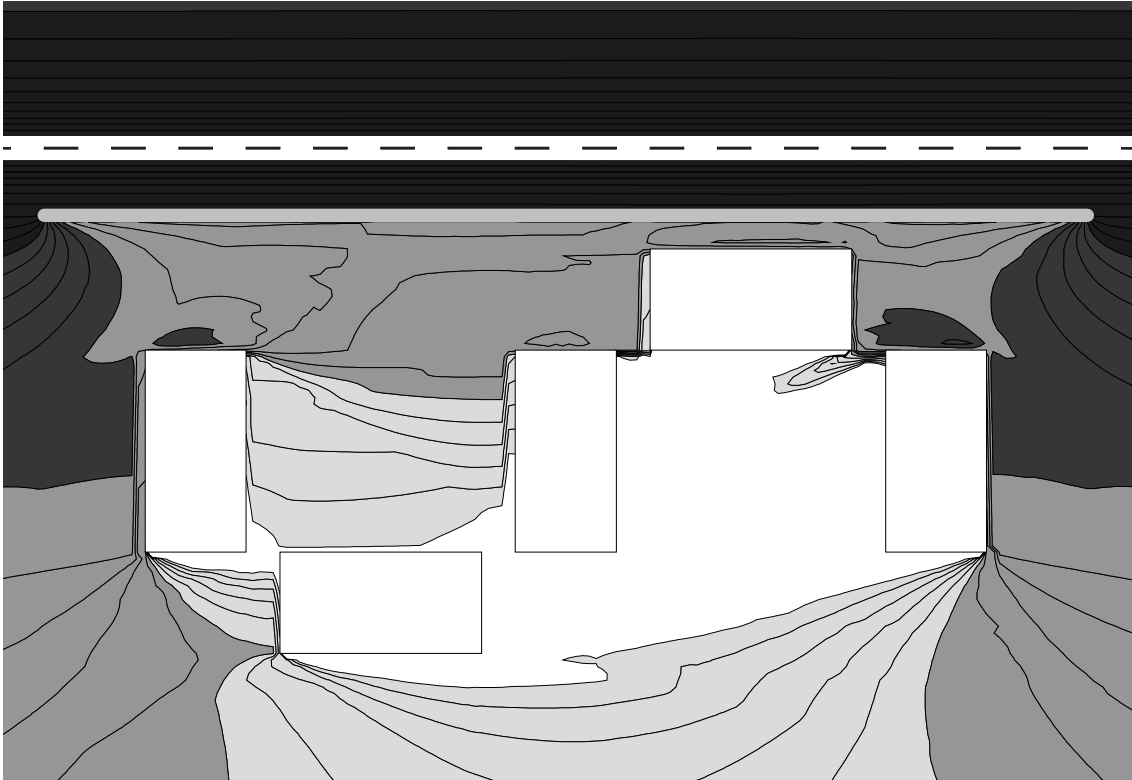
Melusteet toimivat sitä tehokkaammin, mitä korkeampia ne ovat. Liikenteen aiheuttama keskiäänitasoa saadaan alennetuksi 5 dB melusteilla, joiden korkeus on kohtuullinen, mutta jos meluntorjuntatarve on suurempi kuin 10 dB, melusteiden korkeus voi kasvaa huomattavasti. Toimiakseen tehokkaasti meluste tulee peittää suora näköyhteys suojattavasta kohteesta melulähteelle. Korkeita kerrostaloja suojattaessa on huomattava, että melusteilla voidaan vaikuttaa melun keskiäänitasoon lähinnä pihalla ja alimpien kerrosten korkeudella. Ylimpien kerrosten korkeudella vallitsevaan meluun esteet eivät vaikuta lainkaan (kuvat 7.4 ja 7.5).

Melusteet vaikuttavat myös ympäristöön ja maisemaan. Ne peittävät näkymiä, mutta niitä voidaan myös käyttää rikastuttamaan tiemaisemaa. Ympäristönsä helpoimmin sulautettava meluste on meluvalli, joka voidaan rakentaa noudattelemaan maastonmuotoja. Istutuksilla ja kasvillisuudella vallia voidaan maisemoida. Vallin tien puolen kaltevuuden tulee olla 1:2...1:1,5. Suojattavan kohteen puoli vallista on yleensä loivempi, joten valli vaatii paljon tilaa. Kun maapohja on kantava, valli on kuitenkin usein edullisin meluste, sillä niiden rakentamiseen tarvittava maa voidaan saada tiepohjan maa-aineksesta.

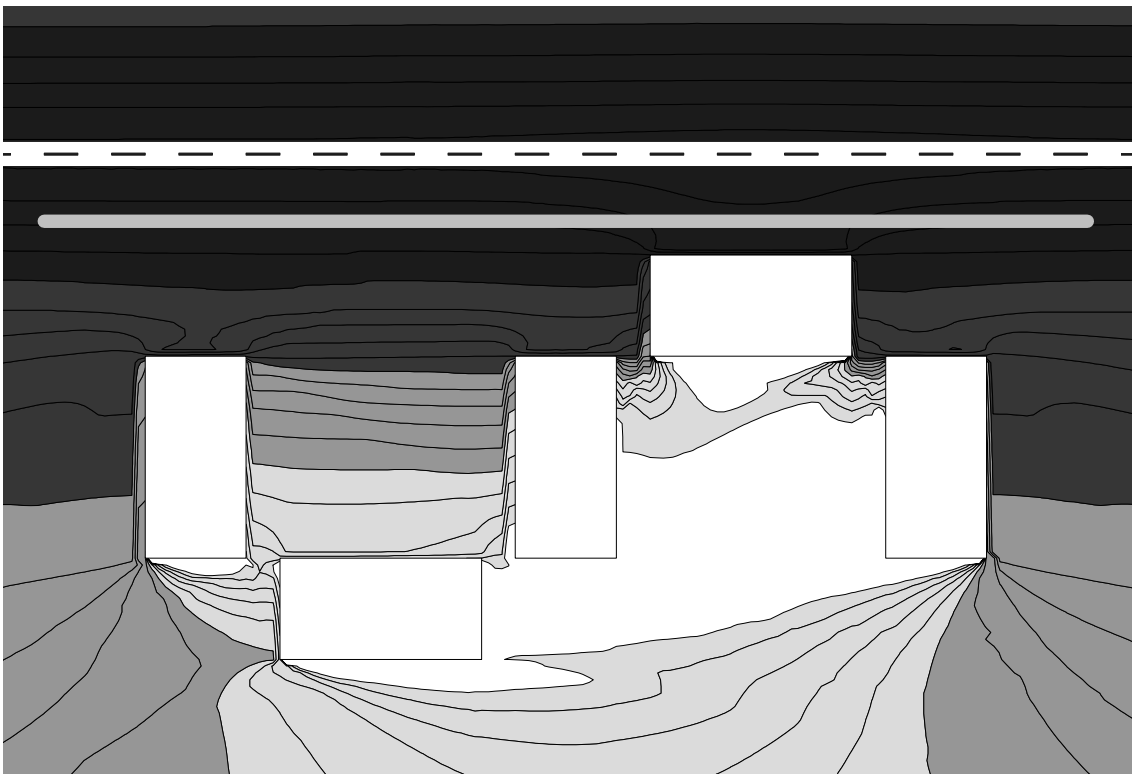
Meluaita voidaan tehdä puusta, betonista, tiilestä, harkoista, metallikaseteista ja erilaisista rakennuslevyistä. Toimiakseen tehokkaasti meluste tulee olla rakenteeltaan ääntä eristävä eli tiivis. Sen tulee ulottua maahan saakka yhtenäisenä rakenteena. Esimerkiksi puusäleikkö ei toimi meluaitana. Melusteesta voidaan tehdä hyvinkin korkea; pääkaupunkiseudulla on esimerkiksi kehä I:n varrella jopa noin 10 m korkeita melusteita. Meluste heijastaa ääntä itsestään pois päin, mikä voi vaikuttaa äänitasoon tien toisella puolella. Heijastuvaa ääntä voidaan vähentää pinnoittamalla meluste tien puoleinen pinta ääntä absorboivalla materiaalilla.

Melukaitteet ovat matalia meluaitoja, jotka on sijoitettu aivan ajoradan viereen. Niillä voidaan lähinnä vaikuttaa rengasmeluun. Tavallisesti melukaiteita käytetään silloin, kun näkymä halutaan säilyttää, esimerkiksi silloilla ja korkeilla penkereillä. Melukaiteiden suojausvaikutus on pieni, jos suojattava kohde sijaitsee samalla korkeudella kuin tie.

Jotta melukaiteella olisi merkittävää vaikutusta äänitasoon, suojattavan alueen tulisi olla tietä alempana.



Kuva 7.4. Tien varteen 10 m etäisyydelle tien keskilinjasta on tehty 2,5 m korkea meluaita. 2 m korkeudella maanpinnan tasosta se alentaa melun keskiäänitasoa vasemmanpuoleisella pihalla noin 10 dB.



Kuva 7.5. Kuvan 7.4 meluste ei vaikuta juuri lainkaan melun keskiäänitasoon 8 m korkeudella.

7.3.4 Parvekelasit

Asuinrakennusten parvekkeet katsotaan tavallisesti pihan leikki- ja oleskelualueisiin verrattaviksi tiloiksi, joten äänitaso parvekkeilla ei saisi ylittää valtioneuvoston päätöksen mukaista keskiäänitason ohjearvoa. Äänitasa parvekkeilla voidaan alentaa parvekelaseilla.

Tavanomaisilla avattavilla parvekelaseilla voidaan parhaimmillaan alentaa äänitasa noin 10 dB parvekkeilla, joilla on absorboivia pintoja, kuten pehmustettuja kalusteita. Niiden ääneneristyskyky riittää alentamaan keskiäänitason parvekkeilla sallittuun päiväajan ohjearvoon 55 dB, kun keskiäänitasa julkisivuilla on enintään noin 65 dB. Parvekelasien toimittajan tulisi osoittaa lasien vaimennuskyky esittämällä mittaustulokset.

Keskiäänitason ylittäessä parvekkeilla 65 dB tavanomaisten avattavien parvekelasien äänenvaimennuskyky ei ole riittävä. Parvekkeet voidaan tällöinkin toteuttaa, mutta lasitus on tällöin tehtävä kiinteäksi. Parvekkeen tuuletus järjestetään vaimennettujen kanalien kautta. Suositeltavampi ratkaisu on, että parvekkeita ei tehdä julkisivuille, joilla melun keskiäänitasa ylittää valtioneuvoston päätöksen mukaisen päiväohjearvon 55 dB.

7.3.5 Ulkokuoren ääneneristys

Asemakaavassa voidaan osoittaa korttelista rakennusalan sivu, jolle on annettu julkisivun ääneneristystä koskeva kaavamääräys. Kaavamerkintä on aaltoviiva. Kaavamääräyksen sanamuoto on [1, 52]: ”Merkintä osoittaa rakennusalan sivun, jonka puoleisen rakennuksen ulkoseinän sekä ikkunoiden ja muiden rakenteiden ääneneristävyyden liikennemelua vastaan on oltava vähintään XX dBA”. Kaavamääräyksessä voidaan lisäksi määrittellä, koskeeko vaatimus tie-, raide-, vai lentomelua. Lentomelua koskeva kaavamääräys voidaan esittää myös seuraavasti: ”Kaava-alueelle sijoitettavan rakennuksen kattorakenteiden, ulkoseinien, ikkunoiden sekä muiden rakenteiden tulee olla sellaisia, että ulko- ja sisämelutasojen erotus on vähintään XX dBA.”

Kaavamääräys tarkoittaa ulkona vallitsevan ja sisällä valtioneuvoston päätöksen mukaan sallittavan äänitason eroa A-painotettuna. Ulkona vallitseva äänitasa tarkoittaa rakennuksen ulkoseinän tasossa vallitsevaa äänitasa, johon ei sisälly seinästä tulevaa heijastusta. Heijastus korottaa äänitasa 3 dB. Kuvan 1 esimerkissä tietä lähinnä sijaitsevan rakennuksen tien puoleisella julkisivulla tien aiheuttaman melun keskiäänitasa on 65 dB. Asemakaavamääräyksessä esimerkkirakennuksen ulkokuoren ääneneristystä koskevan kaavamääräyksen lukuarvoksi muodostuisi siten $65 \text{ dB} - 35 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$.

Julkisivujen ääneneristystä koskevat kaavamääräykset perustuvat valtioneuvoston päätökseen melutason ohjearvoista, jotka ottavat huomioon melun aiheuttaman terveyshai-

tan. Ohjearvojen saavuttaminen ei takaa välttämättä asumismukavuutta tai viihtyisyyttä. Standardissa SFS 5907 esitetty rakennusten akustinen luokitus edellyttää esimerkiksi luokan B asuinrakennukselta 5 dB alhaisempaa keskiäänitasoa kuin valtioneuvoston päätös. Luokan A rakennuksessa äänitason tulee olla 10 dB alhaisempi kuin valtioneuvoston päätös edellyttää. Suunnittelussa standardin SFS 5907 luokitus voidaan ottaa huomioon lisäämällä kaavamääräykseen 5 tai 10 dB [54].

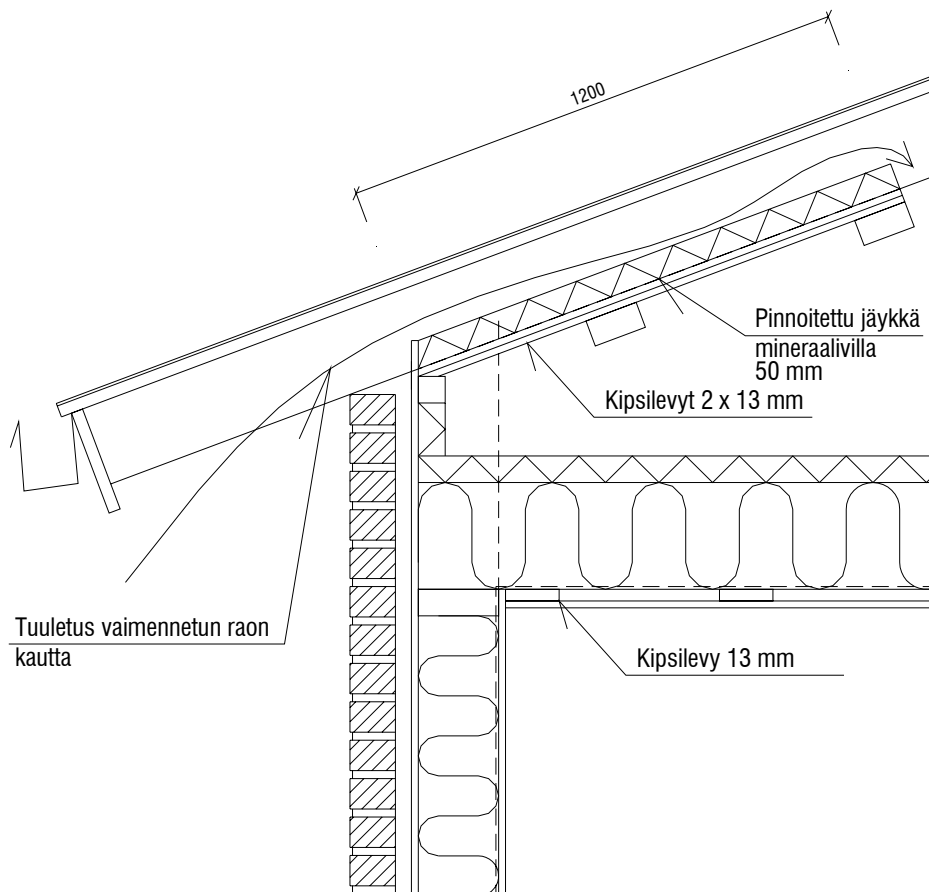
Melualueelle rakennettaessa ulkokuoren ääneneristystä koskeva kaavamääräys tulisi ottaa huomioon mahdollisimman alhaisessa vaiheessa. Kun kaavamääräyksen vaatimus on korkea (35-40 dB), tulisi jo luonnosvaiheessa selvittää, voidaanko melulähteen puoleisille julkisivuille sijoittaa asuinhuoneita ja millä ehdoilla, toisin sanoen minkä kokoisia ikkunat voivat olla ja millaisia ulkoseinärakenteita on mahdollista käyttää. Kaikissa tapauksissa, joissa kaavamääräys on annettu, ikkunoilta ja ikkunaovilta kaavamääräyksen täyttämiseksi vaadittava ääneneristyskyky on selvitettävä ehdottomasti ennen ikkunoiden tilaamista. Kaavamääräyksen ollessa 30-35 dB vaatimus voidaan tavallisesti toteuttaa normaalein rakentein, joten selvitys voidaan tehdä siinä vaiheessa, kun arkkitehti on laatinut ikkunakaaviot. Ulkokuoren ääneneristystä koskeva kaavamääräys vaikuttaa myös tilojen sijoittamiseen ja ulkoseinärakenteisiin:

- Kaavamääräys 40 dB: tavallisesti asuinrakennuksia ei tehdä alueille, joissa melutaso edellyttää näin korkeaa vaatimusta. Kaavamääräys johtaa ikkunoille ja ikkunaoville vaatimukseen, joita ei normaalituotannossa olevin tuottein välttämättä voida täyttää. Kevytrakenteisten ulkoseinärakenteiden käyttö ei ole mahdollista. Asuntojen melusuojaus on ratkaistava siten, että asuinhuoneita ei sijoiteta melulähteen suuntaan, vaan sinne sijoitetaan porrashuoneet, varastot ja muut vastaavat tilat ja huoneistoissa kodinhoitohuoneet, pesuhuoneet ja vastaavat tilat. Melulähteen puolella korvausilmaventtiilien käyttö ei ole yleensä mahdollista.
- Kaavamääräys 35 dB: asuinhuoneita voidaan sijoittaa melulähteen puolelle. Kevytrakenteisten ulkoseinärakenteiden käyttö on yleensä mahdollista, mutta ei suositeltavaa, sillä ikkunoilta vaadittava ääneneristyskyky on sitä suurempi, mitä heikompi ulkoseinän ääneneristyskyky on. Ulkoseinän kantava runko voi olla kevytrakenteinen, mutta ulkoverhouksena on suositeltavaa käyttää tiiltä.
- Kaavamääräys 30 dB: kaavamääräyksen vaatimukset voidaan täyttää normaalein ikkunarakentein ja korvausilmaventtiilein. Tavallisesti lämmöneristysmääräykset jo johtavat ikkunoihin, jotka täyttävät kaavamääräyksen vaatimukset. Koska kaavamääräyksen toteutuminen riippuu myös ikkunoiden pinta-aloista, on julkisivun ääneneristyskyky kuitenkin tarkistettava laskennallisesti. Kevytrakenteisten ulkoseinien käyttö on mahdollista, mutta tuulensuojalevynä on

käytettävä tiivistä rakennuslevyä, joka painaa vähintään 5 kg/m² (esimerkiksi tuulensuojakipsilevy).

Kaavamääräystä ei yleensä anneta, jos ulkona vallitsevan ja sisällä sallittavan äänitason ero on alle 30 dB. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kaikki rakenteet täyttäisivät tällöin valtioneuvoston päätöksen mukaiset melutason ohjearvot. Esimerkiksi ulkoseinä-rakenteita, joissa lämmöneristeenä on polyuretaani tai polystyreeni, ei yleensä voida käyttää melualueille rakennettaessa. Tämä johtuu siitä, että keveytensä vuoksi materiaalit ovat heikkoja ääneneristeitä ja kovuutensa vuoksi ne eivät absorboi ääntä kuten mineraalivilla, lisäksi ne kytkevät puurakenteissa sisä- ja ulkopuolisen levyn yhteen.

Lentomelualueella on otettava huomioon myös kattorakenne sekä äänen siirtyminen räystäään kautta yläpohjan tuuletustilaan. Räystäälle tulee tehdä vaimennettu tuuletusra-ko, joka koostuu kipsilevyrakenteesta ja mineraalivillakerroksesta. Kulkiessaan tuule-tusraon kautta ääni vaimenee ennen siirtymistään yläpohjan tuuletustilaan (kuva 7.6).



Kuva 7.6. Lentomelualueilla rakennusten räystäälle on tehtävä vaimennettu tuuletuskanava, jonka kautta kulkiessaan ääni vaimenee ennen siirtymistään yläpohjan tuuletustilaan [46].

Rakennuksen ulkokuoren ääneneristystä koskeva kaavamääräys tarkoittaa julkisivun kaikkien rakennusosien, kuten ulkoseinärakenteen, ikkunoiden, ikkunaovien ja korvausilmaventtiilien muodostaman kokonaisuuden ääneneristystä. Esimerkiksi kivirakenteisella julkisivulla (pinta-ala 10 m^2 , ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan 60 dB), jossa on ikkuna (pinta-ala 2 m^2 , ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan on 35 dB), saavutetaan kokonaisuuden ilmaääneneristyslukuksi 42 dB . Jos seinärakenne on kevytrakenteinen (ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan 40 dB), kokonaisuuden ilmaääneneristysluku heikkenee 39 desibeliin. Ikkunoiden ja korvausilmaventtiileiden heikkoa ääneneristystä ei voida kompensoida parantamalla raskasta julkisivurakennetta, koska kivirakenteisen seinän massan kaksinkertaistaminen kasvattaisi eristystä karkeasti vain 6 dB . Julkisivun parantaminen lisää eristävyttä vain, kun julkisivurakenne on kevyt. Kevytrakenteinen julkisivurakenne kuitenkin itsessään jo heikentää saavutettavaa eristystä.

Rakennusosien ääneneristysarvojen ilmoittamiseen on olemassa yli kymmenen indeksiä. Yhteistä niille on se, että kaikkien lähtökohtana on ilmaääneneristävyys R tai ilmaääneneristysluku R_w , jotka voidaan mitata laboratoriossa. Nämä arvot ovat painottamattomia fysikaalisia suureita. Liikenne- ja lentomelun äänispektri ei ole tasainen, joten se otetaan huomioon painottamalla mitattuja arvoja erilaisilla korjaustermeillä. Näin saadaan aikaan ISO-standardeissa 140 ja 717 esitetyt luvut $R_w + C_{tr}$ (ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan) ja $R_w + C$ (ilmaääneneristysluku lento- tai raidemelua vastaan). Tavallisesti mitattava taajuusalue on $100\text{--}3150 \text{ Hz}$. Tavallisesti ilmaääneneristysluku lento- ja raidemelua vastaan on $1\text{--}3 \text{ dB}$ heikompi kuin ilmaääneneristysluku R_w ; ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan taas on $1\text{--}3 \text{ dB}$ alhaisempi kuin ilmaääneneristysluku lento- tai raidemelua vastaan.

Korvausilmaventtiileiden ääneneristyskyky ilmoitetaan painotettuna yksikköääneneristävyytenä liikennemelua vastaan $D_{n,e,w} + C_{tr}$ tai muuta melua vastaan $D_{n,e,w} + C$. Käytännössä korvausilmaventtiilit ovat ulkoseinärakenteissa olevia rakoja, mutta niiden yksikköääneneristävyydet voivat silti olla $45\text{--}55 \text{ dB}$. Korvausilmaventtiileiden ääneneristyskykyä arvioitaessa on huomattava, että laboratoriomittauksissa venttiilin pinta-alaksi oletetaan 10 m^2 , sillä venttiilin tarkkaa pinta-alaa on mahdotonta mitata. Oletuksesta seuraa suuri näennäinen ääneneristävyys. Tämä tarkoittaa sitä, että myös ulkokuoren ääneneristystä laskettaessa venttiilin pinta-alaksi on laskettava 10 m^2 .

Voimassa olevat lämmöneristysmääräykset ovat johtaneet siihen, että uudisrakentamisessa korvausilmaventtiileitä ei enää juuri käytetä. Korjausrakentamisessa niitä kuitenkin käytetään yleisesti. Uudistuotannossa asuinrakennusten ilmanvaihto toteutetaan joko huoneistokohtaisilla lämmöntalteenottojärjestelmillä tai yhteiskanavajärjestelmillä. Ääntä voi siirtyä ulkoa sisään myös ilmanvaihdon jäte- ja raitisilmakanavien kautta. Jos ilmanvaihto on suunniteltu niin, että se täyttää rakennusten LVIS-laitteiden aiheuttamaa äänitasoa koskevat määräykset, kanavistossa on yleensä äänenvaimentimet puhallinää-

nen vaimentamiseksi. Yhteiskanavajärjestelmässä vaimentimet tarvitaan lisäksi asuinhuoneistoja yhdistäviin kanaviin riittävän ääneneristyksen saavuttamiseksi. Tavallisesti jäte- ja raitisilmakanavat eivät tällöin vaikuta ulkokuoren ääneneristykseen ja kaavamääräyksen toteutumiseen. Äänenvaimenninten lisäksi ulkoa sisään siirtyvää ääntä vaimentavat päätelaitteet sekä ilmanvaihtokoneiden suodattimet ja muut ilmankäsittelyosat.

7.4 Ulkokuoren ääneneristyksen suunnittelu

7.4.1 Laskentamenetelmät

Rakennuksen ulkokuoren ääneneristystä suunniteltaessa kohdataan kaksi ongelmaa. Ensinnäkin asemakaavamääräys on ilmoitettu äänitasojen eroina, mutta rakenteiden ääneneristyskyky ilmoitetaan ilmaääneneristyslukuina, joita ei ole mahdollista verrata suoraan asemakaavamääräykseen. Esimerkiksi ei ole mahdollista laskea rakennusosien pinta-alojen perusteella julkisivun yhteiseristävyyttä, jota verrattaisiin asemakaavamääräykseen. Äänen siirtyminen kahden suljetun tilan välillä voidaan laskea yksinkertaisesti tunnetuilla menetelmillä, kun tiloja erottavan rakenteen ilmaääneneristävyyydet tunnetaan ja vastaanottohuoneen absorptioalat tiedetään laskelmien tai mittausten perusteella. Oletuksena laskelmissa tällöin on, että sekä lähetys- että vastaanottotilassa äänikenttä on diffuusi. Tarkasteltaessa äänen siirtymistä ulkoa sisälle äänikenttä ulkona ei ole diffuusi.

Rakennuksen ulkokuoren ääneneristyksen mitoituksesta ei ole olemassa viranomaismääräyksiä. Ympäristöministeriön ympäristöoppaassa 108 vuodelta 2003 on esitetty VTT:n laatima mitoitusmenetelmä, joka on esitetty taulukkomuodossa. Ympäristöoppaan menetelmä johtaa kaavamääräyksen äänitasoerosta vaadittavan ilmaääneneristysluvun kullekin rakennusosalle. Ennen ympäristöoppaan menetelmän julkaisemista käytettiin niin sanottua äänitasoeromenetelmää, joka johtaa rakennusosien ilmaääneneristyslukuista julkisivun tuottaman äänitasoeron, jota voidaan verrata kaavamääräyksen äänitasoeroon. Kummallakin menetelmällä on omat etunsa, joita käsitellään jäljempänä. Useimmissa tapauksissa menetelmät johtavat samaan lopputulokseen [34].

7.4.2 Ympäristöopas 108

Ympäristöoppaan 108 [52] mukaan yhden huoneen julkisivua kokonaisuutena koskeva ääneneristyslukuvaatimus saadaan kaavamääräyksen äänitasoeron ΔL_A perusteella:

$$R_{\text{tr,vaad}} = \Delta L_A + K_1 + 7 \quad (7.1)$$

Tekijä K_1 riippuu tarkasteltavan julkisivun pinta-alan S ja lattian pinta-alan S_H suhteesta taulukon 7.1 mukaisesti. K_1 ottaa huomioon muun muassa tarkasteltavan huoneen absorptioalan.

Taulukko 7.1. Tekijän K_1 arvot julkisivun pinta-alan S ja huoneen lattian pinta-alan funktiona.

S/S_H	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4
K_1	+5	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

Taulukko 7.2. Tekijän K_2 arvot julkisivussa olevien ikkunoiden ja ikkunaovien yhteispinta-alan ΣS_i ja tarkasteltavan julkisivun pinta-alan S suhteen funktiona.

$\Sigma S_i/S$	$\leq 0,10$	0,13	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	$\geq 0,50$
K_2	-6	-5	-4	-3	-3	-2	-1	0

Ympäristöoppaan menetelmässä käytetään pelkästään ilmaääneneristyslukuja liikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ (ympäristöoppaassa summasta käytetään merkintää $R_{A,tr}$) riippumatta siitä, tutkitaanko julkisivun ääneneristystä tie-, raide- vai lentomelua vastaan. Ulkoseinärakenteen ilmaääneneristysluvun liikennemelua vastaan tulee olla 3 dB suurempi kuin koko julkisivulta vaadittava ilmaääneneristysluku $R_{tr, vaad}$:

$$R_{A,tr,seinä} \geq R_{tr,vaad} + 3 \quad (7.2)$$

Lentomelualueilla yläpohjarakenteen ilmaääneneristysluvun tulee olla vähintään 5 dB korkeampi kuin koko julkisivulta vaadittava ilmaääneneristysluku:

$$R_{A,tr,yläpohja} \geq R_{tr,vaad} + 5 \quad (7.3)$$

Ovilta ja ikkunoilta vaadittava ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan riippuu niiden pinta-alasta, joka otetaan huomioon tekijällä K_2 (taulukko 7.2).

$$R_{A,tr} \geq R_{tr,vaad} + K_2 \quad (7.4)$$

Korvausilmaventtiilien ilmaääneneristysluvun liikennemelua vastaan tulee olla vähintään 5 dB korkeampi kuin koko julkisivulta vaadittava ilmaääneneristysluku:

$$D_{n,e,A,tr} \geq R_{tr,vaad} + 5 \quad (7.5)$$

Korvausilmaventtiilien ääneneristävyyden mitoitus perustuu siihen, että julkisivuun asennetaan vain yksi venttiili noin 8-10 m² alaa kohti. Jos venttiileitä on enemmän, niiden ääneneristysvaatimusta korotetaan 2 dB.

Ympäristöoppaassa esitetty mitoitusmenetelmä on yksinkertainen ja sillä voidaan nopeasti tarkistaa, ovatko rakennusosien ilmaääneneristysluvut liikennemelua vastaan oikein valittuja. Menetelmä onkin ensisijaisesti tarkoitettu rakennusvalvonnan työkaluksi.

Suunnittelutyökaluna sen käyttökelpoisuus on rajallisempi, sillä menetelmällä ei ole mahdollista tutkia, miten eri rakennusosien ääneneristyskyvyn muuttaminen vaikuttaa kokonaisuuteen. Tällä on merkitystä erityisesti silloin, kun ulkokuoren ääneneristystä koskeva kaavamääräys on korkea ja ulkoseinät kevytrakenteisia: menetelmä voi antaa ikkunoille niin korkeat vaatimukset, että vaatimukset täyttäviä ikkunoita ei ole saatavissa normaalissa tuotannossa. Tällöin tulisi muiden rakennusosien ääneneristystä parantaa tai pienentää ikkunapinta-alaa [34].

7.4.3 Äänitasoeromenetelmä

Kun otetaan huomioon ulkona vallitsevan äänikentän epädiffuusisuus, ikkunan suuntaavuus rakennuksen sisällä ja tavanomaisen asuinhuoneen absorptioala, ulkoa sisälle siirtyvän äänen A-painotettu äänitaso saadaan lasketuksi ulkona vallitsevasta äänitasosta L_u ja ilmaääneneristysluvusta tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ tai raide- ja lentomelua vastaan $R_w + C$. Huoneeseen tietyn rakennusosan kautta välittyvä äänitaso L_s riippuu rakennusosan pinta-alan S_i suhteesta lattian pinta-alaan S_H [13, 46]:

$$L_s = L_u - (R_w + C_{tr}) + 7 + 10 \lg \frac{S_i}{S_H} \quad (7.6)$$

Kaavalla 7.6 voidaan laskea kaikkien julkisivun rakennusosien kautta ulkoa sisälle siirtyvät äänitasot. Koska kaavamääräyksessä ei yleensä ilmoiteta ulkona vallitsevaa äänitasa, vaan äänitasoero, kaavaa 7.6 on yleensä käytettävä äänitasoeron ΔL_A ratkaisemiseksi:

$$\Delta L_A = L_u - L_s = (R_w + C_{tr}) - 7 - 10 \lg \frac{S_i}{S_H} \quad (7.7)$$

Äänitasoero lasketaan kunkin rakennusosan kautta erikseen. Tämän jälkeen lasketaan rakennusosien yhdessä tuottama äänitasoero, jonka tulee olla vähintään yhtä suuri kuin kaavamääräyksen edellyttämä äänitasoero ΔL_A :

$$(L_u - L_s)_{\text{kok}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n 10^{-(L_u - L_s)_i}} \right) \quad (7.8)$$

Rakennusosien ilmaääneneristysluvut tie- tai muuta liikennemelua vastaan mitataan laboratoriossa. Rakennukseen asennettuna esimerkiksi ikkunat eivät tuota yhtä hyviä ilmaääneneristyslukuja sivutiesiirtymän, asennustyössä tapahtuvien epätarkkuuksien ja

tiivisteiden kulumisen ja vanhenemisen vuoksi. Tämä otetaan huomioon pienentämällä laboratoriossa mitattuja ilmaääneneristyslukuja laskennassa 3 dB. Laskennassa on huomattava se, että korvausilmaventtiilin yksikköääneneristävyyksiä käytettäessä pinta-alana S_i on oltava 10 m^2 .

8

Lähdekirjallisuus



1. Asemakaavamerkinnot ja -määräykset. 2003. Helsinki, ympäristöministeriö, opas 12.
2. Asumisterveysohje – Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. 2003. Helsinki, sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1.
3. Barron, M. 2000. Auditorium acoustics and architectural design. Lontoo, E & FN Spon.
4. Beranek, L. 2004. Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture. New York, Springer-Verlag.
5. Betonirakenteiden äänitekniikka. 2000. Helsinki, Rakennustuoteteollisuus RTT ry.
6. Björk, E. 1997. Meluntorjunta. Kuopio, Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitos.
7. EN 12354-1. 2000. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between elements. Brussels, European Committee for Standardization.
8. EN 12354-2. 2000. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms. Brussels, European Committee for Standardization CEN.
9. EN 12354-6. 2003. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 6: Sound absorption in enclosed spaces. Brussels, European Committee for Standardization.
10. Fasold, W. & Veres, E. 1998. Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berliini, Verlag für Bauwesen.
11. Hakala-Zilliacus, L.-M. 2002. Suomen eduskuntatalo. Helsinki, Suomalaisen Kirjallisuuden Seura.
12. Heinonen-Guzejev, M. & Vuorinen, H.S. 2001. Meluherkkyys sekä liikennemelun raportointi ja häiritsevyys. Helsinki, ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 471.
13. Helimäki, H. 1988. Tieliikennemelun laskenta. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto.

14. Helimäki, H. 2003. Savonlinnasali ja Olavinlinnan katos. Akustiikkapäivät 2003. Turku, 6.-7.10., Akustinen Seura ry, s. 135-139.
15. Hietala, J. 2001. Kelluvan betonilaatan kaareutuminen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, talonrakennustekniikan laboratorio, tutkimusraportti 108.
16. Holmberg, R. & Laine, J. 1984. Ilmanvaihtolaitoksen äänitekniset perusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 360.
17. Homb, A., Hveem, S. & Strøm, S. 1983. Lydisolerende konstruksjoner – Datasampling og beregningsmetode. Oslo, Norges byggforskningsinstitutt, anvisning 28.
18. Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyuden ennustemalli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2.
19. Hongisto, V., Keränen, J, & Larm, P. 2004. Simple model for the acoustical design of open-plan offices. Acta Acustica, vol. 90(3), s. 481-495.
20. Hunt, F. V. 1978. Origins in acoustics – The science of sound from antiquity to the age of Newton. New Haven, Yale University Press.
21. Ilmonen, K. 1996. Yleisradion historia 3: Tekniikka, kaiken perusta. Helsinki, Yleisradio Oy.
22. ISO 140-3. 1995. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. Genève, International Organization for Standardization
23. ISO 140-4. 1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Genève, International Organization for Standardization.
24. ISO 140-6. 1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors. Genève, International Organization for Standardization.
25. ISO 140-7. 1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. Genève, International Organization for Standardization.
26. ISO 140-8. 1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 8: Laboratory measurements of the reduction of the trans-

- mitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor. Genève, International Organization for Standardization.
27. ISO 717-1. 1996. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Genève, International Organization for Standardization.
 28. ISO 717-2. 1996. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Genève, International Organization for Standardization.
 29. Keronen, A. & Kylliäinen, M. 1997. Sound insulating structures of beam-to-column framed wooden apartment buildings. Tampere, Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, Publication 77.
 30. Kristensen, J. & Rindel, J. H. 1989. Bygningsakustik - teori og praksis. Glostrup, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166.
 31. Kuttruff, H. 2000. Room acoustics (4. p.). Lontoo, E & FN Spon.
 32. Kylliäinen, M. & Keronen, A. 1999. Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuinkerrostaloissa. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, talonrakennustekniikan laboratorio, julkaisu 97.
 33. Kylliäinen, M. 2003. Uncertainty of impact sound insulation measurements in field. Tampere, Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, Research Report 125.
 34. Kylliäinen, M. 2005. Rakennuksen ulkokuoren rakennusosilta vaadittava ääneneristävyys. Akustiikkapäivät 2005. Kuopio, 26.-27.9., Akustinen Seura ry, s. 78-83.
 35. Kylliäinen M. & Helimäki, H. 2005. Kansallisoopperan orkesteriharjoitussalin huoneakustiikan ongelmat. Akustiikkapäivät 2005. Kuopio, 26.-27.9., Akustinen Seura ry, s. 90-94.
 36. Lahtela, T. 2004. Ääneneristys puutalossa. Helsinki, Wood Focus Oy.
 37. Laki eräistä naapuruussuhteista. Suomen säädöskokoelma, nro 26/1920.
 38. Liikennemelun huomioon ottaminen kaavoituksessa, LIME-työryhmän mietintö. 2001. Helsinki, ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 493.

39. Liikenteen kehitys Helsingissä vuonna 2003. 2004. Helsinki, Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston julkaisuja 2004:5.
40. Lindsay, B. 1973. Acoustics: historical and philosophical development. Stroudsburg, Dowden, Hutchinson & Ross.
41. LVI 20-10328, Vesi- ja viemärlaitteiden äänitekniinen suunnittelu. 2001. Helsinki, Rakennustieto Oy.
42. LVI 30-10333, Ilmanvaihtolaitteiden äänitekniinen suunnittelu ja äänenvaimennus asuinrakennuksissa. 2002. Helsinki, Rakennustieto Oy.
43. Lyytinen, E. 1996. Yleisradion historia 1: Perustamisesta talvisotaan. Helsinki, Yleisradio Oy.
44. Meluestekäsikirja. 1997. Jyväskylä, Suomen kuntatekniikan yhdistys, julkaisu 18.
45. Olesen, H. 1992. Measurements of the acoustical properties of buildings – additional guidelines. Espoo, Nordtest, NT Technical Report 203.
46. RIL 129, Ääneneristysten toteuttaminen. 2003. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.
47. RIL 205. 2003. Puurakenteiden suunnittelu, euronormi. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.
48. RIL 120. 2004. Puurakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.
49. Pääkaupunkiseudun pääväylien meluntorjuntaohjelma vuosille 2000-2020. Helsinki, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV, pääkaupunkiseudun julkaisusarja B2000:6.
50. Pääkaupunkiseudun rautateiden meluntorjuntaohjelma vuosille 2001-2020. Helsinki, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV, pääkaupunkiseudun julkaisusarja B2001:13.
51. Raideliikennemelun laskentamalli. 2002. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 97.
52. Rakennuksen julkisivun ääneneristävyysmitoittaminen. 2003. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 108.

53. Sala, E., Sihvo, M. & Laine, A. 2003. Ääniergonomia – toimiva ääni työvälteenä. Helsinki, Työterveyslaitos ja Työturvallisuuskeskus.
54. SFS 5907. Rakennusten akustinen luokitus. 2004. Helsinki, Suomen Standardisoi-
misliitto SFS ry.
55. Sipari, P., Heinonen, R. & Parmanen, J. 1998. Acoustic properties of wooden floor
slabs. Espoo, Technical Research Centre of Finland VTT, VTT Publications 345.
56. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta ra-
kennuksessa – Määräykset ja ohjeet. 1998. Helsinki, ympäristöministeriö.
57. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilman-
vaihto – Määräykset ja ohjeet. 2003. Helsinki, ympäristöministeriö.
58. Sääksvuori, O. & Kylliäinen, M. 2002. AWS-väliseinien ääneneristyksen suunnitte-
lu. Teräsrakenne. Nro 4, s. 44-45.
59. Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo, VTT
Tiedotteita 2278.
60. Templeton, D. 1993. Acoustics in the built environment. Oxford, Butterworth Archi-
tecture.
61. Thompson, E. 2002. The soundscape of modernity – Architectural acoustics and the
culture of listening in America, 1900-1933. Cambridge, The MIT Press.
62. Tieliikennemelun laskentamalli. 1993. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristön-
suojeluosaston ohje 6/1993.
63. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista. Suomen säädöskokoelma, nro
993/1992.
64. Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta,
I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötila-
olosuhteet, ilmanvaihto ja tiiviys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, talon-
rakennustekniikan laboratorio, tutkimusraportti 131.
65. Ympäristöhallinnon meluntorjunnan yleiset linjaukset. 2002. Helsinki, ympäristö-
ministeriö, ympäristöministeriön moniste 102.



Talonrakennustekniikan tutkimusraportit v. 1998 – 2006

- 138 Heinisuo, M., Aalto, A., Stiffening of Steel Skeletons Using Diaphragms. TUT 2006. 31 p. 7 app. 34 €.
- 137 Kylliäinen, M., Talonrakentamisen akustiikka. TTY 2006. 205 s. 42 €.
- 136 Varjonen, S., Mattila, J., Lahdensivu, J. & Pentti, M., Conservation and Maintenance of Concrete Facades Technical Possibilities and Restrictions. TUT 2006. 29 p.
- 135 Heinisuo, M., Ylihärsilä, H., All metal structures at elevated temperatures. TUT 2006. 54 p. 37 app. 34 €.
- 134 Aho, H., Inha, T., Pentti, M., Paloturvallinen rakentaminen EPS-eristeillä. TTY 2006. 106 s. + 38 liites. 42 €.
- 133 Haukijärvi, M., Varjonen, S., Pentti, M., Julkisivukorjausten turvallisuus. TTY 2006. 25 s. + 111 liites.
- 132 Heinisuo, M., Kukkonen, J., Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3. TUT 2005. 41 p. 34 €.
- 131 Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A., Jokisalo, J., Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. TTY 2005. 102 s. + 10 liites. 42 €.
- 130 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Valovirta, I. Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta diffuusion kannalta tarkasteltuna. 42 € (julkaistaan lähiaikoina)
- 129 Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., Käkelä, P. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. TTY 2005. 101 s. + 211 liites. 42 €.
- 128 Leivo, V., Rantala, J., Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta. TTY 2005. 140 s. 34 €.
- 127 Lahdensivu, J., Luonnonkiviverhottujen massiivitiiliseinien vaurioituminen ja korjausperiaatteet. TTY 2003. 156 s. + 9 liites. 34 €.
- 126 Leivo, V., Hirsirakennuksen yläpohjan tiiviys – vaikutus lämpöenergiankulutukseen. TTY 2003. 63 s.
- 125 Kylliäinen, M., Uncertainty of impact sound insulation measurements in field. TUT 2003. 63 p. + 50 app. 34 €.
- 124 Myllylä, P., Lod, T. (toim.), Pitkäikäinen puurakenteinen halli, toimiva kosteustekniikka ja edullinen elinkaari. TTY 2003. 143 s. + 6 liites. 34 €.
- 123 Mattila, J., Pentti, M., Suojaustoimien tehokkuus suomalaisissa betonijulkisivuissa ja parvekkeissa. TTY 2004. 69 s. 42 €.
- 122 Leivo, V., Rantala, J., Moisture Behavior of Slab-on-Ground Structures. TUT 2003. 100 p. + 12 app. 34 €.
- 121 Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaiset alapohjarakenteet – kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. TTKK 2002. 33 s. + 11 liites.
- 120 Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. TTKK 2003. 106 s. + 13 liites. 34 €.
- 119 Lindberg, R., Wahlman, J., Suonketo, J., Paukku, E., Kosteusvirtatutkimus. TTKK 2002. 92 s. + 3 liites. 34 €.
- 118 Hietala, J., Kelluvan betonilattian kaareutuminen, osa II. TTY 2003. 58 s. + 12 liites. 30 €.
- 117 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Comparison of the Moisture Behaviour of Timber-Framed Wall Structures in a One-Family House. 34 € (julkaistaan lähiaikoina)
- 116 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailu omakotitalossa. TTKK 2002. 54 s. + 11 liites. 34 €.
- 115 Junttila, T., Venäjän rakennusalan säädöstö ja viranomaishallinto, osa I ja II TTKK 2001. 97 s. 34 €
- 114 Junttila, T., (toim.) Venäjän rakennusalan tuotekortit. TTKK 2001. 63 s. 34 €



- 113 Junttila, T., Lod, T., Aro, J., Rakennusinvestointihankkeen toteuttaminen Moskovassa. TTKK 2001. 112 s. + 11 liites. 34 €
- 112 Junttila, T., (toim.), Venäjän rakentamisen oppikirja. Osa B: Talonrakennustekniikka. TTKK 2001. 174 s. 34 €
- 111 Junttila, T., (toim.) Venäjän rakentamisen oppikirja. Osa A: Liiketoimintaympäristö ja rakennushankkeen johtaminen. TTKK 2001. 173 s. + 21 liites. 34 €
- 110 Юнттила, Т. (под ред.), Управление недвижимостью в России. Теория и практические примеры. Технический университет Тампере 2001. 356 стр. + приложения на 33 стр. 34 €
- 109 Junttila, T., (toim.) Kiinteistöjohtaminen Suomessa ja Venäjällä. Edellytykset kiinteistöalan yhteistyölle. TTKK 2001. 293 s. + 54 liites. 34 €
- 108 Hietala, J., Kelluvan betonilattian kaareutuminen. TTKK 2001. 80 s. + 7 liites. 34 €
- 107 Binamu, A., Lindberg, R., The Impact of Air Tightness of The Building Envelope on The Efficiency of Ventilation Systems with Heat Recovery. TTKK 2001. 62 p. + 7 app., 25 €
- 106 Leivo, V., Rantala, J., Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. TTKK 2000. 124 s. 34 €
- 105 Junttila, T. (toim.), Venäjän federaation kaavoitus- ja rakennuslaki. TTKK 2000. 49 s. 34 €
- 104 Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R., Carbon Dioxide Permeability of Cellulose-Insulated Wall Structures. TUT 2000. 46 p. + 9 app. 25 €
- 103 Vinha, J., Käkälä, P., Water Vapour Transmission in Wall Structures Due to Diffusion and Convection. TUT 1999. 110 s. 34 €
- 102 Suonketo, J., Pessi, A-M., Pentti, M.,
- 101 Pessi, A-M., Suonketo, J., Pentti, M., Raunio-Lehtimäki, A. Betonielementtijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus. TTKK. 1999. 88 s. + 6 liites. 42 €
- 100 Pentti, M., Haukijärvi, M., Betonijulkisivujen saumausten suunnittelu ja laadunvarmistus. TTKK 2000. 2. täydennetty painos. 78 s. + 3 liites. 42 €
- 99 Torikka, K., Hyypöläinen, T., Mattila, J., Lindberg, R., Kosteusvauriokorjausten laadunvarmistus. TTKK 1999. 106 s. + 37 liites. 34 €
- 98 Mattila, J., Peuhkurinen, T., Lähiökerrostalon lisärakentamishankkeen tekninen esiselvitysmenettely. Korjaus- ja LVIS-tekninen osuus. TTKK 1999. 48 s.
- 97 Kylliäinen, M., Keronen, A., Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuinkerrostaloissa. TTKK 1999. 59 s. + 37 liites. 34 €
- 96 Vinha, J., Käkälä, P., Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. TTKK 2001. 3 painos. 81 s. + 29 liites. 34 €
- 95 Leivo, V. (toim.), Opas kosteusongelmiin – rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma. TTKK 1998. 157 s. 25 €
- 94 Pentti, M., Hyypöläinen, T., Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. TTKK 1999. 150 s. + 40 liites. 42 €
- 93 Lepo, K., Laatujärjestelmän kelpoisuus. TTKK 1998. 101 s. + 50 liites.
- 92 Berg, P., Malinen, P., Leivo, V., Internal Monitoring of The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries – Rapid Programme. TUT 1998. 81 s. + 93 liites.
- 91 Berg, P., Salminen, K., Leivo, V., Nopeat tuotantojärjestelmät teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1998-2000 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1998. 55 s. + 37 liites.

Raportin hinta: 20 €+ alv 8 %, ellei toisin ole mainittu. Oikeus hinnanmuutoksiin pidätetään.

**Myynti: Tietokirjakauppa Juvenes, Korkeakoulunkatu 1, 33720 Tampere
Puh.(03) 3115 2351, faksi (03) 3115 2191 tai Tampereen teknillinen yliopisto,
Terttu Mäkipää puh. (03) 3115 4804, terttu.makipaa@tut.fi**

Tampereen teknillinen yliopisto
Rakennetekniikan laitos
PL 600
33101 Tampere

Tampere University of Technology
Institute of Structural Engineering
P.O.B. 600
FI-33101 Tampere, Finland

ISBN 952-15-1650-X
ISSN 1796-3206