

Mikko Kylliäinen

Sakari Tervo

Arttu Yli-Pietilä

Talonrakentamisen akustiikka



2. uudistettu laitos

Tampereen yliopisto
Erillisteokset ja sarjajulkaisut
Tampere 2023

Kansikuva on tekoälyn näkemys akustisista mittauksista. Näkemyksensä on antanut tekoälysovellus DALL·E2.

ISBN 978-952-03-2743-9

Lukijalle

Suomenkielistä kirjallisuutta akustiikasta on julkaistu varsin vähän, etenkin rakennustekniikan opiskelijoille sopivia oppikirjoja. Ympäristöministeriön ääniympäristöasetuksen tultua voimaan vuoden 2018 alussa aiemmat oppikirjat vanhentuivat, niin myös tämän kirjan ensimmäinen laitos vuodelta 2006. Akustiikan opetus Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnassa on viime vuosina laajentunut, joten myös siksi on ollut aiheellista tehdä oppikirjasta uusi laitos.

Tarkoituksena on ollut esittää asioita, jotka auttavat ymmärtämään sitä, miksi erilaiset ääntä eristävät rakennusosat tai absorboivat materiaalit ovat sellaisia kuin 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 tarjoaa joukon akustiikan kaavoja. Niiden sisältämien muuttujien vaikutusta havainnollistavat kuvat, jotka vastaavat myös suunnittelu- ja työmaakokouksissa usein esille tuleviin kysymyksiin.

Lähteinä on pyritty käyttämään suomenkielistä kirjallisuutta, joka on lukijan helposti hankittavissa, kuten konferenssiesitelmiä, tutkimusraportteja sekä viranomaismääräyksiä ja -ohjeita. Kaikin osin tämä ei kuitenkaan ole ollut mahdollista. Lähteet on luetteloitu luvuittain ja tavoitteena on ollut käyttää mahdollisimman tuoretta tutkimuskirjallisuutta. Suurin osa lähteistä on löydettävissä verkosta, vaikka sitä lähdeluetteloissa ei erikseen mainita. Valokuvat ja piirroksot ovat pääosin peräisin suunnittelutoimisto A-Insinöörien kuva-arkistosta ja kaaviot on laadittu A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikön suunnittelutyökaluilla.

Oppikirja käsittelee vain rakentamiseen ja jossain määrin kaavoitukseen liittyviä asioita. Siten kirjan tästä painoksesta on jätetty pois asumisterveysasetusta ja sen sovellusohjeita käsittelevä luku, sillä nämä säädökset ja ohjeet kuuluvat rakentamista ja kaavoitusta koskevia säädöksiä antavan ympäristöministeriön sijasta sosiaali- ja terveysministeriön hallinnonalaan, vaikka ne joissakin tilanteissa vaikuttavatkin akustiikkasuunnitteluun.

Kirjoitustyötä on tukenut Rakentamisen Laatu Säätiö myöntämällä tukea Tampereen yliopiston rakennustekniikan yksikölle kirjan laatimiseksi. Esitän siitä säätiölle parhaat kiitokseni. Kiitän myös kirjoitustyön viime vaiheissa mukaan tulleita kanssakirjoittajiani TkT Sakari Tervoa (luvut 7 ja 11) ja DI Arttu Yli-Pietilää (muiden lukujen esimerkkilaskelmat ja kaaviokuvat) sujuvasta ja tarmokkaasta yhteistyöstä kirjahankkeen parissa.

Akustiikka on mielenkiintoinen ja nopeasti kehittyvä tieteenala sekä laaja ja monipuolinen suunnitteluala. Toivon, että myös tämä näkökulma välittyy lukijalle oppikirjan sivuilta.

Tampereella 31.12.2022

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 Uuno Varjo 1938

Sisällys

Lukijalle.....	3
Sisällys	5
1 Johdanto.....	11
1.1 Talonrakentamisen akustiikka	13
1.1.1 Akustiikka tieteen ja tekniikan alana	13
1.1.2 Akustiikan kehitys antiikista 1900-luvulle	14
1.1.3 Akustiikkasuunnittelun tavoitteet	18
1.1.4 Akustiikka osana rakennushanketta	20
1.2 Määräykset ja ohjeet	23
1.2.1 Määräysten kehitys ja vaikuttavuus	23
1.2.2 Ääniympäristöasetus	26
1.2.3 Ääniympäristöohje.....	28
1.2.4 Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus	29
1.2.5 Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista	30
Luvun 1 lähteet	31
2 Äänen eteneminen ja vaimeneminen	35
2.1 Äänen ominaisuuksia	37
2.1.1 Taajuus	37
2.1.2 Äänenpainetaso	38
2.1.3 A-painotus ja äänitaso.....	41
2.1.4 Äänitehotaso	43
2.1.5 Etäisyysvaimennus	43
2.2 Äänenpainetaso huoneessa.....	47
2.2.1 Absorptio	47
2.2.2 Jälkikaiunta-aika.....	49
2.2.3 Huoneen äänenpainetason muodostuminen	51
Luvun 2 lähteet	53
3 Ilmaääneneristys	55
3.1 Ilmaääneneristävyys	57
3.1.1 Rakennusosan ilmaääneneristävyys ja ilmaääneneristävyys tilojen välillä	57
3.1.2 Ilmaääneneristävyyden määritelmä	58
3.1.3 Ilmaääneneristävyyden laskentamallit	58
3.2 Yksinkertaiset rakennusosat	61
3.2.1 Ilmaääneneristävyyden laskenta.....	61
3.2.2 Rakennuslevyt.....	65
3.2.3 Kevyet kivirakenteet	66
3.2.4 Raskaat kivirakenteet.....	67
3.3 Kaksinkertaiset rakennusosat	68
3.3.1 Ilmaääneneristävyyden laskenta.....	68
3.3.2 Rankojen vaikutus.....	72

3.3.3 Ilmavälin kaiunta	72
3.4 Ilmääneneristysluku.....	75
3.4.1 Ilmääneneristävyyden mittaaminen laboratoriossa.....	75
3.4.2 Ilmääneneristysluvun laskeminen	75
3.4.3 Spektripainotusermit	79
3.5 Rakennusosan tiiviys	81
3.5.1 Raon vaikutus ilmääneneristävyyteen	81
3.5.2 Raon vaikutus ilmääneneristyslukuun.....	83
3.6 Ilmääneneristävyys tilojen välillä	84
3.6.1 Äänen rakenteellinen sivutiesiirtymä.....	84
3.6.2 Äänitasoeroluku	86
3.6.3 Tilojen välisen ilmääneneristävyyden laskenta	88
3.6.4 Kivirakenteiden liitoseristävyydet	90
3.6.5 Sivutiesiirtymä ilmanvaihtokanaviston kautta	93
Luvun 3 lähteet	95
4 Askelääneneristys.....	99
4.1 Askelääneneristykseen arviointi	101
4.1.1 Askelääneneristävyyden laskentamallit	101
4.1.2 Askeläänitasoluku	102
4.1.3 Spektripainotusermi	104
4.2 Välipohjien askelääneneristys	108
4.2.1 Raakavälipohja.....	108
4.2.2 Askelääneneristävyyden parannusluku	108
4.2.3 Joustavat lattianpäällysteet.....	110
4.2.4 Kelluvat lattiat.....	111
4.2.5 Alakatot	114
4.2.6 Asennuslattiat.....	115
Luvun 4 lähteet	116
5 Huoneakustiikka.....	119
5.1 Huoneakustiikan merkitys.....	121
5.1.1 Huoneakustiikan suunnittelun tavoitteet	121
5.1.2 Huoneakustiikka ja tilan käyttötarkoitus	121
5.2 Huoneakustiikan lähtökohdat	124
5.2.1 Äänikentän rakentuminen tilassa	124
5.2.2 Tilan muoto	126
5.2.3 Pinnan muoto ja rakenne	128
5.3 Absorptiomateriaalit	129
5.3.1 Huokoiset materiaalit.....	129
5.3.2 Reikälevyt.....	130
5.3.3 Levyresonaattorit.....	131
5.3.4 Kovat pinnat	132
5.3.5 Kalusteet ja yleisö	133
5.3.6 Ilman absorptio.....	133
5.4 Huoneakustiikan suunnittelu	135
5.4.1 Jälkikaiunta-aika.....	135
5.4.2 Puheensiirtaindeksi	137
Luvun 5 lähteet	139

6	Liikennemelun torjunta	141
6.1	Liikennemelun merkitys	143
6.1.1	Liikennemelun torjunta osana rakennushanketta	143
6.1.2	Liikennemelua koskevat määräykset	145
6.2	Äänilähteet	146
6.2.1	Tieliikennemelu	146
6.2.2	Raideliikennemelu	148
6.2.3	Lentomelu	149
6.2.4	Melun mallintaminen	150
6.3	Meluntorjuntakeinot	152
6.3.1	Ennaltaehkäisy	152
6.3.2	Rakennusmassat	154
6.3.3	Rakennussuunnittelu	155
6.3.4	Meluesteet	155
6.3.5	Ulkovaipan ääneneristys	157
6.3.6	Parvekelasitukset	159
6.4	Rakennuksen ulkovaipan ääneneristyksen suunnittelu	160
6.4.1	Laskentamenetelmät	160
6.4.2	Ympäristöopas 108	161
6.4.3	Äänitasoeromenetelmä	163
6.5	Parvekelasitusten ääneneristyksen suunnittelu	164
6.5.1	Äänitason muodostuminen parvekkeelle	164
6.5.2	Parvekelasitusten ääneneristävyden mitoitus	165
	Luvun 6 lähteet	167
7	Liikennetärinän ja runkomelun torjunta	169
7.1	Tärinän ja runkomelun merkitys	171
7.1.1	Tärinän ja runkomelun vaikutukset	171
7.1.2	Ihmisen havaitsemat ilmiöt	171
7.2	Värähtelyn synty ja eteneminen rakennukseen	172
7.2.1	Värähtelyn voimakkuuteen vaikuttavat tekijät	172
7.2.2	Vahvistuminen ja vaimeneminen	172
7.2.3	Värähtelyn lähde	174
7.2.4	Etenemisreitti	175
7.2.5	Rakennus ja perustukset	178
7.3	Lainsäädäntö ja ohjeet	181
7.3.1	Kaavoitus, maankäyttö ja rakentaminen	181
7.3.2	Ohjeavot	181
7.4	Tärinän ja runkomelun mittaaminen	183
7.4.1	Mittausten tarkoitus	183
7.4.2	Mittalaitteet	183
7.4.3	Mitattavat suureet	184
7.4.4	Taustavärähtelyn ja taustamelun korjaus	185
7.4.5	Tilastolliset tunnusluvut	186
7.4.6	Mittauspisteiden valinta	186
7.4.7	Rakennuksen tärinän arviointi maaperästä mitatuista värähtelyistä	187
7.4.8	Mittauksen epävarmuus	187
7.5	Tärinän ja runkomelun vaimennusratkaisut	189
7.5.1	Vaimennuksen sijainti	189
7.5.2	Vaimennuksen mitoitus sekä lisä- ja siirtohäviö	190

7.5.3	Lähteeseen kohdistuvat vaimennusratkaisut	192
7.5.4	Rataan tai väylään kohdistuvat vaimennusratkaisut	193
7.5.5	Maaperään kohdistuvat vaimennusratkaisut	194
7.5.6	Etäisyys- ja rakenteellinen vaimeneminen	195
7.5.7	Runkomelun vaimennusratkaisut perustuksissa	196
7.5.8	Runkomelun vaimentaminen rakennuksessa	197
7.5.9	Tärinän vaimentaminen rakennuksessa	198
7.6	Värähtelyn mallintaminen	201
7.6.1	Mallinnusmenetelmät	201
7.6.2	Laajojen alueiden mallintaminen	203
Luvun 7	lähteet	204
8	Oppilaitokset	207
8.1	Oppilaitoksen ääniympäristö	209
8.1.1	Akustiset tavoitteet	209
8.1.2	Määräykset ja ohjeet	210
8.2	Oppilaitosten akustiikkasuunnittelu	212
8.2.1	Auditorion huoneakustiikka	212
8.2.2	Opetustilan huoneakustiikka	214
8.2.3	Avoimet oppimisympäristöt	216
8.2.4	Ääneneristys	219
8.2.5	Musiikkioppilaitokset	220
Luvun 8	lähteet	221
9	Toimistorakennukset	225
9.1	Toimistojen ääniympäristö	227
9.1.1	Akustiset tavoitteet	227
9.1.2	Määräykset ja ohjeet	227
9.2	Toimistojen akustiikkasuunnittelu	229
9.2.1	Avotoimistot	229
9.2.2	Neuvottelutilat	232
Luvun 9	lähteet	233
10	Sairaalat	235
10.1	Sairaalan ääniympäristö	237
10.1.1	Akustiset tavoitteet	237
10.1.2	Määräykset ja ohjeet	238
10.2	Sairaaloiden akustiikkasuunnittelu	239
10.2.1	Tilavuudeltaan suuret tilat	239
10.2.2	Tärinäherkät laitteet	240
10.2.3	Varavoimakoneet	242
Luvun 10	lähteet	243
11	Konserttitalit	245
11.1	Akustiset ilmiöt konserttitalissa	247
11.1.1	Konserttitalien tilaratkaisut	247
11.1.2	Impulssivaste	248
11.1.3	Heijastuminen, refraktio, transmissio ja absorptio	250
11.1.4	Diffraktio, sironta ja diffuusit heijastukset	250
11.1.5	Äänen interferenssi	251

11.1.6 Ilman absorptio.....	251
11.2 Akustiikan havaitseminen	252
11.2.1 Havaitut akustiikan piirteet	252
11.2.2 Aikaiset heijastukset.....	252
11.2.3 Jälkikaiunta	253
11.2.4 Tärykaiku.....	253
11.2.5 Katsomovaimennus.....	254
11.3 Konserttialiakustiikan mittaluvut	255
11.3.1 Impulssivasteen mittaaminen.....	255
11.3.2 Standardi ISO 3382-1	257
11.3.3 Jälkikaiunta-aika.....	258
11.3.4 Varhainen jälkikaiunta-aika	258
11.3.5 Energiasuhdeparametrit.....	259
11.3.6 Varhainen sivuttaisenergiasuhde	259
11.3.7 Myöhäinen sivuttaisenergiasuhde.....	259
11.3.8 Voimakkuus.....	260
11.3.9 Lava-akustiikan mittaluvut.....	260
11.3.10 Muut mittaluvut.....	261
11.4 Huoneakustiikan mallinnus ja auralisointi	262
11.4.1 Geometrinen tilamalli	262
11.4.2 Huoneakustiikan mallinnusmenetelmät	262
11.4.3 Auralisointimenetelmät.....	263
11.5 Akustiikan visualisointi	265
11.5.1 Menetelmät	265
11.5.2 Esimerkki akustiikan visualisoinnista	265
11.6 Konserttialien suunnittelu	268
11.6.1 Käyttötarkoitus	268
11.6.2 Huoneakustiikan mallintaminen	268
11.6.3 Akustiset mittaluvut	268
11.6.4 Istuimet ja yleisöalueen lattia	269
11.6.5 Sivuseinät, parvet ja katto	270
11.6.6 Lava	271
11.6.7 Meluntorjunta	272
Luvun 11 lähteet	272
12 Puurakennukset	277
12.1 Ääneneristys puurakennuksissa	279
12.1.1 Puurakentamisen akustiikkasuunnittelun kehitys	279
12.1.2 Puun ääneneristysominaisuudet.....	281
12.1.3 Puurakenteiden ilmaääneneristävyys	283
12.1.4 Ilmaääneneristävyys puurakennuksessa	284
12.1.5 Puurakenteiden askelääneneristävyys	289
12.2 Puurakennusten huoneakustiikka	295
12.2.1 Puu absorptiomateriaalina	295
12.2.2 Puurakennusten huoneakustiikan suunnittelu	295
Luvun 12 lähteet	297
13 Korjausrakentaminen	301
13.1 Korjausrakentaminen akustiikan kannalta	303
13.1.1 Korjaushankkeiden luonne.....	303

13.1.2 Korjaus- ja muutostöitä koskevat määräykset ja ohjeet.....	304
13.1.3 Käyttötarkoituksen muutoksia koskevat määräykset ja ohjeet	306
13.2 Korjausrakentamisen erityispiirteitä.....	309
13.2.1 Vanha rakennus suunnittelun lähtökohtana.....	309
13.2.2 Ääneneristys	309
13.2.3 Huoneakustiikka.....	311
Luvun 13 lähteet.....	312

1



Johdanto

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

Ääneneristysnormit 1967

1.1 Talonrakentamisen akustiikka

1.1.1 Akustiikka tieteen ja tekniikan alana

Ääni on tärkeä ja suorastaan välttämätön osa jokapäiväisestä kokemus- ja elämysmaailmaamme, sillä suurin ja merkittävin osa viestinnästämme tapahtuu puheen ja kuuloaistin välityksellä. Nykyisin elämme keskellä ääniympäristöä, jonka tuotamme suurimmaksi osaksi itse, osittain ääni on muiden elollisten olentojen ja elottoman luonnon synnyttämää. Äänen suuren merkityksen vuoksi ei olekaan yllättävää, että ääni on ollut tutkimuksen kohteena ainakin antiikin ajasta saakka. (Lindsay 1973, Kylliäinen 2009a). 1600-luvun kuluessa ääni-ilmiöitä tutkivan tieteenalan nimitykseksi vakiintui akustiikka, joka pohjautuu kreikan kielen kuulemista tarkoittavaan sanaan (Gouk 1999).

Yksi tieteen tehtävistä 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. Nykyisin kahta ensin mainittua kysymystä tutkivaa akustiikan aluetta nimitetään fysikaaliseksi akustikaksi. Se on kaiken muun akustiikan perusta ja akustiikan alueista vanhin. Tarkasteltaessa äänen vaikutuksia laajemmin akustiikka voidaan liittää myös esimerkiksi lääketieteeseen, filosofiaan, sosiaalitieteisiin ja ympäristötieteisiin. Akustiikka liittyy myös taiteisiin: akustiikka tuottaa tieteellistä tietoa, jota voidaan soveltaa paitsi soitinrakennuksessa, myös konserttisalien tai muiden esiintymistilojen suunnittelussa. Akustiikka on siten myös tekniikan ala, joka auttaa ihmistä muokkaamaan ympäristöään. (Lindsay 1973)

Akustiikalle on nykyisin ominaista se, että se yhdistelee muiden tieteenalojen tutkimustuloksia. Esimerkiksi mekaniikka voi tutkia kappaleen liikettä riippumatta toisista tieteistä. Akustiikka ei voi näin tehdä, vaan ensinnäkin värähtelevän kappaleen liiketilan ymmärtäminen edellyttää tietämystä mekaniikasta; kappaleen ympärilleen synnyttämässä äänikentässä tapahtuu paineenvaihteluita ja nopeushäiriöitä verrattuna staattiseen ilmanpaineeseen, minkä tarkastelu edellyttää ilman fysiikkaan kuuluvien tietojen soveltamista. Äänikentässä tapahtuvat ilman tihentymät ja harventumat aiheuttavat muun muassa lämpötilan muutoksia, jolloin on tarkasteltava termodynamiikan ilmiöitä. Kuuloaistimuksen syntyminen puolestaan on fysiologinen ja psykologinen ilmiö. (Hunt 1978)

Nykyisin tuskin on elämänalaa, jota akustiikka ei jollain tavalla koskettaisi: esimerkiksi lääketieteessä ultraääni on mahdollistanut monia tärkeitä tutkimusmenetelmiä. Viihteen aloilla, esimerkiksi elokuvateollisuudessa, akustiikan tuloksia sovelletaan äänentalennuksessa, äänitehosteiden ja tilavaikutelman luomisessa, elokuvateatterin äänentoistossa sekä elokuvasalin suunnittelussa ja rakentamisessa samoin kuin rakennusmateriaalien valinnassa. Näin laajoja vaikutuksia akustiikalla on kuitenkin ollut oikeastaan melko

lyhyen ajan, 1900-luvun alkuvuosikymmenistä lähtien. 1800-luvulla akustiikka poikkesi suuresti nykytilanteesta: se oli paljolti muista tieteistä irrallinen alue, joka kehittyi hitaasti. (Hunt 1978)

1.1.2 Akustiikan kehitys antiikista 1900-luvulle

Ymmärryksen siitä, että kiinteään kappaleeseen kohdistuva isku synnyttää ääntä, on täytynyt muodostua jo kaukana muinaisuudessa, sillä ilmiö on havaittavissa helposti luonnossa, kävellessä ja monessa muussa tilanteessa. Ihminen onkin kautta aikain tuot-tanut pilleillä, torvilla ja rummuilla erilaisia merkki- ja hälytysääniä. Näin tuotetut äänet ovat myös soitinmusiikin perusta. Musiikki on taidemuotona vanha, ja se tuli tieteen kiinnostuksen kohteeksi jo tuhansia vuosia sitten. Antiikin Kreikassa tarve ymmärtää musiikki-instrumenttien toimintaa johti yrityksiin kuvata äänen syntymistä. Kreikan filosofit olivat vakuuttuneita siitä, että äänen alkuperää oli etsittävä kappaleiden liikkeistä, jotka siirtyvät ilman välityksellä korvaan ja synnyttävät kuuloaistimuksen. (Lindsay 1966, Lindsay 1973)

Ilmeisesti varhaisimmat pohdinnat äänen syntymekanismeista liittyvät värähteleviin kieliin, joita tutkimalla saatettiin todeta, että ääntä ei ole ilman värähtelevää kappaletta. Pythagoraan kerrotaan tutkineen eripituisten kielten ja sävelkorkeuden suhdetta. Ei ole kuitenkaan varmaa, tekikö Pythagoras todella tällaisia kokeita ja ymmärsikö hän sävelkorkeuden olevan kääntäen verrannollinen kielen pituuteen. Pythagoraan koulukuntaan kuuluneet Arkhytas ja Eudoksos selittivät 400-luvulla ennen ajanlaskun alkua, että kappaleen nopea liike vastaa korkeaa ääntä ja hidaskäyttö matalaa. Äänenä aistittavat ilmanpaineen vaihtelut syntyvät värähtelevän kappaleen ympäröivään ilmaan aiheuttamista ilman tihentymistä ja harventumista. Aristoteleen ajatteluun sisältyi oivallus ilman tihentymien merkityksestä: hän selitti, että lyömällä kaksi kappaletta yhteen voidaan synnyttää ääntä vain, jos lyönti tapahtuu nopeasti, sillä muuten ilma hajaantuu kappaleiden välistä pois. (Hunt 1978)

Varhaisimmista antiikin aikana kirjatuista pohdinnoista lähtien on vallinnut yksimielisyys siitä, että ääni siirtyy pisteestä toiseen jonkin ilmassa tapahtuvan ilmiön tai toiminnan välityksellä. Tuntemattoman kirjoittajan ajoittamaton teos ”De Audibilibus” kuvaa äänen syntyvän kappaleiden liikkeestä toisiaan vasten tai kappaleen kosketuksesta ilmaan. Kirjoittajan mukaan ääni etenee, kun ilma vuorotellen puristuu kokoon ja laajenee ja suppenee. Liikkeessä oleva ilmahiukkanen vaikuttaa seuraavaan hiukkaseen ja näin ääni etenee ilmassa. (Lindsay 1966, Hunt 1978) Äänen leviämisen analogisuus aaltoreinkaisiin vedessä oli antiikin aikana laajalti tunnettu. Ajatus tunnettiin ainakin 200-luvulla eKr. Keisari Augustuksen aikana vaikuttanut arkkitehti Marcus Vitruvius Pollio selitti äänen etenevän lukemattomina aaltoina ympyränmuodossa täsmälleen samoin kuin tapahtuu pudotettaessa kivi seisovaan veteen. Vitruviuksen mukaan ääni synnyttää samojen lainalaisuuksien mukaisesti kehämäisen aaltoliikkeen, mutta sillä erotuksella, että toisin kuin vedessä, jossa aaltorintama etenee vain vaakatasossa, ääni etenee kaikkiin suuntiin.

Aristoteles pohti äänen heijastumista ja havaitsi, että ääni heijastuu pinnasta samalla tavalla kuin valo: kulma, jolla ääni kohtaa pinnan, on yhtä suuri kuin kulma, jolla ääni pinnasta heijastuu. Aristoteles selitti myös kaiun: ilman värähtely heijastuu kovasta pinnasta takaisin. Tällaiset pohdinnat eivät olleet kaukana akustiikan soveltamisesta käytäntöön, mitä antiikin aikana jonkin verran esiintyi. Säilyneistä käytännön ohjeita sisältävistä dokumenteista tärkein on Vitruviuksen kymmenen kirjaa arkkitehtuurista. Vitruvius antaa muun muassa ohjeita teatterin paikan valinnasta sekä näyttämön ja katsomon muodosta hyvien akustisten olosuhteiden saavuttamiseksi.

Kreikkalaisten filosofien teoksia käännettiin arabiaksi 700-luvulta alkaen. Islamilaiset tiedemiehet omaksuivat aluksi lähinnä Aristoteleen käsityksiä akustiikasta, mutta vähitellen he alkoivat tuottaa uutta tietoa. Basrassa toiminut oppineiden salaseura selitti äänen etenevän niin, että ilman kokoonpuristumisesta syntyy aaltoliike, jossa törmäilevät hiukaset leviävät aallonmuodossa kaikkiin suuntiin. Näin syntyy pallomainen aalto, joka laajenee niin kuin pyöreä pullo lasinpuhaltajan puhaltessa siihen ilmaa. Kun tämä aaltoilu laajenee, liike heikkenee ja lopulta vaimenee, kunnes liike lakkaa. Tässä on sanallisesti varsin tarkasti kuvattuna ilmiö, josta nykyisin käytetään käsitettä äänen leviämismuoto. (Hunt 1978)

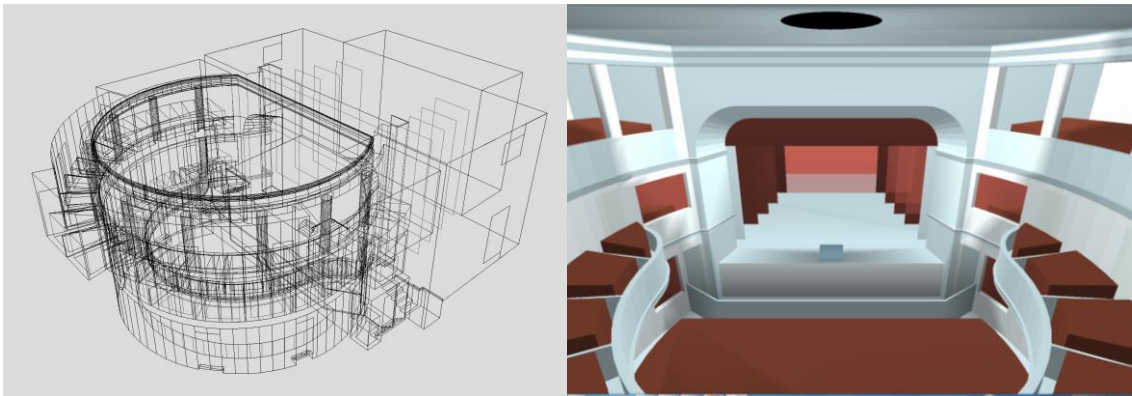
Euroopassa kiinnostus akustiikkaan liittyi tieteellisen valankumouksen alkuvaiheessa ihmeellisiin ja poikkeuksellisiin ääni-ilmiöihin, joita raportoitiin ja joita pyrittiin toistamaan yleisön edessä. Ranskalainen pappi Marin Mersenne (1588–1648) sitä vastoin sovelsi empiiristä tutkimusta akustiikkaan: hän mittasi ensimmäisenä äänen nopeuden ilmassa. Mittauksessa äänilähteenä oli määrättyllä etäisyydellä tarkkailupisteestä laukaistu ase. Laukaisuhetki nähtiin suuliekkien välähdyksestä, jolloin kuluneen ajan ja etäisyyden perusteella voitiin laskea äänen nopeus. (Hunt 1978, Gouk 1999)

Mersennen kokeet ajoittuivat aikaan, jolloin Euroopassa oli kehittymässä ensimmäinen teollinen vallankumous. Sen seurauksena yhteiskunnallinen aloitteenteko siirtyi 1800-luvulle tultaessa porvaristolle, jolle alkoi myös kertyä varallisuutta. Sen takia porvaristolle syntyi mahdollisuuksia ja aikaa nauttia taiteista, mikä johti teatterin, oopperan ja konserttien kaupallistumiseen, ensin Englannissa ja Alankomaissa (Tegen 1986, Thompson 2002). Kaupallistuminen muutti musiikin esitystilanteen uudelleen. Aiemmin julkiset esiintymiset, saati palkkion vastaanottaminen olivat sopimattomia niille, joilla oli korkea sosiaalinen status. Uudenlainen konserttitilanne perustui siihen, että yleisö maksoi esityksen kuulemisesta pääsylipun ja seurasi esitystä passiivisena. Ensimmäisen tällaisen konsertin sanotaan tapahtuneen Lontoossa vuonna 1672 (Gouk 1999).

1700- ja 1800- lukujen vaihde merkitsi hovimusiikin aikakauden päättymistä ja sen korvautumista porvarillisella musiikkikulttuurilla, jonka keskuksena oli kaupallinen, pääsymaksuin ylläpidettävä konserttisali tai teatteri (Gouk 1999). Tämä loi myös uudet akustiset olosuhteet: 1700-luvun kaupalliset teatterit ja konserttisalit olivat suurempia kuin edeltäjänsä hoviteatterit ja palatsien musiikkisalit. Tyypillisessä hovioopperassa oli enintään noin 500 istumapaikkaa, mutta esimerkiksi Milanoon vuonna 1782 valmistuneessa La Scala -opperatalossa on 2300 paikkaa. Koska esitykset rahoitettiin pääsylippuilla, esitystilojen ylläpito oli sitä tuottavampaa, mitä enemmän paikkoja oli. Samalla

kuitenkin kuuluvuus tuli haasteellisemmaksi – hoviteattereissa kuuluvuusongelmia ei yleensä ollut, koska ne olivat pieniä (Weinzierl 2002, Beranek 2004).

Ratkaisuksi teatterien ja konserttisalien suunnitteluun kehittyi geometrinen huoneakustiikka, joka perustui huoneen muodon suunnitteluun tutkimalla äänen leviämistä äänilähteistä piirtämällä äänisäteitä ja seuraamalla äänen heijastumista tilan pinnoista. Tähän liittyivät myös kokeet, joilla yritettiin selvittää ihmisen pään suuntaavuutta. Suomessa arkkitehti ja julkisista rakennushankkeista Suomen suuriruhtinaskunnassa vastanneen intendentinkonttorin johtaja C. L. Engel (1778–1840) ilmeisesti tunsikin kirjastossaan olleiden teosten kautta geometrisen huoneakustiikan käytäntöjä (kuva 1.1) ja eräässä kirjeessään hän kertoi tehneensä äänen kuuluvuuteen liittyviä havaintoja (Sundman 1989, Sinisalo 2006, Niemi et al. 2015). Geometrisen huoneakustiikan pohjalta 1800-luvulla kehittyi ns. kaikuteoria (Postma & Katz 2020), jota käytettiin kirkkojen ja konserttisalien suunnittelussa vielä 1900-luvun puolella. Suomessa kaikuteoriaa käytti kymmeniä kirkkoja suunnitellut arkkitehti Josef Stenbäck (1854–1929). Stenbäckin mukaan tila piti suunnitella niin, että ääntä heijastavan pinnan ja etäisyyden tarkastelupisteeseen tuli olla enintään 19 m (Kylliäinen 2021a).



Kuva 1.1. C. L. Engelin Helsinkiin suunnittelema puurakenteinen teatteritalo valmistui vuonna 1827. Sen muodon pohjana lienee ollut 1700-luvulla geometrisen huoneakustiikan ja pään suuntaavuuden perusteella kehitetty ympyränmallinen teatterisalin muoto. Engelin teatterin geometrinen malli (vas.) ja näkymä teatterisaliin ja näyttämölle (oik.) ovat vuonna 2015 tehdystä arkeoakustisesta tutkimuksesta (Niemi et al. 2015).

Kaikuteoria perustui pääosin päättelyyn äänen käyttäytymisestä. Antiikin ajasta saakka akustiikan ongelmana oli ollut se, että ei ollut olemassa mittalaitteita, joilla akustisia ilmiöitä olisi ollut mahdollista havainnoida, vaan kaikki havainnot perustuivat kuuloon. Kuuloaistimuksen epäluotettavuuden vuoksi ääni-ilmiöt haluttiin selittää matemaattisesti. Akustiikan kehityksen toinen pullonkaula oli se, että matemaattiset analysointimenetelmät eivät riittäneet kuvaamaan ääni-ilmiöitä. (Lindsay 1966, Hunt 1978) Jälkimmäinen ongelma ratkesi 1800-luvun kuluessa, mutta vielä Wallace Clement Sabine (1868–1919), nykyaikaisen akustiikan isänä pidetty amerikkalainen professori, johti huoneakustiikan suunnitteluun edelleen käytettävän tilan jälkikäiunta-ajan kaavan kokeellisesti kuulohavaintoihin perustuen. Koska Sabine pystyi tutkimustensa perusteella

laskemaan jälkikäiunta-ajan, hän pystyi ottamaan tehtäväkseen Bostoniin vuonna 1900 valmistuneen konserttisalin, Symphony Hallin, akustisen konsultoinnin. (Thompson 2002)

Akustisten ilmiöiden kokeelliseen todentamiseen liittyvät ongelmat ratkaisi kondensaattorimikrofonin keksiminen vuonna 1916. Se mahdollisti toistettavat mittaukset tieteellisen tutkimuksen edellyttämällä tarkkuudella, mikä johti 1920-luvulla akustiikkaa koskevan tutkimuksen vilkastumiseen sekä akustiikkaan liittyvän materiaaliteollisuuden ja akustiikkaan erikoistuneen insinöörikunnan syntyyn (Thompson 2002). Suomessa ilmeisesti ensimmäinen rakennus, jossa on käytetty tieteelliseen tietoon perustuvia akustikan suunnittelumenetelmiä, on Eduskuntatalo, jonka istuntosalin kupoli (kuva 1.2) verhoiltiin Yhdysvalloista tuoduilla ääntä vaimentavilla levyillä (Hakala-Zilliacus 2002).

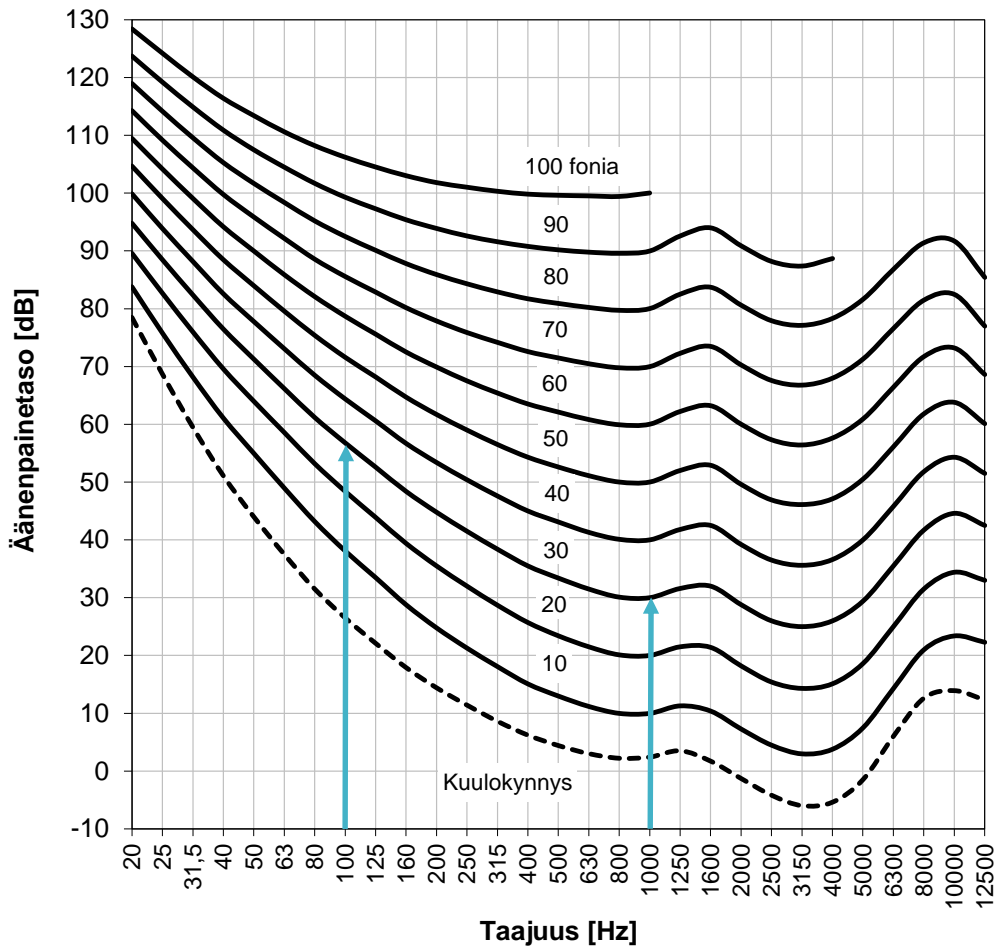
1920-luvulla käynnistynyt yleisradiotoiminta edellytti tietoa studioiden ja tarkkaamoiden akustiikkasuunnittelusta, jota koskeva tieto keskittyi Yleisradioon. Sen toimitalon kellariin rakennettiin 1930-luvulla akustiikkalaboratorio (Kylliäinen 2009b). Viimeistään 1930-luvulta lähtien akustiikka on ollut yksi keino, jonka avulla ihminen on voinut hallita ympäristöään: torjua epätoivottua ääntä eli melua tai luoda toiminnalleen sopivat olosuhteet esimerkiksi ääneneristyksen, huoneakustiikan, tai äänentoiston keinoin (Kylliäinen 2009a).



Kuva 1.2. Eduskunnan istuntosalin kupoli on verhoiltu sokeriruo'osta tehdyillä ääntä absorboivilla levyillä. Vuonna 1931 valmistuneen Eduskuntatalon rakenne- ja akustiikkasuunnittelijana toimi diplomi-insinööri Jaakko Packalén (1886–1935), joka selvitti myös rakennuksen välipohjien ääneneristävyden toteuttamista (Kylliäinen 2009b). Kuvälähde: Museovirasto, kuvaaja Hugo Sundström 1931.

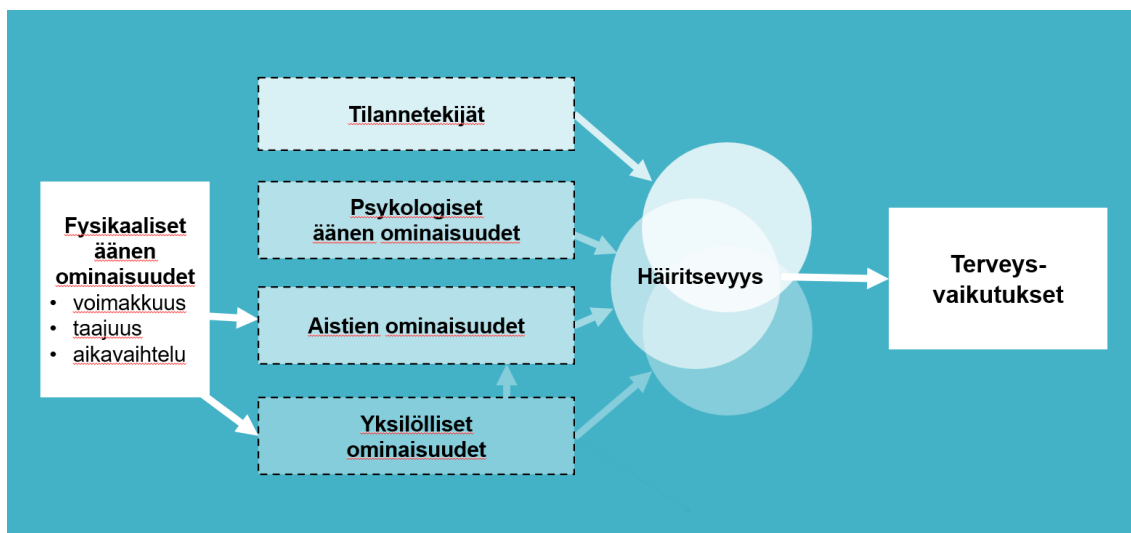
1.1.3 Akustiikkasuunnittelun tavoitteet

Ihminen voi aistia äänenä ilmanpaineen vaihtelun, jonka taajuus on noin 20 Hz ja 20000 Hz välillä. Alle 20 Hz taajuudet aistitaan tuntoaistin kautta tärinänä. Kuulon herkkyys ei ole vakio taajuuden suhteen (kuva 1.3). Ääni on fyysikaalista ilmiötä kuvaava neutraali käsite. Ihmistä häiritsevä, haitallinen tai tarpeeton ääni on melua. Melun käsitteessä yhdistyvät fyysikaalinen ilmiö sekä sen aiheuttama ihmisen subjektiivinen kokemus tai terveyshaitta, joista tunnetuin lienee kuulovaurio.



Kuva 1.3. Äänen voimakkuuden kokeminen riippuu taajuudesta. Vakioäänekkyyskäyristä nähdään, kuinka voimakkaita äänten pitää olla eri taajuuksilla, jotta ääni koetaan yhtä voimakkaaksi (ISO 226:2003). Esimerkiksi 100 Hz taajuudella 55 dB äänenpainetaso koetaan yhtä voimakkaaksi kuin 30 dB äänitaso 1000 Hz taajuudella. Alin käyrä osoittaa kuulokynnystä eri taajuuksilla.

Häiritsevyys on äänen kokemisen kannalta merkittävä tekijä, sillä sen katsotaan edeltävän vakavampia terveysvaikutuksia, kuten unihäiriöitä. Ääni voi olla häiritsevää monesta syystä: esimerkiksi ympäristön muista äänistä voimakkaasti poikkeava tai niistä selvästi erottuva ääni koetaan yleensä häiritseväksi; ääni voi olla häiritsevää, jos se sisältää informaatiota, joka ei ole toivottua tai tarpeellista (Pääkkönen et al. 2016). Tilanteesta riippuen sama ääni voi olla tavoiteltava tai häiritsevä ja haitallinen, jolloin se on melua (kuva 1.4).



Kuva 1.4. Äänen kokeminen ja häiritsevyys riippuvat monesta tekijästä, jotka liittyvät äänen fysiikkaalisiin ja psykologisiin ominaisuuksiin, ihmisen fysiologiaan sekä yksilöllisiin ominaisuuksiin sekä tilanteeseen, jossa ääntä havainnoidaan (Landström et al. 1999 mukaan).

Koska äänen häiritsevyys riippuu tilanteesta, akustiikkaa koskevilla määräyksillä on varsin laaja vaihteluväli eri tilanteissa sallituille äänenvoimakkuuksille (taulukko 1.1). Pienimmät sallitut keskiäänitasot L_{Aeq} liittyvät nukahtamiseen (25 dB) ja suurimmat kuulovaurion ehkäisyyn melutyössä (80 dB).

Taulukko 1.1. Esimerkkejä melun häiritsevyyteen ja terveysvaikutuksiin perustuvista melutasojen raja-arvoista säädösten mukaan (Pääkkönen et al. 2016).

Tilanne	Keskiäänitason L_{Aeq} [dB] raja-arvo
Nukahtaminen ja musiikkimelu	25 dB
Talotekniikan melu asuinhuoneissa	28 dB
Liikennemelu asuinhuoneessa yöllä	30 dB
Liikennemelu asuinhuoneessa päivällä	35 dB
Tuulivoimamelu ulkona	45 dB
Liikennemelu pihalla päivällä	55 dB
Altistumisen tarkastelu melutyössä	70 dB
Altistumisen alaraja melutyössä	80 dB

Rakentamiseen liittyvän akustisen suunnittelun tavoitteet seuraavat kuuloaistin ominaisuuksista, melun terveysvaikutuksista, 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 tottunut, 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 eli ongelma äänenmuodostuksessa (Sala et al. 2003).

- 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 informaationvälityksensä vuoksi. Viihtyisyys liittyy siihen, miten ihmiset kokevat ääniolosuhteet ympäristössään.
- 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 kaiun vuoksi.

1.1.4 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 konserttisaleihin, teattereihin, elokuvateattereihin tai auditorioihin. Näissä rakennuksissa huoneakustiikka on vain yksi osa akustisen suunnittelun kokonaisuutta. Talonrakentamisen akustiikka kattaa yleensä neljä osa-aluetta (kuva 1.5):

- **huoneakustiikka** koskee äänen heijastumista, vaimenemista, leviämistä, siroamista ja muuta käyttäytymistä saman tilan sisällä. Tarkoituksena on tilassa olevan äänilähteen, kuten puhujan tai orkesterikokoonpanon, saaminen kuulostamaan siltä, mitä tilan käyttötarkoitus edellyttää.
- **ääneneristys** 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.

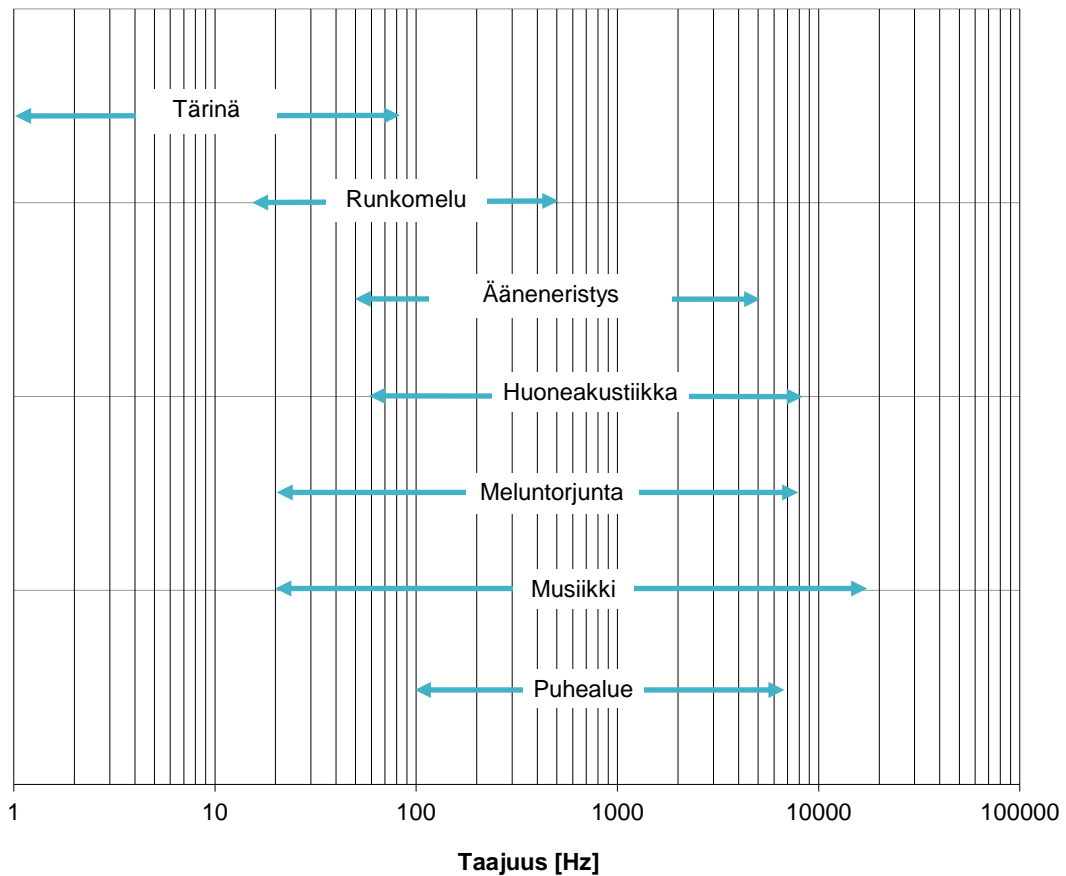
Rakennuksen sisällä meluntorjunnan tarkoituksena on vähentää koneiden tai rakennuksen teknisten järjestelmien aiheuttamaa melua vaikuttamalla melun syntymiseen tai estämällä sen leviämistä ääntä eristävin rakentein, erilaisin äänenvaimentimin tai huoneakustiikan keinoin.

- **tärinän- ja runkomeluntorjunnan** tarkoituksena on vanhastaan ollut eristää rakennuksen rungosta koneet ja laitteet, jotka liikkuvat tai pyörivät, sillä liike saa rakenteet värähtelemään, mikä havaitaan joko ilmaääninä tai tärinänä. Viime vuosikymmeninä on eristetty kokonaisia rakennuksia värähtelevästä maaperästä tai rakenteista, kun rakennus on toteutettu radan varrelle tai päälle.

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 taajuuksalueita (kuva 1.6). Esimerkiksi meluntorjunnan kattama taajuuksalue on laajempi kuin rakennus- ja huoneakustiikan, jotka tarkastelevat puheen ja musiikin kannalta oleellisinta taajuuksaluetta, jolla kuulon herkkyyks on suurimmillaan.



Kuva 1.5. Talonrakentamisen akustiikka käsittää huoneakustiikan, ääneneristyksen, meluntorjunnan ja tärinän- ja runkomeluntorjunnan suunnittelun. Käytännössä kaikissa rakennushankkeissa tehdään suunnitelmia jokaisella neljästä osa-alueesta.



Kuva 1.6. Talonrakentamisen akustiikan osa-alueiden kannalta kiinnostavat taajuusalueet (Fasold & Veres 1998).

Akustiikan suunnittelua tarvitaan ja sitä tehdään käytännössä kaikissa rakennushankkeissa. Rakennuksessa saavutettavien ääniolosuhteiden kannalta ratkaisevat valinnat tehdään suunnitteluvaiheessa. Toisaalta esimerkiksi asiakastyytyväisyyden kannalta akustiikan merkitys on suuri, sillä asuinkerrostaloissa asukkaat havaitsevat virheet usein jo muuttopäivänään.

1.2 Määräykset ja ohjeet

1.2.1 Määräysten kehitys ja vaikuttavuus

Akustisen suunnittelun tavoitteena olevilla terveellisyydellä, viihtyisyydellä ja tarkoituksemukaisuudella on taloudellista merkitystä kansanterveyden, menetetyn työajan ja epätarkoituksenmukaisten tilojen korjaamisen aiheuttamien kustannusten vuoksi. Niiden vuoksi akustinen suunnittelu kiinnostaa myös yhteiskuntaa ja lainsäätäjiä. Nykyisin Euroopan unionin rakennustuotedirektiivi määrittelee rakentamiselle ja rakennustuotteille kuusi niin sanottua olennaista vaatimusta, joiden joukossa ovat terveys ja meluntorjunta.

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: ”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 räsitystä, kuten kipinöiden, tuhkan, noen, savun, lämmön, löyhkän, kaasujen, höyryn, värinän, jyskeen taikka muun sellaisen kautta.” Lain nojalla nostettiin äänen aiheuttamaa häiriötä koskevia oikeusjuttuja, joita käsiteltiin korkeimmassa oikeudessa saakka.

Tutkijoiden kiinnostus ääneneristyksen suhteen kohdistui ensimmäisenä asuinrakennuksiin, joissa ääniolosuhteet vaikuttavat merkittävästi terveyteen sekä yksityisyyteen. Asuinrakennusten ääneneristyksestä oli säädöksiä 1930-luvulta saakka (Kylliäinen & Hongisto 2007), mutta ongelmana oli ollut se, että ääneneristysvaatimukset oli määritetty sanallisesti: eri osapuolet saattoivat muodostaa käsityksensä tyydyttävästä ääneneristyksestä subjektiivisesti, jolloin ne myös poikkesivat toisistaan. Tällaisten säädösten velvoittavuus koettiin 1950-luvulla puutteelliseksi (Kylliäinen 2009c).

Aloitteen ”äänitekniillisten normien laatimiseksi talojen rakentajille” teki sisäasianministeriölle vuonna 1947 Äänitekniillinen Yhdistys (nykyisin Akustinen Seura). Seuraavana vuonna yhdistys esitti, että normeilla voitaisiin vaikuttaa asuntojen puutteelliseen ääneneristykseen. Aloite ei johtanut normien syntymiseen, mutta ensimmäisen kerran asuntojen ääneneristystä yritettiin mitata Helsingissä vuonna 1949. Alan asiantuntijoista 1950-luvun alussa kootun ääneneristystutkimustoimikunnan työ johti vuonna 1955 asuntojen ääneneristystä koskevan suosituksen julkaisemiseen. Kotimaisen akustiikan tutkimuksen ja oppituolin puuttuessa tietoa asuntojen ääneneristävydestä ja mittauksista saatiin teknologian siirtoina erityisesti Pohjoismaista ja Saksasta (Kylliäinen 2009c). Keskeinen henkilö tiedon välittäjänä oli Paavo Arni (kuva 1.7), joka oli aloittanut kansainvälisen verkostoitumisensa 1930-luvulla (Kylliäinen 2021b).



Kuva 1.7. Paavo Arni (1905–1969) oli varsinaiselta ammatiltaan Yleisradion studiopäällikkö, yli-insinööri ja lopulta teknillinen johtaja, mutta näiden tehtävien ohella hän oli akustiikkasuunnittelun, akustiikkaa koskevien määräysten ja järjestötoiminnan keskeinen kehittäjä 1940-luvulta kuolemaansa saakka. Hän oli myös ensimmäinen kansainvälisesti tunnettu suomalainen akustikko, joka yhteyksiensä avulla sai välitetyksi uusinta tutkimustietoa Suomeen (Kylliäinen 2021b). Kuvassa Paavo Arni esittelee Yleisradion Fabianinkadun radiotalon studio 2:n muunneltavaa akustiikkaa vuonna 1950. Kuvälähde: Yleisradion arkisto, kuvaaja Ruth Träskman.

Suosituksia asuntojen ääneneristyksestä annettiin seuraavan kerran vuosina 1960 ja 1967, kunnes vuonna 1975 annettiin säädöstasoiset määräykset Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1, joka koski ääneneristävyyden lisäksi huoneakustiikkaa ja meluntorjuntaa (Kylliäinen 2009c). Asuinrakennuksia koskevien määräysten antamiseen kuului lähes 30 vuotta ensimmäisestä ehdotuksesta, mutta määräysten vaikuttavuus on ollut suuri. Vastavalmistuneen suomalaisen asuinrakennuskannan toteutunut ääneneristävyys (taulukko 1.2) on 1950-luvulta 2000-luvulle parantunut kahdella tapaa: ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset ovat suosituksissa ja määräyksissä kasvaneet, mikä on

vaikuttanut toisaalta rakenteiden paksuuksiin ja massaan kasvattaen ääneneristävyyttä. Samaan aikaan suunnittelu- ja rakennusvirheiden määrä on vähentynyt. Kerrostaloasukkaiden tyytyväisyys asuntonsa ääneneristävyyteen on kasvanut noin 50–60 prosentin tasolta 1960- ja 1970-luvuilla yli 90 prosenttiin 2000-luvulla tehdyissä tutkimuksissa (Lietzén & Kylliäinen 2013).

Taulukko 1.2. Ääneneristysmääräykset täyttävien asuinrakennusten osuus julkisissa tutkimusraporteissa esitetyistä mittaustuloksista sekä tyytyväisten asukkaiden osuus vastaavana aikana tehdyissä kyselytutkimuksissa (Lietzén & Kylliäinen 2014).

Aika	Ilmääneneristys- vaatimusten täytyminen	Askelääneneristys- vaatimusten täytyminen	Tyytyväisiä asukkaita
1955–1959	81 %	86 %	74 %
1960–1967	47 %	65 %	60 %
1967–1976	50 %	46 %	Ei tuloksia
1976–1999	91 %	85 %	67 %
2000–2008	100 %	93 %	93 %

Asuntojen lisäksi määräysten piiriin on vähitellen tullut myös muita rakennus- ja tilatyyppejä. Puhetilojen akustiikkaan on kiinnitetty huomiota 1930-luvulta saakka (Kylliäinen 2009a), ja 1940-luvulta lähtien akustiikan asiantuntijat ovat kirjoittaneet artikkeleita myös koulujen akustiikkasuunnittelusta (Romula 2022). Samalta aikakaudelta tunnetaan myös toteutettuja koulujen akustiikkasuunnitelmia (Kylliäinen & Valovirta 2011, Suutarla 2018). Toimistorakennusten akustiikkaa koskevia suosituksia annettiin vuonna 1967 ja säädöstasoisia määräyksiä on ollut vuodesta 1975 (Tanila 2022), jolloin määräyksiä annettiin myös majoitustiloista, sairaaloista ja teollisuusrakennuksista. Vuoden 1975 jälkeen määräyksiä on uudistettu noin 10–15 vuoden välein, viimeksi vuonna 2017.

Maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) vuonna 2012 tehtyjen muutosten mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus ja sen oleskelu- ja piha-alueet niiden käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla suunnitellaan ja rakennetaan siten, että rakennuksen sekä rakennuspaikan piha- ja oleskelualueiden melualtistus ja ääniolosuhteet eivät vaaranna terveyttä, lepoa tai työntekeä. Laki edellyttää lisäksi, että rakenteiden ääneneristävyyden ja taloteknisten laitteiden äänitason ja asennusten on oltava sellaisia, että rakennuksessa oleskelevien uni ja lepo eivät häiriinny ja rakennuksen käyttötarkoituksen mukainen toiminta on ääniolosuhteiden puolesta mahdollista. Rakennuksen ääniolosuhteet on määritettävä äänitason ja kaiuntaisuuden avulla sekä piha- ja oleskelualueilla äänitasojen avulla. Ympäristöministeriön asetuksella voidaan antaa uuden rakennuksen rakentamista, rakennuksen korjaus- ja muutostyötä sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta varten tarvittavia tarkempia säännöksiä

- rakenteilta ja rakennusosilta edellytettävästä ääneneristävyydestä.
- taloteknisten laitteiden sallitusta äänitasosta,
- rakennuksen ääniolosuhteille asetettavista vaatimuksista ja

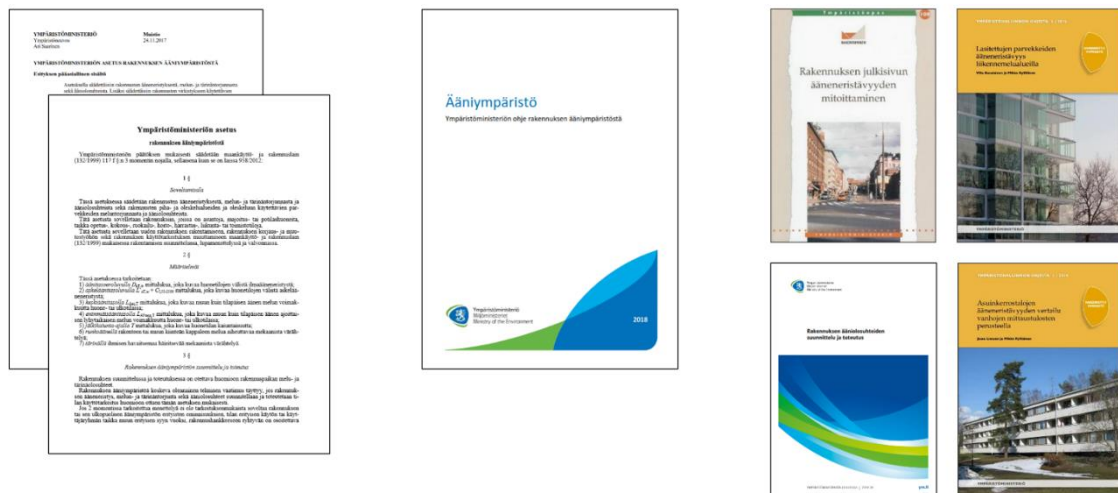
- piha- ja oleskelualueiden meluntorjunnasta ja ääniolosuhteille asetettavista vaatimuksista.

Maankäyttö- ja rakennuslain uudistuksen myötä ympäristöministeriön asetus ja ohjeet sekä oppaat jakautuvat velvoittavuuden suhteen kolmeen tasoon (kuva 1.8). Ääniympäristöasetus 796/2017 on velvoittava (YMa 769/2017). Vuonna 2018 annettu ääniympäristöohje täydentää asetusta antamalla asetusta laajemmin erilaisille tilatyypeille akustisia ohjeita (YMo 2018). Lisäksi ohje selittää ja taustoittaa ääniympäristöasetuksen sisältöä. Ohje ei kuitenkaan ole velvoittava, vaan suunnittelu voidaan tehdä myös ohjeesta poikkeavalla tavalla, kunhan asetuksessa annetut vaatimukset ääniympäristöstä toteutuvat. Kolmannella tasolla ovat ympäristöministeriön oppaat, joissa esitetään suunnittelu- ja toteutusmenetelmiä tai ilmiö- ja tilakohtaisia suunnitteluohjeita (Sipari & Saarinen 2003, Lietzén & Kylliäinen 2014, Kovalainen & Kylliäinen 2014, Kylliäinen & Hongisto 2019). Oppaat eivät ole velvoittavia, vaan suunnittelussa voidaan käyttää muitakin menetelmiä, kunhan ne ovat dokumentoitavissa.

Ääniympäristöasetus 796/2017

Ääniympäristöohje 2018

Ympäristöministeriön oppaat



Kuva 1.8. Ympäristöministeriön ääniympäristöasetus (2017) ja siihen liittyvä perustelumateriaali, ääniympäristöopas (2018) ja suunnittelu- ja toteutusmenetelmiä ja tilatyypikohtaisia suunnitteluohjeita sisältävät ympäristöministeriön oppaat.

1.2.2 Ääniympäristöasetus

Ympäristöministeriö antoi vuoden 2017 lopulla ääniympäristöasetuksen (796/2017), joka tuli voimaan vuoden 2018 alusta. Lisäksi kesällä 2019 ympäristöministeriö antoi asetuksen (360/2019) ääniympäristöasetuksen muuttamisesta. Uudet määräykset perustuvat Suomessa tehtyyn tieteelliseen tutkimukseen sekä tutkimuskirjallisuudesta saatuun tietoon. Uudistuksen kustannusvaikutukset tutkittiin määräysten valmistelun yhteydessä, ja kustannustarkastelut myös tukivat uudistusten tekoa toteutuneella tavalla (Kylliäinen 2019).

Ääniympäristöasetuksen 1 § määrittelee sen soveltamisalan: asetuksessa säädetään rakennusten ääneneristyksestä, melun- ja tärinätorjunnasta ja ääniolosuhteista sekä rakennusten piha- ja oleskelualueiden ja oleskeluun käytettävien parvekkeiden meluntorjunnasta ja ääniolosuhteista. Asetusta sovelletaan rakennuksiin, joissa on asuntoja, majoitusta tai potilashuoneita, taikka opetus-, kokous-, ruokailu-, hoito-, harrastus-, liikunta- tai toimistotiloja. Lisäksi asetusta sovelletaan uuden rakennuksen rakentamisen lisäksi rakennuksen korjaus- ja muutostyöhön sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muuttamiseen maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) mukaisessa rakentamisen suunnittelussa, lupamenettelyssä ja valvonnassa.

Asetuksen 2 §:ssä säädetään, että rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa on otettava huomioon rakennuspaikan melu- ja tärinäolosuhteet. Tämä tarkoittaa sitä, että liikennemelua, tärinää ja runkomelua koskevat vaatimukset annetaan ensisijaisesti asemakaavassa. Jos asemakaava on esimerkiksi vanha eikä siinä ole melu- ja tärinäolosuhteita koskevia kaavamääräyksiä tai alueelle on tullut uusi liikenneväylä tai alueelta on poistunut liikenneväylä, noudatetaan asetuksessa esimerkiksi piha- ja oleskelualueille sallittuja melun keskiäänitasoja. Ääniympäristöasetuksen 5 §:ssä on myös säädetty vähimmäisvaatimuksesta melualueille rakennettavien asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden ulkovaipan ääneneristyksestä.

Rakennuksen korjaus- tai muutostyössä ei ääniympäristöasetuksen 6 §:n mukaan saa heikentää rakennuksen ääneneristystä, melun- ja tärinätorjuntaa, ääniolosuhteita eikä virkistykseen käytettävien rakennuksen piha- ja oleskelualueiden sekä oleskeluun käytettävien parvekkeiden meluntorjuntaa ja ääniolosuhteita. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi julkisten rakennusten peruskorjaushankkeita tulisi hankkeen aluksi selvittää, millaiset akustiset olosuhteet rakennuksessa on. Tarkasti tämä voidaan selvittää lähinnä akustisilla mittauksilla.

Varsin yleinen rakennushanke korjausrakentamisessa on toimisto-, liike- tai teollisuusrakennuksen käyttötarkoituksen muuttaminen asunnoiksi, toisinaan muuhunkin käyttöön. Ääniympäristöasetuksen 6 §:n mukaan käyttötarkoitusta muutettaessa rakennuksen ääneneristys, melun- ja tärinätorjunta ja ääniolosuhteet sekä virkistykseen käytettävien rakennuksen piha- ja oleskelualueiden sekä oleskeluun käytettävien parvekkeiden meluntorjunta ja ääniolosuhteet on suunniteltava ja toteutettava siten, että ääniympäristöstä ei aiheudu asukkaille haittaa. Useimmiten näissä hankkeissa on lähdetty siitä, että haittaa ei aiheudu silloin, kun käyttötarkoituksen muutos suunnitellaan niin, että ääniympäristö vastaa uudisrakentamisen tasoa. Asetuksen 3 § antaa kuitenkin mahdollisuuden tapausharkintamenettelyyn, jos asetusta ei ole tarkoituksenmukaista soveltaa rakennuksen tai sen ulkopuolisen ääniympäristön erityisten ominaisuuksien, tilan erityisen käytön tai käyttäjryhmän taikka muun erityisen syyn vuoksi. Tällainen syy voisi olla esimerkiksi rakennuksen tai sen osan suojeleminen. Tällöin rakennuslupaa haettaessa on osoitettava, että suunnittelu johtaa tilan käyttötarkoitukseen huomioon ottaen ääneneristyksen, melun- ja tärinätorjunnan sekä ääniolosuhteiden kannalta olennaisen teknisen vaatimuksen täyttymiseen.

1.2.3 Ääniympäristöohje

Kesällä 2018 ympäristöministeriö antoi ohjeen rakennuksen ääniympäristöstä (YMo 2018). Ohje selittää laajemmin ääniympäristöasetuksessa annettuja määräyksiä ja mittalukujen merkitystä. Lisäksi se antaa ääniympäristöasetuksessa säädettyä laajemmin raja-arvoja erilaisten rakennus- ja tilatyypin ääneneristykselle, huoneakustiikalle, talotekniikan melutasoille sekä tärinälle ja runkomelulle.

Toisin kuin ääniympäristöasetus, ääniympäristöohje ei ole viranomaisia, rakennushankkeeseen ryhtyvää tai suunnittelijoita sitova, mutta sen voidaan katsoa edustavan rakentamisessa noudatettavaa hyvää rakentamistapaa ääniympäristöä suunniteltaessa, toteutettaessa ja todennettaessa. Ääniympäristöohje myös määrittelee rakennushankkeen eri osapuolien vastuut. Rakennuksen ääniympäristö syntyy rakennushankkeeseen ryhtyvän, käyttäjän, rakennuttajan tai rakennuttajakonsultin sekä suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden yhteistyönä. Rakennushankkeeseen ryhtyvää vastaa siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan säännösten sekä myönnetyn rakennusluvan mukaisesti. Rakennusvalvontaviranomainen valvoo rakennustoimintaa yleisen edun kannalta ja osaltaan huolehtii, että rakentamisessa noudatetaan maankäyttö- ja rakennuslakia ja sen nojalla annettuja säännöksiä. Kunnan rakennusvalvontaviranomaisella on säännösten soveltamis- ja tarkintavalta. Pääsuunnittelija huolehtii siitä, että eri suunnittelualojen suunnitelmat muodostavat kokonaisuuden siten, että rakentamista koskevien säännösten vaatimukset täyttyvät ja noudatetaan hyvää rakentamistapaa. Pääsuunnittelijan tehtäviin kuuluu myös huolehtia yhdessä rakennushankkeeseen ryhtyvän kanssa suunnitelmien riittävydestä, suunnittelijoiden vastuunjaosta ja yhteistyöstä sekä suunnitelmien yhteensovittamisesta.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän tulee selvittää yhdessä suunnittelijoiden kanssa rakennuksen akustisen suunnittelutehtävän vaativuusluokka. Kun suunnittelutehtävän vaativuusluokka on vaativa tai poikkeuksellisen vaativa, rakennushankkeen akustinen suunnittelija on ilmoitettava rakennuslupaa haettaessa. Rakennushankkeeseen ryhtyvän pitää huolehtia siitä, että rakennushankkeen akustinen suunnittelija täyttää hankkeen vaativuusluokkaa vastaavat kelpoisuusvaatimukset. Rakennuslupaviranomainen arvioi kelpoisuusvaatimusten täyttymistä suunnittelijan koulutuksen ja kokemuksen perusteella.

Vaativia rakennushankkeita ovat rakennusvalvontojen käytäntöjen mukaan kaikki ääniympäristöasetuksessa mainitut rakennus- ja tilatyypit asuinrakennuksia lukuun ottamatta. Myös asuinrakennukset voivat olla akustiikan kannalta vaativia, jos ne sijaitsevat melualueella tai poikkeuksellisen vaativia tärinän ja runkomelun vuoksi rakennettaessa ratojen varteen tai päälle tai jos asuinrakennukseen kytkeytyy jokin meluisa tila, kuten musiikkiravintola tai liikuntakeskus. Poikkeuksellisen vaativaksi rakennushanke muodostuu, jos sen tilojen meluttomuudelle, tärinättömyydelle, ääneneristävyydelle tai huoneakustiikalle on asetettu poikkeuksellisia vaatimuksia. Tällaisia hankkeita voivat olla esimerkiksi laboratoriot, joissa on joko äänekkäitä ja täriseviä tutkimuslaitteita tai melu- tai tärinäherkkiä tutkimuslaitteita. Rakennukset, joissa edellytetään poikkeuksellisen korkeaa laatua musiikin kuuntelun tai puheen ymmärrettävyyden vuoksi, ovat myös poikkeuksellisen vaativia rakennushankkeita. Esimerkkejä tällaisista ovat konserttitalit ja

elokuvateatterit. Poikkeuksellisen vaativiksi rakennushankkeet katsotaan myös silloin, jos niissä toteutetaan akustisesti ainutkertainen ratkaisu, jolle ei ole valmiita suunnitteluhjojeita tai josta ei ole kokemuseräistä tietoa tai jonka suunnitteluun liittyy uusien, akustisesti erittäin vaativien rakenneratkaisujen tuotekehitys.

1.2.4 Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus

Standardin SFS 5907 ensimmäinen painos julkaistiin vuonna 2004. Standardin otsikkona oli tuolloin ”Rakennusten akustinen luokitus” (SFS 5907: 2004). Standardin laatimisen taustalla oli se, että 1990-luvulla rakentamismääräyksiä oli muutettu ns. toiminnalliseen suuntaan. Ääneneristyksen osalta tämä oli merkinnyt sitä, että rakentamismääräyskokoelman osassa C1 vuodelta 1998 oli enää määräyksiä vain asuinrakennusten askel- ja ilmääneneristyksestä sekä sallituista äänitasoista. Muista rakennustyypeistä oli vain suppeita ohjeita. Samanaikaisesti myös rakennusvalvonnan velvollisuudet olivat muuttuneet eikä suunnitelmia enää tarkastettu yhtä laajasti kuin aiemmin. Sen sijaan rakennusvalvonnan tehtäväksi oli tullut valvoa sitä, että rakennushankkeen suunnittelu- ja toteutusorganisaatiolla on riittävä pätevyys hankkeen läpiviemiseksi. Muiden kuin asuinrakennusten ääneneristyksen, huoneakustiikan ja meluntorjunnan suunnittelu ja tavoitearvojen määrittely oli siten siirtynyt kokonaan suunnitteluorganisaation vastuulle. Standardin SFS 5907 yksi tarkoitus oli vastata suunnitteluhjojeiden tarpeeseen, joka oli syntynyt viranomaismääräysten supistumisesta (Hirvonen et al. 2005).

Standardissa 5907:2004 otettiin käyttöön erilaisten rakennusten akustinen luokitus, jonka tarkoituksena oli helpottaa suunnittelijoiden, rakennuttajien, rakennusten käyttäjien ja kiinteistönomistajien työtä akustisesti tarkoituksenmukaisten tilojen aikaansaamiseksi ja valintojen tekemiseksi suunnittelun alkuvaiheessa. Standardi jakaa tilat neljään akustiseen laatuluokkaan, joista yksi vastasi viranomaismääräysten tasoa niiltä osin kuin viranomaismääräyksiä oli olemassa. Tämän luokan tason alapuolella ollut luokka oli tarkoitettu vain vanhoille rakennuksille, joiden rakennusaikana ei ollut ollut teknisinä mittalukuina annettuja ääneneristysmääräyksiä ja joissa oli vähemmän tyydyttävät olosuhteet (Hirvonen et al. 2005).

Ääniympäristöasetuksen (YMa 796/2017) antamisen myötä tilojen välisen ääneneristävyyden määrittelevät mittaluvut muuttuivat, minkä vuoksi standardin SFS 5907 ensimmäinen painos (2004) ei ollut enää ajan tasalla. Toisaalta radanvarsirakentamisen lisäantyyessä tärinä- ja runkomelukysymykset ovat lisääntyneet eikä kaikille rakennus- ja tilatyypeille ole ollut tärinä- tai runkomelutasojen ohjearvoja, eikä niitä standardin SFS 5907 (2004) ensimmäisessä painoksessa ollut. Standardin ensimmäisen painoksen käyttökokemusten perusteella voitiin myös todeta, että neliportainen laatuluokitus oli ollut liian hienojakoinen. Siksi standardia uudistettaessa päädyttiin siihen, että standardin toisessa painoksessa (SFS 5907:2022) akustisia luokkia on kolme: luokka A2 vastaa ääniympäristöasetuksessa säädettyjä velvoitteita ja A3 on tarkoitettu vain vanhojen rakennusten luokitteluun. Luokka A1 johtaa säädöstasoa parempaan ääniympäristöön. Standardin

uudistamisen yhteydessä myös sen otsikko vaihtui ja on nyt ”Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus”.

Standardi SFS 5907:2022 antaa suositusarvoja ääniympäristöasetusta laajemmin erilaisille rakennustyypeille, joita ovat asunnot, hotellit, palvelutalot, toimistot, oppilaitokset, päiväkodit, liikuntatilat, terveydenhuollon rakennukset, äänekkäät tilat, teollisuustyöpaikat ja WC- ja hygieniatilat. Lisäksi standardissa on erikseen käsitelty tärinäherkkiä laitteita ja toimintoja, joita ovat esimerkiksi sairaaloiden kuvantamislaitteet. Standardissa annetaan suositusarvoja askel- ja ilmääneneristävyydelle, huoneakustiikalle, talotekniikan melutasoille, liikennemelutasoille sekä liikenteen tärinä- ja runkomelutasoille.

1.2.5 Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista

Edellä mainitut määräykset ja ohjeet käsittelevät lähinnä ääniympäristöä erityisesti 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 993/1992 melutason ohjearvoista. 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 ulkovaipan ääneneristyksestä.

Eryteisesti rautatien ja raitiotien varrelle rakennettaessa äänihaittaa voi aiheuttaa myös rautatien tärinä ja siitä aiheutuva runkoääni. Ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) on annettu tärinälle ja runkomelutasolle asuin-, majoitus- ja potilashuoneiden ohjearvot. Lisäksi tärinää ja runkomelua koskevia suosituksia on VTT:n ohjeissa (Talja 2004, Talja & Saarinen 2009) sekä standardin SFS 5907 toisessa painoksessa (2022).

Luvun 1 lähteet

- Beranek, L. 2004. Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture. New York, Springer-Verlag.
- Fasold, W. & Veres, E. 1998. Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berlin, Verlag für Bauwesen.
- Gouk, P. 1999. Music, science and natural magic in seventeenth-century England. London, Yale University Press.
- Hakala-Zilliacus, L.-M. 2002. Suomen Eduskuntatalo (2. p.). Helsinki, Suomalaisen Kirjallisuuden Seuran Toimituksia 875.
- Hirvonen, M., Hongisto, V., Kylliäinen, M. & Lehtonen, K. 2005. Standardi SFS 5907 rakennusten akustisesta luokituksesta. Akustiikkapäivät 2005. Kuopio, 26.–27.9., Akustinen Seura ry, s. 111–116.
- Hunt, F. V. 1978. Origins in acoustics – The science of sound from antiquity to the age of Newton. New Haven, Yale University Press.
- ISO 226. 2003. Acoustics – Normal equal-loudness-level contours.
- Kovalainen, V. & Kylliäinen, M. 2016. Lasitettujen parvekkeiden ääneneristävyyden liikennemelualueilla. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 6/2016.
- Kylliäinen, M. 2009a. Mitä ääni on? Akustiikan vaihteita antiikin ajatuksista nykyaikaisen äänenhallinnan alkuun. Tekniikan Waiheita. Nro 2, s. 5–18.
- Kylliäinen, M. 2009b. Tämä akustiikka on niin uutta! Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.–15.5. Akustinen Seura ry, s. 36–41.
- Kylliäinen, M. 2009c. Kansainväliset yhteydet vuoden 1967 ääneneristysnormien muotoutumisessa. Tekniikan Waiheita. Nro 3, s. 29–47.
- Kylliäinen, M. 2019. Ääniympäristöasetus ja -ohje. Rakennusfysiikka 2019. Tampere, 28.–30.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 553–558.
- Kylliäinen, M. 2021a. Josef Stenbäck ja kirkkojen akustiikkasuunnittelu 1800- ja 1900-lukujen vaihteessa. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 198–203.
- Kylliäinen, M. 2021b. Akustikko Paavo Arnin kansainvälinen verkostoituminen. Teoksessa: Kylliäinen, M. (toim.). Aikamatkailua. Tampere, Kustannusosakeyhtiö Liipotin, s. 282–311.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. RIL 243-1 Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28.
- Kylliäinen, M. & Valovirta, I. 2011. Opetustilojen huoneakustiikka – paluu juurille. Akustiikkapäivät 2011. Tampere, 11.–12.5., Akustinen Seura ry, s. 285–290.
- Laki 26/1920 eräistä naapurussuhteista.
- Landström, U., Arlinger, S., Hygge, S., Johansson, Ö., Kjellberg, A. & Persson Waye, K. 1999. Störande buller – Kunskapsöversikt för kriteriedokumentation. Stockholm, Arbetslivsinstitutet, Arbete och Hälsa 1999:27.

- Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2013. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden kehittyminen Suomessa vuosina 1955–2008. Tekniikan Waiheita. Nro 1, s. 5–23.
- Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mitaustulosten perusteella. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 1/2014.
- Lindsay, R. B. 1966. The story of acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 39(4), s. 629–644
- Lindsay, R. B. 1973. Acoustics: historical and philosophical development. Stroudsburg, Dowden, Hutchinson & Ross.
- Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999.
- Niemi, H., Kylliäinen, M., Jäppinen, J. & Lindqvist, M. 2015. Engelin teatterin huoneakustiikan mallintaminen. Akustiikkapäivät 2015. Kuopio, 1.–2.9., Akustinen Seura ry, s. 145–150.
- Postma, B. & Katz, B. 2020. Pre-Sabine room acoustic assumptions on reverberation and their influence on room acoustic design. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 147(4), s. 2478–2487.
- Pääkkönen, R., Kylliäinen, M. & Mikkilä, A. 2016. Melun häiritsevyydestä. Ympäristö ja Terveys. Nro 5, s. 82–87.
- Romula, S. 2022. Julkisten rakennusten akustinen kuntotutkimus. Diplomityö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Sala, E., Sihvo, M. & Laine, A. 2003. Ääniergonomia – toimiva ääni työvälina. Helsinki, Työterveyslaitos ja Työturvallisuuskeskus.
- SFS 5907. 2004. Rakennusten akustinen luokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Sinisalo, J. 2006. Arkkitehtuurikirjoja Euroopan laidalla. Helsinki, Museoviraston rakennushistorian osaston julkaisuja 29.
- Sipari, P. & Saarinen, A. 2003. Rakennuksen julkisivun ääneneristävyyden mitoittaminen. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 108.
- Sundman, M. (toim.) 1989. C. L. Engel: Kirjeet 1813–1840. Helsinki, Helsinki-Seura ry, Entisäikain Helsinki XII.
- Suutarla, M. 2018. Kissanmaan koulu – Rakennushistoriallinen selvitys. Tampere, Arkkitehtitoimisto Lasse Kosunen Oy.
- Talja, A. 2004. Suositus liikennetälinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo, VTT tiedotteita 2278.
- Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Esiselvitys. Espoo, VTT tiedotteita 2468.
- Tanila, R. 2022. Toimistotilojen ääniolosuhteita koskevien määräysten ja ohjeiden kehittyminen Suomessa. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Tegen, M. 1986. Populär musik under 1800-talet. Stockholm, Reimers.

- Thompson, E. 2002. *The soundscape of modernity – Architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900–1933*. Cambridge, The MIT Press.
- Vitruvius. s. a. *Arkkitehtuurista*. Suom. Hyppönen, P., Ockenström, L. & Vuola, A. 2022. Helsinki, Gaudeamus.
- VnP 993/1992. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista.
- Weinzierl, S. 2002. *Beethovens Konzerträume – Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen*. Frankfurt am Main, Verlag Erwin Bochinsky.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMa 360/2019. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä annetun ympäristöministeriön asetuksen 5 ja 6 §:n muuttamisesta. Helsinki, ympäristöministeriö.
- YMo 2018. *Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä*. Helsinki, ympäristöministeriö.

2

**Äänen eteneminen ja
vaimeneminen**

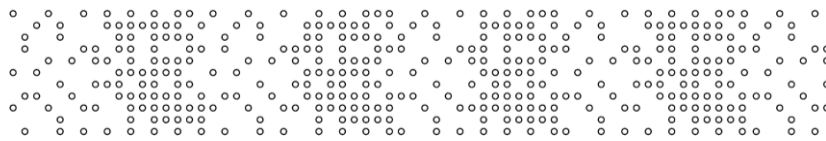
”Akustiikassa on esitettävä suureita, joiden suuruudet ja väliset suhteet vaihtelevat erittäin paljon. Tämän johdosta on otettu käyttöön logaritminen asteikko, johon meidän nyt on tutustuttava, ennen kuin voimme jatkaa.”

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 tihentymiä ja harventumia. Ilmahiukkasten liike saa seuraavat hiukkaset liikkeeseen, ja näin ääni etenee pitkittäisaaltona äänilähteestä ympäristöön (kuva 2.1).



Kuva 2.1. Ääni etenee ilmassa pitkittäisaaltona, jossa ilmahiukkasten tihentymät 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, äänentoistolaitteet, rakennuksen LVIS-laitteet ja erilaiset koneet. Äänen nopeus ilmassa on riippumaton taajuudesta, mutta lämpötila t [°C] vaikuttaa äänen nopeuteen c [m/s]:

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

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. Ilmaääni 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 ilmaäänien 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, äänenpainetta 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
18 dB	Erittäin hiljainen asuinhuone
24 dB	Asuinhuoneen taustääni keskimäärin
30 dB	Kuiskaus
45 dB	Toimistotyöympäristö
60 dB	Puhe 1 m etäisyydellä
70 dB	Vilkas katuliikenne 10 m etäisyydellä
85 dB	Tehdastyöympäristö
100 dB	Piikkaus
110 dB	Oopperalaulaja
120 dB	Kipukynnys
140 dB	Suihkumootorin vieressä

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 suurempi kuin laitteiden yksinään tuottama äänenpainetaso. Äänenpainetason määritelmästä seuraa myös se, että haluttaessa alentaa jonkin tilan äänenpainetasoa ensimmäisenä on

vaimennettava suurimman äänenpainetaso tuottava laite. Jos tilassa on esimerkiksi yksi laite, jonka äänenpainetaso on 60 dB, ja kymmenen laitetta, jotka kukin yksinään tuottavat 30 dB äänenpainetaso, 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

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

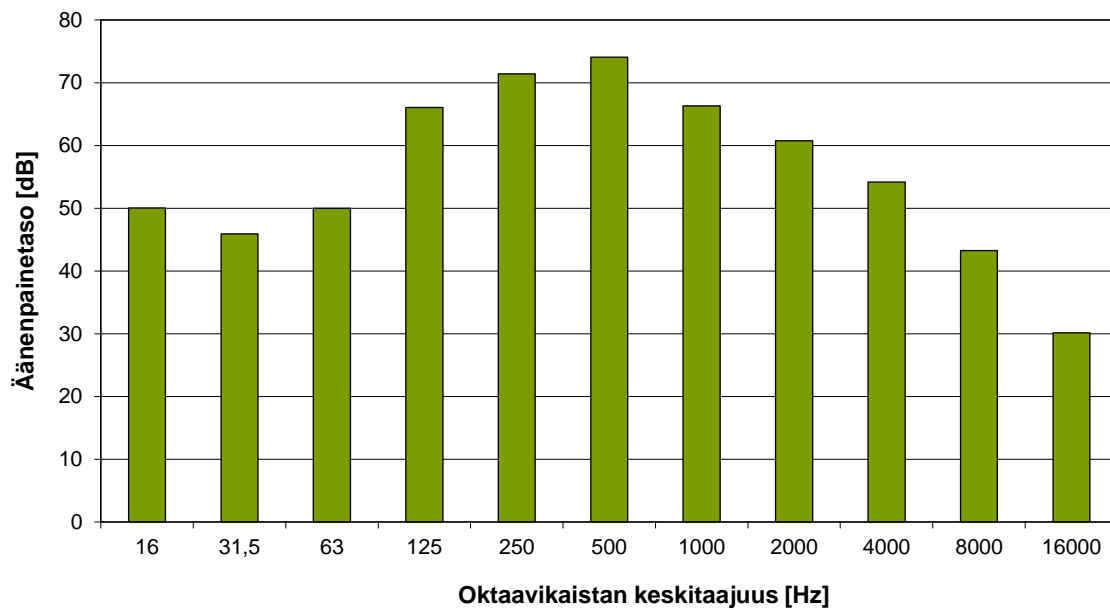
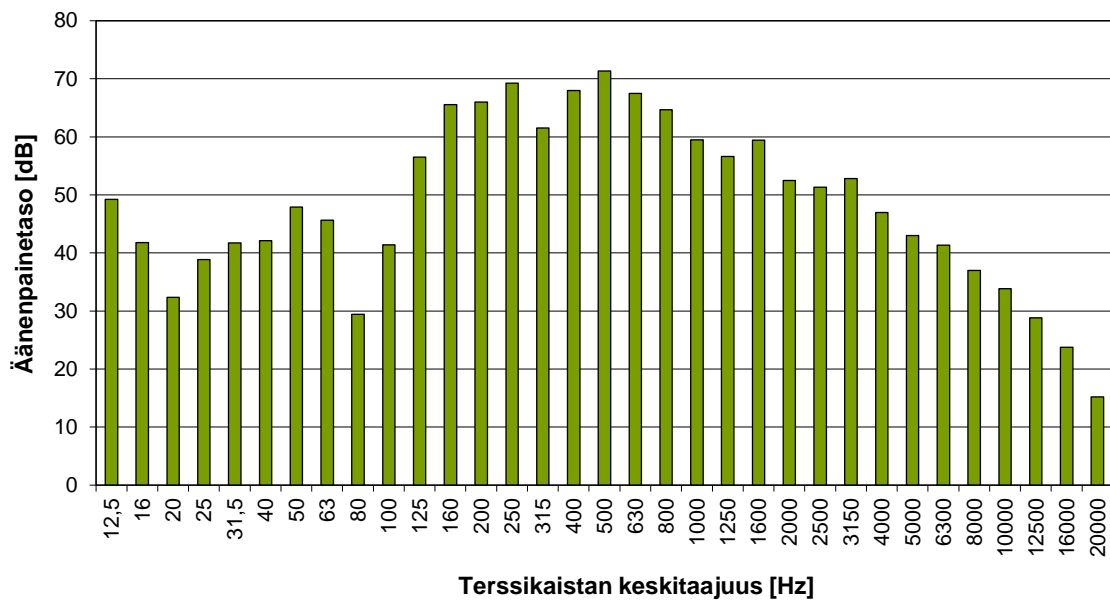
Jos äänilähteiden aiheuttamalle äänenpainetasolle on määritelty jokin sallittu arvo $L_{p,sall}$ ja tilassa tai ulkoalueella on n yhtä voimakasta äänilähdettä, yhdestä äänilähteestä sallittava äänenpainetaso on

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

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 taajuuskais-talla ilmoitettuun äänenpainetasoon, on aina suhteellisesti sama osuus keskitaajuudesta. Oktaavikaistan kaistanleveys on noin 70 % keskitaajuudesta ja terssikaistan kaistanleveys noin 23 % keskitaajuudesta. Taajuuskaistojen määrittely näin johtuu kuuloaistin ominai-suuksista. Kun esimerkiksi musiikissa sävelen äänenkorkeus kasvaa oktaavin, taajuus kaksinkertaistuu. Kahden oktaavin kasvu tarkoittaa taajuuden nelinkertaistumista. Kuu-loaistimuksena yhden oktaavin suhteellinen muutos taajuudessa tuntuu kuitenkin yhtä suurelta huolimatta siitä, että taajuuksien erotus kasvaa jokaisen muutoksen yhteydessä.

Rakenteiden ja rakennusten ääneneristysmittaukset tehdään kolmannesoktaavikais-toittain keskitaajuudesta 50 tai 100 Hz keskitaajuuteen 3150 Hz tai 5000 Hz. Erilaisten koneiden melupäästötiedot ja LVIS-laitteiden äänenvaimennustiedot tai melupäästötiedot ilmoitetaan sitä vastoin oktaavikaistoittain, samoin rakennusmateriaalien absorptio-omi-naisuudet. Nykyisin laitteiden äänitiedot ja materiaalien ominaisuudet ilmoitetaan keski-taajuuksilla 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ja 4000 Hz.

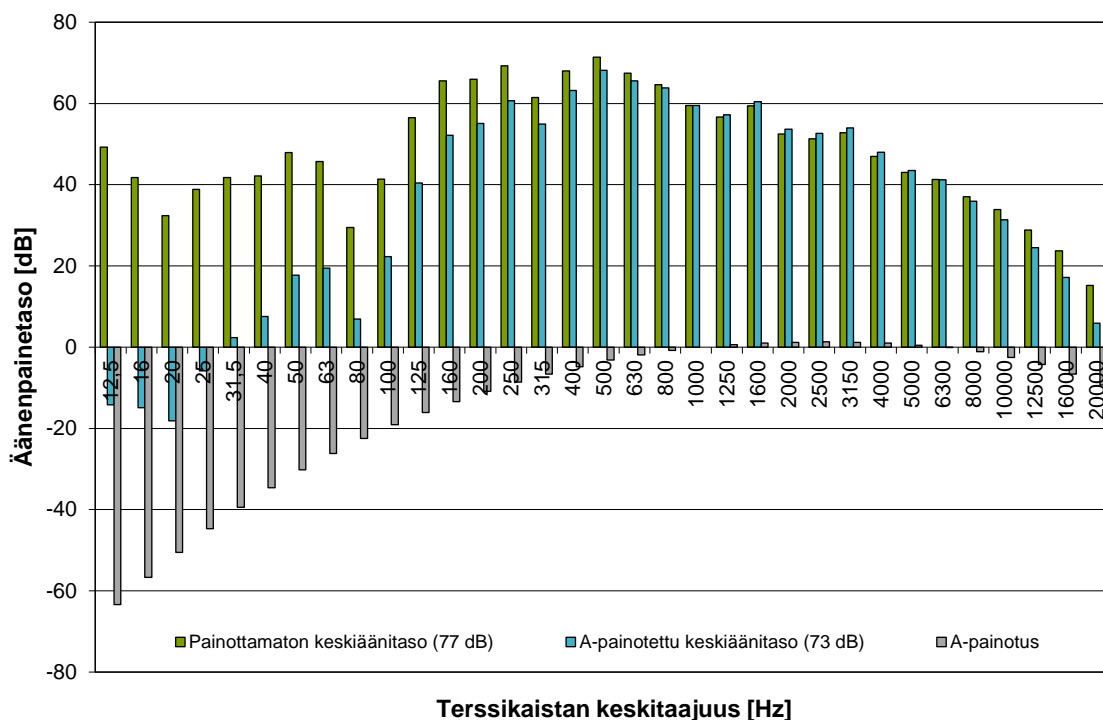
Melumittauksissa terssikaistoittain ilmoitetut tulokset antavat tarkemman käsityksen melusta kuin oktaavikaistoittain tehdyt mittaukset (kuva 2.2). Terssikaistoittain mitatut äänenpainetasot muutetaan oktaavikaistaisiksi laskemalla oktaavikaistan keskitaajuutta vastaavan terssikaistan äänenpainetaso kaavan 2.5 mukaisesti yhteen edellisen ja seuraavan terssikaistan äänenpainetaso kanssa.



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

2.1.3 A-painotus ja äänitaso

Äänenpainetaso L_p kuvaa fyysikaalisen 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 keskitaajuuksittain 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 herkkyiden vähentämällä terssikaistaisesta mitaustuloksesta pienten ja suurten taajuuksien vaikutusta. A-äänitaso on 73 dB ja painottoman kokonaisäänepainetaso 77 dB. Äänilähteenä on ollut espoolainen baritoni. Pienillä (< 100 Hz) ja suurilla taajuuksilla mittaustulos muodostuu taustäänestä.

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 63–4000 Hz tai 63–8000 Hz. Äänitasomittareiden mittausalue on yleensä 20–20 000 Hz, joten niiden tuottamiin mittaustuloksiin sisältyy ääni koko kuuloalueelta. Oktaavi- tai terssikaistaisista äänitasoista taajuuskaistalla saadaan yksilukuinen arvo laske- malla energettinen summa, josta käytetään lyhyesti nimitystä äänitaso, L_A :

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

Taulukko 2.2. Kuvan 2.3 terssikaistoittain mitattujen äänenpainetasojen L_p muuttaminen A-painotetuiksi äänenpainetasoiksi $L_{p,A}$ ja summaus äänitasoksi L_A . A-painotuksen arvot oktaavikaistoilla on esitetty lihavoituina.

Keskitaajuus f [Hz]	Äänenpainetaso L_p [dB]	A-painotus [dB]	A-painotettu äänenpainetaso $L_{p,A}$ [dB]
12,5	49,2	-63,4	-14,2
16	41,8	-56,7	-14,9
20	32,4	-50,5	-18,1
25	38,8	-44,7	-5,9
31,5	41,7	-39,4	2,3
40	42,1	-34,6	7,5
50	47,9	-30,2	17,7
63	45,7	-26,2	19,5
80	29,5	-22,5	7,0
100	41,4	-19,1	22,3
125	56,5	-16,1	40,4
160	65,5	-13,4	52,1
200	66,0	-10,9	55,1
250	69,3	-8,6	60,7
315	61,5	-6,6	54,9
400	68,0	-4,8	63,2
500	71,4	-3,2	68,2
630	67,5	-1,9	65,6
800	64,6	-0,8	63,8
1000	59,5	0,0	59,5
1250	56,6	0,6	57,2
1600	59,4	1,0	60,4
2000	52,5	1,2	53,7
2500	51,3	1,3	52,6
3150	52,8	1,2	54,0
4000	47,0	1,0	48,0
5000	43,0	0,5	43,5
6300	41,3	-0,1	41,2
8000	37,0	-1,1	35,9
10000	33,9	-2,5	31,4
12500	28,8	-4,3	24,5
16000	23,7	-6,6	17,1
20000	15,2	-9,3	5,9
$L_{p,tot} =$	77	$L_A =$	73

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 tarkastelussa on siksi otettava huomioon sekä pitkäaikainen keskiäänitaso $L_{Aeq,T}$ [dB] ja hetkellinen enimmäisäänitaso $L_{A,max}$ [dB].

Keskiäänitaso $L_{Aeq,T}$ 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 keskiäänitasoa laskettaessa:

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

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.

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

2.1.4 Äänitehotaso

Äänilähteen kyky tuottaa ääntä ilmoitetaan äänitehona W [W]. Vertailuääniteho W_0 on 1 pW. Suunnittelussa käytettävien lukuarvojen yksinkertaistamiseksi käytetään äänitehotasoa L_w [dB], jossa laitteen äänitehoa verrataan 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. Ääniteho tai äänitehotasoa ei ole mahdollista mitata suoraan, vaan se on määritettävä laskennallisesti esimerkiksi laitteen ympäristössä tunnetulla etäisyydellä mitatusta äänenpainetasta eri taajuuskaistoilla.

Ulkona sijaitsevan äänilähteen äänitehotason perusteella voidaan laskea äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso kiinnostavalla etäisyydellä. Samoin sisällä olevan äänilähteen huoneeseen aiheuttama äänitaso voidaan laskea sen äänitehotasojen perusteella. Äänitehotasosta ei voida suoraan päätellä, millaiselta jokin äänilähde tietyssä 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 palloaallossa äänenpainetaso L_p pallon säteen suunnassa etäisyydellä r [m] on

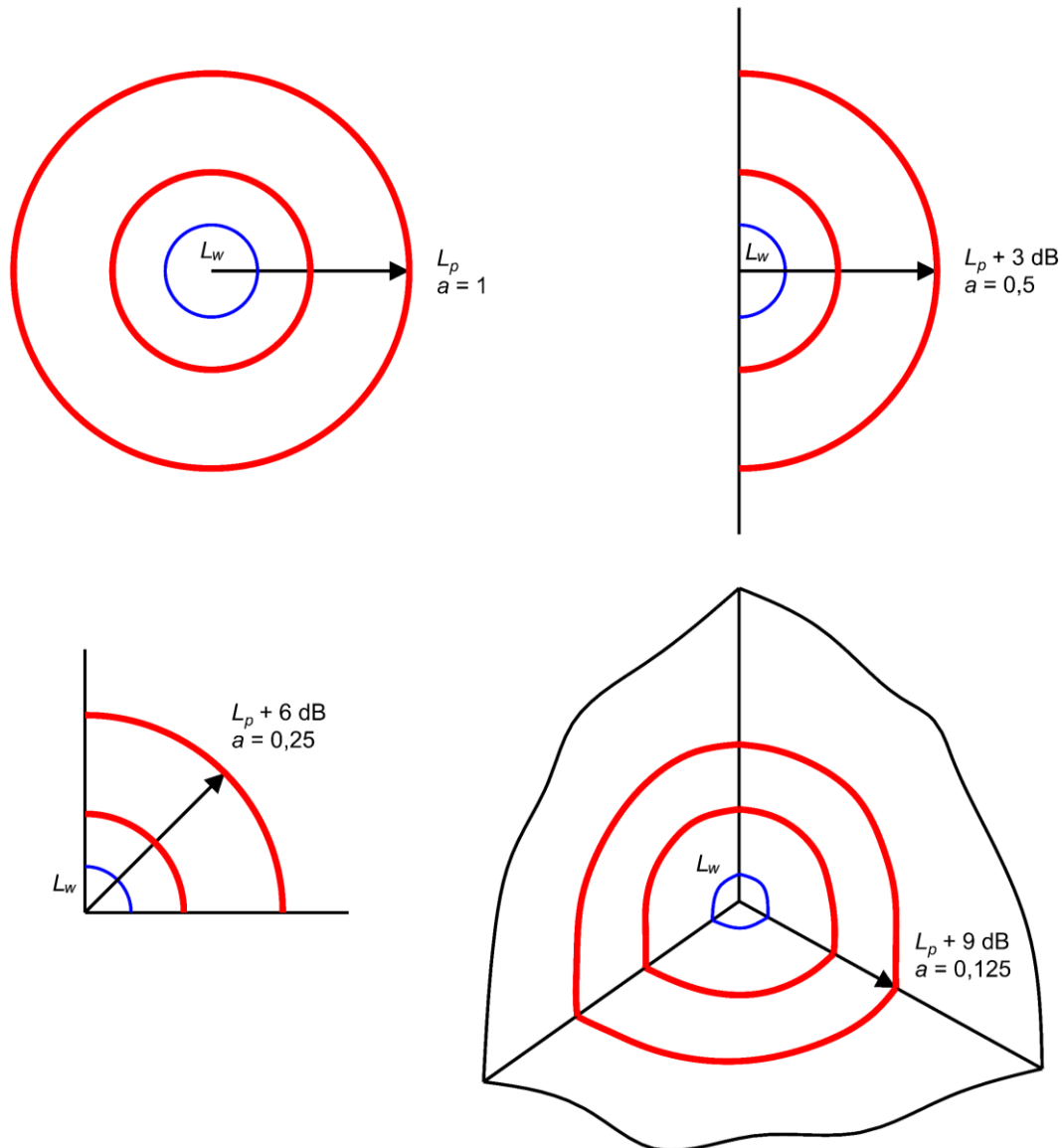
$$L_p = L_W - 10 \lg(4\pi r^2) = L_W - 20 \lg r - 11 \quad (2.9)$$

Palloaallossa äänenpainetaso L_p laskee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Äänenpainetason alenemisesta siirryttäessä äänilähteestä kauemmaksi eli kaavan 2.9 jälkimmäisestä termistä $10\lg(4\pi r^2)$ käytetään nimitystä etäisyysvaimennus. Vaimennus on tässä esityksessä aina positiivinen luku. Kaava 2.9 pätee 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

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

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 palloaallossa kaavalla 2.9 tai 2.10. Tämän jälkeen tulokseen lisätään äänitehon palloaaltoa pienemmälle alalle tapahtuvasta jakautumisesta johtuva korjaus seuraavasti (kuva 2.4):

- äänilähteen sijaitessa tasolla (puolipallo) kaavan 2.9 mukaan laskettuun ääni- tai äänenpainetasoon lisätään 3 dB.
- äänilähteen sijaitessa kahden toisiaan vastaan kohtisuoraan olevan pinnan muodostamassa kulmassa (neljännespallo) kaavan 2.9 mukaan laskettuun ääni- tai äänenpainetasoon lisätään 6 dB.
- äänilähteen sijaitessa kolmen toisiaan vastaan kohtisuorassa olevan pinnan muodostamassa nurkassa (pallon kahdeksasosa) kaavan 2.9 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 palloaallossa 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. Palloaallossa äänenpainetaso suuntaavuus huomioon otettuna on

$$L_p = L_W - 20 \lg r - 11 - 10 \lg a + 10 \lg k \quad (2.11)$$

Äänilähteen suuntaavuus siten korottaa äänenpainetasoa palloaallossa. Suuntaavuustietoja ei esimerkiksi rakennusten LVIS-laitteista useinkaan ole saatavilla, joten usein

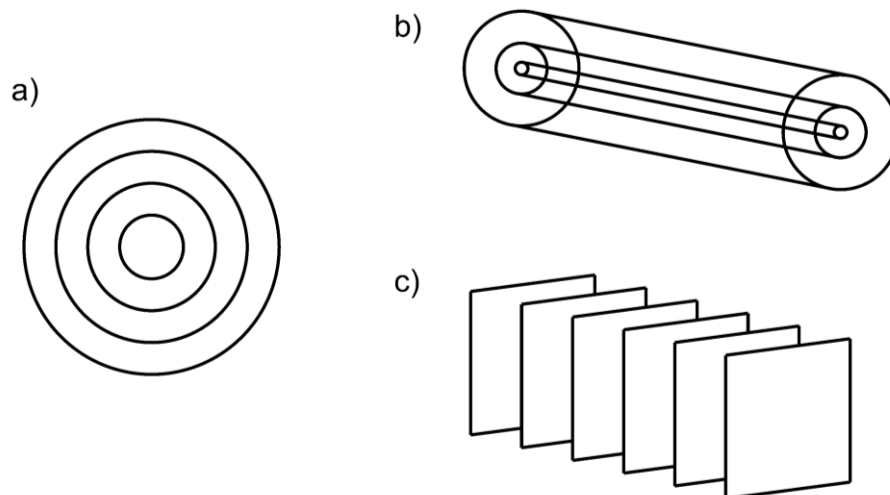
niitä käsitellään pistemäisinä äänilähteinä, joiden ympärille syntyy palloaalto, jossa suuntakerroin on 1. Erikokoisten ja -muotoisten aukkojen suuntakertoimia on annettu alan kirjallisuudessa. Jos otetaan käyttöön avaruuskulman Q käsite – pallopinnalla avaruuskulma on 4π , puolipallopinnalla 2π – ja otetaan huomioon äänilähteen suuntaavuus, äänenpainetaso palloaallossa on

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

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 2.13 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.



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

Pinta-alaltaan suuresta tasomaisesta äänilähteestä, esimerkiksi ilmanvaihtokonehuoneen tai teollisuushallin seinästä, leviävä ääni muistuttaa tasoaaltoa, jossa hyvin lyhyillä etäisyyksillä äänenpainetaso ei laske lainkaan etäisyyden vaikutuksesta (kuva 2.5). Ilmanvaihtokonehuoneen tapauksessa lyhyt etäisyys tarkoittaa noin 1 m etäisyyttä. Hieman kauempana tasoaalto alkaa vaimentua sylinteriaallon tavoin (konehuoneen tapauksessa tyypillisesti noin 1–5 m) ja vielä kauempana palloaallon tavoin.

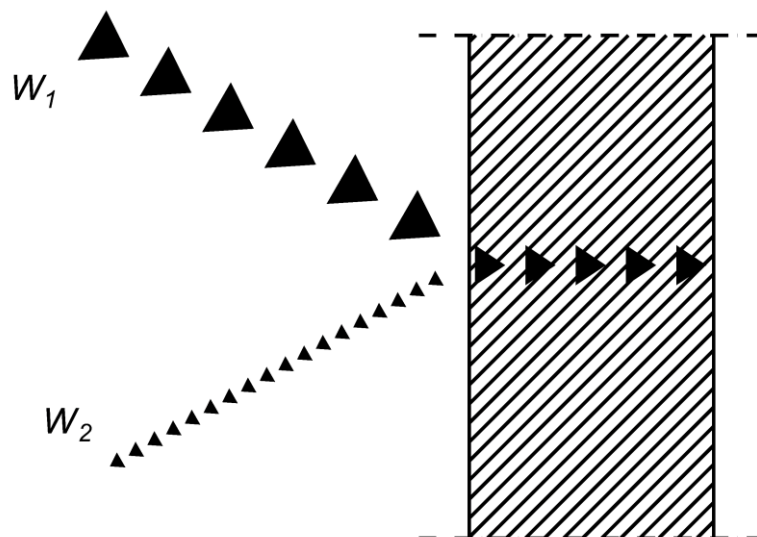
2.2 Äänenpainetaso huoneessa

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:

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

Absorptiosuhde on positiivinen luku, jonka arvo on pienempi kuin 1 ja suurempi kuin 0. Kunkin materiaalin absorptiosuhteen arvo ei ole vakio, vaan se riippuu taajuudesta: materiaalien absorptiosuhteet mitataan oktaavikaistoittain 125–4000 Hz keskitaajuuksilla, nykyisin yleensä myös 63 Hz keskitaajuuksilla. Erilaisista absorptiomateriaaleista kerrotaan tarkemmin huoneakustiikkaa käsittelevän luvun yhteydessä.



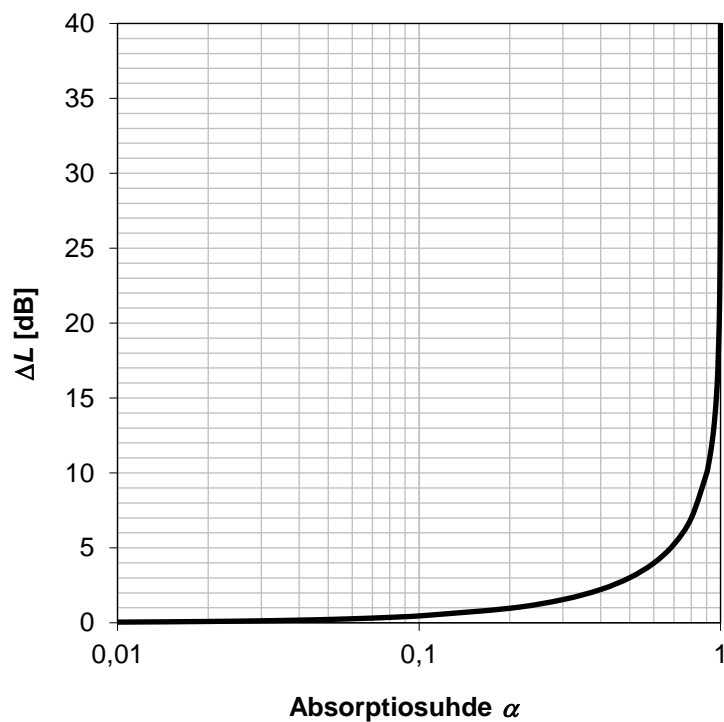
Kuva 2.6. Ääni heijastuu ilman ja toisen aineen rajapinnassa, mutta osa äänitehosta jää heijastumatta ja absorboituu toiseen aineeseen.

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

Äänen heijastuessa pinnasta ääniteho alenee absorption 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 2.7). Alenema ΔL on alle 1 dB, kun absorptiosuhde on 0,2. Absorptiosuhteen lähestyessä arvoa 1 alenema ΔL on useita kymmeniä desibelejä. Materiaalien valinta ja absorption 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. Äänen heijastuessa tapahtuvan äänitehotason aleneman ΔL [dB] riippuvuus absorptiosuhteesta.

2.2.2 Jälkikaiunta-aika

Huoneen pinnoilla olevien materiaalien absorptiosuhteiden α_i ja niiden pinta-alojen S_i [m^2] perusteella voidaan laskea huoneen absorptioala A [m^2] kullakin oktaavikaistan keskitaajuudella. 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 rajaan saakka: jos absorptioala on liian suuri, puheen äänitaso laskee ja kuuluvuutta parantavat heijastukset esimerkiksi katosta vaimenevat, mikä puolestaan heikentää puheen kuuluvuutta ja selvyyttä (Kylliäinen & Hongisto 2019).

Jälkikaiunta-ajan kuluessa äänenpainetaso tilassa alenee Sabinen määritelmän mukaan 60 dB. Olemassa olevan tilan jälkikaiunta-aika voidaan määrittää voimakkaan äänilähteen avulla niin, että äänilähde sammutetaan äkillisesti ja äänenpainetason laskuun kuluva aika mitataan (kuva 2.8). Jälkikaiunta-ajalla, tilavuudella V [m^3] ja absorptioalalla on alkujaan Sabinen kokeellisesti johtama yhteys:

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

Sabinen kaavaa käytetään suunnittelussa, kun määritetään tilan käyttötarkoituksen perusteella tavoiteltavan jälkikaiunta-ajan saavuttamiseksi tarvittava absorptioala taajuuskaistoittain. Muiden akustiikan suureiden tavoin jälkikaiunta-aika riippuu taajuudesta, sillä materiaalien absorptiosuhteet ovat eri taajuuskaistoilla erilaisia. Esimerkkejä erilaisten tilojen jälkikaiunta-ajoista on taulukossa 2.3.

Taulukko 2.3. Erilaisten tilojen jälkikaiunta-aikoja 500 Hz keskitaajuudella (Huhtala et al. 2019, Kylliäinen et al. 2016, Rauhala et al. 2017, Sereda 2022, SFS 5907:2022).

Jälkikaiunta-aika	Esimerkki tilasta
6,3 s	Helsingin yliopiston päärakennuksen vestibyyli
4,7 s	Turun Akatemiatalon juhlasali (tyhjänä, 340 paikkaa)
1,8 s	Tampere-talon iso konserttisali (tyhjänä, 1800 paikkaa)
1,5 s	Kalustamaton asuinhuone
1,1 s	Jyväskylän teatteritalon suuri näyttämö (tyhjänä, 550 paikkaa)
0,7 s	Suuri elokuvateatterisali
0,6 s	Hyvin suunniteltu luokkahuone
0,5 s	Kalustettu asuinhuone
0,4 s	Hyvin suunniteltu avotoimisto

Jos tilavuus on suuri ja tilan pinnat ovat lähes täysin ääntä heijastavia, kuten rapatut ja tasoitetut seinät ja pilarit sekä kivilattiat, joita on esimerkiksi Helsingin yliopiston päärakennuksen vestibyyliässä (kuva 2.8), jälkikaiunta-aika voi olla erittäin pitkä. Konserttisaleissa käytännössä ainoa absorboiva pinta on konserttitilanteessa yleisö. Muut pinnat ovat pääosin ääntä heijastavia, mikä mitoittaa konserttisalin tilavuuden. Jos tavoitellaan 2 s jälkikaiunta-aikaa ja oletetaan yleisön absorptiosuhteeksi 0,8 ja katsomon pinta-alaksi 1000 m², saadaan kaavan 2.17 mukaan 1000 hengen konserttisalin tilavuudeksi 10 000 m³ eli 10 m³ istumapaikkaa kohti. Tämä vastaa tyypillistä konserttisalin tilavuutta (Beranek 2004).



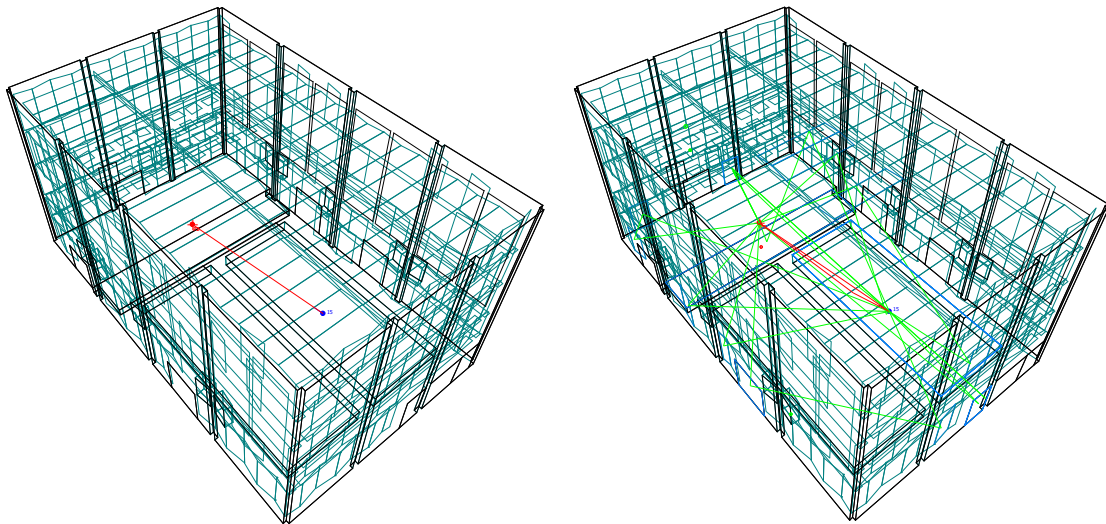
Kuva 2.8. Esimerkkejä tiloista, joissa on mitattu jälkikaiunta -aikoja (taulukko 2.3): Helsingin yliopiston päärakennuksen vestibyyli (6,3 s), Turun Akatemiatalon juhlasali (4,7 s), Tampere-talon iso konserttisali (1,8 s) ja Jyväskylän teatteritalon suuri näyttämö (1,1 s). Kuvälähde: A-Insinöörin kuva-arkisto, kuvaajat Timo Huhtala ja Mikko Kylliäinen.

Jälkikaiunta-aika on määritelty diffuusissa äänikentässä. Se muodostuu äänen herättämisestä huoneen ominaisvärähtelyistä. Suurilla taajuuksilla ominaisvärähtelyiden ominaistaajuudet ovat niin lähellä toisiaan, että niitä ei ole mahdollista erottaa toisistaan. Pienillä taajuuksilla ominaisvärähtelyitä on vähän, ja jälkikaiunta-aika ja äänenpainetaso huoneessa voivat vaihdella suuresti tilan eri kohdissa (Kylliäinen 2014).

Monimutkaisissa tiloissa ja tiloissa, joissa absorptioala on erittäin suuri, Sabine 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. Tarkimmat tulokset Sabine kaavalla saadaan, kun tilan absorptioala on jakaantunut suhteellisen tasaisesti ympäri tilan pintoja.

2.2.3 Huoneen äänenpainetason muodostuminen

Äänilähteen aloittaessa toimintansa huoneessa kuuliija havaitsee ensimmäisenä suoraan äänilähteestä korvaan tulleen äänen (kuva 2.9). 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 2.9. Ääni saapuu vastaanottopisteeseen ensimmäisenä suoraan äänilähteestä. Sen jälkeen vastaanottopisteessä havaitaan heijastuksia huoneen eri pinnoista. Esimerkkinä on Joensuun konservatorion konserttisalin huoneakustinen tietokonemalli. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

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:

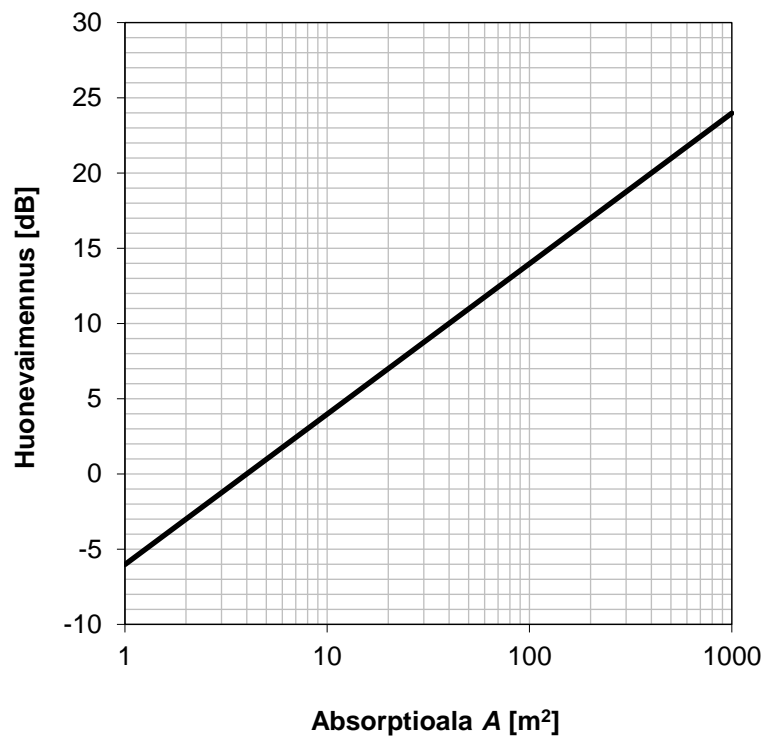
$$L_p = L_w - 10 \lg \frac{A}{4} \quad (2.18)$$

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 2.10).

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

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

Suoraan tulevan äänen vaikutus äänenpainetasoon on kaavan 2.19 mukaan varsin pieni eikä sitä ole yleensä tarpeen ottaa huomioon. Tavallisesti huoneeseen syntyvä äänenpainetaso voidaan laskea riittävällä tarkkuudella huonevaimennuksen perusteella olettamalla huoneen äänikenttä diffuusiksi.



Kuva 2.10. Absorptioalan kaksinkertaistuesssa huonevaimennus kasvaa 3 dB eli äänenpainetaso huoneessa vastaavasti alenee 3 dB. Jos huoneessa ei ole absorboivia pintoja juuri lainkaan ali absorptioala on alle 4 m^2 , huonevaimennus on negatiivinen eli äänenpainetaso kasvaa äänitehotasoa suuremmaksi.

Luvun 2 lähteet

- Beranek, L. 2004. Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture (2nd ed.). New York, Springer-Verlag.
- Huhtala, T., Valovirta, I., Kylliäinen, M. & Takala, J. 2019. Turun Akatemiatalon perusparannus. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 78–83.
- Kylliäinen, M. 2014. The measurement uncertainty of single-number quantities for rating the impact sound insulation of concrete floors. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 100(4), s. 640–648.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28.
- Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D. & Hongisto, V. 2016. Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings. Applied Acoustics. Vol. 102, s. 12–18.
- Rauhala, J., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Takala, J., Valovirta, I. & Ruohonen, M. 2017. Tampere-talon laajennuksen ja tilamuutosten akustiikkasuunnittelu. Rakennusfysiikka 2017. Tampere, 24.–26.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 559–564.
- Sereda, O. 2022. Nykyaikaisten elokuvateatterien akustiikkasuunnittelu. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Takala, J., Kylliäinen, M., Kovalainen, V. & Pelli, T. 2021. Akustiikkasuunnittelu Helsingin yliopiston päärakennuksen peruskorjaushankkeessa. Rakennusfysiikka 2021. Tampere, 26.–28.10., Tampereen yliopisto ja Kiinco Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy, s. 491–496.

3

Ilmääneneristys

”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 Uuno Varjo 1938

3.1 Ilmääneneristävyys

3.1.1 Rakennusosan ilmääneneristävyys ja ilmääneneristävyys tilojen välillä

Ilmääneneristyksen tarkoituksena on vähentää puheen, musiikin, soitinten, äänentoiston tai teknisten järjestelmien huonetilaan synnyttämän ilmäänen siirtymistä toiseen huonetilaan. Ilmääntä 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.

Ilmääneneristävyys on rakennusosan tai rakennusosien muodostaman kokonaisuuden ominaisuus tilojen välillä rakennuksessa. Rakennusosan ilmääneneristävyys muodostuu sen rakennekerroksista ja niiden ominaisuuksista, rakennekerrosten välisistä kytkennöistä (esimerkiksi ilmaväli, ranka, ruuvi, liima) ja ilmavälien täytöistä. Rakennuksessa ääni siirtyy tilasta toiseen tiloja erottavan rakennusosan sekä sitä sivuavien rakennusosien kautta. Tilojen välinen ääneneristävyys muodostuu siten tiloja rajaavien ja yhdistävien rakennusosien ilmääneneristävyyksistä, rakennusosien välisten liitosten ominaisuuksista (jäykkyys, katkot, eristinkerrokset) sekä rakennusosien ja liitosten tiiviydestä.

Tilaan syntyvä äänenpainetaso ja viereisestä tilasta siirtyvän äänitehon kokeminen riippuu monesta muustakin tekijästä. Ensinnäkin tilaan välittyvän äänen voimakkuus riippuu paitsi ilmääneneristävyyydestä, myös äänen voimakkuudesta viereisessä tilassa. Esimerkiksi asuinrakennuksissa ei teknisin ratkaisuin voida vaikuttaa asumismelun voimakkuuteen, vaan pelkästään huoneistoja erottaviin rakenteisiin ja niiden tiiviyteen ja liitoksiin. Tilaan toisesta tilasta välittynyt ääni vaimenee sitä enemmän, mitä suurempi absorptioala vastaanottavassa tilassa on. Absorption lisääminen ei kuitenkaan kasvata ilmääneneristävyyttä, vaan se vaikuttaa pelkästään tilaan syntyvään äänenpainetasoon. Viereisestä tilasta tulevan äänitehon vaimentaminen absorptiota lisäämällä on ääneneristykseen verrattuna melko tehoton keino: absorptioalan kaksinkertaistaminen alentaa äänenpainetasoa 3 dB, mutta ääntä eristävien rakenteiden ilmääneneristävyyydet ovat taajuudesta riippuen yleensä luokkaa 20–80 dB.

Viereisestä tilasta välittyvän äänen havaitseminen ja kokeminen riippuu lisäksi siitä, kuinka paljon tilassa jo on ääntä: mitä enemmän taustääntä on, sitä enemmän se peittää viereisestä tilasta välittyvää ääntä. Pelkästään rakenteiden ilmääneneristävyyksien perusteella ei siten voida päätellä tilaan muodostuvia ääniolosuhteita. Ääneneristysmääräykset perustuvat tilasta toiseen tilaan välittyvän äänen äänenpainetasojen eroon. Niihin vaikuttavat tiloja erottavien ja sivuavien rakennusosien ilmääneneristävyyydet sekä äänen absorboituminen vastaanottavassa tilassa.

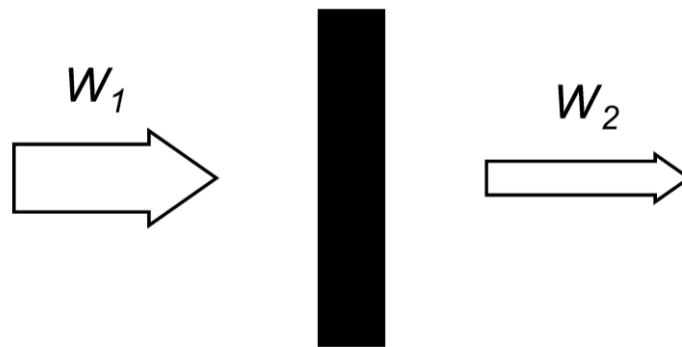
3.1.2 Ilmaääneneristävyyden määritelmä

Ilmaääneneristävyys R [dB] määritellään rakenteen kohdanneen äänitehon W_1 ja sen toiselle puolelle siirtyneen äänitehon W_2 suhteen perusteella (kuva 3.1):

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

Ilmaääneneristävyyden määritelmä tarkoittaa, että rakenteen ilmaääneneristävyyden 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 ilmaääneneristävyydessä on erotettavissa rajataajuuksia, joilla niiden käyttäytyminen muuttuu. Rajataajuudet riippuvat rakenteiden massasta, paksuudesta ja jäykkyydestä. Samat ääneneristävyyteen liittyvät ilmiöt esiintyvät kaikilla rakenteilla, mutta rajataajuuksien paikat ovat erilaisia.



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

3.1.3 Ilmaääneneristävyyden laskentamallit

Ilmaääneneristävyyden ja akustiikan mittausmenetelmät ylipäätään kehittyivät nopeammin kuin laskentamenetelmät (Arni 1949, Thompson 2002, Kylliäinen 2009), mutta nykyisin rakennusosien ja tilojen välisiä ilmaääneneristävyyksiä pystytään laskemaan tarkasti erilaisin menetelmin, jotka voidaan jakaa kolmeen analyttisiin, parametrisiin ja numeerisiin menetelmiin.

Analyttisiä menetelmiä on esitetty monissa akustiikan oppi- ja käsikirjoissa, joista tuoreita esimerkkejä ovat Hopkinsin (2007), Vigranin (2008) ja Rindelin (2018) kirjat. Analyttiset menetelmät tuottavat tietoa rakenteiden käyttäytymisestä ja ilmaääneneristävyyteen liittyvistä ilmiöistä. Ne ovat myös parametrusten menetelmien taustalla, mutta niiden ongelmana on se, että tutkittavien rakenteiden geometria on helposti niin

monimutkaista, että analyttisten menetelmien käytöstä tulee matemaattisesti liian vaikeaa. Analyttisten menetelmien reunaehdot ovat lisäksi usein sellaisia, että niiden vuoksi menetelmiä ei voida käyttää läheskään kaikkien ongelmien ratkaisemiseen. Esimerkkitästä on varsin yksinkertaisen rakenteen eli levyn ja ripojen muodostaman rakenteen ilmääneneristävyyden ratkaiseminen analyttisesti, mikä ei ole 10 vuotta kestäneiden yritystensä jälkeen onnistunut (Brunskog 2022).

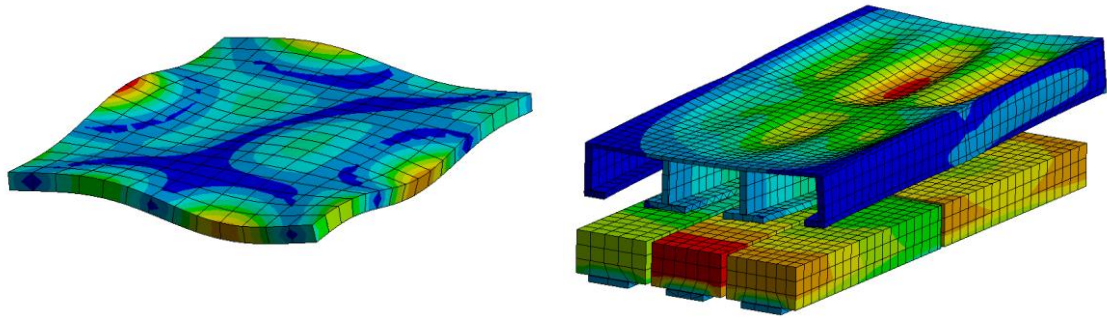
Useimpien parametrinen laskentamenetelmien perustana ovat Sharpin (1973) esittämät mallit, joiden taustalla ovat analyttisten menetelmien tuottamat tulokset. Parametriset menetelmät on yleensä tarkoitettu käytännön suunnittelutyöhön, joten niitä on yksinkertaistettu analyttisistä menetelmistä ja ne voivat perustua osittain myös kokeellisesti saatuun tietoon rakenteiden käyttäytymisestä (Lietzén & Kovalainen 2021). Monet kaupalliset ilmääneneristävyyden laskentamenetelmät perustuvat parametriseen malleihin, joita ei välttämättä ole dokumentoitu kovin tarkasti. Kaupallisten laskentaohjelmistojen antamiin tuloksiin on syytä suhtautua kriittisesti, sillä niillä saadut varsin yksinkertaistenkin rakennusosien ilmääneneristävyydet voivat yksittäisillä keskitaajuuksilla vaihdella jopa kymmeniä desibelejä (Cambridge 2006). Tässä luvussa esitetyt ilmääneneristävyyden laskentatulokset perustuvat parametriseen malliin, jonka pääperiaatteet ja laskentatulosten validointi on tehty viimeksi vuonna 2020 (Riitakangas 2020).

Analyttiset ja parametriset mallit ovat tehokkaita silloin, kun tarkasteltava ongelma on menetelmän rajoitteiden tai reunaehtojen puitteissa. Näiden menetelmien heikkous piileekin juuri niiden soveltavuudessa, joka usein rajautuu yksinkertaisiin tapauksiin. Useasta rakennekerroksesta, ilmaväleistä ja kytkennöistä muodostuvien rakenteiden akustinen käyttäytyminen on monimutkaista. Soveltuvien osien näiden arviointi on mahdollista parametrisilla laskentamalleilla. Vaihtoehdon parametrisille malleille muodostavat erilaiset numeeriset laskentamenetelmät, joiden soveltavuus akustisten ongelmien ratkaisemiseen on erittäin laaja. Numeerisista laskentamenetelmistä ehkä yleisimmin käytetty on FEM eli elementtimenetelmä. (Lietzén & Kovalainen 2021)

Rakennetekniikassa elementtimenetelmää on käytetty jo vuosikymmeniä. Akustikassa sen soveltamisen esteenä on ollut laskenta-ajan kasvaminen suurilla taajuuksilla, mutta laskentatehon lisääntyessä tämä ongelma on vähentynyt ja elementtimenetelmää voidaan soveltaa hyvinkin laajalla taajuusalueella. Lisäksi suurilla taajuuksilla voidaan tarvittaessa hyödyntää parametrisia malleja, sillä keskeiset ratkaistavat ongelmat rakenteiden ilmääneneristävyyttä selvittäessä ovat yleensä pienillä ja keskitaajuuksilla. Numeerisen mallintamisen etuna on se, että tutkittavan rakennusosan geometria voidaan mallintaa erittäin tarkasti, samoin sen liitokset ympäröiviin rakenteisiin (kuva 3.2). Haittapuolena voi olla se, että tulokset ovat myös jossain määrin herkkiä sille, kuinka tarkasti liitokset on mahdollista mallintaa eli kuinka paljon niistä tiedetään eri tilanteissa. (Lietzén & Kovalainen 2021)

Lietzén ja Kovalainen (2021) ovat osoittaneet, että elementtimenetelmällä voidaan mallintaa rakennusosien ilmääneneristävyyttä 2500 Hz keskitaajuuteen saakka. Mallinnustulokset ovat olleet tarkastellulle betonilaatalla tarkempia kuin analyttisen laskentamallin tuottamat tulokset. Lisäksi Lietzénin ja Kovalaisen tarkasteleman puurakenteisen

ripalaatan ilmaääneneristävyyksien laskenta ei ole edes mahdollista millään analyttisellä mallilla (kuva 3.2). Elementtimenetelmää on hyödynnetty myös esimerkiksi kevyen huoneistoja erottavan väliseinän ja ontelolaataston välisen liitoksen ääneneristävyyden tarkasteluun (Talus 2022) sekä puurakenteiden ilmaääneneristävyyden mallintamiseen (Kylliäinen et al. 2021).

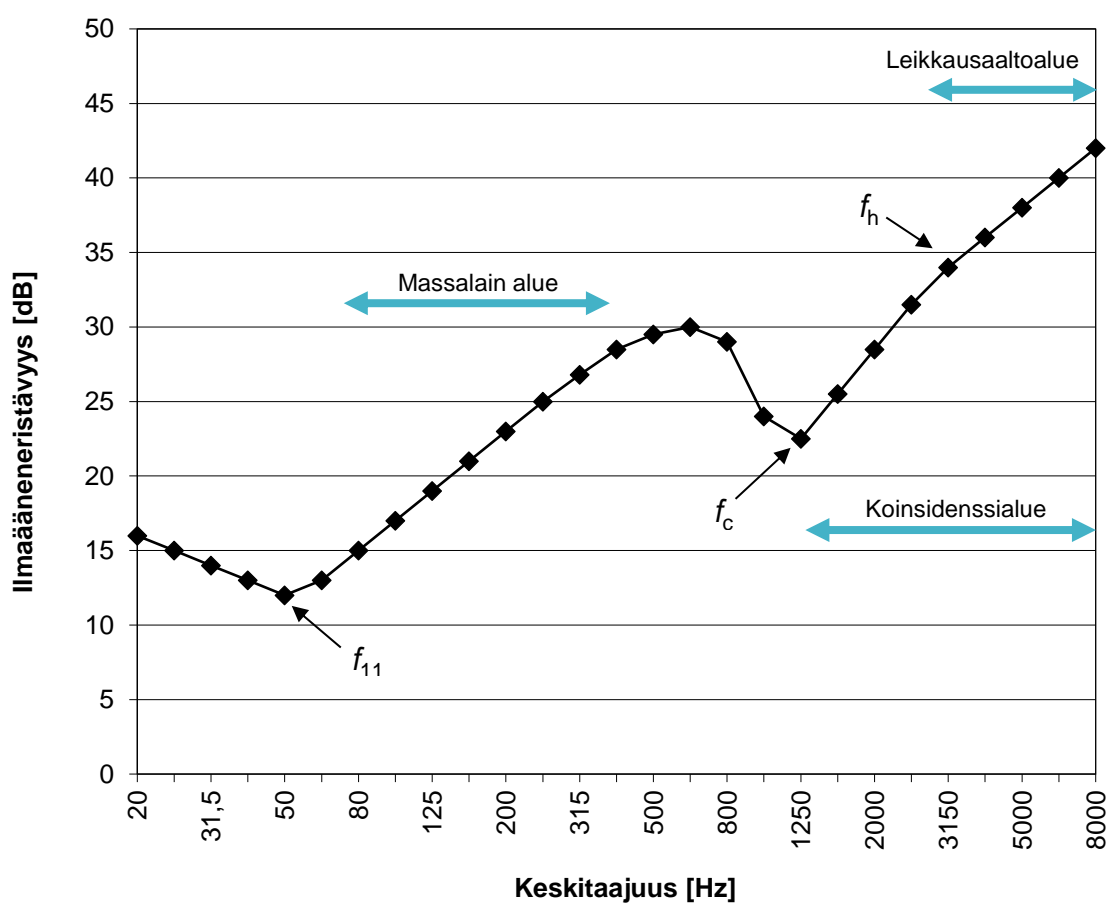


Kuva 3.2. Betonilaatan (vas.) ja puurakenteisen ripalaatan (oik.) elementtimenetelmällä mallinnettu deformaatio yksittäisellä taajuudella. Ripalaatan mallissa on esitetty lisäksi ripojen välissä olevan ilman ja mineraalivillan akustinen kenttä (Lietzén & Kovalainen 2021).

3.2 Yksinkertaiset rakennusosat

3.2.1 Ilmaääneneristävyyden laskenta

Yksinkertaisiksi rakennusosiksi määritellään rakenteet, joiden koko massa on yhdessä rakennekerroksessa. Tällaisia ovat esimerkiksi betonilaatta, muurattu tiiliseinä, rakennuslevyt tai yksittäinen lasikerros. Kuvassa 3.3 on esitetty esimerkkirakenteen ilmaääneneristävyys kolmannesoktaavikaistoittain taajuuksilla 20–8000 Hz. Kuvasta voidaan erottaa kolme rajataajuutta, joilla rakenteen ääneneristävyys heikkenee ja rakenteen käyttäytyminen muuttuu. Tavallisesti nämä rajataajuudet sijoittuvat kuvassa esitetyllä tavalla: pienin on rakenteen alin ominaistajuus f_{11} , keskimmäisenä on koinsidenssin rajataajuus f_c ja suurin leikkausaaltoalueen rajataajuus f_h . Rajataajuuksista tärkein on koinsidenssin rajataajuus, koska usein sijaitsee ilmaääneneristävyyden kannalta kiinnostavalla taajuusalueella 50–3150 Hz. Seuraava esitys yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyydestä perustuu erityisesti Rindelin (2018) kirjaan.



Kuva 3.3. Yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyyden 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 ilmasteneristävyyden [dB] noudattaa massalakia, jonka mukaan ilmasteneristävyys riippuu rakenteen pintamassasta m' [kg/m²] ja taajuudesta f :

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

Pienillä taajuuksilla ilmasteneristävyys voidaan laskea tarkemmin, kun otetaan huomioon, että pienellä taajuusalueella ääntä kohdistuu rakenteen pinta-alalle vähemmän kuin suurilla 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 (Sewell 1970):

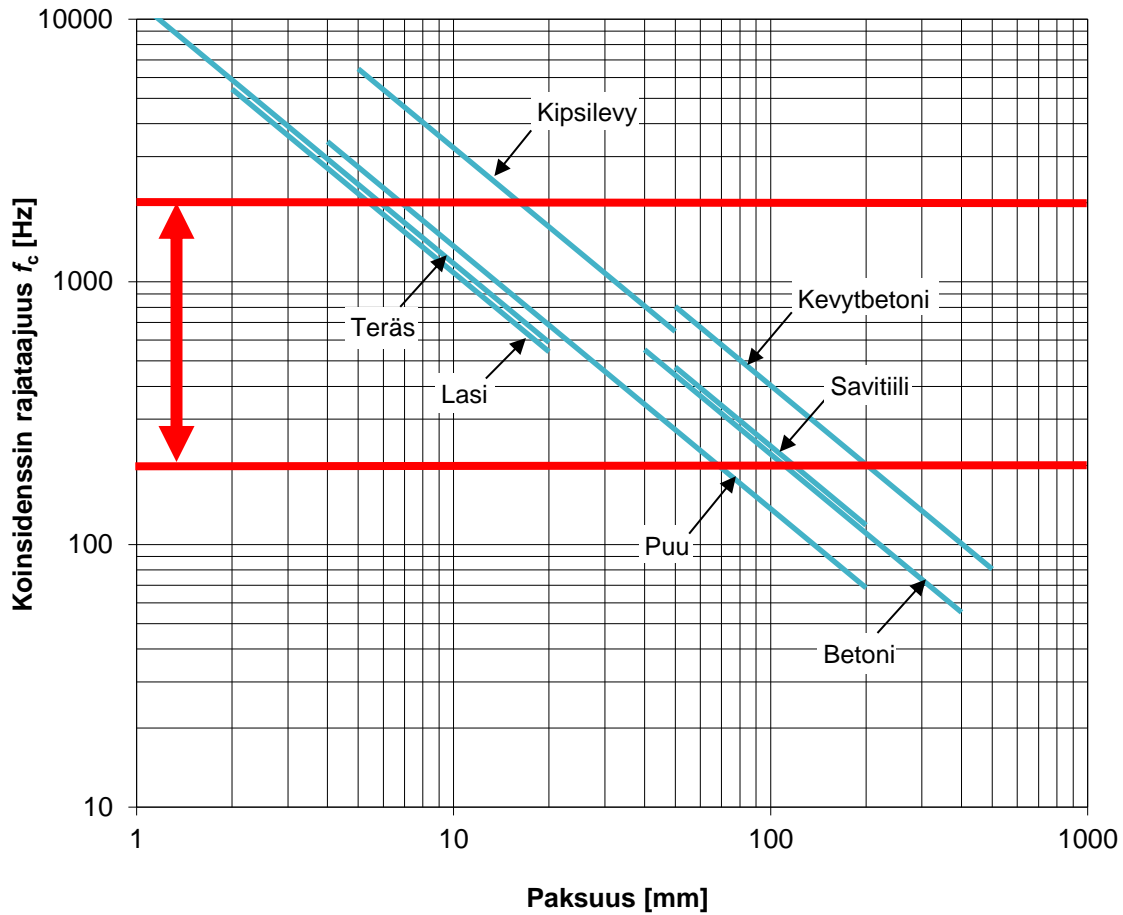
$$R_0 = 20 \lg m' + 20 \lg f - 42 - 10 \lg \left(\ln \left(\frac{2\pi f}{c} \sqrt{l_x l_y} \right) \right) \quad (3.4)$$

Massalain mukaan ilmasteneristävyys paranee 6 dB rakenteen pintamassan tai taajuuden kaksinkertaistuksessa. Ilmasteneristävyys lisääntyy taajuuden kasvaessa massalain mukaisesti, kunnes taajuus on noin puolet koinsidenssin rajataajuudesta f_c (kuva 3.3). Tällöin ilmasteneristävyyden kasvu hidastuu ja rajataajuutta lähestyttäessä ilmasteneristävyys 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 (kuva 3.4) riippuu laatan taivutusjäykkyydestä B ja pintamassasta m' [kg/m²]:

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

Äänen nopeutena ilmassa c [m/s] käytetään arvoa 340 m/s. Laatan taivutusjäykkyys lasketaan kimmomoduulin E [N/m²], Poisson'n vakion ν ja rakenteen paksuuden h [m] perusteella:

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



Kuva 3.4. Rakennusaineiden koinsidenssin rajataajuuksia f_c rakennekerroksen paksuuden funktiona. Kuvaan on merkitty vaakasuorilla punaisilla viivoilla taajuusalue, jonka ulkopuolella rajataajuuden tulisi yleensä olla.

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-ilmio on suurimmillaan rajataajuudella f_c , jota suuremmilla taajuuksilla rakenteen ilmääneneristävyyden alku lähestyy massalain mukaista eristävyttä. Taivutusaaltojen lisäksi rakenteessa esiintyy leikkausaaltoja, kun rakenteen paksuus h [m] on suuri. Leikkausaalto vaikuttaa ilmääneneristävyyden rajataajuuden f_h yläpuolella. Rajataajuus riippuu koinsidenssitaajuudesta ja rakenteen paksuudesta:

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

Yksinkertaisen rakennusosan ilmääneneristävyyden laskenta jakautuu kolmeen osaan rajataajuuksien perusteella. Neljäs osa voisi olla ilmääneneristävyyden laskenta alimman ominaistaajuuden alapuolella, mutta koska alin ominaistaajuus yleensä on pienempi kuin rakennusakustiikassa käsiteltävän taajuusalueen alaraja, sitä pienempiä taajuuksia ei

yleensä ole tarpeen käsitellä. Esitettävät laskentakaavat eivät sisällä rakennetta tukevien rankojen, palkkien tai muiden rakennetta jäykistävien tukien vaikutusta. Rakenteen ilmaääneneristävyys on eri taajuusalueilla

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

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

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

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 (ISO 12354-1:2017)

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

Häviökerroin vaikuttaa erityisesti siihen, kuinka suuri ilmaääneneristävyys 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...0,3 ja sisäisen häviökertoimen arvoksi 0,01.

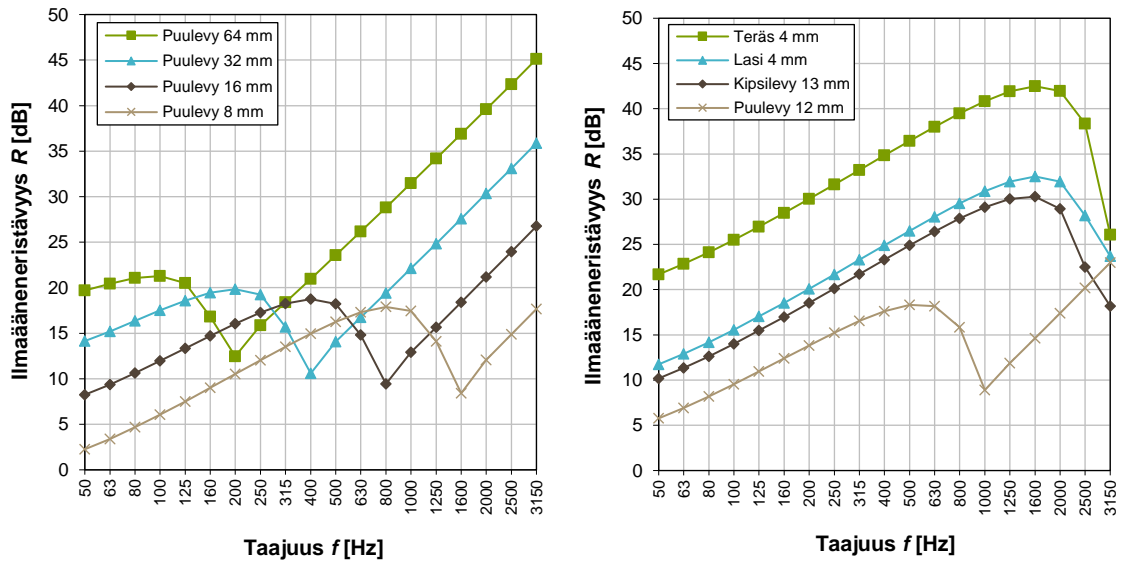
Taulukko 3.1. Yleisten rakennusaineiden materiaaliominaisuuksia.

Rakennusaine	Tiheys ρ [kg/m ³]	Kimmomoduuli E [MPa]	Poisson'n vakio ν	Sisäinen häviökerroin η_{int}
Betoni	2500	25000...35000	0,2	0,01
Kevytbetoni	400...600	1000...1400	0,2	0,01
Savitiili (reikätiili)	1200	7000	0,2	0,01
Savitiili (täystiili)	1800	7000	0,2	0,01
Kalkkihiekkakivi	1900	4400	0,2	0,01
Kipsilevy N	670	2200	0,28	0,003
Kipsilevy EK	800	3500	0,28	0,003
Ikkunalasi	2500	70000	0,24	0,01
Teräs	7850	210000	0,3	0,0003
Alumiini	2700	70000	0,33	0,0003
Puu	350...460	7000...12000	0,28	0,01
Lastulevy	700	2750	0,28	0,01
Havuvaneri	460...520	5500...12000	0,28	0,01
Koivuvaneri	680	8500...16000	0,28	0,01

3.2.2 Rakennuslevyt

Ääntä eristävissä rakenteissa käytettävien rakennuslevyjen ja muiden levymäisten tuotteiden pintamassa on yleensä noin 5–35 kg/m². Akustiselta toiminnaltaan rakennuslevyt ovat yksinkertaisia ohuita levyrakenteita, joiden koinsidenssin rajataajuus on yleensä yli 2000 Hz. Esimerkkejä tällaisista rakennusaineista ovat kipsilevy, puukipsilevy, lasi ja teräs. Koska levyjen 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 3.4 nähdään, millaisia rakenteiden paksuuksien tulisi olla, kun tavoitellaan ääneneristystä:

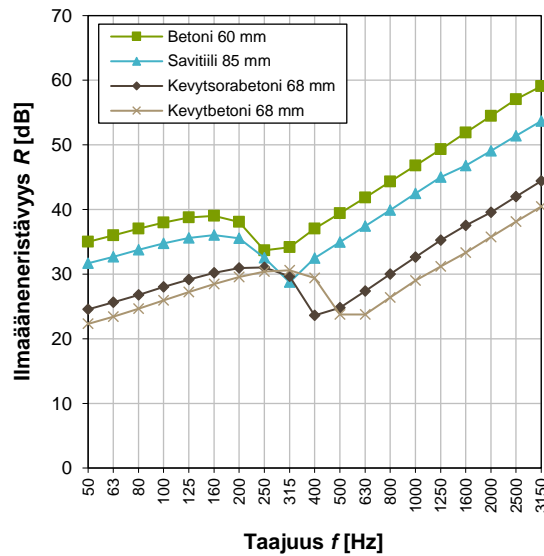
- ääntä eristävää lasia ei kannata tehdä 6 mm paksummaksi. Jos yksinkertaisen lasituksen ilmaääneneristävyyttä halutaan parantaa, lasi voidaan laminoida. Tällöin lasitukselle saadaan lisää massaa ja massalain mukaan lisää ilmaääneneristävyyttä, mutta koinsidenssitaajuus pysyy yli 2000 Hz taajuusalueella.
- 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 heikentäisi yksittäisen levyn ilmaääneneristyskykyä.
- yleinen materiaali ääntä eristävissä rakenteissa on kipsilevy. Kipsilevyjen paksuudet vaihtelevat tuulensuojalevyjen 6 mm ja lattiarakenteissa käytettävien 18 mm välillä. Tämä ei ole sattumaa, vaan alle kipsilevyjen tiheys ja jäykkyys on valittu siten, että 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 yksinään ääntä eristävissä rakenteissa (kuva 3.5).



Kuva 3.5. Rakennuslevyjen laskennallisia ilmajääneneristävyyksiä. Rakenteiden pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m².

3.2.3 Kevyet kivirakenteet

Kevyitä kivirakenteita ovat esimerkiksi alle 100 mm paksut betoniseinät ja -laatat, alle 130 mm paksut savitiilet ja kalkkihiikkakivet sekä kevytsorabetoniharkot ja kevytbetoniharkot ja -elementit, joiden paksuus on 60–150 mm (kuva 3.6). Niiden pintamassa on yleensä 30–150 kg/m².



Kuva 3.6. Kevyiden kivirakenteiden laskennallisia ilmajääneneristävyyksiä. Rakenteiden pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m².

Kevyiden kivirakenteiden koinsidenssin rajataajuudet ovat tyypillisesti 200–400 Hz. Koska näiden rakenteiden pintamassa on suhteellisen suuri esimerkiksi puuhun

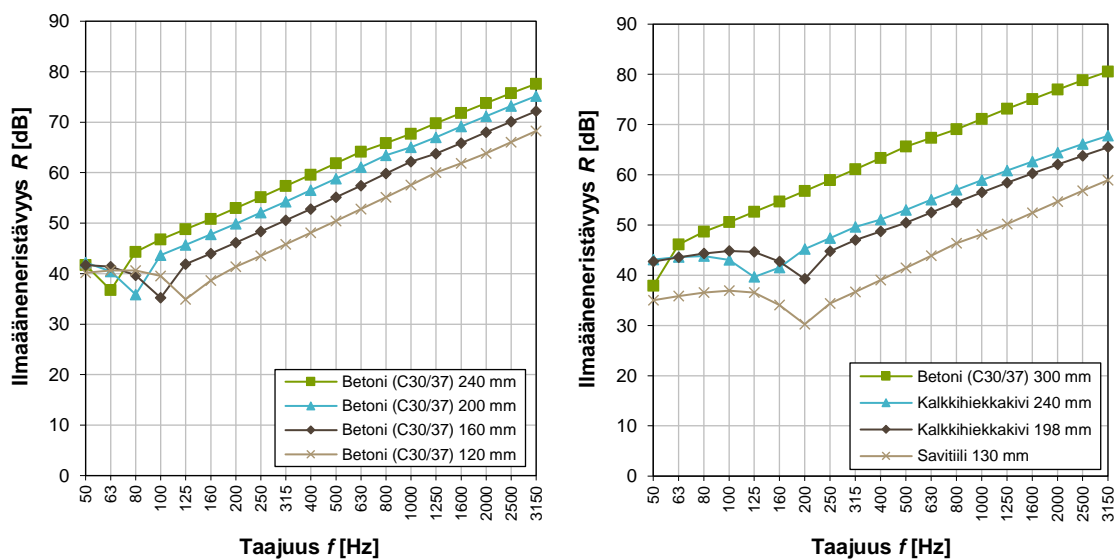
verrattuna, niiden ilmastääneneristyskyky on kohtuullinen (kuva 3.6), mutta koinssidenssin rajataajuus on puheäänien eristämisen kannalta tärkeällä taajuusalueella. Tämä on otettava huomioon suunniteltaessa puhetilojen tai asuinhuoneistojen ääneneristystä. Suuremmilla taajuuksilla leikkausaallot alkavat vaikuttaa ohuiden kivirakenteiden ilmastääneneristyskykyyn.

3.2.4 Raskaat kivirakenteet

Raskaiden kivirakenteiden pintamassa on noin 200 kg/m^2 tai enemmän. Koinssidenssitaa-juudet asettuvat rakenteiden paksuuden ja jäykkyyden johdosta 200 Hz pienemmille taajuuksille, jolloin rakenteiden ilmastääneneristävyys seuraa melko tarkasti massalakea suurella osalla rakennusakustiikan kannalta kiinnostavaa taajuusalueetta: pintamassan ja taajuuden kaksinkertaistuminen lisää rakenteen ilmastääneneristävyttä 6 dB.

Esimerkkejä raskaista kivirakenteista ovat vähintään 120 mm paksut betonirakenteet ja vähintään 130 mm paksut savitiili- ja kalkkihiekkakiviseinät (kuva 3.7). Myös kevyt- betoni- ja kevytsoraharkkorakenteet toimivat raskaiden kivirakenteiden tavoin, kun niiden paksuus ylittää 250 mm. Tällöin niiden koinssidenssitaa-juus on alle 200 Hz. Suurilla taajuuksilla leikkausaallot vaikuttavat raskaiden kivirakenteiden ilmastääneneristävyteen niin, että eristävyys ei kasva enää massalain mukaisesti.

Raskaiden kivirakenteiden massasta seuraa se, että niiden ilmastääneneristävyys on pienillä taajuuksilla muihin yksinkertaisiin rakenteisiin verrattuna hyvä ja sitä parempi, mitä suurempi rakenteen pintamassa on. Suuren pintamassan vuoksi massan lisääminen parantaa raskaiden kivirakenteiden ilmastääneneristävyttä suhteellisesti paljon vähemmän esimerkiksi rakennuslevyihin verrattuna.



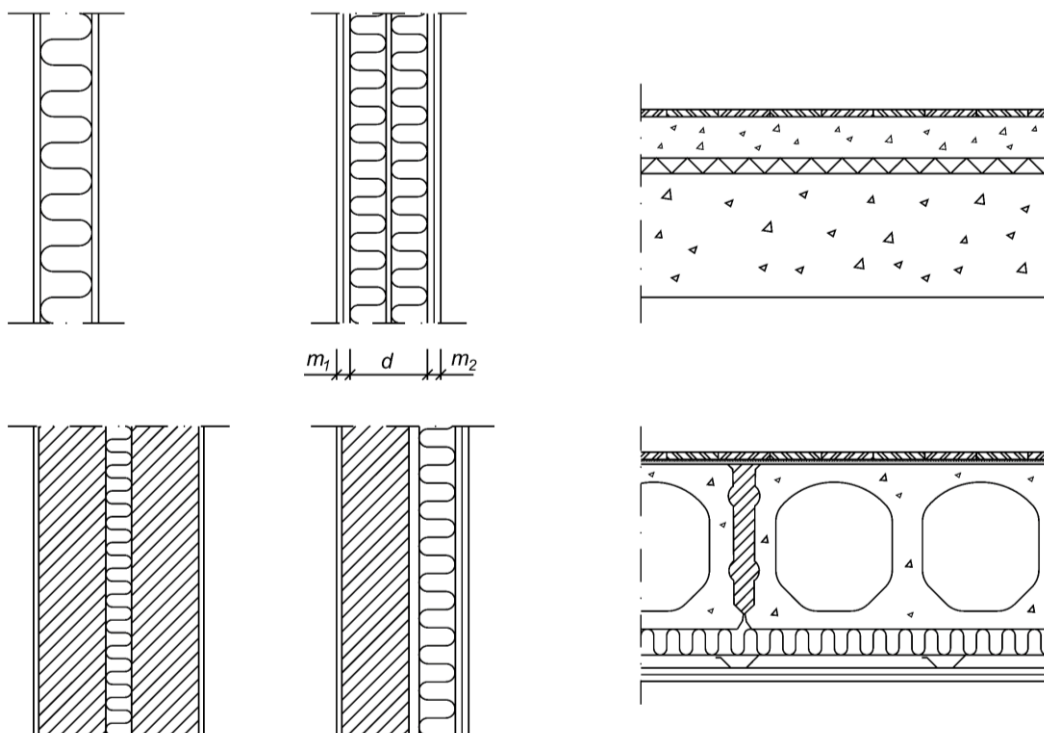
Kuva 3.7. Raskaiden kivirakenteiden laskennallisia ilmastääneneristävyksiä. Rakenteiden pinta- alana on laskennassa käytetty 10 m^2 .

3.3 Kaksinkertaiset rakennusosat

3.3.1 Ilmääneneristävyyden laskenta

Kevyiden rakenteiden ilmääneneristävyyttä voidaan kasvattaa helposti lisäämällä rakenteiden pintamassaa. Jos pintamassa on jo suuri, pienikin parannus ilmääneneristävyydessä 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 ilmväli tai absorptiomateriaalilla täytetty ilmväli. 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 3.8). Myös kantavan välipohjarakenteen päälle tehty kelluva lattia muodostaa rakenteesta kaksinkertaisen, mutta kelluva lattia toimii kelluvan rakenteen alla olevan eristekerroksen takia akustisesti hieman toisella tavalla kuin massojen ja ilmvälin muodostava rakenne. Kelluvia lattioita käsitellään askelääneneristyksen yhteydessä tarkemmin. Esitetty kaksinkertaisten rakenteiden ilmääneneristävyyden laskenta perustuu pääosin Rindelin (2018) kirjaan.



Kuva 3.8. Esimerkkejä kaksinkertaisista rakenteista.

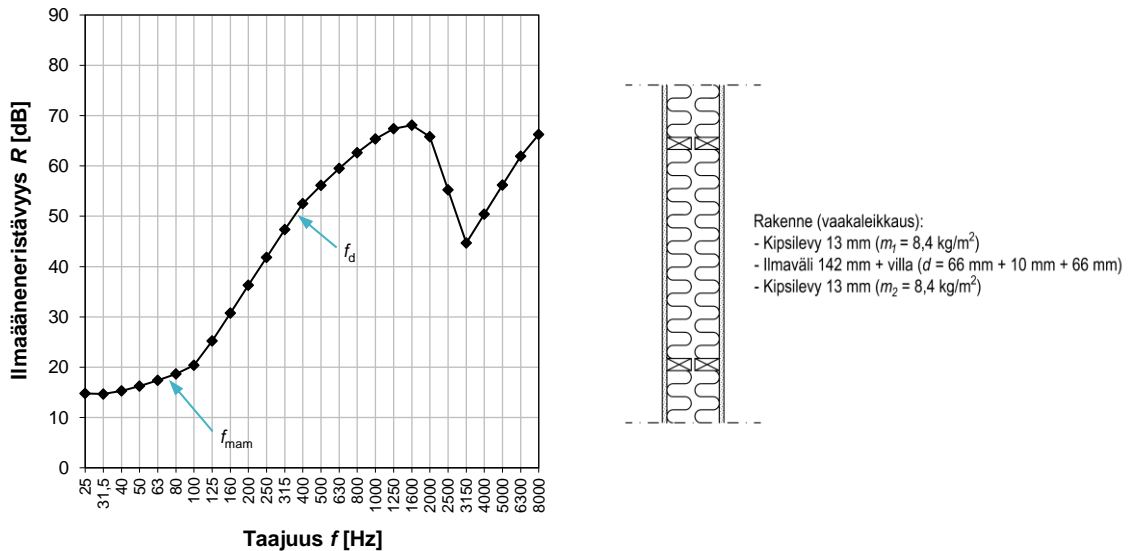
Kaksinkertaisen rakenteen puoliskot ja ilmväli muodostavat massa–jousi–massajärjestelmän, jossa rakenteen puoliskojen välissä oleva massa toimii jousena. Tällaisella rakenteella on ominaistaajuus f_{mam} , jonka yläpuolella ilmääneneristävyys kasvaa nopeasti (kuva 3.9). Ominaistaajuus riippuu rakenteen puolikkaiden pintamassoista m_1 ja m_2 [kg/m²] ja ilmvälän suuruudesta d [m]:

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{1}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (3.12)$$

Ilmääneneristävyys ei kasva rajattomasti, vaan rajataajuudella f_d rakenteen toiminta muuttuu. Tällöin äänen aallonpituus on pieni verrattuna ilmväliin, eikä ilmväli enää toimi jousena. Rakenteen puoliskojen ilmääneneristävytydet voidaan tällöin laskea yhteen. Rajataajuudella rakenteen ilmväli d on noin kuudesosa äänen aallonpituudesta:

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

Kaksinkertaisen rakenteen ilmääneneristävyys perustuu sen puoliskojen ilmääneneristävyteen sekä niiden massoista ja ilmvälistä seuraavaan resonanssitajuuteen. Kaksinkertaisen rakenteen ilmääneneristävyden laskemiseksi on ensin selvitettävä kaavoilla 3.8–3.10 kummankin puoliskon ilmääneneristävyys yksinkertaisina rakenteina. Puoliskojen eristävyksistä käytetään alla merkintöjä R_1 ja R_2 . Laskettaessa puoliskojen eristävyksiä kaavan 3.4 mukainen korjaus massalakiin tehdään vain toisen puoliskon eristävyttä laskettaessa, sillä muussa tapauksessa korjaus kertautuu ja ilmääneneristävyys tulee pienillä taajuuksilla yliarvioiduksi ja suurilla aliarvioiduksi.



Kuva 3.9. Kaksinkertaisen rakenteen rajataajuudet jakavat ilmääneneristävyden kolmeen alueeseen. Kaksinkertaisen rakenteen käyttäytymisessä näkyvät myös sen yksinkertaisten puoliskojen ominaisuudet, tässä tapauksessa muun muassa koinsidenssin rajataajuus noin 3150 Hz ja leikkusaallon vaikutus aivan suurimmilla taajuuksilla. Rakenteen pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m².

Rajataajuudet jakavat kaksinkertaisen rakenteen ilmäeneristävyyden R laskennan kolmeen osaan:

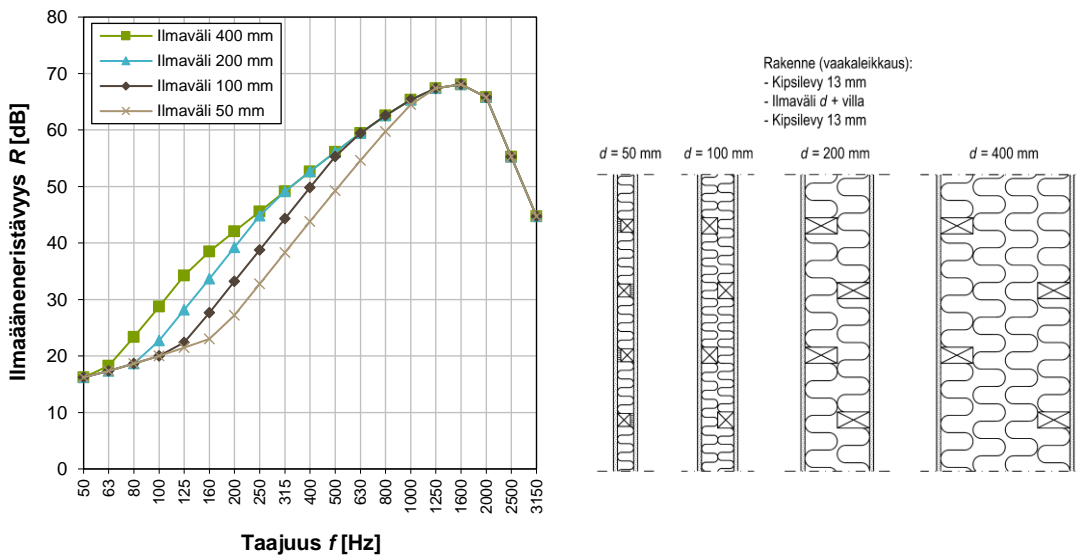
$$R = 20 \lg(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20}) \quad f < f_{\text{mam}} \quad (3.14)$$

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

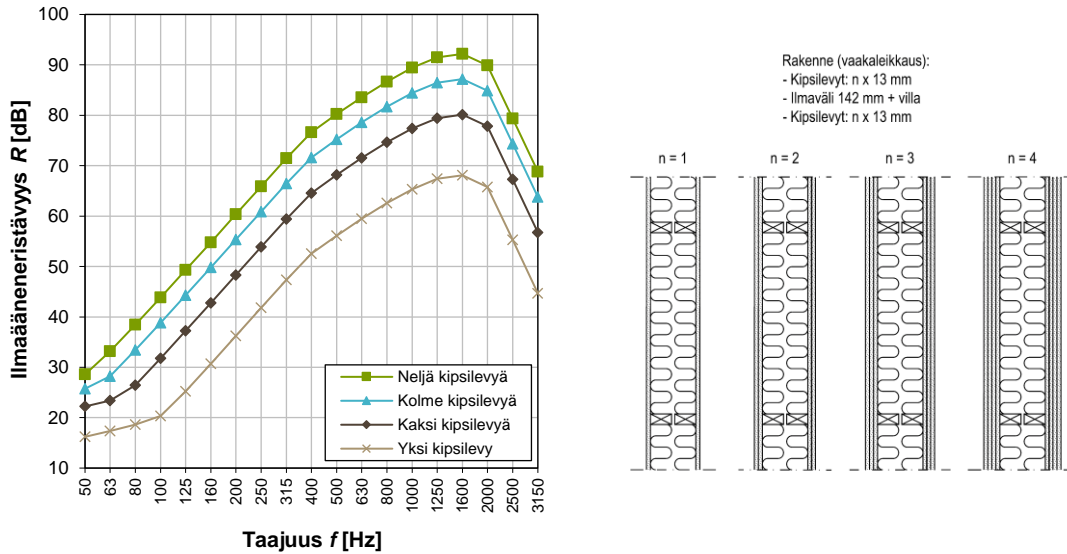
$$R = R_1 + R_2 + 6 \quad f > f_d \quad (3.16)$$

Ominaistaajuudella f_{mam} rakenne on resonanssissa ja sen ilmäeneristävyydellä on minimikohta. Mitä suurempia rakenteen puoliskojen pintamassat m_1 ja m_2 ovat ja mitä suurempi niiden etäisyys d on, sitä pienempi ominaistaajuus on (kuvat 3.10 ja 3.11). 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 ilmäeneristävyyden laskemiseen. Laskentamallien toimivuutta kaksinkertaisten kivirakenteiden ilmäeneristävyyden laskemisessa ei ole juuri tutkittu, sillä niiden ilmäeneristävyys suurilla taajuuksilla on yleensä niin suuri, että sitä ei ole helppoa saada selville laboratoriomittauksin.

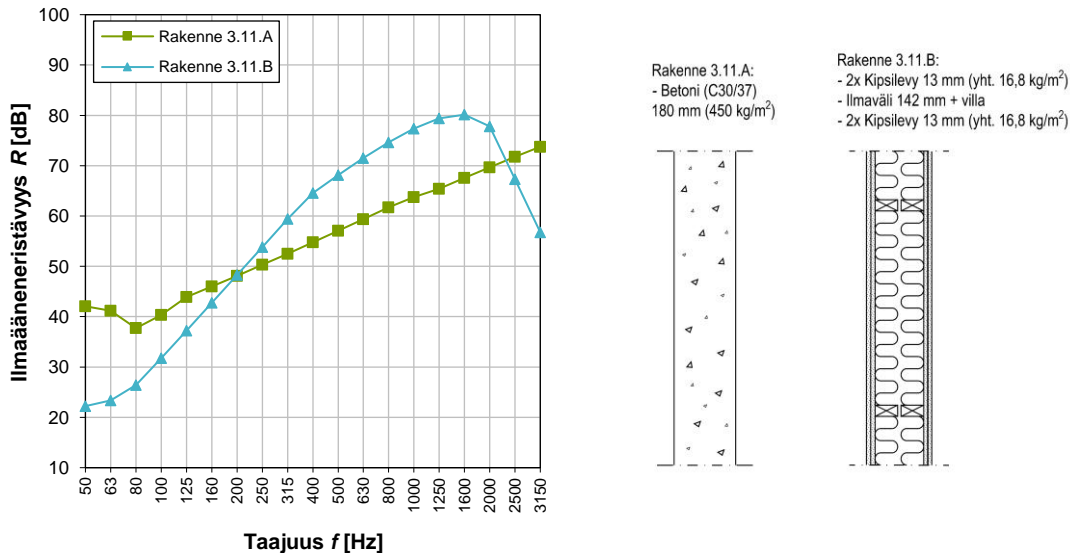


Kuva 3.10. Kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen välisen etäisyyden vaikutus laskennalliseen ilmäeneristävyyteen. Seinärakenteen ilmäväli on oletettu täysin absorboivaksi. Rakenteen pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m^2 .



Kuva 3.11. Kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen massan vaikutus laskennalliseen ilmasteneristävyyteen. Seinärakenteen ilmaväli on oletettu täysin absorboivaksi. Rakenteen pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m².

Massa–jousi–massajärjestelmän ominaistajuuden f_{mam} vuoksi levyrakenteisten kaksinkertaisten rakenteiden ilmasteneristävyys pienillä taajuuksilla on heikompi kuin raskaiden yksinkertaisten kivrakenteiden (kuva 3.12). Matalia ääniä eristettäessä massa on välttämätön. Samasta syystä ääneneristyksessä ei yleensä ole syytä käyttää kolminkertaisia rakenteita, sillä niiden ilmasteneristävyys on kaksinkertaisia rakenteitakin heikompi pienillä taajuuksilla, koska massa–jousi–massaresonansseja on enemmän.

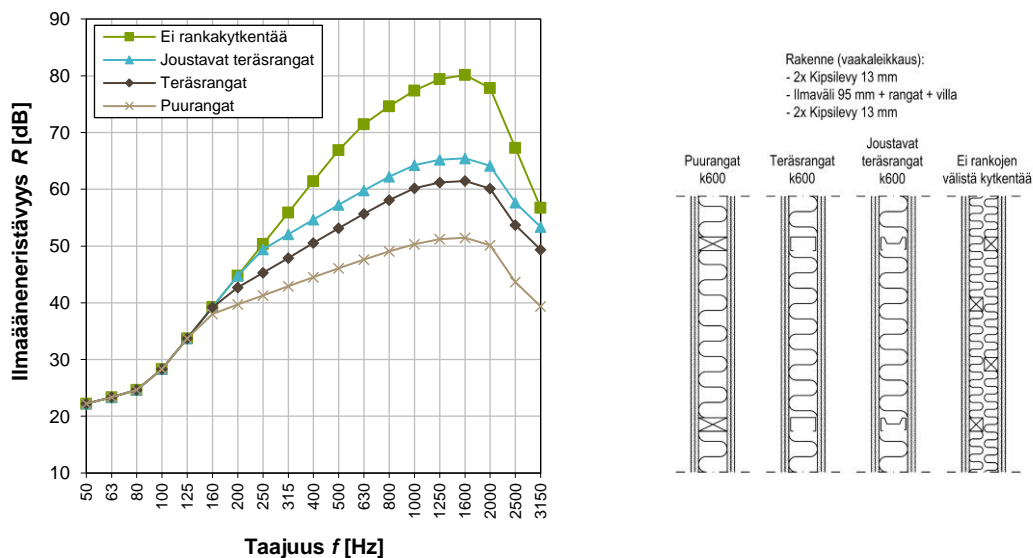


Kuva 3.12. Massa-jousi-massaresonanssin vuoksi kaksinkertaisten levyrakenteiden ilmasteneristävyys on pienellä taajuuksialueella heikompi kuin yksinkertaisten kivrakenteiden. Levyseinärakenteen ilmaväli on oletettu täysin absorboivaksi. Rakenteiden pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m².

Poikkeuksena edellä kerrotusta ovat ikkunat, joiden lämmöneristysvaatimukset johtavat siihen, että on käytettävä kolminkertaisia lasituksia. Ikkunoiden ilmaääneneristävyyteen voidaan vaikuttaa valitsemalla eri paksuiset lasit, jolloin lasien koinsidenssien raja-
taajuudet poikkeavat toisistaan. Lasien ilmavälien tulee myös olla erilaiset – toinen suuri, toinen pieni – jotta massa–jousi–massajärjestelmän ominaistajuudet olisivat mahdollisimman kaukana toisistaan. Ikkunan ilmaääneneristävyys on sitä parempi, mitä paksumpi suurempi ilmaväli on.

3.3.2 Rankojen vaikutus

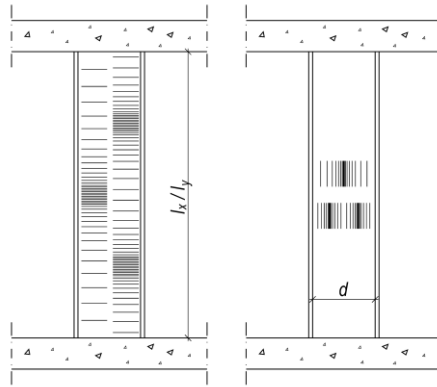
Kaavat 3.14–3.16 perustuvat siihen, että kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen välillä ei ole mitään kytkentöjä. Käytännön rakentamisessa tämä tarkoittaa kaksinkertaisia rakenteita, joiden puoliskolla on omat, toisesta puoliskosta erilliset rungot. Levytysten kiinnittäminen samaan runkoon tuottaa selvästi heikomman eristävyyden verrattuna tilanteeseen, jossa runko on kaksinkertainen eikä kytkentöjä ole. Rankojen jäykkyys vaikuttaa lisäksi siten, että saavutettava ilmaääneneristävyys heikkenee, kun rangat tulevat jäykemmiksi (kuva 3.13).



Kuva 3.13. Rankojen joustavuuden vaikutus laskennalliseen ilmaääneneristävyyteen. Ilmaväli on oletettu täysin absorboivaksi. Rakenteen pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m².

3.3.3 Ilmavälin kaiunta

Kaavojen 3.14–3.16 lähtökohtana on se, että kaksinkertaisen rakenteen ilmaväli on täytetty kokonaan hyvin absorboivalla materiaalilla. Jos täyttöä ei ole, ilmaväliin syntyy kaiuntakenttä, joka heikentää rakenteen ilmaääneneristävyyttä. Seinärakenteen pituus- ja korkeussuunnassa ilman ominaisvärähtelyiden alimmat ominaistajuudet ovat pieniä ja ilmavälin suunnassa suuria (kuva 3.14).

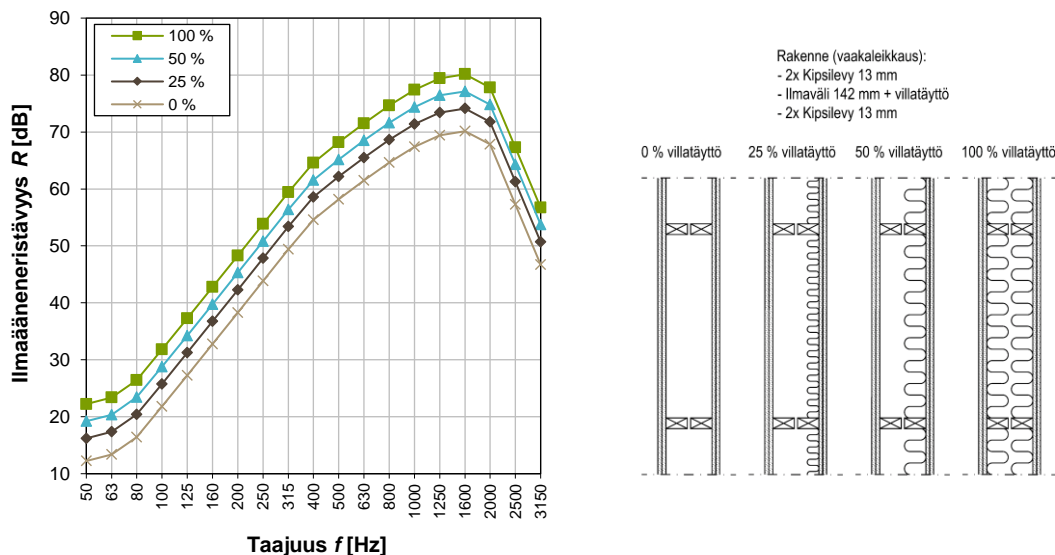


Kuva 3.14. Kaksinkertaisen rakenteen tyhjässä ilmatilassa syntyy ilman ominaisvärähtelyjä. Ilmavälin pituus- ja pystysuunnassa niiden ominaistajuuudet ovat pieniä ja leveysuunnassa suuria.

Ilmavälin ominaisvärähtelyiden alimmat ominaistajuuudet vastaavat aallonpituuksia, joiden puolikas on yhtä suuri kuin seinän ilmavälin leveys l_x , korkeus l_y tai paksuus d . Kun näistä mitoista käytetään yhteistä merkintää l [m], eri suunnissa tapahtuvan ominaisvärähtelyn ominaistajuus on

$$f_r = \frac{340}{2l} \quad (3.17)$$

Jos seinän leveys l_x on 4 m, korkeus l_y 2,5 m ja ilmavälin paksuus 150 mm, alimmat ominaistajuuudet ovat vastaavasti 43 Hz, 68 Hz ja 1130 Hz. Ominaisvärähtelyitä esiintyy myös näiden taajuuksien monikerroilla, joten ilmavälin kaiunta vaikuttaa rakenteen ilmäneristävyyteen koko taajuusalueella (kuva 3.15).



Kuva 3.15. Ilmavälin absorptiomateriaalin täyttöasteen vaikutus laskennalliseen ilmäneristävyyteen. Ilmavälin ääntä absorboivan villan absorptiosuhteeksi on oletettu $\alpha = 1$ ja rankojen välillä ei ole seinän eri puoliskojen välillä kytkentää. Rakenteen pinta-alana on laskennassa käytetty 10 m^2 .

Tavoiteltaessa kaksinkertaisilla rakenteilla hyvää ilmaääneneristävyyttä kaiunta on aina poistettava täyttämällä kaksinkertaisen rakenteen ilmvälin paksuudesta vähintään puolet absorptiomateriaalilla, jonka absorptiosuhde α on 500 Hz suuremmilla taajuuksilla vähintään noin 0,8. Jos ilmväli jää tyhjäksi, ilmaääneneristävyys pienenee koko taajuusalueella jokaisella keskitaajuudella noin 10 dB.

3.4 Ilmaääneneristysluku

3.4.1 Ilmaääneneristävyyden mittaaminen laboratoriossa

Ilmaääneneristävyys R on määritelty rakennusosan 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 määrittää laboratoriossa rakenteen erottamisissa tiloissa vallitsevien äänenpainetasojen L_p avulla. Lähetyshuoneessa (kuva 3.16) käytetään äänilähteenä kohinageneraattoria ja kaiutinta, joka tuottaa huoneeseen vaaleanpunaista kohinaa, jolloin äänenpainetaso on suunnilleen sama kaikilla taajuuksaistoilla 100–3150 Hz tai nykyisin yleisemmin 50–5000 Hz. Laboratorion lähetyshuoneessa äänenpainetasojen L_1 pitää asuinhuoneistojen välistä ilmaääneneristävyyttä mitattaessa olla noin 90–100 dB, jotta lähetyshuoneen äänen laboratorion vastaanottohuoneeseen synnyttämä äänenpainetaso L_2 on mitattavissa.

Ilmaääneneristävyyttä mitattaessa äänilähde tulee sijoittaa vähintään kahteen paikkaan lähetyshuoneessa. Äänenpainetasot mitataan sekä lähetys- että vastaanottohuoneessa kumpaakin äänilähdepaikkaa kohti vähintään viidessä pisteessä, joiden etäisyydet toisistaan ja huoneen seinistä on määritelty standardeissa ISO 10140-2 (2021) ja ISO 10140-4 (2021). Lähetys- ja vastaanottohuoneessa mitataan siten äänenpainetasot vähintään kymmenessä pisteessä. Niiden perusteella lasketaan äänenpainetason paikkakeskiarvo.

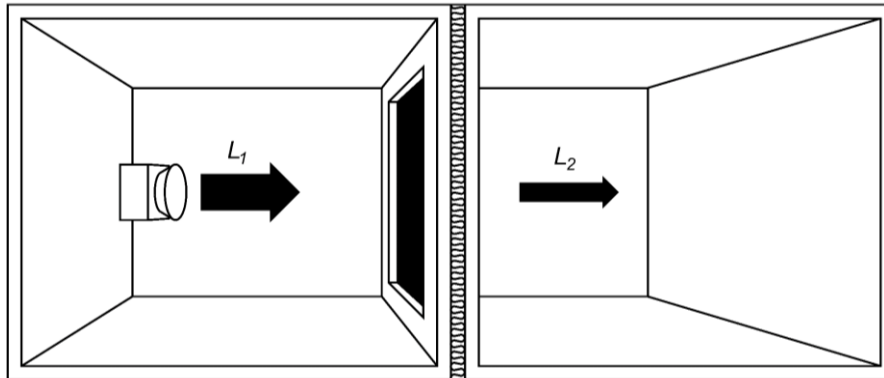
Äänenpainetasojen lisäksi mitataan vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T . Jälkikaiunta-aikaa mitattaessa äänilähde on sijoitettava vähintään yhteen paikkaan ja mikrofoni vähintään kolmeen paikkaan, joista kustakin jälkikaiunta-aika mitataan vähintään kahdesti. Näistä vähintään kuudesta mittaustuloksesta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

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (3.18)$$

3.4.2 Ilmaääneneristysluvun laskeminen

Laboratoriomittauksin saadaan selville yksittäisen rakennusosan, kuten väliseinän, välipohjan, tai ikkunan ilmaääneneristävyys. Ilmaääneneristysmittausten tulos on rakennusosan tai tilojen välinen ilmaääneneristävyys 16 kolmannesoktaavikaistalla. Mittaustuloksista piirretty käyrä on tarkin tapa ilmoittaa rakennusosan tai tilojen välinen

ilmääneneristyskyky. Koska ilmaaneneristysvaatimusten esittäminen ja suunnitteluarvojen esittäminen käyrinä olisi melko hankalaa, mittaustulokset esitetään yhtenä lukuna, ilmaaneneristyslukuna R_w .



Kuva 3.16. Laboratoriomittauksilla saadaan selville yksittäisen rakennusosan ilmaaneneristävyys. Laboratoriossa lähetys- ja vastaanottohuoneet ovat toisistaan irti ja erittäin hyvin eristettyjä, jolloin ääni siirtyy huoneiden välillä käytännössä vain tutkittavan rakennusosan kautta.

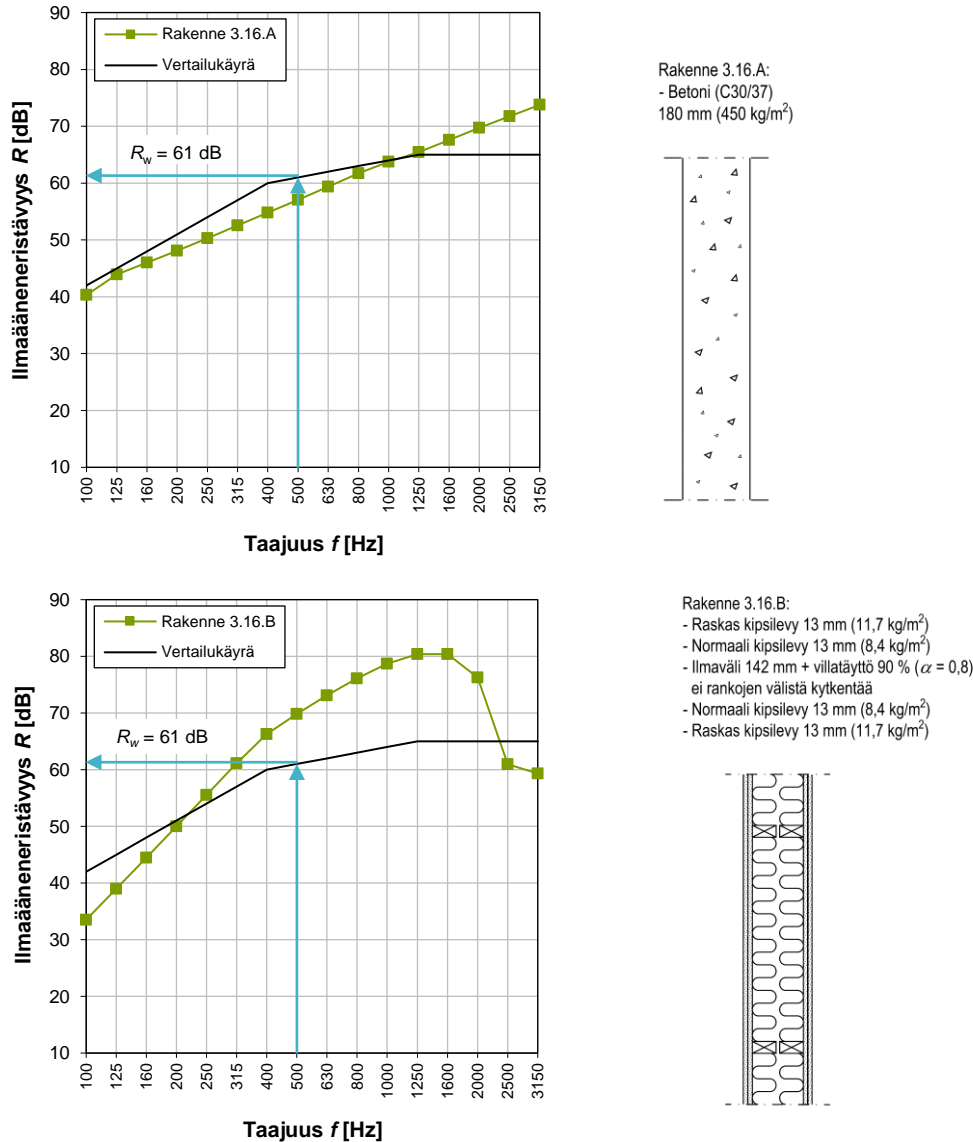
Ilmaaneneristysluku R_w määritetään kolmannesoktaavikaistoittain mitatuista ilmaaneneristävyyksistä R vertailukäyrämenettelyllä. Vertailukäyrän muoto (kuva 3.17) perustuu kuuloaistiin herkkyteen kuulla eri taajuuksisia ääniä sekä puheen äänispektriin. Vertailukäyrä on esitetty standardissa ISO 717-1 (2013).

Ilmaaneneristysluku R_w määritetään vertailukäyrämenettelyllä siten, että vertailukäyrää (taulukko 3.2) siirretään sen muotoa muuttamatta 1 dB portain sellaiseen asemaan, että kolmannesoktaavikaistoittain mitattujen ilmaaneneristävyysien epäsuotuiset poikkeamat vertailukäyrästä ovat yhteensä enintään 32 dB. Epäsuotuinen poikkeama tarkoittaa sitä, että mitattu ilmaaneneristävyys on pienempi kuin vertailukäyrän arvo. Vertailukäyrän aseman määräävät siten vertailukäyrän arvoja pienemmät ilmaaneneristävyudet. Kun vertailukäyrä on saatu sijoitetuksi ylimpään mahdollisimpaan asemaan, jossa epäsuotuisien poikkeamien summa on enintään 32 dB, ilmaaneneristysluku luetaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta. Rakennusosan ilmaaneneristävyys on sitä parempi, mitä suurempi ilmaaneneristysluku on.

Taulukko 3.2. Ilmaaneneristävyuden vertailukäyrän arvot ilmaaneneristysluvun R_w 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

Ilmaääneneristysluku R_w voidaan mitattujen ilmaääneneristävyyksien R lisäksi määrittää vertailukäyrämenettelyllä myös lasketuista ilmaääneneristävyyksistä. Kuvassa 3.17 on määritetty laskennallisista ilmaääneneristävyyksistä ilmaääneneristysluku R_w . Toinen rakenteista on 180 mm paksu betoniväliseinä ja toinen on kaksinkertainen rankarunkoinen väliseinä. Kummankin väliseinän ilmaääneneristysluku R_w on 61 dB.



Kuva 3.17. Ilmaääneneristysluvun R_w määrittäminen parametrisella laskentamallilla lasketuista ilmaääneneristävyyksistä R vertailukäyrämenettelyllä.

Kuvasta 3.17 nähdään, että pelkästään ilmaääneneristysluvun perusteella ei ole mahdollista päätellä rakennusosan ilmaääneneristävyyttä jollain tietyllä taajuudella, vaan saman ilmaääneneristysluvun voi tuottaa akustisesti kaksi hyvin eri tavoin toimivaa rakennusosaa. Ilmaääneneristysluku kuitenkin jossain määrin mahdollistaa erilaisten rakenteiden vertailemisen toisiinsa. Standardien mukainen mittaustapa edellyttää, että laboratorio ilmoittaa mittaustuloksen yhteydessä myös ilmaääneneristävyydet kolmannesoktaavikaistoittain (ISO 717-1:2013), jolloin rakennusosan käyttäytymistä eri taajuusalueella

voidaan myös arvioida. Taulukossa 3.3 on esitetty erilaisten yksinkertaisten rakennusosien parametrisilla laskentamalleilla määritetyistä ilmaääneneristävyyksistä laskettuja ilmaääneneristyslukuja.

Taulukko 3.3. Yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristyslukuja R_w , jotka on määritetty parametrisella laskentamallilla kolmannesoktaavikaistoittain saaduista tuloksista.

Rakenne	Ilmaääneneristysluku R_w [dB]
Normaali kipsilevy 13 mm (8,4 kg/m ²)	26
Raskas kipsilevy 13 mm (11,7 kg/m ²)	28
Lastulevy 12 mm (7,7 kg/m ²)	26
Vaneri 12 mm (7,4 kg/m ²)	22
Teräslevy 4 mm (31,4 kg/m ²)	38
Lasi 4 mm (10 kg/m ²)	29
Kevytbetoni 100 mm (50 kg/m ²)	33
KevytSORbetoni 88 mm (57,2 kg/m ²)	34
Kalkkihiekkakivi 85 mm, väliseinäpönttiharkko (136 kg/m ²)	43
Kalkkihiekkakivi 130 mm, runkopönttiharkko (209 kg/m ²)	48
Savitiili 85 mm, reikätiili (102 kg/m ²)	40
Savitiili 130 mm, reikätiili (156 kg/m ²)	46
Betoni (C30/37) 100 mm (250 kg/m ²)	51
Betoni (C30/37) 150 mm (375 kg/m ²)	58
Betoni (C30/37) 200 mm (500 kg/m ²)	63
Betoni (C30/37) 250 mm (625 kg/m ²)	66
Betoni (C30/37) 300 mm (750 kg/m ²)	69

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 äänitehotasot mitataan ja ilmoitetaan oktaavikaistoittain. Siksi myös ilmaääneneristävyydet on tiedettävä oktaavikaistoittain. Ne voidaan laskea kolmannesoktaavikaistoittain mitatuista ilmaääneneristävyyksistä:

$$R_{1/1} = -10 \lg \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 10^{-R_{1/3,j}/10} \right) \quad (3.19)$$

Laskettaessa ilmaääneneristysluku oktaavikaistoittain määritellyistä ilmaääneneristävyyksistä $R_{1/1}$ vertailukäyrämenettely muuttuu myös. Vertailukäyrälle on erikseen määriteltä arvot oktaavikaistoittain (taulukko 3.4). Vertailukäyrän paikkaa määritettäessä epäsuotuisten poikkeamien summa on 10 dB. Ilmaääneneristysluku luetaan 500 Hz kohdalta.

Taulukko 3.4. Vertailukäyrän arvot oktaavikaistoittain ilmaääneneristysluvun R_w ollessa 55 dB.

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

3.4.3 Spektripainotustermit

Ilmaääneneristysluvun vertailukäyrä perustuu osittain puheen äänispektriin. Se ei sovellu siten parhaalla mahdollisella tavalla rakenteen ilmaääneneristyskyvyn arvioimiseen, jos äänilähteenä on jokin muu kuin puhe. Standardissa ISO 717-1 (2013) on määritelty spektripainotustermit, joiden avulla äänilähteen äänispektri (taulukko 3.5) voidaan ottaa huomioon.

Taulukko 3.5. Spektripainotustermien laskennassa käytettävät äänispektrit.

Keskitaajuus [Hz]	C	C₅₀₋₃₁₅₀	C₅₀₋₅₀₀₀	C_{tr}
	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₃</i>	<i>L₄</i>
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

Spektripainotustermit *C* on tarkoitettu muun muassa raideliikennemelua ja lentoliikennemelua varten. Spektripainotustermitä *C_{tr}* käytetään arvioitaessa rakenteen ilmaääneneristyskyky tieliikennemelua vastaan. 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 spektrisovitusterman alaindeksiin, esimerkiksi $C_{50-3150}$.

Spektripainotustermit lasketaan joko rakennuksessa tai laboratorioissa määritetystä ilmaääneneristysluvusta sekä taulukossa 3.5 esitetyistä spektreistä, joista käytetään seuraavassa merkintää L_{ij} . Alaindeksi *i* viittaa keskitaajuuteen ja taulukossa esitettyihin spektrireihin 1–4. Spektripainotustermit on

$$C_i = -10 \lg \sum 10^{(L_{ij}-R_i)/10} - R_w \quad (3.20)$$

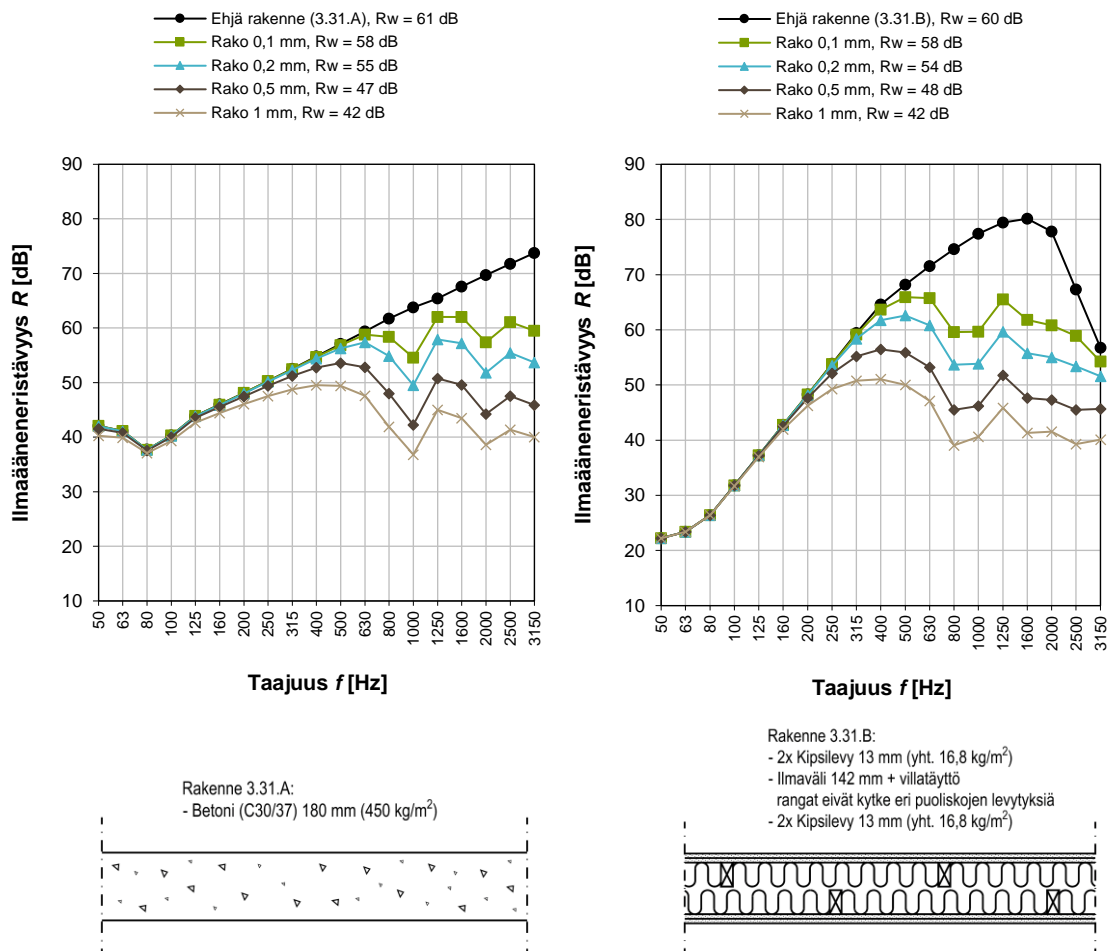
Spektripainotusermin C arvo on tyypillisesti noin 0...-2 dB raskaille rakenteille ja -2...-5 dB levyrakenteille. Spektripainotusermin C_{tr} arvot ovat vastaavasti -2...-5 dB ja -5...-15 dB. Jos mitattava taajuusalue laajennetaan 50 Hz saakka, spektripainotusermien $C_{50-3150}$ ja $C_{tr,50-3150}$ arvot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

Vaativimmissa kohteissa äänen siirtymistä tilojen välillä tutkitaan taajuuskaistoittain määriteltyjen äänilähteen äänitehojen tai äänilähteen tuottamien äänenpainetasojen ja rakenteiden ilmaääneneristävyyksien perusteella. Spektripainotusermit antavat lähinnä yleiskäsityksen rakenteiden ilmaääneneristyskyvystä erityyppisiä äänispektrejä vastaan eri taajuusalueilla.

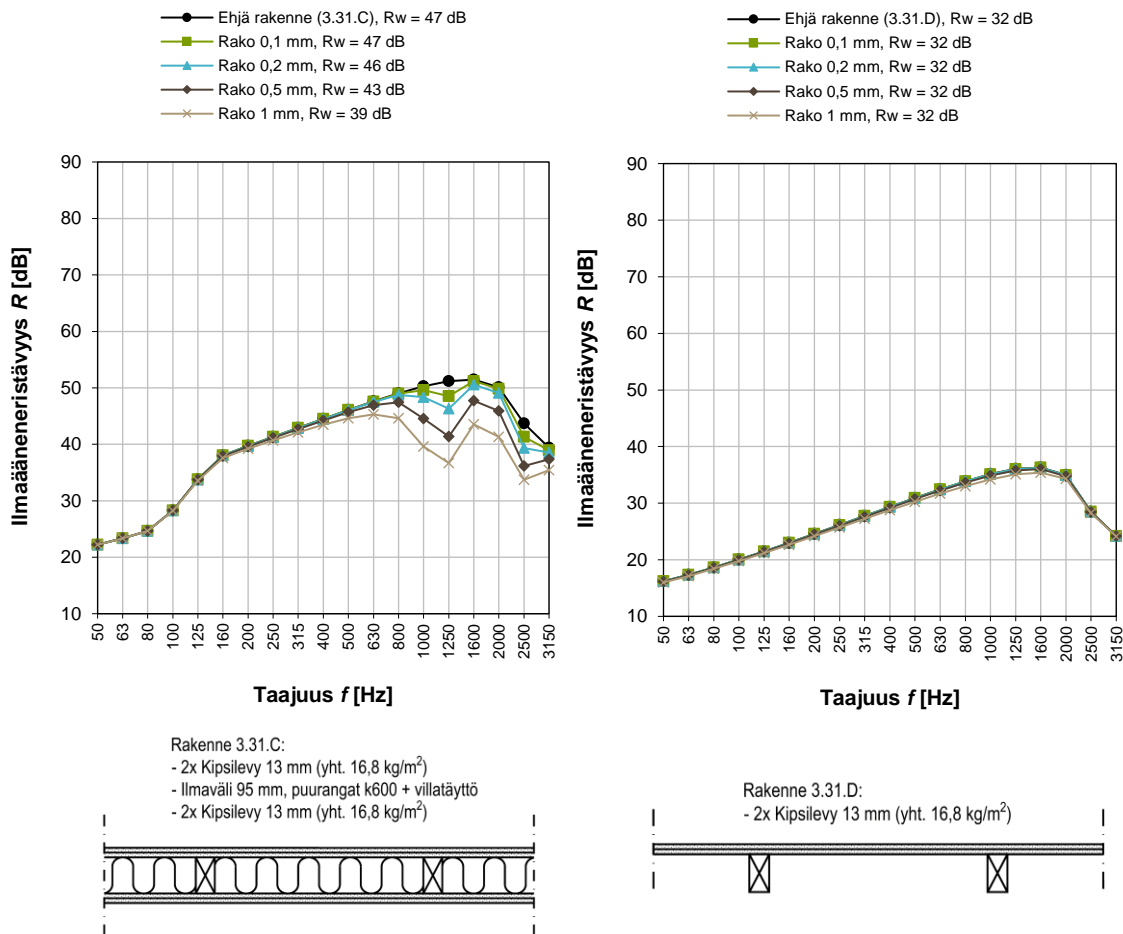
3.5 Rakennusosan tiiviys

3.5.1 Raon vaikutus ilmääneneristävyyteen

Ehdoton edellytys sille, että ilmääneneristävyyttä voidaan saavuttaa, on rakenteiden tiiviys. Jo pienikin rako heikentää rakenteen ilmääneneristyskykyä paljon. Kuviin 3.18 ja 3.19 on laskettu yksinkertaisten ja kaksinkertaisten rakennusosien ilmääneneristävyyksiä Gompertsin (1964) ja Gompertsin ja Kihlmanin (1967) laskentamalleilla siten, rakenteessa on leveydeltään 0,1 mm ja 1 mm välillä vaihteleva rako, jonka pituus on 2,5 m. Myös ehjän rakenteen ilmääneneristävyydet on esitetty. Rakojen vaikutus ilmääneneristävyyteen alkaa suurilta taajuuksilta. Mitä leveämpi rako on, sitä laajemmalla taajuusalueella se heikentää ilmääneneristävyyttä.



Kuva 3.18. Raon vaikutus rakenteen laskennalliseen ilmääneneristävyyteen, kun ehjän rakenteen ilmääneneristysluku on yli 60 dB. Rakenteiden pinta-alana on käytetty laskennassa: 4 m x 2,5 m = 10 m² ja raon pituutena rakenteen korkeutta 2,5 m. Levyseinän ilmaväli on oletettu täysin ääntä absorboivaksi.



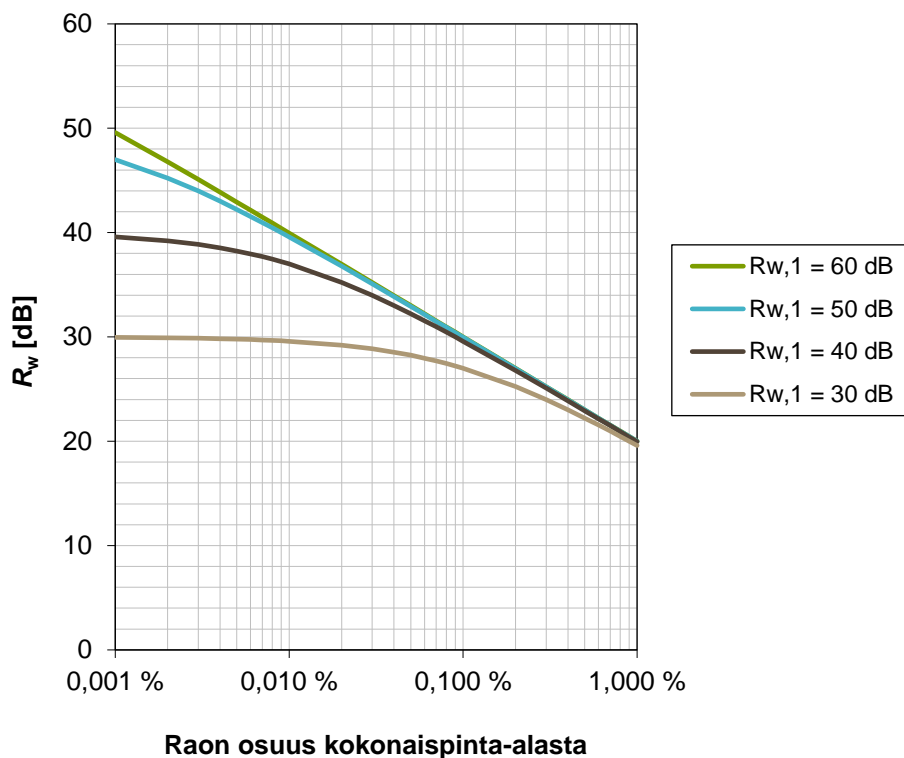
Kuva 3.19. Raon vaikutus rakenteen laskennalliseen ilmasteneristävyyteen, kun ehjän rakenteen ilmasteneristysluku on alle 50 dB. Rakenteiden pinta-alana on käytetty laskennassa: 4 m x 2,5 m = 10 m² ja raon pituutena rakenteen korkeutta 2,5 m. Levyeisän ilmaväli on oletettu täysin ääntä absorboivaksi.

Kuvista nähdään, että raon vaikutus rakennusosan ilmasteneristävyyteen on sitä suurempi, mitä suurempi ehjän rakennusosan ilmasteneristävyys on. Jos ilmasteneristystavoite on korkea (kuva 3.18), rakenteessa ei sallita käytännössä lainkaan rakoja, sillä jo 0,1 mm leveä rako heikentää rakenteen ilmasteneristävyyttä yli 10 dB. Jos hyvin ääntä eristävissä rakenteessa on 0,5 mm leveä rako, sen ilmasteneristyskyky on käytännössä jo menetetty. Jos tilojen välille ei tavoitella erityisen suurta ilmasteneristävyyttä (kuva 3.19), tiloja erottavassa rakenteessa voi olla pieniä rakoja, mutta tiiviys on silti merkittävä tekijä. Käytännössä raot vaikuttavat aina ilmasteneristävyyteen silloin, kun ilmasteneristyslukuksi R_w tavoitellaan 40 dB tai enemmän.

Raot vaikuttavat esimerkiksi ikkunoiden ja yksinkertaisten ovien ääneneristyskykyyn: vaikka lasitus ja ovilevy voidaan suunnitella erittäin hyvin eristäväksi, tiivistäminen on vaikeaa, ja käytännössä saavutettava ilmasteneristysluku jää yleensä alle 50 dB.

3.5.2 Raon vaikutus ilmasteneristyslukuun

Raon vaikutusta ilmasteneristyslukuihin R_w voidaan tutkia olettamalla raon ilmasteneristävyyden nollaksi. Tarkalleen ottaen tämä ei useimmissa tapauksissa pidä paikkaansa. Pienten rakojen ilmasteneristävyyden ei ole nolla, vaan ääni vaimenee jonkin verran kulkiessaan raon kautta tilasta toiseen. Käytännössä rako tiloja erottavassa rakenteessa kuitenkin tarkoittaa sitä, että suunniteltua ilmasteneristävyyttä ei voida saavuttaa (kuva 3.20). Jos esimerkiksi ehjän rakenteen ilmasteneristysluku R_w on 60 dB, rako, jonka osuus rakenteen pinta-alasta on 0,001 %, riittää heikentämään ilmasteneristyslukua 10 dB.

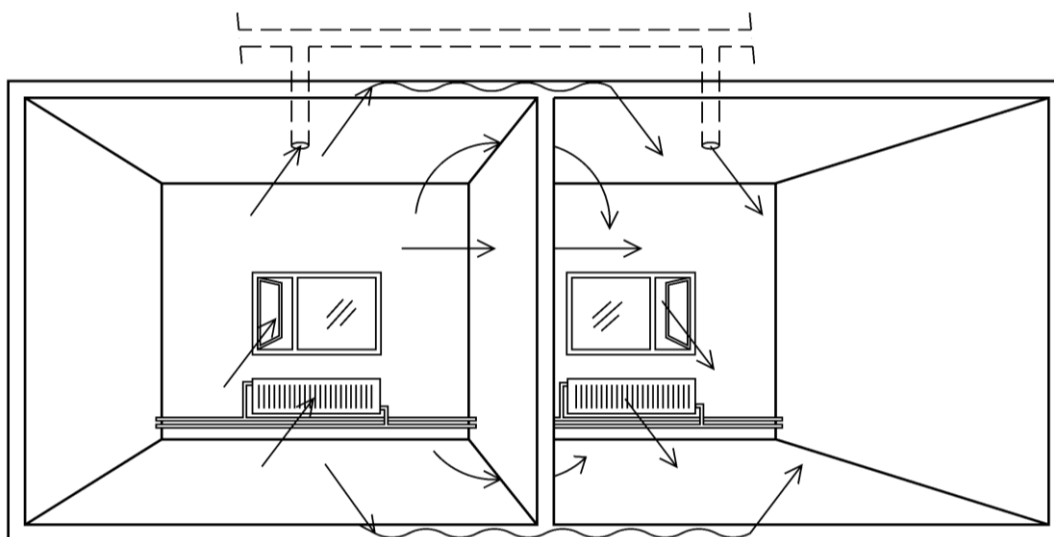


Kuva 3.20. Raon vaikutus rakenteisiin, joiden ilmasteneristysluku R_w vaihtelee 30 ja 60 dB välillä. Raon ilmasteneristysluku on oletettu nollaksi. Tiiviin rakenteen ilmasteneristysluku on annettu selitteessä. Raon pinta-ala on esitetty sen osuutena rakenteen kokonaispinta-alasta.

3.6 Ilmaääneneristävyys tilojen välillä

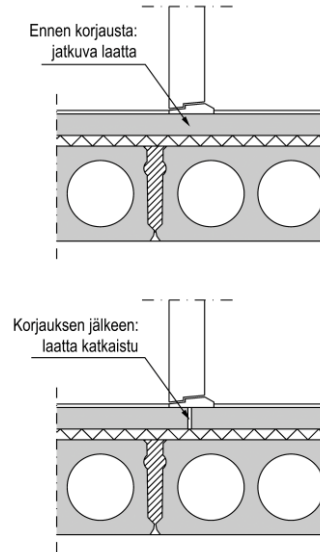
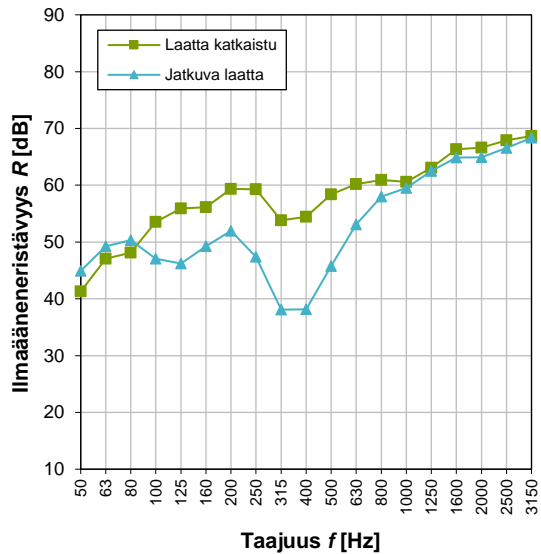
3.6.1 Äänen rakenteellinen sivutiesiirtymä

Aiemmin on tarkasteltu yksittäisten rakennusosien ilmaääneneristävyyttä, jota voidaan tutkia mittaamalla laboratorioissa tai laskentamalleilla. Laboratoriomittauksissa ääni siirtyy laboratorion lähetyshuoneesta vastaanottohuoneeseen käytännössä vain tutkittavan rakennusosan kautta. Rakennuksissa näin ei ole, vaan ääni 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 3.21). Lisäksi ilmaääneneristävyyteen tilojen välillä voivat vaikuttaa rakenteissa olevat raot, kuten huonosti tiivistetyt elementtien saumat tai ilmanvaihtokanavien tai patteriputkien läpiviennit.



Kuva 3.21. Ääni siirtyy rakennuksessa tilasta toiseen tiloja erottavien rakenteiden kautta, mutta myös monia muita reittejä rakenteellisena sivutiesiirtymänä tai rakennusten teknisten järjestelmien välityksellä.

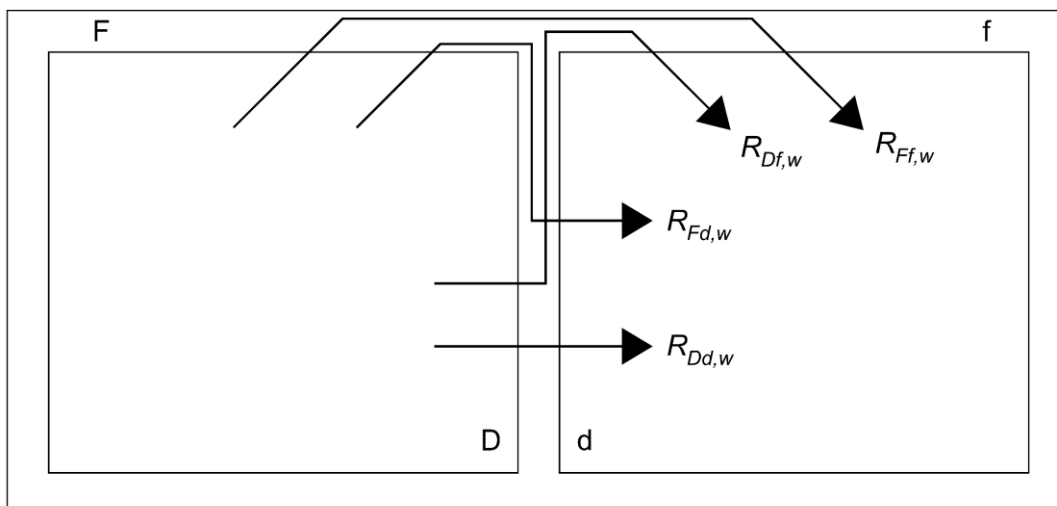
Sivutiesiirtymä tarkoittaa kaikkea äänen siirtymistä, joka tapahtuu muuta reittiä kuin suoraan tiloja erottavan rakenteen välityksellä. Rakenteiden kautta tapahtuvasta sivutiesiirtymästä käytetään nimitystä rakenteellinen sivutiesiirtymä. Rakenteelliset sivutiesiirtymät voivat vaikuttaa merkittävästikin äänen kulkemiseen tilasta toiseen, joten siksi rakentamismääräykset koskevat ilmaääneneristävyyttä rakennuksessa (YMa 796/2017, YMo 2018). Kuvassa 3.22 on käytännön esimerkki sivutiesiirtymän vaikutuksesta, kun tavoiteltu ilmaääneneristysluku tilojen välille R'_w oli 60 dB. Tilasta toiseen jatkunut yhtenäinen kelluva betonilaatta aiheutti koinsidenssialueellaan (noin 400 Hz) erittäin merkittävän sivutiesiirtymän.



Kuva 3.22. Kahden musiikkiluokan välillä on varasto, jonka kummankin levyseinän ilmäääneneristysluku on 48 dB. Tilojen välille tavoiteltiin ilmäääneneristyslukuksi R_w 60 dB. Kelluvan lattian 60 mm paksu betonilaatta oli rakennettu varaston ovien kohdalta jatkuvaksi tilojen välillä, mikä aiheutti runsaasti sivutiesiirtymää tilasta toiseen: ilmäääneneristyslukuksi mitattiin 52 dB. 60 mm paksun betonilaatan koinsidenssitaajuus on noin 370 Hz. Tällä taajuusalueella jatkuva laatta heikensi ilmäääneneristävyyttä enimmillään 16 dB. Katkaisemalla laatta tiloja erottavan väliseinän kohdalla ilmäääneneristysluku R_w parani arvoon 62 dB (Kylliäinen 2006).

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

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 3.23, ilmäääneneristysluku $R_{Dd,w}$), 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 ilmäääneneristävyyttä rakennuksessa, on selvitettävä ilmäääneneristysluvut jokaisen 12 sivutiesiirtymäreitin kautta.



Kuva 3.23. Ääni siirtyy tilojen välillä suoraan tiloja erottavan rakenteen kautta (reitti Dd), mutta lisäksi sillä on lukuisia rakenteellisia sivutiesiirtymäreittejä.

3.6.2 Äänitasoeroluku

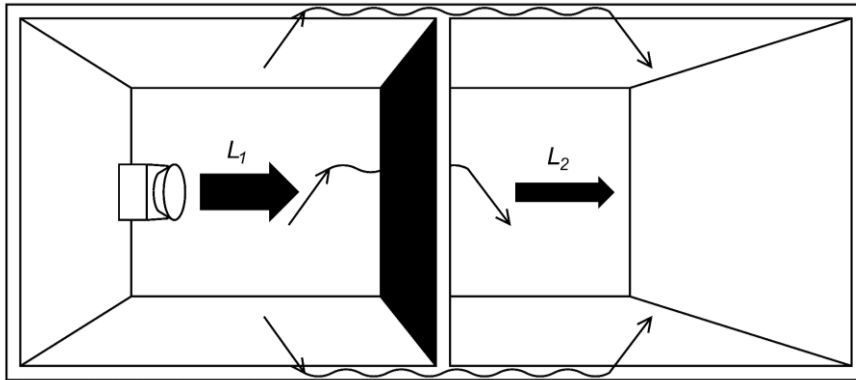
Ilmaääneneristävyyden mittauseriaate tilojen välillä rakennuksessa on sama kuin rakennusosien mittauksilla laboratoriossa. Standardi ISO 717-1 (2017) määrittelee huoneiden välisen ilmaääneneristävyyden arvioimista kolme vaihtoehtoista mittalukua: ilmaääneneristysluvun R'_w (erotukseksi laboratoriomittauksista rakennuksessa mitatusta ilmaääneneristysluvusta käytetään pilkullista merkintää), normalisoidun äänitasoeroluvun $D_{n,w}$ ja standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$. Mittaluvuista R'_w pyrkii kuvaamaan äänitehon siirtymistä tilasta toiseen. Kaksi muuta mittalukua kuvaavat äänenpainetasojen erotuksia huoneiden välillä. Käytettäessä mittalukua $D_{n,w}$ erotukset normalisoidaan 10 m^2 vertailuabsorptioalaan A_0 ja mittalukua $D_{nT,w}$ käytettäessä äänitasoerot standardisoidaan $0,5 \text{ s}$ vertailujälkikaiunta-aikaan T_0 . Suomessa käytettiin ilmaääneneristävyyden mittalukuna rakennuksissa äänitasoerolukua $D_{nT,w}$ vuoteen 1967 saakka ja tämän jälkeen ilmaääneneristyslukua R'_w vuoteen 2017 asti (Lietzén & Kylliäinen 2014).

Ilmaääneneristävyyden R mittauseriaate kehitettiin alkujaan laboratoriomittauksiin, mutta myöhemmin menetelmä otettiin käyttöön myös kenttämittauksissa. Laboratoriossa olosuhteet ovat aina samanlaiset ja äänitehon voidaan olettaa siirtyvän vain tutkitavan rakenteen kautta. Rakennuksessa mittaustulokseen vaikuttavat kuitenkin muun muassa lähetys- ja vastaanottohuoneiden tilavuudet sekä kaikki äänen kulkureitit tilasta toiseen. Jo pitkään on tiedetty, että tilojen välisen ilmaääneneristävyyden arviointi mittaluvuilla R'_w , $D_{n,w}$ ja $D_{nT,w}$ johtaa erilaiseen tulkintaan saavutetusta ääneneristävyydestä, erityisesti vastaanottohuoneen tilavuuden kasvaessa (Kylliäinen et al. 2015).

Mittalukujen tuottama erilainen tulkinta tilojen välisestä ääneneristävyydestä ei osoita mitään siitä, mikä mittaluku kuvaa tilojen välistä ääneneristävyyttä tarkimmin. Ratkaiseva ilmiö on erilaisten asumismelun lähteiden tuottamien äänten siirtyminen tilasta

toiseen. Mittaluvun tulee siten vastata lähetyshuoneesta vastaanottohuoneeseen siirtyneen asumismelun äänitasoa mahdollisimman hyvin. Jälkikäiunta-ajan suomalaisessa kalustetussa asuinhuoneessa tiedetään olevan noin 0,5 s huoneen lattiapinta-alasta riippumatta, mikä vastaa äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ laskennassa käytettävää vertailujälkikäiunta-aikaa (Kylliäinen et al. 2016). Vertailtaessa eri mittalukujen vastaavuutta erilaisten asumisen äänien siirtymiseen asuinhuoneistosta naapurihuoneistoon todettiin, että äänitasoeroluvun vastaavuus on parempi kuin muiden standardissa ISO 717-1 (2017) esitettyjen mittalukujen (Kylliäinen et al. 2015). Siten ääniympäristöasetus 796/2017 määrittelee ääneneristävyyden mittaluvuksi tilojen välillä äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$.

Äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ laskemiseksi on mitattava kolmannesoktaavikaistoittain äänitasoerot eli lähetyshuoneessa vallitsevan äänenpainetason L_1 ja vastaanottohuoneeseen välittyvän äänenpainetason L_2 erotukset (kuva 3.24). Äänilähteenä rakennuksissa tehtävissä mittauksissa käytetään usein ympärisäteilevää kaiutinta (kuva 3.25), joka tuottaa lähetyshuoneeseen noin 100 dB äänenpainetasot mitattavalla taajuusalueella 50–5000 Hz.



Kuva 3.24. Rakennuksessa tehtävissä ilmaääneneristävyyden mittauksissa mittaustulokseen sisältyy äänen kulkeminen kaikkia mahdollisia kulkureittejä tilasta toiseen, mikä vastaa myös kuulijan kokemusta äänen siirtymisestä rakennuksessa.



Kuva 3.25. Ilmaääneneristävyyden mittauksissa äänilähteenä käytettävä ympärisäteilevä kaiutin. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Äänenpainetasot mitataan siten, että kaiutinpaikkoja on lähetyshuoneessa vähintään kaksi ja kumpaakin kaiutinpaikkaa kohti äänenpainetasot mitataan viidestä pisteestä lähetys- ja vastaanottohuoneessa. Äänenpainetasojen lisäksi mitataan vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T (ISO 16283-1:2014). Standardisoidut äänitasoerot D_{nT} [dB] lasketaan mitatuista äänenpainetasoista ja jälkikaiunta-ajoista T sekä vertailujälkikaiunta-ajasta T_0 :

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (3.21)$$

Ääneneristävyyden yksilukuarvon eli standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ laskennassa käytetään vertailukäyrämenettelyä samalla tavalla kuin rakennusosan ilmaääneneristysluvun R_w laskennassa (luku 3.4.2). Myös vertailukäyrän muoto ja arvot ovat samat (taulukko 3.2). Ympäristöministeriön ääniympäristöasetuksessa 796/2017 ja ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) sekä standardissa SFS 5907:2022 on annettu pienimpiä sallittuja äänitasoerolukuja erilaisten tilojen välille. Esimerkiksi kahden asuinhuoneiston välillä pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on 55 dB.

3.6.3 Tilojen välisen ilmaääneneristävyyden laskenta

Standardissa ISO 12354-1 (2017) on esitetty tarkka ja yksinkertaistettu menetelmä ilmaääneneristävyyden laskemiseksi rakennuksessa. Menetelmät perustuvat tiloja erottavien rakenteiden ja tiloja sivuavien rakenteiden ilmaääneneristyslukuihin, jotka voivat olla laboratoriossa mitattuja tai laskettuja, sekä liitosten liitoseristävyyteen K_{ij} . Liitoseristävyys K_{ij} ei ole vakio taajuuden tai rakennusosien massojen ja liitosten jäykkyyksien suhteen. Yksinkertaistettu laskentamenetelmä perustuu siihen, että taajuuden vaikutus liitoseristävyyksiin jätetään huomiotta, jolloin liitoseristävyydet riippuvat pelkästään liittyvien rakennusosien massoista ja liitostavasta. Menetelmä soveltuu ilmaääneneristyslukujen laskemiseen, kun liittyvät rakennusosat ovat raskaita kivirakenteita tai niihin liittyä kevyt levyrakenne.

Raskaiden kivirakenteiden ilmaääneneristävyyttä voidaan parantaa tekemällä rakenteisiin levyverhous, jossa on mineraalivillalla täytetty ilmaväli ja rakennuslevy. Rakenne muodostuu tällöin kaksin- tai kolminkertaiseksi rakenteeksi riippuen siitä, onko levyverhous molemmilla vai ainoastaan toisella puolella kivirakennetta. Sivutiesiirtymiä laskettaessa levyverhous otetaan huomioon ilmaääneneristävyyden parannuslukuna ΔR_w , joka riippuu kivirakenteen, ilmavälin ja levyjen muodostaman massa–jousi–massajärjestelmän ominaistaajuudesta f_{mam} . Ominaistaajuus lasketaan kaavan 3.12 mukaisesti. Parannusluku saadaan tämän jälkeen taulukosta 3.6.

Jos kivirakenteen molemmin puolin on levyverhous, niistä paremmin eristävän parannusluku otetaan huomioon täysimääräisenä ja huonommin eristävän parannusluvusta puolet:

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

Taulukko 3.6. Levyverhouksen ilmääneneristävyden parannusluku ΔR_w [dB] levyverhouksen ja seinärakenteen muodostaman massa–jousi–massajärjestelmän ominaistaajuuden funktiona. Ilmääneneristysluku R_w tarkoittaa verhotun rakenteen ilmääneneristyslukua.

Verhouksen ominaistaajuus f_0 [Hz]	Parannusluku ΔR_w [dB]
$30 \leq f_0 \leq 160$	$74,4 - 20 \lg f_0 - R_w/2$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
$630 \leq f_0 \leq 1600$	-10
$1600 \leq f_0 \leq 5000$	-5

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

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

Ilmääneneristysluvut kuvan 3.22 sivutiesiirtymäreittien kautta lasketaan tiloja erottavan rakenteen ilmääneneristysluvun $R_{s,w}$ ja sivuavien rakenteiden ilmääneneristyslukujen $R_{f,w}$ sekä eri reiteille mahdollisesti osuvien levyverhousten tuottamien ilmääneneristävyden parannuslukujen perusteella. Lisäksi tarvitaan liitoseristävydet, 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 3.22 esitettyihin äänen suoraan kulureittiin ja sivutiesiirtymäreitteihin. Kun ilmääneneristysluku erottavan rakenteen kautta ja ilmääneneristysluvut kaikkien 12 sivutiesiirtymäreitin kautta ovat tulleet määritetyiksi, saadaan lasketuksi ilmääneneristysluku tilojen välille R'_w :

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

Ääniympäristöasetuksessa 796/2017 ilmääneneristävyden mittalukuna käytetään standardisoitua äänitasoerolukua $D_{nT,w}$, joten lopuksi tilojen välille laskettu

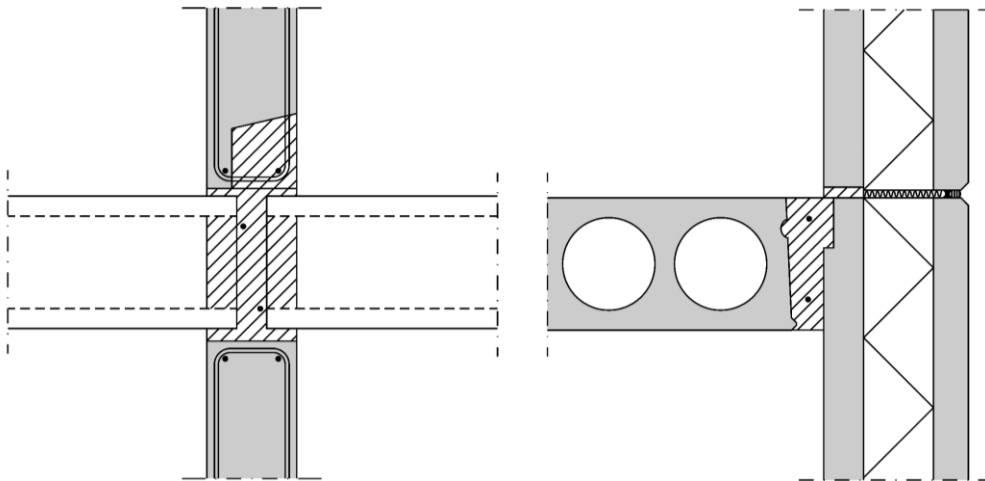
ilmaääneneristysluku R'_w on muunnettava äänitasoeroluviiksi. Näiden kahden mittaluvun välillä on yhteys, joka riippuu vastaanottohuoneen tilavuudesta V ja tiloja erottavan rakennusosan pinta-alasta S_s :

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \lg \frac{0,32 V}{S_s} \quad (3.28)$$

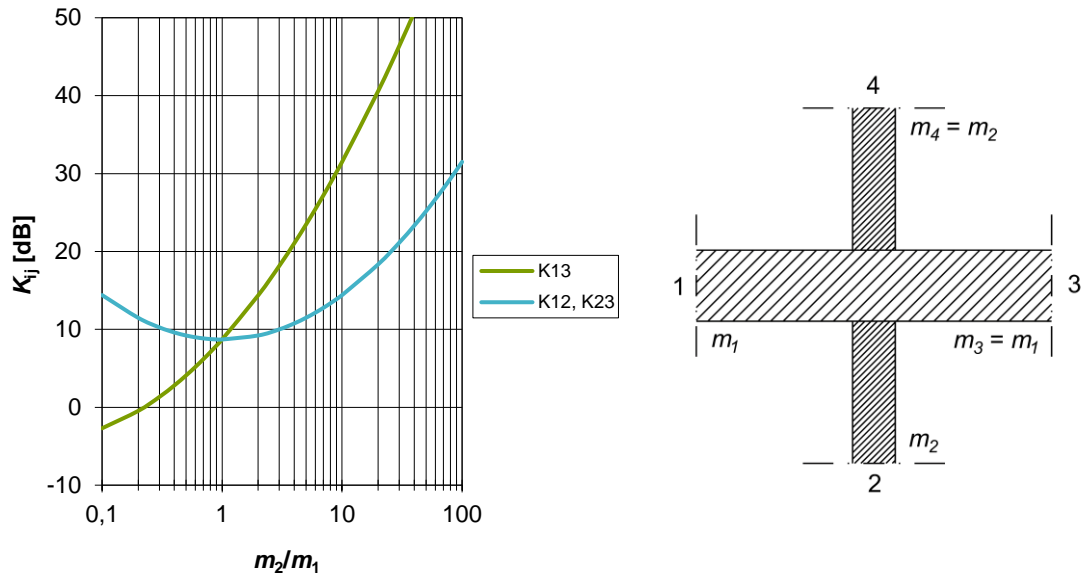
Kaava 3.28 tarkoittaa, että äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ arvo riippuu suunnasta: esimerkiksi laskettaessa äänitasoeroluku pienestä huoneesta isompaan saadaan eri tulos kuin laskettaessa päinvastaiseen suuntaan.

3.6.4 Kivirakenteiden liitoseristävydet

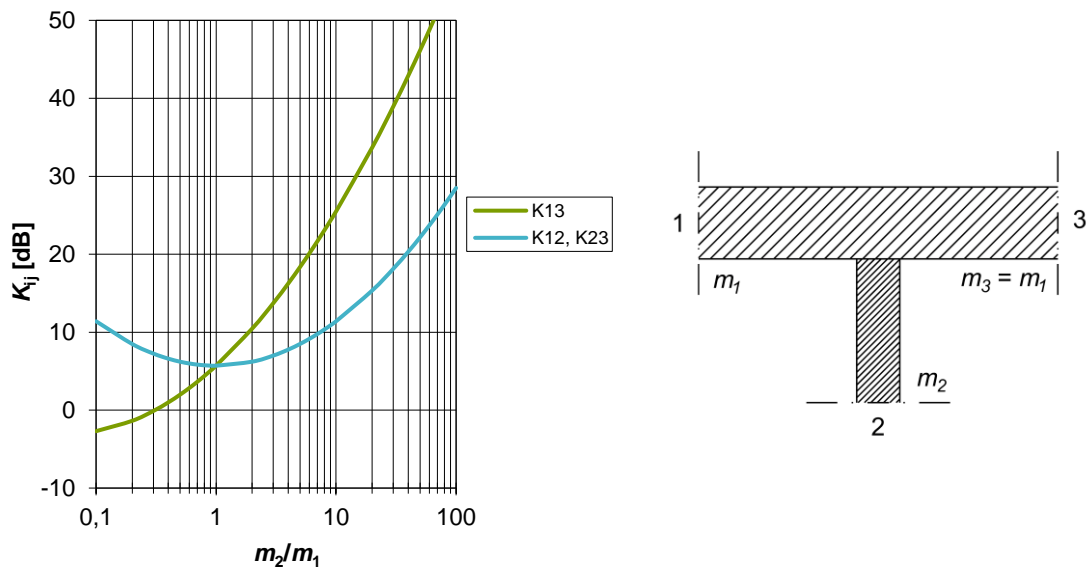
Raskaiden kivirakenteiden liitoseristävydet perustuvat rakenteiden massaan ja liitosten jäykkyyteen (kuva 3.26). Kun tiloja erottava rakenne on sitä sivuavaa rakennetta raskaampi eli tiloja erottavan rakenteen pintamassan m_2 ja sivuavan rakenteen pintamassan m_1 suhteen ollessa yli 1 liitoseristävyys on sitä parempi mitä pienempi sivuavan rakenteen pintamassa on. Kuvissa 3.27 ja 3.28 on esitetty kahden tyyppillisen betoni- ja muiden kivirakenteiden liitostyyppien liitoseristävyksiä. Enemmän liitoseristävyksiä erilaisille liitostyypeille on esitetty standardissa ISO 12354-1 (2017).



Kuva 3.26. Esimerkkejä jäykistä liitoksista: betoniväliseinäelementtien ja ontelolaataston liitos, ulkoseinän betonisandwich-elementtien ja ontelolaataston liitos.

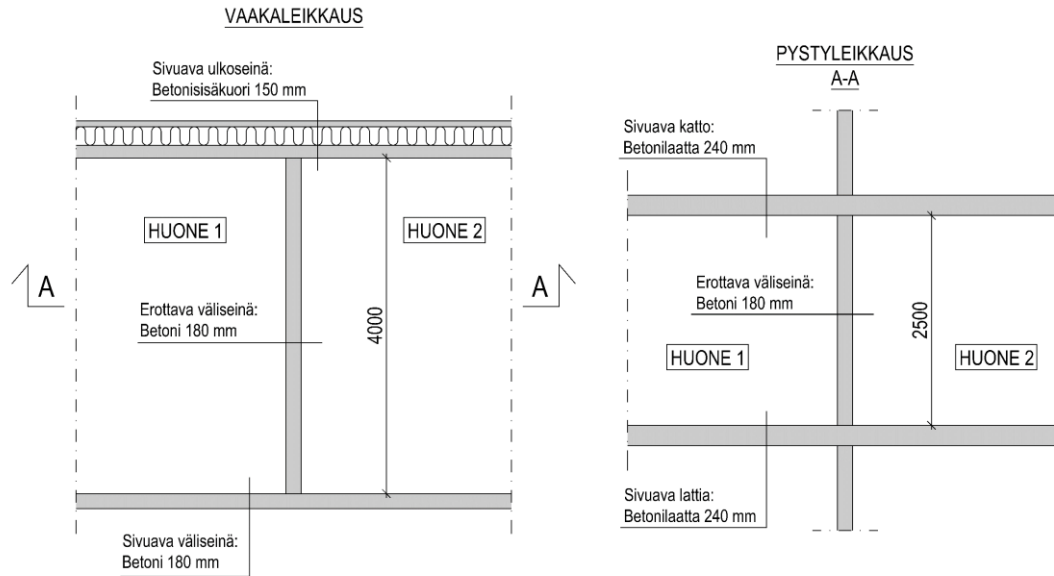


Kuva 3.27. Raskaiden kivirakenteiden jäykän ristiliitoksen liitoseristävyyksiä. Tällaisia liitoksia ovat esimerkiksi betoniväliseinä- ja välipohjaelementtien liitokset.



Kuva 3.28. Raskaiden kivirakenteiden jäykän T-liitoksen liitoseristävyyksiä. Tällaisia liitoksia ovat esimerkiksi betoniväliseinäelementtien liitokset ulkoseinän sandwich-elementteihin.

Kuvassa 3.29 on esitetty vaaka- ja pystyleikkaukset kahdesta vierekkäisestä asuinhuoneistosta. Huoneistojen kummankin tarkasteltavan huoneen tilavuus on 30 m^3 . Huonekorkeus on $2,5 \text{ m}$ ja tiloja erottavan väliseinän pituus on 4 m . Huoneistoja erottavan väliseinän pinta-ala S_s on 10 m^2 . Tiloja erottaa 180 mm paksu betoniväliseinä, jonka ilmajeneristysluku R_w on 61 dB . Sivuvuorina rakenteina ovat katon ja lattian 240 mm paksu paikallavalettu betonilaatta ($R_w = 66 \text{ dB}$) ja ulkoseinän betoninen sisäkuori 150 mm ($R_w = 58 \text{ dB}$) sekä toinen betoniväliseinä 180 mm . Kaikkien rakennusosien ilmajeneristysluvut on määritetty parametrisilla laskentamalleilla (luku 3.2).



Kuva 3.29. Kahden vierekkäisen asuinhuoneiston vaaka- ja pystyleikkaukset huoneistoja erottavan 180 mm paksun betoniväliseinän kohdalta.

Taulukossa 3.7 on esitetty kuvan 3.29 tilanteen jokaisella erilaisella sivutiesiirtymäreitillä olevan rakennusosan ilmaääneneristysluku (esim. reitillä Ff merkintä on $R_{F,w,i}$), liitoseristävyys (esim. $K_{Ff,i}$) sekä reitin ilmaääneneristysluku (esim. $R_{Ff,w,i}$). Tässä tapauksessa mikään sivutiesiirtymäreitti ei ole kokonaisuuden kannalta hallitseva, vaan ääntä siirtyy eniten tiloja erottavan väliseinän kautta. Kaikkien sivutiesiirtymäreittien vaikutus yhteensä kuitenkin johtaa siihen, että äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ arvo (58,6 dB) on yli 2 dB pienempi kuin tiloja erottavan betoniväliseinän ilmaääneneristysluku R_w (61 dB).

Taulukko 3.7. Kuvassa 3.29 esitettyjen huoneiden välisten äänen siirtymäreittien rakennusosien ilmaääneneristysluvut, liitoseristävyydet ja sivutiesiirtymäreittien ilmaääneneristysluvut [dB], jotka yhdessä määräävät tilojen ilmaääneneristävyyden sekä äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ arvon. Samanlaisten reittien arvoja ei ole erikseen esitetty.

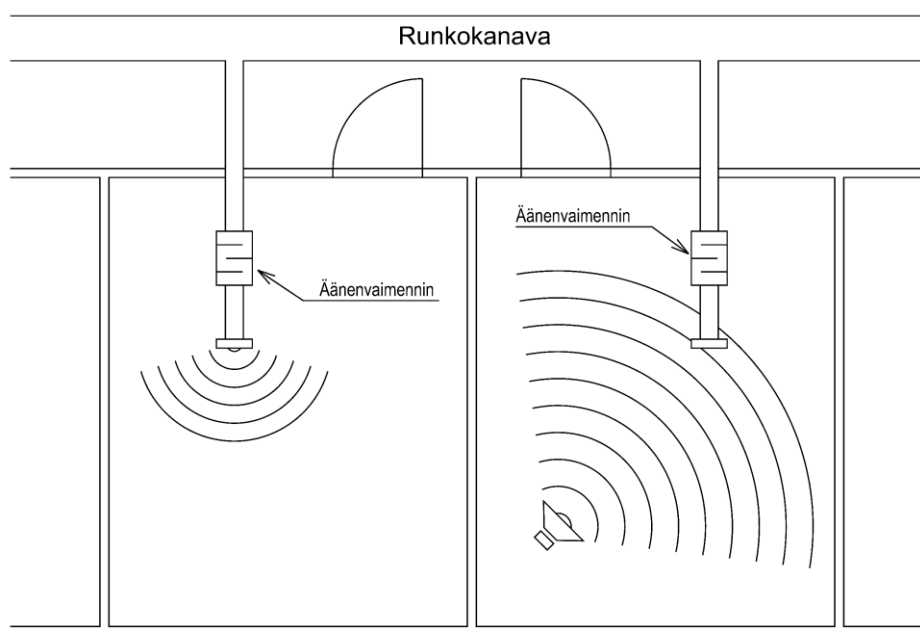
		Ulkoseinä Betoni 150 mm	Väliseinä Betoni 180 mm	Katto ja lattia Betoni 240 mm
Siirtymäreitti	Rakennusosan R_w	58	61	66
	Liitoseristävyys K Reitin eristävyys R			
Ff	$K_{Ff,i}$	6,85	5,70	6,65
	$R_{Ff,w,i}$	70,87	72,72	76,63
Fd	$K_{Fd,i}$	5,74	5,70	8,79
	$R_{Fd,w,i}$	71,26	72,72	76,27
Df	$K_{Df,i}$	5,74	5,70	8,79
	$R_{Df,w,i}$	71,26	72,72	76,27
Dd	$R_{s,w}, R_{Dd,w}$	61		
Ilmaääneneristysluku	R'_w	58,8 dB		
Äänitasoeroluku	$D_{nT,w}$	58,6 dB		

3.6.5 Sivutiesiirtymä ilmanvaihtokanaviston kautta

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 (kaava 3.1). Kun vastaanottotilaan johtaa toisesta lähetystilasta 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 ilmaääneneristävyyskaavan perusteella myös niin, että ilmaääneneristävyys tilojen välillä heikkenee 3 dB.

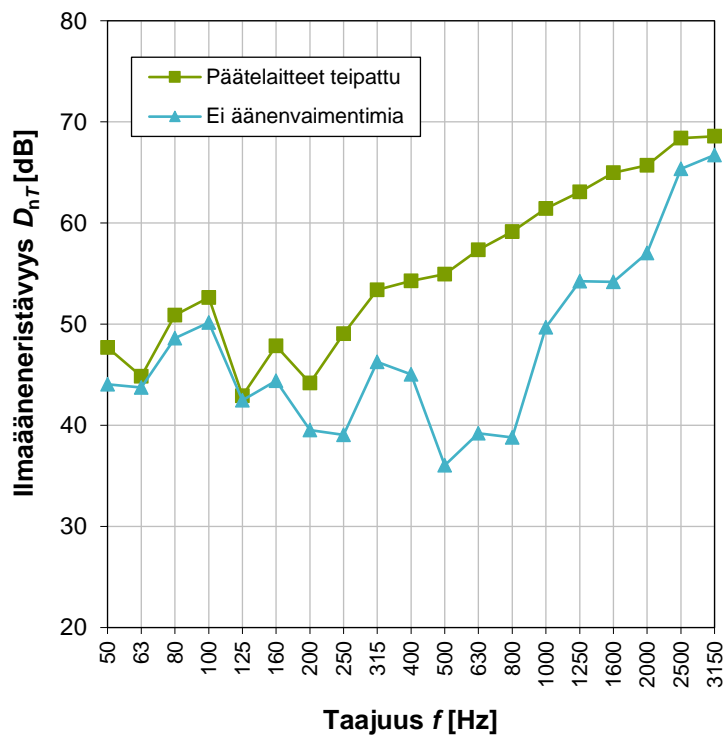
Ääneneristystä suunniteltaessa rakennusosien ilmaääneneristävyys tulee sivutiesiirtymien, mahdollisten työvirheiden ja muiden tekijöiden aiheuttamien heikkennysten vuoksi aina valita jonkin verran paremmaksi kuin tilojen välille asetettu ilmaääneneristyslukuvaatimus. Yhden merkittävän sivutiesiirtymäreitin muodostaa ilmanvaihtokanavisto (kuva 3.30). Jos ilmanvaihtokanavien sallitaan heikentävän ilmaääneneristystä 0,5 dB pelkästään rakennusosan tuottamaan ilmaääneneristykseen verrattuna, ilmaääneneristävyyden 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.



Kuva 3.30. Huoneiden välinen äänen sivutiesiirtymäreitti ilmanvaihtokanaviston kautta.

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. Ilmanvaihtokanavien ääneneristys on siten suunniteltava useimmissa toimistorakennuksissa, kaikissa kouluissa, terveyskeskuksissa, sairaaloissa, hotelleissa ja asuinrakennuksissa, joissa on yhteiskanavajärjestelmä (kuva 3.31). Erityisen suuria vaatimuksia ilmanvaihtokanavien ääneneristykselle syntyy vaativimmissa tiloissa, kuten elokuvateattereissa, teattereissa ja konserttisaleissa. Ilmanvaihtokanavien kautta tapahtuvan sivutiesiirtymän suunnitteluun ovat esittäneet tarkan laskentamenetelmän Kylliäinen & Hongisto (2007).



Kuva 3.31. Asuinkerrostalossa on yhteiskanavajärjestelmä, jossa ei ollut äänenvaimentimia huoneistojen välillä. Äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ tulisi olla ääniympäristöasetuksen 796/2017 mukaan asuinhuoneistojen välillä vähintään 55 dB. Pöytähuoneiden välillä äänitasoeroluvuksi mitattiin 46 dB. Kun kanavien päätelaitteet teipattiin umpeen, äänitasoeroluku parani arvoon 59 dB, joka vastaa rakennuksessa välipohjan kantavana rakenteena käytetyn 370 mm paksun ontelolaataston (massa 510 kg/m²) äänitasoerolukua kentämittauksissa. Ääneneristyksen parantamiseksi kanaviin oli asennettava 1000 mm pitkät äänenvaimentimet. (Kylliäinen 2006)

Äänen siirtyessä kanavan kautta tilasta toiseen tapahtuu vaimenemista äänen kulkiessa huonetilasta päätelaitteen kautta kanavaan. Tämän lähtövaimennuksen lisäksi kanaviston ääneneristys muodostuu lisäksi äänitason jakautumisesta kanavan haaroissa syntyvästä vaimennuksesta, huoneita yhdistävässä kanavassa huoneiden välillä olevien äänenvaimentimien vaimennuksesta ja päätelaitteiden vaimennuksesta. Lisäksi vaimennusta

syntyy jonkin verran kanavien mutkista sekä kanavan pituusyksikköä kohti, joskin ne vaikuttavat lähinnä suurilla taajuuksilla, joilla ääneneristävyys muodostuu äänenvaimentimien ansiosta muutenkin yleensä suureksi.

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.

Kanavan seinämän kautta taivutusvärähtelynä etenevää ääntä voidaan vähentää katkaisemalla kanavan pelti seinän kohdalla, jolloin katkaisukohtaan asennetaan joustava liitinnauha. Tätä tapaa käytetään, kun kanava kulkee levyrakenteisen seinän läpi. Jos kanava kulkee kivirakenteisen seinän läpi, taivutusvärähtelyä voidaan vähentää valamalla kanava jäykästi seinään kiinni. Jos kanavan seinämä on kaksinkertainen, taivutusvärähtelyä saadaan estetyksi myös katkaisemalla ulompi pelti seinän kohdalla. 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.

Luvun 3 lähteet

- Arni, P. 1949. Käytännöllisen akustiikan perusteet. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava.
- Brunskog, J. 2022. The forced sound transmission of finite periodic plates using a variational approach. Proceedings of Internoise 2022. Glasgow, September 21–24.
- Cambridge, J. E. 2006. An evaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms. Master's Thesis. Gothenburg, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Acoustics.
- Gomperts, M. C. 1964. The "sound insulation" of circular and slit-shaped apertures. *Acustica*. Vol. 14, s. 1–16.
- Gomperts, M. C. & Kihlman, T. 1967. The sound transmission loss of circular and slit-shaped apertures in walls. *Acustica*, Vol. 18, s. 144–150.
- Hopkins, C. 2007. Sound insulation. Oxford, Butterworth-Heinemann.
- ISO 10140-2. 2021. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation.
- ISO 10140-4. 2021. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 4: Measurement procedures and requirements.

- ISO 12354-1. 2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
- ISO 16283-1. 2014. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation.
- ISO 717-1. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation.
- Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetekniikan laitos, tutkimusraportti 137.
- Kylliäinen, M. 2009. Kansainväliset yhteydet vuoden 1967 ääneneristysnormien muotoutumisessa. Tekniikan Waiheita. Nro 3, s. 29–47.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. RIL 243-1 Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Kylliäinen, M., Lietzén, J. & Kovalainen, V. 2021. Puurakenteiden ääneneristävyyden nykyaikaiset laskentamenetelmät. Rakennusfysiikka 2021. Tampere, 26.–28.10., Tampereen yliopisto ja Kiinko Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy, s. 471–476.
- Kylliäinen, M., Takala, J. & Hongisto, V. 2015. Ilmaääneneristysluku sekä standardisoitu ja normalisoitu äänitasoeroluku huoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden kuvaajina. Akustiikkapäivät 2015. Kuopio, 1.–2.9., Akustinen Seura ry, s. 158–161.
- Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D. & Hongisto, V. 2016. Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings. Applied Acoustics. Vol. 102, s. 12–18.
- Lietzén, J. & Kovalainen, V. 2021. Rakenteiden ilmaääneneristävyyden arviointi elementtimenetelmällä. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 102–107.
- Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mitaustulosten perusteella. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 1/2014.
- Riitakangas, J. 2020. Ilmaääneneristävyyden parametrinen laskentamallin validointi. Insinööri työ. Kuopio, Savonia-ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala.
- Rindel, J. H. 2018. Sound insulation in buildings. London, CRC Press.
- Sewell, E. C. 1970. Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. Journal of Sound and Vibration. Vol. 12, s. 21–32.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Sharp, B. H. 1973. A study of techniques to increase the sound insulation of building elements. Washington, Department of Housing & Urban Development, Report R73-5.
- Talus, L. 2022. Ontelolaataston täyttövalun vaikutus tilojen väliseen ääneneristävyyteen. Diplomityö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Thompson, E. 2002. The soundscape of modernity – Architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900–1933. Cambridge, The MIT Press.
- Vigran, T. E. 2008. Building acoustics. London, Taylor & Francis.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.

YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

4

Askelääneneristys

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

Yli-insinööri Paavo Arni 1949

4.1 Askelääneneristyksen arviointi

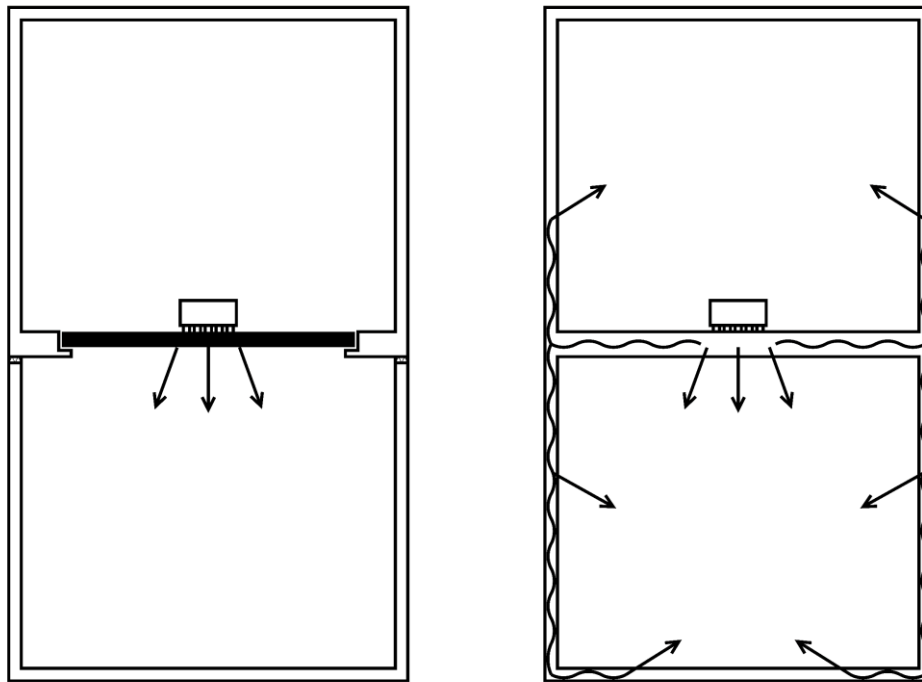
4.1.1 Askelääneneristävyden laskentamallit

Askeläännet 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. Askelääneneristyksen tarkoituksena on vähentää rakenteisiin kohdistuvien iskujen aiheuttamaa ääntä. Rakenteen askelääneneristävyteen vaikuttavat samat ilmiöt kuin ilmaääneneristävyteen, 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 viereisissä tai yläpuolisissa tiloissa. Esimerkiksi rivitaloissa vierekkäisten huoneistojen tulee täyttää määräykset askelääneneristyksestä. Kun asuinkerrostalon kellarikerroksessa on päivittäistavarakauppa, askelääneneristystä voidaan mitata niin, että askeläänikoje on kaupassa ja äänenpainetasot mitataan kaupan yläpuolella olevassa huoneistossa.

Askelääneneristystä voidaan ilmaääneneristyksen tavoin arvioida sekä laboratoriossa että kenttämittauksin valmiissa rakennuksissa tehtävin mittauksin (kuva 4.1). Laboratoriomittauksin saadaan tietoa yksittäisten rakennusosien 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. Ääniympäristöasetus ja ääniympäristöohje koskevat askelääneneristystä rakennuksessa (YMa 796/2017, YMo 2018).

Askelääneneristyksen suunnittelu on pitkään perustunut rakennuksessa tehdyin mittauksin toimiviksi todettujen rakenneratkaisujen käyttöön, mutta laskentamenetelmien kehitys on tehnyt mahdolliseksi myös erittäin tarkat askelääneneristävyden laskennalliset tarkastelut. Askelääneneristävyttä voidaan tarkastella analyttisin menetelmin (esim. Kovalainen et al. 2019), parametrinen menetelmin (esim. Latvanne & Kylliäinen 2019, Latvanne et al. 2019) tai numeerisin menetelmin (Lietzén et al. 2022a, Kylliäinen et al. 2021). Käytännön suunnittelutyössä kahta jälkimmäistä, erityisesti parametrisia menetelmiä, ja uusien rakennustuotteiden kehitystyössä ja tutkimistyössä numeerisia menetelmiä eli esimerkiksi elementtimenetelmää (FEM).



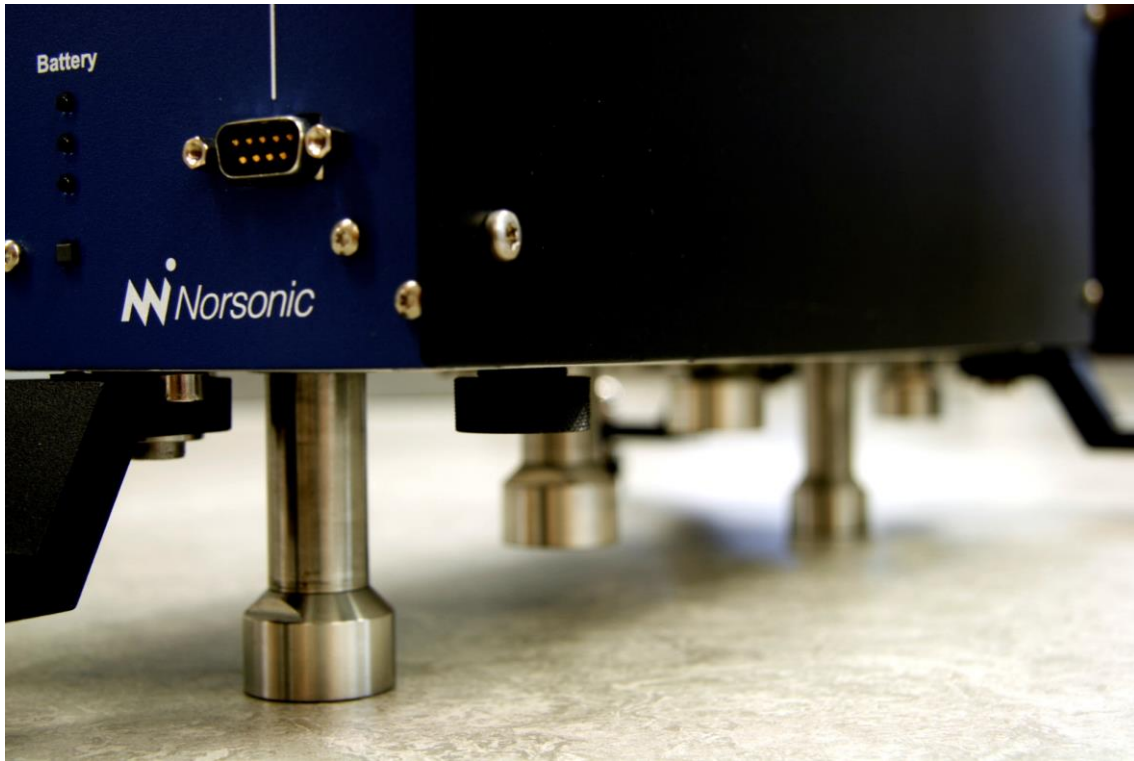
Kuva 4.1. Laboratoriomittauksin saadaan selville yksittäisen rakennusosan askelääneneristyskyky. Mittaukseen rakennuksessa sisältyy sivutiesiirtymä tiloja erottavaa rakennetta sivuavien rakenteiden kautta.

4.1.2 Askeläänitasoluku

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 vastaanotto-tilassa kolmannesoktaavikaistoittain yleensä keskitaajuuksilla 50–3150 Hz. Laboratoriossa mitatusta askeläänikojeen aiheuttamasta äänenpainetasosta käytetään merkintää L_i ja rakennuksessa mitatusta merkintää L_i' .

Mittausmenetelmän määrittelevä standardi (ISO 16283-2:2013) edellyttää, että kenttämittauksissa askeläänikojeella on lähetyshuoneessa vähintään neljä paikkaa ja sen tuottamaa ääntä mitataan vastaanottohuoneessa vähintään kahdesta kohdasta kutakin askeläänikojeen paikkaa kohti. Suositeltavaa on sisällyttää mittauksiin enemmänkin mittauksia luotettavamman tuloksen saamiseksi (Kylliäinen 2014).

Tilaan syntyvä äänenpainetaso riippuu tilan absorptioalasta A [m^2], jonka määrittämiseksi mitataan vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T [s] sekä tilavuus V [m^3]. Absorptioala lasketaan Sabine kaavalla. Erilaisissa tiloissa mitatut tulokset tehdään vertailukelpoisiksi joko normalisoimalla vertailuabsorptioalaan A_0 (10 m^2) tai standardisoimalla vertailujälkikaiunta-aikaan T_0 (0,5 s). Laboratoriomittauksissa käytetään normalisointia (ISO 10140-3:2022) ja kenttämittauksissa on pääsääntöisesti siirrytty käyttämään standardisointia (ISO 16283-2:2013).



Kuva 4.2. Standardoidun askeläänikojeen viisi teräsvasaraa lyövät välipohjaan 10 iskuja sekunnissa. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Rakennuksissa tehtävissä askelääneneristävyyden kenttämittauksissa käytetään Suomessa standardisoituja mittalukuja, sillä niiden on todettu vastaavan normalisoituja mittalukuja paremmin äänen siirtymistä vastaanottohuoneeseen (Lietzén et al. 2016) ja asuinrakennuksissa kalustettujen asuinhuoneiden jälkikaiunta-ajat ovat tyypillisesti 0,5 s riippumatta huoneen lattiapinta-alasta (Kylliäinen et al. 2016). Askelääneneristävyyttä koskevat määräykset ja ohjeet on siten annettu standardisoituna askeläänitasolukuina (YMa 796/2017, YMo 2018).

Normalisoitu askeläänepainetaso eli askeläänitaso tietyllä taajuudella on laboratoriossa mitattuna

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad (4.1)$$

ja kenttämittauksessa rakennuksessa standardisoitu askeläänitaso on

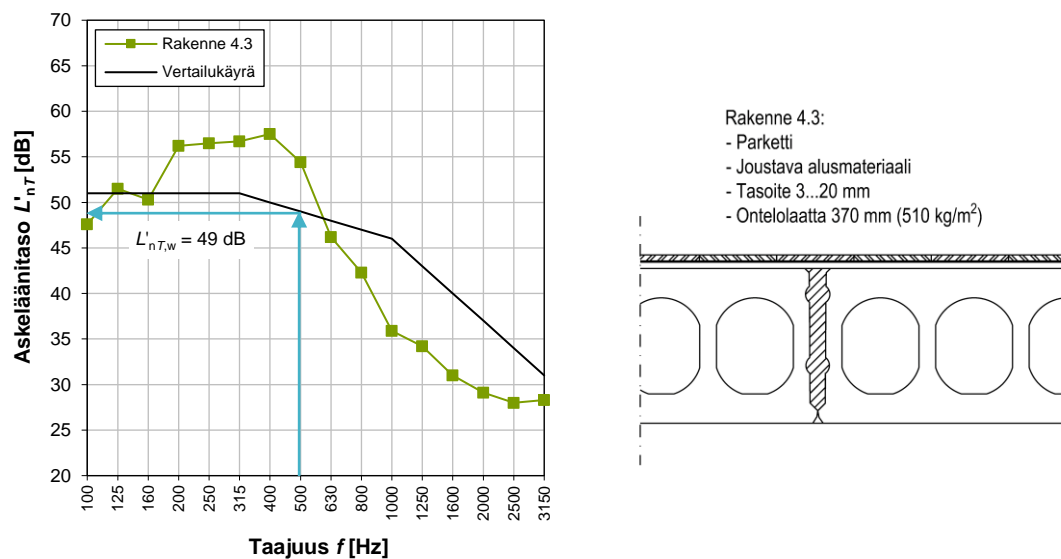
$$L'_{nT} = L'_i - 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (4.2)$$

Ilmaääneneristävyyden tavoin myös askelääneneristävyyden 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 $L'_{nT,w}$.

Taulukko 4.1. Askelääneneristävyyden vertailukäyrän arvot askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ ollessa 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

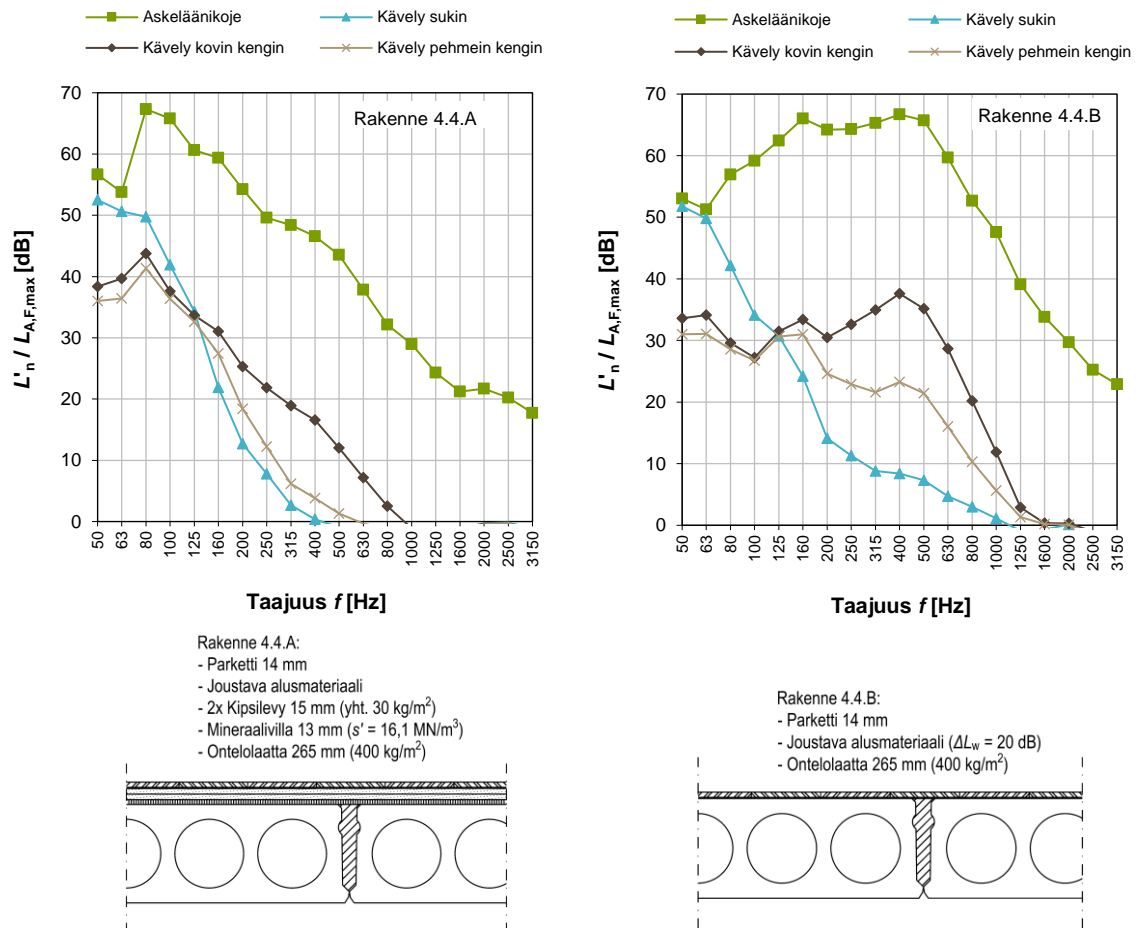


Kuva 4.3. Asuinkerrostalon välipohjarakenteen askeläänitasot mitattuna rakennuksessa. Askeläänitasoluku $L'_{nT,w} = 49$ dB.

4.1.3 Spektripainotustermi

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 askeläänitasoluvuista ei kuitenkaan voida päätellä, millaisia äänenpainetasoja rakennuksessa tapahtuvasta toiminnasta syntyy: esimerkiksi kävely ja askeläänikoje tuottavat taajuusjakaumaltaan ja voimakkuudeltaan erilaiset äänenpainetasot ja ero riippuu lattian rakennetyypistä (kuva 4.4).



Kuva 4.4. Mitatut askeläänikojeen askeläänitasot (L'_n) sekä äänitasot ($L_{A,F,max}$) kävelystä eri jalkineilla kahden eri välipohjan pintarakenteen tapauksissa (Kylliäinen et al. 2017).

Kävelyn ja kojeen tuottamien äänenpainetasojen eron lisäksi kuvasta 4.4 nähdään muitakin rakenteen akustiseen toimintaan liittyviä seikkoja. Kuvan rakenteen 4.4A lattian pintarakenteen ominaistaajuus eli taajuus, jolla rakenne herkimmin värähtelee, on noin 80 Hz. Sen yläpuolella kojeen aiheuttamat askeläänitasot alenevat jyrkästi. Standardin mukaisesta mittauksesta voidaan siten päätellä rakenteen akustisen toiminnan periaate. Myös kävely herättää lattian pintarakenteen ominaistaajuuden. Sitä vastoin rakenteella 4.4B lattianpäällysteen ominaistaajuus on noin 500 Hz, mutta lähinnä kävely kovapohjaisiin kengin herättää sen. Sitä vastoin kävely sukin tuottaa suurimmat äänenpainetasot alle 80 Hz taajuusalueella. (Kylliäinen et al. 2017)

Askeläänikojeen ongelmana on, että sen tuottama äänispektri ei vastaa mitään todellista askeläänilähdettä. Koje onkin aikanaan suunniteltu niin, että sen tuottamat äänenpainetasot ovat voimakkuudeltaan niin suuria, että ne ovat mitattavissa missä tahansa

tilanteessa. Tätä ongelmaa on pyritty ratkaisemaan kehittämällä vaihtoehtoisia äänilähteitä, mutta niidenkään tuottamat äänispektrit eivät kaikissa olosuhteissa vastaa todellisten askeläänilähteiden tuottamia äänispektrejä. Siksi tehokkain tapa muodostaa yhteys askelääneneristävyyden objektiivisten mittaustulosten, askeläänitasojen, ja ihmisen kokeman askelääneneristävyyden välille on saada aikaan mittaluku, joka lasketaan askeläänikojeella tuotetuista äänenpainetasoista niin, että se vastaa mahdollisimman hyvin koetua askelääneneristystä. (Kylliäinen 2019)

Askeläänitasoja on mitattu pitkään 100 Hz keskitaajuudesta ylöspäin. Kuvan 4.4 esimerkki kuitenkin osoittaa, että alle 100 Hz taajuusalueella voi olla paljon askelääntä. Askelääneneritasolukujen laskennan esittämissä standardeissa on ensimmäisen kerran vuonna 1996 esitetty spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$, joka laajentaa mitattavan taajuusalueen 50 Hz saakka. Suomen vaatimukset askelääneneristävyydelle esitetään standardisoidujen askeläänitasolukujen ja spektripainotusermin summana $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ (YMa 796/2017, YMo 2018). Spektripainotusermi lasketaan taajuuskaistoilla 50–2500 Hz mitatuista tai lasketuista askeläänitasoista $L'_{nT,i}$ (ISO 717-2:2013):

$$C_{1,50-2500} = 10 \lg \sum_{i=50}^{2500} 10^{L'_{nT,i}/10} - 15 - L'_{nT,w} \quad (4.3)$$

Spektripainotusermin negatiivinen arvo tarkoittaa sitä, että askeläänispektrissä yleensä on suuria askeläänitasoja suurilla taajuuksilla. Negatiivisia arvoja ei kuitenkaan oteta huomioon verrattaessa mitattuja askeläänitasolukuja sallittuihin arvoihin (YMo 2018). Jos askeläänispektri suunnilleen seuraa askeläänitasoluvun laskennassa käytettävän vertailukäyrän muotoa, spektripainotusermin arvo on nolla tai lähellä sitä. Spektripainotusermin positiivinen arvo tarkoittaa useimmiten sitä, että askeläänispektrissä on suuria askeläänitasoja alle 100 Hz taajuuksilla. Spektripainotusermin arvo voi ylittää 10 dB (Kempainen & Kylliäinen 2017), joten se muuttaa merkittävästi välipohjarakenteiden järjestyksen verrattuna aiemmin käytettyihin mittalukuihin, jotka perustuivat taajuusalueeseen 100–3150 Hz. Taulukossa 4.2 on esitetty kuvan 4.4. välipohjarakenteiden askeläänitasoluvut ilman spektripainotusermiä ja sen kanssa. Tässä tapauksessa välipohjien mittalukujen ero pienenee 8 desibelistä 4 desibeliin.

Taulukko 4.2. Kuvan 4.4 välipohjarakenteiden askeläänitasoluvut.

Rakenne	Lattian pintarakenne	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ [dB]
4.4.A	Kelluva lattia	48	53
4.4.B	Lautaparketti	56	57

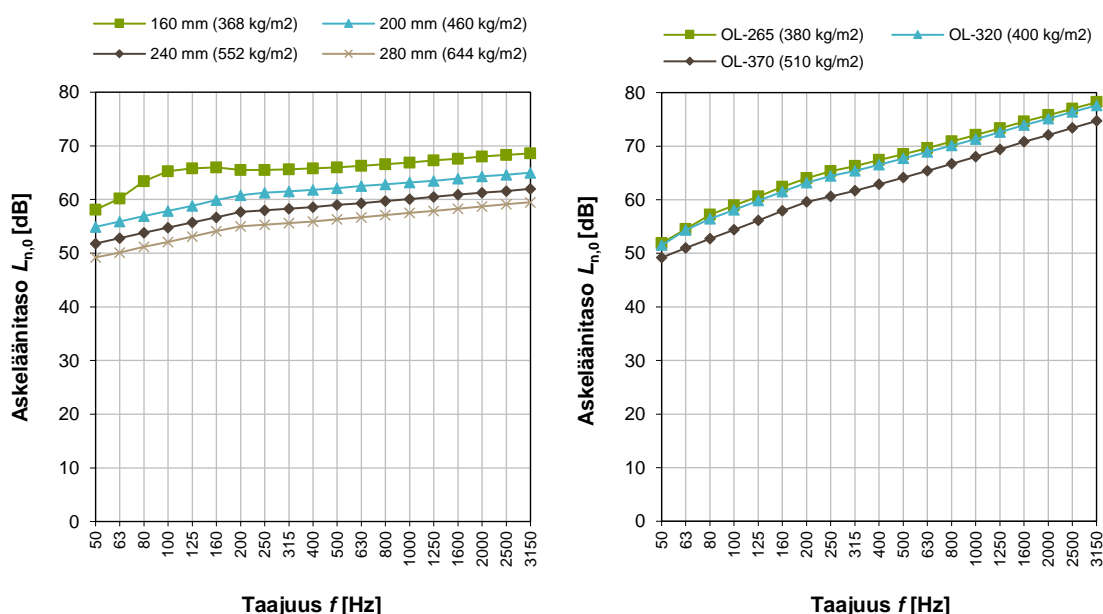
Kuuntelukokeilla on todettu, että Suomessa askelääneneristävyyden mittalukuna käytettävä $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ parantaa mittaluvun yhteyttä askelääneneristävyyden subjektiiviseen kokemiseen (Kylliäinen et al. 2017). Koska tämä mittaluku on esitetty kansainvälisissä standardeissa, se on sisällytetty Suomen kansallisiin määräyksiin. On kuitenkin löydettävissä uusia askeläänikojeen käyttöön edelleen perustuvia mittalukuja, joilla on askeläänitasoluvun ja spektripainotusermin summaa parempi yhteys kokemukseen askelääneneristävyydestä (Kylliäinen 2019, Kylliäinen et al. 2019).

Suomen säädöksissä ja ohjeissa määräykset askelääneneristävydestä tilojen välille on annettu suurimpina sallittuina askeläänitasolukuina $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$. Ympäristöministeriön ääniympäristöasetuksessa 796/2017 ja ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) sekä standardissa SFS 5907:2022 on annettu suurimpia sallittuja askeläänitasolukuja erilaisten tilojen välille. Esimerkiksi suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ asuinhuoneesta toisen asuinhuoneiston asuinhuoneeseen on 53 dB.

4.2 Välipohjien askelääneneristys

4.2.1 Raakavälipohja

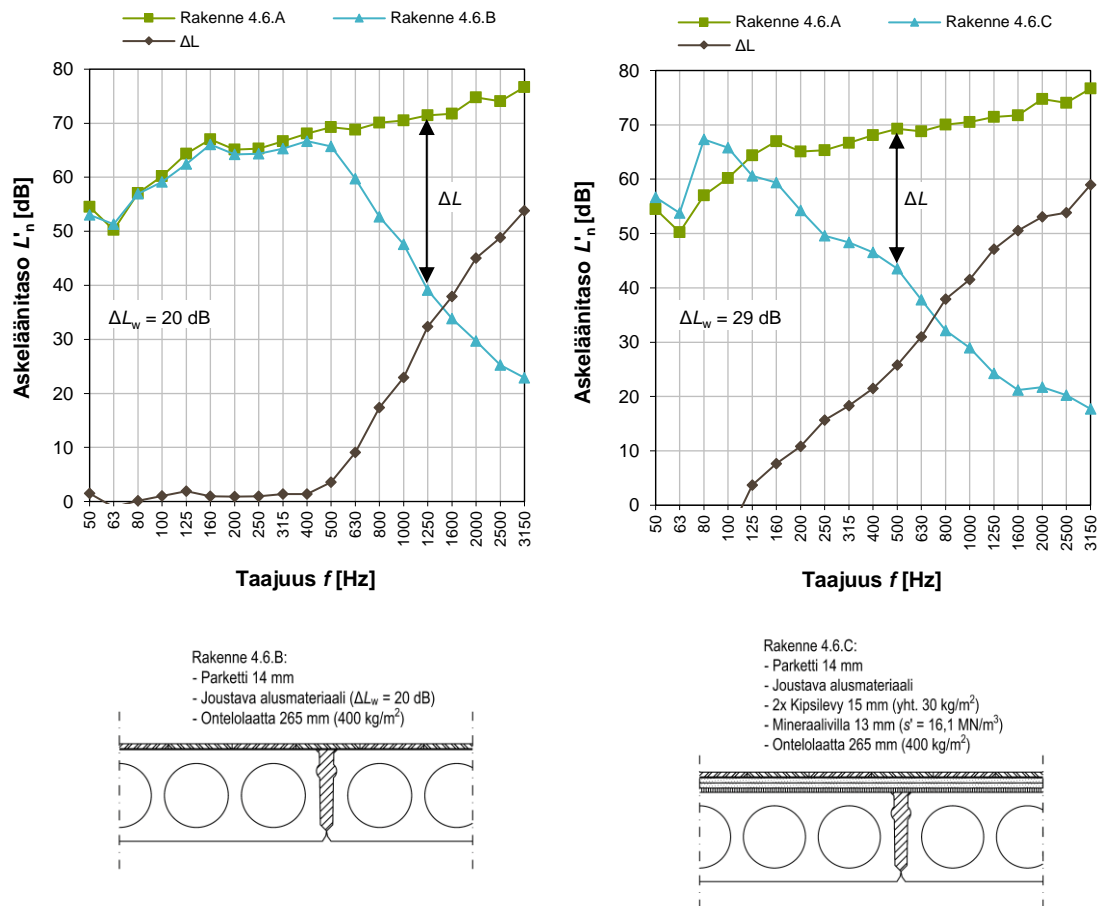
Välipohjan askelääneneristävyydelle luovat perustan päällystämättömän eli ns. raakavälipohjan ominaisuudet. Kivirakenteisilla välipohjilla ratkaiseva tekijä on välipohjan massa kuten yksinkertaisilla rakennusosilla ilmaääneneristävyydessäkin. Kuvassa 4.5 on esitetty päällystämättömien paikallavalettujen betonivälipohjien ja ontelolaatastojen laskettuja askeläänitasoja. Kuvasta nähdään, että massiivisen betonivälipohjan paksuuden kasvattaminen 160 mm:stä 280 mm:iin alentaa askeläänitasoja noin 10 dB koko taajuusalueella.



Kuva 4.5. Raakavälipohjien eli päällystämättömien massiivibetonivälipohjien (vas.) ja ontelolaatastojen (oik.) laskettuja askeläänitasoja.

4.2.2 Askelääneneristävyyden parannusluku

Erilaisten lattianpäällysteiden askelääneneristyskyky voidaan ilmoittaa askelääneneristysmittauksiin perustuvina tunnuslukuina standardin ISO 717-2 (2013). Tunnusluvut perustuvat siihen, että massiivisen betonisen välipohjalaatan normalisoidut askeläänitasot mitataan päällystettynä ja päällystämättöminä, yleensä laboratoriossa Mittaustulosten erotuksena saadaan askeläänitasojen alenemat ΔL [dB] kolmannesoktaavikaistoittain (kuva 4.6). Lattianpäällyste on sitä parempi, mitä suurempia sen tuottamat askeläänitasojen alenemat ovat.



Kuva 4.6. Ontelolaattavälipohjan mitatut askeläänitasot ilman pintarakennetta sekä kahdella eri pintarakenteella (Kylliäinen et al. 2015). Kuvaajissa on esitetty myös askelääneneristävyyden parannuslukujen määräytyminen pintarakenteille. Rakenne 4.6.A on päällystämätön 265 mm paksu ontelolaatasto (400 kg/m³).

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

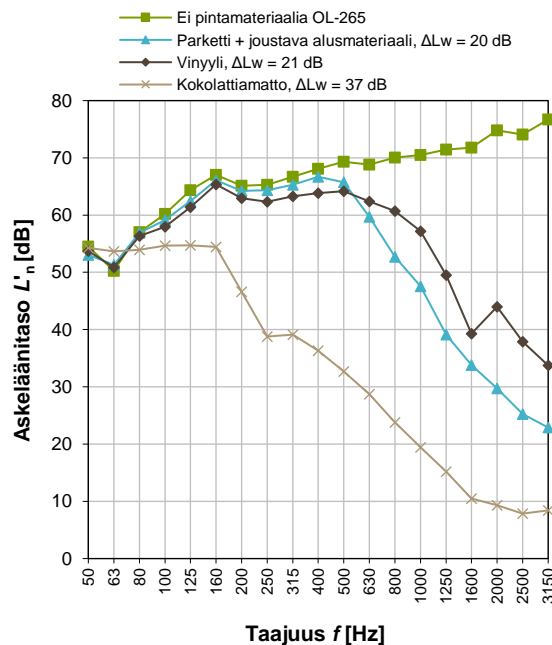
$$\Delta L_w = L_{n,eq,0,w} - L_{n,w} \quad (4.4)$$

Standardi ISO 717-2 (2013) antaa nykyisin mahdollisuuden myös ilmoittaa lattianpäällysteiden askelääneneristävyyden parannusluvut puuvälipohjille. Näitä arvoja lattianpäällysteiden toimittajat eivät toistaiseksi ole juuri mitanneet eikä niitä ole tuotteista siten

yleensä saatavilla. Tutkimustietoa lattianpäällysteiden toiminnasta puuvälipohjilla sitä vastoin on jonkin verran olemassa (Lietzén et al. 2021, Lietzén et al. 2022b).

4.2.3 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 askelääneneristuksen parantamiseksi eli askelista ja muista vastaavista äänistä syntyvien äänitasojen alentamiseksi on rakenteeseen kohdistuvien iskujen vaimentaminen pehmeillä lattianpäällysteillä (kuva 4.7). Kuvan 4.7 välipohjien askeläänitasoluvut on esitetty taulukossa 4.3.



Kuva 4.7. Ontelolaattavälipohjan mitatut askeläänitasot eri pintarakenteilla (Kylliäinen et al. 2015).

Taulukko 4.3. Kuvan 4.7 välipohjarakenteiden askeläänitasoluvut.

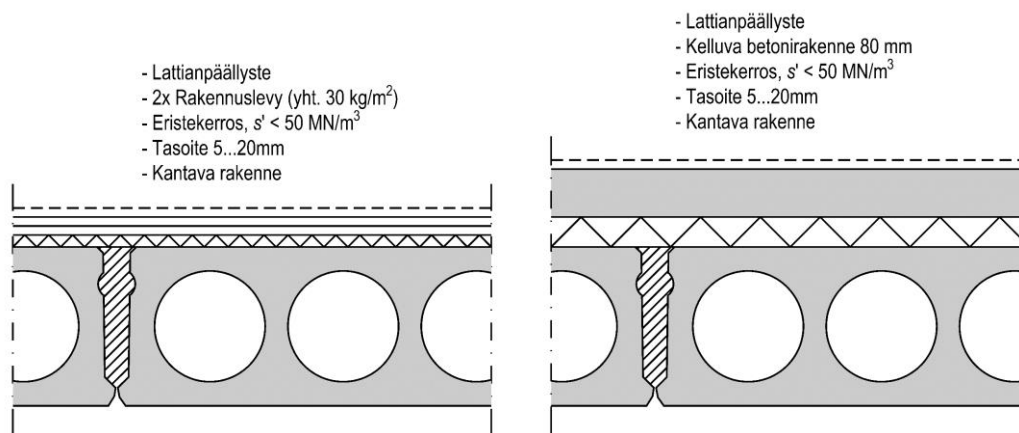
Lattian pintarakenne	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ [dB]
Ei pintamateriaalia	77	77
Parketti + joustava alusmateriaali, $\Delta L_w = 20$ dB	57	56
Vinyyli, $\Delta L_w = 21$ dB	56	55
Kokolattiamatto, $\Delta L_w = 37$ dB	40	44

Pehmeiksi lattianpäällysteiksi luetaan pehmeät muovimatot sekä lautaparketit lamiinaatit 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 saman-

muotoiseen äänispektriin. Asuinrakennuksissa asuinhuoneiden lattianpäällysteinä käytettävien pehmeiden muovimattojen askelääneneristävyyden parannusluvut ovat yleensä noin 17–21 dB. Lautaparkettien askelääneneristävyyden parannusluvut ovat 17–20 dB käytettäessä yleisiä joustavia alusmateriaaleja. Porrashuoneisiin tarkoitettujen lattianpäällysteiden askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w ovat yleensä 6–14 dB. Pehmeisiin lattianpäällysteisiin perustuvia välipohjaratkaisuja suunniteltaessa pitää käyttää vain sellaisia lattianpäällysteitä, joiden parannusluvut tunnetaan.

4.2.4 Kelluvat lattiat

Kelluvassa lattiassa on pehmeä eristekerros sekä sen päälle tehtävä rakenne, joka voi olla rakennuslevy, pumpattava tasoite tai paikalla valettava betonilaatta (kuva 4.8). Asuinrakennusten askelääneneristysvaatimukset edellyttävät kelluvan lattian käyttöä massiivisen välipohjarakenteen päällä, jos lattianpäällysteenä on alustaansa liimattava parketti, luonnonkivi, keraaminen laatta tai vastaava kova pinnoite. Kelluvia lattioita ovat myös yleisesti käytettävät lämpölattiat. Kelluvia lattioita käytetään riittävän askelääneneristyksen saavuttamiseksi myös sijoitettaessa asuinrakennuksiin meluisia tiloja tai tavoiteltaessa askelääneneristyksen lisäksi hyvää ilmasteneristystä, kuten teattereissa, elokuvateattereissa, studioissa, äänitarkkaamoissa ja koulujen musiikkiluokissa.



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

Kelluvan lattian eristekerroksena voi olla mineraalivilla, elastisoitu polystyreeni tai tärinäneristimet, 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/m^2] ja eristekerroksen dynaamisesta jäykkyydestä s' [MN/m^3]. Ominaisuuteen vaikuttaa myös kantavan rakenteen massa ja jäykkyys. Tosiasiallisesti kantava rakenne ja kelluva rakenne muodostavat kaksinkertaisen rakenteen, mutta kantavan betonivälipohjan massa ja

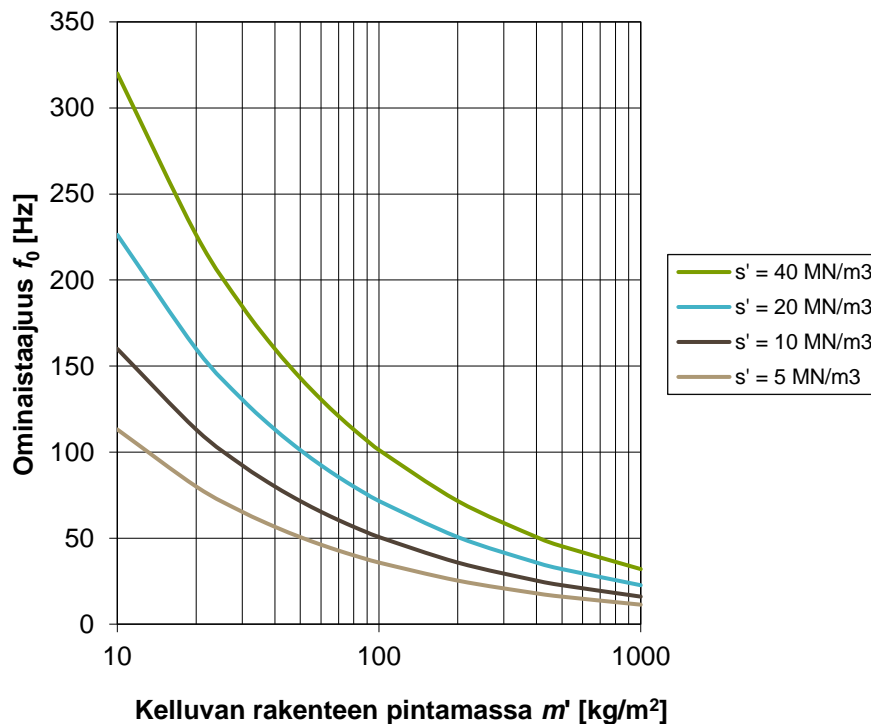
jäykkyys ovat yleensä niin suuria, että kelluvaa rakennetta on yleensä mahdollista tarkastella yksinkertaisena rakenteena. Sen ominaistajuus on

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

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:

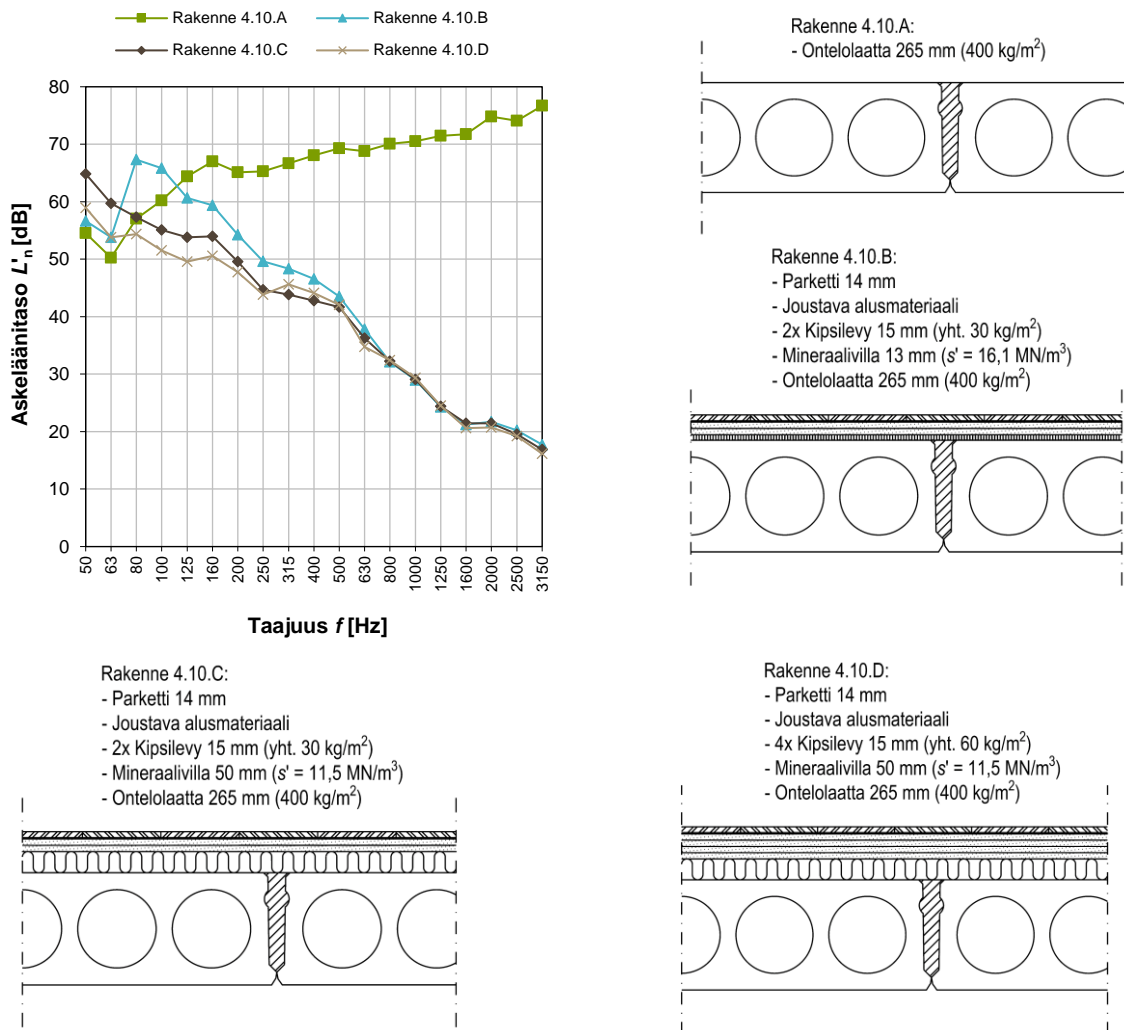
$$s' = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i}} \quad (4.7)$$

Kelluva lattia toimii akustisesti sitä paremmin, mitä alhaisempi ominaistajuus on. Ominaisajuutta 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 mieluiten selvästi alle 50 Hz, jotta kelluvan rakenteen askelääneneristyskyky olisi asukkaista subjektiivisesti hyväksyttävissä (Kylläinen 2019).



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

Kuvassa 4.10 on esitetty levyrakenteisten kelluvien lattioiden mitattuja askeläänitasoja. Vastaavien välipohjarakenteiden askeläänitasoluvut on esitetty taulukossa 4.4. Kuvasta nähdään kelluvan lattian ominaistajuuden siirtyminen pienemmille taajuuksille, kun eristekerroksen dynaaminen jäykkyys pienenee ja kelluvan kerroksen pintamassa kasvaa. Askelääneneristävyuden yksilukuarvot vastaavasti pienenevät ominaistajuuden laskiessa (taulukko 4.4). Kuvasta 4.10 nähdään myös, että ominaistajuusalueella kelluvien lattioiden tuottamat askeläänitasot ovat suurempia kuin raakavälipohjan tuottamat. Kuvan tapauksessa ne ovat enimmillään 10 dB raakavälipohjalla saatuja suurempia.



Kuva 4.10. Kelluvan pintarakenteen massan ja eristekerroksen jäykkyyden vaikutus ontelolaattavälipohjan mitatuille askeläänitasoille (Kylliäinen et al. 2015).

Taulukko 4.4. Kuvan 4.10 välipohjarakenteiden askeläänitasoluvut.

Rakenne	Kelluvan lattian ominaistajuus f_0 [Hz]	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ [dB]
Rakenne 4.10.A	–	77	77
Rakenne 4.10.B	n. 80 Hz	48	53
Rakenne 4.10.C	n. 50 Hz	41	50
Rakenne 4.10.D	n. 30 Hz	39	45

Kelluvia lattioita 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 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 eristetilan kuivatusmahdollisuuksia rakennusaikana mahdollisesti sattuvan vesivahingon aikana. (Hietala 2001)

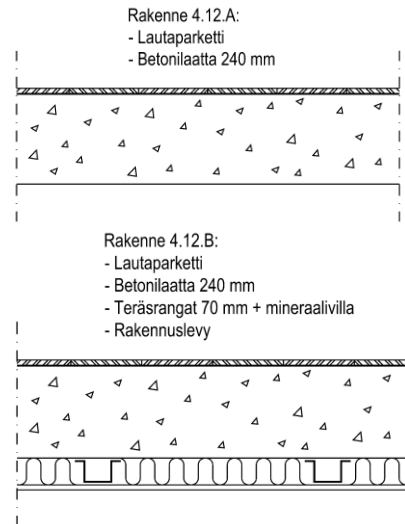
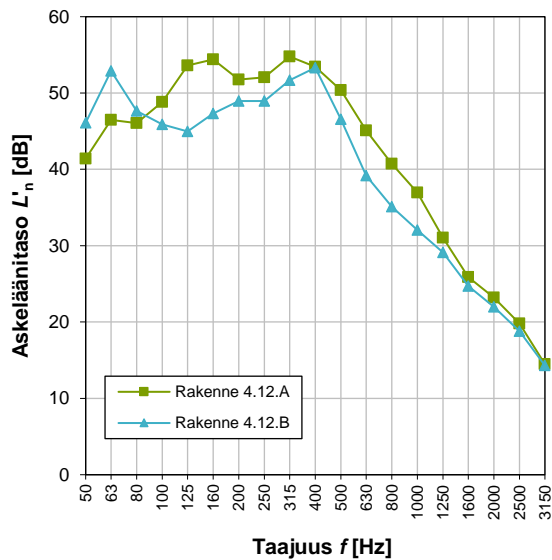
Massiivisten kantavien rakenteiden päälle sijoitettavien päällystämättömien kelluvien lattioiden tuottamat askelääneneristävyyden parannusluvut ΔL_w ovat yleensä suurempia kuin 25 dB. Kelluvan lattian päällystäminen lattianpäällysteellä vaikuttaa askeläänitasoihin paljon vähemmän kuin lattianpäällysteen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

4.2.5 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 tekeillä seinistä kaksinkertaisia rakenteita.

Alakattolevytyksenä käytetään rakennuslevyjä, joiden massa yleensä on vähintään 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, kun tavoitellaan hyvää ääneneristystä.

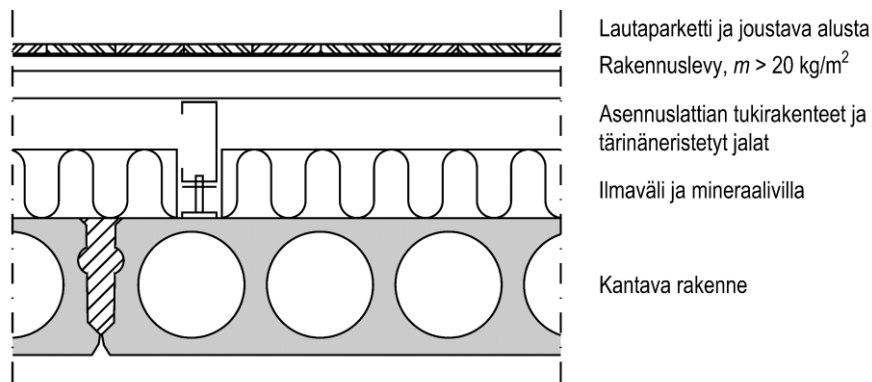
Betonirakenteisessa asuinkerrostalossa alakatosta ei kannata tehdä liian hyvin eristävää, sillä sivutiesiirtymän vuoksi alakatto alentaa askeläänitasoja yleensä enintään noin 3–5 dB (kuva 4.11). Sitä vastoin korjausrakentamisessa, kun kantavan betonirakenteen massa usein on pieni, ääntä eristävien alakattojen merkitys voi olla hyvin suuri riittävän askelääneneristävyyden saavuttamiseksi. Puuvälipohjien askelääneneristävyyden toteuttamisessa alakatto on yksi ratkaisevimmista osatekijöistä (Latvanne & Kylliäinen 2017).



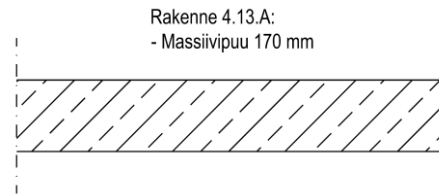
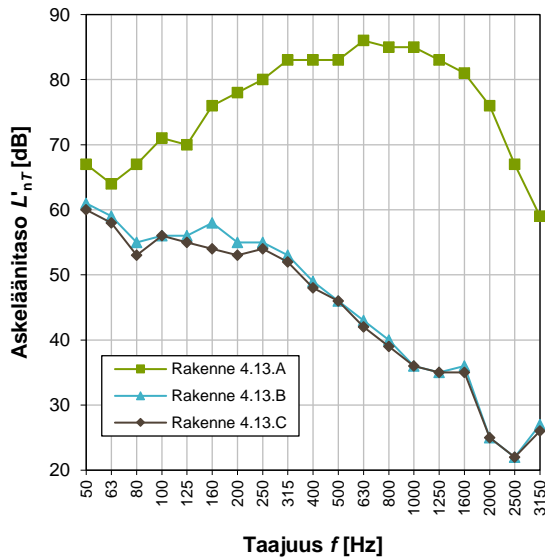
Kuva 4.11. Alakaton vaikutus lautaparketilla päällystetyn 240 mm paksun betonilaatan askeläänitasoihin. Pienillä taajuuksilla alakatto voi johtaa askeläänitasojen kohoamiseen, koska alakaton levytyksen ja ilmavälin sekä kantavan rakenteen muodostaman kaksinkertaisen rakenteen ominaistaajuus f_{mam} on rakenteesta ja ripustustavasta riippuen yleensä alle 200 Hz (Kylliäinen 2006).

4.2.6 Asennuslattiat

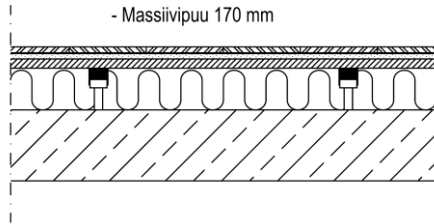
Asennuslattiat (kuva 4.12) mahdollistavat rakennusten LVIS-asennusten tekemisen lattian pintarakenteen ja välipohjan kantavan rakenteen välissä olevaan ilmatilaan. Tällöin LVIS-tekniikan huolto ja korjaaminen helpottuvat ja rakennuksen muuntojoustavuus myös paranee. Asennuslattian askelääneneristys perustuu sen pintarakenteen massaan, pintarakenteen ja kantavan rakenteen välissä olevan ilmavälin korkeuteen ja pintarakennetta kantavien tukirakenteiden erottamiseen kantavasta rakenteesta joustavasti esimerkiksi tärinäneristimin. Kuvassa 4.13 on esitetty massiivipuisen kantavan rakenteen päälle tehdyillä asennuslattioilla saavutettavia askeläänitasoja. Vastaavat askeläänitasot on esitetty taulukossa 4.5.



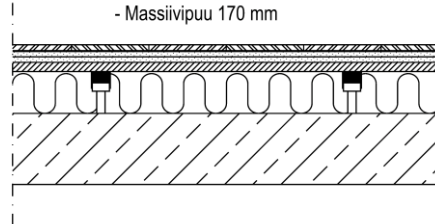
Kuva 4.12. Asennuslattian rakenneperiaate.



- Rakenne 4.13.B:
- Parketti 14 mm
 - Joustava alusmateriaali 2 mm
 - Normaali kipsilevy 13 mm
 - Lattialastulevy 22 mm
 - Asennuslattiajärjestelmä 100 mm, ilmavälissä mineraalivilla 95 mm
 - Massiivipuu 170 mm



- Rakenne 4.13.C:
- Parketti 14 mm
 - Joustava alusmateriaali 2 mm
 - Lattiakipsilevy 13 mm
 - Normaali kipsilevy 13 mm
 - Lattialastulevy 22 mm
 - Asennuslattiajärjestelmä 100 mm, ilmavälissä mineraalivilla 95 mm
 - Massiivipuu 170 mm



Kuva 4.13. Asennuslattian vaikutus massiivipuisen välipohjan mitattuihin askeläänitasoihin. Kuvälähde: Granab.

Taulukko 4.5. Kuvan 4.13 välipohjarakenteiden askeläänitasoluvut.

Rakenne	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ [dB]
Rakenne 4.13.A	83	83
Rakenne 4.13.B	48	52
Rakenne 4.13.C	47	50

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 ilmavälistä.

Luvun 4 lähteet

Hietala, J. 2001. Kelluvan betonilaatan kaareutuminen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, talonrakennustekniikan laboratorio, tutkimusraportti 108.

- ISO 12354-2. 2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms.
- ISO 16283-2. 2020. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.
- ISO 717-2. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.
- Kemppainen, J. & Kylliäinen, M. 2017. Spektripainotustermin $C_{1,50-2500}$ vaikutus askelääneneristävyyden arviointiin. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 129–134.
- Kovalainen, V. & Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2019. Kelluvien laattojen askelääneneristävyyden analyttinen laskenta. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 33–40.
- Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetekniikan laitos, tutkimusraportti 137.
- Kylliäinen, M. 2014. The measurement uncertainty of single-number quantities for rating the impact sound insulation of concrete floors. *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 100(4), s. 640–648.
- Kylliäinen, M. 2019. Rating the impact sound insulation of concrete floors with single-number quantities based on a psychoacoustic experiment. Väitöskirja. Tampere, Tampere University Dissertations 93.
- Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D. & Rekola, J. 2017. Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings. *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 103(2), s. 236–251.
- Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V. & Hongisto, V. 2015. Correlation between single-number quantities of impact sound insulation and noise ratings of walking on concrete floors. *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 101(5), s. 975–985.
- Kylliäinen, M., Lietzén, J. & Kovalainen, V. 2021. Puurakenteiden ääneneristävyyden nykyaikaiset laskentamenetelmät. *Rakennusfysiikka 2021*. Tampere, 26.–28.10., Tampereen yliopisto ja Kiinko Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy, s. 471–476.
- Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D. & Hongisto, V. 2016. Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings. *Applied Acoustics*. Vol. 102., s. 12–18.
- Kylliäinen, M., Virjonen, P. & Hongisto, V. 2019. Optimized reference spectrum for rating the impact sound insulation of concrete floors. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 145(1), s. 407–416.
- Latvanne, P. & Kylliäinen, M. 2017. Puuvälipohjien askelääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 117–122.
- Latvanne, P. & Kylliäinen, M. 2019. Puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskennallinen arviointi. *Puu*. Nro 3, s. 42–50.
- Latvanne, P., Kylliäinen, M., Kovalainen, V. & Lietzén, J. 2019. Parametrinen laskentamalli puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 55–61.

- Lietzén, J., Kylliäinen, M. & Pajunen, S. 2021. Lattianpäällysteiden toiminta puuvälipohjilla. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 66–71.
- Lietzén, J., Kylliäinen, M. & Takala, J. 2016. Justification of standardized impact sound pressure levels in rating of impact sound insulation of floors. Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016. Hamburg, August 21th–24th, paper no. 226.
- Lietzén, J., Kylliäinen, M., Valjakka, S. & Pajunen, S. 2022a. Vibration level reduction by floor coverings installed on wooden slabs. *Building Acoustics*, Vol. 29(2), s. 221–237.
- Lietzén, J., Sormunen, J. & Pajunen, S. & Kylliäinen, M. 2022b. Simulation of impact force generated by an ISO tapping machine on a wooden slab using explicit dynamics analysis. *Engineering Structures*, Vol. 270, article 114855.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

5

Huoneakustiikka

”Katson voivani väittää, että huoneakustiikan alalla ollaan nykyisin jo siksi selvällä pohjalla, että suurin piirtein katsoen hyvä akustiikka varmuudella jo on järjestettävissä uusiin huoneustoihin ja että myös vanhat epäonnistuneet tulokset voidaan korjata. Suurinta vaikeutta tuottavat vielä äänen laatuun kohdistuvat hienoimmat vivahteukset.”

Diplomi-insinööri Jaakko Packalén 1931

5.1 Huoneakustiikan merkitys

5.1.1 Huoneakustiikan suunnittelun tavoitteet

Huoneakustiikan tarkoituksena on hallita äänen leviämistä, heijastumista, siroamista 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, jolloin puheäänen voimakkuus on riittävä. 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.

5.1.2 Huoneakustiikka ja tilan käyttötarkoitus

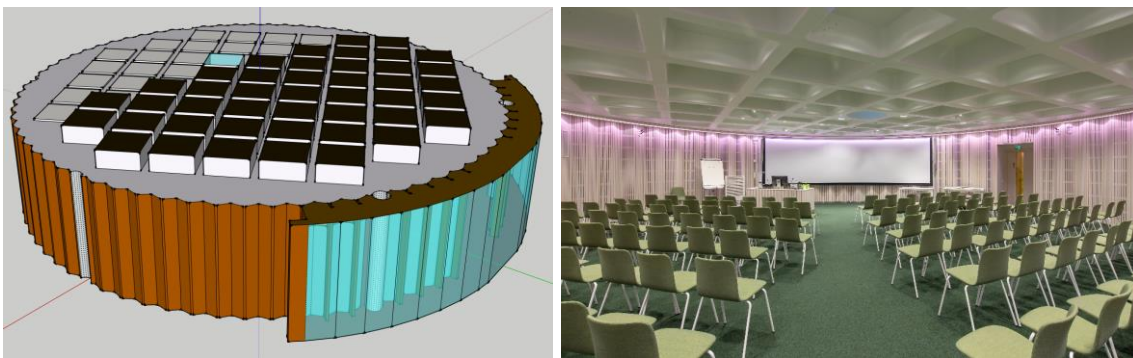
Huoneakustista suunnittelua tarvitaan monenlaisissa tiloissa puhe- tai musiikkitulojen lisäksi. Siten huoneakustisella suunnittelulla on monenlaisia tavoitteita: sen avulla voidaan pyrkiä mahdollisimman hyvään puheen selvyyteen ja kuuluvuuteen, mutta toisissa kohteissa puheäänen äänitaso pyritään saamaan 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 elokuvan tekijät ovat sen suunnitelleet. Salin kaiunnan pitää vaikuttaa toistettuun ääneen mahdollisimman vähän. Siksi jälkikaiunta-ajat nykyaikaisissa elokuvateattereissa ovat lyhyitä ja käytännössä salin kaikki pinnat ovat voimakkaasti absorboivia (Riionheimo & Lokki 2021, Sereda 2022). Katsoja aistii lähinnä suoraan kaiuttamista tulevaa ääntä, sillä heijastukset absorboivista pinnoista ovat vähäisiä.
- konserttisalissa jälkikaiunta-ajan tulee olla melko pitkä. Koska yleisön alue on voimakkaasti absorboiva, kaikkien muiden pintojen tulee olla kovia ja heijasta-

via. Musiikin kokemisen ja tilantunnon kannalta tärkeitä ovat suoran äänen lisäksi varhaiset heijastukset erityisesti sivusuunnasta. (Beranek 2004, Barron 2010)

- 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. (YMa 796/2017, YMo 2018)
- 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 taustäänänen tai keinotekoisen peittoäänänen äänenpainetaso on yli 40 dB. Tällöin se peittää viereisestä työpisteestä tulevaa puheääntä. (Kylliäinen & Hongisto 2019)
- teollisuushallissa voi olla runsaasti äänekkäitä koneita, joiden synnyttämä äänitaso voi aiheuttaa kuulovaurioriskin. Tilan äänitasa saadaan alennetuksi järjestämällä sinne suuri absorptioala. Tällöin huoneakustiikan keinoja käytetään melun torjuntaan. (SFS 5907:2022)

Huoneakustisen suunnittelun lähtökohtana on edellä olevan perusteella tilan käyttötarkoitus. Vuonna 1931 Jaakko Packalén, yksi Suomen ensimmäisistä akustiikkasuunnittelijoista, totesi, että ”huoneen suunnittelussa akustisessa suhteessa on huomattava kolme päätekijää: muoto, suuruus ja ääripintojen rakennusaineet”. Huoneakustiikan suunnittelun osa-alueita ovat nykyäänkin tilan tilavuuden ja muodon valinta, heijastavien pintojen suunnittelu, tarvittavan absorptioalan määrittäminen ja mahdollisten ääntä sirottavien pintojen suunnittelu (kuva 5.1), joille kaikille voidaan johtaa tavoitteet tilan käyttötarkoituksesta.



Kuva 5.1. Pyöreää muotoa ei yleensä pidetä parhaana mahdollisena puhesalin tai muunkaan esiintymistilan muotona. Tampereen pääkirjasto Metson peruskorjauksen yhteydessä kirjastoon toteutettiin uusi kokouskeskus, jossa on muodoltaan pyöreä auditorio. Pyöreässä tilassa ongelmaksi helposti muodostuvat kiertävät kaikuilmiöt ja äänen keskittymät estettiin rikkomalla pyöreät pinnanmuodot ääntä absorboivilla ja sirottavilla materiaaleilla. Kuvassa on esitetty huoneakustista mallinnusta varten tehty tilamalli sekä valokuva tilasta valmiina. (Mikkilä et al. 2019)

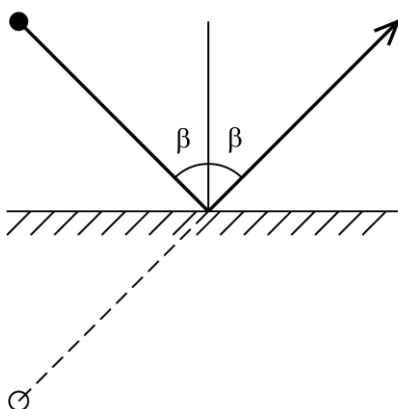
Huoneakustiikan suunnittelulle on akustiikkaa koskevassa kirjallisuudessa esitetty lukuisia kriteereitä. Useimmat niistä ovat matemaattisesti monimutkaisia (Beranek 2004, Barron 2010) ja edellyttävät käytännössä huoneakustisten mallinnusohjelmien käyttöä (ks. luku 11). Niitä käytetään erityisesti vaativimpien tilojen, kuten konserttisalien, monitoimisalun, puhe- ja musiikkiteatterien, konferenssisalien ja suuren luentosalien suunnittelussa. Kaikkien näiden tilojen sekä jokapäiväisissä rakennushankkeissa suunniteltavien tilojen suunnittelussa yhtenä kriteerinä on jälkikaiunta-aika T . Toinen yleisesti nykyisin käytössä oleva huoneakustiikan mittaluku on puheensiirtoindeksi STI.

Käyttötarkoitukseltaan erilaisia tiloja on lukematon määrä eikä kaikkia varten voida antaa tarkkoja ohjeita. Standardin SFS 5907 toinen painos (2022) kuitenkin kattaa varsin laajan otoksen erilaisia rakennus- ja tilatyyppejä. Toisaalta toimiva tila voidaan toteuttaa monella vaihtoehtoisella tavalla.

5.2 Huoneakustiikan lähtökohdat

5.2.1 Äänikentän rakentuminen tilassa

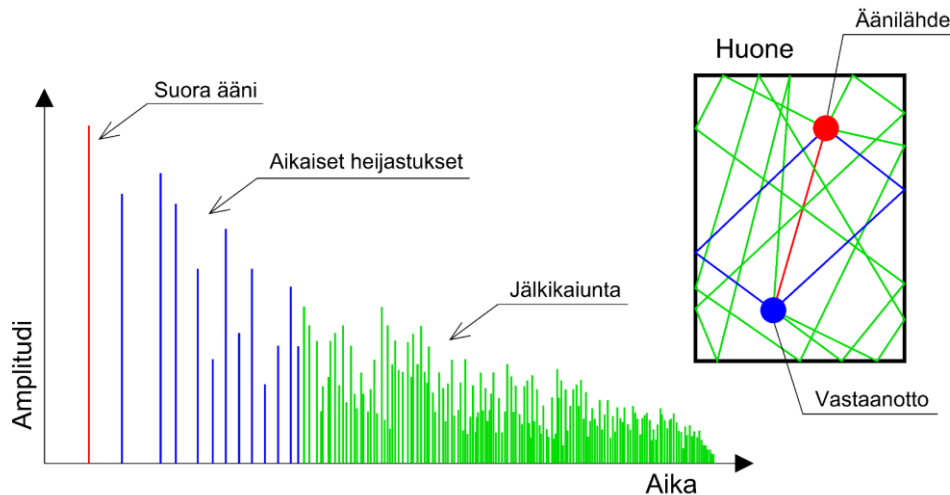
Suljetussa huonetilassa suurin osa äänienergiasta, joka havaitaan kuuloaistimuksena, on heijastunut huoneen seinä-, katto- ja lattiapinnoista. Kun äänilähde sammutetaan suuressa konserttisalissa, kuulija aistii noin sekunnin kuluttua siitä ääntä, joka on heijastunut noin 20 kertaa. Heijastusten määrä yhden sekunnin kuluessa on noin 8000 (Barron 2010). Ääni heijastuu tietyissä olosuhteissa samalla tavalla kuin valo: kulma, jolla ääniaalto kohtaa pinnan, on yhtä suuri kuin kulma, jolla se heijastuu pinnasta pois (kuva 5.2).



Kuva 5.2. Ääni heijastuu pinnasta samalla tavalla kuin valo, kun heijastavan pinnan pinta-ala on suuri verrattuna äänen aallonpituuteen.

Heijastuessaan pinnasta ääniaalto menettää energiastaan osan, joka absorboituu (luku 2.2). Koska heijastuneen äänen kulkema matka on pidempi kuin äänilähteestä suoraan kuulijalle kulkeneen äänen kulkema reitti, heijastuneen äänen äänenpainetaso on alhaisempi kuin suoran äänen (kuva 5.3). Heijastusten määrä on kuitenkin niin suuri, että tarkastelupisteessä havaittavasta äänienergiasta suurin osa syntyy heijastuksista. (Kuttruff 2000)

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 ennustamalla 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.

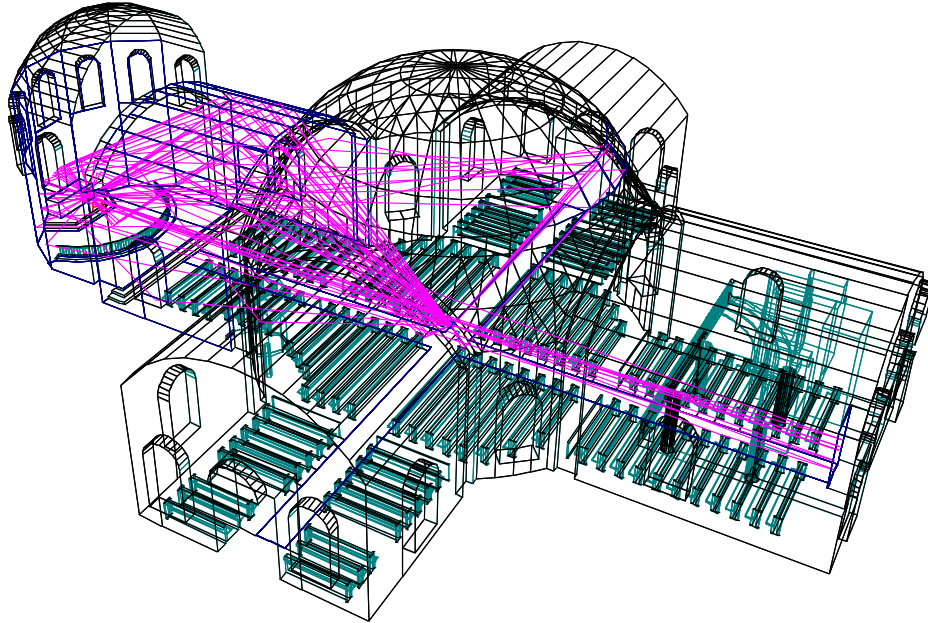


Kuva 5.3. Yksinkertaistettu esimerkki äänen impulssivasteesta huoneessa.

Huoneakustiset mittaluvut (luku 11) perustuvat useimmiten tilan impulssivasteen mittaamiseen. Impulssivaste voidaan yksinkertaisesti demonstroida lyömällä kädet yhteen, minkä synnyttämä ääni vastaa impulssia. Riittävän kaiuntaisessa tilassa havaitaan tämän jälkeen vaimeneva ääni eli vaste. Tilan äänikentän rakentuminen voidaan nähdä myös mitatuista impulssivasteista, josta kuvassa 5.3 on esitetty yksinkertaistettu esimerkki.

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.

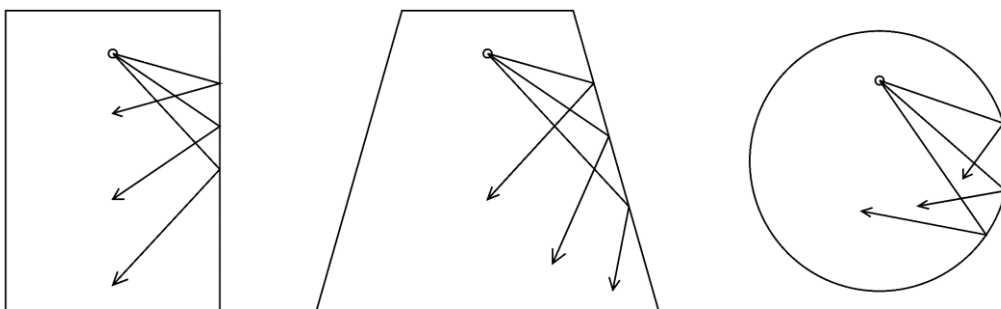
Heijastuksia voidaan ohjata tilan muodolla ja erilaisilla heijastinrakenteilla. Puhe- ja musiikkitiloissa tulee välttää erityisesti tärykaikua, joka syntyy kahden saman-suuntaisen kovan pinnan väliin. Tärykaiku tarkoittaa sitä, että ääni heijastuu useita kertoja peräkkäin vastakkaisista pinnoista, ja se kuullaan monta kertaa eri äänenä (kuva 5.4). 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, kuten elokuvateattereissa.



Kuva 5.4. Kivirakenteisessa 1850-luvulla rakennetussa kirkossa syntyy tärykaiku kuorissa olevan oven ja takaseinän väliin, mikä nähdään huoneakustisessa mallissa heijastuksina kirkkosalin pituussuunnassa (Latvanne 2013).

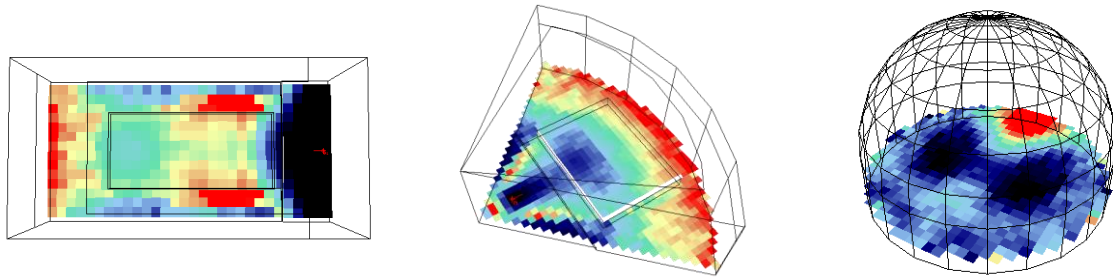
5.2.2 Tilan muoto

Tilan perusmuoto vaikuttaa suuresti siihen, millainen puheen selvyys ja kuuluvuus 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 (Beranek 2004). 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 (kuva 5.5).

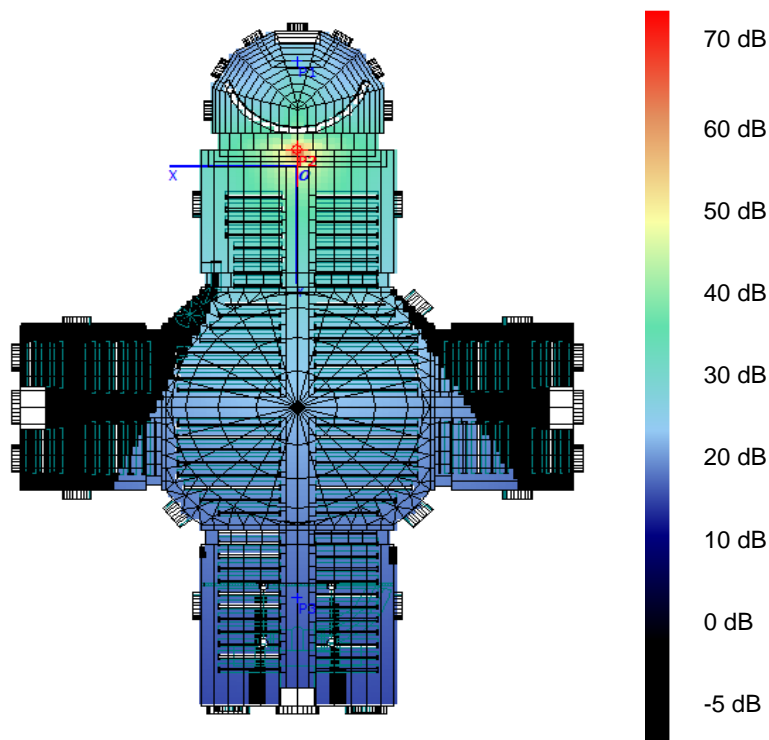


Kuva 5.5. Äänen heijastuminen eri muotoisissa tiloissa.

Tilan vaakaleikkauksen lisäksi on otettava huomioon pystyleikkaus: katon kaltevuus ja sen suunta vaikuttaa huoneakustiikkaan. 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, mutta tämä tekee suunnittelusta vaikeampaa (kuva 5.6). Vaikka tilan perusmuoto olisi valittu oikein, jokin yksityiskohta voi johtaa siihen, että huoneakustiikka on puheen kuuluvuuden ja selvyyden kannalta ongelmallinen (kuva 5.7).



Kuva 5.6. Sivulta tulevan äänienergian määrä eri muotoisissa tiloissa, joiden kaikkien tilavuus on 4000 m^3 ja jälkikaiunta-aika 1,5 s. Suorakaiteen muotoisessa tilassa puhuja on tilan oikeassa päädyssä, viuhkanmuotoisessa terävässä kulmassa ja pyörässä tilassa kehän toisella laidalla. Viuhkanmuotoisessa ja pyöreässä kupolin kattamassa tilassa esiintyy kohtia, joihin äänienergiaa ei saavu juuri lainkaan.

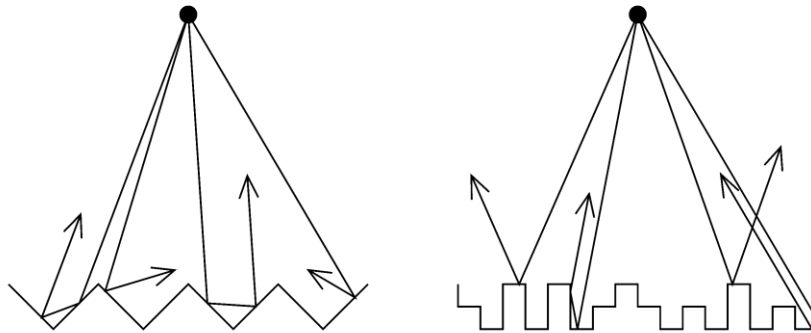


Kuva 5.7. Kivirakenteisessa kirkossa (ks. kuva 5.4) ristosakaroihin ei tule suoraa ääntä lainkaan, mikä tarkoittaa myös sitä, että ristosakaroiden kohdalta ei synny myöskään sivuheijastuksia. Suoran äänen äänenpainetaso laskee etäisyysvaimennuksen johdosta alttarilta kirkon takaosaan siirtyäessä yli 40 dB (Latvanne 2013).

5.2.3 Pinnan muoto ja rakenne

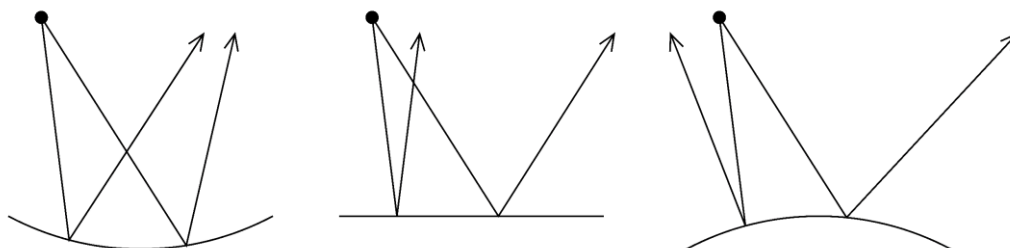
Äänen heijastuminen on erilaista eri taajuuksilla: mitä matalampi äänen taajuus on ja mitä pidempi sen aallonpituus on, sitä suurempi heijastavan pinnan tulee olla, jotta heijastus tapahtuisi. Pieni pinta ei aiheuta juuri minkäänlaista häiriötä matalataajuiseen ääniaaltoon, joka sen kohtaa. Heijastumisen 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 ääntä voidaan sirottaa (kuva 5.8). Pinta sirottaa ääntä laajalla taajuusalueella, kun sen kuviointi ei ole säännöllinen. Tätä ilmiötä voidaan hyödyntää esimerkiksi silloin, kun halutaan välttää haitallinen heijastus, esimerkiksi tärykaiku, mutta absorptioalaa ei voida lisätä (Barron 2010). Ääntä sirottamalla jälkikaiunta-aika laskee, mutta ei yhtä paljon kuin se laskisi lisäämällä absorptiota. Myös tilan kalusteet sirottavat ääntä jossain määrin samalla tavalla kuin rikutut pinnat.



Kuva 5.8. Pinnan rakenne ja karkeus vaikuttaa äänen heijastumiseen.

Kovera muoto on heijastusten kannalta vaikea (kuva 5.9), kun äänilähde sijaitsee lähellä pintaa. Tällöin kovera pinta saa aikaan äänen keskittymistä. Kovera pinta levittää ääntä, kun äänilähde sijaitsee kaukana siitä. Kuperä pinta sitä vastoin toimii aina ääntä levittävänä rakenteena.

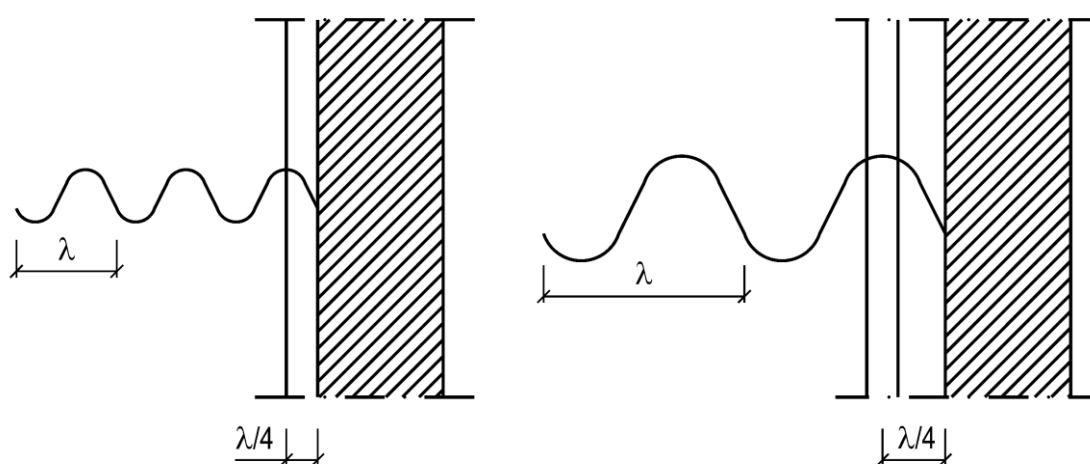


Kuva 5.9. Äänen heijastuminen koverasta, tasaisesta ja kuperasta pinnasta.

5.3 Absorptiomateriaalit

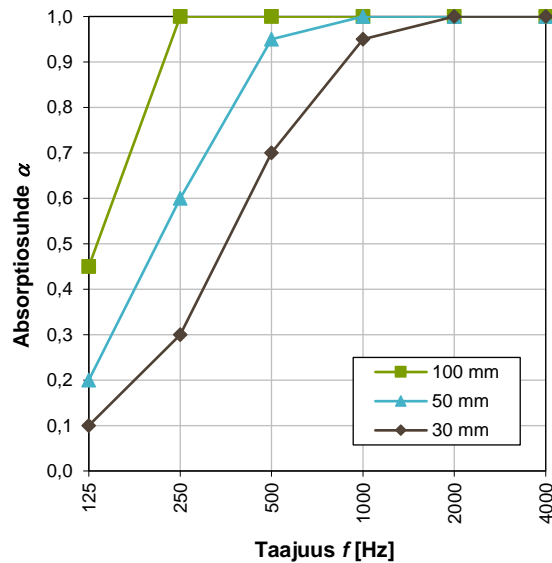
5.3.1 Huokoiset materiaalit

Huokoisten materiaalien, kuten mineraalivillojen, paksujen tekstiilien ja ruiskutteiden 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 5.10). Huokoinen materiaali absorboi tehokkaimmin taajuuksia, joiden aallonpituus on nelinkertainen materiaalin paksuuteen verrattuna (Fasold & Veres 1998): 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. Lisäksi materiaalin tiheyden tulee olla riittävän suuri, jotta absorptiota tapahtuisi. Materiaalin absorptiosuhteet on aina tarkistettava valmistajien luetteloista.



Kuva 5.10. Ohut huokoinen materiaalikerros absorboi tehokkaasti suuria taajuuksia, joiden aallonpituus on lyhyt (vasemmalla). Materiaalin absorptiosuhdetta pienillä taajuuksilla voidaan nostaa jättämällä materiaalin ja seinä- tai kattorakenteen välille ilmarako (oikealla).

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. Absorptiosuhteet ovat pienillä taajuuksilla sitä parempia, mitä paksumpia ainepaksuudet ovat (kuva 5.11). Absorptiosuhdetta voidaan parantaa myös jättämällä huokoisen materiaalin ja sen takana olevan materiaalin väliin ilmarako, jolloin materiaalikerros osuu matalampien äänten aallonpituuden neljänneksen kohdalle (kuva 5.11). Esimerkiksi monet alakattorakenteet toimivat tällä tavalla.



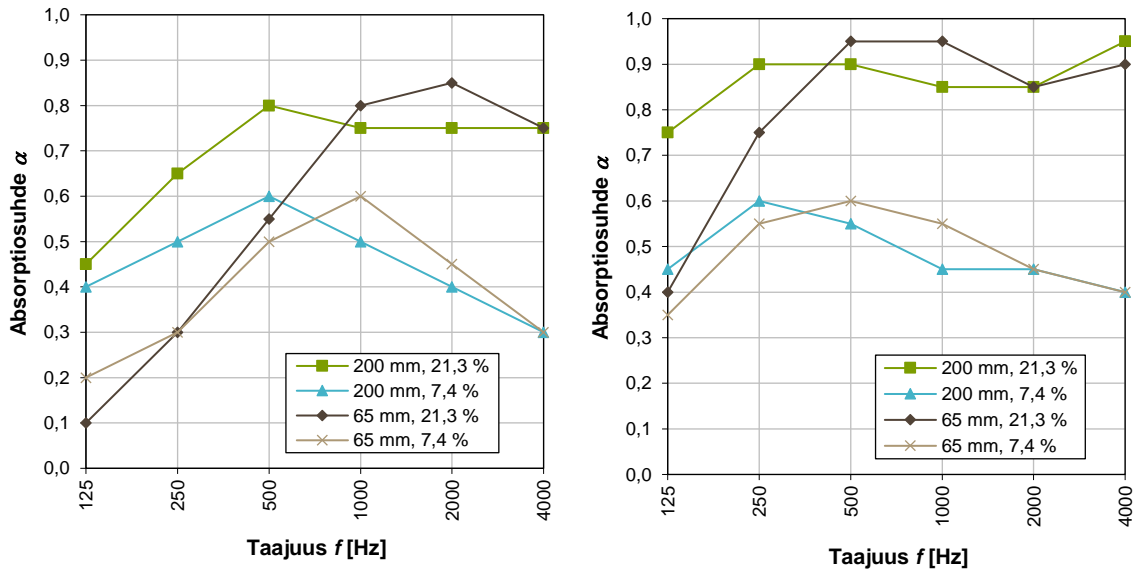
Kuva 5.11. Huokoisen materiaalin absorptiosuhteet riippuvat rakennekerroksen paksuudesta. Esimerkkejä akustiikkamineraalivillojen absorptiosuhteista.

Mineraalivillan tyyppiset materiaalit voidaan päällystää hyvin ilmaa läpäisevällä pinnotteella, esimerkiksi ruiskutettavalla materiaalilla, 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.

5.3.2 Reikälevyt

Rakenteita, joissa rei'itetyn rakennuslevyn takana on ilmapäli, käytetään erityisesti pienten ja keskitaajuuksien absorboimiseen. Niiden absorptiokyky perustuu siihen, että reiässä oleva ilma toimii massana ja ilmapäliissä oleva ilma jousena, jotka muodostavat massa–jousijärjestelmän. Kun rei'itettyyn levyyn kohdistuu ääntä, äänitehoa absorboituu eniten reikälevyn massa–jousijärjestelmän ominaistajuudella. Ominaisajuus ja absorptiosuhde riippuvat ilmapälin paksuudesta, reiän koosta, reikien määrästä, reiän muodosta ja rakennuslevyn paksuudesta (kuva 5.12).

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.



Kuva 5.12. Rei'itettyjen levyjen absorptiosuhde riippuu ilmavälin paksuudesta, reiän muodosta ja reikien määrästä sekä ilmavälin täytöstä mineraalivillalla. Kuvissa on esimerkkejä 12,5 mm pak-sujen rei'itettyjen kipsilevyjen absorptiosuhteista. Vasemmalla levyn takana on tyhjä ilmaväli ja oikealla ilmavälissä on 50 mm villatäyttö. 7,4 % rei'ityssuhteen levyissä on pyöreät reiät ja 21,3 % rei'ityssuhteen levyissä reiät ovat ovaalin muotoiset. Kaikissa rakenteissa reikälevyn takana on ilmaa läpäisevä taustahuopa.

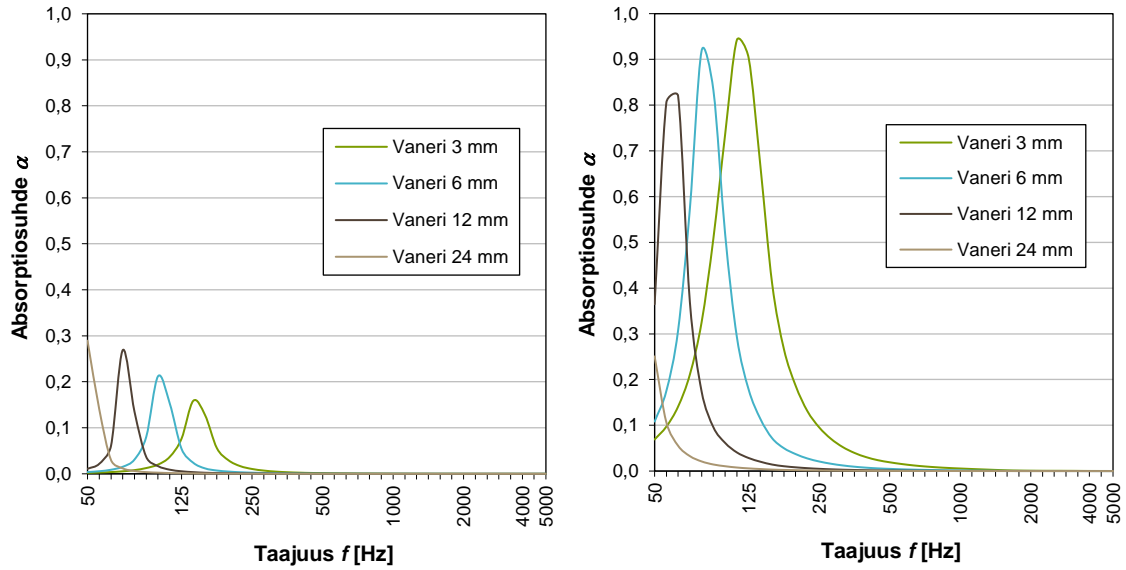
5.3.3 Levyresonaattorit

Levyresonaattorit ovat rakenteita, joissa ehjän rakennuslevyn takana on tyhjä tai mine-raalivillalla täytetty ilmaväli. Levyresonaattoreilla voidaan absorboida pieniä taajuuksia; suurilla taajuuksilla levyrakenteet ovat heijastavia (kuva 5.13).

Levyresonaattoreita ovat esimerkiksi kaikki levyrakenteiset seinät, ikkunat ja ovet ja useimmat ohuet rakennuslevyt, kuten vaneri, puu ja lastulevy. Niiden absorptiosuhteet ovat korkeimmillaan pienillä taajuuksilla, joilla niiden ilmaääneneristävyys on vastaa-vasti alimmillaan. Erityisesti vaativampien tilojen huoneakustiikkaa suunniteltaessa le-vyrakenteisten seinien absorptiokyky on otettava huomioon, jotta jälkikaiunta-aika pie-nillä taajuuksilla ei tulisi liian alhaiseksi. Levyrakenteita käytetään myös äänen heijasta-miseen. Tällöin levykerroksen massa ja ilmaväli on valittava niin, että rakenteen ominais-taajuus on mahdollisimman alhainen. Jos levyn takana oleva rakenne oletetaan erittäin jäykäksi ja massiiviseksi levyyn verrattuna, levyresonaattorin ominaistajuus f_0 [Hz] voi-daan laskea levyn pintamassan m' [kg/m^2] ja ilmavälin d [m] perusteella:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad (5.1)$$

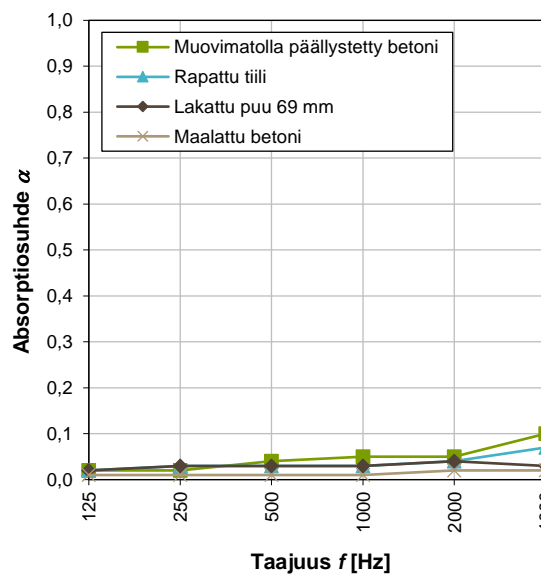
Levyresonaattoreiden ominaistajuus on sitä pienempi, mitä suurempi levyn pinta-massa on ja mitä suurempi ilmaväli on. Tavallisesti levyrakenteisten seinien ja alakattojen ominaistajuus on alle 100 Hz. Absorptiosuhteeseen vaikuttaa ominaistajuuden lisäksi ilmavälin täyttö huokoisella materiaalilla: tällöin absorptiosuhteet ovat suurempia.



Kuva 5.13. Vanerilevystä muodostettujen levyresonaattorien absorptiosuhteita laskettuna Coxin ja D'Antonion (2020) mukaan. Vasemmalla levyn takana on 100 mm tyhjä ilmapäli ja oikealla ilmapäliissä on 50 mm mineraalivilla. Absorptiosuhteen mittauksissa saatavat absorptiosuhteet ovat todennäköisesti esitettyjä pienempiä.

5.3.4 Kovat pinnat

Kun rakenteen massa on suuri, rakenteen ominaistaajuus on alhainen eikä rakenne enää toimi levyresonaattorina huoneakustiikan kannalta tärkeällä taajuusalueella. Kun rakenteen pinta on lisäksi kova ja tiivis, rakenne heijastaa äänitehosta suurimman osan itsestään pois. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi tiiliseinät, betonirakenteet ja massiivinen puu (kuva 5.14).

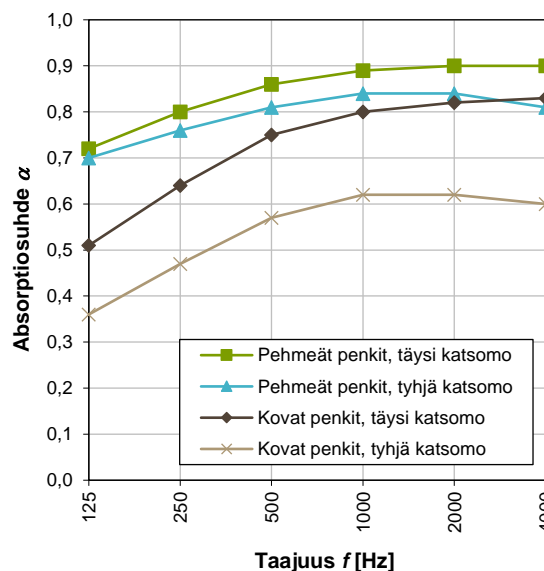


Kuva 5.14. Raskaiden kova- ja tiivispintaisten materiaalien absorptiosuhteita.

5.3.5 Kalusteet ja yleisö

Rakentamismääräyksissä ja erilaisissa ohjeissa annetut tavanomaisten tilojen, kuten luokahuoneiden, pienten neuvottelutilojen ja toimistohuoneiden, jälkikaiunta-ajat koskevat tyhjiä huoneita, joissa ei ole kalusteita tai ihmisiä. Näissäkin tiloissa kalusteita voidaan kuitenkin hyödyntää osana huoneakustista ratkaisua (Pääkkönen & Kylliäinen 2017).

Vaativampia tiloja, kuten auditorioita, isoja luentosaleja, puheteattereita tai musiikki-tiloja, 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 5.15 on esitetty yleisön alueen keskimääräisiä absorptiosuhteita.

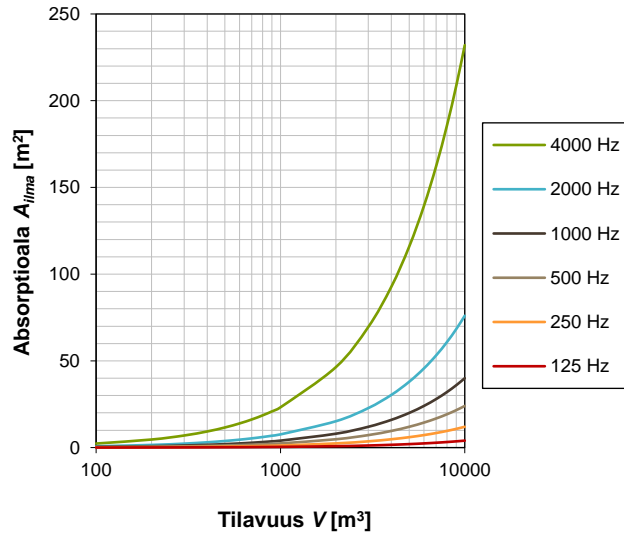


Kuva 5.15. Yleisön alueen absorptiosuhteita (Beranek & Hidaka 1998).

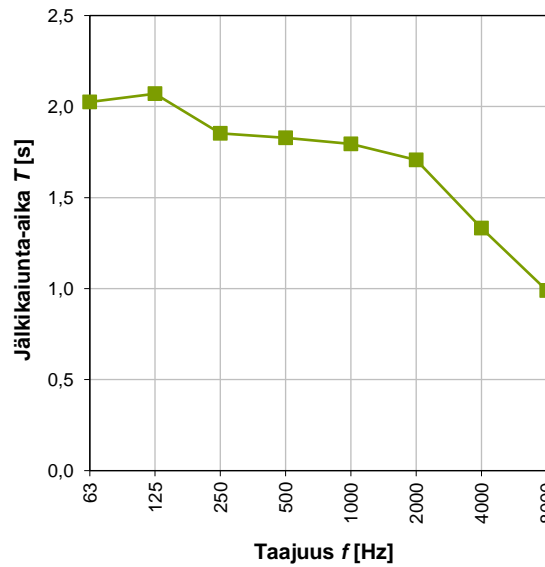
5.3.6 Ilman absorptio

Ilma absorboi ääntä, mutta sen vaikutus on merkittävä lähinnä suurimmilla 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 5.16 on esitetty ilman absorptioala oktaavikaistoittain tilavuuden funktiona.

Käytännössä ilman absorptiolla on merkitystä vain hyvin suurissa tiloissa, kuten liikuntahalleissa, monitoimihalleissa, suurissa luento- ja konferenssisaleissa, konserttisaleissa ja teattereissa. Mitattaessa näiden jälkikaiunta-aikaa ilman absorptio näkyy jälkikaiunta-ajan lyhenemisenä suurimmilla taajuuksilla (kuva 5.17).



Kuva 5.16. Ilman absorptioala 20 °C lämpötilassa ja 50 % suhteellisessa ilmankosteudessa.



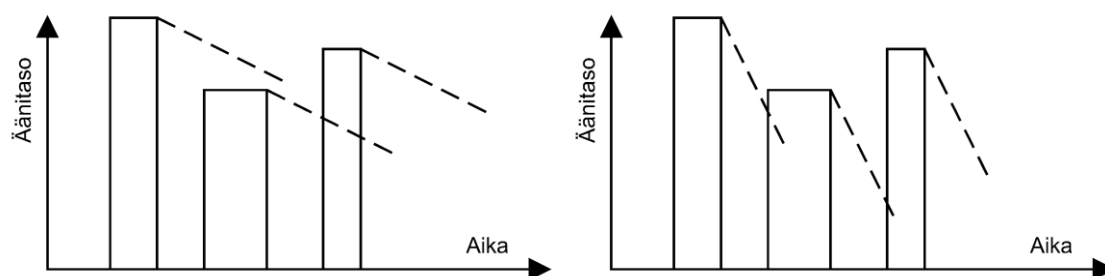
Kuva 5.17. Ilman absorptio näkyy isoissa tiloissa jälkikaiunta-ajan lyhenemisenä suurilla taajuuksilla. Kuvassa Tampere-talon 1800-paikkaisen ison konserttisalin mitatut jälkikaiunta-ajat. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

5.4 Huoneakustiikan suunnittelu

5.4.1 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunta-ajan (luku 2.2) 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 5.18).

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 puhetilassa johtaa siihen, että suurin osa tilan pinnoista on peitetty absorptiomateriaalilla eikä hyödyllisiä heijastuksia synny lainkaan (Kylliäinen & Hongisto 2019).



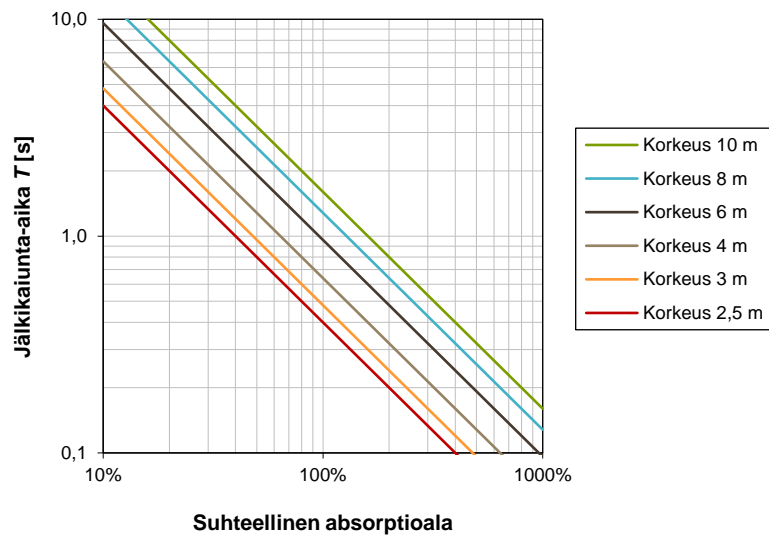
Kuva 5.18. Jälkikaiunta-ajan ollessa pitkä puheen tavut vaimenevat tilassa hitaasti ja peittävät toisiaan. Tavut erottuvat toisistaan hyvin ja puheen selvyys paranee, kun jälkikaiunta-aika on sopivan lyhyt. (Arni 1949, Barron 2010)

Tavallisimpien tilojen jälkikaiunta-ajoista on annettu suosituksia standardissa SFS 5907:2022. Lisäksi joidenkin tilojen jälkikaiunta-ajoista on annettu määräyksiä ja ohjeita ympäristöministeriön ääniympäristöasetuksessa 796/2017 ja ääniympäristöohjeessa (YMa 796/2017, YMa 2018). Tavallisimpien tilojen suunnittelussa voidaan käyttää apuna kuvaa 5.19, jossa on esitetty tilassa vaadittavan absorptioalan suhteellinen määrä prosentteina tilan lattiapinta-alasta. Kunkin absorptiomateriaalin määrää voidaan arvioida jakamalla kuvasta saatava prosenttimäärä materiaalin absorptiosuhteella.

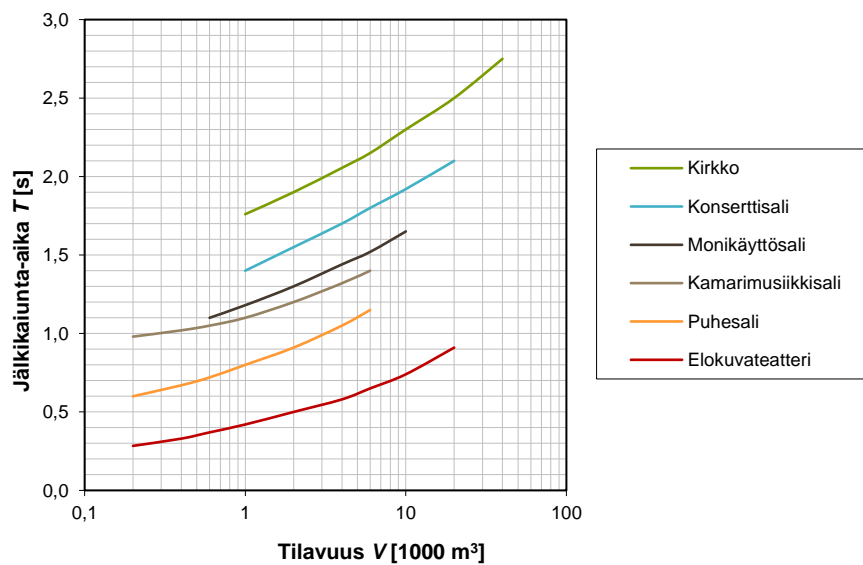
Vaativampien tilojen, kuten auditorioiden suunnittelun lähtökohtana on tilan oikea muoto ja sopiva tilavuus. Taulukossa 5.1 on suuntaa antavia tilavuuksia erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltuville tiloille. Kuvassa 5.20 puolestaan on esitetty näihin tiloihin sopivia jälkikaiunta-aikoja. Musiikkitaloissa absorptioala muodostuu pääasiassa yleisön alueesta, joten jälkikaiunta-ajalla ja tilavuudella on melko suora yhteys (luku 2.2).

Taulukko 5.1. Tilan käyttötarkoitukseen perustuvia suuntavia tilavuuksia henkeä kohti ja tilan suurimmat suositeltavat tilavuudet (Fasold & Veres 1998).

Käyttötarkoitus	Tilavuus henkeä kohti [m ³]	Suurin tilavuus V [m ³]
Kokoustila, seminaarihuone	3...5	1000
Auditorio, konferenssisali	4...6	5000
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 5.19. Sabine'n kaavan mukainen absorptioala [%] suhteessa tilan lattiapinta-alaan huonekorkeuden ja jälkikaiunta-ajan vaihdellessa, kun absorptiomateriaalin absorptiosuhde on 1.



Kuva 5.20. Huoneakustisesti vaativien tilojen suositeltavia jälkikaiunta-aikoja 500–1000 Hz taajuuksilla. (Beranek 2004, Fasold & Veres 1998, Templeton 1993)

5.4.2 Puheensiirtoindeksi

Tiloissa, joissa puheesta tulisi saada selvää, keskeisiä akustisia suunnittelutavoitteita ovat puheen kuuluvuus ja selvyys eli puheenerotettavuus. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi auditoriot ja opetustilat. Puheenerotettavuutta voidaan mitata objektiivisesti puheensiirtoindeksillä (STI, eng. speech transmission index). Se on otettu opetustilojen suunnittelukriteeriksi standardissa SFS 5907:2022, jossa annetaan ohjearvoja erilaisten tilojen huoneakustiikan toteutukselle.

Puheensiirtoindeksin arvoon vaikuttavat puheen äänitaso, huoneen jälkikaiunta-aika ja heijastukset sekä tilan taustamelutaso. Näiden osatekijöiden johdosta puheensiirtoindeksin arvoon vaikuttavat käytännössä myös tilan muoto ja absorptiomateriaalin sijoittelu tilassa. Puheensiirtoindeksin arvoa määritettäessä oletetaan, että puheen tavut ovat amplitudimoduloitua signaalia. Kun akustisella siirtotiellä on kohinaa tai kaiuntaa, puheen modulaatio pienenee ja tämä laskee puheen ymmärrettävyyttä. Aikaiset heijastukset yleensä tukevat puhetta, mutta liian myöhään saapuva heijastus voi sotkea puheenerotettavuutta. Taustamelu tilassa peittää puhesignaalia, samoin kaiuntaisessa tilassa kauan vaimenevat tavut.

Puheensiirtoindeksin arvo vaihtelee 0 ja 1 välillä. Kun puheensiirtoindeksin arvo on $STI = 1$, kuulija kuulee kaikki tilassa satunnaisesti luetellut tavut oikein ja kun $STI = 0$ kaikki puheen informaatio on hävinnyt matkalla puhujalta kuulijalle. Käytännössä arvo 1 voitaisiin saavuttaa kaiuttomassa tilassa, kun kuulija on aivan lähellä puhujaa. Puheensiirtoindeksin arvo 0 voisi tarkoittaa sitä, että taustamelun äänitaso tilassa on paljon puheen äänitasoa suurempi. Tällainen tilanne on esimerkiksi meluisassa tehdashallissa. Hyvä puhetila ei edellytä kuitenkaan puheensiirtoindeksin arvoa 1, sillä aivot toimivat niin, että jos sanasta yksi tavu kuullaan epäselvästi, ne osaavat päätellä, mikä sana on kysymyksessä. Siten suuressa auditoriossa puheenerotettavuus on hyvä, kun puheensiirtoindeksin arvo on 0,6 tai enemmän. Opetustilassa pyritään puheensiirtoindeksin arvoon 0,7 tai enemmän (YMo 2018, Kylliäinen & Hongisto 2019, SFS 5907:2022), sillä kuuloaisti kehittyy aikuisen tasolle noin 15 vuoden iässä (Mealings et al. 2015).

Puheensiirtoindeksi STI voidaan laskea impulssivasteesta, joka on mitattu kaiuttimella ja mikrofonilla (IEC 60286-16). STI lasketaan näennäisen signaali-kohinasuhteen (S/N_{app}) avulla (IEC 60286-16):

$$STI = (S/N_{app} + 15)/30 \quad (5.2)$$

Näennäinen signaali-kohinasuhde S/N_{app} määritellään oktaavikaistan f_k ja modulaatio-
taajuuden F_i suhteen (Keränen 2015):

$$S/N_{app} = \sum_{k=1}^K w_k S/N_{app}^{(k)}, \quad (5.3)$$

$$S/N_{app}^{(k)} = 1/I \sum_{i=1}^I w_k S/N_{app}^{(k,i)} \text{ ja} \quad (5.4)$$

$$S/N_{app}^{(k,i)} = 10 \log_{10} \left(\frac{m_k(F_i)}{1-m_k(F_i)} \right), \quad (5.5)$$

missä w_k on taajuuskaistan painotuskerroin ja modulaation vaimennuskerroin on $m_k(F_i) = \left(\sqrt{1 + (2\pi F_i T_{10}(f_k)/13,8)^2} (1 + 10^{-\text{SNR}(f_k)/10}) \right)^{-1}$. (5.5)

Kaavassa 5.5 $T_{10}(k)$ on varhainen jälkikaiunta-aika (EDT), $\text{SNR}(f_k) = L_S(f_k) - L_N(f_k)$ on todellinen signaali-kohinasuhde oktaavikaistalla f_k . Parametrien arvot kaavoissa 5.2. – 5.5 ovat (Keränen 2015):

$$K = 7, I = 14, f_k = [125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000] \text{ Hz} \quad (5.6)$$

$$F_i = \left[\begin{array}{l} 0,63; 0,80; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 3,15; 4,00; \\ 5,00; 6,30; 8,00; 10,00; 12,50 \end{array} \right] \text{ Hz} \quad (5.7)$$

Puheensiirtoindeksin lisäksi toinen puheenerotettavuuden mittaluku on PA-järjestelmille käytettävä STIPA (eng. *STI for PA*). Aikaisemmin käytössä oli myös erillinen huoneakustiikan nopean arviointiin tarkoitettu mittaluku RASTI (eng. *room acoustic STI*) ja telekommunikaation arviointiin tarkoitettu STITEL (eng. *STI for Telecommunication Systems*), mutta näitä ei tulisi enää nykyään käyttää (IEC 60286-16).

Puheensiirtoindeksiä STI voidaan käyttää myös käänteisesti puheenpeiton arvioimiseen. Puheenpeitto on tärkeää avotoimistoissa, jotta yleisesti keskittymistä häiritsevänä pidetyn puheen äänitaso viereisistä työpisteistä olisi äänitasoltaan mahdollisimman alhainen (Kylliäinen & Hongisto 2019). Puheensiirtoindeksiä voidaan käyttää myös koetun ilmaääneneristävyyden arvioimiseen (taulukko 5.1), koska sillä voidaan ottaa huomioon puheäänien vaimeneminen tilojen väliseen ääneneristävyyteen perustuen, vastaanottohuoneen kaiuntaisuus ja taustamelutason peittovaikutus vastaanottohuoneessa (Keränen & Hongisto 2010). Äänitasoerolukuun $D_{nT,w}$ sisältyy näistä tekijöistä vain ensimmäisen.

Puheensiirtoindeksin luokitukset erilaisia puheenerotettavuuden arvioimiseksi ja tavoitteiden asettamiseksi erilaisia puhetiloja varten on esitetty taulukossa 5.2. Ympäristöministeriön ääniympäristöoppaassa (2018) on puheensiirtoindeksille esitetty ohjearvoja erilaisia tiloja, kuten luokkahuoneita, opetustiloja, kokoustiloja, ruokailu- ja liikuntatiloja, potilashuoneita ja toimistotiloja varten.

Taulukko 5.1. Puheensiirtoindeksin merkitys ihmisen kokemuksen kannalta (SFS 5907:2004).

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

Taulukko 5.2. Puheensiirtaindeksin (STI) luokitukset erilaisia puhetiloja ja tilanteista varten (IEC 60286-16).

Luokka	STI	Välitettävä tieto	Esimerkkejä tiloista	Kuvaus
A+	> 0,76		Äänitysstudiot	Erittäin hyvä puheenerotettavuus, mutta harvoin saavutettavissa
A	0,74	Monimutkainen tieto, oudot sanat	Teatterit, auditoriot, oikeussalit, parlamentit, avustetun kuulemisen järjestelmät	Korkea puheenerotettavuus
B	0,70	Monimutkainen tieto, oudot sanat		
C	0,66	Monimutkainen tieto, oudot sanat	Teatterit, auditoriot, oikeussalit, telekonferenssi, parlamentit	Korkea puheenerotettavuus
D	0,62	Monimutkainen tieto, tutut sanat	Luentosalit, luokahuoneet, konserttitalit	Hyvä puheenerotettavuus
E	0,58	Monimutkainen tieto, tuttu konteksti	Konserttitali tai moderni kirkko	Korkealaatuiset PA-järjestelmät
F	0,54	Monimutkainen tieto, tuttu konteksti	PA-järjestelmät ostoskeskuksissa, julkisten tilojen toimistot, hälytysäänijärjestelmät, katedraalit	Hyvälaatuiset PA-järjestelmät
G	0,50	Monimutkainen tieto, tuttu konteksti	Ostoskeskukset, julkisten tilojen toimistot, hälytysäänijärjestelmät	Hälytysäänijärjestelmien vaatimus
H	0,46	Yksinkertainen tieto, tutut sanat	Hälytysääni- ja PA-järjestelmät vaikeissa akustisissa ympäristöissä	Normaali alaraja hälytysäänijärjestelmille
I	0,42	Yksinkertainen tieto, tutut sanat	Hälytysääni- ja PA-järjestelmät erittäin vaikeissa akustisissa ympäristöissä	
J	0,38		Ei sovellu PA-järjestelmille	
U	< 0,36		Ei sovellu PA-järjestelmille	

Luvun 5 lähteet

- Arni, P. 1949. Käytännöllisen akustiikan perusteet. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava.
- Barnett, P. W. 1999. Overview of speech intelligibility. Institute of acoustics, Vol 21, Part 5.
- Barron, M. 2010. Auditorium acoustics and architectural design (2. p.). London, Spon Press.
- Beranek, L. 2004. Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture. New York, Springer-Verlag.
- Beranek, L. & Hidaka, T. 1998. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 104(6), s. 3169–3177.
- Cox, T. & D'Antonio, P. 2020. Acoustic absorbers and diffusers - Theory, design and application (3. p.). London, CRC Press.
- Fasold, W. & Veres, E. 1998. Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berlin, Verlag für Bauwesen.

- ISO 3382-3. 2012. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices.
- IEC 60286-16. 2020. Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- Keränen, J. 2015. Measurement and prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices. Väitöskirja. Aalto- University, Department of Signal Processing and Acoustics, Doctoral Dissertations 23/2015.
- Keränen, J. & Hongisto, V. 2010. Background noise affect subjective sound insulation – needs to update the target values? *Internoise 2010*. Lisbon, June 13–16.
- Kuttruff, H. 2000. Room acoustics (4. p.). London, E & FN Spon.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28.
- Latvanne, P. 2013. Tyrvään kirkon huoneakustiikan mallinnus. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Mealings, K. T., Demuth, K., Buchholz, J. M. & Dillon, H. (2015a). The effect of different open plan and enclosed classroom acoustic conditions on speech perception in Kindergarten children. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 138(4), s. 2458–2469.
- Mikkilä, A., Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2019. Tampereen pääkirjasto Metson perusparannus. Akustiikkapäivät. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 100–105.
- Packalén, J. 1931. Huoneakustiikasta. *Teknillinen Aikakauslehti*. Vol. 21 (10), s. 495–501.
- Pääkkönen, R. & Kylliäinen, M. 2017. Kalusteet osana tilan akustista ratkaisua. *Rakennusfysiikka 2017*. Tampere, 24.–26.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 603–608.
- Riionheimo, J. & Lokki, T. 2021. Elokvateatteri muokkaa elokuvan äänimaisemaa. *Akustiikkapäivät 2021*. Akustinen Seura ry, Turku, 24.–25.11., s. 209–216.
- Sereda, O. 2022. Nykyaikaisten elokvateatterien akustiikkasuunnittelu. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- SFS 5907. 2004. Rakennusten akustinen luokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Templeton, D. 1993. Acoustics in the built environment. Oxford, Butterworth Architecture.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

6

Liikennemelun torjunta

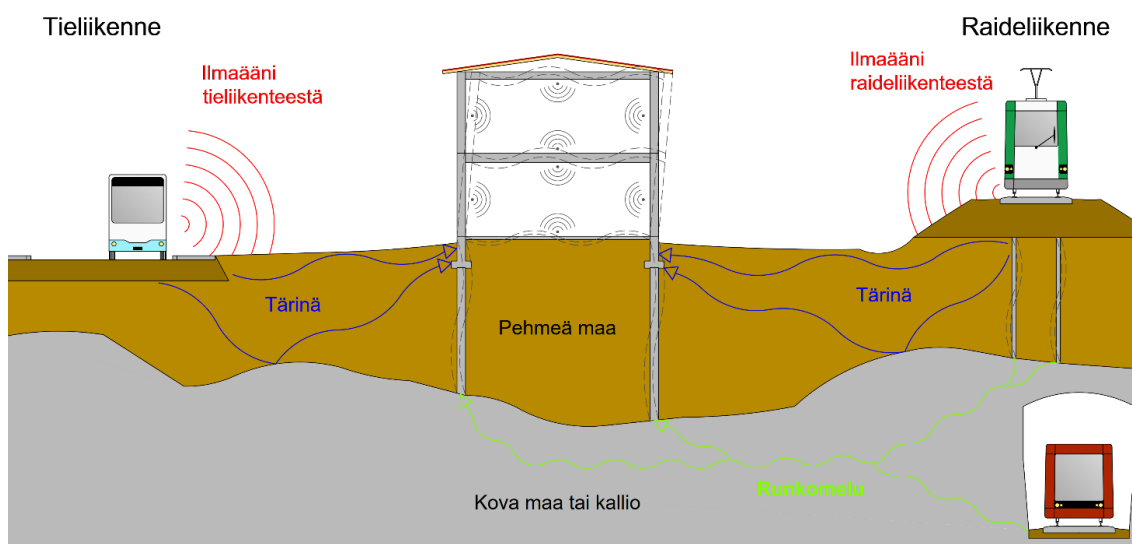
”Voimakas teknillinen kehitys on manannut esiin ääniä, jotka ovat vieroksuttuja ja joita pidetään meluna. Tämän päivän melusta näyttää tulevan vaikea yhteiskunnallinen probleema, jonka merkityksestä ei kaikilla ihmisillä ole edes miellekuvaa. Melu ei ole tämän päivän tuotetta, sillä jo sata vuotta sitten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

Tekniikan liseniaatti Eero Lampio 1962

6.1 Liikennemelun merkitys

6.1.1 Liikennemelun torjunta osana rakennushanketta

Ääneneristystä tai meluntorjuntaa edellyttävä äänilähde voi olla paitsi rakennuksen sisäpuolella, myös ulkona. Tie- ja raideliikenteen vaikutukset rakennuksissa oleviin ihmisiin välittyvät sekä ilman että maan tai kallion kautta (kuva 6.1). 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.



Kuva 6.1. Tie- ja raideliikenteen ympäristöönsä tuottama melu etenee ilman välityksellä rakennuksen piha- ja oleskelualueille, parvekkeille ja rakennuksen ulkovaipan pinnalle, jonka värähtely välittyy ilmaääneksi rakennuksen sisään. Liikenne aiheuttaa lisäksi pehmeiden maakerrosten kautta etenevää tärinää ja kovien maakerrosten ja kallion kautta etenevää runkomelua, joita tarkastellaan luvussa 7. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

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 kasvanee tai kääntyivät jopa laskuun. Muuttoliike kaupunkeihin ja erityisesti kasvukeskuksiin ja pääkaupunkiseudulle merkitsee liikenteen lisääntymistä näillä alueilla. Yhdyskuntasuunnittelussa on viime vuosikymmeninä pyritty 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. (Heinonen-Guzejev & Vuorinen 2001; LIME-työryhmän mietintö 2001)

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 yksityiskohtaisesti 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 tekevät pääsääntöisesti akustiikkasuunnittelutoimistot. 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 teiden, katujen 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 melusuojuiksi ajateltujen rakennusten valmistumista edellyttää.

Asemakaavassa esitettyjen meluntorjuntaratkaisujen toteutumista valvotaan rakennuslupavaiheessa. Tällöin on yleensä esitettävä vähintään selvitys siitä, että rakennuksen julkisivun rakennusosat – ikkunat, ikkunaovet 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 tai

alueelle on rakennettu uusi liikenneväylä, meluselvitys on tehtävä rakennuslupaan liittyen (YMa 796/2017, YMo 2018).

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 meluesteinä ja rakennusten ulkokuorelle asetettavat vaatimukset voivat muodostua kohtuuttomiksi.

6.1.2 Liikennemelua koskevat määräykset

Melun tiedetään aiheuttavan erilaisia haitallisia terveysvaikutuksia, kuten sepelvaltimotautia, vakavia unihäiriöitä ja häiritsevyyttä (2002/49/EY). Rakennuksen ulkopuolisen äänilähteestä sallittavat melutasot on esitetty valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 melutason ohjearvoista. 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 palvelevilla alueilla on ohjeena, että melutaso ei saa ylittää ulkona melun A-painotetun keskiäänitason L_{Aeq} päiväohjearvoa (klo 7–22) 55 dB eikä yöohjearvoa (klo 22–7) 50 dB. Uusilla alueilla on melutason yöohjearvo kuitenkin 45 dB, jonka saavuttaminen kaupunkiympäristössä on erittäin vaikeaa. Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoja. Tavallisesti katsotaan, että asumiseen käytettävillä alueilla riittää, että valtioneuvoston päätöksen mukaiset ohjearvot täyttyvät pihojen oleskelu- ja leikkialueilla.

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 havainnointiin 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_{Aeq} päiväohjearvon (klo 7–22) 35 dB ja yöohjearvon (klo 22–7) 30 dB. Opetus- ja kokoontumistiloissa sovelletaan ainoastaan melutason päiväohjearvoa 35 dB sekä liike- ja toimistohuoneissa päiväohjearvoa 45 dB. Valtioneuvoston päätöksen mukaiset melutason ohjearvot perustuvat melun terveysvaikutuksiin. Siten ne eivät välttämättä takaa viihtyisyyttä melualueille rakennettaessa.

6.2 Äänilähteet

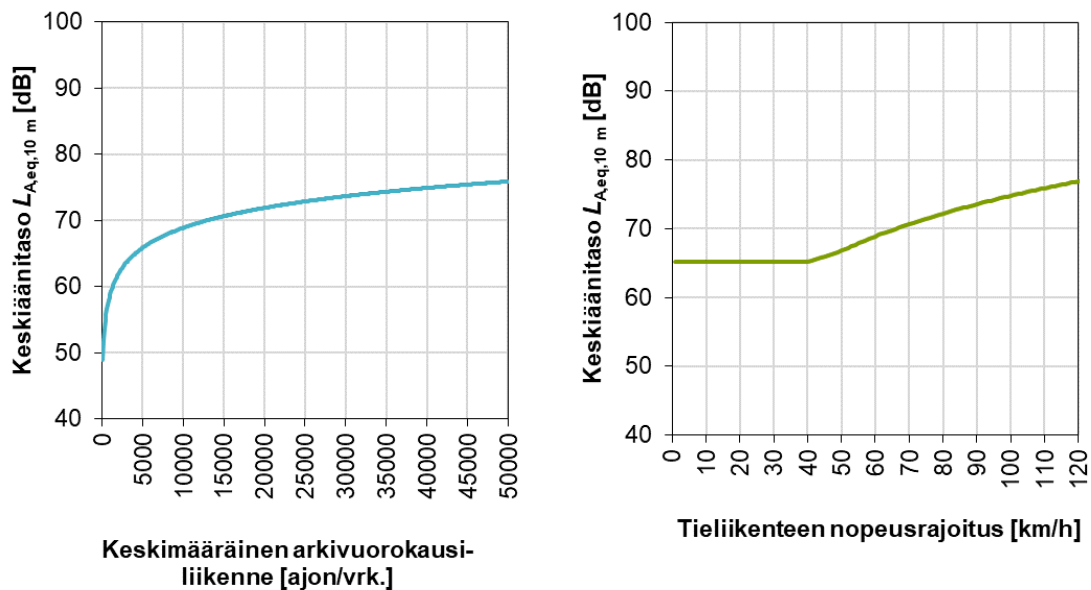
6.2.1 Tieliikennemelu

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 pienemmillä vaihteella ajetaan. Moottorimelun lisäksi myös auton voimansiirto ja korin värähtely aiheuttavat ääntä. Raskaissa ajoneuvoissa on lisäksi erilaisia laitteita, jotka aiheuttavat melua. Esimerkki tällaisesta äänilähteestä on päivittäistavarakaupan tavaraliikenteessä esiintyvä 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 ilmapirtauksesta, mutta virtausmelun merkitys on suurimmillaan vasta, kun ajonopeus on yli 120 km/h. (LIME-työryhmän mietintö 2001).

Vilkaasti 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 äänitasa 3 dB.

Ajonopeus vaikuttaa rengas- ja moottorimeluun, joten esimerkiksi ajonopeuden laskeminen 100 km/h nopeudesta 80 km/h nopeuteen alentaa keskiäänitasa tieliikennemelun laskentamallin mukaan noin 2 dB. Nopeuden laskeminen 60 km/h nopeuteen alentaa keskiäänitasa 3,5 dB lisää. Kuvassa 6.2 on esitetty nopeuden ja liikennemäärän vaikutusta tieliikennemelun keskiäänitasoon 10 m etäisyydellä tien keskilinjasta.



Kuva 6.2. Päiväajan (klo 7–22) perusäänitaso $L_{Aeq,10\text{ m}}$ kuvaa tieliikenteen tuottamaa äänitasoa 10 m päässä äärettömän pitkän, suoran tien keskilinjasta. Vasemmalla on esitetty arjen keski-
vuorokausiliikenteen (KAVL) vaikutus melutasoon, kun liikenteen nopeus tieosuudella on 60 km/h. Oikealla on esitetty tieliikenteen nopeuden vaikutus melutasoon, kun KAVL on 10 000 ajon/vrk.

Edetessään mastossa ääni heijastuu maasta, jonka koostumus vaikuttaa heijastuneen äänen äänitasoon. Alueella, jolla maaperä on pehmeää, äänitaso voi olla useita desibelejä 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 melua merkittävästi (Sandberg & Ejsmont 2002). Meluselvityksissä esitetään piha-alueen keskiäänitaso 2 m korkeudella. Julkisivun ääneneristysvaatimusta määrittäessä 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.

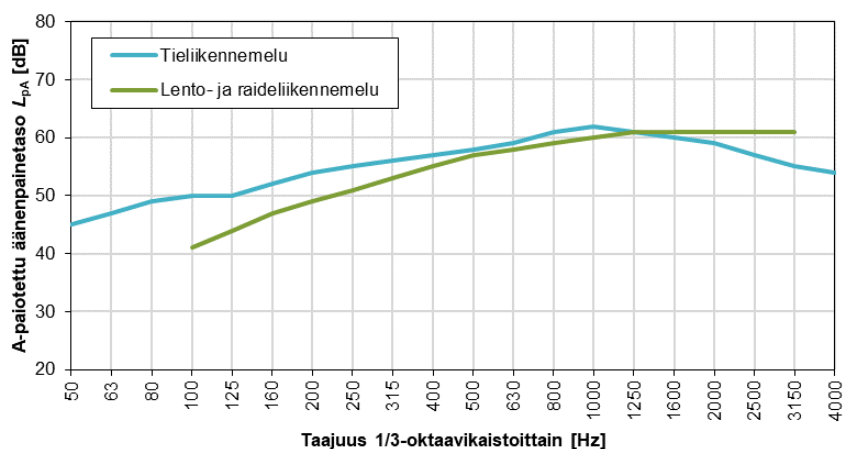
Liikennemelun keskiäänitaso mallinnetaan sekä nykyisen että ennustetun liikennemäärän perusteella. Kasvukeskuksissa liikennemäärät ovat kasvaneet 1990-luvun puolivälistä saakka. Koko valtakunnan mittakaavassa kasvun ennustetaan edelleen jatkuvan, mutta alueelliset erot ovat suuret. Monilla paikkakunnilla etenkin Itä- ja Pohjois-Suomessa liikenteen arvioidaan vähenevän tai säilyvän suunnilleen ennallaan. Helsingin kantakaupunginkin alueella liikennemäärä on vähentynyt viimeiset 20 vuotta, vaikka se pääkaupunkiseudulla muuten onkin kasvanut paljon (Liikenteen kehitys Helsingissä 2021).

Valtioneuvoston päätös 993/1992 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.

6.2.2 Raideliikennemelu

Valtakunnallisesti ajatellen raideliikennemelu on tieliikennemeluun verrattuna pienempi ympäristöongelma. On 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.

Tieliikennemeluun verrattuna raideliikennemelu sisältää enemmän äänienergiaa suurilla taajuuksilla (kuva 6.3). Raideliikennemelu syntyy lähinnä junan pyörän ja kiskon kosketuksesta, joka synnyttää laajakaistaista melua (kuva 6.4). Osa raideliikennemelusta syntyy myös diesel- ja sähkömoottoreista, etenkin nopeuksien ollessa hiljaisia.



Kuva 6.3. Tieliikennemelun sekä raide- ja lentoliikennemelun spektrit taajuuskaistoittain, kun keskiäänitaso L_{Aeq} on 70 dB. Tieliikenne-, raide- ja lentoliikennemelun spektrit on määritetty standardin ISO 717-1 (2013) mukaisesti.



Kuva 6.4. Raideliikennemelun mittausta. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Timo Huhtala.

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

6.2.3 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.

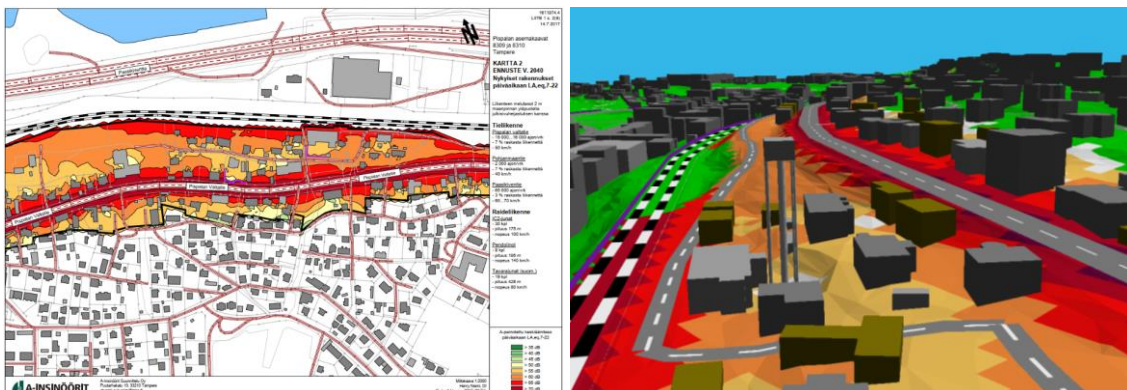
Asemakaavoituksessa suosituksena on, että uusia asuinrakennuksia ei tulisi sijoittaa alueille, joilla L_{DEN} on enemmän kuin 60 dB. Lentoliikenteen kasvusta huolimatta lentomelulle altistuvien ihmisten määrä on Suomessa vähentynyt. Tämä johtuu erityisesti siitä, että lentokoneet ovat kehittyneet hiljaisemmiksi. Lentomelun leviämiseen

asuntoalueille on voitu vaikuttaa myös lentoreittien ja kiitoratojen käytön suunnittelulla. Lentokoneiden melupäästöä säädelään myös kansainvälisin määräyksin.

6.2.4 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 (Nielsen et al. 1996, Nielsen et al. 1997). Laskentamalleilla voidaan laskea melun keskiäänitaso missä tahansa tarkastelupisteessä käsinkin, mutta tavallisesti melun leviämistä halutaan havainnollistaa laatimalla koko tarkasteltavalta alueelta melukartta (kuva 6.5). Jos tarkasteltavana on hehtaarin ala ja melun keskiäänitaso halutaan tietää 5 m välein, laskelma pitäisi suorittaa 400 kertaa. Siksi melukartat laaditaan poikkeuksetta tietokoneohjelmistoilla.



Kuva 6.5. Esimerkki melukartasta: Tampereen Pispalan kaupunginosan asemakaavan meluselvityksen melukartta ennustetilanteessa vuonna 2040 sekä näkymä kolmiulotteisesta maastomallista. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Markkinoilla on melumallinnusohjelmistoja, joihin sisältyy tieliikennemelun ja raide-liikennemelun 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 (kuva 6.4), 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 mittaustulokseen sisältyy myös kaikki muu alueella mittaustuloksen 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 tai tutkimustarkoituksiin (esim. Kovalainen et al. 2021). Asemakaavaa varten tarvittavat meluselvitykset perustuvat käytännössä lähes poikkeuksetta mallinnukseen.

6.3 Meluntorjuntakeinot

6.3.1 Ennaltaehkäisy

Liikennemelusta tuli merkittävä yhteiskunnallinen kysymys autoistumisen myötä. Yhdysvalloissa keskustelu liikennemelusta alkoi, kun polttomoottori voitti voimanlähteiden välisen kilpailun ja Ford tarjosi jokamiehen kukkarolle sopivan T-mallin. 1930-luvulle tultaessa Yhdysvalloissa autoja oli jo yksi viittä asukasta kohden (Thompson 2002). Suomessa yhtä autoa kohti oli samaan aikaan noin sata asukasta, ja suurin osa autoista oli linja- ja kuorma-autoja.

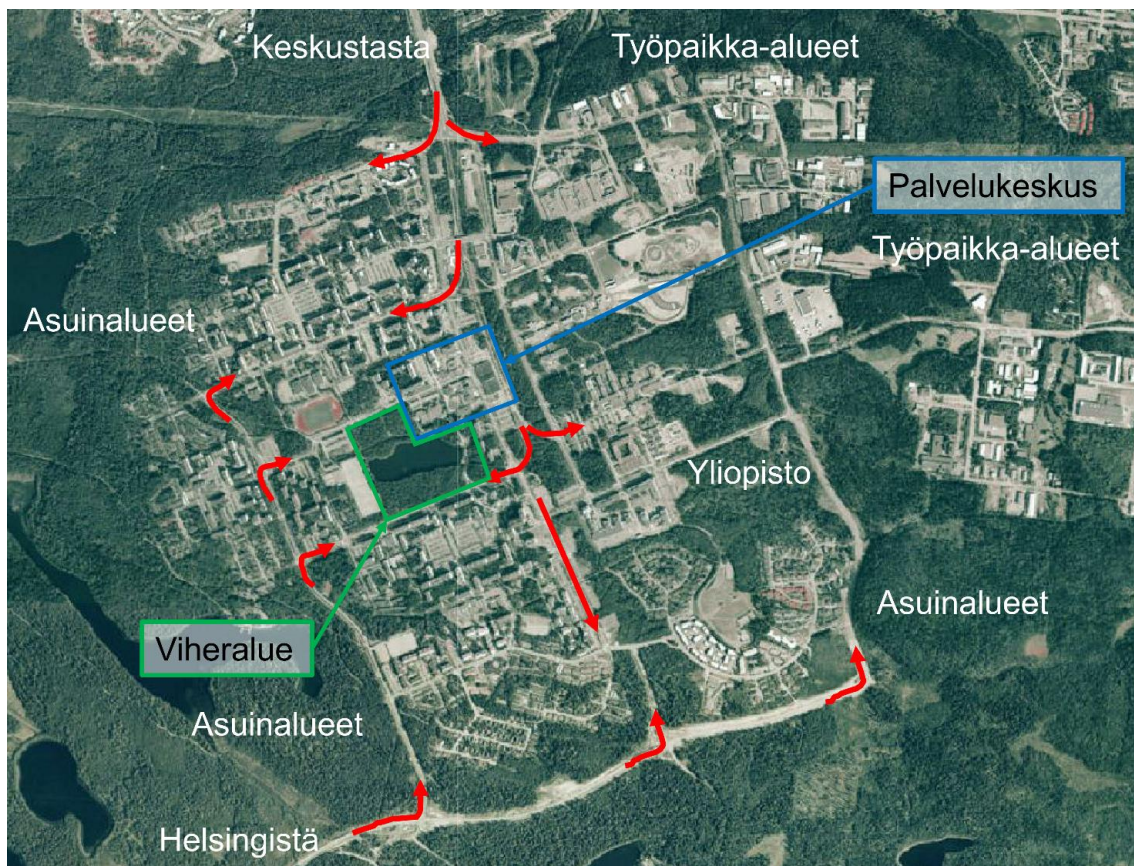
Autoistuminen Suomessa alkoikin verrattain myöhään, vasta 1960-luvulla, kun henkilöautojen tuonti oli vapautettu vuonna 1963. Jo ennen tätä yhdyskuntasuunnittelussa oli siirrytty umpikortteleista lamelli- ja pistetaloista muodostuviin avokortteleihin (kuva 6.6). Tällä pyrittiin saavuttamaan avaruutta, väljyyttä ja näkymiä, mutta melun leviämisen kannalta avokorttelit olivat huono ratkaisu. Vielä parikymmentä vuotta sitten avokorttelit olivat meluisillakin rakennuspaikoilla yleinen kaavoitusratkaisu. Nykyisin tällaista suunnittelua näkee harvemmin. Sitä vastoin melu on jo pitkään ollut yhtenä kaavoituksen lähtökohtana melualueille rakennettaessa. (Kylliäinen 2021)



Kuva 6.6. Kalevan kaupunginosaa Tampereella vuonna 1962 (vas.). Yhdeksänkerroksisten pistetalojen, Kalevantornien, rakentaminen oli alkanut vuonna 1949. Teiskontiellä, kaupungin keskeisellä sisääntuloväylällä, autoja kulkee harvaksen. Puolikunnallisten talojen katolta kuvattu näkymä olisi vuonna 2023 jokseenkin samanlainen, mutta autoja olisi jonoiksi asti. Lisäksi kuvaan olisivat ilmestyneet raitiotien kiskot ja johtimet. Ilmakuvassa vuodelta 1966 (oik.) nähdään, kuinka Kalevan kaupunginosa rakentuu Teiskontien ja Sammonkadun varsille lamellitaloista, joiden välistä melu pääsee esteettä leviämään. Kuvälähteet: Museoviraston kuvakokoelma, kuvaaja Matti Poutvaara (vas.), Tampereen kaupunki (oik.).

Meluntorjuntakeinoista tärkein ja tehokkain on ennaltaehkäisy, jonka tulisi olla myös ensisijainen keino. Yksi ennaltaehkäisyn keino olisi vaikuttaa äänilähteisiin, kuten on tehty lentoliikenteessä kansainvälisin säädöksin. Tieliikenteen suhteen äänilähteisiin vaikuttaminen on vaikeampaa, mutta sähköautojen yleistyessä myös tieliikenteen aiheuttama melu väijäämättä vähenee. Käytännössä maankäytön suunnittelun keinoin voidaan tehokkaasti rajoittaa melun etenemistä liikenneväylältä asuinalueille (kuva 6.7). 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 ylempät kaavatasot maakuntakaava 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, hidastetöyssyjen, liikenneympyröiden ja kavennusten suunnittelu alueiden koojakaduille. Melua voidaan vähentää myös suunnittelemalla koojakadut niin, että asuntoalueelle ei synny läpiajoa. (Lime-työryhmän mietintö 2001)

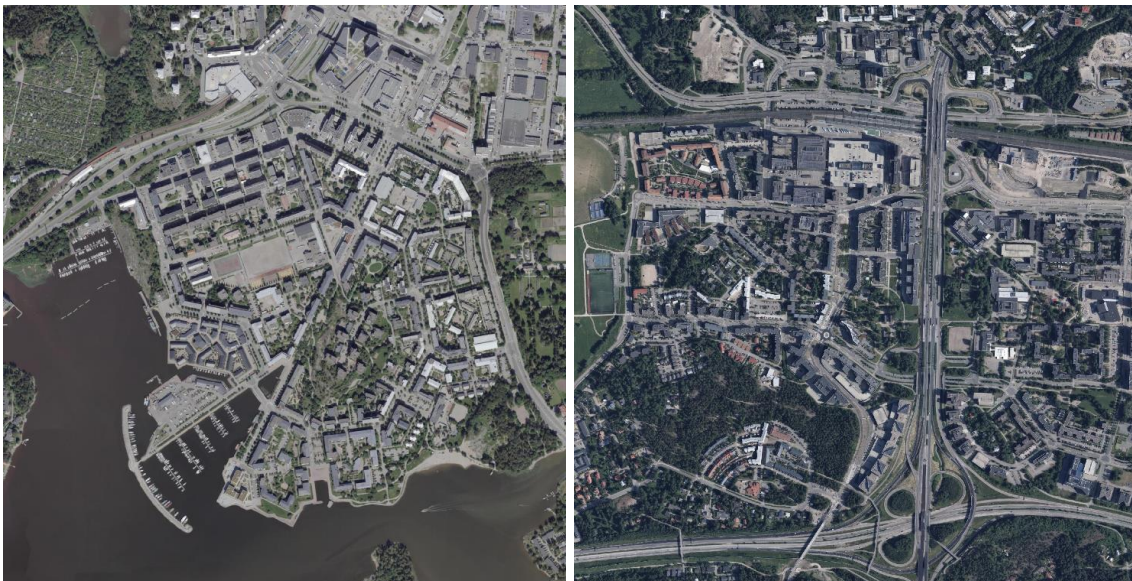


Kuva 6.7. Tampereen Hervannan kaupunginosan alkuperäiset liikennejärjestelyt ovat pyrkineet siihen, että liikenne ohjautuu pääväylältä koojakaduille, joiden välille jää laajoja rauhallisia korttelialueita. Asian havainnollistamiseksi ilmakuvaan on lisätty kaupunginosan eri osien toimintoja osoittavia tekstejä ja liikennevirtoja kuvaavia nuolia. Kuvälähde: Tampereen kaupunki.

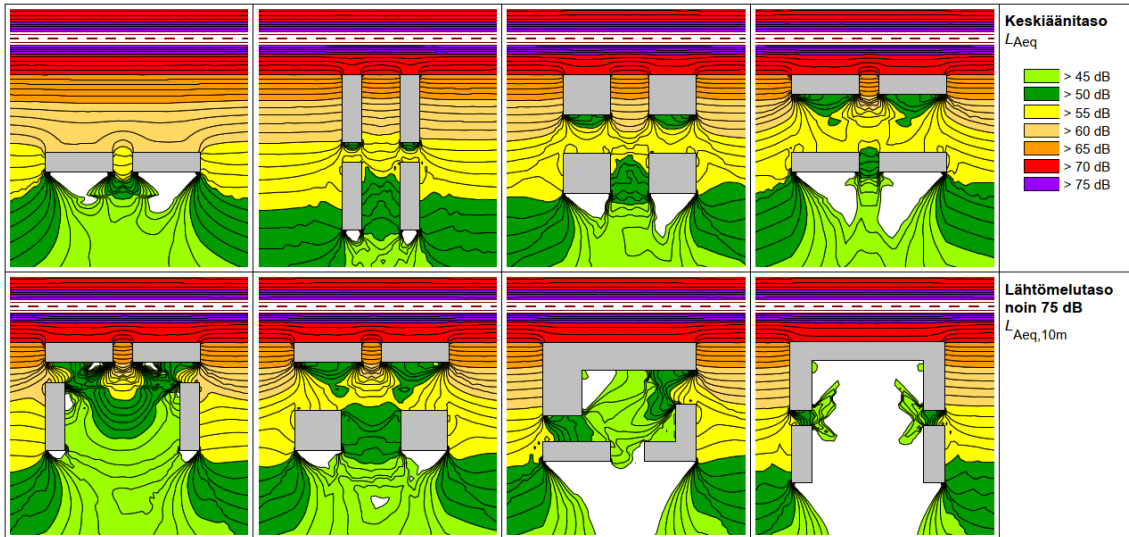
6.3.2 Rakennusmassat

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, viirastoilla, toimistoilla ja vastaavilla rakennuksilla (kuva 6.8). Usein käytetty tapa on suojata moottoritien tai valtatievarteen kaavoitettava asuinalue toimisto- tai liikerakennuksilla, jotka sijaitsevat lähimpänä tietä. Asuinrakennuksilla suojata pihojen oleskelualueita melulta tehokkaasti, sillä ne ovat korkeampia kuin melusteet käytännössä yleensä voivat olla (kuva 6.9).

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 6.8. Helsingin Herttoniemen kaupunginosassa (vas.) umpikorttelit ja toimistorakennukset estävät melun leviämistä liikenneväyliltä alueen sisäosiin, johon on voitu sijoittaa viheralueita ja pientalorakentamista. Espoon Leppävaaran kaupunginosassa (oik.) liikenneväylien varrelle on sijoitettu liike- ja toimistorakennuksia. Kuvalähde: Helsingin kaupunki, kaupunkimittauspäalvelu, Espoon kaupunki.



Kuva 6.9. Korttelin erilaisten massoittelevaihtoehtojen vaikutus päiväajan keskiäänitasoon $L_{A,eq,07-22}$. Pihojen oleskelualueille asetetut melutaso ohjearvot täyttyvät vihreillä ja valkoisilla alueilla. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

6.3.3 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.

Toisinaan 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.

6.3.4 Meluesteet

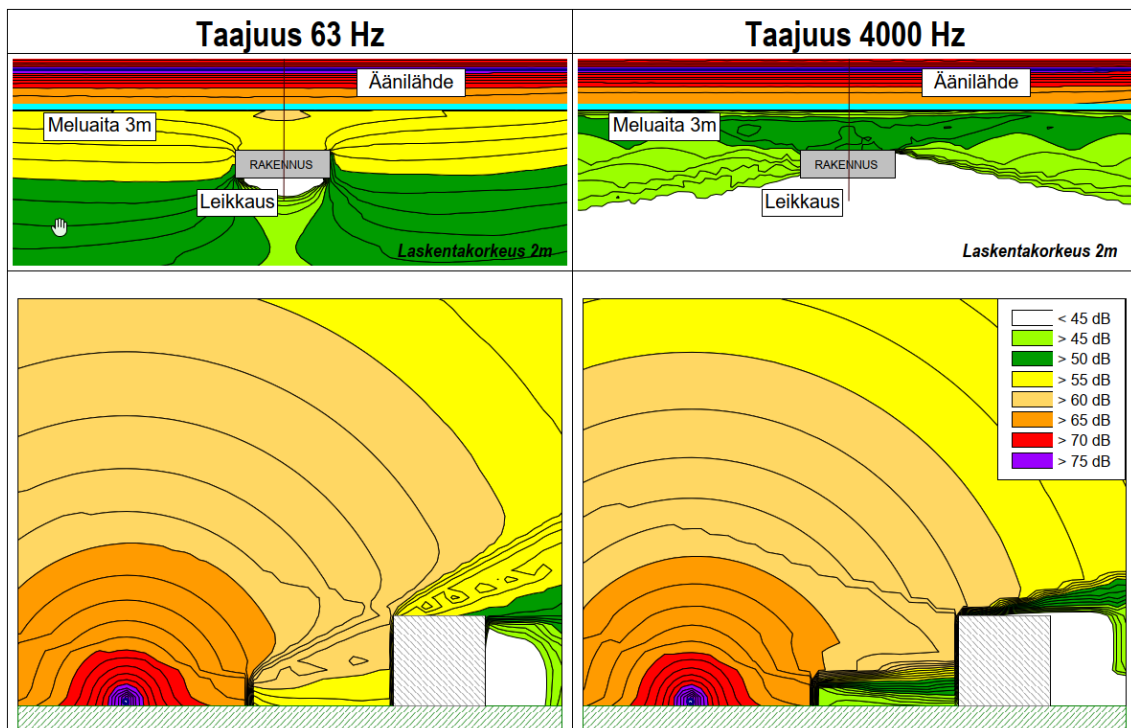
Meluesteet ovat liikenneväylien varsille tai korttelialueille tehtäviä rakenteita, joiden tehtävänä on estää äänen eteneminen suoraan suojattavaa kohteeseen. Meluesteitä tulisi tehdä vain siinä tapauksessa, että ennaltaehkäisevä meluntorjunta ei ole mahdollista tai riittävää. Melueste voidaan toteuttaa monella tavalla. Esteenä voi toimia meluaita, -valli ja kaide, jotka tavallisesti sijoitetaan liikenneväylän varrelle. Korttelialueella meluesteinä voivat toimia niiden meluvallin ja -aidan lisäksi myös piharakennukset, jätekatokset ja autotallit.

Meluesteet toimivat sitä tehokkaammin, mitä korkeampia ne ovat. Liikenteen aiheuttama keskiäänitasoa saadaan alennetuksi 5 dB meluesteillä, joiden korkeus on kohtuullinen, mutta jos meluntorjuntatarve on suurempi kuin 10 dB, meluesteiden korkeus voi kasvaa huomattavasti. Toimiakseen tehokkaasti meluesteen 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 (kuva 6.10).

Melusteet vaikuttavat myös ympäristöön ja maisemaan. Ne peittävät näkymiä, mutta niitä voidaan myös käyttää rikastuttamaan tiemaisemaa. Ympäristöönsä helpoimmin sulautettava meluste on meluvalli, joka voidaan rakentaa noudattelemaan maastonmuotoja. Istutuksilla ja kasvillisuudella valla 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 maamassoista.

Meluita voidaan tehdä puusta, betonista, tiilestä, harkoista, metallikaseteista ja erilaisista rakennuslevyistä. Toimiakseen tehokkaasti melusteen tulee olla rakenteeltaan ääntä eristävä eli tiivis. Sen tulee ulottua maahan saakka yhtenäisenä rakenteena. Esimerkiksi puusäleikkö ei toimi meluitana. 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 melusteen tien puoleinen pinta ääntä absorboivalla materiaalilla.



Kuva 6.10. Äänen pienet taajuudet siroavat eli taipuvat esteen taakse, joten melusteen takana ei ole koskaan täysin hiljaista. Lisäksi meluste ei vaikuta lainkaan meluun silloin, kun tarkastuspisteestä on näköyhteys melulähteeseen. Siksi melusteet eivät ole erityisen tehokas melun torjuntakeino. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Melukaiteet 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.

6.3.5 Ulkovaipan ääneneristys

Asemakaavassa voidaan osoittaa korttelista rakennusalan sivu, jolle on annettu julkisivun ääneneristystä koskeva kaavamääräys. Kaavamerkintä on aaltoviiva. Kaavamääräyksen sanamuoto on (Asemakaavamerkinnät ja -määräykset. 2003): ”Merkintä osoittaa rakennusalan sivun, jonka puoleisen rakennuksen ulkoseinän sekä ikkunoiden ja muiden rakenteiden ääneneristävyuden liikennemelua vastaan on oltava vähintään XX dBA”. Kaavamääräyksessä voidaan lisäksi määritellä, 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 ulkovaippaan kohdistuvan ja sisällä valtioneuvoston päätöksen mukaan sallittavan A-painotetun äänitason eroa $\Delta L_{A,vaad}$. Ulkovaippaan kohdistuva äänitaso tarkoittaa rakennuksen ulkoseinän tasossa vallitsevaa äänitاسoa, johon ei sisälly seinästä tulevaa heijastusta, joka korottaa äänitاسoa noin 3 dB. Heijastunut ääni ei ole pyrkimässä rakennuksen sisään, vaan se on kulkemassa rakennuksesta pois päin. Jos rakennuksen ulkovaippaan päivällä kohdistuvan liikennemelun keskiäänitaso $L_{Aeq,07-22}$ on 65 dB, asemakaavamääräyksessä vaadittavaksi äänitاسoeroksi $\Delta L_{A,vaad}$ muodostuu $65 \text{ dB} - 35 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$.

Julkisivujen ääneneristystä koskevat kaavamääräykset perustuvat valtioneuvoston päätökseen 993/1992 melutason ohjearvoista, jotka ottavat huomioon melun aiheuttaman terveyshaitan. Ohjearvojen saavuttaminen ei takaa välttämättä asumismukavuutta tai viihtyisyyttä. Esimerkiksi raskaan liikenteen ohiajojen aikana hetkellinen melutaso voi olla merkittävästi suurempi kuin sisällä sallittava keskiäänitaso. Kaavamääräyksissä esitettyjen vaatimusten toteutuminen ei siten tarkoita, että sisällä asuinhuoneistossa olisi täysin hiljaista.

Melualueelle rakennettaessa ulkovaipan ääneneristystä koskeva kaavamääräys tulisi ottaa huomioon mahdollisimman alhaisessa vaiheessa. Kun kaavamääräyksen vaatimus on suuri (35–40 dB), tulisi jo hankkeen alkuvaiheessa 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. Ulkovaipan ääneneristystä koskeva kaavamääräys vaikuttaa myös tilojen sijoittamiseen ja ulkoseinärakenteisiin (Kylliäinen 2008):

- äänitasoero $\Delta L_{A,vaad} = 40$ dB: tavallisesti asuinrakennuksia ei tehdä alueille, joissa melutaso edellyttää näin korkeaa vaatimusta. Kaavamääräys johtaa ikkunoille ja ikkunaoville vaatimuksiin, joita ei normaalituotannossa olevin tuottein välttämättä voida täyttää. Kevytrakenteisten ulkoseinärakenteiden käyttö ei yleensä ole mahdollista. Asuntojen meluntorjunta on usein ratkaistava siten, että asuinhuoneita ei sijoiteta melulähteen suuntaan, vaan sinne sijoitetaan porrashuoneet, varastot ja muut vastaavat tilat ja huoneistoissa kodinhoitohuoneet, pesuhuoneet ja vastaavat tilat.
- äänitasoero $\Delta L_{A,vaad} = 35$ 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.
- äänitasoero $\Delta L_{A,vaad} = 30$ 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 valtioneuvoston päätöksen 993/1992 perusteella, jos ulkovaippaan kohdistuvan 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 ulkoseinärakenteita, 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.

Ääniympäristöasetuksen (YMa 796/2017, YMa 360/2019) mukaan ”Rakennuksen, jossa on asuntoja tai majoitus- tai potilashuoneita, ulkovaipan ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava melualueilla siten, että ääneneristys on vähintään 30 desibeliä.” Tämä tarkoittaa sitä, että asetuksessa mainituille rakennuksille asetetaan ulkovaipan ääneneristysvaatimukseksi äänitasoero 30 dB, kun melutaso rakennuspaikalla ylittää ulkona valtioneuvoston päätöksen 993/1992 mukaan sallittavat keskiäänitasot.

Lentomelualueella on otettava huomioon myös kattorakenne sekä äänen siirtyminen räystäään kautta yläpohjan tuuletustilaan. Räystäälle tehdään toisinaan vaimennettu tuuletusrako, joka koostuu säänkestävästä rakennuslevytyksestä ja mineraalivillakerroksesta. Kulkiessaan tuuletusraon kautta ääni vaimenee ennen siirtymistään yläpohjan tuuletustilaan.

Uudistuotannossa asuinrakennusten ilmanvaihto toteutetaan joko huoneistokohtaisilla lämmöntalteenottojärjestelmillä tai yhteiskanavajärjestelmillä. Ääntä voi periaatteessa 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 puhallinäänen vaimentamiseksi sekä yhteiskanavajärjestelmässä että huoneistokohtaisissa ilmanvaihtokoneissa. Yhteiskanavajärjestelmässä vaimentimet tarvitaan lisäksi asuinhuoneistoja yhdistäviin kanaviin riittävän ääneneristykseen 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.

6.3.6 Parvekelasitukset

Parveke on rakennuksen ulkotila, johon on yhteys rakennuksen sisältä [37]. Parveke on kylmä tila, eikä sitä lueta kerrosalaan. Parvekkeessa on kaide, ja se voidaan suojata avattavilla rakenteilla kuten liukulaseilla. Ulkotilaan rajoittuva rakenne ei saa olla ulkoseinän kaltainen. Avattavan lasituksen osuutena voidaan pitää 30 % pystysuorasta, ulkoilmaan rajoittuvasta pinnasta (Kovalainen & Kylliäinen 2016a).

Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista määrittelee asumiseen käytettävillä alueilla ulkona sallittavat melutasot päivä- ja yöaikaan. Valtioneuvoston päätökseen liittyvässä ympäristöministeriön muistiossa (Sarkkinen 1992) asumiseen käytettäväksi alueeksi määritellään pihojen oleskelualueiden lisäksi terassit ja parvekkeet. Valtioneuvoston päätöksessä tätä määritelmää ei ole, mutta kuntien kaavoitus-, rakennusvalvonta- ja ympäristönsuojeluviranomaiset ovat ryhtyneet kiinnittämään huomiota parvekkeiden meluntorjuntaan. Myös Uudenmaan ELY-keskuksen meluntorjuntaa maankäytön suunnittelussa koskevassa ohjeessa (Airola 2013) parvekkeet rinnastetaan piha-alueisiin.

Parvekkeen vaipan eli parvekelasituksen ja kaiteen ääneneristävyyden mitoittava suure on parvekkeella sallittava melun keskiäänitaso $L_{Aeq,s}$. Päivällä sallittava keskiäänitaso on 55 dB ja yöllä yleensä 50 dB (uusilla alueilla 45 dB). Kun tiedetään parvekkeeseen kohdistuva liikennemelun äänitaso $L_{Aeq,u}$, voidaan määrittää parvekkeen vaipalle vaatimus $\Delta L_{A,vaad}$ parvekkeen vaippaan kohdistuvan ja parvekkeella sallittavan äänitason erona. Uusilla alueilla yöllä sallittava keskiäänitaso $L_{Aeq,22-07}$ 45 dB muodostuu usein parvekkeen vaipan mitoittavaksi arvoksi. Käytännössä kaavamääräykseen tuleva äänitasoero $\Delta L_{A,vaad}$ voi olla luokkaa 1–20 dB (Kovalainen & Kylliäinen 2016a).

6.4 Rakennuksen ulkovaipan ääneneristysten suunnittelu

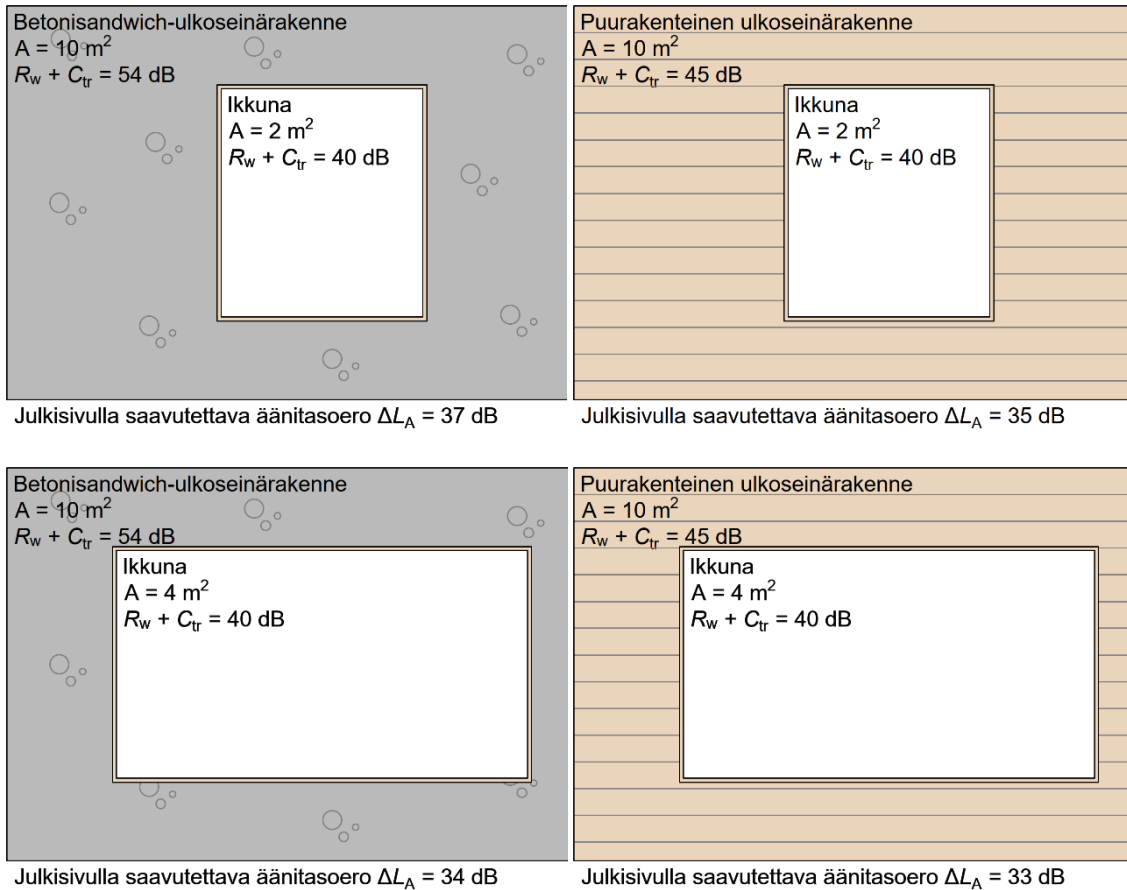
6.4.1 Laskentamenetelmät

Rakennuksen ulkokuoren ääneneristystä suunniteltaessa kohdataan kolme ongelmaa. Ensimmäkin asemakaavamääräys on ilmoitettu ulkovaippaan kohdistuvan ja sisällä sallittavan äänitason erona, mutta rakenteiden ääneneristyskyky ilmoitetaan ilmaääneneristyslukuina, joita ei ole mahdollista verrata suoraan asemakaavamääräykseen. Rakennusosan ilmaääneneristävyys tai ilmaääneneristysluku eivät juuri riipu rakennusosan pinta-alasta: esimerkiksi ikkunan ilmaääneneristysluku R_w on sama riippumatta siitä, onko ikkunan pinta-ala 2 m^2 vai 4 m^2 . Sitä vastoin suuremman pinta-alansa vuoksi pinta-alaltaan 4 m^2 kokoinen ikkuna välittää ääntä ulkoa sisälle 3 dB enemmän kuin ikkuna, jonka pinta-ala on 2 m^2 (kuva 6.11). Siksi rakennuksen ulkovaipalla saavutettavaa äänitasoeroa määrittäessä on otettava huomioon kaikki äänen kulkureitit eli jokainen rakennusosa pinta-aloineen huomioon.

Toiseksi äänen siirtyminen kahden suljetun tilan välillä voidaan laskea, kun tiloja erotavan rakenteen ilmaääneneristävyys 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.

Kolmantena ongelmana rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyttä määrittäessä on ilmaääneneristysluku R_w , joka on kehitetty kuvaamaan ääneneristävyttä puhetta ja asumismelua vastaan. Liikennemelun äänispektri poikkeaa näistä: liikennemelussa on enemmän pienitaajuisia komponentteja. Ulkovaipan ääneneristävyden laskemisessa käytetään ilmaääneneristyslukujen R_w ja spektripainotusermien summaa. Tavallisesti käytettävä taajuusalue on $100\text{--}3150 \text{ Hz}$, jolla ilmaääneneristysluvun merkintä tieliikennemelua vastaan on $R_w + C_{tr}$ ja lento- ja raideliikennemelua vastaan $R_w + C$.

Lämmöneristys- ja energiamääräykset ovat johtaneet siihen, että uudisrakentamisessa korvausilmaventtiileitä ei enää juuri käytetä. Korjausrakentamisessa niitä kuitenkin käytetään yleisesti. Korvausilmaventtiileiden ääneneristyskyky ilmoitetaan painotettuna yksikköääneneristävyysnä 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 yksikköääneneristävyys 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 .



Kuva 6.11. Erilaisilla ulkoseinärakenteen ja ikkunan yhdistelmillä saavutettava julkisivun laskennallinen äänitasoero ΔL_A . Kaikissa neljässä tilanteessa julkisivun kokonaispinta-ala on 10 m^2 , ja huoneen lattiapinta-ala 10 m^2 . Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Rakennuksen ulkokuoren ääneneristyksen mitoituksesta ei ole olemassa viranomaismääräyksiä. Ympäristöministeriön ympäristöoppaassa 108 (Sipari & Saarinen 2003) on esitetty VTT:n laatima mitoitusmenetelmä, joka on esitetty taulukkomuodossa. Ympäristöoppaan menetelmä johtaa kaavamääräyksen äänitasoerosta vaadittavan ilmaaäneneristysluvun kullekin rakennusosalle. Tarkempi, ns. äänitasoeromenetelmä on esitetty käsikirjassa RIL 243-1 (Kylliäinen & Hongisto 2007). Kummallakin menetelmällä on omat etunsa, joita käsitellään jäljempänä. Useimmissa tapauksissa menetelmät johtavat samaan lopputulokseen (Kylliäinen 2005).

6.4.2 Ympäristöopas 108

Ympäristöoppaan 108 (Saarinen & Sipari 2003) mukaan yhden huoneen julkisivua kokonaisuutena koskeva ääneneristyslukuvaatimus saadaan kaavamääräyksen äänitasoeron $\Delta L_{A,vaad}$ perusteella:

$$R_{vaad} = \Delta L_{A,vaad} + K_1 + 7 \quad (6.1)$$

Tekijä K_1 riippuu tarkasteltavan julkisivun pinta-alan S ja lattian pinta-alan S_H suhteesta taulukon 6.1 mukaisesti. K_1 ottaa huomioon muun muassa tarkasteltavan huoneen absorptioalan.

Taulukko 6.1. 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

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 $R_{tr, vaad}$:

$$R_{A,tr,seinä} \geq R_{tr,vaad} + 3 \quad (6.2)$$

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

$$R_{A,tr,yläpohja} \geq R_{tr,vaad} + 5 \quad (6.3)$$

Ovilta ja ikkunoilta vaadittava ilmaääneneristysluku liikennemelua vastaan riippuu niiden pinta-alasta, joka otetaan huomioon tekijällä K_2 (taulukko 6.2).

$$R_A \geq R_{tr,vaad} + K_2 \quad (6.4)$$

Taulukko 6.2. Tekijän K_2 arvot julkisivussa olevien ikkunoiden ja ikkunaovien yhteispinta-alan $\sum S_i$ ja tarkasteltavan julkisivun pinta-alan S suhteen funktiona.

$\sum S_i/S$	$\leq 0,10$	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

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

$$D_{n,e,A,tr} \geq R_{tr,vaad} + 5 \quad (6.5)$$

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 (Kylliäinen 2005).

6.4.3 Äänitasoeromenetelmä

Kun otetaan huomioon ulkona vallitsevan äänikentän epädiffuusisuus ja ikkunan suuntaavuus rakennuksen sisällä, ulkoa sisälle siirtyvän äänen A-painotettu äänitaso saadaan lasketuksi ulkona vallitsevasta äänitasosta $L_{Aeq,u}$ ja ilmaääneneristysluvusta tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ tai raide- ja lentomelua vastaan $R_w + C$. Huoneessa, jonka lattia-ala on 12 m^2 ja absorptioala 10 m^2 , sisälle syntyvä äänitaso $L_{Aeq,s}$ riippuu rakennusosan pinta-alan suhteesta S_i huoneen lattia-alaan S_H (Kylliäinen & Hongisto 2007):

$$L_s = L_u - (R_w + C_{tr}) + 7 + 10 \lg \frac{S_i}{S_H} \quad (6.6)$$

Kaavalla 6.6 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 kunkin rakennusosan tuottaman äänitasoeron $\Delta L_{A,i}$ ratkaisemiseksi:

$$\Delta L_{A,i} = L_s - L_u = (R_w + C_{tr}) - 7 - 10 \lg \frac{S_i}{S_H} \quad (6.7)$$

Äänitasoero lasketaan kunkin rakennusosan kautta erikseen. Tämän jälkeen lasketaan rakennusosien yhdessä tuottama äänitasoero $\Delta L_{A,tot}$, jota verrataan kaavamääräyksen äänitasoeroon $\Delta L_{A,vaad}$:

$$\Delta L_{A,tot} = 10 \lg \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n 10^{-\Delta L_{A,i}/10}} \right) \geq \Delta L_{A,vaad} \quad (6.8)$$

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.

6.5 Parvekelasitusten ääneneristyksen suunnittelu

6.5.1 Äänitason muodostuminen parvekkeelle

Äänitason muodostumiseen parvekkeelle vaikuttaa monta tekijää. Tuotevalmistajat saattavat esittää avattavalle parvekelasitukselle laboratoriossa mitatut ilmaääneneristävyydet, mutta lasitus on vain yksi osa kokonaisuudesta, jonka tuloksena parvekkeelle muodostuu tietty äänitaso. Avattava lasitus kokonaisuutena on yleensä kuitenkin merkittävin ilmaääneneristävyyteen vaikuttava tekijä, mutta muiden tekijöiden merkitys korostuu silloin, kun äänitasoerovaatimus kasvaa. Pelkästään lasituksen määrääminen kaavassa ei siten riitä takaamaan melutasojen toteutumista, sillä parvekkeelle syntyvä melutaso riippuu parvekelasien ääneneristävyydestä, lasien tiivisteistä, välilistoista ja tuuletusraoista, kaiteen rakenteesta ja tiiviydestä, pielien rakenteesta ja ääneneristävyydestä, parvekkeen sisätilan tilavuudesta, parvekkeen absorptioalasta sekä parvekkeen vaipan ja sen osien pinta-aloista. Toisin sanoen parvekelasit tulisi mitoittaa samaan tapaan kuin rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyys, jonka suunnittelemiseksi on olemassa useita menetelmiä. (Kovalainen & Kylliäinen 2016b)

Liikennemelun siirtyminen ulkoa parvekkeelle on pääosin samanlainen ilmiö kuin liikennemelun siirtyminen ulkoa huoneeseen. Rakennuksen sisälle siirtyvän äänen määrä riippuu ulkovaipan rakennusosien pinta-aloista ja ääneneristävyydestä: ääntä siirtyy sitä enemmän ulkoa sisään, mitä suurempi rakennusosan pinta-ala on ja mitä pienempi sen ääneneristävyys on. Lisäksi ääni vaimenee sisällä riippuen siitä, kuinka paljon ääntä vaimentavaa absorptioalaa huoneessa on. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyden mitoitusmenetelmät perustuvat siihen, että perustapauksessa asuinhuoneen absorptioala on noin 10 m^2 (Sipari & Saarinen 2003, Kylliäinen & Hongisto 2008). Erilaisilla korjaustermeillä otetaan huomioon huoneen suurempi koko ja absorptioala.

Parvekettä ja asuinhuonetta erottaa se, että parvekkeella ei ole asuinhuoneelle tyypillistä 10 m^2 absorptioalaa ja parvekkeen vaipparakenne on ilmaääneneristävyydeltään yleensä reilusti heikompi kuin asuinhuoneen ulkoseinä. Parvekkeelle muodostuvan keskiäänitason kannalta mitoittava tilanne on se, että parvekkeella oleskelee yksi ihminen, mutta siellä ei ole lainkaan kalustusta. Parvekkeen absorptioala, joka kuvaa tilassa olevien ääntä vaimentavien pintojen määrää, riippuu lineaarisesti parvekkeen tilavuudesta (Kovalainen 2016). Tämä toimii yhtenä lähtötietona lasitusten suunnittelumenetelmässä. Lisäksi tarvitaan tietoa lasitusten, kaiteiden ja rakojen ääneneristävyydestä (Kovalainen & Kylliäinen 2016b).

6.5.2 Parvekelasitusten ääneneristävyyden mitoitus

Ympäristöministeriön oppaassa (Kovalainen & Kylliäinen 2016a) on esitetty parvekelasitusten valitsemiseksi melualueilla kaksi mitoitusmenetelmää, taulukkomitoitus ja tarkempi menetelmä. Tässä kirjassa esitetään vain taulukkomitoitusmenetelmä. Lasitettujen parvekkeiden meluntorjuntatarve liittyy yleensä liikennemeluun, joten rakennusosien ilmääneneristyslukujen yhteydessä käytetään spektripainotustermejä. Tavallisimmin parvekkeen vaipan ilmääneneristysluvut tarvitaan tieliikennemelua vastaan ($R_w + C_{tr}$).

Parvekkeelle vaipparakenteen äänitasoero $\Delta L_{A,lask}$ voidaan laskea kehitetyllä taulukkomenetelmällä. Äänitasoeron ΔL_A laskentaan tarvitaan seuraavat lähtötiedot:

- parvekelasin laboratoriossa mitattu ilmääneneristysluku kyseistä melulajia vastaan ($R_w + C$ tai $R_w + C_{tr}$)
- parvekelasituksen pinta-ala S_1 [m^2]
- kaidelasin laskennallinen ilmääneneristysluku kyseistä melulajia vastaan (yleensä $R_w + C$ tai $R_w + C_{tr}$)
- kaidarakenteen pinta-ala S_2 [m^2]
- kaidarakenteen viivamaisten rakojen määrä ja pinta-alat (lasivälit)
- parvekkeen tilavuus V [m^3]
- parvekkeelle mahdollisesti tulevan absorptiomateriaalin absorptioala A [m^2]
- mahdollisten kiinteiden lasien tai muiden rakenteiden, kuten betonipieliön ilmääneneristysluvut ja pinta-alat

Rakennusosista käytetään lähtökohtaisesti aina laboratoriossa mitattuja ilmääneneristyslukuja. Lasikaiteen arvona voidaan käyttää vastaavan lasin ilmääneneristävyyttä, johon lisätään viivamaisten rakojen vaikutus (Kylliäinen & Kovalainen 2016a). Laskenta suoritetaan erikseen jokaiselle rakennusosalle, jotka laskennan lopussa yhdistetään. Yksittäisen rakennusosan i laskennallinen äänitasoero $\Delta L_{A,lask,i}$ määritetään seuraavasti:

$$\Delta L_{A,lask,i} = (R_w + C_{tr})_i + K_{S,i} + K_{abs} + K \quad (6.9)$$

Kaavassa 6.9 $K_{S,i}$ on rakennusosan i pinta-alasta riippuva korjaustermi (taulukko 6.3), K_{abs} on parvekkeen absorptioalasta riippuva korjaustermi (taulukko 6.4) ja K on mittauksin määritetty korjaustermi (-5 dB). Lasitetun parvekkeen absorptioalan korjaustermissä K_{abs} otetaan huomioon tyhjän lasitetun parvekkeen tilavuudesta riippuva absorptioala sekä parvekkeella mahdollisesti oleva muu absorptiomateriaali, jonka pinta-ala on S_{abs} [m^2]. Absorptiomateriaalin absorptiokertoimeksi on oletettu 0,8.

Korjaustermillä K otetaan huomioon erilaiset laboratoriomittauksen ja kenttämittauksen väliset erot ja lasituksen rakoihin liittyvät epävarmuudet. Korjaustermi on määritetty

mittauksin, ja sen suuruus on -5 dB (Kovalainen 2016). Muut korjaustermit valitaan taulukoiden 6.3 ja 6.4 perusteella. Väliarvot voidaan interpoloida tarvittaessa.

Taulukko 6.3. Rakennusosan pinta-alasta riippuva korjaustermi K_s [dB].

S_i [m ²]	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	25	30
K_s [dB]	0	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-12	-13	-14	-15

Taulukko 6.4. Parvekkeen absorptioalasta riippuva korjaustermi K_{abs} [dB]. Materiaalin absorptiosuhteeksi oletetaan 0,8.

V [m ³]	S_{abs} [m ²]									
	0	1	2	3	4	5	10	15	20	
5	4	5	6	7	7	8	10	11	12	
10	4	5	6	7	8	8	10	11	12	
15	5	6	7	7	8	8	10	11	12	
20	6	6	7	8	8	9	10	12	13	
25	6	7	7	8	8	9	11	12	13	
30	7	7	8	8	9	9	11	12	13	
35	7	8	8	9	9	9	11	12	13	
40	7	8	8	9	9	10	11	12	13	

Jos lasikaiteen laboratoriossa mitatusta ilmaääneneristysluvusta ei ole tietoa, se voidaan määrittää taulukoiden 6.5 ja 6.6 avulla, kun viivamaisten rakojen (esim. lasivälien ja parvekepieliin päin olevien rakojen) määrä on tiedossa. Määrittystä varten tarvitaan joko raon pinta-alan S_{rako} suhde koko kaiteen S_{kaide} pinta-alaan tai vastaavasti raon leveyden b_{rako} suhde koko kaiteen leveyteen L_{kaide} , kun viivamainen rako on koko kaiteen korkuinen. Lasikaiteen arvon valinta suoritetaan laskemalla viivamaisten rakojen osuus kaiteen kokonaispinta-alasta. Esimerkiksi 2 mm leveä lasiväli 1 m leveällä lasilla on $0,002/1 = 0,002$. Lasikaiteena käytetään yleensä laminoitua lasia 4+4, mutta myös muita lasityyppejä voidaan käyttää. Markkinoilla on esimerkiksi ääneneristyslaminoituja laseja, joiden ilmaääneneristysluvut voivat olla normaaleja lasia parempia.

Taulukko 6.5. Laminoidusta lasista muodostetun kaiteen ilmaääneneristysluku raide- tai lentomelua vastaan R_w+C [dB], kun lasivälit otetaan huomioon.

Lasin paksuus [mm]	Rakojen osuus kaidepinta-alasta (S_{rako}/S_{kaide} tai b_{rako}/L_{kaide}) 1/1000												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3+3	31	24	22	20	19	18	17	17	16	15	15	15	14
4+4	32	25	22	21	20	19	18	17	17	16	16	16	15
5+5	33	26	23	22	20	19	19	18	17	17	17	16	16

Taulukko 6.6. Laminoidusta lasista muodostetun kaiteen ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan R_w+C_r [dB], kun lasivälit otetaan huomioon.

Lasin paksuus [mm]	Rakojen osuus kaidepinta-alasta ($S_{\text{rako}}/S_{\text{kaide}}$ tai $b_{\text{rako}}/L_{\text{kaide}}$) 1/1000												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3+3	29	23	20	19	17	17	16	15	15	14	14	13	13
4+4	30	24	21	20	18	17	17	16	16	15	15	14	14
5+5	31	24	22	20	19	18	17	17	16	16	15	15	15

Kun parvekkeen ulkovaipan kaikilla eri rakennusosilla saavutettavat äänitasoerot on laskettu edellä kuvatulla tavalla, koko ulkovaipan muodostama äänitasoero lasketaan kaavalla:

$$\Delta L_{A,\text{lask}} = \Delta L_{A,\text{lask,min}} + K_{\text{sum}} \geq \Delta L_{A,\text{vaad}} \quad (6.10)$$

Lasketun äänitasoeron tulee olla vähintään yhtä suuri kuin parvekkeen ulkovaipalta vaadittu äänitasoero $\Delta L_{A,\text{vaad}}$. Kaavassa 6.10 $\Delta L_{A,\text{lask,min}}$ on yhdistettävien rakennusosien äänitasoeroista pienempi (yleensä avattavan lasituksen äänitasoero) ja K_{sum} on rakenteiden yhdistämisestä riippuva korjaustermi (taulukko 6.7). Rakennusosia voidaan yhdistää tällä menetelmällä aina kaksi kerrallaan, mutta yhdistyksiä voidaan tehdä peräkkäin haluttu määrä. Yhdistämiseen tarvittava korjaustermi K_{sum} saadaan taulukosta 6.10. Korjaustermin arvon valitsemiseksi tarvitaan yhdistettävien äänitasoerojen absoluuttinen erotus. Väliarvot voidaan interpoloida.

Taulukko 6.7. Äänitasoerojen yhdistämisestä riippuva korjaustermi K_{sum} [dB].

$\Delta L_{A,\text{lask,max}} - \Delta L_{A,\text{lask,min}}$ [dB]	0	1	2	3	4	5	6	8	10	≥ 20
K_{sum} [dB]	-3,0	-2,5	-2,1	-1,8	-1,5	-1,2	-1,0	-0,6	-0,5	0

Luvun 6 lähteet

- Airola, H. 2013. Melun- ja värinän torjunta maankäytön suunnittelussa. Helsinki. Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, ELY-keskuksen opas 02/2013.
- Asemakaavamerkinnot ja -määräykset. 2003. Helsinki, ympäristöministeriö, opas 12.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/49/EY ympäristömelun arvioinnista ja hallinnasta, annettu 25.6.2002.
- Heinonen-Guzejev, M. & Vuorinen, H. S. 2001. Meluherkkyys sekä liikennemelun raportointi ja häiritsevyys. Helsinki, ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 471.
- ISO 717-1. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation.
- Kovalainen, V. 2016. Lasitettujen parvekkeiden meluntorjunnan suunnittelu ja mittaaminen liikennemelualueilla. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.

- Kovalainen, V. & Kylliäinen, M. 2016a. Lasitettujen parvekkeiden ääneneristävyys liikennemelualueilla. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 6/2016.
- Kovalainen, V. & Kylliäinen, M. 2016b. Lasitetun parvekkeen ääneneristys liikennemelua vastaan. Lasirakentaja. Nro 2, s. 4–13.
- Kovalainen, V., Huhtala, T. & Kylliäinen, M. 2021. Pori–Mäntyluoto-testiradan melupäästömitaukset. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 14–19.
- Kylliäinen, M. 2005. Rakennuksen ulkokuoren rakennusosilta vaadittava ääneneristävyys. Akustiikkapäivät 2005. Kuopio, 26.–27.9., Akustinen Seura ry, s. 78–83.
- Kylliäinen, M. 2008. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristykseen suunnittelu. Rakentajain Kalenteri 2009, s. 382–393.
- Kylliäinen, M. 2021. Melu rakentamisen ohjaajana. Ympäristö ja Terveys. Nro 2, s. 6–10.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2008. Mittausmenetelmä rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskevan asemakaavamääräyksen toteutumisen valvomiseksi, Rakenteiden Mekaniikka. Vol. 41(1), s. 37–43.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. RIL 243-1 Rakennusten akustinen suunnittelu: Akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Liikennemelun huomioon ottaminen kaavoituksessa. 2001. LIME-työryhmän mietintö. Helsinki, ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 493.
- Liikenteen kehitys Helsingissä 2021. 2022. Helsinki, Helsingin kaupunki, kaupunkiympäristön toimiala, kaupunkiympäristön julkaisuja 2022:23.
- Nielsen H. et al. 1996. Road traffic noise: the Nordic prediction method. Copenhagen, Nordic Council of Ministers, TemaNord 1996:525.
- Nielsen H. et al. 1997, Railway traffic noise: the Nordic prediction method. Copenhagen, Nordic Council of Ministers, TemaNord 1997:524.
- Sandberg, U. & Ejsmont, J.A. 2002. Tyre/road Noise Reference Book. Kisa, Informex.
- Sarkkinen, S. 1992. Ehdotus valtioneuvoston päätökseksi melutason ohjearvoista. Helsinki, ympäristöministeriö, muistio 26.10.1992.
- Sipari, P. & Saarinen, A. 2003. Rakennuksen julkisivun ääneneristävyuden mitoittaminen. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 108.
- VnP 993/1992. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMa 360/2019. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä annetun ympäristöministeriön asetuksen 5 ja 6 §:n muuttamisesta. Helsinki, ympäristöministeriö.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

7

Liikennetärinän ja runkomelun torjunta

”Asukkaiden ja viranomaisten vaatimukset asuin-
ympäristön laadulle ovat lisääntyneet. Liiken-
teestä aiheutuva runkoääni tulisi ottaa huomioon
liikenteestä aiheutuvan melun ja tärinän tapaan
kaavoitus- ja rakentamispäätöksiä tehtäessä.
Vaikka laissa ja asetuksissa edellytetään otetta-
vaksi huomioon ympäristöhaitat, jotka aiheutuvat
maaliikenteen aiheuttamasta maaperäisestä vä-
rähTELystä ja siitä syntyvästä runkoäänestä, oh-
jeistuksen puuttuessa haittojen arviointi jää usein
puutteelliseksi.”

Erikoistutkija Asko Talja 2009

7.1 Tärinän ja runkomelun merkitys

7.1.1 Tärinän ja runkomelun vaikutukset

Liikenteen aiheuttaman runkomelun ja tärinän huomioon ottaminen talonrakennushankkeissa on erittäin tärkeää. Mikäli niitä ei oteta huomioon, voidaan päätyä tilanteeseen, jossa rakennusta ei voida ottaa käyttöön suunnitellun käyttötarkoituksen mukaisesti. Tärinä ja runkomelu vaikuttavat asuinviihtyvyyteen, ja niillä voi olla vaikutusta ihmisen terveyteen esimerkiksi häiriintyneen unen takia (Jauhiainen et al. 2007).

Asuinviihtyvyyden ja terveyden lisäksi melun ja värähtelyn aiheuttamat riskit otetaan huomioon rakennushankkeissa, joissa on erityisvaatimuksia. Esimerkiksi elokuvateattereissa, konserttisaleissa ja muissa esiintymiseen tarkoitetuissa tiloissa tai laboratoriotiloissa on yleensä vaatimuksia suurimmille sallituille melu- ja värähtelytasoilta. Esimerkiksi sairaaloissa kuvantamislaitteilla on taustavärähtelyvaatimus asennuspaikan lattialle ja elokuvateattereissa on taustameluvaatimus katsomolle.

Tärinä ja melu ovat lisääntyneet asutuissa ympäristöissä viimeisten vuosikymmenten aikana liikennemäärien lisääntymisen ja asumisen keskittymisen vuoksi. Tärinää ja runkomelua voivat aiheuttaa esimerkiksi raideliikenne, räjäytystyöt, remontointi, paalutus ja muut maanrakennustyöt. Näistä raideliikenne – rautatiet, raitiotiet ja pääkaupunkiseudulla metro – on selvästi yleisin huomioon otettava tärinän ja runkomelun lähde talonrakennushankkeissa. Rakentamisen aikana tulee ottaa huomioon rakennustöistä, kuten paalutuksesta, johtuva tärinä ja melu, mutta niitä ei käsitellä tässä kirjassa.

7.1.2 Ihmisen havaitsemat ilmiöt

Rakennusrunkoon maaperän kautta kytkeytyvä värähtely voi aiheuttaa rakennuksessa ilmiötä, jotka voidaan kokea häiritsevinä tai epämiellyttävinä. Ilmiöt jaotellaan tyypillisesti kahteen luokkaan niiden aiheuttaman havainnon perusteella.

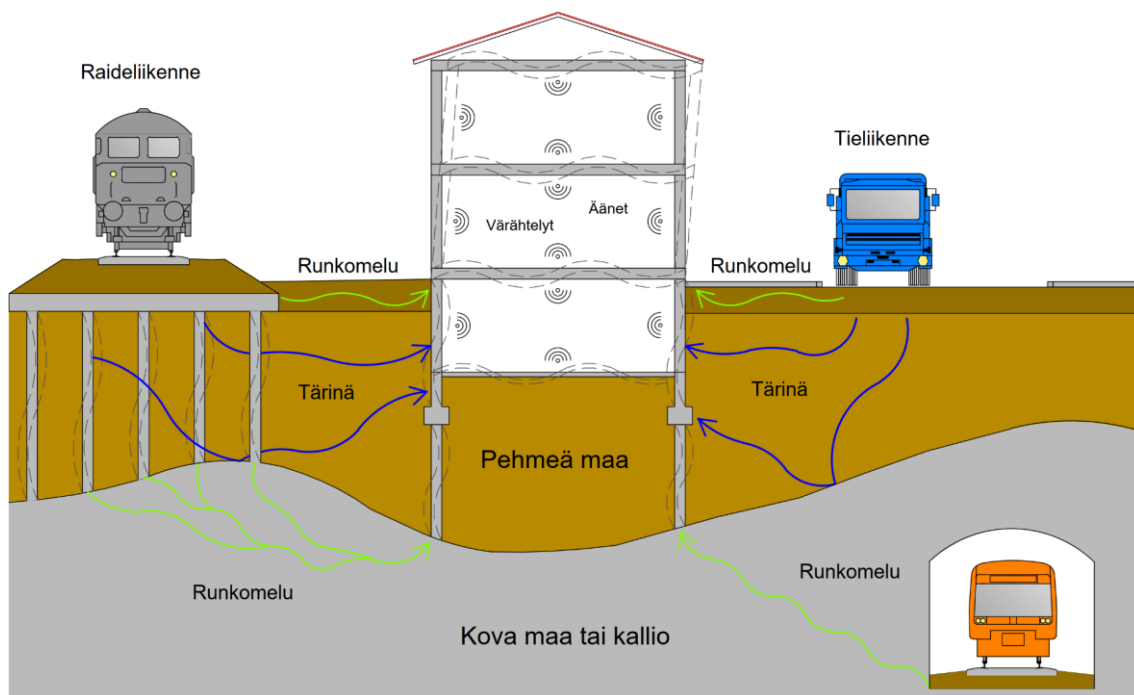
Mikäli värähtely on riittävän voimakasta ja taajuus on 16...500 Hz, värähtely voidaan aistia rakennuksen ääntä säteilevistä pinnoista kuuloaistin avulla. Tästä ilmiöstä käytetään yleensä, ja myös tässä esityksessä, nimeä runkomelu.

Tärinä on ihmisen tuntoaistinsa kautta havaitsemaa pienitaajuisia värähtelyä taajuusalueella 1...80 Hz. Useasti tärinä havaitaan lattian pystysuuntaisena värähtelynä, mutta se voidaan havaita myös vaakasuunnissa. Pystysuuntainen värähtely yleensä vahvistuu enemmän kuin vaakasuuntainen värähtely johtuen lattian muita rakenteita suuremmasta mobiliteetista. Lisäksi tärinän havaitsemiseen saattaa liittyä sekundääristä ilmaaänenä kuuluttavaa melua. Esimerkiksi kaapissa olevat astiat saattavat osua toisiinsa tärinän vaikutuksesta ja aiheuttaa kuuluttavaa kilinää.

7.2 Värähtelyn synty ja eteneminen rakennukseen

7.2.1 Värähtelyyn voimakkuuteen vaikuttavat tekijät

Liikenteen aiheuttaman värähtelyn ja runkomelun voimakkuuteen vaikuttavat värähtelyn lähde, etenemisreitti eli maa- tai kallioperä, sekä värähtelyn vastaanottaja eli rakennus. Tässä lähteeksi lasketaan liikenneväline ja väylä, jolla liikenneväline liikkuu. Vastaanottajaan kuuluu rakennuksen maanpäällisen osan lisäksi perustukset. Liikenteestä johtuvaa värähtelyä rakennuksissa aiheuttaa raideliikenne ja autoliikenne, kun taas runkomelua aiheuttaa pääsääntöisesti ainoastaan raideliikenne. Kuvassa 7.1 on esitetty periaatetasolla eri liikennevälineiden aiheuttamien värähtelyjen reittejä.



Kuva 7.1. Värähtely etenee liikenneväylältä maaperän kautta rakennuksen perustuksiin monia reittejä

7.2.2 Vahvistuminen ja vaimeneminen

Värähtely vahvistuu ja vaimenee maaperässä ja rakenteissa. Vahvistuminen tapahtuu ominaistaajuuksilla ja vaimeneminen riippuu materiaalin ja rakenteen ominaisuuksista. Ominaistaajuudella tapahtuvasta voimistumisesta käytetään nimitystä resonanssi.

Usein rakenteiden ja maaperän ominaisuuksia esitetään yksinkertaistettuna massa–jousi–vaimenninjärjestelmällä, jonka liikeyhtälö on (Heikkinen 2019):

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + r \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t), \quad (7.1)$$

missä $F(t)$ on järjestelmään syötetty voima, m on massa, r on vaimennus, k on jousivakio, $x(t)$ on liikepoikkeama ajan suhteen ja $dx(t)/dt$ sekä $dx(t)/dt^2$ on liikepoikkeaman ensimmäisen ja toisen asteen derivaatta ajan t suhteen, eli nopeus ja kiihtyvyys. Kun voima $F = 0$ ja vaimeneminen $r = 0$, yhtälöstä 7.1 voidaan ratkaista järjestelmän ominaistajuus värähtelynopeuden suhteen (Heikkinen 2019):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (7.2)$$

Maaperälle vaimennus esitetään usein Rayleigh-vaimennuksena ja rakenteille hysteereettisenä tai viskoottisena vaimennuksena (Oksanen 2021). Kaava 7.2 on usein hyödyllinen, kun arvioidaan värähtelysystemin eri osien ominaistajuuksien vaikutuksia vahvistukseen. Vaimentumista kuvataan usein vaimennussuhteena (Heikkinen 2019)

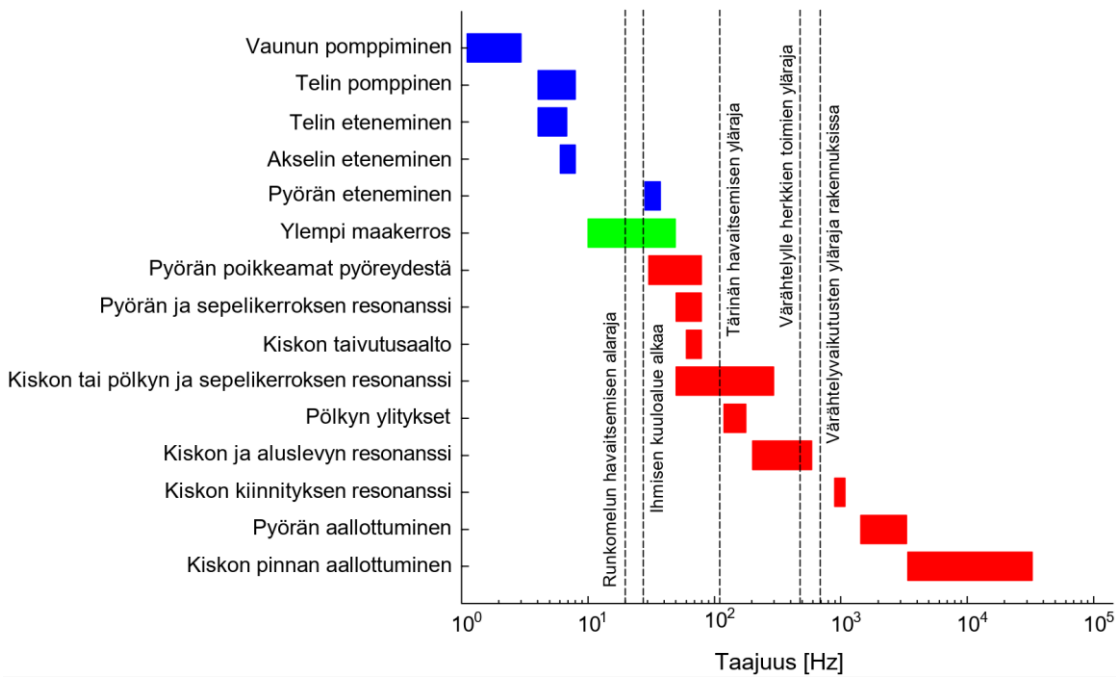
$$\eta = \frac{r}{2\sqrt{km}} \quad (7.3)$$

Värähtely vaimenee rakennuksissa kuulumattomiin tai huomaamattomiin jonkin ajan kuluulta siitä, kun järjestelmään syötetty voima F on loppunut. Vaimentumista voidaan arvioida suoraviivaisesti samalla tavalla kuin huoneakustiikan jälkikaiunta-aikaa. Vaimennuksen suhteen rakenteellinen jälkikaiunta-aika voidaan ilmoittaa (Pura 2021)

$$T = \frac{6 \ln(10)}{r/m} = \frac{6 \ln(10)}{4\pi f_0 \eta} \quad (7.4)$$

Tästä nähdään, että mittaamalla järjestelmän jälkikaiunta-aika T ja ominaistajuus f_0 voidaan suoraan arvioida järjestelmän vaimennussuhde η .

Junien aiheuttamien resonanssien esiintyminen eri taajuusalueilla on esitetty kuvassa 7.2. Vaunuun ja junan etenemiseen liittyvät resonanssit sekä ylemmän maakerroksen resonanssi aiheuttavat värähtelyn voimistumista tärinätaajuuksilla. Muut resonanssit esiintyvät runkomelutaajuuksilla. Tieliikenteen resonanssit esiintyvät pääsääntöisesti tärinätaajuuksilla ja ne johtuvat raskaan tieliikenteen kohdalla ainakin korin, lavan ja telin etenemisestä sekä mahdollisesta pomppimisesta. Tien pinnan aallottuminen ja muut säännölliset epätasaisuudet tien pinnassa voivat aiheuttaa resonansseja runkomelutaajuuksilla.



Kuva 7.2: Tyypillisiä junaliikenteen ja radan resonanssien taajuusalueita. Piirretty uudelleen viitteen (Connolly et al. 2014) mukaisesti.

7.2.3 Värähtelyn lähde

Värähtelyherätteen aiheuttaa epätasaisuudet liikennevälineen pyörän ja väylän välillä sekä liikennevälineen oma liikkuva massa. Liikennevälineen liikkuva massa aiheuttaa väylän alla olevan maaperän hetkellisen painumisen, josta syntyy värähtelyä maaperään (Oksanen 2021).

Junan liikkussa kiskoilla, junan aiheuttama liikepoikkeama siirtyy ratarakenteesta maaperään. Lisäksi epätasaisuudet kiskon pinnassa ja junan pyörässä aiheuttavat impulssimaista herätettä, joka kytkeytyy ratarakenteen kautta maaperään. Tärinän kannalta merkittävämpi ilmiö on rataan ja maaperän aiheutettu liikepoikkeama ja runkomelun kannalta merkittävämpi on ratarakenteen kautta maaperään kytkeytyvä suuritaajuisempi heräte.

Maantieliikenteessä pyörän ja väylän välinen rajapinta on yleensä sen verran pehmeä, että runkomelua syntyy lähinnä isoimpien epäjatkuvuuskohtien, kuten kaivon kansiin, kohdalla. Tärinän kannalta herätettä syntyy enemmän epätasaisissa väylän osissa, kuten esimerkiksi hidastetöyssyissä (Talja 2005).

Lähteen aiheuttaman värähtelyn voimakkuuteen vaikuttaa yleisesti kulkuneuvon tyyppi, kunto, paino ja nopeus sekä väylän kunto, rakenne ja perustamistapa (Talja, 2004). Runkomelun kannalta pyörien ja radan kunto sekä junatyyppi ovat merkittäviä tekijöitä (Talja & Saarinen 2009). Tärinän kannalta merkitsevimpiä muuttujia ovat junan massa ja radan perustamistapa (Talja 2005). Tarkastelussa jaotellaan värähtelyä aiheuttavat lähteet yleensä liikennetyypin mukaan (Talja & Saarinen 2009).

7.2.4 Etenemisreitti

Liikennevälineen aiheuttama liikepoikkeama etenee maaperässä aaltoliikkeenä. Maan sisällä etenevät runkoaallot, joihin kuuluvat pitkittäinen aalto (P-aalto) ja poikittainen aalto (S-aalto). Pitkittäisessä aaltoliikkeessä aalto etenee kuten ääni ilmassa. Väliaineen partikkelit värähtelevät edestakaisin aaltoliikkeen suuntaan oman lepotilan paikkansa suhteen. Partikkeleiden liike aiheuttaa kokoonpuristumista ja harvenemista alueittain, mikä johtaa paineen ja tilavuuden muutoksiin. Poikittainen aalto aiheuttaa väliaineen partikkelien liikkumista aallon etenemissuuntaan nähden kohtisuoraan. Väliaineen partikkelit siirtyvät ja palaavat takaisinpäin poikittaisen aallon kulkiessa sen läpi, mutta tilavuus ei kuitenkaan muutu (Oksanen 2021).

Kun maan sisällä etenevät aallot saapuvat pintaan tai pinnassa herätetään aalto, syntyy pinta-aaltoja pitkittäis- ja poikittaisaaltojen summana. Pinta-aaltoja on useita eri tyyppisiä, mutta tärinän ja runkomelun kannalta merkittävimmän on Rayleigh-aalto, joka liikuttaa väliaineen partikkeleita elliptisesti vastakkaiseen suuntaan aallon etenemissuuntaan nähden. Rayleigh-aalto on P-aallon ja S-aallon pystysuuntaisen komponentin summa. Elliptinen liike johtuu siitä, että P- ja S-aallon summan komponenteilla on eri amplitudit. Rayleigh-aalto vaimenee eksponentiaalisesti syvyyden suhteen ja on siis suurimmillaan maan pinnalla. Talon rakennusprojektin kannalta pinta-aaltojen merkitys värähtelyn etenemisessä on merkittävä, sillä arviolta 67 % värähtelyn energiasta on pinta-aallossa. P-aalto ja S-aalto välittävät 26 % ja 7 % energiasta (Oksanen 2021).

Aaltojen etenemisnopeus riippuu aaltotyyppistä ja maaperän ominaisuuksista. Pitkittäisaallon (P) nopeus on (ISO 14837-32)

$$c_P = \sqrt{\frac{M_{\max}}{\rho}}, \quad (7.5)$$

poikittaisaallon (S) nopeus on

$$c_S = \sqrt{\frac{G_{\max}}{\rho}}, \quad (7.6)$$

missä M_{\max} on maaperän elastinen pituussuuntainen moduuli G_{\max} on maaperän elastinen liukumoduuli ja ρ on maaperän tiheys. Kun käytetään tunnettua liukumoduulin ja elastisen moduulin välistä yhteyttä (ISO 14387-32)

$$M_{\max} = \frac{2(1-\nu_0)G_{\max}}{1-2\nu_0} \quad (7.7)$$

voidaan pitkittäisaallonnopeus kirjoittaa muodossa

$$c_P = \sqrt{\frac{2(1-\nu_0)}{1-2\nu_0}} c_S. \quad (7.8)$$

Kaavasta 7.8 nähdään, että pitkittäisaallon nopeus on aina suurempi kuin poikittaisaallon nopeus. Rayleigh-aallon nopeus voidaan arvioida kaavalla (Oksanen 2021)

$$c_R = \left(\frac{0.862 + 1.14v_0}{1 + v_0} \right) c_S, \quad (7.9)$$

josta nähdään, että Rayleigh-aallon nopeus on vähemmän kuin poikittaisaallon nopeus, siis $c_P > c_S > c_R$.

Värähtely etenee ja vaimenee eri maaperissä eri tavalla. Värähtelevän aallon amplitudi A_1 etäisyydellä d_1 esitetään usein Bornitzin mallilla. Malli kuvaa aallon vaimenemista homogeenisessä puoliavaruudessa suhteessa amplitudiin A_0 etäisyydellä d_0 seuraavasti (ISO 14837-32):

$$\frac{A_1}{A_0} = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^\beta \exp(\alpha(d_0 - d_1)), \quad (7.10)$$

jossa β on geometrisen vaimennuksen parametri ja α on maaperän vaimennuksen parametri. Etäisyysstermissä $(d_0 - d_1)$ tulisi ottaa huomioon mikä on tarkasteltavan aallon etenemisreitti. Pinta-aalto etenee pintaa pitkin ja runkoaalto maan tai kallioperän sisällä. Kaava 7.10 pätee ainoastaan niillä alueilla, joissa yksi aaltotyyppi on muita voimakkaampi.

Geometrista vaimennusta havainnollistetaan usein vertaamalla sitä tyynen veden pintaan tiputetun kiven aiheuttamien aaltojen vaimentumiseen etäisyyden suhteen (Törnqvist & Talja, 2006). Kuten mainittu, geometrinen vaimennustermi β liittyy aaltotyyppiin ja lisäksi lähteen geometriaan. Geometrisen vaimennuksen arvoja on esitetty homogeeniselle puoliavaruudelle taulukossa 7.1. Käytännössä liikennevälineet eivät ole piste tai viivalähteitä vaan jotain siltä väliltä ja maaperä saattaa vaihdella alueellisesti. Tällöin vaimenemismallin parametri β on jollain alueella taulukon 7.1 arvojen 0,0...2,0 välillä. Maaperän vaimennuksen parametrien esimerkkejä on annettu taulukossa 7.2 ja kuvassa 7.3. on esitetty vaimennus eri maaperän sisäiselle vaimennuskertoimelle.

Käytännössä molemmat vaimennusparametrit ovat taajuusriippuvia. Maaperätermin taajuusriippuvuutta voidaan kuvata esimerkiksi lineaarisesti (Hellberg 2008):

$$\alpha = \pi\gamma f/c, \quad (7.11)$$

missä γ on jokin vaimennuskerroin, f on taajuus, ja c on aallonnopeus.

Yleissääntönä voidaan pitää sitä, että pienitaajuinen värähtely (1–80 Hz) etenee pehmeissä maaperissä helpommin kuin kovissa maaperissä ja runkomelu (16–500 Hz) etenee kovissa maaperissä helpommin kuin pehmeissä maaperissä. Pehmeäksi maaperäksi voidaan luokitella esimerkiksi savi, siltti, turpeet ja näiden eri muodot. Kovia maaperiä ovat esimerkiksi moreeni, hiekka ja kallio.

Taulukko 7.1. Aaltotyyppien geometrinen vaimeneminen maaperässä (Hellberg 2008).

Lähteen sijainti	Lähteen tyyppi	Etenevä aaltotyyppi	β
Maanpinta	Pistelähde	Runkoaalto	2,0
		Pinta-aalto	0,5
	Viivalähde	Runkoaalto	1,0
		Pinta-aalto	0,0
Maan sisällä	Pistelähde	Runkoaalto	1,0
	Viivalähde	Runkoaalto	0,5

Taulukko 7.2. Maaperän ominaisuuksia (Törnqvist & Talja, 2006). Painokairausvastusta ja suljettua leikkauslujuutta ei ole tässä esitetty toisin kuin viitteessä (Törnqvist & Talja, 2006).

Maaperän tyyppi	v_s [m/s]	E [Mpa]	α	ν
Pehmeä savi, vesipitoisuus 50...120 %	< 80	< 3	0,010...0,040	0,45...0,5
Pehmeä savi	80...120	3...5	0,020...0,040	0,45...0,5
Sitkeä savi	100...200	4...10	0,030...0,060	0,30
Kova savi	50...400	10...100	0,050...0,070	0,30
Löyhät välimaalajit (siltit, silttiset hiekat)	80...250	15...40	0,020...0,050	0,20...0,40
Tiiviit välimaalajit (siltit, silttiset hiekat)	150...400	20...80	0,010...0,040	0,20...0,40
Löyhät hiekat	100...200	30...60		0,20...0,35
Tiiviit hiekat ja löyhät keskitiiviit sorat	150...250	90...180	0,004...0,035	0,20...0,35
Tiiviit sorat ja moreenit	200...500	400... 1000	0,003...0,060	0,20...0,30
Iskostuneet moreenit	400...800	1 000... 3 000	0,010...0,110	0,30...0,40
Kallio	> 700	5 000... 20 000	0,010	0,45

Sisäinen vaimennus α on annettu pienillä muodonmuutostasoilla (liukumä $\gamma < 10^{-4}$... 10^{-5}) ja keskimääräisessä jännitystilassa $\sigma_m = 100$ kPa.

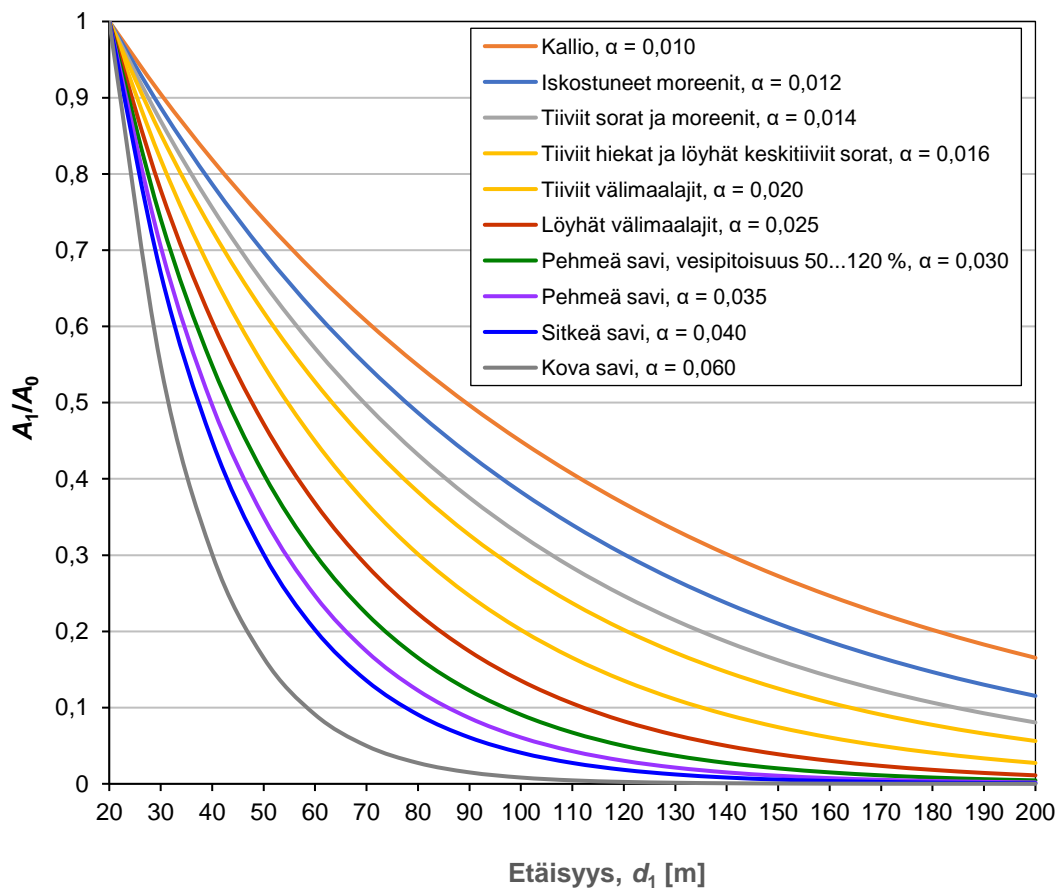
v_s : Poikittaisaallon (S-aallon) etenemisnopeus

E : Youngin moduuli, kimmomoduuli

α : materiaalinen sisäinen vaimennus

μ : Poissonin suhde

Maaperän vaimentumisparametreja voidaan arvioida epäsuorasti painokairauksen (SPT, standard penetration test) tai puristinkairauksen (CPT, cone penetration test) tuloksista (ISO 14837-32). Selvästi luotettavampia tuloksia kuitenkin saadaan seismisillä menetelmillä, jotka mittaavat värähtelyn etenemistä suoraan (ISO 14837-32). Seismisiä menetelmiä ovat muun muassa, pinta-aaltomenetelmät, seisminen CPT ja ristireikä-menetelmä (Crosshole) (ISO 14837-32). Pinta-aaltomenetelmien etuna on, että maaperän parametreja voidaan arvioida ilman kairauksia ja menetelmällä saadaan mitattua isoja alueita verrattuna muihin menetelmiin (ISO 14837-32).



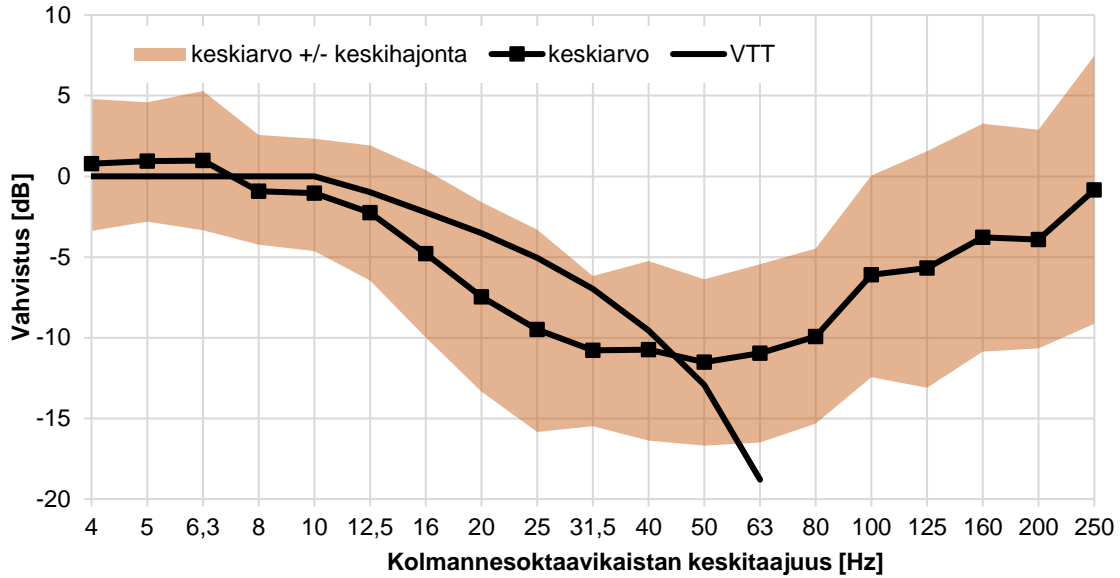
Kuva 7.3. Etäisyysvaimennus kaavan 7.10 mukaisesti viivalähteelle $\beta = 0$ ja referenssietäisyydellä $d_0 = 20$ m.

7.2.5 Rakennus ja perustukset

Värähtely kytkeytyy perustusten kautta rakennukseen ja etenee sieltä rakennusrunkoon. Värähtelyn kytkeytymiseen rakennukseen vaikuttavat rakennuksen koko, perustamistapa, rakenneosien massat ja jäykkyydet (Talja 2004).

Rakennuksen perustamistapa vaikuttaa värähtelyn kytkeytymiseen merkittävästi. Kytkeytyminen on tapauskohtaista, mutta yleistykseenä voidaan todeta, että runkomelu ei vaimene perustuksissa, mikäli rakennus on perustettu lähelle tai suoraan kallioperään tai kitkamaahan (Talja 2008). Maanvaraisesti pehmeälle maaperälle perustetussa rakennuksessa runkomelu yleensä vaimenee maaperästä perustuksiin siirryttäessä.

Tärinätaajuuksilla värähtely keskimääräisesti voimistuu talon perustusten kautta rakennusrunkoon siirryessään (Talja 2005). Vahvistuminen johtuu useasta eri seikasta, mutta yksi isoimpia tekijöitä on paalut, jotka voivat virittyä samalle taajuudelle kuin maaperässä esiintyvä värähtely. Kuvassa 7.4 on esitetty värähtelyn kytkeytyminen taajuuden suhteen arvioituna.



Kuva 7.4. Värähtelyn kytkeytyminen maaperästä rakennuksen perustuksiin RIVAS-projektin mitauksissa ja VTT:n perustusten pienennyskerroin k_{per} (Talja 2011). RIVAS-projektin data on uudelleen piirretty lähteen (Villot et al. 2012) perusteella.

Maaperän suhteen voidaan yleisesti todeta, että tyypillisesti tärinä ei aiheuta riskiä asuinviihtyvyydelle, kun talo perustetaan kitkamaalle tai kallioperälle. Toisaalta runkomelu ei yleensä aiheuta riskiä asuinviihtyvyydelle pehmeillä maaperillä.

Kuultavaksi runkomeluksi värähtely muuttuu rakennuksen pinnoilla tapahtuvan värähtelyn myötä. Pinnan säteilytehokkuudella σ ja pinta-alalla A on merkittävä vaikutus siihen, kuinka suuri osa värähtelystä muuntuu kuultavaksi meluksi. Äänitehoa, jonka pinta (1) tuottaa voidaan arvioida esimerkiksi tilastollisen energia-analyysin (SEA, eng. *statistical energy analysis*) mukaisesti (Oksanen 2021):

$$L_{p,av} = 10 \log_{10}(\langle \tilde{v}_1^2/v_0^2 \rangle) + 10 \log_{10}(\sigma_1) + 10 \log_{10}(4A_1/A_S) \quad (7.12)$$

missä $\langle \tilde{v}_1^2 \rangle$ on pinnan värähtelyn nopeuden tehollinen arvo keskiarvotettuna koko pinnan yli, $v_0 = 50 \times 10^{-9}$ m/s on värähtelyn nopeuden referenssitaso, A_1 on säteilevän pinnan pinta-ala ja A_S on huonetilan absorptioala. Kaavassa 7.12 pinta-ala on helposti arvioitavissa, värähtelyn nopeus riippuu herätteestä ja säteilytehokkuus pinnan ominaisuuksista.

Säteilytehokkuus on taajuusriippuva termi ja vaikuttaa näin ollen runkomelun tasoon merkittävästi. Säteilytehokkuuteen vaikuttaa materiaalin dimensiot ja materiaalin muut ominaisuudet, mm. Youngin moduuli ja tiheys (Pura 2021). Säteilytehokkuus on noin 1, kun taajuus f on hieman suurempi kuin pinnan koinsidenssin rajataajuus f_c (esitelty kapaleessa 3.2.1) ja suurimmillaan juuri koinsidenssin rajataajuudella (Pura, 2021). Koinsidenssin rajataajuutta pienemmillä taajuuksilla säteilyindeksi on selvästi pienempi kuin 1 (Pura 2021). Erityisesti betonirakennuksissa rakenteiden koinsidenssitäajuuudet voivat olla runkomelun taajuusalueella ja aiheuttaa runkomelun voimistumista, mikäli

runkomelun herätteen merkitsevät taajuudet ovat suurempia tai yhtä suuria kuin koinsidenssin rajataajuus.

Tärinä voimistuu useimmiten eniten rakennuksen välipohjissa, koska välipohjien alimmat ominaistajuudet ovat usein virittyneet samalle taajuusalueelle kuin tärinäheräte. Välipohjien ominaistajuuksiin vaikuttaa välipohjanpituus, leveys, paksuus, tuenta eli useimmiten jänneväli ja materiaali.

7.3 Lainsäädäntö ja ohjeet

7.3.1 Kaavoitus, maankäyttö ja rakentaminen

Alueiden käytön suunnittelua ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999), jonka tavoitteena on turvallinen, terveellinen ja viihtyisä ympäristö. Maankäyttö- ja rakennusasetus (895/1999) edellyttää tärinä- ja runkomeluselvitystä kaavoitusvaiheessa. Samassa asetuksessa ohjeistetaan, että rakennuksen suunnitteluvaiheessa tärinä- ja runkomeluselvitykset tulee toimittaa rakennusvalvontaviranomaiselle. Lisäksi maantielaissa (503/2005) edellytetään ympäristön huomioon ottamista. Ympäristövahinkojen korvaamista koskevan lain (737/1994) mukaisesti melusta ja tärinästä aiheutuvasta vahingosta korvausvelvollinen on vahingon aiheuttaja (Talja et al. 2008, Talja & Saarinen 2009).

7.3.2 Ohjearvot

VTT:n ohjeen mukaan hyvät asuinolosuhteet voidaan saavuttaa, kun värähtely on alle 0,10 mm/s (Talja et al. 2008) ja asuinrakennuksille suositellaan, että värähtely on alle 0,3 mm/s. Runkomelulle suositellaan asuinrakennuksille pienempää tasoa kuin 30 dB tai 35 dB (Talja & Saarinen 2009). Muut suositukset on esitetty taulukossa 7.3. Uudessa SFS-standardissa on rakennuksille annettu laatuluokituksia runkomelun ja tärinän suhteen (SFS 5097:2022). Uusille asuinrakennuksille laatuluokat noudattelevat taulukossa 7.3 annettuja arvoja.

Taulukon 7.3 suositusarvot sisältyvät myös lainsäädäntöön. Ympäristöministeriön asetukseen rakennuksen ääniympäristöstä (796/2017) liittyvässä ohjeessa asuinrakennuksille on annettu ohjearvoksi tärinälle < 0,3 mm/s ja runkomelulle < 30 dB tunneleissa ja < 35 dB avoradalla (YMo 2018).

Taulukko 7.3. Tärinän (Talja et al. 2008) ja runkomelun suositusarvot (Talja & Saarinen 2009).

Tärinän suositusarvoja		
Luokka		$v_{w,95}$
A	Hyvät asuinolosuhteet Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyä Suhteellisen hyvä olosuhteet	$\leq 0,10$ mm/s
B	Ihmiset voivat havaita värähtelyä, mutta ne eivät ole häiritseviä	$\leq 0,15$ mm/s
C	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa. Keskimäärin 15 % asukkaista pitää värähtelyä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöstä.	$\leq 0,30$ mm/s
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä.	$\leq 0,60$ mm/s
Runkomelun suositusarvoja		
Rakennustyyppi		L_{prm} [dB]
Radio-, tv- ja äänitysstudiot, konserttitalit		25...30
Asuinhuoneistot		30/35 ¹⁾
Hoito- ja sosiaalihuollon laitokset, majoitustilat		30/35 ¹⁾
• potilashuoneet, majoitustilat		
• päiväkodit, lasten ja henkilökunnan oleskeluun tarkoitetut huoneet		
Kokoontumis- ja opetustilat		35
• luokahuoneet, luentosalit, kirkot ja muut huonetilat, joissa edellytetään yleisön saavan hyvin puheesta selvän ilman äänentoistolaitteiden käyttöä		
• muut kokoontumistilat kuten teatterit ja kirjastot		
Toimistot, kaupat, näyttelytilat, museot		40/45 ¹⁾

¹⁾ Avoradat

7.4 Tärinän ja runkomelun mittaaminen

7.4.1 Mittausten tarkoitus

Talonrakennushankkeissa mittauksiin perustuvien selvitysten tarkoituksena on selvittää, onko rakennuspaikalla odotettavissa runkomelu- tai tärinäriskeä. Mittaustulosten perusteella arvioidaan tärinä- ja runkomeluriskien suuruutta. Mittaustuloksia voidaan käyttää myös tarkemman mallinnuksen lähtötietoina.

7.4.2 Mittalaitteet

Värähtelymittausten tuloksista voidaan johtaa tärinän ja runkomelun arvot. Runkomelua voidaan standardin ISO 14837-1 mukaan mitata värähtelyn lisäksi myös ilmaäänä. Runkomelun mittaaminen ilmaäänä vaatii olemassa olevan kohteen. Värähtelystä muunnos ilmaääneksi on tapauskohtaista ja riippuu mm. käytetyistä materiaaleista, kuten on esitetty kaavassa 7.12.

Värähtelyä mitataan kiihtyvyyssantureilla tai nopeusantureilla ja päätelaitteella. Mikäli signaalit tallennetaan, analyysi voidaan tehdä jälkikäteen ja tällöin päätelaite korvataan tallentimella. Muunnokset kiihtyvyyden ja nopeuden välillä ovat laskennallisesti mahdollista toteuttaa derivoimalla tai integroimalla. Esimerkiksi kiihtyvyyssanturin värähtelykiihtyvyyden signaali voidaan muuttaa suoraviivaisesti integroimalla värähtelynopeudeksi tai edelleen uudelleen integroimalla värähtelyn liikepoikkeamaksi. Ilmaäänä esiintyvää runkomelua voidaan mitata mikrofoneilla ja äänitasomittareilla.

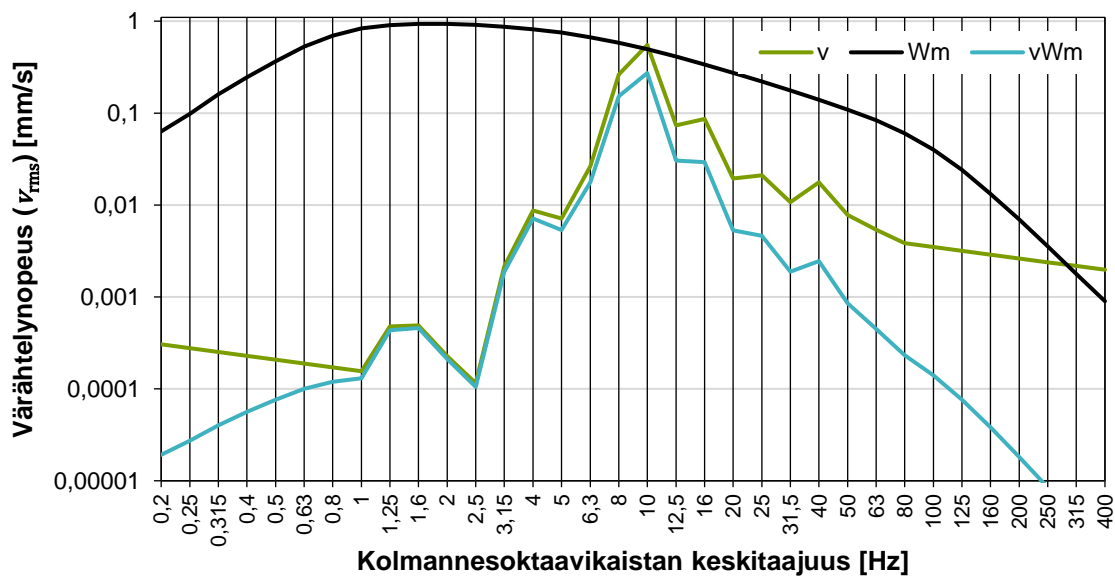
Värähtelyä mittaavien laitteiden teknisiä vaatimuksia on esitetty standardissa ISO 8041 ja äänitasomittareiden vaatimuksia on esitetty standardissa IEC 61672. Molemmat standardit on suunnattu laitevalmistajille tai laitteen laboratoriotestien ohjeeksi, mutta mittaajan olisi hyvä olla tietoinen, noudattaako käytetty laite näitä standardeja.

Värähtelyn mittaamisessa mittalaitteen tulisi pystyä mittaamaan värähtelynopeutta välillä 5×10^{-4} mm/s ... 100 mm/s tai kiihtyvyyttä välillä 3×10^{-6} m/s² ... 500 m/s² (ISO 14837-1). Äänitason mittaamiseen ei ole annettu vastaavaa toiminta-aluetta kuin värähtelyn mittaamiseen, mutta mikäli ohjearvojen täyttymistä halutaan luotettavasti todentaa mittaamalla, olisi signaali-kohinasuhteen hyvä olla vähintään 10 dB. Näin ollen ohjearvojen perusteella äänitasomittareiden taustamelutason tulisi olla $L_{Aeq} < 20$ dB taajuuskaisalla 16...500 Hz. Vaatimukset värähtelynopeuden pienimmistä tasoista ja äänitasomittarin taustamelusta ovat nykymittalaitteille mahdollisia, mutta myös melko vaativia. Pienempi taustakohinataso laitteissa yleensä tarkoittaa myös kalliimpaa hintaa laitteelle. Mittaajan tulisi olla tietoinen omien laitteidensa rajoituksista.

Mittalaitteiden taajuusalueen tulisi olla mitattavan ilmiön mukainen. Runkomelun ja tärinän tapauksessa mittalaitteiden tulisi mitata taajuusaluetta 1...500 Hz.

7.4.3 Mitattavat suuret

Standardissa ISO 2631-2 kuvaillaan värähtelyn mittaamista ihmisen havainnon kannalta rakennuksen sisällä. Standardissa määritellään taajuusriippuva painotuskerroin W_m ihmisen havaitsemalle tärinälle. Taajuuspainotus W_m on määritelty kahden toisen asteen Butterworth-yli- ja alipäästösuotimien kaskadina, sekä taajuuspainotuksena ja sen taajuusvaste esitetty kuvassa 7.5.



Kuva 7.5. ISO 2631 mukaisen W_m painotuksen vaikutus värähtelyn nopeuteen v .

W_m -taajuuspainotetusta signaalista johdetaan muita parametreja, jotka kuvaavat värähtelyn voimakkuutta. Näitä parametreja on käsitelty ISO 2631 standardin osassa 1. Tässä käsiteltävän asian kannalta tärkein on signaalin tehollinen arvo (rms, eng. *root mean square*) yhden sekunnin aikana. Yksittäisen liikennevälineen ohiajon tärinää arvioidaan W_m -taajuuspainotetun värähtelyn nopeuden yhden sekunnin tehollisarvon enimmäisarvona:

$$v_{W_m,rms,1s,max} = \max_t \left\{ \left(E_{1s} \{ v_{W_m}^2(t) \} \right)^{1/2} \right\}, t \in (t_1, t_2), \quad (7.13)$$

missä operaattorit $E_{1s}\{\cdot\}$ ja \max_t ovat yhden sekunnin odotusarvo ja enimmäisarvo, $v_{W_m}(t)$ on värähtelyn nopeuden signaali ajan t suhteen ja (t_1, t_2) on aikaväli ohituksen alusta, ajanhetkestä t_1 , ohituksen loppuun ajanhetkeen t_2 .

Ohituksen ajanjakso $t \in (t_1, t_2)$ määritellään yleensä signaalista sinä ajanjaksona, kun signaalin amplitudi ylittää ensimmäisen kerran ajanhetkellä t_1 jonkin ennalta määrätyn

raja-arvon ja pysyy riittävän kauan raja-arvon yläpuolella aikaan t_2 asti. Amplitudin raja-arvon ylittyminen siis laukaisee mittauksen (eng. *trigger*). Moderneja mittareita pystytään yleensä käyttämään tällä mittausten menetelmällä. Ajanjaksojen valinta voidaan tehdä myös signaalien jälkikäsitelyssä, koska standardien mukaisessa menettelyssä signaalit tallennetaan.

Runkomelua arvioidaan A -taajuuspainotetun ja S -aikapainotetun painesignaalin $p_{AS}(t)$ enimmäisarvosta

$$L_{pAS\max} = 20 \log_{10} \left(\max_t \{p_{AS}(t)/p_0\} \right), t \in (t_1, t_2), \quad (7^*.14)$$

missä äänenpaineen referenssitasona käytetään $p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa. Kuten mainittiin tämän kappaleen alussa, runkomelua voidaan myös arvioida A -taajuuspainotetusta ja S -aikapainotetusta värähtelyn nopeuden signaalista $v_{AS}(t)$ samalla tavalla kuin äänipaineelle kaavassa 8.14. Kun runkomeluna arvioidaan värähtelyn nopeudesta, on huomioitava säteilevien pintojen värähtelyn nopeus ja pintojen ominaisuuksien vaikutus äänipaineeseen, kuten esitetty kaavassa 7.12.

7.4.4 Taustavärähtelyn ja taustamelun korjaus

Taustamelun tai taustavärähtelyn korjaus tehdään terssikaistoittain. Taustamelusta saadaan arvio niistä mittauksen ajanhetkistä, jotka eivät sisällä signaalia.

Taustamelun tai värähtelyn korjauksessa voidaan käyttää standardin ISO 16032 mukaista korjausta:

$$L_p(f_c) = \begin{cases} \hat{L}_p(f_c) & , 10 \text{ dB} \leq \text{SNR}(f_c) \\ \hat{L}_p(f_c) + 10 \log_{10}(1 - 10^{-\text{SNR}(f_c)/10}) & , 4 \text{ dB} \leq \text{SNR}(f_c) < 10 \text{ dB} \\ \text{N/A} & , \text{SNR}(f_c) < 4 \text{ dB} \end{cases} \quad (7.15)$$

missä f_c on terssikaistan keskitaajuus ja $\text{SNR}(f_c) = \hat{L}_p(f_c) - N_p(f_c)$ on mitatun äänipainetason $\hat{L}_p(f_c)$ ja taustamelun $N_p(f_c)$ välinen tasoero, eli signaali-kohinasuhde. Signaalia ei arvioida, jos signaali-kohinasuhde on alle 4 dB, josta käytetään merkintää N/A. Mitattu taso voidaan kuitenkin raportoida.

Taustamelu tulisi arvioida ajallisesti riittävän pitkänä tehollisena keskiarvona. Standardin ISO 16032 mukaan noin 30 s olisi sopiva keskiarvon pituus, jos taustamelu on ajallisesti suurin piirtein samansuuruista. Jos taustamelu tai värähtely vaihtelee voimakkaasti ajan suhteen voi taustamelun poisto olla haastavaa.

ISO 1996-2, joka käsittelee ympäristömelua, antaa taustamelukorjaukselle arvot

$$L_p(f_c) = \begin{cases} 10 \log_{10}(10^{\hat{L}_p(f_c)/10} - 10^{N(f_c)/10}), & 3 \text{ dB} \leq \text{SNR}(f_c) \\ N/A, & \text{SNR}(f_c) < 3 \text{ dB} \end{cases} \quad (7.16)$$

Jos signaali-kohina-suhde on alle 3 dB, mittaustulokset voidaan raportoida, mutta korjausta ei tehdä. Näistä kahdesta korjauksesta standardissa ISO 1996-2 esitetty on suoraviivaisempi käyttää. Taustavärähtelyn korjauksessa L_p korvataan värähtelynopeuden tasolla L_v , ja taustamelu N_p korvataan taustavärähtelynopeuden tasolla N_v .

7.4.5 Tilastolliset tunnusluvut

Tärinän ja runkomelun tilastolliset tunnusluvut $v_{w,95}$ ja L_{prn} ovat 95. persentiili (sadan- tai prosenttipiste) mitatuista suureista. Tilastollista tunnuslukua tulkitaan siten, että 95 % liikennevälineistä alittaa arvon tai tason (Talja 2005, Talja & Saarinen 2009).

Mikäli mitattavien suureiden jakauma on tunnettu, voidaan persentiiliä arvioida suljetussa muodossa mittausten keskiarvon ja keskihajonnan avulla. VTT ohjeistaa, että tärinän tapauksessa 95. persentiili tulisi laskea 15 merkitsevimmän junan ohiajoista aiheutuneista värähtelytasoista (Talja 2005). Runkomelulle 95. persentiili lasketaan kaikista mitatuista ohiajoista (Talja & Saarinen 2009).

Mittausten määrästä on todettu, että tärinää tulisi tarkastella junien osalta viikon mittaisissa jaksoissa ja jatkoanalyysiin valitaan viikon sisällä esiintyvistä junista 15 suurimman tärinätason aiheuttanutta junaa tilastollisen tunnusluvun laskemiseen (Talja 2005).

Runkomelun osalta VTT:n ohje mittauksien määrään (Talja & Saarinen 2009) on yhtenevä standardin ISO 14837-1 ohjeen kanssa. Kultakin liikennevälineeltä tulisi mitata vähintään 5 ohitusta. Mikäli hajonta on enemmän kuin 2 dB mittausten välillä, tulisi ohiajoja mitata enemmän.

7.4.6 Mittauspisteiden valinta

Mittauspisteet valitaan rakennuspaikalta siten, että ne edustavat tärinän ja runkomelun kannalta koko rakennusta. Mikäli mittalaitteita on rajallinen määrä, kannattaa mittauspisteet yrittää valita siten, että ne edustavat runkomelun ja tärinän kannalta pahinta tilannetta. Esimerkiksi signaali-kohinasuhteen takia näistä voidaan todennäköisesti luotettavammin arvioida koko rakennuksen osalta tilannetta kuin niistä mittauspisteistä, joissa värähtelyä on vähemmän. Mittauspisteiden tuloksista on tarkoitus arvioida tärinä ja runkomelu siitä rakennuksen osasta, mihin ohje- tai suunnitteluarvoja on määritelty.

Tärinän arviointia tulevaa rakennusta varten mittaus voidaan suorittaa suoraan maaperästä, mikäli mahdollista, läheltä talon perustustasoa. Kun runkomelua arvioidaan tulevaan rakennukseen, mittauspisteiden tulisi sijaita lähellä perustustasoa, esimerkiksi

suoraan kallio- tai kitkamaassa tai rakennuksen perustuksissa, jos se on rakentamisen aikataulutuksen puolesta mahdollista.

Mikäli mittauksilla arvioidaan olemassa olevaa rakennusta, tärinä mitataan siitä lattian pisteestä, jonka oletetaan olevan tärinälle alttein. Yleensä tämä piste on keskilattia tai jännevälin keskipiste (ISO 2631-2). Runkomelun mittaamisesta ilmaäänä ohjeistetaan, että äänitasomittarin tulisi olla lähellä huoneen keskipistettä, mutta ei aivan keskipisteessä (ISO 14837-1). Melumittauksia koskevassa standardissa on lisäksi ohjeistettu, että huoneiloissa mitattaessa mittauspisteen tulisi olla vähintään 0,5 m päässä kaikista pinnoista (ISO 1996-2). Kuten muissakin mittauksissa, runkomelumittauksissakin on hyvä ottaa huomioon tarkastelun kohde. Esimerkiksi jos runkomelu koetaan häiritsevänä nukkuessa, mittauspiste olisi hyvä sijoittaa lähelle tyynyä.

7.4.7 Rakennuksen tärinän arviointi maaperästä mitatuista värähtelyistä

VTT:n ohjeessa kuvaillaan tärinäriskin arviointia, kun värähtelyä on mitattu maaperästä tai perustuksista (Talja, 2011). Maaperästä mitattua värähtelyn nopeutta painotetaan ensin alipäästösuotimella, joka on esitetty kuvassa 7.2. Alipäästö mallintaa kytkeytymistä maaperästä rakennuksen perustuksiin. Alipäästettyä signaalia tarkastellaan kahdella tavalla. Ensin tarkastellaan ylittääkö tärinä laajakaistaisena ohjearvon ja lopuksi tehdään resonanssitarkastelu sekä vaaka- että pystysuuntaiselle värähtelylle. Laajakaistaista signaalia kerrotaan arvolla 1,5, mikäli tarkasteltava kohde on paaluilla tai siinä on enemmän kuin yksi kerros. Resonanssitarkastelussa terssikaistaista signaalia kerrotaan vaakasuunnassa kertoimella 4 ja pystysuunnassa kertoimella 6. Näillä kertoimilla vahvistettuja terssikaisia arvoja verrataan ohjearvoon.

VTT:n empiirisen mallin lisäksi voidaan käyttää myös tarkempia malleja maaperästä rakennukseen kytkeytyvän värähtelyn arvioimiseksi, joista kerrotaan enemmän kappaleessa 7.5.

7.4.8 Mittauksen epävarmuus

Junan tai muun liikenteen aiheuttama runkomelu ja tärinä on luonteeltaan satunnaista, mutta se sisältää myös deterministisiä osia. Determinististä on mm. mittauspisteen etäisyys radasta, maaperän ominaisuudet, herätetaso ja muut sellaiset ominaisuudet, joiden voidaan olettaa pysyvän vakiona mittausten ajan. Epävarmuuden ajatellaan mittauksissa johtuvan satunnaisista osista, kuten junien pyörien kunnosta, kiskojen kunnosta ja mittauksen otoskoosta eli mitattujen junien lukumäärästä. Jos mittaussajakaus on pitkä, deterministiset sekä satunnaiset ominaisuudet voivat myös muuttua. Maaperässä voi tapahtua muutoksia sään vaihtuessa ja pyörien sekä kiskon kunto voi heikentyä tai junien nopeudet voivat muuttua siten, että se vaikuttaa herätteen lähtötasoon.

Standardin IEC 61672 mukaisen luokan 1 äänitasomittarin, johon kuuluu mikrofoni ja päätelaite, epävarmuus on 1 dB. Epävarmuutta runkomelun äänitasomittaukseen lisäävät muun muassa taustamelu, huoneakustiikka, junien otoskoko ja rakennusvaipan äänieristys. Standardin ISO 8041 standardin täyttävän värähtelymittarin epävarmuus on noin 10 %. Antureiden kiinnitys, maaperän ja ilmaston olosuhteet, junakaluston kunto sekä junien otoskoko lisäävät värähtelymittauksen epävarmuutta. Mikäli värähtelymittauksesta johdetaan runkomelun arvio, epävarmuuteen lisätään vielä huoneakustiikan mallinuksen epävarmuus.

Kaikki epävarmuutta lisäävät ilmiöt ovat kuitenkin hyvin hallittavissa tai ennustettavissa nykyisellä tiedolla, joten mittauksen epävarmuus pystytään laskemaan ja se voidaan näin ollen ottaa huomioon arvioinneissa.

7.5 Tärinän ja runkomelun vaimennusratkaisut

7.5.1 Vaimennuksen sijainti

Tärinää ja runkomelua pyritään vaimentamaan rataan tai väylään, maaperään ja rakennukseen liittyvillä vaimennusratkaisulla. Vaimennusratkaisut soveltuvat eri tilanteisiin riippuen vaimennustarpeen määrästä, torjuntaratkaisun teknistaloudellisesta toteutettavuudesta ja värähtelyherätteen taajuussisällöstä asuinviihtyvyyden riskin kannalta. Talonrakentamisen näkökulmasta vaimennusratkaisut useimmiten toteutetaan rakennukseen, tontille tai sen välittömään läheisyyteen. Taulukossa 7.4 on esitetty tässä käsiteltyjen torjuntatoimien sijainti ja arvioitu vaimennus eri lähteiden perusteella.

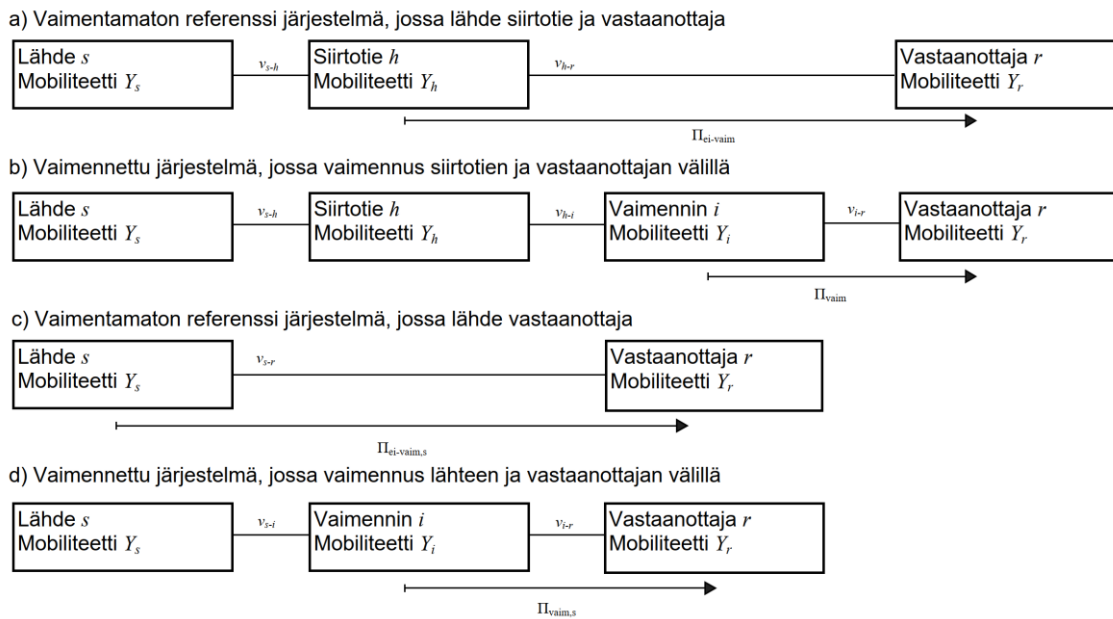
Taulukko 7.4. Runkomelun ja tärinän vaimennusesimerkkejä. Toteutunut vaimennus riippuu mm. torjuttavan runkomelun tai tärinän taajuuskaistasta, rakenteista ja maaperästä.

Sijainti	Arvioitu runkomelun vaimennus	Vaimennusratkaisu
Rata	7 dB	Kiskovaimennin (Soltanieh <i>et al.</i> 2022)
	5 dB ... 10 dB	Kiskon aluslevy (Talja & Saarinen 2009)
	5 dB ... 10 dB	Pohjainpölkky (Talja & Saarinen 2009)
	10 dB ... 15 dB	Sepelinalusmatto (Talja & Saarinen 2009)
	15 dB ... 20 dB	Kelluva laattarakenne (Talja & Saarinen 2009)
Maaperä	0,015 dB/m... 0,40 dB/m	Etäisyysvaimentuminen (Talja & Saarinen 2009)
	5 dB ... 10 dB	Tärinäseinä (Talja & Saarinen 2009)
Rakennus	10...20 dB	Rakennuksen kelluttaminen perustuksista joustavilla matoilla (Talja & Saarinen 2009)
	20...30 dB	Rakennuksen kelluttaminen perustuksista teräsousilla (Talja & Saarinen 2009)
	3...20 dB	Huoneen pintojen kelluttaminen

Sijainti	Arvioitu tärinän vaimennus	Ratkaisuesimerkkejä
Rata	30 %	Ratapenkereen kasvattaminen (Hakulinen 1999)
	ei arviota	Suihkuinjektointi radan alla penkereen läpi pohjamaahan (Ranin 2009)
	0 % ... 25 %	Pohjainpölkky (Oksanen <i>et al.</i> 2022)
	50 %	Stabilointi radan alla kalkki/sementtipilareilla (Hakulinen 1999)
	60 % ... 80 %	Maanvarainen teräsbetonilaatta (Hakulinen 1999)
	90 %	Paalulaatta (Hakulinen 1999)
Maaperä	0 % ... 50 %	Teräsponttiseinä (Liisanantti 2021, Leimi 2022)
	30 % ... 60 %	Stabilointi radan vieressä (Hakulinen 1999, Talja <i>et al.</i> 2014, Huhtala <i>et al.</i> 2017, Auvinen 2010)
Rakennus	30 % ... 80 %	Lattian värähtelymitoitus (Talja <i>et al.</i> 2008)
	30 % ... 75 %	Rakenteen värähtelymitoitus (Talja <i>et al.</i> 2008)

7.5.2 Vaimennuksen mitoitus sekä lisäys- ja siirtohäviö

Vaimennuksen suunnittelussa ja mitoituksessa pyritään vaimentamaan jotain tiettyä taajuusalueita värähtelystä, jotta suunnittelu- tai ohjearvot täytetään. Suunnittelun lähtötilana on vaimennettava rakenne, maaperä tai perustus, jolla vaimennettava rakenne sijaitsee, sekä tarvittava vaimennus kullakin taajuuskaistalla. Näillä kaikilla on vaikutusta saavutettavaan vaimennukseen. Vaimennettu ja vaimentamaton järjestelmä ja niihin liittyvät termit ja parametrit on esitetty kuvassa 7.6. Tässä esityksessä kaikki vaimennusarvot ovat desibeliasteikolla positiivisia lukuja. Suomessa konventiona on ilmoittaa värähtelyn vaimennus prosentteina ja runkomelun vaimennus desibeleinä ja näiden välillä voidaan tehdä helposti muunnoksia.



Kuva 7.6. Vaimennusmitoituksen periaate ja parametrit. Kuvat c) ja d) esitetty mukaillen viitettä (Villot et al. 2019).

Värähtelyn vaimennusta mitataan lisäyshäviöllä (IL, eng. *insertion loss*), joka ilmoitetaan desibeleissä. Lisäyshäviöllä mitataan, kuinka paljon värähtelevään järjestelmään lisätyllä vaimennusratkaisulla on saavutettu vaimennusta. Se määrittellään vaimennettuun rakenteeseen saapuvan tehovirtauksen Π_{vaim} ja saman, mutta vaimentamattoman rakenteen tehon $\Pi_{\text{ei-vaim}}$ suhteen (Villot et al. 2019)

$$IL(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{\Pi_{\text{ei-vaim}}(f)}{\Pi_{\text{vaim}}(f)} \right). \quad (7.17)$$

Tehovirtaus on taajuuden f suhteen

$$\Pi_{\text{ei-vaim}}(f) = 1/2 \operatorname{Re}\{F_r(f)v_{h-r}^*(f)\} \text{ ja}$$

$$\Pi_{\text{vaim}}(f) = 1/2 \operatorname{Re}\{F_r(f)v_{i-r}^*(f)\}, \quad (7.18)$$

missä $F(f)$ ja $v(f)$ ovat kompleksinen kontaktivoima ja kontaktivärähtelynopeus. Kun käytetään tunnettua yhteyttä $v_c = Y_r F_r$, ja $v_r = Y_r F_r$ missä Y_r on rakenteen mekaaninen mobiliteetti, saadaan (Villot et al. 2019)

$$IL(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{|v_{h-r}(f)|^2}{|v_{i-r}(f)|^2} \right) \quad (7.19)$$

Lisäyshäviön lisäksi yhtä yleisesti käytetään termiä lisäsvahvistus, joka on IL:n negaatio. Kuvassa 7.4 on esitetty lisäyshäviön parametrit, kun vaimennus sijoitetaan (kuva 7.4 a) ja b)) siirtotien ja vastaanottajan väliin tai lähteen ja siirtotien väliin (kuva c) ja d)). Lähteen ja siirtotien välisessä vaimennuksessa kaavojen 7.17–7.20 muuttujat korvataan muuttujilla $\Pi_{ei-vaim,s}(f)$, $\Pi_{vaim,s}(f)$, $v_{s-h}(f)$ ja $v_{i-h}(f)$.

Kaavasta 7.19 voidaan johtaa eri vaimennusratkaisujen lisäyshäviö. Koska taloa ei rakenneta kahdesti, ensin ilman vaimennusta ja sitten vaimennuksen kanssa, joudutaan toteuttanutta lisäyshäviötä arvioimaan olemassa olevasta rakennuksesta tehtävillä mittauksilla tai mallinuksilla. Esimerkiksi joustavasti perustetun talon lisäyshäviö voidaan arvioida olemassa olevan talon perustusten ja rungon välisestä värähtelymittauksesta sekä rakennuksen ja perustusten mobiliteetista (Masoumi et al. 2022)

$$IL(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{|v_{h-i}(f)|^2}{|v_{i-r}(f)|^2} \frac{|Y_h|^2}{|Y_r+Y_h|^2} \right) \quad (7.20)$$

Kaavan 8.20 ensimmäistä termiä kutsutaan vaimennuskyyvyksi tai siirtohäviöksi (TL, eng. *transmission loss*) ja se on määritelty värähtelyjärjestelmään saapuvan voiman F_s ja siitä lähtevän voiman F_l välisenä suhteena. Kaava 7.20 voidaan esittää siirtohäviön avulla (Masoumi et al. 2022):

$$IL(f) = TL(f) + 10 \log_{10} \left(\frac{|Y_h|^2}{|Y_r+Y_h|^2} \right). \quad (7.21)$$

Yleinen kellutettu rakenne on välipohjan päälle rakennettu joustavan materiaalin päällä oleva lattia (ks. esimerkiksi kappale 4.2.4). Yleensä tällainen lattia suunnitellaan askelääneneristystä varten, mutta tässä kappaleessa liikenteen aiheuttamaa värähtelyä vaimennetaan rakenteen rungosta kellutettuun lattiaan päin. Vaimennus voidaan laskea kaavalla 7.20 käyttämällä siirtotien mobiliteettina välipohjan mobiliteettia ja vastaanottajan mobiliteettina lattian mobiliteettia.

Siirtohäviö voidaan laskea tasaantuneen värähtelyn aikana liikepoikkeaman $x(f)$, kiihtyvyyden $a(f) = x(f)(2\pi f)^2$, tai värähtelynopeuden $v(f) = x(f)2\pi f$ suhteesta, toisin sanoen:

$$TL(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{F_s(f)}{F_l(f)} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{a_s(f)}{a_l(f)} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{v_s(f)}{v_l(f)} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{x_s(f)}{x_l(f)} \right). \quad (7.22)$$

Käytännön tilanteissa näistä neljästä suureesta helpointa on mitata kiihtyvyyttä. Siirtohäviön lisäksi kirjallisuudessa esiintyy yhtä usein siirtofunktio (eng. *transmissibility*), joka on siirtohäviön negaatio. Siirtohäviö ja siirtofunktio esiintyvät kirjallisuudessa myös harhaanjohtavasti ristiin ja lisäksi muitakin termejä samalle mittaluvulle käytetään.

Yksiulotteisen massa-jousi-vaimentimen, jonka vaimentuminen on hystereettistä, siirtohäviöllä on hyvin tunnettu muoto:

$$TL(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{(1-(f/f_0)^2)^2 + \eta^2}{1+\eta^2} \right), \quad (7.23)$$

Vaimennuksen mitoituksessa pystytään vaikuttamaan vaimentimien siirtohäviöön. Yksinkertaisen mallin siirtohäviön kaavassa vaimentimen perustajuutta f_0 ja vaimennussuhdetta η muuttamalla voidaan vaikuttaa saavutettuun siirtohäviöön ja sitä kautta lisäyhäviöön rakennuksessa. Joskus voidaan kuitenkin joutua myös jäykistämään vaimenninta ennen tai jälkeen olevaa rakennetta, jotta suunniteltu vaimennus saavutetaan. Tärinän vaimennuksessa päädytään usein jäykistämään jotain osaa siirtotiestä eikä vaimenninta suunnitella ollenkaan. Tämä johtuu siitä, että vaimenninta ei pystytä käytännön syistä virittämään kovin pienelle taajuudelle ja se virittyykin usein tärinätaajuuksille. Tästä aiheutuu järjestelmään resonanssi.

7.5.3 Lähteeseen kohdistuvat vaimennusratkaisut

Liikennevälineen tyyppi, kunto, paino, jousitus ja nopeus, sekä väylän kunto, rakenne ja perustamistapa vaikuttavat värähtelyn voimakkuuteen melko suuresti (Talja et al. 2008). Kaluston ja väylien ylläpidolla on siis suuri vaikutus tärinä- ja runkomeluhaittoihin.

Tieliikenteen väylillä epäjatkuvuuskohtia, kuten hidastetöyssyjä, ja tien jäykkyyseroja tulisi välttää (Talja et al. 2008) tärinärisikin pienentämiseksi. Väylien kunnossapidolla on epäjatkuvuuksien kannalta merkittävä rooli (Talja et al. 2008). Väylän perustaminen paalulaatalla on tehokkain rakenteellinen tapa vaimentaa tärinää (Talja et al. 2008). Tieliikenteelle voidaan lisäksi pienentää ajonopeutta, rajoittaa akselipainoja tai ajoneuvotyyppejä, mutta ajoneuvojen kuntoon tai jousitukseen on vaikeampi vaikuttaa.

Junan pyörien kunto ja ajonopeus, sekä kiskon ja radan kunto vaikuttavat ympäristöön leviävän värähtelyn voimakkuuteen merkittävästi (Talja et al. 2008, Talja & Saarinen 2009). Esimerkiksi huonokuntoisen radan vaikutus runkomeluun voi olla 10 dB verrattuna hyväkuntoiseen rataan (Talja & Saarinen 2009). Junakaluston värähtelyä voidaan pienentää parantamalla pyörien pyöreyttä, vähentämällä jousittamattoman massan määrää telissä, akselissa ja pyörissä ja pienentämällä ajonopeutta tai akselipainoja.

Runkomelun kannalta junan ajonopeus tyypillisesti pienentää runkomelun tasoja, sillä radan ja pyörän epätasaisuudet eivät aiheuta niin voimakasta herätettä. Tämä johtuu ainakin siitä, että pyörät pyörivät hitaammin ja pyörän ja raiteen välisten impulssimaisten herätteiden määrä aikayksikköä kohti pienenee, vaikka kokonaisuutena niiden määrä ei pienene, koska matka pysyy samana. Lisäksi epäjatkuvuuksiin kohdistuvat voimat

tyypillisesti pienenevät hitaammalla nopeudella. Hitaamman nopeuden takia ohituksen ajallinen kesto kasvaa ja melulle altistutaan näin ollen enemmän (Sutela 2016). Kuitenkin runkomelua koskevat ohje- tai suunnitteluarvot runkomelua ovat enimmäisarvoja, ja altistustasoa ei runkomelun puolesta tarvitse tarkastella. Liikenteen- tai ympäristön kokonaismelutasoissa kuitenkin altistustasoa tulee tarkastella ja tässä yhteydessä runkomelulla voi olla vaikutusta.

Tärinällä junan ajonopeuden vaikutus riippuu maaperän ja junan aiheuttamien resonanssien yhteisvaikutuksesta. Nimittäin, junan vaunut, pyörät, akselit, telit, voivat aiheuttaa värähtelyä samalla taajuusalueella, jolle ylempi maakerros on virittynyt, kuten on esitetty kuvassa 7.5. Tärinälle ajonopeuden laskeminen on siis torjuntatoimi, jota tulee käyttää ottaen huomioon vallitsevan maaperän ominaisuudet. Joissain tapauksissa nopeuden laskeminen saattaa lisätä tärinää (Sutela 2016). Suurnopeusjunilla nopeuden pienentämisellä voi olla merkittävämpi vaikutus kuin muilla junatyypeillä, sillä värähtely vahvistuu sitä enemmän, mitä lähempänä junan nopeus on maaperän Rayleigh-aallon nopeutta. Mikäli junan nopeus on sama kuin maaperän Rayleigh-aallon nopeus, värähtelyn liikepoikkeama voi vahvistua 400 % staattiseen tapaukseen nähden (Vinter 2015).

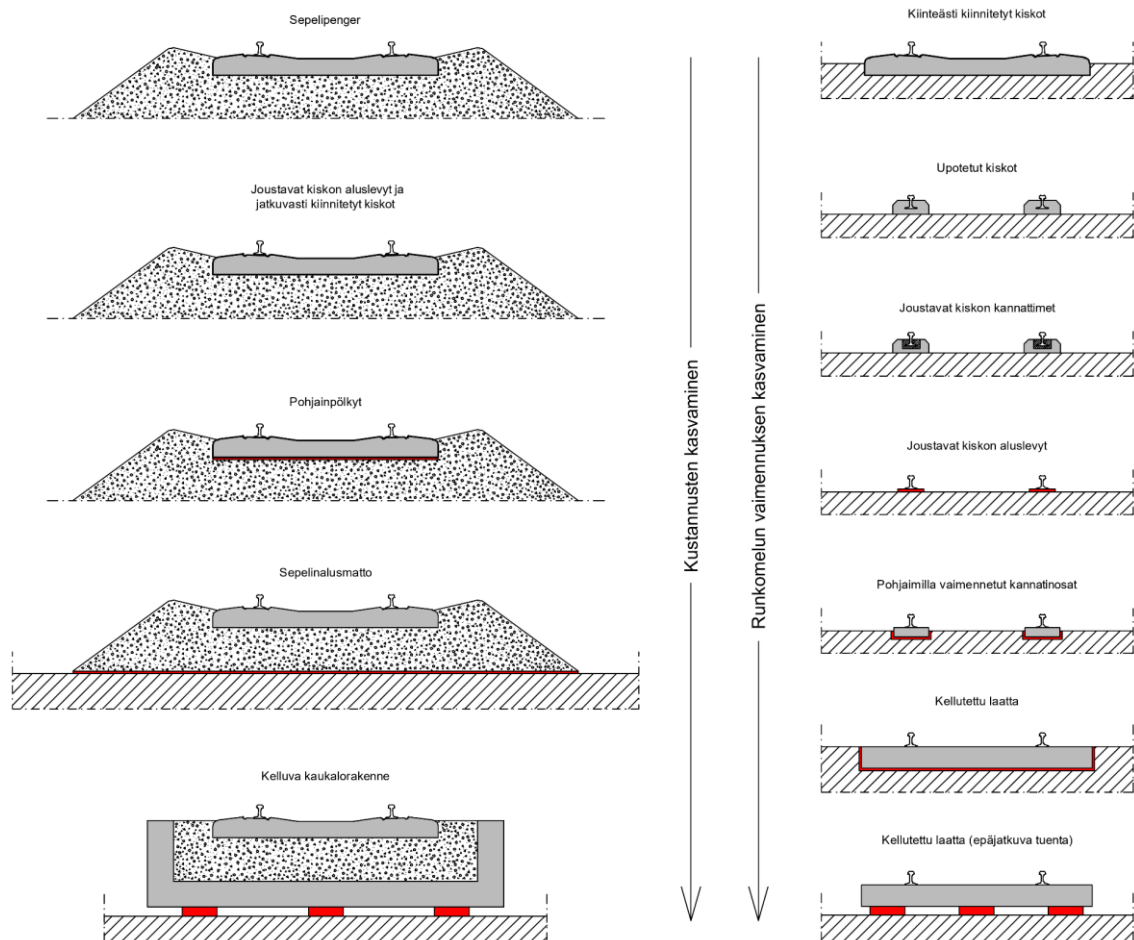
Kiskon kunto ja radan linjaus vaikuttavat herätteen suuruuteen merkittävästi. Esimerkiksi kuluneet kiskonjatkokset ja vaihteet aiheuttavat ympäristöönsä moninkertaisen värähtelyherätteen verrattuna tasaiseen kiskoon (Talja 2009).

7.5.4 Rataan tai väylään kohdistuvat vaimennusratkaisut

Värähtelyn vaimentamiseen radassa on monta keinoa. Runkomelua voidaan torjua kiskon, pölkyn tai tukikerroksen (sepelikerros) alle sijoitettavalla vaimennusmateriaalilla, kuten on esitetty kuvassa 7.6 (ISO 14837-1). Kiskon kylkeen voidaan myös asentaa kiskonvaimennin, jolla voidaan saavuttaa hieman vaimennusta (Soltanieh et al. 2022). Runkomelun vaimennusratkaisujen tehokkuutta radassa on arvioitu taulukossa 7.4.

Tärinän vaimennusratkaisuna ratarakenteessa voidaan käyttää radan alle sijoitettavaa stabilointia (Talja 2009), paalulaattaa (Hakulinen 1999), maanvaraista teräsbetoni-laattaa (Hakulinen 1999), vastapengertä, tai pölkyn alle sijoitettavaa vaimenninta (Oikarinen 2022). Vaimennusratkaisujen tehokkuudesta on tehty tutkimusta rakennetuista torjuntatoimista (Huhtala et al. 2017, Huhtala et al. 2021) ja myös mallintamisen kautta (Liisanantti 2021, Leimi 2022). Kuvassa 7.7 on esitetty osan vaimennusratkaisujen sijoittelu poikkileikkauksessa ja taulukossa 7.4 on arvioitu tärinäntorjuntakeinojen vaimennuskykyä.

Rakennushankkeissa päädytään harvoin vaimentamaan raiteita tai rataa osana torjuntasuunnittelua, mutta joissain tapauksissa tämä on ainoa vaihtoehto, jotta saavutetaan ohje- tai suunnitteluarvo.

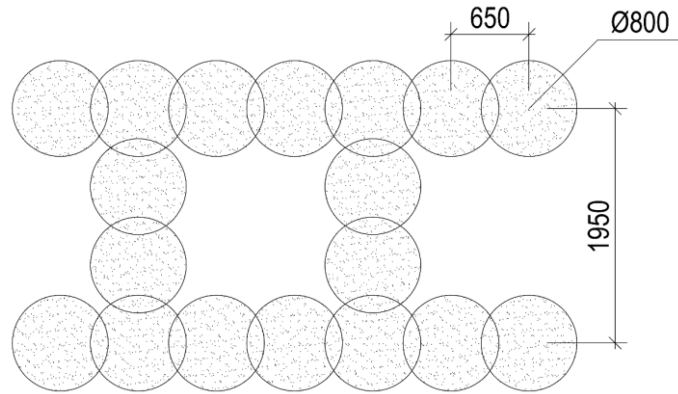


Kuva 7.7. Runkomeluvaimentimien sijoittelu ratarakenteessa, mukaillen viitettä (ISO 14837-1). Alkuperäisessä viitteessä kiskon aluslevyt, pohjainpölkky ja sepelinalusmatto on esitetty kaukalorakenteelle. Punainen väri esittää vaimentimen sijaintia.

7.5.5 Maaperään kohdistuvat vaimennusratkaisut

Radan tai väylän ja rakennuksen väliin jäävään maaperään voidaan myös kohdistaa vaimennustoimia tärinää vastaan. Näitä ovat erilaiset maanalaiset seinärakenteet, maaperän stabilointiratkaisut tai maaperän jäykistäminen injektoinnilla, joita on esitetty kuvassa 7.9.

Talonrakennuskohteissa stabilointiseinät voivat olla perusteltu ja kustannustehokas vaihtoehto (Huhtala et al. 2017). Stabilointiseinän vaimennuskyky voi olla 30...60 %, jos maaperän olosuhteet seinän rakentamiselle ovat otolliset, rakennus sijaitsee riittävän kaukana stabiloidusta esteestä ja maaperässä esiintyvä vaakavärähtely on suurempaa kuin pystyvärähtely (Talja et al. 2014). Stabilointi tehdään yleensä ristikkorakenteisilla kalkki- tai sementtipilareilla. Esimerkki stabilointiseinänä rakenteesta on annettu kuvassa 7.8.



Kuva 7.8. Stabilointiseinän rakenne ylhäältä esitettyinä. Piirretty mukailen viitettä (Talja et al. 2014).

Maanalaisten seinien lisäksi värähtelyä voidaan torjua etenemisreitillä syvällä kaivannolla tai kuilulla (Kurikka 2014). Huonon stabiliteetin takia kovin syvän kaivannon tekeminen ei ole mahdollista. Kaivanto voidaan täyttää esimerkiksi kumirouheella stabiliteetin saavuttamiseksi (Kurikka 2014).

Vielä kehitteillä oleva värähtelyn torjuntakeino etenemisreitillä on radan viereen tuotu raskas massa. Massa virittyy maaperän jäykkyydestä ja omasta painosta riippuen jollekin ominaistajuudelle. Kun maaperässä etenevä Rayleigh-aalto kohtaa massan, massa alkaa värähdellä ominaistajuudellaan ja Rayleigh-aalto siroaa tämän vaikutuksesta eri suuntiin. (Krylov 2007)

Runkomelua vastaan tehtävät vaimennustoimet etenemisreitillä olisivat kallioperään tai kovaan maaperään tehtäviä kaivantoja, niin kutsuttuja tärinäseiniä, jotka mahdollisesti täytettäisiin jollain pehmeällä materiaalilla (Talja & Saarinen 2009). Koska runkomelu joutuisi kulkemaan kaivannon alitse, aiheutuisi siitä runkomelulle etäisyysvaimentumaa. Tällaisia ratkaisuja ei kuitenkaan tiedettävästi ole tehty, joskin samaa ideaa toteuttava ratkaisu on suhteellisen yleisesti käytetty runkomelun torjuntakeino. Ratkaisussa kallioperään perustetun talon maanalaiset seinät irrotetaan joustavasti kallioperästä tai niitä ei kiinnitetä kallioperään ollenkaan. Tässä tapauksessa runkomelu ei pääse kytkeytymään kallioperästä rakennuksen runkoon sivuttaissuuntaisesti vaan joutuu kiertämään talon perustusten kautta. Sopivalla etäisyydellä tällä voidaan saavuttaa riittävä etäisyysvaimentuminen ja tällöin koko taloa ei tarvitse kelluttaa perustuksistaan.

7.5.6 Etäisyys- ja rakenteellinen vaimeneminen

Kaavoitusvaiheessa voidaan vaikuttaa tärinän ja runkomelun torjuntaan sijoittamalla näille alttiita kohteita kauemmaksi radasta vaaka- tai pystysuunnassa. Pystysuuntaan etäisyyden kasvattaminen on tietenkin mahdollista vain, jos rakennuksissa on useampia kerroksia. Vähiten vaivaa vaativa vaihtoehto kaavoituksessa on käyttää VTT:n esittämiä varoetäisyyksiä, jotka on esitetty taulukossa 7.5. Muut mahdollisuudet ovat mittausselvitys, mallinnusselvitys tai näiden yhdistelmä.

Taulukko 7.5. Tärinän ja runkomelun turvaetäisyyksiä liikennetyypin ja maapohjan mukaan (Törnqvist & Talja, 2006, Talja & Saarinen 2009).

Runkomelun varoetäisyys	Maapohja, väylän sijainti ja runkomelutason raja			
	Pehmeä maa, pintaväylä	Kova maa, pintaväylä	Kallio, tunneli	Kallio, pintaväylä
Liikennetyppi				
	35 dB	35 dB	30 dB	35 dB
Tieliikenne, 50 km/h	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m
Tieliikenne, 100 km/h	< 5 m	< 5 m	< 50 m	< 120 m
Raitiovaunu, 40 km/h	< 5 m	15 m	50 m	120 m
Metro tai lähijuna, 80 km/h	< 5 m	30 m	90 m	160 m
Lähijuna, 160 km/h	10 m	60 m	130 m	200 m
Sähkömoottorijuna, 220 km/h	15 m	70 m	150 m	> 200 m
IC-juna, 160 km/h	40 m	130 m	200 m	> 200 m
Tavarajuna, 100 km/h	60 m	160 m	> 200 m	> 200 m

Tärinän varoetäisyys	Suosittelava turvaetäisyys	Pehmein maalaji väylän alla
Liikennetyppi		
Tavarajunaliikenne (3 500 tn, 90 km/h)	500 m	Pehmeä maa
Pikajunaliikenne (140 km/h)	200 m	Pehmeä maa
Tavara- ja pikajunat	100 m	Kova maa
Raskas maantieliikenne (100 km/h, sileä)	100 m	Pehmeä maa
Hidastetöyssyt, raskas liikenne (40 km/h)	100 m	Pehmeä maa
Raskas katuliikenne (40 km/h, sileä)	50 m	Pehmeä maa
Raskas maantie- ja katuliikenne (myös hidastetöyssyt)	15 m*)	Kova maa

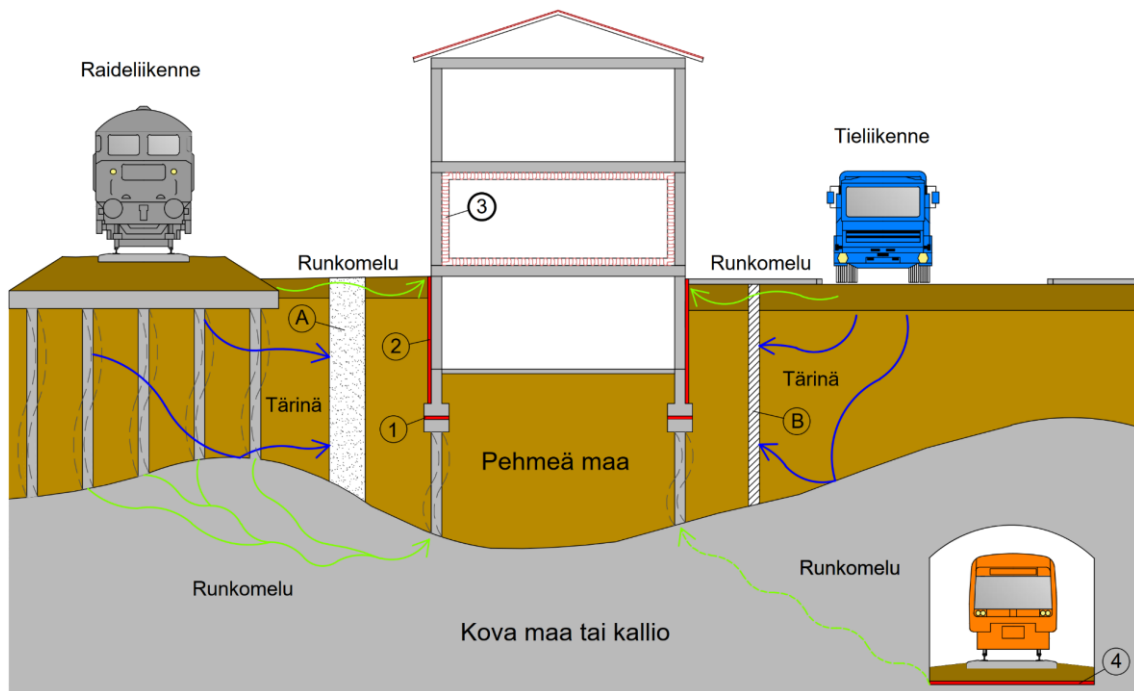
*) Ei koske väyliä, joilla on vain tilapäisesti raskasta liikennettä

Runkomelun pystysuuntainen vaimentuminen rakennuksissa on tapauskohtaista ja sitä tulisi nykytiedon mukaan käyttää harkiten torjuntakeinona. Usein on nimittäin mahdollista, että runkomelu on voimakkaampaa jossain kerroksessa rungon resonanssien takia kuin sen alapuolisessa kerroksessa johtuen rungon rakenteesta ja erityisesti sen resonansseista (esim. Oksanen 2021). Tärinälle kerrosvaimentumaa ei tulisi olettaa sillä resonanssi voi voimistaa tärinää ylemmissä kerroksissa (Hamshar 2017). Varsinkin korkeissa rakennuksissa, tärinän tyypillisesti tärinä voimistuu ylimmissä kerroksissa verrattuna alempiin kerroksiin.

7.5.7 Runkomelun vaimennusratkaisut perustuksissa

Mikäli runkomelua ei pystytä vaimentamaan lähellä lähdettä, joudutaan runkomelua torjumaan rakennuksessa. Nykyään yleinen torjuntatoimi on kaksoisantura tai halkaistu antura, jossa talon perustuksiin ala- ja yläpuolisen anturan väliin asennetaan jousimaista mattoa tai levyä, esimerkiksi elastomeeria, kuten on esitetty kuvassa 7.9 (ks. myös kuva

1.5). Lisäksi rakennuksen maanvastainen seinä, joka sijoittuu väylän puolelle, vaimennetaan usein pystysuuntaisella vaimentimella (kuva 7.9).



Kuva 7.9. Runkomelun ja tärinän vaimennusratkaisuja. Radan alla oleva paalulaatta vaimentaa tärinää tehokkaasti, mutta aiheuttaa lisääntyneen runkomeluriskin. Muita vaimennusratkaisuja ovat A) stabilointirakenne radan ja rakennuksen välissä, B) tärinäseinä, jolla voidaan vaimentaa runkomelua tai tärinää, 1) vaakasuuntainen runkomeluvaimennin, 2) pystysuuntainen runkomeluvaimennin, 3) huone huoneessa -rakenne, 4) sepelinalusmatto.

Kun vaimennustarve on suuri, voidaan jousimaista mattoa suurempi vaimennuskyky saavuttaa teräsjousilla. Tyypillisesti kuitenkin saavutetaan riittävä vaimennus anturoiden väliin asennetuilla jousimaisella matolla. Vaimennusmateriaalien valmistajia on useita ja ne ovat erikoistuneita vaimennusratkaisujen toimittamiseen. Vaimennin mitoitetaan alustan mobiliteetin, rakennuksen mobiliteetin sekä kuorman avulla (kappale 7.5.2).

Perustuksiin sijoitetulle vaimennusratkaisulla on mahdollista vaimentaa runkomeluna 10...30 dB. Saavutetun vaimennuksen määrä riippuu rakennuksen alla olevasta maaperästä, perustamistavasta, valitusta kellutusmenetelmästä, ja kellutuksen yläpuolisesta rakennuksen rungosta.

7.5.8 Runkomelun vaimentaminen rakennuksessa

Jos runkomelun vaimentaminen ei ole mahdollista rakennuksen perustuksissa, voidaan sitä vaimentaa myös huonetilassa. Huonetilassa voidaan vaimentaa joko yksi tai useampi voimakkaimmin säteilevä pinta. Arvion voimakkaimmin säteilevistä pinnoista voi tehdä mittaamalla tai mallintamalla värähtelyn säteilevistä pinnoista ja käyttämällä esimerkiksi kaavaa 7.12.

Yleensä betonirakenteisessa talossa välipohjat säteilevät väliseiniä enemmän runkomelua, koska väliseinät ovat rakenteeltaan kevyempiä. Lattian vaimennus toteutetaan kelluvalla lattialla, joka viritetään siten, että runkomelun merkitsevät taajuudet vaimenevat kuulumattomiin. Katosta säteilevä runkomelu vaimennetaan ääntä eristävällä alakatolla. Jos kaikki pinnat halutaan vaimentaa, ratkaisuna on niin sanottu huone huoneessa -rakenne (Sereda 2022).

Kelluvien rakenteiden suunnittelu ja rakentaminen vaativat tarkkaa detaljisuunnittelua, sillä jäykkiä kytköksiä kelluvan rakenteen ja rakennusrungon välillä ei sallita, sillä ne tekevät kellutetusta rakenteesta hyödyttämän värähtelyn vaimentamisen näkökulmasta. Muun muassa läpivientien ja kiinnitysten osalta tulee siis kiinnittää erityistä huomiota siihen, että ne eivät kytke kelluvaa rakennetta jäykästi rakennusrunkoon. Huone huoneessa -rakenteet ovat usein käytössä esimerkiksi äänitysstudioissa pienten taustameluvaatimuksien vuoksi. Studioissa tyypillisesti kuitenkin torjutaan runkomelua, joka johuu rakennuksen muusta käytöstä eikä liikenteestä.

Yksinkertainen esimerkkilaskelma huoneen pintojen vaimennuksesta on esitetty taulukossa 7.6. Taulukon tuloksista havaitaan, että yhden pinnan vaimentaminen ei vaimenna kokonaisrunkomelutasoja kovinkaan paljon, jos edes yhden toisen pinnan säteily lähes samansuuruista. Toisaalta kahden suurimman säteilijän vaimentaminen pienentää kokonaistason eniten.

Taulukko 7.6. Esimerkki huoneen pintojen vaimennuksen vaikutuksesta runkomelun kokonaistason huonetilassa. Vaimennettujen pintojen runkomelutasot on esitetty lihavoituina.

Rakenneosa	Materiaali	Lähtötaso	Runkomelutaso L_{prm} [dB]			
			Lattia	Katto	Lattia ja katto	Kaikki
Lattia	300 mm ontelolaatasto	42	35	42	35	35
Katto	300 mm ontelolaatasto	41	41	34	34	34
Ulkoseinä	Sandwich-elementti, lasipintaa 50 %	25	25	25	25	18
Väliseinä 1	2 x kipsilevy ja ranka, villa	30	30	30	30	23
Väliseinä 2	2 x kipsilevy ja ranka, villa	30	30	30	30	23
Käytävän väliseinä	Betoni 300 mm	38	38	38	38	31
Kokonaistaso		46	44	44	42	39

7.5.9 Tärinän vaimentaminen rakennuksessa

Tärinän vaimennusratkaisut rakennuksessa perustuvat rakennuksen rungon ja lattian värähtelyominaisuuksien hallintaan. Tärinää ei voida vaimentaa samalla tavalla perustuksissa kuin runkomelua sillä tärinän hallitsevat taajuudet ovat usein lähellä esimerkiksi elastomeereilla vaimennetun talon kellutustaajuutta.

Rakennuksen suunnitteluvaiheessa tai alueen kaavoitusvaiheessa vaimennusmahdollisuuksiin voidaan vielä vaikuttaa. Peruseriaatteena rakennusrunkoon kohdistuvissa

tärinäntorjuntaratkaisuihin on, että maaperässä esiintyviä resonansseja pyritään välttämään rakennuksen rungon ominaistajuuksissa (Talja et al. 2008). Yleensä tämä tarkoittaa, että rakennuksen runkoa jäykistetään, jotta ominaistajuus siirtyy ylemmäksi. Rakennusrunko sisältää useita ominaistajuuksia, joiden yhteisvaikutusten arviointi on hankalaa.

Suoraviivaisin tärinän torjuntakeino rakennuksen sisällä lienee lattian värähtelymitoitus (Talja et al. 2008). Tällä torjutaan pystysuuntaista värähtelyä, joka saattaa välipohjassa vahvistua jopa noin kuusinkertaiseksi talon perustuksiin nähden (Talja et al. 2008), mikäli lattian alin ominaistajuus on lähellä maaperässä esiintyvän värähtelyn ominaistajuutta. Tyypillisesti värähtelymitoitus voi olla hyödyllinen torjuntakeino, kun kyseessä on raskas välipohja, jolla on pitkä jänneväli. Tällöin lattian alin ominaistajuus voi viritä tärinätaajuuksille. Lattian alinta ominaistajuutta voidaan arvioida esimerkiksi kaavalla (Talja 2011):

$$f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \left(\frac{(EI)_L}{m} \right)^{1/2} \quad (7.24)$$

missä m [kg/m²] on lattian pintamassa, L on pituus, ja $(EI)_L$ on pituussuuntainen jäykkyys. Kaava (7.13) aliarvioi ominaistajuutta alle 5 % jos pituuden leveyden välinen suhde on yli 1,0 ja pituus- ja leveyssuuntaisten jäykkyyksien välinen suhde on yli 30, eli lattia on leveyden suhteen vähintään 30 kertaa jäykempi (Talja 2011).

Tärinän torjunta olemassa olevan lattian ominaistajuuksia muuttamalla vaatii rakenteellisia ratkaisuja. Lattiaa voidaan jäykistää esimerkiksi tukemalla sitä alapuolelta palkeilla tai pilareilla. Jännevälin puoleen väliin asennettuna palkki vaimentaa alinta ominaistajuutta eniten.

Rakennusrungon alin ominaistajuus liittyy rungon korkeuteen h . Karkeasti voidaan arvioida, että rakennusrungon alin ominaistajuus on (ISO 4866):

$$f_0 = 46/h \quad (8.25)$$

Jos rungon alin ominaistajuus on lähellä maaperässä esiintyvä värähtelyn ominaistajuutta, värähtely voi voimistua rakennusrungossa noin nelinkertaiseksi (Talja et al. 2008). Maaperästä mitatun värähtelyn perusteella voidaan siis esimerkiksi suositella vältettävän tiettyä kerroslukumäärää jossain alueella. Mikäli suunnitellun talon kerroskorkeuteen ei voida vaikuttaa tai rakennus on jo olemassa, täytyy käyttää muita torjuntakeinoja vaakasuuntaiselle huojunnalle. Pientaloille rungon ominaistajuutta voidaan nostaa jäykistämällä talon seiniä tai lisäämällä jäykistävien seinien määrää tai pienentämällä rakennusten ylempien kerrosten massaa (Talja et al. 2008). Lisäksi, jos pientalo on perustettu paaluille, voidaan sokkeli viedä syväälle maahan, paalujen yläpinnan alapuolelle (Talja et al. 2008). Näistä ratkaisuista olemassa olevalle pientalolle käyttökelpoisin ratkaisu lienee lisätä jäykistävien seinien määrää. Esimerkiksi kevyitä väliseiniä voidaan korvata jäykemmällä seinärakenteilla.

Korkeassa rakentamisessa rungon ominaistaajuuden hallinta on hankalampaa eikä rungon rakenteeseen välttämättä voida vaikuttaa niin paljon, että ominaistaajuutta saataisiin siirrettyksi. Tällöin värähtelyä voidaan pienentää viritetyllä massavaimentimella (TMD, eng. tuned mass damper) (Valjus 2019). TMD:n vaimennus perustuu siihen, että sen jousi tai jouset viritetään häiritsevälle ominaistaajuudelle massan avulla, joka on murto osan koko rakenteen massasta. TMD:n massa heiluu vastavaiheessa rakenteeseen nähden ja vaimentaa näin rakenteen värähtelyä.

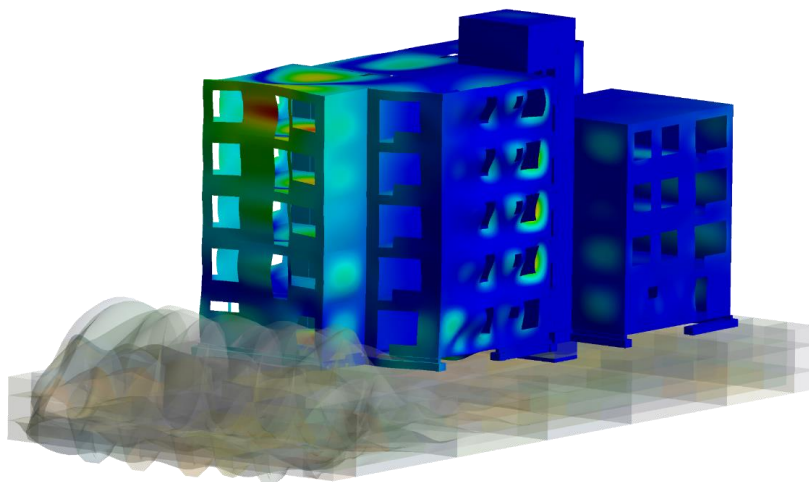
7.6 Värähtelyn mallintaminen

7.6.1 Mallinnusmenetelmät

Värähtelyn mallintaminen on erittäin haastava tehtävä johtuen ongelman luonteesta. Maa-perä on suurelta osin tuntematonta, lähteen voimakkuus on vain osittain tiedossa ja rakennuksen akustiikan mallintaminen tarkasti on haastavaa. Paras tarkkuus mallintamisessa saadaankin, kun käytetään mittauksia kalibroimaan mallin eri osia (Oksanen 2021). Mallinnusmenetelmät kategorisoidaan kolmeen luokkaan, parametriset menetelmät, empiiriset menetelmät ja näiden yhdistelmät eli semi-empiiriset menetelmät (ISO 14837-1).

Yleisesti mallinnusongelma jaetaan kolmeen osaan, lähteen $S(f)$, siirtotien $H(f)$ ja vastaanottajan $R(f)$ mallinnukseen. Eri osien mallinnuksessa voidaan käyttää joko mittauksia, mittauksiin perustuvaa mallinnusta tai ne voidaan mallintaa parametrisesti. Värähtely $V(f)$ on näiden kolmen funktio ja niiden välillä voi olla myös yhteisvaikutuksia, jotka tulisi ottaa mallinnuksessa huomioon (ISO 14387-1).

Parametrisissä malleissa ongelma esitetään 1D-, 2D- tai 3D-avaruudessa ja malleilla annetaan ominaisuuksia, joita hallitaan fysiikan avulla. Suljetun muodon analyttiset ratkaisut värähtelyongelmalla ovat yksinkertaistuksia ja usein ongelman yksittäisiä osia ei mallinneta erikseen, jolloin mallin tarkkuus ei voi olla korkea (Oksanen 2021). Tästä syystä parametrisessä mallinnuksessa käytetään numeerisia ratkaisuja, joilla voidaan mallintaa yksittäiset osat hyvinkin tarkasti (kuva 7.10). Numeerisia menetelmiä ovat elementtimenetelmä (FEM, eng. *finite element method*), reunaelementtimenetelmä (BEM, eng. *boundary element method*) ja aikatazon differenssimenetelmä (FDTD, eng. *finite-difference time-domain*) (ISO 14837-1).



Kuva 7.10. Rautatien varrella sijaitsevan asuinkerrostalon yhdellä taajuudella visualisoitu värähtely elementtimenetelmään perustuvassa laskentamallissa. Liikettä on ilmiön havainnollistamiseksi vahvasti liioiteltu (Oksanen et al. 2021).

Elementtimenetelmien tarkkuudesta runkomelun ja tärinän mallinnuksessa on hyviä kokemuksia (Hamshar 2017, Oksanen 2021). Toisaalta elementtimallinnus on aikaa vievää ja kustannukset ovat yleensä tästä syystä suurempia kuin yksinkertaisimmilla malleilla (Oksanen, 2021). Toisaalta tärinä- ja runkomeluongelman analysointi tarkemmilla menetelmillä voi saada aikaan paljon merkittävämpiä säästöjä vaimennusratkaisujen toteutuksessa.

Empiiriset mallit oletettavat, että värähtelyyn vaikuttavat komponentit voidaan esittää eriteltynä. Empiirisissä malleissa usein lähde–siirtotie–vastaanottaja–malli esitetään muodossa (ISO 14837-1)

$$L_v(f) = S(f) + H(f) + R(f), \quad (7.26)$$

jossa jokainen osatermi koostuu korjaustermeistä:

$$S(f) = S_{\text{ref}} + \Delta S_{\text{pyörä}} + \Delta S_{\text{kiskon kunto}} + \Delta S_{\text{ratatyyppi}} + \Delta S_{\text{nopeus}} + \dots$$

$$H(f) = \Delta H_{\text{maaperä}} + \Delta H_{\text{radan perustus}} + \dots \quad (7.27)$$

$$R(f) = \Delta R_{\text{talon perustus}} + \Delta R_{\text{talon rakenne}} + \dots$$

missä S_{ref} on junan tyyppispektri ja kullekin korjaustermille on annettu jokin etukäteen mitattu tai mallinnettu arvo, joka riippuu esimerkiksi junatyypistä, talon tyypistä, perustamistavoista tai junan nopeudesta. VTT on esittänyt empiirisen mallin junan aiheuttamalle runkomelulle viitteessä (Talja & Saarinen 2009). Kyseisessä mallissa korjaustermejä on noin 10 kpl ja lähteen voimakkuudelle on annettu etäisyysriippuva peruskäyrä. VTT on esittänyt vastaavan empiirisen laskentamallin junan aiheuttamalle tärinälle (Törnqvist & Talja, 2006).

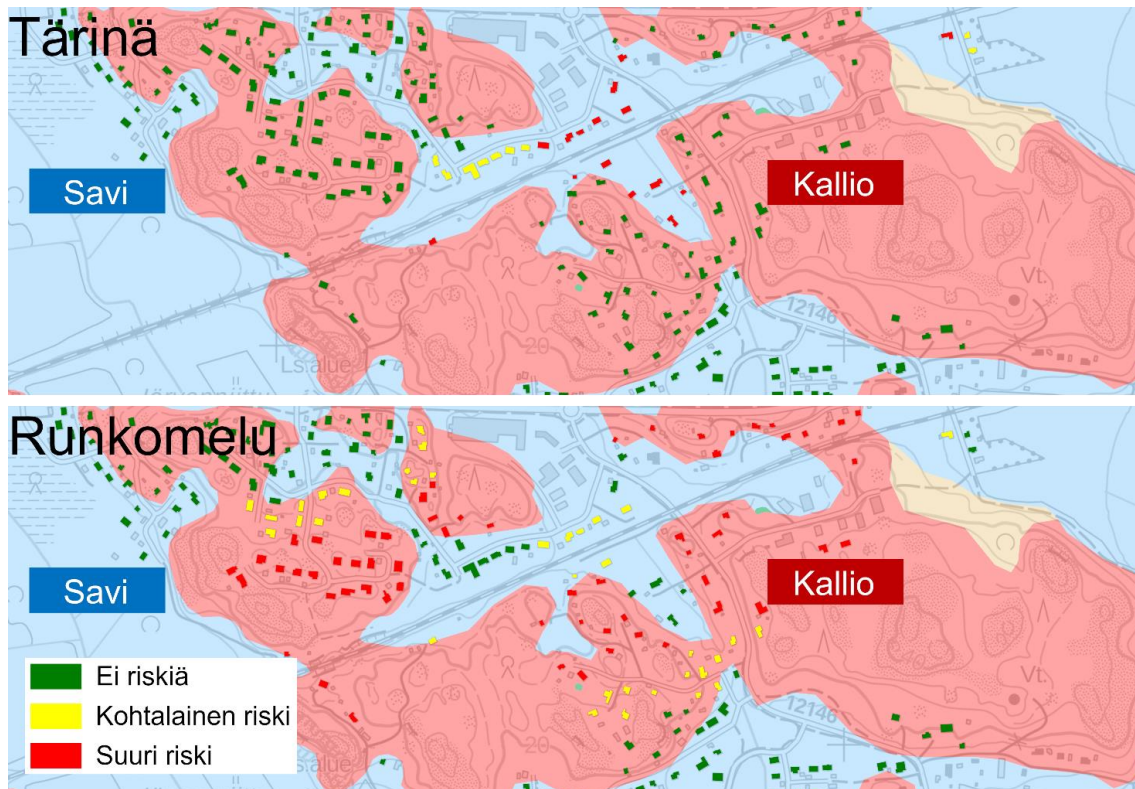
Empiirisen tai semi-empiirisen mallinnuksen epävarmuus voi olla suuri riippuen mallinnettavasta tilanteesta. Niiden etuna on kuitenkin laskennan helppous. Semi-empiirisiä malleja kehitetäänkin edelleen erityisesti niiden laskennallisen keveyden vuoksi. Esimerkiksi, jos tarkasteltava väylä on useita kymmeniä kilometrejä pitkä rautatie ja alue sisältää kymmeniä tuhansia rakennuksia, ei ole ajankäytöllisesti järkevää arvioida värähtelyä koko alueella numeerisilla menetelmillä. Numeerisia menetelmiä voidaan kuitenkin käyttää arvioimaan osia esimerkiksi siirtoreiteistä mittausten sijaan. Esimerkiksi Horisontti Eurooppa -ohjelman rahoittamassa tutkimuksessa kehitetään semi-empiirisiä malleja (Degrande et al 2021). Mallissa värähtely L_v pisteessä \mathbf{x}_b lähteen voimatiheyden L_F , viivälähteen siirtomobilitettiin TM_L ja vastaanottajan siirtofunktion C_b summana

$$L_v(\mathbf{x}_b) = L_F(\mathbf{X}, \mathbf{x}_1) + TM_L(\mathbf{X}, \mathbf{x}_1) + C_b(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_b), \quad (7.28)$$

missä \mathbf{X} on radan pisteet muodostava joukko, ja \mathbf{x}_1 on piste maaperässä. Kutakin termiä kaavasta (7.28) voidaan arvioida mittausten tai mallinnuksen avulla (Degrande et al. 2021).

7.6.2 Laajojen alueiden mallintaminen

Tärinä- ja runkomeluriskien tarkasteluja tehdään laajojen alueiden suunnittelun yhteydessä. Esimerkiksi uusien ratahankkeiden, lisäraiteiden tai vanhojen ratojen muutostöiden suunnittelussa tai yleiskaavoituksessa on arvioitava tärinä- ja runkomeluvaiikutuksia. Tällaisissa hankkeissa käytetään algoritmiavusteisia semi-empiirisiä tai empiirisiä menetelmiä, jotka mahdollistavat laajojen tietomäärien hallitsemisen. Algoritmiavusteisilla menetelmillä voidaan esimerkiksi vertailla raiteiden erilaisia pohjanvahvistamistapoja sekä vaimennusratkaisuja ratarakenteissa tai maaperässä sekä laskea eri olosuhdeluokkiin sijoittuvien rakennusten määrät laajoiltakin alueilta kussakin tapauksessa (kuva 7.11). Tämä tieto yhdistettynä vaimennusratkaisuiden kustannustietoon mahdollistaa panoshyötysuhteen vertailun erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen välillä. (Huhtala & Oksanen 2023)



Kuva 7.11. Algoritmiavusteisella mallinnuksella voidaan arvioida radan aiheuttamaa tärinä- ja runkomeluriskiä tehokkaasti suurelle määrälle kiinteistöjä. Kuva osoittaa myös, että tärinän (ylhäällä) ja runkomelun (alhaalla) riskialueiden laajuudet riippuvat liikennöivän kaluston lisäksi oleellisesti maaperästä. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Luvun 7 lähteet

- Auvinen, T. 2010. Junaliikenteen aiheuttama tärinä ja sen vähentämisen vaikutus asuinviihtyvyyteen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta.
- Connolly, D. P., Kourousis G., Laghrouche, O., Ho, C. L., & Frode, M. C. 2014. Benchmarking railway vibrations – track, vehicle, ground and building effects. *Constructions and Building Material*. Vol. 92, s. 64–81
- Degrande, G. et al. 2021. State-of-the-art and concept of the vibration prediction tool. SILVARS-TAR project GA 101015442, Deliverable D1.1, Raportti Euroopan komissiolle.
- Hakulinen, M. 1999. Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa. Helsinki, Ratahallintokeskus.
- Hamshar, B. 2017. Radanvarsirakennusten värähtely ja tärinän vaimentaminen, Diplomityö, Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta.
- Heikkinen, M. 2019. Raideliikenteen aiheuttama rakenteiden värähtely. Diplomityö, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- Hellberg, J. 2008. Rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentaminen syvästabilointirakenteilla ja tärinän FEM-mallinnus 2D ympäristössä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta.
- Huhtala, T. & Oksanen, B. 2023. Uudet laskentamenetelmät raideliikenteen tärinän ja runkome-lun arvioinnissa. *Rautatietekniikka*. Nro 1, s. 18–19.
- Huhtala, T., Oksanen, B. & Kylliäinen, M. 2021. Pori–Mäntyluoto-koerataosuuden tärinä- ja runkomelumittaukset. *Akustiikkapäivät 2021*. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 20–25.
- Huhtala, T., Ruohonen, M. & Kylliäinen, M. 2017. Stabilointirakenne liikennetärinän torjuntakeinona. *Akustiikkapäivät 2017*. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 278–283.
- IEC 61672-1. 2013. Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications.
- IEC 61260-1. 2014. Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications.
- ISO 1996-2. 2017. Acoustics, Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of sound pressure levels.
- ISO 2631-1. 1997. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements.
- ISO 4866. 2010. Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.
- ISO 8041-1. 2017. Human response to vibration – Measuring instrumentation – Part 1: General purpose vibration meters.
- ISO 14837-1. 2005. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems Part 1: General guidance.
- ISO 14837-32. 2005. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground.
- Jauhiainen, T., Vuorinen, H. S. & Heinonen-Guzejev, M. 2007. Ympäristömelun vaikutukset. Helsinki, ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 3/2007.

- Krylov, V. V. 2007. Control of traffic-induced ground vibrations by placing heavy masses on the ground surface. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, s. 311-320.
- Leimi, S. 2022. Rautatietärinän vaimennusmenetelmien vertailu ja soveltuvuustarkastelu, Diplomityö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Liisanantti, P. 2021. Ponttiseinän toiminnan mallintaminen ratatärinän vaimentamiseksi. Diplomityö. Oulun yliopisto, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma.
- Masoumi, H., Noori, B. Cardona, J., & Carels, P. 2022. Assessment of building performance against train induced vibrations by a hybrid experimental-numerical methodology. 14th International Workshop on Railway Noise and Vibration, s. 663–670.
- Oikarinen, E. 2022. Pohjainten toiminta ja käyttömahdollisuudet Suomen rataverkolla. Diplomityö. Oulu, Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta.
- Oksanen, B. 2021. Raideliikenteen aiheuttaman runkomelun mallintaminen rakennuksessa. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- Oksanen, B., Lietzén, J., Huhtala, T. & Kylliäinen, M. 2021. Numeeriseen laskentamalliin perustuva raideliikenteen runkomelun arviointimenetelmä. *Akustiikkapäivät 2021*. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 38–42.
- Pura, M. 2021. Äänen rakenteelliset sivutiesiirtymät puurakennuksissa. Diplomityö. Oulu, Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta.
- Ranin, L. 2009. Junaratojen vahvistus suihkuinjektoinnilla. Diplomityö. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu, insinöritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta.
- Sereda, O. 2022. Nykyaikaisten elokuvateatterien akustiikkasuunnittelu. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Soltanieh, G. Ni, Y.-Q., Ip, M., & Ho, W. 2022. Theoretical and numerical study on the effect of TMD in ground borne noise control. The 14th International Workshop on Railway Noise and Vibration.
- Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi, Espoo, VTT Tiedotteita 2425.
- Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Esiselvitys. Espoo, VTT Tiedotteita 2468.
- Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo, VTT tiedotteita 2569.
- Talja A., Törnqvist J. & Niemeläinen E. 2014. Pilaristabilointi- ja ponttiseinät: Tärinäestekokeilujen alustavat tulokset ja jatkotutkimustarpeet. Espoo, VTT Asiakasraportti VTT-CR-00691-15.
- Talja A. & Törnqvist J. 2014. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. Espoo, VTT:n tutkimusraportti.
- Törnqvist, J. & Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Espoo, VTT Working Papers 50.
- Valjus, J. 2019. Korkea rakentaminen yleistyy – insinöörit uusien haasteiden edessä. *Betonilehti*. Nro 3, s. 70–76

- Vinter, J. 2015. Eristyskerroksen materiaalin vaikutus maanvaraisen ratapenkereen toimivuuteen. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu.
- Villot, M., Guigou-Carter, C., Jean, P. & Picard, N. 2012. Procedures to predict exposure in buildings and estimate annoyance, Deliverable D1.6, Railway Induced Vibration Abatement Solutions (RIVAS).
- Villot, M., Trevisan, B., Grau, L., & Jean, P. 2019. Indirect methods for evaluating the in-situ performance of building base isolation. *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 105(4), s. 630–637.

8

Oppilaitokset

”Opettajan ääni kateederilta saavuttaa kuulijan osittain suoraan ja osittain kerran tai useita kertoja heijastuneena eri pinnoista. Ei olisi johdonmukaista peittää esimerkiksi katon keskiosaa absorboivilla levyillä, sillä sieltä ääni heijastuu käytännöllisesti katsoen samanaikaisesti alkuperäisen äänen kanssa.”

Yli-insinööri Paavo Arni 1951

8.1 Oppilaitoksen ääniympäristö

8.1.1 Akustiset tavoitteet

Oppilaitoksen tärkein tehtävä on tukea ja mahdollistaa oppiminen. Akustiikan kannalta koululaisten näkökulmasta tämä tarkoittaa sitä, että opetustiloissa on toisaalta riittävä puheenerotettavuus, toisaalta riittävä työrauha koulutyötä varten. Puheenerotettavuuteen vaikuttavat opetustilojen huoneakustiset ratkaisut sekä talotekniikan tiloihin tuottama taustäänitaso. Työrauhaan voi vaikuttaa opetustilojen välinen äänenkeräisy ja erityisesti avoimissa oppimisympäristöissä huoneakustiikka ja mahdollinen peittoääni tai sen puuttuminen.

Oppilaitokset ovat myös opettajien työpaikkoja, joiden akustisilla ominaisuuksilla on vaikutuksia työterveyteen. Opettajat voivat olla työssään lähes yhtäjaksoisesti äänessä koko työpäivän ajan. Oppilaitoksissa tulisi siten olla akustiset olosuhteet, joissa puheen tuottaminen ja opetustyö on vaivatonta ja tila tulee opettajan äänenkäyttöä niin, että ei esimerkiksi synny tarvetta korottaa äänenvoimakkuutta. Jos tällaisia olosuhteita ei ole, vaarana on, että opettajalle kehittyy äänihäiriö eli ongelmia äänenmuodostuksessa. Äänihäiriöiden tavallinen hoitokeino on sairausloma ja kuntouttaminen, joka helposti vie hyvin pitkän ajan. Ongelma voi myös toistua, ellei opetustilan akustiikkaa muuteta tarkoituksenmukaisemmaksi.

Puutteellinen akustiikka opetustilassa vaikuttaa oppimisen ja opettamisen laatuun. Opettajien äänihäiriöistä seuraa myös kustannusvaikutuksia esimerkiksi ongelman hoidosta, sairauspoissaoloista ja sijaisjärjestelyistä. Vuosittain Suomessa kuntoutetaan joitakin satoja opettajia äänihäiriöiden vuoksi, ja useimmiten taustalla on opetustilojen puutteellinen puheakustiikka. Kuntoutuksesta ja sairauslomista muodostuvat kustannukset ovat nopeasti suurempia kuin opetustilan muuttaminen opettajan äänenkäyttöä tukevaksi (Kemppainen 2017).

Monissa oppilaitoksen tiloissa yksityisyys on myös merkittävä akustinen tavoite. Esimerkiksi kouluterveydenhoitajan ja -lääkärin vastaanottohuoneissa sekä koulupsykologin ja -kuraattorin huoneissa käytävät keskustelut ovat luottamuksellisia, eivätkä ne saa olla kuultavissa käytävillä tai viereisissä tiloissa. Nämä seikat otetaan huomioon ääntä eristävien rakenteiden suunnittelussa. Oppilaitoksen jotkin toiminnot, kuten tekninen työ tai musiikin opetus, voivat aiheuttaa häiriötä muulle rakennuksessa tapahtuvalle toiminnalle, ellei äänenkeräisy ole riittävällä tasolla.

Oppilaitosten ääniympäristöön ja akustiikkasuunnitteluun on kiinnitetty huomiota jo pitkään (kuva 8.1) ja koulujen akustiikkasuunnittelua tiedetään tehdyn ainakin 1940-luvulta saakka (Arni 1951, Kylliäinen & Valovirta 2011, Suutarla 2018). Säädotasolla oppilaitosten ääniympäristöstä määrättiin kuitenkin ensimmäisen kerran vasta 1985, jolloin Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 annettiin vaatimukset oppilaitosten

ilma- ja askelääneneristävyydelle, jälkikaiunta-ajoille ja talotekniikasta sallittaville äänitasoille. Rakentamismääräyskokoelmaa uusittaessa vuonna 1998 nämä määräykset kuitenkin poistettiin ja vain luokkahuonetta koskevia ohjeita annettiin ilmaääneneristävyydestä, jälkikaiunta-ajasta ja talotekniikan tuottamista äänitasoista (Romula 2022). Ääniympäristöasetuksen 796/2017 ja ääniympäristöohjeen (YMo 2018) antamisen myötä oppilaitoksia koskevat määräykset ovat jälleen tulleet kattavammiksi.



Kuva 8.1. Vuonna 1950 valmistuneen Tampereen Kissanmaan koulun juhla- ja liikuntasalin takaseinällä sekä katon reunoilla on "kaiunpoistolaitteita" eli absorptiomateriaalina toimivia vanerisia reikälevyjä, joiden takana on ilmatila (Suutarla 2018). Kuvälähde: A-Insinöörien arkisto, kuvaaja Tuomas Pelli.

8.1.2 Määräykset ja ohjeet

Ääniympäristöasetuksen 796/2017 (2022) soveltamisalaan kuuluvat rakennukset, joissa on opetus-, ruokailu- ja liikuntatiloja. Näiden lisäksi oppilaitoksissa voi olla asetuksen soveltamisalaan kuuluvista muista tiloista hoito- ja toimistiloja. Asetuksessa ei anneta näille tiloille ääniympäristöä koskevia määräyksiä teknisinä mittalukuina, vaan niiden ääneneristys on suunniteltava siten, että niissä saavutetaan toimintaa vastaava riittävän hyvä ääniympäristö. Huoneakustiikan ja talotekniikan tiloihin tuottamien äänitasojen osalta edellytetään riittävää puheenerotettavuutta.

Ympäristöministeriön ääniympäristöoppaassa (YMo 2018) on annettu ohjearvoja teknisinä mittalukuina oppilaitosten tilojen väliselle ilma- ja askelääneneristävyydelle, jälkikaiunta-ajalle ja puheensirtoindeksille ja talotekniikan tuottamille melutasoille.

Tarkempia suunnitteluohjeita sekä tavoitearvoja oppilaitosten tilojen huoneakustiikan suunnittelua varten on annettu ympäristöministeriön oppaassa, joka koskee rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelua ja toteutusta (Kylliäinen & Hongisto 2019). Oppaassa annetut ohjeet koskevat esimerkiksi avointen oppimisympäristöjen huoneakustiikan suunnittelua.

Ääniympäristöasetuksen (796/2017) säädöksiä ja ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) annettuja tarkemmin oppilaitosten tiloja ja niille asetettavia tavoitearvoja on käsitelty standardissa SFS 5907:2022. Ääneneristyksen, huoneakustiikan ja talotekniikan melutasojen lisäksi standardissa on annettu suositusarvot liikenteen aiheuttamalle tärinälle ja runkomelulle sekä liikenteen aiheuttamille melutasoille oppilaitoksen sisällä ja ulko-oleskelualueilla.

Ääniympäristöasetus ja -ohje sekä standardi SFS 5907 koskevat lähinnä päiväkotuja, peruskouluja ja lukioita sekä ammatillisia oppilaitoksia ja korkeakouluja. Määräyksiä ja ohjeita sekä suosituksia annetaan niiden opetustiloille mukaan lukien musiikin ja teknisen työn opetustilat. Ammatillisissa oppilaitoksissa ja korkeakouluissa on paljon tiloja, joille on määriteltävä akustiset suunnittelutavoitteet tapauskohtaisesti käyttötarkoituksen perusteella. Tällaisia ovat esimerkiksi laboratorio- ja tutkimustilat tai konehallit. Musiikkioppilaitosten rakennushankkeissa akustiset tavoitteet on suureksi osaksi yleensä asetettava tapauskohtaisesti.

8.2 Oppilaitosten akustiikkasuunnittelu

8.2.1 Auditorion huoneakustiikka

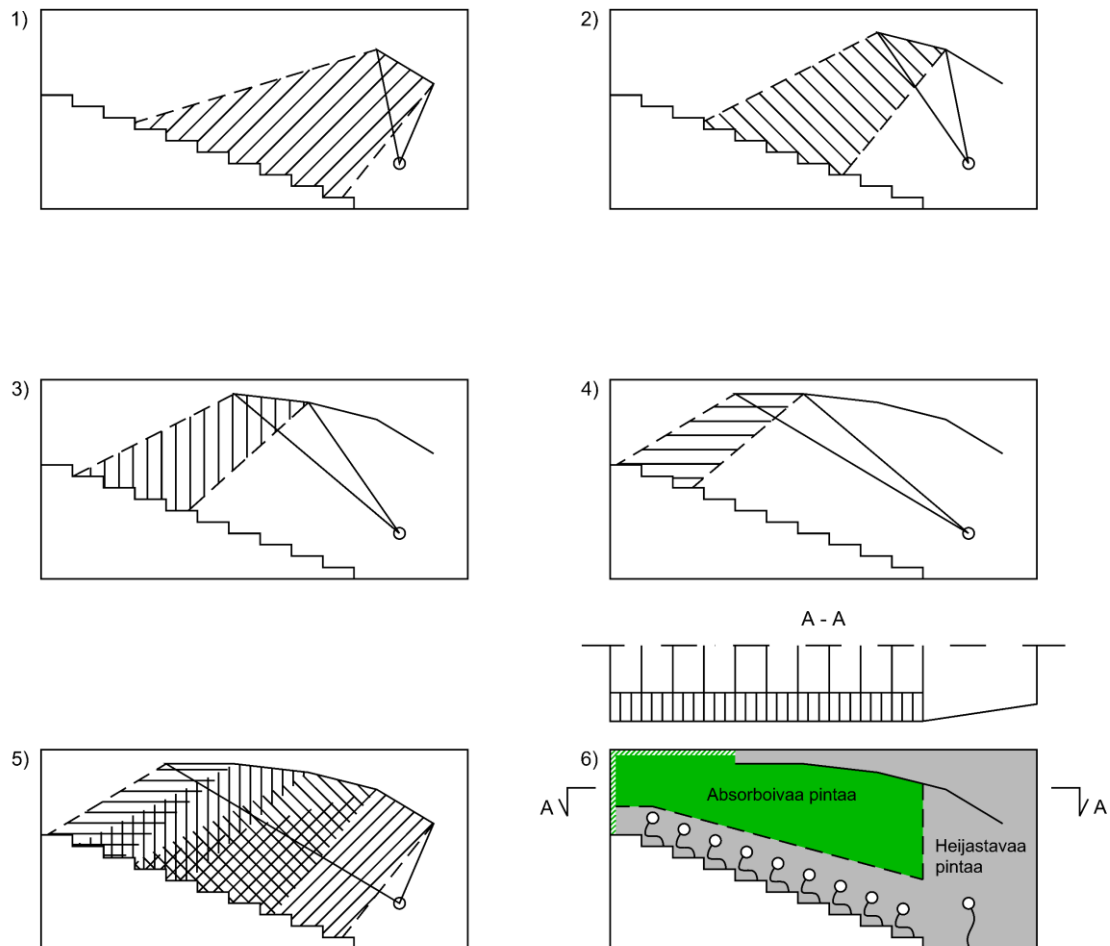
Suurissa auditorioissa, joissa on joitakin satoja istuinpaikkoja, keskeinen huoneakustiikan suunnittelukriteeri on äänen riittävä kuuluvuus selvyuden lisäksi. Riittävä kuuluvuus eli tarpeeksi suuri äänenvoimakkuus muodostuu suorasta äänestä ja varhaisista heijastuksista auditorion pinnoista. Puheenerotettavuuden kannalta oleellista on, että muut kuulijat eivät ole puhujalta vastaanottajalle kulkevan suoran äänen tiellä. Auditorioihin – samoin kuin teattereihin, konserttisaleihin ja muihin esiintymistiloihin – ei siten tehdä nousevaa katsomoa pelkästään näköyhteyden, vaan myös kuulemisen vuoksi (Barron 2010).

Toinen tärkeä seikka auditorion akustiikan kannalta on varhaisten heijastusten suunnittaminen yleisön alueelle. Tämä edellyttää heijastavien tasojen ja absorptiomateriaalien sijoittamista sopiviin paikkoihin. Lisäksi jälkikaiunta-aika pitää säätää ääntä absorboivilla pinnoilla selvyuden kannalta sopivaksi. Kuvassa 8.2 on esimerkki auditorion heijastavien ja absorboivien pintojen suunnittelusta, kun tavoitteena on mahdollistaa puhetilaisuudet ilman äänentoistoa (Templeton 1993):

- 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 keski-osan jälkeen heijastava taso on vaakasuorassa (vaiheet 2–5). Sijoittamalla tasot sopivasti koko yleisön alueelle saadaan katosta hyödyllisiä heijastuksia.
- esiintyjien alueella salin sivuseinät tehdään vinoiksi siten, että niiden välille ei synny tärykaikua poikkisuunnassa (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 pehmutetut istuimet, ja mahdollisesti lisäksi tarvittavasta absorptiomateriaalista. Absorptiomateriaali sijoitetaan sivuseinien yläosaan sekä katon takaosaan (vaihe 6). Päälystämällä takaseinä absorptiomateriaalilla estetään myöhäisten 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.

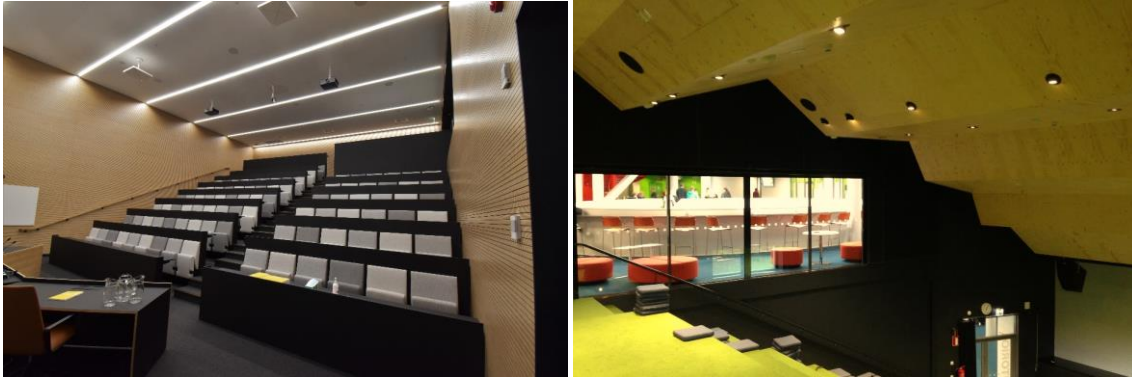
- puhujan kannalta on edullista, jos hän kuulee oman äänensä aikaisia heijastuksia auditoriosta. Katon heijastaviin rakenteisiin tilan etuosaan voidaan tehdä tasoja, joiden kautta puhujan on mahdollista saada palautetta.

Kuvassa 8.2 esitettyä auditorion suunnitteluperiaatetta voidaan soveltaa hyvin erilaisilla tavoilla. Heijastavat ja absorboivat pinnat voidaan esimerkiksi häivyttää niin, että ne näyttävät täysin samalta tai heijastuspintoja voidaan korostaa arkkitehtonisin keinoin (kuva 8.3).



Kuva 8.2. Esimerkki auditorion heijastavien ja absorboivien pintojen suunnittelusta ja sijoittelusta (Kylliäinen 2006).

Monissa oppilaitosten rakennushankkeissa ei enää rakenneta erillistä auditoriota tai juhlasalia. Sitä vastoin puhe- ja juhlatilaisuuksia varten käytetään usein oppilaitoksen aulan ja ruokalan muodostamaa tilavuudeltaan suurta tilaa, jossa voi olla katsomoksi soveltuvat oleskeluportaat (ks. kuva 12.16). Näihin tiloihin voi liittyä myös näyttämö tai esiintymiskoroke. Myös tällaisessa tilanteessa voidaan käyttää kuvan 8.2 mukaista suunnitteluperiaatetta järjestämällä katsomon kohdalle sopivia heijastavia tasoja, joskaan seinäpinnat yleensä eivät ole käytettävissä tai ne ovat kaukana. Tilavuudeltaan suurten aulatilojen akustiikkasuunnittelusta ja tarvittavista absorptiomateriaalien määristä kerrotaan sairaalarakentamisen yhteydessä luvussa 10.2.1.



Kuva 8.3. Kaksi erilaista auditoriota, joissa kummassakin on sovellettu kuvassa 8.2 esitettyä auditorion suunnitteluperiaatetta. Vasemmalla absorboivat ja heijastavat pinnat on järjestetty saman näköisiksi, mutta oikealla heijastavasta pinnasta on tehty polveileva arkkitehtoninen aihe. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaajat Simo Laitakari ja Mikko Kylliäinen.

8.2.2 Opetustilan huoneakustiikka

Tavallisin opetustilojen eli luokkahuoneiden suunnittelussa käytetty akustinen mittaluku on jälkikaiunta-aika T . Suomessa on 1940-luvulta saakka annettu suosituksia opetustilojen jälkikaiunta-ajasta. Suositusarvot ovat vaihdelleet 0,5 s ja 0,8 s välillä (Kylliäinen & Valovirta 2011). Rakentamismääräyksissä jälkikaiunta-ajaksi on sallittu suurimmillaan 0,9 s (Romula 2022). Voimassa oleva ympäristöministeriön ääniympäristöohje (YMo 2018) määrittelee jälkikaiunta-ajan ohjearvoksi 0,5–0,7 s, samoin standardi SFS 5907 (2022) akustisessa luokassa A2.

Jälkikaiunta-aika on yksi opetustilan ääniolosuhteiden yksi osatekijä. Sen lisäksi opettajan äänen on oltava opetuksessa ilman äänen korottamistarvetta riittävän kuuluva koko tilassa, kun opettaja puhuu tilan toisessa päässä. Puheenerotettavuuden kannalta signaalikohinasuhde eli puheäänien äänenpainetaso ja taustäänien äänenpainetaso erotus ovat tärkeitä puheenerotettavuudelle. Jos puheen erotettavuutta arvioidaan vain huoneakustisten mittasuureiden, kuten puheensiirtoindeksin STI avulla, mittaluvun arvo paranee sitä enemmän, mitä pienemmäksi jälkikaiunta-aika mitoitetaan (Kylliäinen & Hongisto 2019).

Jos opetustilan huoneakustiikka suunnitellaan niin, ääniympäristöohjeessa esitetyn jälkikaiunta-ajan edellyttämä absorptioala sijoitetaan vain kattoon, hyvin ääntä absorboivaa materiaalia tarvitaan opetustilan korkeudesta riippuen noin 60–80 % katon pinta-alasta. Jos tämä määrä absorptiomateriaalia sijoitetaan katon keskelle, katosta tuleva hyödyllinen varhainen heijastus vaimenee jopa 10 dB, jolloin sen äänenpainetaso voi olla opetustilassa sallittua talotekniikan äänitasoa pienempi (Kylliäinen & Valovirta 2011). Puheen signaalikohinasuhde tulee tällöin negatiiviseksi eikä riittävää puheenerotettavuutta voida saavuttaa.

Opetustilassa suora äänen kulkureitti varsinkin tilan takaosiin voi olla estetty, koska edessä istuvat oppilaat ovat takana istuvien kannalta esteinä. Puheen suunta vaihtelee opetustilanteessa. Äänen suora kulkureitti voi katketa, jolloin kuuluvuus voi riippua esi-

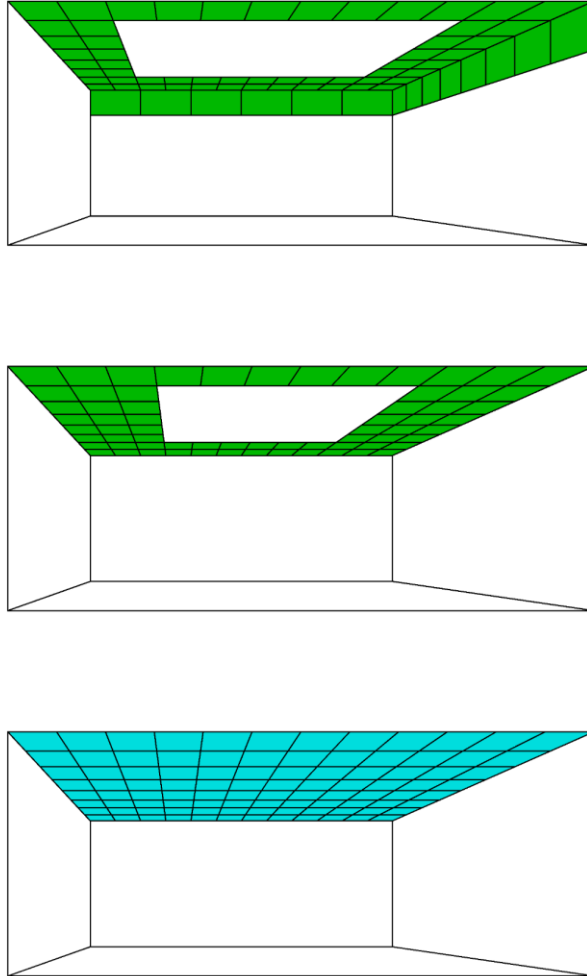
merkiksi vain katosta tulevista varhaisista heijastuksista (Hodgson & Nosal 2022, Yang & Bradley 2009). Jos nämä heijastukset ovat heikkoja varhaisten heijastusten reiteille asetettujen tehokkaasti absorboivien pintojen vuoksi, puheen erotettavuus jää vaatimattomaksi.

Huoneakustisesti toimivassa opetustilassa taustäänitaso ei peitä puhetta liikaa. Ääniympäristöohjeen mukaan keskiäänitaso L_{Aeq} talotekniikasta saa olla enintään 33 dB. Tilan absorboivat pinnat suunnitellaan niin, että hyödyllisiä varhaisia heijastuksia syntyy, mutta myöhäiset heijastukset vaimenevat (Bradley & Sato 2003). Jonkin verran kaiuntainen opetustila on puheen erotettavuuden kannalta parempi kuin opetustila, jossa absorption määrää lisäämällä pyritään mahdollisimman lyhyeen jälkikaiunta-aikaan ja vaimennetaan samalla aikaiset heijastukset. Tutkimuskirjallisuudessa on osoitettu, että opetustilaan sopiva jälkikaiunta-aika on noin 0,5...0,7 sekuntia (Sato & Bradley 2008, Bradley 2009).

Opetustilassa opettajan äänenkäytön kannalta merkittävä tekijä on huoneakustiikan lisäksi tilaan toiminnasta syntyvä äänitaso. Mitä suurempi taustäänitaso, sitä enemmän opettajan on korotettava ääntään. Jälkikaiunta-ajan lyheneminen noin 0,2–0,3 sekuntia pienentää tilassa tapahtuvan toiminnan aiheuttamaa äänitasoa noin 7–8 dB (Jokitulppo et al. 2017). Jälkikaiunta-ajan lyhentäminen tarkoittaa absorptioalan kasvattamista. Absorptioalan liiallinen kasvattaminen kuitenkin vaimentaa puheen kuuluvuuden kannalta tärkeät varhaiset heijastukset ja siten opetustilan ylivaimentamista tulee välttää. Opetustilan huoneakustiikan suunnittelu siten, että kuuluvuus ja puheenerotettavuus ovat mahdollisimman hyviä tilanteessa, jossa opettaja puhuu koko opetusryhmälleen luokan etuosasta, ei estä tilan käyttöä myös ryhmätöihin ja muihin koulutyöhön sisältyviin työtapoihin. (Kylliäinen & Hongisto 2019)

Huoneakustiikan suunnittelun kannalta luokkahuoneet ja muut pienet opetustilat ovat puhesaleja tai auditorioita pienoiskoossa. Erotuksena niistä on tasainen, mistä seurauksena on, että 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 huoneakustiikan suunnitteluperiaatteena on, että katon keskiosaan jätetään heijastava kova pinta, esimerkiksi maalattu betoni tai kipsilevyalakatto, ja absorptiomateriaali sijoitetaan katon reunoille tai osittain seinien yläosaan. Näin menetellään silloin, kun käytetään huokoisia absorptiomateriaaleja, joiden absorptiosuhteet ovat 500 Hz ja korkeammilla oktaavikaistoilla yli 0,9. Jos käytetään esimerkiksi reikälevyjä, joiden absorptiosuhde on 0,6–0,7, koko katon ala voidaan päällystää niillä, koska materiaali on puoliheijastavaa (kuva 8.4). (Kylliäinen & Hongisto 2019)

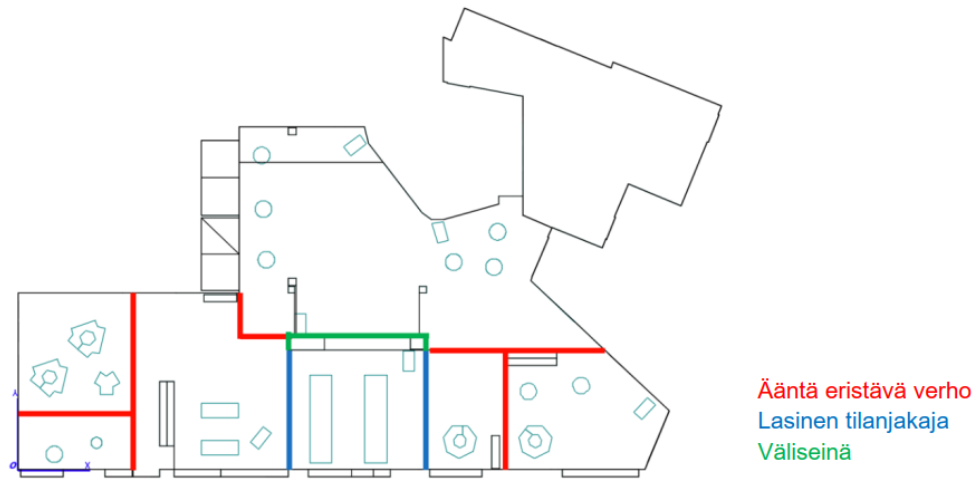
Ympäristöministeriön ääniympäristöohje (YMo 2018) antaa puheensirtoindeksille STI ohjearvoksi opetustiloissa vähintään 0,7. Tämä arvo vastaa korkeaa puheenerotettavuutta (taulukko 5.2). Edellä kuvatuilla periaatteilla eli järjestämällä tilaan varhaisia heijastuksia ja sopivan lyhyen jälkikaiunta-ajan, tämä arvo on saavutettavissa, kun talotekniikan tuottama keskiäänitaso L_{Aeq} on enintään sallittu 33 dB.



Kuva 8.4. 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). (Kylliäinen 2006)

8.2.3 Avoimet oppimisympäristöt

Uusien opetussuunnitelmien myötä avoimia oppimisympäristöjä (kuva 8.5) ryhdyttiin rakentamaan Suomessa oppilaitosten uudis- ja korjausrakentamishankkeissa 2010-luvun jälkipuoliskolla. Avoimet oppimisympäristöt Suomessa ovat yleensä muodostaneet pinta-alaltaan noin 200 m² kokoisen tilan, jossa noin 50–70 koululaisella on 2–5 opettajaa (Kylliäinen & Pääkkönen 2017). Tällä alueella tilaa ei rajata kiintein väliseinin niin kuin luokkahuoneissa tehdään ja sekä oppilaat että opettajat voivat liikkua ja työskennellä avoimen oppimisympäristön koko alalla. Avointen oppimisympäristöjen rakentamista on kokeiltu Suomessa jo aiemminkin, 1970-luvulla peruskouluun siirryttäessä. Ulkomailta avoimia oppimisympäristöjä on rakennettu laajemmin 1960-luvulta lähtien ja niiden pedagoginen tausta-ajatus juontaa joitakin vuosikymmeniä kauemmas. (Baker 2012, Kylliäinen & Hongisto 2019)



Kuva 8.5. Kaaviokuva avoimesta oppimisympäristöstä, jossa on käytetty erilaisia tilanjakajia rajoittamaan äänen leviämistä tilassa (Sadeaho 2020).

Avoimiin oppimisympäristöihin alettiin kohdistaa 1960-luvulta lähtien kritiikkiä, jonka yhtenä pääsyyinä oli puutteellinen akustiikka. Vaikka opetusmenetelmät olivat 1960-luvulle tultaessa muuttuneet, avointen oppimisympäristöjen akustiikka oli suunniteltu luokkahuoneita vastaavaksi. Seurauksena oli äänen leviäminen esteettä koko tilaan, mikä johtui ääntä absorboivien pintojen liian pienestä määrästä sekä äänen kulkua rajaavien tilanjakajien puuttumisesta (King 1963, Kingsbury & Taylor 1970, Sulewsky 1970, Teplitzky 1970, Veneklasen & Hyde 1970, Schellenberg 1975, Shield et al. 2010). Esteettä tilassa leviävä ääni häiritsi keskittymistä edellyttävää koulutyötä. Häiritsevyyden lisäksi äänitasot olivat koulupäivän aikana suuria (Sulewsky 1970).

Avoimiin oppimisympäristöihin kohdistunutta kritiikkiä raportoitiin 1970- ja 1980-luvuilla Ruotsista, Iso-Britanniasta, Yhdysvalloista, Kanadasta ja Uudesta-Seelannista, ja avoimia oppimisympäristöjä muutettiin uudelleen luokkahuoneiksi (Broden 1983). Viime vuosikymmeninä niitä on alettu jälleen rakentaa, erityisesti Pohjoismaissa. Myös avointen oppimisympäristöjen akustiikkaan on kiinnitetty huomiota, ja suunnitteluun on annettu ohjeita (Petersen & Rasmussen 2012, Canning et al. 2017). Avoimessa oppimisympäristössä käytettävät vuorovaikutteiset opetusmenetelmät johtavat siihen, että tilassa voi samanaikaisesti olla käynnissä ryhmätöitä, itsenäistä työskentelyä ja tilanteita, joissa opettaja puhuu opetusryhmälle. Nämä eri toimintamuodot voivat olla häiriötekijöitä toisilleen ja edelleen oppimiselle (Takala et al. 2017). Avoimen oppimisympäristön ääniolosuhteet riippuvat akustiikan lisäksi myös siitä, millä tavoin tilaa käytetään. Häiriötömyyden kannalta vastaavia olosuhteita kuin seinin rajatuissa luokkahuoneissa ei voida saavuttaa avoimissa oppimisympäristöissä.

Avoimia oppimisympäristöjä on tutkittu erityisesti toiminnasta aiheutuvan äänitason sekä äänen koetun häiritsevyyden kannalta. Suurimmat äänitasot näissä tiloissa tuottavat koululaiset itse. Mitä pienemmistä koululaisista on kysymys, sitä suurempia äänitasot ovat. Ryhmätöiden ja liikkumista vaativien tehtävien aikana keskiäänitaso $L_{A,eq}$ voi olla 53–57 dB ja opettajan puhuessa opetusryhmälleen 47 dB (Greenland et al. 2011). Suomessa tehdyissä mittauksissa toiminnasta aiheutuva keskiäänitaso oli eri kohdissa avointa

oppimisympäristö noin 35–50 dB vähintään puolet ajasta koulupäivän aikana. Toiminnan aikaisen keskiäänitason keskiarvo tilassa oli 45 dB. Kohdasta riippuen toiminnan aikainen melutaso oli koulupäivän kuluessa 10 % ajasta enemmän kuin 62–69 dB (Romula 2020, Sadeaho 2020). Pienimmät lapset kokevat melun muita häiritsevämpänä johtuen kuuloaistin kehittymisestä (Mealings et al. 2015).

Melun vaikutuksia koulutyöhön on selvitetty kyselytutkimuksilla. Ulkomailla tehdyssä kyselytutkimuksessa oppilaat kokivat häiritsevimmäksi melun lähteeksi oppilaat muissa opetusryhmissä, toiseksi häiritsevemmäksi ulkona olevat oppilaat ja kolmanneksi muiden opetusryhmien opettajat. Oppilaat kuuluivat opettajansa parhaiten, kun muut opetusryhmät olivat hiljaa ja heikoiten, kun muut opetusryhmät työskentelivät ja liikkuivat. Opettajat kokivat häiritsevimmäksi toisten opetusryhmien opettajat ja seuraavaksi häiritsevemmäksi muiden opetusryhmien oppilaat. Kommunikaation kannalta opettajat kokivat helpoimmaksi keskustelun oppilaan kanssa kahden kesken ja vaikeimmaksi keskustelun koko opetusryhmän kanssa (Mealings et al. 2015).

Suomessa tehdyssä kyselytutkimuksessa koululaiset nimesivät häiritseviksi tekijöiksi muiden oppilaiden puheen ja muista oppimissoluista kuuluvat äänet. Opettajat taas totesivat joutuvansa korottamaan avoimessa oppimisympäristössä toiminnan aikaisen melun takia ääntään tullakseen kuulluksi, mistä on seurannut äänenmuodostuksen ongelmia enemmän kuin luokahuoneessa. Koulutyötä häiritsevinä tekijöinä opettajat pitivät muiden oppilaiden puhetta, kun oma ryhmä tekee keskittymistä vaativia tehtäviä, oppimisympäristöön hajaantuneiden oppilaiden puhetta sekä muiden opetusryhmien oppilaiden puhetta, kun opettaja puhuu.

Merkittävin koulutyötä vaikeuttava tekijä avoimessa oppimisympäristössä on keskittymistä häiritsevä puhe, jonka lähteenä voi olla toisen opetusryhmän opettaja tai muut oppilaat. Suomessa avointen oppimisympäristöjen ääniolosuhteita on tutkittu vähän (Pääkkönen et al. 2015). Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että luokahuoneiden suunnittelussa vuosikymmeniä käytetty jälkikaiunta-aika ei ole riittävä avointen oppimisympäristöjen suunnittelukriteeri. Lyhytkään jälkikaiunta-aika ja suuri absorptioala eivät takaa riittävän hyviä ääniolosuhteita avoimiin oppimisympäristöihin puheen häiritsevyyden kannalta. Ääniolosuhteisiin voidaan vaikuttaa tilanjakajilla, kuten verhoilla, seinäkkeillä ja kalusteilla. Peittoäänien merkitys näyttää olevan suuri (Kylliäinen & Pääkkönen 2017).

Peittoäänien käyttöä avoimissa oppimisympäristöissä on ehdotettu jo 1970-luvulla (Pirn 1971). Tarkoituksena on rajoittaa peittoäänellä etäisyyttä, jolla puhe on hyvin erottavissa ja vähentää siten sen häiritsevyyttä, sillä talotekniikan tuottaman taustaaänen keskiäänitaso $L_{A,eq}$ on avoimissa oppimisympäristöissä 24–32 dB, mikä ei ole riittävä puheenpeiton aikaansaamiseksi (Kylliäinen & Pääkkönen 2017). Peittoääni tuotetaan keinotekoisesti kaiuttimilla ja sen sisältö on neutraalia huomaamatonta kohinaa. Suurilla etäisyyksillä puheensirtoindeksin STI tulisi olla avoimessa oppimisympäristössä mahdollisimman pieni, mutta pienillä etäisyyksillä tarpeeksi suuri tilanteessa, jossa opettaja puhuu koko ryhmälleen. Opetustiloissa puheensirtoindeksin arvon tulisi olla vähintään 0,7. Tätä lukuarvoa voidaan soveltaa avoimissa oppimisympäristöissä pienillä etäi-

syyksillä ja se saavutetaan noin 3–4 m etäisyydellä opettajasta, kun tilassa on 40 dB peittoäänitaso. Tämä etäisyys mahdollistaa hyvän puheenerotettavuuden opettajan puhussa koko opetusryhmälle. Jos otetaan huomioon toiminnan aikainen keskiäänitaso, puheensirtoindeksin STI arvo on yleensä edelleen vähintään 0,7, kun etäisyys opettajaan on 3–4 m. Koulupäivän aikana esiintyy kuitenkin toiminnan aikaisia äänitasoja, joiden aikana puheenerotettavuus tällä etäisyydellä on pienempi (Sadeaho 2020). Häiritsevyyden rajana pidetään puheensirtoindeksin arvoa 0,5. Tämä arvo saavutetaan avoimissa oppimisympäristöissä 8 metrin etäisyydellä, kun peittoääni on 40 dB (Kylliäinen & Pääkkönen 2017). Peittoääni ei lähtökohtaisesti lisää opetuksen aikaista keskiäänitasoa (Takala et al. 2017). Ympäristöministeriön oppaassa (Kylliäinen & Hongisto 2019) avoimen oppimisympäristön suunnittelukriteerinä on puheensirtoindeksi STI, jonka arvon 3 m etäisyydellä puhujasta pitää olla vähintään 0,7 ja 8 m etäisyydellä se saa olla enintään 0,5.

Avoimen oppimisympäristön ääniolosuhteisiin voidaan vaikuttaa tilanjakajilla, kuten seinäkkeillä, kalusteilla, verhoilla, paljeovilla ja vastaavilla helposti liikuteltavilla ratkaisuilla. Tilaan voidaan järjestää pieniä rauhallisia vetäytymistiloja, ryhmätyötiloja ja vastaavia ratkaisuja, jolloin niissä kussakin voidaan saavuttaa erilaiset ääniolosuhteet ja valinnanvaraa oppilaille. Avoimessa oppimisympäristössä opetustiloja suuremman huonekorkeuden on havaittu lisäävän puheyksityisyyttä suurilla etäisyyksillä, koska kattoheijastuksen merkitys äänen etenemisessä pienenee etäisyysvaimennuksen kasvaessa. (Kylliäinen & Hongisto 2019)

8.2.4 Ääneneristys

Oppilaitosten tilojen ääneneristystarpeet muodostuvat tilassa tapahtuvan toiminnan muulle toiminnalle aiheuttamasta häiriöstä (esim. teknisen työn tilaryhmä, musiikin opetustilat, liikuntatilat), riittävästä yksityisyydestä (oppilashuollon tila) ja oppimisen tai koulutyön ja työskentelyn edellyttämästä ääneneristävydestä (opetustilat, toimistotilat). Ääneneristystä tarkastellaan yleensä rakennusosien ilmaääneneristyslukujen R_w ja tilojen välisten äänitasoerolukujen $D_{nT,w}$ perusteella. Muista tiloista kulkeutuvan äänen vaikutukset ja kokeminen riippuvat kuitenkin myös tilan muista olosuhteista, kuten jälkikaiunta-ajasta ja taustäänitasosta.

Koettua ääneneristävyttä voidaan tarkastella puheensirtoindeksin STI avulla (Keränen & Hongisto 2010). Koettua ääneneristävyttä tutkittaessa pyritään mahdollisimman pieneen puheensirtoindeksin arvoon. Arvoa 0,2 pidetään yksityisyyden rajana ja arvon ollessa 0,05 ääneneristävyden voidaan arvioida olevan niin hyvä, että viereisessä tilassa on mahdotonta saada puheesta enää selvää eikä sitä juuri enää huomaakaan. Ääniympäristöoppaassa (YMo 2018) ja standardissa SFS 5907 (2022) eri tiloille annettuja äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ pienimpiä sallittuja arvoja voidaan myös perustella koetulla ääneneristävydellä (taulukko 8.1). Sama koskee myös talotekniikan suurimpia sallittuja keskiäänitason arvoja, sillä talotekniikan tuottama kohina toimii myös peittoääninä koetun ääneneristävyden kannalta.

Taulukko 8.1. Oppilaitoksen tiloille asetettavien akustisten tavoitearvojen perusteella saavutettava puheensiirtoindeksin STI arvo tilojen välillä, kun viereisessä tilassa yksi ihminen puhuu normaalilla puheäänellä. Toimistohuoneen ja terveydenhoitajan huoneen tilavuus on 36 m³, neuvottelutilan 60 m³ ja opetustilan 200 m³ ja tiloja erottavien väliseinien pinta-alat ovat vastaavasti 12 m², 15 m² ja 21 m².

Tila	Äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	Keskiaänitaso L_{Aeq}	Jälkikaiunta-aika T	STI
Toimistohuone	40 dB	33 dB	0,8 s	0,21
Opetustila	44 dB	33 dB	0,6 s	0,00
Terveydenhoitajan huone	48 dB	33 dB	0,8 s	0,05
Neuvottelutila	48 dB	33 dB	0,6 s	0,00

8.2.5 Musiikkioppilaitokset

Musiikin opetustilojen huoneakustisten ja talotekniikan äänitasotavoitteiden valintaan sekä tilavarausten tekemiseen voidaan käyttää kansainvälistä standardia ISO 23591 (2021), joka perustuu norjalaiseen standardiin NS 8178 (2014). Esimerkiksi bänditilassa absorptioalaa tarvitaan musiikin äänitason vaimentamiseksi paljon, myös pientaajuuksilla (kuva 8.6). Musiikkioppilaitosten yhteyteen toteutettavien konserttisalien tilavuuden ja korkeuden taas pitää olla suuri, jotta ne soveltuvat myös sinfoniselle orkesterimusiikille (kuva 8.6). Koska musiikkioppilaitosten konserttisaleissa voidaan soittaa lähes mitä tahansa musiikinlajia, tarpeen on usein muunneltava akustiikka, jolla jälkikaiunta-aikaa voidaan säätää kullekin esitykselle sopivaksi.



Kuva 8.6. Bänditila (vas.) edellyttää lyhyttä jälkikaiunta-aikaa ja absorptiota bassotaajuuksilla. Musiikkioppilaitoksen konserttisalin tulee olla kaiuntainen, mikä edellyttää riittävän suurta tilavuutta (oik.). Esimerkit ovat Joensuun konservatorion 2021 valmistuneesta uudisrakennuksesta. Kuvallähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

Standardi SFS 5907 (2022) suosittelee musiikkioppilaitosten ääneneristävyyden suunnitteluun käytettäväksi standardin akustisen laatuluokan A1 suositusarvoja vähimmäisvaatimuksina. Esimerkiksi ilmaääneneristävyyden vähimmäisvaatimukseksi musiikinharjoitustilojen välille tulee tällöin äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ arvo 65 dB ja askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ suurimmaksi sallituksi arvoksi asetetaan 43 dB. Käytännössä nämä

arvot johtavat kaksinkertaisiin rakenteisiin ja kelluviin lattioihin. Esimerkiksi bänditilojen ja vahvistetun musiikin soittotilojen ääneneristys voi edellyttää suurempiäkin ääneneristysvaatimuksia.

Luvun 8 lähteet

- Arni, P. 1951. Akustiska problem i skollokaler. Föredrag vid NIM 4 i Helsingfors, juni 1951. Helsinki, Sanoma Oy.
- Baker, L. 2012. A History of School Design and its Indoor Environmental Standards, 1900 to Today. Berkeley, National Institute of Building Sciences, National Clearinghouse for Educational Facilities.
- Barron, M. 2010. Auditorium acoustics and architectural design (2. p.). London, Spon Press.
- Bradley, J. S. 2009. A new look at acoustical criteria for classrooms. *Internoise 2009*, 23.-26.8., Ottawa.
- Bradley, J. S. & Sato, H. 2003. On the importance of early reflections for speech in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 113, s. 3233–3244.
- Brogden, M. 1983. Open plan primary schools: Rhetoric and reality. *School Organization*. Vol. 3(1), s. 27–41.
- Canning, D., Cogger, E., Greenland, E., Harvie-Clark, J., James, A., Oeters, D., Orłowski, R., Parkin, A., Richardson, R. & Shield, B. 2015. *Acoustics of schools: a design guide*. London, Institute of Acoustics & Association of Noise Consultants.
- Greenland, E. E. & Shield, B. M. 2011. A survey of acoustic conditions in semi-open plan classrooms in the United Kingdom. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 130(3), s. 1399–1410.
- Hodgson, M. & Nosal, E.-M. 2002. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 111, s. 932–939.
- ISO 23591. 2021. Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces.
- Jokitulppo, J., Pirilä, S., Niemitalo-Haapola, E. & Rantala, L. 2017. Osallistava melunhallinta ja akustointi – Miten opetustilan ääniympäristöä voidaan parantaa? *Rakennusfysiikka 2017*. Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Tampere, 24.–26.10., s. 597–602.
- Kempainen, J. 2017. Akustisten olosuhteiden kustannusvaikutukset. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- Keränen, J. & Hongisto, V. 2010. Background noise affect subjective sound insulation – needs to update the target values? *Internoise 2010*. Lisbon, June 13–16.
- King, J. 1963. Sound of change in the American schoolhouse. *Sound*. Vol. 2, s. 12–15.
- Kingsbury, H. F. & Taylor, D. W. 1970. Acoustical conditions in open-plan classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 47, s. 79.

- Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetekniikan laitos, tutkimusraportti 137.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28.
- Kylliäinen, M. & Pääkkönen, R. 2017. Ääniolosuhteet avoimissa oppimisympäristöissä. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 21–26.
- Kylliäinen, M. & Valovirta, I. 2011. Opetustilojen huoneakustiikka – paluu juurille. Akustiikkapäivät 2011. Tampere, 11.–12.5., Akustinen Seura ry, s. 285–290.
- Mealings, K. T., Demuth, K., Buchholz, J. M. & Dillon, H. 2015. The effect of different open plan and enclosed classroom acoustic conditions on speech perception in Kindergarten children. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 138(4), s. 2458–2469.
- NS 8178. 2014. Acoustic criteria for rooms and spaces form music rehearsal and performance.
- Petersen, C. M. & Rasmussen, B. 2012. Acoustic design of open plan schools and comparison of requirements. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting. Odense, June 18–20.
- Pirn, R. 1971. The class circle – an acoustical design concepts for open-plan schools. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 97, s. 97.
- Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S. & Vinha, J. 2015. Acoustics and new learning environment – A case study. *Applied Acoustics*. Vol. 100, s. 74–78
- Romula, S. 2020. Toiminnan aikaiset melutasot avoimessa oppimisympäristössä. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Romula, S. 2022. Julkisten rakennusten akustinen kuntotutkimus. Diplomityö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Sadeaho, P.-H. 2020. Toiminnan aikaisen melutason vaikutus puheenerotettavuuteen avoimessa oppimisympäristössä. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Sato, H. & Bradley, J. S. 2008. Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 123, 2064–2077.
- Schellenberg, B. 1975. Noise and sound control in open plan schools. Washington, U. S. Department of Health.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Shield, B., Greenland, E. & Dockrell, J. 2010. Noise in open plan classrooms in primary schools: A review. *Noise & Health*. Vol. 1, s. 225–234.
- Sulewsky, J. E. 1970. Acoustics in office landscape and open-plan schools. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 481970, s. 99.
- Suutarla, M. 2018. Kissanmaan koulu – Rakennushistoriallinen selvitys. Tampere, Arkkitehtitoimisto Lasse Kosunen Oy.
- Takala, J., Rauhala, J., Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2017. Kokeilu häiritsevyyden rajoittamiseksi avoimessa oppimisympäristössä. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 27–32.

- Templeton, D. 1993. *Acoustics in the built environment*. Oxford, Butterworth Architecture.
- Teplitzky, A. M. 1970. Effects of background noise, distance, and speech directivity in the open plan. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 49(1), s. 88.
- Veneklasen, P. S. & Hyde, J. R. 1970. Concepts and Acoustics of Open-Plan Offices and Schools. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 47(1), s. 78.
- Yang, W. & Bradley, J. S. 2009. Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 125, s. 922–933.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

9

Toimistorakennukset

”Tavallisimmat melunlähteet toimistoissa ovat ihmisten puhe, puhelimien hälytyslaitteet ja konttorikoneet sekä huoneessa tapahtuva liikenne. Katto on tärkein ääntä heijastava pinta, ja siksi se hallitointimistoissa olisi aina vaimennettava.”

Arkkitehti Alpo Halme 1965

9.1 Toimistojen ääniympäristö

9.1.1 Akustiset tavoitteet

Toimistotyöympäristön akustisten olosuhteiden tulee luoda hyvät edellytykset työnteolle (Hongisto & Kylliäinen 2008). Nykyisin toimistotyöympäristö tarkoittaa useimmille työskentelyä avotoimistossa tai monitilatoimistossa (kuva 9.1). Kumpikin näistä voidaan suunnitella akustisesti toimivaksi. Se edellyttää, että tilassa käytetään aina kolmea akustista ratkaisua: tilassa on ensinnäkin oltava riittävä määrä hyvin absorboivia pintoja, toiseksi tilassa tarvitaan tilanjakajia (seinäkkeitä, kalusteita) rajoittamaan suoran äänen leviämistä ja kolmanneksi tilassa pitää olla sopiva määrä puhetta peittävää huomaamattonta kohinaa eli peittoääntä. Jos yksi näistä ratkaisuista jätetään pois, avointa toimistotyöympäristöä ei voida saada akustiikan kannalta toimivaksi. Kaikkien kolmen ratkaisun tarkoituksena on vähentää keskittymistä haittaavaa häiriötä, joka syntyy puheesta, joka käsillä olevan työtehtävän kannalta on tarpeetonta eli tällöin kysymys on melusta.

Avoimessa toimistotyöympäristössä akustisten ratkaisujen tarkoitus on tukea työnteoa rajoittamalla puheesta syntyvää häiriötä. Käytännössä jokaisella työpaikalla on myös tiloja, joissa tärkeää on yksityisyys. Esimerkiksi neuvottelutilojen ääneneristävyyden pitää olla niin hyvä, että se mahdollistaa luottamuksellisten keskustelujen käymisen. Tällaisia voivat olla tarjousneuvottelut, liiketoiminnan kehittämistä koskevat keskustelut tai henkilöstöasiat. Näissä tiloissa myös hyvä puheenerotettavuus on käyttötarkoituksen kannalta keskeinen ominaisuus.

Toimistorakennusten akustiikkaa koskevia suosituksia annettiin vuonna 1967 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisemissa Ääneneristysnormeissa. Sääöstasoisia määräyksiä toimistorakennusten akustiikasta on ollut vuodesta 1975, jolloin Suomen rakentamismääräyskokoelma julkaistiin (Tanila 2022). Akustiikan asiantuntijat ovat kohdistaneet mielenkiintoaan toimistorakennusten akustiikkaan tätä aiemminkin. Esimerkiksi vuonna 1965 Akustisessa Aikakauslehdessä julkaistiin artikkeli maisemakonttorien akustisista ilmiöistä ja suunnitteluratkaisuista (Halme 1965).

9.1.2 Määräykset ja ohjeet

Toimisto- ja kokoustilat kuuluvat ääniympäristöasetuksen 796/2017 (2022) soveltamisalaan, joskin asetuksessa määräyksenä edellytetään näiden tilojen ääneneristävyyden, meluntorjunnan ja huoneakustiikan vastaavan käyttötarkoitustaan ja tuottavan riittävän hyvän ääniympäristön. Ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) on annettu ohjearvoja toimistorakennuksen tilojen välisille ääneneristävyyksille, talotekniikan melutasoille sekä toimistohuoneiden ja avointen toimistotilojen huoneakustiikalle.



Kuva 9.1. Esimerkki hyvin suunnitellusta avotoimistosta. Tilan koko katon alalla on ääntä tehokkaasti absorboivaa materiaalia. Lisäksi absorptiota on jonkin verran kalusteissa ja lattian tekstiilimatto absorboi jonkin verran suurimpia taajuuksia. Työpisteiden ja ryhmien välillä on riittävästi tilanjakajina toimivia seinäkkeitä ja kalusteita. Tilassa on myös peittoäänijärjestelmä koko työpisteiden alalla. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

Tarkempia suunnitteluohjeita sekä tavoitearvoja oppilaitosten tilojen huoneakustiikan suunnittelua varten on annettu ympäristöministeriön oppaassa, joka koskee rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelua ja toteutusta (Kylliäinen & Hongisto 2019). Oppaassa annetut ohjeet koskevat esimerkiksi avointen avotoimistojen ja kokoustilojen huoneakustiikan suunnittelua.

Ääniympäristöasetuksen (796/2017) säädöksiä ja ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) annettuja tarkemmin toimistotiloja ja niille asetettavia tavoitearvoja on käsitelty standardissa SFS 5907:2022. Ääneneristyksen, huoneakustiikan ja talotekniikan melutasojen lisäksi standardissa on annettu suositusarvot liikenteen aiheuttamalle tärinälle ja runkome-lulle sekä liikenteen aiheuttamille melutasoille oppilaitoksen sisällä ja ulko-oleskelualueilla.

9.2 Toimistojen akustiikkasuunnittelu

9.2.1 Avotoimistot

Avotoimistojen ääniolosuhteet eivät saa heikentää työn tuottavuutta yksilön tai koko organisaation kannalta (Hongisto & Kylliäinen 2008). Puutteellisesta akustiikasta ja tekeillä olevan työn kannalta tarpeettoman puheen aiheuttamasta häiritsevyydestä seuraavat keskittymisongelmat ja stressitason kasvu voivat johtaa huomattavaan työajan hukkaa. Eriytyisen suuret vaikutukset puheäänien häiritsevyydellä on silloin, kun työtehtävä edellyttää keskittymistä. (Hongisto 2005, Kylliäinen & Hongisto 2019)

Rakennusalan kustannustarkasteluissa otetaan huomioon rakennuskustannukset, käyttökustannukset ja nykyisin jossain määrin myös elinkaarikustannukset. Tilojen käytön aikana syntyy kuitenkin kustannuksia, joita yleensä ei oteta huomioon. Tällaisia ovat esimerkiksi akustisesti epätarkoituksenmukaisten tilojen aiheuttamat kustannukset terveysvaikutusten tai työajan hukan vuoksi (Kemppainen 2017, Kemppainen et al. 2019).

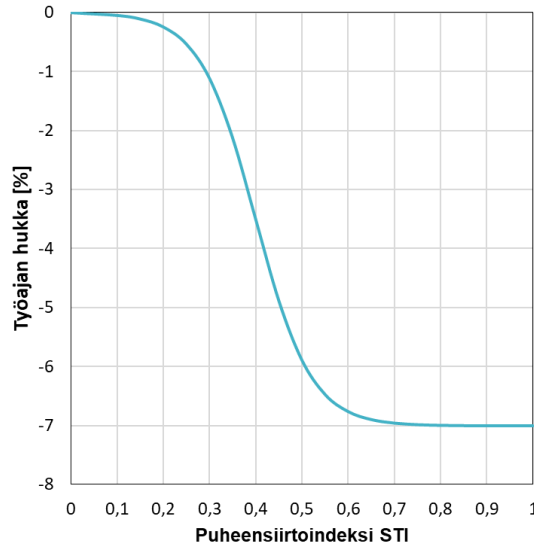
Avotoimistojen akustiikkaa on tutkittu Suomessa ja kansainvälisesti varsin paljon. Tutkimuskirjallisuuden perusteella tunnetaan ratkaisut, joiden mukaan avotoimistot kannattaa suunnitella akustisesti ja toiminnallisesti: tarvitaan paljon absorptioalaa vaimentamaan äänen heijastumista ja alentamaan äänitasoa, tarvitaan seinäkkeitä estämään suoran äänen etenemistä ja tarvitaan peittoäänijärjestelmä vähentämään puheenerotettavuutta (Kylliäinen & Hongisto 2019). Avotoimistossa myös kalusteista syntyvästä absorptioalasta on hyötyä (Pääkkönen & Kylliäinen 2017).

Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty arvioita työajan hukasta silloin, kun avotoimiston akustiikka ei vastaa tarkoitustaan (Hongisto 2005). Työajan hukka voidaan laskea puheenerotettavuuden ja puhetilojen puheakustiikan arvioimiseksi kehitetyn puheensiirtindeksin STI avulla (ISO 3382:2012). Puheensiirtindeksiä voidaan käyttää myös puheen häiritsevyyden ja puheyksityisyyden arviointiin (Hongisto 2005, Hongisto & Kylliäinen 2008).

Työteho alkaa laskea keskittymistä vaativissa tehtävissä, kun puheensiirtindeksin STI arvo on suurempi kuin 0,20. Työtehon lasku saavuttaa maksiminsa, kun puheensiirtindeksi STI on kasvanut arvoon 0,60 (kuva 9.2). Puheensiirtindeksin arvo 0,60 vastaa puheenerotettavuutta hyvässä puhetilassa (ks. taulukko 5.2). Työtehon laskun maksimi on 7 % työajasta (Hongisto 2005, Haapakangas et al. 2020).

Puheensiirtindeksin arvo avotoimistossa voidaan määrittää huoneakustisella tietokonemallinnuksella. Mallinnuksen avulla on tutkittu kahta avotoimistoa, joissa on 170 työpistettä ja avotoimiston pinta-ala on noin 2000 m². Avotoimisto 1 vastaa huoneakustialtaan tarkoituksenmukaisesti suunniteltua avotoimistoa (kuva 9.1). Tässä vaihtoehdossa työpisteet on eroteltu toisistaan kalusteilla ja seinäkkeillä. Toimiston katossa on koko alalla akustiikkamineraalivilla 40 mm ja lattianpäällysteenä on tekstiilimatto. Avo-

toimistoon on lisäksi asennettu peittoäänijärjestelmä, jonka tuottaman peittoäänien keskiäänitaso $L_{A,eq}$ on 42 dB. Avotoimistossa 2 on taustaaänen keskiäänitaso 33 dB, joka vastaa toimistohuoneessa sallittavaa keskiäänitasoa (SFS 5907:2022). Toimistossa ei työpöytien lisäksi ole muita kalusteita eli tilanjakajia ei ole. Katto on koko alaltaan verhottu 40 mm paksulla akustiikkamineraalivillaa ja lattiamateriaalina on muovimatto. (Kempainen et al. 2019)

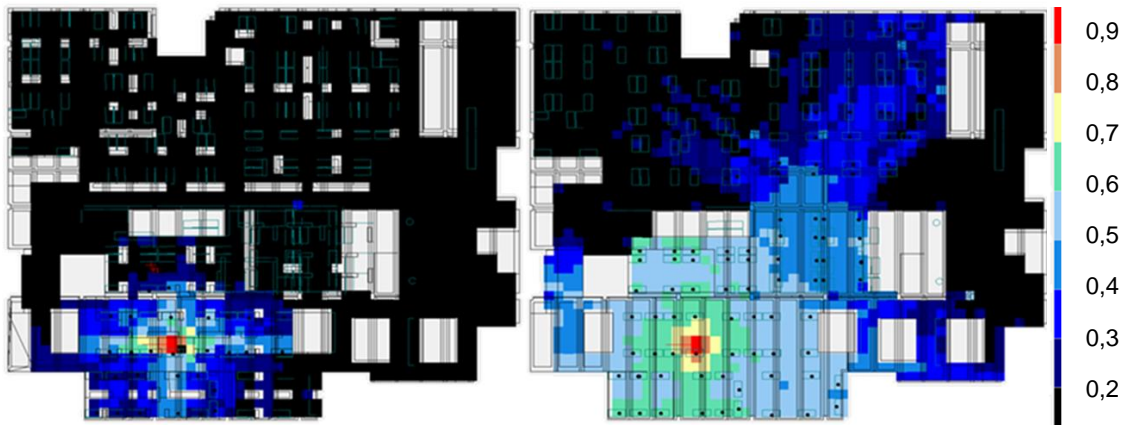


Kuva 9.2. Työtehon lasku avotoimistossa puheensiirtoindeksin STI funktiona (Hongisto 2005).

Puheensiirtoindeksin STI arvo on määritetty huoneakustisella tietokonemallinnuksella (kuva 9.3). Kuvasta nähdään, että vähimmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa puhe on selvästi kuultavissa noin neljänneksellä avotoimiston alasta. Tarkoituksenmukaisessa avotoimistossa tämä ala rajautuu muutaman metrin säteelle työpisteestä. Puheensiirtoindeksin STI arvosta eri puolilla toimistoa laadittiin neljä laskentaverkkoa siten, että puhuja oli avotoimistossa neljässä eri työpisteessä. Työajan hukka laskettiin puheensiirtoindeksin perusteella siten, että avotoimistossa oletettiin olevan koko ajan yksi puhuja jollain mallinnetusta työpisteestä.

Työajan hukan kustannuksia laskettaessa oletettiin, että toimiston työajasta 90 % on laskutettavaa ja työtunnin hinta on 60 €/h (alv 0 %). Äänilähde sijoitettiin johonkin toimiston työpisteen kohdalle ja tämän perusteella on laskettu puheensiirtoindeksin arvon jakauma koko toimistossa. Puheensiirtoindeksin lasketuista neljästä jakaumasta on laskettu keskiarvo, jonka perusteella on arvioitu työajan hukkaa avotoimistoissa 1 ja 2 (Kempainen et al. 2019).

Työajan menetyksestä seuraavat kustannukset on esitetty taulukossa 9.1. Avotoimistossa 1 yhteensä 30 työntekijää häiriintyy puheesta niin, että syntyy työajan hukkaa, mistä edelleen muodostuu kustannuksia vuodessa vajaat 60 000 €. Mutta avotoimistossa 2 yhteensä 116 työntekijää häiriintyy ja kustannukset ovat vuodessa 350 000 €.



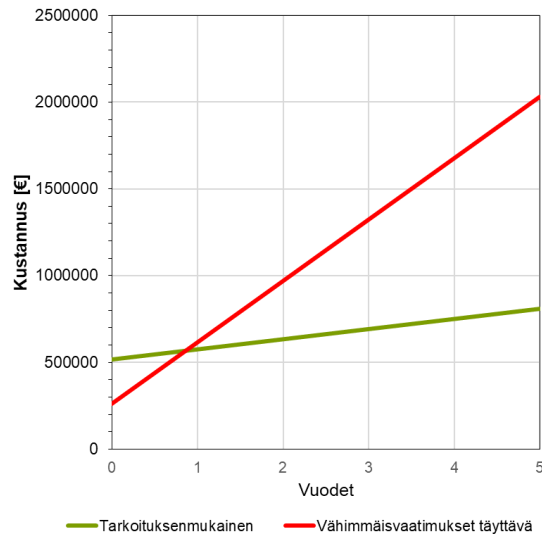
Kuva 9.3. Puheensiirtoindeksin STI arvo tarkoituksenmukaisessa (vas.) ja vähimmäisvaatimuk-
sia vastaavassa avotoimistossa (oik.). Puhuja on keskellä punaista aluetta (Kemppainen et al.
2019).

Taulukko 9.1. Työajan hukasta muodostuva kustannusmenetys tarkoituksenmukaisessa ja vä-
himmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa (Kemppainen et al. 2019).

Avotoimisto 1	Tarkoituksenmukainen avotoimisto						
	> 0,8	0,7–0,79	0,6–0,69	0,5–0,59	0,4–0,49	0,3–0,39	0,2–0,29
Työntekijöitä	1	1	1	4	5	9	9
Kustannusmenetys	1628 €	6477 €	4722 €	17285 €	17116 €	8805 €	2021 €
Yhteensä							58995 €
Avotoimisto 2	Vähimmäisvaatimusten mukainen avotoimisto						
	> 0,8	0,7–0,79	0,6–0,69	0,5–0,59	0,4–0,49	0,3–0,39	0,2–0,29
Työntekijöitä	1	4	14	20	31	27	19
Kustannusmenetys	1628 €	22669 €	89569 €	109692 €	100253 €	28228 €	4267 €
Yhteensä							353306 €

Avotoimistossa 1 akustisista ratkaisuista syntyvät rakennuskustannukset muodostuvat työpöydistä, seinäkkeistä, kalusteista, lattianpäällysteestä, katon absorptiomateriaalista, peittoäänijärjestelmästä ja muista kustannuksista. Nämä ovat yhteensä 517 000 €. Avotoimistossa 2 akustisten ratkaisujen rakennuskustannukset koostuvat työpöydistä, lattianpäällysteestä, katon absorptiosta ja muista kustannuksista. Yhteensä kustannukset ovat 261 000 €. Rakennuksen rungon tai talotekniikan kustannuksia ei ole otettu huomioon, sillä ne ovat kummassakin tapauksessa samat. Kun rakennuskustannuksia ja työajan hukasta muodostuvia kustannuksia tarkastellaan viiden vuoden ajalta, havaitaan, että avotoimiston 1 kokonaiskustannukset ovat vuodessa pienemmät kuin avotoimiston 2 (kuva 9.4). Viidessä vuodessa avotoimisto 1 tulee 1,2 M€ edullisemmaksi kuin avotoimisto 2.

Kuvan 9.4 kokonaiskustannustarkastelu osoittaa, että sijoittaminen tarkoituksenmukaisiin ääniolosuhteisiin avotoimistossa on kannattavaa. Todennäköisesti sijoituksen kannattavuus lisäksi kertautuu parantuvana työtyytyväisyytenä. Tästä syystä ääniympäristöohjeessa (YMo 2018) ja ympäristöministeriön oppaassa (Kylliäinen & Hongisto 2019) on annettu ohjeita avotoimiston ääniolosuhteista ja niiden suunnittelusta. Ohjeet perustuvat puheensiirtoindeksiin ja sen sallittuun arvoon 0,5, kun etäisyys äänilähteestä on 8 m. Etäisyydestä, jolla puheensiirtoindeksin STI arvo laskee normaalilla puheäänien voimakkuudella ja taajuusjakaumalla alle 0,5, käytetään nimitystä häiritsevyysetäisyys r_D [m] (SFS 5907:2022).



Kuva 9.4. Rakennuskustannuksista ja työajan hukasta syntyvistä kustannuksista muodostuvat avotoimiston kokonaiskustannukset viiden vuoden kuluessa tarkoituksenmukaisessa ja vähimmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa (Kempainen et al. 2019).

9.2.2 Neuvottelutilat

Neuvottelutilojen (kuva 9.5) akustiset suunnittelutavoitteet liittyvät yksityisyyteen ja luottamuksellisuuteen sekä hyvään puheenerotettavuuteen. Hyvin neuvottelutilojen äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on vähintään 48 dB (YMo2018, SFS 5907:2022). Taulukosta 8.1 nähdään, että tällainen äänitasoeroluku tuottaa käytännössä täydellisen yksityisyyden neuvottelutilaan, kun taustaäänien keskiäänitaso 30 dB. Todellisuudessa talotekniikka voi tuottaa tiloihin selvästi pienemmän taustaäänitason, jonka peittovaikutus on pienempi.



Kuva 9.5. Pienessä neuvottelutilassa (vas.) nähdään seinälle kiinnitetty absorptiopinta. Suuremmassa neuvottelutilassa (oik.) kaikilla pinnoilla on joko absorptiota tai diffuusoreita, jolloin puheenerotettavuus on erittäin hyvä. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Marjo Lalli.

Pienissä neuvottelutiloissa hyvä puheenerotettavuus saadaan aikaan, kun tilassa on riittävä määrä absorboivia pintoja. Puheenerotettavuutta heikentävien tärykaikujen estämiseksi pienissä neuvottelutiloissa on edullista sijoittaa kahdelle vierekkäiselle seinälle absorptiota (kuva 9.5). Suurissa neuvottelutiloissa on katon keskelle suositeltavaa tehdä ääntä heijastava pinta, jolla varmistetaan puheen riittävä kuuluvuus. Videoneuvottelujen yleistyttyä on suositeltavaa käyttää sekä lähetys- että vastaanottopään neuvottelutiloissa riittävästi absorptiota sekä mahdollisuuksien mukaan myös diffuusoreja puheenerotettavuuden parantamiseksi (kuva 9.5).

Luvun 9 lähteet

- Haapakangas, A., Hongisto, V. & Liebl, A. 2020. The relation between the intelligibility of background speech and cognitive performance – A revised model based on laboratory studies. *Indoor Air*. Vol. 30(6), s. 1130–1146.
- Halme, A. 1965. ”Maisemakonttori”. *Akustinen Aikakauslehti*. Nro 4, s. 3–4.
- Hongisto, V. 2005. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor Air*. Vol. 15, s. 458–468.
- Hongisto, V. & Kylliäinen, M. 2008. RIL 243-3-2008, Rakennusten akustinen suunnittelu: toimitot. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- ISO 3382-3. 2012. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices.
- Kemppainen, J. 2017. Akustisten olosuhteiden kustannusvaikutukset. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- Kemppainen, J., Kylliäinen, M., Niemi, H. & Mikkilä, A. 2019. Ääniolosuhteiden kustannusvaikutukset avotoimistoissa. *Akustiikkapäivät 2019*. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 118–123.
- Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28.
- Pääkkönen, R. & Kylliäinen, M. 2017. Kalusteet osana tilan akustista ratkaisua. *Rakennusfysiikka 2017*. Tampere, 24.–26.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 603–608.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Tanila, R. 2022. Toimistotilojen ääniolosuhteita koskevien määräysten ja ohjeiden kehittyminen Suomessa. Kandidaatintyö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

10

Sairaalat

”Rakennuksissa itsessään esiintyy mitä moninai-
simmista syistä värähtelyä, osaksi korvin kuulta-
vaa ääntä tai pikemminkin äänihäiriötä, osaksi
taas tuntoaistilla havaittavaa värähtelyä tai tä-
rinää. Lisäksi tunkeutuu rakennuksiin niiden ulko-
puolelta vastaavanlaisia joko kuultavia tai tunnet-
tavia värähtelyitä, siis joko ääniä ja tärinää, tai va-
vahtelua, keinumista sekä aaltoilua.”

Diplomi-insinööri Uuno Varjo 1947

10.1 Sairaalan ääniympäristö

10.1.1 Akustiset tavoitteet

Sairaaloissa akustiset tavoitteet liittyvät rauhallisten olosuhteiden järjestämiseen toipuille ihmisille, yksityisyyden varmistamiseen, puheen erotettavuuteen tai puheenpeittoon (Huhtala et al. 2015). Tavoitteet sairaalan eri tiloissa ovat siten toisiinsa nähden päinvas-taisia. Lisäksi sairaalarakentamisessa on runsaasti teknisiä järjestelmiä, jotka ovat myös melulähteitä. Sairaalan ympäristön liikenteen tai muun toiminnan aiheuttama melu ja tä-rinä voivat olla merkittäviä häiriötekijöitä sairaalan toiminnalle. Sairaalan hyvän ääniym-päristön on arvioitu vaikuttavan myönteisesti potilaiden toipumiseen (Blomqvist et al. 2004).

Sairaalarakentamisessa esiintyvät edellä olevan perusteella kaikki tässä oppikirjassa käsitellyt akustiset ilmiöt monin eri tavoin. Huoneakustiikan keinoja käytetään sairaalan toiminnasta aiheutuvan yleismelutason alentamiseen ja hälyisyyden välttämiseen esimer-kiksi käytävillä, ruokaloissa ja aulatiloiissa, joissa sijaitsevat ilmoittautumis- ja neuvonta-pisteet. Neuvottelutiloissa, auditoriossa sekä vastaanottohuoneissa ja leikkaussaleissa huoneakustiikan keinoin varmistetaan riittävä puheenerotettavuus. Sairaaloiden tiloja suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon se, että niissä asioi ja on hoidettavana henki-löistä, joilla kuulo voi olla pysyvästi tai tilapäisesti rajoittunut (Jokitulppo & Kylliäinen 2016). Vuodeosastoilla, avotoimistoissa ja tarkkailutiloissa huoneakustisin ratkaisuin py-ritään rajoittamaan puheen leviämistä.

Yksityisyys on sairaaloissa keskeistä potilashuoneissa, neuvotteluhuoneissa sekä eri-tyisesti vastaanottohuoneissa, joissa käytävät keskustelut eivät saa kuulua viereisiin huo-neisiin tai odotustiloihin. Tähän voidaan vaikuttaa ääntä eristävin rakentein ja ovin. Per-hehuoneissa kysymys on myös yksityisyydestä sekä asumismelun muille perhehuoneille aiheuttaman häiritsevyyden vähentämisestä. Auditorioiden tai ilmanvaihtokonehuonei-den ääneneristyksen tavoitteena on rajoittaa äänen leviämistä muihin tiloihin. (Huhtala et al. 2015)

Meluntorjuntaa edellyttävät sairaalan tekniset järjestelmät, kuten ilmanvaihto tai vara-voimakoneet, mutta myös läheisten liikenneväylien tuottama melu. Sairaalan omaan toi-mintaan liittyvä merkittävä ulkona vaikuttava melulähde on sairaalahelikopterin liikku-minen sairaala-alueella. Helikopterit myös aiheuttavat sairaalarakennuksen runkoon tä-rinää, joka voi merkittävästi haitata kuvantamislaitteiden toimintaa sekä häiritä toipuvia ihmisiä (Huhtala et al. 2015).

Sairaaloissa on toimistohuoneita, avotoimistoja, auditorioita ja neuvottelutiloja, joiden akustiikkasuunnittelusta on kerrottu luvuissa 8 ja 9. Näissä luvuissa kerrottuja suunnitte-luperiaatteita voidaan soveltaa vastaaviin tiloihin myös sairaaloissa.

10.1.2 Määräykset ja ohjeet

Ääniympäristöasetuksessa 796/2017 (2022) on säädetty potilashuoneiden ääniympäristöstä, mutta asetuksessa potilashuoneella tarkoitetaan hoitolaitoksissa tai hoitokodeissa olevia tiloja, jotka rinnastuvat käyttötarkoitukseltaan asuntoihin, kuten erilaisten palveluasumisyksiköiden asuinkäyttöön suunniteltua tilaa. Potilashuoneessa on kaikki asumiseen tarvittavat varusteet eli kylpyhuone ja keittomahdollisuus (YMo 2018). Potilashuoneella ei tarkoiteta sellaisia tutkimushuoneita, vastaanottohuoneita, toimenpide- ja terapiatiloja tai vastaavia tiloja, joissa ollaan lyhytaikaisesti. Suurin osa sairaaloiden tiloista on juuri tällaisia.

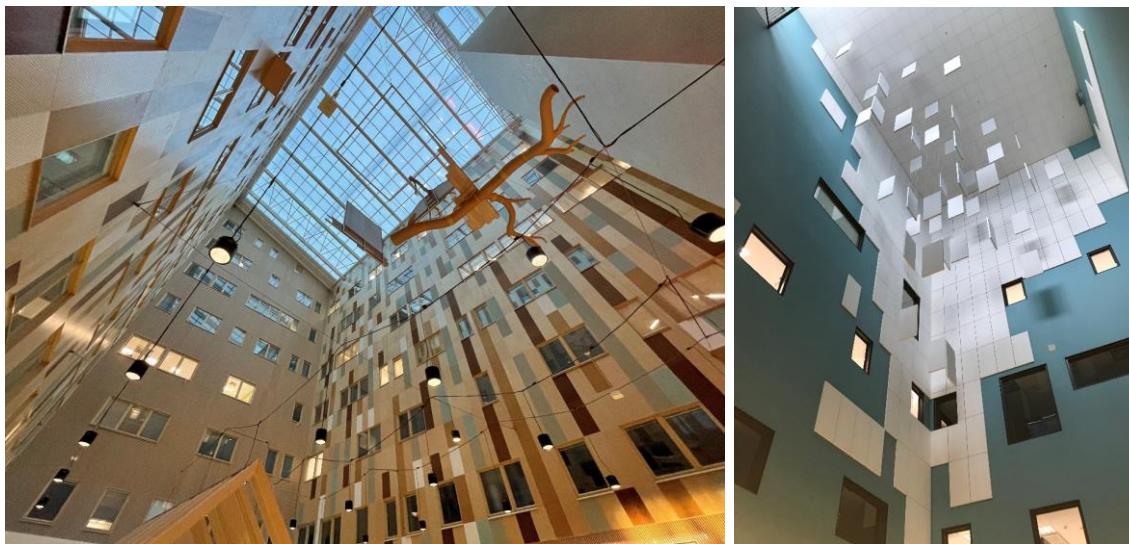
Sairaaloiden tiloille on annettu suositusarvoja ilma- ja askelääneneristävyydestä, huoneakustiikasta, talotekniikan meluntorjunnasta, liikennemeluntorjunnasta sekä tärinästä ja runkomelusta standardissa SFS 5907 (2022). Standardin suositusarvot kattavat jokseenkin kaikki sairaaloissa esiintyvät tilat ja toiminnot, myös erikoistilat, kuten kuulon- ja unitutkimushuoneet ja musiikin soittamiseen käytettävät terapiatilat, jotka edellyttävät varsin hyvää ääneneristystasoa.

10.2 Sairaaloiden akustiikkasuunnittelu

10.2.1 Tilavuudeltaan suuret tilat

Nykyaikaisessa sairaalarakentamisessa pyritään tilat ja toiminnot sijoittamaan yhtenäiseen rakennusmassaan. Tällöin rakennuksen runkosyvyys tulee varsin suureksi, jolloin luonnonvalon saamiseksi sairaaloihin rakennetaan usein näyttävä ja monesti koko rakennuksen korkeussuunnassa läpäisevä keskusaula, johon sijoittuu opastus- ja ilmoittautumispisteitä sekä kahviloita ja ruokaloita (Huhtala et al. 2015, Mikkilä et al. 2021).

Korkeat aulatilat muodostuvat suuren tilavuutensa vuoksi hyvin kaiuntaisiksi ja hälyisiksi ellei huoneakustiseen ratkaisuun kiinnitetä riittävää huomiota. Luonnonvalon saamiseksi korkeissa auloissa on usein lasikatto (kuva 10.1), jolloin absorptiomateriaalia ei voida sijoittaa sen pinnalle (Mikkilä et al. 2021). Siten absorptiomateriaalit on useimmiten sijoitettava seinille riittävän absorptioalan aikaansaamiseksi. Tällaisissa tiloissa voidaan huoneakustisen ratkaisun kehittämisessä käyttää luovuutta yhteistyössä arkkitehdin ja akustiikkasuunnittelijan kesken (kuva 10.1). Suurten aulatilojen huoneakustiikan suunnittelussa on usein hyödyllistä käyttää huoneakustista tietokonemallinnusta ratkaisun optimoimiseksi (Mikkilä et al. 2017).



Kuva 10.1. Turun yliopistollisen sairaalan Majakkasairaalan korkeissa aulatilissa (Mikkilä et al. 2021) absorptiomateriaalia on sijoitettu seinille (vas.). Tampereen yliopiston lääketieteen laitoksen laajennuksessa (Arvo 2, oik.) yhdessä korkeassa aulatilassa osa absorptiomateriaalista on ripustettu vaijereilla ilmaan, jolloin yksinkertaisin keinoin on saatu aikaan kolmiulotteinen tilateos, joka luo vaikutelman liikkeestä (Mikkilä et al. 2017). Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Simo Laitakari.

10.2.2 Tärinäherkät laitteet

Tärinäherkät laitteet ovat yleensä kuvantamislaitteita, esimerkiksi massaspektrografeja, ja elektronimikroskooppeja, tai muita tutkimuslaitteita, kuten kromatografeja. Ne vaativat tietyt olosuhteet, jotta kuvantaminen olisi tarkkaa. Tärinäherkkien laitteiden valmistajat usein määrittelevät laitteidensa vaatimukset värähtelykriteerien mukaan (VC, eng. *vibration criteria*) (Gordon 1999). Jollekin laitteelle asentamisolun värähtelykriteeri voi olla esimerkiksi VC-C, joka vastaa $12,5 \mu\text{m/s}$ värähtelynopeutta taajuuskaistalla 8...80 Hz. Muita värähtelykriteerejä ovat esimerkiksi A, B, D, E ja F, joissa värähtelynopeus puollittuu, kun siirrytään aakkosjärjestyksessä eteenpäin. Laitevalmistajat saattavat myös ilmoittaa tietyn värähtelynopeuden ylärajan taajuutta tai taajuuskaistaa kohti. Tärinäherkät laitteet on otettu huomioon myös standardissa SFS 5907 (2022).

Tärinäherkkiin laitteisiin vaikuttavan tärinän lähteenä voi olla raideliikenne (kuva 10.2) tai joissakin tapauksissa tieliikenne (ks. luku 7). Sairaaloissa tyypillinen tärinän lähde on myös helikopterin laskeutuminen kentälle, joka usein sijoitetaan sairaalarakennuksen katolle (Huhtala et al. 2015).



Kuva 10.2. Turun yliopistollisen keskussairaalan Majakkasairaala on rakennettu vilkkaan tien ja rantadan päälle. Rakennuksen tärinän- ja runkomelunvaimennusratkaisu on toteutettu väylien päälle rakennetun kannen laakeroinnin yhteydessä (Mikkilä et al. 2021). Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Simo Laitakari.

Helikopterin laskeutuminen sairaalarakennuksen katolla sijaitsevalle kentälle aiheuttaa rakennukseen paineiskun, joka saa rakennuksen värähtelemään. Jotta kuvantamislaitteiden häiriötön toiminta olisi mahdollista myös helikopterin laskeutuessa, laskeutumisalustat tulee eristää rakennuksen rungosta värinäeristimin (kuva 10.3). Värinäherkkiin laitteisiin voivat vaikuttaa myös räjäytys- ja louhintatyöt sairaalan lähistöllä, sairaalarakennuksen tekniset järjestelmät sekä sairaalan muu toiminta käyttäjien kävelystä lähtien. (SFS 5907:2022)

Värinäherkkien laitteiden värinäntorjunta vaatii aina tapauskohtaista selvitystyötä. Jos suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa värinäherkkien laitteiden sijoitteluun, niin ne tulisi sijoittaa rakennuksen jäykimpiin osiin. Näitä ovat usein tilat lähellä rakennuksen perustuksia, erityisesti, jos rakennus on lähellä kallioperää. Olemassa olevassa rakennuksessa voidaan tehdä mittaamalla taustavärähtelykartoitus ja selvittää missä rakennuksen osassa asetetut kriteerit taustavärähtelyn osalta täyttyvät.



Kuva 10.3. Tampereen yliopistollisen sairaalan D-rakennuksen katolla näkyy helikopterikenttä (vas.), joka on eristetty muusta rakennuksesta värinäeristiminä toimivin jousin (oik.). Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaajat Simo Laitakari ja Timo Huhtala.

Värinäherkille laitteille voidaan myös suunnitella muusta rakennusrungosta erilliset perustukset. Värinäherkän laitteen alla oleva lattia voidaan leikata irti muusta rakennusrungosta tai lähtökohtaisesti suunnitella se irrallisena muusta rakennusrungosta. Joissain tapauksissa tämä vaatii erilliset paalut laitteen alla olevalle lattialle. Mikäli värinäherkän laitteen lattia on erillään rakennusrungosta, talon muusta käytöstä johtuva värähtely ei kytkeydy laitteen alla olevaan lattiaan ainakaan rakennusrungon kautta. Värinäherkille laitteille voidaan myös suunnitella kelluvia rakenteita, vaikka niissä usein on jo valmiiksi toteutettu laitekohtainen kellutus esimerkiksi laitteen omiin jalkoihin. Kellutustaajuuden

vaatimus on usein niin pieni, että kellutuksessa kyseeseen tulee lähinnä ilmajousien tai teräsrousien käyttö.

Helikopterien lentoreiteistä yleensä seuraa myös vaatimuksia sairaalarakennusten ulkovaipan ääneneristykselle. Ulkovaipan mitoittamiseksi on tavallisesti tehtävä meluselvitys, jossa tutkitaan helikopterin melupäästön ja lentoratojen perusteella melun leviämistä sairaala-alueelle. Rakennuksen ulkovaippaan kohdistuvien melutasojen perusteella voidaan määrittää ulkovaipalta vaadittava äänitasoero $\Delta L_{A,vaad}$ (luku 6.4).

10.2.3 Varavoimakoneet

Sairaaloiden toiminnan pitää pysyä käynnissä myös tilanteissa, joissa sähköjatelussa esiintyy katkoksia. Siksi sairaaloihin tai niiden yhteyteen toteutetaan varavoimakone. Varavoimakoneet tuottavat melua monella tavalla: koneet itsessään ovat melun sekä tärinän ja runkomelun lähteitä, mutta myös niiden ilmanotto ja pakoputkisto ovat melulähteitä, jotka on otettava suunnittelussa huomioon, vaikka varavoimakone onkin toiminnassa vain poikkeustilanteissa sekä koekäytön aikana.

Varavoimakoneet voidaan sijoittaa sairaalarakennukseen tai ulos. Sijoitettaessa koneet sairaalarakennuksen suositeltavaa on, että ne eivät sijaitisi lähellä melu- tai tärinäherkkiä toimintoja. Koneiden melupäästö ympäristöönsä on tyypillisesti yli 100 dB luokkaa myös pienillä taajuuksilla (Huhtala et al. 2015), mikä joka tapauksessa tarkoittaa riittävän ääneneristävyyden saavuttamiseksi kaksinkertaisia kivirakenteita konehuonetta muista tiloista erottaviksi väliseiniksi, erittäin hyvin ääntä eristävää alakattoa sekä kelluvaa lattiaa, jonka ääneneristyskyky on erittäin hyvä. Mitä lähempänä konehuone on melulle tai tärinälle herkkiä tiloja tai toimintoja, sitä suuremmiksi ääneneristys- ja tärinäneristystarpeet muodostuvat.

Sairaalan sisätiloihin muodostuvan ääniympäristön sekä rakennuskustannusten kannalta on edullista sijoittaa varavoimakone ulos. Tällöin varavoimakoneesta on laadittava meluselvitys ja suunniteltava konehuoneen ulkovaipan ääneneristys riittävän hyväksi, jotta koneen tuottama melu saadaan eristetyksi. Lisäksi pakoputkisto ja ilmanottokanavat edellyttävät hyviä äänenvaimentimia. Riittävä ääneneristystaso sekä äänenvaimenninten vaimennuskyky voidaan selvittää laatimalla konehuoneesta meluselvitys ja melukartat samaan tapaan kuin liikennemeluselvityksissä.

Standardin SFS 5907 (2022) mukaan varavoimakoneen suurin sallittu koekäytön aikainen keskiäänitaso $L_{a,eq,T}$ on ulko-oleskelualueilla 55 dB. Varavoimakoneen koekäytön sisälle tuottamille keskiäänitasoilla voidaan soveltaa valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 päiväjälle esitettyjä ohjeita.

Luvun 10 lähteet

- Blomkvist, V., Eriksen, C., Theorell, T., Ulrich, R. & Rasmanis, G. 2004. Acoustics and psychological environment in intensive coronary care. *Occupational & Environmental Medicine*. Vol. 62, e1.
- Gordon, C. G. 1999. Generic vibration criteria for vibration-sensitive equipment. Proceedings 3786 of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers SPIE, Optomechanical Engineering and Vibration Control. Denver, September 28.
- Huhtala, T., Mikkilä, A., Kylliäinen, M. & Kalkkinen, S. 2015. Sairaalat akustiikkasuunnittelun erikoisalana – akustiikkasuunnittelijan ja pääsuunnittelijan näkökulma. *Akustiikkapäivät 2015*. Kuopio, 1.–2.9., Akustinen Seura ry, s. 185–191.
- Jokitulppo, J. & Kylliäinen, M. 2016. Hyvät akustiset olosuhteet julkisissa tiloissa ja kodeissa – huonokuuloisen näkökulma. *Valtakunnalliset Audiologiapäivät*. Oulu, 7.-8.4.2016, Suomen audiologian yhdistys ry ja Oulun yliopistollinen sairaalan kuulokeskus.
- Mikkilä, A., Huhtala, T. & Valovirta, I. 2021. Akustisesti vaativia yliopistollisia rakennuksia Turussa. *Akustiikkapäivät 2021*. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 108–113.
- Mikkilä, A., Valovirta, I., Takala, J., Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2017. Arvo 2 – nykyaikaisen kampuksen akustiset ilmiöt. *Akustiikkapäivät 2017*. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 202–207.
- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- VnP 993/1992. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista.
- YMa 796/ 2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

11

Konserttitalit

”Akustiikka kaikkine mittalukuineen määriteltynä ei ole itsessään keskeinen tavoite; tärkeintä on se, kuinka tila välittää musiikin sanoman, joka tosin on jokaiselle kuulijalle erilainen.”

Akustikko Linda Madalik 2018

11.1 Akustiset ilmiöt konserttisaleissa

11.1.1 Konserttisalien tilaratkaisut

Konserttisalien ja esiintymistilojen huoneakustiikan ensisijaiset tehtävät ovat välittää musiikki yleisölle ja mahdollistaa orkesterin tai yhtyeen yhteissoitto mahdollisimman hyvin. Huoneakustiikalla on suuri merkitys musiikin ilmaisulle ja sitä kautta musiikin kokemukseksi. Yksi musiikin tarkoitus on välittää tunnetiloja kuuntelijoille ja huoneakustiikalla on tässä merkittävä rooli. Tilaan muodostuvat akustiset olosuhteet taas riippuvat merkittävästi tilaratkaisusta eli erityisesti riittävästä tilavuudesta sekä pohjan muodosta.

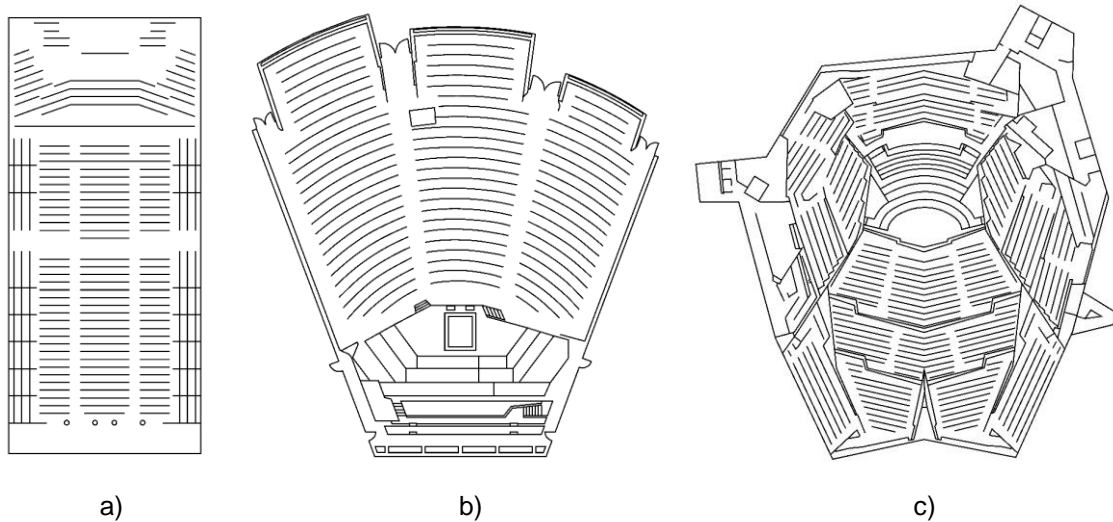
Konserttisalit jaetaan yleensä kolmeen luokkaan niiden pohjan muodon perusteella: 1. suorakulmaiset, niin sanotut kenkälaatikon malliset salit; 2. viuhkamaiset salit, joissa sivuseinät avautuvat lavalta yleisöön päin; 3. ympäröivät salit, eli niin sanotut viinitarhan muotoiset salit, joissa yleisö on lavan ympärillä. Maineikkaat 1800-luvulla rakennetut konserttisalit ovat muodoltaan kenkälaatikoita, kuten Musikvereinien kultainen sali Wienissä (Beranek 2004). Viime vuosikymmeninä on jälleen ryhdytty rakentamaan isoja konserttisaleja kenkälaatikkomallilla. Suomessa juhlasalit ja konserttisalit (kuva 11.1) rakennettiin kenkälaatikon mallisina 1800-luvulta 1930-luvulle saakka (Niskanen 2008, Niemi 2014, Kylliäinen et al. 2015).

Viuhka yleistyi konserttisalin muotona 1930-luvulta lähtien. Ajatus viuhkan muodosta siirtyi konserttisaleihin elokuvateattereista, joissa pyrkimyksenä oli saada yleisö mahdollisimman lähelle valkokangasta (Thompson 2002). Viuhkaa konserttisalin muotona suosi esimerkiksi Alvar Aalto (Barron 2010). Suomessa ensimmäinen viuhkan mallinen konserttitaloehdotus oli Viipurin toteutumatta jäänyt konserttitalo, jonka suunnitelmat esiteltiin vuonna 1942 (Niskanen 2008). Ympäröivien salien rakentaminen alkoi 1960-luvulla, kun Berliinin Philharmonie valmistui (Beranek 2004). Suomessa Helsingin Musiikkitalon konserttisali on pohjaratkaisuiltaan ympäröivä sali (Lokki et al. 2013).



Kuva 11.1. Helsingin konservatorion 1931 valmistunut konserttisali oli Suomessa ensimmäinen tila, jonka käyttötarkoitus oli konserttitila. Kuvallähde: Museoviraston kuvakokoelmat.

Tyypiesimerkit konserttisalien erilaisista pohjaratkaisuista on esitetty kuvassa 11.2. Lisäksi esiintymistilat jaetaan yleensä lavan koon perusteella kamarimusiikkisaleihin, joissa pienemmät orkesterit esiintyvät, ja konserttisaleihin, joissa lavalle voi esiintyä sinfoniaorkesteri. Tälle luokittelulle ei kuitenkaan ole mitään tarkkaa määritelmää. Tässä luvussa keskitytään lähinnä klassisen musiikin esiintymistiloihin. Muiden tilojen huoneakustiikan suunnittelun periaatteita on esitetty kappaleessa 5.



Kuva 11.2. Konserttisalien luokittelu pohjan muodon perusteella: a) suorakulmainen sali, Wienin Musikvereinin Großer saal (1870) b) viuhkamainen sali, Helsingin Finlandia-talon Finlandia-sali, (1971) ja c) ympäröivä sali, Berlin Philharmonie (1963). Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

11.1.2 Impulssivaste

Akustiikan ilmiöiden kuvaamisen kannalta on hyödyllistä esittää havaittu ääni äänilähteen s , siirtotien h , sekä vastaanottajan r yhteisvaikutuksena. Aikatasossa havaittu signaali $x(t)$ kuvataan näiden konvoluutiona

$$x(t) = s(t) * h(t) * r(t), \quad (11.1)$$

missä $*$ on konvoluutio ja t on aika. Taajuustasossa konvoluutio on kertolasku

$$x(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = s(f)h(f)r(f), \quad (11.2)$$

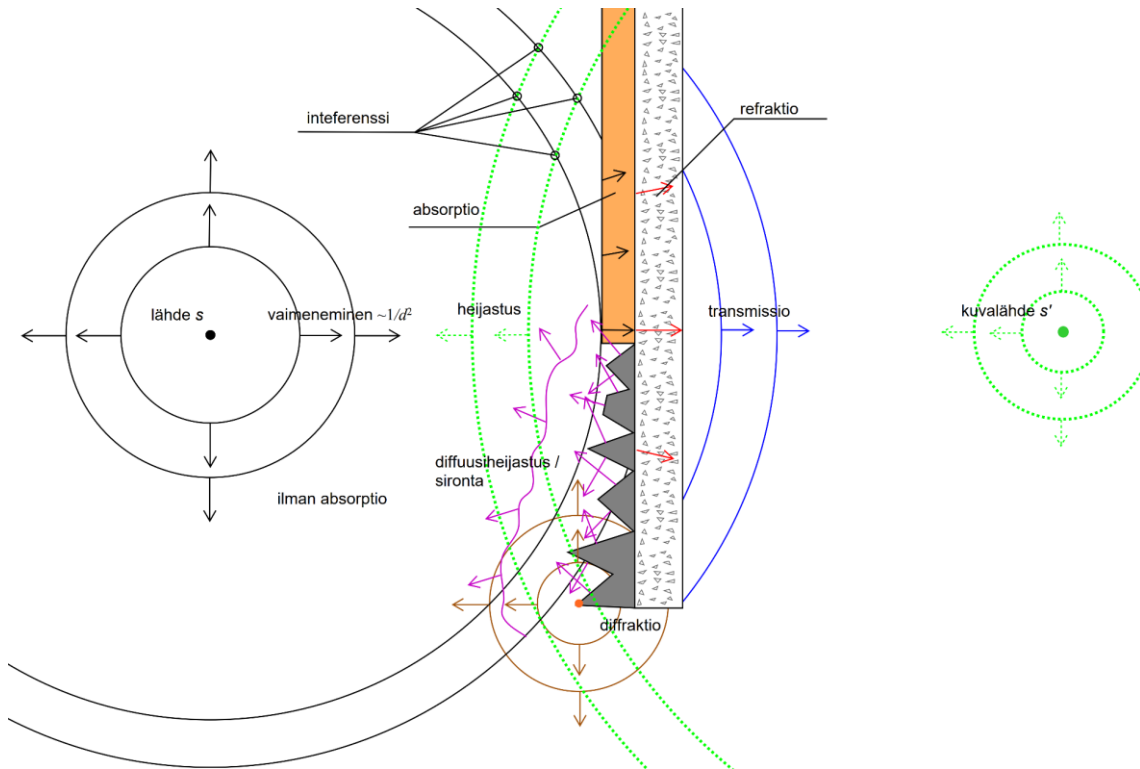
missä $\mathcal{F}\{\cdot\}$ on Fourier-muunnos ja f on taajuus.

Linearisessa ja aikainvariantissa huoneakustiikassa kahden pisteen välillä äänilähde ja vastaanottaja voivat vaihtua, mutta akustinen siirtotie $h(t)$ pysyy vakiona. Tyypillinen äänilähde säteilee ympärilleen ääntä, joka suuntaan, joihinkin suuntiin enemmän kuin toisiin. Äänilähde, joka säteilee ääntä joka suuntaan, vaimenee etäisyyden d neliön suhteen käänteisesti $\sim 1/d^2$.

Huoneen akustiikan siirtotie $h(t)$, tai huoneen impulssivaste, koostuu akustisista ilmiöistä, joita äänilähteestä matkaan lähtenyt ääni kohtaa ennen kuin se saavuttaa vastaanottajan. Ääni kulkee normaalissa huoneilmassa noin 345 m/s nopeudella ja kohtaa usein useamman akustisen ilmiön ennen saapumistaan vastaanottajaan. Näitä akustisia ilmiöitä ovat äänen heijastuminen ja absorboituminen rajapinnalla, diffraktio, sironta sekä refraktio. Kukin näistä vaikuttaa huoneen impulssivasteeseen ja lineaarisessa akustiikassa koko impulssivaste voidaan kuvata niiden summana

$$h(t) = \sum_i h_i(t), \quad (11.3)$$

missä $h_i(t)$ on jokin akustinen ilmiötä ja i sen indeksi. Lisäksi koko vasteeseen vaikuttaa ilman absorptio, joka vaimentaa ääntä suurilla taajuuksilla pieniä taajuuksia enemmän. Kuvassa 11.3 on havainnollistettu akustisia ilmiöitä.



Kuva 11.3. Akustiset ilmiöt huoneakustiikassa. Nuolet kuvaavat ääni-aallon etenemissuuntaa. Aaltojen muodot ovat ilmiöitä havainnollistava. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Huoneakustiikassa huoneimpulssivaste jaetaan yleensä suoraan ääneen (DS, eng. *direct sound*), aikaisiin tai varhaisiin heijastuksiin (ER, eng. *early reflections*) ja myöhäiseen kaiuntaan (LR, eng. *late reverberation*):

$$h(t) = h_{DS}(t) + h_{ER}(t) + h_{LR}(t). \quad (11.4)$$

Suora ääni saapuu äänilähteestä suorinta reittiä vastaanottajaan. Aikaiset heijastukset ovat suoran äänen jälkeen saapuvia erillisiä ensimmäisten kertaluokkien heijastuksia

lähimmistä pinnoista. Kuitenkin aikaiset heijastukset vasteessa $h_{\text{ER}}(t)$ voivat edustaa myös muita akustisia ilmiöitä kuin heijastuksia. Termi on kuitenkin vakiintunut käyttöön. Joskus käytetään myös termiä aikainen vaste. Yleensä jako aikaiseen ja myöhäiseen äänikenttään tehdään 80 ms kohdalla suoran äänen jälkeen, mutta muitakin määritelmiä on olemassa. Jälkikaiunta on usean heijastuksen tai muun akustisen ilmiön läpikäynyt ääni, joka saapuu aikaisten heijastusten jälkeen.

11.1.3 Heijastuminen, refraktio, transmissio ja absorptio

Ääni heijastuu saapuessaan ilmasta tiheämmän väliaineen pintaan. Jos pinta on jäykkä ja läpäisemätön ääniaalloilla heijastuminen noudattaa peiliheijastuksen lakia, joka on myös esitetty Snellin laissa. Äänen heijastuskulma on Snellin lain mukaisesti pinnan normaalin suhteen peilikuva.

Mikäli pinta ei ole jäykkä tai läpäisemätön, osa äänestä heijastuu ja osa refraktoituu rajapinnalla ja etenee materiaalin sisällä. Heijastuksen voimakkuutta kuvataan heijastuskertoimella $\beta(f) \in \mathcal{C}$, josta voidaan johtaa absorptiokerroin (ks myös kappale 2.2.1)

$$\alpha(f) = 1 - |\beta(f)| \quad (11.5)$$

Refraktoitunut aalto saattaa edetä koko rakenteen läpi runkoäänenä ja säteillä rakenteen toisella puolella, kuten esitetty kappaleessa 3.1.2. Tästä ilmiöstä käytetään termiä transmissio. Esiintymistilojen huoneakustiikan kannalta transmissio ja refraktio voidaan kuvata heijastus- tai absorptiokertoimella.

11.1.4 Diffraktio, sironta ja diffuusit heijastukset

Kohdatessaan särmän, esimerkiksi kulman, ääniaalto taipuu sen ympäri eli diffraktoituu. Diffraktion voimakkuus riippuu ääniaallon saapumiskulmasta, särmän dimensioista ja taajuudesta (Lokki & Savioja 2001). Arkipäiväinen käytännön esimerkki diffraktiosta ääniaalloilla on se, että ihminen voi kuulla äänen kulman takaa ja se, että vilkkaan liikennemelu kuuluu meluesteen taakse.

Diffraktioon ja heijastumiseen perustuvat usein huoneakustiikassa käytetyt diffusorit (kuva 11.4). Diffusorit heijastavat pintaan saapuvan ääniaallon useaan eri suuntaan. Ääniaalto näin ollen siroaa saapuessaan diffusorin rajapintaan. Diffusoreiden toimintaa kuvataan diffuusisuus- tai sirontakertoimella (eng. *diffusion coefficient, scattering coefficient*).

Diffusorilla hajautetusta heijastuksesta käytetään usein termiä diffuusiheijastus. Diffusorin tavoin toimivat myös kaikki epätasaiset pinnat. Diffuusion määrä riippuu pinnan epätasaisuuksien dimensioista, taajuudesta ja ääniaallon tulokulmasta. (Cox & D'Antonio 2020)



Kuva 11.4. Konserttisalien lisäksi diffusoreita käytetään esimerkiksi äänitysstudioissa ja äänitarkkaamoissa, kuten Kaustisen musiikkilukion studiotiloissa. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Virpi Hankaniemi.

11.1.5 Äänen interferenssi

Kun kaksi tai useampi ääniaalto saapuu samanaikaisesti vastaanottajaan, aallot summautuvat, kuten esitetty kaavassa 11.3 ja tällöin jokin taajuus saattaa vaimentua tai vahvistua riippuen aaltojen vaiheiden suhteista. Tämä ilmiö on esiintymistiloissa merkityksellinen erityisesti pienillä taajuuksilla.

11.1.6 Ilman absorptio

Konserttisaleissa ja muissa esiintymistiloissa ilman absorptio vaikuttaa merkittävästi suurten taajuuksien vaimenemiseen, kuten esitetty kappaleessa 5.3.6. Ilman absorptio vaikuttaa sitä enemmän mitä kauemmas ääni on edennyt. Ilman absorption vaikutusta voidaan arvioida ilman huoneakustisia mittauksia huoneilman kosteudesta ja lämpötilasta.

11.2 Akustiikan havaitseminen

11.2.1 Havaitut akustiikan piirteet

Ihminen havaitsee huoneakustiikan kuuloaistin avulla. Tässä kappaleessa keskitytään havaintoon lähinnä yleisön kannalta. Lokki et al. (2011) löysivät kuuntelukokeiden avulla kahdeksan attribuuttia, joilla ihmiset kuvailevat konserttisalien akustiikkaa. Näitä olivat kirkkaus, eroteltavuus, läheisyys, bassoisuus, lempeys, täyteläisyys ja kaiuntaisuus.

Standardissa ISO 3382-1 huoneakustiikan havaitsemista on kuvailtu termeillä kaiuntaisuus, äänen selkeys tai kirkkaus, äänen voimakkuus, äänilähteen leveys ja kuulijan ympäröivyyys.

11.2.2 Aikaiset heijastukset

Aikaiset heijastukset ovat muutaman ensimmäisen kertaluvun heijastuksia tai muita edellä mainituista akustisista ilmiöistä, jotka saapuvat ensimmäisen 80 ms aikana suoran äänen jälkeen kuuntelijalle (ks. kuva 5.3).

Jos suoran äänen ja ensimmäisten heijastuksien välinen aika on liian suuri tai ensimmäisten heijastusten amplitudi on liian pieni ja tämän jälkeen saapuu voimakkaampia heijastuksia, ne voidaan kokea erillisenä äänilähteenä, kaikkuna (Gade 2014, Robinson et al. 2013). Kaikua ilmiönä pyritään välttämään konserttisaliakustiikan suunnittelussa. Jos taas heijastukset saapuvat riittävän lyhyen aikaikkunan sisällä, kuulija yhdistää ne samaan äänilähteeseen. Tätä kutsutaan psykoakustiikassa presedenssi-efektiksi (Robinson et al. 2013). Presedenssi-efekti on hyvin riippuvainen äänen tyypistä, impulssimaiset äänet koetaan pienemmällä viiveellä eri äänitapahtumiksi kuin kompleksisemmat äänet (Gade 2014).

Aikaisten heijastusten vaikutus havaittuun akustiikkaan on suuri ja riippuu vahvasti salin muodosta, pintojen muodoista ja materiaalista, jotka vaikuttavat heijastusten akustisiin ominaisuuksiin. Yleisellä tasolla aikaiset heijastukset sävyttävät ääntä, vahvistavat havaittua äänenvoimakkuutta ja kirkkautta, vaikuttavat äänilähteen havaittuun suuntaan sekä tilan tuntuun (Gade 2014). Heijastukset ovat yleensä amplitudiltaan pienempiä kuin suoraan äänilähteestä tuleva ääni. Mikäli äänilähdettä lähellä on voimakkaasti heijastava pinta, äänilähteen havaittu suunta voi siirtyä pinnalle todellisen suunnan sijaan. (Gade 2014, Puomio 2016).

Viimeaikaiset tutkimustulokset painottavat, että sivuttaissuuntaiset heijastukset vaikuttavat moniin muihinkin äänilähteen ja akustiikan havaintoihin kuin pelkästään äänen sävyyn tai äänen suuntaan (Pätynen et al. 2015). Yleisö havaitsee musiikin voimakkaampana, kun sivuttaisenergiaa on saatavilla riittävä määrä. Se lisää orkesterin soittimien

havaittua kirkkautta ja ympäröivyyttä (Pätynen et al. 2015). Välillisesti se vaikuttaa esimerkiksi klassisen orkesterin dynamiikkaan, joka on yksi tärkeimmistä ilmaisumuodoista musiikissa (Lokki & Pätynen 2017). Dynamiikaltaan suurempi musiikki koetaan yleensä ilmaisuvoimaisempana ja musiikillinen elämys on kuulijalle suurempi (Pätynen et al. 2015).

Katosta saapuvat heijastukset voivat häiritä äänilähteen havaittua läheisyyttä ja dynamiikkaa, jos ne saapuvat ennen vaakasuuntaisia heijastuksia. Lisäksi kuuntelijan havaitsema äänikuva voi olla monofoninen (Lokki & Pätynen 2018).

Diffuusoreita tai diffuuseja pintoja käytetään hajottamaan ääntä, erityisesti jos halutaan välttää kovia heijastuksia, jotka voivat aiheuttaa tärykaikua tai lähteen heijastuksista johtuvaa havaitun suunnan siirtymistä. Diffuuseilla pinnoilla voidaan myös luoda tasaisempi jälkikaiunta tilan eri osien suhteen. Diffuusoivien pintojen etuna absorboiviin pintoihin nähden on, että niillä voidaan poistaa joitain heijastusten aiheuttamia ei-haluttuja ilmiöitä ilman, että ääntä absorboituu (Cox & d'Antonio 2020). Haittapuolena on, että diffuusissa heijastumisessa kuitenkin tapahtuu jonkin verran vaimentumista, erityisesti suuret taajuudet vaimentuvat enemmän kuin pienet (Lokki & Pätynen 2018). Lisäksi diffuusiheijastuminen muuntaa heijastuksen vaihevastetta satunnaisemmaksi verrattuna heijastumiseen suorasta pinnasta, joka vaikuttaa havaittuun kirkkauteen ja basson laatuun. Onkin osoitettu, että konserttisalin suorista pinnoista saatavat laajakaistaiset aikaiset heijastukset tekevät äänestä selkeämmän tai kirkkaamman kuin diffuusit heijastukset (Lokki et al. 2011).

11.2.3 Jälkikaiunta

Jälkikaiunta on yksi tärkeimmistä akustisista ominaisuuksista, jotka vaikuttavat musiikin kokemiseen ja havaitsemiseen (Lokki et al. 2011). Jälkikaiunta vaikuttaa havaintoon musiikin ympäröivyydestä ja hieman myös havaittuun tilan tuntuun. (Puomio 2016). Jos jälkikaiunta-aika on liian lyhyt, musiikki voidaan kokea sekoittumattomana ja siihen ei koeta yhteyttä (Reinhart & Souza 2018). Jos taas jälkikaiunta-aika on liian pitkä, musiikin dynaamiset vaihtelut, artikulaatio ja rytmi voidaan kokea vääristyneenä tai epäselvänä (Reinhart & Souza 2018). Lisäksi jälkikaiunta vaikuttaa ainakin havaittuun äänilähteen etäisyyteen (Kuusinen & Lokki 2015).

11.2.4 Tärykaiku

Mikäli konserttisalissa on fokuoivia pintoja jälkikaiuntaan saattaa syntyä selkeitä heijastuksia tai heijastusryhmiä, jotka koetaan tärykaikuna (Gade 2014). Fokusointi viittaa ääniaallon keskittymiseen ja valon etenemisessä analogia on kovera peili. Fokusointi huoneakustiikassa voi syntyä koverista pinnoista tai säännöllisistä kuvioista ja yleensä tärykaiun syntymiseen on riittävää, että fokuoivaa pintaa vastapäätä on heijastava pinta.

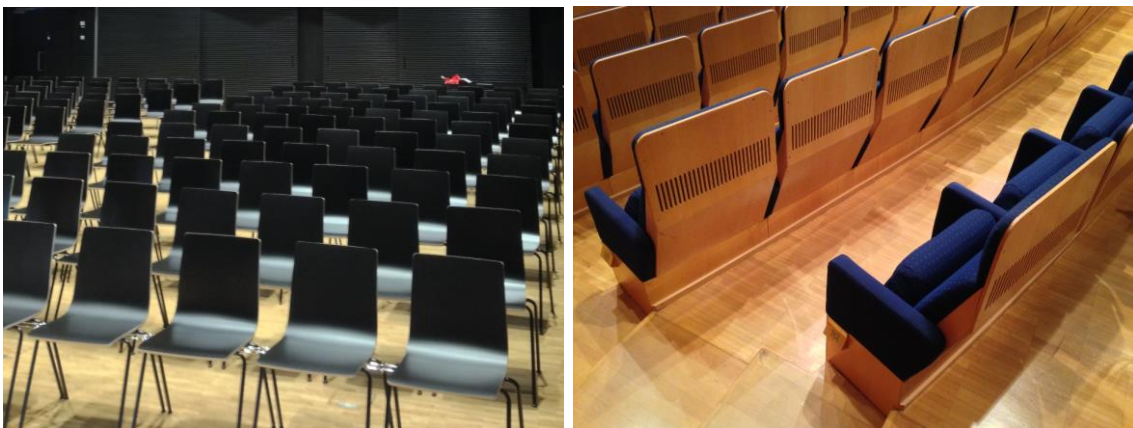
Ääniaalto heijastuu näiden pintojen välillä tietyllä vakioviiveellä, koska etäisyys pysyy vakiona. Vakioviiveestä aiheutuu tärykaiulle tietty äänensävy interferenssin vuoksi.

Tärykaiku voi ilmetä myös ilman fokuoivia pintoja esimerkiksi suorakulmaisissa saleissa, jos tilan pinnoista osa on voimakkaasti vaimennettuja ja osa ei (Gade 2014). Tärykaikua pyritään välttämään konserttisaliakustiikan suunnittelussa. Akustiikkaa suunniteltaessa tulisi siten kiinnittää huomiota siihen, onko tilassa yhdensuuntaisia pintoja, jotka voisivat saada aikaan tärykaiun.

11.2.5 Katsomovaimennus

Katsomovaimennus on penkkirivien säännöllisyydestä johtuva ilmiö. Lavalta saapuva suora ääni summautuu penkkirivistä diffraktoituneen ja lattiasta heijastuneen vastakkaisvaiheessa olevan äänen kanssa kuulijan kohdalla. Suurin vaimentuma saavutetaan taajuudella, joka vastaa kaksi kertaa penkin selkänöjan efektiivistä korkeutta. Jollain taajuudella vastaavasti ääni vahvistuu. Avoimissa penkeissä, joissa selkänöja ei yllä lattiaan asti, vaimentuma on leveämpi ja suljetuissa penkeissä hyvin kapeakaistainen (kuva 11.5). (Tahvanainen 2021).

Vaimentuma ilmenee pienillä taajuuksilla alle 800 Hz taajuusalueella ja vaimentuman taajuusalueen leveys ja voimakkuus riippuvat penkin tyypistä, salin muodosta sekä kuuntelupisteen etäisyydestä äänilähteeseen. Suorakulmaisissa saleissa taajuusvasteen alussa ilmenevä vaimentuma korjaantuu heijastusten saapuessa ajan kuluessa ja lopullisessa vasteessa vaimentumaa ei juuri ole havaittavissa. Viinitarhan ja viuhkan muotoisissa saleissa katsomovaimennus taas on edelleen havaittavissa lopullisessa vasteessa. Selittäväksi tekijäksi on nostettu aikaisten heijastusten vähäisyys, joka näissä geometrioissa johtuu sivuttaissuuntaisten heijastusten puutteesta. (Tahvanainen 2021).



Kuva 11.5. Istuimen rakenne ja muoto vaikuttavat merkittävästi katsomovaimennukseen. Kevyt-rakenteinen ja ilmava istuin (vas.) on tässä suhteessa akustisesti edullisempi kuin korkealla selkänöjalla varustettu istuin, jonka rakenne jatkuu yhtenäisenä lattiaan saakka. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

11.3 Konserttisaliakustiikan mittaluvut

11.3.1 Impulssivasteen mittaaminen

Impulssivaste kuvaa akustista siirtotietä äänilähteestä vastaanottajaan. Objektiivisesti impulssivaste voidaan mitata toistettavimmin kaiuttimella ja mikrofoneilla. Kaiuttimen sijasta saatetaan joissain tapauksissa käyttää impulssimaista äänilähdettä, kuten ilmapalloa tai starttipistoolia paukkupatruunoilla. Näiden menetelmien avulla mitatuista impulssivasteista saadaan laskettua akustisia mittalukuja melko luotettavasti. Kaiuttimia käytetään huoneakustisissa mittauksissa useimmiten äänilähteinä varsinkin niiden hyvän toistettavuuden takia. Joidenkin akustisten parametrien laskentaan vaaditaan äänilähteen kalibrointi, joka voi olla muilla kuin kaiuttimella haastavaa.

Kaiuttimella ei suoraan voida toistaa impulssia, ainakaan kovin suurella voimakkuudella. Tästä syystä kaiuttimella mitattaessa lähdesignaalina käytetään useimmiten logaritmista sinipyyhkäisyä (Farina, 2001) tai satunnaista kohinaa, tyypillisesti MLS-kohinaa (eng. *Maximum Length Sequences*) (Rife & Vanderkooy 1989), joka on pseudosatunnaista jaksollista signaalia. Logaritmisessa sinipyyhkäisyssä signaalin siniaallon perustaajuus muuttuu logaritmisesti ajan suhteen (Farina 2001):

$$x(t) = \sin\left(\frac{\omega_1 t}{\log(\omega_2/\omega_1)} (e^{(t/T)\log(\omega_2/\omega_1)} - 1)\right), \quad (11.6)$$

missä $\omega_1 = 2\pi f_1$ ja $\omega_2 = 2\pi f_2$, ovat pyyhkäisyn aloitus- ja lopetustaajuudet ja T on signaalin pituus. Kuvassa 11.6 on esitetty kaavalla 11.1 lasketun sinipyyhkäisyn spektrummi parametrien arvoilla $f_1 = 20$ Hz, $f_2 = 20$ kHz ja $T = 5$ s.

Impulssivaste lasketaan vastaanottavan mikrofonin signaalin $\hat{y}(t)$ ja herätteen $x(t)$ välisestä dekonvoluutiosta

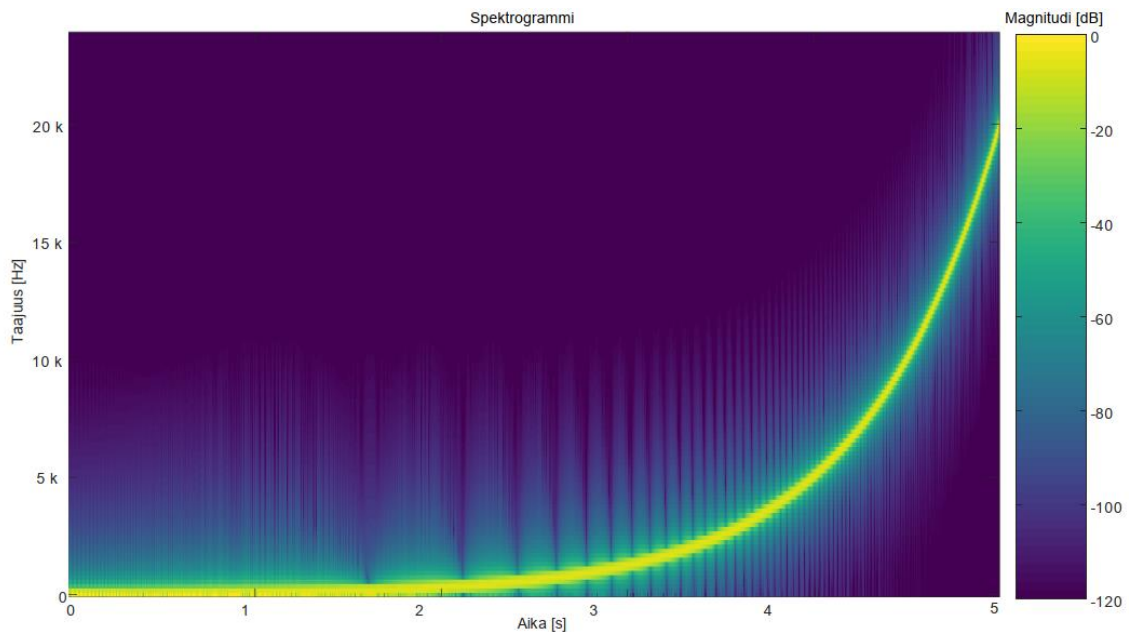
$$\hat{h}(t) = \hat{y}(t) \circledast x(t) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{F}\{\hat{y}(t)\}}{\mathcal{F}\{x(t)\}}\right\}, \quad (11.7)$$

missä \circledast merkitsee dekonvoluutiota, $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ ja $\mathcal{F}\{\cdot\}$ ovat käänteis-Fourier-muunnos ja Fourier-muunnos. Mittaustulos sisältää reaalitylanteessa aina kohinaa, joka voidaan esittää:

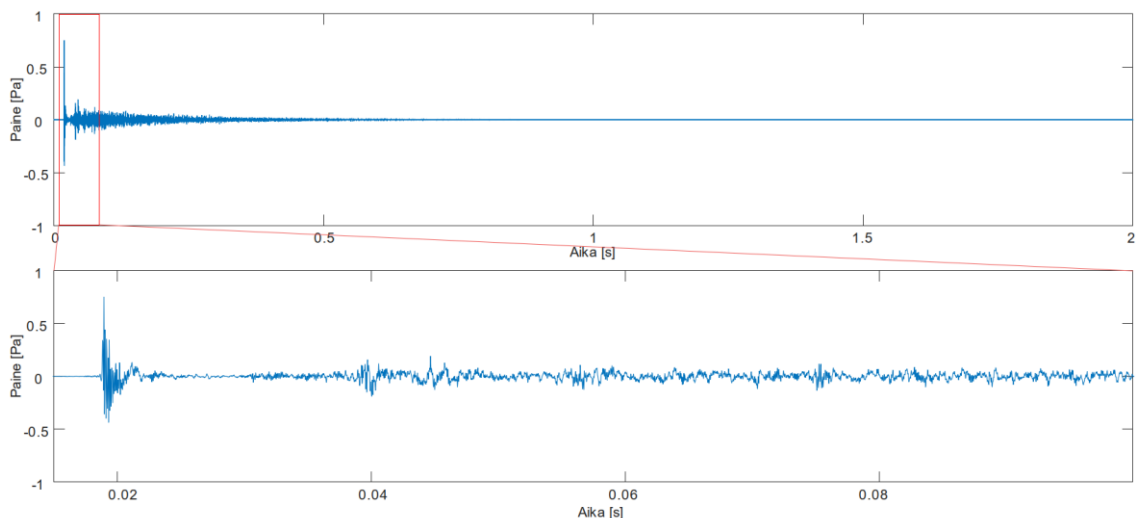
$$\hat{y}(t) = x(t) * h(t) + \sum_k h_k(t) * n_k(t) + n_{\text{laitteet}}(t) = x(t) * h(t) + n(t), \quad (11.8)$$

missä $h_k(t)$ on siirtofunktion kohinalähteestä mikrofoniin, $n_k(t)$ on kohinalähteen äänipaine, ja $n_{\text{laitteet}}(t)$ on laitteistoista johtuva kohina. Kaavan jälkimmäisessä osassa on

oletettu, että kohinalähteet voidaan esittää kaikkien kohinalähteiden summana $n(t) = \sum_k h_k(t) * n_k(t) + n_{\text{laitteet}}(t)$. Kohinalla ja sen arvioinnilla on merkitystä huoneimpulssivasteen mittauksessa, sillä akustisten mittalukujen arviointi vaatii vähintään 35 dB signaali-kohina-suhteen (ISO 3382-1). Signaali-kohina-suhdetta voidaan parantaa mitauksissa keskiarvottamalla useita mittauksia (ISO 3382-1). Käytännössä kohinan taso voidaan arvioida mikrofonisignaalista, esimerkiksi siitä osasta, missä ei esiinny signaalia. Esimerkki mitatusta huoneimpulssivasteesta on esitetty kuvassa 11.7.



Kuva 11.6. Kaavalla 11.6 lasketun logaritmisin sinipyyhkäisyn spektrogrammi. Parametreina käytetty arvoja $f_1 = 20$ Hz, $f_2 = 20$ kHz ja $T = 5$ s ja näytteenottotaajuus $f_s = 48$ kHz.



Kuva 11.7. Esimerkki mitatusta impulssivasteesta 2 sekunnin ajalta. Suora ääni ja aikaiset heijastukset on esitetty suurennettuna alemmassa kuvassa. Suora ääni saapuu noin 17 ms kohdalla, sillä etäisyys lähteeseen on hieman yli 6 m. Aikaiset heijastukset saapuvat tämän jälkeen, ensimmäisenä lattiaheijastus noin 20 ms kohdalla.

11.3.2 Standardi ISO 3382-1

Konserttisalien huoneakustiikan mittauksissa käytetään yleisesti standardissa ISO 3382-1 määriteltyjä mittalukuja. Impulssivasteiden mittaamiseen standardin ISO 3382-1 mukaisesti vaaditaan ympärisäteilevä äänilähde, joka voidaan kalibroida (kuva 11.8). Standardin ISO 3382-1 mukainen ympärisäteilevä äänilähde tuottaa ääntä joka suuntaan tasanaisesti taulukon 11.1 sallimissa rajoissa. Tyypillisiä arvoja akustisille mittaluvuille konserttisaleissa on esitetty taulukossa 11.2

Mikrofoneja tulisi olla kaksi, pallo- ja kahdeksikkosuuntakuviainen. Mittauskaluston tulisi täyttää äänitasomittareiden standardin IEC 61672-1 luokka 1 tai mikäli käytetään tallenninta ja mikrofonia, tulisi tallentimen taajuusvasteen toleranssin olla ± 3 dB. Oktaavikaistasuodattimien tulee täyttää standardin IEC 61620 vaatimukset. Äänilähteiden tulisi olla noin 1,5 metrin korkeudessa siellä missä tyypilliset äänilähteet yleensä salissa ovat. Mikrofonit tulisi sijoittaa noin 1,2 metrin korkeuteen ja normaalille yleisön alueelle, mutta ei kuitenkaan liian lähellä äänilähdettä.

Taulukko 11.1. Suurin sallittu poikkeama ympärisäteilevän äänilähteen suuntaavuudessa vaaleanpunaisella kohinalla mitattuna vapaassa kentässä (ISO 3382-1).

Oktaavikaistan keskitaajuus	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Suurin sallittu poikkeama	± 1 dB	± 1 dB	± 1 dB	± 3 dB	± 5 dB	± 6 dB



Kuva 11.8. Konserttisalin huoneakustiikan mittauksissa käytettävä ympärisäteilevä äänilähde. Kuvallähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

Taulukko 11.2. Akustisten mittalukujen tyypillisiä arvoja konserttisaleissa (ISO 3382-1).

Subjektiiivinen kokemus	Akustinen suure	Taajuuskaistat ^{a)}	Juuri havaittava ero	Tyypillinen vaihteluväli ^{b)}
Subjektiiivinen äänenvoimakkuus	Voimakkuus G	500...1000	1 dB	-2...10 dB
Havaittu kaiuntaisuus	Varhainen jälkikaiunta EDT	500...1000	5 %	1,0... 3,0 s
Havaittu äänen selkeys tai kirkkaus	Äänen selkeys C_{80}	500...1000	1 dB	-5...5 dB
Havaittu äänilähteen leveys	Varhainen sivuttaisenergiasuhde J_{LF}	125...1000	0,05	0,05...0,35
Kuulijan ympäröivyyttä	Myöhäinen sivuttaisenergiasuhde L_J	125...1000	Ei tiedossa	-14...1 dB

^{a)} Keskiarvon laskentaan käytetään aritmeettista keskiarvoa paitsi L_J lasketaan energiakeskiarvona

^{b)} Taajuuskeskiarvotetut arvot yhdessä pisteessä, konserttisaleissa ja monikäyttösaleissa ilman yleisöä

11.3.3 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunta-aika on esitelty kappaleessa 2.2.2. Kuten aiemmin esitettiin, jälkikaiunta-aika on se aika, joka äänellä kuluu siihen asti, että se on vaimentunut kuulumattomiin. Tämä vastaa tasoa, joka on 60 dB suoraa ääntä pienempi. Impulssivasteen jälkikaiunta-ajan arviointi tehdään Schröderin integraalin kautta:

$$e(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau, \quad (11.9)$$

missä $e(t)$ on impulssivasteen energia ja $h(\tau)$ on paine ajan τ suhteen. Suora sovitetaan energiavasteeseen desibeliasteikolla $E(t) = 10 \log_{10}(e(t))$. Vaimenemiskäyrästä $E(t)$ lasketaan kulmakerroin $c_{5,35}$ [dB/s] niiden tasojen välillä, jotka ovat 5 dB ja 35 dB vaimenemiskäyrän tasaista osaa pienempiä ja jälkikaiunta-aika lasketaan kulmakertoimesta $T_{30} = 60/c_{5,35}$. Jälkikaiunta-aika voidaan myös laskea myös suuremmasta tai pienemmästä dynamiikasta, kuitenkin aina aloittaen 5 dB vaimentuneesta kohdasta. Käytetty dynamiikka tulisi ilmoittaa tuloksia raportoidessa (esim. T_{20} tai T_{30}).

Impulssivasteen oletetun eksponentiaalisen vaimenemisen vuoksi impulssivasteen integrointi ei muuta funktion perusmuotoa vaan se säilyy eksponentiaalisena. Desibeliasteikolla suoran sovitus Schröderin integraaliin on houkuttelevampaa kuin suoraan amplitudivasteeseen.

11.3.4 Varhainen jälkikaiunta-aika

Varhainen jälkikaiunta-aika (EDT, eng. early decay time), kuvaa impulssivasteen alkuosan vaimenemista samaan tapaan kuin jälkikaiunta-aika T_{30} kuvaa tilan koko vasteen vaimenemista. Se lasketaan samaan tapaan kuin T_{30} , mutta kulmakerroin määritellään niistä ajanhetkistä, kun äänitaso on vaimentunut 0 dB ja 10 dB $EDT = T_{10} = 60/c_{0,10}$.

EDT kuvaa havaittua kaiuntaa paremmin kuin jälkikaiunta-aika T , joka kuvaa tilan fysi-
kaalisia ominaisuuksia paremmin.

11.3.5 Energiasuhdeparametrit

Aikaisen energian ja myöhäisen energian suhde on määritelty seuraavasti:

$$C_{t_e} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{t_e} h^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (11.10)$$

missä $t_e = 80$ ms kun kyseessä on äänen selkeys C_{80} . Toinen vaihtoehto aikarajalle on $t_e = 50$ ms. Äänen selkeys kuvaa siis aikaisen äänikentän energian määrä verrattuna sen jälkeen saapuvaan äänikenttään. Tämä parametri on vahvasti paikkariippuvainen konserttisaleissa ja esiintymistiloissa.

11.3.6 Varhainen sivuttaisenergiasuhde

Varhainen sivuttaisenergiasuhde lasketaan suoran äänen jälkeen saapuvan sivuttaisen energian ja kokonaisenergian suhteesta:

$$J_{LF} = \frac{\int_{0,005}^{0,080} h_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} h^2(t) dt} \quad (11.11)$$

missä $h_L(t)$ on impulssivasteen hetkellinen paine mitattuna kahdeksikkosuuntakuvioisella mikrofonilla. Konserttisaleissa, joissa on paljon pystysuuntaisia pintoja, kuten kenkälaatikon mallisissa saleissa, sivuttaisenergiasuhde on paljon isompi kuin viinitarha- tai viuhkamallisissa saleissa, joissa sivuseinät eivät tuota yleisöalueelle niin paljon energiaa sivusuunnista.

11.3.7 Myöhäinen sivuttaisenergiasuhde

Myöhäinen sivuttaisenergia suhde on koko sivuttaisen energian ja kokonaisenergian suhde

$$L_J = 10 \log_{10} \frac{\int_{0,80}^{\infty} h_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (11.12)$$

Jälleen, kuten aikaisen sivuttaisenergiasuhteenkin tapauksessa, kenkälaatikon mallisissa saleissa myöhäinen sivuttaisenergiasuhde on tyypillisesti isompi kuin viinitarhan tai viuhkan mallisissa saleissa.

11.3.8 Voimakkuus

Tilan akustista vahvistamista kuvaa parametri G , joka lasketaan seuraavasti

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_{10m}^2(t) dt}, \quad (11.13)$$

missä $\int_0^{\infty} h_{10m}^2(t) dt$ on 10 metrin etäisyydellä ympärisäteilevän kaiuttimen energia vapaassa kentässä. Käytännössä kaiuttimen referenssitason voi mitata kaiuttomassa tai puolikaiuttomassa tilassa. Kaavassa 11.13 integraalit tulisi aloittaa ajanhetkestä $t = 0$, joka on impulssivasteen alkamisaika ja lopettaa ajanhetkeen ($t = \infty$), joka vastaa sitä hetkeä, kun energia on pienentynyt 30 dB tai enemmän.

Voimakkuudessa siis verrataan tilan akustisen vasteen energiaa kaiuttimen tuottamaan energiaan vapaassa kentässä. Esiintymistiloissa, joiden koko on alle 25 000 m³, voimakkuus G on tyypillisesti -2 dB ... 10 dB.

11.3.9 Lava-akustiikan mittaluvut

Lava-akustiikan mittaluvuiksi käytetään varhaista ja myöhäistä tukea. Varhainen tuki lasketaan impulssivasteesta, joka on 1,0 metrin etäisyydellä ympärisäteilevän lähteen akustisesta keskipisteestä seuraavasti:

$$ST_{\text{Early}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{10 \text{ ms}} h^2(t) dt}. \quad (11.14)$$

Heijastavien pintojen tulisi lisäksi olla vähintään 2,0 m etäisyydellä mittauspisteestä. Varhainen tuki liittyy siihen, kuinka hyvin orkesterin tai yhtyeen jäsenet kuulevat toistensa musisoinnin lavalla. Mittaluku ei ota huomioon suoraa ääntä, viivettä, tai heijastuksia lähipinnoilta.

Myöhäinen tuki lasketaan samasta impulssivasteesta kuin varhainen tuki, mutta nimitäjän aikaikkuna on pidempi:

$$ST_{\text{Late}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{10 \text{ ms}}^{1000 \text{ ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{10 \text{ ms}} h^2(t) dt}. \quad (11.15)$$

Myöhäinen tuki kuvastaa muusikoiden subjektiivisesti kokemaa kaiuntaisuutta. Taulukossa 11.3 on esitetty lava-akustiikan mittalukujen tyypillisiä arvoja.

Taulukko 11.3. Esiintymistilan lavan akustiset mittaluvut (ISO 3382-1).

Subjekttiivinen kokemus	Akustinen mittaluku	Keskiarvoistuksen taajuuskaistat	Juuri havaittava ero	Tyypillinen vaihteluväli
Orkesterin olosuhteet	Varhainen tuki, ST_{Early}	250 Hz ... 2 kHz	Ei tiedossa	-24 dB ... -8 dB
Havaittu kaiuntaisuus	Myöhäinen tuki, ST_{Late}	250 Hz ... 2 kHz	Ei tiedossa	-24 dB ... -10 dB

11.3.10 Muut mittaluvut

Standardissa ISO 3382-1 on lisäksi esitetty interauraalinen (korvien välinen) korrelaatio-kerroin (IACC, eng. *interaural cross correlation*), joka lasketaan korvissa olevien mikrofonien välillä. Tähän voidaan käyttää keinopäätä tai korvissa olevia mikrofoneja. Lisäksi kirjallisuudessa on esitetty useita huoneakustiikan parametreja, jotka voivat olla hyödyllisiä huoneakustiikan arvioinnissa. Tässä esitellään niistä muutama yleisesti käytetty parametri.

Bassosuhdetta (BR, eng. *Bass Ratio*) ei ole määritelty standardissa ISO 3382-1, mutta se on hyödyllinen apusuure jälkikaiunta-ajan taajuusriippuvuuden tarkastelussa. Bassosuhte on määritelty pienten taajuuksien jälkikaiunta-ajan ja keskimmäisten oktaavikais-tojen jälkikaiunta-ajan suhteesta:

$$BR = \frac{T(125 \text{ Hz}) + T(250 \text{ Hz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} \quad (11.16)$$

Bassosuhte mittaa havaittua äänen lämpöä. Vastaavasti voidaan esittää diskanttisuhte (TR, eng. *Treble Ratio*)

$$TR = \frac{T(2 \text{ kHz}) + T(4 \text{ kHz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} \quad (11.16)$$

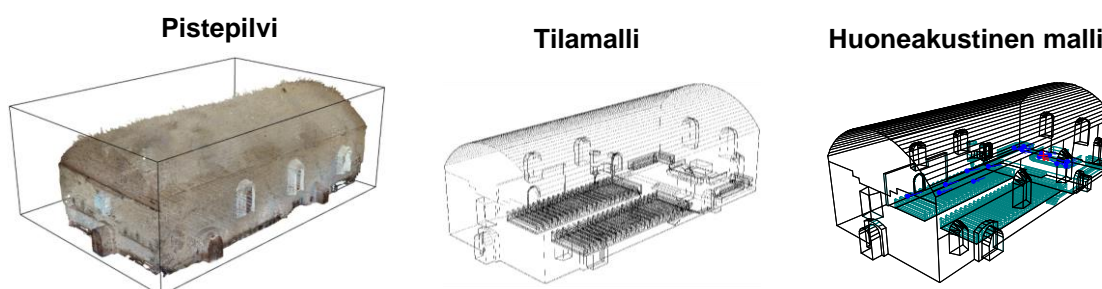
joka kuvaa jälkikaiunnan kirkkautta (Beranek 2004, Gade 2014).

Alkuviive (ITDG; eng. *initial time delay gap*) on aika ensimmäisen heijastuksen ja suoran äänen välillä, kun vastaanottopiste on keskellä konserttisalia. Tässä jätetään huomiotta lattiaheijastus. ITDGN on sanottu kuvaavaan lähteen läheisyyttä. (Beranek, 2004)

11.4 Huoneakustiikan mallinnus ja auralisointi

11.4.1 Geometrinen tilamalli

Huoneakustiikan mallinnuksen pohjaksi tarvitaan tutkittavasta tilasta geometrinen malli. Uudisrakentamishankkeissa geometrinen malli saadaan arkkitehdilta tai luodaan arkkitehdin mallin pohjalta. Olemassa olevien tilojen mallintamiseksi voidaan luoda geometrinen malli rakennuspiirustusten pohjalta, mutta se voi olla epätarkkaa, koska vanhaa rakennusta ei välttämättä ole toteutettu piirustusten mukaisesti tai myöhemmin on tehty muutoksia, joista ei ole suunnitelma-aineistoa käytettävissä. On myös mahdollista, että vanhat suunnitelmat eivät ole säilyneet. Olemassa olevan rakennuksen mallintamiseksi on suositeltavaa tehdä pistepilven kuvaamiseen perustuva geometrinen malli (kuva 11.9). Pistepilven kuvaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi laserkeilausta tai fotogrammetrisia menetelmiä. (Sadeaho 2022)



Kuva 11.9. Olemassa olevan tilan geometrisen tilamallin ja huoneakustisen mallin luominen fotogrammetriseen mittaukseen perustuvasta pistepilvestä (Sadeaho 2022).

11.4.2 Huoneakustiikan mallinnusmenetelmät

Edellä mainittujen ISO 3382-1 standardin mittalukujen säätäminen huoneakustiikan suunnitteluvaiheessa on tärkeää, mutta ne eivät suoraan kerro, miltä sali tulee kuulostamaan. Tämän vuoksi huoneakustiikan mallinnus ja auralisointi ovat hyödyllisiä työkaluja esiintymistilojen akustisten ominaisuuksien tutkimuksessa. Auralisointi tarkoittaa äänen ja akustiikan kuultavaksi tekemistä. Suunniteltavan tilan auralisointi vaatii aina myös huoneakustiikan mallinnuksen.

Menetelmiä akustiikan fysiikkaan perustuvaan mallinnukseen on monia. Isojen tilojen mallinnukseen käytetyimpiä menetelmiä ovat geometriset menetelmät, joihin kuuluvat säteen seuranta, radiositeettimenetelmä ja kuva-lähdemenetelmä (Savioja et al. 2008). Koska geometriset menetelmät eivät mallinna pieniä taajuuksia kovin hyvin, voidaan

joissain ongelmissa käyttää aaltopohjaisia menetelmiä, erityisesti reunaelementtimenetelmää ja aikatazon differenssimenetelmää. Hybridimenetelmissä yhdistetään yleensä kuvälähdemenetelmän aikainen vaste ja säteenseurannan tuottama jälkikaiunta. On myös mahdollista yhdistää aaltopohjaisen menetelmän tuottamat pienet taajuudet ja geometrysten menetelmien tuottamat suuret taajuudet.

11.4.3 Auralisointimenetelmät

Olemassa olevan tilan auralisointi perustuu akustisista mittauksista tehtävään analyysiin. Huoneen impulssivaste mitataan yleensä useasta paikasta, esimerkiksi paikoilta, jotka edustavat sinfoniaorkesterin soittimien paikkoja (Pätynen & Lokki 2009). Vastaanottajana on mikrofonihiila, jonka tulisi koostua vähintään neljästä mikrofonista, kun ääntä auralisoidaan kolmiulotteisesti. Joskus vastaanottajana käytetään myös mikrofoneja, jotka ovat keinopään tai ihmisen korvissa. Tämä rajoittaa toiston kuulokekuunteluun.

Mikrofonihiilan impulssivasteiden analyysiin on olemassa useita menetelmiä, joista yleisimmin huoneakustiikan auralisoinnissa käytössä olevat ovat Ambisonics ja parametriset menetelmät. Ambisonics on jatkuva-aikainen, äänen fysiikkaan perustuva menetelmä, jossa mikrofonisignaaleista johdetaan äänikentän paine- ja suuntasignaalit (Daniel et al. 2003). Parametrisissa menetelmissä äänikentän suunta ja paine analysoidaan yleensä lyhyissä aikaikkunoissa taajuuden suhteen (Tervo et al. 2013). Lisäksi joissain menetelmissä analysoidaan suoran ja diffuusin äänen suhde aikaikkunassa (Merimaa & Pulkki 2005).

Mallinnettu tai mitattu huoneakustiikka konvoloidaan lähteen signaalilla, kuten on esitetty kaavassa 11.1. Lähteenä käytetään siihen soveltuvaan signaalia ja lähteen suuntakuviota, esimerkiksi sinfoniaorkesteria, jos halutaan arvioida konserttisalin akustiikkaa.

Auralisoinnissa ääni tuotetaan kuuntelijalla kuulokkeiden avulla tai monikanavaisen kaiutinjärjestelmän avulla, joka yleensä sijaitsee kaiuttomassa, puolikaiuttomassa tilassa tai hyvin vaimennetussa tilassa. Kuulokkeiden avulla toistettavassa auralisoinnissa saapuvan äänikentän konvoloidaan pään suuntavasteella (HRTF, eng. *head-related transfer function*). Kullekin taajuudelle ja suunnalle on olemassa oma vasteensa molempiin korviin. Jokaisella ihmisellä on hieman erilaiset HRTF-vasteet. Jos kuuntelijan HRTF vastetta ei tunneta, joudutaan käyttämään jonkin muun henkilön HRTF-vastetta tai simuloitua vastetta, jonka soveltuvuutta voidaan arvioida esimerkiksi antropologisten mittausten avulla tai kuuntelemalla.

Monikanavaisessa kaiutin auralisoinnissa HRTF-vasteille ei ole tarvetta, sillä ääni tuotetaan paikalla kuunteluhuoneessa. Huoneakustiikan auralisoinnissa ääni tuotetaan kaiuttimista yleensä jollakin seuraavista menetelmistä: Ambisonics (Daniel et al. 2003), vektoriperusteinen amplitudipanorointi (VBAP, eng. *vector-based amplitude panning*) (Pulkki 1997) tai lähimmän kaiuttimen menetelmä (NN, eng. *nearest neighbour*). Ambisonicsissa ääni tuotetaan kaiuttimista painottamalla kaiutinsignaaleja suuntasignaaleilla siten, että äänikenttä kaiuttimien keskipisteessä, eli kuuntelupisteessä vastaa mitattua

äänipainetta (Daniel et al. 2003). VBAPissa käytetään kolmea äänen suunnassa olevaa lähintä kaiutinta tuottamaan ääni kyseisestä suunnasta (Pulkki 1997). NN-menetelmässä ääni tuotetaan siitä kaiuttimesta, joka on lähimpänä äänen suuntaa. Kaikkia toistomenetelmiä voidaan käyttää HRTF-vasteiden kanssa kuulokekuuntelussa.

11.5 Akustiikan visualisointi

11.5.1 Menetelmät

Olemassa olevaa tai suunnitteilla olevaa salia voidaan tutkia myös visuaalisesti eri vas- teiden kautta. Akustiikka riippuu taajuudesta, suunnasta, ajasta, havainnointipisteestä ja lähteen paikasta. Moniulotteisen datan visualisointi ei ole ikinä helppoa, mutta marginali- soimalla tai kiinnittämällä yhden tai useamman muuttujan voidaan esittää data eri ulottu- vuksiensa suhteen kaksiulotteisessa avaruudessa yhdessä kuvassa.

Impulssivasteen magnitudin esittäminen taajuuden, ajan tai molempien suhteen on yksi yleisimpiä huoneakustiikasta esitettäviä visualisointeja. Taajuuden ja ajan suhteen impulssivaste voidaan esittää spektrogrammina. Spektrogrammin haasteena on kuitenkin aika-taajuus-resoluutio aikaikkunan pituuden valinnan takia. Aika-taajuus-resoluution haastetta on vältetty aikaintegraatioon perustuvan taajuusvasteen visualisoinnissa (Päty- nen et al. 2013). Kuvassa 11.9 on esitetty impulssivasteen spektrogrammi ja viitteen (Pä- tynen et al. 2013) mukainen aika-taajuusvaste.

Impulssivasteen suunta ja amplitudi halutaan useasti esittää yhtä aikaa, jotta pystytään tulkitsemaan millä tavalla äänikenttä jakaantuu tilassa. Suunnan ja amplitudin visuali- sointiin on esitetty useita menetelmiä, mutta nykyään yleistynyt tapa on käyttää myös tässä aikaintegraatiota ja esittää eri ajanhetkiin mennessä saapuneen vasteen kokonais- energian suuntakuvio, kuten viitteessä (Pätynen et al. 2013). Menetelmässä energian in- tegraatio voidaan tehdä eteen- tai taaksepäin. Pienemmille tiloille taaksepäin integrointi (esim. Laukkanen, 2014, Tervo et al. 2015) ja suuremmille tiloille taaksepäin integrointi (esim. Pätynen et al. 2013) antaa mielekkäämpiä visualisointeja, joista voidaan tulkita saapuvan äänikentän suunta eri ajanhetkillä.

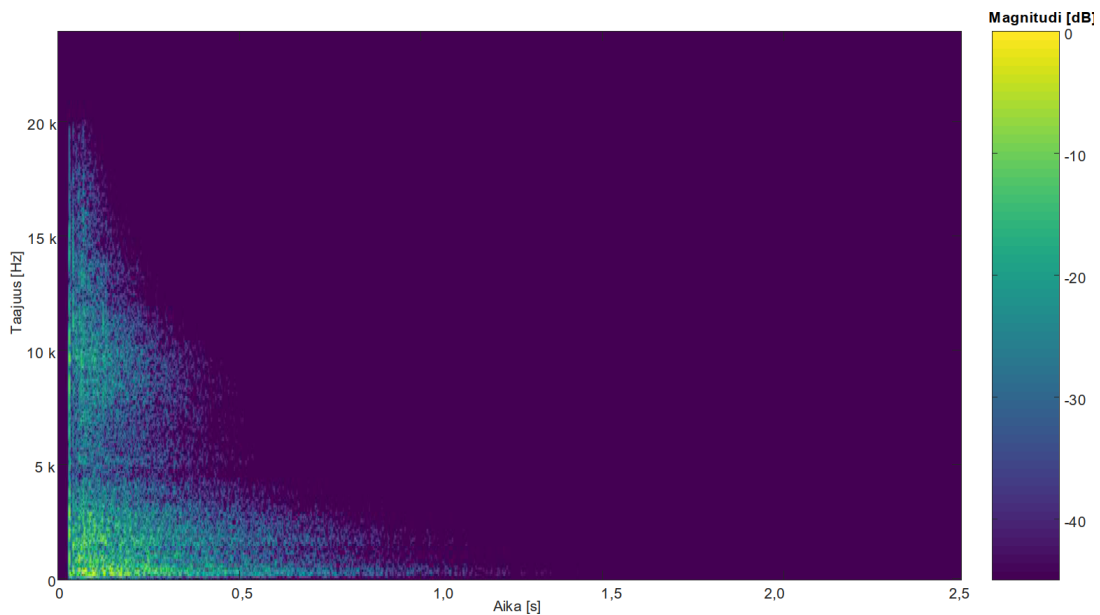
11.5.2 Esimerkki akustiikan visualisoinnista

Joensuun konservatorion konserttisalin akustiikka on tässä analysoitu edellä mainituilla visualisointimenetelmien avulla. Kuvassa 11.9 on esitetty yhden mitatun impulssivasteen spektrogrammi ja aika-taajuusvaste Pätyksen et al. 2013 esittämillä menetelmillä. Spekt- rogrammista on hankala tulkita salin aika- tai taajuusvasteen erityispiirteitä, mutta se voi olla muuten hyödyllinen työkalu esimerkiksi mittausten tarkastamiseen.

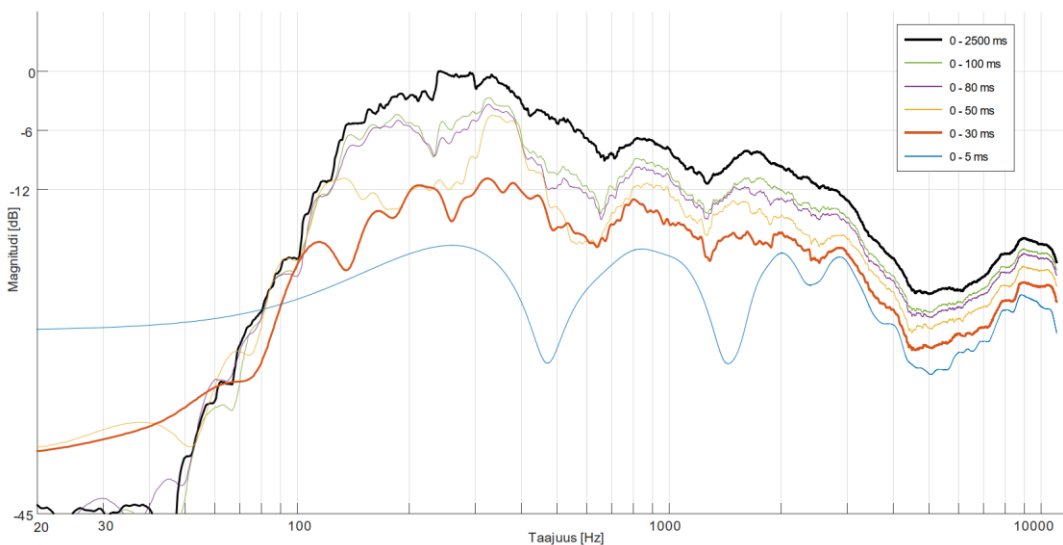
Kuvasta 11.9 b) voidaan päätellä, että salissa ei ole merkittävää katsomovaimennusta tai se korjaantuu melko pian suoran äänen jälkeen saapuvien aikaisten heijastusten myötä. Lisäksi nähdään, että taajuusvaste kasvaa melko tasaisesti 80 ms jälkeen, eli jälkikaiunta on taajuusvasteeltaan tasaista. Ensimmäisen 50 ms aikana mittauspisteeseen saapuu 300– 400 Hz taajuuskaistalla noin 6 dB enemmän energiaa kuin muille kaistoille. Tämä ei

todennäköisesti ole kuultavissa oleva ilmiö, koska jo 80 ms kohdalla taajuusvaste on ta-
soittunut. Ilman absorptio voidaan havaita siitä, että suuret taajuudet yli 3 kHz taajuus-
kaistalla voimistuvat vain noin 1–2 dB ensimmäisen 100 ms jälkeen, kun pienemmät taa-
juudet voimistuvat 2–6 dB.

Kuvassa 11.10 on esitetty salin aika-tila-vaste viitteen (Pätynen et al. 2013) mukaan
laskettuna. Visualisoinneista voidaan päätellä, että salissa on laajakaistaisia heijastuksia
sivuttaissuunnissa ja katosta saapuvat heijastukset ovat hieman vaimeampia kuin sivut-
taissuuntaiset heijastukset. Lattia- ja lavaheijastus on myös selkeästi näkyvissä ensim-
mäisen 30 ms aikana. Ensimmäiset sivuttaissuuntaiset heijastukset saapuvat 30 ms aikana
ja kattoheijastus 50 ms aikana.

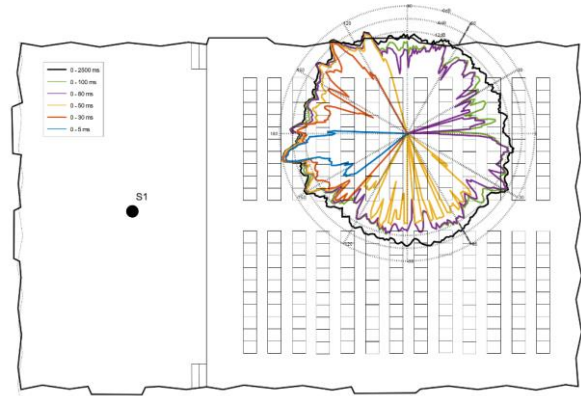
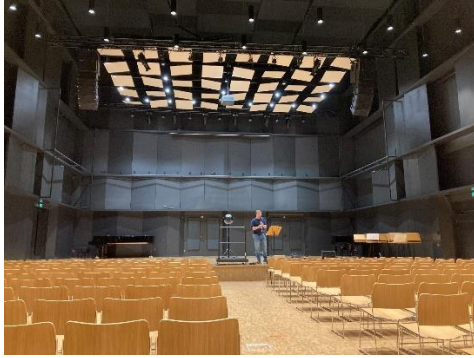


a) Impulssivasteen spektrogrammi



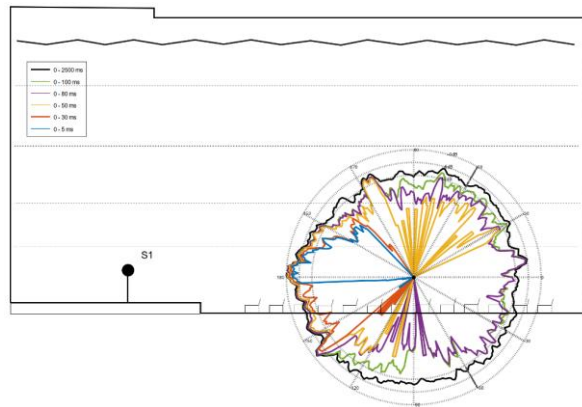
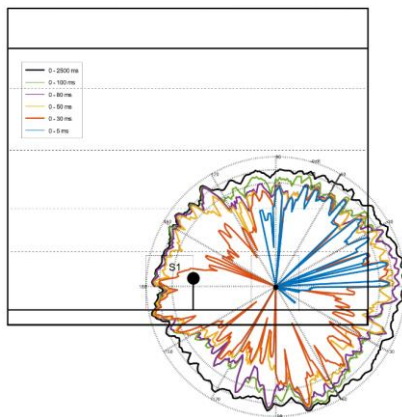
b) Impulssivasteen aika–taajuusvaste eri aikaikkunoissa

Kuva 11.9. Konserttisalin aika–taajuusvasteita yhdellä lähde- ja vastaanottopisteellä mitattuna.



a) Valokuva konserttisalista

b) Vaakatasoinen äänikenttä



c) Poikkileikkauksen suuntainen äänikenttä

d) Pituusleikkauksen suuntainen äänikenttä

Kuva 11.10. Valokuva Joensuun konservatorion konserttisalista sekä analysoidut äänikentät yhdestä yleisön alueen mittauspisteestä lavalla sijaitsevalle kaiutinpisteelle (S1). a) Akustikko testaa salin akustiikkaa muusikon roolissa. Ympärisäteilevä kaiutin on akustikon vieressä, b) vaakatason, c) poikkileikkauksen ja d) pituusleikkauksen suuntainen äänikenttä. Kuvälähteet: A-Insinöörin kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen (valokuva).

11.6 Konserttisalien suunnittelu

11.6.1 Käyttötarkoitus

Esiintymistiloja suunnitellaan nykyään monikäyttötiloiksi. Usein halutaan akustisen musiikin konserttien lisäksi esittää myös sähköisesti vahvistetun musiikin eri tyylejä samassa tilassa, järjestää puhe- tai koulutustilaisuuksia tai mahdollisesti käyttää tilaa tanssiin tai liikuntaan. Tämä asettaa suunnittelulle haasteita sillä kaikkiin näihin toimintoihin ei sovellu sama akustiikka.

Sähköisesti vahvistettu musiikki vaatii huoneen akustiikalta enemmän vaimennusominaisuuksia kuin akustisesti esitetty musiikki, koska kaiuttimista tulevaa suoraa ääntä halutaan korostaa ilman akustiikan aiheuttamaa väritystä. Liikunta tai muu tilaa vaativa toiminta voi johtaa siihen, että permannon istuimet tulee olla siirrettäviä ja lava tulee olla muunneltavissa. Nämä ja monet muut asiat aiheuttavat sen, että ainoastaan klassisen orkesterimusiikkiin suunniteltavia saleja ei juurikaan enää tehdä tai ne ovat harvinaisia.

11.6.2 Huoneakustiikan mallintaminen

Menetelmiä suunnitellun salin huoneakustiseen mallinnukseen on kolme: tietokoneavusteinen mallinnus, pienoismalli ja empiirinen mallinnus. Pienoismalleja tehtiin aikaisemmin enemmän, mutta nykyään tietokoneavusteinen mallinnus on selvästi yleisempää (Rindel 2010). Empiirisessä mallissa huoneen akustiset mittaluvut arvioidaan huoneen geometrian sekä diffuusille äänikentälle kehitettyjen kaavojen avulla (Gade 2014). Empiiriset mallit voivat olla hyödyllisiä suunnittelun alkuvaiheessa, kun tarkka muoto tai materiaalit eivät ole vielä tiedossa.

Tietokoneavusteinen mallinnus on halvempaa ja nopeampaa kuin pienoismallin rakentaminen. Lisäksi se mahdollistaa auralisoinnin, eri vaihtoehtojen helpon ja nopean vertailun ja tarkemman analyysin heijastusten sekä mittalukujen jakauman kannalta (Rindel 2010). Jos käytetään pelkästään geometrisen akustiikan menetelmiä, mallinnuksen haasteeksi voi nousta tietyt akustiset ilmiöt, kuten diffraktio (Rindel 2010). Näitä voidaan kuitenkin mallintaa aaltopohjaisilla menetelmillä esimerkiksi katsomon osalta.

11.6.3 Akustiset mittaluvut

Jälkikaiunta-aika mitoitetaan mallinnusohjelman avulla esimerkiksi kuvan 5.20 vaatimuksen tai kohteen akustisten vaatimusten mukaiseksi. Monikäyttösaleissa jälkikaiunta-aika joudutaan mitoittamaan monelle eri käyttötapaukselle. Kaiuntaa voidaan muokata liikuteltavilla verhoilla, käännettävillä seinäelementeillä, tai laskettavalla katolla (Gade

2014). Jälkikaiunnan pituudelle eri taajuuskaistoilla on annettu suosituksia standardissa DIN 18041. Suhteessa toisiin kaistoihin jälkikaiunta-aika voi olla taulukon 11.4 mukainen. Keskitajuuskaistoja suurempi poikkeama sallitaan 63 Hz, 125 Hz, 4 kHz ja 8 kHz oktaavikaistoilla.

Taulukko 11.4. Jälkikaiunta-ajan poikkeamat eri taajuuskaistoilla (DIN 18041)

Poikkeama	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Suurin sallittu	170 %	145 %	120 %	120 %	120 %	120 %	120 %	120 %
Pienin sallittu	50 %	65 %	80 %	80 %	80 %	80 %	65 %	50 %

Muille akustisille mittaluvuille ei ole annettu yhtä tarkkoja standardoituja tai yleispäteviä suunnitteluohjeita kuin jälkikaiunnalle, mutta niihin voidaan soveltaa standardissa ISO 3382-1 esitettyjä tyypillisiä arvoja tai niitä voidaan verrata olemassa oleviin saleihin. Gade on esittänyt oman suosituksensa kamarimusiikki- ja konserttisaleille, joissa esitetään klassista musiikkia, ja ne on esitetty taulukossa 11.5 (Gade 2014). Mikäli arvoja verrataan olemassa oleviin saleihin, tulisi ymmärtää minkä kokoinen konserttisali on suunnitteilla ja mihin sitä verrataan. Erityisesti konserttisalin tilavuus, suunniteltu yleisömäärä ja käyttötarkoitus vaikuttavat akustisiin vaatimuksiin ja mittalukuihin. Mittaluvut voivat olla myös määritelty kohteen akustisissa vaatimuksissa (Esim. Day et al. 2015).

Taulukko 11.5. Akustisten mittalukujen suosituksia klassiselle musiikille. Luvut esittävät paikka-keskiarvoistettuja lukuja. Taulukon arvoissa oletetaan, että penkit ovat hyvin absorboivia, joten jälkikaiunta-aika ei muutu yli 0,2 s kun yleisö on paikalla. (Gade 2014)

Mittaluku	Symboli	Kamarimusiikkisali	Konserttisali
Salin koko	V/N	2500 m ³ / 300 istuinta	25 000 m ³ / 2000 istuinta
Jälkikaiunta-aika	T	1,5 s	2,0 s – 2,4 s
Varhainen jälkikaiunta-aika	EDT	1,4 s	2,2 s
Voimakkuus	G	10 dB	3 dB
Äänen selkeys	C_{80}	3 dB	-1 dB
Sivuttaisenergiasuhde	LEF	0,15 – 0,20	0,20 – 0,25
Interauraalinen korrelaatiokerroin	1 – IACC	0,6	0,7
Varhainen tuki	ST_{early}	-10 dB	-14 dB

11.6.4 Istuimet ja yleisöalueen lattia

Konserttisali pyritään suunnittelemaan siten, että sen akustiset ominaisuudet olisivat mahdollisimman samanlaiset sekä tyhjänä, että täytenä. Tällöin penkkien absorptiokertoimien tulisi olla mahdollisimman lähelle istuvan yleisön absorptiokertoimia. Lisäksi penkkien rakenne ja lattia vaikuttavat katsomovaimennuksen taajuuskaistaan ja voimakkuuteen, kuten esitetty kappaleessa 11.2.5.

Suosittelavaa on käyttää kevytrakenteisia penkkejä, jotka ovat alhaalta avonaisia (Lokki & Pätynen 2018). Katsomovaimennuksen aiheuttama vaimentuma esiintyy avoimilla penkeillä suuremmalla taajuudella kuin penkeillä, joiden selkänöjä ylettyy maahan

asti. Tätä ei koeta niin haitalliseksi pienimpien taajuuksien kannalta (Lokki & Pätynen 2018).

Jyrkästi kalteva katsomo estää kuuntelijan takaa tulevat heijastukset ja pienentää jälkikaiun tilaa konserttisalin yläosassa (Gade 2014, Lokki & Pätynen 2018). Tämä vaikuttaa havaittuun jälkikaiun ympäröivyyteen. Tasainen tai hieman salin takaosaa kohti nouseva lattia on tästä syystä suositeltavaa (Lokki & Pätynen 2018). On myös ehdotettu, että lattia voisi olla kaarevasti nouseva (Gade 2014). Kaltevan lattian käyttöä on myös perusteltu sillä, että katsoja näkee orkesterin paremmin (Gade 2014).

11.6.5 Sivuseinät, parvet ja katto

Kuuntelukokeiden perusteella suurin osa tavallisista konserttiin osallistujista suosii akustiikkaa, jossa on tasaisista pinnoista tulevia sivuttaissuuntaisia heijastuksia, joka toteutuu usein esimerkiksi suorakulmaisissa konserttisaleissa (Lokki & Pätynen 2018).

Jos salin muoto poikkeaa suorakulmaisesta salista, aikaisia sivuttaisheijastuksia voidaan luoda lisäämällä saliin heijastavia pintoja. Heijastinsuunnittelu voidaan toteuttaa tietokoneavusteisesti (Day et al. 2015). Heijastuksia voidaan suunnata yleisöalueelle erillisillä heijastinelementeillä tai suuntaamalla parvekkeiden etuosan ja parvien alaosan ja seinän kulma siten, että vaakasuuntainen äänienergia yleisön alueella lisääntyy (Gómez, et al. 2016). Aikaisten heijastusten lisääminen kuitenkin vie pois äänienergiaa jälkikaiunasta, joka tulisi ottaa suunnittelussa huomioon (Gade 2014).

Parvirakenteet lisäävät sivuttaissuuntaisen energian määrää (Lokki & Pätynen 2018). Parvien syvyyden tulisi olla riittävä, jotta toisen asteen heijastus parven ja seinän välillä heijastaa riittävän leveän taajuuskaistan (Lokki & Pätynen 2018). 2 metriä syvä parvi mahdollistaa toisen asteen heijastuksen noin 100 Hz ylöspäin (Lokki & Pätynen 2018). Parvien suunnittelussa tulisi kiinnittää huomiota siihen, että yleisöalue, joka on parven alla, kuulee riittävästi myös jälkikaiuntaa ja kokee tilan tuntua (Gade 2014). Tämä voidaan varmistaa sillä, että parven etuosan ja lattian välinen korkeus on riittävä (Gade 2014).

Heijastusten laatuun tulisi kiinnittää huomiota. Heijastinelementtien koon ja suuntauksen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon, että se voi vaikuttaa orkesterin balanssiin eri tavalla eri yleisön osissa (Gade 2014). Tämä johtuu siitä, että heijastinelementtien efektiivinen taajuuskaista määräytyy niiden dimensioiden mukaan. Pienempi heijastinelementti heijastaa suurempia taajuuksia hyvin, mutta heikommin tietyn rajataajuuden alapuolella (Gade 2014). Lisäksi, kuten todettua, diffuusit heijastukset heikentävät havaittua kirkkautta ja havaittua tilan avoimuutta. Sivuheijastusten tulisikin olla sellaisista pinnoista, joissa ei ole pieniä diffusoivia elementtejä, koska diffusoivat elementit saattavat vaimentaa erityisesti korkeita taajuuksia ja sotkea vaihevastetta (Lokki & Pätynen 2018). Kuitenkin olisi hyvä, että diffusoivia elementtejä olisi salissa jonkin verran (Gade 2014). Onkin ehdotettu, että diffusoivia tai ääntä hajottavien elementtien kokoa tulisi vaihdella,

jotta tietyt taajuudet eivät vaimenisi enemmän suhteessa muihin taajuuksiin (Lokki & Pätynen 2018).

Konserttisalin katon tulisi olla riittävän korkealla, jotta riittävä määrä vaakasuuntaisia ensimmäisiä heijastuksia ehtii saapua kuulijalle ennen katosta saapuvia heijastuksia (Lokki & Pätynen 2018). Korkea katto vaikuttaa myös jälkikaiunnen syntyyn myönteisesti sillä jälkikaiunta pystyy kehittymään korkeassa tilassa (Lokki & Pätynen 2018). Tämä on seurausta siitä, että kattoa nostamalla salin tilavuus kasvaa ja pääasiallinen absorptioala, yleisöalueen pinta-ala, pysyy vakiona (Gade 2014). Lisäksi korkean katon myötä aikaisen vasteen ja jälkikaiunnen välille muodostuu ajallinen ero, joka auttaa kuulemiskokemuksessa erottelemaan lähteen ja salin erillisinä äänivirtoina (Lokki & Pätynen 2018).

11.6.6 Lava

Muusikot ja kapellimestarit työskentelevät konserttisalin lavalla ja heille on tärkeää kuulla toisensa ja itsensä soitto. Lava-akustiikan tulisi siis tukea mahdollisimman hyvin yhteissoittoa (kuva 11.11). Lisäksi muusikot tarvitsevat kuulohavainnon konserttisalin kaiunnasta, jonka perusteella he voivat arvioida tonaalista ja orkesterin balanssia (Kahle 2013).

Standardissa ISO 3382-1 esitettyjä lava-akustiikan mittalukuja on kritisoitu melko paljon (Dammerud et al. 2010). Myöhäisen tuen ST_{Late} tilalle on ehdotettu jälkikaiunta-aikaa T ja kirkkautta C_{80} , jotka vastaavat paremmin havaittua kaiuntaa (Dammerud et al. 2010). Jotkin heijastukset voidaan kokea lavalla haitalliseksi ja toiset hyödylliseksi orkesterin yhteissoiton kannalta (Dammerud 2009). Aikaisen tuen tilalle ei kuitenkaan ole löydetty korvaavaa parametria, vaan arkkitehtonisilla piirteillä todetaan olevan merkitystä (Dammerud et al. 2010). Muusikoiden suosiossa ovat haastattelujen perusteella korkeat, mutta eivät niin leveät lavat (Dammerud 2009). Muita arkkitehtonisia piirteitä, jotka on koettu hyödylliseksi niin salin kuin muidenkin muusikoiden kuulemisen kannalta, ovat hieman lavalta pois päin käännetyt seinät ja katto (Dammerud et al. 2010).

Lavalla on myös merkitystä yleisön kokeman akustiikan kannalta. Joissain tapauksissa kevytrakenteiset tai ontot lavat saattavat vaimentaa alimpia orkesterin taajuuksia 31,5–63 Hz oktaavikaistoilla. Lavan korkeudella suhteessa yleisön alueen lattian korkoon on myös arveltu olevan vaikutusta ainakin kirkkauteen, basson voimakkuuteen ja dynamiikan suuruuteen (Lokki & Pätynen 2018). Lavan tulisi siis olla jonkin verran ylempänä kuin yleisön alueen, mutta tätä ei ole tutkittu tarkemmin.

Lavan takaseinän suhteen on esitetty, että sen tulisi olla absorboiva (Kahle 2013) tai sellainen, josta ei seuraa suoraa heijastusta yleisöön päin, vaan äänienergia ohjataan konserttisalin sivuille (Lokki & Pätynen 2018). Tällainen ohjaaminen lisää vaakasuuntaista energiaa yleisöalueella (Lokki & Pätynen 2018). Joissain tilanteissa on mahdollista ohjata äänienergia heijastumaan lavan kulmien lähistöltä, hieman lavan yläpuolelta (25–65 asteen kulmassa suhteessa lavan vaakasuuntaan) yleisöalueelle. Tällaiset lavan yläpuolelta

saapuvat aikaiset heijastukset lisäävät havaittua ”avoimuutta” tai ”ilmavuutta” (Lokki & Pätynen 2018).



Kuva 11.11. Konserttisalin lava-akustiikan vuoksi ja orkesterin yhteissoiton tukemiseksi lavan päälle tehdään useimmiten heijastinrakenne, joka lisää nopeita heijastuksia lavan alueella. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

11.6.7 Meluntorjunta

Konserttisaleille ja esiintymistiloille on yleensä tiukemmat taustameluvaatimukset kuin esimerkiksi asuintiloille. Yleensä tulee ottaa huomioon ilmaääneneristys- ja askelääneneristys (luvut 3 ja 4) sekä ilmanvaihdosta syntyvä melu. Läpivientien, kuten savunpoistoluukkujen ääneneristykseen tulisi kiinnittää huomiota. Meluisalle paikalle kaupunkien keskustaan rakennettaessa tulee ottaa huomioon liikennemeluntorjunta (luku 6) sekä liikennetärinä ja runkomelu (luku 7). Lisäksi tulisi kiinnittää huomiota valaistuksen äänekkyteen, esimerkiksi, jos tilassa on sähköisesti suunnattuja valoja.

Luvun 11 lähteet

Barron, M. 2010. Auditorium acoustics and architectural design (2. p.). London, Spon Press.

- Beranek, L. 2004. Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture (2. p.). New York, Springer-Verlag-
- Cox, T. & D’Antonio, P. 2020. Acoustic absorbers and diffusers - Theory, design and application (3. p.). London, CRC Press.
- Daniel, J., Moreau, S., & Nicol, R. 2003. Further investigations of high-order ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging. Audio Engineering Society Convention 114.
- Dammerud, J. 2009. Stage acoustics for symphony orchestras in concert halls. PhD Thesis. Bath, University of Bath.
- Dammerud, J. J., Barron, M. and Kahle, M. 2010. Objective assessment of acoustic conditions on concert hall stages – limitations and new strategies. International Symposium on Room Acoustics 2010.
- Day, C., Marshall, H., Scelo, T., Valentine, J. & Exton, P. 2016. The Philharmonie de Paris- Acoustic design and commissioning. Institute of Acoustics 2015.
- DIN 18041. 2016. Acoustic quality in rooms – Specifications and instructions for the room acoustic design.
- Farina, A. 2001. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, Audio Engineering Society Convention 108.
- Gade, A. C. 2014. Architectural Acoustics. Teoksessa Rossing, T. D. (toim.). Springer Handbook of Acoustics (2. p.). New York, Springer-Verlag.
- Gómez, J. Ó. G., Kahle, E., & Wulfrank, T. 2016. Shaping concert halls. EuroRegio 2016. Porto, June 13–15.
- ISO 3382-1. 2009. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces.
- Kahle, E. 2013. Room acoustical quality of concert halls: perceptual factors and acoustic criteria – return from experience, International Symposium on Room Acoustic 2013.
- Kahle, E. 2016. Acoustic feedback for performers on stage – return from experience. International Symposium on Musical and Room Acoustics 2016.
- Kuusinen, A., & Lokki, T. 2015. Investigation of auditory distance perception and preferences in concert halls by using virtual acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 138(5), s. 3148–3159.
- Kylliäinen, M., Niemi, H., Jäppinen, J. & Linqvist, M. 2015. Helsingin keskeisten 1800-luvun konserttitilojen huoneakustiikan mallintaminen. Musiikki. Vol. 45 (2), s. 28–52.
- Laukkanen, P. 2014. Evaluation of studio control room acoustics with spatial impulse responses and auralization. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- Lokki, T. & Pätynen, J. 2017. Objekttiivinen konserttialin dynamiikan arviointi. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., s. 215–220.
- Lokki, T. & Pätynen, J. 2018. Concert halls should primarily please the ear, not the eye. Auditorium Acoustics 2018.

- Lokki, T., Pätynen, J., Tervo, S., Siltanen, S. & Savioja, L. 2011. Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 129, s. EL223–EL228.
- Lokki, T., Pätynen, J., Tervo, S. & Vertanen, H. 2011. Suomalaisten konserttisalien vertailu aistinvaraisin menetelmin. *Akustiikkapäivät 2011*. Tampere, 11.–12.5.
- Lokki, T. & Savioja, L. 2001. Huoneakustiikan mallinnus ja auralisaatio – katsaus nykytutkimukseen. *Akustiikkapäivät 2001*. Espoo, 8.–9.10., s. 129–134.
- Lokki, T., Tervo, S., Pätynen, J., Kuusinen, A. 2013. Musiikkitalon ison konserttisalin akustiikka. *Akustiikkapäivät 2013*. Turku, 22.–23.5., s. 225–230
- Merimaa, J. & Pulkki, V. 2005. Spatial impulse response rendering I: Analysis and synthesis. *Journal of the Audio Engineering Society*. Vo. 53(12), s. 1115–1127.
- Niemi, H. 2014. Helsingin kadonneiden 1800-luvun konserttitilojen akustiikan mallinnus ja auralisointi. *Diplomityö*. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Niskanen, R. 2008. Missä soitto soi – Musiikkitalit Suomessa. Helsinki, Multikustannus Oy.
- Pulkki, V. 1997. Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. *Journal of the audio engineering society*. Vol. 45(6), s. 456–466.
- Puomio, O. 2016. Konserttisaliakustiikan ja musiikin vaikuttavuuden tutkimus lämpökameralla. *Diplomityö*. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- Pätynen, J. & Lokki, T. 2009. Sinfoniaorkesteri herätteenä auralisaatiossa. *Akustiikkapäivät 2009*. Vaasa, 14.–15.5., s. 100–105.
- Pätynen, J., Tervo, S. & Lokki, T. 2013. Tila-aika-analyysi eurooppalaisista konserttisaleista visualisoinnin avulla. *Akustiikkapäivät 2013*. Turku, 22.–23.5., s. 219–224.
- Pätynen, J., Tervo, S. & Lokki, T. 2015. Dynamiikan havaitseminen ja konserttisalien akustiikan vaikutus tunteisiin. *Akustiikkapäivät 2015*. Kuopio, 24.–25.11., s. 95–100.
- Reinhart, P. N. & Souza, P. E. 2018. Effects of varying reverberation on music perception for young normal-hearing and old hearing-impaired listeners. *Trends in Hearing*. Vol. 22, s. 1–11.
- Rife, D. D., & Vanderkooy, J. 1989. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. *Journal of the Audio Engineering Society*. Vol. 37(6), s. 419–444.
- Rindel, J. H. 2010. Room acoustic modelling techniques: A comparison of a scale model and a computer model for a new opera theatre. *International Symposium on Room Acoustics 2010*.
- Robinson, P. W., Walther, A., Faller, C., & Braasch, J. 2013. Echo thresholds for reflections from acoustically diffusive architectural surfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 134(4), s. 2755–2764.
- Sadeaho, P.-H. 2022. Olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallintaminen – Esimerkkinä Sastamalan Pyhän Marian kirkko. *Diplomityö*. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Savioja, L., Siltanen, S., ja Lokki, T. 2008. Geometrisen huoneakustiikan renderöinti-yhtälö. *Rakenteiden mekaniikka*. Vol. 41(1), s. 25–30.
- Tahvanainen, H. 2021. Katsomovaimennuksesta konserttisaleissa. *Akustiikkapäivät 2021*. Turku, 24.–25.11., s. 204–208.

- Tervo, S., Pätynen, J. & Lokki, T. 2013. Tilaimpulssivasteiden analyysi ja synteesi huoneakustii-
kassa. Akustiikkapäivät 2013. Turku, 22.–23.5.
- Tervo, S., Pätynen, J. & Lokki, T. 2015. Autojen sisätilojen akustiikan ja äänentoiston analyysi
tilaimpulssivasteista. Akustiikkapäivät 2015. Kuopio, 24.–25.11.-
- Thompson, E. 2002. The soundscape of modernity – Architectural acoustics and the culture of
listening in America, 1900–1933. Cambridge, The MIT Press.

12

Puurakennukset

”Välikatoista voidaan aivan yleisesti sanoa, että tavallisesti meillä käytetyt välikatot eristävät ilma-ääntä riittävässä määrässä. Poikkeuksen tekevät vain kevyet puiset välipohjat, joihin nähden on syytä ryhtyä erikoisiin toimenpiteisiin. Tavallisesti on asia helposti autettavissa tällaisen välikaton alapuolelle tehtävällä erillisellä, kevyellä apuvälipohjalla, ja tuloksena on aivan erinomainen ääneristyskyky.”

Diplomi-insinööri Uuno Varjo 1947

12.1 Ääneneristys puurakennuksissa

12.1.1 Puurakentamisen akustiikkasuunnittelun kehitys

Suomen rakennuskannasta suurin osa oli pitkään puurakennuksia, mutta 1900-luvun kuudessa betonista tuli vallitseva rakennusmateriaali asuinkerrostalojen, toimistotalojen, koulujen ja monien muiden rakennusten rungoissa. Puusta rakennettiin pitkään omakotitaloja, rivitaloja, enintään kaksikerroksisia asuinkerrostaloja sekä yksikerroksisia päiväkotia, oppilaitoksia ja kokoontumistiloja.

Puurakennusten korkeuden rajoittaminen oli seurausta Turun kaupungin lähes kokonaan vuonna 1827 tuhonneesta tulipalosta, jollaisen ei haluttu koskaan toistuvan. Turun ja monen muun suomalaisen suuren kaupunkipalon aikaiset olosuhteet eivät kuitenkaan olleet olemassa 170 vuotta myöhemmin eikä merkittäviä kaupunkipaloja ole ollut Suomessa vuoden 1882 jälkeen (Kylliäinen 1996). Vuonna 1997 paloturvallisuutta koskenut Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E1 uudistettiin, ja kolmi- ja nelikerroksisten puukerrostalojen rakentaminen puurakenteisina tuli mahdolliseksi. Uudistukseen oli alettu varautua jo aiemmin, ja puukerrostalojen ääntä eristävien rakenteiden kehitystyö oli aloitettu 1990-luvun puolivälissä (Keronen & Kylliäinen 1995, Kylliäinen 1998). Nykyaikaisen puurakentamisen kehitys Suomessa alkoi tuolloin.

Aluksi puukerrostalojen runkoratkaisuna oli kantava rankarunko (Lahtela 2004), joka usein rakennettiin työmaalla, joskin vaihtoehtona oli puurakenteinen pilari–palkkirunko (Keronen & Kylliäinen 1997). Sittemmin runkovaihtoehtoja on kehitetty lisää, ja suurin osa puukerrostaloista toteutetaan nykyisin joko suurelementteinä tai tilaelementteinä. Näissä kantavana materiaalina voi olla puurankarunko tai massiivipuu. Myös hirsirunkoisia puukerrostaloja on toteutettu. 2010-luvun loppuvuosina puurunkoisina ryhdyttiin toteuttamaan myös julkisia rakennuksia laajemmassa määrin, ja erityisesti puurakenteisena rakennettujen koulujen ja päiväkotien ja oppilaitosten kerrosluku on kasvanut (Latvanne & Mikkilä 2021). Puurakenteisena on rakennettu myös yksityisiä rakennushankkeita, kuten toimistorakennuksia, jotka voivat olla varsin korkeitakin.

Puurakennusten ääneneristävyiden kehittäminen perustui 1990-luvulla lähinnä ääneneristysmittauksiin, koska luotettavia ja käytännön suunnittelutyöhön soveltuvia laskentamenetelmiä ei ollut tarjolla. Laboratoriomittauksilla selvitettiin yksittäisten rakennusosien ilma- ja askelääneneristysarvoja. Rakentamismääräykset ovat perustuneet Suomessa tilojen väliseen ääneneristävyteen, ei tiloja erottavien rakennusosien ääneneristävyyksiin (Lietzén & Kylliäinen 2015). Sivutiesiirtymien laskennallisiin tarkasteluihin ei ole ollut olemassa laskentamenetelmiä, joten puukerrostalojen ääneneristävyiden selvittämiseksi on toteutettu useita koerakentamishankkeita 1990-luvun puolivälistä lähtien (kuva 12.1) ja vielä 2010-luvullakin (Keronen & Kylliäinen 1997, Kylliäinen et al. 2015).

Laboratoriomittaukset ja varsinkin koerakennukset ovat kehitystyössä varsin raskaita menettelyitä: esimerkiksi erilaisten vaihtoehtojen tutkiminen tai sulkeminen pois on mittauksin hidasta ja kallista. Puurakennusten rakennushankkeissa suunnittelu on paljolti perustunut aiemmin toimiviksi havaittujen ratkaisujen toistamiseen. Uusien rakenteiden toiminnasta yritettiin tehdä päätelmiä aiempien mittaustulosten perusteella. Tämä on ollut myös puurakentamisen edistämisessä merkittävä pullonkaula (Kylliäinen et al. 2021).

Suunnittelu tai kehitystyö, joka perustuu pääasiallisesti ratkaisujen testaamiseen laboratorioissa tai koerakennuksessa, on puurakentamisen edistymisen kannalta kuitenkin ongelma. Asian merkitystä voidaan havainnollistaa vertaamalla tilannetta rakennesuunnitteluun: jos rakennesuunnittelu perustuisi kantavien rakenteiden koekuormitukseen ilman mahdollisuutta tarkastella rakenteiden käyttäytymistä laskennallisesti, on selvää, että tällainen suunnittelu olisi tehotonta sekä ajankäytön että kustannusten kannalta. Ääneneristävyyden laboratoriomittaukset vievät aikaa eikä laboratorioissa voida käytännössä koskaan tehdä niin laajoja koesarjoja, että ratkaisuja voitaisiin optimoida. Koerakennuksen rakennuskustannukset ovat suuret ja järkevää olisi saada koerakennuksen rakennusosat tai tilaelementit käytetyksi todellisessa rakennuksessa, mutta aina se ei ole mahdollista. (Kylliäinen et al. 2021)

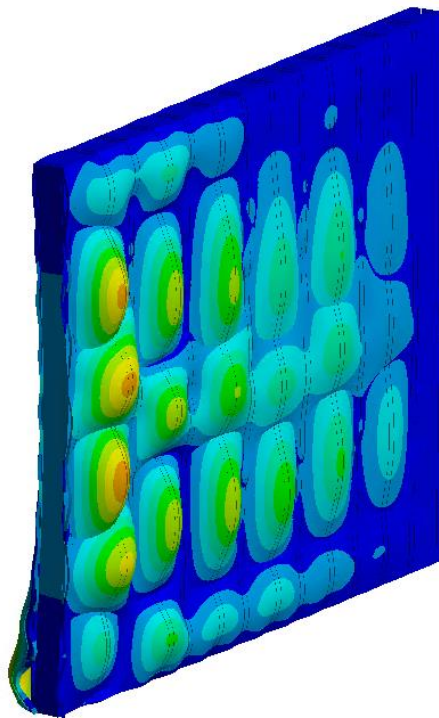
Betonirakentamisessa asuinkerrostalojen väliseinät ja välipohjat ovat pitkälle vakiintuneita, rakennevaihtoehtoja on muutamia ja niiden ääneneristysarvot tunnetaan. Puurakentamisessa tiloja erottavien rakennetyyppien kirjo on laaja. Välipohjan kantavana rakenteena voi olla esimerkiksi massiivipuulevy, sahatavarapalkisto, ripalaatasto, kotelo-laatasto tai puun ja betonin liittorakenne. Väliseinän runkona voi olla puuranka, massiivipuu tai hirsi. Kun otetaan huomioon puurakentamisessa tarvittavien muiden rakennekerrosten määrä ja vaihtoehdot, on selvää, että kaikkien mahdollisten rakennevaihtoehtojen ilma- ja askelääneneristävyyksiä ei voida selvittää laboratoriomittauksin tai koerakennuksissa.



Kuva 12.1. Tampereen teknillinen korkeakoulu tutki puukerrostalon ilma- ja askelääneneristysratkaisuja vuonna 1995 mittauksin laboratoriahalliin pystytetyssä kaksikerroksisessa koerakennuksessa (Keronen & Kylliäinen 1997). Vasemmalla nähdään keskeneräisen koerakennuksen runko ja oikealla koerakennus valmiina ulkovalloksineen. Tutkimustuloksia käytettiin Ylöjärven asuntomessuille 1996 valmistuneiden Suomen ensimmäisten nykyaikaisten puukerrostalojen rakentamisessa. Kuvalähde: Tampereen yliopisto, rakennustekniikan yksikön kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

Ilma- ja askelääneneristävyyksien määrittämiseksi on kehitetty 2010-luvulta lähtien kehitetty tarkkuudeltaan ja nopeudeltaan eritasoisia laskentamenetelmiä. Parametriset laskentamallit soveltuvat erityisesti suunnittelutyökaluiksi jokapäiväisissä rakennushankkeissa (Kylliäinen et al. 2015, Latvanne et al. 2019, Lahtela et al. 2021). Vaativammissa suunnittelutehtävissä ja rakenteiden tuotekehitystyössä voidaan käyttää numeerisia menetelmiä (esim. FEM), joiden tarkkuus vastaa parhaimmillaan ääneneristysmittausten mittausepävarmuutta (Lietzén & Kovalainen 2021, Kylliäinen et al. 2021). Ilma- ja askelääneneristävyyksien laskentaan on esitetty myös runsaasti analyttisiä laskentamalleja (esim. Kovalainen et al. 2019), mutta niiden käyttökelpoisuutta rajoittavat menetelmien monet reunaehdot: pienikin muutos laskettavassa rakenteessa reunaehtoihin nähden voi johtaa siihen, että menetelmää ei voida soveltaa. (Kylliäinen et al. 2021)

Numeerisilla menetelmillä ei ole parametrinen tai analyttisten menetelmien rajoitteita esimerkiksi reunaehtojen suhteen, vaan tutkittavan rakenteen geometria ja liitokset voidaan mallintaa halutulla ja tarkoituksenmukaisella tarkkuudella (kuva 12.2). Laskennallisten menetelmien hyödyntäminen merkitsee säästöjä sekä ajankäytössä että kustannuksissa, kun erilaisia rakennevaihtoehtoja voidaan tarkastella nopeasti ja tehokkaasti. (Kylliäinen et al. 2021)



Kuva 12.2. Elementtimenetelmällä mallinnetun rankarakenteisen seinän värähtelyn visualisointi yhdellä taajuudella. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

12.1.2 Puun ääneneristysominaisuudet

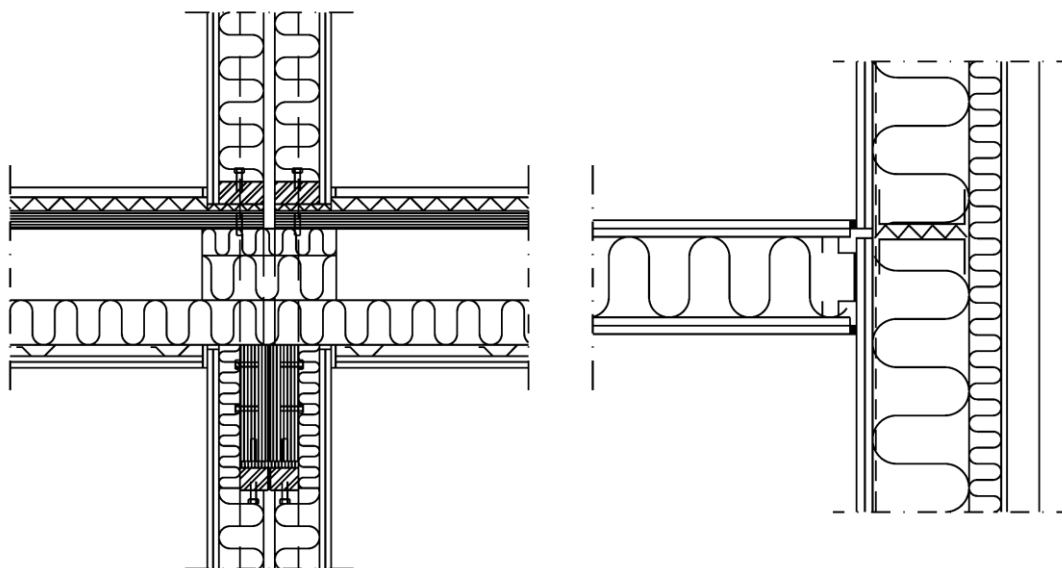
Betonirakennuksissa sekä ilma- että askelääneneristävyyden perustana ovat kantavan rakenteen massa, raudoitettujen betonilaattojen ja -seinien jäykkyys sekä rakennusosien

jäykät ja tiiviit liitokset. Puurakenteet toimivat akustisesti kaikissa näissä suhteissa toisin kuin betonirakenteet. Koska puun tiheys on viidenneksen luokkaa betonista, ääneneristävyys ei voi perustua kantavan rakenteen massa. Vaikka puu on betoniin verrattuna kevyttä, se on tiheyteensä nähden jäykkää: puun kimmomoduuli on noin puolet betonin kimmomoduulista. Puun tiheyden ja jäykkyyden suhteesta seuraa, että massiivisen puurakenteen ääneneristävyys on pienempi kuin massalain perusteella voisi olettaa (taulukko 12.1). Taulukosta nähdään, että massiivisen puulevyn ilmaääneneristysluku R_w on lähes 20 dB pienempi kuin yhtä paksun betonilevyn.

Taulukko 12.1. Puun ja betonin ääneneristävyteen vaikuttavia materiaaliominaisuuksia sekä massiivisen puu- ja betonilevyn lasketut ilmaääneneristysluvut R_w .

Ominaisuus	Tiheys ρ	Kimmomoduuli E	Ilmaääneneristysluku R_w	
			60 mm	120 mm
Puu	500 kg/m ³	11 600 MPa	26 dB	35 dB
Betoni	2500 kg/m ³	27 000 MPa	44 dB	54 dB

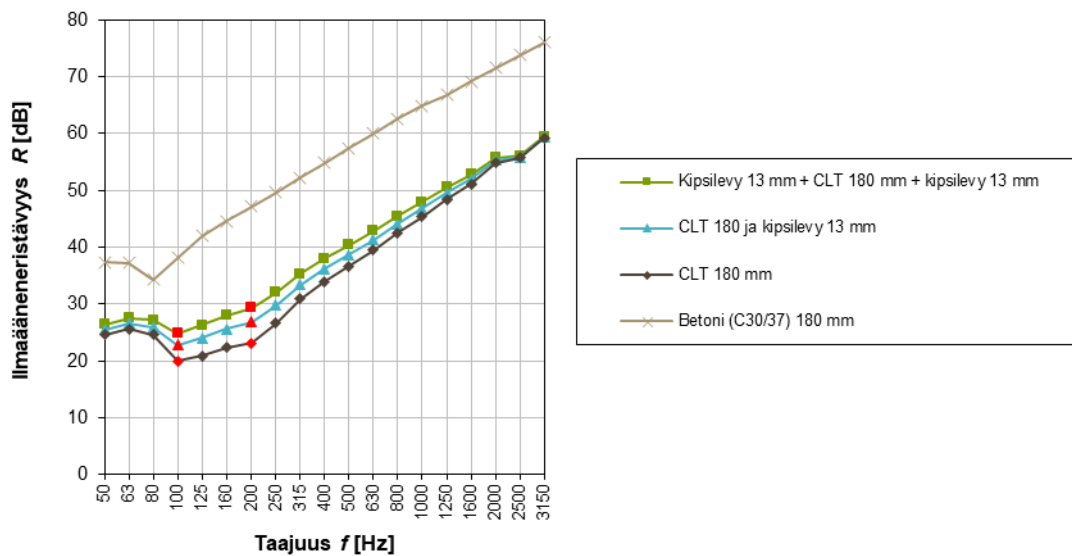
Puurakenteita ei voi liitoksissa juottaa ja raudoittaa jäykiksi niin kuin betonirakenteita. Liitoksissa ei siten ole vastaavasti jäykkyyttä kuin betonirakenteiden liitoksissa ja koska massa on pienempi (taulukko 12.1), huoneistosta tai tilasta toiseen jatkuva puulevy voisi muodostua äänen hallitsevaksi kulkureitiksi. Siksi puurakenteet eivät äänen sivutiesiirtymän vuoksi voi esimerkiksi asuinrakennuksissa jatkuva huoneistosta toiseen. Sivutiesiirtymän estämiseksi puurakenteisiin tehdään siksi erilaisia katkoja ja eristinratkaisuja huoneistoja tai tiloja erottavien rakennusosien kohdalla (kuva 12.3).



Kuva 12.3. Esimerkkejä sivutiesiirtymää estävistä kevyiden rakenteiden liitoksista: puukerrostalon huoneistoja erottavien välipohjan ja väliseinän liitos (vas.), huoneistoja erottavan yksirunkoisen väliseinän (oik.) liitos ulkoseinään (Keronen & Kylliäinen 1997, Sääksvuori & Kylliäinen 2002).

12.1.3 Puurakenteiden ilmäääneneristävyys

Kuvassa 3.4 on esitetty erilaisten rakennusmateriaalien koinsidenssin rajataajuuksia, kun rakennekerroksen paksuus vaihtelee. Kuvasta nähdään, että lähes kaikilla paksuuksilla puukerroksen koinsidenssin rajataajuus on taajuusalueella, joka saavutettavan ilmäääneneristävyys kannalta on epäedullinen. Puu sekä puulevyt materiaalina ovat lisäksi sellaisia, että niiden jäykkyys riippuu suunnasta. Siten puulevyillä havaitaan yleensä kaksi koinsidenssin rajataajuutta, joiden vuoksi taajuusalue, jolla ilmäääneneristävyys heikenee, on varsin leveä (kuva 12.4).

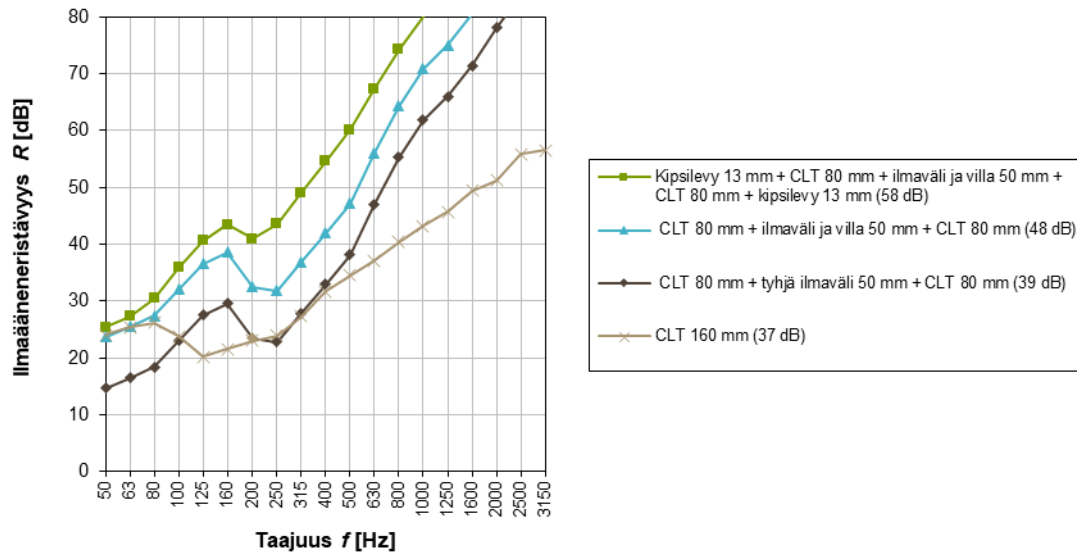


Kuva 12.4. 180 mm paksun CLT-levyn suunnasta riippuvan jäykkyyden vuoksi koinsidenssin rajataajuuksia on kaksi (merkitty punaisella). Koinsidenssin vaikutusta ilmäääneneristävyteen voidaan vähentää kiinnittämällä levyn pintaan mekaanisesti rakennuslevy, kuten kipsilevy. Kuvasta nähdään lisäksi ääneneristävyys kasvu massalain vaikutuksesta.

Koinsidenssin vaikutusta voidaan vähentää puulevyn pintaan mekaanisesti kiinnitettävällä rakennuslevyllä, jonka koinsidenssialue on suuremmilla taajuuksilla. Kuvassa 12.4. on esitetty CLT-levyyn yhdeltä ja kahdelta puolelta kiinnitetyn kipsilevyn vaikutus ilmäääneneristävyteen R ja koinsidenssialueeseen. Levytys molemmin puolin kasvattaa ilmäääneneristävyttä koinsidenssialueella noin 6–7 dB. Ääneneristävyys on palonkeston lisäksi syy sille, että tiloja erottavissa rakenteissa puupinnoille kiinnitetään rakennuslevy.

Kuvassa 12.4. esitetyn 180 mm paksun CLT-levyn laskettu ilmäääneneristysluku on 39 dB ja 44 dB molemmin puolin levytettynä. Tällainen rakenne voisi sopia toimistorakennuksissa toimistohuoneita erottavaksi väliseinärakenteeksi, sillä niiden välillä tavoiteltava äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on 40 dB (SFS 5907:2022). Asuinhuoneistojen välillä tavoite on 55 dB. Massalain perusteella voidaan päätellä, että CLT-levyn paksuutta tai kipsilevykerrosten määrää ei voida kasvattaa niin paljon, että väliseinän rakennepaksuus säilyisi käytännössä toteutettavana. Siksi puuväliseinät ovat aina kaksinkertaisia silloin, kun tavoitellaan hyvää ääneneristävyttä.

Kuvassa 12.5 on esitetty kaksinkertaisen CLT-väliseinän ilmasteneristävyyden muodostuminen. Ensimmäisessä seinäversiossa CLT-levyn paksuus on 160 mm. Tämän jälkeen CLT-levy on jaettu kahteen toisistaan erilliseen 80 mm paksuun levyyn, joiden välissä on 50 mm mineraalivillalla täytetty ilmaväli. Kuvasta nähdään, että asuinhuoneistojen välille asetetun äänitasoeroluvun 55 dB saavuttaminen edellyttää kaksinkertaista rakennetta, jonka kumpikin puolisko on verhottu rakennuslevyllä ja joiden välissä oleva ilmatila on täytetty ääntä absorboivalla materiaalilla. Rankarunkoisten väliseinien ilmasteneristävyyksien muodostuminen on esitetty aiemmin luvussa 3.3.



Kuva 12.5. Kaksinkertaisen CLT-väliseinän muodostuminen. Selitteen yhteydessä on suluisissa esitetty kunkin rakennetyypivaihtoehdon tuottamat ilmasteneristysluvut R_w [dB].

12.1.4 Ilmasteneristävyys puurakennuksessa

Ympäristöministeriön ääniympäristöasetus 796/2017 koskee äänen siirtymistä tilasta toiseen, mihin myös ihmisen kokemus ääneneristyksestä rakennuksessa perustuu. Rakenteiden välityksellä tapahtuva äänen siirtyminen tilasta toiseen on puurakennuksissa monimutkaisempi ilmiö kuin vastaavassa betonirakennuksessa. Puurakennuksesta monimutkaisemman tekevät rakenteiden kiinnitysjärjestelmät, rakenteiden ja niiden liitoksien geometria sekä puun mekaaniset ja akustiset ominaisuudet. (Pura et al. 2021)

Tavallisesti puurakenteisten rakennusosien välille on järjestetty riittävä liitoseristävyys katkaisemalla sivuavat rakenteet (esim. Keronen & Kylliäinen 1997, Kylliäinen et al. 2017b, Lahtela et al. 2021). Pystyrakenteissa katko toteutetaan tärinäneristimillä. Koska eristimet on mitoitettava tavoiteltavan ääneneristävyyden ja niille tulevan kuorman perusteella, eristimet ovat yleensä jäykkyydeltään erilaisia eri kerroksissa ja kerrosten sisälläkin, mikä edellyttää huolellista suunnittelutyötä sekä akustiikkasuunnittelijan ja rakennesuunnittelijan yhteistyötä. Pilari–palkkirunkoisessa puukerrostalossa tätä ongelmaa ei olisi, sillä kantava runko jää muiden rakennusosien sisään (kuva 12.3) ja kussakin

kerroksessa väli- ja ulkoseinien pitää kantaa vain itsensä (Keronen & Kylliäinen 1997). Vaakarakenteissa tarvittava katko toteutetaan ilmapölyllä eli rakenteet eivät jatku tiloja erottavan rakennusosan ohi. Sivuvaan rakenteen katkaisemisella sivutien liitoseristävyyttä pyritään kasvattamaan niin suureksi, että sivutien vaikutus kokonaisääneneristävyyteen on merkityksetön. (Pura et al. 2021)

Puurakennuksessa sivutiesiirtymä ja liitoseristävyydet sekä niihin vaikuttavat ratkaisut riippuvat merkittävästi valittavasta runkojärjestelmästä. Puurakennus voidaan toteuttaa rankarunkoisena, massiivipuurunkoisena tai pilari–palkkirunkoisena ja lisäksi nämä vaihtoehdot voidaan elementoida eri tavoin (kuva 12.6). Hirsirunko on myös mahdollinen sekä puukerrostaloissa että julkisissa puurakennuksissa.

Tilaelementein rakennetussa puukerrostalossa työmaalle tuodaan lähes valmiita asuntoja tai asunnon puolikkaita. Tehtaassa valmistetussa tilaelementissä kaikki pinnat, kiintokalusteet ja LVIS-järjestelmät ovat valmiiksi asennettuja. Työmaalla tehdään vain rakenteelliset ja talotekniset liitokset. Tilaelementtien kantavana rakenteena käytetään sekä seinissä että välipohjissa CLT-levyä, joka toimii jäykistävänä levynä. Tilaelementtejä voidaan tehdä myös rankarakenteisina. Kummassakin tapauksessa tilojen välille saavutettava ääneneristävyys riippuu elementtien välisten liitosten toteuttamisesta pysty- ja vaakasuunnassa. Tilaelementtien asennuksessa riskinä on se, että liitosten tärinäeristimet vaurioituvat, siirtyvät pois paikoiltaan tai ylikuormittuvat, jolloin ne eivät enää toimi ääneneristävyyden kannalta suunnitellulla tavalla. (Kylliäinen et al. 2017b) Myös julkisia rakennuksia on toteutettu CLT-rakenteisista tilaelementeistä (Latvanne & Mikkilä 2021)



Kuva 12.6. Esimerkki tilaelementein toteutetusta puukerrostalosta: TOAS Lumipuu Tampereella. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Suurelementtijärjestelmässä ulko- ja väliseinät toimivat pystykuormia kantavina ja jäykistävinä rakenteina. Seinäelementit voidaan toteuttaa rankarakenteisina tai CLT-runkoisina. Välipohjan kantavana rakenteena ovat tavallisesti liima- tai viilupuuvasat tai ripalaatasto, jonka kansilevyllä on suuri merkitys välipohjan jäykkyyden kannalta. Sivutiesiirtymiä on suurelementtijärjestelmällä rakennetussakin puukerrostalossa vähennettävä huoneistojen rajalle sijoitettavin tärinäneristinkaistoin. Ongelmana suurelementtijärjestelmässä on se, että jäykistyksen edellyttämät vaakavoimat on saatava välitetyksi elementiltä toiselle, joten elementit sidotaan toisiinsa pystysuunnassa jäykin liittimin. (Kylliäinen et al. 2017b)

Puurakenteiset asuinkerrostalot toteutetaan tavallisesti tilaelementeillä tai suurelementeillä, mutta ne voidaan toteuttaa myös pilari–palkkirunkoisina. Pilari–palkkirunkoisessa puurakennuksessa ei tarvita kantavia seinälinjoja. Kantavana runkona toimivat liima- tai viilupuiset pilarit ja palkit, joiden ympärille ja varaan rakennetaan yleensä suurelementeistä ulko- ja väliseinät ja välipohja. Suurelementit eivät kuitenkaan välitä rakenteellisia pystykuormia, mutta voivat toimia jäykistävinä, vaakakuormia siirtävinä osina. Toisaalta palkkien ja pilarien muodostamaan kehään on järjestettävissä jäykkyyttä paljonkin, jolloin seinät voidaan liittää pilari–palkkirunkoon täysin joustavasti. Tämä on ääneneristävyyden kannalta edullista, ja sivutiesiirtymän vähäisyyden ansiosta pilari–palkkirunkoisissa puukerrostaloissa on mitattu laboratoriomittaustuloksia vastaavia ilmajääläis-eristyslukuja ja askeläänitäslukuja. (Kylliäinen et al. 2017b, Keronen & Kylliäinen 1997) Muut puurakennukset kuin asuinkerrostalot toteutetaan yleensä pilari–palkkirunkoisina tai kantavien massiivipuulementtien ja pilari–palkkirungon yhdistelminä (kuva 12.7, esim. Latvanne & Mikkilä 2021).



Kuva 12.7. Pilari–palkkirunko puurakenteisessa koulussa (Suomalais-venäläinen koulu Helsingissä). Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Rakennuksen jäykistämisen kannalta liitokset ovat ongelma, koska niiden tulisi olla joustavia mutta kuitenkin välittää vaakakuormia elementiltä toiselle. Erityisesti korkeissa puurakennuksissa (kuva 12.8) tämän lisäksi ongelmaksi muodostuu se, että värinäeristinten muodonmuutoksista syntyy liian suuria liikkeitä rakennuksen ylimmissä kerroksissa. Siksi korkeat puurakennukset on toteutettu niin, että puurunko on joko jatkuva perustuksista vesikattoon saakka tai tilaelementit ovat jäykin teräsosin toisiinsa kiinnitettyjä. Tämä tarkoittaa sitä, että sivutiesiirtymän hallitsemiseksi kantava puurunko on verhoittava rungosta irrotetuin levyrakentein ja koolauksin (HOAS Tuuliniitty 2021). Vuoteen 2022 mennessä korkein Suomessa toteutettu puukerrostalo on 14-kerroksinen (Suomen korkein puukerrostalo 2019).



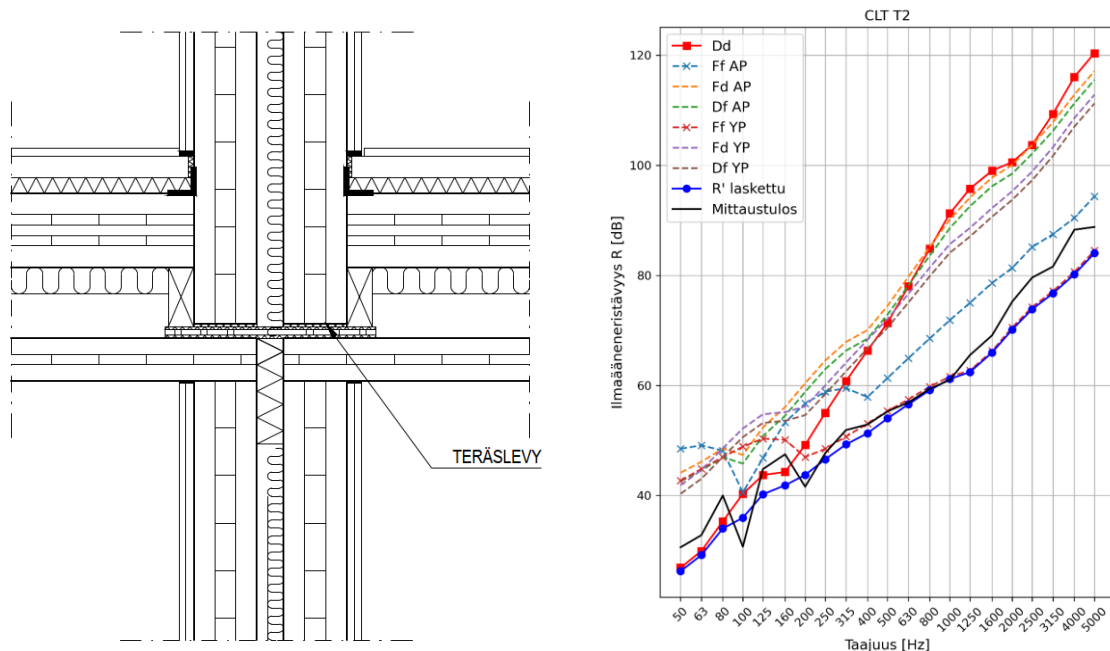
Kuva 12.8. Esimerkki korkeasta tilaelementtirakenteisesta kerrostalosta: Espoossa sijaitseva HOAS Tuuliniitty, joka 13-kerroksisena on maailman korkein tilaelementtitekniikalla toteutettu puukerrostalo. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Tilojen välisen ääneneristävyyden selvittämiseksi äänen rakenteellinen sivutiesiirtymä on otettava huomioon (luku 3.6). Standardissa ISO 12354-1 (2017) esitetty tilojen välisen ääneneristävyyden laskentamenetelmä sivutiesiirtymineen soveltuu myös puurakentamiseen. Merkittävä ero betonirakentamiseen nähden on kuitenkin se, että betonirakentamisessa liitoseristävyys on lähes taajuudesta riippumaton, mutta puurakenteiden liitoseristävyydet riippuvat taajuudesta erittäin paljon (Pura 2021). Puurakenteissa liitoseristävyyteen vaikuttavia tekijöitä on myös huomattavasti enemmän kuin betonirakenteissa. Puurakenteiden liitoksille ominaista ovat rakenteiden kiinnittämiseen käytettävät kiinnitysjärjestelmät ja -elimet. CLT-rakenteiden liitoksissa kiinnitys saattaa määrittää liitoksen liitoseristävyyden. Vahvat kytkentätavat, esimerkiksi tiloja erottavan rakennusosan ohi jatkuvat kulmaraudat, heikentävät liitoseristävyyttä merkittävästi ja saattavat jopa mitätöidä elementtien välille sijoitettujen värinäeristimien vaikutuksen. Jopa käytettävän ruuvityypin on havaittu vaikuttavan liitoksella saavutettavaan liitoseristävyyteen. (Pura et al.

2021) Toisaalta CLT-rakenteiden liitoksien saumojen on todettu vaikuttavan liitoseristävyyteen, vaikka ne ilman tärinäneristimiä tai ilmapälejä eivät varsinaisesti erota rakenteita täydellisesti. Esimerkiksi koulun, päiväkodin tai toimistorakennuksen toteuttaminen näyttäisi olevan mahdollista ilman saumoissa olevia tärinäneristimiä tai katkoja (Pura 2021).

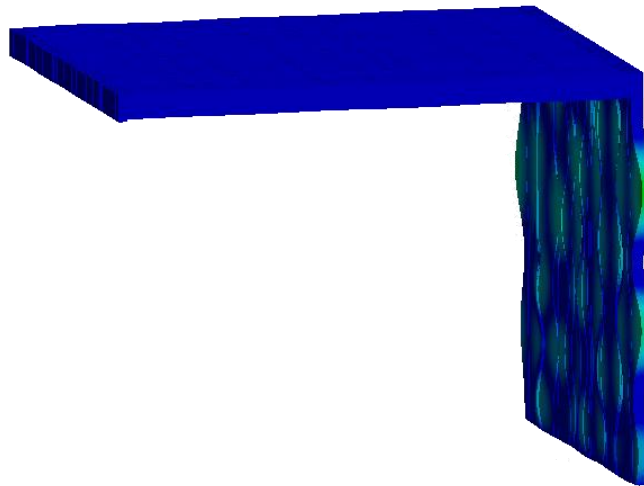
Laskettaessa tilojen välisiä ääneneristävyyksiä puurakennuksissa keskeinen tieto on liitoseristävyys, josta toistaiseksi on rajallisesti tietoa tutkimuskirjallisuudessa. Kun suunniteltavassa rakennuksessa käytettävistä liitoksista on saatavissa tieto, tilojen välisen ilmaääneneristävyyden ja äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ laskenta pystytään tekemään hyvinkin tarkasti.

Kuvan 12.9 esimerkissä mitattu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on 58 dB ja laskennallisesti tulokseksi saatiin 57 dB. Kuvasta havaitaan, että sivutiesiirtymät vaikuttavat pelkän tiloja erottavan väliseinärakenteen ääneneristävyyteen nähden suurilla taajuuksilla yli 30 dB. Sivutiesiirtymien vaikutus pienillä taajuuksilla noin 160 Hz asti on vain muutamia desibelejä eli tiloja erottava rakenne määrää saavutettavan ääneneristävyyden. Tämän taajuuden jälkeen vaikutus kasvaa nopeasti ja suurilla taajuuksilla sivutiesiirtymät muodostuvat määrääväksi tekijäksi. Hallitsevin äänen kulkureitti suurilla taajuuksilla on huoneen katto (kuvassa reitti Ff YP) ja seuraavaksi hallitsevin huoneen lattia (kuvassa reitti Ff AP). (Pura 2021)



Kuva 12.9. Laskennallisesti eri sivutiesiirtymäreittien perusteella määritetyt puukerrostalon viekkäisten huoneistojen välisten sivutiesiirtymäreittien tuottamat ilmaääneneristävyydet R taajuuskaistoittain sekä niistä laskettu ilmaääneneristävyydet R'_w . Tiloja erottavien rakennusosien liitos on esitetty vasemmalla ja sivutiesiirtymäreittien merkinnät vastaavat kuvaa 3.22. Huoneen alapuolista välipohjaa tarkoittaa merkintä AP ja yläpuolista YP (Pura 2021).

Standardin ISO 12354-1 puutteena rajallinen tieto puurakenteiden liitoseristävyyksistä (Pura et al. 2021). Nykyaikaiset numeeriset mallinnusmenetelmät kuitenkin mahdollistavat myös liitoseristävyyksien laskennan hyvällä tarkkuudella. Kuvassa 12.10 on esitetty kuva puuvälipohjan ja puuseinän liitoksesta, jonka värähtelyä ja edelleen liitoseristävyyttä on mallinnettu elementtimenetelmällä. Liitoseristävyyksien mittaaminen laboratoriossa on erittäin työlästä ja kallista, sillä se vaatii raskaan koejärjestelyn, käytännössä koerakennuksen. Liitoseristävyyksien mallintaminen numeerisesti voi osoittautua jatkossa puurakentamista ja sen kehittämistä merkittävästi edistäväksi tekijäksi.



Kuva 12.10. Puurakenteisten rakennusosien välisten liitosten liitoseristävyyden määrittämiseksi tehty numeerinen mallinnus. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

12.1.5 Puurakenteiden askelääneneristävyys

Puurakentamisen ja varsinkin asuinkerrostalojen kilpailukyvyn kannalta välipohja on keskeinen rakennusosa, sillä siihen kohdistuu runsaasti vaatimuksia. Niitä asettavat ainakin kantavuus, jäykistäminen, taipuma, värähtely, palonkesto ja tiiviys sekä ilma- ja askelääneneristävyys (Keronen 1998). Käytännössä askelääneneristävyys on välipohjan kannalta mitoittavampi tekijä kuin ilmäääneneristävyys: välipohjan täyttäessä askeläänitasolukua $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ koskevat määräykset myös ilmäääneneristävyyttä koskevaa äänitasoerolukua $D_{nT,w}$ koskevat vaatimukset tavallisesti toteutuvat.

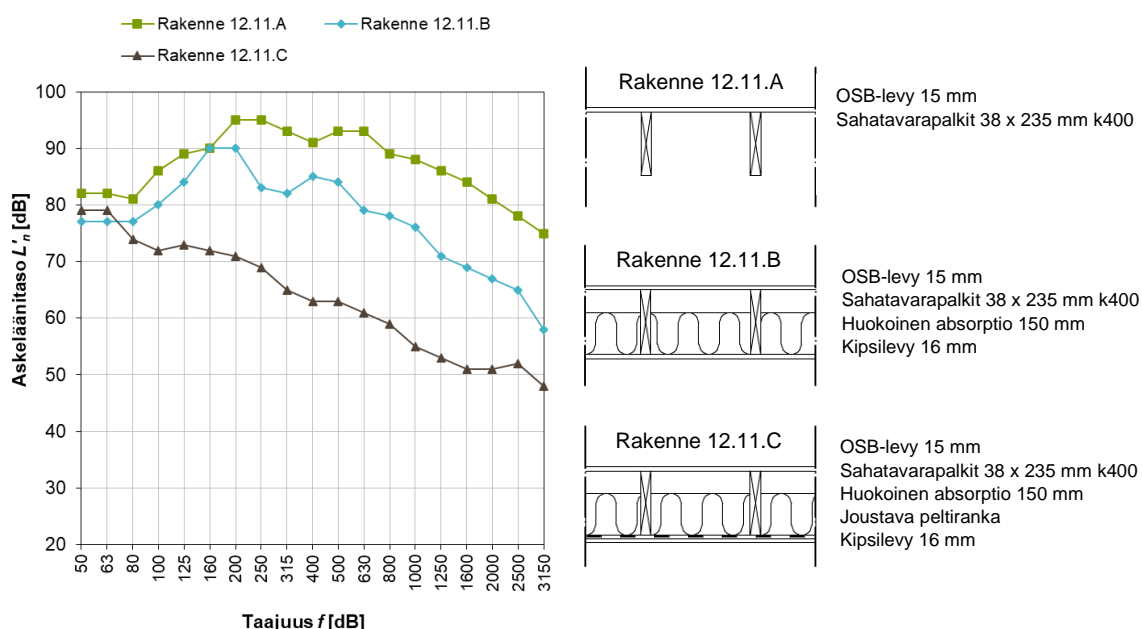
Puuvälipohjat ovat kerroksellisia rakenteita, jotka muodostuvat kantavasta palkistosta, sen päällä olevasta kansilevystä sekä alakatosta. Palkiston välissä on yleensä ääntä absorboivaa huokoista materiaalia. Kansilevyn päällä voi olla rakennuslevykerroksia, betonivalu, muu valettava kerros tai eri tavoin toteutettu kelluva lattia. Alakaton levytyksen massa ja kiinnitystapa palkistoon voivat vaihdella. Laajassa kirjallisuustutkimuksessa (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017) käytiin läpi kaikki puuvälipohjia koskevat parametriset mittaussarjat, joissa oli tutkittu erilaisten muuttujien vaikutuksia askelääneneristävyyteen. Näiden pohjalta tunnistettiin puuvälipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavista tekijöistä merkittävimmät sekä vähäiset tekijät (taulukko 12.1).

Taulukko 12.1. Puuvälipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017).

Merkittävimmät tekijät	Vähäiset tekijät
Alakatto	Kantavien vasojen k-jako
Alakaton kiinnitystapa	Jänneväli
Kantavan rakenteen kansilevyn massa	Vasojen materiaali
Lattianpäällyste	Vasojen tyyppi
Ilmavälin absorptio määrä	Vasojen korkeus, jos levytys kiinnitetty vasoihin
Kelluva lattia	Alakaton massa, jos levytys kiinnitetty vasoihin

Puuvälipohjien askelääneneristävyys perustuu suurelta osin rakennekerrosten kytkennöissä tapahtuviin värähtelyhäviöihin. Joustavat kytkennät ja kerrokset vaimentavat välipohjassa etenevää askelääniherätteestä aiheutuvaa värähtelyä. Laajan kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että alakaton liitos palkistoon on merkittävin yksittäinen puuvälipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttava tekijä (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017).

Alakattolevyt voidaan kiinnittää joko suoraan kantavien välipohjapalkkien alapintaan tai joustavasti. Välipohjan pintaan kohdistuva askelheräte voi edetä välipohjassa joko runko- tai ilmaäänenä. Palkkien kautta kulkevan runkoäänän on arvioitu olevan merkittävin äänenkulkureitti, kun palkkien korkeus on yli 200 mm. Alakatto ja palkkien yläpuolinen rakenne muodostavat massa–ilmajousi–massajärjestelmän, jonka tuottama ilmaääneneristävyys parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä. Alakaton kiinnitys joustavasti jousirangoilla parantaa askelääneneristävyyttä huomattavasti enemmän kuin alakaton suora kytkentä (kuva 12.11).

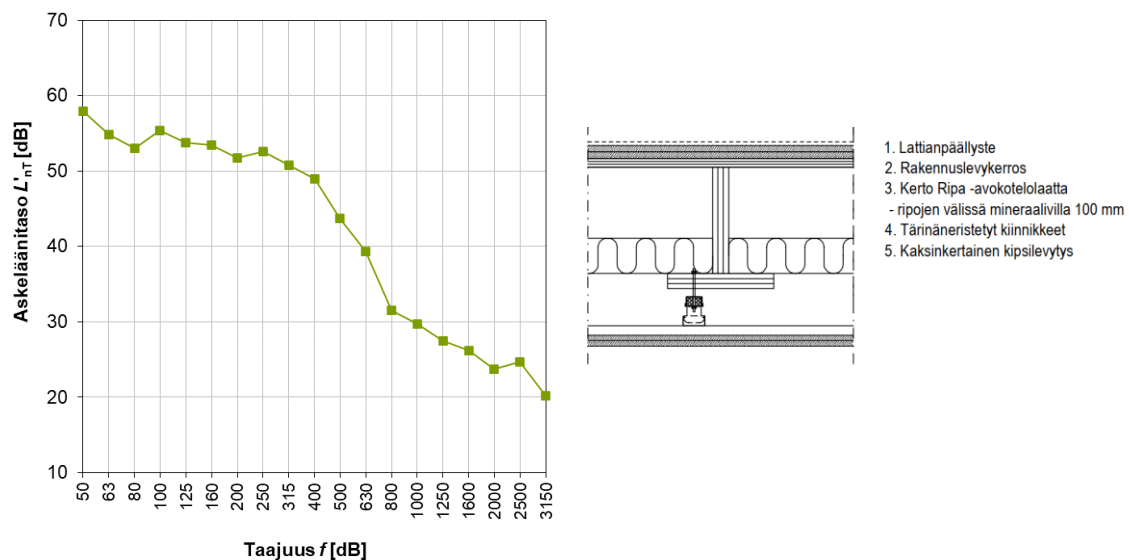


Kuva 12.11. Alakaton ja sen ripustuksen vaikutus puuvälipohjan askeläänitasoihin (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017).

Kelluvan lattian merkitystä puuvälipohjien askelääneneristävyyden toteuttamisessa on pidetty suurena. Tutkimuskirjallisuudessa esitetyt parametriset mittaussarjat kuitenkin osoittavat, että kelluvan lattian vaikutus on ylipäättään pienempi kuin yleisesti on ajateltu ja selvästi pienempi kuin joustavasti ripustetun alakaton (Latvanne 2015). Kelluva lattia parantaa puuvälipohjan askelääneneristävyyttä ominaistajuuttaan suuremmilla taajuuksilla. Mitä suurempi kelluvan kerroksen pintamassa m' [kg/m^2] on ja mitä pienempi eriste-kerroksen dynaaminen jäykkyys s' [MN/m^3] on, sitä pienemmäksi kelluvan lattian ominaistajuus saadaan. Kelluva kerros voidaan tehdä levyrakenteisena, betonirakenteisena tai jostain muusta valettavasta massasta.

Alakaton merkityksen osoittaa se, että puuvälipohja voidaan toteuttaa ilman kelluvaa lattiaa, kun alakaton ripustus valitaan sopivan joustavaksi ja välipohjan kantavan rakenteen kansilevyn massa on riittävä. Alakatto voidaan ripustaa esimerkiksi joustavilla peltirangoilla tai tärinäneristetyillä kannakkeilla, joilla ominaistajuus saadaan säädetyksi hyvin pienelle taajuusalueelle niin, että kävely ei herätä ominaistajuutta. Näillä keinoin puuvälipohjasta voidaan vähentää yksi rakennekerros, jolloin välipohjan kustannustehokkuus paranee. Tällaisella ratkaisulla ei esiinny kelluvalle lattialle tyypillistä, kantavan rakenteen materiaalista riippumatonta ominaistajuutta (ks. luvut 4.1.3 ja 4.2.4) pienillä taajuuksilla (kuva 12.13), joka kasvattaa askeläänitasoja raakavälipohjaan verrattuna (Kylliäinen et al. 2015). Tämä voi parantaa kerrostaloasukkaiden subjektiivista kokemusta askelääneneristävyydestä (Kylliäinen et al. 2017a).

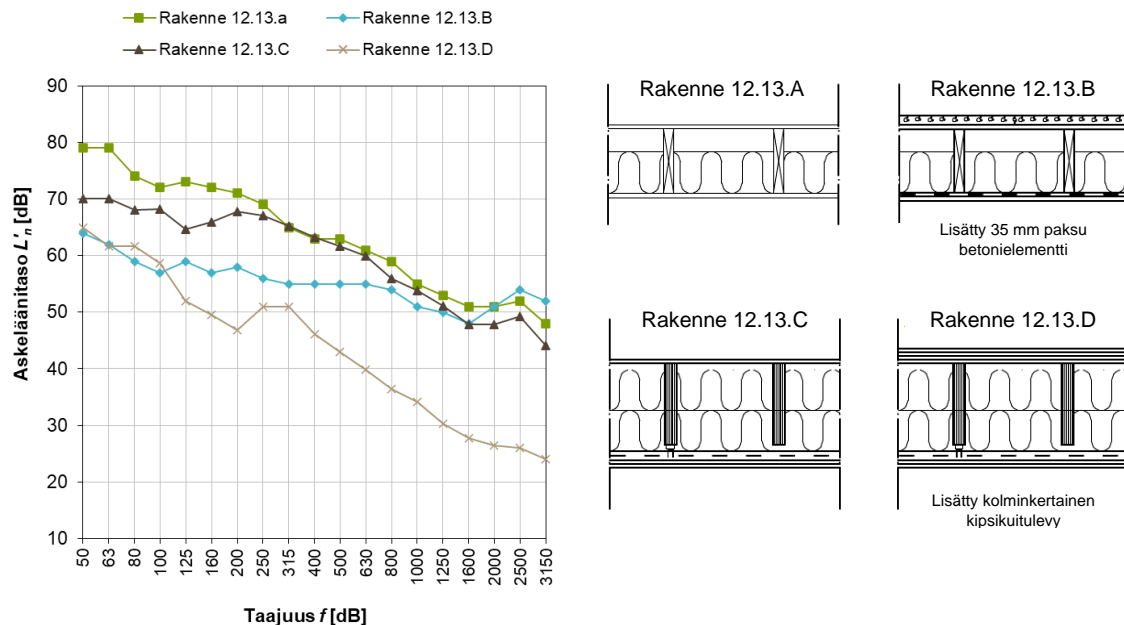
Ilman kelluvaa lattiaa toteutettavissa puuvälipohjissa on käytettävä joustavia lattianpäällysteitä, kuten muovimattoja tai lautaparkettia ja laminaattia joustavine alustoineen. Vaikka tällaisia puuvälipohjia on käytetty varsin runsaasti, niissä on kehittämisen mahdollisuuksia erityisesti ääntä eristävän alakaton ripustusratkaisussa.



Kuva 12.12. Ilman alakattoa toteutetun puuvälipohjan tuottamat askeläänitasot, kun alakatto on ripustettu tärinäneristetyillä kannakkeilla ja välipohjan pinnassa on kipsilevykerros. Askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ on 49 dB (Kylliäinen et al. 2015).

Välipohjan kantavan palkiston päällä olevan kansilevyn massan kasvattaminen parantaa rakenteen askelääneneristävyyttä (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017). Toisaalta puurakenteiden merkittävä etu perinteisiin massiivirakennetekniikoihin nähden on juuri rakenteiden keveys. Välipohjan massaa voidaan kasvattaa erilaisten laatta- ja levyrakenteiden avulla. Valettavien pintarakenteiden haittana on niiden vaatima kosteudenhallinta ja kuivumisaika, jotka hidastavat tuotantoa sekä työmaa- että puuelementti-tehdasolosuhteissa. Mahdollisuutta korkeaan esivalmistusasteeseen pidetään myös puurakenteiden etuna perinteisiin massiivirakenteisiin nähden.

Välipohjapalkkien yläpuolinen rakenne koostuu yleensä yhdestä tai useammasta levy- tai laattakerroksesta. Raakavälipohjan päälle voidaan valaa laatta esimerkiksi betonista tai kipsimassasta. Kansilevyn massaa voidaan lisätä myös rakennuslevykerroksin (Kylliäinen et al. 2015). Kuvassa 12.13 esitetyistä tuloksista nähdään, että kovapintainen betonilisämassa parantaa askelääneneristävyyttä pienten taajuuksien alueella yli 15 dB, mutta yli 2000 Hz taajuusalueella se heikentää askelääneneristävyyttä raakavälipohjaan nähden. Heikentyminen suurilla taajuuksilla johtuu siitä, että betoni- ja kipsilaatoissa suuritaajuinen värähtely herää merkittävästi ja niiden sisäinen häviökerroin on pieni. Tämä ei kuitenkaan ole ongelma, kun välipohjaan lisätään joustava lattianpäällyste, joka vaimentaa tehokkaasti askelääniä suurilla taajuuksilla. Tällaisia ovat esimerkiksi lautaparkeetit ja laminaatit joustavine alustoineen. Rakennuslevyt kuvan 12.13. tapauksessa laskevat askeläänitasoja koko taajuusalueella ja vaikutus on pienillä taajuuksilla pienimmillään noin 5 dB ja suurilla taajuuksilla enimmillään noin 25 dB. (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017)



Kuva 12.13. Puuvälipohjan kansilevyn päälle tehdyn lisämassakerroksen vaikutus askeläänitasoihin, kun välipohjalla ei ole lattianpäällystettä (Latvanne 2015, Latvanne & Kylliäinen 2017).

Palkkirakenteisilla välipohjilla ohutkin absorptiomateriaalikerros välipohjan sisällä palkkiväleissä parantaa askelääneneristävyyttä huomattavasti. Absorptiomateriaali absorboi välipohjan sisällä etenevää ilmaääntä ja vaimentaa välipohjan ilmatilaan syntyvää äänikenttää. Absorptiomateriaalin parannusvaikutus havaitaan myös välipohjilla, joiden kantavana rakenteena on paksu CLT-levy ja joissa on levyrakenteinen joustavasti ripustettu alakatto. Suhteellisesti suurin parannus saavutetaan, kun täysin tyhjiin ilmatilaan lisätään ohut absorptiomateriaalikerros. Tavallisesti absorptiomateriaalin tulisi täyttää välipohjan ilmatilasta pystysuunnassa noin 30–50 %. Tällöin parannusvaikutus askeläänitasoihin on luokkaa 2–5 dB pienillä taajuuksilla ja 1000–2000 Hz taajuusalueella 10–15 dB. (Latvanne & Kylliäinen 2019)

Lattianpäällysteen tehtävänä on vaimentaa rakenteeseen kohdistuvaa iskuä. Ilman joustavaa lattianpäällystettyä välipohja, kantavan rakenteen materiaalista riippumatta, saadaan asuntojen askelääneneristysmääräykset täyttäväksi vain käyttämällä kelluvaa lattiaa. Joustavat lattianpäällysteet vaikuttavat merkittävästi puuvälipohjilla saavutettavaan askelääneneristävyyteen, kun kelluvaa lattiaa ei käytetä. Suurilla taajuuksilla askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL on lattianpäällysteestä riippuen parhaimmillaan 20–30 dB (Latvanne & Kylliäinen 2019; Lietzén et al. 2021). Tutkimuskirjallisuuden perusteella tiedetään, että lattianpäällysteet toimivat puuvälipohjilla eri tavoin kuin betonivälipohjille asennettuina. Lattianpäällysteiden valmistajat eivät juuri ole mittauttaneet askelääneneristävyyden alenemia tai puuvälipohjilla. Tämä on puuvälipohjien suunnittelun kannalta ongelma, koska tärkeä lähtötieto puuttuu. (Lietzén et al. 2021)

Betonivälipohjilla joustavien lattianpäällysteiden askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL kasvaa noin 200–300 Hz taajuusalueella käytännössä koko mitattavan taajuusalueen ylärajalle saakka ja voi olla suurimmillaan yli 50 dB. Puuvälipohjilla näin ei käy, vaan muovimattojen parannusvaikutus kasvaa noin 1000 Hz asti, minkä jälkeen kasvu lakkaa. Lautaparketeilla parannusvaikutuksen kasvu voi päättyä tai hidastua jo noin 500 Hz taajuudesta alkaen. Lisäksi joustavat lattianpäällysteet käyttäytyvät erilaisilla alustoilla eri tavoin. (Lietzén et al. 2021) Lattianpäällysteiden toiminta on aiemmin kuvattujen ilmiöiden lisäksi yksi seikka, joka tekee puuvälipohjien käyttäytymisen ja edelleen laskennallisen tarkastelun huomattavasti monimutkaisemmaksi kuin betonirakenteiden askelääneneristävyyden laskennan.

Puuvälipohjien askelääneneristävyyttä kehitettäessä tulisi huomiota kiinnittää taulukossa 12.1 esitettyihin merkittävimpiin tekijöihin, sillä niiden vaikutus askelääneneristävyyteen on parhaimmillaan useita kymmeniä desibelejä. Sitä vastoin taulukossa mainittujen vähäisten tekijöiden parannusvaikutus on muutamia desibelejä (Latvanne 2015). Niillä voidaan joissakin tilanteissa saada jonkin verran hyötyä askelääneneristävyyttä suunniteltaessa, mutta käytännössä puuvälipohjan askelääneneristävyyden ratkaisevat taulukossa esitetyt merkittävimmät tekijät.

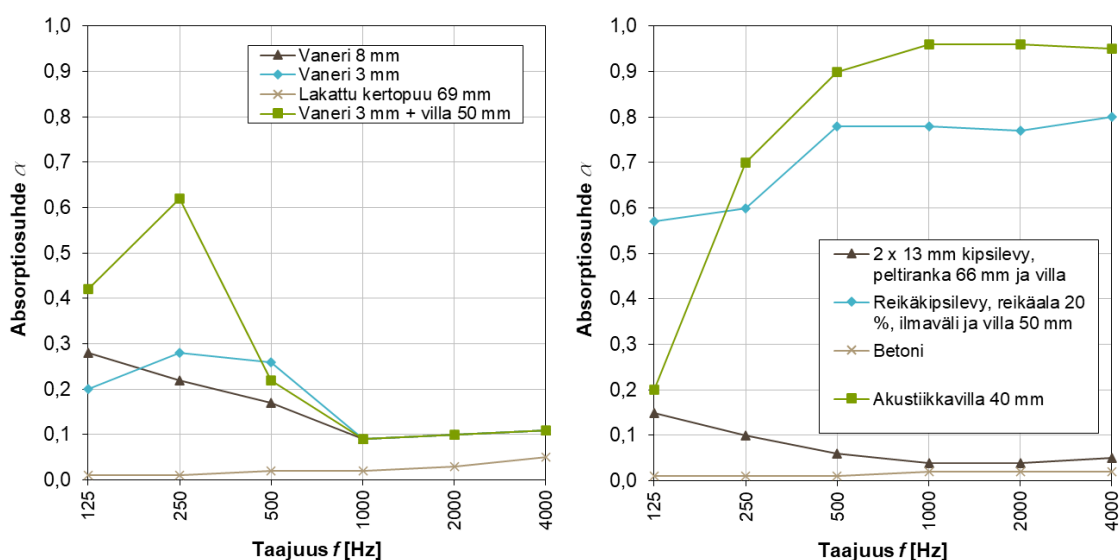
Standardissa ISO 12354-2 (2017) on esitetty välipohjien ja tilojen välisen askelääneneristävyyden laskentaan menetelmä, mutta se soveltuu heikosti puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin. Puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin on kehitetty parametrinen laskentamenetelmä, jolla pystytään varsin tarkasti ja tehokkaasti

arvioimaan askeläänitasoja ja askeläänitasolukuja (Latvanne & Kylliäinen 2019, Latvanne et al. 2019). Jos kaikkia parametrinen mallinnuksen edellyttämiä lähtötietoja ei ole saatavilla, voidaan käyttää numeerista mallintamista elementtimenetelmällä. Puuvälipohjan askelääneneristävyyden FEM-mallinnuksessa on simuloitava koko askelääninen syntymekanismi alkaen askeläänikojeen aiheuttamasta herätteestä (Lietzén et al. 2019, Lietzén et al. 2021b, Lietzén et al. 2022). Mallintamisen ja puuvälipohjan akustisen toiminnan monimutkaisuudesta huolimatta elementtimenetelmällä saatavat tulokset ovat tarkkoja ja menetelmää voidaan soveltaa ongelmiin, joissa reunaehdot tai rakenteen geometria tekevät parametrinen tai analyttisen mallintamisen mahdottomaksi (Kylliäinen et al. 2021).

12.2 Puurakennusten huoneakustiikka

12.2.1 Puu absorptiomateriaalina

Jälkikaiunta-aika ja moni muukin huoneakustinen mittaluku perustuu tilan absorptioalaan A [m²], joka muodostuu tilan kaikkien näkyvien pintojen absorptiosuhteista α ja pintaaloista S [m²]. Kuvassa 12.14 on esitetty puupintojen absorptiosuhteita ja vertailun vuoksi muiden materiaalien absorptiosuhteita (Kylliäinen 2006). Kuvasta nähdään, että puu on materiaalina lähes koko taajuusalueella heijastava pinta samaan tapaan kuin esimerkiksi betoniseinä. Pienillä taajuuksilla se voi toimia jossain määrin absorboivana pintana.



Kuva 12.14. Puupintojen (vas.) ja muiden materiaalien (oik.) absorptiosuhteita.

12.2.2 Puurakennusten huoneakustiikan suunnittelu

Puun ja puurakenteiden pienistä absorptiosuhteista seuraa se, että tilan, esimerkiksi opeustilan, auditorion tai muun puhetilän käyttötarkoituksen mukaisen jälkikaiunta-ajan edellyttämän absorptioalan aikaansaaminen olisi puupinnoilla mahdotonta: materiaalin pinta-ala tulisi niin suureksi, että sitä ei saataisi mahtumaan tilaan. Siksi puurakennusten huoneakustinen suunnittelu ei konserttisaleja tai musiikkisaleja lukuun ottamatta poikkea muista materiaaleista toteutettujen rakennusten suunnittelusta. Puun absorptio-ominaisuuksista seuraa se, että käytettäessä puuta huoneakustisena materiaalina kysymys on lähes aina puun ja jonkun tehokkaasti ääntä absorboivan materiaalin yhdistelmästä (kuva 12.15).



Kuva 12.15. Toimistorakennuksen vastaanottoaulaan on saatu aikaan rauhalliset ja miellyttävät ääniolosuhteet yhdistämällä voimakkaasti muotoiltu puu tehokkaaseen absorptiomateriaaliin, joka on sijoitettu pystysuuntaisten puulevyjen väliin. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Puurakennuksissa laajat puupinnat toimivat tärkeänä osana sisustusta (kuva 12.5). Puupohjaisia materiaaleja pyritään suosimaan myös muissa sisäverhouspinnoissa, kuten alakatoissa ja seinäverhouksissa. Käytännön ratkaisuja ovat erilaiset puukuitulevyt sekä rei'itetyt puulevyt ja -rimoitukset, joiden taustalle asennetaan ääntä absorboivaa materiaalia. Puupintojen käyttöä rajoittavat jossain määrin julkisten tilojen pintamateriaalien pintaluokkavaatimukset. (Latvanne & Mikkilä 2021)



Kuva 12.16. Kouluihin rakennetaan usein tilavuudeltaan suuria aulatiloja, joita käytetään lisäksi puhetiloina auditorioiden tapaan. Tällaisissa tiloissa lähes kaikki seinä- ja kattopinnat on verhotava hyvin absorboivilla materiaaleilla, kuten on tehty Mansikkalan koulukeskuksessa Imatralla (vas.) ja Suomalais-venäläisessä koulussa Helsingissä (oik.). Kumpikin koulu on puurakenteinen. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Puupintojen absorptio pienillä taajuuksilla on otettava huomioon konserttisalien ja muiden akustisesti esitettävän musiikin esitystiloiissa. Niissä käytännössä ainoa absorboiva pinta on tavallisesti yleisö. Jos tällaisen tilan pinnat ovat puurakenteisia ja ne muodostuvat ohuista puulevyistä, joiden takana on ilmatila, ne toimivat levyresonaattoreina. Bassotaajuuksille voi tällöin syntyä merkittävä absorptioala, mikä lyhentää jälkikaiunta-aikaa. Tämä ei kuitenkaan ole tavoiteltavaa. Siksi musiikkitiloissa puupintojen tulee olla riittävän paksuja, jolloin ne eivät toimilevyresonaattoreina tai taastaansa tiiviisti ja ilman ilmvälejä kiinnitettyjä, jos rakennus on betonirunkoinen. Puurakenteita voidaan toisaalta joissakin tiloissa hyödyntää nimenomaan bassotaajuuksia absorboivina pintoina.

Luvun 12 lähteet

- HOAS Tuuliniitty – Maailman korkein puumoduulikerrostalo valmistui Espooseen. 2021 Puu. Nro 2, s. 12–17.
- ISO 12354-1. 2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
- ISO 12354-2. 2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms.
- Keronen, A. (toim.). 1998. Puukerrostalot: rakenteet. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, talonrakennustekniikan laboratorio, julkaisu 85.
- Keronen, A. & Kylliäinen, M. 1995. Joustavat liitokset eristävät äänen puukerrostaloissa. Rakennustekniikka. Nro 5, s. 21–24.
- 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.
- Kovalainen, V. & Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2019. Kelluvien laattojen askelääneneristävyyden analyttinen laskenta. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 33–40.
- Kylliäinen, M. 1996. Miksi puukaupungit paloivat? Rakennusvalvonta. Nro 2, s. 18–22.
- Kylliäinen, M. 1998. Paloturvallisuus. Keronen, A. (toim.). Puukerrostalot: rakenteet. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, talonrakennustekniikan laboratorio, julkaisu 85, s. 75–91.
- Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetekniikan laitos, tutkimusraportti 137.
- Kylliäinen, M., Björman, J. & Hakkarainen, J. 2015. Akustisesti toimivan kustannustehokkaan puuvälipohjan kehittäminen. Rakennusfysiikka 2015. Tampere, 20.–22.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 573–578.
- Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D. & Rekola, J. 2017a. Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 103(2), s. 236–251.

- Kylliäinen, M., Latvanne, P., Kuusinen, A. & Kekki, T. 2017b. Puukerrostalojen ääneneristys – asiantuntijaselvitys. Joensuu, Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja C44
- Kylliäinen, M., Lietzén, J. & Kovalainen, V. 2021. Puurakenteiden ääneneristävyyden nykyaikaiset laskentamenetelmät. Rakennusfysiikka 2021. Tampere, 26.–28.10., Tampereen yliopisto ja Kiinko Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy, s. 471–476.
- Lahtela, T. 2004. Ääneneristys puutalossa – Puurakenteisen asuinrakennuksen ääneneristävyyden suunnitteluohje. Helsinki, Wood Focus Oy.
- Lahtela, T., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V. & Talus, L. 2021. Ääneneristys puukerrostalossa. Helsinki, Puuinfo Oy.
- Latvanne, P. 2015. Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- Latvanne, P. & Kylliäinen, M. 2017. Puuvälipohjien askelääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 117–122.
- Latvanne, P. & Kylliäinen, M. 2019. Puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskennallinen arviointi. Puu. Nro 3, s. 42–50.
- Latvanne, P., Kylliäinen, M., Kovalainen, V. & Lietzén, J. 2019. Parametrinen laskentamalli puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 55–61.
- Latvanne, P. Mikkilä, A. 2021. Puurakenteisten oppilaitosten akustiikkasuunnittelun erityispiirteitä. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 182–187.
- Lietzén, J. & Kovalainen, V. 2021. Rakenteiden ilmaääneneristävyyden arviointi elementtimenetelmällä. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 102–107.
- Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mitataustulosten perusteella. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 1/2014.
- Lietzén, J., Kylliäinen, M., Miettinen, J. & Pajunen, S. 2019. Askeläänikojeen aiheuttama herätevoima puuvälipohjilla. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 20–25.
- Lietzén, J., Kylliäinen, M. & Pajunen, S. 2021a. Lattianpäällysteiden toiminta puuvälipohjilla. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 66–71.
- Lietzén, J., Kylliäinen, M., Valjakka, S. & Pajunen, S. 2022a. Vibration level reduction by floor coverings installed on wooden slabs. *Building Acoustics*. Vol. 29(2), s. 221–237.
- Lietzén, J., Miettinen, J., Kylliäinen, M. & Pajunen, S. 2021b. Impact force excitation generated by an ISO tapping machine on wooden floors. *Applied Acoustics*. Vol. 175, article 107821.
- Lietzén, J., Sormunen, J., Pajunen, S. & Kylliäinen, M. 2022b. Simulation of impact force generated by an ISO tapping machine on a wooden slab using explicit dynamics analysis. *Engineering Structures*. Vol. 270, article 114855.
- Pura, M. 2021. Äänen rakenteelliset sivutiesiirtymät puurakennuksissa. Diplomityö. Oulu, Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta, rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.
- Pura, M., Kylliäinen, M. & Kovalainen, V. 2021. Rakenteellisten sivutiesiirtymien laskennallinen tarkastelu puurakennuksissa. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 84–89.

- SFS 5907. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Suomen korkein puukerrostalo Lighthouse Joensuu. 2019. Puu. Nro 3, s. 12–17.
- Sääksvuori, O. & Kylliäinen, M. 2002. AWS-väliseiniä ääneneristyksen suunnittelu. Teräsra-
kenne. Nro 4, s. 44–45.

13

Korjausrakentaminen

”Sangen useat nykyaikaiset asuintalot on rakennettu huomioonottamatta tarpeeksi ääneneristyskysymyksiä, ja seurauksena on ollut rauhattomien kotien aikaansaanti. Rakennusakustiikan tehtävänä on aikaansaada tässä suhteessa parannusta.”

Yli-insinööri Paavo Arni 1949

13.1 Korjausrakentaminen akustiikan kannalta

13.1.1 Korjaushankkeiden luonne

Korjausrakentamisen osuus kaikesta rakentamisesta on viime vuosikymmeninä ollut jatkuvassa kasvussa. Korjausrakentaminen kattaa hyvin laajan kirjon kooltaan ja luonteeltaan erilaisia rakennushankkeita. Niihin voi sisältyä erilaisia rakenteiden pitkäaikaiskestävyyteen liittyvien vaurioiden korjaamista, suunnittelu- tai rakennusvirheiden korjaamista, tilamuutoksia tai epätarkoituksenmukaisten tilojen parantamista. Tällaisissa hankkeissa akustiikkasuunnittelu voi käsittää yksittäisten detaljien suunnittelua, kuten rakenteiden liitoksia tai läpivientejä. Tilamuutokset rakennuksessa edellyttävät ääneneristysten, huoneakustiikan, meluntorjunnan ja tärinätorjunnan suunnittelua. (Rauhala et al. 2015)

Laajimmillaan korjausrakentaminen tarkoittaa olemassa olevien rakennusten perusparannusta tai käyttötarkoituksen muutosta, jolloin uusi käyttötarkoitus voi olla aiempaa akustisesti merkittävästi vaativampi. Oman erityisen osa-alueensa muodostavat arvoraakennusten perusparannukset, joissa on otettava huomioon rakennuksen rakennushistorialliset ja rakennustaiteelliset arvot sekä suojelutavoitteet. Varsin tyypillinen korjausrakentamishanke on rakennuksen käyttötarkoituksen muuttaminen toimisto-, liike- tai teollisuusrakennuksesta asuinrakennukseksi (kuva 13.1), joskus myös oppilaitokseksi tai sairaalaksi. (Rauhala et al. 2015)

Korjausrakentamiskohteisiin liittyy usein myös olemassa olevan rakentamisen laajentamista. Jos laajennus tehdään esimerkiksi rakennuksen lisäsiipenä, hanke vastaa kutakuinkin uudisrakentamishanketta lukuun ottamatta liittymistä vanhaan rakennukseen. Sitä vastoin laajennus korottamalla vanhaa rakennusta on akustisesti huomattavasti vaativampi ratkaisu, sillä tällöin on otettava huomioon esimerkiksi se, että vanha yläpohjarakenne ei ole alkujaan tarkoitettu ääntä eristäväksi rakenteeksi. Lisäksi korotuksen talotekniikka ei saa heikentää alempien kerrosten ääniympäristöä.

Etenkin julkisten rakennusten perusparannushankkeisiin liittyy energiatehokkuuden parantamistavoitteita ja usein myös sisäilmaan liittyviä korjaustarpeita, jotka usein johtavat rakennuksen LVIS-järjestelmien uusimiseen. (Rauhala et al. 2015, Huhtala et al. 2019, Kylliäinen et al. 2019). Uuden ilmanvaihtojärjestelmän ilmamäärät ovat vanhoja järjestelmiä suurempia, mikä johtaa suurempiin ilmanvaihtokanavien kokoihin ja uusiin kanavareitteihin. Nämä ovat ääneneristystä heikentäviä tekijöitä, jotka tulee ottaa suunnittelussa ja toteutuksessa huomioon (ks. luvut 3.5 ja 3.6.5). Sisäilmaan liittyvien seikkojen vuoksi vanhoja huoneakustisia materiaaleja ei yleensä voida säilyttää, vaan ne vaihdetaan uusiin.



Kuva 13.1. Vuonna 1973 valmistunut toimistorakennus, jonka käyttötarkoitus muuttui asunnoiksi. Rakennusta myös korotettiin kahdella uudella asuinkerroksella. Oikealla on hankkeen yhteydessä uudisrakennuksena toteutettu rivitalo. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylläinen.

Suunniteltaessa tilamuutosten, perusparannusten ja käyttötarkoitusten muutosten yhteydessä akustisia ratkaisuja huomioon on otettava myös rakennusfysikaaliset näkökohdat. Rakennuksen ulkovaipan vanhojen rakennusosien lämmöneristyskyky voi olla vaatimaton, jolloin sen verhoaminen uudella absorptiomateriaalilla, jolla usein on myös pieni tai pienehkö lämmönjohtavuus, voi merkittävästi muuttaa ulkovaipan rakennusfysikaalista toimintaa. Tällaiset muutostyöt edellyttävät rakennusfysikaalisen toimivuuden varmistamista esimerkiksi tuuletusratkaisuilla (Takala et al. 2019).

13.1.2 Korjaus- ja muutostöitä koskevat määräykset ja ohjeet

Ympäristöministeriön ääniympäristöasetusta 796/2017 sovelletaan rakennuksen korjaus- ja muutostyöhön. Asetuksen mukaan rakennuksen ääneneristystä, melun- ja tärinätorjuntaa, ääniolosuhteita sekä virkistykseen käytettävien rakennuksen piha- ja oleskelualueiden sekä oleskeluun käytettävien parvekkeiden meluntorjuntaa ja ääniolosuhteita ei saa rakennuksen korjaus- tai muutostyössä heikentää.

Ääniympäristöohjeen (YMo 2018) mukaan rakennuksen ääniympäristöä koskevat vaatimukset määräytyvät korjaus- ja muutostöissä rakennuksen valmistusaikana voimassa olleiden säädösten mukaisesti. On kuitenkin huomattava, että rakennuksen

ääniympäristö voi olla rakennusajankohtansa määräystasoa parempi. Korjaus- ja muutostyössä otetaan huomioon asumisterveysasetuksessa (STMa 545/2015) asetetut vaatimukset. Jos rakennuksen korjausrakentaminen tai muutostyö edellyttää merkittäviä muutoksia rakenteisiin korjaus- tai muutostyön vuoksi, vaatimustenmukaisuuden toteutuminen arvioidaan tapauskohtaisesti rakennuslupamenettelyn yhteydessä (YMo 2018).

Ääniympäristön kannalta merkittävänä korjaus- tai muutostyönä voidaan ääniympäristöohjeen mukaan pitää esimerkiksi julkisivu- tai ikkunakorjausta, kylpyhuoneen tai keittiön siirtämistä toisen asunnon makuuhuoneen päälle, lattiapäällysteen vaihtamista, uuden saunan, uuden hissien, uuden ilmanvaihto- tai viemärijärjestelmän rakentamista. Yksittäisen rakennusosan tai järjestelmän korjaus tai muutos ei kuitenkaan tarkoita sitä, että rakennuksen ominaisuuksia tulisi muilta osin parantaa. Esimerkiksi julkisivun korjaaminen ei tarkoita sitä, että asuinhuoneistojen välistä ääneneristävyyttä pitäisi parantaa korjauksen yhteydessä. (YMo 2018) Asuinrakennusten ikkuna- ja julkisivuremonttien yhteydessä on otettava huomioon, että rakennuksen ulkovaipan ääneneristykselle voi olla asemakaavassa annettu äänitasoerovaatimus $\Delta L_{a,vaad}$. Remontin yhteydessä on varmistettava siitä, että asemakaavassa esitetty määräys toteutuu myös remontin jälkeen. Esimerkiksi rakennuksen ilmanvaihdon parantaminen lisäämällä julkisivuun tai ikkunoihin korvausilmaventtiilit voi johtaa ulkovaipan ääneneristävyyden heikkenemiseen. (Kylliäinen & Lietzén 2014)

Rakennuksen valmistusajankohtana voimassa olleissa säädöksissä esitettyjen mittalukujen tulkinta edellyttää varsin kattavia tietoja akustiikasta ja säädösten kehittymisestä. Tieteen ja tekniikan historian tutkimuksessa ongelmana on usein se, että ilmiöt on aikanaan kuvattu sanallisesti toisin kuin nykyisin tai matemaattisessa muodossa olevat kaavat tai teorit on formuloitu eri tavoin tai esitetty toisenlaisella notaatiolla kuin nykyisin on käytäntönä. Mahdollista on myös se, että sama matemaattinen merkintä voi tarkoittaa eri tavoin määriteltyä suuretta. (Kragh 2003) Nämä seikat koskevat eri vuosikymmeninä annettujen ääniympäristöä koskevien säädösten tulkintaa. Esimerkiksi vuoden 1998 rakentamismääräyksissä määriteltyjen ilmaääneneristyslukujen R'_w ja askeläänitasolukujen $L'_{n,w}$ laskenta mittaustuloksista poikkesi edellisissä, vuoden 1985 määräyksissä määriteltyistä luvuista, vaikka suureiden merkintä oli täysin sama. (Lietzén & Kylliäinen 2013) Taulukossa 13.1 on esimerkki askelääneneristystä koskevien mittalukujen tulkinnasta ja eroista vuosina 1975 ja 1985. Esimerkistä nähdään, että pelkästään mittalukujen arvoista ei voida päätellä sitä, mikä vaatimustaso eri aikoina on ollut. Vanhojen määräysten mittalukujen tulkinnan helpottamiseksi ympäristöministeriö on julkaissut oppaan (Lietzén & Kylliäinen 2014)

Rakennuksen iän ja sen rakennusajankohtana voimassa olleiden määräysten perusteella ei asuinrakennuksia lukuun ottamatta ole mahdollista päätellä kovinkaan tarkasti, millainen ääniympäristö rakennuksessa on. Rakennus voi olla määräystasoa parempi tai olla nykyäskäyttöön nähden ääniympäristöltään varsin hyvä joko kaikkien tilojen ja ominaisuuksien osalta tai vain osittain. Tämä koskee myös rakennuksia, jotka on rakennettu ennen kuin Suomessa on ollut mitään teknisinä mittalukuina annettuja säädöksiä rakennusten ääniympäristöstä. Esimerkiksi 1900-luvun alkupuolen koulurakennuksissa paksut

kantavat muuratut väliseinät sekä välipohjina käytetyt betoniset alalattapalkistot ovat tuottaneet luokkahuoneiden välille varsin hyvän ääneneristävyyden (Romula 2022). Akustista suunnittelua on toisaalta myös tehty ennen kuin teknisinä mittalukuina annettuja säädöksiä oli olemassa (esim. Kylliäinen & Valovirta 2011). Lisäksi sata vuotta vanhat koulurakennukset on ehditty peruskorjata vähintään kerran, ehkä useammankin kerran, jolloin niiden ääniympäristöä on todennäköisesti parannettu alkuperäisestä. (Romula 2022)

Käytännössä olemassa olevan rakennuksen ääniympäristön selvittämiseksi luotettavin menetelmä on akustisten mittausten tekeminen riittävän kattavasti rakennuksessa (Romula 2022). Myös ääniympäristöohje (YMo 2018) esittää mittauksia rakennuksen ääneneristävyyden tai muiden ominaisuuksien tason selvittämiseksi suunnittelun ja toteutuksen lähtötiedoksi.

Taulukko 13.1. Vuoden 1975 rakentamismääräyskokoelmassa asetettiin askelääneneristävyydelle kerrostalohuoneistojen välille vaatimus askeläänentasoindeksiä l_i , jonka arvon tuli olla enintään 63 dB. Vuoden 1985 rakentamismääräyskokoelmassa askeläänentasoindeksi korvasi askeläänitasoluku $L'_{n,w}$, jonka arvo sai olla enintään 58 dB. Näyttäisi siis siltä, että vaatimustaso kasvoi 5 dB vuonna 1985 kiristynyt 5 dB (Lietzén & Kylliäinen 2013). Muuntamalla mittaluvut nykyisin käytettäviksi ($L'_{n,T,w}$) ja olettamalla vastaanottohuoneen tilavuudeksi 30 m³ nähdään, että vaatimustaso pysyi tosiasiallisesti samana ja 5 dB ero mittalukujen arvoissa johtui mittalukujen määrittelystä.

Vuosi	Mittaluku	Arvo	Arvo nykymittaluvulla lausuttuna
1975	Askeläänentasoindeksi l_i	63 dB	58 dB
1985	Askeläänitasoluku $L'_{n,w}$	58 dB	58 dB

13.1.3 Käyttötarkoituksen muutoksia koskevat määräykset ja ohjeet

Ympäristöministeriön ääniympäristöasetusta 796/2017 sovelletaan myös rakennuksen käyttötarkoituksen muuttamiseen. Asetuksen mukaan rakennuksen käyttötarkoitusta muutettaessa rakennuksen ääneneristys, melun- ja värinäntorjunta ja ääniolosuhteet sekä virkistykseen käytettävien rakennuksen piha- ja oleskelualueiden sekä oleskeluun käytettävien parvekkeiden meluntorjunta ja ääniolosuhteet on suunniteltava ja toteutettava siten, että ääniympäristöstä ei aiheudu asukkaille haittaa. Ääniympäristöopas (YMo 2018) toteaa, että haittaa ei aiheudu, jos käyttötarkoituksen muutoksen suunnittelussa noudatetaan ääniympäristöasetuksessa annettuja vaatimuksia ja oppaassa annettuja ohjearvoja. Ääniympäristöasetus tai ääniympäristöohje eivät määrittele, mitä asukkaille aiheutuva haitta voisi tarkoittaa. Haittaa syntyy varmasti silloin, jos ääniympäristö vaikuttaa terveyteen, mutta myös ääniympäristön vaikutus viihtyisyyteen voitaisiin ehkä jo tulkita haitaksi.

Rakentamismääräysten uudistaminen oli aloitettu hallituskaudella 2011–2015, mutta asetuksia annettaessa seuraavan hallituksen (2015–2019) hallitusohjelmassa todettiin seuraavaa (Ratkaisujen Suomi 2015): ”Edistetään rakennusten käyttötarkoituksen muuttamista toimisto- ja liiketiloista asunnoiksi. Rakennuksen korjaaminen, käyttötarkoi-

tuksen muuttaminen tai perusparantaminen ei laukaise uudisrakentamistasoisia velvoitteita esimerkiksi esteettömyys- ja äänieristysvaatimusten osalta.” Tästä hallitusohjelmassa olleesta kirjauksesta seurasi se, että ääniympäristöasetukseen 796/2017 ei ollut mahdollista kirjata käyttötarkoituksenmuutoshankkeita ajatellen suoraan samoja akustisia vaatimuksia kuin asunnoille uudistuotannossa. Ääniympäristöopas kuitenkin käytännössä ohjaa noudattamaan uudistuotannon tasoa rakennuksen käyttötarkoitusta muutettaessa. (YMo 2018, Rauhala et al. 2021)

Käyttötarkoituksen muutokset tulisi suunnitella niin, että akustiset tavoitteet vastaavat uudisrakentamisen tasoa. Tämä on perusteltua myös siksi, että käyttötarkoitukseltaan muutettavat rakennukset ovat usein alkujaan olleet sellaisia, että niissä ollut toiminta ei ole asettanut tilojen tai kerrosten väliselle ääneneristävyydelle, rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyydelle tai muille akustisille ominaisuuksille erityisiä tai mitään vaatimuksia (Rauhala et al. 2021). Käyttötarkoitusta muutettaessa on siten joka tapauksessa tehtävä merkittäviä muutoksia rakenteisiin. Toisaalta asuinkerrostalojen asukkaiden tyytyväisyys ääneneristävyyteen on erilaisten kyselytutkimusten mukaan edellyttänyt vähitellen yhä parempaa ääneneristävyyttä asuinhuoneistojen välille (Lietzén & Kylliäinen 2014). Voidaan arvioida, että hankkeessa sovellettavien tavoitearvojen asettaminen uudistuotantoa alhaisemmalle tasolle johtaisi todennäköisesti siihen, että asuinkerrostaloissa merkittävä osa asukkaista olisi asuntojensa akustiseen laatuun tyytymättömiä (Rauhala et al. 2021).

Vanhan rakennuksen uusi käyttö asuinrakennuksena muuttaa rakennuksen käyttötarkoitusta akustisesti oleellisesti vaativammaksi. Vanhojen rakenteiden ominaisuudet asettavat täydentävien rakennekerrosten suunnittelulle lähtökohtia, esimerkiksi vanhojen rakenteiden kantavuus voi muodostua merkittäväksi reunaehdoksi täydentävien kerrosten suunnittelulle. Usein vanhojen rakennusosien ominaisuuksista ei ole tarjolla tietoa, jolloin lähtötilannetta voidaan selvittää ääneneristysmittauksin. Rakenteiden parantamista hankkeelle asetettavat tavoitteet täyttäväksi voidaan tutkia nykyaikaisin mallinnusmenetelmin. Tämä on yksi seikka, joka perustelee käyttötarkoitusten muutosten vaativuusluokan asettamista poikkeuksellisen vaativaksi (PV) ainakin asuinrakentamiskohteissa. (Rauhala et al. 2021)

Rakennuksen käyttötarkoituksen muuttuessa jostain muusta käytöstä kulttuuri- tai musiikkitalaksi (kuva 13.2), akustiset tavoitteet määritellään aina tapauskohtaisesti erikseen käyttötarkoitukseen ja käyttäjän tarpeisiin perustuen (Takala et al. 2021b). Tavoitteet on määriteltävä tapauskohtaisesti myös, kun tehdään laajennushankkeita olemassa olevan rakennusmassan päälle tai sisään (Rauhala et al. 2017). Samoin kulttuuri- ja musiikkitalojen perusparannushankkeissa näin on meneteltävä, koska olemassa oleva tilanne ei useinkaan ole ääniympäristöltään käyttäjän tarpeita vastaava ja perusparannusten yhteydessä toteutetaan tavallisesti myös tilamuutoksia. (Kylliäinen et al. 2019, Mikkilä et al. 2019, Niemi et al. 2019)



Kuva 13.2. Laivaston soittokunnan uudet harjoitustilat toteutettiin vanhaan varastorakennukseen. Kuvassa nähdään koko soittokunnan harjoitussali, jonka seinä- ja kattopinnoille on tehty huoneakustiikkaa soittokunnan tarpeita varten parantavia pintoja ja rakennekerroksia. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Simo Laitakari.

13.2 Korjausrakentamisen erityispiirteitä

13.2.1 Vanha rakennus suunnittelun lähtökohtana

Korjausrakentamisessa lähtökohtana on olemassa oleva rakennus, jonka rakenteiden ja pintamateriaalien ominaisuudet sekä tilojen geometria asettavat suunnittelulle reunaehdot. Suojellussa rakennuksessa suunnittelun vaikeusastetta lisää edelleen se, että uudet rakenteet, verhoukset ja tekniset järjestelmät eivät saisi muuttaa rakennuksen ja tilan luonnetta. (Rauhala et al. 2015)

Mitä vanhempi rakennus on kysymyksessä, sitä todennäköisemmin sitä on rakennushistoriansa aikana korotettu tai laajennettu, usein vieläpä monessa vaiheessa. Tällaisen rakennuksen käyttötarkoituksen muuttuessa asunnoiksi voidaan joutua tilanteeseen, jossa tulevan asuinhuoneiston sisällä on eri koroissa olevia vanhoja kantavia rakenteita. Tämä johtaa edelleen siihen, että joissakin osissa rakennusta uusille rakennekerroksille on runsaasti tilaa, mutta toisaalla ne on tehtävä hyvin pienen rakennekerroskorkeuden sisällä. Myös vanhojen rakenteiden kantavuus voi asettaa uusille rakennekerroksille rajoituksia. Näistä syistä korjausrakentamisen akustiikkasuunnittelussa onkin usein ideoitava innovatiivisia ratkaisuja. (Rauhala et al. 2015)

Monissa tapauksissa rakennus ei alkujaan ole ollut käytössä, joka olisi edellyttänyt erityisiä ratkaisuja akustiikan takia tai sellaisia ei ole säädösten kautta edellytetty (Rauhala et al. 2015). Esimerkki tällaisesta tilanteesta on vanha tehdasrakennus, jossa välipohjien tehtävänä on ollut kantaa tuotantokoneiston ja materiaalien paino. Usein ratkaisut ovat materiaalimenekin kannalta optimoituja, esimerkiksi ylälaattapalkistoja, joissa ylälaatat ovat suhteellisen ohuita ja palkit korkeita.

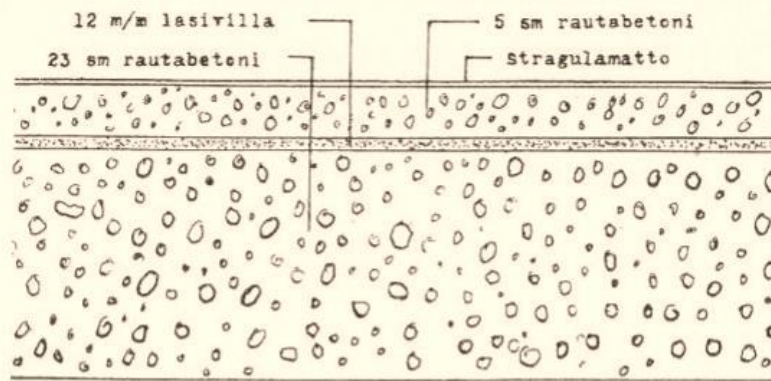
Akustiikkasuunnittelun lähtötietoina korjaushankkeissa tarvitaan tietoja säilytettävistä rakenteista. Mitä vanhempi rakennus on kysymyksessä, sitä vähemmän sen rakenteista yleensä on olemassa tai säilynyt suunnitelmätietoa. Käyttötarkoituksenmuutos-hankkeissa vanhoista rakennuksista puretaan yleensä kaikki kevyet rakenteet. Akustiikkasuunnittelun kannalta oleellisia rakennetietoja ovat välipohja- ja ulkoseinärakenteet materiaalivahvuuksineen, jotka selviävät parhaiten rakenteista otettavilla porausnäytteillä. Sopivat avauskohdat määritetään yhdessä rakennesuunnittelijan kanssa vanhojen suunnitelmien perusteella. (Rauhala et al. 2015)

13.2.2 Ääneneristys

Käyttötarkoitukseltaan muutettavassa rakennuksessa on usein sekä hyvin ohuita betonisia ja muurattuja rakenteita että muurattuja tai elementtirakenteita, joiden sementti- tai kipsipohjainen rakennusmateriaali on kevyttä. Molemmissa tapauksissa rakenteen koinsi-

denssin rajataajuus on kuulon kannalta keskeisellä alueella, tyypillisesti 400 ja 1000 Hz välillä. (Rauhala et al. 2015) Tällaisten rakennekerrosten ääneneristävyyttä on yleensä parannettava. Esimerkiksi betonisten alalaattapalkistojen alalaatta voi olla 20–60 mm paksu. Jos huoneistoja erottava väliseinä liittyy tällaiseen alalaattaan, pitää alalaatan pintaan tehdä ääneneristystä parantava alakattorakenne. 1900-luvun alkuvuosikymmeninä yleisesti käytetty elementtirakenne, kipsikuonaseinä, tuottaa äänitasoeroluvuksi $D_{nT,w}$ noin 45–48 dB, joten tällaisten väliseinien ääneneristävyyttä on parannettava, tavallisesti levyverhouksin.

Vuosikymmenten aikana myös käsitykset siitä, millaisia ääntä eristävät rakenteet ovat, ovat muuttuneet (kuva 13.3). Siinäkin tapauksessa, että rakennuksen rakennusajankohdalla on ollut ääniolosuhteita koskevia säädöksiä tai on pyritty toteuttamaan hyvät ääniolosuhteet, rakennuksessa voi olla suunnittelu- tai rakennusvirheiden vuoksi paljonkin puutteita (Lietzén & Kylliäinen 2014). Esimerkiksi 1960- ja 1970-luvuilla tehtyjen asuin-kerrostalojen julkisivu-, ikkuna- ja putkiremonttien yhteydessä olisi mahdollista varsin yksinkertaisin toimenpitein parantaa myös niiden akustista laatutasoa ja edelleen myös asuntojen arvoa. (Rauhala et al. 2015)



Kuva 125. Eräs hyvä välipohjarakenne.

Taulukko 25.

Aine	Paksuus cm	Massalattian paksuus cm	Iskääniluvun parannus fonia
Bitumihiuopa	0,15	2,0—2,5	3
Vuorivanumatto	0,8	3,0—3,5	11
Vuorivanumatto aaltopahvilla varustettuna	0,8	4,0—4,5	20
Lasivillamatto	1,5	4,5—5,0	23
Lasivillamatto asfalttipaperilla	2,0	5,5—6,0	25

Kuva 13.3. Akustiikan käsikirjassa vuodelta 1949 esitetyt kelluvia lattiarakenteita (Arni 1949). Nykykäsitysten mukaan taulukossa esitetyt kelluvan rakenteen eristekerrokset ovat aivan liian ohuita.

Peruskorjaushankkeissa ja käyttötarkoituksen muutoksissa 1800-luvun rakennusten puupalkkistojen ja 1900-luvun alkupuolen rakennusten alalatta-, ylälaatta- ja kotelopalkkistojen eloperäiset täytteet tavallisesti vaihdetaan (kuva 13.4.), sillä ne muodostavat riskin sisäilman laadun kannalta, erityisesti kosteus- ja vesivauriotapauksissa. Vanhoina täyteinä voi olla sahanpurua tai muuta kevyttä materiaalia, mutta myös tiheydeltään melko painavaa materiaalia, kuten koksikuonaa, tiilimurskaa tai rakennusjätettä. Näiden poistaminen pienentää välipohjan pintamassaa m^3 [kg/m^3], mikä massalain mukaisesti vähentää ääneneristystä. Massan pienentymisestä johtuva ääneneristävyyden heikentyminen on esitettävä uusilla rakennekerroksilla, joilla tarpeen mukaan voidaan ääneneristystä edelleen parantaa esimerkiksi käyttötarkoituksen muutoksissa.



Kuva 13.4. Betoninen alalattapalkkisto, jonka pintarakenteet on purettu ja palkkien välistä on poistettu vanha rakennusaikainen täyte. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Tuukka Lyly.

13.2.3 Huoneakustiikka

Vanhoissa rakennuksissa huonekorkeudet ovat yleensä huomattavasti suurempia kuin esimerkiksi nykyisissä asuinkerrostaloissa. Siten toiminta, joka uudisrakennuksessa ei edellyttäisi erityisiä huoneakustisia ratkaisuja, voi vanhaan rakennukseen sijoitettuna johtaa kaiun ja puheenerotettavuuden kannalta epäsuotuisen tilanteeseen. Esimerkiksi asuinhuoneiston sijoittaminen vanhan tehdasrakennuksen 6 m korkeaan kerrokseen johtaa totutusta poikkeavaan kaiuntaan asuinhuoneissa. Kalustetuissa huoneissa on totuttu noin 0,5 s jälkikaiunta-aikaan (Kylliäinen et al. 2016), mutta tilavuuden kasvaessa kaksin-

kertaiseksi myös jälkikaiunta-aika kasvaa vastaavassa suhteessa, minkä monet asukkaat kokevat häiritseväksi.

Arvorakennusten peruskorjaushankkeissa huoneakustiikan parantaminen on tehtävä rakennussuojelun ehdoilla. Huoneakustiset ratkaisut on yleensä sovitettava rakennuksen luonteeseen, ja useimmiten ratkaisut eivät saisi olla näkyviä. Ulkonäöltään tasainen ja hyvin alkuperäisiä maalattuja tai rapattuja pintoja muistuttava absorboiva pinta voidaan saada aikaan erilaisilla ruiskutettavilla tuotteilla (kuva 13.5). Joissakin tapauksissa absorptioon on käytettävä raskaita verhoja. Myös kiinteisiin kalusteisiin voidaan piilottaa absorboivia pintoja. (Huhtala et al. 2019, Takala et al. 2021a)



Kuva 13.5. Suojellun puhutilan huoneakustiikkaratkaisu perustuu paksuihin verhoihin sekä katon reunoilla kiertävään ruiskutettuun pintaan. Kuvälähde: A-Insinöörien kuva-arkisto, kuvaaja Mikko Kylliäinen.

Luvun 13 lähteet

- Arni, P. 1949. Käytännöllisen akustiikan perusteet. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava.
- Huhtala, T., Valovirta, I., Kylliäinen, M. & Takala, J. 2019. Turun Akatemiatalon perusparannus. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 78–83.
- Kragh, H. 2003. An introduction to the historiography of science (5. p.). Cambridge, Cambridge University Press.
- Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D. & Hongisto, V. 2016. Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings. Applied Acoustics. Vol. 102, s. 12–18.
- Kylliäinen, M., Rauhala, J., Lietzén, J., Valovirta, I., Takala, J. & Manninen, N. 2019. Akustiikkasuunnittelu Kuopion musiikkikeskuksen korjaushankkeessa. Rakennusfysiikka 2019. Tampere, 28.–30.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 539–544.
- Kylliäinen, M. & Valovirta, I. 2011. Opetustilojen huoneakustiikka – paluu juurille. Akustiikkapäivät 2011. Tampere, 11.–12.5., Akustinen Seura ry, s. 285–290.
- Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2013. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden kehittyminen Suomessa vuosina 1955–2008. Tekniikan Waiheita. Nro 1, s. 5–23.

- Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mitaustulosten perusteella. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 1/2014.
- Mikkilä, A., Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2019. Tampereen pääkirjasto Metson peruseräparannus. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 100–105.
- Niemi, H., Kylliäinen, M., Lietzén, J. & Tarri, M. 2019. Jyväskylän Sinfonian harjoitussalin korjaus. Akustiikkapäivät 2019. Oulu, 28.–29.10., Akustinen Seura ry, s. 84–91.
- Ratkaisujen Suomi – pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma 29.5.2015. Helsinki, hallituksen julkaisusarja 10/2015.
- Rauhala, J., Kylliäinen, M., Valovirta, I. & Huhtala, T. 2015. Akustiikkasuunnittelu korjausrakentamishankkeissa. Akustiikkapäivät 2015. Kuopio, 1.–2.9., Akustinen Seura ry, s. 266–271.
- Rauhala, J., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Takala, J., Valovirta, I. & Ruohonen, M. 2017. Tampere-talon laajennuksen ja tilamuutosten akustiikkasuunnittelu. Rakennusfysiikka 2017. Tampere, 24.–26.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 559–564.
- Rauhala, J., Manninen, N., Kovalainen, V. & Kylliäinen, M. 2021. Akustiikkasuunnittelu rakennusten käyttötarkoituksen muutoksissa. Rakennusfysiikka 2021. Tampere, 26.–28.10., Tampereen yliopisto ja Kiinko Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy, s. 497–502.
- Romula, S. 2022. Julkisten rakennusten akustinen kuntotutkimus. Diplomityö. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta.
- STMa 545/2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.
- Takala, J., Kylliäinen, M., Kovalainen, V. & Pelli, T. 2021a. Akustiikkasuunnittelu Helsingin yliopiston päärakennuksen peruskorjaushankkeessa. Rakennusfysiikka 2021. Tampere, 26.–28.10., Tampereen yliopisto ja Kiinko Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy, s. 491–496.
- Takala, J., Pelli, T. & Kylliäinen, M. 2021b. Laivaston soittokunnan uudet harjoitustilat. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.–25.11., Akustinen Seura ry, s. 217–222.
- Takala, J., Rauhala, J., Pelli, T. & Tarri, M. 2019. Ahlmanin ammattiopiston musiikkitalat – akustiikan ja rakennusfysiikan yhteensovitus. Rakennusfysiikka 2019. Tampere, 28.–30.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 559–564.
- YMa 796/2017. Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- YMo 2018. Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

Tämä akustiikkasuunnittelua talonrakennushankkeissa käsittelevä oppikirja on laadittu ajatellen kahta Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnassa järjestettävää akustiikan kurssia. Se soveltuu oppikirjaksi akustiikan opetukseen myös muissa yliopistoissa sekä ammattikorkeakouluissa. Kirjan alkupuoli (luvut 1–5) esittää perusteet akustiikan ilmiöistä ja loppupuoli (luvut 6–13) käsittelee ilmiöiden soveltamista erilaisissa rakennushankkeissa sekä asemakaavoituksessa.



Akustiikan asiantuntija Paavo Arni (1905–1969) esittelee vuonna 1946 lehdistölle ”Arnin akvaariota” eli vesimallia, jota käytettiin sittemmin keskeytyneessä hankkeessa Kaartin maneesin muuttamiseksi Yleisradion konserttisaliksi. Mallilla yritettiin tutkia, kuinka ääni etenee ja heijastuu tilassa. Kuvälähde: Yleisradion arkisto, kuvaaja Ruth Träskman 19.11.1946.