

Puukerrostalojen ääneneristys

Asiantuntijaselvitys

Mikko Kylliäinen, Pekka Latvanne, Antti Kuusinen, Toni Kekki



Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja
C, Raportteja: 44

Puukerrostalojen ääneneristys

Asiantuntijaselvitys

Mikko Kylliäinen, Pekka Latvanne, Antti Kuusinen, Toni Kekki

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU 2017
JOENSUU

Julkaisusarja

C:44

*Julkaisusarjan
vastaava toimittaja*

Kari Tiainen

Taitto

Kaisa Varis

Kansikuva

Sari Kaija, Virran Varrelta Design Oy

© Tekijä ja Karelia-ammattikorkeakoulu

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain mukaisesti kielletty ilman nimenomaista lupaa.

ISBN 978-952-275-242-0

ISSN-L 2323-6914

ISSN 2323-6914

Julkaisumyynti

Karelia-ammattikorkeakoulu
julkaisut@karelia.fi
<http://www.tahtijulkaisut.net>

Joensuu, 2017



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Pohjois-Karjalan
MAAKUNTALIITTO

JOENSUUN TIEDEPUISTO



JOSEK 

Joensuun Seudun Kehittämissyhtiö JOSEK Oy

Sisällys

ESIPUHE	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Puurakenteiden akustiset erityispiirteet	8
1.2 Akustiikan osa-alueet	9
1.3 Ääniolosuhteiden viihtyisyys- ja terveysvaikutukset	10
1.4 Ääneneristystä koskevat säädökset ja ohjeet	12
2 ILMAÄNENERISTYS	15
2.1 Ilmaääneneristyksen tarkoitus	15
2.2 Ilmaääneneristysluku	16
2.3 Ilmaääneneristävyksien laskenta	18
2.4 Yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyden muodostuminen	18
2.5 Kaksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyden muodostuminen	22
3 ASKELÄÄNENERISTYS	36
3.1 Välipohjan merkitys	36
3.2 Askeläänitasojen mittaus	37
3.3 Askeläänitasoluku	38
3.4 Puuvälipohjan askelääneneristävyden muodostuminen	39
3.5 Puuvälipohjan askelääneneristävyteen vaikuttavat tekijät	41
4 RUNKOJÄRJESTELMÄT JA SIVUTIESIIRTYMÄT	48
4.1 Äänen sivutiesiirtymä	48
4.2 Puukerrostalon runkojärjestelmät	49
4.3 Sivutiesiirtymän vähentäminen	50
5 LVIS-JÄRJESTELMÄT	51
5.1 LVIS-järjestelmät äänilähteenä	51
5.2 Ilmaääneneristävyys ilmanvaihtokanaviston kautta	52
5.3 LVIS-laitteiden tärinäneristys	53
5.4 Muut LVIS-järjestelmät	54

6 RAKENNUKSEN ULKOVAIPAN ÄÄNENERISTYS	56
6.1 Liikennemelun merkitys	56
6.2 Asemakaavamääräyksen muodostuminen	57
6.3 Rakennusosan ilmaääneneristysluvut liikennemelua vastaan	58
6.4 Ulkovaipan ääneneristävyden muodostuminen	59
6.5 Ulkovaipan rakennusosien valinta	61
6.6 Tärinä ja runkomelu	62
7 TULEVAISUUDEN KEHITYSSUUNTIA	63
7.1 Rakentamismääräysten uudistaminen	63
7.2 Puurakenteiden ajankohtaiset kehityshankkeet	66
7.3 Puurakenteiden kehitystarpeet tulevaisuudessa	67
8 PUUKERROSTALON AKUSTIIKKASUUNNITELMAN SISÄLTÖ	68
8.1 Tehtäväluettelot	68
8.2 Ehdotus puukerrostalon akustiikkasuunnitelman sisällöksi	69
LÄHTEET	71

Esipuhe

Pohjois-Karjalassa on tehty pitkäjänteistä työtä puurakentamisen kehittämiseksi maakunnan alueella. Viime vuosina panoksia on suunnattu erityisesti puukerrostalorakentamiseen ja siihen liittyvän rakennuttamis- ja suunnitteluosaamiseen. Toiminnan ansiosta maakunnan ensimmäisen puukerrostalo As Oy Joensuun Pihapetäjä valmistui keväällä 2017 ja lisää merkittäviä puurakennuskohteita on alkamassa, kuten maakunnan ensimmäinen CLT-levyrakenteinen päiväkotikiitos Joensuun Hukanhaudalla. Puurakentamisen edelläkävijöitä ollaan myös Penttilänrantaan rakennettavassa 14-kerroksisessa Joensuu Lighthouse puukerrostalossa, mikä tulee valmistuessaan olemaan maailman korkein kokonaan puurunkoinen kerrostalo.

Tulevaisuuden näkymä puurakentamiselle Suomessa on se, että osana biotaloutta se tulee olemaan avainasemassa suomalaisen metsäteollisuuden rakennemuutoksen tukemisessa sekä kasvun ja kansainvälisen kilpailukykyyn varmistamisessa. Erityisesti suuren mittakaavan teollinen puurakentaminen, kuten kerrostalorakentaminen, tulee lisääntymään huomattavasti lähitulevaisuudessa. Tavoitteena on, että lähivuosina joka kymmenes kerrostalo olisi puurakenteinen. Vuonna 2016 puukerrostalojen osuus oli noussut jo 5 prosentin tasolle ja yli kaksikerroksisia puukerrostaloja oli vuoteen 2016 mennessä rakennettu Suomeen yhteensä 52 kappaletta.

Karelia-ammattikorkeakoulu on sitoutunut puurakentamisen kehittämiseen Pohjois-Karjalan maakunnassa. Puurakentaminen on nostettu ammattikorkeakoulun ja Opetus- ja kulttuuriministeriön välisissä strategianeuvotteluissa yhdeksi merkittävimmistä kehittämisen kohteista. Myös maakunnan ja Joensuun seudun strategioissa puurakentamisella on vahva asema osana metsäbiotaloutta. Näistä lähtökohdista on hyvä jatkaa jo aloitettua työtä ja vahvistaa Pohjois-Karjalan imagoa metsiin, puuhun ja puurakentamiseen liittyvän osaamisen mallimaakuntana.

Lähtölaukaus Karelia-ammattikorkeakoulun suuren mittakaavan puurakentamiseen liittyvään osaamisen kehittämiseen oli Puurakentamisen osaamisen siirto -hankkeen käynnistyminen vuoden 2014 loppupuolella. Hankkeen käynnistämisen lähtökohtana oli tunnistettu suunnittelu ja rakennuttamisosaamisen puute. Puurakentamisen osaamisen siirto -hankkeen toiminnan edesauttamana alueelle on muodostumassa puurakentamisen klusteri, joka koostuu rakennuttajista, suunnittelijoista, rakennusliikkeistä, talotehtaista ja puutuoteosatoimittajista.

Arvoketjumalli eri toimijoiden välillä on kuitenkin vielä puutteellinen ja vasta muodostumasta. Tähän ydinongelmaan pyritään vastaamaan vuoden 2017 alusta alkaneella Teollisen rakentamisen ratkaisut – arvoketjumallista liiketoimintaa -hankkeella. Rakentamisen arvoketjumallilla tarkoitetaan toimintamallia, jossa tuoteosatoimittajat, suunnittelijat ja rakennusliikkeet toimivat keskenään tiiviissä yhteistyössä tarjoten kokonaisratkaisuja markkinoille. Tavoitteena on synnyttää uusia tuote- ja palvelukonsepteja erityisesti teollisen rakentamisen ratkaisuksi. Lisäksi hanke tuottaa avointa ja puolueetonta tietoa suuren mittakaavan puurakentamisen kohteiden suunnitteluun, toteutukseen ja ylläpitoon liittyen.

Tämä julkaisu on tuotettu osana Puurakentamisen osaamisen siirto sekä Teollisen rakentamisen ratkaisut -hankkeita. Molemmissa hankkeissa on tullut vahvasti esille haasteet puukerrostalorakentamisen akustiikkasuunnittelussa. Betonirakenteiden etuna on materiaalin oma massa, joka vaimentaa tehokkaasti varsinkin matalat äänen taajuudet. Puurakentamisessa äänieristystä ei voida materiaalin keveyden takia perustaa pelkästään sen massaan vaan äänitekninen suunnittelu vaatii aivan uuden suunnittelun osa-alueen haltuun ottamista.

Tämä asiantuntijaselvitys on toteutettu Karelia-ammattikorkeakoulun ja A-insinöörit suunnittelu Oy:n yhteistyönä. Julkaisun tavoitteena on auttaa lukijaa ymmärtämään puurakenteiden akustisia ominaisuuksia ja siten välttämään tyypillisiä suunnittelu- ja rakennusvirheitä.

Joensuussa,

Ville Mertanen
projektiasiantuntija
Karelia-ammattikorkeakoulu

1 Johdanto

1.1 PUURAKENTEIDEN AKUSTISET ERITYISPIIRTEET

Valtaosa Suomen asuinkerrostalokannasta on viimeisten vuosikymmenien aikana toteutettu betonirakenteisena. Betonielementtitalojen rakenteet, rakenteiden liitokset ja ääneneristysratkaisut standardoitiin lähes 50 vuotta sitten. Betonitaloissa huoneistojen välinen ääneneristävyys perustuu betonin massaan (tiheys noin 2500 kg/m³) ja liitosten jäykkyyteen [45]. Esimerkiksi ulkoseinäelementit kiinnitetään jäykästi väliseinäelementteihin. Niiden massasta ja liitoksen jäykkyydestä seuraa se, että äänen siirtyminen huoneistosta toiseen suoraan väliseinän kautta sekä ulkoseinän kautta on riittävän vähäistä.

Puu on betoniin verrattuna kevyttä (tiheys noin 500 kg/m³). Tästä seuraa se, että levymäinen puukerros on ilmaääneneristävyydeltään noin 15 dB heikempi kuin paksuudeltaan vastaava betonikerros. Näin ollen puukerrostaloissa huoneistojen välinen ääneneristävyys ei voi perustua puun massaan eikä tiloja erottavia rakenteita sivuavien rakenteiden kautta kulkevan äänen siirtymistä tilasta toiseen voida vähentää tekemällä näiden rakenteiden liitoksista jäykkiä. Puun tiheyden ja jäykkyyden suhde on lisäksi sellainen, että levymäisen puutuotteen ääneneristävyys on heikempi kuin yhtä painavan kipsilevyn, jonka tiheys ja jäykkyys on optimoitu ääneneristävyyden suhteen. Näistä puun fysikaalisista ominaisuuksista seuraa kaksi piirrettä, jotka ovat puurakentamiselle tyypillisiä silloin, kun tavoitellaan ääneneristävyyttä:

- Puurakenteet ovat tavalla tai toisella kerroksellisia siten, että levykerrosten välissä on ääntä vai mentavalla materiaalilla kokonaan tai osin täytetty ilmapäli. Levykerrokset voivat lisäksi muodostua useasta kerroksesta, esimerkiksi CLT-levyjen pintaan asennetaan tavallisesti rakennuslevyjä, kuten kipsilevykerros tai -kerroksia.
- Puurakenteet eivät jatku huoneistosta toiseen, vaan äänen siirtymistä huoneistosta toiseen muita reittejä kuin suoraan tiloja erottavan rakenteen kautta vähennetään katkaisemalla sivuavat rakenteet

huoneistoja erottavien väliseinien ja välipohjien kohdalla. Riittävän ääneneristävyyden saavuttaminen puukerrostalossa edellyttää siten huolellista ja kattavaa detaljisuunnittelua.

Tämän asiantuntijaselvityksen tavoitteena on auttaa lukijaa ymmärtämään puurakenteiden akustisia ominaisuuksia ja siten välttämään tyypillisiä suunnittelu- ja rakennusvirheitä sekä edistää puukerrostalojen suunnittelua ja tuotekehitystä.

1.2 AKUSTIIKAN OSA-ALUEET

Yleiskielessä akustiikasta puhuttaessa tarkoitetaan useimmiten tilojen huoneakustiikkaa eli sitä, miten selvää puhe tai musiikki tilassa on ja miten ihmiset sen kokevat. Tavallisesti akustiikka liitetään huoneakustiikaltaan vaativiin kohteisiin, kuten konserttisaleihin, teattereihin, elokuvateattereihin tai auditorioihin. Näissäkin rakennuksissa huoneakustiikka on vain yksi osa akustisen suunnittelun kokonaisuutta [41]. Talonrakentamisessa, kuten asuinrakennushankkeissa, akustiikka kattaa yleensä neljä osa-aluetta (kuva 1.1):

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

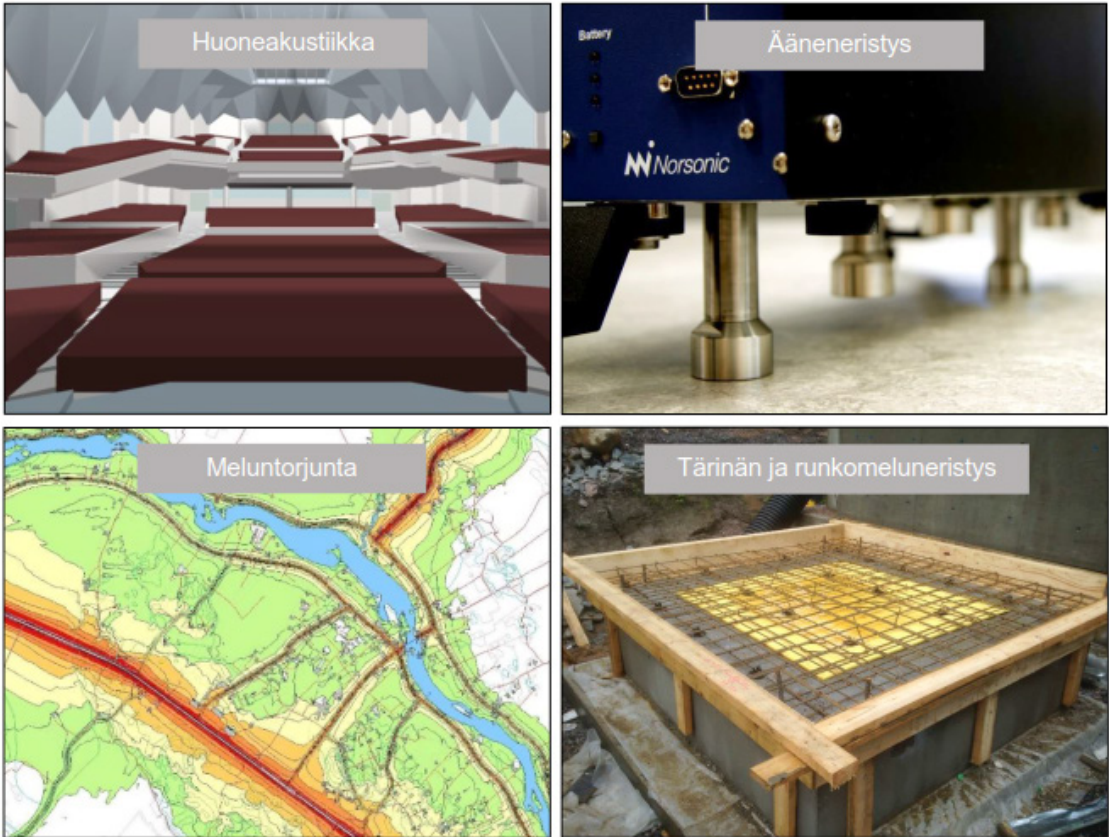
- **Rakennusakustiikka** tutkii äänen siirtymistä eri tilojen välillä rakenteiden ja muiden äänen kulureittien kautta. Äänilähteen luonteen perusteella puhutaan ilmaääneneristyksestä ja askel- tai runkoonääneneristyksestä.

- **Meluntorjunnan** tarkoituksena on vähentää rakennuksen ulkopuolisen melun, kuten tie-, raide- tai lentoliikenteen ja teollisuuden aiheuttaman melun, syntymistä tai estää sen etenemistä erilaisin meluestein tai ääntä eristävin rakentein. Rakennuksen sisällä meluntorjunnan tarkoituksena on vähentää koneiden tai rakennuksen teknisten laitteiden aiheuttamaa melua vaikuttamalla melun syntymiseen tai estämällä sen leviämistä ääntä eristävin rakentein, erilaisin äänenvaimentimin tai huoneakustiikan keinoin.

- **Tärinäneristys** liittyy läheisesti konedynamiikkaan, mutta myös akustiikkaan: rakennuksen runkoon jäykästi kiinnitetty laite, jossa on liikkuvia osia, saa rakenteet värähtelemään ja synnyttää siten ääntä tai tuntoaistin kautta havaittavaa tärinää. Tärinäneristyksen tarkoituksena on vähentää laitteen aiheuttaman värähtelyn siirtymistä rakennuksen runkoon eristämällä laite rungosta joustavilla rakenneosilla. Rautateiden ja raitioteiden läheisyyteen rakennettaessa värähtely pyrkii siirtymään maata pitkin rakennukseen joko tärinänä tai runkomeluna. Ratojen varsille rakennettaessa kokonaiset rakennukset usein eristetään värähtelevästä maaperästä sijoittamalla perustuksiin eristimiä [31].

Akustiikan neljä osa-aluetta limittyvät paljolti toisiinsa. Esimerkiksi rakennuksen teknisiä laitteita vaimennettaessa puhutaan meluntorjunnasta, vaikka keinona olisi äänen vaimentaminen huoneakustiikan keinoin.

Akustisen suunnittelun tarve ei koske pelkästään vaativia rakennustyyppejä. Tosiasiallisesti akustista suunnittelua tarvitaan ja sitä tehdään käytännössä kaikissa rakennushankkeissa. Esimerkiksi asuinhuoneistoja erottavan ääntä eristävän väliseinän rakennetyypin valinta on akustista suunnittelua. Asuin-kerrostalohuoneiston ääniolosuhteet muodostuvat naapureista ja porrashuoneesta kuuluvista äänistä, rakennuksen teknisten järjestelmien tuottamista äänistä sekä ulkoa sisään pyrkivistä äänistä. Siten asuinrakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu edellyttää huomion kiinnittämistä erityisesti ääneneristyksen ja meluntorjunnan suunnitteluun [41].



Kuva 1.1. Tilan tai rakennuksen akustiikka muodostuu neljästä osa-alueesta: huoneakustiikasta, ääneneristyksestä, meluntorjunnasta ja tärinäneristyksestä.

1.3 ÄÄNIOLOSUHTEIDEN TERVEYS- JA VIIHTYISYYSVAIKUTUKSET

Puutteelliset ääniolosuhteet aiheuttavat kustannuksia jo olemassaolollaan: esimerkiksi työteho voi huonoissa toimitiloissa heikentyä jopa 10 % [22], samoin äänihäiriön tai kuulovaurion saaneen työntekijän kuntouttaminen tai pahimmillaan sairaseläkkeelle joutuminen aiheuttaa kansantaloudellisia kustannuksia. Kustannuksia aiheutuu myös tilojen ääniolosuhteiden korjaamisesta. Niitä alkaa syntyä jo siinä vaiheessa, kun rakennuksen käyttäjä joutuu käyttämään aikaansa asioiden selvittelyyn. Lisäksi tavallisesti on pidettävä kokouksia ja palkattava asiantuntijoita [49]. Ongelmien ratkaisemiseksi vaadittava suunnittelu- ja rakennustyö aiheuttaa myös kustannuksia. Useimmiten nämä kustannukset ovat turhia, sillä rakennuksen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tarkoituksenmukaisten ääniolosuhteiden aikaansaaminen on huomattavasti halvempaa ja helpompaa kuin rakennuksen valmistuttua havaittavien ongelmien korjaaminen. Vaikka ongelmat olisivatkin teknisesti ratkaistavissa, voi käydä myös niin, että taloudellisia resursseja niiden korjaamiseen ei enää ole. Esimerkiksi puukerrostaloissa sivuavien rakenteiden kautta huoneistosta toiseen käytettävien tärinäneristinkaistojen vaihtaminen on käytännössä jokseenkin mahdotonta.

Puutteellisilla ääniolosuhteilla on terveydellisiä ja taloudellisia vaikutuksia, jotka voivat pahimmillaan muodostua kansanterveydellisiksi ja kansantaloudellisiksi ongelmiksi. Ääniolosuhteilla voi olla myös sosiaalisia vaikutuksia, jos esimerkiksi asuntojen hinta riippuu siitä, sijaitseeko asunto liikennemelualueel-

la vai hiljaisella alueella. Tällöin meluisille alueille hakeutuvat asumaan ne, joilla asunnon hankkimiseen käytettävät taloudelliset mahdollisuudet ovat rajallisia [1].

Suomessa asuinrakennusten ääneneristävyydestä annettiin ensimmäiset suositukset vuonna 1955. Rakennusvalvonnan asettamien vaatimusten johdosta 1960-luvun lopulla alettiin noudattaa Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n 1967 julkaisemia ääneneristysnormeja, joissa annetut raja-arvot ilma- ja askelääneneristykselle siirtyivät sellaisenaan Suomen rakentamismääräyskokoelmaan, joka julkaistiin vuonna 1975. Käytännössä Suomessa on asuinrakennusten ääneneristävyys ollut Euroopan kärkitasoa siitä lähtien, kun suosituksia 1950-luvulla annettiin. Tämä koskee sekä vaatimustasoa että toteutunutta ääneneristävyttä, vaikka toteutunut ääneneristävyys ei aina ole ollutkaan suositusten ja määräysten mukainen (taulukot 1.1 ja 1.2). Määräyksillä ja toteutuneella ääneneristävydellä on myös ollut yhteys asukkaiden tyytyväisyyteen asuntojensa ääniolosuhteista: 1950-luvulla asukkaista 81 % oli tyytyväisiä asuntojensa ääniolosuhteisiin, 1960-luvun puolivälissä 60 % ja vuonna 2005 tehdyssä tutkimuksessa 93 % [63]. Määräykset ovat vaikuttaneet toisaalta rakenteiden paksuuksien kasvuun ja toisaalta rakennusvirheiden vähenemiseen [62].

Taulukko 1.1. Asuinkerrostalojen vierekkäisten asuinhuoneistojen ilmaääneneristävyyden kehitys Suomessa 1950-luvulta 2000-luvulle [63].

Vuodet	Ilmaääneneristysluvun R'_{w} keskiarvo	Vaatus (R'_{w})	Vaatimukset täytävien osuus
1955–1959	54 dB	51 dB	81 %
1960–1967	52 dB	52 dB	47 %
1967–1976	52 dB	52 dB	50 %
1976–1999	55 dB	52 dB	91 %
2000–2008	57 dB	55 dB	100 %

Taulukko 1.2. Asuinkerrostalojen vierekkäisten asuinhuoneistojen askelääneneristävyyden kehitys Suomessa 1950-luvulta 2000-luvulle [63].

Vuodet	Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ keskiarvo	Vaatus ($L'_{n,w}$)	Vaatimukset täytävien osuus
1955–1959	57 dB	62 dB	86 %
1960–1967	55 dB	56 dB	65 %
1967–1976	58 dB	58 dB	46 %
1976–1999	55 dB	58 dB	85 %
2000–2008	49 dB	53 dB	93 %

Taulukoissa 1.1 ja 1.2 esitetyt tilastot edustavat tiettyä asuinkerrostalokannan otosta, jonka mittaustulokset on esitetty julkaistuissa tutkimusraporteissa. Vaikka toteutunut ääneneristys näyttää nykyisin vastaavan hyvin vaatimustasoa, ongelmia kuitenkin esiintyy. Tämä johtuu ääneneristävyiden arviointiin käytettävistä mittaluvuista. Erityisesti askelääneneristävyiden arvioinnissa kysymys on siitä, että häiriöaiheuttava taajuusalue on määräysten mitattavaksi edellyttämän taajuusalueen ulkopuolella. Siten asuinrakennuksissa voi olla tilanteita, joissa määräykset täyttyvät, mutta asukkaat ovat tyytymättömiä ääneneristävyteen [46, 51, 54]. Äänen aiheuttama häiriytyminen on terveyden kannalta merkittävä asia, sillä se edeltää terveyshaittojen muodostumista [69]. Toisaalta taas on tilanteita, joissa asukkaat mitatut arvot ovat vaatimustasoa heikommalla, vaikka rakenteet on oikein suunniteltu ja toteutettu. Tämä johtuu siitä, että mittaluvut eivät kaikissa tilanteissa ole täysin valideja [56].

1.4 ÄÄNENERISTYSTÄ KOSKEVAT SÄÄDÖKSET JA OHJEET

Akustisilla olosuhteilla on taloudellista merkitystä kansanterveyden, menetetyt työajan ja epätarkoituksenmukaisten tilojen korjaamisen aiheuttamien kustannusten vuoksi. Niiden johdosta akustinen suunnittelu kiinnostaa myös yhteiskuntaa ja lainsäätäjiä. Euroopan unionin rakennustuotedirektiivi määrittelee rakentamiselle ja rakennustuotteille kuusi niin sanottua olennaista vaatimusta, joiden joukossa ovat terveys ja meluntorjunta. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan terveyden ja viihtyisyyden huomioon ottava meluntorjuntaa koskeva olennainen vaatimus edellyttää rakennuksen suunnittelua ja rakentamista siten, että melu, jolla rakennuksessa tai sen lähellä olevat altistuvat, pysyy niin alhaisena, ettei se vaaranna näiden henkilöiden terveyttä ja että se antaa mahdollisuuden nukkua, levätä ja työskennellä riittävän hyvissä olosuhteissa [96].

Rakentamista koskevaa lainsäädäntöä ohjaa Euroopan unionin jäsenmaissa rakennustuotedirektiivi, joka määrittelee rakennuksia koskevat niin sanotut olennaiset vaatimukset. Niiden joukossa on meluntorjuntaa koskeva vaatimus. Sen toteutumiseksi vaadittavat olosuhteet määritellään kansallisesti. Suomessa rakennustuotedirektiivin vaatimuksia on täsmennetty maankäyttö- ja rakennuslaissa, ja edelleen Suomen rakentamismääräyskokoelmassa [49]. Määräysten lisäksi ääniolosuhteita koskevia määräyksiä ja ohjeita on muissakin säädöksissä ja ohjeissa. Näiden keskinäinen hierarkia on esitetty taulukossa 1.3.

Taulukko 1.3. Asuinrakennusten ääniolosuhteita koskevat määräykset ja ohjeet sekä niiden asema ja merkitys [45].

Asema	Asiakirja	Merkitys
Säädös	Rakennustuotedirektiivi	Velvoittava, ohjaa lainsäädäntöä
Säädös	Maankäyttö- ja rakennuslaki	Velvoittava
Säädös	Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C1	Velvoittava
Säädös	Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2	Velvoittava
Ohje	Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjeistuksesta	Asemakaavamääräysten kautta velvoittava
Suositus	SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus	Velvoittava, jos määritelty noudatettavaksi urakka- tai kauppa-asiakirjoissa
Suunnitteluohje	RIL 243 Rakennusten akustinen suunnittelu	Edustaa hyvää rakentamistapaa

Asuinrakennusten ääniolosuhteita koskevat vaatimukset on annettu Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1-1998 [49]. Siinä esitetään kaikkia rakennuksia koskeva määräys, jonka mukaan rakennus on suunniteltava ja toteutettava siten, että melu, jolle rakennuksessa tai sen lähellä olevat altistuvat, pysyy niin alhaisena, että se ei vaaranna näiden henkilöiden terveyttä ja antaa mahdollisuuden nukkua, levätä ja työskennellä riittävän hyvissä olosuhteissa. Lisäksi rakentamismääräyskokoelman osa C1 edellyttää, että rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa on hyvien ääniolosuhteiden saavuttamiseksi otettava huomioon ääneneristyksen lisäksi kaikki rakennuksen ääniolosuhteisiin vaikuttavat tekijät, kuten melulähteen voimakkuus ja tilojen keskinäinen sijoittelu.

Rakentamismääräyskokoelman osassa C1-1998 on annettu teknisinä mittalukuina määräyksiä asuinhuoneistoille, ääniolosuhteiden toteuttamista koskevia ohjeita sekä ohjeita selventäviä selostuksia. Rakentamismääräyskokoelman ääneneristys- ja meluntorjuntavaatimuksen katsotaan riittävässä määrin täyttyvän, kun rakennus suunnitellaan ja rakennetaan määräyksissä ja ohjeissa esitetyllä tavalla. Rakennusvalvontaviranomaiset valvovat näiden määräysten toteutumista.

Asuinrakennuksessakin voi olla muita tiloja kuin asuntoja tai niihin liittyviä varastotiloja ja yhteisiä tiloja. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi päivittäistavarakaupat ja ravintolat, joiden toiminta voi olla hyvinkin äänestä. Näiden tilojen suunnittelemiseksi rakentamismääräyskokoelmassa ei ole teknisinä mittalukuina annettuja vaatimuksia, vaan ne on suunniteltava tapauskohtaisesti. Rakentamismääräyskokoelmassa esitetyt vaatimukset hyvin ääniolosuhteiden saavuttamiseksi johtavat tällöin viisivaiheiseen prosessiin:

1. Selvitetään, millaista toimintaa tilan käyttäjällä on.
2. Selvitetään, millaisia ääniolosuhteita toiminta edellyttää tai millaista haittaa eli melua se aiheuttaa rakennuksen muille käyttäjille tai viereisille rakennuksille.
3. Määritellään suunnittelulle tavoitearvot teknisinä mittalukuina. Mittaluvut ovat tärkeitä siksi, että rakennuksen valmistuttua voidaan tarvittaessa selvittää, vastaako rakennus suunnitelmia.
4. Suunnitellaan asetettuja tavoitearvoja vastaavat rakenneratkaisut.
5. Toteutetaan rakennus siten, että se vastaa suunnitelmia. Tämä tarkoittaa mm. sitä, että urakoitsijat eivät voi vaihtaa suunnittelijoiden esittämiä ratkaisuja muihin ilman, että muutoksen vaikutus ääniolosuhteisiin tutkitaan.

Valtioneuvoston päätös 993/1992 [103] melutason ohjearvoista määrittelee asuinrakennusten pihamaalla tai muilla oleskelualueilla ja parvekkeilla sekä sisällä asuinhuoneissa. Vaikka päätöksessä esitetään ohjearvoja, ohjearvot muuttuvat määräyksiksi asemakaavaprosessin kautta. Melualueille rakennettaessa ulkoalueiden meluntorjuntaa sekä rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskevat kaavamääräykset perustuvat valtioneuvoston päätöksen mukaisesti melutason ohjearvoihin. Lainvoimaisen kaavan määräyksiä on noudatettava ja ratkaisut niiden toteuttamiseksi on esitettävä rakennuslupavaiheessa.

Standardi SFS 5907 [84] on Suomen standardisoimisliitto SFS ry:n vuonna 2004 julkaisema asiakirja, joka laajan lausuntokierroksen jälkeen on saanut rakennuslupalain yleisesti hyväksytyksi aseman. Standardi ei ole luonteeltaan määräys, vaan suositus. Siten se on tarkoitettu rakentamista ohjaavaksi asiakirjaksi, ja sen käyttö on vapaaehtoista. Standardi SFS 5907 jakaa teknisten mittalukujen perusteella rakennukset neljään akustiseen luokkaan A...D. Standardin mukaan rakennuksen voidaan todeta kuuluvan johonkin luokkaan, kun siinä on tehty standardin määrittelemä määrä akustisia mittauksia. Standardissa esitettyjen luokkien vaatimuksia voidaan kuitenkin käyttää suunnittelussa ohjearvoina aina, vaikka standardin määrittelemiä mittauksia ei tehtäisikään. Rakennuksen voidaan kuitenkin todeta kuuluvan johonkin luokkaan vain mittauksen perusteella.

Standardin määrittelemä luokka D on tarkoitettu vanhojen rakennusten akustisten ominaisuuksien toteamiseen. Uudisrakentamisessa tai vanhojen rakennusten käyttötarkoituksen muutoksissa on aina noudatettava luokan C vaatimuksia, jotka vastaavat rakentamismääräyskokoelman osan C1 vaatimuksia. Luokkien A ja B rakennuksissa ääniolosuhteet ovat luokan C rakennuksia parempia.

Standardin SFS 5907 yksi tarkoitus on vastata suunnitteluohjeiden tarpeeseen, joka on syntynyt viranomais määräysten supistumisesta. Standardissa esitetään teknisinä mittalukuina ohjearvoja erilaisten rakennustyyppien suunnittelemiseksi ääniolosuhteiden osalta. Ratkaisuja näiden olosuhteiden saavuttamiseksi ei standardissa ole. Sitä vastoin Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisemassa kirjasarjassa RIL 243 Rakennusten akustinen suunnittelu [49] esitetään rakenne- ja muita standardin vaatimuksia vastaavia suunnitteluratkaisuja, joiden voidaan katsoa edustavan hyvää rakentamistapaa.

2 Ilmaääneneristys

2.1 ILMAÄNENERISTYKSEN TARKOITUS

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. 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] on värähtelyiden määrä jaettuna ajanjaksolla, jonka kuluessa värähtelyt on havaittu. Käytännössä kaikki akustiikan ilmiöt ovat taajuudesta riippuvia.

Äänenä aistittavat ilmanpaineen vaihtelut ovat staattiseen ilmanpaineeseen verrattuna hyvin pieniä. Ilmakehän ilmanpaine on noin 100 kPa, mutta kuulokynnyks 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 eli miljoonakertainen, äänenpaineita olisi epäkäytännöllistä soveltaa suunnittelu- ja laskentatyössä. Siksi tarkasteltavaa äänenpainetta p verrataan vertailuäänepaineeksi otettuun kuulokynnykseen p_0 . Tällöin äänen voimakkuutta voidaan kuvata äänenpainetasona L_p [dB]. Äänenpainetason määrittelyn mukaan pienimmän kuultavissa olevan äänenpaineen äänenpainetaso on 0 dB ja kipukynnyksen äänenpaineen äänenpainetaso on noin 120 dB.

Levitessään huonetilassa äänilähteestä ympäristöön äänialto kohtaa esteitä, kuten seinä- ja lattiarakenteita, ikkunoita tai ovia. Paineen vaihtelu ilmassa saa nämä rakenteet värähtelemään, ja rakenteet värähtelyllään saavat toisella puolellaan olevan ilman värähtelemään. Rakenteen kohtaaman värähtelyn määrä voidaan ilmaista äänitehona W_1 [dB]. Välittynyt värähtely voidaan edelleen havaita ilmaääninä. Ilmaääneneristyksen tarkoituksena on vähentää puheen, musiikin, soitinten, äänentoiston tai teknisten laitteiden huonetilaan synnyttämän äänen siirtymistä toiseen huonetilaan [41]. Välittynyt äänienergia voidaan ilmaista äänitehona W_2 [dB].

Ilmääneneristävyys on rakennusosan tai rakennusosien muodostaman kokonaisuuden ominaisuus. Tilaan syntyvä äänenpainetaso ja viereisestä tilasta siirtyvän äänitehon kuuluminen riippuu monesta muustakin tekijästä. Ensinnäkin tilaan välittyvä ääniteho W_2 riippuu paitsi ilmääneneristävydestä, myös viereisessä tilassa olevasta äänitehosta W_1 . Tilaan toisesta tilasta välittynyt ääniteho W_2 vaimenee sitä enemmän, mitä enemmän ääntä vaimentavia pintoja eli absorptioalaa tilassa on. Absorptioalan 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 ilmääneneristävydet ovat taajuudesta riippuen yleensä 20-70 dB.

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

2.2 ILMAÄNENERISTYSLUKU

Ilmääneneristävyys R [dB] on suure, joka kuvaa rakenteen kykyä vähentää sen pinnalle kohdistuvan äänen siirtymistä rakenteen toiselle puolelle. Se on määritelty pinnalle kohdistuvan äänitehon ja rakenteen toiselle puolelle siirtyvän äänitehon suhteena. Ääniteho puolestaan on suure, joka kuvaa äänienergian absoluuttista määrää. Sitä ei ole mahdollista määrittää suoraan mittauksilla, vaan se on selvitettävä välillisesti. [49]

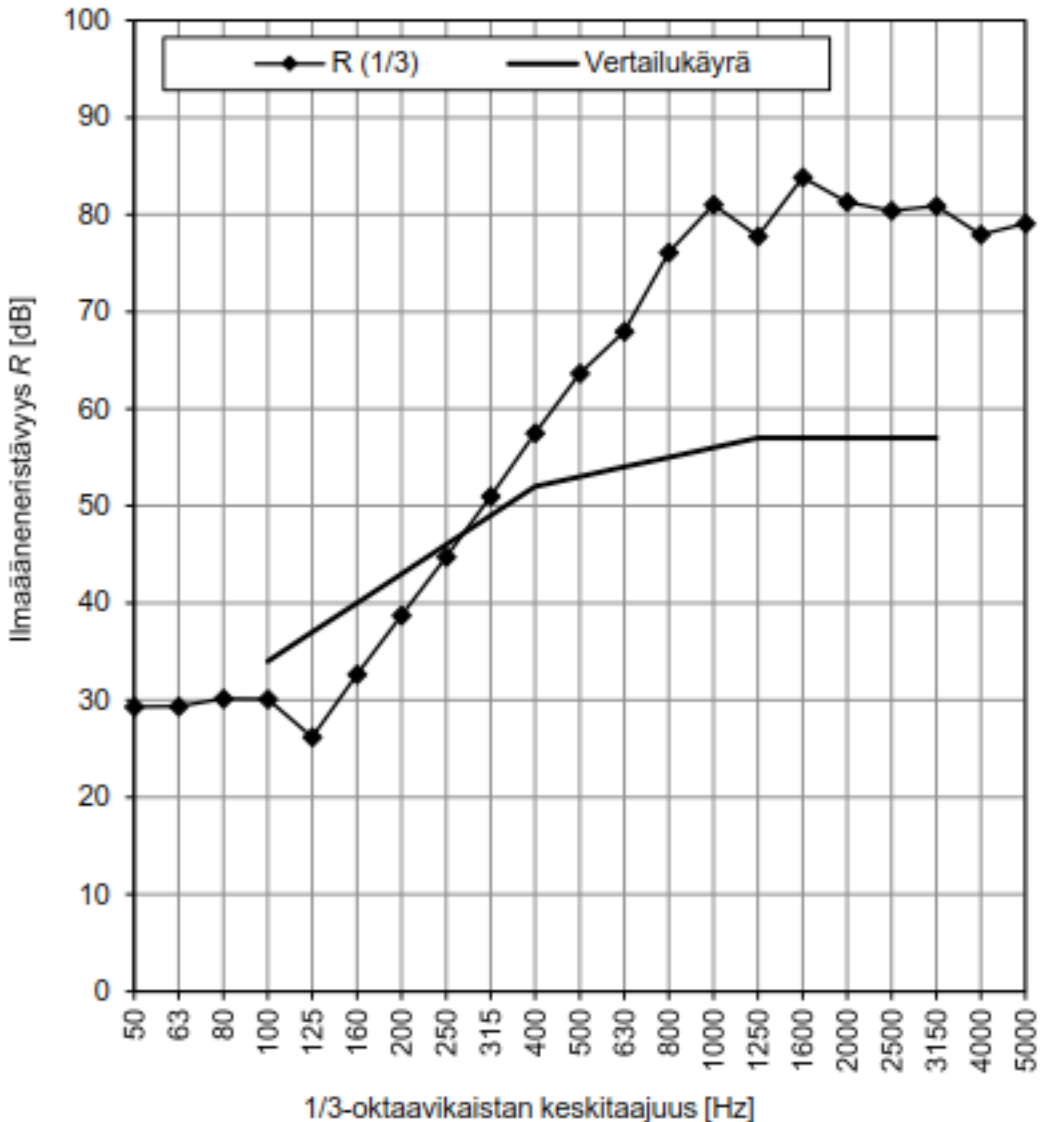
Laboratoriossa ilmääneneristävyys R mitataan siten, että vierekkäin on kaksi toisistaan eristettyä betonikammiota. Niiden välinen ääneneristävyys on erittäin suuri. Vierekkäisten kammioiden seinät muodostavat kaksinkertaisen rakenteen, jossa olevaan aukkoon tutkittava rakenne asetetaan. Koska kammioiden välinen ilmääneneristävyys on erittäin suuri, ääniteho siirtyy kammioista toiseen pääasiassa vain tutkimusaukkoon asennetun rakenteen kautta. Tosiasiallisesti äänitehoa siirtyy kammioiden välillä myös lukuisia muita reittejä pitkin eli sivutiesiirtymänä. Laboratoriossa sivutiesiirtymänä kulkevan äänitehon määrä on kuitenkin niin pieni, että se on merkityksetöntä. Näin ollen laboratoriomittauksissa pääosa kammioista toiseen siirtyneestä äänitehosta on peräisin rakenteen pinnalle kohdistuneesta äänitehosta ja tuloksena saatu ilmääneneristävyys kuvaa tarkasti tutkitun rakenteen ominaisuuksia. Rakennuksessa ääni siirtyy tilasta toiseen [49]. Rakennuksessa ääni kulkee lukemattomia reittejä tilojen välillä, jolloin rakennuksessa mitattuun ilmääneneristävyyteen sisältyvät kaikki nämä reitit. Rakennuksessa mitatusta ilmääneneristävyydestä käytetään merkintää R' erotuksessa laboratoriomittausta tarkoittavasta merkinnästä R .

Ilmääneneristävyys on taajuudesta riippuva suure. Siksi ilmääneneristävydet lasketaan tai mitataan tavallisesti 16 keskitaajuudella välillä 100 Hz...3150 Hz. näistä eri taajuuksilla määritetyistä ilmääneneristävyksistä määritetään suunnittelun helpottamiseksi vertailukäyrämenettelyllä ilmääneneristysluku, josta käytetään merkintää R_w laboratoriomittauksissa ja merkintää R'_w rakennuksessa tehdyissä mittauksissa (kuva 2.1). Vertailukäyrän muoto on määritelty aikanaan tekemällä suuri määrä mittauksia kivirakenteisissa asuinkeuhkaloissa ja haastattelemalla suuri joukko ihmisiä. Vertailukäyrän muotoa noudatteleva ilmääneneristävyys eri taajuuksilla koetaan yleensä hyväksi puheääntä vastaan.

Ilmääneneristysluku R_w saadaan mittaustuloksista siten, että vertailukäyrää siirretään sen muotoa muuttamatta 0,1 tai 1 dB portain sellaiseen asemaan, että taajuuksittain mitattujen ilmääneneristävyksien R poikkeamat vertailukäyrästä epäsuotuisaan suuntaan ovat yhteensä enintään 32 dB [90]. Epäsuotuinen poikkeama tarkoittaa sitä, että mitattu ilmääneneristävyys on pienempi kuin vertailukäyrän

arvo. Vertailukäyrän aseman määräävät siten vertailukäyrän arvoja pienemmät ilmaääneneristävyydet. Kun vertailukäyrä on saatu sijoitetuksi ylimpään mahdolliseen asemaan, jossa epäsuotuisten poikkeamisen summa on enintään 32 dB, ilmaääneneristysluku luetaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta (kuva 2.1). Rakenteen kyky eristää ilmaääntä on sitä parempi, mitä suurempi ilmaääneneristysluku on.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 [96] mukaan pienin sallittu ilmaääneneristysluku R'_w mitattuna asuinhuoneistosta toiseen asuinhuoneistoon on 55 dB. Pienin sallittu ilmaääneneristysluvun R'_w arvo porrashuoneen ja asuinhuoneiston välillä on 39 dB, kun välissä on ovi.



Kuva 2.1. Kolmannesoktaavikaistoittain mitatut ilmaääneneristävyydet ja ilmaääneneristysluvun laskenta.

2.3 ILMÄÄNENERISTÄVYYKSIEN LASKENTA

Perinteisesti rakennusosien ilmääneneristävyydet ja ilmääneneristysluvat on selvitetty mittauksin laboratoriossa. Nykyään on olemassa myös kaupallisia ohjelmistoja ilmääneneristävyyksien laskentaa, joskin niiden antamien tulosten validiteetti on usein selvittämättä. Ohjelmistojen valmistajat eivät myöskään yleensä anna tietoja laskentateorioista. Siten kaupallisten ohjelmistojen tuloksiin ei välttämättä voi kovin hyvin luottaa. [9]

Jäljempänä esitetyt ilmääneneristävyyksien laskentatulokset on määritetty parametrisella laskentamallilla, joka on kehitetty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella [38]. Laskentamallin taustalla oleva teoria on esitetty lähteissä [17, 18, 21, 39, 72, 83, 85, 92, 104]. Laskentamallilla voidaan ottaa huomioon rakenteen rakennekerrosten massa ja jäykkyys, mahdollisissa ilmäväleissä olevat ääntä vaimentavat materiaalit, rankarunkoisen seinän rankojen joustavuudet sekä eristerapatun ulkoseinän resonanssin. Malli perustuu siihen, että laskentaohjelmaan syötetään vuorotellen kerroksia ja liitoksia. Kerroksia ovat esimerkiksi rakennuslevyt ja liitoksia ovat esimerkiksi päällekkäisten rakennuslevyjen kiinnitystavat tai levykerrosten välillä olevat ilmatilat täyttöineen ja rankoineen.

Laskentamallin validoinnista ja tarkkuudesta on esitetty arvio lähteessä [38]. Laskentatarkkuus vastaa lähteissä [53] ja [21] esitettyjä vastaavien mallien tarkkuutta. Kaikkien laskentamallien tarkkuus riippuu siitä, kuinka monimutkainen rakenne on kyseessä: mitä useampi rakennekerros rakenteessa on, sitä enemmän mittaus- ja laskentatulokset yleensä eroavat toisistaan.

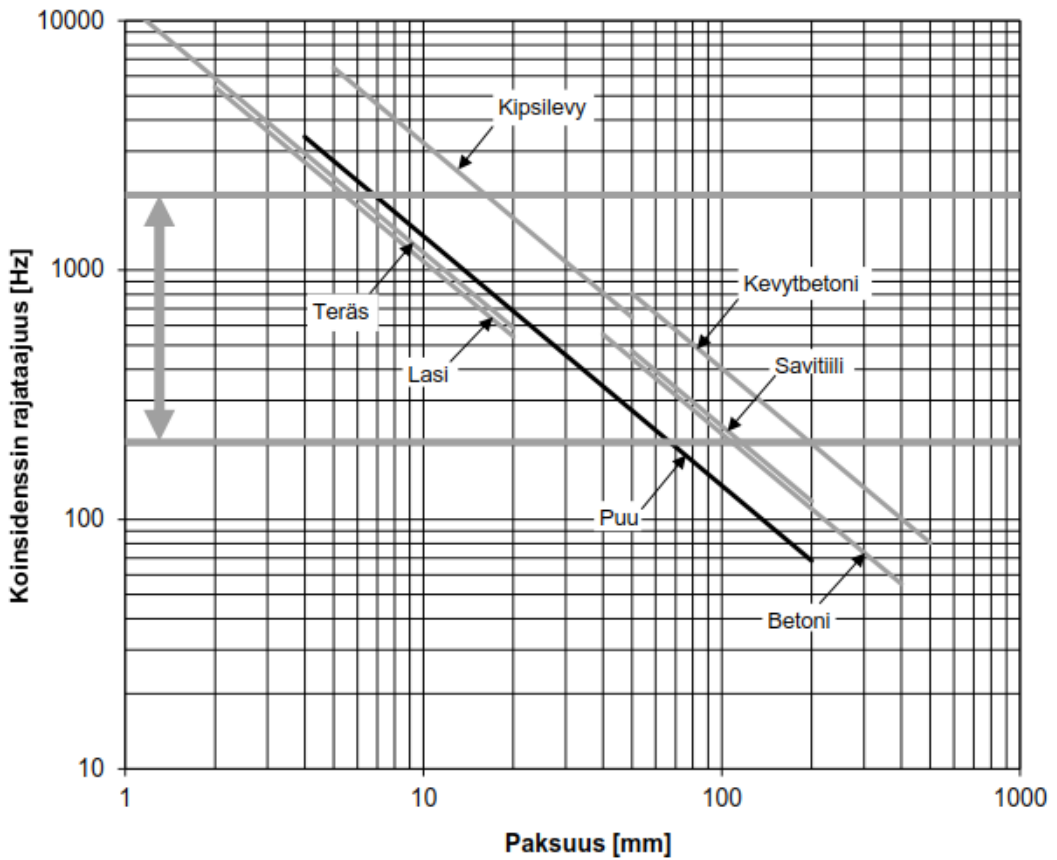
Laskentamallilla määritetään ilmääneneristävyydet R kolmannesoktaavikaistoittain. Kolmannesoktaavikaistoittain lasketuista arvoista saadaan ilmääneneristysluvat R_w eli rakenteen ilmääneneristävyyttä kuvaavat yksilukuarvot vertailukäyrämenettelyllä standardin SFS-EN ISO 717-1 [90] mukaisesti.

2.4 YKSINKERTAISEN RAKENTEEN ILMÄÄNENERISTÄVYYDEN MUODOSTUMINEN

Akustiikassa yksinkertaisilla rakenteilla tarkoitetaan rakenteita, joiden massa on yhdessä kerroksessa tai jotka muodostuvat päällekkäisistä levykerroksista, joiden välissä ei ole ilmävälejä. Esimerkiksi vanerilevy, kertopuulevy tai CLT-levy ovat yksinkertaisia rakenteita. Yksinkertaisen rakenteen ilmääneneristävyys perustuu rakenteen massaan. Yksinkertaisin laskentamenetelmä on massalaki, jolla voidaan selvittää massan [kg/m^2] ja taajuuden perusteella rakenteen ilmääneneristävyys taajuuksittain. Massalain mukaan ilmääneneristävyys kasvaa 6 dB taajuuden tai massan kaksinkertaistuessa.

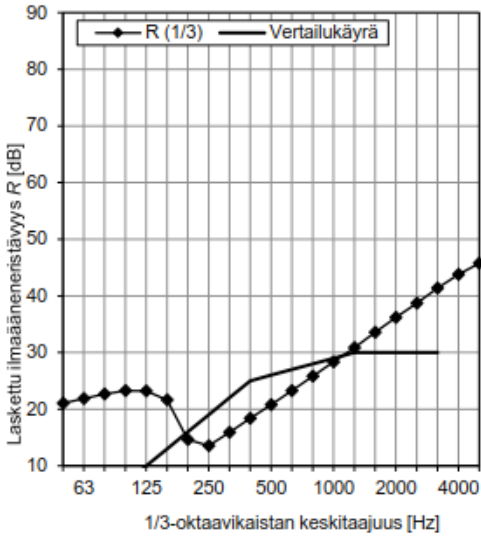
Massalaki on kuitenkin epätarkka keino rakenteen ilmääneneristävyyden määrittämiseksi. Jokaisen rakenteen ilmääneneristävyydessä on erotettavissa rajataajuuksia, joilla niiden käyttäytyminen muuttuu ja poikkeaa massalain mukaisesti. Yksinkertaisen rakenteen merkittävin rajataajuus riippuu rakenteen massasta ja jäykkyydestä. Tietyllä rajataajuudella näiden suhteesta seuraa se, että äänen nopeus ilmassa ja taivutus-aallon nopeus rakenteessa on yhtä suuri. Tästä rajataajuudesta käytetään nimitystä koinsidenssin rajataajuus. Samat ääneneneristävyyteen liittyvät ilmiöt esiintyvät kaikilla rakenteilla, mutta rajataajuuksien paikat ovat erilaisia. Koinssidenssin rajataajuus on ilmiö, joka käytännössä määrittelee sen, mitä materiaaleja voidaan käyttää ääntä eristävässä rakenteissa ja millaisia nämä rakenteet ovat.

Kuvassa 2.2 on esitetty rakenteen paksuuden funktiona koinssidenssin rajataajuus. Rajataajuuden tulisi olla alle 200 Hz tai yli 2000 Hz, jotta siitä ei olisi kuulohavainnon ja ääneneneristävyyden kannalta haittaa. Suuri osa puulevyjen paksuuksista johtaa siihen, että koinssidenssin rajataajuus on epäedullisella alueella (kuva 2.3). Kuvassa 2.4 on esitetty, kuinka levymäisten puutuotteiden ääneneneristävyyttä voidaan parantaa yhdistämällä niihin rakennuslevyjä, joiden koinssidenssin rajataajuudet ovat edellisellä alueella.

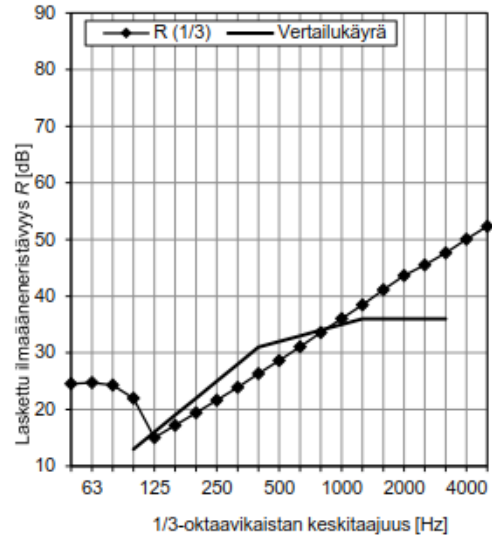


Kuva 2.2. Erialaisten rakennusmateriaalien koinsidenssin rajataajuuksia paksuuden funktiona.

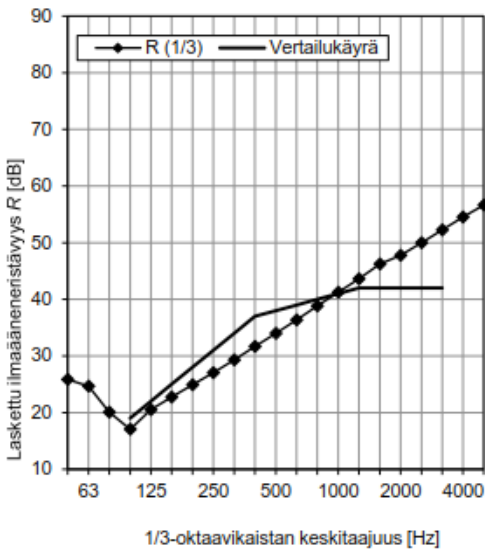
VS1



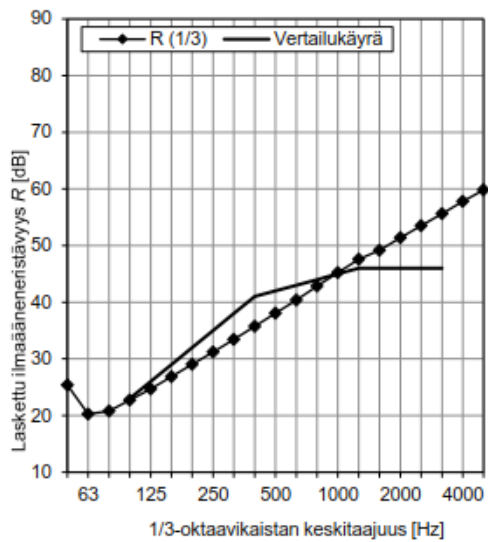
VS2



VS3



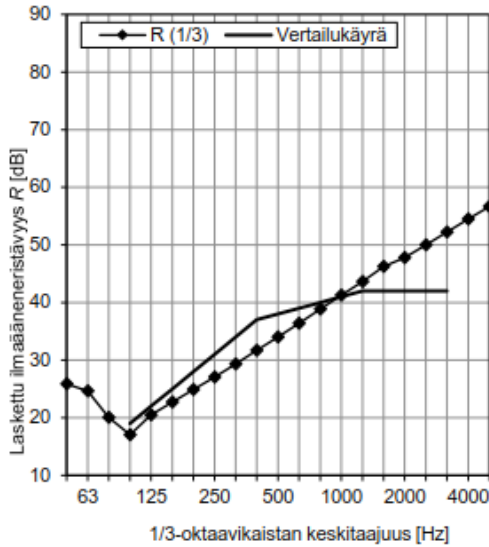
VS4



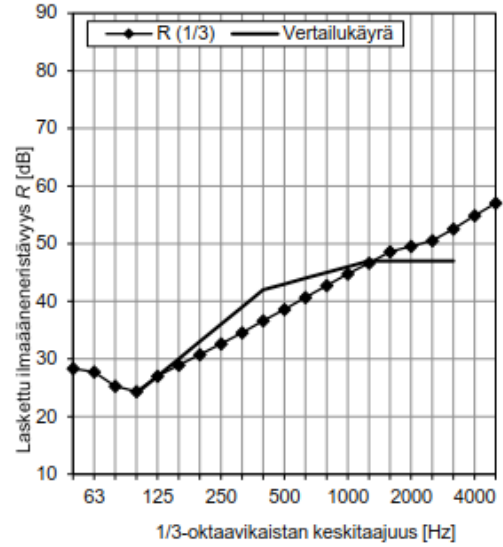
Kuva 2.3. Eri paksuisten puulevyjen laskettuja ilmaääneneristävyyksiä:

- Rakenne VS₁ ($R_w = 26$ dB): CLT 60 mm
- Rakenne VS₂ ($R_w = 32$ dB): CLT 100 mm
- Rakenne VS₃ ($R_w = 38$ dB): CLT 140 mm
- Rakenne VS₄ ($R_w = 42$ dB): CLT 180 mm

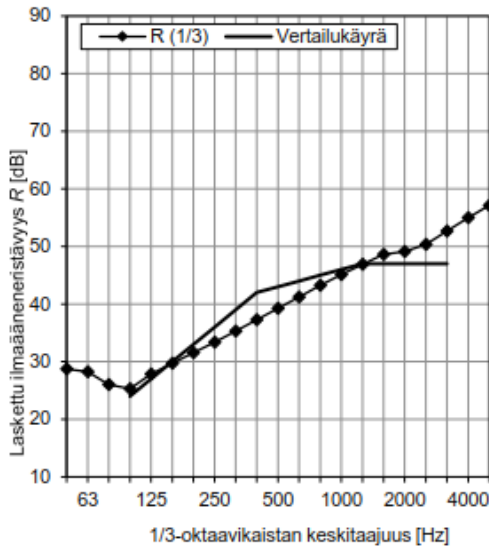
VS3



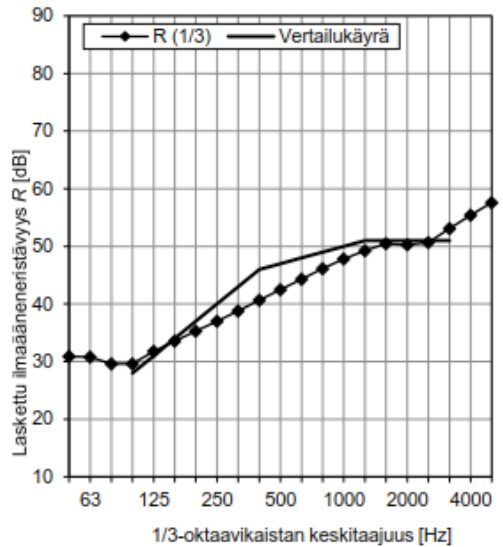
VS5



VS6



VS7



Kuva 2.4. Puulevyjen koinsidenssin kompensointi rakennuslevyillä, joilla koinsidenssialue on suuremmilla taajuuksilla:

Rakenne VS4 ($R_w = 38$ dB): CLT 140 mm

Rakenne VS5 ($R_w = 43$ dB): kipsilevy N13, CLT 140 mm, kipsilevy N13

Rakenne VS6 ($R_w = 43$ dB): kipsilevy EK13, CLT 140 mm, kipsilevy EK13

Rakenne VS7 ($R_w = 47$ dB): 2 x kipsilevy EK 13, CLT 140 mm, 2 x kipsilevy EK13

2.5 KAKSINKERTAISEN RAKENTEEN ILMAÄNENERISTÄVYYDEN MUODOSTUMINEN

2.5.1 Kaksinkertaisen rakenteen määritelmä

Kevyiden rakenteiden ilmasteneristävyyttä voidaan kasvattaa helposti lisäämällä rakenteiden pintamassaa. Jos pintamassa on jo suuri, pienikin parannus ilmasteneristävyydessä 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 ilmastaväli tai absorptiomateriaalilla täytetty ilmastaväli. Akustisen toimintansa kannalta tällainen rakenne on kaksinkertainen.

Esimerkkejä kaksinkertaisista rakenteista ovat molemmiin puolin levytetyt kipsilevyseinät, kaksinkertaiset tiiliseinät ja betonivälipohjat, joihin liittyy levyrakenteinen alakatto tai asennuslattia. Myös kantavan välipohjarakenteen päälle tehty kelluva lattia muodostaa rakenteesta kaksinkertaisen, mutta kelluva lattia toimii kelluvan rakenteen alla olevan eristekerroksen johdosta akustisesti hieman toisella tavalla kuin massojen ja ilmastavälin muodostava rakenne. Kelluvia lattioita käsitellään askelääneneristyksen yhteydessä tarkemmin.

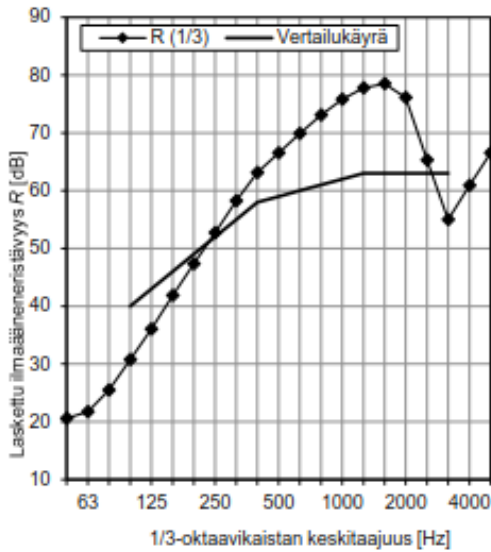
2.5.2 Ilmastavälin ja massan vaikutus kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyyteen

Kaksinkertaisen rakenteen puoliskot ja ilmastaväli muodostavat massa-jousi-massajärjestelmän, jossa rakenteen puoliskojen välissä oleva massa toimii jousena. Tällaisella rakenteella on ominaistajuus, jolla se helpoimmin värähtelee. Ominaistaajuuden yläpuolella ilmasteneristävyys kasvaa nopeasti. Ominaistaajuus riippuu rakenteen puolikkaiden pintamassoista ja niiden välissä olevan ilmastavälän suuruudesta: mitä suurempia massat ovat ja mitä suurempi ilmastaväli on, sitä pienemmällä taajuudella ominaistaajuus on. Ilmasteneristävyyden kannalta on edullista saada ominaistaajuus mahdollisimman alhaiseksi. Ääneneristystä suunniteltaessa kaksinkertaisen rakenteiden puoliskojen massat ja niiden etäisyys toisistaan on valittava niin, että ominaistaajuus on enintään 100 Hz, mieluiten alle 50 Hz.

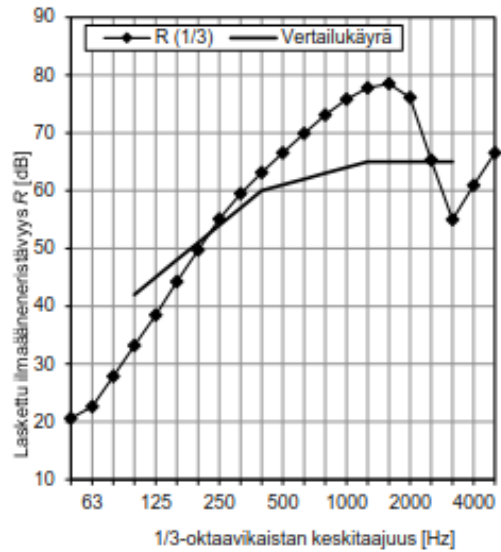
Kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyys ei kasva rajattomasti, vaan suurilla taajuuksilla rakenteen toiminta muuttuu. Tällöin äänen aallonpituus on pieni verrattuna ilmastaväliin, eikä ilmastaväli enää toimi jousena. Rakenteen puoliskojen ilmasteneristävyydet voidaan tällöin laskea yhteen. Rajataajuudella rakenteen ilmastaväli on noin kuudesosa äänen aallonpituudesta.

Kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyys perustuu sen puoliskojen ilmasteneristävyyteen sekä niiden massoista ja ilmastavälisestä seuraavaan ominaistaajuuteen (kuvat 2.5–2.7). Kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyyden laskemiseksi on ensin selvitettävä sen kummankin puoliskon ilmasteneristävyys yksinkertaisina rakenteina. Vaihtoehtoisesti kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen ääneneristävyyksinä voidaan käyttää niiden mittaustuloksia.

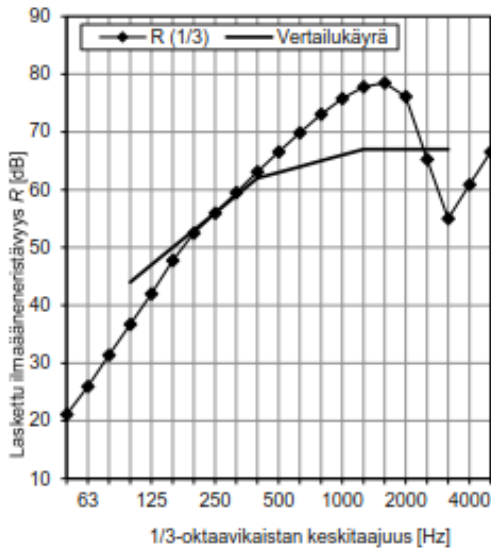
VS8



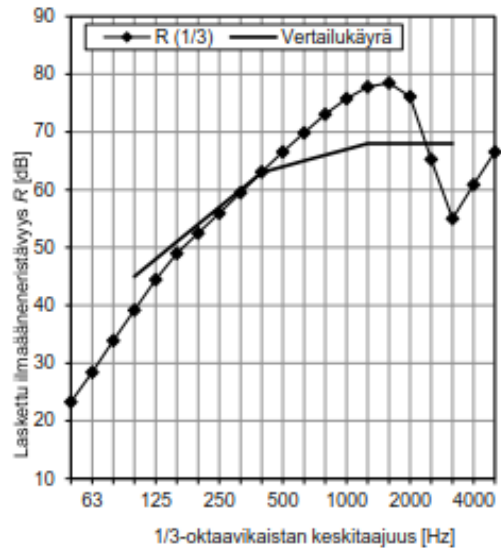
VS9



VS10

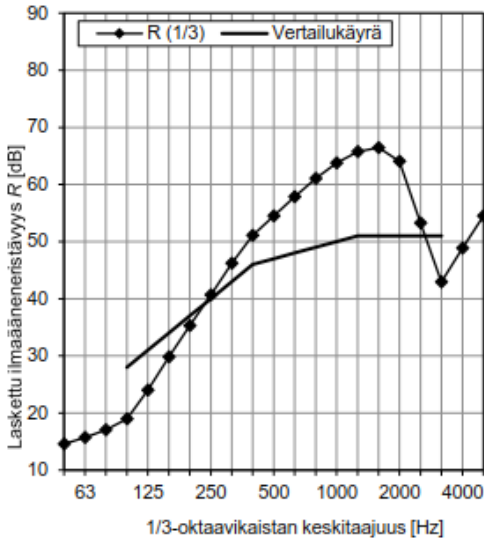


VS11

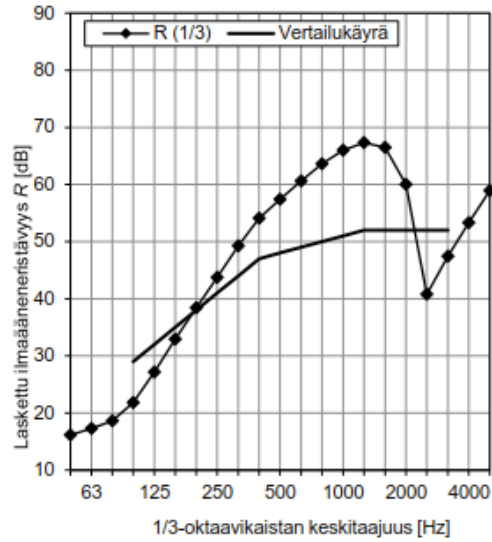


Kuva 2.5. Puurankarunkoisten kipsilevyväliseinien ilmääneneristävyydet, kun ilmaväli vaihtelee:
 Rakenne VS8 ($R_w = 59$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13
 Rakenne VS9 ($R_w = 61$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 16 mm, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13
 Rakenne VS10 ($R_w = 63$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 116 mm, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13
 Rakenne VS11 ($R_w = 64$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 216 mm, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

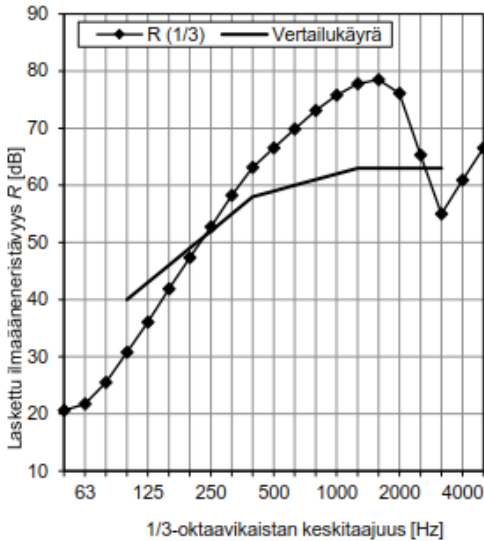
VS12



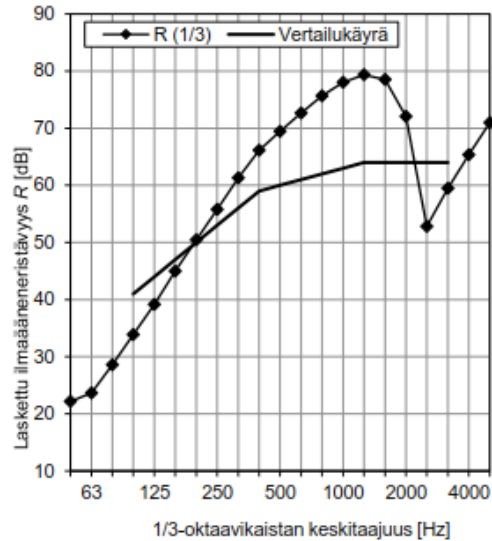
VS13



VS8



VS14



Kuva 2.6. Puurankarunkoisten kipsilevyväliseiniä ilmaääneneristävyydet, kun levykerroksen massa vaihtelee:

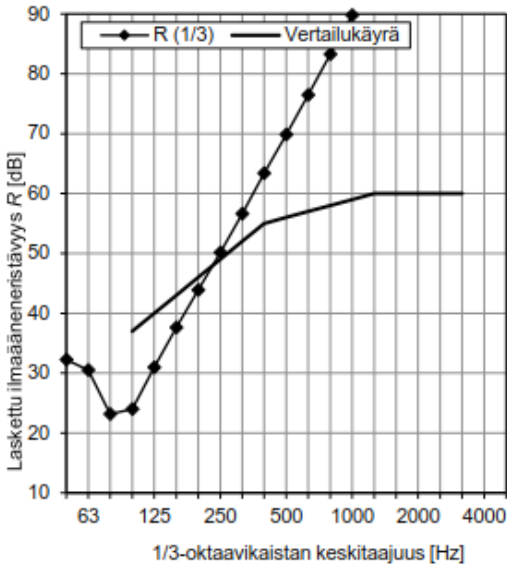
Rakenne VS12 ($R_w = 47$ dB): kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy N13

Rakenne VS13 ($R_w = 48$ dB): kipsilevy EK13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy EK13

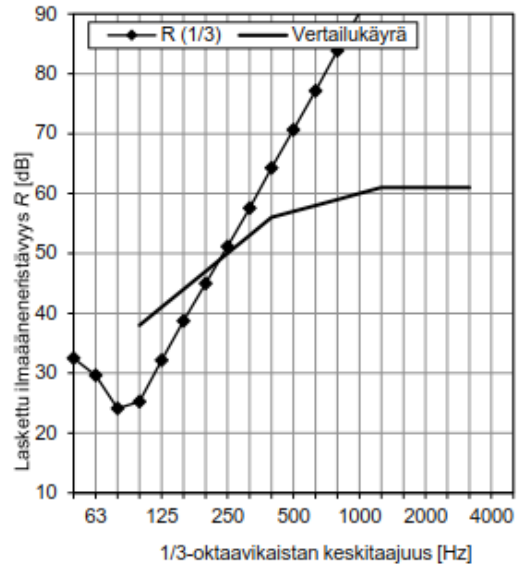
Rakenne VS8 ($R_w = 59$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

Rakenne VS14 ($R_w = 60$ dB): 2 x kipsilevy EK13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy EK13

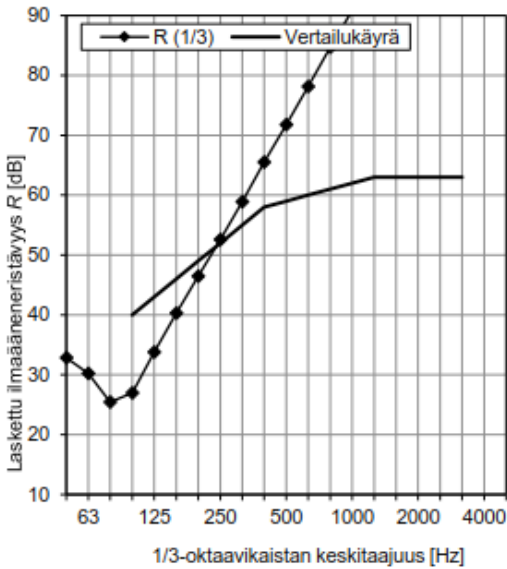
VS15



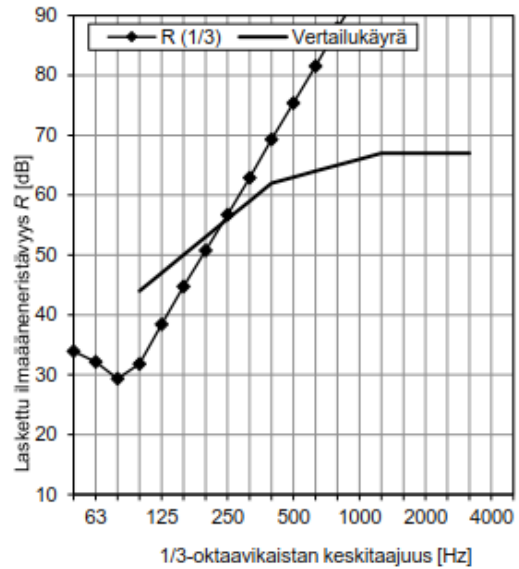
VS16



VS17



VS18

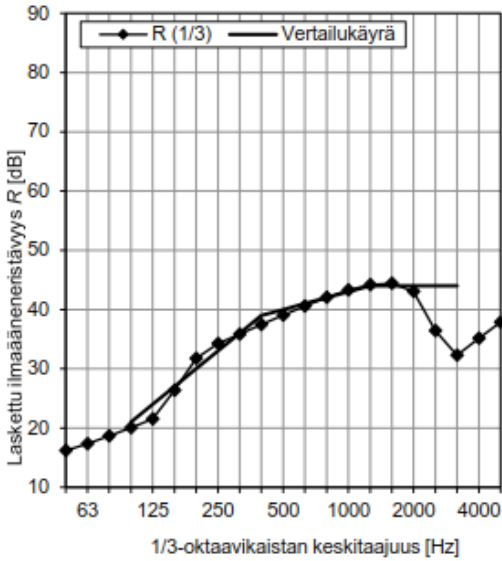


Kuva 2.7. CLT-runkoisten väliseinién ilmääneneristävyydet, kun pintalevytyksen massa vaihtelee:
 Rakenne VS15 ($R_w = 56$ dB): kipsilevy N13, CLT 140 mm, ilmaväli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy N13
 Rakenne VS16 ($R_w = 57$ dB): kipsilevy EK13, CLT 140 mm, ilmaväli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy EK13
 Rakenne VS17 ($R_w = 59$ dB): kipsilevy F15, CLT 140 mm, ilmaväli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy F15
 Rakenne VS18 ($R_w = 63$ dB): kipsilevy N13 + F15, CLT 140 mm, ilmaväli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy N13 + F15

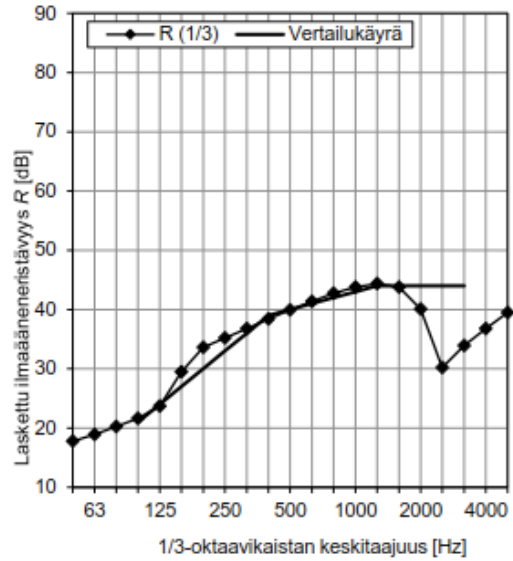
2.5.3 Rankojen vaikutus kaksinkertaisen rakenteen ilmastäneristävyyteen

Samaan rankaan rangan molemmin puolin kiinnitetty rakennuslevyt muodostavat myös kaksinkertaisen rakenteen, mutta sen ilmastäneristävyyt jät rankojen tuottaman kytkennän vuoksi heikommaksi kuin kytkemättömien rakenteiden. Rangat määrittelevät käytännössä sen, kuinka suureksi ilmastäneristävyyt voi ylipäätään nousta. Rankojen jäykkyys vaikuttaa lisäksi siten, että saavutettava ilmastäneristävyyt heikkenee, kun rangat tulevat jäykemmiksi. Puurangat ovat ääneneristävyyden kannalta käytännössä täysin jäykkiä, joten on edullista, että k-jako on mahdollisimman suuri. Kuvissa 2.8-2.10 on esitetty levytyksen massan, rangan paksuuden ja rankojen k-jaon vaikutus rankaseinän ilmastäneristävyyteen.

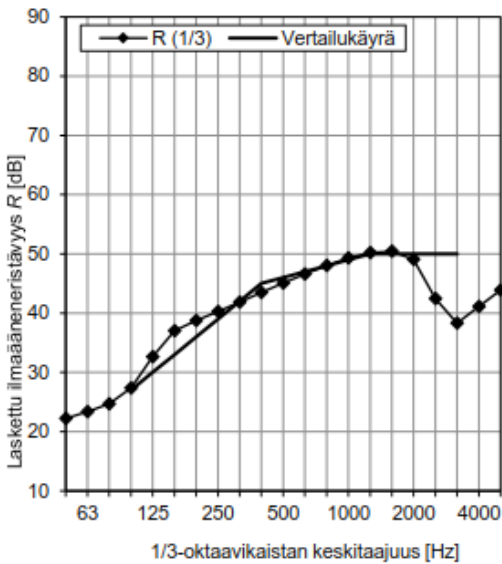
VS19



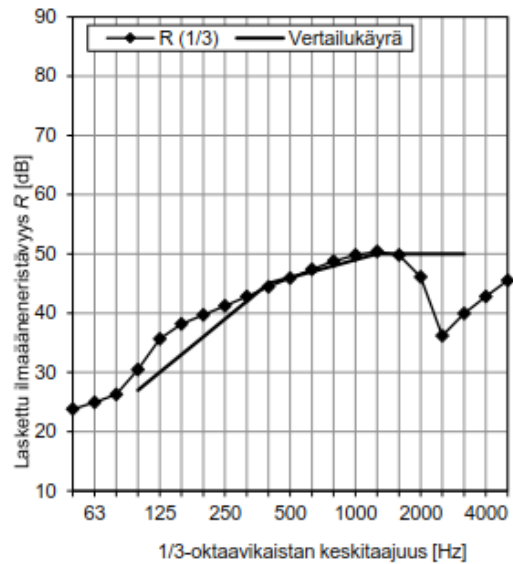
VS20



VS21



VS22



Kuva 2.8. Levykerroksen massan vaikutus kytketyn puurankaseinän ilmaääneneristävyyteen:

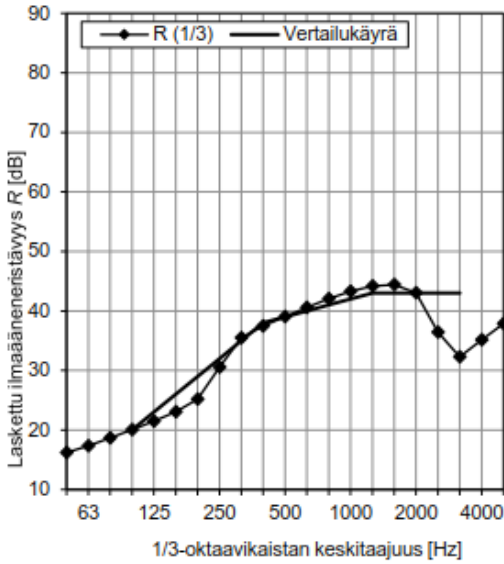
Rakenne VS19 ($R_w = 40$ dB): kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy N13

Rakenne VS20 ($R_w = 40$ dB): kipsilevy EK13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy EK13

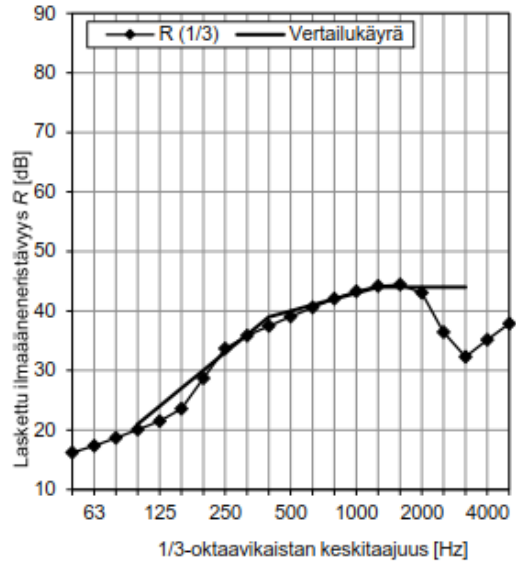
Rakenne VS21 ($R_w = 46$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

Rakenne VS22 ($R_w = 46$ dB): 2 x kipsilevy EK13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy EK13

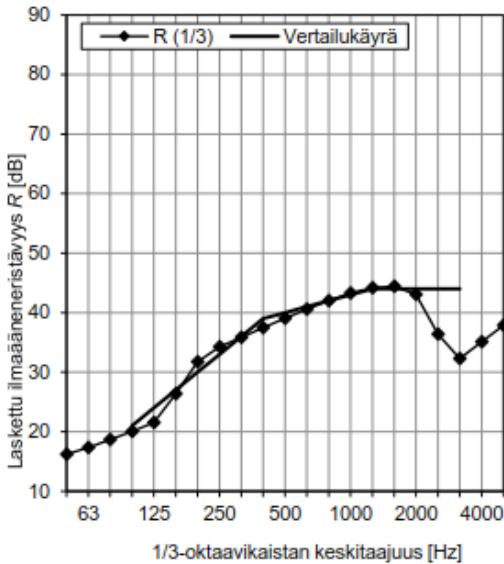
VS23



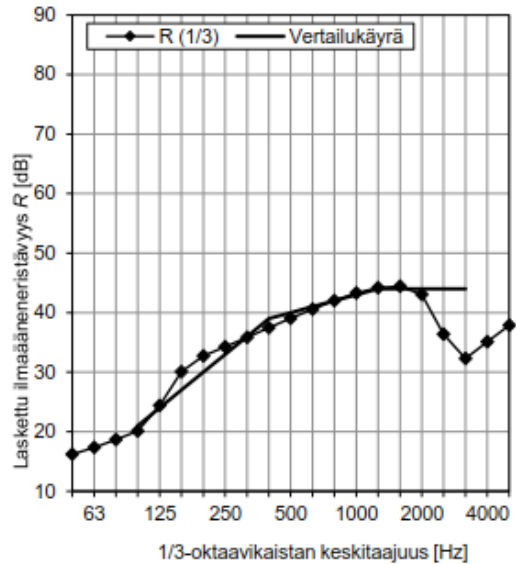
VS24



VS19



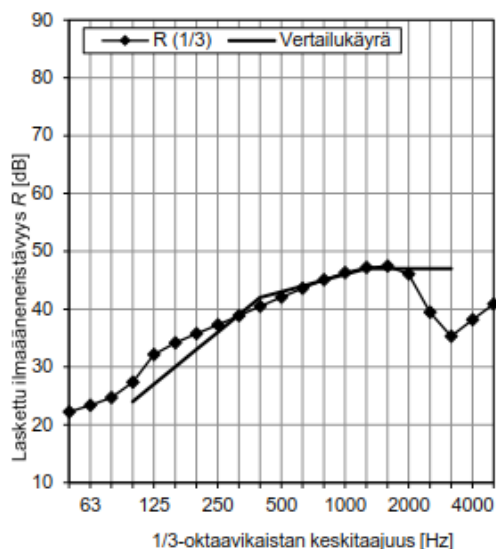
VS25



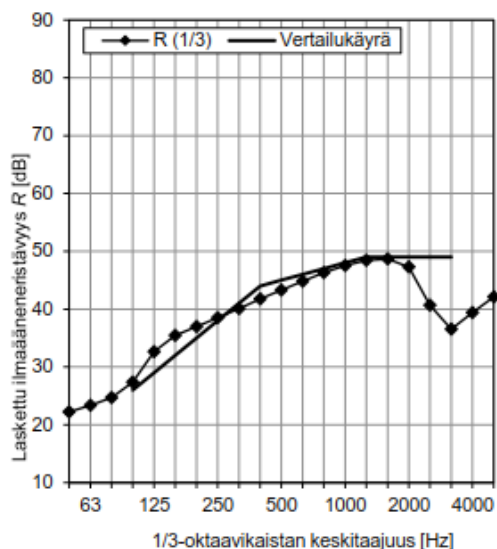
Kuva 2.9. Rangan paksuuden vaikutus kytketyn puurankaseinän ilmaääneneristävyyteen:

- Rakenne VS23 ($R_w = 39$ dB): kipsilevy N13, puuranka 44 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy N13
- Rakenne VS24 ($R_w = 40$ dB): kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy N13
- Rakenne VS19 ($R_w = 40$ dB): kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy N13
- Rakenne VS25 ($R_w = 40$ dB): kipsilevy N13, puuranka 147 mm k600 ja mineraalivilla, kipsilevy N13

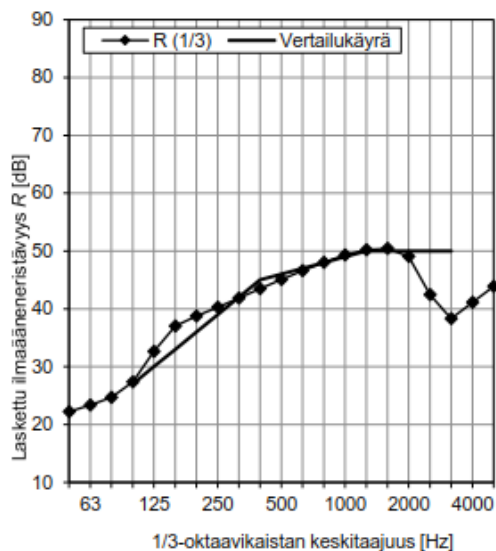
VS16



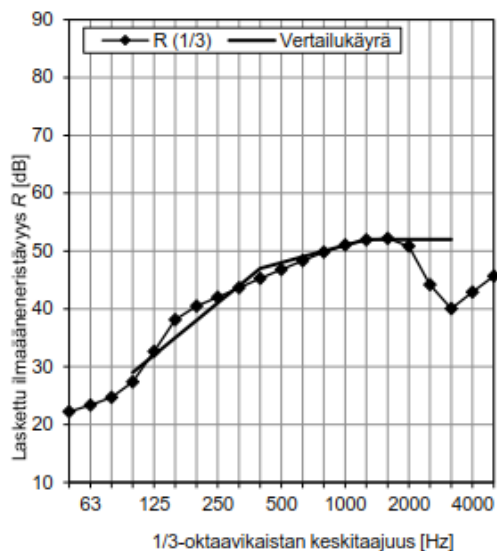
VS27



VS21



VS28



Kuva 2.10. Rangan k-jaon vaikutus kytketyn puurankaseinän ilmaääneneristävyyteen:

Rakenne VS26 ($R_w = 43$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k300 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

Rakenne VS27 ($R_w = 45$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k400 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

Rakenne VS21 ($R_w = 46$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

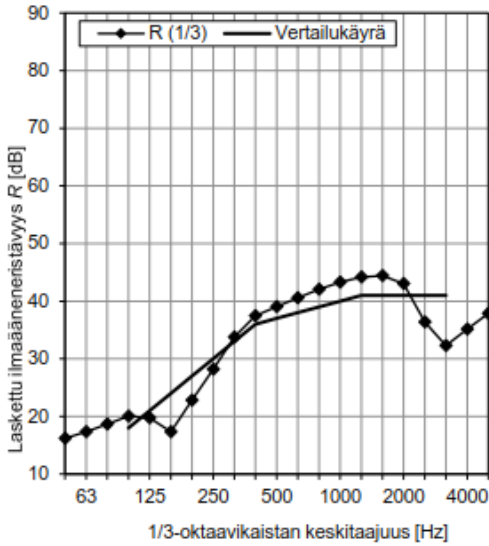
Rakenne VS28 ($R_w = 48$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 147 mm k900 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13

2.5.4 Ilmavälin täytön vaikutus kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyyteen

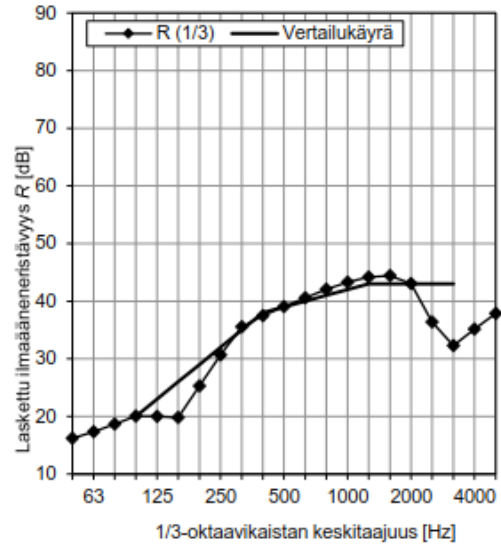
Kaksinkertaisen rakenteen ilmaväli täytetään tavallisesti kokonaan tai ainakin suurelta osin hyvin absorboivalla materiaalilla. Jos täyttöä ei ole, ilmaväliin syntyy kaiuntakenttä, joka heikentää rakenteen ilmasteneristävyyttä. Seinärakenteen pituus- ja korkeussuunnassa ilman ominaisvärähtelyiden alimmat ominaistajuudet ovat pieniä ja ilmavälin suunnassa suuria. Ilmavälin ominaisvärähtelyiden alimmat ominaistajuudet vastaavat aallonpituuksia, joiden puolikas on yhtä suuri kuin seinän ilmavälin leveys, korkeus tai paksuus.

Jos seinän leveys on 4 m, korkeus 2,5 m ja ilmavälin paksuus 150 mm, alimmat ominaistajuudet ovat vastaavasti 43 Hz, 68 Hz ja 1130 Hz. Ominaisvärähtelyitä esiintyy myös näiden taajuuksien monikerroilla, joten ilmavälin kaiunta vaikuttaa rakenteen ilmasteneristävyyteen koko taajuusalueella. Tavoiteltaessa hyvää ilmasteneristävyyttä kaiunta on aina poistettava täyttämällä kaksinkertaisen rakenteen ilmavälin paksuudesta vähintään puolet absorptiomateriaalilla, jonka absorptiosuhde α on 500 Hz ja korkeammilla taajuuksilla vähintään lähellä noin 0,9. Aivan täynnä absorptiomateriaalia ilmaväin ei tarvitse olla kuten kuvat 2.11. ja 2.12 osoittavat.

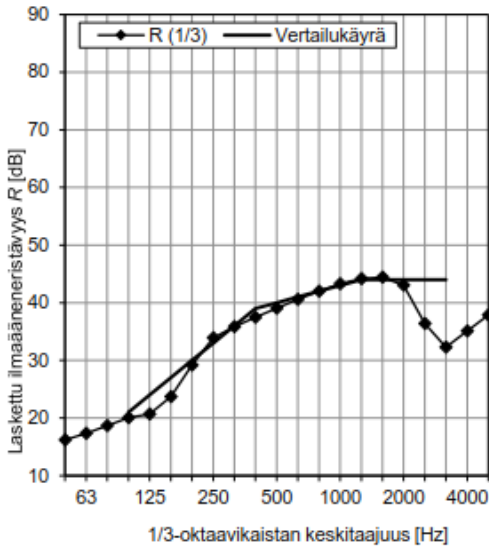
VS29



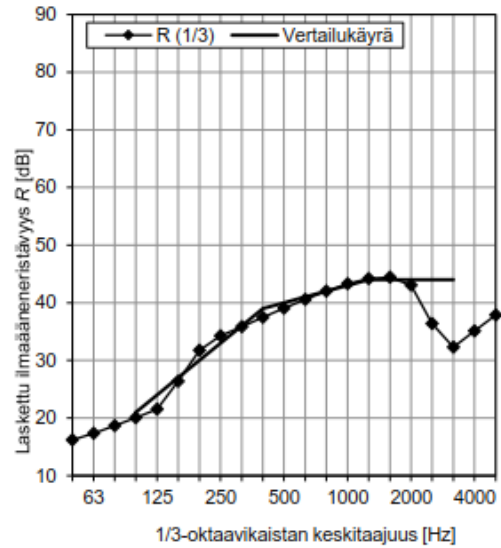
VS30



VS31



VS19



Kuva 2.11. Ilmajälin täytön vaikutus kytketyn puurankaseinän ilmajäänenestävyyteen:

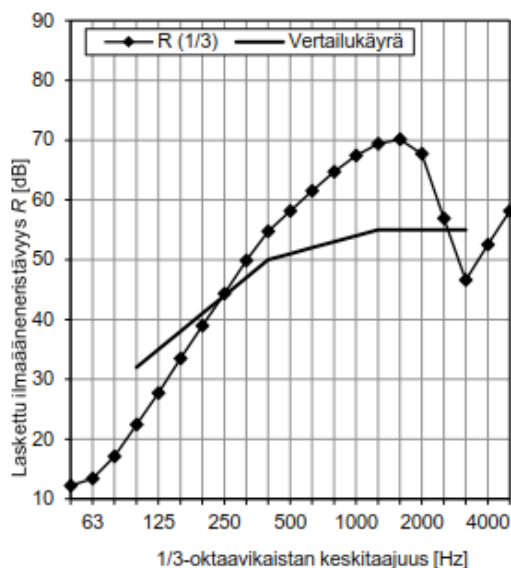
Rakenne VS29 ($R_w = 37$ dB): kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja tyhjä ilmajäli, kipsilevy N13

Rakenne VS30 ($R_w = 39$ dB): kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla 20 mm, kipsilevy N13

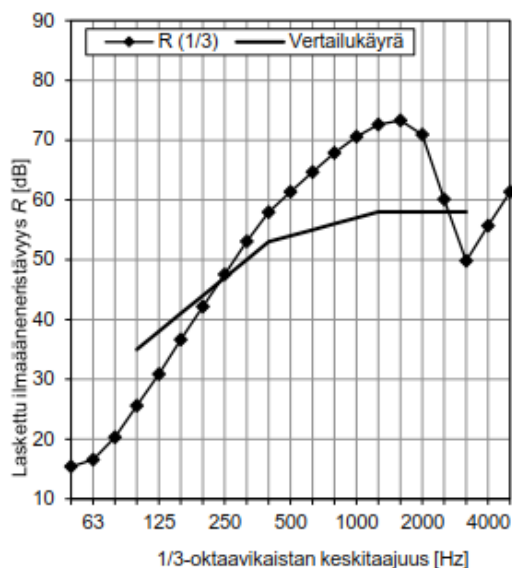
Rakenne VS31 ($R_w = 40$ dB): kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla 50 mm, kipsilevy N13

Rakenne VS19 ($R_w = 43$ dB): kipsilevy N13, puuranka 92 mm k600 ja mineraalivilla 92 mm, kipsilevy N13

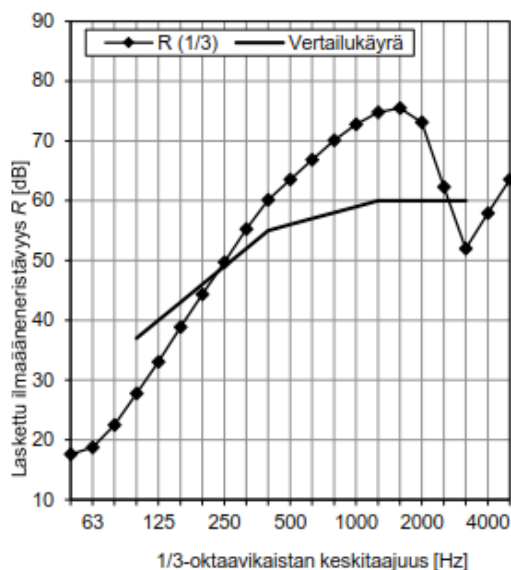
VS32



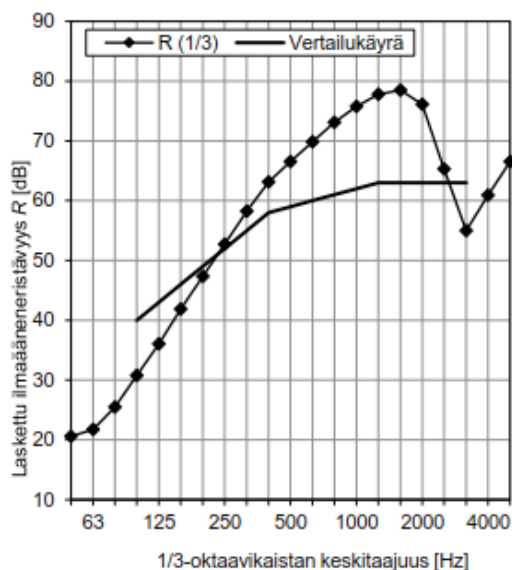
VS33



VS34



VS8



Kuva 2.12. Ilmavälin täytön vaikutus kaksirunkoisen puurankaseinän ilmaääneneristävyyteen:

Rakenne VS32 ($R_w = 51$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600, ei mineraalivillaa, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600, ei mineraalivillaa, 2 x kipsilevy N13

Rakenne VS33 ($R_w = 54$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla 20 mm, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600, mineraalivilla 20 mm, 2 x kipsilevy N13

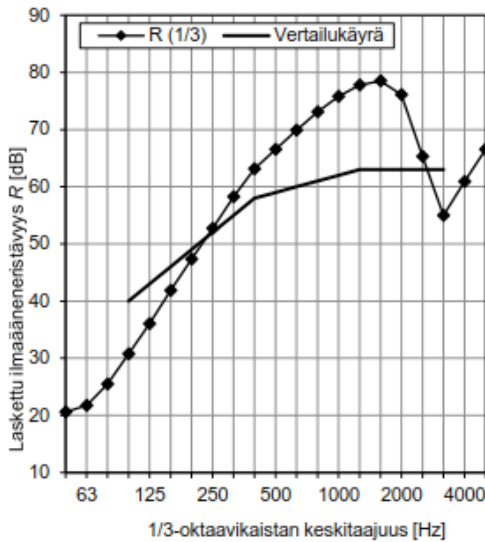
Rakenne VS34 ($R_w = 56$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla 66 mm, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600, ei mineraalivillaa 2 x kipsilevy N13

Rakenne VS8 ($R_w = 59$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla 66 mm, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla 66 mm, 2 x kipsilevy N13

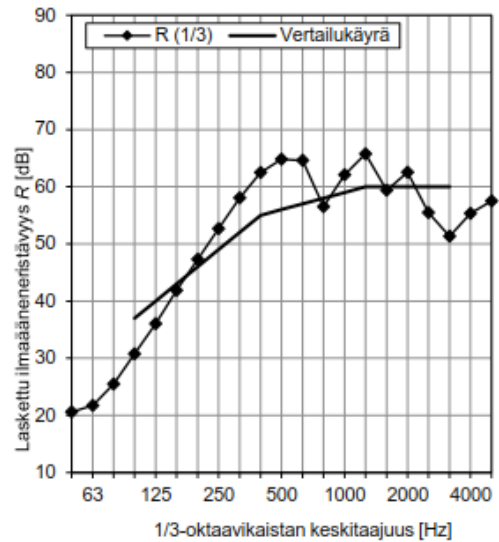
2.5.5 Tiiviyn vaikutus kaksinkertaisen puuseinän ilmaääneneristävyyteen

Puurakennuksissa liitosten suunnittelu ja rakentaminen oikein ovat keskeisiä seikkoja ääneneristävyyden kannalta. Liitoksiin liittyy monia akustisia seikkoja, joista yksi on tiiviys. Jo pienikin rako riittää pilaamaan huoneistojen väliseinän ilmaääneneristävyyden. Jälkeenpäin ääneneristystä alentavan raon löytäminen voi olla hankalaa, vaikka se ääneneristysmittausten perusteella on selvästi havaittu (kuvat 2.13 ja 2.14). Rakenteiden tiiviyyden on siten kiinnitettävä erityistä huomiota sekä suunnittelussa että rakentamisessa.

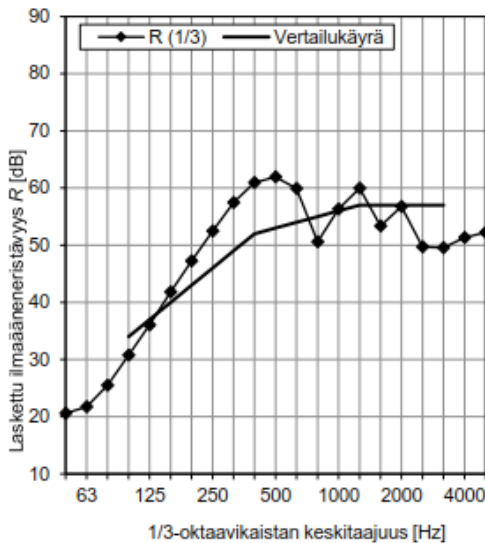
VS8



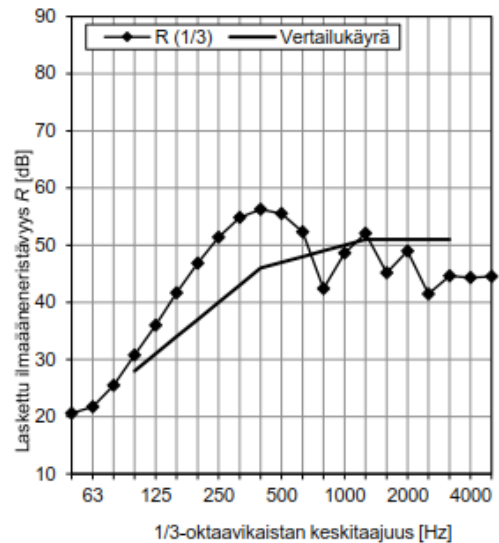
VS35



VS36



VS37



Kuva 2.13. Huoneistoja erottavan rankaväliseinän päätysaumassa olevan raon (korkeus 2,5 m) vaikutus ilmaääneneristävyyteen:

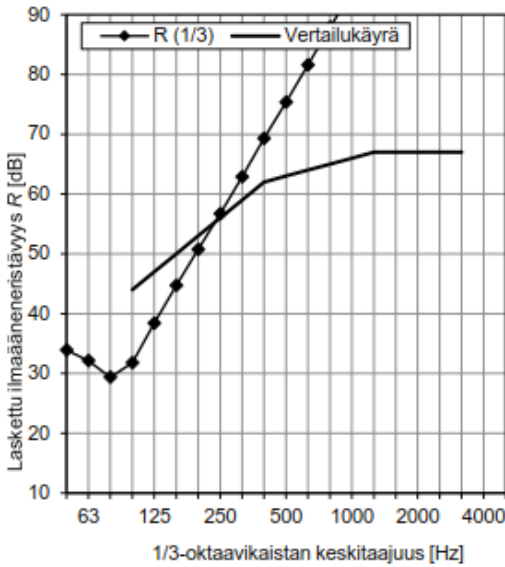
Rakenne VS8 ($R_w = 59$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13, ei rakoa

Rakenne VS35 ($R_w = 56$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13, raon leveys 0,1 mm

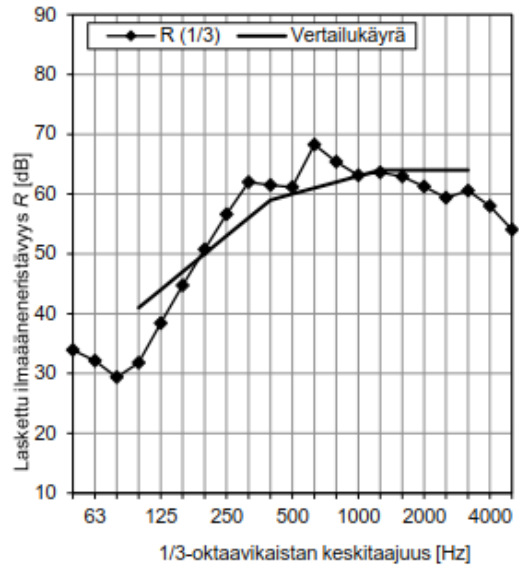
Rakenne VS36 ($R_w = 53$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13, raon leveys 0,2 mm

Rakenne VS37 ($R_w = 47$ dB): 2 x kipsilevy N13, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, ilmaväli 20 mm, puuranka 66 mm k600 ja mineraalivilla, 2 x kipsilevy N13, raon leveys 0,5 mm

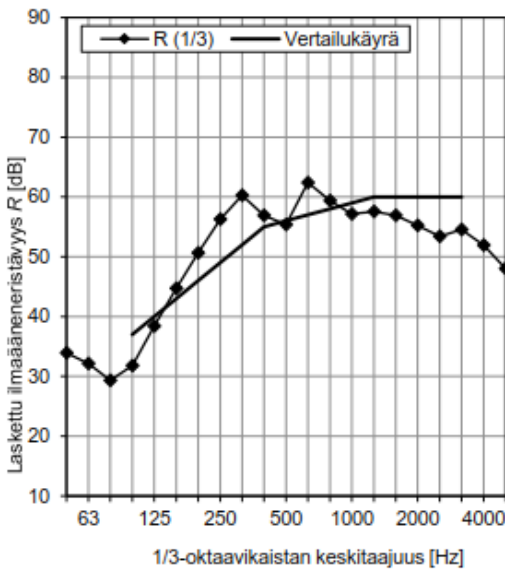
VS18



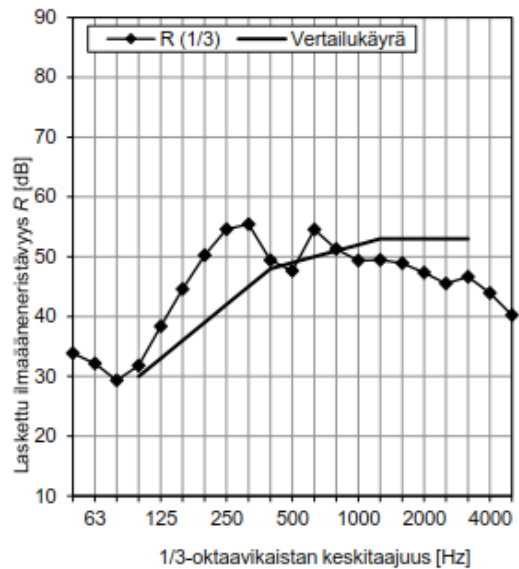
VS38



VS39



VS40



Kuva 2.14. Huoneistoja erottavan CLT-väliseinän päätysaumassa olevan raon (korkeus 2,5 m) vaikutus ilmaääneneristävyyteen:

Rakenne VS18 ($R_w = 63$ dB): kipsilevy N13 + F15, CLT 140 mm, ilmapäli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy N13 + F15, ei rakoa

Rakenne VS38 ($R_w = 60$ dB): kipsilevy N13 + F15, CLT 140 mm, ilmapäli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy N13 + F15, raon leveys 0,1 mm

Rakenne VS39 ($R_w = 56$ dB): kipsilevy N13 + F15, CLT 140 mm, ilmapäli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy N13 + F15, raon leveys 0,2 mm

Rakenne VS40 ($R_w = 49$ dB): kipsilevy N13 + F15, CLT 140 mm, ilmapäli 40 mm, jossa mineraalivillaa 40 mm, CLT 140 mm, kipsilevy N13 + F15, raon leveys 0,5 mm

3 Askelääneneristys

3.1 VÄLIPOHJAN MERKITYS

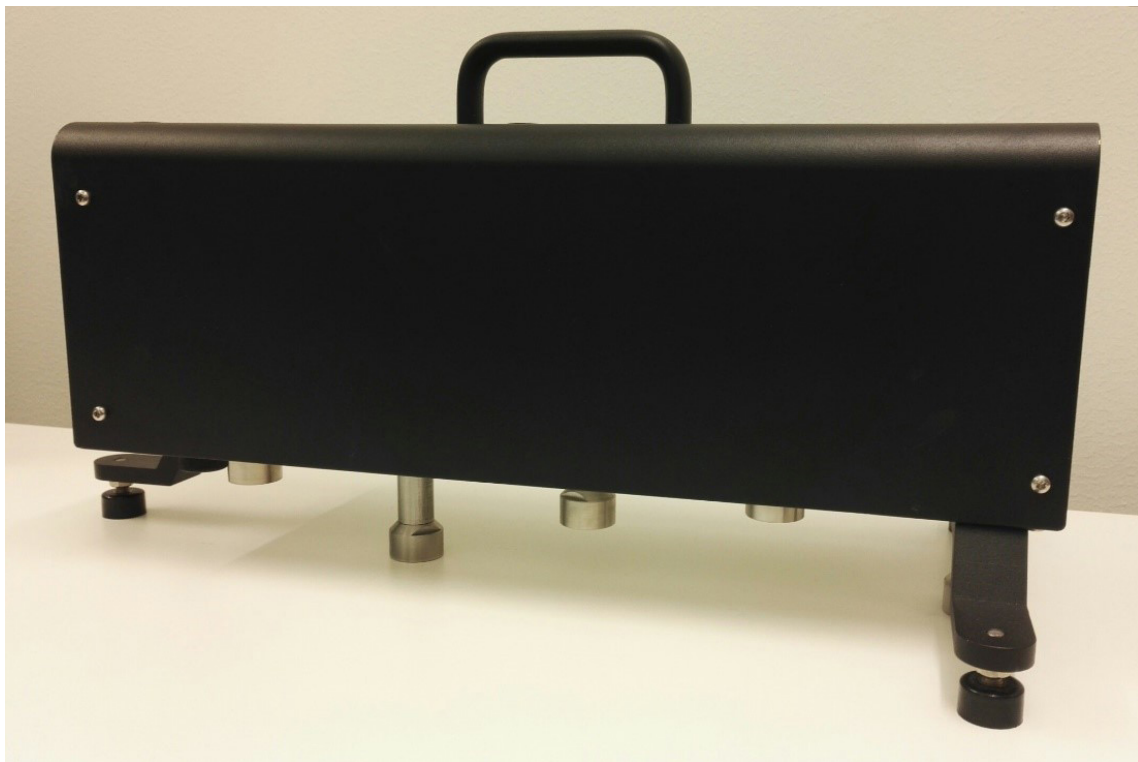
Puuvälipohja on puukerrostalon rakennusosista se, johon kohdistuu eniten erilaisia vaatimuksia: rakentamismääräykset koskevat puuvälipohjan kantavuutta, taipumaa, värähtelyä, palonkestoa ja tiiviyyttä, ilmaaneneristävyyttä ja askelääneneristävyyttä. Käytännössä välipohjarakenteesta suureksi osaksi riippuu puukerrostalon kilpailukyky betonirakenteisiin kerrostaloihin verrattuna. Siten juuri välipohja on rakennusosa, johon liittyy runsaasti kehittämistarpeita. Käytännössä ne koskevat akustiikan osalta askelääneneristävyyttä, sillä tavallisesti välipohja, joka täyttää askelääneneristysvaatimukset, täyttää samalla myös ilmaaneneristysvaatimukset.

Kerrostaloissa asumismelulähteistä askelääni, joka kuuluu toisista asunnoista, koetaan kaikkein häiritsevimpänä melulähteenä [4, 19, 33, 34, 57]. Askeläänit ovat kävelystä, esineiden putoilemisesta, huonekalujen siirtelystä ja muista vastaavista tapahtumista syntyviä runkoääniä. Runkoääni syntyy siten, että tavalla tai toisella iskun saanut rakenne saa ympärillään olevan ilman värähtelemään, jolloin isku havaitaan rakenteen toisella puolella ilmaääninä [41]. Erityyppisistä askeläänilähteistä lasten juoksemisen ja yleisesti kävelyn on havaittu olevan häiritsevimpiä askeläänilähteitä [35, 61].

Puuvälipohjat ovat kevyitä verrattuna betonivälipohjiin ja ne sisältävät yleensä useita erilaisia rakennekerroksia. Rakenteiden monimutkaisuuden vuoksi puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentaan ei ole nykyisellään saatavissa laskentamalleja ja askelääneneristävyyden arviointi perustuu suurelta osin kokemuseräiseen tietoon. Massiivivälipohjien askelääneneristävyyden laskentaan on olemassa laskentamalleja, mutta ne soveltuvat heikosti puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin [59].

3.2 ASKELÄÄNITASOJEN MITTAAMINEN

Askelääneneristävyyttä voidaan ilmaääneneristävyyden tavoin arvioida sekä laboratoriossa että kenttämittauksin valmiissa rakennuksissa. Laboratoriomittauksin saadaan tietoa yksittäisten rakenteiden askelääneneristyskyvystä. Rakennuksessa äänen siirtyminen rakennuksen tilasta toiseen tilaan on monimutkainen ilmiö, johon sisältyy äänen siirtyminen suoraan tiloja erottavan rakenteen kautta sekä kaikkien muiden reittien kautta sivutiesiirtymänä. Rakentamismääräykset koskevat askelääneneristystä valmiissa rakennuksessa. Se voidaan varmuudella selvittää vain kenttämittauksin rakennuksessa. Äänilähteenä käytetään standardisoitua askeläänikojetta (kuva 3.1) ja mittaukset tehdään standardin SFS-EN ISO 16283 mukaisesti. Kenttämittausten toteuttamisesta on annettu ohjeet standardissa SFS-EN ISO 16283 [89].



Kuva 3.1. Askelääneneristävyyden mittauksissa äänilähteenä käytettävä askeläänikoje pudottaa viittä metallilieriötä (massa 500 g) lattiaan 40 mm korkeudelta kahdesti sekunnissa kutakin, jolloin rakenne saa 10 iskua sekunnissa.

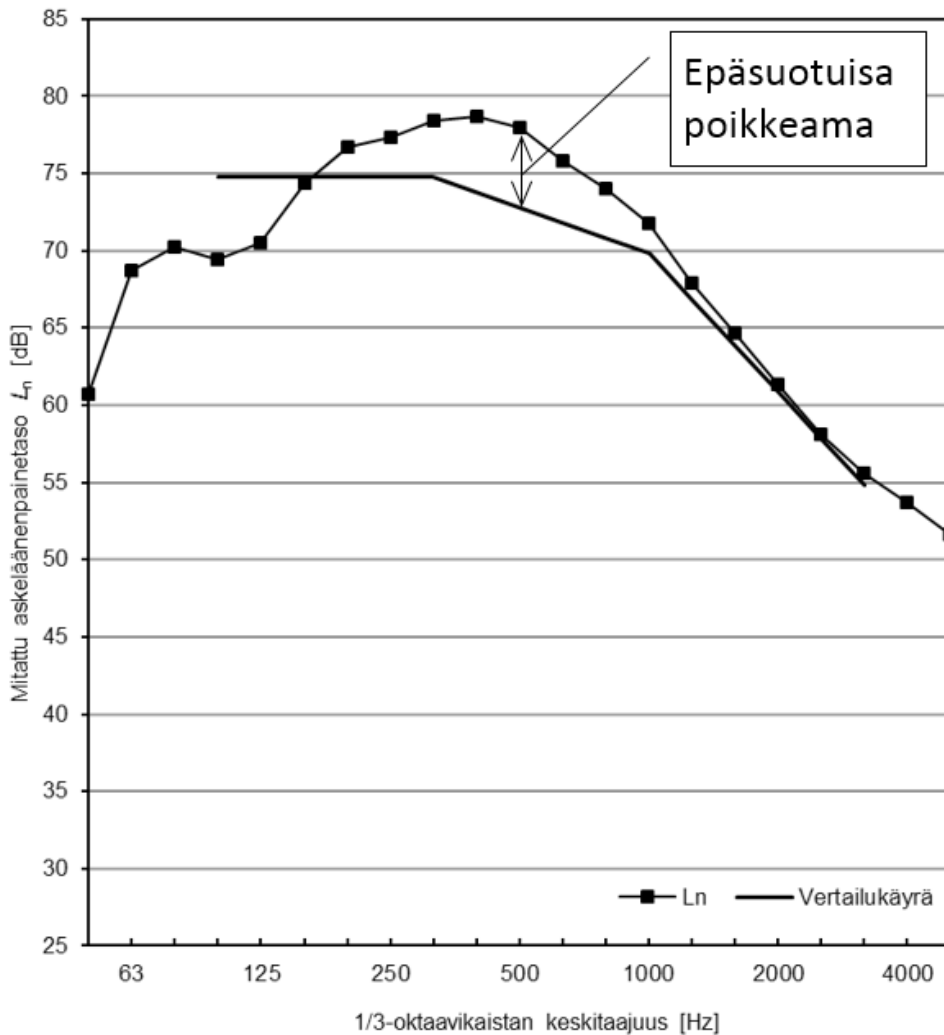
Askeläänikojeen aiheuttama äänenpainetaso vastaanottohuoneessa mitataan kolmannesoktaavikaistoittain 100–3150 Hz taajuusalueella. Äänenpainetasomittaus tehdään useasta pisteestä ja mitaustuloksista lasketaan energiakeskiarvo. Rakenteen askelääneneristyskyky on sitä parempi, mitä alhaisempia mitatut äänenpainetasot ovat. Askeläänitasomittauksen yhteydessä mitataan myös vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T [s], sillä se vaikuttaa huoneeseen muodostuvaan äänenpainetasoon: kalustetussa huoneessa äänenpainetasot ovat pienempiä kuin kalustamattomassa. Rakentamismääräyskokoelmassa esitetyt vaatimukset koskevat lähinnä kalustettua huonetta. Askelääneneristävyyden laskennassa mitatut äänenpainetasot normalisoidaan jälkikaiunta-ajan ja huoneen tilavuuden perusteella lasketun huoneen absorptioalan avulla. Vertailuabsorptioalana käytetään 10 m^2 , joka vastaa puolen sekunnin jälkikaiunta-aikaa huoneessa, jonka tilavuus on 30 m^3 . Normalisoidut äänenpainetasot esitetään kolmannesoktaavikaistoittain taajuusalueella 100–3150 Hz (kuva 3.2). Rakenteen askelääneneristävyys on sitä parempi, mitä pienempiä askeläänitasot 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 päivittäistavara-kauppa, askelääneneristystä voidaan mitata niin, että askeläänikoje on kaupassa ja äänenpainetasot mitataan kaupan yläpuolella olevassa huoneistossa.

3.3 ASKELÄÄNITASOLUKU

Askelääneneristykseen mittaustulokset ja vaatimukset esitetään yksilukuarvona, askeläänitasolukuna [91]. Laboratoriossa mitatusta askeläänitasoluvusta käytetään merkintää $L_{n,w}$ ja rakennuksessa mitatusta merkintää $L'_{n,w}$. Yksilukuarvo helpottaa eri välipohjarakenteiden askelääneneristykseen vertailemista. Yksilukuarvon laskemiseksi eri taajuuksilla mitattuja askeläänepainetasoja verrataan vertailukäyrään siten, että vertailukäyrää siirretään 0,1 dB tai 1 dB portain sellaiseen asemaan, että taajuuskaistoittain mitattujen askeläänitasojen epäsuotuisten poikkeamien summa vertailukäyrän arvoihin on enintään 32 dB. Vertailukäyrä on esitetty standardissa SFS-EN ISO 717-2 [91]. 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.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 [97] mukaan suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ mitattuna asuinhuoneistoista toiseen asuinhuoneistoon on 53 dB. Askeläänitasoluvun suurin sallittu arvo mitattuna porrashuoneesta asuinhuoneistoon on 63 dB. Porrashuoneesta sallittu 10 dB suurempi arvo perustuu siihen, että porrashuoneissa oleskellaan rajallinen aika, joten melurasitus asuinhuoneistoihin on alhaisempi. Toisaalta porrashuoneen lattianpäällysteet edellyttävät suurempaa kosteuden ja epäpuhtauksien kestävyyttä kuin asuinhuoneiden lattianpäällysteet, joten käytännössä olisi vaikeaa tehdä porrashuoneeseen yhtä joustavia päällysteitä kuin asuinhuoneisiin.

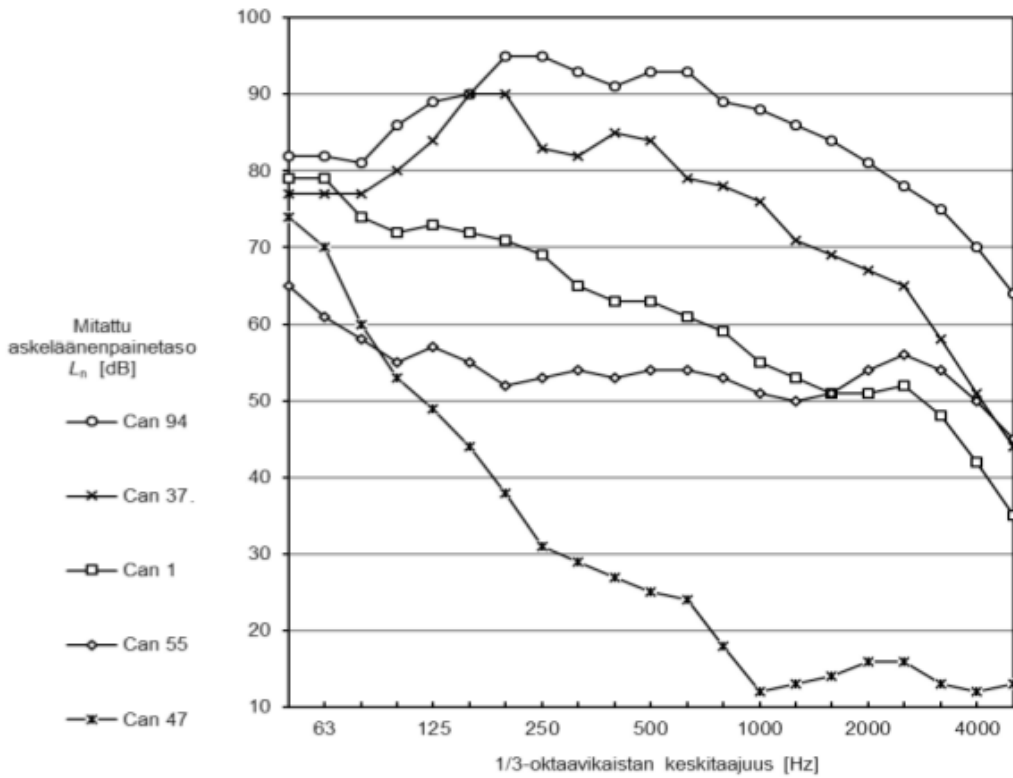


Kuva 3.2. Kuvaajassa on esitetty erään puuvälipohjan askelääneneristävyyden mittaustulokset 1/3-oktaavikaistoittain sekä standardin ISO 717-2 mukainen vertailukäyrä. Mittaus tehtiin laboratorioissa. Vertailukäyrää on siirretty siten, että mittaustulosten ja vertailukäyrän epäsuotuisien poikkeamien summa on alle 32 dB. Askeläänitasoluku $L_{n,w}$ luetaan vertailukäyrältä 500 Hz taajuudelta. Tässä tapauksessa $L_{n,w}$ on 73 dB.

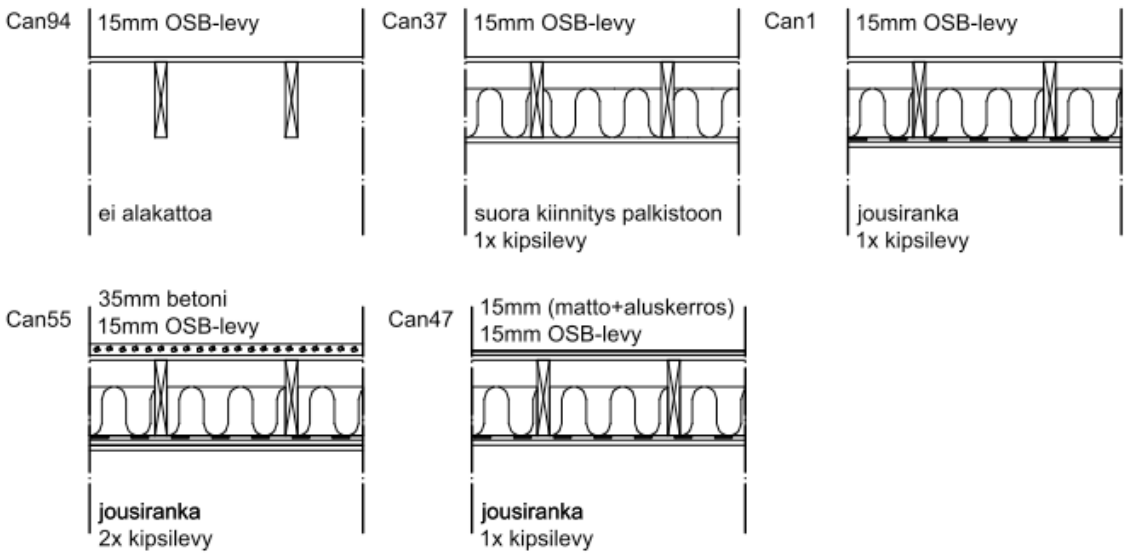
3.4 PUUVÄLIPOHJAN ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN MUODOSTUMINEN

Askeläänilähde aiheuttaa välipohjan pintaan iskuja, jotka saavat välipohjan rakenteet värähtelemään. Värähtely etenee välipohjan rakennekerrosten ja kantavien ripojen tai palkkien kautta ja siirtyy välipohjan toisella puolella ilmaan. Ilman värähtely aistitaan äänenä, josta tässä tapauksessa käytetään nimitystä askelääni. Se, miten värähtely etenee välipohjassa, riippuu välipohjan rakennekerroksista ja niiden välisistä kytkennöistä. Värähtely voi edetä rakenneosissa runkoäänenä tai rakenteen sisällä olevassa ilmatilassa ilmapölyäänä. Puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyden suunnittelussa tulee hahmottaa värähtelyn merkittävimmät kulkureitit ja vaimentaa ne niiden merkittävyyssjärjestyksessä. Seuraavassa on esitetty mittaustulosten avulla esimerkki eri rakenneratkaisuiden vaikutuksesta välipohjan askelääneneristävyyteen. Myöhemmin kappaleessa 3.5 on käsitelty tarkemmin puuvälipohjien eri rakenneosien ja rakenneratkaisuiden vaikutusta askelääneneristävyyteen. [58]

Kuvien 3.3 ja 3.4 avulla on nähtävissä, miten eri rakenneratkaisut vaikuttavat välipohjan askelääneneristävyyteen. Ylimpänä käyränä kuvan 3.3 kuvaajassa on niin sanottu raakavälipohjarakenne, joka koostuu pelkästä lattialeevystä ja palkistosta (rakenne Can 94). Tällä rakenteella on erittäin heikko askelääneneristävyys.



Kuva 3.3. Yhteenveto eri rakennekerrosten vaikutuksesta puuvälipohjan askelääneneristävyyteen [58, 106]



Kuva 3.4. Kuvan 3.3. rakenteiden rakennetyypit [58].

Vertaamalla rakenteiden Can 37 ja Can 1 askeläänitasoja raakaväli pohjarakenteeseen havaitaan, että alakaton kiinnitystavalla on merkittävä vaikutus välipohjan askelääneneristävyyteen. Rakenteessa Can 37 alakatto on kiinnitetty suoraan kantaviin palkkeihin ja rakenteessa Can 1 alakattolevyjen ja palkkien välissä on joustava alakattoranka. Rakenne Can 1 (joustava) parantaa askelääneneristävyyttä huomattavasti enemmän kuin Can 37 (jäykkä).

Väli pohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavat myös eri rakennekerrosten massat. Vertaamalla rakenteiden Can 94 ja Can 55 askelääneneristävyyksiä havaitaan, että rakennekerrosten massan lisääminen parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä. Tästä syystä massiiviväli pohjilla, kuten betonilaatoilla, saavutetaan usein hyvä askelääneneristävyys, kun ne on päällystetty joustavalla lattianpäällysteellä. Yksi puurakentamisen kilpailueduista massiivirakenteisiin nähden on rakenteiden keveys, joten välipohjan massan merkittävä lisääminen ei ole mielekästä. Kuten kuvan 3.3 mittaustulokset esittävät, massan lisääminen parantaa askelääneneristävyyttä erityisesti pienillä taajuuksilla eli alle 100 Hz taajuusalueella.

Kuvan 3.3 mittaustulosten perusteella merkittävin parannus raakaväli pohjaan (Can94) nähden saavutetaan rakenteella Can47. Parannus on selitettävissä useilla rakennekerroksilla, jotka vaimentavat tehokkaasti värähtelyn etenemistä välipohjassa. Pehmeä lattianpäällyste vaimentaa askeläänilähteen tuottamaa iskuäly välipohjan pintaan. Useat levykerrokset ja joustavasti kiinnitetty alakatto vaimentavat tehokkaasti välipohjassa etenevää värähtelyä. Tämä Can47 mittaustulos osoittaa, että puuväli pohjan askelääneneristävyyttä on mahdollista parantaa lisäämättä välipohjan massaa merkittävästi.

3.5 PUUVÄLIPOHJAN ASKELÄÄNERISTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

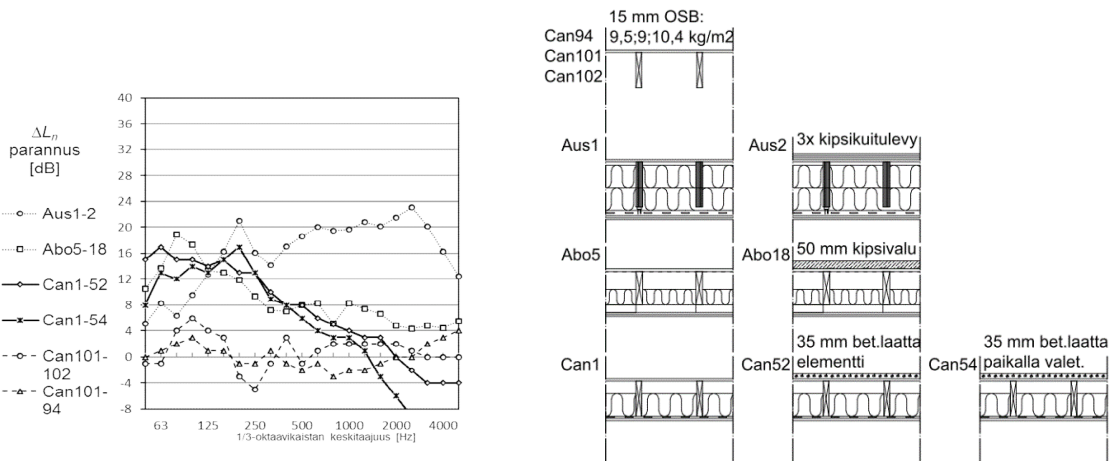
3.5.1 Väli pohjan massa

Väli pohjan massa on merkittävin askelääneneristävyyteen vaikuttava tekijä. Väli pohjan pintalaatan ja alakaton massan kasvattaminen parantaa rakenteen askelääneneristävyyttä, erityisesti alle 100 Hz taajuusalueella. Toisaalta puurakenteiden merkittävä etu perinteisiin massiivirakennetekniikoihin nähden

on juuri rakenteiden keveys [7, 11, 105]. Välipohjan massaa voidaan kasvattaa erilaisten laatta- ja levykerrosten. Työmaalla tehtävät valutyöt kuitenkin pidentävät kuivumisajan vuoksi rakennusaikaa työmaalla. Paikallavalurakenteita suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon myös rakentamisaikainen kosteudenhallinta. Mahdollisuutta saavuttaa korkea esivalmistusastetta pidetään myös puurakentamisen etuna perinteisiin massiivirakenteisiin nähden [3, 7, 11, 15, 93].

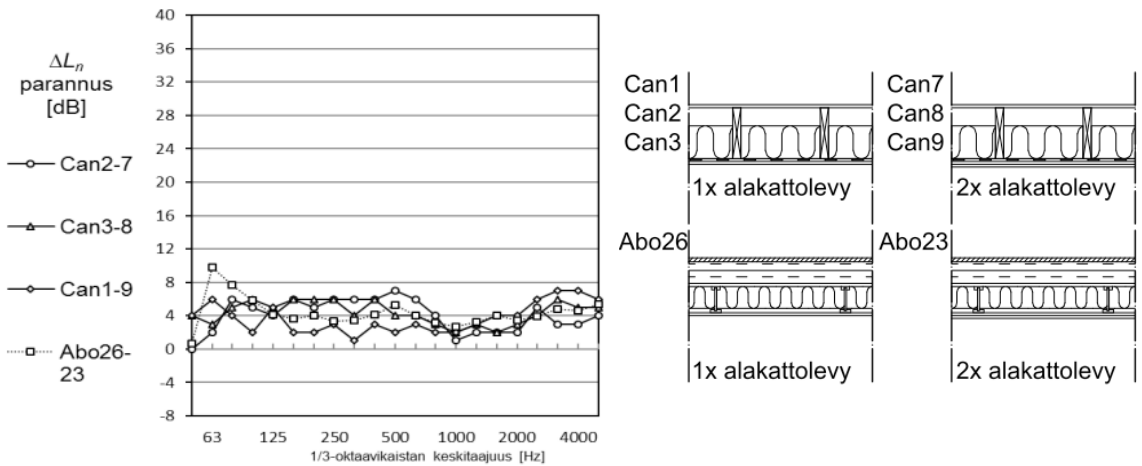
Puuvälipohjan välipohjapalkkien yläpuolinen rakenne koostuu yleensä yhdestä tai useammasta levy- tai laattakerroksesta. Päälystämättömän raakavälipohjan päälle voidaan valaa laatta esimerkiksi betonista tai kipsistä, kuten kuvan 3.5 rakenteissa Abo18, Can52 ja Can54 on tehty. Kuvassa 3.5 ja muissa kuvissa välipohjan muutoksen vaikutus on esitetty askelääneneristävyuden parannuksena ΔL_n eli muutetun ja alkuperäisen välipohjan askeläänitasojen erona. Kuten kuvassa 3.5 esitetyistä tuloksista voidaan havaita, ilman lattianpäällystystä ja kelluttavaa aluskerrosta asennetut raskaat pintalaatat parantavat askelääneneristävyttä erityisesti pienten taajuuksien alueella mutta yli 2000 Hz taajuusalueella ne heikentävät askelääneneristävyttä. Heikentyminen suurilla taajuuksilla johtuu siitä, että betoni- ja kipsilaatoissa suuritaajuihin värähtely herää merkittävästi [106] ja niiden sisäinen häviökerroin on pieni. Kuvan 3.5 kuvaajasta voidaan myös nähdä, että lattialevyn pintamassan pienet muutokset eivät vaikuta askeläänitasoihin.

Kuvan 3.5 käyrässä Aus1-2 on esitetty kipsikuitulevyjen kolminkertaistamisen vaikutus askeläänitasoihin. Mittaustulosten mukaan levyjen kolminkertaistaminen parantaa askelääneneristävyttä koko taajuusalueella vähintään 10 dB. Tämä ilmiö perustuu siihen, että levykerrosten välissä tapahtuu merkittäviä värähtelyhäviöitä, jotka vähentävät alapuoliseen rakenteeseen siirtyvää värähtelyä.



Kuva 3.5. Välipohjan massan vaikutus ja rakennetyypit [58].

Välipohjan kokonaismassaa voidaan kasvattaa myös lisäämällä alakattorakenteen massaa. Kuvan 3.6 kuvaajissa on esitetty alakattolevyjen kaksinkertaistamisen vaikutus askeläänitasoihin. Kuvan 3.6 rakenteissa alakattolevy oli kiinnitetty välipohjapalkkistoon joustavasti akustisella jousirangalla. Se, että levyjen kaksinkertaistus ei paranna askelääneneristävyttä 1000 Hz taajuusalueella, johtuu alakattolevyjen koinsidenssin rajataajuudesta [2]. Koinssidenssin rajataajuus riippuu levyn taivutusjäykkyudesta, paksuudesta ja massasta [13].

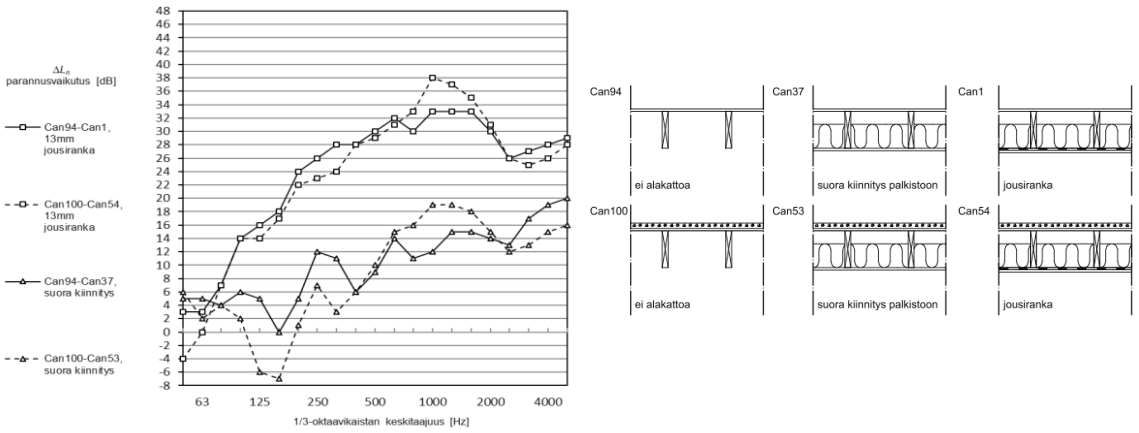


Kuva 3.6. Alakattolevyn kaksinkertaistamisen vaikutus askeläänitasoihin [2, 58, 106] ja koerakenteiden rakennetyypit [58]. Alakatot oli kiinnitetty joustavasti.

3.5.2 Alakatto

Puuvälipohjien askelääneneristävyys perustuu massan lisäksi rakennekerrosten kytkennöissä ja liitoksissa tapahtuviin värähtelyhäviöihin [4, 11, 69]. Joustavat kytkennät ja kerrokset vaimentavat välipohjassa etenevää askeläänierätteestä aiheutuvaa värähtelyä. Alakaton liitos palkistoon ja kelluva pintalaatan alla oleva joustava kerros ovat merkittävimpiä joustavia liitoksia puuvälipohjissa [58].

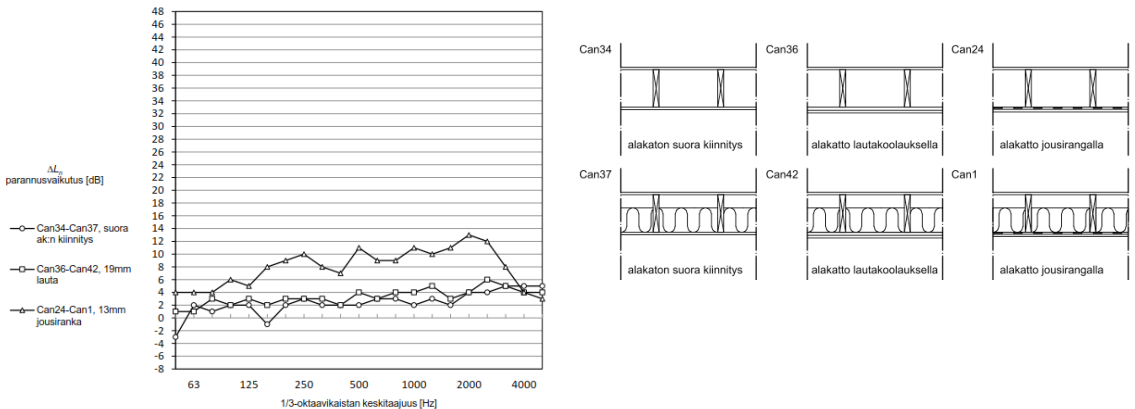
Alakattolevy voidaan kiinnittää suoraan kantavien välipohjapalkkien alapintaan tai joustavasti: esimerkiksi tärinäneristimillä tai jousirangoilla. Jousirankojen haasteena voitaneen pitää niiden asennusteknistä toimivuutta. On esitetty [Bradley 2001], että palkkien kautta kulkeva runkoääni on merkittävin äänenkulkureitti, kun palkkien korkeus on yli 200 mm. Kantavissa puuvälipohjissa palkit ovat pääsääntöisesti yli 200 mm korkeita. Kuten kuvan 3.6 tuloksista voidaan havaita, alakaton kiinnitys joustavasti jousirangoilla parantaa askelääneneristävyyttä huomattavasti enemmän kuin alakaton suora kytkentä. Kun alakatto on kiinnitetty joustavasti palkkeihin, värähtelyn eteneminen palkeista alakattoon heikkenee merkittävästi ja välipohjan askelääneneristävyys paranee.



Kuva 3.7. Alakaton kiinnityksen vaikutus askeläänitasoihin [106] ja koerakenteiden rakennetyypit [58].

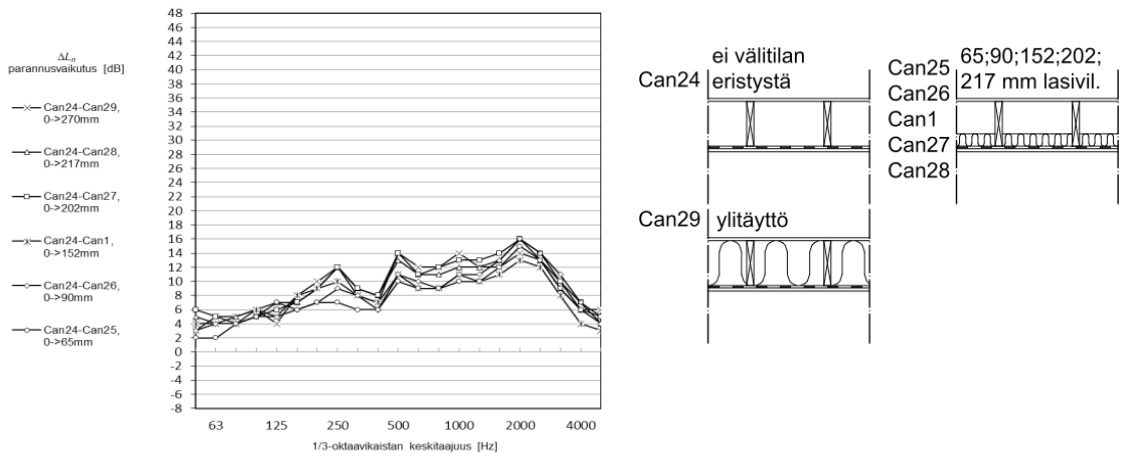
3.5.3 Absorptiomateriaali välipohjan sisällä

Puuvälipohjan palkkien välissä on usein ilmatila, jossa askelherätteestä syntyvä ääni etenee ilmaäänenä. Kuten alakattojen yhteydessä todettiin, palkkeja pitkin etenevä runkoääni on merkittävä äänenkulkureitti puuvälipohjassa. Kun tämä reitti vaimennetaan, muodostuu välipohjan ilmatilassa kulkeva ilmaääni kriittiseksi äänenkulkureitiksi. Tämä ilmiö on nähtävissä kuvassa 3.7 esitetyistä mittaustuloksista: kun alakatto on kytketty suoraan välipohjapalkkien alapintaan, absorptiomateriaalin lisääminen ei juuri paranna välipohjan askelääneneristävyyttä. Jos alakatto on kiinnitetty joustavasti palkistoon, absorptiomateriaalin lisääminen parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä merkittävästi.



Kuva 3.8. Absorptiomateriaalin lisäämisen vaikutus alakaton erilaisilla kytkentätyypeillä [58, 106].

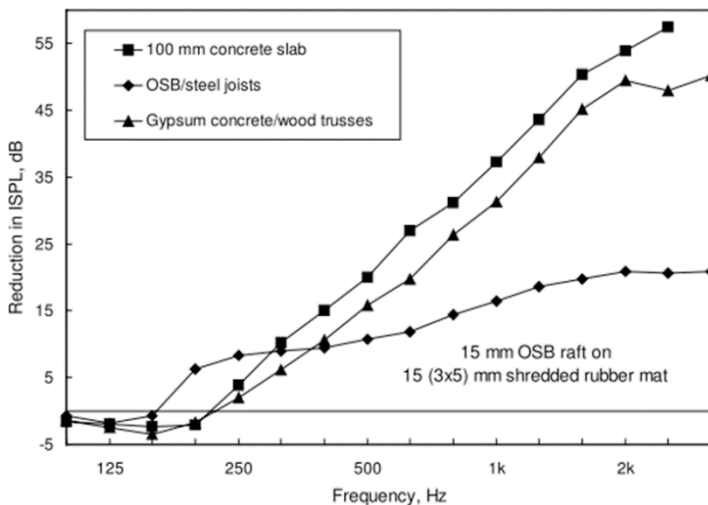
Absorptiomateriaalin askelääneneristävyyden parannusvaikutus perustuu siihen, että se vaimentaa tehokkaasti ilmatilassa kulkevaa ääntä, erityisesti ilmatilaan syntyviä seisovia aaltoja. Kuvassa 3.8 on esitetty eri paksuisten lasivillakerrosten vaikutus puuvälipohjan askelääneneristävyyteen. Kuvan 3.8 tulokset osoittavat, että ohutkin absorptiomateriaalikerros parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä merkittävästi. Toisaalta mittaustulokset osoittavat myös, että välipohjan täyttäminen kokonaan villalla ei merkittävästi paranna sen askelääneneristävyyttä verrattuna pienempään täyttöasteeseen.



Kuva 3.9. Välipohjan sisällä olevan absorptiomateriaalin paksuuden vaikutus mitattuihin askeläänitasoihin [106] ja koerakenteiden rakennetyypit [58].

3.5.4 Kelluva lattia

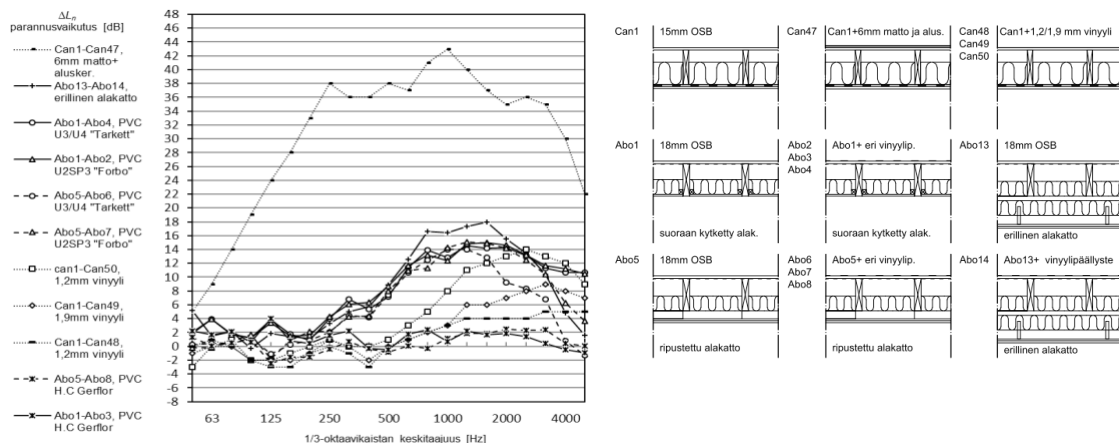
Tutkimusten mukaan kelluva lattia parantaa puuvälipohjan askelääneneristävyyttä erityisesti silloin, kun pintalaatta on raskas, sillä kelluttava kerros estää tehokkaasti suuritaajuisten värähtelyn etenemisen pintalaatasta muuhun välipohjarakenteeseen. Pintalaatan massa itsessään parantaa välipohjan eristävyyttä pienillä taajuuksilla. Rakenne, jonka päälle kelluva pintalaatta asennetaan, vaikuttaa kelluvan lattian tuottamaan askelääneneristävyyden parannusvaikutukseen (kuva 3.9), erityisesti rakenteen jäykkyys [106]. Standardissa EN 12354-2 [86] esitetty laskentamalli kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannusvaikutuksen laskentaan soveltuu vain raskaille välipohjille, sillä laskentateoria olettaa, että varsinainen välipohjarakenne on äärettömän jäykkä [58, 86, 106]. Paksu betonilaatta voidaan olettaa äärettömän jäykäksi mutta palkkirakenteiselle välipohjalle oletus ei päde [107].



Kuva 3.10. Erilaisten levykerrosten päälle asennetun samanlaisen kelluvan lattian parannusvaikutus eri lattiatyypeillä [107].

3.5.5 Lattianpäällyste

Lattianpäällyste valitaan usein arkkitehtonisin perustein, mutta sen avulla voidaan vaikuttaa myös välipohjan askelääneneristävyyteen. Lattianpäällysteen askelääneneristystä parantava vaikutus perustuu siihen, että se vaimentaa välipohjaan kohdistuvaa askelherätettä. Näin ollen vaimennusvaikutus ei kohdistu vain yhteen vaan kaikkiin välipohjan äänenkulkureitteihin [28]. Yleisessä käytössä olevien lattianpäällysteiden parannusvaikutus puuvälipohjilla alkaa noin 250 Hz taajuudelta [15, 95, 106], mikä on havaittavissa myös kuvien 3.10 ja 3.11 kuvaajista. Kuten kappaleessa 3.5.1 todettiin, pienten taajuuksien askelääneneristävyyden riippuvainen pääasiassa välipohjan alakaton ja pintalattian yhteismassasta.



Kuva 3.11. Erilaisille puuvälipohjille asennetun lattianpäällysteen parannusvaikutus [2, 106].

Standardeissa SFS-EN ISO 10140-1 ja SFS-EN ISO 10140-5 [87, 88] on esitetty mittausten menetelmä lattianpäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutukselle. Parannusvaikutus ΔL määritetään laskemalla erotus askeläänitasoluvalle lattianpäällysteen kanssa ja ilman lattianpäällystettä. Standardissa on esitetty mittausten menetelmä sekä betoni- että puuvälipohjalle. Puuvälipohjasta on esitetty kolme erilaista versiota. [87, 88] Massiivi- ja kevytvälipohjille on esitetty eri rakenteet, sillä lattianpäällysteiden parannusvaikutus eri tyyppisillä välipohjilla on erilainen eikä betonivälipohjille määritettyjä askelääneneristävyyden parannuslukuja ΔL voida käyttää puuvälipohjilla.

Lattianpäällystevalmistajilla on toistaiseksi varsin niukasti tietoa päällysteiden toiminnasta puuvälipohjilla. Lattianpäällysteiden parannusvaikutuksen arviointi perustuu tällä hetkellä yksittäisistä kohteista saatuihin mittauksituloksiin [58].

3.5.6 Vähäisemmät puuvälipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät

Laajassa kirjallisuustutkimuksessa [58] selvitettiin, mitkä rakenteelliset tekijät vaikuttavat palkkirakenteisen puuvälipohjan askelääneneristävyyteen. Seuraavilla tekijöillä ei nykyisen tutkimustiedon perusteella ole merkittävää vaikutusta puuvälipohjan askelääneneristävyyteen:

- palkkien pituus ja välipohjan pinta-ala vaikuttavat sivutiesiirtymiin, mutta eivät pelkän välipohjan askelääneneristävyyteen
- välipohjan taivutusjäykkyuden merkittävä kasvattaminen parantaa pienten taajuuksien askelääneneristävyyttä. Taivutusjäykkyyden muutoksen pitää kuitenkin olla merkittävä, jopa nelinkertainen. Sahatavarapalkkien korkeuden 1,6-kertaistaminen tuotti noin 4 dB parannusvaikutuksen 80–125 Hz taajuusalueella.
- kovan tai ohuen lattiapäällysteen asentaminen suoraan puisen lattialevyn päälle ilman joustavaa aluskerrosta ei paranna puuvälipohjan askelääneneristävyyttä
- pintalattian massan lisääminen paksuilla kipsi- tai betonilaatoilla ilman joustavaa kerrosta tai lattiapäällystettä voi heikentää askelääneneristävyyttä.
- välipohjapalkkien väliin jäävän ilmatilan täyttäminen kokonaan absorptiomateriaalilla ei vaikuta välipohjan askelääneneristävyyteen
- ilman alakaton joustavaa kiinnitystä välipohjan sisällä olevalla absorptiomateriaalilla ei ole vaikutusta askelääneneristävyyteen

4 Runkojärjestelmät ja sivutiesiirtymät

4.1 ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄ

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 [96] esitetyt ääneneristysvaatimukset koskevat ääneneristävyttä rakennuksessa asuinhuoneistojen välillä. Rakennuksessa saavutettava ääneneristävyys riippuu ensinnäkin äänen siirtymisestä asuinhuoneistosta toiseen suoraan niitä erottavan rakennusosan kautta ja lisäksi äänen kaikista muista kulkureiteistä. Ääni siirtyy tilasta toiseen vaakasuunnassa niitä erottavan väliseinän kautta, mutta myös ulkoseinän, käytäväseinän ja välipohjan sekä LVIS-järjestelmän kautta. Äänen siirtymistä tilasta toiseen muita reittejä kuin tiloja erottavan rakennusosan kautta sanotaan sivutiesiirtymäksi.

Rakenteellinen sivutiesiirtymä sisältää äänen sivutiereitit rakenteiden kautta. Rakenteellinen sivutiesiirtymä on keskeinen tekijä puukerrostalossa asuinhuoneistojen välillä saavutettavan ääneneristävyuden kannalta. Rakenteellisella sivutiesiirtymällä on yhteys puukerrostalon runkojärjestelmään ja ratkaisuihin, jotka ovat mahdollisia sivutiesiirtymän vähentämiseksi. Tavallisesti huoneistojen rajalla rakenteisiin järjestetään jokin joustava kerros. Seuraavassa kuvaillaan puukerrostalojen runkojärjestelmiä ääneneristävyyden, liitosten ja sivutiesiirtymän kannalta.

4.2 PUUKERROSTALON RUNKOJÄRJESTELMÄT

4.2.1 Tilaelementtijärjestelmä

Tilaelementein rakennetussa puukerrostalossa työmaalle tuodaan lähes valmiita asuntoja tai asunnon puolikkaita. Hyvin suunnitellussa ja kuivissa tehdasoloissa tehdyssä tilaelementissä kaikki pinnat, kiintokalusteet ja LVIS-järjestelmät ovat valmiiksi asennettuina ja työmaalle jää vain rakenteellisten ja taloteknisten liitosten teko [60].

Puukerrostalo-hankkeissa useissa kohteissa tilaelementtien kantavana rakenteena sekä seinissä että välipohjissa on käytetty CLT-levyä, joka toimii jäykistävänä levynä. Tilaelementtejä voidaan tehdä myös pystyrunkorakenteisina. Kummassakin tapauksessa ääneneristävyyden kannalta keskeistä on elementtien välisten liitosten toteuttaminen pysty- ja vaakasuunnassa. Koko rakennuksen jäykistämisen kannalta liitokset ovat ongelma, koska niiden tulisi olla joustavia mutta kuitenkin välittää vaakakuormia elementiltä toiselle.

Suuren koon vuoksi tilaelementtien asennus työmaalla vaatii järeämpää nostokalustoa kuin esimerkiksi pelkät seinä- tai välipohjaelementit [60]. Suurikokoista ja painavaa elementtiä on vaikeampaa käsitellä kuin pienempiä seinä- tai väliseinäelementtejä. Siten sivutiesiirtymien ja saavutettavan ääneneristävyyden kannalta on riskinä se, että tilaelementin asennuksen yhteydessä tärinäneristimet vaurioituvat, siirtyvät pois aiotuilta paikoiltaan tai ylikuormittuvat.

4.2.2 Suurelementtijärjestelmä

Suurelementtijärjestelmässä ulko- ja väliseinät toimivat pystykuormia kantavina ja jäykistävinä rakenteina. Seinäelementit voidaan toteuttaa rankarakenteisina tai CLT-runkoisina. Rankarakenteiset seinät jäykistetään levyrakenteilla. CLT-runkoisessa elementissä CLT-levy toimii jäykistävänä rakenteena. Välipohjan kantavana rakenteena ovat tavallisesti liima- tai viilupuuvasat tai ripalaatasto, jonka kansilevyllä on suuri merkitys välipohjan jäykkyyden kannalta [60].

Tilaelementtijärjestelmän tavoin sivutiesiirtymiä on suurelementtijärjestelmällä rakennetussa puukerrostalossa vähennettävä huoneistojen rajalle sijoitettavien tärinäneristinkaistoin. Ongelmana tässä järjestelmässä on se, että jäykistyksen edellyttämät vaakavoimat on saatava välitetyksi elementiltä toiselle, joten elementit sidotaan toisiinsa pystysuunnassa jäykin liittimin.

4.2.3 Pilari-palkkirunko

Pilari-palkkirungolla toteutetussa puukerrostalossa ei tarvita kantavia seinälinjoja. Kantavana runkona toimivat liima- tai viilupuiset pilarit ja palkit, joiden ympärille rakennetaan yleensä suurelementeistä seinät ja välipohja. Suurelementit eivät kuitenkaan välitä rakenteellisia pystykuormia, mutta voivat toimia jäykistävinä, vaakakuormia siirtävinä osina [60]. Toisaalta palkkien ja pilarien muodostamaan kehään on järjestettävissä jäykistyksen edellyttämää jäykkyyttä paljonkin, jolloin seinät voidaan liittää pilari-palkkirunkoon täysin joustavasti. Tämä on ääneneristävyyden kannalta edullista, ja sivutiesiirtymän vähäisyyden johdosta pilari-palkkirunkoisissa puukerrostaloissa on mitattu laboratoriomittaustuloksia vastaavia ilmaaneneristyslukuja ja askeläänitasolukuja [36].

4.3 SIVUTIESIIRTYMIEN VÄHENTÄMINEN

Väliseinien ja ulkoseinien liitoksissa välipohjiin tai toisiinsa tavoitteena on vähentää äänen siirtymistä liitoksen puolelta toiselle. Betonirakenteisissa asuinkerrostaloissa sivutiesiirtymän väheneminen perustuu liitoksen jäykkyyteen ja liittyvien rakennusosien massaan. Standardissa SFS-EN 12354-1 [85] on esitetty menetelmä, jolla voidaan yksinkertaisesti laskea tilojen välinen ilmaääneneristysluku tiloja erottavien ja sivuavien rakenteiden ilmaääneneristyslukujen sekä liitoksissa tapahtuvien häviöiden perusteella. Menetelmän mukaan liitoksessa tapahtuva häviö on yhtä paksujen betonirakenteiden T-liitoksessa 6 dB ja ristiliitoksessa 9 dB.

Puurakenteisten rakennusosien ilmaääneneristävyysien laskentamenetelmät ovat tällä hetkellä varsin tarkkoja (luku 2), joten tiloja erottavien ja sivuavien rakennusosien ilmaääneneristysluvut voidaan laskea. Sitä vastoin liitoksissa tapahtuvien häviöiden laskentaan ei ole toistaiseksi olemassa standardoitua tai muuta yleisesti hyväksyttyä menetelmää, sillä puurakenteiden käyttäytyminen on betonirakenteita monimutkaisempaa. Ulkomailla aihetta on lähestytty teoreettisesti laboratoriomittausten tukena [81] sekä tekemällä värähtelymittauksia rakennuksissa, jolloin on saatu liitoksissa tapahtuvat energiahäviöt eli värähtelytasojen erotukset selville taajuuden funktiona [94, 108, 109]. Värähtelytasojen erotuksista on Suomessa käytetty myös nimitystä liitoseristävyys [41]. Puurakenteiden liitoksissa, joissa on käytetty tärinäneristyskaistoja, on mitattu liitoseristävyksiä, jotka pienillä taajuuksilla (50–100 Hz) ovat luokkaa 10 dB ja kasvavat noin 5 dB taajuuden kaksinkertaistuessa noin 1000 Hz asti ja tämän jälkeen jopa yli 10 dB taajuuden kaksinkertaistuessa. Ongelmana tulosten käytännön soveltamisessa on se, että arvot riippuvat suuresti reitistä, jota tarkastellaan: esimerkiksi välipohjan ja väliseinän liitoksessa arvot ja niiden taajuuskäyttäytyminen ovat erilaisia kuin väliseinän ja ulkoseinän liitoksessa [94].

Suomessa puukerrostalojen liitosten suunnittelu perustuu paljolti mittaamalla saatua aineistoon sekä tärinäneristinkaistojen toimittajien ohjeisiin. Tärinäneristyskaistoilla saavutettava eristävyys perustuu niille tulevan kuormituksen aiheuttamaan painumaan. Tärinäneristinmateriaalien toimittajat ilmoittavat kaksi tärkeää kuormitusalueita:

- A) jännitys [MN/m^2], jolla eristimet toimivat optimaalisesti
- B) suurin sallittu jännitys [MN/m^2], jonka eristimet kestävät hetkellisesti ominaisuuksien muuttumatta

Tärinäneristinkaistojen valinta tarkoittaa sitä, että jokaiselle kantavalle seinälle tuleva viivakuorma on tunnettava jokaisessa kerroksessa. Näin ollen tärinäneristintien suunnittelu edellyttää rakennesuunnittelijan ja akustiikkasuunnittelijan tiivistä yhteistyötä. Tärinäneristinkaistojen mitoittamiseksi akustiikkasuunnittelija tarvitsee rakennesuunnittelijalta seuraavat tiedot:

- C) viivakuorma [kN/m] rakenteiden omasta painosta ja hyötykuormien pysyvästä osasta
- D) viivakuorma [kN/m] rakenteiden omasta painosta, hyötykuormien täydestä arvosta ja lumikuormasta

Kaikki kuormat ilmoitetaan ilman osavarmuuskertoimia, sillä tärinäneristinkaistojen mitoitus vertautuu käyttörajatilamitoitukseen.

5 LVIS-järjestelmät

5.1 LVIS-JÄRJESTELMÄT ÄÄNILÄHTEINÄ

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan rakennuksen LVIS-laitteita ovat esimerkiksi hissit, vesi- ja viemärilaitteet, kompressorit, ilmanvaihtolaitteet, jäähdytyslaitteet ja lämmityslaitteet. niihin rinnastetaan myös keskuspölynimuri, mattoimuri ja talopesulan laitteet, kuten pesukoneet, lingot, kuivauspuhaltimet ja mankelit [97]. LVIS-järjestelmät vaikuttavat rakennuksen ääniolosuhteisiin lähinnä kolmella tavalla [49]:

E) ilmanvaihtokoneiden puhaltimet saavat ilman pyörteilemään. Samoin ilman virtaus ilmanvaihtokanavistossa sekä pääte- ja säätölaitteissa synnyttää virtausääntä, joka siirtyy näistä äänilähteistä kanaviston kautta huonetiloihin. Ilmanvaihtojärjestelmän äänenkehitys voidaan hallita parhaiten valitsemalla puhaltimet ja kaikki ilmankäsittelyosat sekä kanavakoot oikein ja käyttämällä hyviä äänenvaimentimia. Myös vesi- ja viemärilaitteissa syntyy virtausääntä, mutta se aiheuttaa lähinnä runkoääntä, jota voidaan vähentää tärinäneristysten keinoin.

F) rakennuksen runkoon kiinnitetyt tekniset laitteet, joissa on liikkuvia osia, saavat rakenteet värähtelemään. näin syntynyt runkoääni etenee rakenteita pitkin ja saa ympäröivän ilman värähtelemään synnyttäen näin ilmaääntä. Tekniset laitteet edellyttävät lähes poikkeuksetta tärinäneristimiä.

G) ilmastointijärjestelmän kanavat, lämmitys- ja vesijärjestelmän putket ja muut vastaavat on johdettava konehuoneista rakennuksen muihin tiloihin. Jossain kohdassa ne on yleensä vietävä ääntä eristäväksi suunnitellun rakenteen läpi. Läpiviennit on suunniteltava sellaisiksi, että ne eivät heikennä rakenteiden ilma- tai askelääneneristyskykyä: niiden on oltava tiiviitä, eivätkä ne saa kytkeä kaksirunkoisten rakenteiden puoliskoja toisiinsa.

Rakentamismääräyskokoelmassa [97] äänitasoille määritetään kaksi sallittua arvoa, keskiäänitaso LA_{eq} ja enimmäisäänitaso LA_{max} . Kaikkien rakennusten LVIS-järjestelmiä koskee määräys, jonka mukaan rakennusta palvelevien tai rakennuksen LVIS-laitteiden aiheuttama keskiäänitaso LA_{eq} saa olla enintään 45 dB saman tai läheisen rakennuksen ikkunan ulkopuolella, parvekkeella, pihamaalla tai muussa vastaavassa paikassa asuinalueella ja muilla melulle herkillä alueilla. Rakennuksen sisällä sallittavat äänitasot on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Rakennuksen LVIS-laitteista asuinhuoneistoihin sallittavat keski- ja enimmäisäänitasot [97].

Tila	Keskiäänitaso LA_{eq}	Enimmäisäänitaso LA_{max}
Asuinhuoneissa	28 dB	33 dB
Keittiössä	33 dB	38 dB

5.2 ILMAÄNENERISTÄVYYS ILMANVAIHTOKANAVIEN KAUTTA

Tilojen välille vaadittavan ääneneristykseen saavuttamiseksi ei riitä pelkästään oikeiden rakennetyypin valinta ja niiden sekä liitosten huolellinen toteutus. Jo varsin pieni rako tiloja erottavassa seinä- tai välipohjarakenteessa riittää heikentämään ääneneristystä paljon. Rakennuksissa ilmanvaihtokanavien halkaisijat ovat vähintään 100 mm, joten on selvää, että kanavilla on suuri vaikutus tilojen väliseen ääneneristykseen.

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

Rakennusosien ilmaääneneristävyys tulee sivutiesiirtymien, mahdollisten työvirheiden ja muiden tekijöiden aiheuttamien heikennysten vuoksi aina valita jonkin verran paremmaksi kuin tilojen välille asetettu ilmaääneneristyslukuvaatimus. Jos ilmanvaihtokanavien sallitaan heikentävän ilmaääneneristystä 0,5 dB pelkästään rakennusosan tuottamaan ilmaääneneristykseen verrattuna, ilmaääneneristävyyden tai ilmaääneneristysluvun kunkin kanavan kautta tulee olla tiloja erottavan rakenteen arvoa vähintään [45]:

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

Jos samassa kanavassa on useita venttiileitä, kukin venttiili katsotaan aina yhdeksi kanavaksi, ja kanavien ääneneristys mitoitetetaan täyttämään edellä luetellut vaatimukset. erilaisten rakennusten suunnittelussa lähtökohdana tulee olla se, että tiloja erottavia ilmanvaihtokanavia ei voida toteuttaa ilman äänenvaimentimia, kun ilmääneneristyslukuksi tilojen välillä vaaditaan 40 dB tai enemmän. Ilmanvaihtokanavien ääneneristys on siten suunniteltava useimmissa muissakin rakennustyypeissä asuinrakennusten lisäksi.

Oppaassa RIL 243-1 [49] on esitetty menetelmä ilmanvaihtokanavien ääneneristyksen suunnittelemiseksi. Menetelmä perustuu siihen, että kulkiessa kanavistossa tapahtuu vaimenemista. esimerkiksi ääni vaimenee siirtyessään huonetilasta päätelaitteen kautta kanavaan. Kanavan ääneneristävyys muodostuu lisäksi äänitason jakautumisesta kanavan haaroissa syntyvästä vaimennuksesta, huoneita yhdistävässä kanavassa huoneiden välillä olevien äänenvaimentimien vaimennuksesta ja päätelaitteiden vaimennuksesta. Lisäksi vaimennusta syntyy kanavien mutkista sekä kanavan pituusyksikköä kohti. Ilmääneneristävyys kanavien kautta voidaan laskea taajuuskaistoittain ja lopuksi määrittää vertailukäyrämenettelyllä ilmääneneristysluku.

5.3 LVIS-LAITTEIDEN TÄRINÄNERISTYS

Kaikki rakenteisiin kiinnitetyt laitteet, joissa on liikkuvia tai pyöriviä osia, voivat aiheuttaa tärinää tai yleisemmin runkoääntä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi ilmanvaihtokoneet, jäähdytyskoneet, kompressorit, lauhduttimet, pumput, taajuusmuuttajat, sähkökäyttöiset ovet ja hissit. Myös viemärit ja vesijohdot synnyttävät runkoääntä. Monien laitevalmistajien ilmanvaihtokoneissa puhaltimilla on valmiiksi suunniteltu tärinäneristys ja tavallisesti koneen paineaukot on liitetty koneen vaippaan joustavilla liitosnauhoilla, jolloin koneiden runkoääneneristystä ei tarvitse erikseen suunnitella.

Koneiden tärinäneristyksestä on syytä koneita tilattaessa varmistua, sillä eri valmistajien suunnittelu- ja toimituskäytännöt ovat erilaiset. Ilmastointilaitokseen liittyy usein myös pumppuja, taajuusmuuttajia ja muita laitteita. Nämä laitteet tuottavat ilmanvaihtokoneisiin, kompressoreihin ja vedenjäähdytyskoneisiin verrattuna vähän ilmaääntä, mutta pääsääntö niiden asennuksessa on, että mitään laitetta ei saa kiinnittää jäykästi rakennuksen runkoon, vaan niille on suunniteltava tärinäneristys. Näiden laitteiden toimitukseen ei välttämättä kuulu valmiiksi suunniteltua tärinäneristystä.

Puukerrostaloissa värähtely korostuu betonitaloihin verrattuna, sillä koneiden kierrosnopeus saattaa olla samalla alueella kuin puuvälipohjan ominaistaajuus eli taajuus, jolla puuvälipohjan värähtely helpoiten herää. Lisäksi puuvälipohja on huomattavasti kevyempi kuin betonivälipohja, jolloin sen värähtelyn amplitudi voi kasvaa resonanssissa nopeammin kuin betonivälipohjan. Tämä koskee myös asuinhuoneistoja, joissa pyykinpesukoneen linkousnopeus voi olla samalla taajuusalueella kuin puuvälipohjan ominaistaajuus.

E erityisen helppoja keinoja puurakenteiden värähtelyn hallitsemiseksi ei ole. Pyörivien ja liikkuvien laitteiden aiheuttamaa värähtelyä voidaan kuitenkin rajoittaa esimerkiksi seuraavin keinoin:

- H) sijoitetaan laite mahdollisimman lähelle välipohjaa kantavaa seinää
- I) sijoitetaan laite välipohjan alla olevan seinälinjan päälle
- J) lyhennetään välipohjan jänneväliä
- K) lisätään välipohjan massaa

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

tys. Puukerrostalossa runkoäänen leviäminen rakenteissa on kuitenkin luultavasti rajallisempaa kuin betonirakenteisessa asuinrakentamossa, koska rakenteet on äänen sivutiesiirtymien johdosta katkaistava huoneistojen rajoilla. Nämä katkot toimivat myös runkoäänikatkoina.

Puutteellisesta tärinäneristyksestä aiheutuva runkoääni on yleensä kyseessä silloin, kun rakennuksessa kuuluu epämääräisestä suunnasta tai kaikkialta teknisen laitteen aiheuttamaa ääntä. Se voi olla häiritsevän voimakasta, ja istuessa tai seisoessa saattaa tuntua tärinää. Runkoäänen voi aiheuttaa myös jokin talotekninen asennus ilman värähtelevää laitetta, esimerkiksi vesijohto kiinnitettynä levyrakenteeseen tai sadevesiviemäri, jonka kannake osuu hormirakenteeseen. Runkoääniongelmia aiheuttavat myös virheet tärinäneristintien asennuksessa ja suunnittelussa: liian jäykät tai ylikuormitetut tärinäneristimet eivät toimi oikein; tärinäneristimistä ei ole hyötyä, jos eristettävän laitteen ja rakennuksen rungon välissä on osa, joka kytkee laitteen rakenteisiin [41].

5.4 MUUT LVIS-JÄRJESTELMÄT

5.4.1 Lämmitysjärjestelmä

Rakennuksen lämmitysjärjestelmän äänenhallinnan suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota järjestelmävalintoihin sekä putkien ja laitteiden mitoittamiseen siten, että niistä aiheutuu huonetiloihin mahdollisimman vähän ääntä tilan käyttötarkoitukseen nähden.

Lämmitysjärjestelmät saattavat myös heikentää sekä ilma- että askelääneneristävyyttä. Lämmitysjärjestelmän tuottamat äänitasot riippuvat putkiston mitoittamisesta, laitevalinnoista, verkostosuunnittelusta eli laitteiden ja putkien sijoittelusta ja kannakoinnista sekä lämmönjakohuoneen sijainnista ja siellä olevien laitteiden tärinäneristyksestä [41].

5.4.2 Käyttövesijärjestelmä

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

Käyttövesijärjestelmän tuottamiin äänitasoihin voidaan vaikuttaa suunnittelemalla painetasot kohtuullisiksi, kannatteleamalla putket oikealla tavalla ja valitsemalla hiljaisia osia järjestelmään. Joissakin tapauksissa käyttövesijärjestelmän aiheuttamien äänien hallitsemiseksi on tehtävä myös rakenneteknisiä ratkaisuja, kuten ääntä eristäviä alakattoja. Suunnittelun osa-alueista äänenhallinnan kannalta oleellisia ovat putkistojen mitoitus, laitevalinnat ja putkien ja laitteiden sijoittelu [41].

5.4.3 Viemärijärjestelmä

Rakennuksen viemärijärjestelmän äänenkehitys perustuu siihen, että viemärijätteen liikkeet saavat aikaan putkiston liikkeen eli värähtelyn, joka kannakkeiden kautta siirtyy rakennuksen runkoon. Rungon värähtely puolestaan synnyttää ilmaan värähtelyä, joka voidaan aistia ilmaaänenä. Siten viemärijärjestelmän rakennuksen runkoon aiheuttaman värähtelyn tulee olla mahdollisimman vähäistä, jotta sitä ei kuultaisi ilmaaänenä. Viemärijärjestelmän aiheuttama ääni vaihtelee ajan kuluessa. Jos viemäriäänttä mitataan asuinrakennuksessa, mittaus aloitetaan hetkestä, jolloin esimerkiksi WC-allas vedetään, ja päätetään, kun viemärijäte on poistunut putkistosta eikä ääni ole enää erotettavissa taustaaänessä. Keskiäänitaso LA_{eq} määritetään tältä ajalta. Suurin hetkellinen äänitason huippuarvo eli enimmäisäänitaso LA_{max} syntyy yleensä hetkellä, jolloin viemärijäte iskeytyy putkiston alamutkaan [45].

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

Asuinkerrostaloissa käytetään yleensä muovi- tai valurautaviemäreitä. Yleensä raskaamman viemäriin ääneneristyskyky on kevyttä viemäriä parempi. Ääneneristyskyky vaikuttaa siihen, kuinka paljon ilmassa oleva viemäri synnyttää ympäristöönsä ääntä. Käytännössä viemäriputkien tulee kuitenkin olla koteloituna tai esimerkiksi välipohjarakenteen sisässä siten, että putken ja huonetilan välissä on vähintään kaksinkertainen kipsilevykerros tai ääneneristävyydeltään vastaava rakennuslevykerros.

Runkoäänen syntyminen riippuu viemäriputkien asennuksesta. Puukerrostalossa kysymykseen tulee vain rakenteista tärinäneristimin irrotettu valurautaviemäriin asennusjärjestelmä, koska puukerrostalon rakenteissa ei ole niin suurta massaa, että se tekisi mahdolliseksi putkien kiinnittämisen jäykästi rakenteisiin. Koko viemärijärjestelmä irrotetaan rakennuksen rungosta tehokkailla tärinäneristimillä, jotka estävät viemäriin värähtelyn siirtymisen rakennuksen runkoon. Tavallisesti viemärijärjestelmien kiinnikkeet on mitoitettu niin, että viemärit saa kannakoida rakenteeseen, jonka massa on vähintään noin 200 kg/m². Puukerrostaloissa tällaisia rakenteita ei oikeastaan ole. Käytännössä kannakointi voidaan tehdä puuvälipohjasta, mutta ei hormista eikä esimerkiksi CLT-rakenteisesta seinästä. Kannakointi vaatii tällöin apurungon, joka kiinnitetään välipohjien kohdalta ja putket kannakoidaan kerrosvälillä apurunkoon. Viemärimelu ei välttämättä muodostu ongelmaksi, jos välipohjan kantavan rakenteen päällä on kelluva lattia ja alla joustavasti ripustettu alakatto.

Asuinrakennuksissa pystyviemäriinjoihin ei saa tehdä vaakasiirtoja. Viemäriinjoit tulee tuoda suoraan ylhäältä alas. Pystyviemäreissä ei saa olla vaakasiirtoja. Viemäriinjoit tulee sijoittaa sellaisten tilojen läheisyyteen, joissa ei ole kovia äänitasovaatimuksia [41].

6 Rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyys

6.1 LIIKENNEMELUN MERKITYS

Liikennemelualueilla sijaitsevissa asuinkerrostaloissa merkittävä asumismukavuutta ja -terveyttä heikentävä tekijä on liikennemelun siirtyminen rakennuksen ulkovaipan kautta sisälle asuinhuoneeseen. Meluhaittojen ehkäisemiseksi valtioneuvosto on antanut päätöksen melutason ohjearvoista erilaisten rakennusten sisätiloissa [103].

Liikenteen aiheuttama melutaso riippuu rakennuspaikasta. Rakennuksen ulkovaippaan kohdistuvaan melutasoon vaikuttavat liikennemäärä ja nopeusrajoitus, etäisyys liikenneväylään, melusteet, maastonmuodot ja maaperän kyky vaimentaa ääntä [32]. Ulkovaipan rakennusosilta vaadittava ääneneristyskyky määräytyy siten rakennuksen sijainnin perusteella, joten yleistä vaatimusta rakennusten ääneneristävyydelle liikennemelua vastaan ei ole mahdollista määrätä. Sen sijaan rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskevat vaatimukset annetaan asemakaavassa kaavamääräyksinä.

Melualueille rakennettaessa ulkovaipan ääneneristävyyden toteutumista valvotaan tavallisesti suunnitelmien perusteella. Yleensä rakennuslupavaiheessa on esitettävä laskennallinen selvitys siitä, että rakennuksen ulkovaippa täyttää asemakaavassa esitetyn vaatimuksen. Rakennuksen sisätilaan muodostuva melutaso riippuu rakennuksen ulkovaipan kaikkien rakennusosien, kuten ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden, ikkunoiden ja ikkunaovien sekä korvausilmaventtiilien kyvystä eristää ääntä [43].

6.2 ASEMAKAAVAMÄÄRÄYKSEN MUODOSTUMINEN

Asemakaavassa osoitetaan kaavamerkinnällä rakennusalan sivu, jolle on annettu rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskeva kaavamääräys. Ympäristöministeriön asemakaavamerkintäoppaan mukaan kaavamääräyksen sanamuoto on esimerkiksi: ”Merkintä osoittaa rakennusalan sivun, jonka puoleisen rakennuksen ulkoseinän sekä ikkunoiden ja muiden rakenteiden ääneneristävyyden liikennemelua vastaan on oltava vähintään 35 dBA.” Kaavamääräyksessä myös tavallisesti määritellään, koskeeko vaatimus tie-, raide- vai lentoliikennemelua. Lentomelua koskeva asemakaavamääräys voidaan esittää myös seuraavasti: ”Kaava-alueelle sijoitettavan rakennuksen kattorakenteiden, ulkoseinien, ikkunoiden sekä muiden rakenteiden tulee olla sellaisia, että ulko- ja sisämelutasojen erotus on vähintään 35 dBA.” Kaavamääräyksissä annetut vaatimustasot ovat tyypillisesti 28 ja 40 dB välillä [45].

Ulkovaipan ääneneristystä koskevan kaavamääräyksen perustana ovat valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 [103] annetut melutason ohjearvot eri tiloille (taulukko 6.1). Ohjearvot on määritelty suurimpina sallittuina A-painotettuina keskiäänitasoina päiväajalle (klo 7–22) ja yöajalle (klo 22–7). Koska sisällä sallitut äänitasot on annettu keskiäänitasoina, valtioneuvoston päätöksen mukaisten ohjearvojen saavuttaminen ei siten tarkoita sitä, että liikennemelu ei lainkaan kuuluisi rakennuksen sisätilaan; keskiäänitasoihin sisältyvät hetkelliset äänen huippuarvot voivat olla huomattavan korkeitakin.

Taulukko 6.1. Valtioneuvoston päätöksen 993/1992 mukaiset melutason ohjearvot eli päivä- ja yöajan suurimmat sallitut keskiäänitasot $L_{A,eq}$ erilaisten rakennusten sisätiloissa.

Tila	Päiväohjearvo $L_{A,eq}$, 07-22	Yöohjearvo $L_{A,eq}$, 22-07
Asuinhuoneet	35 dB	30 dB
Potilashuoneet	35 dB	30 dB
Majoitushuoneet	35 dB	30 dB
Opetustilat	35 dB	–
Kokoontumistilat	35 dB	–
Liikehuoneet	45 dB	–
Toimistohuoneet	45 dB	–

Ulkovaipan ääneneristystä koskeva kaavamääräys voidaan määritellä, kun tiedetään, millaisen keskiäänitason alueen liikenneväylät tai lentoliikenne aiheuttavat päivällä ja yöllä tulevan rakennuksen julkisivun kohdalla eri korkeuksilla maanpinnasta. Liikenteen aiheuttama keskiäänitaso ulkona $L_{A,eq,u}$ voidaan selvittää mittauksin, mutta tavallisesti se määritetään mallintamalla melun leviäminen kolmiulotteisessa maastomallissa liikennemäärien ja ajonopeuksien perusteella pohjoismaisilla laskentamenetelmillä. Mallintamisen etuna mittauksiin verrattuna on se, että tuloksena saadaan melukartta, josta voidaan lukea vallitseva äänitaso missä tahansa alueen kohdassa. Mittaus sitä vastoin tuottaa tietoa äänitasosta vain yhdessä pisteessä.

Kaavamääräys annetaan suurimman rakennuksen ulkovaipan kohdalla vallitsevan keskiäänitason $L_{A,eq,u}$ ja sisällä valtioneuvoston päätöksen mukaan sallittavan keskiäänitason $L_{A,eq,s}$ erotuksena. Kaavamääräyksen selvittämiseksi on tunnettava ulkona vallitsevat päivä- ja yöajan keskiäänitasot. Ase-

makaavassa rakennuksen ulkokuoren ääneneristystä koskeva kaavamääräys eli vaadittava äänitasoero $\Delta L_{A,vaad}$ [dB] on suurempi näistä kahdesta erotuksesta:

$$\text{Päivällä:} \quad \Delta L_{A,vaad, 07-22} = L_{A,eq,u,07-22} - L_{A,eq,s,07-22}$$

$$\text{Yöllä:} \quad \Delta L_{A,vaad, 22-07} = L_{A,eq,u,22-07} - L_{A,eq,s,22-07}$$

Ulkona vallitseva äänitaso $L_{A,eq,u}$ tarkoittaa rakennuksen julkisivun tasossa vallitsevaa äänitasoa, johon ei sisälly julkisivusta tulevaa heijastusta. Heijastus korottaa äänitasoa julkisivun pinnalla 3 dB. Koska heijastunut ääni on kulkemassa rakennuksesta pois päin, se ei vaikuta rakennuksen sisätiloihin muodostuvaan keskiäänitasoon. Jos melukartassa rakennuksen ulkovaipan kohdalla keskiäänitaso on päivällä 68 dB, kaavamääräyksen äänitasoerovaatimukseksi $\Delta L_{A,vaad}$ tulee tällöin $68 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 35 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$.

Tavallisesti kaavamääräysten äänitasoerot $\Delta L_{A,vaad}$ ovat 28 ja 40 dB välillä. Kaavamääräystä ei yleensä erikseen anneta, jos ulkovaipan kohdalla vallitsevan ja sisällä sallittavan äänitason ero on vähemmän kuin 28 dB. Jos vaadittava äänitasoero olisi yli 40 dB, asuin-, potilas- ja majoitushuoneiden sekä opetus- ja kokoontumistilojen toteutus olisi erittäin vaikeaa, koska ikkunoilta vaadittava ääneneristyskyky tulisi niin suureksi, että vaatimuksen täyttävät ikkunat olisi suunniteltava ja teetettävä erikoisratkaisuna. Teknisesti tämä on mahdollista, mutta rakennuskustannukset voivat kohota suuriksi.

6.3 RAKENNUSOSAN ILMAÄÄNENERISTYSLUVUT LIIKENNEMELUA VASTAAN

Ilmaääneneristysluvun R_w avulla voidaan arvioida rakennusosien ääneneristyskykyä puhetta vastaan. Tieliikenne-, raide- ja lentomelun äänispektrit poikkeavat merkittävästi puheesta, joten ilmaääneneristysluku ei kuvaa rakennusosien ääneneristyskykyä niitä vastaan kovinkaan hyvin. Siksi standardissa SFS-EN ISO 717-1 [90] on esitetty niin sanotut spektripainotustermit, joiden avulla ilmaääneneristysluku R_w korjataan vastaamaan paremmin ihmisen kokemaa eristävyyttä eri liikennemelulajeja vastaan.

Ulkoseinäarakenteiden, ikkunoiden ja ikkunaovien ääneneristyskyky ilmoitetaan ilmaääneneristyslukuina tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ tai raide- ja lentomelua vastaan $R_w + C$. Ulkovaipan ääneneristyksen suunnittelussa lähtötietoina tarvittavat ilmaääneneristysluvut määritetään laboratoriomittausten perusteella tai laskennallisesti.

Ilmaääneneristysluku raide- ja lentomelua vastaan $R_w + C$ on tyypillisesti 0...5 dB pienempi kuin ilmaääneneristysluku R_w . Ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ on tavallisesti 1...10 dB pienempi kuin ilmaääneneristysluku R_w . Erot johtuvat siitä, että liikennemelua painottuu puhetta enemmän pienille taajuuksille, joilla rakenteiden ääneneristyskyky on aina heikompi kuin suurilla taajuuksilla [43]. Taulukossa 6.1 on esitetty erilaisten puurunkoisten ulkoseinäarakenteiden ilmaääneneristyslukuja eri melutyyppejä vastaan.

Taulukko 6.1. Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden ilmajääneristyslukuja.

Tunnus	Rakennekerrokset	R_w	$R_w + C$	$R_w + C_{tr}$
US1	- puuverhous 23 mm - tuuletusväli 32 mm, jossa puuranka k600 - tuulensuojavilla 50 mm - pystyrunko 150 mm k600, välissä lämmöneristysvilla 200 mm - kipsilevy N13	42 dB	41 dB	39 dB
US2	- puuverhous 23 mm - tuuletusväli 32 mm, jossa puuranka k600 - tuulensuojakipsilevy TS9 - pystyrunko 200 mm k600, välissä lämmöneristysvilla 200 mm - kipsilevy N13	49 dB	47 dB	42 dB
US3	- puuverhous 23 mm - tuuletusväli 32 mm, jossa puuranka k600 - tuulensuojakipsilevy TS9 - pystyrunko 200 mm k600, välissä lämmöneristysvilla 200 mm - 2 x kipsilevy N13	50 dB	49 dB	45 dB
US4	- puuverhous 23 mm - tuuletusväli 32 mm, jossa puuranka k600 - tuulensuojakipsilevy TS9 - pystyrunko 150 mm k600, välissä lämmöneristysvilla 150 mm - CLT 100 mm - kipsilevy N13 - kipsilevy F15	54 dB	52 dB	48 dB

6.4 ULKOVAIPAN ÄÄNERISTÄVYYDEN MUODOSTUMINEN

Äänitasoerona $\Delta L_{A,vaad}$ annettava kaavamääräyksen vaatimus rakennuksen ulkovaipan ääneneristyksestä ei ole sama kuin rakennusosan ääneneristyskyky, joka ilmoitetaan ilmajääneristyslukuna $R_w + C$ tai $R_w + C_{tr}$. Ilmajääneristysluku on rakenteen ominaisuus, joka ei käytännössä muutu, vaikka rakenteen pinta-ala muuttuu. Sitä vastoin ulkoseinärakenne, jonka pinta-ala on 20 m², välittää ääntä ulkoa sisään 3 dB enemmän kuin ulkoseinärakenne, jonka pinta-ala on 10 m², vaikka ulkoseinärakenteen ilmajääneristysluku onkin sama. Toisaalta pienessä huoneessa ääni vaimenee vähemmän kuin suuressa huoneessa. Kaavamääräyksen perustana ovat valtioneuvoston päätöksessä määritellyt suurimmat sallitut keskiäänitasot erilaisissa tiloissa. Rakennuksen sisätilaan muodostuva keskiäänitaso $L_{A,eq,s}$ riippuu paitsi kaikkien tilaa rajaavan ulkovaipan rakennusosien ääneneristyskyvystä, myös näiden rakennusosien pinta-aloista sekä äänen vaimenemisesta huonetilassa.

Ulkovaipan ääneneristävyyden suunnittelun tavoitteena on laskea huoneen dimensioiden ja ulkovaipan rakennusosien ilmajääneristyslukujen perusteella toteutuva äänitasoero $\Delta L_{A,tot}$, jonka tulee olla vähintään yhtä suuri kuin vaaditun äänitasoeron $\Delta L_{A,vaad}$. Taulukkoon 6.2 on laskettu saavutettava ää-

nitasoero $\Delta L_{A,tot}$, kahteen erikokoiseen huoneeseen. Pienemmän huoneen lattiapinta-ala on 12 m² ja suuremman 24 m². Ikkunan ilmajääneristysluku $R_w + C_{tr}$ on 37 dB tai 40 dB ja pinta-ala 2 m² Ulkoseinärakenteen pinta-ala on pienemmässä huoneessa 5,5 m² ja suuremmassa huoneessa 13 m².

Taulukko 6.2. Erikoisissa huoneissa saavutettava äänitasoero $\Delta L_{A,tot}$ tieliikennemelua vastaan, kun huoneen koko ja ulkoseinärakenteen pinta-ala vaihtelee.

Ikkunan $R_w + C_{tr}$	Ulkoseinän rakennetyyppi	Ulkoseinän $R_w + C_{tr}$	Saavutettava äänitasoero $\Delta L_{A,tot}$	
			Huone 12 m ²	Huone 24 m ²
37 dB	US1	39 dB	32 dB	33 dB
37 dB	US2	42 dB	33 dB	35 dB
37 dB	US3	45 dB	34 dB	36 dB
37 dB	US4	48 dB	34 dB	37 dB
40 dB	US1	39 dB	33 dB	34 dB
40 dB	US2	42 dB	35 dB	36 dB
40 dB	US3	45 dB	36 dB	38 dB
40 dB	US4	48 dB	37 dB	39 dB

Edellä olevan perusteella sisälle muodostuva keskiäänitaso on sitä suurempi, mitä pienempi tila on ja mitä suurempi tilaa rajaavan ulkovaipan pinta-ala on tilan kokoon nähden. Lisäksi on otettava huomioon ulkovaipan eri rakennusosien ilmajääneristysluvut ja osuudet ulkovaipan pinta-alasta. Kaikkien näiden seikkojen tutkiminen tarkasti olisi suunnittelutyötä ajatellen turhan monimutkaista. Siksi ulkovaipan rakennusosien valintaan tarvitaan käytännöllinen suunnittelumenetelmä. Määräyksiä menetelmästä, jolla ulkovaipan ääneneristystä koskevan kaavamääräyksen toteutuminen pitää osoittaa, ei ole. Vaihtoehtoisia menetelmiä on tällä hetkellä käytössä kaksi, jotka molemmat on selostettu esimerkiksi oppaassa RIL 243-1-2007 [49]. Toinen menetelmä on julkaistu alkujaan ympäristöministeriön ympäristöoppaassa 108 [70]. Menetelmä perustuu taulukkomitoitukseen, jossa kaavamääräyksen ääni tasoerosta $\Delta L_{A,vaad}$ johdetaan rakennusosilta vaadittavat ilmajääneristysluvut tieliikennemelua vastaan. Toinen, niin sanottu äänitasoeromenetelmä perustuu vuonna 1975 julkaistuun RT-korttiin [74]. Menetelmän periaatteena on, että rakennusosien ilmajääneristysluvuista $R_w + C_{tr}$ tai $R_w + C$ johdetaan toteutettava äänitasoero $\Delta L_{A,tot}$, jota voidaan verrata kaavamääräyksessä esitettyyn vaatimukseen $\Delta L_{A,vaad}$.

Ulkovaipan suunnittelumenetelmät johtavat yleensä samaan lopputulokseen [40], joten kumpaakin menetelmää voidaan käyttää rakennuksen ulkovaipan ääneneristyksen laskennalliseen tarkasteluun. Kummallakin menetelmällä on etunsa. Ympäristöoppaan menetelmä on taulukkomitoituksena yksinkertainen, ja sillä voidaan nopeasti tarkastaa, ovatko rakennusosien ilmajääneristysluvut liikennemelua vastaan oikein valitut. Taulukkomitoituksen vuoksi menetelmällä ei kuitenkaan ole mahdollista tutkia, kuinka eri rakennusosien ääneneristyskyvyn muuttaminen vaikuttaa saavutettavaan äänitasoeroon $\Delta L_{A,tot}$. Esimerkiksi vaadittavan äänitasoeron $\Delta L_{A,vaad}$ ollessa suuri ympäristöoppaan menetelmä voi edellyttää ikkunoilta niin suuria ilmajääneristyslukuja, että vaatimuksen täyttäviä ikkunoita ei ole markkinoilla. Markkinoilla olevien ikkunoiden ilmajääneristysluvut tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ ovat yleensä enintään 46...48 dB. Tällöin on joko pienennettävä ikkunoiden pinta-alaa tai parannettava

ulkoseinärakenteen ääneneristyskykyä. näitä seikkoja on mahdollista tutkia äänitasoeromenetelmällä [40]. Ulkovaipan ääneneristävyys voidaan rakennuksen valmistuttua todentaa mittauksin [50].

6.5 ULKOVAIPAN RAKENNUSOSIEN VALINTA

Huoneen keskiäänitason $L_{A,eq,S}$ on tilakohtainen ilmiö, joten varmuus kaavamääräyksessä määritellyn äänitasoeron $\Delta L_{A,vaad}$ saavuttamisesta edellyttää toteutuvan äänitasoeron $\Delta L_{A,tot}$ laskentaa kaikissa rakennuksen meluherkissä tiloissa. Mahdollista on myös valita rakennuksen ulkokuoren rakennusosat koko rakennuksessa samanlaisiksi, jolloin rakennuksesta on löydettävä melun kannalta epäedullisin tila. Tämä ei kuitenkaan ole aina taloudellisesti järkevää, varsinkaan jos kaavamääräyksessä vaadittu äänitasoero on suuri.

Tavallisesti ulkovaipan ääneneristyslaskelma tehdään rakennuslupavaiheessa ikkunoilta ja ikkunaovilta liikennemelua vastaan vaadittavien ilmaääneneristyslukujen selvittämiseksi. Ulkovaipan muut rakennusosat on yleensä laskelmaa tehtäessä jo valittu, ja ne ovat osa suunnittelun lähtötietoja. Aina näin ei kuitenkaan ole, ja ulkoseinä- ja joskus yläpohjarakenteita on parannettava kaavamääräyksen äänitasoeron saavuttamiseksi. Ikkunoiden pinta-alaa voidaan myös joutua pienentämään, jotta rakennus pystytäisiin toteuttamaan markkinoilla olevilla ikkunarakenteilla. Jos kaavamääräys edellyttää erittäin suurta äänitasoeroa $\Delta L_{A,vaad}$ (38...40 dB), on suositeltavaa selvittää jo selvästi ennen rakennuslupavaihetta, millaiset ulkoseinärakenteet ja ikkunakoot ovat mahdollisia ja millaista ääneneristyskykyä ikkunoilta vaaditaan.

Kun kaavamääräyksen edellyttämä äänitasoero $\Delta L_{A,vaad}$ on tavanomainen (28...35 dB), ulkovaipan ääneneristys selvitys voidaan tavallisesti tehdä rakennuslupavaiheessa. Selvitystä laadittaessa on tunnettava asemakaavan vaatimukset, rakennuksen tilojen ja ulkovaipan rakennusosien pinta-alat sekä ulkovaipan rakennetyyppien ilmaääneneristysluvut liikennemelua vastaan. Suunnittelun lähtötiedoiksi tarvitaan siten rakennuspaikan asemakaavaote tai rakennuksen asemapiirustus, pohjapiirustukset, julkisivupiirustukset, leikkaukset sekä rakennetyypit.

Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen sisäpuolelle muodostuvaan keskiäänitasoon $L_{A,eq,S}$ on sitä merkittävämpi, mitä suurempi kaavamääräyksen äänitasoero $\Delta L_{A,vaad}$ on. Jos vaadittava äänitasoero on pieni, ikkuna on tavallisesti ratkaisevin ulkovaipan rakennusosa. Vaatimuksen ollessa suuri alkaa ulkoseinärakenteen ääneneristyskyky vaikuttaa suuremman pinta-alansa vuoksi. Mitä suurempi vaadittava äänitasoero on, sitä enemmän huomiota pitää kiinnittää myös ulkoseinärakenteen valintaan [43]:

$\Delta L_{A,vaad} = 40$ dB: puurakenteisten ulkoseinien käyttö edellyttää rakenteen huolellista suunnittelua, valintaa ja toteutusta. Ulkoseinärakenteen valitsemiseksi ulkovaipan ääneneristys selvitys tulisi tehdä riittävän ajoissa ennen rakennusluvan hakemista, mahdollisesti jo hankkeen luonnosvaiheessa.

$\Delta L_{A,vaad} = 35$ dB: puurakenteisten ulkoseinien käyttö on yleensä mahdollista, mutta rankarakenteisen seinän tuulensuojalevynä tulee olla tiivis rakennuslevy, jonka massa on vähintään 5 kg/m². Sisäverhouslevyjen määrää voidaan joutua lisäämään riittävän ääneneristävyyden saavuttamiseksi.

$\Delta L_{A,vaad} = 30$ dB: Useimmat tavanomaiset ulkoseinärakenteet täyttävät kaavamääräyksen vaatimukset. Tavallisesti rankarakenteisen seinän tuulensuojalevynä tulee kuitenkin olla tiivis rakennuslevy, jonka massa on vähintään 5 kg/m². Koska kaavamääräyksen toteutuminen riippuu myös ikkunoista, ulkovaipan ääneneristys selvitys on kuitenkin tehtävä viimeistään rakennuslupaa haettaessa.

Rakennusalan kirjallisuudesta [73] on löydettävissä muutaman kymmenen ulkoseinärakenteen ilmaääneneristysluvat $R_w + C_{tr}$ ja $R_w + C$. Myös rakennustuoteteollisuus on mittauttanut valmistamiensa ulkoseinärakenteiden ilmaääneneristyslukuja laboratorioissa. Kaikkien ulkoseinärakenteiden ilmaääneneristyslukuja ei kuitenkaan tunneta.

Laboratoriomittaus yksittäisen rakennetyypin ominaisuuksien selvittämiseksi on kallista ja hidasta, kun otetaan huomioon varsinaisen mittauksen lisäksi se, että tutkittava rakennusosa on kuljetettava laboratorioon ja asennettava laboratorion tutkimusaukkoon. Edullisempaa onkin selvittää ulkoseinärakenteiden ilmaääneneristysluvat laskemalla, joka nykyisin on varsin tarkkaa. Laskennallisesti voidaan myös nopeasti tutkia erilaisten muutosten vaikutuksia rakenteella saavutettavaan ilmaääneneristyslukuun.

Yläpohjan ääneneristyskyky on huoneeseen muodostuvan äänitason kannalta merkittävä tekijä lähinnä lentomelualueilla. Ulkoseinärakenteiden tavoin yläpohjarakenteiden ilmaääneneristyslukuja liikennemelua vastaan on annettu rakennusalan kirjallisuudessa [73] ja rakennustuoteteollisuuden omista suunnitteluohjeissa. Yläpohjarakenteiden ilmaääneneristysluvat voidaan selvittää myös laskennallisesti. Kun yläpohja on kevytrakenteinen, on huomattava, että kirjallisuudessa esitettävien ääneneristysarvojen käyttö edellyttää sitä, että äänen kulku räystäiden kautta yläpohjan tuuletustilaan estetään järjestämällä tuuletus vaimennetun tuuletuskanavan kautta [49, 73]. Jos ääni pääsee kulkemaan räystään kautta ullakotilaan vaimenematta, sen etenemistä huoneeseen on estämässä vain lämmöneristekerros ja yläpohjan sisäverhouslevy, joiden ääneneristyskyky on vähäinen.

6.6 TÄRINÄ JA RUNKOMELU

Raideliikenteen maaperään aiheuttama värähtely ilmenee pehmeiden maalajien alueilla rakenteiden liikkeenä, jonka ihminen aistii tuntoaistinsa välityksellä tärinä. Tärinän kannalta ongelmallisimpia ovat yleensä raskaimmat tavarajunat. Kovilla maalajeilla maaperän värähtelysisältö on suurempitaajuisia ja amplitudiltaan pienempää, jolloin tärinä ei yleensä ylitä ihmisen havaintokynnystä. Rakenteiden värähtely saattaa ilmetä rakennuksissa runkoääninä silloin, kun maalaji on kovaa. Runkoäänen ihminen aistii kuuloaistinsa välityksellä pienitaajuisena meluna. Runkomelu leviää tehokkaimmin ratarakenteesta ympäristöön kalliota pitkin. Mikäli ratarakenne sekä rakennukset on paalutuksin tuettu kallioperään, runko-melua voi ilmetä myös pehmeiden maalajien alueilla. Hyvin lyhyillä etäisyyksillä sekä tärinä että runkomelu voivat olla häiritseviä. Maaperän lisäksi tärinä- ja runkomelutasoihin voivat paikallisesti vaikuttaa huomattavasti rata-rakenteen mahdolliset kaartet, kallistukset sekä epäjatkuvuuskohdat, esim. vaihteet, tukirakenteen muutokset siltojen ja alikäytävien yhteydessä [30, 31].

Puukerrostaloja on toistaiseksi rakennettu ilmeisen vähän rautateiden tai raitioteiden läheisyyteen. Jos puukerrostaloahanke toteutetaan tärinä- tai runkomelualueelle, eristinten suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska valmiita ratkaisuja ei ole olemassa. Luultavasti runkomelun leviäminen puurunkoisessa asuinkerrostalossa on liitoksissa olevien katkojen vuoksi vähäisempää kuin betonitaloissa. Sitä vastoin tärinän hallinta voi olla vaikeampaa, vaikka puukerrostalojen välipohjien ominaistaajuudet ovatkin yleensä samalla taajuualueella kuin betonivälipohjien. Erona on kuitenkin se, että puuvälipohjan värähtelyn amplitudi todennäköisesti kasvaa pienemmän massan johdosta nopeammin kuin betonivälipohjan.

Tärinä- ja runkomelualueelle rakennettaessa tarvitaan suunnittelun lähtötiedoksi selvitys siitä, millaista tärinä ja runkomelu ovat voimakkuudeltaan ja taajuuksisällöltään. Lähteissä [98–102] on esitetty Suomessa käytettävät arviointi- ja suunnittelumenetelmät.

7 Tulevaisuuden kehityssuuntia

7.1 RAKENTAMISMÄÄRÄYSTEN UUDISTUMINEN

7.1.1 Uudistustyön tausta

Ympäristöministeriö on käynnistänyt Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 eli ääniolosuhteita koskevan osan uudistustyön vuonna 2015. Vuonna 1998 annettuna ja vuoden 2000 alusta voimaan tulleen C1 on yksi vanhimmista voimassa olevista rakentamismääräyskokoelman osista. Ministeriön tavoitteena on, että uudet huoneakustiikkaa, melutasoja ja ääneneristystä koskevat määräykset voitaisiin antaa marraskuussa 2017. Käytännössä vuoden 2016 aikana tehdään valmistelutyötä siten, että vuoden 2017 voidaan toteuttaa tarvittava lainsäädäntötyö [80].

Vuoden 1998 uudistuksen yhteydessä tehtiin aiempiin, vuonna 1985 annettuihin määräyksiin [96, 97] suuria muutoksia. Aiemmin määräysten piirissä olivat olleet asuinrakennusten lisäksi mm. toimistotilat, sairaalat, hotellit ja oppilaitokset. Vuonna 1998 siirryttiin kuitenkin ns. toiminnallisiin määräyksiin, ja teknisinä mittalukuina annettiin määräyksiä vain asuinrakennuksista. Muita rakennus- ja tilatyyppejä koskien annettiin vain ohjeita, ja nekin olivat erittäin suppeita. Sitä vastoin vuoden 1998 rakentamismääräyskokoelmassa annettiin kaikkia rakennuksia koskevana määräyksenä vaatimus siitä, että ”rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että melu, jolle rakennuksessa tai sen lähellä olevat altistuvat, pysyy niin alhaisena, ettei se vaaranna näiden henkilöiden terveyttä ja että se antaa mahdollisuuden nukkua,

levätä ja työskennellä riittävän hyvissä olosuhteissa” [97]. Tämä tarkoitti sitä, että tulkinta eri tiloissa tarvittavista ääniolosuhteista siirrettiin rakennushankkeeseen ryhtyvän ja hänen valitsemansa suunnitteluorganisaation vastuulle. Ajatuksena oli, että markkinavoimat asettaisivat tason erilaisten rakennusten ääniolosuhteille. Näin ei ole välttämättä kuitenkaan käynyt [20].

Valmisteilla olevan uudistuksen yhtenä tavoitteena on se, että tärkeimpien tila- ja rakennustyyppien vaatimuksia palautetaan rakentamismääräyskokoelmaan [24, 25], sillä puutteelliset ääniolosuhteet vaikuttavat hyvinvointiin, työtehoon ja terveyteen ja aiheuttavat siten turhia kustannuksia, jotka voivat olla huomattavasti suurempia kuin hyvien ääniolosuhteiden suunnittelu- ja rakennuskustannukset. Toisaalta tämä seikka on toisaalta politisoitunut, koska hallitusohjelman tavoitteena toisaalta on määräysten karsiminen [71]. Siten ei vielä voida varmuudella vielä sanoa, toteutuuko uudistus edellä kuvatulla tavalla.

Toinen merkittävä uudistus liittyy ääneneristävyyden mittalukujen määrittelyyn. Määräysten uudistamiseksi on jo vuosien ajan tehty valmistelevaa työtä. Ympäristöministeriö on ollut rahoittajana useissa tutkimushankkeissa, joista merkittävin ja laajin on Rakennusten ääneneristävyyden käyttäjälähtöinen kehittäminen ÄKK (2012-2014), jota rahoittamassa oli ministeriön lisäksi kahdeksan rakennusalan yritystä tai järjestöä. Seuraavassa esitetään merkittävimmät asuinrakentamiseen liittyvät muutosehdotukset. Tarkemmin tutkimuksen tuottamaa taustatietoa on luettavissa lähteestä [24].

Ääneneristävyyden mittalukujen kehitys juontaa 1930-luvulle, ja vuosikymmenten saatossa määräykseen on kertynyt painolastia [44, 56], joka tietyissä tilanteissa vaikeuttaa rakenteiden ja rakennusten suunnittelua. Uudistuksen tavoitteena on vähentää tällaisia tilanteita muuttamalla nyt käytössä olevat mittaluvut paremmin toimiviksi. Käytännössä muutos ei tarkoita sitä, että vaatimustaso kiristyy, vaan joissakin tilanteissa näennäinen tarve lisätä esimerkiksi rakennepaksumuksia poistuu. Uudet mittaluvut ovat laskettavissa vanhoista eli tässäkin suhteessa muutos ei ole erityisen radikaali. Määräysuudistuksessa asuinrakennuksia koskee myös kaavailu mitattavan taajuusalueen muutoksista.

7.1.2 Ääneneristävyyden mittalukujen määrittely

Standardi SFS-EN ISO 717-1 määrittelee huoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden arvioimista varten kolme vaihtoehtoista mittalukua: ilmaääneneristysluvun R'_w ja standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ [90]. Mittaluvuista R'_w pyrkii kuvaamaan äänitehon siirtymistä tilasta toiseen. Kaksi muuta mittalukua kuvaavat äänenpainetasojen erotuksia huoneiden välillä. Käytettäessä mittalukua $D_{nT,w}$ äänitasoerot standardisoidaan 0,5 s vertailujälkikaiunta-aikaan.

Ilmaääneneristävyyden R mittausten menetelmä kehitettiin alkuun laboratoriomittauksiin [8, 10], mutta myöhemmin menetelmä otettiin käyttöön myös kenttämittauksissa, jolloin ilmaääneneristävyyden merkintä on R' [14]. Laboratoriossa olosuhteet ovat aina samanlaiset ja äänitehon voidaan olettaa siirtyvän vain tutkittavan 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 ja $D_{nT,w}$ johtaa erilaiseen tulkintaan saavutetusta ääneneristävyydestä, erityisesti vastaanottohuoneen tilavuuden kasvaessa [6, 16, 66].

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.

Kenttämittausaineistoon perustuvat tarkastelut ovat osoittaneet, että tyyppillinen jälkikaiunta-aika suomalaisessa asuinhuoneessa on 0,5 s. Toisaalta on myös osoitettu, että standardisoitu äänitasoeroluku

$D_{nT,w}$ vastaa asumismelun siirtymisestä asuinhuoneistosta toiseen syntyvää äänitasoa naapurihuoneistossa paremmin kuin R'_w . Näin ollen on suositeltavaa, että Suomessa siirrytään käyttämään ilmaääneneristävyyden mittalukuna standardisoitua äänitasoerolukua ilmaääneneristysluvun sijasta [55, 56].

Jos siirtymä standardisoituun äänitasoerolukuun toteutetaan ilmaääneneristävyyttä koskevissa määräyksissä, vastaava muutos tulisi tehdä johdonmukaisuuden vuoksi myös askelääneneristävyyttä koskevien mittalukujen määrittelyssä. Toisin sanoen nykyisin käytössä oleva normalisoitu askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ tulisi korvata standardisoidulla äänitasoeroluvulla $L'_{nT,w}$. Myös askelääneneristävyydestä voidaan todeta, että standardisoitu askeläänitasoluku vastaa paremmin askeläänikojeen kalustettuun huoneeseen aiheuttamaa äänitasoa kuin normalisoitu askeläänitasoluku. Tämä johtuu siitä, että suomalaisten asuinhuoneiden jälkikaiunta-aika on lähempänä standardisoidun luvun vertailujälkikaiunta-aikaa 0,5 s kuin absorptioala, joka kalustetuissa huoneissa on tyypillisesti 20 m² eikä 10 m², jota käytetään vertailuabsorptioalana normalisoitua askeläänitasolukua $L'_{n,w}$ laskettaessa [64].

7.1.3 Mitattavan taajuusalueen laajentaminen

Askelääneneristävyyden mittalukuja koskeva kritiikki on kohdistunut erityisesti siihen, että erilaisten rakenteiden askeläänitasoluvut ja ihmisten subjektiivinen kokemus rakenteiden askelääneneristävyydestä eivät kaikissa tapauksissa vastaa toisiaan [42]. Tämä koskee sekä betonirakenteisia asuinkeuhkaloja että puukerrostaloja. Suomessa on tutkittu betonirakenteisia välipohjia kuuntelukokeiden perusteella ja todettu [51, 52], että taajuusalueen laajentaminen 50 Hz keskitaajuuteen asti nykyisestä alimmasta 100 Hz keskitaajuudesta parantaa mittalukujen ja ihmisten subjektiivisten arvioiden välistä korrelaatiota (taulukko 7.1).

Taulukossa 7.1 esitettyjen mittalukujen yhteydessä esiintyvät spektripainotustermit C_I ja $C_{I,50-2500}$. Spektripainotustermi C_I ottaa huomioon askeläänispektrin painottumisen kapealla taajuusalueella. Spektripainotustermi $C_{I,50-2500}$ ottaa lisäksi huomioon taajuudet alle 100 Hz alueella. Vaikka spektripainotustermit parantavat korrelaatiota, mikään standardin mukaisista mittaluvuista ei kuitenkaan ole täydellinen: korrelaatiota ei ole subjektiivisen kokemuksen ja sukin tapahtuvan kävelyn välillä eikä subjektiivisen kokemuksen ja superpallon pompotuksen välillä. Siten mittaluvuissa on edelleen kehittämisen varaa. Koska tässä esitellyn tutkimuksen lisäksi on näyttöä siitä, että ihmiset kokevat pienitaajuiset askeläänit häiritsevinä betonitaloissa [46] ja koska ulkomailla tehtyjen tutkimusten mukaan pienitaajuisilla askeläänillä on merkitystä puukerrostalojen askelääneneristykseen subjektiivisen kokemuksen kannalta [65, 95], on suositeltavaa laajentaa mitattavaa taajuusaluetta.

Taulukko 7.1. Erilaisten askeläänilähteiden ja standardin SFS-EN ISO 717-1 mukaisten askelääneneristävyyden mittalukujen välinen korrelaatio ilmaistuna Pearsonin korrelaatiokertoimen neliöllä R^2 . S_1 = kävely kovapohjaisiin kengin, S_2 = kävely sukat jalassa, S_3 = kävely pehmeäpohjaisiin kengin, S_4 = superpallon pompotus, S_5 = tuolin siirto.

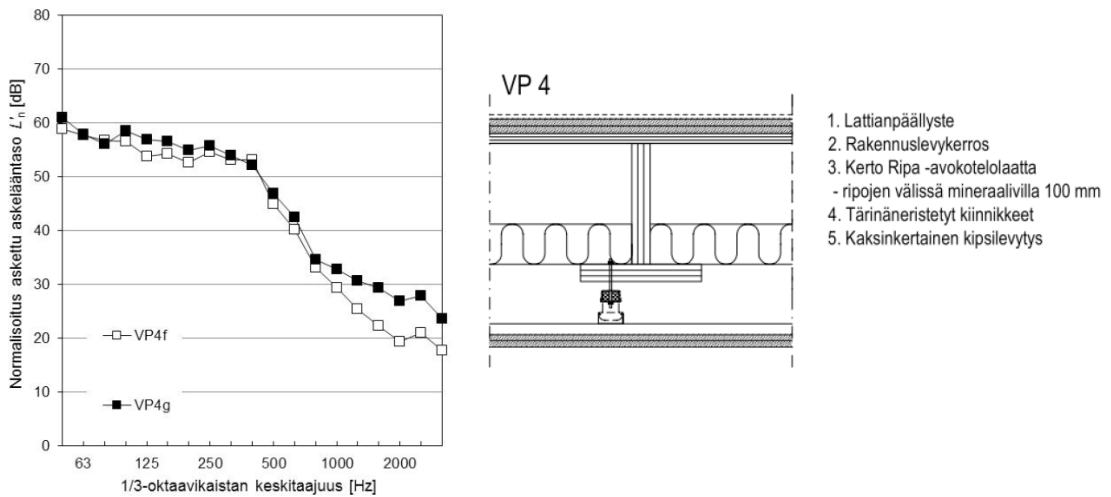
Mittaluku	S1	S2	S3	S4	S5	Keskiarvo
$L'_{n,w}$	0,41	0,03	0,26	0,09	0,52	0,26
$L'_{n,w} + C_I$	0,50	0,05	0,32	0,13	0,47	0,29
$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	0,49	0,08	0,31	0,08	0,51	0,29

Ilmaääneneristävyyden taajuusalueen laajentamiseen ei ole vastaavaa tarvetta kuin askelääneneristävyydessä [27]. Kansainvälisissä tutkimuksissa taajuusalueen laajentamista on esitetty, mutta esitykset perus-

tuvat laboratoriokokeisiin, joissa on soitettu bassovoittoista musiikkia sellaisella äänenvoimakkuudella [68], että sitä ei käytännössä asunnoissa esiinny [26]. Toisaalta ilmaääneneristävyyden mittausten laajentaminen nykyisestä 100 Hz keskitaajuudesta 50 Hz keskitaajuuteen tarkoittaisi mittauserävarmuuden tuntuva kasvua [23]. Askelääneneristävyyden mittauksissa epävarmuuden kasvu sitä vastoin on rajallista ja muutos on siten toteutettavissa [47].

7.2 PUURAKENTEIDEN AJANKOHTAISET KEHITYSHANKKEET

Suomessa puukerrostalojen kehittäminen on tehty pääasiassa metsäteollisuuden tai rakennusliikkeiden johdolla, jolloin kehityshankkeet ovat pyrkineet käytännön ongelmien ratkaisemiseen. Esimerkki käytännön ongelman ratkaisemisesta tavalla, jossa lopputulos oli akustisesti hyvä, on puuvälipohjan kehityshanke, jossa tavoitteena oli saada puuvälipohjan rakennekerroksia vähennetyksi [48]. Kirjallisuustutkimuksen perusteella oli selvää, että kelluvan lattian vaikutus askelääneneristävyyteen on pienempi kuin joustavasti ripustetun alakaton. Hankkeen tuloksena kehitettiin välipohja, joka täyttää rakentamismääräyskokoelman askelääneneristysvaatimukset ja jonka askelääneneristävyys on hyvä myös puurakenteille tavallisesti ongelmallisilla pienillä taajuuksilla (kuva 7.1).



Kuva 7.1. Puuvälipohja, joka täyttää askelääneneristysmääräykset ilman kelluvaa lattiarakennetta [48].

Suomessa puurakenteiden akustiseen toimintaan liittyvä perustutkimus on jäänyt vähemmälle huomiolle. Tästä johtuu esimerkiksi se, että puuvälipohjan askelääneneristävyyden ennustamiseen tai sivutiesiirtymien määrittämiseen puukerrostalon huoneistojen välillä ei ole olemassa laskentamallia.

Ulkomailla tutkimus keskittyy tällä hetkellä erityisesti kolmeen asiaan:

- puurakenteiden toiminnan mallintamista tutkitaan erilaisilla numeerisilla menetelmillä [29, 37, 82]
- sivutiesiirtymiä puurakenteissa tutkitaan sekä kokeellisesti että teoreettisesti [81, 94, 108, 109]
- ääniolosuhteiden kokemista puurakennuksissa ja ääneneristävyyden nykyisten mittalukujen validiteettia selvitetään sosioakustisin ja psykoakustisin menetelmin [65, 95]

7.3 PUURAKENTEIDEN KEHITYSTARPEET TULEVAISUUDESSA

Huolimatta siitä, että puukerrostalorakentamista on Suomessa kehitetty yli 20 vuotta, kehitystarpeita on edelleen olemassa. Tällä hetkellä on tunnistettavissa suuntaus puuosien massojen optimoimiseen puurakenteiden kilpailukyyn parantamiseksi. Ongelmana on ollut se, että puun suuresta määrästä johtuen puukerrostalot eivät ole olleet hinnaltaan erityisen kilpailukykyisiä. Tähän ongelmakenttää liittyy joukko asioita, joihin tarvittaisiin ratkaisuja:

- tuotekehitys perustuu etenkin askelääneneristävyyden osalta laboratoriomittauksiin tai koerakennuksessa tehtäviin mittauksiin. Uusien tuotteiden kehittämiseksi ja seuraavassa vaiheessa erilaisten variaatioiden suunnittelemiseksi käytännön rakennushankkeissa tarvittaisiin yksinkertainen askeläänitasoluvun laskentamalli.
- Suomessa ei ole tehty tieteelliset kriteerit täyttävää sosioakustista tutkimusta, jossa kyselytutkimuksin selvittäisiin puukerrostalojen ääniolosuhteiden kokemista ja sen yhteyttä objektiivisiin ääneneristävyyden mittalukuihin. Tällaisen tutkimuksen tekeminen olisi tärkeää, jotta saadaan selville, kuinka hyvin nykyiset, alkujaan betonirakennusten arviointia varten tarkoitetut mittaluvut kuvaavat ääniolosuhteiden kokemusta puurakennuksissa.
- puurakenteiden ääneneristävyyden kokemista voidaan tutkia myös psykoakustisin kuuntelukokein laboratoriossa, jolloin saadaan yksityiskohtaista aineistoa siitä, mitkä äänityypit ja taajuusalueet ihmiset kokevat häiritseviksi. Pelkästään kyselytutkimuksilla tätä tietoa ei ole mahdollista saada. puukerrostaloissa liitokset ratkaisevat saavutettavan ääneneristävyyden. Tällä hetkellä ei ole olemassa yleisesti hyväksytyjä sivutiesiirtymien laskentamalleja puurakenteille. Tämä on myös seikka, joka vaikeuttaa puurakennusten suunnittelua ja jättää liitosratkaisujen toimivuuden testaamisen rakennusten valmistuttua tehtävien mittausten varaan.
- puurakentamisen kilpailukyky riippuu paljolti välipohjarakenteesta. Keskeistä olisi saada välipohjan rakennustöitä siirrettyksi mahdollisimman paljon tehtaalla tehtäviksi, jolloin asennustöiden määrä työmaalla vähenee ja rakennusaika nopeutuu. Puuvälipohjassa on myös kehittämisen varaa akustiikan kannalta, koska nykyisin on käytettävä teräksisiä jousirankoja tai joustavia tärinäneristimiin perustuvia kiinnikkeitä ääneneristävyyden kannalta riittävän joustavan kerroksen aikaansaamiseksi. välipohjan tapaan myös väliseinärakennetta tulisi kehittää niin, että se voidaan kuljettaa yhtenä kapaleena tehtaalta työmaalle asennettavaksi.
- puukerrostalot on Suomessa tehty joko rankarunkoisina tai CLT-ratkaisuina, jolloin massiiviset puulevyt toimivat kantavina rakenteina. Vaihtoehtoisia runkojärjestelmiä on ehkä löydettävissä, esimerkiksi pilari-palkkirunko ratkaisisi sivutiesiirtymäongelmat ja liitoksiin liittyvän problematiikan, kun ääntä eristävien rakenteiden liitosten ei tarvitsisi välittää pysty- tai vaakakuormia.

8 Puukerrostalon akustiikka-suunnitelman sisältö

8.1 TEHTÄVÄLUETTELOT

Turhan yleinen tapa rakennusten akustiikan toteutuksessa on edelleen se, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan ensin ja valmiista rakennuksesta saatujen valitusten perusteella ryhdytään parantamaan ääneneristystä, huoneakustiikkaa tai taloteknisten laitteiden äänenvaimennusta ja värinäneristystä. Tässä vaiheessa kustannukset ovat aina suuret verrattuna siihen, että ratkaisuihin olisi varauduttu suunnitteluvaiheessa. Asuinrakennusten korjaukset on kuitenkin pakko tehdä takuutöinä. Asiakastyytyväisyyden kannalta akustiikan merkitys on suuri, sillä asiakkaat havaitsevat virheet usein jo muuttopäivänään [41].

Asuinrakennuksia suunniteltaessa on noudatettava rakentamismääräyskokoelman osan C1 määräyksiä. Kaikkien suunnittelijoiden, kuten arkkitehdin, rakennesuunnittelijan ja LVIS-suunnittelijan suunnitelmat vaikuttavat rakennuksen ääniolosuhteisiin. Suunnittelijoiden tehtäväluetteloissa ei kuitenkaan ole akustiikkaan liittyviä suunnittelutehtäviä lukuun ottamatta rakennesuunnittelijan tehtäväluetteloa, jossa mainitaan rakennetyyppien ääneneristävyys [76–78]. Kuten aiemmin on jo todettu, asuinhuoneistojen ääneneristävyys riippuu rakennusosien ominaisuuksien lisäksi monista muista tekijöistä, kuten ääntä eristävien rakennusosien liitoksista tai läpiviennistä, joiden suunnittelu tehtäväluetteloiden mukaan ei ole arkkitehdin, rakennesuunnittelijan tai LVIS-suunnittelijan tehtävä.

Erikoissuunnittelijoiden tehtäväluetteloissa ei ole akustiikkaan liittyen kaikkia tarpeellisia tehtäviä, mutta toisaalta pääsuunnittelijan velvollisuus on huolehtia siitä, että rakennushankkeessa on kaikki tarvittava osaaminen ja pätevä henkilöstö [75], kuten akustiikkasuunnittelija. Akustiikka voidaan ottaa huomioon esimerkiksi niin, että suunnittelukohteesta laaditaan erillinen akustiikkasuunnitelma, joka liitetään

urakka-asiakirjoihin muiden suunnitelmien tavoin. Erillisen akustiikkasuunnitelman laatiminen kaikissa kohteissa olisi valmiissa rakennuksissa saavutettavien ääniolosuhteiden kannalta perusteltua, sillä tavallisesti esimerkiksi ilmastoinnin äänenhallintaa, rakenteiden läpivientidetalleja, liitosten tiivistyksiä ja muita akustiikan kannalta ratkaisevia tekijöitä ei esitetä missään suunnitelmissa. Puukerrostalon tiilialueella laaditussa oppaassa [60] onkin esitetty, että puukerrostalohankkeissa tulisi aina olla akustiikkasuunnittelija.

8.2 EHDOTUS PUUKERROSTALON AKUSTIIKKASUUNNITELMAN SISÄLLÖKSI

Akustiikkaan liittyvät suunnittelutehtävät on vuodesta 2015 lähtien esitetty akustiikkasuunnittelijan tehtäväluettelossa [79]. Tehtäväluettelo kattaa koko rakennushankkeen tarveselvityksestä rakennuksen käyttöönottoon asti. Tarkoituksenmukaista ei ole toistaa kaikkea tehtäväluettelon sisältöä, vaan seuraavassa on esitetty puukerrostalohankkeen kannalta keskeiset akustiikkasuunnittelutehtävät rakennushankkeen eri vaiheissa:

Hankesuunnittelu

- rakennuspaikan melutilanteen selvittäminen asemakaavan tai alueelta laadittujen meluselvitysten perusteella tai laatimalla maastonmuotojen, liikennemäärien ja ajonopeuksien perusteella meluselvitys, jonka avulla määritetään rakennuksen ulkovaipan ääneneristystarve sekä pihojen oleskelualueiden ja parvekkeiden meluntorjuntatarve
- rautatien tai raitiotien läheisyyteen rakennettaessa rakennuspaikan tärinä- ja runkomelutilanteen selvittäminen asemakaavan tai alueelta laadittujen selvitysten perusteella tai laatimalla laskennallinen tai mittauksiin perustuva tärinä- ja runkomeluselvitys
- asuinhuoneistojen väliselle ääneneristävyydelle, huoneakustiikalle ja LVIS-järjestelmien tuottamalle melutasolle asetettavien vaatimusten määrittely
- rakennuksen runkojärjestelmän arviointi ääneneristävyuden näkökulmasta
- ehdotus ääntä eristävien rakenteiden rakennetyypeistä yhteistyössä rakennesuunnittelijan kanssa

Ehdotus- ja yleissuunnittelu

- asuinhuoneistojen väliselle ääneneristävyydelle, huoneakustiikalle ja LVIS-järjestelmien tuottamalle melutasolle asetettavien vaatimusten määrittely, ellei tätä ole jo hankesuunnitteluvaiheessa tehty
- ääntä eristävien rakenteiden rakennetyyppien täsmentäminen
- tiloja erottavien ovien ja lasiseiniä ääneneristysvaatimusten määrittely
- LVIS-järjestelmien meluntorjunnan periaatteiden ja kanavareittien suunnittelu yhteistyössä ilmanvaihtosuunnittelijan kanssa
- LVI-suunnittelijan avustaminen vesi-, lämpö- ja viemärijärjestelmien valinnassa
- ilmanvaihtokanavistossa tarvittavien äänenvaimenninten tilantarpeen alustava määrittely yhteistyössä ilmanvaihtosuunnittelijan kanssa äänen siirtymisen estämiseksi tilasta toiseen ilmanvaihtokanavien ilmatilan kautta
- porrashuoneiden huoneakustiikan suunnittelu yhteistyössä arkkitehdin kanssa
- selvitys rakennuksen ulkovaipan ääneneristävydestä sekä pihojen oleskelualueiden ja parvekkeiden meluntorjunnasta rakennuslupahakemuksen liitteeksi
- tarvittaessa ratojen aiheuttaman tärinän ja runkomelun edellyttämien eristusratkaisujen valinta ja suunnittelu ja tärinähallintasuunnitelman laatiminen

Toteutussuunnittelu

- ääntä eristävien rakenteiden liitosdetaljien laatiminen
- ääntä eristävien rakenteiden tiivistysohjeiden laadinta
- LVIS-järjestelmien ääntä eristäviin rakenteisiin edellyttämien läpivientien läpivientidetaljien laatiminen
- ilmanvaihtokanavissa tarvittavien äänenvaimenninten määrittely äänen siirtymisen estämiseksi tilasta toiseen ilmanvaihtokanavien ilmatilan kautta
- ohjeiden laadinta rakennuksen LVIS-järjestelmien tärinäneristyksestä
- tarvittaessa ratojen aiheuttaman tärinän ja runkomelun edellyttämiin eristusratkaisuihin liittyvien liitosdetaljien laadinta
- yllä mainittuja asioita koskevien työohjeiden kokoaminen urakka-asiakirjoina toimiviksi toteutussuunnitteluvaiheen akustiikkaselostuksiksi, jotka tehdään erikseen rakennusteknisiin töihin ja LVI-tekniisiin töihin liittyen.

Rakennusaika

- rakennusaikaisten muutosten hyväksyminen
- rakennusaikaisten muutosten suunnittelu
- osallistuminen työmaakokouksiin
- valvonta työmaakokousten yhteydessä ja tarvittaessa muulloinkin sekä havaintojen raportointi

Vastaanottovaihe

- akustiset mittaukset urakoitsijan työsuorituksen laadun varmistamiseksi: tarvittava määrä ilma-ääneneristyslukujen R'_w askeläänitasolukujen $L'_{n,w}$, ulkovaipan äänitasoerolukujen $DI_{s,2m,nT,w} + C_{tr}$ ja LVIS-laitteiden aiheuttamien keskiäänitasojen $L_{A,eq}$ ja enimmäisäänitasojen $L_{A,max}$ mittauksia
- tarvittaessa tärinän ja runkomelun mittaukset rakennuksesta
- mittaustulosten raportointi
- luovutustarkastukseen osallistuminen

Lähteet

1. Ampuja, O. 2007. Melun sieto kaupunkielämän välttämättömyytenä: melu ympäristöongelmana ja sen synnyttämien reaktioiden kulttuurinen käsittely Helsingissä. Helsinki, Suomalaisen Kirjallisuuden Seura, Bibliotheca Historica 110.
2. Balanant, N., Guigou, C. & Villenave, M. 2012. Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois, à vocation logements. Paris, l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement.
3. Bard, D., Davidsson, P. & Wernberg, P. A. 2010. Sound and vibrations investigations in a multi-family wooden frame building. Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics. Sydney, August 23-27.
4. Bodlund, K. 1985. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 102(3), 381-402
5. Bradley, J. S. & Birta, J. A. 2001. A Simple model of the sound insulation of gypsum board on resilient supports. *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 49(5), 216-223.
6. Brandt, O. 1964. European experience with sound-insulation requirements. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 36, 719-724.
7. Brunskog, J. 2002. Acoustic excitation and transmission of lightweight structures. Doctoral Thesis. Sweden, LTH, Lund University, Engineering Acoustics, Report TVBA-1009.
8. Buckingham, E. 1925. Theory and interpretation of experiments on the transmission of sound through partition walls. *Scientific Papers of the Bureau of Standards*. Vol. 20, 193-210.
9. Cambridge, J. E. 2006. An evaluation of various sound insulation software and their applications in the design of silent rooms. Master's Thesis. Gothenburg, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering.
10. Chrisler, V. L. & Snyder, W. F. 1935. Recent sound transmission measurements at the national bureau of standards. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. Vol. 14, 749-764.
11. Craik, R. J. M. 1998. Structure-borne sound transmission in lightweight buildings. Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics. Seattle, June 20-27.
12. Craik, R. J. M. & Galbrun, L. 2005. Vibration transmission through a frame typical of timber-framed buildings. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 281, 763-782.
13. Cremer, L., Heckl, M. & Petersson, B. A. T. 2005. Structure-borne sound, structural vibrations and sound radiation at audio frequencies (3. p.). Berlin, Springer-Verlag.
14. DIN 52210. 1952. Bauakustische Prüfungen – Luftschalldämmung und Trittschallstärke – Bestimmung am Bauwerk und im Laboratorium.
15. Forssén, J., Kropp, W., Brunskog, J., Ljunggren, S., Bard, D., Sandberg, G., Ljunggren, F., Ågren, A., Hallström, O., Dybro, H., Larsson, K., Tillberg, K., Jarnerö, K., Sjökvist, L. G., Östman, B., Hagberg, K., Bolmsvik, Å. Olsson, A., Ekstrand, C. G. & Johansson, M. 2008. Acoustics in wooden buildings, State of the art 2008. Borås, Technical Research Institute of Sweden, Report 2008:16.

16. Gastell, A. 1936. Schalldämmmessungen in der Praxis und vorschläge zur Normung des Schallschutzes von Wohnungstrennwänden und Decken. *Akustische Zeitschrift*. Vol. 1, 24–35.
17. Gomperts, M. C. 1964. The “sound insulation” of circular and slit-shaped apertures. *Acustica*. Vol. 14, 1–16.
18. Gomperts, M. C. & Kihlman, T. 1967. The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. *Acustica*, Vol. 18, 144–150.
19. Guigou, C., Lacaze, M. & Villenave, M. 2010. Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments d'habitation à ossature bois. Paris, l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement.
20. 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.
21. Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyden ennuste-malli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2.
22. Hongisto, V. 2005. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor Air*. Vol. 15, 458–468.
23. Hongisto, V., Keränen, J., Kylliäinen, M., Mahn, J. 2012. Reproducibility of the present and the proposed single-number quantities of airborne sound insulation. *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 98, 811–819.
24. Hongisto, V. & Kylliäinen, M. 2015. *ÄKK Loppuraportti*. Turku, Työterveyslaitos.
25. Hongisto, V., Kylliäinen, M. & Hyönä, J. 2015. *ÄKK-hankkeen suositukset tulevaisuuden ääneneristysmääräyksiä koskien*. *Rakennusfysiikka 2015*. Tampere, 20.-22.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, s. 561–566.
26. Hongisto, V., Mäkilä, M., Haapakangas, A., Hakala, J., Hyönä, J. & Kylliäinen, M. 2013. Acoustic satisfaction in multi-storey buildings built after 1950 – preliminary results of a field survey. *Proceedings of the 42nd International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2013*. Innsbruck, September 15–18, paper no. 835.
27. Hongisto, V., Suokas, M. & Mäkilä, M. 2015. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – the effect of wall construction. *Building and Environment*. Vol. 85, 309–320.
28. Hopkins, C. 2007. *Sound Insulation*. London, Elsevier Ltd.
29. Hopkins, C., Filippopolitis, M., Ferreira, N., Völzl, R., Schanda, U., Mahn, J. & Krajčí, L. 2016. Vibroacoustic finite element modelling of a solid timber floor formed from dowel-connected joists. *Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016*. Hamburg, August 21–24.
30. Huhtala, T. 2006. Mittausjakson pituuden vaikutus maaperästä mitatun maaperästä mitatun raide liikenteen värähtelyn asuntoihin aiheuttaman haitan arvioinnissa. *Diplomityö*. Espoo, Teknillinen korkeakoulu.
31. Huhtala, T. 2011. Menetelmät tärinä- ja runkomeluhaitan arvioinnissa. *Akustiikkapäivät 2011*. Tampere, 11.-12.5., Akustinen Seura ry.

32. Huhtala, T., Kylliäinen, M. & Takala, J. 2015. Meluntorjunta maankäytön suunnittelun lähtökohtana. Rakennusfysiikka 2015. Tampere, 20.-22.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 611-616.
33. Izewska, A. 2005. Requirements for impact sound insulation between dwellings from the point of view of acoustical comfort of inhabitants. Proceedings of Forum Acusticum. Budapest, August 29 – September 2.
34. Jeon, J. Y., Jeong, J. H. & Ando, Y. 2002. Objective and subjective evaluation of floor impact noise. Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment. Vol. 2 (1), 20–28
35. Jeon, J. Y., Ruy, J. K., Jeong, J. H., Tachibana, H. 2006. Review of the impact ball in evaluation of floor impact sound. Acta Acustica united with Acustica, vol. 92, pp. 777-786.
36. 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.
37. Kohrmann, M., Buchschmied, M., Schanda, U. & Müller, G. 2016. A FEM-Based planning tool for the vibro-acoustic design of wooden floors at low frequencies. Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016. Hamburg, August 21-24.
38. Kovalainen, V. & Kylliäinen, M. 2013. Rakenteiden ilmastueneristävyyden mallinnusohjelma RAI-MO – käyttöohje. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos.
39. Kristensen, J. & Rindel, J. H. 1989. Bygningsakustik – teori og praksis. Glostrup, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166.
40. Kylliäinen, M. 2005. Rakennuksen ulkokuoren rakennusosilta vaadittava ääneneristävyys. Akustiikkapäivät 2005. Kuopio, 26.-27.9., Akustinen Seura ry, s. 78–83.
41. Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 137.
42. Kylliäinen, M. 2007. Miksi askelääneneristuksen arviointi on niin vaikeaa? Akustiikkapäivät 2007. Espoo, 27.-28.9., Akustinen Seura ry, s. 130-135.
43. Kylliäinen, M. 2008. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristuksen suunnittelu. Rakentajan Kalenteri 2009, 382–393.
44. Kylliäinen, M. 2009. Kansainväliset yhteydet vuoden 1967 ääneneristysnormien muotoutumisessa. Tekniikan Waiheita. Nro 3, s. 29-47.
45. Kylliäinen, M. 2011. Kivitalojen ääneneristys. Helsinki, Suomen Rakennusmedia Oy.
46. Kylliäinen, M. 2012. Rating of floors with the proposed impact sound reduction index. Proceedings of the Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting. Odense, Danish Acoustical Society, June 18–20, paper no. 14.
47. 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), 640–648.

48. Kylliäinen, M., Björman, J. & Hakkarainen, J. 2015. Akustisesti toimivan kustannustehokkaan puuvälipohjan kehittäminen. Tampere, 20.-22.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 573-578.
49. Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. RIL 243-1 Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
50. Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2008. Mittausmenetelmä rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskevan asemakaavamääräyksen toteutumisen valvomiseksi. Rakenteiden Mekaniikka. Vol. 41, nro 1, s. 37-43.
51. Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D. & Rekola, L. 2016. A laboratory listening experiment on subjective and objective rating of impact sound insulation of concrete floors. Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016. Hamburg, August 21-24, paper no. 193.
52. Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V. & Hongisto, V. 2015. Correlation between single-number-quantities of impact sound insulation and various noise ratings of walking on concrete floors. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 101(5), s. 975-985.
53. Kylliäinen, M. & Mikkilä, A. 2009. Rakennusosien ilmaääneneristävyysmallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä. Rakennusfysiikka 2009. Tampere, 27.-29.10., Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitos ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 269-278.
54. Kylliäinen, M., Oliva, D., Rekola, L. & Hongisto, V. 2015. Asuinhuoneistojen betonivälipohjien askelääneneristysten subjektiivinen ja objektiivinen arviointi. Kuopio, 1.-2.9., Akustinen Seura ry, s. 204-207.
55. 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.
56. 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.
57. Langdon, F.J., Buller, I.B. & Scholes, W.E. 1981. Noise from neighbours and the sound insulation of party walls in houses. Journal of Sound and Vibration. Vol. 79(2), 205-228
58. Latvanne, P. 2015. Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
59. Latvanne, P. & Kylliäinen, M. 2015. Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet. Rakennusfysiikka 2015. Tampere, 20.-22.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 567-572.
60. Lehtinen, J., Savikko, R. & Länsiluoto, J. 2015. Kouvola Innovations Oy – Puukerrostalon tilaajan opas. Julkaisematon raportti. Tampere, A-Insinöörit Suunnittelu Oy ja Sweco Oy.
61. Liebl, A., Späh, M. & Leitner, P. 2013. Evaluation of acoustic quality in wooden buildings: Listening tests and questionnaire field study. Borås, SP Technical Research Institute of Sweden, SP report 2014:16.
62. Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2013. Asuinkeuhkalojen ääneneristävyyden kehittyminen Suomessa vuosina 1955-2008. Tekniikan Waiheita. Nro 1, s. 5-23.

63. Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mittaustulosten perusteella. Helsinki, ympäristöhallinnon ohjeita 1/2014.
64. 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 21-24, paper no. 226.
65. Ljunggren, F., Simmons, S. & Hagberg, K. 2014. Correlation between sound insulation and occupants' perception – proposal of alternative single number rating of impact sound. Applied Acoustics. Vol. 85, 57–68.
66. Mariner, T. 1961. Critique of the reverberant room method of measuring air-borne sound transmission loss. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 33, 1131– 1139.
67. Mayr, A. R. & Nightingale, T. R. T. 2007. On the mobility of joist floors and periodic rib-stiffened plates. Ottawa, National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-49694.
68. Mortensen F. R. 1999. Subjective evaluation of noise from neighbours with focus on low frequencies. Kongens Lyngby, Technical University of Denmark, Department of Acoustic Technology, Publication no. 53.
69. Pääkkönen, R., Kylliäinen, M. & Mikkilä, A. 2016. Melun häiritsevyydestä. Ympäristö ja Terveys. Nro 5, s. 83–87.
70. Rakennuksen julkisivun ääneneristävyyden mitoittaminen. 2003. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 108.
71. Ratkaisujen Suomi – pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma 29.5.2015, hallituksen julkaisusarja 10/2015, Helsinki, 2015.
72. Rauhala, J. & Kylliäinen, M. 2009. Eristerapatun betoniseinän ilmaääneneristävyys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 142.
73. RIL 129-2003 Ääneneristyksen toteuttaminen. 2003. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.
74. RT 084.30 Ikkuna, ääneneristävyys. 1975. Helsinki, Rakennustietosäätiö.
75. RT10-11108 Pääsuunnittelun tehtäväluettelo PS12. 2013. Helsinki, Rakennustieto Oy.
76. RT10-11109 Arkkitehtisuunnittelun tehtäväluettelo ARK12. 2013. Helsinki, Rakennustieto Oy.
77. RT10-11128 Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK12. 2013. Helsinki, Rakennustieto Oy.
78. RT10-11129 Taloteknisen suunnittelun tehtäväluettelo TATE12. 2013. Helsinki, Rakennustieto Oy.
79. RT10-11185 Akustiikkasuunnittelun tehtäväluettelo AKU12. 2015. Helsinki, Rakennustieto Oy.
80. Saarinen, A. 2015. Rakennuksen meluntorjunta ja ääniolosuhteet. Keskustelutilaisuus rakennusten äänieristyksestä, meluntorjunnasta ja ääniolosuhteista. Helsinki, ympäristöministeriö, 27.10.2015.

81. Schoenwald, S. 2008. Flanking sound transmission through lightweight framed double leaf walls – Prediction using statistical energy analysis. Doctoral Dissertation. Eindhoven, Eindhoven University of Technology.
82. Schöpfer, F., Hopkins, C., Mayr, A. & Schanda, U. 2016. Modelling structure-borne sound transmission across a timber-frame wall using SEA. Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016. Hamburg, August 21-24.
83. 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, 21–32.
84. SFS 5907. 2004. Rakennusten akustinen luokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
85. SFS-EN 12354-1. 2000. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
86. SFS EN 12354-2. 2000. Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms.
87. SFS EN 10140-1. 2010. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building element – Part 1: Application rules for specific products.
88. SFS-EN ISO 10140-5. 2010. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 5: Requirements for test facilities and equipment.
89. SFS-EN ISO 16283-2. 2015. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. part 2: Impact sound insulation.
90. SFS-EN ISO 717-1. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
91. SFS-EN ISO 717-2. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.
92. Sharp, B. H. 1978. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 11, 53–63.
93. Sjöström, A., Baard, D., Persson, K. & Sandberg, G. 2010. Experimental structural acoustic investigation of lightweight floor structure. Proceedings of Congress on Sound and Vibration. Ljubljana, September 15–18.
94. Sjöström, A., Negreira, J., Bard, D., Sandberg, G., Novak, C. & Ule, H. 2014. Flanking transmission in three different lightweight wooden building types. Proceedings of the 43rd International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2014. Melbourne, November 16–19.
95. Späh, M., Hagberg, K., Bartlomé, O., Weber, L., Leistner, P. & Liebl, A. 2013. Subjective and objective evaluation of impact noise sources in wooden buildings. *Building Acoustics*. Vol. 20, 193–214.
96. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys – määräykset. 1985. Helsinki, ympäristöministeriö.
97. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa – Määräykset ja ohjeet. 1998. Helsinki, ympäristöministeriö.

98. Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamista ja luokituksesta. Espoo, VTT, VTT Tiedotteita 2278.
99. Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. Espoo, VTT, VTT Tiedotteita 2425.
100. Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi – Esiselvitys. Espoo, VTT, VTT Tiedotteita 2468.
101. Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo, VTT, VTT Tiedotteita 2569.
102. Törnqvist, J. & Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Espoo, VTT, VTT Working papers 50.
103. Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista.
104. Virjonen, P. & Hongisto, V. 2009. Joustavarankaisen levyrakenneseinän äänenläpäisy. Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.-15.5. Akustinen Seura ry.
105. Walk, M. & Keller, B. 2001. High Sound insulation wooden floor system with granular filling. Proceedings of 17th International Congress of Acoustics. Rome, September 2-7.
106. Warnock, A. C. C. 2000. Impact sound measurements on floors covered with small patches of resilient materials or floating assemblies. Ottawa, National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, Report IRC-IR-802 RES.
107. Warnock, A. C. C. & Birta, J.A. 2000. Detailed report for consortium on fire resistance and sound insulation of floors: Sound transmission and impact sound insulation data in 1/3 octave bands. Ottawa, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Internal Report IR-811.
108. Ågren, A. & Ljunggren, F. 2013. In situ measured flanking transmission in light weight timber houses with elastic flanking isolators. Proceedings of the 42nd International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2013. Innsbruck, September 15–18.
109. Ågren, A. & Ljunggren, F. 2016. In situ measured flanking transmission in light weight timber houses with elastic flanking isolators – part II. Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016. Hamburg, August 21-24.