

Alina Lahdensivu

**HUONEEN MODAALISEN ÄÄNIKENTÄN
VAIKUTUS TILOJEN VÄLILLÄ
TODENNETTAVAAN PUUVÄLIPOHJAN
ASKELÄÄNENERISTÄVYYTEEN**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: TkT Mikko Kylliäinen
Tarkastaja: TkT Jesse Lietzén
Marraskuu 2024

TIIVISTELMÄ

Alina Lahdensivu: Huoneen modaalisen äänikentän vaikutus tilojen välillä todennettavaan puuvälipohjan askelääneneristävyyteen

Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan DI-ohjelma
Marraskuu 2024

Puuvälipohjilla on todettu olevan ongelmia askelääneneristävyydessä alle 100 Hz taajuuksilla. Pitkäkestoinen altistuminen askeläänille voi aiheuttaa asukkaille terveydellisiä ongelmia. Puurakentamista on pyritty lisäämään Suomessa viime vuosina hallituksen toimesta, minkä vuoksi puuvälipohjien askelääneneristävyys on merkittävässä asemassa rakennesuunnittelussa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten huoneen modaalinen äänikenttä vaikuttaa puuvälipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen. Kirjallisuuden mukaan yksi merkittävä tekijä rakenteen askelääneneristävyydessä on vastaanottotilan koko ja muoto.

Analyttisiä laskentamenetelmiä puuvälipohjien askelääneneristävyydelle on hyvin vähän, ja ne voidaan ratkaista vain erityistapauksissa. Yleisimpiä oletuksia askelääneneristävyyden analyttisissä yhtälöissä ovat oletus diffuusista äänikentästä ja täysin jäykistä ja heijastavista seinistä.

Vastaanottotilan koon, huoneen reunaehdojen ja vastaanottotilan näytteistyksen vaikutusta puuvälipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen tutkittiin elementtimenetelmään perustuvalla simuloinnilla. Välipohjarakenteen ja huoneen ilmatilan kytkeytymistä sekä huoneen ominaistajuuksia tarkasteltiin sekä analyttisesti että simuloimalla. Kytkeytymistä kuvaava simulointimalli sekä ominaistajuuksien laskentatapa validoitiin analyttisiin yhtälöihin vertaamalla.

Välipohjan ja huoneen kytkeytymistä kuvaavissa analyttisissä yhtälöissä huoneen ja tarkasteltavan rakenteen ominaistajuudet täytyy tietää tai laskea analyttisesti. Huoneen ominaistajuuksien laskentaan käytettävä analyttinen yhtälö antaa hyvän arvion ominaistajuuksista. Tutkimuksen perusteella huoneen alimmat ominaistajuudet voivat poiketa analyttisen yhtälön tuloksesta jopa 5 Hz, mikä johtuu huoneen reunaehdoista.

Huoneen reunaehdolla ja ilmatilan näytteistyksellä on merkittävä vaikutus saatuun laskentatulokseen. Kevytrakenteisissa huoneissa korostuu eri moodit jäykkä- ja betonipintaisiin huoneisiin verrattuna. Mittausstandardien mukaiselta mittausalueelta saatavat laskentatulokset olivat selvästi pienempiä muihin näytteistystapoihin verrattuna. Mittauspisteistä saatava tulos vastaa koko huoneen askeläänitason tulosta alle 100 Hz taajuuksilla, mutta yliarvioi huoneen äänenpainetasokenttää 100 Hz yläpuolella.

Askelääneneristävyyden simulointien perusteella huoneen aksiaalimoodit ovat merkittäviä puuvälipohjan pienten taajuuksien askelääneneristävyydessä. Erityisesti pystysuuntaiset moodit f_{001} ja f_{002} heikentävät puuvälipohjien askelääneneristävyyttä kaikilla mallinnetuilla huoneilla. Tämän vuoksi vastaanottotilan mallintaminen voi olla hyödyllistä Schroederin taajuuden alapuolella.

Avainsanat: Askelääneneristävyys, puuvälipohja, huonemoodi, modaalinen äänikenttä, elementtimenetelmä, FEM

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Alina Lahdensivu: The effect of the modal sound field of a receiving room to the verifiable impact sound insulation of a timber floor assembly

Master's thesis
Tampere University
Master's programme in Civil Engineering
November 2024

Timber partition floors have problems in their impact sound insulation (ISI) at low frequencies under 100 Hz. Long-term exposure to impact sounds may lead to health problems for the inhabitants. The Finnish Government has sought to increase construction from timber in recent years, which causes ISI to play an important role in the structural design process of timber floors.

The aim of this study was to investigate how the modal sound field of a receiving room affects the verifiable ISI of a timber joist floor. According to literature, one significant factor of the ISI of a structure is the size and shape of the receiving room.

There are very few analytical calculation methods for ISI of timber floors, and their solutions are only valid for specific cases. The most common assumptions in analytical equations are about the diffusivity of the sound field and completely rigid room boundaries.

The influence of the size of the receiving room, the boundary conditions and the sampling of the sound field to the ISI of a timber joist floor was studied using the finite element method (FEM). The coupling of the floor assembly and sound field of the receiving room as well as the natural frequencies of the receiving room were studied both analytically and utilizing FEM. The FEM models for the coupling of the structure and sound field as well as the search methods for the eigenfrequencies of the room were validated by comparing the results to the analytical results.

Analytical equations for coupling of the floor assembly and room sound field assume the knowledge of or require the calculation of the eigenfrequencies of the receiving room. The analytical equation for the room modes gives a reasonable estimation. The lowest room modes may vary as much as 5 Hz from the analytical calculation.

The effect of the boundary conditions and sampling of the room sound field are significant to the calculation results. Rooms with lightweight boundaries emphasize different room modes compared to rigid and heavyweight boundaries. The results from the measurement area defined in measurement standards gives lower calculation results compared to other sampling methods. The results from the measurement positions corresponds to the results obtained from the whole receiving room at frequencies under 100 Hz. Above 100 Hz the measurement positions overestimate the overall sound pressure level in the receiving room.

According to the ISI simulations, the axial modes of the room are significant in the low-frequency ISI of a timber joist floor. Vertical modes f_{001} and f_{002} especially lower the ISI of timber floor assemblies in all simulated rooms. Therefore, the simulation of the receiving room can be useful below the Schroeder frequency.

Keywords: Impact sound insulation, timber joist floor, room mode, modal sound field, FEM

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty osana *Puu- ja hybridirakenteisten välipohjien digitaaliset suunnittelumenetelmät (PuuHyVä)* -hanketta. Hankkeen tavoitteena on tehostaa puurakennusten suunnittelua, kustannustehokkuutta ja materiaalitehokkuutta. Tampereen yliopiston osahankkeen tarkoituksena on kehittää mitoitustyökalu, jolla välipohjien akustinen ja värähtelysuunnittelu on yksinkertaisempaa.

Haluan kiittää työni tarkastajia ja ohjaajia TkT Mikko Kylliäistä, TkT Jesse Lietzénia ja DI Lauri Talusta mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta sekä hyvistä kommentteista, palautteesta ja jännittävistä keskusteluista niin ohjauspalaverien kuin koko diplomityöprosessin aikana. Erityiskiitos DI Lauri Talukselle laskennan opastuksesta sekä lounasseurasta.

Haluan kiittää myös kaikkia läheisiäni tuesta tutkimuksen aikana. Erityiskiitos Lukakselle vertaistuesta sekä päivittäisestä kannustuksesta.

Tampereella, 28.11.2024

Alina Lahdensivu

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Puuvälipohjien askelääneneristävyys pienillä taajuuksilla.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	3
2. HUONEEN ÄÄNIKENTÄN YHTEYS RAKENTEEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYTEEN....	4
2.1 Huoneen äänikenttä	4
2.2 Askelääneneristävyden mittaaminen ja mallinnus	11
2.2.1 Laboratoriomittaukset	15
2.2.2 Kenttämittaukset.....	16
2.2.3 Mallinnusmenetelmät	18
2.3 Puuvälipohjien askelääneneristävyys.....	19
2.3.1 Puuvälipohjat Suomessa	19
2.3.2 Puuvälipohjien askelääneneristävyteen vaikuttavat tekijät	24
2.3.3 Ongelmat puuvälipohjien askelääneneristävydessä.....	25
2.4 Lattian ja huoneen moodien kytkeytyminen.....	26
2.5 Johtopäätökset	30
3. MENETELMÄT	32
3.1 Laskenta- ja mallinnusparametrit	32
3.1.1 Rakenteet.....	32
3.1.2 Huonetilat ja reunaehdot.....	33
3.1.3 Materiaalit.....	36
3.2 Simulointimallit	38
3.2.1 Laatan ja huoneen kytkeytyminen	38
3.2.2 Ominaistaajuuksien tarkastelu	39
3.2.3 Askelääneneristävyden simulointi.....	40
3.3 Validointi	43
4. TULOKSET.....	47
4.1 Laatan ja huoneen kytkeytyminen.....	47
4.2 Huoneen ominaistaajuudet	61
4.3 Huoneen äänikentän vaikutus.....	63
4.4 Askelääneneristävyys	65
5. TULOSTEN TARKASTELU.....	72
5.1 Laatan ja huoneen kytkeytyminen.....	72
5.2 Huoneen ominaistaajuudet	72
5.3 Huoneen äänikentän vaikutus askelääneneristävyteen.....	73
5.4 Puuvälipohjan askelääneneristävyys.....	74
6. YHTEENVETO	76
LÄHTEET.....	78
LIITE A: REUNAEHDON VAIKUTUS YKSINKERTAISESSA MALLISSA	84
LIITE B: SIMULOITUJEN HUONEIDEN ALIMMAT OMINAISTAAJUUDET	85
LIITE C: ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN SIMULOINTITULOKSET.....	87
LIITE D: KAPEAKAISTAISET TULOKSET.....	90

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

CLT	<i>Cross laminated timber</i> , ristiin liimattu massiivipuu
FEM	<i>Finite element method</i> , elementtimenetelmä
ISO	International organization of standardization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
JKA	Jälkikaiunta-aika
LVL	Laminated veneer lumber, viilupuu
PML	<i>Perfectly matched layer</i> , täydellisesti yhteensovitettu kerros
SEA	<i>Statistical energy analysis</i> , tilastollinen energia-analyysi
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Isot kirjaimet

A	Huoneen kokonaisabsorptioala [m^2]
A_0	Vertailuabsorptioala, $10 m^2$
B	Taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden [Nm]
B_{eff}	Efektiiivinen taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden ortotrooppiselle levylle [Nm]
B_x	Taivutusjäykkyys x-suunnassa leveysyksikköä kohden [Nm]
B_y	Taivutusjäykkyys y-suunnassa leveysyksikköä kohden [Nm]
$C_{n_x n_y}$	Kytkeytymiskerroin [-]
C_I	Spektripainotusermi, jolla otetaan huomioon taajuuskaistat 100–2500 Hz [dB]
$C_{I,50-2500}$	Spektripainotusermi, jolla otetaan huomioon taajuuskaistat 50–2500 Hz [dB]
E	Materiaalin kimmokerroin [Pa]
F	Levyn herätevoima [N]
G	Materiaalin liukukerroin [Pa]
L	Huoneen kaikkien sivujen yhteenlaskettu pituus [m]
L_i	Askeläänitaso [dB]
L_n	Normalisoitu askeläänitaso laboratoriossa mitattuna [dB]
$L_{n,i}$	Yhden laboratoriossa tehdyn mittauksen normalisoitu askeläänitaso [dB]
L_{nT}	Standardisoitu askeläänitaso laboratoriossa mitattuna [dB]
L'_{nT}	Standardisoitu askeläänitaso kentällä mitattuna [dB]
$L_{nT,w}$	Standardisoitu askeläänitasoluku laboratoriossa mitattuna [dB]
$L'_{nT,w}$	Standardisoitu askeläänitasoluku kentällä mitattuna [dB]
$L_{n,w}$	Normalisoitu askeläänitasoluku laboratoriossa mitattuna [dB]
$L'_{n,w}$	Normalisoitu askeläänitasoluku kentällä mitattuna [dB]
L_p	Äänenpainetaso [dB]
$L_{p,i}$	Yhden mittauksen tuloksena saatu äänenpainetaso [dB]
M	Moodien limittymistä kuvaava kerroin [-]
MT_{60}	Huonemoodin jälkikaiunta-aika [s]
N	Huoneen ominaistaajuuksien lukumäärä valittuun taajuuteen asti [-]
Q_n	Huonemoodin laatutekijä, Q-arvo [-]
S	Huonetta rajaavien pintojen yhteenlaskettu pinta-ala [m^2]
T	Jälkikaiunta-aika [s]
T_0	Vertailujälkikaiunta-aika, 0,5 s
T_{60}	Sabinen jälkikaiunta-aika [s]

V	Tilavuus [m^3]
X	Levyn kytkentätavasta riippuva kerroin kokonaishäviökertoimessa [-]
Z	Impedanssi [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$]
Z_i	Pinnan i impedanssi, $i = x, y, z$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$]

Pienet kirjaimet

c	Äänennopeus ilmassa, 343 m/s
c_B	Materiaalin taivutusaallonnopeus [m/s]
c_S	Materiaalin leikkausaallonnopeus [m/s]
d	Levyresonaattorin ilmavälin kokonaispaksuus [m]
e	Neperin luku $\approx 2,718$
f	Taajuus [Hz]
f_c	Koinsidenssin rajataajuus [Hz]
f_n	Huoneen ominaistaajuus [Hz]
$f_{n_x n_y n_z}$	Huoneen ominaistaajuus [Hz]
f_s	Schroederin rajataajuus [Hz]
g	Maan putoamiskiihtyvyyys, $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$
j	Imaginääriluku, $\sqrt{-1}$
k	Aaltoluku ilmassa [rad/m]
k_x	Materiaalin aaltoluku x-suunnassa [rad/m]
k_y	Materiaalin aaltoluku y-suunnassa [rad/m]
k_z	Materiaalin aaltoluku z-suunnassa [rad/m]
$k_{n_x n_y n_z}$	Aaltoyhtälön ominaisarvo [rad/m]
l_i	Huoneen dimensio. $i = x, y, z$ [m]
l_x	Huoneen dimensio x-suunnassa [m]
l_y	Huoneen dimensio y-suunnassa [m]
l_z	Huoneen dimensio z-suunnassa [m]
m	Materiaalin pintamassa [kg/m^2]
m_h	Askeläänikojeen vasaran massa, $500 \text{ g} = 0,5 \text{ kg}$
n	Askeläänikojepaikkojen tai mittauspisteiden lukumäärä [-]
$n(f)$	Mooditiheys [moodia/Hz]
n_x	Kokonaisluku, joka kuvastaa huoneen ominaistaajuudella x-suunnassa olevien aallonpituuden puolikkaiden määrää [-]
n_{x1}	Kokonaisluku, joka kuvastaa laatan ominaistaajuudella x-suunnassa olevien aallonpituuden puolikkaiden määrää [-]
n_y	Kokonaisluku, joka kuvastaa huoneen ominaistaajuudella y-suunnassa olevien aallonpituuden puolikkaiden määrää [-]
n_{y1}	Kokonaisluku, joka kuvastaa laatan ominaistaajuudella y-suunnassa olevien aallonpituuden puolikkaiden määrää [-]
n_z	Kokonaisluku, joka kuvastaa huoneen ominaistaajuudella z-suunnassa olevien aallonpituuden puolikkaiden määrää [-]
p	Äänenpaine [Pa]
p_0	Vertailuäänepaine, $20 \mu\text{Pa}$
r	Huokoisen materiaalin virtausvastus [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]
r_s	Huokoisen materiaalin virtausvastus pituusyksikköä kohden [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$]
t	Rakenteen paksuus [m]
$v(x, y)$	Rakenteen nopeuskentän funktio [m/s]
x_0	Pisteherätteen x-koordinaatti [m]
y_0	Pisteherätteen y-koordinaatti [m]

Muut symbolit

α	Absorptiosuhde [-]
δ	Huoneen jälkikaiunta-ajasta riippuva häviökerroin [-]
δ_n	Huoneen moodin vaimennuskerroin [rad/s]
ζ	Seinän akustinen ominaisimpedanssi [-]
ζ_i	Pinnan i akustinen ominaisimpedanssi, $i = x, y, z$ [-]
ζ	Moodin vaimennussuhde [-]
η	Levyn kokonaishäviökerroin [-]
η_i	Levyn sisäinen häviökerroin [-]
θ	Suuntakulma [rad]
λ	Aallonpituus [m]
μ	Poisson' luku [-]
ρ	Materiaalin tiheys [kg/m ³]
ρ_0	Ilman tiheys, 1,205 kg/m ³
$\varphi_{n_x n_y n_z}$	Laatan ominaismuotofunktio [-]
$\varphi_{n_x n_y n_z}$	Huoneen ominaismuotofunktio [-]
ω	Kulmataajuus [rad/s]
ω_n	Ominaiskulmataajuus [rad/s]
$\omega_{n_x n_y n_z}$	Huoneen ominaiskulmataajuus [rad/s]
$\omega_{n_x n_y n_z}$	Laatan ominaiskulmataajuus [rad/s]
Λ	Huoneen ominaismuotofunktion tilavuusintegraali [-]

1. JOHDANTO

1.1 Puuvälipohjien askelääneneristävyys pienillä taajuuksilla

Askeläänet ovat suurin tekijä kerrostaloasukkaiden akustiikasta tekemissä valituksissa (Blazier & DuPree, 1994; Ljunggren, Simmons & Hagberg, 2014; Öqvist, 2017; Öqvist, Ljunggren & Johnsson, 2018; Bard, Vardaxis & Sondergard, 2019; Gibson *et al.*, 2022; Ljunggren & Simmons, 2022). Pitkäaikainen altistuminen askeläänille voi aiheuttaa ongelmia asukkaiden mielenterveydelle sekä fyysiselle terveydelle (Guite, Clark & Ackrill, 2006; Maschke & Niemann, 2007; Park & Lee, 2017).

Askelääneneristävyys on yleensä puuvälipohjien mitoittava tekijä (Blazier & DuPree, 1994; Rasmussen, 2019; Lietzén, 2024). Vuonna 2023 Suomessa tilastoitiin olevan 146 vähintään 3-kerroksista puusta rakennettua asuinkerrostaloa. Vuonna 2021 puukerrostaloja valmistui 21, mikä on eniten modernien puukerrostalojen koko rakennusaikana (Puuinfo, 2023). Taustalla puukerrostalojen määrän lisääntymisessä on puurakentamisen edistäminen Suomen hallituksen toimesta viimeisen 20 vuoden aikana (Ympäristöministeriö, 2007, 2018). Tammikuussa 2025 voimaan tulevan rakentamislain (751/2023) perusteella rakentamisen on hillittävä ilmastonmuutosta ratkaisulla, jotka muun muassa edistävät kiertotaloutta (Rakentamislaki 751/2023, 2023). Suomen nykyisessä hallitusohjelmassa pyritään vauhdittamaan puurakentamista kannustimien avulla sekä ohjaamalla tutkimus-, kehitys- ja innovaatorahoitusta puurakentamiseen ja alan koulutukseen. Lisäksi hallitus aikoo purkaa puurakentamiseen liittyvää sääntelyä. (Valtioneuvosto, 2023). Puurakentamisen yleistyessä puuvälipohjien askelääneneristävyys on merkittävässä asemassa rakennesuunnittelussa.

Askelääneneristävyydellä kuvataan rakenteen kykyä vaimentaa esimerkiksi kävelystä ja hyppimisestä aiheutuvia iskumaisia ääniä. Puuvälipohjien askelääneneristävyyteen vaikuttavat muun muassa lattian kokonaisuudessa, lattianpäällyste, liitosten jäykkyys, palkkien k-jako, alakattorakenne ja staattinen kuormitus (Johansson, 1995; Latvanne, 2015).

Huoneen koolla ja muodolla on todettu olevan vaikutusta tilojen välillä mitattavaan askelääneneristävyyteen (Goydke, 1990; Johansson, 1995; Neves e Sousa & Gibbs, 2011, 2014). Johanssonin (1995) tutkimuksessa tarkasteltiin puuvälipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavia tekijöitä ja huomattiin, että pienissä ja keskikokoisissa huoneissa ei

saatu samoja tuloksia samanlaisilla välipohjilla. Neves e Sousa ja Gibbs (2011, 2014) tutkivat huonekoon vaikutusta askelääneneristävyyteen betonivälipohjilla ja huomasivat, että merkittävin heikkeneminen askelääneneristävyydessä tulee huoneen ensimmäisellä pystysuuntaisella moodilla.

Rakenteen askelääneneristävyyttä arvioidaan yleensä huoneen ominaisuuksista riippuvalla normalisoidulla askeläänitasoluvulla $L_{n,w}$ tai $L'_{n,w}$ tai standardisoidulla askeläänitasoluvulla $L_{nT,w}$ tai $L'_{nT,w}$ sekä näihin lisättävällä spektripainotusermillä C_i tai $C_{i,50-2500}$ (SFS-EN ISO 717-2:2020, 2020). Askeläänitasoluvut $L_{n,w}$ ja $L_{nT,w}$ määritetään laboratoriossa mitatuista tuloksista ja askeläänitasoluvut $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ määritetään kentällä mitatuista tuloksista. Normalisoinnilla ja standardisoinnilla eri välipohjien mittaustuloksista pyritään poistamaan mittaustilan huoneakustiikan vaikutus. Spektripainotusermeillä nimensä mukaisesti painotetaan valittuja mitattuja taajuuksia, jotta pienillä taajuuksilla esiintyvät piikit saataisiin otettua paremmin huomioon. Termillä C_i otetaan huomioon terssikaistat 100–2500 Hz (SFS-EN ISO 717-2:2020, 2020). Yksilukuarvoilla pyritään myös kuvaamaan rakenteen subjektiivista eli koettua askelääneneristävyyttä (Kylliäinen, 2019). Mittaluku $L'_{nT,w}+C_{i,50-2500}$ vastaa paremmin koettua askeläänepainetasoa kuin pelkkä standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$ (Hopkins, 2007; Bradley, Zeitler & Schoenwald, 2011; Kylliäinen, 2019). Suomessa käytettävissä askelääneneristävyyden määräyksissä on mukana spektripainotusermi $C_{i,50-2500}$. Lainsäädännön mukaan suurin sallittu askeläänitasoluku asuinhuoneiden välillä on $L'_{nT,w}+C_{i,50-2500} \leq 53$ dB (Ympäristöministeriö, 2017). Spektripainotusermi ottaa huomioon pienten taajuuksien alueen 50–100 Hz, jota ei arvioida lainkaan standardin ISO 717-2 (2020) mukaisella vertailukäyrällä.

Aiemmissä tutkimuksissa pienten taajuuksien merkitystä on tarkasteltu enemmän ilmaääneneristävyyden osalta ja askelääneneristävyyden tutkimuksissa on keskitytty standardien mukaisiin taajuuksiin 100 Hz alkaen (Ågren & Johansson, 1989; Osipov, Mees & Vermeir, 1997; Simmons, 1999; Hopkins & Turner, 2005). Välipohjien askelääneneristävyyttä pienillä taajuuksilla on tutkittu viime aikoina kokeellisesti ja mallintamalla. Tutkimuksissa on todettu, että huoneen resonanssitaajuuksilla eli huonemoodeilla on vaikutusta todennettavaan askelääneneristävyyteen (Yoo *et al.*, 2010; Neves e Sousa & Gibbs, 2011, 2014; Reynders *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020).

Huoneen ilmatilan ja rakenteen moodien kytkeytymisestä on tehty joitakin tutkimuksia ja kehitetty laskentamalleja (Kihlman, 1967, 2008; Osipov, Mees & Vermeir, 1997; Neves e Sousa & Gibbs, 2011, 2014; Jin, Chen & Liu, 2014). Rakenteen ja huoneen välistä vuorovaikutusta kuvaavissa yhtälöissä huoneen äänikentän on oletettu olevan diffuusi tai huoneen seinien olevan täysin jäykät ja heijastavat. Diffuusissa äänikentässä äänen

energiatiheyden oletetaan olevan sama kaikkialla huoneessa. Tällöin ääni voi saapua mistä tahansa suunnasta samalla todennäköisyydellä ja edetä mihin tahansa suuntaan yhtä suurella todennäköisyydellä. Lisäksi diffuusissa äänikentässä pinnasta heijastuva aalto voi lähteä mihin tahansa suuntaan samalla todennäköisyydellä ja huoneen kaiunta ei riipu vastaanottopisteestä. Diffuusista äänikenttää voidaan siis tarkastella tilastollisesti. (Vér & Beranek, 2006; Hopkins, 2007; Rindel, 2018) Vuorovaikutusta kuvaavissa yhtälöissä täytyy lisäksi tietää huoneen ominaistajuudet tai laskea ne analyyttisesti.

Reynders et al. (2019) tutki diffuusin äänikentän oletuksesta aiheutuvaa epävarmuutta askelääneneristävyyden arviointiin. Diffuusin äänikentän malli yliarvioi askeläänenpainetasoja pienillä taajuuksilla, minkä takia epävarmuus pienillä taajuuksilla on suuri. Huoneen tilavuuden pienentäminen lisää epävarmuutta pienillä taajuuksilla, kun muut askelääneneristävyyteen vaikuttavat parametrit pysyvät samoina (Reynders, 2019). Tämän vuoksi huoneiden äänikenttien tutkimus ja tarkempi mallinnus on tärkeässä roolissa askelääneneristävyyden arvioinnissa (Hopkins, 2007; Reynders *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020).

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tarkoituksena on selvittää miten huoneen modaalinen äänikenttä vaikuttaa puuvälipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen. Huonetilan äänikenttää varioidaan muuttamalla huoneen tilavuutta ja analysoimalla simulointituloksessa tapahtuvia muutoksia. Tutkimuksessa selvitetään myös, miten huoneen eri reunaehdot vaikuttavat huoneen ominaistajuuksiin ja koko välipohjan askelääneneristävyyteen 50–500 Hz taajuuskais-toilla. Lisäksi tutkimuksessa selvitetään huoneen ilmatilan näytteistyksen vaikutusta puuvälipohjan askelääneneristävyyden laskentatulokseen.

Huoneen ja laatan kytkeytymistä sekä huoneen äänikenttää tarkastellaan analyyttisillä yhtälöillä sekä simuloimalla elementtimenetelmää hyödyntäen. Kokonaisen välipohjan askelääneneristävyyttä tarkastellaan simuloinnilla. Yksinkertaisen mallin reunaehtoja muuttamalla saadaan selville analyyttisissä yhtälöissä tehtyjen oletusten vaikutusta kokonaistulokseen.

2. HUONEEN ÄÄNIKENTÄN YHTEYS RAKENTEEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYTEEN

2.1 Huoneen äänikenttä

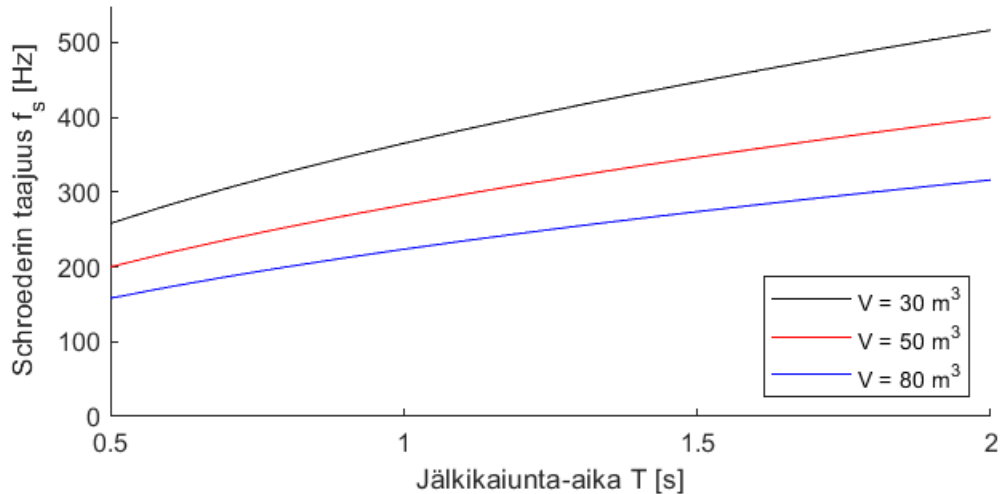
Äänen liikettä väliaineessa voidaan kuvata akustisen aaltoyhtälön avulla. Huoneessa, jonka dimensiot ovat l_x , l_y ja l_z , oletetaan olevan täysin jäykät ja heijastavat seinät. Oletetaan, että aaltoyhtälön ratkaisu on harmoninen eli se ei riipu ajasta. Tällöin aaltoyhtälö voidaan kirjoittaa yhtälössä (1) esitetyssä aikainvariantissa muodossa.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0, \quad (1)$$

jossa p on paine ja k on aaltoluku (Kuttruff, 2009). Jokaisella huoneella on Schroederin rajataajuus, joka lasketaan yhtälöllä (2).

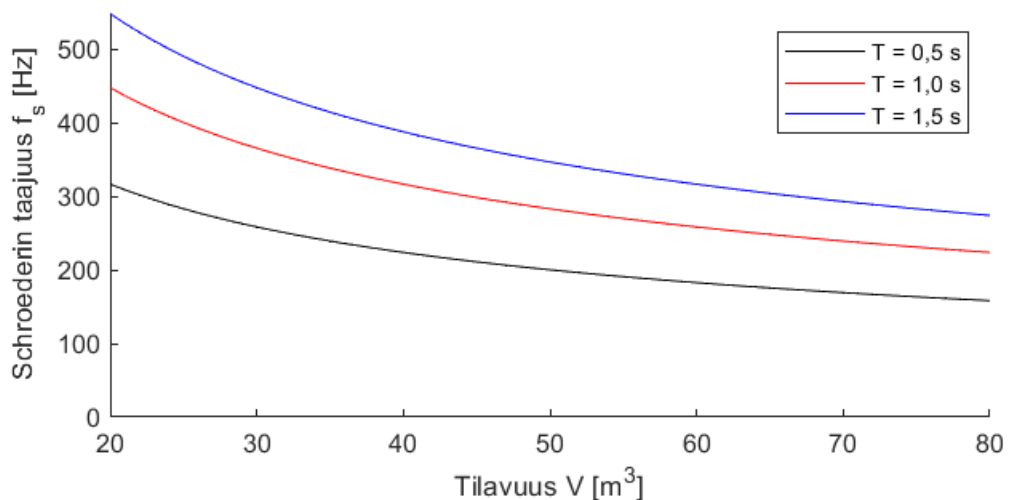
$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (2)$$

jossa T on huoneessa vallitseva keskimääräinen jälkikaiunta-aika (*JKA*) ja V on huoneen tilavuus (Schroeder, 1954; Schroeder & Kuttruff, 1962). Schroederin taajuus jakaa huoneen äänikentän modaaliseen ja diffuusiin äänikenttään. Yhtälössä diffuusiäänikentällä tarkoitetaan taajuuksia, joilla huoneen resonanssitaajuudet limittyvät siten, ettei yksittäisiä taajuuksia pysty erottamaan. Vuonna 1954 Schroeder määrittä, että moodien limittymistä kuvaava kerroin on $M = 10$. Vuoden 1962 artikkelissaan Schroeder ja Kuttruff määrittivät, että moodien limittymistä kuvaavavaksi kertoimeksi riittää $M = 3$ eli tarkasteltavalla taajuusalueella on kolme huonemoodia (Schroeder, 1954; Schroeder & Kuttruff, 1962). Kuvassa 1 Schroederin taajuus on esitetty jälkikaiunta-ajan suhteen eri tilavuuksilla.



Kuva 1. Schroederin taajuus jälkikaiunta-ajan suhteen.

Kuten kuvasta 1 nähdään, Schroederin rajataajuus kasvaa, kun huoneen jälkikaiunta-aika pitenee. Kuvasta 1 nähdään myös, että Schroederin taajuus on suurempi pienemmillä huonetilavuuksilla. Tämä on esitetty selvemmin kuvassa 2, jossa Schroederin taajuus on esitetty tilavuuden suhteen eri jälkikaiunta-ajoilla.



Kuva 2. Schroederin taajuus tilavuuden suhteen.

Kuvasta 2 nähdään, että Schroederin taajuus on kääntäen verrannollinen huoneen tilavuuteen eli Schroederin taajuus kasvaa huoneen tilavuuden pienentyessä. Jälkikaiunta-aika $T = 0,5 \text{ s}$ vastaa kalustetun asuinhuoneen jälkikaiunta-aikaa ja $T = 1,5 \text{ s}$ vastaa tyhjän huoneen jälkikaiunta-aikaa (Takala, 2013). Kalustetussa 30 m^3 huoneessa Schroederin taajuus on $f_s = 260 \text{ Hz}$ ja tyhjässä huoneessa $f_s = 450 \text{ Hz}$. 80 m^3 huoneen Schroederin taajuus kalustettuna on $f_s = 160 \text{ Hz}$ ja tyhjänä $f_s = 270 \text{ Hz}$.

Jälkikaiunta-ajalla tarkoitetaan aikaa, jossa äänenpainetaso huoneessa laskee 60 dB äänilähteen vaiettua. Huoneen jälkikaiunta-aikaa voidaan arvioida Sabine'n yhtälöllä (3).

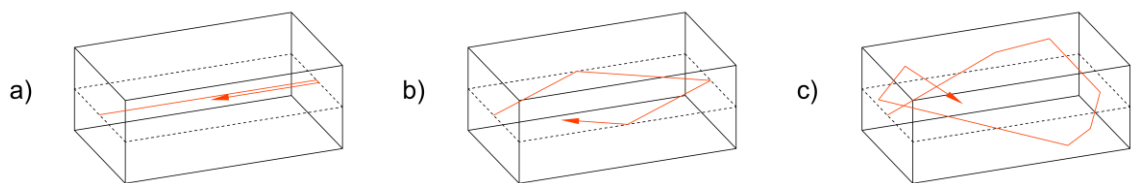
$$T = \frac{0,16V}{A}, \quad (3)$$

jossa V on huoneen tilavuus ja A on huoneen kokonaisabsorptioala. Sabine'n yhtälö perustuu oletukseen diffuusista äänikentästä.

Huoneen äänikenttää ei voida olettaa diffuusiksi koko mitattavalla taajuusalueella seuraavissa tilanteissa (Hopkins, 2007; Rindel, 2018):

- huoneessa on paljon absorboivia pintoja ja ne ovat epätasaisesti jakautuneita
- huoneessa ei ole riittävästi ääntä sirottavia ja diffusoivia elementtejä
- huoneen pisimmän ja lyhimmän dimension suhde on suuri
- huoneen tilavuus on hyvin suuri

Tällaisissa tilanteissa huoneen äänikenttää tarkastellaan modaalisena. Modaalisessa äänikentässä äänenpaineen amplitudi ei muutu ajan suhteen ja huoneeseen syntyy seisovia aaltoja eli huonemoodeja. Huonemoodit syntyvät taajuuksille, joilla vähintään yksi huoneen dimensio on mooditaajuuden aallonpituuden puolikkaan kerrannainen. Huonetta rajaavien pintojen välille voi syntyä kolmenlaisia moodeja: aksiaalisia, tangentiaalisia sekä vinotulokulmaisia (Hopkins, 2007; Kuttruff, 2009; Rindel, 2018). Erilaiset moodityypit ovat havainnollistettuna kuvassa 3.



Kuva 3 . a) Aksiaali b) tangentiaali ja c) vinotulokulmainen moodi.

Suurilla taajuuksilla vinotulokulmaiset moodit määräävät huoneessa vallitsevan äänenpainetasokentän, kun taas pienillä taajuuksilla aksiaaliset moodit ovat määrääviä äänikentässä (Rindel, 2018).

Moodien määrää tietyllä taajuudella voidaan arvioida mooditiheyden (4) avulla.

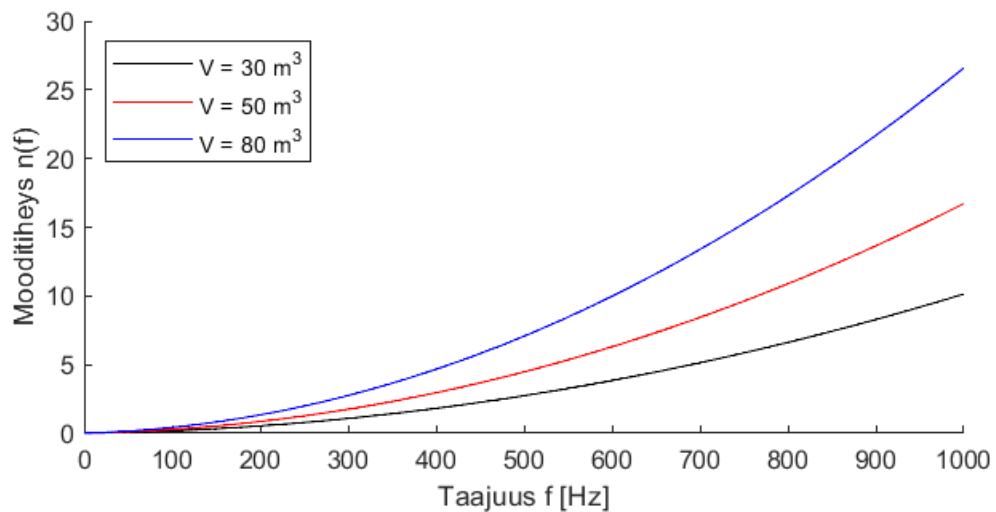
$$n(f) = \frac{dN}{df} = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{L}{8c}, \quad (4)$$

jossa V on huoneen tilavuus, c on äänennopeus ilmassa, f on tarkasteltava taajuus, S on huonepintojen yhteenlaskettu pinta-ala ja L on huoneen kaikkien särmien yhteenlaskettu pituus (Morse & Ingard, 1968; Lubman, 1974). Mooditiheys kuvaa keskimääräistä huonemoodien määrää hertsiä kohden. Taajuusvaste yhdeltä tai useammalta huonemoodilta voi limittyä vierekkäisille taajuuskaistoille (Hopkins & Turner, 2005).

Moodien kokonaismäärä huoneessa tiettyyn taajuuteen f asti voidaan laskea yhtälöllä (5).

$$N = \frac{4\pi V}{3} \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{4} \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L f}{8c} + \frac{1}{8}, \quad (5)$$

jossa V on huoneen tilavuus, c on äänennopeus ilmassa, S on huonetta rajaavien pintojen yhteenlaskettu pinta-ala ja L on huoneen kaikkien särmien yhteenlaskettu pituus (Morse & Bolt, 1944; Pierce, 1989; Rindel, 2018). Kuvassa 4 on havainnollistettu, miten huonekoko vaikuttaa mooditiheyteen.



Kuva 4. Mooditiheys taajuuden funktiona kolmella eri huonetilavuudella.

Kuvasta 4 nähdään, että suuremmalla huonekoolla mooditiheys kasvaa nopeammin taajuuden kasvaessa. Esimerkiksi huoneessa, jonka tilavuus on 80 m^3 on noin 7 moodia 500 Hz taajuudella kun 30 m^3 huoneessa moodeja on 3 samalla taajuudella.

Suorakulmaisessa huoneessa, jonka seinät ovat täysin jäykät ja heijastavat, aaltoyhtälön (1) ominaisarvot saadaan yhtälöllä (6).

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \left[\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

jossa l_x , l_y ja l_z ovat huoneen dimensiot ja n_x , n_y ja n_z ovat kokonaislukuja, jotka ilmaisevat aallonpituuden puolikkaiden määrää huoneen dimension suunnassa. Huoneen resonanssitaajuuudet eli huonemoodit voidaan laskea yhtälöllä (7).

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x n_y n_z}, \quad (7)$$

jossa c on äänennopeus ilmassa. Jäykkien ja täysin heijastavien seinien oletuksella laskennasta saadaan helpompaa (Hopkins, 2007). Suorakulmaisessa huoneessa, jossa seinät eivät ole täysin jäykät, aaltoyhtälön ominaisarvot ovat kompleksisia. Tällainen tapaus tuottaa reunaehtoiseen yhtälöryhmän, joka määritetään yleensä numeerisesti (Kuttruff, 2009; Mechel, 2013). Kuttruff (2009) on esittänyt ominaisarvoille myös likimääräisen ratkaisun, jossa yhden suunnan aaltoluku lasketaan yhtälöllä (8).

$$k_x \approx \frac{n_x \pi}{l_x} + j \frac{2k}{n_x \pi \zeta}, \quad (8)$$

jossa n_x on kokonaisluku, joka ilmaisee aallonpituuden puolikkaiden määrää x-suunnassa, l_x on huoneen sivun mitta, k on ilman aaltoluku ja $\zeta = Z/\rho_0 c$ on seinän akustinen ominaisimpedanssi. Myös likimääräisessä ratkaisussa oletetaan, että seinät ovat lähes jäykät. Aaltoyhtälön ominaisarvot kolmiulotteisessa avaruudessa voidaan yhdistää ja laskea yhtälöllä (9).

$$k_{n_x n_y n_z} = [k_x^2 + k_y^2 + k_z^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

jossa l_x , l_y ja l_z ovat huoneen dimensiot ja n_x , n_y ja n_z ovat kokonaislukuja, jotka ilmaisevat aallonpituuden puolikkaiden määrää huoneen dimension suunnassa (Kuttruff, 2009).

Impedanssi kuvaa seinän värähtelyherkkyyttä ja se riippuu seinän materiaaliominaisuuksista (Kuttruff, 2009). Yksikerroksisen seinän impedanssi Z on riippuvainen taajuudesta ja se voidaan laskea yhtälöllä (10).

$$Z = j\omega m \left(1 - \sin^4 \theta \left(\left(\frac{c}{c_S} \right)^2 + \left(\frac{c}{c_B} \right)^4 \right)^{-1} \right) + \eta \omega m, \quad (10)$$

jossa $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus, m on seinän pintamassa, θ on tulokulma, c on äänennopeus ilmassa, c_S on leikkausaallonnopeus materiaalissa, c_B on taivutusaallonnopeus materiaalissa ja η on materiaalin kokonaishäviökerroin. Pienillä taajuuksilla seinän impedanssi määräytyy seinän omilla resonanssitaajuuksilla. (Rindel, 2018)

Leikkaus- ja taivutusaaltojen nopeus materiaalissa riippuu materiaalin jäykkyysominaisuuksista. Leikkausaallonnopeus isotrooppisessa elastisessa materiaalissa lasketaan yhtälöllä (11).

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}}, \quad (11)$$

jossa G on materiaalin liukukerroin, ρ on materiaalin tiheys, E on materiaalin kimmomoduuli ja μ on Poissonin luku. (Rindel, 2018) Materiaalin taivutusjäykkyys B leveysyksikköä kohden lasketaan yhtälöllä (12).

$$B = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (12)$$

jossa E on materiaalin kimmomoduuli, μ on Poissonin luku ja t on tarkasteltavan materiaalikerroksen paksuus. Taivutusjäykkyyden avulla voidaan laskea materiaalin kriittinen taajuus. Kriittisellä taajuudella $c_B = c$ eli taivutusaallonnopeus on yhtä suuri kuin äänennopeus ilmassa. (Rindel, 2018) Kriittinen taajuus f_c lasketaan yhtälöllä (13).

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}, \quad (13)$$

jossa c on äänennopeus ilmassa, m on materiaalin pintamassa ja B on materiaalin taivutusjäykkyys. (Rindel, 2018) Taivutusaallonnopeus materiaalissa riippuu taajuudesta ja se lasketaan yhtälöllä (14).

$$c_B = c \sqrt{\frac{f}{f_c}}, \quad (14)$$

jossa c on äänennopeus ilmassa ja f_c on kriittinen taajuus yhtälöstä (13). (Rindel, 2018)

Monikerroksisen rakenteen impedanssia voidaan arvioida levyresonaattorin impedanssilla. Esimerkiksi levyseinällä kipsilevyt toimivat resonaattorina ja koolausväli kaviteettina. Levyresonaattorin impedanssi lasketaan yhtälöllä (15).

$$Z = r_s + j \left(\omega m - \frac{\rho c^2}{\omega d} \right), \quad (15)$$

jossa r_s on ilmvälin eristemateriaalin virtausvastus pituusyksikköä kohden, j on imaginääriluku, ω on kulmataajuus, m on resonaattorin pintamassa, ρ on ilman tiheys, c on äänennopeus ilmassa ja d on resonaattorin ilmvälin kokonaispaksuus (Kuttruff, 2009). Eristemateriaalin virtausvastus pituusyksikköä kohden on $r_s = rt$, jossa r on materiaalin virtausvastus ja t on materiaalin paksuus.

Huonetilojen äänikenttää voidaan ennustaa useilla eri keinoilla. Yksi yleisimmistä mallinnuskeinoista on säteenseurantamenetelmä (*ray tracing method*). Menetelmä sopii erityisesti tiloille, jotka ovat satunnaisen muotoisia ja niiden absorboivat ja ääntä hajottavat pinnat eivät ole tasaisesti koko huoneessa. Äänilähteen tuottamaa sädettä seurataan huoneessa heijastuksineen niin kauan, kunnes se saavuttaa vastaanottopisteen tai se osuu pintaan, joka on täysin absorboiva. (Vér & Beranek, 2006; Vigran, 2008)

Toinen yleisesti käytetty menetelmä huonetilan mallinnukseen on kuvalähdemenetelmä (*image source method*), joka perustuu oletukseen, että heijastukset pinnoilta voidaan korvata virtuaalisen toissijaisen lähteen aiheuttamalla suoralla äänellä. Tässä menetelmässä todelliset heijastusreitit on helpompi selvittää, mutta toissijaisten lähteiden oikeellisuuden selvittäminen voi olla työlästä erikoisemman muotoisissa tiloissa. (Vér & Beranek, 2006; Vigran, 2008) Lisäksi huonetilaa voidaan mallintaa mittauksiin perustuvilla empiirisillä malleilla sekä säteenseuranta- ja kuvalähdemenetelmien yhdistelmillä eli hybridimalleilla (Vér & Beranek, 2006).

Yllä mainitut menetelmät ovat geometrisia menetelmiä. Niillä voidaan laskea huoneakustisia parametreja hyvin erikoisen muotoisissakin tiloissa. Yleinen tarkastelualue malleilla

on 125–5000 Hz oktaavikaistat. Geometriset mallinnusmenetelmät ratkaisevat huoneakustiikan parametreja nimensä mukaisesti geometrisena ilmiönä aikatasossa. Ratkaisussa käytetään reunaehtoina yleisesti diffuusin kentän reaalisia absorptiokertoimia ja ääntä sirottavien pintojen kertoimia. Menetelmillä ei pystytä ottamaan huomioon huoneen modaalisia ominaisuuksia yhtä hyvin kuin aaltoyhtälön ratkaisuun perustuvilla menetelmillä.

2.2 Askelääneneristävyyden mittaaminen ja mallinnus

Edelleen mittauskäytössä oleva standardoitu askeläänikoje kehitettiin 1930-luvun alussa (Osswald, 1936). Ensimmäinen standardi askelääneneristävyyden mittaamisesta tehtiin Saksassa vuonna 1938, jossa käytettiin muutama vuosi aiemmin kehitettyä askeläänikojetta (DIN 4110, 1938). Askeläänikoje standardoitiin vuonna 1960 esistandardissa ISO R140 (1960). Nykyisin mittauksissa käytettävän askeläänikojeen tulee täyttää standardin ISO 10140-5 (2022) mukaiset vaatimukset.

Askelääneneristävyyttä mitataan laboratoriossa standardin ISO 10140-3 (2021) mukaan ja kentällä standardin ISO 16283-2 (2020) mukaan. Mittauslaboratorion tiloja sekä askeläänieräteenä sallittavia laitteita koskevia määräyksiä on esitetty standardissa ISO 10140-5 (2022) ja yleisiä mittauskäytäntöjä koskevia määräyksiä standardissa ISO 10140-4 (2021).

Suomessa tehdyissä mittauksissa välipohja herätetään standardisoidulla askeläänikojeella. Askeläänikojeessa on yhteensä 5 vasaraa, jotka painavat kukin 500 g ja jotka putoavat vuorotellen lattiaan 40 mm korkeudelta kaksi kertaa sekunnissa. Standardit antavat myös vaihtoehtoisia tapoja tehdä askeläänieräte, joilla saadaan aikaiseksi hieman erilainen spektri erityisesti pienillä taajuuksilla. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020; SFS-EN ISO 10140-3:2021, 2021; SFS-EN ISO 10140-5:2022, 2022) Tässä tutkimuksessa keskitytään askeläänikojeen aiheuttamaan herätteeseen, sillä askeläänikojeella mitattujen yksilukuarvojen ja subjektiivisen arvion välinen korrelaatio on nykyisistä mittausmenetelmistä paras (Kylliäinen, 2019; Lietzén, 2024).

Askeläänikoje asetetaan testattavalle lattialle vähintään neljään eri kohtaan, vähintään 0,7 m etäisyydelle toisistaan ja 0,5 m etäisyydelle lattian reunoista. Homogeenisilla lattioilla askeläänikoje voidaan asettaa ja suunnata satunnaisesti lattia-alalle, mutta anisotrooppisilla lattioilla, kuten puuvälipohjilla, askeläänikojeen tulisi olla 45° kulmassa palkkeihin nähden. Anisotrooppisella rakenteella on tarkastelusuunnasta riippuvia ominai-

suuksia. Esimerkiksi puinen ripalaatta on jäykempi palkkien suunnassa verrattuna palkkeja vastaan kohtisuoraan jäykkyyteen. Mittaustiloissa ei saa olla ihmisiä mittausten aikana, kun mitataan laboratoriossa. Kentällä mitattaessa vastaanottohuoneessa on yleensä mittaaja. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020; SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021)

Äänenpainetasomittaukset tehdään laboratorion vastaanottotilassa joko kiinteillä mitauspaikoilla tai jatkuvasti liikkuvalla mikrofonilla. Mittaukset tehdään yleensä 1/3 oktaavikaistoilla, joiden keskitaajuudet ovat 100–5000 Hz. Suomessa taajuusaluetta on jatkettu myös 50, 63 ja 80 Hz taajuuskaistoille. Mittauspisteiden tulee olla 0,7 m etäisyydellä toisistaan, huonetta rajaavista pinnoista sekä ääntä sirottavista pinnoista ja 1,0 m etäisyydellä mitattavasta rakenteesta. Mittauksia tehdään yhtä monta jokaista askeläänikojeapaikkaa kohden. Mittauksilla saadaan selville huoneen keskimääräinen äänenpainetaso energian suhteen integroimalla tulos mittausajan yli. (SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021)

Normalisoidun askeläänitason L_n mittauksessa mitataan äänen siirtymistä mekaanisesti herätetyn lattian kautta vastaanottotilassa, joka on yleensä mitattavan rakenteen alapuolinen tila. Normalisoitu askeläänitaso lasketaan mitatuista äänenpainetuloksista yhtälön (16) mukaan.

$$L_n = L_i + 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right), \quad (16)$$

jossa L_i on mitattu äänenpainetaso, A on huoneen ekvivalentti kokonaisabsorptioala ja $A_0 = 10 \text{ m}^2$ on vertailuabsorptioala (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020; SFS-EN ISO 10140-3:2021, 2021). Ekvivalentti kokonaisabsorptioala lasketaan Sabineen yhtälöllä (3) huoneessa mitatun jälkikaiunta-ajan avulla (SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021). Kentällä mitattu normalisoitu askeläänitaso merkitään L'_n . Mittaustulosten laskennassa huoneen kokonaisabsorptioalaksi oletetaan 10 m^2 .

Eri askeläänikojeapaikoilta ja eri mittauspisteistä saadut tulokset keskiarvoistetaan yhtälön (17) mukaan.

$$L_i = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right), \quad (17)$$

jossa L_i on keskiarvoistettu askeläänitaso, n on askeläänikojeapaikkojen tai mittauspisteiden kokonaismäärä, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ja $L_{p,i}$ on yksittäisestä askeläänikojeapaikasta tai

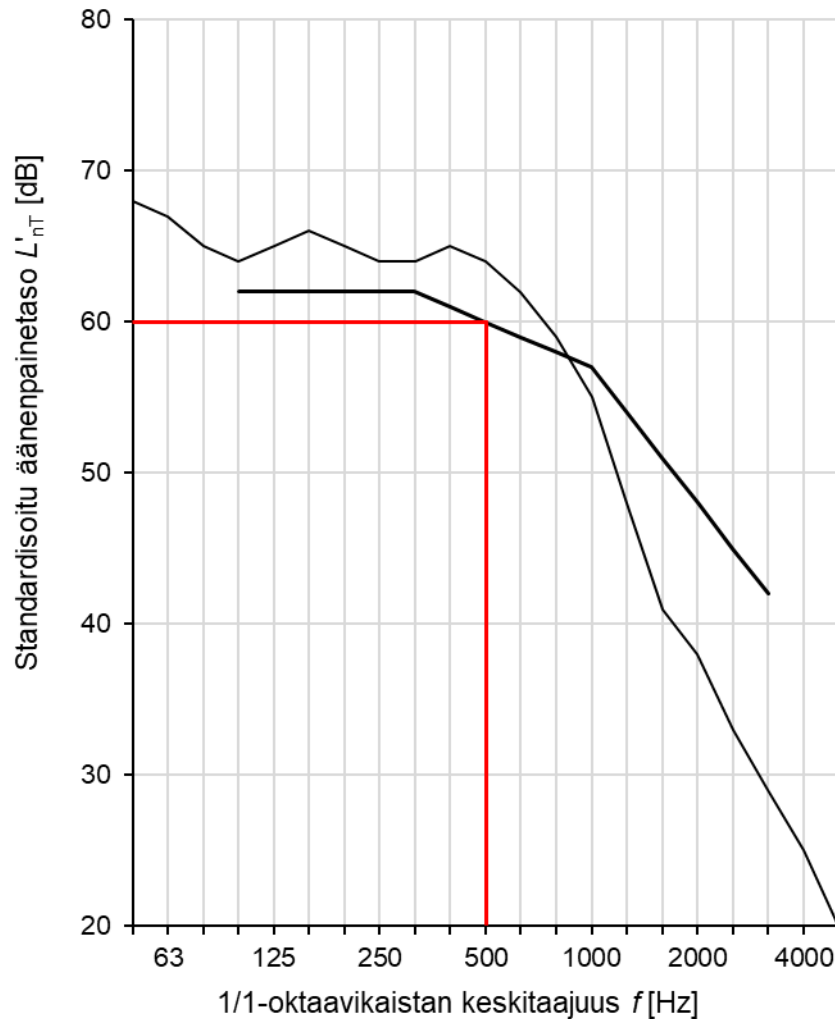
mittauspisteestä saatu tulos. Keskiarvoistuksella pyritään saamaan arvo, joka kuvastaa koko huoneessa vallitsevaa äänikenttää. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020)

Mitatut askeläänitasot voidaan normalisoida suoraan myös vastaanottohuoneessa mitatun jälkikaiunta-ajan mukaan, jolloin puhutaan standardisoidusta askeläänitasosta L_{nT} . Standardisoitu askeläänitaso lasketaan yhtälöllä (18).

$$L_{nT} = L_i - 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (18)$$

jossa L_i on mitattu äänenpainetaso, T on mitattu jälkikaiunta-aika ja T_0 on vertailujälkikaiunta-aika. Kentällä tehdyissä mittauksissa merkintätapa standardisoidulle askeläänitasolle on L'_{nT} , joka vastaa hyvin subjektiivista kokemusta askelääneneristävydestä. Vertailujälkikaiunta-aika on $T_0 = 0,5$ s, joka vastaa kalustetun asuinhuoneen jälkikaiunta-aikaa (Hopkins, 2007; Takala, 2013; SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020) Askeläänepainetasomittaukset joudutaan keskiarvoistamaan tulosten laskennan yhteydessä, jotta mitaustulokset ovat riittävän tarkkoja ja antavat kokonaiskäsityksen huoneessa vallitsevasta äänikentästä (Rindel, 2018).

Kentällä mitatun rakenteen askelääneneristävyttä kuvataan askeläänitasoluvulla $L'_{nT,w}$ tai $L'_{n,w}$. Nämä ovat yksiluarvoja, jotka määritetään standardisoidun askeläänitason L'_{nT} ja normalisoidun askeläänitason L'_n mittaustuloksista standardin ISO 717-2 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä. Vertailukäyrämenettelyssä mittaustulosta verrataan 100–3150 Hz taajuuskaistoilla standardin mukaiseen vertailukäyrään. Kuvassa 5 on esitetty mittauskäyrä mustalla sekä standardin ISO 717-2 mukainen vertailukäyrä paksulla mustalla viivalla.



Kuva 5. Yksilukuarvon $L'_{nT,w}$ määrittäminen ISO 717-2 (2020) mukaisen vertailukäyrän avulla standardisoidun äänenpainetaso L'_{nT} mittauskäyrästä.

Vertailukäyrää sovitetaan mittaustulokseen siirtämällä sitä 1 dB kerrallaan mittaustuloskäyrää kohden, kunnes mittaustulosten ja vertailukäyrän epäsuotuisien poikkeamien summa on niin suuri kuin mahdollista, mutta kuitenkin alle 32 dB. Epäsuotuisat poikkeamat ovat askelääneneristävyydellä sellaisia mittaustuloksia, jotka ylittävät vertailukäyrän. Standardisoitu äänenpainetaso $L'_{nT,w}$ saadaan sovitetulta vertailukäyrältä 500 Hz taajuuden kohdalta. Kuvassa 5 olevalla vertailukäyrältä saadaan yksilukuarvoksi $L'_{nT,w} = 60$ dB ja se on havainnollistettu punaisella viivalla. Laboratoriossa mitattujen rakenteiden askelääneneristävyyttä kuvataan vastaavalla menetelmällä saadulla normalisoidulla askeläänitasoluvulla $L_{n,w}$, joka riippuu mittaustilan kokonaisabsorptioalasta. (SFS-EN ISO 717-2:2020, 2020)

Rasmussen (2019) tutki 35 Euroopan maan ääneneristävyydemääräyksiä asuinrakennuksille. Määräykset on muutettu vastaamaan arvoa $L'_{nT,w}$ oletettujen huoneiden ja raken-

netyyppien perusteella. Askelääneneristävyyden määräykset vaihtelevat 20 dB eri puolilla Eurooppaa. 10 maalla määräykset on annettu standardisoidulla askeläänitasoluvulla $L'_{nT,w}$, 17 maalla normalisoidulla askeläänitasoluvulla $L'_{n,w}$, 4 maalla määräyksessä on mukana spektripainotusermi ja 4 maalla ei ole omia määräyksiä askelääneneristävyydelle. 3 maata suosittelee, että askelääneneristävyyden vaatimus täyttyisi myös spektripainotusermin kanssa. Itävallassa vaatimus on tiukin, $L'_{nT,w} \leq 48$ dB. Kroatiassa ja Serbiassa vaatimus on $L'_{,w}$ tai $L'_{n,w} \leq 68$ dB. Keskimäärin vaatimus on $L'_{n,w} \leq 57$ dB. Suomen lainsäädännössä asetettu suurin sallittu askeläänitasoluku asuinhuoneiden välillä on $L'_{nT,w} + C_{i,50-2500} \leq 53$ dB (Ympäristöministeriö, 2017).

2.2.1 Laboratoriomittaukset

Laboratoriossa tehdään mittauksia erilaisille rakennusosille, joiden ääneneristävyysominaisuuksia halutaan tutkia. Askelääneneristysmittaukset tehdään päällekkäin olevissa huoneissa, joita erottaa tutkittava välipohjarakenne. Ylempi tila on mittauksissa lähetyksilä ja alempi vastaanottotila. Vastaanottotilan huonetilavuuden tulee olla vähintään 50 m³ (SFS-EN ISO 10140-5:2022, 2022). Lisäksi standardissa on ohjeistettu valitsemaan huoneen mitat siten, että huoneen ominaistajuudet ovat mahdollisimman tasaisesti jakaantuneita pienillä taajuuksilla. Vastaanottohuoneessa tulee olla myös ääntä sirottavia ja diffuosoivia elementtejä. Jos vastaanottotilan jälkikaiunta-aika alle 100 Hz taajuuksilla on alle 1 s tai yli 2 s, täytyy varmistaa, että mitattu ilmaääneneristävyys ei riipu jälkikaiunta-ajasta. Mikäli riippuvuus havaitaan, huoneen jälkikaiunta-aikaa tulee muokata siten, että jälkikaiunta-aika on välillä $1 \leq T \leq 2(V/50)^{2/3}$. Tarkempia vaatimuksia huoneen mitoista tai jälkikaiunta-ajasta ei ole annettu.

Vastaanottotilan taustäänitason tulee olla riittävän hiljainen, jotta se ei aiheuta häiriötä mittauksiin. Standardissa ISO 10140-4 (2021) on suositeltu, että taustäänitaso on vähintään 6 dB, mielellään yli 15 dB, lähetyssignaalin ja taustäänitason muodostaman yhteisäänitason alapuolella kaikilla taajuuskaistoilla. Laboratoriossa tehdyissä mittauksissa ääni kulkee yleensä suoraa reittiä rakenteen läpi. Äänen kulku sivuavia reittejä pitkin on pyritty estämään. Huonetilojen välisen ilmaääneneristävyyden tulee olla riittävä, jotta ainoa äänilähde mittausten aikana on askelääniherätteestä. Toisin sanoen muista lähteistä kuin lattian kautta kulkeutuvasta askelääniherätteestä syntyvän äänenpainetaso tulee olla 10 dB pienempiä kaikilla oktaavikaistoilla. (SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021; SFS-EN ISO 10140-5:2022, 2022)

Testattavan lattian tulee olla 10–20 m² siten, että lattian lyhyempi reuna on vähintään 2,3 m pitkä. Jos testiaukko on koko välipohjan kokoinen, vastaanottotilan tilavuudeksi

suositellaan 50–60 m³. (SFS-EN ISO 10140-5:2022, 2022) Kevyillä testattavilla välipohjilla alakatto voidaan ripustaa palkkeihin kiinnitetystä koolauksesta. Rakentamiseen liittyvissä määräyksissä noudatetaan kevyiden seinien määräyksiä, jotka on annettu standardin ISO 10140-5 liitteessä A. Välipohjan ympäryks ei saa olla jäykästi kytketty laboratorion pysyvään rakenteeseen eli testiaukkoon. Kevyille välipohjille, joiden massa on $m < 150 \text{ kg/m}^2$, ei ole annettu standardissa erityissäantöjä, jotka pitäisi ottaa huomioon välipohjan liittämisen testiaukkoon.

Jälkikaiunta-ajan mittaukset tehdään standardin ISO 3382-2 (2008) mukaan katkaistun kohinan menetelmällä tai integroidun impulssivasteen menetelmällä. Katkaistun kohinan menetelmässä huoneeseen tuotetaan kaiuttimella äänikenttä, jonka spektri on mahdollisimman tasainen ja jatkuva koko tarkasteltavalla taajuusalueella. Kun kaiuttimen tuottama kohina lakkaa, äänen vaimenemisen mittaaminen alkaa. Jälkikaiunta-ajan tarkasteluväli on 20 dB siitä, kun äänenpainetaso huoneessa on laskenut 5 dB. Tarkasteltu jälkikaiunta-aika muutetaan vastaamaan Sabinen määrittämää T_{60} jälkikaiunta-aikaa. Jälkikaiunta-aika T_{60} vastaa aikaa, jossa äänenpainetaso huoneessa vaimenee 60 dB äänilähteen vaiettua. Mittauksia tulee tehdä vähintään 6 jokaista taajuuskaistaa kohden vähintään yhdellä kaiutinpaikalla. Standardissa suositellaan käyttämään insinöörimenetelmää, jossa kaiutinpaikkoja on 2 ja mittauspiste-kaiutin yhdistelmiä on vähintään 6. (SFS-EN ISO 3382-2:2008, 2008; SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021)

2.2.2 Kenttämittaukset

Kentällä tehtävissä askelääneneristävyyden mittauksissa käytetään samoja mittausperiaatteita kuin laboratoriossa. Lähetys- ja vastaanottohuoneet eivät ole kenttäolosuhteissa täysin identtisiä ja äänen siirtymiseen tilasta toiseen vaikuttaa myös välipohjan liitokset ympäröiviin seiniin.

Mittauspisteet ja askeläänikojepaikat valitaan sattumanvaraisesti noudattaen samoja reunaehtoja, jotka on esitetty luvussa 2.2. Standardissa ISO 16238-2 (2020) suositellaan käytettävän 6 askeläänikojepaikkaa, kun mitataan anisotrooppisia lattioita. Askeläänikojepaikkoja tulee olla kuitenkin vähintään 4. Laboratoriomittauksista poiketen mittaaja voi pitää mikrofonia kädessään mittausten aikana ja olla mitattavassa tilassa. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020)

Äänenpainetason mittaukset tehdään paikallaan olevilla mittauspisteillä tai mittaaja voi liikuttaa mikrofonia manuaalisesti ympyrän, spiraalin tai sylinterin muotoisella radalla.

Kalustetussa huoneessa, jossa ei ole riittävästi tilaa, mittausratana voi toimia kolme puoliympyrää. Jokaisella mittaustavalla mittauksia tulee tehdä vähintään yksi jokaista koje-paikkaa kohden. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020)

Mittaustavan aiheuttamaa virhettä pienillä taajuuksilla pohdittiin jo vuonna 1954 (Kuhl, 1954). Ongelma pienten taajuuksien mittausten luotettavuudessa ja toistettavuudessa on tullut esille jo standardissa ISO 140-7 (1998), jonka liitteessä C oli ohjeita alle 400 Hz taajuuksien mittaamiselle alle 50 m³ huoneissa. Liitteessä kehoitetaan lisäämään mit-tauspisteitä ja mittaamaan huoneen keskialueelta, sillä äänenpainetaso huoneen raja-pintojen lähellä on suurempi. Rindelin (2018) mukaan mittauspisteiden lisääminen ei kui-tenkaan vähennä äänenpainetasomittausten epävarmuutta. Kylliäisen (2019) mukaan pienten taajuuksien epävarmuuksilla ei ole merkittävää vaikutusta askeläänitasolukuun ja nykyisissä standardeissa (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020; SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021) mittausaluetta on laajennettu alaspäin 50 Hz taajuuskaistalle.

Pieniä tiloja varten standardissa ISO 16283-2 (2020) on esitetty pientaajuusmenetelmä, jota käytetään 50, 63 ja 80 Hz taajuuskaistojen mittaamiseen huoneissa, joiden tilavuus on alle 25 m³. Menetelmä perustuu Simmons (1999) sekä Hopkinsin ja Turnerin (2005) tekemiin tutkimuksiin. Tutkimusten tarkoituksena oli lisätä mittausten luotettavuutta ja toistettavuutta sekä kehittää uusi helposti omaksuttava mittausmenetelmä, jonka avulla saadaan paremmin huoneessa vallitsevaa äänikenttää kuvaava äänenpainekeskisarvo mittaustulosten laskentaan. Hopkinsin ja Turnerin (2005) tutkimus keskittyi vain ilmaää-neneristävyyteen, mutta he ehdottivat, että samaa menetelmää voitaisiin hyödyntää myös askelääneneristävyyden osalta. Vastaavanlainen tutkimus pientaajuusmenetel-män käytöstä askelääneneristävyyden mittauksissa osoitti kuitenkin, että kehitetty me-netelmä ei sovellu askelääneneristävyyden mittaamiseen (Kylliäinen *et al.*, 2022). Sim-monsin (1999) tutkimuksessa sen sijaan mitattiin myös kahta eri välipohjaa kehitetyllä menetelmällä, mutta kyseinen mittausmenetelmä ei tuottanut halutunlaisia tuloksia.

Pientaajuusmenetelmässä tehdään lisämittauksia huoneen nurkissa. Mittausten tarkoi-tuksena on saada parempi käsitys huoneessa vallitsevasta keskimääräisestä äänenpai-netasosta. Pientaajuusmenetelmässä askeläänikojepaikoista vähintään 2 tulee olla sa-moja kuin yleisellä menetelmällä mitattaessa ja jokaista kojepaikkaa kohden tulee mitata vähintään 4 nurkkaa, joista 2 on lattiatasossa ja 2 katon tasossa. Mikrofonin on mittauk-sissa paikallaan n. 0,3–0,4 m etäisyydellä kaikista nurkkaa rajaavista pinnoista. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020)

Jälkikaiunta-aika mitataan vastaanottohuoneessa standardin ISO 3382-2 (2008) mukaan katkaistun kohinan menetelmällä tai integroidun impulssivasteen menetelmällä vastaavasti kuin laboratoriossa. Keskeytetyn kohinan menetelmässä paikallaan olevia mittauspisteitä tulee olla vähintään 6 jokaisella taajuuskaistalla ja mittaukset tehdään vähintään 1 kaiutinpaikalla. Mittaajan tulee olla huoneessa myös jälkikaiunta-ajan mittauksissa, mikäli hän on ollut huoneessa muissa mittauksissa. Jälkikaiunta-ajan mittauksen pientaajuusmenetelmässä on tärkeää, että äänen spektri on tasainen ja jatkuva myös 63 Hz oktaavikaistalla. (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020) Erona tavalliseen menetelmään, pienten taajuuksien jälkikaiunta-aika mitataan vain 63 Hz oktaavikaistalla eikä terssikaistoilla. Tätä oktaavikaistan tulosta käytetään 50, 63 ja 80 Hz taajuuskaistoille mittaustulosten laskennassa. Suomessa standardin mukaista pientaajuusmenetelmää ei käytetä sen virheellisyyden vuoksi (SFS 5907:2022, 2022; Rakennustarkastusyhdistys, 2024).

2.2.3 Mallinnusmenetelmät

Analyttisissä laskentamalleissa tutkittava tilanne, kuten rakenteessa tapahtuvat muodonmuutokset, pyritään esittämään mahdollisimman tarkasti fysiikan lakien avulla. Askelääneneristävyydelle on kehitetty laskentamalli standardissa ISO 12354-2 (SFS-EN ISO 12354-2:2017, 2017). Laskentamallin avulla laboratoriossa mitatun lattian askeläänitasoluvun pystyy muuttamaan kentällä mitattua tulosta vastaavaksi. Menetelmä soveltuu homogeenisille betonirakenteille. Puisen raakavälipohjan äänensäteilyä on hankalaa ennustaa analyttisesti, sillä sen mallinnuksessa on kolme vaikeaa osa-aluetta (Wang *et al.*, 2020). Brunskog ja Hammer (2000) ovat kehittäneet mallin puuvälipohjan askelääneneristävyyden ennustamiseksi, mutta mallia voi hyödyntää vain hyvin rajatuissa tapauksissa.

Elementtimenetelmään perustuvia numeerisia menetelmiä (*finite element method, FEM, FE-menetelmä* ja *boundary element method, BEM*) hyödynnetään yleensä pienten taajuuksien mallintamisessa, jolloin rakenteen käyttäytyminen on modaalista. Askelääneneristävyyden numeerisessa mallinnuksessa levy herätetään mekaanisesti pistevoimalla. Levyn vasteeseen vaikuttavat herätteen lisäksi reunaehdot sekä rakenteen kytkeytyminen ympäristöön. Mallinnuksella ratkaistaan väliaineen sisäisiä ongelmia, ulkoisia ongelmia sekä näiden yhdistelmiä. Sisäisissä ongelmassa väliaine on rajallinen ja ulkoisissa ongelmassa väliaine on ääretön. Yhdistetyssä ongelmassa rakenne on yhteydessä useaan väliainealueeseen, joista vähintään yksi on ääretön. (Atalla & Sgard, 2015) Esimerkiksi puisen ripalaattavälipohjan tapauksessa sisäinen ongelma on lattiapalkkien välissä olevassa ilmatilassa tapahtuva äänen siirtyminen. Ulkoinen ongelma

samassa tapauksessa on lattiaa ympäröivässä ilmatilassa tapahtuvat äänikentän muutokset.

Puurakenteisen välipohjan mallinnuksessa huokoinen eriste ja ilmatila pitäisi mallintaa pienillä taajuuksilla. Lattian materiaaliominaisuudet tulee valita kirjallisuuden tai kokeellisen moodianalyysin perusteella. (Lietzén *et al.*, 2024) Merkittävä tekijä askelääneneristävyyden ennustamisessa on mallinnuksessa käytetyt reunaehdot (Neves e Sousa & Gibbs, 2014; Wang *et al.*, 2020).

Parametrisissa malleissa kokonaisuuteen vaikuttavat tekijät jaetaan parametreiksi eli muuttujiksi. Muuttamalla yhtä parametria kerrallaan, selvitetään miten kyseinen parametri vaikuttaa kokonaisuuteen. Puuvälipohjien mittauksiin perustuvia askelääneneristävyyden parametrisia mallinnuksia on tehty useita (Hammer, 1994; Johansson, 1995; Latvanne, 2015; Gibson *et al.*, 2022). Mittauksiin perustuvien parametrusten tutkimusten tuloksia on tarkasteltu tarkemmin luvussa 2.3.2.

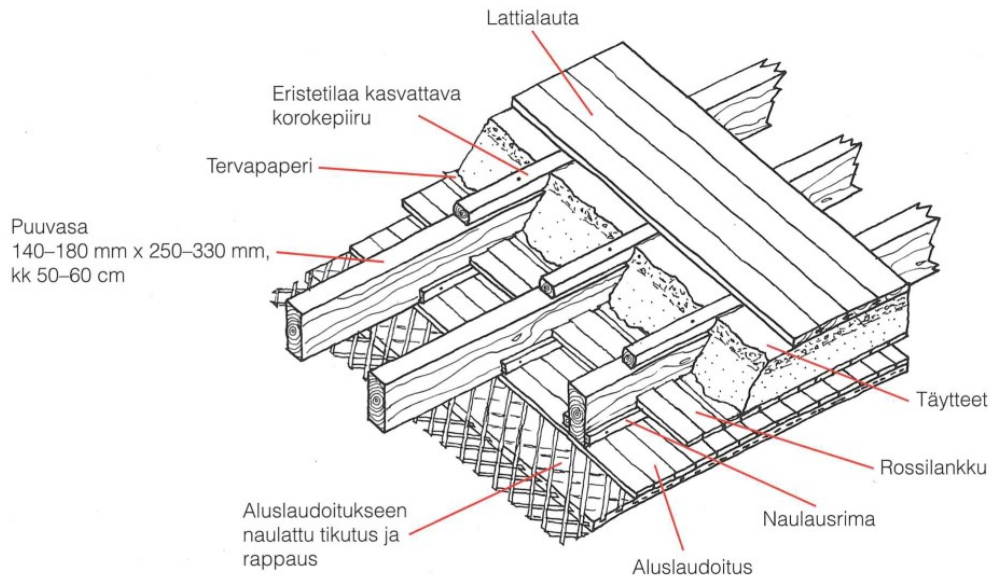
Suurilla taajuuksilla tilastollisen energia-analyysin (*SEA, statistical energy analysis*) käyttö on yleisempää, sillä suuremmilla taajuuksilla äänikentässä ja rakenteessa on suuri mooditiheys. SEA-malleissa tarkastellaan keskimääräisen energian siirtymistä osajärjestelmien ja näiden liitosten kautta. Alisysteemien energia muutetaan keskimääräiseksi äänenpainetasoksi tai värähtelytasoksi. Tilastollista energia-analyysiä voi käyttää tilanteissa, joissa ääni- ja värähtelykenttä on diffuusi ja rakenneosien kytkentä on heikko. (Hopkins, 2007; Atalla & Sgard, 2015; Rindel, 2018)

2.3 Puuvälipohjien askelääneneristävyys

2.3.1 Puuvälipohjat Suomessa

Suomessa puurakentaminen on pitkään keskittynyt pääasiassa omakotitaloihin ja muihin pieniin rakennuksiin. 1800-luvulla kaupungeissa vain julkiset rakennukset ja varakkaiden kauppiaiden rakentamat talot tehtiin kivistä. Muut samaan aikaan rakennetut rakennukset olivat 1- tai 2-kerroksisia puutaloja ja pieniä puisia asuinrakennuksia. 1800- ja 1900-luvun vaihteessa kivistä rakentaminen kiihtyi ja puisia taloja purettiin keskusta-alueelta niiden tieltä. Puutaloja rakennettiin yhä kaupunkien laitamille. (Lahti, 1960; Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

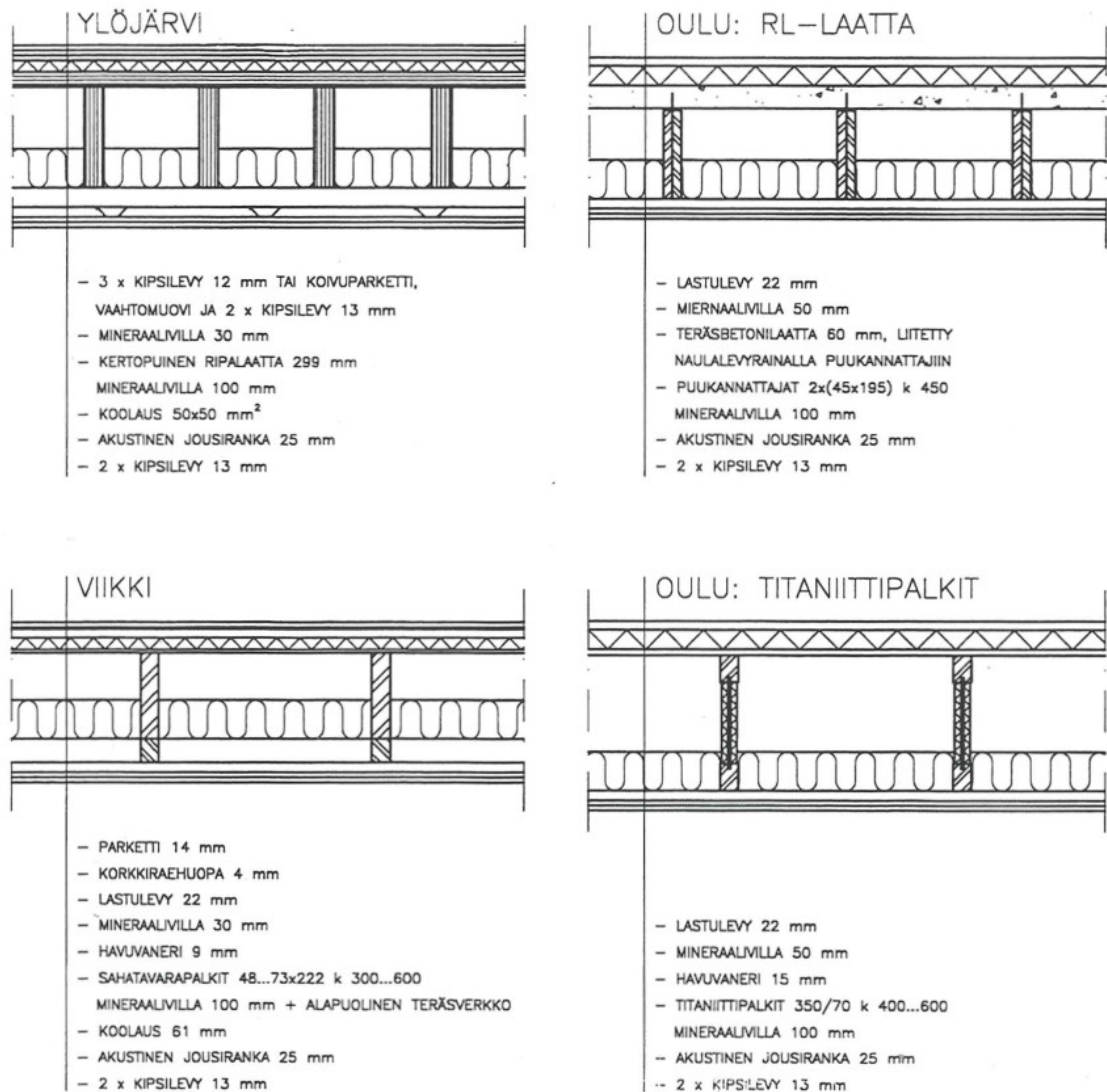
Kivitaloissa välipohjat olivat puusta noin 1920-luvulle asti. Esimerkki kivialon välipohjasta on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kivirakenteisen kerrostalon välipohja 1900-luvun vaihteessa (Neuvonen, Mäkiö ja Malinen, 2002).

Puisten lattiapalkkien päät upotettiin massiivitiiliseiniin varta vasten jätettyihin koloihin ja palkit ankkuroitiin raudalla seinän muuraukseen. Lattia tehtiin valmiiksi, kun koko rakennuksessa oli katto. Lattiapalkkien alareunaan kiinnitettiin rivat, joiden päälle asetettiin palkkivälin pituisia lautoja. Lautojen päälle laitettiin eristemateriaalit, joita olivat esimerkiksi sammal, hiekka, savi ja tuohi. Lattialaudat kiinnitettiin palkkien yläpintaan ja alakatto naulattiin palkkien alapintaan. Vanhojen puuvälipohjien askelääneneristävyydelle ei ollut vaatimuksia, joten askeläänät kuuluvat hyvin kerrosten välillä. (Lahti, 1960; Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

1990-luvulla Suomessa rakennettiin modernien puukerrostalojen pilottikohteita Ylöjärvellä, Viikissä ja Oulussa. Koerakennuksissa kiinnitettiin erityistä huomiota ääneneristävyyteen ja kokeiltiin erilaisia lattiaratkaisuja, jotka on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. 1990-luvun koerakennusten välipohjatyypit (Keronen, 1998).

Ensimmäinen nykyaikaisista puukerrostaloista rakennettiin Ylöjärven asuntomessuille 1996. Kohteen välipohja on tehty kertopuusta valmistetuista ripalaattaelementeistä. Ripalaattojen päällä on 30 mm paksu kova mineraalivilla ja 3 kerrosta kipsilevyjä sekä lattianpäällyste. Alakattona on 2 kerrosta kipsilevyjä, jotka on kiinnitetty akustisiin jousirankoihin. Välipohjan askelääneneristävyyttä mitattiin eri huoneissa ja normalisoitu askelääneneristysluku oli välillä $L'_{n,w} = 36\text{--}44$ dB. (Keronen, 1998)

Viikin kerrostalossa välipohja on elementeistä koottu palkistovälipohja. Elementit koostuvat sahatavarapalkeista, joiden päällä on havupuuvaneri. Elementin päällä on 30 mm paksu kova mineraalivilla, lastulevy sekä lattianpäällyste alusmateriaalin kanssa. Palkkivälissä oleva eriste pysyy paikallaan palkkien alapintaan kiinnitetyn teräsverkon päällä. Kahdesta kipsilevystä koostuva alakatto on asennettu akustisten jousirankojen varaan.

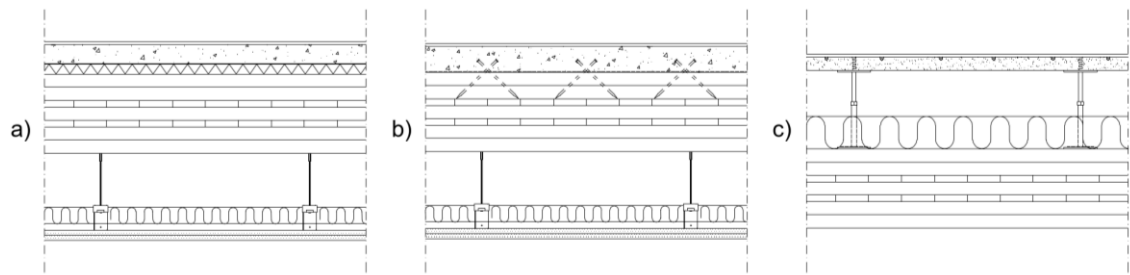
Välipohjan askelääneneristysmittauksista määritetty normalisoitu askeläänitasoluku on välillä $L'_{n,w} = 48\text{--}53$ dB. (Keronen, 1998)

Oulussa käytettiin kahta erilaista välipohjaa. Toinen välipohjista koostuu RL-laatastosta, joka on puu-betoni-liittorakenne. Laatastossa puukannattajien päällä on naulalevyin kiinnitetty 60 mm paksu betonilaatta. Välipohjan päällys- ja alakattorakenteet tehtiin elementtien asennuksen jälkeen. Elementtien päällä on 50 mm paksu kova mineraalivilla ja lastulevy. Kahdesta kipsilevystä koostuva alakatto on kiinnitetty puukannattimista ripustettuihin akustisiin jousirankoihin. Yhdessä rakennuksessa välipohja tehtiin titaniittipalkkirunkoisista ripalaattaelementeistä. Välipohjan päällys- ja alusrakenteet ovat vastaavat kuin RL-laatastosta koostuvassa välipohjassa. Titaniittipalkistovälipohjan normalisoitu askelääneneristysluku on välillä $L'_{n,w} = 51\text{--}54$ dB ja RL-laatastovälipohjan välillä $L'_{n,w} = 44\text{--}49$ dB. (Keronen, 1998).

Nykyisin palkkirakenteiset puuvälipohjat ovat hyvin samanlaisia Ylöjärven pilottikohteessa käytetyn puuvälipohjan kanssa. Välipohjan kannessa on yleensä kolme raskasta kipsilevyä ripalaatan tai muun puisen levyn päällä tai noin 60 mm paksu betoninen pintavalu, kun lattia on kiinteästi kiinni palkistorakenteessa. Tällaisilla ratkaisuilla välipohjien standardisoiduksi askeläänitasoluvuksi voidaan saada $L'_{nT,w} + C_{150\text{--}2500} = 53$ dB. (Lahtela *et al.*, 2021)

Puuvälipohjissa käytettävät kelluvat lattiat ovat hyvin usein betonisia ja ne ovat paksuudeltaan noin 60 mm. Kelluvissa lattioissa välipohjan pintarakenteen ja kantavan kerroksen välissä on kova eristekerros. Betonisella pintalaatalla välipohjaan saadaan helposti lisää massaa, mutta pintalaatan ominaistuuksilla välipohjan askelääneneristävyys heikkenee. (Lahtela *et al.*, 2021)

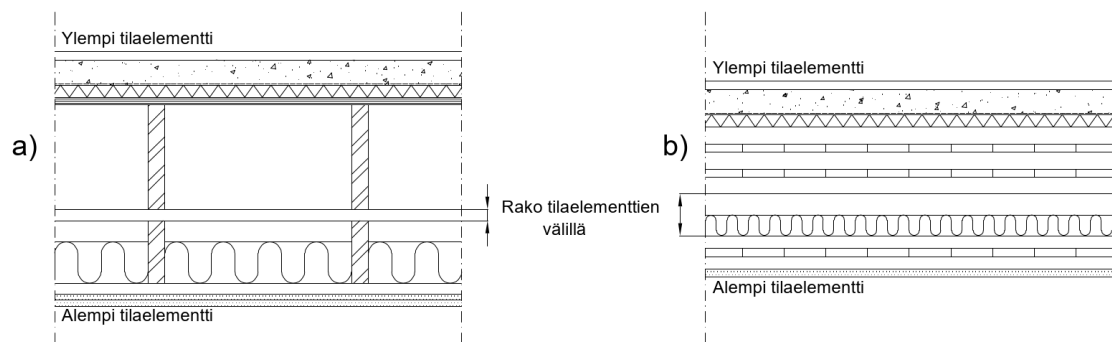
Insinööripuutuotteiden kuten ristiin liimatun massiivipuulevyn (*CLT, cross laminated timber*) käyttö on lisääntynyt viime vuosina. Massiivipuuvälipohjissa puu toimii kantavana rakenteena. Välipohjan päällysrakenne on kelluva betonilaatta, puu-betoni-liittorakenteeksi valettu laatta tai tärinäneristimien päälle tehty asennuslattia. Massiivipuuvälipohjien rakennetyyppejä on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Massiivipuuvälipohjien rakennetyyppejä: a) kelluva betonilaatta b) puu-betoni-liittolaatta ja c) asennuslattiajärjestelmä Lahtelan et al. (2021) mukaan

Puu-betoni-liittorakenteissa puupalkiston tai CLT-laatan päälle valettava betonilaatta ankkuroidaan puuosaan yleensä erilaisilla teräsosilla kuten nauloilla tai erilaisilla vaar-noilla. Rakennetyypin mukaan alakatto voidaan ripustaa jousirangoista, kiinnittää suo-raan massiivipuulevyyn tai jättää massiivipuulevyn alapinta paljaaksi. (Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1995; Lahtela et al., 2021)

Kerrostaloissa käytettävien puuelementtien valmistusastetta on pyritty lisäämään, jotta puurakentaminen työmaalla on nopeampaa. Tämän seurauksena puurakentaminen tila-elementeistä on myös lisääntynyt. (Jussila, 2022) Tilaelementtien rakennetyyppejä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Tilaelementtien rakennetyyppejä: a) palkkirakenteinen välipohja ja b) massiivipuuvälipohja Lahtelan et al. (2021) mukaan.

Tilaelementeistä rakennettaessa välipohjat koostuvat ylempään elementtiin osasta, jossa pintalaatta on usein kelluva sekä alemman tilaelementtiin osasta, johon alakatto on kiinnitetty. Tilaelementtien rakennetyypit vastaavat kuvassa 8 esitettyjä rakennetyyppejä, mutta elementtien väliin jätetään rako, jotta elementit eivät ole kytkettyjä toisiinsa. Massiivipuusta rakennettaessa tilaelementtien välinen rako on vähintään 100 mm. (Lahtela et al., 2021)

Lahtelan et al. (2021) esittämät välipohjaratkaisut on luokiteltu $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} = 53$ dB ja $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} = 63$ dB sen mukaan millaisiin askeläänitasolukuihin välipohjalla voidaan päästä oikealla rakennustavalla. Kuvassa 8 esitetyn asennuslattiajärjestelmällisen CLT-välipohjan ja kuvassa 9 esitetyn CLT-tilaelementtivälipohjan askeläänitasoluksi voidaan saada $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} = 63$ dB. Muilla esitetyillä välipohjatyypeillä askeläänitasoluksi voidaan saada $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} = 53$ dB.

Omakotitaloissa puuvälipohjat tehdään 400 mm tai 600 mm jaolla puupalkeista, joiden päälle asennetaan lattiapäällyste ja palkkien alapintaan alakattoverhous. Palkkien väleissä voi tapauskohtaisesti olla lämmöneristettä. (Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1995) Omakotitaloille ei ole määritetty vaatimuksia askelääneneristävyydelle.

2.3.2 Puuvälipohjien askelääneneristävyteen vaikuttavat tekijät

Parametristen tutkimusten perusteella suurin tekijä puuvälipohjan askelääneneristävydessä on alakatto ja sen kiinnitys. Joustavasti kiinnitetyillä alakatoilla askelääneneristävyys paranee koko taajuusalueella 50–5000 Hz erityisesti massiivisilla puuvälipohjilla. Alakaton tuottama parannusvaikutus askelääneneristävyteen on parempi yli 80 Hz taajuuksilla. Jousirankojen k-jaon harventamisella voidaan edelleen parantaa koko rakenteen askelääneneristävyyttä. (Latvanne, 2015)

Puuvälipohjan kokonaismassaa voi lisätä pintalaatan ja alakaton yhteismassaa kasvattamalla, jolloin askelääneneristävyys paranee erityisesti pienillä taajuuksilla. Tutkimusten perusteella alakatoissa ja pintalaatoissa tulisi suosia monikerroksisia levyrakenteita yhden paksun rakenteen sijasta. Jos paksujen ja massiivisten pintalaattojen ja runkorakenteen väliin lisää eristeen, lattiarakenteen askelääneneristävyys paranee. (Hammer, 1994; Johansson, 1995; Latvanne, 2015; Gibson *et al.*, 2022)

Joustavalla lattianpäällysteellä voidaan vaimentaa välipohjaan kohdistuvaa askeläänierätettä ja siten parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä. Lattianpäällysteen parantava vaikutus askelääneneristävyteen alkaa yleisesti noin 250 Hz taajuuskaistalta, mutta sen parannusvaikutus riippuu välipohjatyypistä. (Latvanne, 2015)

Johanssonin (1995) tutkimuksessa on tarkasteltu erilaisten jäykistysmenetelmien vaikutusta puuvälipohjien askelääneneristävyteen pienillä taajuuksilla. Palkkien suuntainen jäykistys parantaa lattian askelääneneristävyyttä 63 Hz taajuudelta alkaen (Latvanne, 2015). Puuvälipohjan palkkijaon parantava vaikutus askelääneneristävyteen riippuu lattian koosta (Johansson, 1995; Latvanne, 2015). Palkkien pituudella ei ole todettu olevan

vaikutusta ääneneneristävyyteen (Latvanne, 2015). Palkkien poikkileikkauksen muoto ja materiaali voivat vaikuttaa askelääneneristävyyteen joko parantavasti tai heikentävästi. Palkkien korkeuden kasvatus parantaa askelääneneristävyyttä, sillä välipohjan massa ja jäykkyys kasvavat. Johanssonin (1995) mukaan jäykempi rakenne koetaan subjektiivisesti paremmaksi, vaikka mittaustulosten perusteella jäykkä rakenne on huonompi.

Askeläänikojeen aiheuttama heräte riippuu välipohjasta. Puuvälipohjilla askeläänikojeen aiheuttama amplitudispektrin magnitudi on suurin pienillä taajuuksilla ja pienenee taajuuden kasvaessa. (Lietzén, 2024) Askeläänikojeen aiheuttamalle herätteelle on tehty laskennallisia malleja (Brunskog & Hammer, 2003b; Mosharrof *et al.*, 2011), joita on hyödynnetty askelääneneristävyyden FEM-mallinnuksessa (Brunskog & Hammer, 2003a; Rabold *et al.*, 2010; Coguenanff *et al.*, 2015). Lietzén *et al.* (2022) ovat tehneet askeläänikojeen aiheuttamalle herätteelle FEM-mallin, jota on hyödynnetty puuvälipohjan askelääneneristävyyden laskennassa. (Lietzén *et al.*, 2022; Lietzén, 2024)

2.3.3 Ongelmat puuvälipohjien askelääneneristävyydessä

Puuvälipohjien askelääneneristävyydessä on todettu olevan ongelmia erityisesti pienillä taajuuksilla (Olynyk & Northwood, 1968; Ljunggren, Simmons & Hagberg, 2014; Öqvist, 2017; Öqvist, Ljunggren & Johnsson, 2018; Bard, Vardaxis & Sondergard, 2019; Gibson *et al.*, 2022; Ljunggren & Simmons, 2022). Puuvälipohjien alimmat ominaistajuuudet osuvat yleensä 50–100 Hz taajuuksille, joilla kävelyn aiheuttama värähtelyenergia on suurimmillaan (Hammer, 1994; Johansson, 1995; Gibson *et al.*, 2022). Välipohjan ominaistajuuksiin vaikuttaa välipohjan kokonaisuudessa, joka puuvälipohjilla on huomattavasti pienempi betonisiin välipohjiin verrattuna.

Pienillä taajuuksilla mitattu askelääneneristävyys vaihtelee paljon erityisesti pienissä huoneissa ja keskihajonta tuloksissa on suurempi (Johansson, 1995; Caniato *et al.*, 2017). Puuvälipohjien askelääneneristävyyden mittaustulokseen kentällä vaikuttaa, miten välipohjan palkit on asennettu ja minkä muotoinen ja kokoinen huone on (Johansson, 1995). Riittävä askelääneneristävyys on hankala saavuttaa puisella raakavälipohjalla ja kansallisten määräysten vuoksi välipohjat tarvitsevat eristävän lattianpäällysteen ja mahdollisesti kelluvan pintalaatan (Alonso, Patricio & Suárez, 2019; Wang *et al.*, 2020).

Viime vuosina on selvitetty, pitäisikö puuvälipohjien askelääneneristävyyden mittausaluetta jatkaa jopa 20 Hz taajuuskaistalle (esim. Öqvist, 2017; Öqvist, Ljunggren & Johnsson, 2018; Negreira, Sjöström & Glebe, 2019). Tutkimusten perusteella puuvälipohjien askelääneneristävyyttä kuvaavien yksilökuvarvojen ja subjektiivisen kokemuksen välinen

korrelaatio paranee, kun spektripainotustermillä otetaan huomioon taajuudet 20–3150 Hz. Toistaiseksi askelääneneristävyyttä tarkastellaan vielä 50 Hz alkaen.

2.4 Lattian ja huoneen moodien kytkeytyminen

Puurakenteisten ripalaattojen kriittinen taajuus on tyypillisesti 50–100 Hz välillä, minkä vuoksi ilmatilan ja lattian moodien kytkeytyminen tulee ottaa huomioon (Hammer, 1994). Huoneen painekentän yhtälöitä on esitetty monella eri tavalla, joissa levyn ja huoneen moodien kytkeytyminen otetaan huomioon (Kihlman, 1967, 2008; Osipov, Mees & Vermeir, 1997; Neves e Sousa & Gibbs, 2011, 2014; Jin, Chen & Liu, 2014). Näissä laskentaa on helpotettu olettamalla, että huoneen seinät ovat täysin jäykät ja heijastavat, sillä malleissa moodien kytkeytyminen riippuu huoneen ominaistajuuksista. Tässä työssä moodien kytkeytymistä tarkastellaan Neves e Sousan ja Gibbsin (2011, 2014) tekemällä laskentamallilla.

Neves e Sousa ja Gibbs (2011, 2014) mallinsivat homogeenisen betonilattian käyttäytymistä yhdessä huonetilan kanssa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös parametreja, jotka vaikuttavat askelääneneristävyyteen asuinhuoneissa. Homogeenisen lattian värähtelystä aiheutuva äänenpainekenttä huoneessa voidaan laskea aikainvariantissa muodossa yhtälöllä (19).

$$p(x, y, z) = -j\omega\rho_0 \sum_{n_x, n_y, n_z=1}^{\infty} \frac{c^2(-1)^{n_z} C_{n_x n_y} \varphi_{n_x n_y n_z}(x, y, z)}{\left[(\omega_{n_x n_y n_z} + j\delta)^2 - \omega^2 \right] \Lambda_{n_x n_y n_z}} \quad (19)$$

jossa ω on tarkasteltava kulmataajuus, ρ_0 on ilman tiheys, n_x , n_y ja n_z ovat kokonaislukuja, jotka kuvastavat aallonpituuden puolikkaiden määrää huoneessa tietyllä taajuudella, c on äänennopeus ilmassa, C_{n_x, n_y} on lattian nopeuskentästä riippuva kytkeytymiskerroin, $\varphi_{n_x n_y n_z}$ on huoneen ominaismuotofunktio, $\omega_{n_x n_y n_z} = 2\pi f_{n_x, n_y, n_z}$ on huoneen ominaiskulmataajuus, $\delta = 6,9/T$ on huoneen jälkikaiunta-ajasta T riippuva huoneen häviökerroin (Kihlman, 1967), $\Lambda_{n_x n_y n_z} = \int \varphi_{n_x n_y n_z}(x, y, z)^2 dV = V/8$ on huoneen ominaismuotofunktion neliön tilavuusintegraali ja $V = l_x l_y l_z$ on huoneen tilavuus. Yhtälössä on oletettu, että huoneen äänikenttä ei vaikuta levyn nopeuskenttään. Huoneessa vallitseva jälkikaiunta-aika on määritetty yhtälössä käyttämällä globaalia absorptiokerrointa $\alpha = 0,02$, joka on tasan jakautunut kaikille huoneen osapinnoille (Neves e Sousa & Gibbs, 2011).

Kytkeytymiskerroin C_{n_x, n_y} riippuu lattian nopeuskentästä yhtälön (20) mukaan.

$$C_{n_x n_y} = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} v(x, y) \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) dx dy, \quad (20)$$

jossa v on lattian nopeuskentän funktio, n_x ja n_y ovat kokonaislukuja, jotka kuvaavat aallonpituuden puolikkaiden määrää huoneessa x - ja y -suunnissa ja l_x ja l_y ovat lattian dimensiot. Pistevoimalla F herätetyn yksinkertaisesti tuetun lattian kytkeytymiskerroin lasketaan yhtälöllä (21).

$$C_{n_x n_y} = j \frac{4\omega F}{\pi^2 m} \sum_{n_{x1}, n_{y1}=1}^{\infty} \left\{ \frac{\varphi_{n_{x1} n_{y1}}(x_0, y_0) [(-1)^{n_{x1}+n_x} - 1][(-1)^{n_{y1}+n_y} - 1]}{\omega_{n_{x1} n_{y1}}^2 (1 + j\eta) - \omega^2 n_{x1} n_{y1} \left[\left(\frac{n_x}{n_{x1}}\right)^2 - 1 \right] \left[\left(\frac{n_y}{n_{y1}}\right)^2 - 1 \right]} \right\}, \quad (21)$$

jossa m on laatan pintamassa, $\varphi_{n_{x1} n_{y1}}$ on laatan ominaismuotofunktio, x_0 ja y_0 ovat pisteherätteen koordinaatit laatalta, $\omega_{n_{x1} n_{y1}}$ on laatan ominaiskulmataajuus, η on laatan kokonaishäviökerroin, ω on tarkasteltava kulmataajuus, n_{y1} ja n_{z1} ovat kokonaislukuja, jotka kuvaavat aallonpituuden puolikkaiden määrää laatan y - ja z -suunnissa ja n_x ja n_y ovat kokonaislukuja, jotka kuvaavat aallonpituuden puolikkaiden määrää huoneen x - ja y -suunnissa. Levyn häviökerroin riippuu taajuudesta yhtälön (22) mukaan.

$$\eta = \eta_i + X/\sqrt{f}, \quad (22)$$

jossa η_i on materiaalin sisäisiä häviöitä kuvaava termi, X on tarkasteltavan laatan kytkeytävistä riippuva kerroin ja f on tarkasteltava taajuus. Yhtälön toinen termi arvioi materiaalin reunoilla tapahtuvia häviöitä. (Hopkins, 2007) Hopkinsin mukaan mittaukset osoittavat, että muuratuille ja betonisille rakenteille $X = 1$ on järkevä oletus. Standardissa ISO 10140-5 (2022) on annettu minimiarvo $X = 0,3$. Puurakenteisille seinille ja välipohjille, joissa on käytetty eristevillaa, voidaan käyttää arvoa $X = 0,8$ (Hopkins, 2007).

Laatan ominaismuoto lasketaan yhtälöllä (23).

$$\varphi_{n_{x1} n_{y1}}(x, y) = \sin\left(\frac{n_{x1} \pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{n_{y1} \pi y}{l_y}\right), \quad (23)$$

jossa n_{y1} ja n_{z1} ovat kokonaislukuja, jotka kuvaavat aallonpituuden puolikkaiden määrää laatan dimension suunnassa ja l_y ja l_z ovat laatan dimensiot. (Hopkins, 2007)

Huoneen ominaismuoto lasketaan yhtälöllä (24).

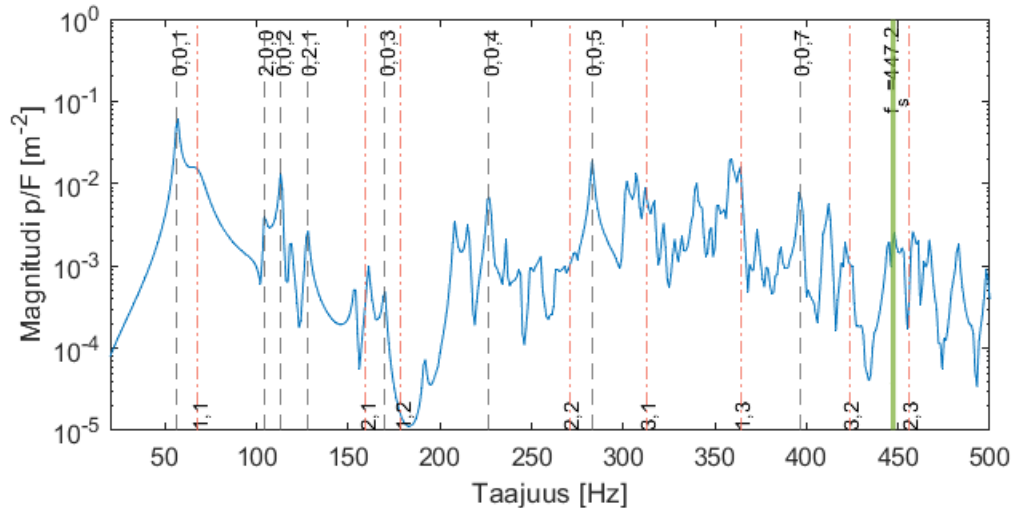
$$\varphi_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right) \quad (24)$$

jossa n_x , n_y ja n_z ovat kokonaislukuja, jotka kuvaavat aallonpituuden puolikkaiden määrää huoneen dimension suunnassa ja l_x , l_y ja l_z ovat huoneen dimensiot. (Hopkins, 2007; Kuttruff, 2009)

Huoneen äänenpainekentän yhtälön (19) avulla voidaan laskea huoneessa vallitseva äänenpainetaso yhtälöllä (25).

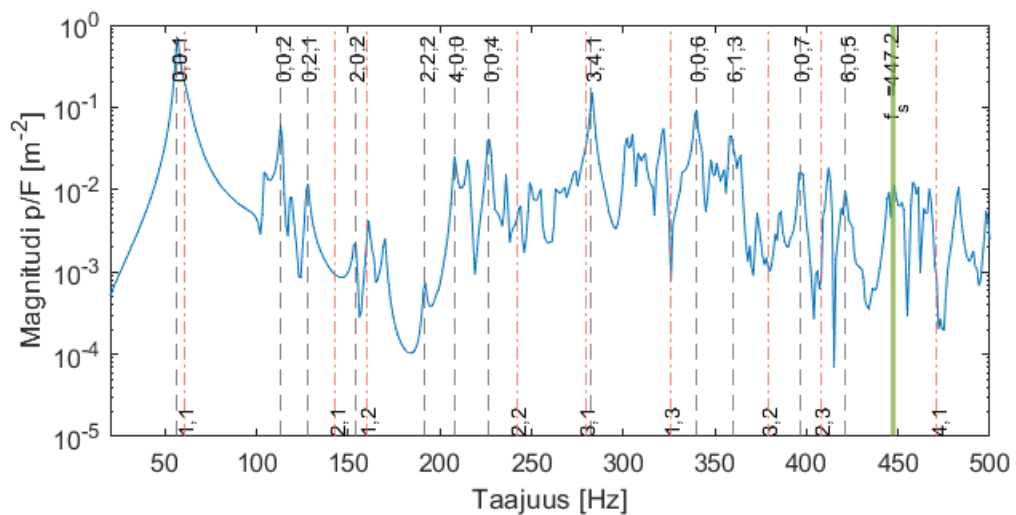
$$L_p = 10 \log\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right), \quad (25)$$

jossa p on laskettu äänenpaine tietyllä taajuudella ja $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ on vertailuäänepaine ilmassa (Vigran, 2008; Rindel, 2018). Yhtälöä (25) voidaan edelleen hyödyntää lattian askelääneneristävyyden arvioinnissa sijoittamalla saatu äänenpainetaso yhtälöön (16) tai (18) riippuen normalisointitavasta. Kuvassa 10 on esitetty 5 N pistevoimalla keskeltä herätetyn 200 mm paksun raudoitettun betonilaatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi 30 m³ kokoisessa huoneessa. Magnitudi on kompleksisen luvun absoluuttinen arvo eli reaalin arvo, joka kuvaa suureen voimakkuutta ja se lasketaan yhtälöllä $\sqrt{\Re^2 + \Im^2}$. Yhtälössä (21) käytetty pistevoima on askeläänikojeen yhden vasaran massaa vastaavaa pistevoima $F = m_h g$, jossa m_h on vasaran massa ja $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ on Maan putoamiskiihtyvyys. Äänenpaine on laskettu pisteessä (-1, -1, -1) huoneen keskipisteestä katsottuna yhtälöllä (19).



Kuva 10. 200 mm paksun homogeenisen betonilaatan nopeuskentästä aiheutuva äänenpaine 30 m^3 huoneessa tarkastelupisteessä $(-1, -1, -1)$. Huonemoodit kertoimieen on esitetty harmailla katkoviivoilla, levymoodit kertoimieen oransseilla pistekatkoviivoilla ja Schroederin rajataajuus $f_s = 447,2 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla. Kuvan yläreunassa olevat luvut vastaavat huonemoodin aallonpituuden puolikkaiden määrää x -, y - ja z -suunnassa ja kuvan alareunassa olevat luvut vastaavat laatan moodien aallonpituuden puolikkaiden kerrannaisia n_x ja n_y .

Kuvassa 11 on esitetty äänenpaineen magnitudi 30 m^3 kokoisessa huoneessa, kun 200 mm paksu CLT laatta on herätetty 5 N pistevoimalla keskeltä laatan yläpintaa.



Kuva 11. 200 mm paksun CLT laatan nopeuskentästä aiheutuva äänenpaine 30 m^3 huoneessa tarkastelupisteessä $(-1, -1, -1)$. Huonemoodit kertoimieen on esitetty harmailla katkoviivoilla, levymoodit kertoimieen oransseilla pistekatkoviivoilla ja Schroederin rajataajuus $f_s = 447,2 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla. Kuvan yläreunassa olevat luvut vastaavat huonemoodin aallonpituuden puolikkaiden määrää x -, y - ja z -suunnassa ja kuvan alareunassa olevat luvut vastaavat laatan moodien aallonpituuden puolikkaiden kerrannaisia n_x ja n_y .

Kuvissa 10 ja 11 nähdään piikkejä levy- ja huonemoodeilla äänenpaineen magnitudissa. Betonilaatan ja CLT-laatan äänenpaineen magnitudin kuvaajat ovat muodoltaan samantaisia, mutta CLT-laatalla äänenpaineen magnitudi on selvästi suurempi. Lisäksi piikkejä aiheuttavat moodit ovat osin eri moodeja. Mikäli levyn ja huoneen moodit pääsevät kytkeytymään, askelääneneristävyys heikkenee kyseisellä taajuudella ja aiheuttaa piikin äänenpaineen magnitudissa. Sekä betonilaatalla että CLT-laatalla ensimmäinen pystysuuntainen moodi f_{001} tuottaa suurimman piikin.

Neves e Sousan ja Gibbsin (2011, 2014) tutkimusten mukaan merkittävin heikkeneminen askelääneneristävydessä homogeenisellä betonilaatalla on yleensä ensimmäisen pystysuuntaisen huonemoodin taajuudella eli taajuudella, jolla on yksi solmukohta huoneen korkeussuunnassa. Kuvassa 10 ensimmäinen pystysuuntainen moodi on $f_{001} = 56,6$ Hz, jolla on suurin piikki äänenpaineen magnitudissa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös huonekoon vaikutusta äänenpaineen siirtymiseen lattian läpi muuttamalla huonekorkeutta sekä sivumittojen l_x ja l_y suhdetta välillä 1–2. Tutkimuksessa kehitetyn yhtälön avulla voi selvittää, kytkeytyvätkö valittu lattia ja huonetila.

2.5 Johtopäätökset

Puuvälipohjien ääneneristävydessä on todettu olevan ongelmia pienillä taajuuksilla, mistä aiheutuu häiriötä asukkaille. Erityisesti puuvälipohjien keveys on ongelmana pienillä taajuuksilla, sillä välipohjan alimmat ominaistaajuudet osuvat 50–100 Hz alueelle. Lisäksi huonekoon on todettu vaikuttavan tarkasteltavan rakenteen todennettavaan ääneneristävyyteen.

Analyttiset menetelmät askelääneneristävyden arviointiin toimivat betonisille välipohjille, kun huoneen äänikentän oletetaan olevan diffuusi ja seinien täysin jäykät ja heijastavat. Puuvälipohjien askelääneneristävyden arviointi sen sijaan on vaikeaa. Todellisuudessa huoneen äänikenttä on modaalinen pienillä taajuuksilla. Lisäksi huoneen seinät eivät ole jäykät, vaan värähtelevät huoneessa vallitsevan äänenpaineen mukaan. Seinien värähtelyherkkyyttä kuvaa impedanssi, joka riippuu seinän materiaaliominaisuuksista ja taajuudesta (Kuttruff, 2009). Puurakenteisissa rakennuksissa erityisesti rannakaranteisten väliseinien kipsilevyt pääsevät värähtelemään koolausvälin alueelta.

Lattian värähtelyn aiheuttamalle äänikentälle huoneessa ei ole yleisesti toimivia analyttisiä menetelmiä, kun värähtelevä lattia on epähomogeeninen ja anisotrooppinen puuvälipohja. Lisäksi ominaistaajuuksien laskentaan ei ole analyttistä menetelmää, jos reunaehto ei ole jäykkä seinä vaan esimerkiksi impedanssi.

Analyttisten menetelmien puutteen vuoksi tässä tutkimuksessa askelääneneristävyyttä tarkastellaan mallinnuksella elementtimenetelmää hyödyntäen. Työssä tarkastellaan analyttisiä menetelmiä vastaavaa tilannetta, jossa huoneen seinät ovat täysin heijastavat sekä tilannetta, jossa huoneen seinät ovat hieman absorboivat. Värähtelevänä rakenteena käytetään ripalaattapuuvälipohjaa

Erialaisten huonetilojen moodit lasketaan analyttisesti jäykälle tilanteelle käyttämällä Matlab R2023b -ohjelmistoa. Näitä analyttisesti laskettuja moodeja verrataan COMSOL Multiphysics 6.2 -ohjelmalla tehtyyn moodianalyyysiin eri reunaehdoilla.

Vastaanottotilan vaikutusta todennettavaan askelääneneristävyyteen puuvälipohjalla tarkastellaan Comsol -ohjelmalla, jossa lattian ja huonetilan moodien kytkytyminen voidaan ottaa huomioon myös tapauksessa, jossa vastaanottotilan seinät eivät ole täysin jäykät. Lisäksi vastaanottotilan tilavuutta muutetaan, jotta saadaan selville huonetilan todellinen vaikutus askelääneneristävyyteen.

3. MENETELMÄT

3.1 Laskenta- ja mallinnusparametrit

Huonetilan ja laatan kytkeytymistä tarkasteltiin 20–500 Hz taajuuksilla analyttisellä mallilla (19) kahdella eri materiaalilla, kahdella laattakoolla ja kolmella eri huonekoolla. Tarkasteltuja yhdistelmiä oli siis yhteensä 12. Laatan ja huoneen kytkeytymistä varten tehtiin myös simulointimalli, joka validoitiin molemmilla laattatyypeillä analyttiseen yhtälöön verraten. CLT-laatan yksinkertainen kytkeytymistä kuvaava simulointimalli laskettiin myös jäykän, betonisen ja levyrakenteisen pinnan reunaehdoilla ja laskentatuloksia verrattiin keskenään.

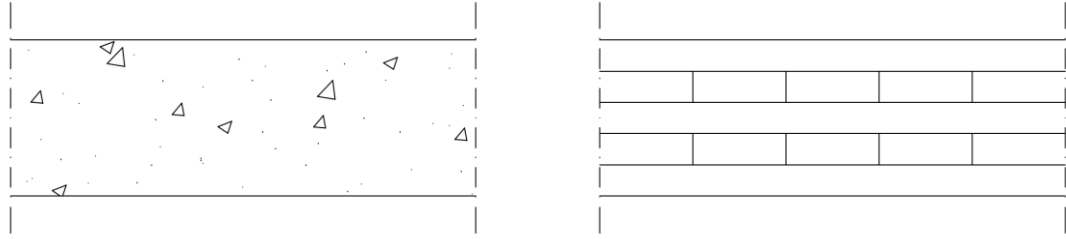
Kokonaisen puuvälipohjan askelääneneristävyyttä tarkasteltiin 50–500 Hz taajuuksilla elementtimenetelmää hyödyntäen. Huonetilan vaikutusta puuvälipohjan askelääneneristävyyden laskentatulokseen tarkasteltiin elementtimenetelmää hyödyntäen. Huoneen reunaehtoina käytettiin laboratoriossa mitatusta jälkikaiunta-ajasta riippuvaa impedanssia.

Huoneen koon ja reunaehtojen vaikutusta puuvälipohjan askelääneneristävyyteen tarkasteltiin kolmella eri huonekoolla ja kolmella eri reunaehdolla. Tarkasteltavia yhdistelmiä oli yhteensä 9. Huonekokoa varioitiin muuttamalla huoneen korkeutta. Reunaehtoina huoneessa oli jäykät, betoniset ja kevytrakenteiset pinnat.

Kaikille simuloituille huonetiloille tehtiin moodianalyysi elementtimenetelmää hyödyntäen. Moodianalyysin tarkoituksena oli selvittää reunaehtojen vaikutusta huoneen ominaistajuuksiin. Moodien hakumenetelmät validoitiin analyttiseen yhtälöön (7) vertaamalla.

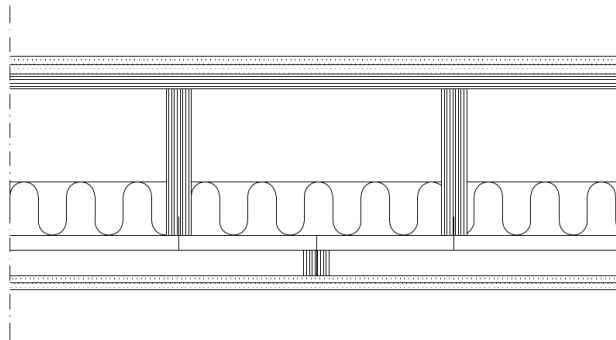
3.1.1 Rakenteet

Huonetilan ja laatan kytkeytymisen tarkastelussa rakenteina käytettiin 200 mm paksua raudoitettua betonilaattaa, jonka lujuusluokka oli C30/37 sekä 200 mm paksua CLT-laattaa. Laattojen dimensiot olivat $3,3 \times 3 \text{ m}^2$ ja $2,5 \times 4 \text{ m}^2$. Kytkeytymistarkastelussa käytetyt laatat on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Kytkeytymistarkastelussa käytetty 200 mm paksu betonilaatta vasemmalla ja 200 mm paksu CLT-laatta oikealla.

Askelääneneristävyyden simuloinnissa tarkasteltiin viilupuusta (*laminated veneer lumber, LVL*) tehtyä ripalaattavälipohjaa, joka on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Askelääneneristävyyden simuloinnissa käytetty ripalaattavälipohja. Välipohjan rakenne ylhäältä alas oli kaksi 15,5 mm paksua kipsilevyä, 27 mm paksu LVL levy, 260 mm korkeat ja 45 mm leveät LVL-palkit 490 mm välein, 95 mm lasivillaa palkkien välissä, 27 mm paksu ja 100 mm leveä LVL-levy 550 mm välein ruuvattu palkkien alapintaan, 45 mm korkea ja leveä LVL-koolaus 490 mm välein ruuvattu palkkien välisiin LVL-levyihin ja kaksi 125 mm paksua kipsilevyä.

Välipohjan ripalaatta koostui 27 mm paksusta LVL-laatasta, joka oli ruuvattu ja liimattu 260 mm korkeisiin ja 45 mm leveisiin LVL-palkkeihin, jotka olivat 490 mm välein. Ripalaatan päällä oli kaksi raskasta kipsilevyä. Palkiston alle oli ruuvattu 100 mm leveät LVL-levyt 550 mm välein. Alakatto koostui kahdesta kipsilevystä, jotka oli kiinnitetty 45 mm leveään ja korkeaan LVL-koolaukseen. Välipohjan pinta-ala oli kaikissa tarkastelluissa tilanteissa 2,83 x 3,68 m².

3.1.2 Huonetilat ja reunaehdot

Huonetilan ja laatan kytkeytymistarkastelussa käytettiin 6 eri huonekokoa. Huonetilojen muuttuva dimensio oli huoneen korkeus siten, että huoneiden tilavuudet olivat 30 m³, 40 m³ ja 50 m³. Askelääneneristävyyden simuloinnissa huoneiden pinta-ala oli vakio

2,83 x 3,68 m². Huonekorkeuksina käytettiin 2,5 m, 3,0 m ja 3,5 m. Asuinkerrostalohuoneistojen tyypillinen huonekorkeus on pienimmillään 2,5 m. Toimistoissa ja koulurakennuksissa sekä uudemmissa parvellisissa asuinkerrostalohuoneistoissa huonekorkeudet voivat olla 3,0 m ja 3,5 m. Huoneiden dimensiot on esitetty taulukossa 1. Yksinkertaisuuden vuoksi huoneille on annettu koodi. Huoneet, joiden koodi alkaa kirjaimella *K*, käytettiin laatan ja huoneen moodien kytkeytymisen tarkastelussa. Kirjaimilla *A* ja *L* alkavia huoneita käytettiin askelääneneristävyyden simuloinnissa.

Taulukko 1. Kytkeytymistarkastelussa ja askelääneneristävyyden simuloinnissa käytettyjen huoneiden dimensiot. Koodien kirjain viittaa laskentaan, jossa huonekokoa on käytetty. *K* = laatan ja huoneen moodien kytkeytyminen, *L* = askelääneneristävyyden simulointi laboratorioasetelmassa ja *A* = askelääneneristävyyden simulointi asuintiloissa.

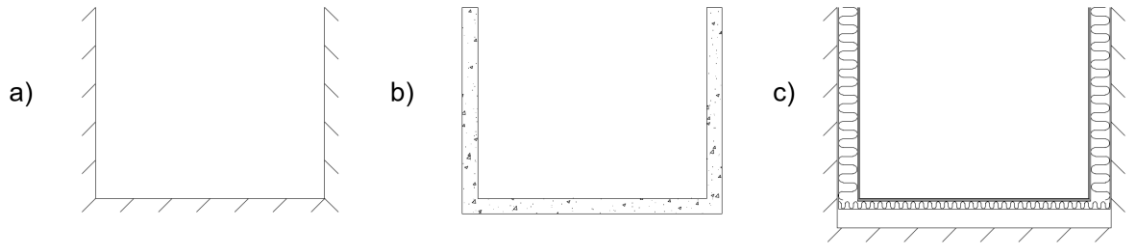
Koodi	l_x [m]	l_y [m]	l_z [m]	V [m ³]
K1	3,3	3,0	3,03	30
K2	4,0	2,5	3,0	30
K3	3,3	3,0	4,05	40
K4	4,0	2,5	4,0	40
K5	3,3	3,0	5,0	50
K6	4,0	2,5	5,0	50
L1	3,05	3,90	4,7	56
A1	2,83	3,68	2,5	26
A2	2,83	3,68	3,0	31
A3	2,83	3,68	3,5	36

Huoneen jälkikaiunta-ajan T ja seinän akustisen ominaisimpedanssin ζ välillä on huoneen dimensioista riippuva yhteys, joka on esitetty yhtälössä (26).

$$\zeta_i = \frac{Z_i}{\rho_0 c} = \frac{4c \log_{10} e}{3} \cdot \frac{MT_{60}}{l_i} \cong 200 \cdot \frac{MT_{60}}{l_i}, \quad (26)$$

jossa i on x, y tai z, ρ_0 on ilman tiheys, c on äänennopeus ilmassa, MT_{60} on huonemoodin jälkikaiunta-aika ja l_i on huoneen x-, y- tai z-suunnan dimensio. X, y tai z valitaan sen mukaan mikä koordinaatti on kohtisuorassa tarkasteltavaa pintaa vastaan. (Morse & Ingard, 1968)

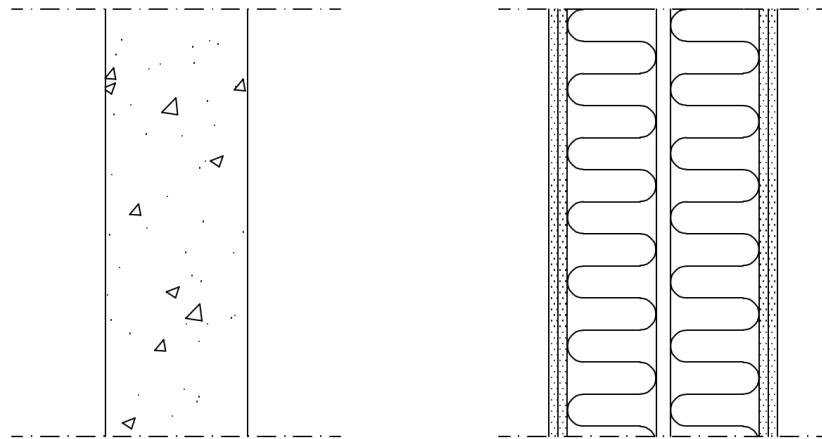
Huonetta rajaavilla pinnoilla käytettiin ominaistuuksien ja askelääneneristävyyden tarkastelussa kolmea eri reunaehto: jäykkiä, betonisia ja kipsilevy-pintoja. Eri reunaehdot on esitetty havainnollisesti kuvassa 14.



Kuva 14. Huonetta rajaavien pintojen a) jäykkä b) betoninen ja c) kevytrakenteinen reunaehto.

Jäykän seinän tapauksessa hiukkasnopeus seinän vieressä on nolla. Betoniseinät ja betonilattia olivat 200 mm paksuja. Huonetta rajaavilla pinnoilla käytettiin reunaehtona yhtälön (10) mukaista impedanssia, jota on käytetty betonipintojen impedanssina myös Kraxbergerin et al. (2023) tutkimuksessa.

Kipsilevyseinän oletettiin toimivan jäykkää seinää vasten olevana levyresonaattorina siten, että kipsilevyt toimivat resonoivana levynä ja runkoväli eristeineen ilmapälinä. Kaksirunkoisen seinän toisen rangan kipsilevyt jätettiin huomioimatta. Reunaehtona huonetta rajaavilla pinnoilla oli tällöin yhtälön (15) mukainen impedanssi. Huonetta rajaavien seinien rakennetyypit on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Huoneen reunaehtoina käytettyjen seinien rakennetyypit. 200 mm paksu betoniseinä on kuvassa vasemmalla. Kuvassa oikealla on kaksirunkoinen kipsilevyseinä. Kipsilevyseinän rakenne vasemmalta oikealle on kaksi 12,5 mm paksua kipsilevyä, 125 mm paksu runko, jonka välissä on 125 mm mineraalivillaa, 20 mm ilmapäli runkojen välissä, 125 mm paksu runko, jonka välissä on 125 mm mineraalivillaa ja kaksi 12,5 mm paksua kipsilevyä (Lahtela et al., 2021).

Kevytrakenteisen huoneen lattiaan käytettiin kuvassa 13 esitettyä rakennetta. Yhtälöä (15) hyödynnettiin huoneen lattian impedanssin laskennassa vastaavasti kuin seinien impedanssin laskennassa.

3.1.3 Materiaalit

Tavanomainen huoneilman lämpötila on 21°C, joten laskennassa ja mallinnuksessa ilman tiheytenä käytettiin 1,205 kg/m³ ja äänennopeutena 343 m/s. Huoneen ja laatan kytkeytymistä kuvaavan yhtälön kytkeytymiskertoimessa ja ominaistajuuksien laskennassa käytettiin CLT-laatan tapauksessa efektiivistä taivutusjäykkyyttä $B_{eff} = \sqrt{B_x B_y}$ (Hopkins, 2007).

Laskennassa ja mallinnuksessa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty seuraavalla sivulla taulukossa 2.

Taulukko 2. Laskennassa ja simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet. Arvioidut materiaaliominaisuudet tummennettu.

Materiaali	ρ [kg/m ³]	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	G_{xy} [MPa]	G_{yz} [MPa]	G_{xz} [MPa]	ν_{xy} [-]	ν_{yz} [-]	ν_{xz} [-]	η_i [-]	r_s [Pa·s/m ²]
Betoni 200 mm (SFS EN 1992-1-1+A1+AC, 2015)	2500		33000				-		0,2		0,015	-
CLT 200 mm (Zhou <i>et al.</i> , 2017)	420		4539 ^{a)}				-		0,4		0,015	-
Kipsilevy 12,5 mm ^{b)} (Saint-Gobain Finland Oy (Gyproc), 2023b)	672		1850 ^{c)}				-		0,25 ^{d)}		0,01 ^{d)}	-
Kipsilevy 15,5 mm ^{b)} (Saint-Gobain Finland Oy (Gyproc), 2023a)	994		4750 ^{c)}				-		0,25 ^{d)}		0,01 ^{d)}	-
LVL kansi 27 mm ^{b)} (Metsäliitto osuuskunta (Metsä Wood), 2020)	510	10500	2000	130	120	600	600	0,25 ^{d)}	0,25 ^{d)}	0,25 ^{d)}	0,015 ^{d)}	-
LVL palkki 45x260 mm ^{b)} (Metsäliitto osuuskunta (Metsä Wood), 2020)	510	13800	130	430	600	600	380	0,25 ^{d)}	0,25 ^{d)}	0,25 ^{d)}	0,015 ^{d)}	-
Elastomer 12,5 mm ^{b)} (Getzner Werkstoffe GmbH, 2019)	256 ^{d)}		0,83/ 1,3				-		0,4		0,18	-
Lasivilla 95 mm ^{b)} (Saint-Gobain Finland Oy (Isover), 2022b, 2022a)	13		-				-		-		-	6000

a) Efektiivinen arvo Zhoun *et al.* (2017) mittaustuloksesta $E_x = 8379$ MPa ja $E_y = 2459$ MPa yhtälöllä $E_{eff} = \sqrt{E_x E_y}$.

b) Materiaaliarvot perustuvat kirjallisuuteen (*kursivoitu*) (Cremer, Heckl & Petersson, 2005; Hopkins, 2007; Bolmsvik *et al.*, 2014) Lietzénin *et al.* (2024) mukaan

c) Keskiarvo pitkittäisestä ja sivuttaisesta arvosta. 12,5 mm paksulle kipsilevyllä arvot olivat 2100 ja 1600 MPa. 15,5 mm paksulle kipsilevyllä arvot olivat 5000 ja 4500 MPa.

d) Mitattu arvo tietyille materiaalille

3.2 Simulointimallit

Kaikki tässä luvussa esitetyt simulointimallit tehtiin COMSOL Multiphysics 6.2 -ohjelmistolla. Mallit ratkaistiin taajuustasossa tekemällä laskentataajuuden parametripyyhkäisy (*parameter sweep*). Parametrin arvo vaihtui laatan ja huoneen kytkeytymistarkastelussa sekä ominaistajuusanalyysissä 1 Hz välein ja askelääneneristävyyden simuloinnissa 2 Hz välein askeläänikojeen vasaranlyöntien aiheuttaman rajoitteen vuoksi.

Simulointimalleissa olevat taajuusriippuvat häviökertoimet ja verkon koko muuttuivat parametritaajuuden mukaan. Elementin maksimikooksi määritettiin pienempi arvo $\lambda/5$ tai 200 mm. Aallonpituus on $\lambda = c/f$, jossa c on äänennopeus ilmassa ja f on laskentataajuus.

Malleissa vallitseva jälkikaiunta-aika määritettiin huoneen moodianalyysin perusteella. Simulointiohjelmisto määrittää moodianalyysissä ominaistajuuden f_n lisäksi ominaiskulmataajuuden ω_n , vaimennussuhteen ζ (*damping ratio*) sekä laatutekijän Q_n (*quality factor*, *Q-arvo*). Moodin jälkikaiunta-aika T voidaan laskea yhtälöllä (27).

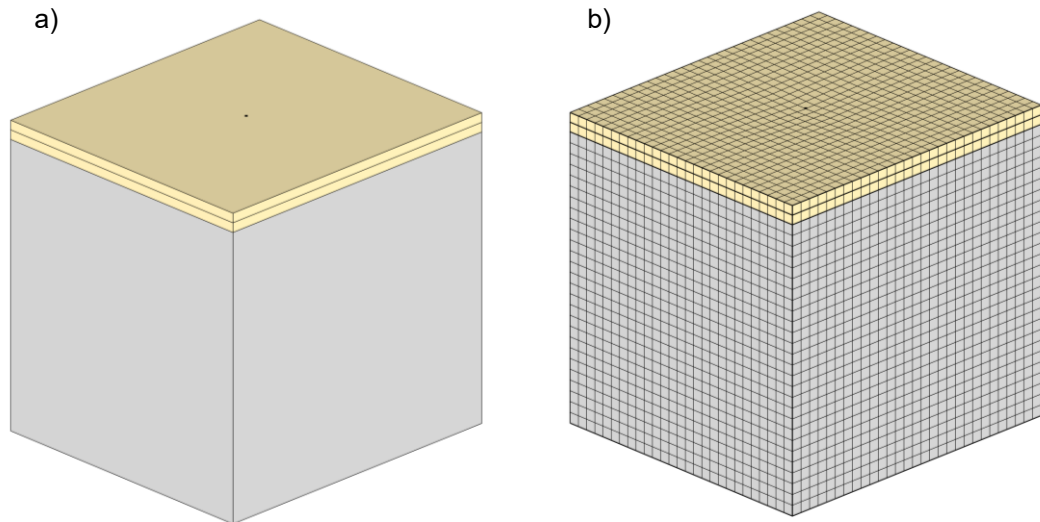
$$T = \frac{Q_n \ln 10^3}{\pi f_n} = \frac{\ln 10^3}{\delta_n}, \quad (27)$$

jossa Q_n on Q-arvo, f_n on ominaistajuus ja $\delta_n = \zeta \omega_n$ on huoneessa vallitsevan moodin vaimennuskerroin (*decay factor*) (Beranek, 1949; Morse & Ingard, 1968; Prinn *et al.*, 2025). Jälkikaiunta-ajan määrittämisessä mallissa ei ollut välipohjarakennetta mukana, vaan tämä oli mallinnettu impedanssireunaehdolla samaan tapaan kuin kevytrakenteisen huoneen lattia.

3.2.1 Laatan ja huoneen kytkeytyminen

Huonetilan ja laatan kytkeytymisen simulointimalli validoitiin vertaamalla laskentatulosta analyttiseen yhtälöön (19). Keskelle laatan yläpintaa sijoitettiin z-suuntainen 5 N harmoninen voima. Laatta tuettiin yksinkertaisella tuennalla asettamalla määritetty siirtymä z-suunnassa keskellä laatan reunoja nollassi. Laatan muut reunat ja tahkot pääsivät liikkumaan vapaasti. Laatan materiaaliyhtälöihin lisättiin isotrooppinen häviökerroin, jonka arvo oli yhtälön (22) mukaisesti taajuusriippuva. Laatan nopeuskenttä ratkaistiin hyödyntämällä rakennemekaniikan yhtälöitä. Värähtelevän laatan alapinnan ja huonetilan yläpinnan rajalla reunaehtona oli *acoustic-structure boundary*, joka yhdistää rakennemekaniikan ja paineakustiikan yhtälöt. Huoneen ja laatan kytkeytymistä kuvaavan simulointi-

mallin validoinnissa huoneena käytettiin tilaa K1 ja huoneen seinien reunaehtona käytettiin yhtälön (26) mukaista seinän impedanssia, jossa jälkikäiunta-ajaksi asetettiin $T = 1,5$ s. Laatta ja huone verkotettiin heksaedrielementtiverkolla ja malli ratkaistiin taajuusalueella 20–500 Hz. Simulointimallin geometria ja verkotus on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Kytkeytymistarkastelun simulointimallin a) geometria ja b) verkotus.

Kuvassa 16 välipohja on esitetty vaaleankeltaisella ja huone harmaalla värillä. Validointitulokset on esitetty luvussa 3.3.

3.2.2 Ominaistaajuuksien tarkastelu

Erikokoisten huoneiden moodeja mallinnettiin kolmella eri tapauksella: jäykällä, betonisilla ja kipsilevyseinillä. Mallinnettuja ominaistaajuuksia verrattiin yhtälöllä (7) analyttisesti laskettuihin ominaistaajuuksiin. Kaikki tarkastellut mallit verkotettiin heksaedriverkolla.

Ensimmäisessä tapauksessa huoneen seinät oletettiin täysin jäykiksi ja heijastaviksi, jolloin hiukkasnopeus seinän vieressä on nolla (*Sound Hard Boundary*). Huoneen ominaistaajuuksien laskennassa käytettiin ARPACK ratkaisinta. Ominaistaajuuksien etsintämenetelmänä käytettiin suorakaidetta (*Rectangle*). Huonemoodien arvioituna lukumääränä käytettiin yhtälöllä (5) 500 Hz taajuudella laskettua arvoa N . Moodien enimmäismääränä käytettiin $N + 10$. Ratkaisimen ominaistaajuuksien hakualuetta rajattiin reaaliakselilla 500 Hz asti. Imaginääriakselilla pienin ja suurin sallittu arvo oli nolla.

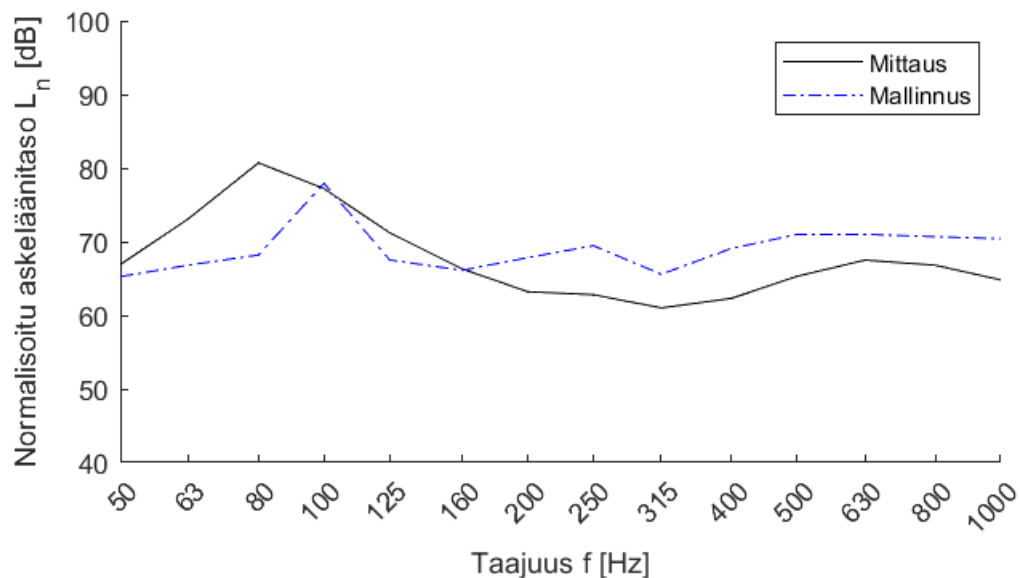
Betonipintojen reunaehtona käytettiin yksikerroksisen seinän taajuusriippuvaa impedanssireunaehto, joka on esitetty yhtälössä (10). Impedanssit 200 mm paksulle betoni-

seinälle laskettiin analyttisesti Matlab-ohjelmistolla, jossa tulos eroteltiin reaali- ja imaginääriosiin. Comsoliin tehtiin eri taajuuksilla laskettujen impedanssien interpolaatiofunktiot reaali- ja imaginääriosille, joista saatiin impedanssireunaehto $Z_n = \Re\{Z(f)\} + j\Im\{Z(f)\}$. Kipsilevyypintojen impedanssireunaehto oli yhtälön (15) mukainen.

Betoni- ja kipsilevyreunaehtoissa kyseessä on epälineaarinen ominaisarvoanalyysi (COMSOL, 2024). Analyysissä ratkaisin vertaa saatua ominaistajuutta parametripyyhkäisytaajuuteen, jonka mukaan impedanssireunaehto muuttuu. Ratkaisimella etsittiin pyyhkäisytaajuutta lähimpänä oleva ominaistajuus siten, että taajuuden imaginääriosa oli vertailutaajuutta suurempi (*Around shift*). Ominaisaajuksien linearisointipisteinä käytettiin parametripyyhkäisytaajuutta. Huoneen ominaistajuus saavutettiin, kun ominaistajuuden reaali- ja parametripyyhkäisytaajuus olivat lähimpänä toisiaan.

3.2.3 Askelääneneristävyyden simulointi

Kokonaisen ripalaattapuuvälipohjan askelääneneristävyyttä simuloitiin 1/3-oktaavikaistoilla 50–500 Hz. Välipohja on mitattu laboratoriossa ja sen askelääneneristävyyttä taajuuksilla 50–1000 Hz on tutkittu aikaisemmin simuloimalla (Lietzén *et al.*, 2024). Lietzénin mallinnustulos on esitetty kuvassa 17.

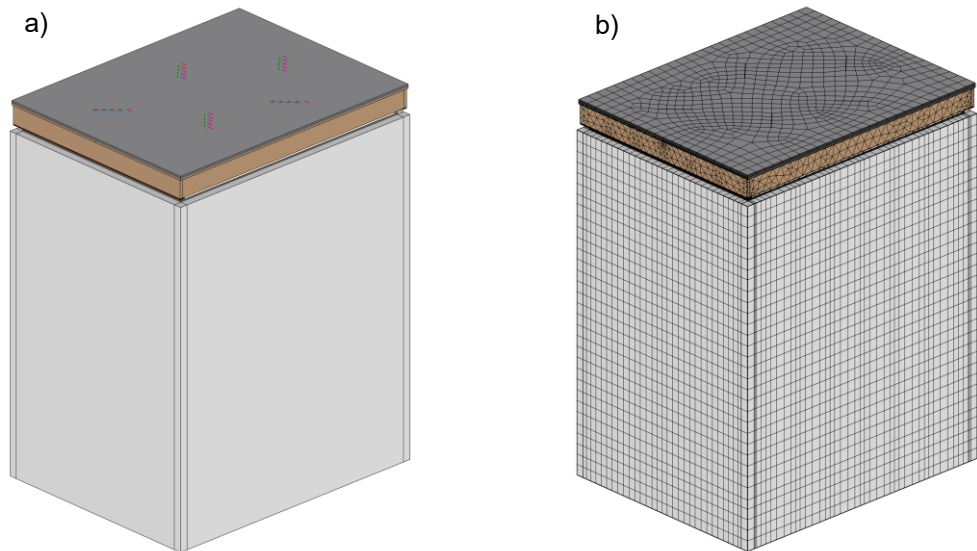


Kuva 17. Lietzénin (2024) simulointitulokset ideaalisessa tilanteessa ja laboratoriossa mitattu askeläänitaso ripalaattavälipohjalle 50–1000 Hz taajuuksilla.

Lietzénin simulointimallissa standardisoidun askeläänikojeen vasaran aiheuttama impulssi simuloitiin eksplisiittidynamiikka-analyysillä, jossa vasaran ja välipohjan välisen

kosketuksen epälineaarisuuden tarkastelu on tehokasta. Impulssivoima muutettiin taajuustasoon jälkikäsitteilyllä vastaamaan askeläänikojeen jatkuvaa toimintaa. Tuloksena saatiin viiden vasaran välipohjaan tuottamat pistevoimat. Simuloinnin toisessa vaiheessa ratkaistiin välipohjan äänisäteily askeläänikojeen aiheuttamalla herätteellä taajuustasossa. Välipohjan eri osat olivat täysin kytkettyjä toisiinsa. Simulointi tehtiin 2 Hz resoluutiolla, joka vastaa askeläänikojeen herätespektriä. Välipohjan säteilemä ääniteho ratkaistiin suoraan mallintamalla välipohjan alle akustinen ilmatila, joka kuvastaa akustista puoliavaruutta. Alueen reunat olivat täysin absorboivat, joten reunaehtona käytettiin täydellisesti yhteensovitettuja kerroksia (*perfectly matched layers, PML*). Lopuksi laskettu äänen säteilyteho muutettiin vastaamaan normalisoitua askeläänitasoa L_n vastaanottohuoneessa jälkikäsitteilyllä. Kapeakaistaiset äänitehotulokset muutettiin vastaamaan normalisoitua askeläänitasoa diffuusissa äänikentässä. Tämän jälkeen askeläänikoje-
paikkojen tuloksista otettiin energiakeskiarvo ja tulokset integroitiin vastaamaan 1/3 oktaavikaistoja. (Lietzén *et al.*, 2022, 2024)

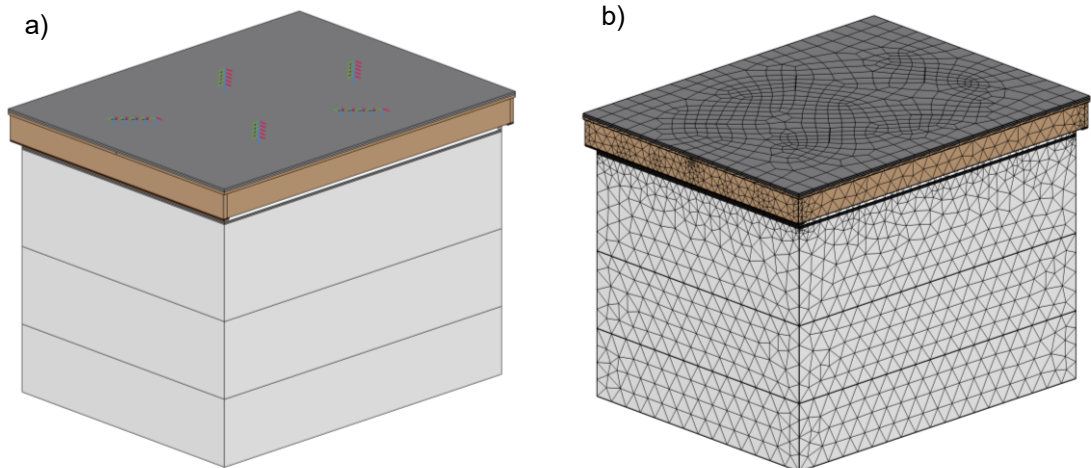
Tässä tutkimuksessa Lietzénin simulointimallista poistettiin PML kerrokset ja akustinen ilmatila muutettiin vastaamaan mittauslaboratorion kokoista ilmatilaa eli vastaanottohuonetta L1. Huoneen reunaehtoina oli yhtälön (26) mukainen impedanssi, jossa jälkikaiunta-aikana käytettiin laboratoriossa mitattua 1/3 oktaavikaistaista jälkikaiunta-aikaa. Mitatulle jälkikaiunta-ajalle tehtiin Comsolissa interpolaatiofunktio. Parametripyyhkäisyn tarkastelutaajuuden osuessa mittaustulosten väliin, arvo interpoloitiin mitattujen arvojen välillä. Pienimmillä tarkastelutaajuuksilla käytettiin lähintä mitattua arvoa. Mittaushuoneen simulointimallin geometria ja verkotus on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Mittaushuoneen simulointimallin a) geometria ja askeläänikojeapaikat sekä b) mallin elementtiverkotus.

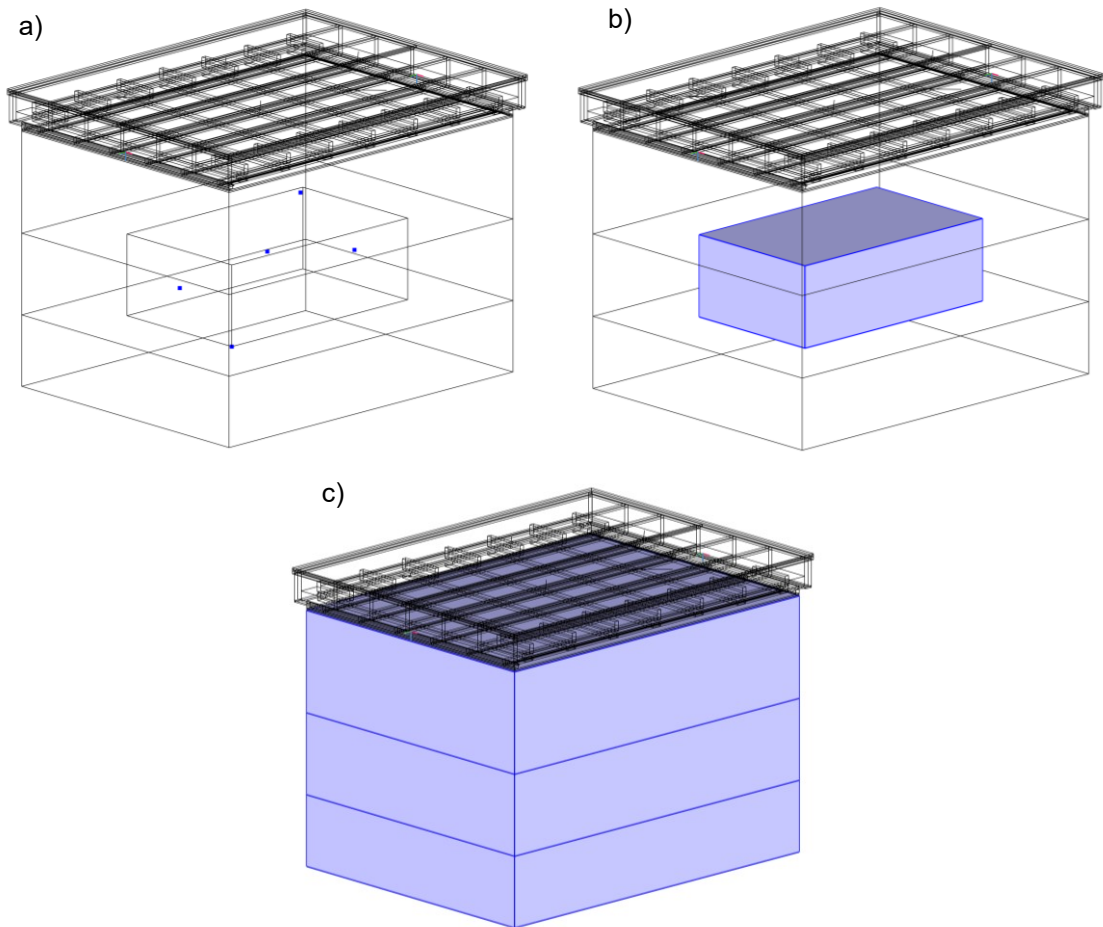
Kokonaisen puuvälipohjan askelääneneristävyyttä simuloitiin myös taulukon 1 mukaisissa huoneissa A1–A3. Välipohjan askelääneneristävyys simuloitiin jokaisella huonekokoalla jäykän, betoni- ja kipsilevypinnan reunaehdoilla vastaavasti kuin luvussa 3.2.2.

Välipohja oli verkotettu aiemmin vapaalla tetraedriverkolla. Huoneen mittausalue verkotettiin heksaedriverkolla, mutta muilta osin huoneen elementtiverkkona oli vapaa tetraedriverkko.



Kuva 19. Kokonaisen puuvälipohjan askelääneneristävyyden simulointimallin a) geometria ja askeläänikojeapaikat sekä b) verkotus.

Kaikkiin simuloituihin huoneisiin tehtiin standardien ISO 16283-2 (2020) ja ISO 10140-4 (2021) mukainen mittausalue sekä viisi mittauspistettä, jotka kuvastavat standardien mukaista huoneen näytteistystä paikallaan olevalla mikrofonilla. Lisäksi tulosta tarkasteltiin koko huoneen alueella. Huoneen näytteistystavat on esitetty kuvassa 20 sinisellä.

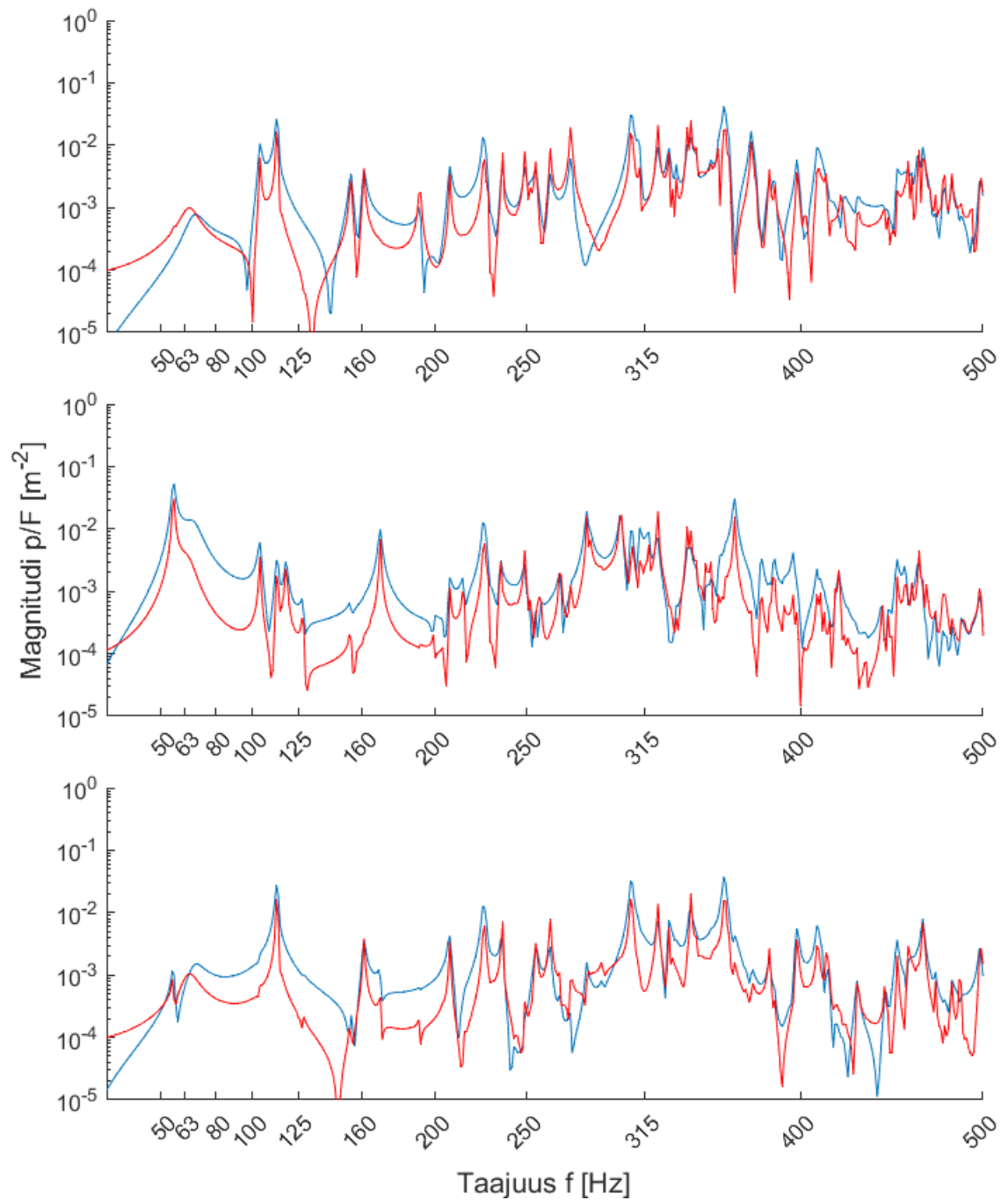


Kuva 20. Mallinnetun huoneen näytteistys: a) standardien ISO 16283-2 (2020) ja ISO 10140-4 (2021) mukaiset mittauspisteet paikallaan olevalle mikrofonille, b) standardien ISO 16283-2 (2020) ja ISO 10140-4 (2021) mukainen mittausalue ja c) koko huone.

Huoneessa vallitsevan äänenpainetason keskiarvoa tarkasteltiin erilaisilla näytteistystavoilla, joista a) on standardin mukaisen mittausalueen avaruudellinen keskiarvo, b) on standardin mukaiset kiinteät mittauspisteet ja c) koko huoneen avaruudellinen keskiarvo. Kuvan 20 a) mittauspisteet sijaitsevat mittausalueen b) sisäpuolella tai reunalla. Standardien mukaisilla mittauspisteillä pyritään saamaan avaruudellinen keskiarvo huoneessa vallitsevasta äänikentästä.

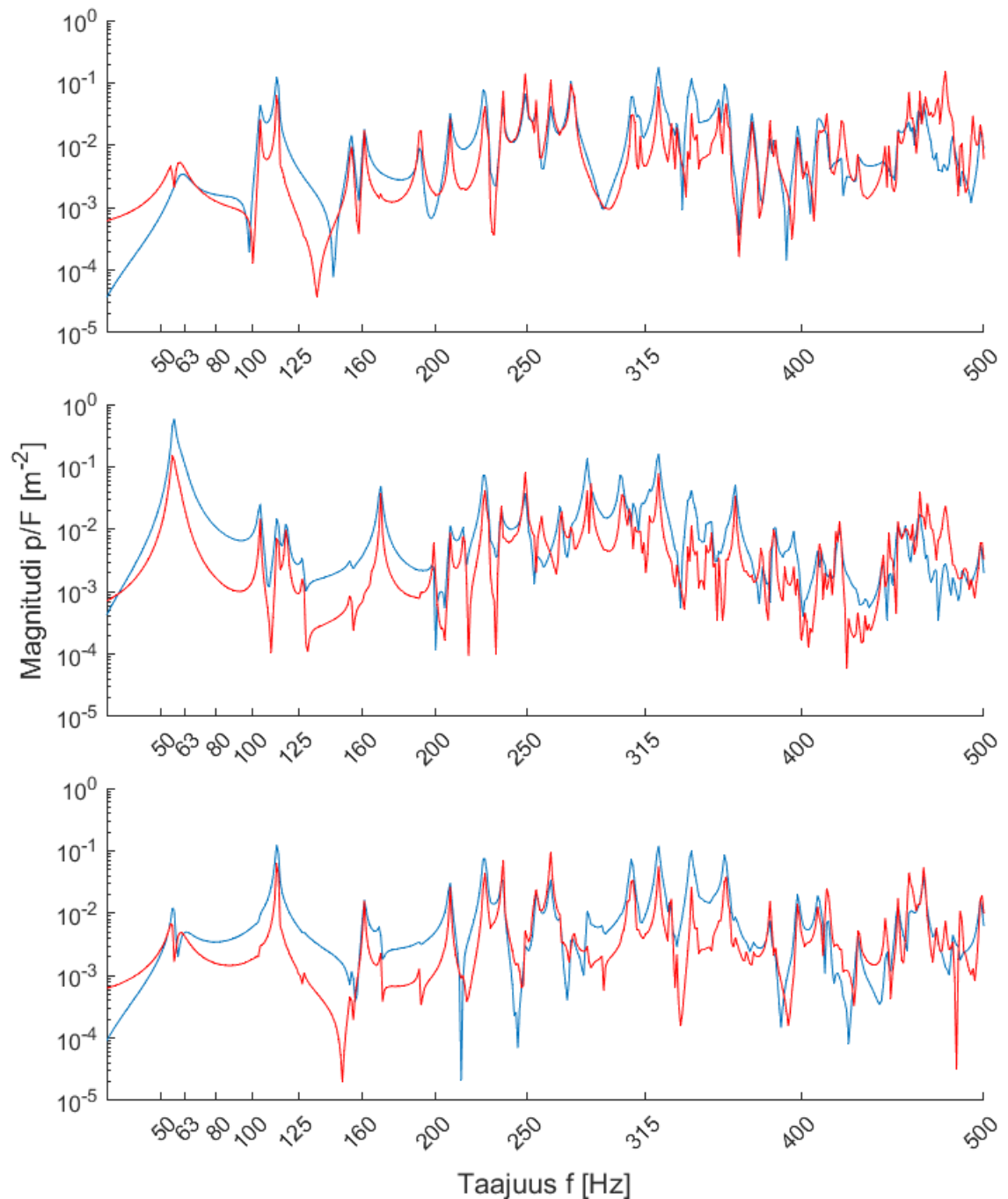
3.3 Validointi

Huonetilan ja laatan kytkeytymistä kuvaava FE-malli validoitiin vertaamalla simuloitua tulosta analyttisellä yhtälöillä (19) laskettuun tulokseen käyttämällä 200 mm paksua betonilaattaa sekä 200 mm paksua CLT-laattaa. Validointikuvaajat on esitetty kolmesta eri pisteestä alla olevissa kuvissa 21 ja 22. Ylin kuvaaja on huoneen K1 keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja kuuntelijan korkeudelta pisteestä (2,15; 1,7; 1,5).



Kuva 21. Betonilaatan simulointimallin validointi. Analyttinen tulos on kuvassa sini-sellä ja simulointitulos punaisella. Ylin kuvaaja on huoneen K1 ($V = 30 \text{ m}^3$) keskipisteestä, keskimäinen pisteestä $(0,7; 0,7; 0,7)$ ja alin kuvaaja pisteestä $(2,15; 1,7; 1,5)$.

Kuvasta 21 nähdään, että analyttisen ja simuloitun mallin tuloksissa näkyvät magnitudin piikit osuvat samoille taajuuksille. Simuloitussa mallissa äänenpaineen magnitudin vaihtelu on voimakkaampaa analyttiseen malliin verrattuna.



Kuva 22. CLT-laatan simulointimallin validointi. Analyttisesti laskettu tulos on sinisellä ja simuloitu tulos punaisella. Ylin kuvaaja on huoneen K1 ($V = 30 \text{ m}^3$) keskipisteestä, keskimäinen pisteestä $(0,7; 0,7; 0,7)$ ja alin kuvaaja pisteestä $(2,15; 1,7; 1,5)$.

Vastaavasti kuin kuvassa 21 myös kuvassa 22 piikit äänenpaineen magnitudissa osuvat kutakuinkin samoille taajuuksille. Simulointimallissa huiput jäävät hieman pienemmiksi kuin analyttisessä mallissa. Vastavuus analyttisen mallin ja simulointimallin välillä huoneen keskipisteessä on erityisen hyvä 230 Hz suuremmilla taajuuksilla. Simuloitu ja analyttisesti laskettu tulos ovat muodoltaan hyvin samanlaisia.

Ominaistaajuuksien hakumenetelmät validoitiin vertaamalla tulosta analyttiseen yhtälöön (7) käyttämällä jäykän seinän reunaehtoa taulukossa 1 esitetyle huoneelle K1. Huoneen 10 alinta ominaistaajuutta jäykällä reunaehdolla on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Huoneen K1 ($V=30\text{ m}^3$) 10 alinta ominaistaajuutta jäykällä reunaehdolla.

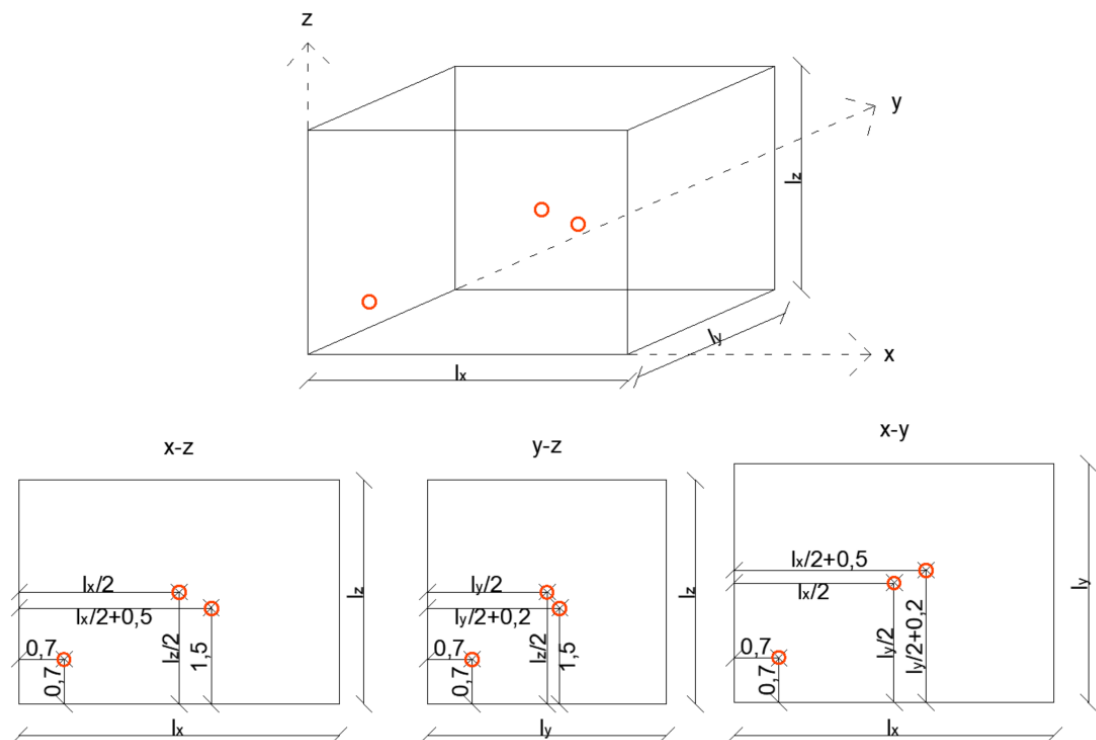
n_x	n_y	n_z	Analyttinen	Simuloitu, lineaarinen	Simuloitu, epälineaarinen
1	0	0	51,97	51,97	51,97
0	0	1	56,61	56,60	56,60
0	1	0	57,17	57,17	57,17
1	0	1	76,84	76,84	76,84
1	1	0	77,26	77,26	77,26
0	1	1	80,45	80,45	80,45
1	1	1	95,77	95,77	95,77
2	0	0	103,94	103,95	103,95
0	0	2	113,20	113,21	113,21
0	2	0	114,33	114,35	114,35

Kuten taulukosta 3 nähdään, simuloitu tulos vastaa hyvin analyttisesti laskettua tulosta. Eri hakumenetelmillä simuloitujen tulokset ovat samat. Ero analyttisen ja simuloitujen tulosten välillä johtuu numeerisen menetelmän tarkkuudesta.

4. TULOKSET

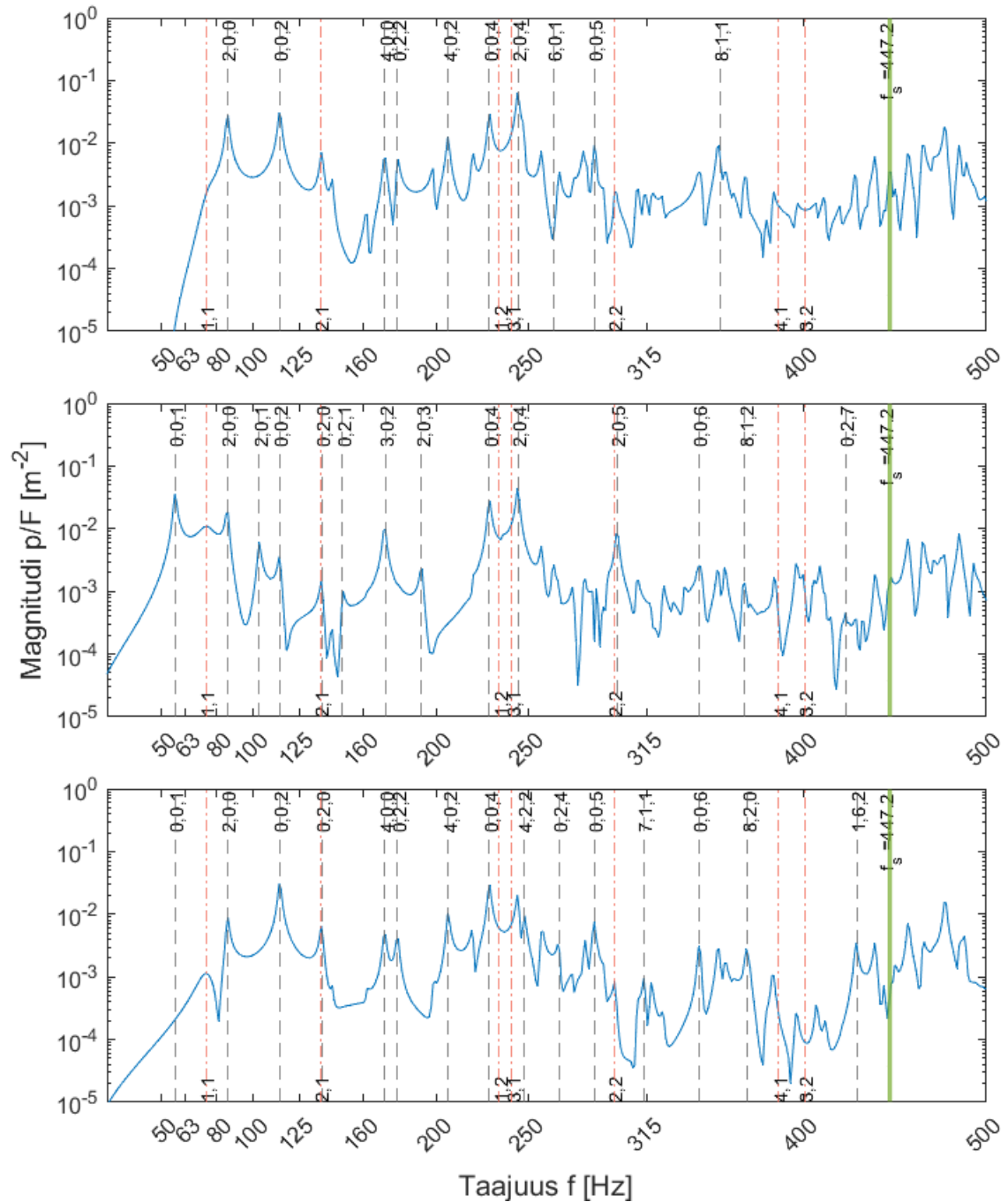
4.1 Laatan ja huoneen kytkeytyminen

Laatan ja huoneen kytkeytymistä tarkasteltiin analyttisellä laskennalla. Tarkasteltava tila tarkastelupisteineen on havainnollistettu kuvassa 23. Koordinaatiston nollapiste sijaitsee huoneen nurkassa.

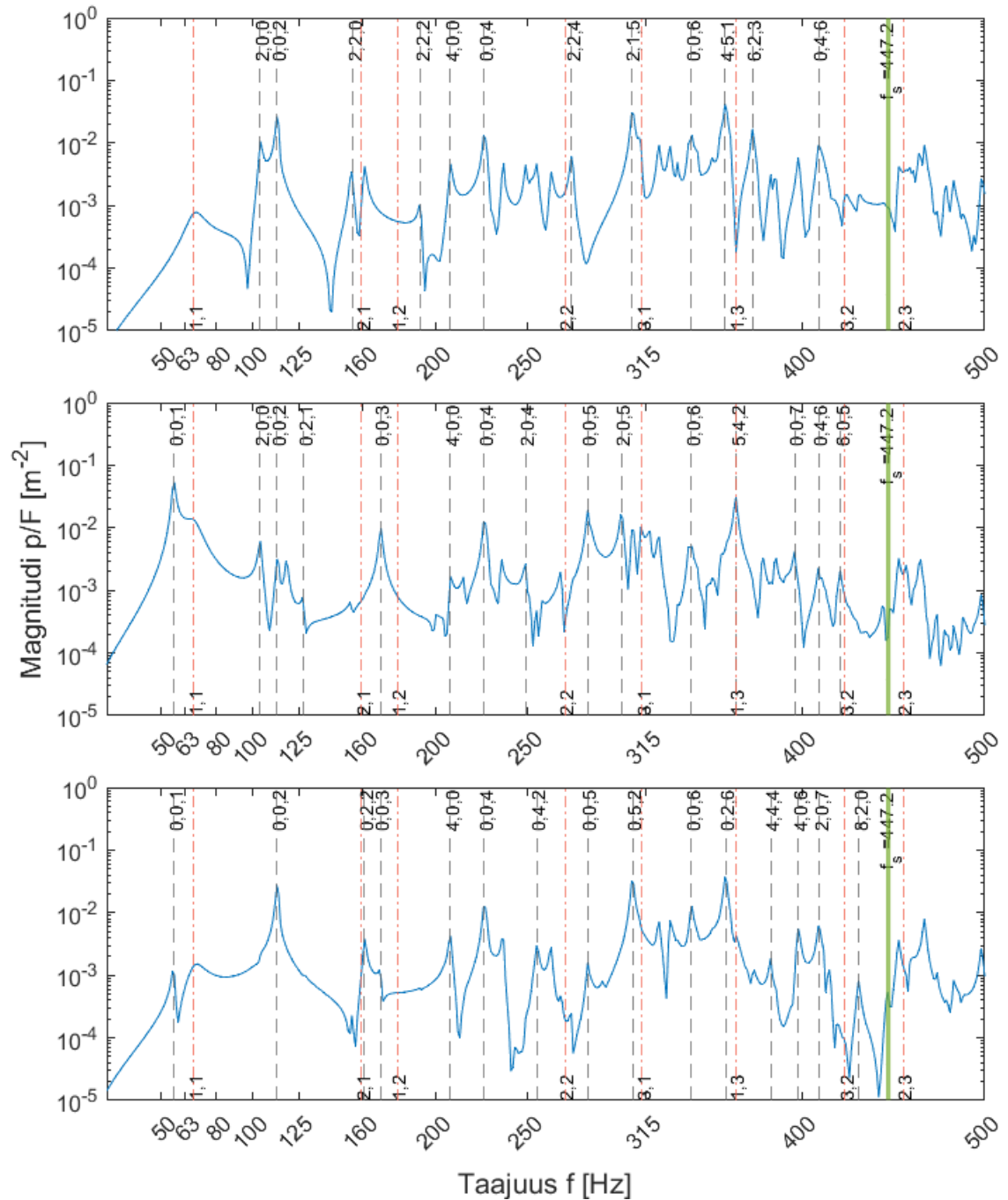


Kuva 23. Tarkasteltavan tilan koordinaatisto ja tarkastelupisteiden sijainnit [m], havainnekuva.

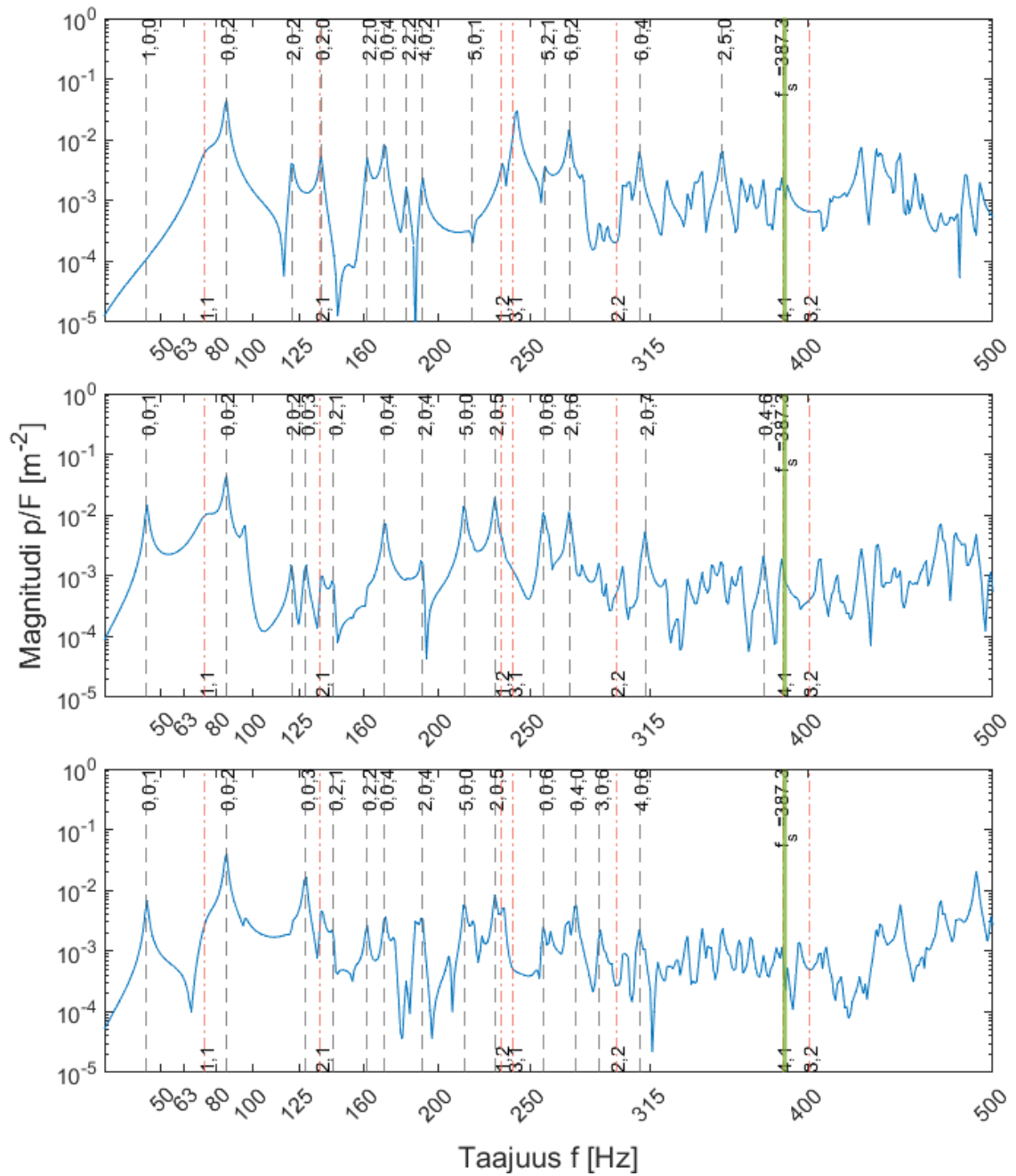
Kytkeytymistarkastelun tulokset on esitetty alla olevissa kuvissa siten, että ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimmäinen on pisteestä $(0,7; 0,7; 0,7)$ ja alin kuvaaja on pisteestä $(l_x/2+0,5; l_y/2+0,2; 1,5)$. Kaikki tarkastelupisteet sijaitsevat standardien ISO 10140-4 ja ISO 16823-2 mukaisilla mitta-alueilla (SFS-EN ISO 16238-2:2020, 2020; SFS-EN ISO 10140-4:2021, 2021).



Kuva 24. 4 x 2,5 m² kokoisien 200 mm paksun betonilaatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K2 ($V = 30 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,5; 1,45; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 447,2 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.

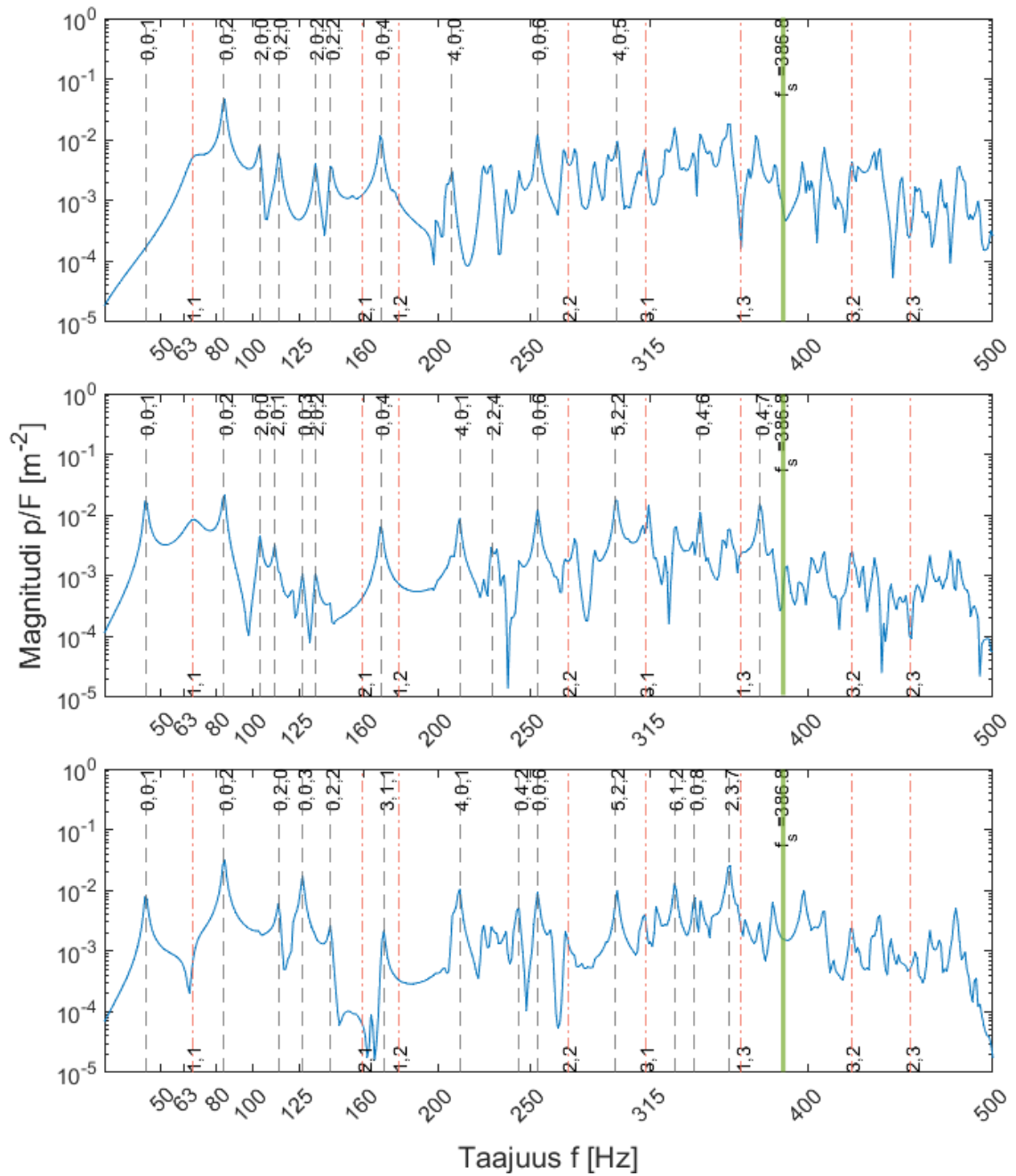


Kuva 25. $3,3 \times 3 \text{ m}^2$ kokoisen 200 mm paksun värähtelevän betonilaatan aiheuttaman äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K1 ($V = 30 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimääräinen kuvaaja pisteestä $(0,7; 0,7; 0,7)$ ja alin kuvaaja pisteestä $(2,15; 1,7; 1,5)$. Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 447,2 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.

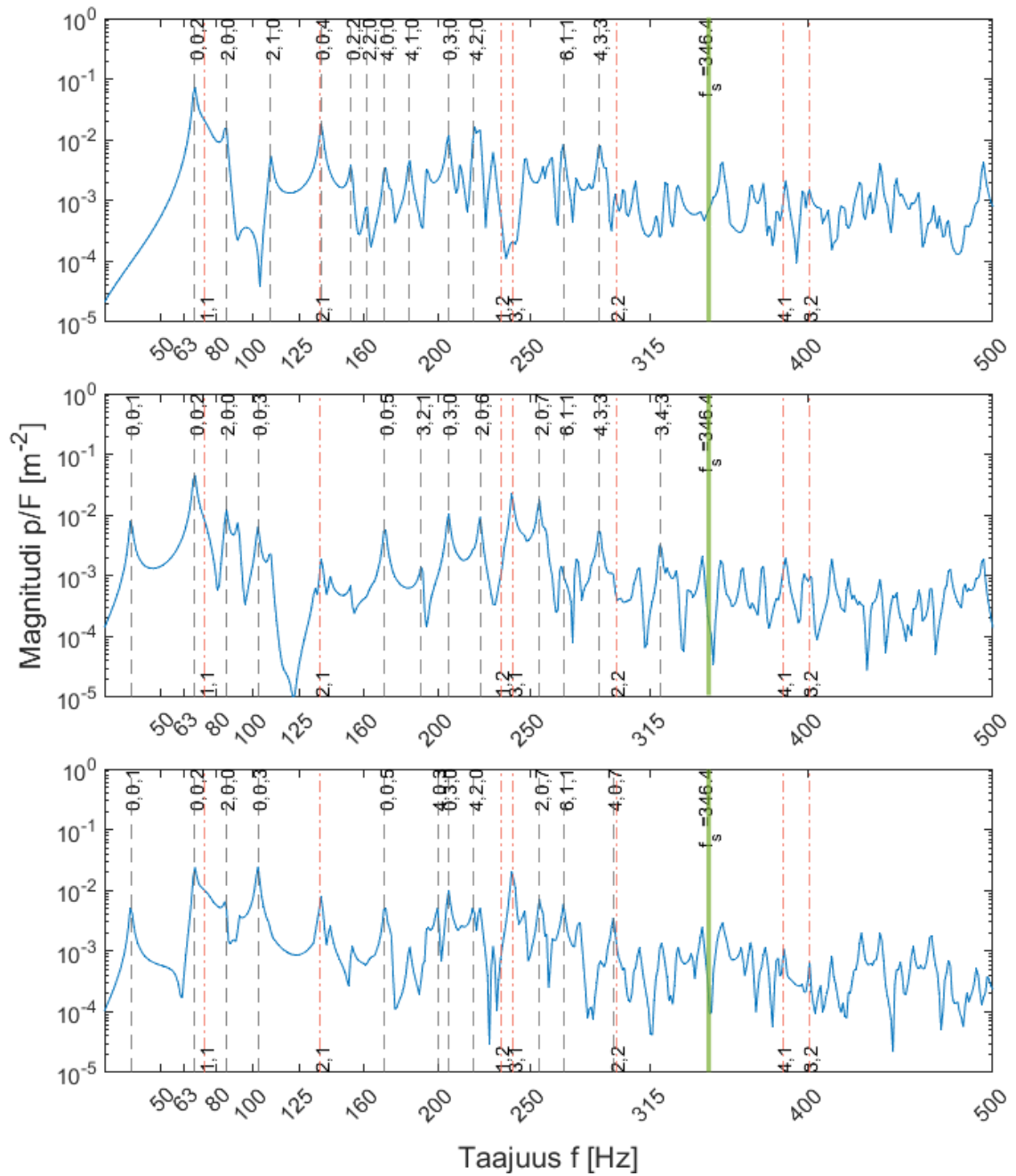


Kuva 26. 4 x 2,5 m² kokoisen 200 mm paksun betonilaatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K4 ($V = 40$ m³) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,5; 1,45; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 387,3$ Hz on vihreällä pystyviivalla.

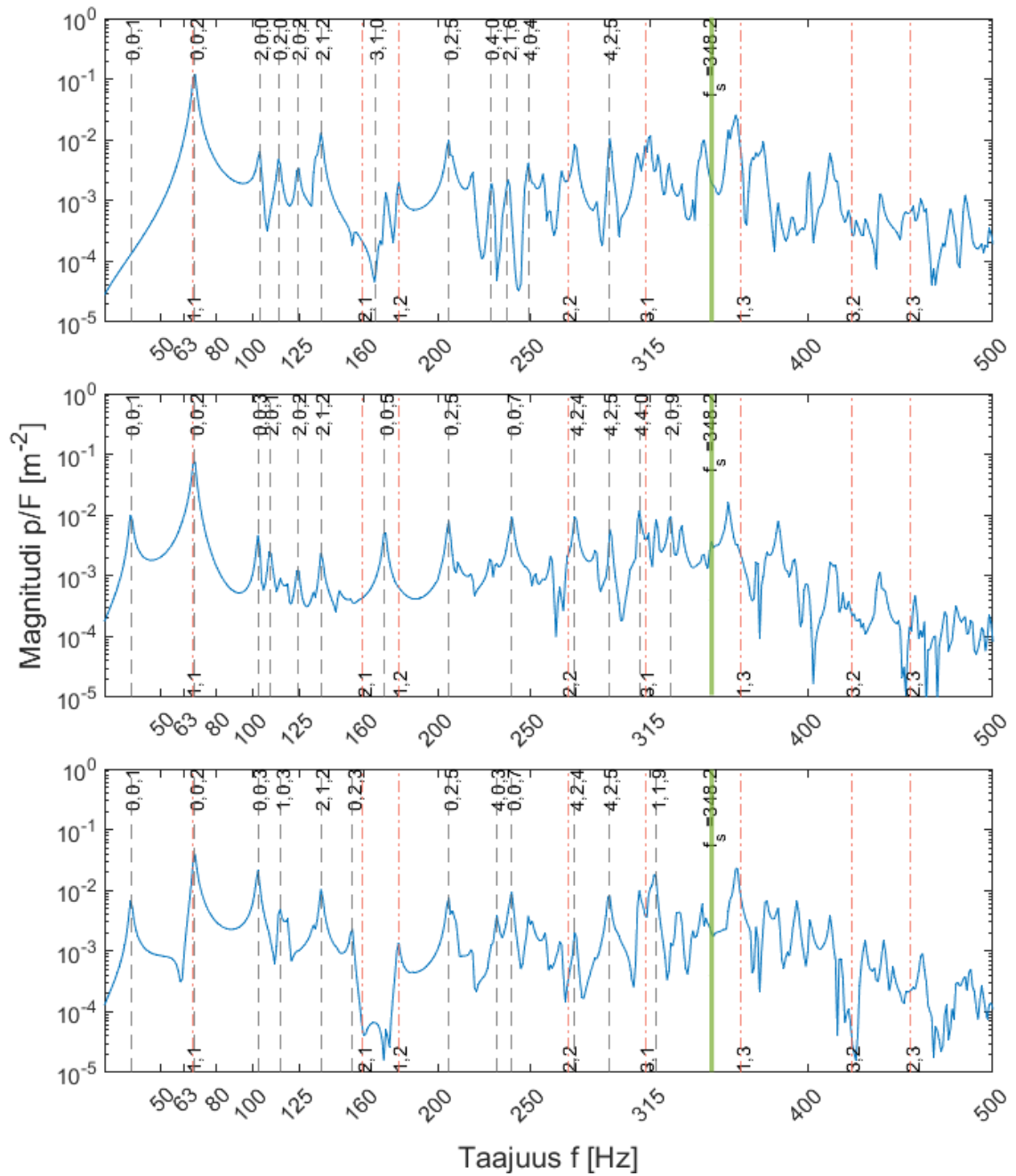
Kuvan 26 huoneessa x- ja z-suunnan mitat ovat samat. Näin ollen moodien taajuudet, joissa n_x ja n_z ovat toisin päin vastaavat toisiaan eli esimerkiksi ominaistajuus $f_{0,0,2} = f_{2,0,0} = 86$ Hz.



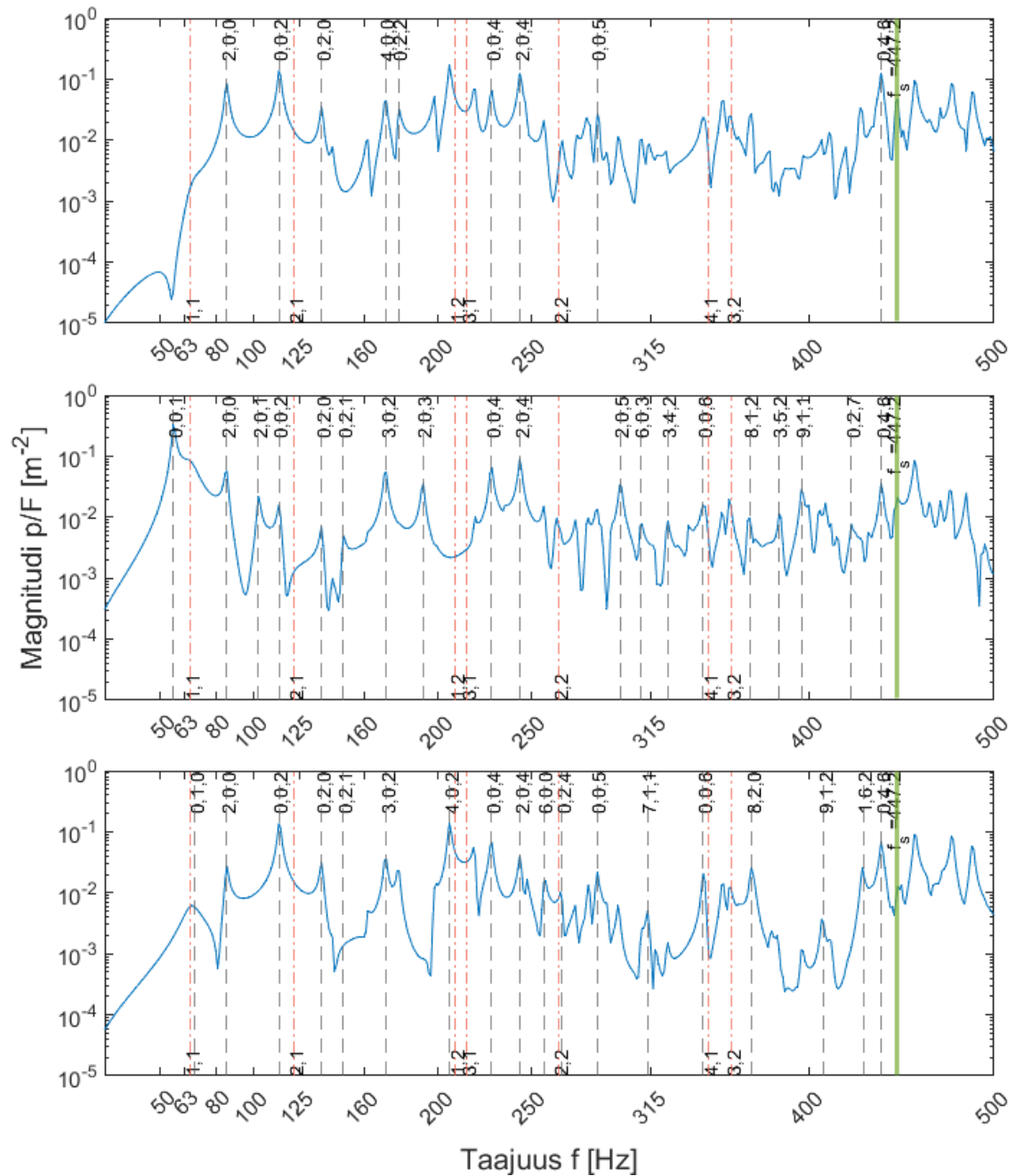
Kuva 27. $3,3 \times 3 \text{ m}^2$ kokoisen 200 mm paksun värähtelevän betonilaatan aiheuttaman äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K3 ($V = 40 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä $(0,7; 0,7; 0,7)$ ja alin kuvaaja pisteestä $(2,15; 1,7; 1,5)$. Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 386,8 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.



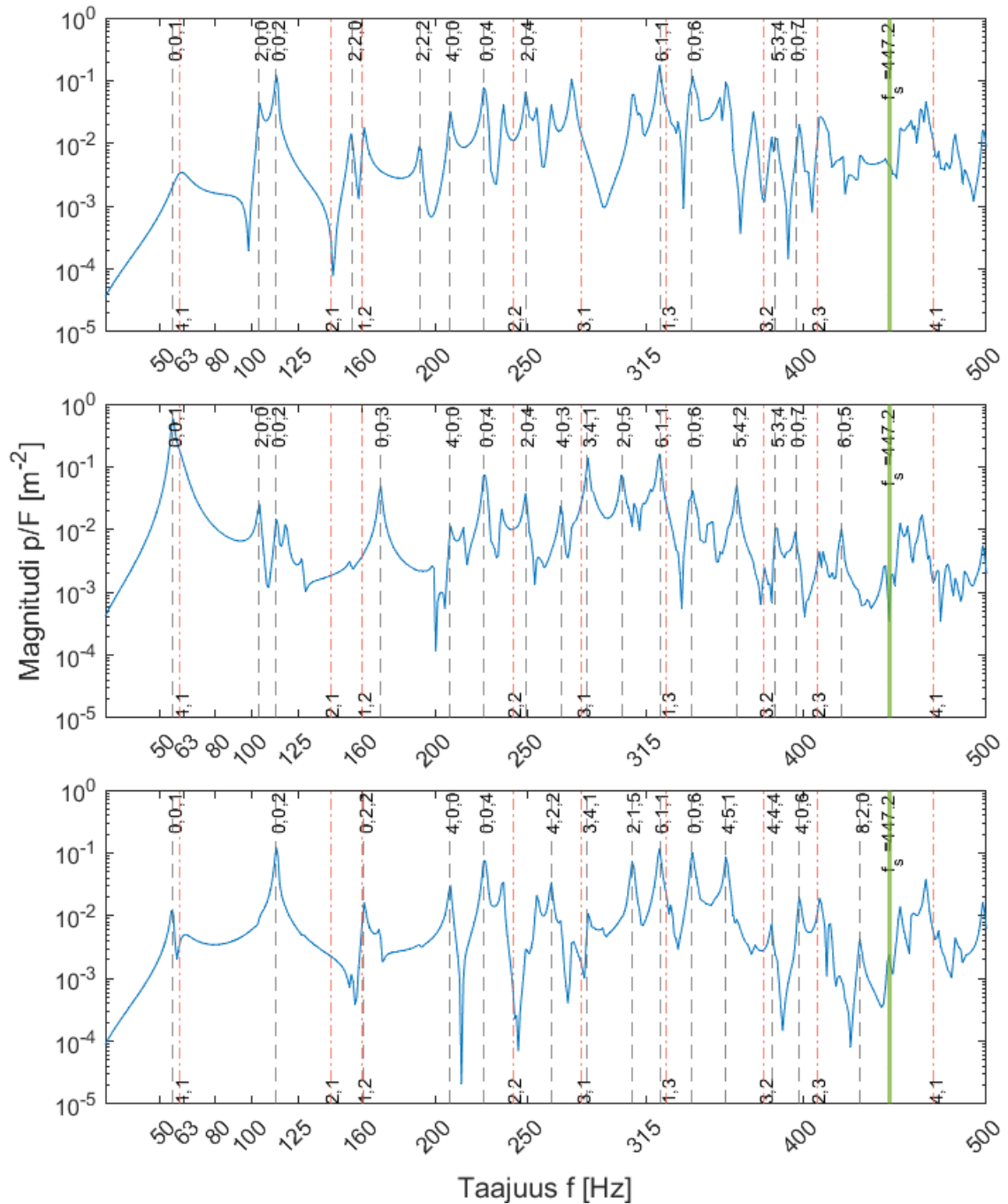
Kuva 28. $4 \times 2,5 \text{ m}^2$ kokoisen 200 mm paksun betonilaatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K6 ($V = 50 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimmäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,5; 1,45; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 346,4 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.



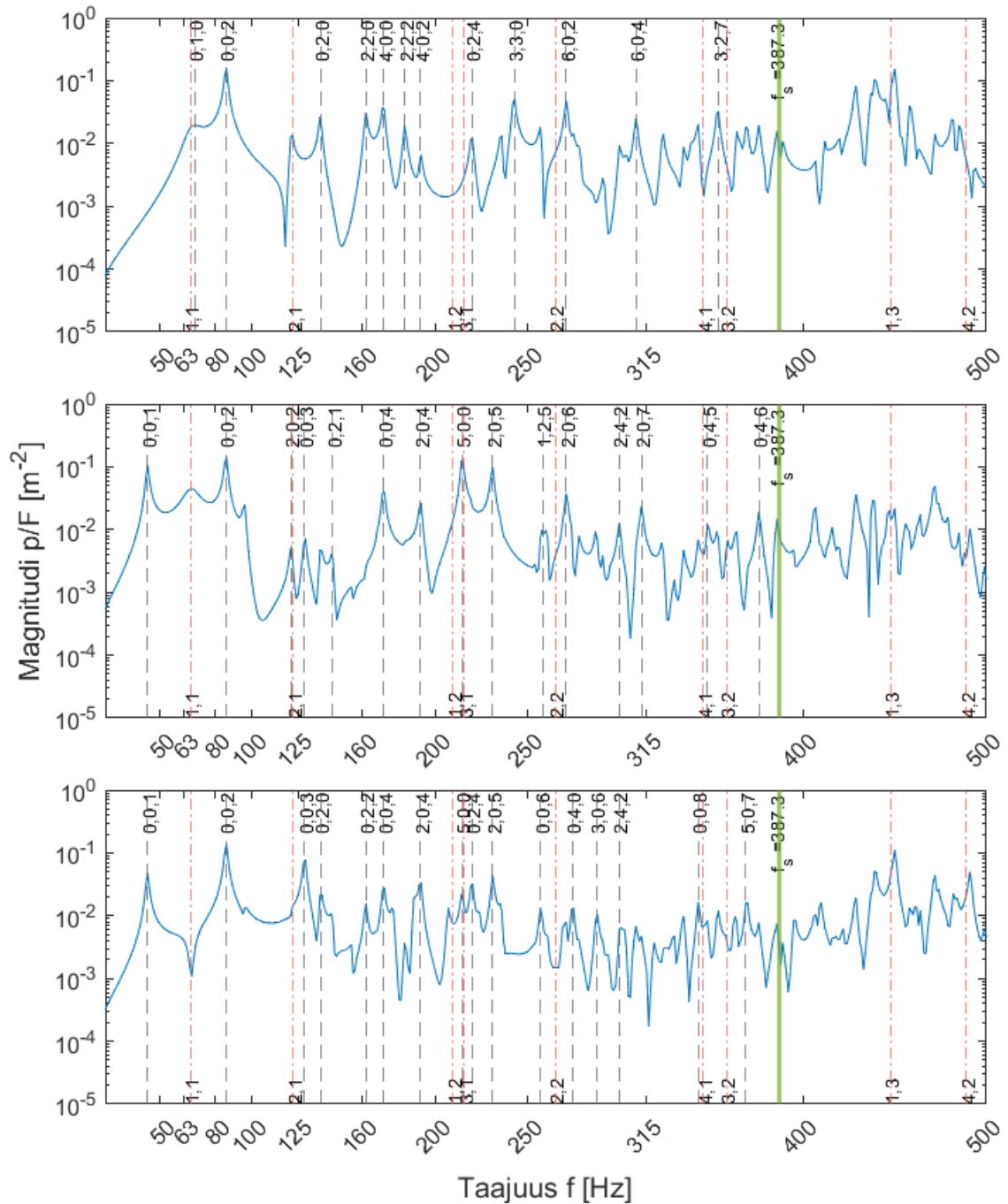
Kuva 29. $3,3 \times 3 \text{ m}^2$ kokoisen 200 mm paksun värähtelevän betonilaatan aiheuttaman äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K5 ($V = 50 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä $(0,7; 0,7; 0,7)$ ja alin kuvaaja pisteestä $(2,15; 1,7; 1,5)$. Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 348,2 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.



Kuva 30. 4 x 2,5 m² kokoisen 200 mm paksun CLT laatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K2 ($V = 30$ m³) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,5; 1,45; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 447,2$ Hz on vihreällä pystyviivalla.

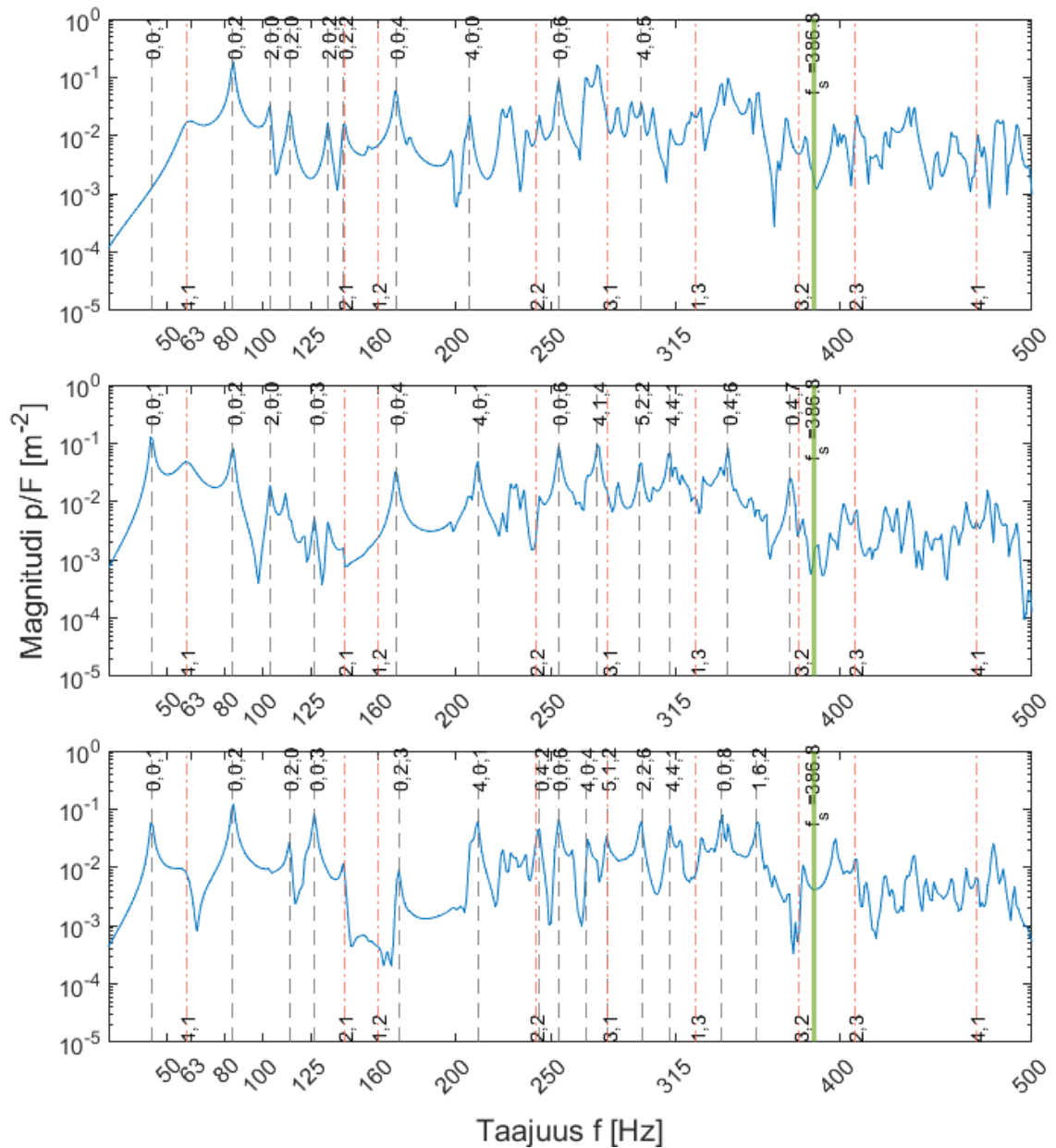


Kuva 31. 3,3 x 3 m² kokoisen 200 mm paksun CLT laatan värähtelyn aiheuttaman äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K1 ($V = 30 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,15 ;1,7; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 447,2 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.

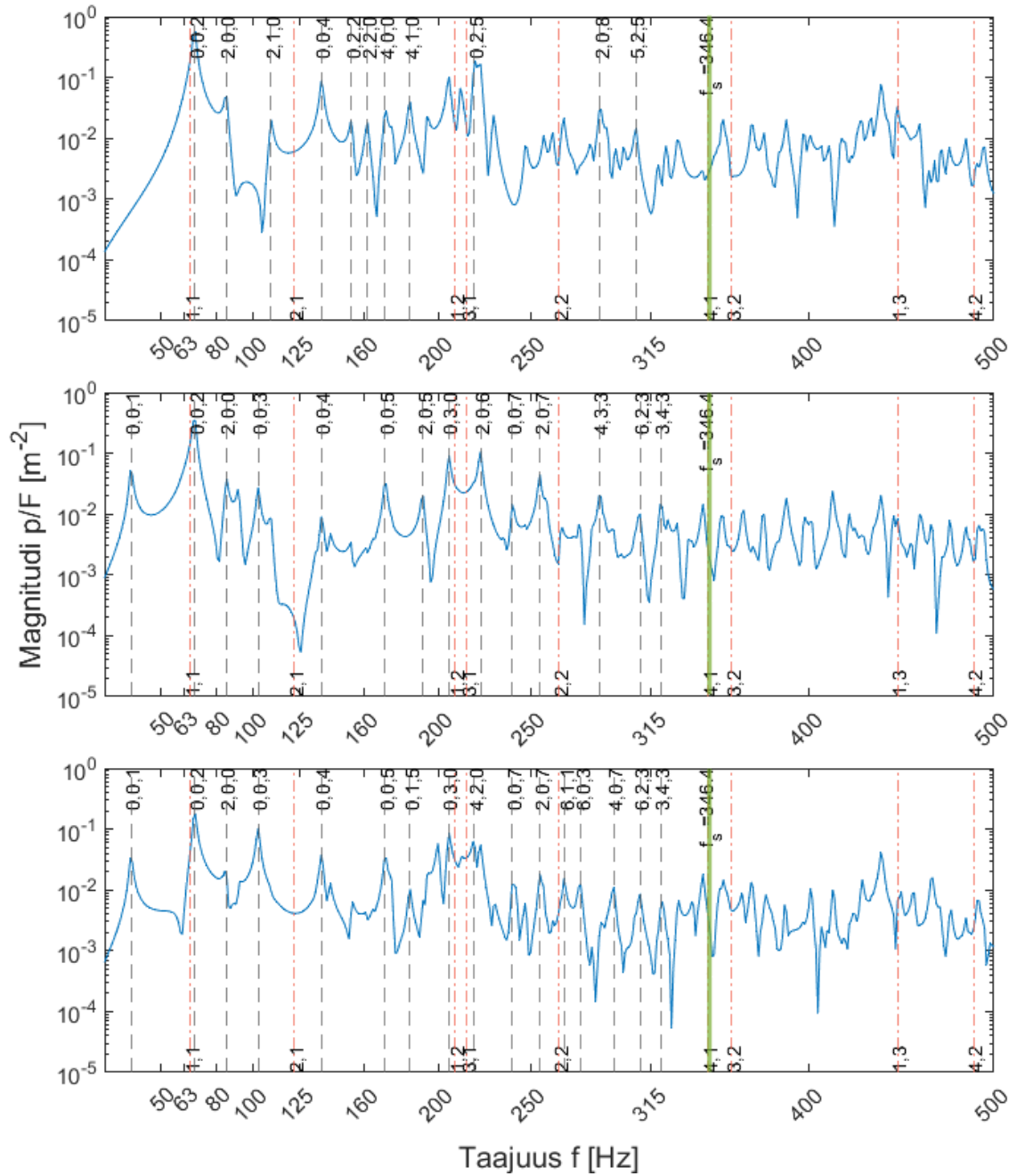


Kuva 32. 4 x 2,5 m² kokoisen 200 mm paksun CLT laatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K4 (V = 40 m³) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,5; 1,45; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 387,3$ Hz on vihreällä pystyviivalla.

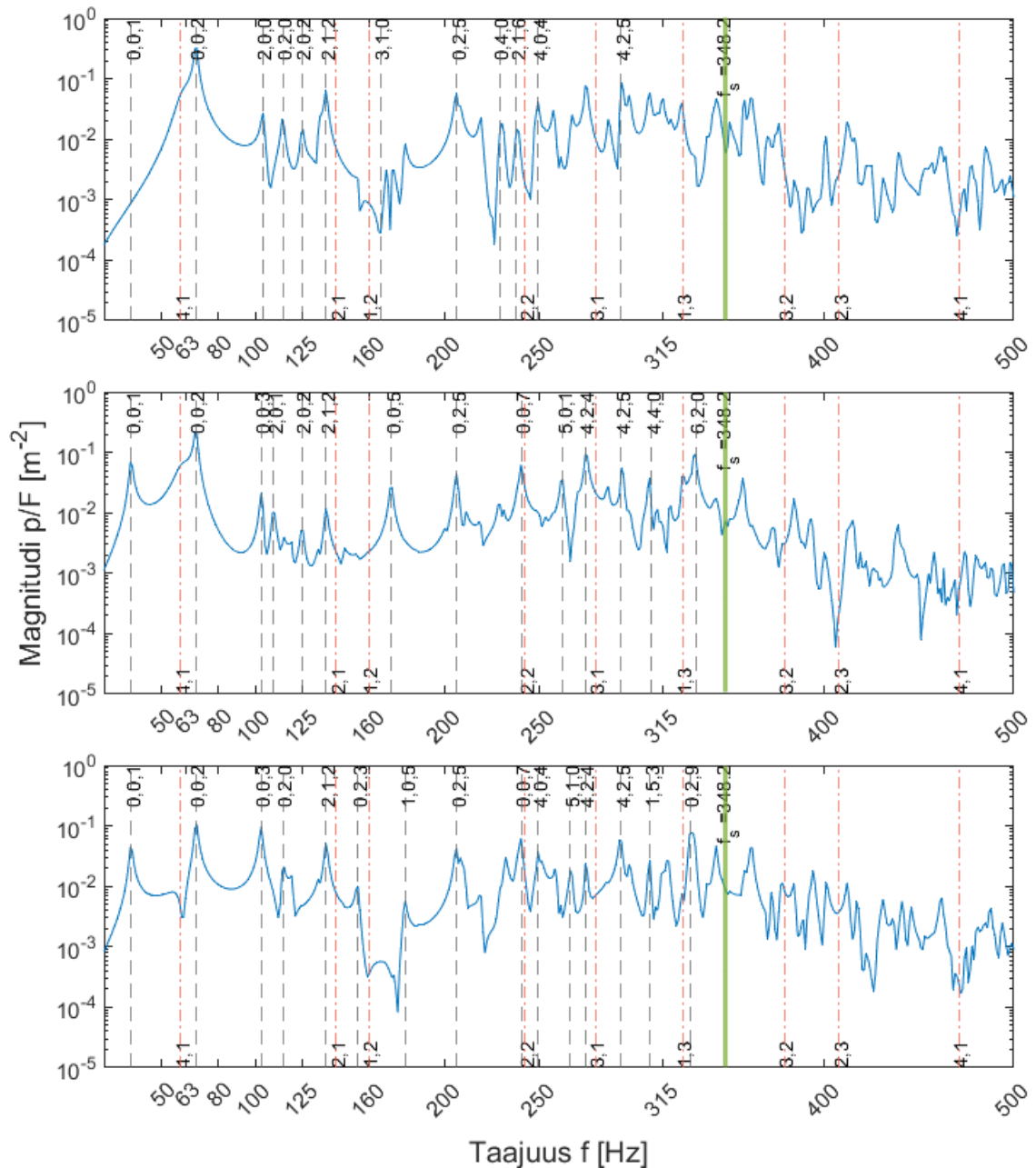
Kuvassa 32 huoneen x- ja z-suuntien dimensiot ovat samat, joten moodien kertoimet n_x ja n_z vastaavat toisiaan, esimerkiksi $f_{2,0,4} = f_{4,0,2} = 192$ Hz.



Kuva 33. 3,3 x 3 m² kokoisen 200 mm paksun CLT laatan värähtelyn aiheuttaman äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K3 (V = 40 m³) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,15; 1,7; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 386,8$ Hz on vihreällä pystyviivalla.



Kuva 34. $4 \times 2,5 \text{ m}^2$ kokoisen 200 mm paksun CLT laatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K6 ($V = 50 \text{ m}^3$) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,5; 1,45; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 346,4 \text{ Hz}$ on vihreällä pystyviivalla.



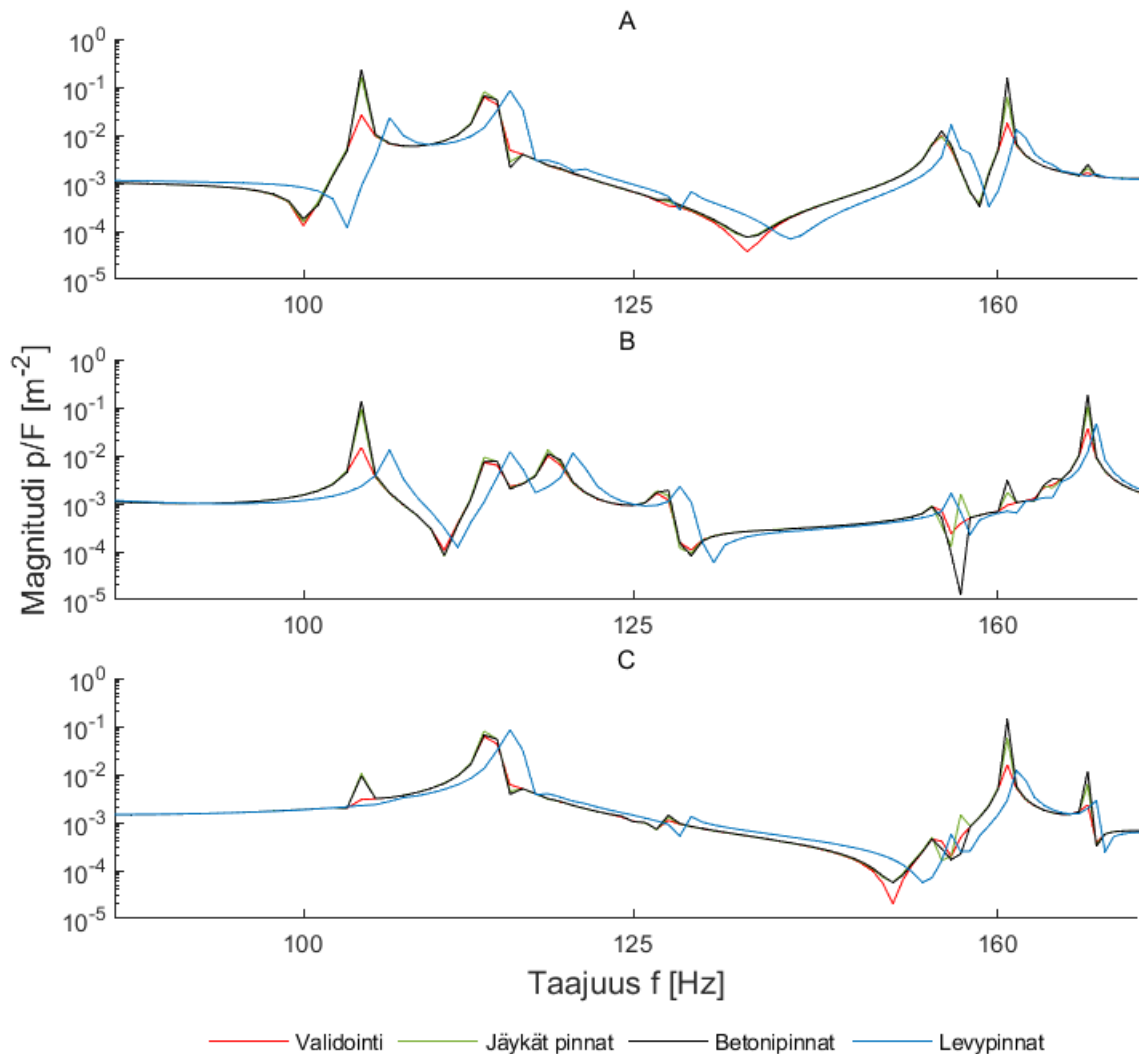
Kuva 35. 3,3 x 3 m² kokoisen 200 mm paksun CLT laatan värähtelyn aiheuttaman äänenpaineen magnitudi taajuuden suhteen huoneessa K5 ($V = 50$ m³) kolmessa eri pisteessä. Ylin kuvaaja on huoneen keskipisteestä, keskimäinen kuvaaja pisteestä (0,7; 0,7; 0,7) ja alin kuvaaja pisteestä (2,15; 1,7; 1,5). Huonemoodit ovat kuvassa harmailla katkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan yläreunassa. Laatan moodit ovat oransseilla pistekatkoviivoilla ja moodien kertoimet ovat kuvaajan alareunassa. Huoneen Schroederin rajataajuus $f_s = 348,2$ Hz on vihreällä pystyviivalla.

Kuvissa 24–35 huonemoodit on merkitty harmailla katkoviivoilla ja levymoodit oransseilla pistekatkoviivoilla. Kuvissa 24–35 nähdään piikkejä äänenpaineen magnitudissa huonemoodeilla. Laatan ominaistajuuksilla magnitudikuvaajissa nähdään yleensä kuoppa.

Mikäli huoneen ja laatan ominaistajuuudet osuvat lähelle toisiaan, moodit voivat kytkeytyä ja aiheuttaa huomattavasti suuremman piikin äänenpaineen magnitudissa, kuten kuvissa 29, 31 ja 34.

Huoneessa K6 huoneen korkeus on kaksinkertainen huoneen lyhyempään sivumittaan verrattuna. Tällöin y- ja z-suuntaisia ominaistajuuksia osuu samalle taajuudelle, mutta z-suunnan kerroin on y-suunnan monikerta, kuten kuvassa 28 ominaistajuus $f_{002} = f_{010} = 69$ Hz. Huoneessa K4 x- ja z-suunnan dimensio on sama. Tällöin sekä x- että z-suunnan aksiaalimoodit osuvat samalle taajuudelle kuten kuvissa 26 ja 32 moodi $f_{204} = f_{402}$.

Analyttisen tarkastelun lisäksi CLT-laatan ja huoneen yksinkertaistettu kytkeytymisen simulointimalli laskettiin jäykän pinnan, betonipinnan ja levy-pinnan reunaehdoilla. Selkeyden vuoksi tulokset on esitetty taajuuskaistoilta 100–160 Hz kuvassa 36.



Kuva 36. Reunaehdon vaikutus CLT-laatan värähtelyn aiheuttamaan äänenpaineen magnitudiin huoneen a) keskipisteessä, b) pisteessä (0,7; 0,7; 0,7) ja c) pisteessä (2,15; 1,7; 1,5).

Kuvasta 36 nähdään, että jäykällä ja betonisella pinnalla huoneen ominaistajuuudet ovat hyvin korostuneita. Jäykän pinnan ja betonipinnan tulokset vastaavat keskenään hyvin toisiaan sekä validoitua tulosta muutamia piikkejä lukuun ottamatta. Levypintaisessa mallissa ominaistajuuudet ovat selvästi siirtyneet korkeammalle. Eniten hajontaa tulosten välillä on 160 Hz taajuuskaistalla sekä yksittäisten moodien kohdalla. Samat ilmiöt ovat nähtävissä koko taajuusalueella 20–500 Hz, jotka on esitetty pisteittäin liitteessä A.

4.2 Huoneen ominaistajuuudet

Huoneen reunaehtojen vaikutusta huoneen ominaistajuuksiin tarkasteltiin käyttäen samaa huonetta K1 kuin laatan ja huoneen kytkeytymisen validoinnissa. Taulukossa 4 on esitetty 10 alinta moodia kertoimineen eri reunaehtoja käyttäen. Jäykän, betonisen ja levypintaisen huoneen ominaistajuuudet saatiin simuloimalla.

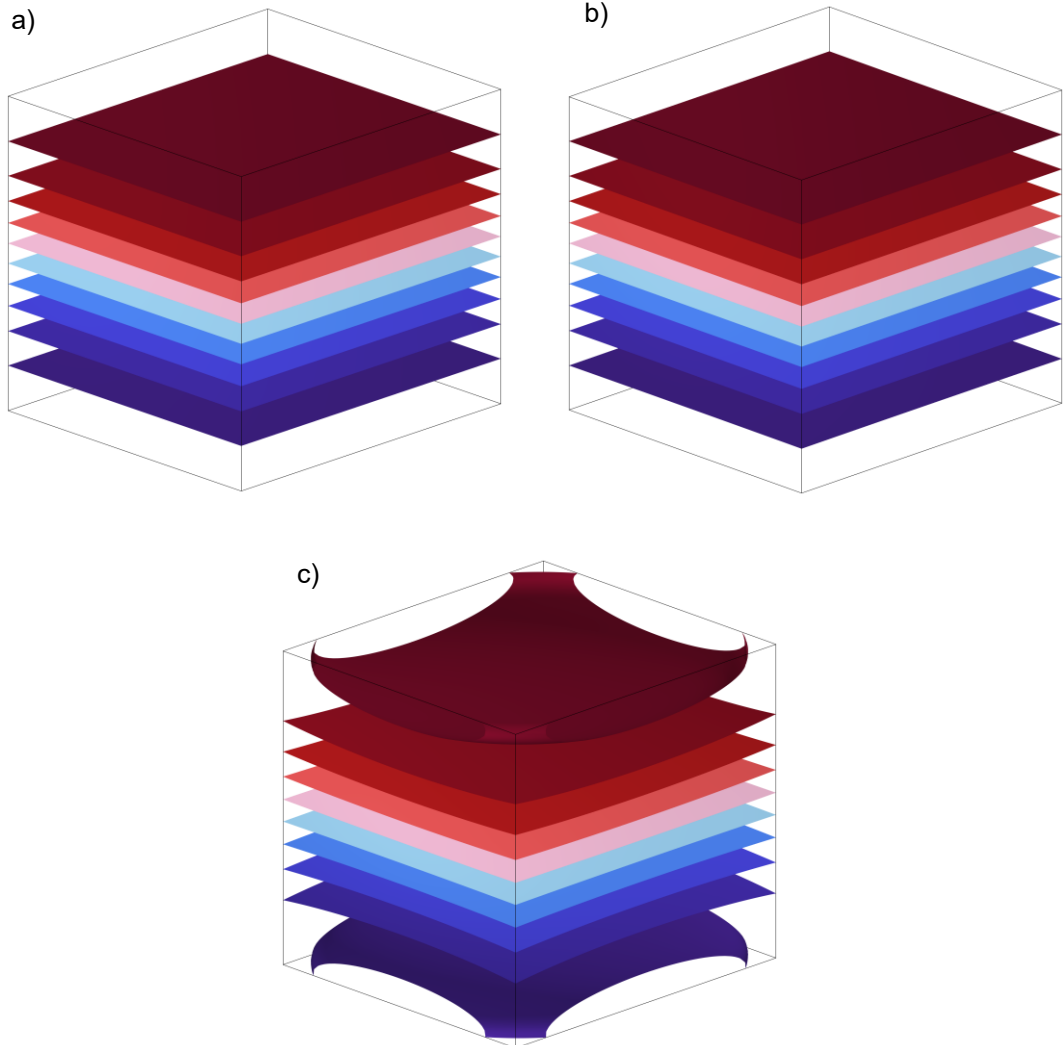
Taulukko 4. Huoneen K1 ($V = 30 \text{ m}^3$) 10 alinta ominaistajuuutta [Hz] simuloituna eri reunaehdoilla.

n_x	n_y	n_z	Analyttinen	Jäykät pinnat	Betonipinnat	Levypinnat
1	0	0	51,970	51,970	52,141 + 0,026j	57,239 + 1,511j
0	0	1	56,601	56,601	56,761 + 0,024j	61,078 + 0,928j
0	1	0	57,167	57,167	57,324 + 0,023j	61,983 + 1,211j
1	0	1	76,841	76,841	76,987 + 0,019j	81,517 + 0,749j
1	1	0	77,259	77,259	77,404 + 0,019j	80,850 + 0,615j
0	1	1	80,447	80,447	80,589 + 0,018j	84,369 + 0,578j
1	1	1	95,773	95,774	95,916 + 0,017j	99,675 + 0,490j
2	0	0	103,939	103,95	104,03 + 0,010j	106,39 + 0,304j
0	0	2	113,201	113,21	113,28 + 0,009j	115,29 + 0,189j
0	2	0	114,333	114,35	114,42 + 0,009j	116,59 + 0,251j

Taulukosta 4 nähdään, että betonipintaisen ja jäykkäpintaisen huoneen moodien reaali-osien välinen ero pienenee, kun taajuus kasvaa. Reaali-osien välinen ero on enimmillään 0,33 %. Huoneen lattialla ja katolla on kipsilevypintojen tapauksessa eri reunaehdot kuin seinillä, minkä takia huoneen ominaistajuuudet f_{011} ja f_{101} ovat toisin päin suuruutensa puolesta. Näillä taajuuksilla saman moodimuodon ominaistajuuksissa on suurin ja pienin ero jäykkäseinäiseen huoneeseen verrattuna. Mikäli moodeja verrataan suuruusjärjestyksessä, suurin ero ominaistajuuksien välillä on pienimmällä ominaistajuudella f_{100} . Ero on suurimmillaan 9 % tai noin 5 Hz ja ero pienenee taajuuden kasvaessa. Levypintaisen huoneen ominaistajuuksien imaginääriosia on huomattavasti suurempi

betonipintaisen huoneen ominaistajuuksiin verrattuna, mikä tarkoittaa, että levypintaisessa huoneessa tapahtuu enemmän häviöitä.

Kuvassa 37 on esitetty huoneen K1 simuloitu ominaistajuus f_{001} eri reunaehdoilla

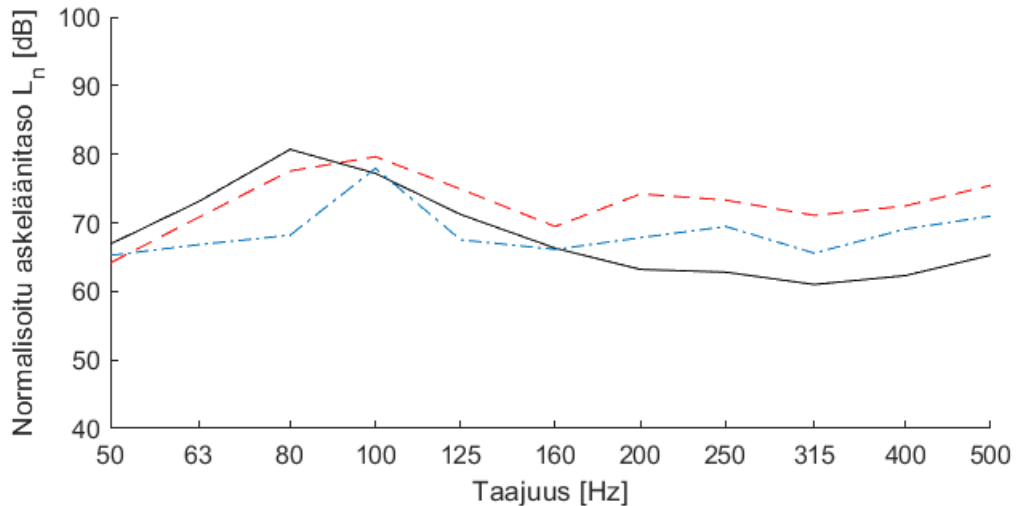


Kuva 37. Ensimmäinen pystysuuntainen moodi f_{001} a) jäykkäseinäisessä b) betoniseinäisessä ja c) levyseinäisessä huoneessa.

Kuvasta 37 nähdään, että levypintojen reunaehdolla ominaismuoto on hieman käyristynyt huoneen ylä- ja alareunoilta. Jäykkäpintaisen ja betonipintaisen huoneen moodimuodot ovat keskenään identtiset. Kaikkien simuloitujen tilojen 10 alinta ominaistajuutta on esitetty liitteessä B.

4.3 Huoneen äänikentän vaikutus

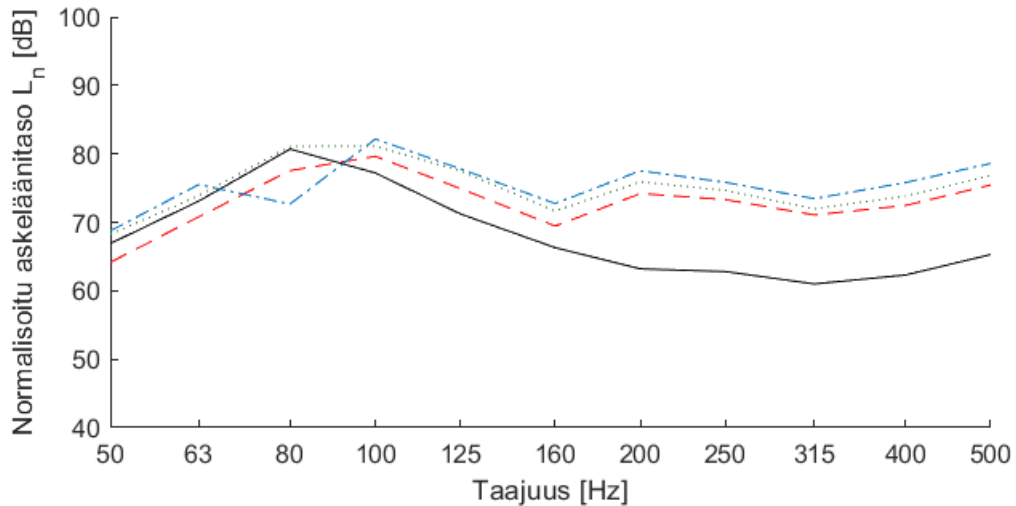
Huoneen äänikentän vaikutusta koko lattian askelääneneristävyyteen tarkasteltiin ensin mitattuun jälkikäiunta-aikaan perustuvan impedanssireunaehdon avulla. Mallinnustulos on esitetty kuvassa 38 yhdessä mittaustuloksen ja Lietzénin (2024) mallinnustuloksen kanssa.



Kuva 38. Puuvälipohjan askelääneneristävyyden mittaustulos mustalla, Lietzénin (2024) mallinnustulos sinisellä pistekatkoviivalla ja mallinnustulos huonetilan kanssa punaisella katkoviivalla.

Kuvasta 38 nähdään, että huonetilan lisääminen malliin parantaa mallinnuksen vastaavuutta mittaustulokseen pienillä taajuuksilla. Alle 200 Hz taajuuksilla laskentatulokset poikkeaa mittaustuloksesta keskimäärin noin 3 dB. Yli 200 Hz taajuuksilla vastaavuus mittaustuloksen kanssa heikkenee ja mallinnustulos on jopa 10 dB mitattua arvoa suurempi, mutta mallinnustuloksen muoto vastaa näillä taajuuksilla mittaustulosta. Yli 160 Hz taajuuksilla laskettu tulos poikkeaa Lietzénin tuloksesta noin 5 dB.

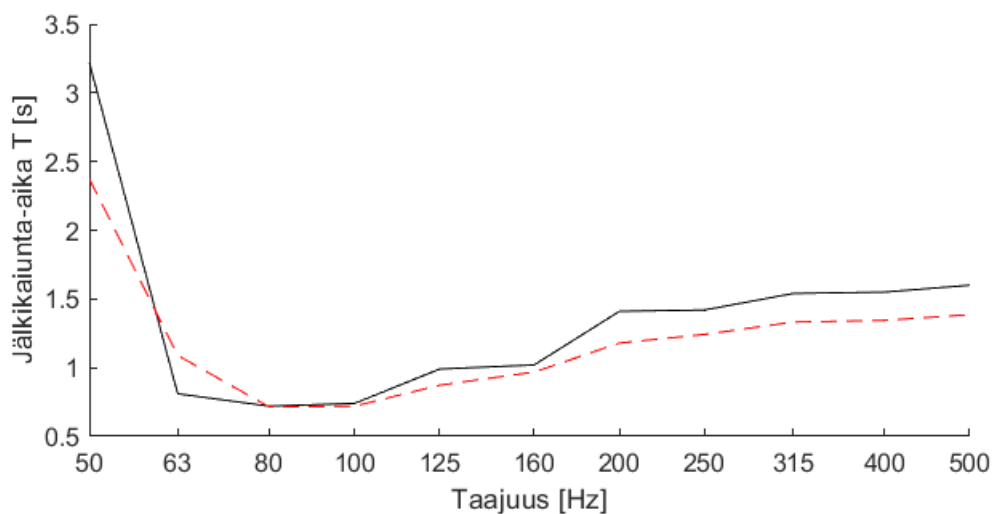
Laskentatulokset kuvan 20 eri näytteistystavoilla on esitetty kuvassa 39 mittaustuloksen kanssa.



Kuva 39. Puuvälipohjan askelääneneristävyyden mittaustulos mustalla, mittausalueen mallinnustulos punaisella katkoviivalla, mittauspisteiden mallinnustulos sinisellä pistekatkoviivalla ja koko huoneen mallinnustulos vihreällä pisteviivalla.

Kuvasta 39 nähdään, että koko huoneen tulos vastaa parhaiten mittaustulosta pienillä taajuuksilla. Mittausalueen mallinnustulos on noin 3 dB mittaustulosta pienempi alle 100 Hz taajuuksilla ja keskimäärin 10 dB mittaustulosta suurempi yli 200 Hz taajuuksilla. Huoneen toinen pystysuuntainen ominaistaajuus on $f_{002} = 85,7$ Hz, joka keskiarvoistuu 80 Hz terssikaistalle. Tämä näkyy myös mallinnustuloksissa kuoppana mittauspisteiden tuloksessa sekä piikkinä muissa tuloksissa 80 Hz kaistalla. Mallinnetun huoneen alimmat ominaistaajuudet on esitetty liitteessä B.

Simulointimallista määritetty jälkikaiunta-aika on esitetty kuvassa 40 mitatun jälkikaiunta-ajan kanssa.

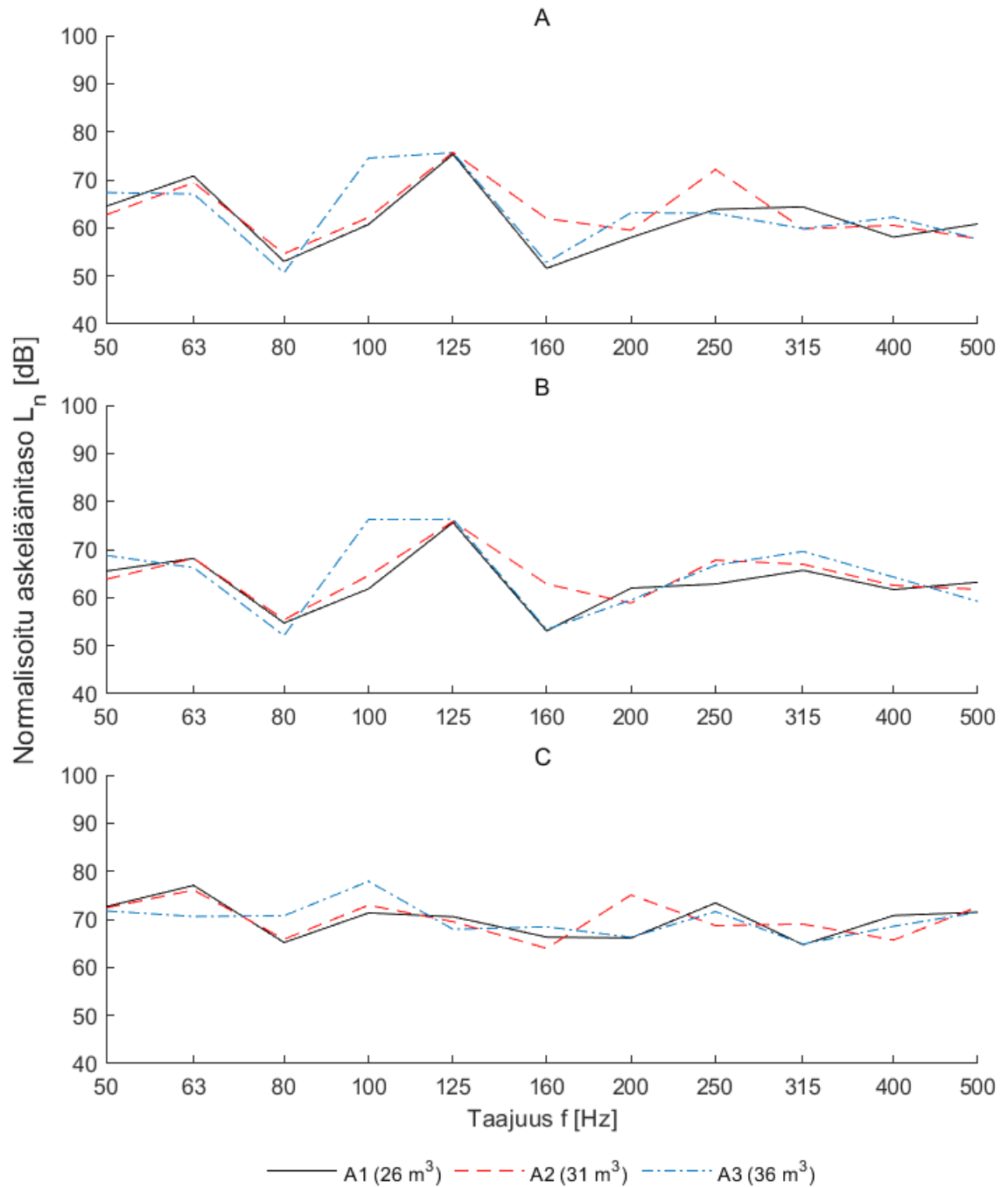


Kuva 40. Huoneen mitattu jälkikaiunta-aika mustalla ja simulointimallin jälkikaiunta-aika punaisella katkoviivalla.

Kuvasta 40 nähdään, että simulointimallin jälkikaiunta-aika vastaa hyvin mitattua jälkikaiunta-aikaa koko taajuusalueella.

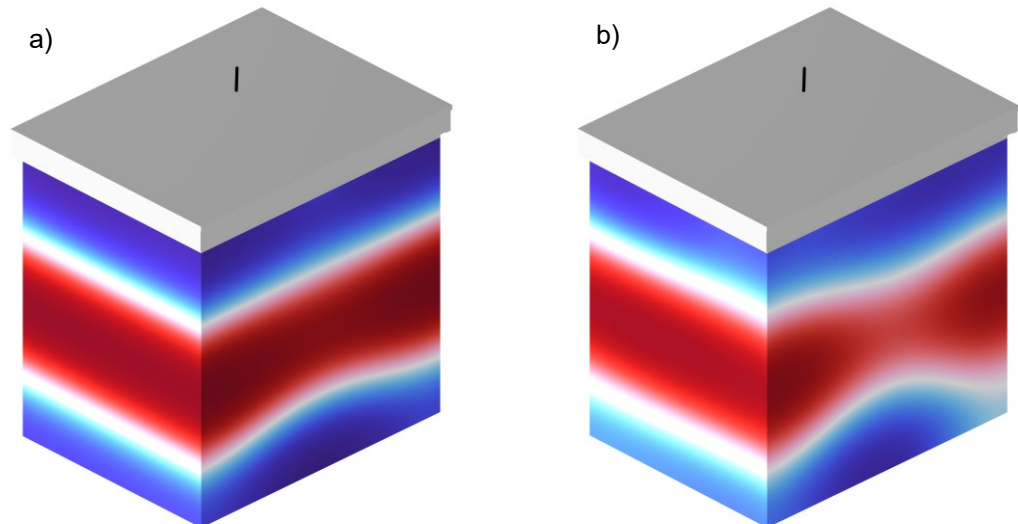
4.4 Askelääneneristävyys

Samalla reunaehdolla mallinnettujen erikokoisten huoneiden simulointitulokset on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. a) Jäykkien pintojen b) betonipintojen ja c) levypintojen reunaehdolla mallinnettujen erikokoisten huoneiden simulointitulokset.

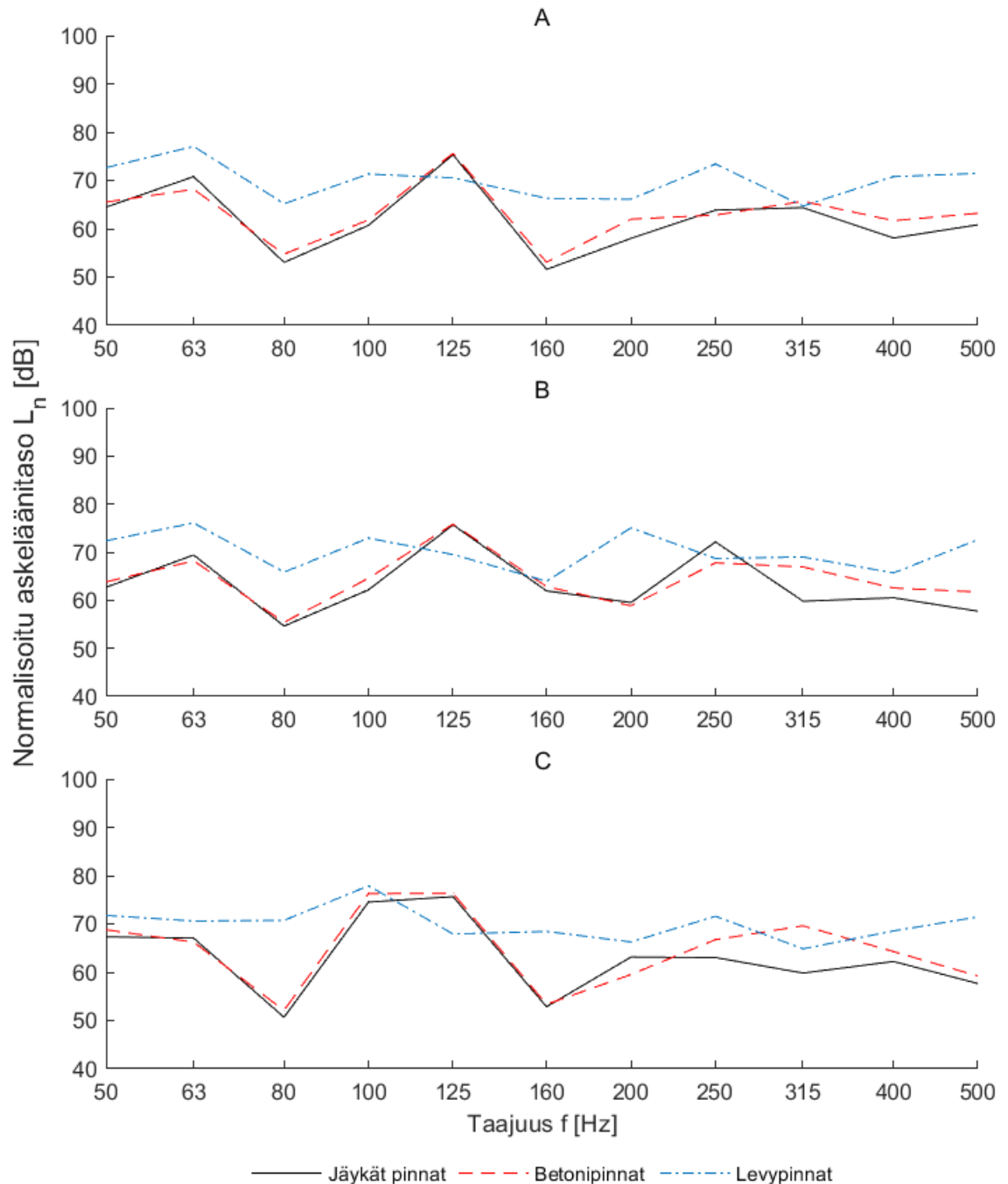
Kuvasta 41 nähdään, että alle 125 Hz taajuuksilla huoneiden A1 ja A2 tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Huoneessa A3 kaikilla reunaehdoilla korostuu 100 Hz taajuuskaista, jolle osuu huoneen toinen pystysuuntainen ominaistaajuus f_{002} . Kuvassa 42 on esitetty askelääneneristävyyden simulointimallissa nähtävä toinen pystysuuntainen moodi betoni- ja levyseinän reunaehdoilla. Askeläänikojeen paikka on kuvassa mustalla viivalla.



Kuva 42. Huoneen A3 askelääneneristävyyden simulointimallista nähtävä toinen pystysuuntainen moodi f_{002} a) betonipintaisessa ja b) levyseinäisessä huoneessa. Askeläänikojeen paikka on merkitty välipohjarakenteen päälle mustalla viivalla.

Kuvasta 42 nähdään, että moodi on molemmilla reunaehdoilla hieman käyrästynyt erityisesti huoneen pitkällä sivulla. Kuvasta nähdään myös, että kevytrakenteissa huoneessa värit ovat vaaleampia eli äänenpainetaso huoneessa on pienempi kuin betonirakenteisessa huoneessa. Huoneen toinen pystysuuntainen ominaistaajuus on $f_{002} = 98$ Hz jäykkän seinän reunaehdolla, $f_{002} = 99$ Hz betonireunaehdolla ja $f_{002} = 100$ Hz levyseinien reunaehdolla. Jäykkä- ja betonipintaisissa huoneissa A1 ja A2 korostuu huonemoodi f_{030} 125 Hz taajuuskaistalla, mikä nähdään laskentatuloksissa kuvassa 41.

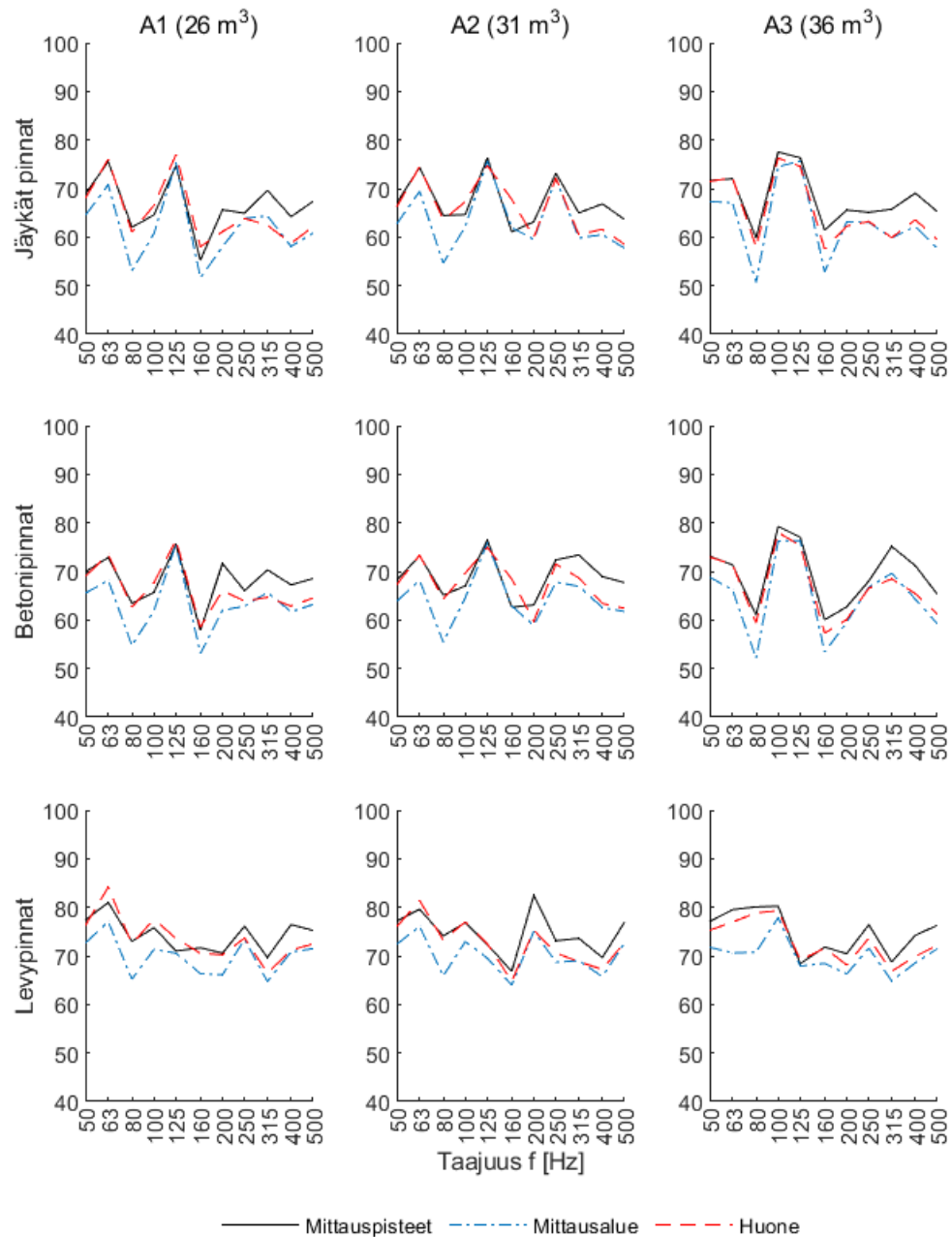
Samankokoisten huoneiden simulointitulokset eri reunaehdoilla on esitetty kuvassa 43.



Kuva 43. a) Huoneen A1 ($V = 26 \text{ m}^3$) b) huoneen A2 ($V = 31 \text{ m}^3$) c) huoneen A3 ($V = 36 \text{ m}^3$) simulointitulokset eri reunaehdoilla.

Kuvasta 43 nähdään, että jäykän seinän ja betoniseinän reunaehdoilla lasketut tulokset vastaavat toisiaan erittäin hyvin koko taajuusalueella huoneessa A1 ja alle 200 Hz taajuuksilla huoneissa A2 ja A3. Huoneessa A2 jäykän seinän reunaehdolla nähdään 250 Hz taajuuskaistalla ominaistaajuus, jota ei nähdä betoni- tai kipsilevyreunaehdolla. Levyypintaisen huoneen normalisoidut askeläänitasot ovat huomattavasti tasaisempia koko taajuusalueella jäykkä- ja betonipintaisiin huoneisiin verrattuna. Levyypintaisessa huoneessa A2 näkyy moodi f_{042} 200 Hz taajuudella.

Eri näytteistystapojen laskentatulokset on esitetty kuvassa 44 huoneen reunaehdon ja huonekorkeuden mukaan.

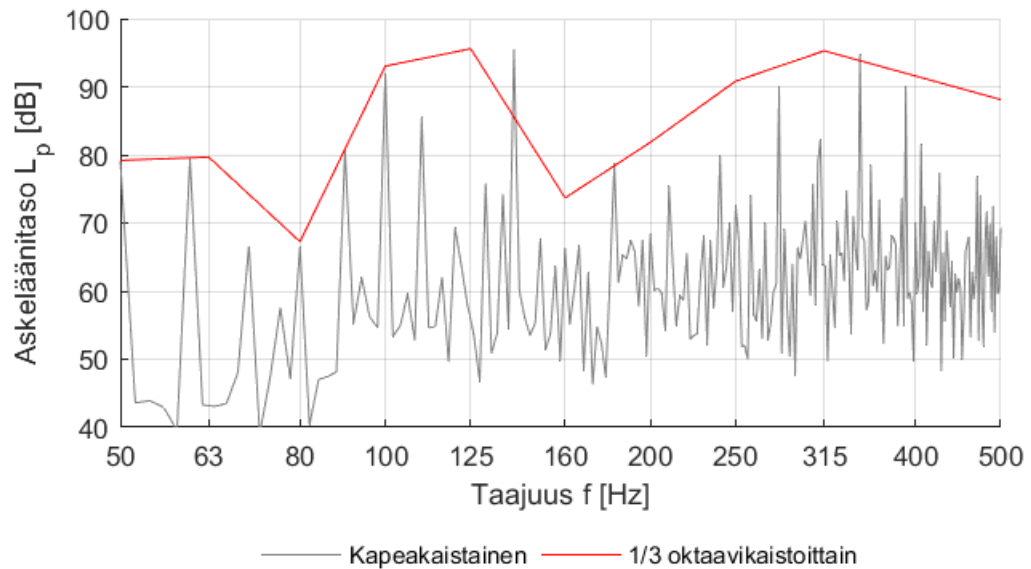


Kuva 44. Huonetilojen A1–A3 laskentatulokset eri näytteistystavoilla ja reunaehdoilla.

Kuvasta 44 nähdään, että mittausalueelta saadaan kaikissa tapauksissa pienimmät tulokset. Mittauspisteillä saatava tulos vastaa hyvin koko huoneen keskiarvoa alle 160 Hz taajuuksilla. 160 Hz yläpuolella mittauspisteistä saatava tulos ylierioi huoneessa vallitsevaa äänikenttää enimmillään 10 dB. Ero mittausalueen ja koko huoneen tulosten välillä on jopa 10 dB 80 Hz taajuuskaistalla. Koko huoneen äänenpainetaso vastaavuu

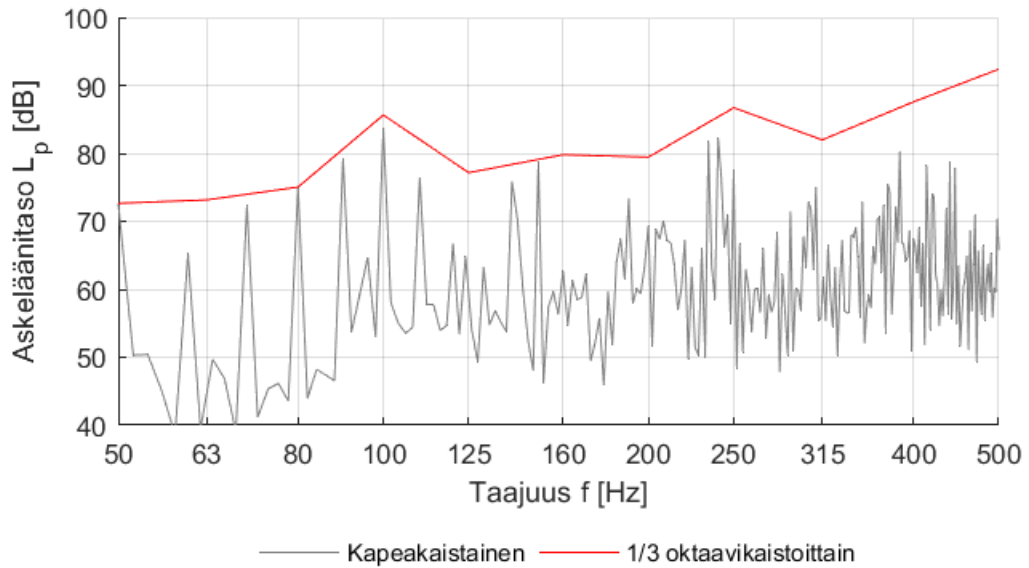
paranee mittausalueen tuloksen kanssa yli 160 Hz taajuuksilla. Kaikki kuvan 44 osat on esitetty suurempina liitteessä C.

Betonipintaisen huoneen A3 mittausalueella vallitseva askeläänitaso kapeakaistaisena sekä keskiarvoistettuna on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Askeläänitaso L_p betoniseinäisen huoneen A3 ($V = 36 \text{ m}^3$) mittausalueella kapeakaistaisena ja terssikaistoille keskiarvotettuna.

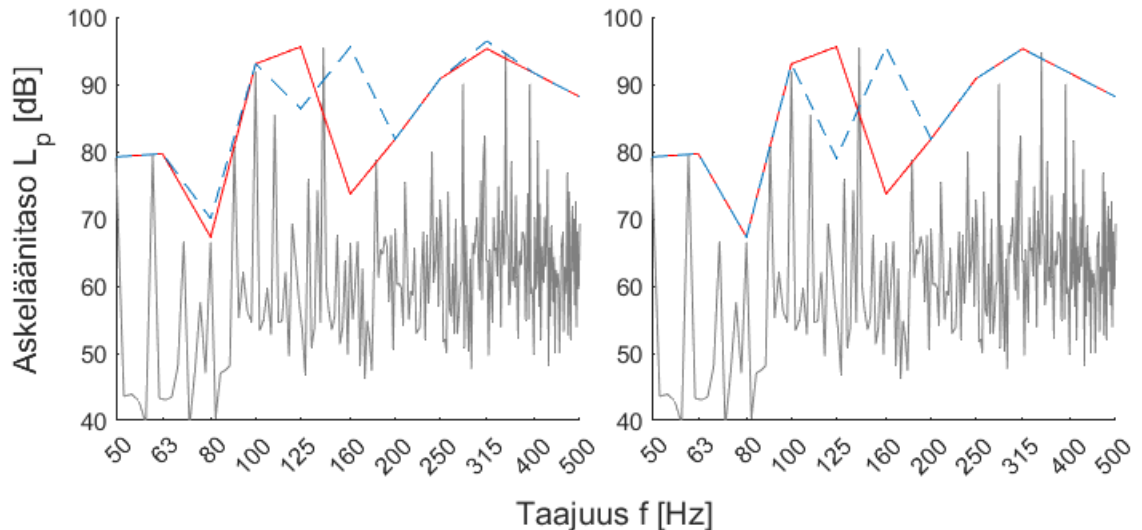
Kuvasta 45 nähdään, että taajuuskaistojen 125 Hz ja 160 Hz välissä olevat suurimmat äänenpainetaso piikit keskiarvoistuvat taajuudelle 125 Hz, mikä näkyy myös normalisoiduissa tuloksissa. Huoneen ominaistaajuus f_{002} näkyy kuvassa piikkinä 100 Hz taajuudella. 125 Hz taajuudella näkyy vaakasuuntainen aksiaalimoodi $f_{030} = 140 \text{ Hz}$. Kuvassa 46 on esitetty kapeakaistainen ja keskiarvotettu tulos levyseinäisen huoneen A3 mittausalueella.



Kuva 46. Askeläänitaso L_p levyseinäisen huoneen A3 ($V = 36 \text{ m}^3$) mittausalueella kapeakaistaisena ja terssikaistoille keskiarvoistettuna.

Kuvassa 46 nähdään huoneen ominaistajuus f_{002} 100 Hz taajuudella. Levyseinäisen huoneen äänenpainetaso on keskimäärin 10 dB pienempi kuin jäykkä- ja betoniseinäisen huoneen äänenpainetaso, mutta mallissa vallitseva jälkikaiunta-aika on huomattavasti muiden reunaehtojen malleja lyhyempi. Kaikkien huonetilojen mittausalueiden simulointitulokset on esitetty kapeakaistaisena liitteessä D.

Liitteen D kuvaajista nähdään, että jäykkä- ja betonipintaisilla huoneilla aksiaalimoodi f_{030} osuu 125 ja 160 Hz taajuuskaistojen väliin. Kuvassa 47 on esitetty betonipintaisen huoneen A3 kapeakaistainen tulos sekä eri tapoja keskiarvoistaa tulos taajuuskaistoittain. Terssikaistoille on annettu nimelliset ala- ja ylärajat, jotka kuuluvat kahdelle vierekkäiselle kaistalle. Tämä jättää tulkinnanvaraa siitä, miten keskiarvoistus tulisi tehdä. Tässä työssä taajuuskaistojen alaraja on seuraava laskettu taajuus edellisen kaistan ylärajasta eli kutakin laskettua tulosta käytettiin vain yhdellä taajuuskaistalla eikä päällekkäisyyksiä sallittu.



Kuva 47. Betonipintaisen huoneen A3 kapeakaistaisen tuloksen keskiarvoistus limityillä taajuuksilla vasemmalla ja rajalla olevan ominaistajuudesta johtuvan huippuarvon siirto seuraavalle taajuuskaistalle oikealla. Työssä yleisesti käytetty keskiarvoistus on esitetty kuvissa punaisella, kapeakaistainen tulos harmaalla ja vaihtoehtoinen keskiarvoistus sinisellä katkoviivalla.

Kuvassa 47 vasemmalla taajuuskaistojen ala- ja ylärajat limittyvät eli edellisen taajuuskaistan yläraja on seuraavan taajuuskaistan alaraja. Kuvasta nähdään, että 160 Hz taajuudella askeläänitaso nousee 22 dB ja 125 Hz taajuudella vastaavasti askeläänitaso pienenee 9 dB. Muilla taajuuskaistoilla ero on enimmillään noin 3 dB.

Kuvassa 47 oikealla taajuuskaistojen 125 Hz ja 160 Hz rajalla oleva piikki äänenpaine-tasossa on keskiarvoistettu sinisessä kuvaajassa taajuuskaistalle 160 Hz ja punaisessa kuvaajassa taajuuskaistalle 125 Hz. Kuvasta nähdään, että yhdenkin taajuuden siirto taajuuskaistalta toiselle voi muuttaa keskiarvoistusta huomattavasti. 125 Hz taajuudella askeläänitaso laskee 17 dB ja 160 Hz taajuudella askeläänitaso nousee 22 dB, kun keskiarvoistusta muutetaan.

5. TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Laatan ja huoneen kytkeytyminen

Analyttisesti lasketuissa äänenpaineen magnitudikuvaajissa 24–35 nähdään suurimmat piikit kahdella ensimmäisellä pystymoodilla f_{001} ja f_{002} . Huoneiden keskipisteissä ja pisteessä $(l_x/2+0,5; l_y/2+0,2; 1,5)$ kuvaajien suurin piikki on toisella pystysuuntaisella moodilla f_{002} . Standardien mukaisen mittausalueen kulmassa pisteessä $(0,7; 0,7; 0,7)$ suurin piikki on ensimmäisellä pystymoodilla f_{001} huoneissa K1–K4 sekä betoni että CLT laatala. Neves e Sousan ja Gibbsin (2011, 2014) tutkimuksissa suurin piikki äänenpaineen magnitudissa oli ensimmäisellä pystysuuntaisella moodilla f_{001} .

Magnitudikuvaajan muotoon vaikuttavat huonetilavuuden lisäksi laatan ominaisuudet, tarkastelupiste ja herätepiste. Samassa tilassa eri tarkastelupisteiden kuvaajat ovat muodoltaan hyvinkin erilaisia ja eri moodit aiheuttavat piikkejä äänenpaineen magnitudiin. CLT-laatoilla vastaanottotilaan syntyvän äänenpaineen magnitudi oli huomattavasti suurempi kuin betonilaatoilla eli CLT-laattojen askelääneneristävyys on heikompi vastaaviin betonisiin laattoihin verrattuna. Lisäksi CLT-laatan ominaistajuudet ovat pienempiä vastaavan kokoiseen betonilaattaan verrattuna. Kuvista 29 ja 34 nähdään, että kaikkein suurimmat piikit äänenpaineen magnitudissa tulevat taajuuksille, joilla laatan ja huoneen moodit ovat lähellä toisiaan ja moodit kytkeytyvät. CLT-laatan ja betonilaatan magnitudikuvaajat ovat lähes samanmuotoisia samalla huonekoolla.

Yksinkertaisessa kytkeytymistä tarkastelevassa simulointimallissa reunaehdoilla on suuri vaikutus saatavaan tulokseen. Kuten kuvasta 36 sekä liitteestä A nähdään, puuväli- ja betonipintaisen huoneen tulokset vastaavat hyvin toisiaan ja validoitua tulosta. Reunaehdot vaikuttavat siihen, mitkä moodit huoneessa korostuvat.

5.2 Huoneen ominaistajuudet

Huoneen reunaehto- ja muuttaminen kasvattaa huoneen ominaistajuuksia betonipinnoilla enimmillään noin 0,2 Hz. Kun reunaehtona on kipsilevyypinnat, ominaistajuudet kasvavat 5 Hz pienimmillä taajuuksilla. Tämä tarkoittaa, että pienillä taajuuksilla huoneen seinien värähtelyn vuoksi huonetila on näennäisesti todellista tilavuutta pienempi erityisesti levyypintaisissa tiloissa. Ominaisuuksissa oleva imaginääriosa kuvaa huoneessa tapahtuvia häviöitä, joiden vuoksi äänenpainetaso huoneessa laskee ja moodimuoto voi

olla hieman käyristynyt jäykkään reunaehtoon verrattuna. Reunaehtojen aiheuttamat muutokset huoneen ominaistajuuksiin tasoittuvat taajuuden kasvaessa.

Taajuuden kasvaessa betoniseinän impedanssi kasvaa ja reunaehto vastaa paremmin jäykän seinän reunaehto. Tämä nähdään myös ominaisarvoanalyysissä noin 300 Hz taajuudesta ylöspäin, joilla ominaistajuuden imaginääriosaa on hyvin pieni, käytännössä nolla. Tällöin huoneen ominaistajuus on täysin reaalin ja vastaa jäykkäseinäisen huoneen ominaistajuutta.

Moodianalyysin perusteella voidaan todeta, että analyttisillä yhtälöillä saadaan hyvä arvio siitä, millä taajuuksilla huoneen moodit ovat. Levyseinäisissä huoneissa on hyvä tiedostaa, että huoneen alimmat ominaistajuudet voivat poiketa analyttisen yhtälön antamasta tuloksesta jopa 5 Hz.

5.3 Huoneen äänikentän vaikutus askelääneneristävyyteen

Huoneen äänikentän vaikutusta askelääneneristävyyteen arvioitiin lisäämällä puuväli-pohjan simulointimalliin laboratorion vastaanottotilan L1 kokoa vastaava ilmatila. Simulointimallin jälkikaiunta-aika jää keskimäärin noin 0,2 s lyhyemmäksi kuin mitattu jälkikaiunta-aika. Tämä aiheuttaa sen, että yli 100 Hz taajuuksilla mallinnustuloksen vastaavuus mittaustuloksen kanssa heikkenee. Huoneellisen mallin laskettu askeläänitaso on noin 3 dB Lietzénin mallinnustulosta korkeampi. Lietzénin malli poikkeaa mitatusta tuloksesta noin 5 dB yli 100 Hz taajuuksilla.

Alle 100 Hz taajuuksilla huoneellisen mallin vastaavuus mitatun tuloksen kanssa paranee Lietzénin laskentatulokseen verrattuna. Paras vastaavuus mittaustuloksen kanssa saatiin koko huoneen äänikentän keskiarvolla. Mittausalueelta saatu laskentatulosta vastaa muodoltaan koko huoneen laskentatulosta, mutta poikkeaa noin 3 dB mittaustuloksesta alle 200 Hz taajuuksilla. Yli 200 Hz taajuuksilla eri näytteistyksillä mallinnetut tulokset ovat muodoltaan samanlaisia kuin mittaustulos, mutta askeläänitaso on 10 dB suurempi. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että huoneen ominaisuudet selittävät Lietzénin aiemmin havaitsemia mittaus- ja simulointitulosten välisiä eroja. Mittauspisteet osuivat huoneessa 80 Hz taajuuskaistalla moodin solmukohtiin, minkä vuoksi kuvajassa nähdään kuoppa kyseisellä taajuudella.

Puuväli-pohjan materiaaliominaisuudet oli valittu tuotevalmistajien käyttötasoilmoitusten ja tuotekorttien avulla. Näin ollen rakenteiden massa ja jäykkyysominaisuudet voivat poiketa todellisesta tilanteesta, mikä voi osin selittää mallinnustuloksen eroa mittaustulokseen. Lisäksi laboratoriotilassa oli mittausten aikana ääntä sirottavia elementtejä, joista

ei ollut tarkempia tietoja, joten ne jouduttiin jättämään mallinnuksesta pois. Sirottavat rakenteet voivat vaikuttaa tilan äänikentän modaalisuuteen ja siten mittaustulokseen. Tämä voi vaikuttaa tulosten väliseen eroon yli 100 Hz taajuuksilla.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että vastaanottotilan mallintaminen voi olla hyödyllistä Schroederin rajataajuuden alapuolella eli modaalisessa äänikentässä. Ero mittaustuloksen ja simuloitun tuloksen välillä johtuu todennäköisesti mallinnuksessa käytettyjen parametrien, huoneen ominaisuuksien kuten jälkikaiunta-ajan sekä puutteellisten lähtötietojen yhteisvaikutuksesta.

5.4 Puuvälipohjan askelääneneristävyys

Huonekoon vaikutuksen tarkastelussa pienin simuloitu huonetila oli A1, jonka tilavuus oli $V = 26 \text{ m}^3$. Tässä huonetilassa standardin mukainen mittausalue oli vain $2,6 \text{ m}^3$, joten mittauspisteiden välisen standardin mukaisen etäisyyden löytäminen viidelle mittapistelle oli haastavaa. Pienten huoneiden mittaustilanteessa mittapisteteet voivat olla virheellisesti standardin mukaisen mittausalueen ulkopuolella tai liian lähellä toisiaan.

Huoneen reunaehdolla on suuri merkitys huoneen askeläänitasoon. Jäykkä- ja betoni-pintaisissa huoneissa sekä huoneen että välipohjan ominaistajuudet korostuvat enemmän levypintaiseen huoneeseen verrattuna. Levyseinäisissä huoneissa äänenpainetasot ovat pienempiä jäykkä- ja betonipintaisiin huoneisiin verrattuna, mutta jälkikaiunta-aika huoneissa on lyhyempi, mikä aiheuttaa suurempia normalisoituja askeläänitasoja vastaanottohuoneessa. Lisäksi mallissa vallitseva jälkikaiunta-aika jää liian pitkäksi todellisuuteen verrattuna, joten seinien mallinnus levyresonaattorina ei täysin vastaa todellista tilannetta, mikä on huomattu myös aiemmin (Cox & D'Antonio, 2009; Kuttruff, 2009). Impedanssireunaehdolla saadaan kuitenkin selville huoneen reunoilla tapahtuvia vaihesiirtoja ja niiden vaikutusta puuvälipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen sekä huoneen ominaistajuuksiin. Levyseinän mallinnukselle ei toistaiseksi ole olemassa parempaa impedanssimallia, jota voitaisiin käyttää reunaehtona. Rakenteet tulisi todennäköisesti joko mallintaa kokonaisina, jolloin kaikki seinän ominaistajuudet saadaan otettua huomioon tai käyttää vain reaalisia impedanssireunaehdoja, kuten absorptiosuhdetta. Reaalisilla reunaehdoilla ei kuitenkaan voida ottaa huomioon heijastuksissa tapahtuvia vaihesiirtoja.

Huoneessa vallitsevan askeläänitason näytteistyksestä on vaikutusta saatavaan laskentatulokseen. Alle 100 Hz taajuuksilla mittapisteteet ja koko huoneen keskimääräinen äänenpainetaso tuottavat lähes saman tuloksen. Mittausalueelta saatava tulos aliarvioi

huoneessa vallitsevaa äänikenttää alle 100 Hz taajuuksilla. Yli 100 Hz taajuuksilla huoneen ja mittausalueen tulokset vastaavat paremmin toisiaan, kun mooditiheys huoneessa kasvaa ja lähestytään diffuusaa äänikenttää. Yli 100 Hz taajuuksilla mittauspisteillä saatava tulos yliarvioi huoneessa vallitsevaa äänikenttää. Lisäksi pisteiden sijaintien valinnalla voidaan vastaavasti saada huoneessa vallitsevaa äänikenttää huomattavasti pienempi tulos, mikäli mittauspisteet osuvat moodien solmukohtiin. Koko huoneen keskimääräinen äänenpainetaso ottaa laskentatuloksessa kaikki korostuvat ominaistajuudet huomioon.

Kaikilla reunaehdoilla normalisoiduissa arvoissa nähdään suurempia tasoja taajuuskais-toilla, joille ensimmäinen ja toinen pystysuuntainen moodi keskiarvoistuvat. Lisäksi välipohjarakenteen ja huoneen moodit voivat kytkeytyä aiheuttaen suuren piikin kuten luvun 4.1 kuvissa 29, 31 ja 34. Vastaanottotilan aksiaalisten moodien vaikutus voi olla merkittävä myös askelääneneristävyyden yksilukuarvon spektripainotustermin määrittämisessä. Vaakamoodi f_{030} osuu todennäköisesti lähelle välipohjarakenteen moodia, sillä äänenpainetasossa havaittava piikki on merkittävä vaakamoodin taajuudella.

Suurimmassa simuloitussa tilassa A3 ääneneristävyydessä nähdään piikki 100 Hz taajuuksilla kaikilla reunaehdoilla. 100 Hz taajuudelle osuu huoneen toinen pystysuuntainen moodi f_{002} . Pystysuuntaisen moodin lisäksi huoneessa todennäköisesti korostuu jokin välipohjan moodi, joka kytkeytyy huonemoodin kanssa kuten luvussa 5.1 esitettiin. Yhtä suuria piikkejä 100 Hz taajuuskaistalla ei ole nähtävissä tiloissa A1 ja A2.

6. YHTEENVETO

Huoneen modaalisen äänikentän vaikutusta puuvälipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen tutkittiin laskennallisesti analyttisillä yhtälöillä sekä mallintamalla elementtimenetelmää hyödyntäen. Huoneen ilmatilan ja laatan kytkeytymistä erikokoisissa tiloissa tarkasteltiin analyttisellä laskennalla kolmessa eri pisteessä, kun laatta oli herätetty keskeltä laatan yläpintaa harmonisella pistevoimalla. Huoneen ja laatan kytkeytymistä kuvaava simulointimalli validoitiin analyttisiin yhtälöihin vertaamalla kahdella eri laamalla. Reunaehto- ja vaikutusta laskentatulokseen tarkasteltiin vertaamalla laskentatuloksia validoituun simulointitulokseen.

Puuvälipohjan askelääneneristävyyttä tarkasteltiin simuloimalla elementtimenetelmää hyödyntäen. Ensimmäisessä tilanteessa puuvälipohjan askelääneneristävyyden laskentamalliin lisättiin laboratoriotilaa vastaava ilmatila, jonka reunaehto riippui mittaustuloksen mitatusta jälkikaiunta-ajasta. Huoneeseen vaikutusta puuvälipohjan askelääneneristävyyteen tarkasteltiin FE-menetelmällä muuttamalla vastaanottotilan korkeutta. Vastaanottotilan reunaehtoina käytettiin jäykän seinän reunaehto- ja kahta impedanssireunaehto- ja joilla pyrittiin kuvaamaan betoni- ja kevytrakenteisten huoneiden pintoja. Kaikille tarkastelluille huoneille tehtiin moodianalyysit kaikilla eri reunaehdoilla.

Huoneen reunaehto vaikuttaa huoneessa vallitseviin ominaistajuuksiin, mutta analyttisellä yhtälöllä saadaan hyvä arvio ominaistajuuksista. Kevytrakenteisissa huoneissa on hyvä tiedostaa, että alimmat ominaistajuudet voivat poiketa analyttisesti lasketusta arvosta jopa 5 Hz. Huonetilan reunaehdoilla on merkittävä vaikutus myös huoneessa vallitsevaan äänenpaineeseen sekä rakenteen askelääneneristävyyteen. Impedanssi-reunaehdoilla ei pystytä ottamaan huomioon huonetta rajaavan pinnan kaikkia ominaistajuuksia.

Huonetilan lisääminen puuvälipohjan askelääneneristävyyden simulointimalliin paransi mallinnustuloksen vastaavuutta laboratorion mittaustuloksen kanssa. Alle 200 Hz taajuuksilla mallinnustulos poikkesi mittaustuloksesta keskimäärin 3 dB. Yli 200 Hz taajuuksilla mallinnustuloksen muoto vastasi mittaustulosta, mutta askeläänitaso oli noin 10 dB suurempi. Mallinnetun tilan jälkikaiunta-aika jäi liian lyhyeksi mitattuun jälkikaiunta-aikaan verrattuna, mikä selittää suurta eroa mallinnuksen ja mittaustuloksen välillä.

Huoneen kaksi alinta pystysuuntaista ominaistajuutta ovat merkittäviä huoneessa vallitsevan äänenpainetason sekä rakenteen askelääneneristävyyden kannalta. Kaikissa tiloissa oli nähtävissä piikki 100 Hz taajuuskaistalla, jolle osuu huoneen toinen pystysuuntainen moodi f_{002} . Suurimmassa mallinnetussa huoneessa A3 ($V = 36 \text{ m}^3$) 100 Hz taajuus korostui selvästi enemmän kuin muilla mallinnetuilla huoneilla. Puuvälipohjan ominaistajuus pääsee todennäköisesti kytkeytymään huoneen A3 pystymoodin f_{002} kanssa. Mikäli huoneen ja välipohjan moodit osuvat lähelle toisiaan, moodit pääsevät kytkeytymään ja välipohjan askelääneneristävyys heikkenee. Vastaanottotilan mallinnus voi olla tästä syystä hyödyllistä Schroederin rajataajuuteen asti.

Huonetilassa vallitsevan askeläänitason näytteistys vaikuttaa saatavaan laskentatulokseen. Alimmilla taajuuksilla standardin mukaiselta mittausalueelta saatava tulos aliarvioi koko huoneessa vallitsevaa äänenpainetasoa. Huoneen ja mittausalueen tulokset vastaavat toisiaan, kun mooditiheys huoneessa kasvaa ja lähestytään diffuusia äänikenttää.

LÄHTEET

- Alonso, A., Patricio, J. & Suárez, R. (2019) On the efficiency of impact sound insulation systems on prefabricated lightweight floor and on standard homogeneous base-floor, *Engineering Structures*, 191, pp. 649–657. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.070>.
- Atalla, N. & Sgard, F. (2015) *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. CRC Press.
- Bard, D., Vardaxis, N.G. & Sondergard, E. (2019) Acoustic Comfort Investigation in Residential Timber Buildings in Sweden, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 24(1), pp. 78–89. Saatavilla: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.24.1.23237>.
- Beranek, L.L. (1949) *Acoustic Measurements*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Blazier, W.E. & DuPree, R.B. (1994) Investigation of low-frequency footfall noise in wood-frame, multifamily building construction, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(3), pp. 1521–1532. Saatavilla: <https://doi.org/10.1121/1.410230>.
- Bolmsvik, Å., Linderholt, A., Brandt, A. & Ekevid, T. (2014) FE modelling of light weight wooden assemblies – Parameter study and comparison between analyses and experiments, *Engineering Structures*, 73, pp. 125–142. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.028>.
- Bradley, J.S., Zeitler, B. & Schoenwald, S. (2011) Objective and subjective assessment of light-weight wood-framed floor assemblies in response to footstep and low-frequency impact sounds, in: *Inter-Noise*, Osaka, Japan, pp. 1–7.
- Brunskog, J. & Hammer, P. (2000) Prediction Models of Impact Sound Insulation on Timber Floor Structures; A Literature Survey, *Building Acoustics*, 7(2), pp. 89–112. Saatavilla: <https://doi.org/10.1260/1351010001501525>.
- Brunskog, J. & Hammer, P. (2003a) Prediction Model for the Impact Sound Level of Lightweight Floors, *Acta Acustica united with Acustica*, 89(2), pp. 309–322.
- Brunskog, J. & Hammer, P. (2003b) The Interaction Between the ISO Tapping Machine and Lightweight Floors, *Acta Acustica united with Acustica*, 89(2), pp. 296–308.
- Caniato, M., Bettarello, F., Fausti, P., Ferluga, A., Marsich, L. & Schmid, C. (2017) Impact sound of timber floors in sustainable buildings, *Building and Environment*, 120, pp. 110–122. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.015>.
- Coguenanff, C., Desceliers, C., Guigou-Carter, C. & Jean, P. (2015) Probabilistic model of the impact force spectrum for the standard tapping machine.
- COMSOL (2024) Eigenfrequency Study, Nonlinear eigenfrequency analysis. Saatavilla: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/aco_ug_study_types.15.05.html (Viitattu: 20.9.2024).
- Cox, T.J. & D’Antonio, P. (2009) *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application*. 2. ed. London: Taylor & Francis.
- Cremer, L., Heckl, M. & Petersson, B.A.T. (2005) *Structure-Borne sound*. 3rd edn. New York: Springer.
- DIN 4110 (1938) *Technische Bestimmungen für Zulassung neuer Bauweisen*. Berlin: Deutscher Normenausschuß.

Getzner Werkstoffe GmbH (2019) Sylomer SR 42 Data sheet.

Gibson, B., Nguyen, T., Sinaie, S., Heath, D. & Ngo, T. (2022) The low frequency structure-borne sound problem in multi-storey timber buildings and potential of acoustic metamaterials: A review, *Building and Environment*, 224, p. 109531. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109531>.

Goydke, H. (1990) Guidance for the measurement of sound insulation of building elements in low frequency bands, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 1990(5), pp. 175–178.

Guite, H.F., Clark, C. & Ackrill, G. (2006) The impact of the physical and urban environment on mental well-being, *Public Health*, 120(12), pp. 1117–1126. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2006.10.005>.

Hammer, P. (1994) Impact sound transmission of wooden-joint floor. Lund institute of technology, Department of Engineering Acoustics.

Hopkins, C. (2007) *Sound Insulation*. 1st edn. Amsterdam: Elsevier Ltd.

Hopkins, C. & Turner, P. (2005) Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies, *Applied Acoustics*, 66(12), pp. 1339–1382. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.04.005>.

ISO R 140 (1960) Field and laboratory measurements of airborne and impact sound transmission. Geneva: International Organization for Standardization.

Jin, G.Y., Chen, Y.H. & Liu, Z.G. (2014) A Chebyshev-Lagrangian method for acoustic analysis of a rectangular cavity with arbitrary impedance walls, *Applied Acoustics*, 78(2014), pp. 33–42. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.10.015>.

Johansson, C. (1995) Low-frequency impact sound insulation of a lightweight wooden joist floor, *Applied Acoustics*, 44(2), pp. 133–147. Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(95\)91369-E](https://doi.org/10.1016/0003-682X(95)91369-E).

Jussila, J. (2022) Transformation towards sustainability in the construction market: Adoption of wood construction in Finland. doctoral Thesis. Vaasan yliopisto. Saatavilla: <https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/14637> (Viitattu: 23.9.2024).

Keronen, A. (1998) *Puukerrostalot: rakenteet*. 85. Tampere: Rakennustekniikan osasto, p. 105.

Kihlman, T. (1967) Sound Radiation into a Rectangular Room. Applications to Airborne Sound Transmission in Buildings, *Acustica*, 1967(18), pp. 11–20.

Kihlman, T. (2008) Sound radiation from a wall into a rectangular room, in INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. INTER-NOISE and NOISE-CON, Shanghai, pp. 4578–4582.

Kraxberger, F., Kurz, E., Weselak, W., Kubin, G., Kaltenbacher, M. & Schoder, S. (2023) 'A validated finite element model for room acoustic treatments with edge absorbers', *Acta Acustica*, 7, p. 48. Saatavilla: <https://doi.org/10.1051/aacus/2023044>.

Kuhl, W. (1954) Fehlermöglichkeiten bei Schalldämmungsmessungen bei tiefen Frequenzen I, *Acta Acustica*, 4(Supplement 2), pp. 611–614.

Kuttruff, H. (2009) *Room acoustics*. 5th edn. Abingdon: Spon Press.

Kylliäinen, M. (2019) Rating the impact sound insulation of concrete floors with single-number quantities based on a psychoacoustic experiment. Tampere University. Saatavilla <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/116289>

Kylliäinen, M., Talus, L., Lietzén, J., Latvanne, P. & Kovalainen, V. (2022) Assessment of the low-frequency procedure in the field measurements of impact sound insulation between dwellings, *Applied Acoustics*, 185(2022), p. 108399.

Lahtela, T., Kylliäinen, M., Lietzen, J., Kovalainen, V. & Talus, L. (2021) Ääneneristys puutalossa. Puuinfo.

Lahti, M.J. (1960) Kuinka Helsinkiä on rakennettu: Rakennustoimintaa ja työmenetelmiä viime vuosisadan loppupuolelta toiseen maailmansotaan. Helsinki: Rakentajain kustannus oy.

Latvanne, P. (2015) Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/23062>

Lietzén, J. (2024) Computational Prediction of Impact Sound Insulation of a Timber Floor Based on Simulated Impact Force Excitation of the Standard Tapping Machine. Tampere University. Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/155288>

Lietzén, J., Kovalainen, V., Kylliäinen, M. & Pajunen, S. (2024) Computational prediction of impact sound insulation of a full-scale timber floor applying a FEM simulation procedure, *Engineering Structures*, 310, p. 118130. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118130>.

Lietzén, J., Sormunen, J., Pajunen, S. & Kylliäinen, M. (2022) Simulation of impact force generated by an ISO tapping machine on a wooden slab using explicit dynamics analysis, *Engineering Structures*, 270, p. 114855. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114855>.

Ljunggren, F. & Simmons, C. (2022) Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, Part III, *Applied Acoustics*, 197, p. 108955. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108955>.

Ljunggren, F., Simmons, C. & Hagberg, K. (2014) Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Applied Acoustics*, 85, pp. 57–68. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.04.003>.

Lubman, D. (1974) Precision of reverberant sound power measurements, *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(2), pp. 523–533.

Maschke, C. & Niemann, H. (2007) Health effects of annoyance induced by neighbour noise, *Noise Control Engineering Journal*, 55(3), pp. 348–356. Saatavilla: <https://doi.org/10.3397/1.2741308>.

Mechel, F. (2013) *Room Acoustical Fields*. Springer. Saatavilla: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-22356-3>.

Metsäliitto osuuskunta (Metsä Wood) (2020) *Kerto LVL käsikirja - Mekaaniset ominaisuudet*.

Morse, P.M. & Bolt, R.H. (1944) Sound Waves in Rooms, *Reviews of Modern Physics*, 16(2), pp. 69–150. Saatavilla: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.16.69>.

Morse, P.M. & Ingard, K.U. (1968) *Theoretical Acoustics*. 1st edn. New York.

Mosharrof, M.S., Brunskog, J., Ljunggren, F. & Ågren, A. (2011) An Improved Prediction Model for the Impact Sound Level of Lightweight Floors: Introducing Decoupled Floor-Ceiling and Beam-Plate Moment, *Acta Acustica united with Acustica*, 97(2), pp. 254–265. Saatavilla: <https://doi.org/10.3813/AAA.918405>.

Negreira, J., Sjöström, A. & Glebe, D. (2019) Low-frequency behaviour of a sound field inside a reverberant room: Measurements and numerical prediction tools, *Building Acoustics*, 26(2), pp. 93–108. Saatavilla: <https://doi.org/10.1177/1351010X19840974>.

- Neuvonen, P., Mäkiö, E. & Malinen, M. (2002) *Kerrostalot 1880-1940*. Helsinki: Rakennustieto oy.
- Neves e Sousa, A. & Gibbs, B.M. (2011) Low frequency impact sound transmission in dwellings through homogeneous concrete floors and floating floors, *Applied Acoustics*, 72(4), pp. 177–189. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.006>.
- Neves e Sousa, A. & Gibbs, B.M. (2014) Parameters influencing low frequency impact sound transmission in dwellings, *Applied Acoustics*, 78, pp. 77–88. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.10.013>.
- Olynyk, D. & Northwood, T.D. (1968) Assessment of Footstep Noise through Wood-Joist and Concrete Floors, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43(4), pp. 730–733. Saatavilla: <https://doi.org/10.1121/1.1910889>.
- Osipov, A., Mees, P. & Vermeir, G. (1997) Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings, *Applied Acoustics*, 52(3), pp. 273–288. Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00031-5).
- Osswald, F.M. (1936) Method for Measuring Sound Isolation, in Particular of Impact Sound, *Journal of the Acoustical Society of America*, 4(7), pp. 261–264.
- Park, S.H. & Lee, P.J. (2017) Effects of floor impact noise on psychophysiological responses, *Building and Environment*, 116, pp. 173–181. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.build-env.2017.02.005>.
- Pierce, A.D. (1989) *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. 3rd edn. East Sandwich: Springer.
- Prinn, A.G., Tuna, Ç., Walther, A. & Habets, E.A.P. (2025) A study of the spatial non-uniformity of reverberation time at low frequencies, *Applied Acoustics*, 227, p. 110220. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110220>.
- Puuinfo (2023) Suomessa toteutetut puukerrostalot, Puuinfo. Saatavilla: <https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/asuinkerrostalot/suomessa-toteutetut-puukerrostalot/> (Viitattu: 24.9.2024).
- Rabold, A., Buchschmid, M., Düster, A., Müller, G. & Rank, E. (2010) Modelling the Excitation Force of a Standard Tapping Machine on Lightweight Floor Structures, *Building Acoustics*, 17(3), pp. 175–197. Saatavilla: <https://doi.org/10.1260/1351-010X.17.3.175>.
- Rakennustarkastusyhdistys (2024) Tilojen välisen ilma- ja askeläänieristävyyden osoittaminen. Saatavilla: <https://toptenrava.fi/tulkintakortti/tilojen-valisen-ilma-ja-askelaanieristavyyden-osoittaminen/> (Viitattu: 9.10.2024).
- Rakentamislaki 751/2023 (2025) Rakentamislaki 751/2023 (voimassa 1.1.2025 alkaen). Saatavilla: <https://www.edilex.fi/lainsaadanto/20230751#L2P5> (Viitattu: 13.10.2024).
- Rasmussen, B. (2019) Sound insulation between dwellings - Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes. In: *Proceedings of the International Congress on Acoustics*. Aachen, Germany, pp. 5102–5109.
- Reynders, E. (2019) Practical formulas for quantifying the uncertainty of impact sound insulation measurements caused by the diffuse field assumption, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 259(2), pp. 7405–7415.
- Reynders, E.P.B., Wang, P., Van hoorickx, C. & Lombaert, G. (2019) Prediction and uncertainty quantification of structure-borne sound radiation into a diffuse field, *Journal of Sound and Vibration*, 463, p. 114984. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114984>.

Rindel, J.H. (2018) *Sound Insulation in Buildings*. 1st edn. Cornwall, Great Britain: Taylor & Francis Group, LLC.

Saint-Gobain Finland Oy (Gyproc) (2023a) 'Tuotekortti - Gyproc GL 15 Lapikas - Lattialevy'.

Saint-Gobain Finland Oy (Gyproc) (2023b) 'Tuotekortti - Gyproc GN 13 Normaali'.

Saint-Gobain Finland Oy (Isover) (2022a) 'Isover valintataulukko'.

Saint-Gobain Finland Oy (Isover) (2022b) 'Suoritustasoilmoitus'.

Schroeder, M.R. (1954) Statistik der Frequenzkurve in Räumen, *Acustica*, 1954(4), pp. 594–600.

Schroeder, M.R. & Kuttruff, K.H. (1962) On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(1), pp. 76–80.

SFS 5907:2022 (2022) *Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS EN 1992-1-1+A1+AC (2015) *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 140-7:1998 (1998) *Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 717-2:2020 (2020) *Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 3382-2:2008 (2008) *Acoustics. Measurement of room acoustics parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 10140-3:2021 (2021) *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 10140-4:2021 (2021) *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 4: Measurement procedures and requirements*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 10140-5:2022 (2022) *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 5: Requirements for test facilities and equipment*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 12354-2:2017 (2017) *Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 16238-2:2020 (2020) *Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation*. Helsinki, Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.

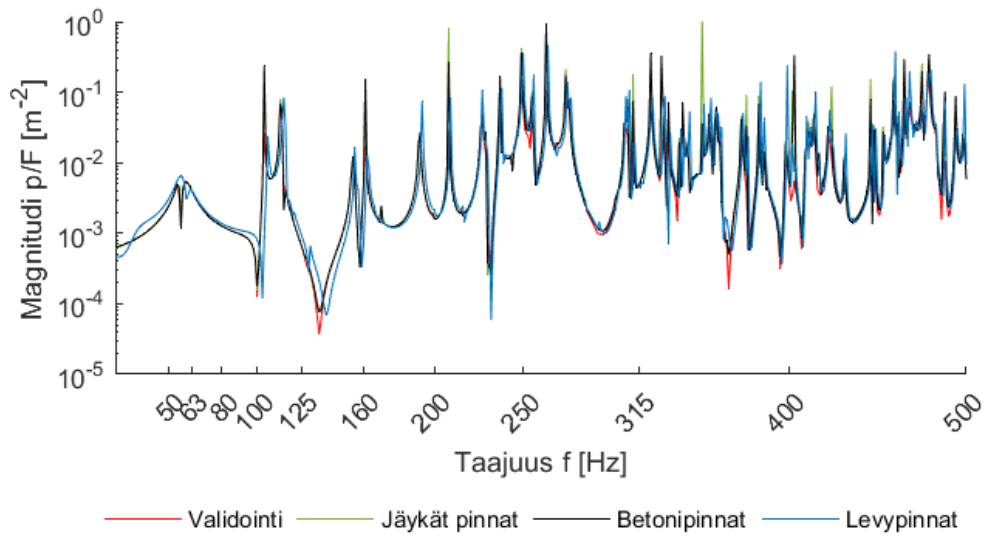
Simmons, C. (1999) Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions, *Acta Acustica united with Acustica*, 85(1999), pp. 88–100.

Takala, J. (2013) *Suomalaisten asuinhuoneiden ääniolosuhteet ja ääneneristävyyden mittaus-tapa*. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

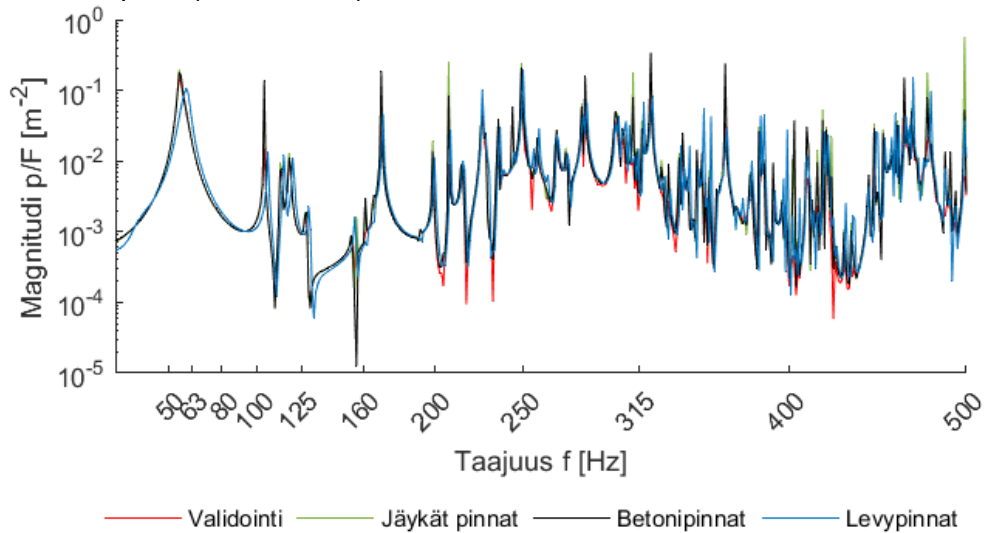
- Valtion teknillinen tutkimuskeskus (1995) Step 2: Ruurakenteet: rakennedetaljit - rakenteet. Helsinki: Rakennustieto oy.
- Valtioneuvosto (2023) Vahva ja välittävä Suomi : Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023, Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58.
- Vér, I. & Beranek, L. (2006) Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications. 2nd edn. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.
- Vigran, T.E. (2008) Building Acoustics. 1st edn. New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- Wang, P., Van hoorickx, C., Lombaert, G. & Reynders, E. (2020) Numerical prediction and experimental validation of impact sound radiation by timber joist floors, Applied Acoustics, 162, p. 107182. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107182>.
- Ympäristöministeriö (2007) Puurakentamisen edistämisen seurantarayhmä. Ympäristöministeriö (Ympäristöministeriön raporteja 17/2007). Saatavilla: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/41367> (Viitattu: 20.9.2024).
- Ympäristöministeriö (2017) Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä, 796/2017.
- Ympäristöministeriö (2018) Puurakentamisen toimenpideohjelma, Ympäristöministeriö. Saatavilla: <https://ym.fi/hankesivu?tunnus=YM025:00/2018> (Viitattu: 13.9.2024).
- Yoo, S.Y., Lee, P.J., Lee, S.Y. & Jeon, J.Y. (2010) Measurement of Sound Field for Floor Impact Sounds Generated by Heavy/Soft Impact Sources, Acta Acustica united with Acustica, 96(4), pp. 761–772. Saatavilla: <https://doi.org/10.3813/AAA.918330>.
- Zhou, J., Chui, Y.H., Gong, M. & Hu, L. (2017) Elastic properties of full-size mass timber panels: Characterization using modal testing and comparison with model predictions, Composites Part B: Engineering, 112, pp. 203–212. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.027>.
- Ågren, A. & Johansson, C. (1989) 'Development of a light-weight wood-joist floor with high impact sound insulation', in. Inter-noise, Newport Beach, CA, USA.
- Öqvist, R. (2017) Measurement and perception of sound insulation from 20 Hz between dwellings. Saatavilla: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-62843> (Accessed: 6 June 2024).
- Öqvist, R., Ljunggren, F. & Johnsson, R. (2018) Walking sound annoyance vs. impact sound insulation from 20 Hz, Applied Acoustics, 135, pp. 1–7. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.019>.

LIITE A: REUNAEHDON VAIKUTUS YKSINKER- TAISESSA MALLISSA

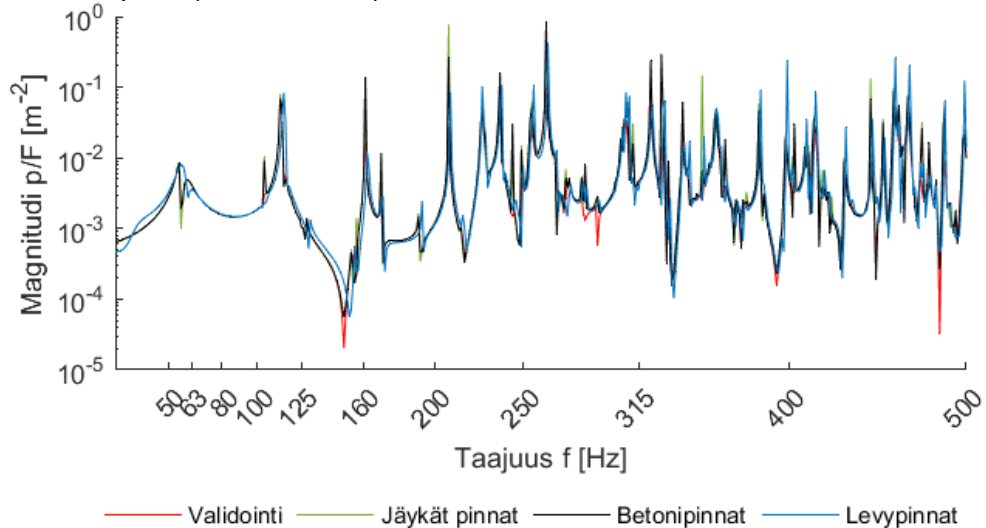
Huone K1, keskipiste



Huone K1, piste (0,7; 0,7; 0,7)



Huone K1, piste (2,15; 1,7; 1,5)



LIITE B: SIMULOITUJEN HUONEIDEN ALIMMAT OMINAISTAAJUUKSET

Huoneen A1 alimmat moodit eri reunaehdoilla

n_x	n_y	n_z	Jäykät pinnat	Betonipinnat	Levyypinnat
0	1	0	46,60	47,90+0,19j	52,50+1,86j
1	0	0	60,60	61,51+0,10j	65,35+1,08j
0	0	1	68,60	70,00+0,12j	72,49+0,60j
1	1	0	76,45	77,17+0,06j	80,85+0,77j
0	1	1	82,93	84,15+0,09j	86,76+0,51j
1	0	1	91,53	92,62+0,07j	95,19+0,45j
0	2	0	93,21	93,75+0,04j	95,96+0,37j
1	1	1	102,71	103,69+0,06j	106,52+0,43j
1	2	0	111,18	111,65+0,03j	114,15+0,34j
0	2	1	115,73	116,57+0,04j	118,45+0,25j

Huoneen A2 alimmat ominaistajuudet

n_x	n_y	n_z	Jäykät pinnat	Betonipinnat	Levyypinnat
0	1	0	46,60	47,69+0,16j	52,40+1,94j
0	0	1	57,17	58,74+0,18j	61,52+0,87j
1	0	0	60,60	61,38+0,08j	65,16+1,07j
0	1	1	73,76	74,93+0,10j	77,84+0,65j
1	1	0	76,45	77,06+0,05j	80,71+0,76j
1	0	1	83,31	84,34+0,08j	87,11+0,54j
0	2	0	93,21	93,67+0,03j	95,85+0,37j
1	1	1	95,46	96,36+0,06j	99,36+0,49j
0	2	1	109,34	110,10+0,04j	112,03+0,28j
1	2	0	111,18	111,58+0,02j	114,06+0,34j

Huoneen A3 alimmat ominaistajuudet

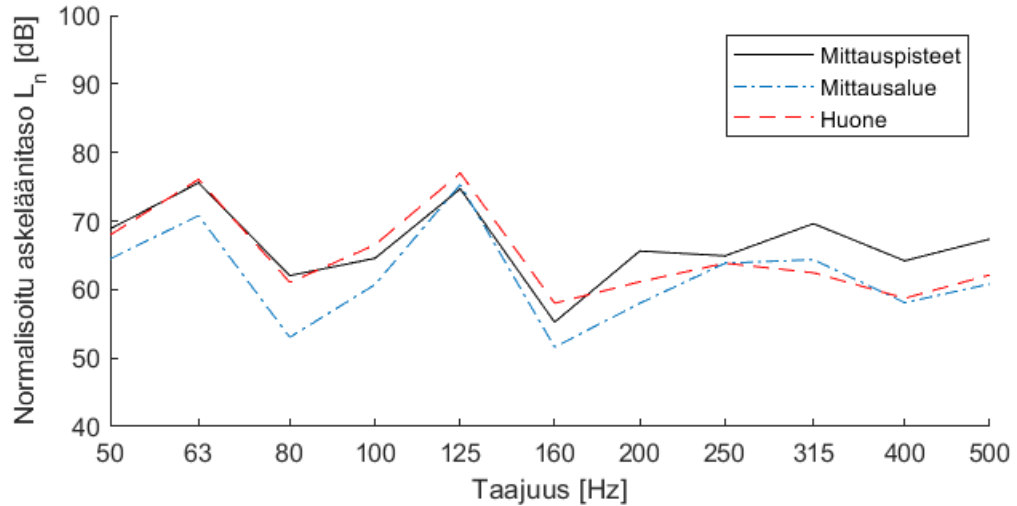
n_x	n_y	n_z	Jäykät pinnat	Betonipinnat	Levyypinnat
0	1	0	46,60	47,54+0,14j	52,22+1,92j
0	0	1	49,00	50,68+0,24j	53,95+1,29j
1	0	0	60,60	61,28+0,07j	65,03+1,05j
0	1	1	67,62	68,75+0,11j	71,91+0,78j
1	1	0	76,45	76,98+0,05j	80,61+0,75j
1	0	1	77,93	78,89+0,08j	81,82+0,61j
1	1	1	90,80	91,63+0,06j	94,74+0,54j
0	2	0	93,21	93,61+0,03j	95,77+0,36j
0	0	2	98,00	98,72+0,05j	100,27+0,25j
0	2	1	105,30	105,98+0,04j	107,97+0,30j

Huoneen L1 alimmat ominaistajuudet

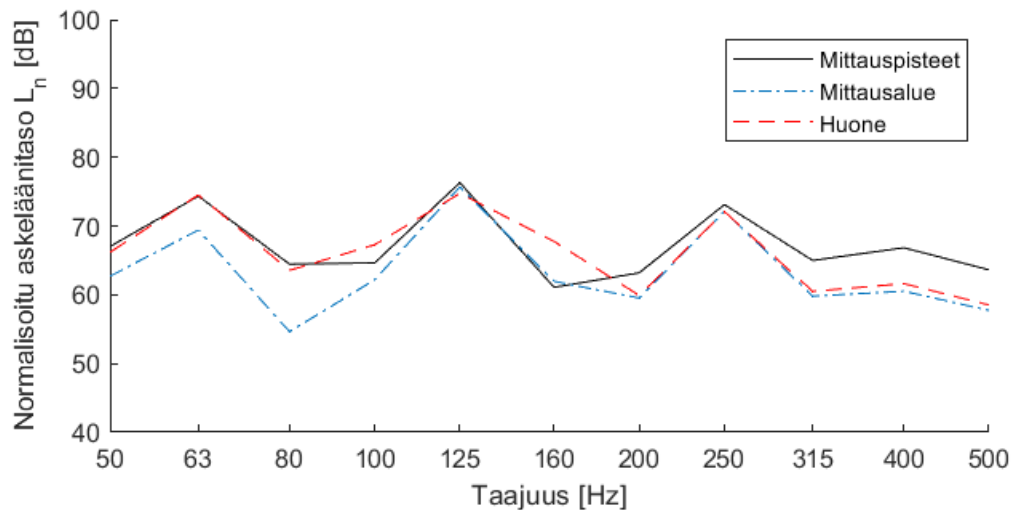
n_x	n_y	n_z	f_n
0	1	0	38,25+0,72j
0	0	1	44,50+0,39j
1	0	0	56,59+0,56j
0	1	1	57,92+0,75j
1	1	0	67,65+1,53j
1	0	1	71,64+1,70j
1	1	1	73,59+1,20j
0	2	0	80,64+2,04j
0	0	2	85,68+1,62j
0	2	1	88,17+1,38j

LIITE C: ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN SIMULOINTITULOKSET

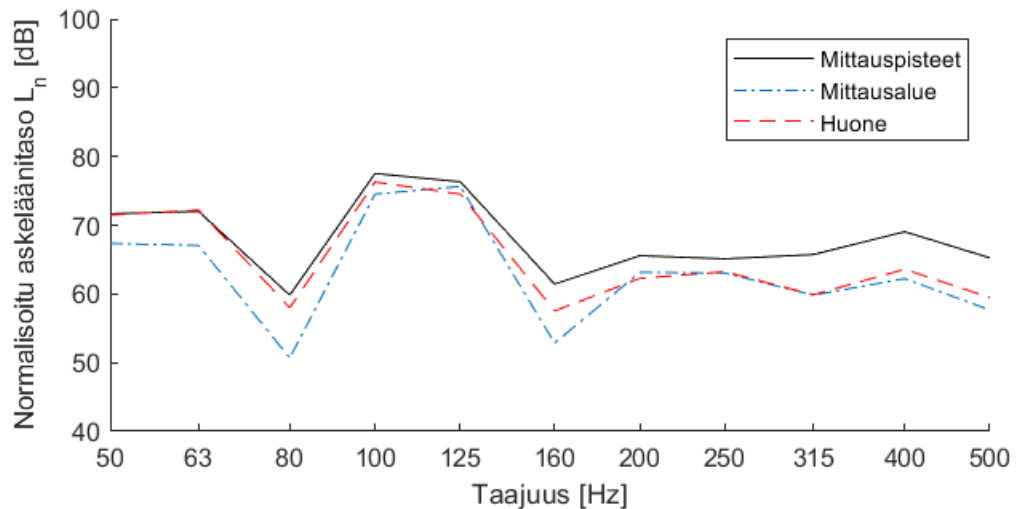
Huone A1 (26 m³), jäykät pinnat

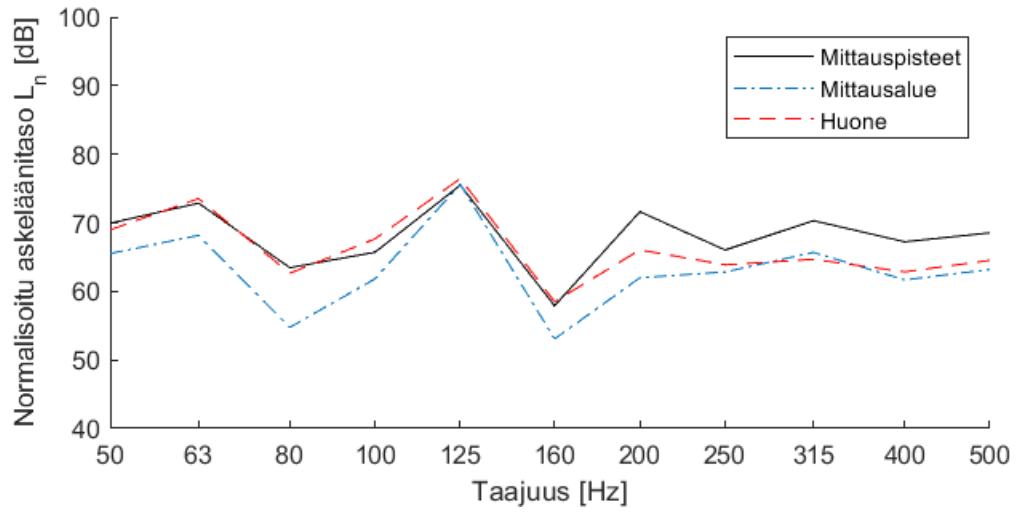
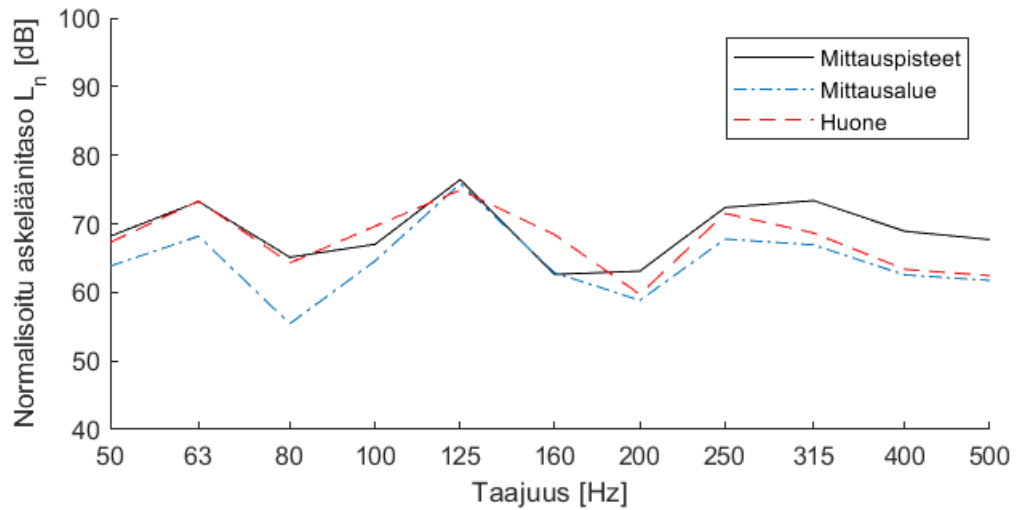
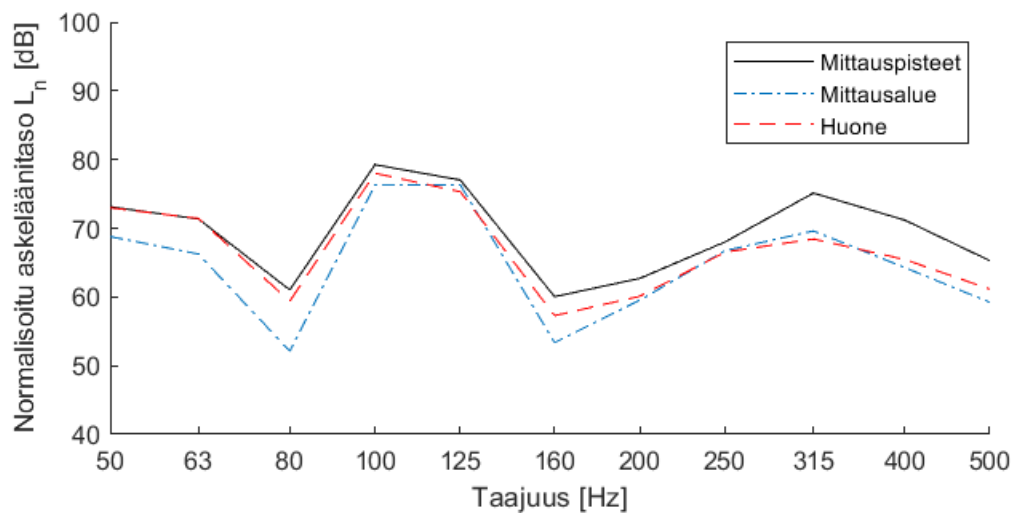


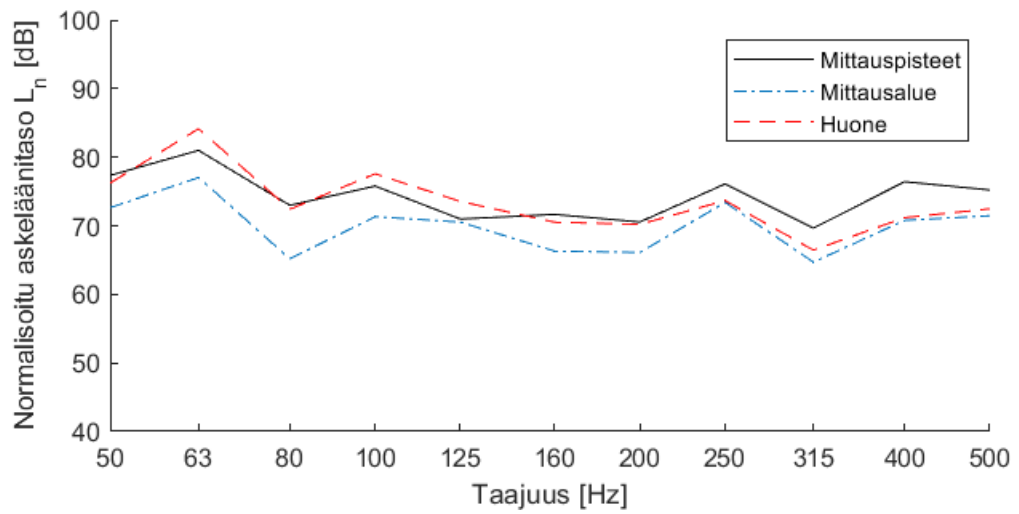
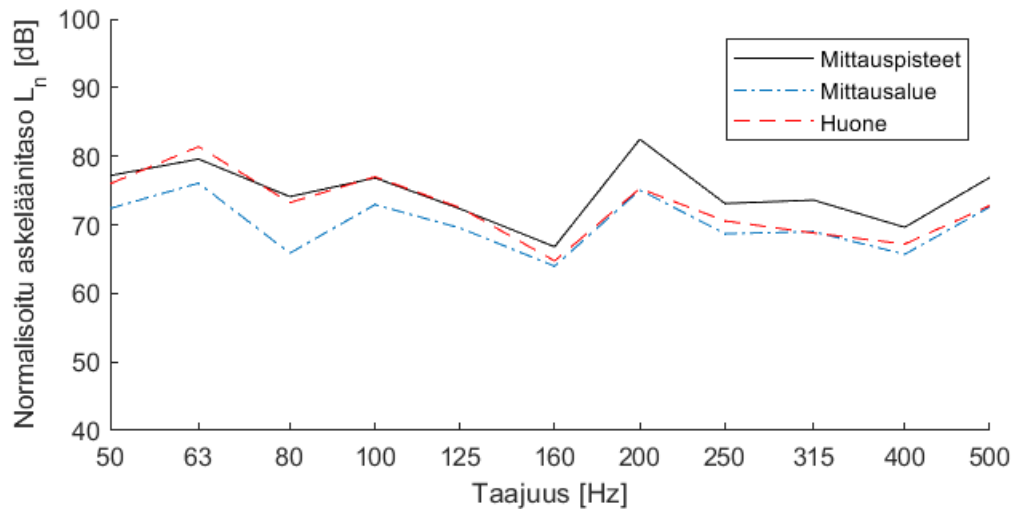
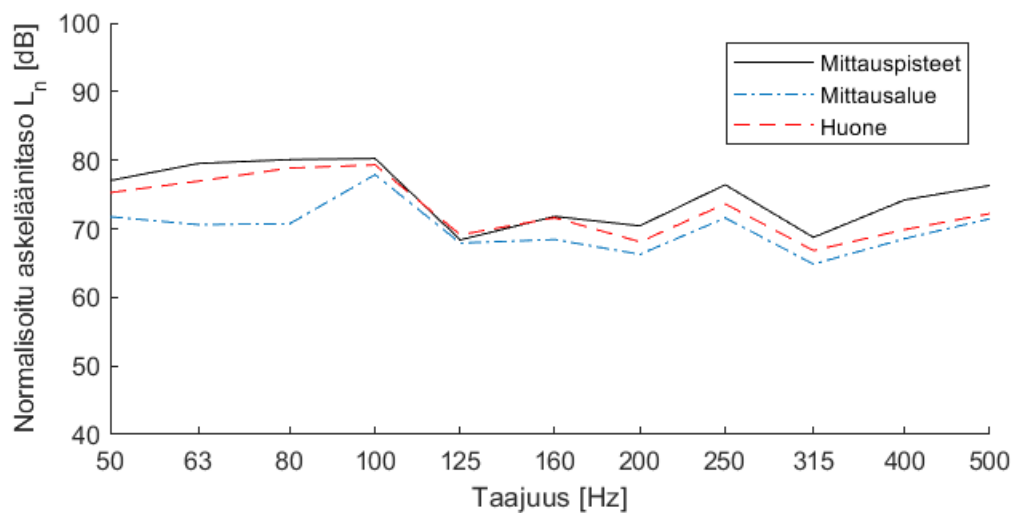
Huone A2 (31 m³), jäykät pinnat



Huone A3 (36 m³), jäykät pinnat

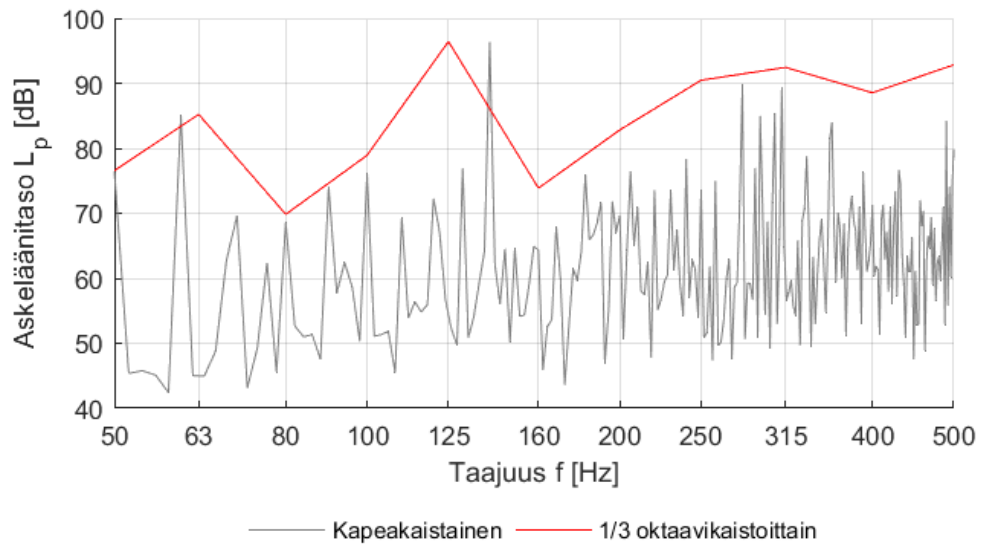


Huone A1 (26 m³), betonipinnatHuone A2 (31 m³), betonipinnatHuone A3 (36 m³), betonipinnat

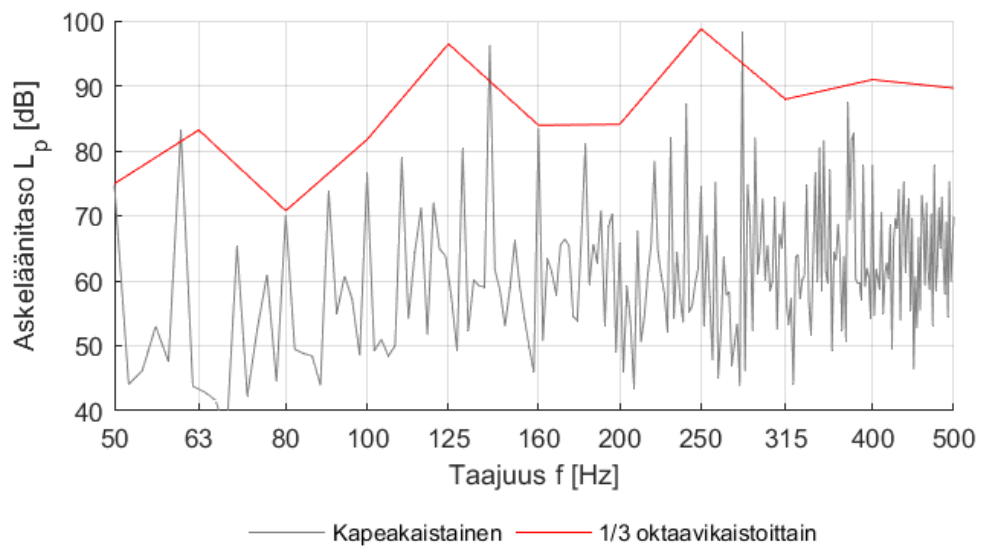
Huone A1 (26 m³), levyseinätHuone A2 (31 m³), levyseinätHuone A3 (36 m³), levyseinät

LIITE D: KAPEAKAISTAISET TULOKSET

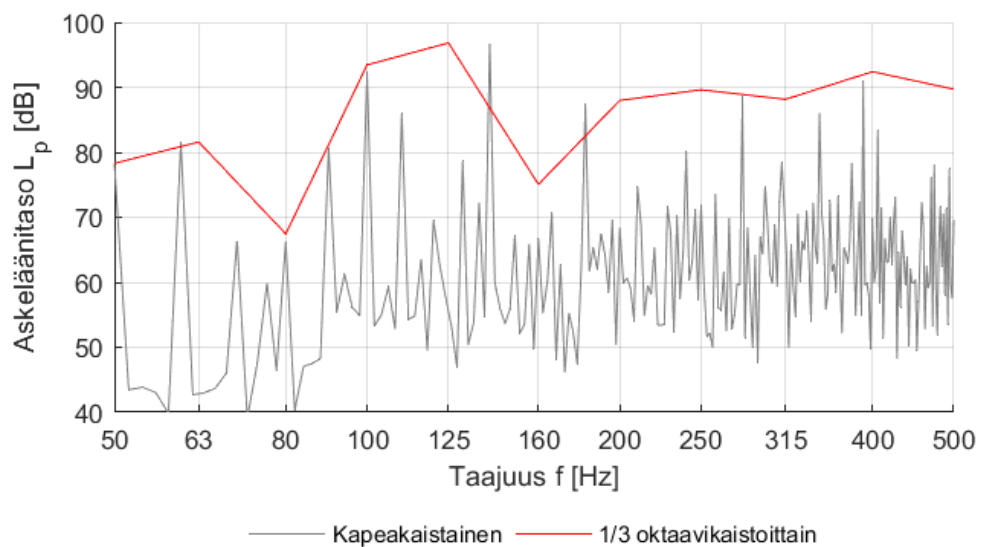
Huone A1 (26 m³), jäykät pinnat

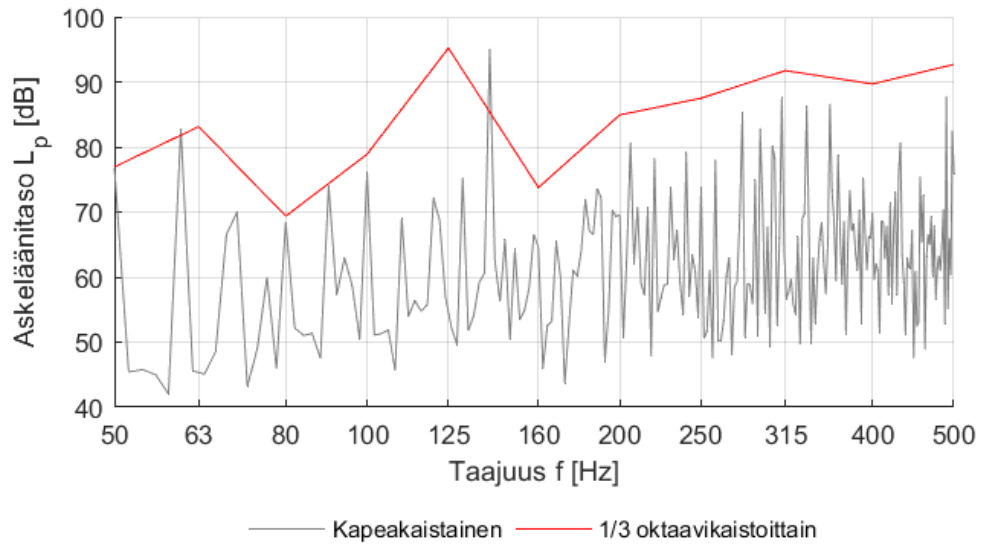
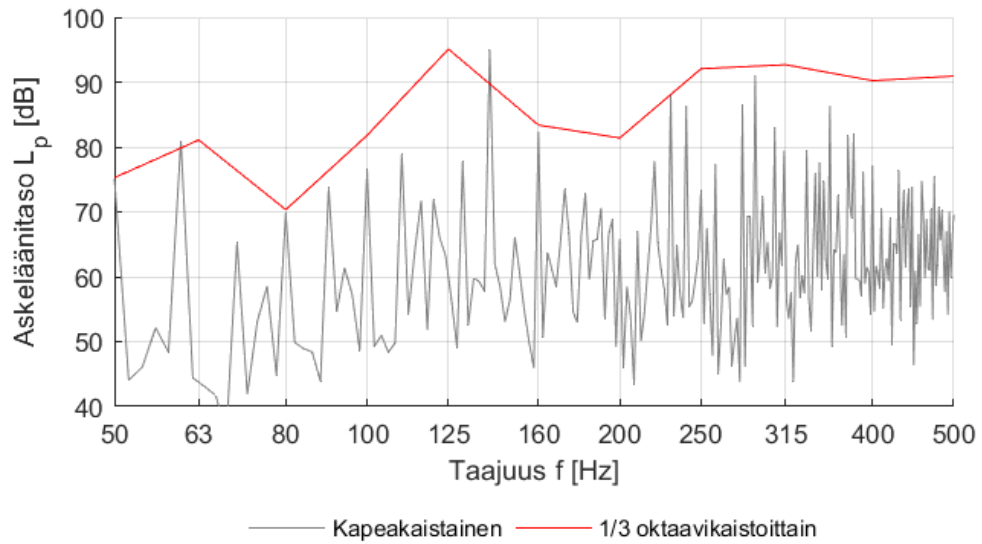
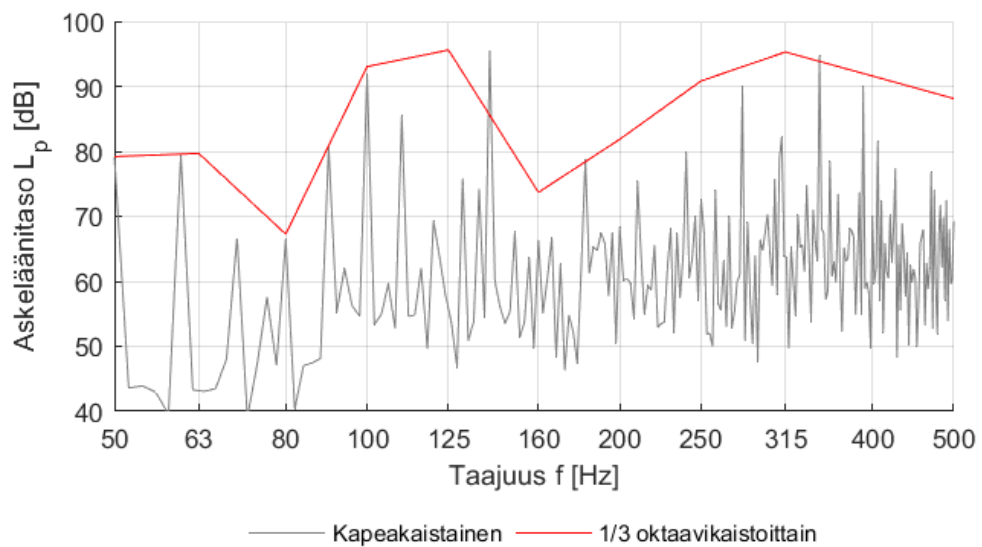


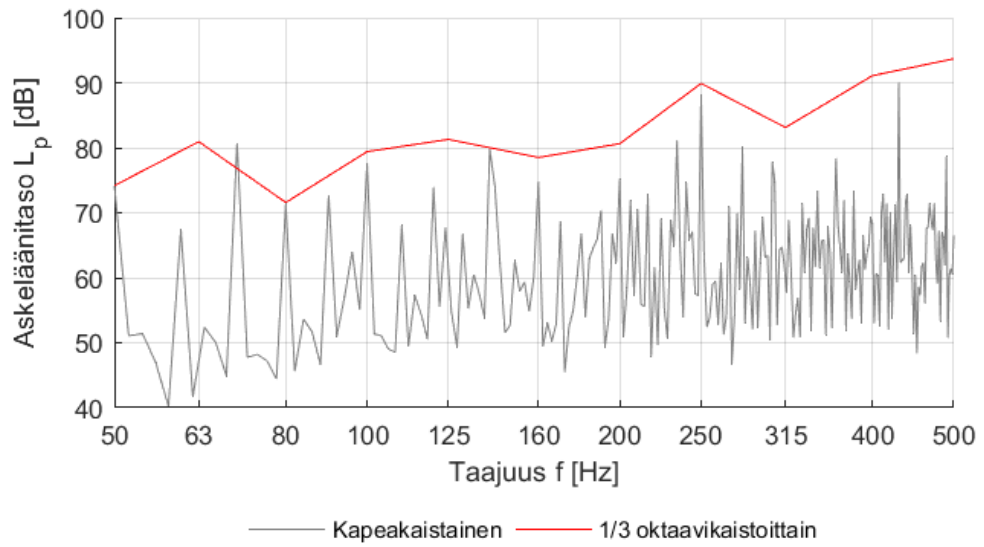
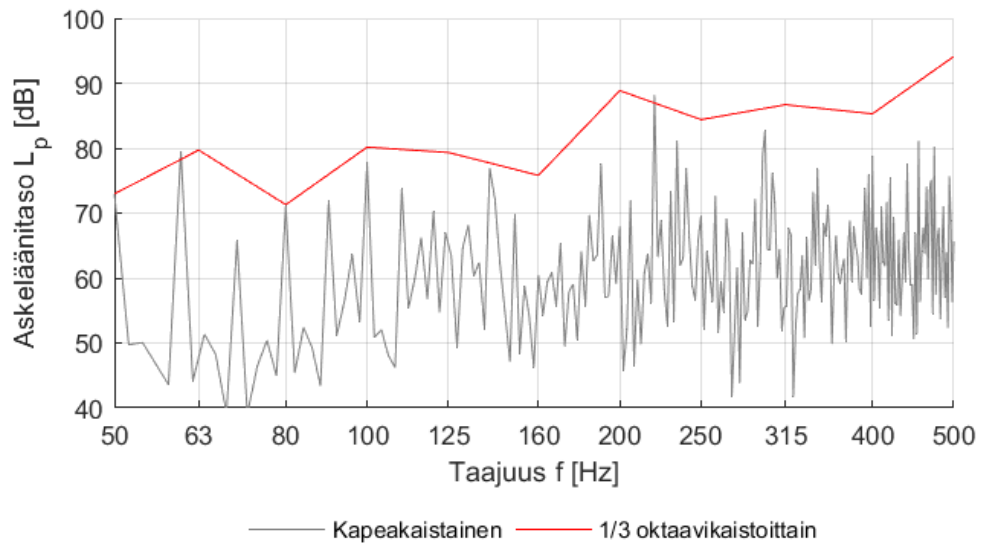
Huone A2 (31 m³), jäykät pinnat



Huone A3 (36 m³), jäykät pinnat



Huone A1 (26 m³), betonipinnatHuone A2 (31 m³), betonipinnatHuone A3 (36 m³), betonipinnat

Huone A1 (26 m³), levyinnatHuone A2 (31 m³), levyinnatHuone A3 (36 m³), levyinnat