

Lauri Talus

ONTELOLAATASTON TÄYTTÖVALUN VAIKUTUS TILOJEN VÄLISEEN ÄÄNENERISTÄVYYTEEN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja, TkT Mikko Kylliäinen
Tarkastaja, DI Jesse Lietzén
Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Lauri Talus: Ontelolaataston täyttövalun vaikutus tilojen väliseen ääneneristävyyteen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan DI-ohjelma
Maaliskuu 2022

Suomessa on joissakin kohteissa rakennettu kevytrakenteinen tiloja erottava seinä jatkuvan ontelolaattavälipohjan jännevälikkeelle. Tällaisten rakenneratkaisujen on arvioitu johtavan heikkoon tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen. Heikon ääneneristävyyden syynä on pidetty jatkuvan ontelolaataston kautta tapahtuvaa äänen sivutiesiirtymää sekä parketti- ja laminaattilattioiden ääneneristystä heikentävää vaikutusta, eli niin sanottua parkettiresonanssia. Tilojen välisen ääneneristävyyden parantamiseksi ontelolaataston ontelot on valettu tiloja erottavan seinän kohdalla umpeen. Tämän täyttövalun tarpeellisuutta on kuitenkin viimeaikaisten ääneneristävyyksmittausten valossa kyseenalaistettu.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella ontelolaataston täyttövalun vaikutusta kevytrakenteisen seinän ja ontelolaataston liitoksen toimintaan sekä täyttövalun merkityksellisyyttä tilojen välisen ääneneristävyyden kannalta. Täyttövalun vaikutusta tarkasteltiin sekä kenttämittauksin että laskennallisesti. Suoritettujen kenttämittausten tuloksista havaittiin, että parhaat mittaus tulokset saatiin kohteessa, jossa täyttövalua ei ollut käytetty. Sen sijaan kahdessa kohteessa, jossa täyttövalua oli käytetty joko koko liitoksessa tai osassa liitosta, ilmaääneneristävyyden vaatimustasoa ei saavutettu. Kenttämittausten tulokset viittaavat siis siihen, että täyttövalua ei ole ratkaiseva tekijä tilojen välisen ääneneristävyyden kannalta.

Täyttövalun vaikutusta ontelolaataston ja kevytrakenteisen tiloja erottavan seinän liitoksen liitoseristävyyteen tarkasteltiin käyttäen elementtimenetelmää (*finite element method*, FEM). Elementtimenetelmällä määritettyjä liitoseristävyyksiä puolestaan käytettiin standardien SFS-EN ISO 12354-1 ja 12354-2 laskentamenetelmien lähtötietona, jolloin voitiin tarkastella täyttövalun vaikutusta tilojen väliseen ilma- ja askelääneneristävyyteen.

FE-menetelmällä tehtyjen simulaatioiden perusteella ontelolaataston täyttövalua parantaa liitoksen liitoseristävyyttä ontelolaatastoa pitkin kulkevalla sivutiesiirtymäreitillä. Standardien SFS-EN ISO 12354-1 ja 12354-2 mukaisesti tehtyjen tilojen välisen ilma- ja askelääneneristävyyden laskelmien perusteella täyttövalua ei kuitenkaan paranna tilojen välistä ääneneristävyyttä merkittävä tavalla. Täyttövalulla saavutettiin pieni parannus tilojen väliseen askelääneneristävyyteen, joskin parannuksen todettiin johtuvan ainakin osittain laskentamallin rajoittuneisuudesta. Lisäksi askelääneneristävyyden parannus ei laskennan perusteella ole tarpeen askelääneneristävyyden vaatimustason saavuttamiseksi.

Kenttämittausten ja laskennan tulosten perusteella todettiin, että vaikka ontelolaataston täyttövalua parantaa liitoksen liitoseristävyyttä, se ei paranna tilojen välistä ääneneristävyyttä. Täyttövalun avulla ei myöskään laskennan perusteella voida ehkäistä parkettiresonanssin vaikutusta. Näistä syistä täyttövalun käyttäminen tilojen välisen ääneneristävyyden parantamiseksi ei ole tarpeellista.

Avainsanat: ontelolaatasto, kevytrakenteinen tilojen välinen seinä, sivutiesiirtymä, elementtimenetelmä, FEM, ISO 12354

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Lauri Talus: The effect of a concrete core fill of hollow core slabs on the sound insulation between rooms

Master's thesis

Tampere University

Master's programme in Civil Engineering

March 2022

In Finland, the lightweight partitioning wall between dwellings is sometimes built within the span of a hollow-core slab floor so that the floor structure is continuous between dwellings. This type of construction has been found to result in insufficient airborne sound insulation between dwellings. The reason for the weak airborne sound insulation has been assumed to be the flanking sound transmission via the continuous hollow-core slab floor, and the effect of floor coverings such as laminate or parquet floors. A concrete core-fill of the hollow-core slabs at the junction was proposed to improve the sound insulation between dwellings. However, in light of recent sound insulation measurements, the necessity of the core-fill has come into question.

The purpose of this master's thesis is to study and analyze the effect of a concrete core-fill on the behavior of the junction of a continuous hollow-core slab floor and a lightweight partitioning wall and the sound insulation between rooms. The effect of the core-fill was analyzed via field measurements and calculations. The effect of the core-fill on the vibration reduction index of the junction in question was determined via the finite element method (FEM). Using the vibration reduction index determined via the FE-method as input data, the sound insulation between dwellings was investigated using the calculation methods presented in the standards SFS-EN ISO 12354-1 and SFS-EN ISO 12354-2.

The field measurements suggest that the core-fill alone is not the determining factor for sound insulation between dwellings. The best airborne and impact sound insulation results were measured between two rooms where a core-fill was not utilized in the junction of the hollow-core slab floor and the lightweight partitioning wall. The results of the field measurements suggest that the effect of the continuous floor structure isn't necessarily as important as other structural details which influence the sound transmission between dwellings.

The finite element analysis of the junction of a continuous hollow-core slab floor and a lightweight partitioning wall showed that the core-fill does noticeably improve the vibration reduction index of the flanking path via the hollow-core slab. However, the calculations of sound insulation between dwellings according to SFS-EN ISO 12354-1 and SFS-EN ISO 12354-2 suggest that the core-fill, despite improving the vibration attenuation at the junction, does not improve the airborne sound insulation between dwellings. A small improvement in calculated impact sound insulation was found, but the improvement was partially attributed to the inaccuracies of the calculation model. Additionally, the situations where the impact sound insulation was improved, the requirements for impact sound insulation between dwellings had already been fulfilled without the core-fill.

From the measurement and calculation results it was determined that while the concrete core-fill does improve the vibration attenuation at the junction of a hollow-core slab floor and the lightweight partitioning wall, its effect on sound insulation between dwellings was either not sufficiently large, as in the case of airborne sound insulation, or that the improvement was unnecessary, as in the case of impact sound insulation. As such, the concrete core-fill in the junction was deemed unnecessary.

Keywords: Hollow-core slab, lightweight partitioning wall, flanking sound transmission, vibration reduction index, FEM, ISO 12354

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

ALKUSANAT

Aloitin diplomityöprosessin työskentelyäni noin vuoden A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n akustiikkasuunnitteluyksikössä. Diplomityön aiheeksi valikoitui itselleni mielenkiintoinen, vahvasti laskennallinen aihe, jossa pääsin hyödyntämään opintojeni ja työtehtävieni kautta oppiamiani taitoja.

Tämän diplomityön rahoittajina toimivat Betoniteollisuus ry ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Haluan kiittää A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n akustiikkasuunnitteluyksikön yksikönjohtajaa TkT Mikko Kylliäistä asiantuntevasta ohjauksesta ja työn mahdollistamisesta. DI Jesse Lietzénille puolestaan kuuluu suuri kiitos tutkimuksen kirjallisten ja laskennallisten osien ohjaamisesta. Suurkiitos myös Betoniteollisuus ry:lle sekä erityisesti Janne Kihulalle tutkimuksen mahdollistamisesta ja tuesta tutkimuksen aikana.

Haluan myös kiittää kaikkia läheisiäni, jotka ovat tämän pitkän mutta antoisan tutkimuksen aikana minua tukeneet ja kannustaneet.

Tampereella, 4.3.2022

Lauri Talus

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Ontelolaattojen käyttö Suomessa	1
1.2 Ontelolaataston täyttövalu	2
1.3 Tutkimuksen tavoite ja rakenne	6
2. TILOJEN VÄLINEN ÄÄNENERISTÄVYYS	7
2.1 Äänen siirtyminen tilojen välillä	7
2.1.1 Rakennusosan ilmaääneneristävyys	7
2.1.2 Rakennusosan askelääneneristävyys	8
2.1.3 Sivutiesiirtymät	9
2.1.4 Värähtelyn eteneminen rakenteessa	10
2.1.5 Rakenteen epäjatkuvuuskohtat	12
2.2 Kenttämittaukset	14
2.2.1 Ilmaääneneristävyuden kenttämittaus	14
2.2.2 Askelääneneristävyuden kenttämittaus	18
2.3 Standardin SFS-EN ISO 12354 laskentamalli	22
2.3.1 Ilmaääneneristävyys tilojen välillä	23
2.3.2 Askelääneneristävyys tilojen välillä	27
2.3.3 Liitoseristävyys	29
2.3.4 Rakenteellinen jälkikaiunta-aika	34
2.3.5 Kokonaishäviökerroin	34
2.4 Tilastollinen energia-analyysi	38
2.5 Elementtimenetelmä	38
2.5.1 Elementtimenetelmän periaatteet	39
2.5.2 Elementtimenetelmä akustiikassa	40
2.6 Täyttövalun vaikutuksen tarkastelu	43
3. AINEISTO JA MENETELMÄT	45
3.1 Kenttämittaukset	45
3.1.1 Mittauskohteet	45
3.1.2 Ilmaääneneristävyuden mittaus	48
3.1.3 Askelääneneristävyuden mittaus	49
3.1.4 Jälkikaiunta-ajan ja taustäänitason mittaus	49
3.2 Laskennallisesti tarkasteltavat rakenteet ja liitokset	50
3.3 Ontelolaataston ääneneristävyuden FEM-mallinnus	53
3.3.1 Geometria ja materiaaliominaisuudet	53
3.3.2 Elementtiverkko	54
3.3.3 Reunaehdot	54
3.3.4 Ilmaääneneristävyuden simulointi	54
3.3.5 Askelääneneristävyuden simulointi	55
3.3.6 Validointi	56
3.4 Liitoseristävyuden FEM-mallinnus	61
3.4.1 Geometria ja materiaaliominaisuudet	61
3.4.2 Elementtiverkko	63
3.4.3 Reunaehdot	65
3.4.4 Ristiliitoksen nopeustasoeron simulointi	66

3.4.5 Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan määrittäminen	67
3.4.6 Validointi.....	68
3.5 SFS-EN ISO 12354 sivutiesiirtymälaskenta.....	74
3.5.1 Tarkasteltavat tilanteet	75
3.5.2 Validointi.....	76
4. TULOKSET.....	79
4.1 Mittaustulokset	79
4.2 Laskennan tulokset	79
4.2.1 Ontelolaataston ääneneristävyys.....	80
4.2.2 Ontelolaataston ja kevyen väliseinän liitoksen eristävyys	82
4.2.3 Tilojen välinen ääneneristävyys.....	85
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	92
6. YHTEENVETO.....	94
LÄHTEET	96
LIITE A: MITTAUSTULOKSET	102

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Kantavan ontelolaataston ja kevyen tilojen välisen seinän liitos, kun ontelolaatasto on jatkuva tilojen välillä. Ontelolaatasto on valettu umpeen seinän kohdalta 600 mm:n matkalta. Perustuu lähteeseen (Helimäki & Kääriäinen 2013).</i>	4
Kuva 2.	<i>Ensimmäisen kertaluvun rakenteellisia sivutiesiirtymiä huoneiden välillä.</i>	10
Kuva 3.	<i>Äärettömän levyn epäjatkuvuuskohta, jossa levyn paksuus kasvaa arvosta h_1 arvoon h_2. Perustuu lähteeseen (Cremer et al. 2005).</i>	12
Kuva 4.	<i>Ääretön levy (paksuus h_1) jonka jännevälillä on symmetrinen lisämassa (paksuus h_2). Perustuu lähteeseen (Cremer et al. 2005).</i>	13
Kuva 5.	<i>Neljän toisiinsa liittyvän levyn ristiliitos. Levyjen risteämiskohdassa on värähtelyä vaimentava, symmetrinen lisämassa. Perustuu lähteeseen (Fujiwara 1983).</i>	13
Kuva 6.	<i>Esimerkki standardin ISO 717-1 (2020) vertailukäyrämenettelystä.</i>	18
Kuva 7.	<i>Esimerkki standardin ISO 717-2 (2020) vertailukäyrämenettelystä. Kuvassa esitetty vaakasuuntaisen askelääneneristävyyden mittaustulos.</i>	21
Kuva 8.	<i>Esimerkki rakenteen taajuusvasteesta. Kuvaajassa on esitetty rakenteen pinnan normaalisuuntaisen kiihtyvyyden taajuuden funktiona.</i>	36
Kuva 9.	<i>Puolen tehon kaistanleveyden määrittäminen systeemin taajuusvasteen avulla.</i>	36
Kuva 10.	<i>Esimerkki yksinkertaisen rakenteen elementtiverkosta. Kuvassa a) on verkottamaton rakenne, ja kuvassa b) on sama rakenne jaettuna elementteihin.</i>	39
Kuva 11.	<i>Esimerkkejä eri elementtityypeistä. Ympyrät kuvastavat elementtien solmukohtia. a) palkkielementti b) 2D-kuorielementti c) lineaarinen heksaedri 3D-elementti d) kvadraattinen heksaedri 3D-elementti. Perustuu ANSYS®-manuaaliin (ANSYS Element Reference 2021).</i>	40
Kuva 12.	<i>Elementtikoon vaikutus mallin vasteen määrittämisessä. Pisteet kuvastavat elementtien solmukohtia. Sinimuotoinen viiva kuvastaa rakenteessa tai ilmassa etenevää ääniaaltoa. a) Mallin elementtikoko on 1/2 äänen aallonpituudesta. b) Mallin elementtikoko on 1/12 äänen aallonpituudesta.</i>	42
Kuva 13.	<i>Laskennassa tarkastellut ontelolaattapoikkileikkaukset.</i>	51
Kuva 14.	<i>Validointitapauksen ontelolaatan poikkileikkauksen CAD-geometria.</i>	57
Kuva 15.	<i>Elementtiverkko ontelolaataston ääneneristävyyden laskentamallissa.</i>	58
Kuva 16.	<i>Mitattu ja laskennallinen ontelolaataston ilmaääneneristävyys. Laskentatulokset on esitetty 1/27-oktaavikaistoittain. Paljas ontelolaatta 203 mm (8").</i>	59
Kuva 17.	<i>Mitattu ja laskennallinen ontelolaataston ilmaääneneristävyys. Laskentatulokset on esitetty 1/3-oktaavikaistoittain. Paljas ontelolaatta 203 mm (8").</i>	59
Kuva 18.	<i>Mitattu ja laskennallinen normalisoitu askeläänitaso. Laskentatulokset esitetty 1/3-oktaavikaistoittain.</i>	60
Kuva 19.	<i>ANSYS Mechanicalissa mallinnettu ontelolaataston O32 ja kevytrakenteisen tilojen välisen seinän ristiliitoksen geometriamalli. Ontelolaatastoon liittyviä rakenteita ei ole selkeyden vuoksi esitetty.</i>	62

Kuva 20.	<i>Esimerkki ontelolaataston FEM-mallin verkotuksesta. Eri verkotuskriteereillä verkotetut osat liitettiin toisiinsa ANSYS Mechanicalin kontakteja hyödyntäen.....</i>	64
Kuva 21.	<i>Validointimallin geometrian dimensiot. Mitat ovat millimetreinä. Perustuu Mahnin (2017) mittausraporttiin.....</i>	69
Kuva 22.	<i>Mahnin (2017) mittaama ja FEM-mallilla laskennallisesti määritetty suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero.</i>	70
Kuva 23.	<i>Mahnin (2017) mittaama ja laskennallisesti määritetty ontelolaataston rakenteellinen jälkikaiunta-aika. a) Laataston A rakenteellinen jälkikaiunta-aika b) Laataston B rakenteellinen jälkikaiunta-aika.</i>	72
Kuva 24.	<i>Mahnin (2017) mittaama ja FEM-mallilla määritetty liitoseristävyys.....</i>	74
Kuva 25.	<i>Kohteessa 2 mitattu sekä laskennallisesti määritetty tilojen välinen standardisoitu äänitasoero.</i>	76
Kuva 26.	<i>Kohteessa 4 mitattu ja laskennallisesti määritetty tilojen välinen standardisoitu askeläänitaso.</i>	77
Kuva 27.	<i>Ontelolaatastojen laskennallisesti määritetyt ilmaääneneristävyudet. Tulokset esitetty 1/3-oktaavikaistoittain.</i>	80
Kuva 28.	<i>Ontelolaatastojen laskennallisesti määritetyt ilmaääneneristävyudet, kun laataston pinnassa 15 mm paksu tasoite.</i>	81
Kuva 29.	<i>Ontelolaatastojen laskennallisesti määritetyt askelääneneristävyudet, kun ontelolaataston pinnassa on 15 mm paksu tasoite.....</i>	82
Kuva 30.	<i>Ontelolaataston ja kevyen väliseinän liitoksen liitoseristävyuden laskentatulokset.</i>	84
Kuva 31.	<i>Ontelolaataston O32 ja kevytrakenteisen seinän liitoksen FEM-mallin tuloksia taajuudella ~1000 Hz. a) Onteloiden äänenpaine, ei täyttövalua. b) Onteloiden äänenpaine, täyttövalua. c) Liitoksen kokonaissiirtymä, ei täyttövalua. d) Liitoksen kokonaissiirtymä, täyttövalua.</i>	85
Kuva 32.	<i>Laskennallinen tilojen välinen standardisoitu äänitasoero, lattian kautta kulkevan äänen sivutiesiirtymäreitin standardisoitu äänitasoero sekä tiloja erottavan seinän standardisoitu äänitasoero.</i>	90
Kuva 33.	<i>Laskennallinen tilojen välinen standardisoitu äänitasoero, lattian kautta kulkevan äänen sivutiesiirtymäreitin standardisoitu äänitasoero sekä tiloja erottavan seinän standardisoitu äänitasoero.....</i>	91

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DSF	<i>Diffuse Sound Field</i> , diffuusi äänikenttä
FEM	<i>Finite Element Method</i> , elementtimenetelmä
FSI	<i>Fluid-Structural Interaction</i> , Rakenteen ja fluidin välinen vuorovaikutus
HPB	<i>Half-power-bandwidth</i> , puolen tehon kaistanleveys
ISO	<i>International organization for standardization</i> , kansainvälinen standardisoimisjärjestö
MSUP	Modal superposition, ominaistajuuksien superpositiomenetelmä
NRC	<i>National Research Council Canada</i> , Kanadan kansallinen tutkimusneuvosto
PCI	<i>Precast Concrete Institute</i> , Yhdysvaltalainen betonielementtirakentamisen instituutti
RMS	<i>Root-mean-square</i> , tehollisarvo
ROR	<i>Rain-on-the-roof</i> , tilastollista värähtelykenttää approksimoiva voimaheräte
RTT	Rakennustuoteteollisuus
SBK	Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö
SEA	<i>Statistical energy analysis</i> , tilastollinen energia-analyysi
SFEM	<i>Spectral finite element method</i> , spektraalielementtimenetelmä
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS Ry

A	Absorptioala [m^2]
A_0	Referenssiabsorptioala [m^2]
a_i	Ekvivalentti absorptiopituus [m]
c	Äänen vaihenopeus [m/s]
B	Taivutusjäykkyys [J]
$C_{I,50-2500}$	Spektripainotusermi [dB]
C_{Sab}	Sabinen vakio [dB]
D	Äänitasoero [dB]
D_{nT}	Standardisoitu äänitasoero [dB]
$D_{nT,w}$	Standardisoitu äänitasoeroluku [dB]
$D_{v,ij}$	Nopeustasoero herätetyn rakennusosan i ja rakennusosan j välillä [dB]
$\overline{D_{v,ij}}$	Suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero rakennusosien i ja j välillä [dB]
$\overline{D_{v,ij,n}}$	Rakennusosien i ja j liitoksen normalisoitu suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero [dB]
$\overline{D_{v,ij,situ}}$	Rakennusosien i ja j liitoksen suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero <i>in situ</i> [dB]
E	Kimmomoduuli [Pa]
f	Taajuus [Hz]
f_{ref}	Referenssitaajuus [Hz]
f_c	Koinsidenssin rajataajuus [Hz]
f_{centre}	Terssikaistan keskitaajuus [Hz]
K_{ij}	Rakennusosien i ja j liitoksen liitoseristävyys [dB]
L_1	Lähetyshuoneessa mitattu äänenpainetaso [dB]
L_2	Vastaanottohuoneessa mitattu äänenpainetaso [dB]
L_b	Huoneessa mitattu taustaäänitaso [dB]

L_{sb}	Huoneessa mitattu äänenpainetaso, joka sisältää äänilähteen signaalin ja taustäänen [dB]
L_n	Rakenteen normalisoitu askeläänitaso laboratoriossa [dB]
L'_n	Normalisoitu askeläänitaso rakennuksessa [dB]
$L_{n,d}$	Normalisoitu askeläänitaso tiloja erottavan rakenteen läpi [dB]
$L_{n,ij}$	Normalisoitu askeläänitaso äänen sivutiesiirtymäreittiä ij pitkin [dB]
$L_{n,situ}$	Normalisoitu askeläänitaso <i>in situ</i> [dB]
$L_{n,w}$	Rakenteen normalisoitu askeläänitasoluku laboratoriossa [dB]
$L'_{n,w}$	Normalisoitu askeläänitasoluku rakennuksessa [dB]
L'_{nT}	Standardisoitu askeläänitaso rakennuksessa [dB]
$L'_{nT,w}$	Standardisoitu askeläänitasoluku rakennuksessa [dB]
L_p	Äänenpainetaso [dB]
L_v	Värähtelyn nopeustaso [dB]
l_{ij}	Rakennusosien i ja j välisen liitoksen pituus [m]
ΔL	Askeläänitason parannusluku [dB]
ΔL_{situ}	Askeläänitason parannusluku <i>in situ</i> [dB]
$\Delta L_{d,situ}$	Alaslasketun katon askeläänitason parannusluku <i>in situ</i> [dB]
n	Mittauspisteiden lukumäärä
m	Kaiutin tai askeläänikojepaikkojen lukumäärä
m'	Rakenteen pintamassa [kg/m^2]
M	Liitoksen muodostavien rakenteiden massasuhde [-]
R	Rakenteen ilmaääneneristävyys laboratoriossa [dB]
R'	Ilmaääneneristävyys rakennuksessa [dB]
R_{ij}	Äänen sivutiesiirtymäreitin ij ilmaääneneristävyys [dB]
R_{situ}	Rakenteen ilmaääneneristävyys <i>in situ</i> [dB]
R_w	Rakenteen ilmaääneneristysluku laboratoriossa [dB]
R'_w	Ilmaääneneristävyyden luku rakennuksessa [dB]
ΔR	Lisälevytyksen ilmaääneneristävyyden parannusvaikutus [dB]
ΔR_{situ}	Lisälevytyksen ilmaääneneristävyyden parannusvaikutus <i>in situ</i> [dB]
S	Rakennusosan pinta-ala [m^2]
T_0	Refenssijälkikaiunta-aika [s]
T	Jälkikaiunta-aika [s]
T_s	Rakenteellinen jälkikaiunta-aika [s]
$T_{s,lab}$	Rakenteellinen jälkikaiunta-aika laboratoriossa [s]
$T_{s,situ}$	Rakenteellinen jälkikaiunta-aika <i>in situ</i> [s]
V	Huoneen tilavuus [m^3]
v	Rakenteen pinnan normaalin suuntainen värähtelyn nopeus [m/s]
\tilde{v}	Rakenteen pinnan normaalin suuntaisen värähtelyn nopeuden tehollinen arvo [m/s]
v_0	Referenssivärähtelyn nopeus [m/s]
W_1	Rakenteeseen lähetyspuolella kohdistuva ääniteho [W]
W_2	Rakenteen vastaanottopuolelle säteilemä ääniteho [W]
W_{tot}	Rakenteen vastaanottopuolelle kokonaisuudessaan säteilevä ääniteho [W]
γ	Taivutusaaltojen tehon läpäisysuhde [-]
Δ	Rakenteen paksuuksien suhde paksuuden muutoskohdassa [-]
η_{tot}	Rakennusosan kokonaishäviökerroin [-]
η_{int}	Rakennusosan sisäinen häviökerroin [-]
λ	Aallonpituus [m]
ν	Poissonin vakio [-]
ρ	Tiheys [kg/m^3]
$\overline{\rho_0}$	Akustisen fluidin ja rakenteellisen osan kytkentään liittyvä alimatriisi

τ	Rakenteen ilmaäänän läpäisysuhde [-]
τ'	Tilojen välinen ilmaäänän läpäisysuhde [-]
τ_d	Tiloja erottavan rakenteen ilmaäänän läpäisysuhde [-]
τ_f	Sivuavan rakenteen ilmaäänän läpäisysuhde [-]
τ_e	Pienen osan ilmaäänän läpäisysuhde [-]
τ_s	Epäsuoran ilmareitin ilmaäänän läpäisysuhde [-]
τ_{ij}	Äänen sivutiesiirtymäreitin ilmaäänän läpäisysuhde [-]
ω	Kulmataajuus [1/s]
$[M_S]$	Rakenteellisen systeemin massamatriisi
$[C_S]$	Rakenteellisen systeemin vaimennusmatriisi
$[K_S]$	Rakenteellisen systeemin jäykkyyismatriisi
$[M_F]$	Akustisesta fluidista koostuvan systeemin massamatriisi
$[C_F]$	Akustisesta fluidista koostuvan systeemin vaimennusmatriisi
$[K_F]$	Akustisesta fluidista koostuvan systeemin jäykkyyismatriisi
$[R]$	Rakenteellisen osan ja fluidin kytkentään liittyvä alimatriisi

1. JOHDANTO

1.1 Ontelolaattojen käyttö Suomessa

Suomessa betonielementtien käyttö asuinrakentamisessa lähti voimakkaaseen nousuun Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestön (SBK) vuonna 1970 julkaiseman BES-järjestelmän (Betonielementtisysteemi) myötä. BES-järjestelmä on avoin elementtijärjestelmä, jonka keskiössä on ns. kantavat seinät -järjestelmä, jossa betonielementtiseinät toimivat rakennuksen kantavina rakenteina. Järjestelmää kutsuttiin myös pitkälaattajärjestelmäksi käytettyjen välipohjaelementtien mukaan: osa kantavat seinät -järjestelmää oli välipohjan muodostavat esijännitetyt ontelolaatat. BES-rakentamisen huippuvuosina pitkälaattatalojen välipohjissa käytettiin ontelolaattojen lisäksi ruotsalaisia Nilcon-kuori-laattoja. Joiltakin teknisiltä ominaisuuksiltaan Nilcon-laatta oli parempi, mutta kokonaisuudessaan ontelolaatta osoittautui paremmaksi tuotteeksi. Nilcon-laatan valmistus Suomessa lopetettiin vuonna 1983. (Hytönen & Seppänen 2009)

Suomessa ontelolaattojen valmistuksen aloitti vuonna 1970 Cellit Oy, joka valmisti kanadalaisia Spiroll-ontelolaattaelementtejä. Suomalaisen Elementtituote Oy:n Variax-ontelolaatan valmistus aloitettiin niin ikään vuonna 1970. Ensimmäinen BES-järjestelmän mukainen asuinkerrostalo rakennettiin vuonna 1971 Tampereella, ja sen välipohjarakenteena käytettiin ontelolaattoja. Vuosina 1971–1974 Suomessa rakennettiin yhteensä noin 300 asuinkerrostaloa, joiden välipohjarakenteena käytettiin ontelolaatastoja. (Hytönen & Seppänen 2009)

Pitkälaattojen suurimpia etuja aiemmin käytettyihin massiivibetonilaattoihin nähden olivat niiden pienempi kokonaisuus ja niiden mahdollistama pidempi jänneväli. Rakennusten kokonaisuusmassaa voitiin vähentää merkittävästi käyttämällä pitkälaattoja massiivilaattojen sijaan. Lisäksi pitkien jännevälien ansiosta kerrostalojen kantavien seinien lukumäärää voitiin karsia. (Hytönen & Seppänen 2009)

Ontelolaattoja valmistetaan ja käytetään Suomessa edelleen. Ne ovat laajalti käytössä asuin-, liike- ja teollisuusrakentamisen kohteissa, joissa ontelolaattoja käytetään niin ylä-, ala- kuin välipohjien kantavana rakenteena. Suomessa asuinkerrostaloissa tyypillisimmät ontelolaattojen koot ovat O27, O32 ja O37. Ohuempien O27- ja O32-ontelolaattojen yhteydessä käytetään myös pintavaluja välipohjan massan lisäämiseksi. Lisäksi ontelolaattojen pintamateriaalina käytetään askelääneneristävyuden parantamiseksi lattianpäällysteitä, kuten esimerkiksi parketti- ja laminaattilattioita alusmateriaaleineen.

1.2 Ontelolaataston täyttövalu

Nykyisin kerrostalorakentamisessa voidaan käyttää rakennekokonaisuutta, jossa kantavat väli- ja alapohjarakenteet koostuvat ontelolaatoista ja tiloja erottavat seinät, tai osa niistä, rakennetaan kevytrakenteisina betoniseinien sijaan. Joissakin kohteissa on päädytty rakenneratkaisuun, jossa välipohjana toimiva ontelolaatasto on jatkuva tilojen välillä, eli tilojen välinen seinä rakennetaan ontelolaatan jännevälille. Tämänkaltaisia rakenteita on käytetty esimerkiksi asuin-, hotelli- ja hoivakotirakentamisessa (Helimäki & Kääriäinen 2013).

Helimäen & Kääriäisen (2013) mukaan kenttämittausten perusteella ontelolaataston ollessa jatkuva tilojen välillä Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 1998 (YM 1998) mukaisia asuinhuoneistojen välisen ääneneristävyyden vaatimuksia ei kyetä edellä kuvatulla rakenneratkaisulla täyttämään. Rakennusmääräyskokoelman osan C1 mukaiset ilmaääneneristävyyden vaatimukset asuinhuoneistojen välillä on esitetty taulukossa 1, ja askelääneneristävyyden vaatimukset taulukossa 2.

Taulukko 1. *Ilmaääneneristysvaatimukset huoneistojen välillä (YM 1998)*

Huonetila	Pienin sallittu ilmaääneneristysluku R'_w [dB]
Asuntojen, ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä	55
Asuinhuoneiston ja toista huoneistoa palvelevan uloskäytävän välillä, kun välissä on ovi	39

Taulukko 2. *Askelääneneristysvaatimukset huoneistojen välillä (YM 1998)*

Huonetila	Suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ [dB]
Asuinhuoneistoa ympäröivistä tiloista keittiöön tai muuhun asuinhuoneeseen, yleensä	53
Uloskäytävästä asuinhuoneeseen	63

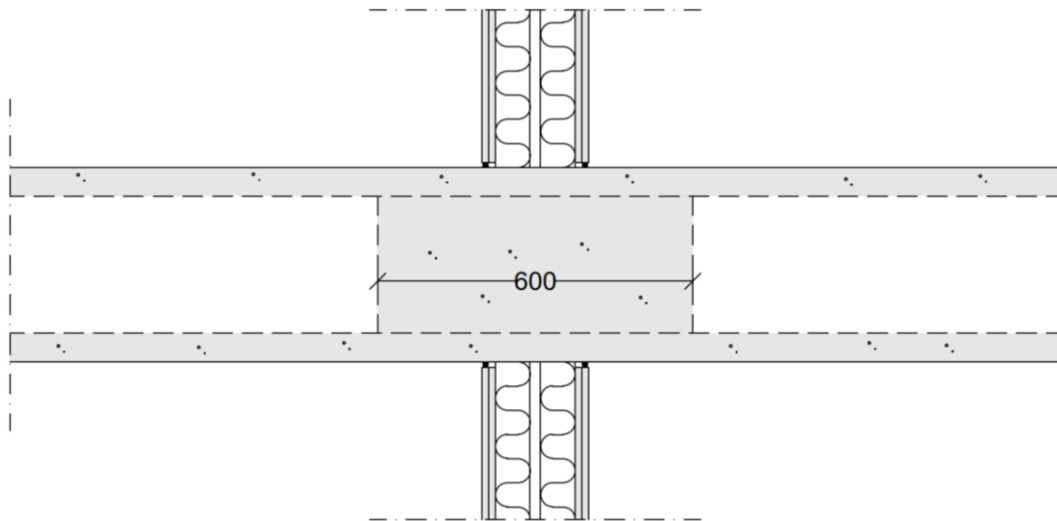
Vaatimuksia huoneistojen väliselle ääneneristävyydelle on sittemmin päivitetty vuonna 2017 voimaan tulleen ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä (2017) myötä. Ilmaääneneristävyyden mittaluku vaihdettiin ilmaääneneristysluvusta R'_w standardisoituun äänitasoerolukuun $D_{nT,w}$ [dB], sillä standardisoidun mittaluvun on todettu korreloivan paremmin asuinrakennuksissa tilojen välillä siirtyvien elämisen äänien kanssa (Kylliäinen et al. 2016). Askelääneneristävyydessä puolestaan siirryttiin normalisoidusta askeläänitasoluvusta $L'_{n,w}$ standardisoituun askeläänitasolukuun spektripainotusermillä $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ [dB], jonka on todettu vastaavan paremmin as-

keläänikojeen vastaanottohuoneeseen tuottamaa äänitasoa (Lietzén et al. 2016). Standardisoidun askeläänitason yhteydessä Suomessa käytetään spektripainotustermiä $C_{I,50-2500}$ [dB]. Spektripainotustermin $C_{I,50-2500}$ on todettu parantavan normalisoidun askeläänitasoluvun korrelaatiota subjektiivisesti koetun askeläänien kokemuksen kanssa (Kylliäinen et al. 2019). Askelääneneristävyyden vaatimukset esitetään standardisoidun askeläänitasoluvun ja spektripainotustermin summana $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$. Ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 (2017) mukaiset vaatimukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ääneneristävyydsvaatimukset huoneistojen välillä (YM 2017)

Huonetila	Pienin sallittu standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ [dB]	Suurin sallittu standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ [dB]
Asuntojen, majoitus- tai potilas-huoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Syyksi huoneistojen väliselle heikolle ääneneristävyydelle on esitetty ontelolaataston kautta tapahtuvaa äänen sivutiesiirtymää (Helimäki & Kääriäinen 2013). Helimäen & Kääriäisen mukaan jatkuva ontelolaatta toimii äänisiltana, joka heikentää huoneistojen välistä ääneneristävyyttä. Helimäki & Kääriäinen toteavat heikon ilmaääneneristävyyden johtuvan erityisesti ontelolaattalattian pintarakenteena käytetyistä parketti- ja laminaattipinnoitteista. Sivutiesiirtymän ehkäisemiseksi Helimäki & Kääriäinen suosittelivat ontelolaattojen onteloiden valamista umpeen huoneistoja erottavan väliseinän kohdalta, 600 mm:n matkalta. Helimäen & Kääriäisen (2013) suosittelu liitosdetalji on esitetty kuvassa 1. Tähän väliseinän kohdalle tehtyyn lisävaluun viitataan tästedes käsitteellä *täytövalu*.



Kuva 1. *Kantavan ontelolaataston ja kevyen tilojen välisen seinän liitos, kun ontelolaatasto on jatkuva tilojen välillä. Ontelolaatasto on valettu umpeen seinän kohdalta 600 mm:n matkalta. Perustuu lähteeseen (Helimäki & Kääriäinen 2013).*

Täyttövalun käyttäminen on ajatuksena perusteltu: ontelolaataston valaminen umpeen seinän kohdalta lisää liitoksen massaa, ja estää äänen suoran ilmareitin onteloa pitkin tilasta toiseen. Äänen etenemistä rakenteellisen liitoksen yli on myös kirjallisuudessa pyritty ehkäisemään lisäämällä massaa rakenteiden liitoskohtaan. Esimerkiksi Skandinavian maissa jatkuvien alapohjalaattojen kautta etenevän äänen vaikutusta tilojen väliseen ääneneristävyyteen on pyritty vähentämään lisäämällä alapohjalaatan paksuutta tilojen välisen seinän kohdalla (Brunskog 2002). Materiaalimuutosten ja poikkileikkauksen muutosten on myös laskennallisesti osoitettu vaimentavan värähtelyn etenemistä palkkimaisissa ja levymäisissä rakenteissa (Cremer et al. 2005).

Helimäki & Kääriäinen (2013) toteavat lausunnossaan myös lattianpäällysteiden, erityisesti kelluvan lautaparketin tai laminaatin, heikentävän tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä. Tämä ilmiö tunnetaan niin sanottuna parkettiresonanssina, mutta se koskee myös muita samankaltaisia lattianpäällysteitä (Boverket 2008). Parkettiresonanssissa tilojen välinen ilmaääneneristävyys heikkenee parketin, sen alusmateriaalin ja lattiarakenteen muodostaman systeemin resonanssien vuoksi (Boverket 2008; Hongisto 2001). Hongisto (2001) osoitti, että parkettiresonanssin aiheuttamaa ilmaääneneristävyyden heikennystä voidaan ehkäistä muuttamalla toisen asunnon lattiarakennetta siten, että vierekkäisten asuntojen lattianpäällysteet eivät enää viritty samalle ominaistaajuudelle. Tällöin kaksoiresonanssia ei synny, ja parkettiresonanssin aiheuttama ilmaääneneristävyyden heikennys katoaa.

Kirjallisuudessa suomalaisten betonirakenteisten asuinkerrostalojen ääneneristävyyttä ja sivutiesiirtymäilmiöitä on tarkasteltu melko kattavasti 70-luvulta lähtien useiden tutkijoiden toimesta (Lasanen 1972; Halme 1974; Pohjalainen & Parmanen 1976; Malinen 1977; Halme-Salo 1983; Parmanen et al. 1989). Kirjallisuudessa liitosdetaljiikan vaikutus tilojen väliseen ääneneristävyyteen on tunnistettu tärkeäksi tekijäksi jo BES-aikakauden aikaisessa vaiheessa (Lasanen 1972). Jatkuvien välipohjarakenteiden ongelmallisuus on niin ikään tiedostettu jo 70-luvulla (Malinen 1977). Kirjallisuudessa on käsitelty ontelolaatastojen ääneneristävyyttä, mutta täyttövalun käyttämisestä ääneneristävyyden parantamiseksi ei ole mainintoja Helimäki & Kääriäinen (2013) lisäksi.

Vuonna 1979 Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö julkaisi uuden BES-järjestelmän rakenteita koskevan suosituksen, joka korvasi vastaavan, vuonna 1974 julkaistun suosituksen (SBK 1979). Tämä uusi suositus sisälsi rakenneteknisen tarkastelun lisäksi myös BES-järjestelmän mukaisten rakenteiden ja liitosten ääneneristävyydestä tarkastelut, joita aiemmassa suosituksessa ei ollut otettu huomioon. Julkaisussa on tunnistettu sivutiesiirtymien ääneneristävyyttä heikentävä vaikutus, mutta siinä ei mainita ontelolaatavälipohjan täyttövalua ääneneristävyyden parantamisen keinona (SBK 1979).

Vuonna 2000 Rakennustuoteteollisuus RTT julkaisi Betonirakenteiden äänitekniikka -teoksen (RTT 2000), joka sisältää silloisia betonirakentamisen rakennusakustiikkaan liittyviä ohjeita. RTT:n julkaisussa on esitetty ohjeellinen liitosdetalji jatkuvan ontelolaataston ja kevyen, kaksirunkoisen tilojen välisen seinän liitoksesta, jolla tulisi saavuttaa tuolloin voimassa ollut taulukon 1 mukainen huoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden vaatimus $R'_w = 55$ dB. Mainintaa ontelolaataston täyttövalusta julkaisussa ei kuitenkaan ole. Täyttövalua ei niin ikään mainita myöhemmin julkaistussa Asuinrakennusten äänitekniikan täydentävässä suunnitteluohjeessa (Helimäki et al. 2009), joka päivitti ja täydensi Betonirakenteiden äänitekniikka -julkaisua uusimmilla rakennusakustisilla kannanotoilla ja ratkaisuilla.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella tilojen välillä jatkuvan ontelolaataston täyttövalun käyttöä ääneneristävyyden parantamiseen ei ollut tarkasteltu ennen Helimäen & Kääriäisen (2013) lausuntoa, tai ainakaan sen käyttöä ei ole tutkimuskirjallisuudessa esitetty. Muiden pohjoismaiden ohjeistuksista ei täyttövalun käyttöä ole mainittu. Norjalainen ohjeistus esimerkiksi ohjeistaa oikean välipohjarakenteen valinnassa (Werner et al. 2008). Yhdysvaltalaisen *Precast Concrete Instituten* (PCI) ohjeistuksessa todetaan, että runkoäänien vaimentamisessa voidaan hyödyntää rakenteen epäjatkuvuuskohtia, mutta täyttövalua ei suoranaisesti ole mainittu (PCI 1998).

Ontelolaataston täyttövalun käyttäminen on työläs ja merkittäviä lisäkustannuksia aiheuttava tapa parantaa tilojen välistä ääneneristävyyttä. Helimäen & Kääriäisen (2013) lausunnon julkaisun jälkeen kenttämittauksissa on ollut kohteita, joissa kuvan 1 mukaista liitosta on käytetty ilman ontelolaataston täyttövalua, ja ääneneristävyyden vaatimustasot on saavutettu. Herääkin kysymys, onko ontelolaataston täyttövalun käyttäminen täysin välttämätöntä kyseisen tyyppisissä tilanteissa.

1.3 Tutkimuksen tavoite ja rakenne

Tämän tutkimuksen tavoite on tarkastella, miten jatkuvan ontelolaataston täyttövalu vaikuttaa kuvan 1 mukaisen liitoksen toimintaan, ja miten täyttövalu vaikuttaa tilojen väliseen ääneneristävyyteen kokonaisuudessaan. Tutkimuksessa vertaillaan kenttämittausten avulla kohteita, joissa täyttövalua on käytetty kohteisiin, joissa täyttövalua ei ole. Täyttövalun vaikutusta liitoksen toimintaan ja sen merkityksellisyyttä tilojen välisen ääneneristävyyden kannalta tutkitaan myös laskennallisesti hyödyntäen elementtimenetelmää (*finite element method*, FEM, FE-menetelmä) ja standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamenetelmiä.

Kappale 2 käsittelee tilojen välisen ilma- ja askelääneneristävyyden käsitteitä, sekä äänen kulkeutumista tilasta toiseen. Kappaleessa käsitellään standardien SFS-EN ISO 16283-1 (2014) ja SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaiset ilma- ja askelääneneristävyyden mittausten menetelmät ja niiden kulku. Lisäksi kappaleessa tarkastellaan erilaisia laskennallisia menetelmiä, joita voidaan käyttää tilojen välisen ääneneristävyyden arvioimiseen.

Kappaleessa 3 esitetään tutkimuksessa käytetyt menetelmät: ääneneristävyydsmittaukset ja niissä tehdyt valinnat, liitoksen toiminnan tarkastelu FE-menetelmällä sekä standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) mukaiset laskelmat tilojen välisen ääneneristävyyden määrittämiseksi. Mittausten ja laskennan tulokset esitellään kappaleessa 4, ja niistä tehdyt johtopäätökset kappaleessa 5.

2. TILOJEN VÄLINEN ÄÄNENERISTÄVYYS

2.1 Äänen siirtyminen tilojen välillä

Ääni voi siirtyä tilasta toiseen joko ilmaäänenä tai runkoäänenä. Ilmaäänellä tarkoitetaan ääntä, joka syntyy esimerkiksi puheesta, musiikista, tai television katselusta. Ilmaääni etenee nimensä mukaisesti ilmassa. Kun tarkastellaan ilmaäänen siirtymistä jonkin rakennusosan kautta tai huoneesta toiseen, puhutaan ilmaääneneristävydestä.

Ääntä syntyy myös huoneen seiniin ja lattioihin kohdistuvista iskuista, esimerkiksi askelista, putoavista esineistä, tai vasaroinnista. Iskuista aiheutuvaa ääntä kutsutaan yleensä askelääneksi tai runkoääneksi. Tilojen välillä siirtyvän runkoäänen vaimenemista tarkasteltaessa puhutaan askelääneneristävydestä.

2.1.1 Rakennusosan ilmaääneneristävyys

Ilmaääneneristävyys on suure, joka kuvaa rakennusosan kykyä estää ilmaäänen siirtymistä rakenteen kautta. Yksittäisen rakenteen ilmaääneneristävyttä R [dB] voidaan tarkastella laboratoriomittausten avulla tai erilaisten laskennallisten menetelmien avulla. Rakenteiden laboratoriossa mitattuja ilmaääneneristävyden yksilukuarvoja R_w [dB] voidaan käyttää rakenteiden keskinäiseen vertailuun rakennusakustisen suunnittelun työkaluna. Laboratoriotuloksia tarvitaan myös standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laskentamallin lähtötietona tilojen välisen ääneneristävyden määrittämiseksi.

Rakenteen pintaan kohdistuvan äänitehon W_1 [W] ja rakenteen toiselle puolelle säteilevän äänitehon W_2 [W] suhde, eli rakenteen läpäisysuhde τ [-], voidaan määrittää yhtälöstä (1) (Hopkins 2007):

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (1)$$

Rakenteen ilmaääneneristävyys laboratoriotilanteessa R voidaan määrittellä rakenteen läpäisysuhteen avulla kaavasta (2):

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad (2)$$

Ilmaääneneristävyden laboratoriomittaukset tehdään standardin SFS-EN ISO 10140-2 (2010) mukaisesti taajuuskaistoittain. Ilmaääneneristävyden mittauksissa tarkastellaan kuitenkin useimmiten äänenpainetasoa L_p [dB] äänitehon sijaan. Rakennusosan ilmaääneneristävyys voidaankin määrittää myös yhtälöstä (3):

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (3)$$

jossa L_1 [dB] on lähetyshuoneessa mitattu äänenpainetaso, L_2 [dB] vastaanottohuoneessa mitattu äänenpainetaso, S [m²] rakennusosan pinta-ala ja A [m²] vastaanottohuoneen absorptioala. Ilmaääneneristävyyden laboratoriomittauksen tuloksista voidaan standardin SFS-EN ISO 717-1 (2020) vertailukäyrämenettelyllä määrittää rakenteen ilmaääneneristävyyden yksilukuarvo R_w [dB].

Rakennusosan laboratoriossa mitattu ilmaääneneristävyys ei suoraan kuvaa sitä, kuinka hyvin rakenne estää ilmaäänien siirtymistä huoneesta toiseen. Tilojen väliseen ääneneristävyyteen vaikuttavat esimerkiksi tiloja erottavaan rakennusosaan kytkeytyvät rakenteet, rakennustyön laatu ja huoneiden dimensiot. Valmiissa rakennuksessa tilojen välinen ilmaääneneristävyys R' [dB] tai standardisoitu äänitasoero D_{nT} [dB] voidaan mitata standardin SFS-EN ISO 16283-1 (2014) mukaisesti. Kuten laboratoriomittauksessakin, myös kenttämittauksessa ilmaääneneristävyyden yksilukuarvot R'_w ja $D_{nT,w}$ voidaan määrittää standardin SFS-EN ISO 717-1 (2020) mukaisesti. Ilmaääneneristävyyden kenttämittausten kulku on esitelty kappaleessa 2.2.1.

2.1.2 Rakennusosan askelääneneristävyys

Askelääneneristävyys kuvaa rakennusosan kykyä estää runkoäänien kulkeutumista rakennusosan kautta. Runkoääniä ovat äänet, jotka syntyvät rakennuksen rakenteisiin kohdistuvista iskuista, esimerkiksi askeleista, lattialle putoavista esineistä tai askelääni-kojeesta. Kuten ilmaääneneristävyydsinkin, myös rakennusosan askelääneneristävyys voidaan mitata laboratoriossa. Rakennusosan askelääneneristävyyden laboratoriomittaukset suoritetaan standardin SFS-EN ISO 10140-3 (2010) mukaisesti.

Laboratoriossa voidaan mitata rakennusosan normalisoitu askeläänitaso L_n [dB] taajuuskaistoittain. Normalisoitu askeläänitaso määritetään normalisoimalla vastaanottohuoneessa mitattu askeläänitaso L_i [dB] yhtälön (4) mukaisesti

$$L_n = L_i + 10 \log\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (4)$$

jossa A on vastaanottohuoneen absorptioala ja $A_0 = 10 \text{ m}^2$ on referenssiabsorptioala (SFS-EN ISO 10140-3 2010). Mitatuista normalisoiduista askeläänitasoista L_n voidaan määrittää rakennusosan normalisoitu askeläänitasoluku $L_{n,w}$ [dB] standardin SFS-EN ISO 717-2 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä.

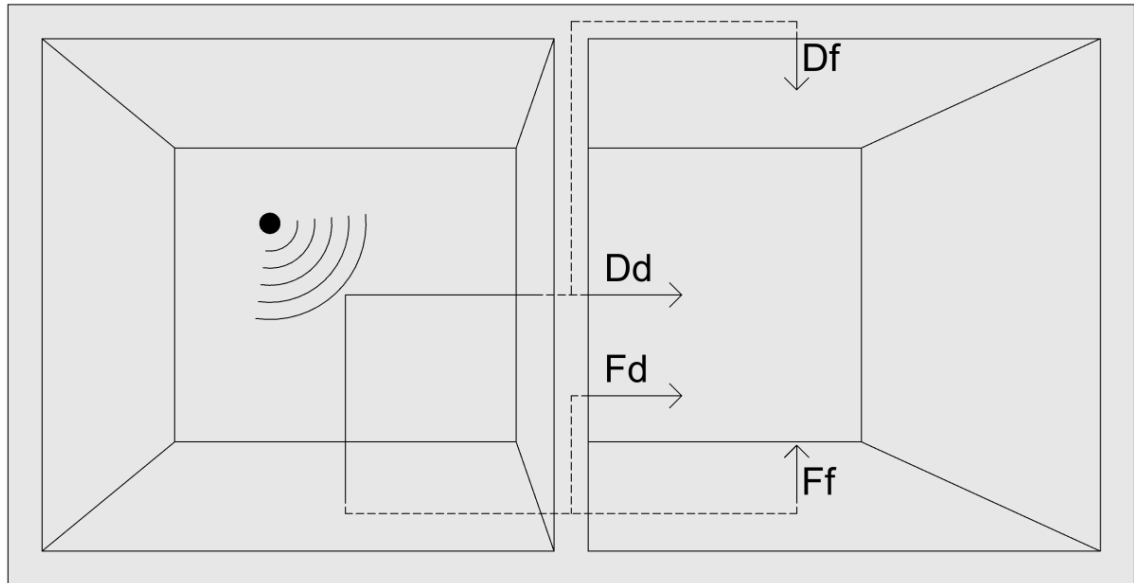
Kuten ilmaääneneristävyydenkin tapauksessa, myös rakennusosan askelääneneristävyyden riippuu rakennusosan dimensioista, siihen liittyvistä rakenteista sekä vastaanottotilan koosta ja sen absorptioalasta. Tilojen välistä askelääneneristävyyttä voidaan kuvata joko normalisoidun askeläänitason L'_n [dB] tai standardisoidun askeläänitason L'_{nT} [dB] avulla. Askelääneneristävyys tilojen välillä voidaan mitata standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaisesti. Askelääneneristävyyden yksilukuarvot $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ sekä tarvittavat spektripainotusermit voidaan määrittää standardin SFS-EN ISO 717-2 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä. Askelääneneristävyyden kenttämittausten kulku on esitetty kappaleessa 2.2.2.

2.1.3 Sivutiesiirtymät

Ääneneristävyys huoneiden välillä on useimmiten heikompi kuin huoneita erottavan rakenteen laboratoriossa mitattu ääneneristävyys. Heikompi ääneneristävyys johtuu siitä, että valmiissa rakennuksessa äänellä on useita kulkureittejä huoneiden välillä, kun taas laboratoriotilanteessa muiden reittien vaikutus on minimoitu. Esimerkiksi Helimäki & Kääriäinen (2013) toteavat, että tilojen välistä ääneneristävyyttä heikentää tilojen välillä jatkuvan ontelolaattavälipohjan kautta kulkeutuva ääni.

Valmiissa rakennuksessa ääni voi kulkeutua kahden huoneen välillä esimerkiksi ilmastointikanavia pitkin tai rakenteissa esiintyvien rakojen kautta. Ääni voi myös siirtyä tilasta toiseen rakenteita pitkin runkoääninä, eli rakenteiden värähtelynä. Näitä ylimääräisiä äänen kulkureittejä huoneiden välillä kutsutaan sivutiesiirtymiksi. Sivuavien rakennusosien kautta tapahtuvia sivutiesiirtymiä kutsutaan usein rakenteellisiksi sivutiesiirtymiksi. Esimerkiksi jatkuva ontelolaattavälipohja toimii rakenteellisena sivutiesiirtymäreittinä tilojen välillä: ääni etenee ontelolaattaa pitkin rakenteellisena värähtelynä tilasta toiseen. Valmiissa rakennuksessa rakenteellisina sivutiesiirtymäreitteinä toimivat kaikki huoneita erottavaa rakennusosaa sivuavat rakennusosat. Esimerkiksi vaakasuuntaisen tilojen välisen ilmaääneneristävyyden tapauksessa rakenteellisia sivutiesiirtymiä syntyy huoneen katon, lattian ja sivuavien seinien kautta.

Standardissa SFS-EN ISO 12354-1 (2017) rakenteellisia sivutiesiirtymäreittejä kuvataan kirjanyhdistelmällä, jossa ensimmäinen kirjain kuvaa rakennetta, johon ääni kohdistuu lähetyshuoneessa ja toinen kirjain rakennetta, joka säteilee ääntä vastaanottohuoneeseen. Huoneita erottavaa rakennetta kuvataan lähetyshuoneessa tunnuksella D ja vastaanottohuoneessa tunnuksella d (*direct*). Sivuavaa rakennetta puolestaan kuvataan lähetyshuoneessa tunnuksella F ja vastaanottohuoneessa tunnuksella f (*flanking*). Kuvassa 2 on esitetty esimerkkejä äänen kulkureiteistä huoneiden välillä, kun lähetyshuoneen ilmatilaan kohdistetaan heräte.



Kuva 2. Ensimmäisen kertaluvun rakenteellisia sivutiesiirtymiä huoneiden välillä.

Kuvassa 2 on esitetty seuraavat äänen sivutiesiirtymäreitit:

- Suoraan huoneita erottavan rakenteen läpi Dd (*direct-direct*).
- Huoneita erottavan seinän kautta kattoon, ja sieltä vastaanottohuoneeseen Df (*direct-flanking*).
- Lattian kautta huoneita erottavaan seinään, ja siitä edelleen vastaanottohuoneeseen Fd (*flanking-direct*).
- Lattian kautta lähetystilasta vastaanottotilaan Ff (*flanking-flanking*).

Jokaista sivuavaa rakennetta kohden syntyy kolme ensimmäisen kertaluvun rakenteellista sivutiesiirtymäreittiä. Reitin kertaluvulla kuvataan sitä, kuinka monen rakenteellisen liitoksen ylitse äänen reitti kulkee. Kuvan 2 kaltaisessa tilanteessa, jossa tiloja erottava rakenne liittyy muihin rakenteisiin kaikilta neljältä sivultaan, ensimmäisen kertaluvun rakenteellisia sivutiesiirtymäreittejä on yhteensä 12.

Kuvassa 2 esiintyvien sivutiesiirtymien lisäksi tilojen väliseen ääneneristävyyteen vaikuttavat myös pidemmät sivutiesiirtymäreitit, jotka kulkevat useamman rakenteellisen liitoksen yli. Yksittäisen reitin vaikutus ei välttämättä ole merkittävä, mutta pitkien sivutiesiirtymäreittien kokonaisvaikutus voi olla merkittävä, kun ne kaikki otetaan huomioon. (Craik 2001)

2.1.4 Värähtelyn eteneminen rakenteessa

Huoneen ilmatilassa etenevä ilmaääni tai rakenteeseen kohdistuva mekaaninen heräte aiheuttavat rakenteessa värähtelyä. Värähtely etenee rakenteita pitkin, ja edetessään se

vaimenee rakenteen häviöiden vaikutuksesta. Runkoäänien tapauksessa rakennusosien värähtely itsessään ei yleensä ole ihmisen havaittavissa (Hopkins 2007). Rakennusosan värähtely aiheuttaa kuitenkin huoneen ilmatilaan kytkeytyessään paineenvaihteluita, jotka voidaan havaita ilmaääninä.

Toisin kuin ilmassa, rakenteessa etenevässä värähtelyssä esiintyy useita eri aaltotyyppisiä, joiden vaikutus ääneneristävyyteen vaihtelee aaltotyyppittäin. Levymäisillä rakennusosilla tärkeimmät aaltotyypit ovat taivutus- (*bending*), näennäispitkittäis- (*quasi-longitudinal*) ja leikkausaalto (*transverse shear*). Sauvoille leikkausaaltojen sijaan merkittävä aaltotyyppi on vääntöaalto (*torsional*). (Hopkins 2007)

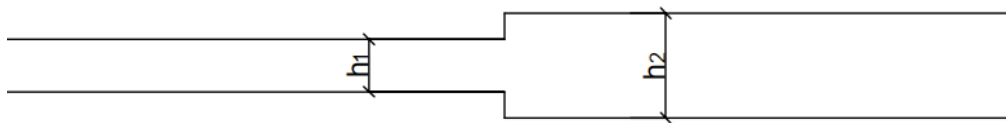
Pitkittäisaaltoja esiintyy kiinteissä, nestemäisissä ja kaasumaisissa väliaineissa (Cremer et al. 2005). Ääni etenee ilmassa puhtaasti pitkittäisaaltona. Pitkittäisaallossa hiukkasien liike on yhdensuuntainen aallon etenemissuunnan kanssa (Cremer et al. 2005), eli ne ovat ns. puristusaaltoja. Pitkittäisaaltoja esiintyy vain silloin, kun väliaineen dimensiot kaikkiin suuntiin ovat merkittävästi pitkittäisaallon aallonpituutta suurempia (Cremer et al. 2005).

Koska rakennuksissa tyypillisesti esiintyvien rakennusosien dimensioista vähintään yksi on merkittävästi muita dimensioita pienempi, ei puhtaita pitkittäisaaltoja voi syntyä. Sen sijaan rakennusosan pienimmän dimension suunnassa tapahtuu Poissonin ilmiön myötä myös aallon etenemissuunnan normaalin suuntaisia muodonmuutoksia. Levymäisillä rakennusosilla tämä muodonmuutos tapahtuu levyn paksuussuunnassa, sauvoilla taas muodonmuutos voi tapahtua kahteen suuntaan sauvan poikkisuunnassa. (Cremer et al. 2005; Hopkins 2007) Näennäispitkittäisaallon aiheuttamat poikkisuuntaiset siirtymät ovat verrattain pieniä, joten sen merkitys värähtelevän rakennusosan äänensäteilyn kannalta on vähäinen (Cremer et al. 2005; Hopkins 2007). Näennäispitkittäisaalto on kuitenkin runkoäänien etenemisen kannalta merkittävä aaltolaji (Hopkins 2007).

Äänensäteilyn kannalta tärkein aaltotyyppi on taivutusaalto (Hopkins 2007). Taivutusaallot aiheuttavat rakenteen pinnan normaalin suuntaisia muodonmuutoksia, jotka toimivat ilmaäänien herätteenä. Runkoäänien etenemisen kannalta myös ns. tasossa etenevät aaltotyypit, eli leikkaus- ja näennäispitkittäisaallot ovat tärkeitä. Kaikki kolme aaltotyyppiä ovat erityisen tärkeässä asemassa, kun tarkastellaan runkoäänien etenemistä usean rakennusosan liitoksessa (Hopkins 2007).

2.1.5 Rakenteen epäjatkuvuuskohdat

Runkoäänien etenemiseen rakenteessa vaikuttavat rakenteessa esiintyvät materiaaliominaisuuksien tai poikkileikkausgeometrian muutokset (kuva 3), sekä muut epäjatkuvuuskohdat (kuva 4). Rakenteellisissa epäjatkuvuuskohdissa osa rakenteesta etenevistä ääniaalloista heijastuu takaisin, jolloin rakennetta pitkin etenevä värähtely vaimenee. Näennäispitkittäisten aaltojen vaimeneminen palkin tai levyn poikkileikkauksen muutoskohdassa on varsin vähäistä. Taivutusaalloilla ero epäjatkuvuuskohtaan tulevan värähtelyn ja sen läpäisevän värähtelyn välillä on kuitenkin suurempi kuin näennäispitkittäisaalloilla. (Cremer et al. 2005)



Kuva 3. Äärettömän levyn epäjatkuvuuskohta, jossa levyn paksuus kasvaa arvosta h_1 arvoon h_2 . Perustuu lähteeseen (Cremer et al. 2005)

Levyn paksuuden muutoskohdassa tapahtuvaa värähtelyn vaimenemista voidaan tarkastella aallon tehon läpäisysuhteen γ avulla. Esimerkiksi kohtisuoralla tulokulmalla taivutusaaltojen tehon läpäisysuhde äärettömän levyn materiaalipaksuuden muutoskohdassa voidaan määrittää yhtälöstä (5):

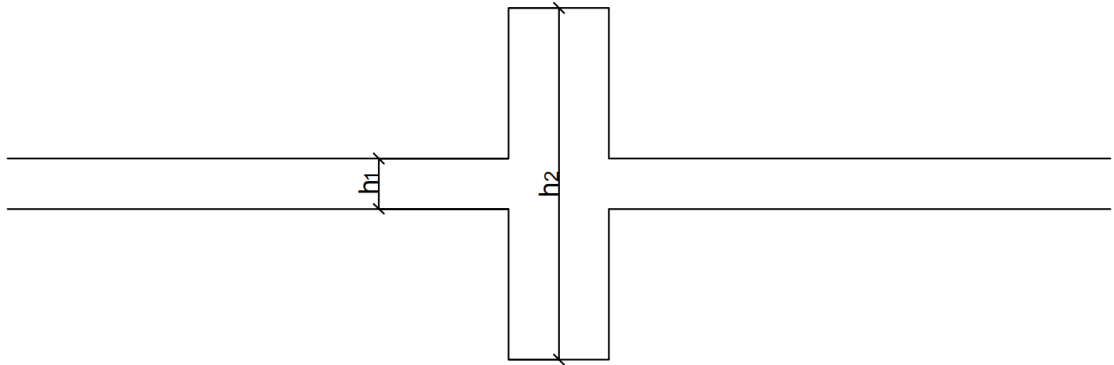
$$\gamma = \left[\frac{\Delta^{-5/4} + \Delta^{-3/4} + \Delta^{3/4} + \Delta^{5/4}}{\frac{\Delta^{-2}}{2} + \Delta^{-1/2} + 1 + \Delta^{1/2} + \frac{\Delta^2}{2}} \right]^2 \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{h_1}{h_2}$$

Materiaalipaksuuden muutoksella ei saavuteta suurta värähtelyn vaimennusta: realistisesti materiaalipaksuuden muutokset ovat enintään luokkaa $\Delta = 5$, jolloin värähtelyn vaimennus on 3 dB (Cremer et al. 2005).

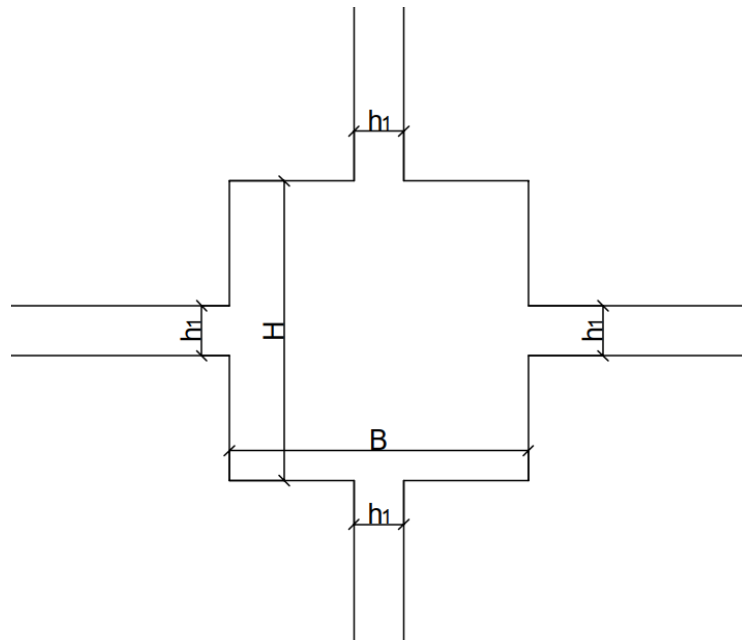
Niin sanottu lisämassa (blocking mass) (kuva 4) voi vaimentaa levyssä tai palkissa etenevää värähtelyä, mikäli lisämassa on riittävän paljon suurempi kuin rakenteen poikkileikkaus. Rakenteen ja lisämassan rajapinnassa tietyn rajataajuuden alapuolella runkoääni läpäisee rajapinnan täysin. Rajataajuuden yläpuolisilla taajuuksilla runkoääni puolestaan heijastuu täysin lisämassan rajapinnasta. Lisämassan aiheuttama värähtelyn

vaimennus riippuu lisämassan ja tarkasteltavan rakenteen poikkileikkauksista sekä lisämassan symmetrisyydestä rakenteeseen nähden. (Cremer et al. 2005)



Kuva 4. Ääretön levy (paksuus h_1) jonka jänneväliä on symmetrinen lisämassa (paksuus h_2). Perustuu lähteeseen (Cremer et al. 2005)

Lisämassojen vaikutusta rakenteellisten liitosten toimintaan on tutkittu kirjallisuudessa. Fujiwara (1983) tarkasteli lisämassan vaikutusta neljän toisiinsa liittyvän betonilevyn liitoksessa (kuva 5). Fujiwara osoitti laskennallisesti lisämassan aiheuttaman vaimennuksen olevan riippuvainen lisämassan koosta, sen keskisytydestä suhteessa liitokseen sekä värähtelyn taajuudesta. Pienillä taajuuksilla lisämassan vaikutus oli hyvin vähäinen, kun taas suurilla taajuuksilla (> 1000 Hz) Fujiwara totesi lisämassan vaimentavan värähtelyn etenemistä liitoksen yli merkittävästi.



Kuva 5. Neljän toisiinsa liittyvän levyn ristiliitos. Levyjen risteämiskohdassa on värähtelyä vaimentava, symmetrinen lisämassa. Perustuu lähteeseen (Fujiwara 1983)

Ontelolaatan täyttövalun voidaan ajatella toimivan eräänlaisena lisämassana. Se lisää liitoskohdan massaa, ja toimii rajapintana, jossa runkoäänen vaimenemista voi tapahtua.

Ei ole kuitenkaan varmaa, millä taajuusalueella täyttövalun vaikutus on havaittavissa. Jos täyttövalun vaikutus on havaittavissa vain hyvin suurilla taajuuksilla, on mahdollista että sen vaikutus ääneneristävyyteen tilojen välillä kokonaisuudessaan ei ole merkittävä.

2.2 Kenttämittaukset

Ääneneristävyyttä tilojen välillä voidaan tarkastella valmiissa rakennuksessa kenttämittauksin. Tilojen välinen ilmaääneneristävyys mitataan standardin SFS-EN ISO 16283-1 (2014) mukaisesti, ja tilojen välinen askelääneneristävyys puolestaan standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaisesti. Sekä ilma- että askelääneneristävyys huoneiden välillä voidaan mitata sekä pysty- että vaakasuunnassa.

Ilma- ja askelääneneristävyyden kenttämittauksilla ei kyetä suoraan tarkastelemaan ontelolaataston täyttövalun vaikutusta tilojen väliseen ääneneristävyyteen, sillä valmiissa rakennuksessa ääneneristävyyteen vaikuttavia seikkoja on useita. Tällöin kenttämittauksen perusteella on mahdotonta tietää, millainen vaikutus täyttövalulla on tilojen väliseen ääneneristävyyteen kokonaisuudessaan. Kenttämittausten avulla voidaan kuitenkin vertailla kohteita joissa, täyttövalua on käytetty kohteisiin, joissa täyttövalua ei ole tehty, ja näin tarkastella täyttövalun tarpeellisuutta ääneneristävyysvaatimusten toteutumisessa.

2.2.1 Ilmaääneneristävyyden kenttämittaus

Ilmaääneneristävyys huoneistojen välillä mitataan standardin SFS-EN ISO 16283-1 (2014) mukaisesti. Mittaus suoritetaan 1/3-oktaavikaistoittain vähintään taajuusalueella 100–3150 Hz. Tarkasteltavaa taajuusaluetta voidaan tarvittaessa laajentaa. Taajuuskaistaisista arvoista voidaan edelleen määrittää standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$, jota käytetään ääneneristävyysvaatimusten mittalukuina. Yksilukuarvot määritetään standardin SFS-EN ISO 717-1 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä mitatuista taajuuskaistaisista arvoista.

Ilmaääneneristävyyksluvun R'_w tai standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus käsittää seuraavat vaiheet:

- Lähetyshuoneen äänenpainetason L_1 mittaus
- Vastaanottohuoneen äänenpainetason L_2 mittaus
- Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajan T mittaus
- Vastaanottohuoneen taustäänitason L_b mittaus

Lähetys- ja vastaanottohuoneen äänenpainetasoja mitattaessa lähetyshuoneesta valitaan vähintään kaksi sijaintia, johon äänilähde asetetaan. Lähetyshuoneessa voidaan joko käyttää kahta äänilähdettä yhtäaikaisesti, tai yhtä äänilähdettä, jota siirretään mitausten edetessä. Äänilähteen tuottaman signaalin äänenpainetaso mitataan sekä lähetys- että vastaanottohuoneessa vähintään viidestä pisteestä. Mittauspisteiden väliset etäisyydet sekä niiden etäisyydet huoneen pinnoista on määritetty standardin SFS-EN ISO 16283-1 kohdassa 7.6. Äänenpainetason mittauksen kesto on määritetty standardin kohdassa 7.7. (SFS-EN ISO 16283-1 2014)

Kaiuttimen tuottamien äänenpainetasojen lisäksi vastaanottohuoneessa mitataan sen taustäänitaso, jotta voidaan varmistua siitä, ettei taustäänitaso vaikuta vastaanottohuoneessa mitattuun äänenpainetasoon. Mitatun taustäänitason avulla vastaanottohuoneen mitatulle äänenpainetasolle tehdään taustäänikorjaus, jolla poistetaan taustäänien vaikutus ilmaääneneristävyyden mittaustuloksesta. Taustäänitason mittauksen kesto riippuu huoneen taustäänestä: jos ääni on tasaista, riittää lyhyempi mittaus. Jos taustäänien voimakkuus taas on vaihtelevaa, on syytä suorittaa pidempi mittaus. Taustäänitason mittauksen kesto valitaan standardin kohdan 7.7. (SFS-EN ISO 16283-1 2014) mukaisesti.

Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajan mittaus tehdään mittaustulosten normalisointia varten. Jälkikaiunta-aika mitataan standardin SFS-EN ISO 3382-2 (2008) mukaisesti joko katkaistun kohinan menetelmällä tai integroidun impulssivasteen menetelmällä. Jälkikaiunta-ajan mittauksia varten vastaanottohuoneesta valitaan vähintään yksi kaiutinpaikka. Jälkikaiunta-aika mitataan vähintään kuudesta eri pisteestä. Katkaistun kohinan menetelmän tapauksessa mittaus voidaan myös suorittaa kolmesta pisteestä, kaksi kertaa jokaisesta. (SFS-EN ISO 16283-1 2014)

Lähetys- ja vastaanottohuoneissa mitattujen äänenpainetasojen avulla määritetään kunkin huoneen äänenpainetason energiakeskiarvo L_1 ja L_2 yhtälöstä (6):

$$L_i = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (6)$$

jossa L_j [dB] ovat yhtä kaiutinpaikkaa vastaavista mittauspisteistä mitatut äänenpainetasot, ja n on mittauspisteiden lukumäärä. (SFS-EN ISO 16283-1 2014)

Lähetys- ja vastaanottohuoneiden äänenpainetasojen L_1 ja L_2 lisäksi vastaanottohuoneessa mitataan taustäänitaso L_b [dB]. Taustäänitason mittauksen aikana äänilähde ei tuota ääntä, vaan tarkoituksena on mitata ympäristön vastaanottohuoneeseen tuotta-

mien äänien äänenpainetasoa. Mitatun taustaäänitason avulla vastaanottohuoneen yhtälön (6) mukaisesti lasketulle äänenpainetasolle tehdään taustaäänikorjaus. Taustaäänikorjaus tehdään yhtälön (7) mukaisesti:

$$L = 10 \log_{10} \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) \quad (7)$$

jossa L_b [dB] on vastaanottohuoneessa mitattu taustaäänitaso ja L_{sb} [dB] vastaanottohuoneessa mitattu äänenpainetaso, joka sisältää sekä taustaäänien että kaiuttimen tuottaman signaalin. (SFS-EN ISO 16283-1 2014) Taustaäänikorjaus tehdään, jotta vastaanottohuoneen taustaääni ei vaikuttaisi mittaustulokseen; taustaäänit korottaa vastaanottohuoneen äänenpainetasoa, mikä heikentäisi mitattua ilmaääneneristävyyttä.

Lähetys- ja vastaanottohuoneiden äänenpainetasojen avulla määritetään yhtä kaiutinpaikkaa vastaava äänitasoero D [dB] yhtälöstä (8):

$$D = L_1 - L_2 \quad (8)$$

Äänitasoeron D avulla voidaan edelleen määrittää tilojen välinen ilmaääneneristävyys R' [dB] kaavasta (9):

$$R' = D + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (9)$$

jossa S on huoneita erottavan rakenteen pinta-ala, ja A [m²] on vastaanottohuoneen absorptioala. Absorptioala voidaan määrittää Sabinen kaavalla:

$$A = 0,16 \frac{V}{T} \quad (10)$$

jossa V [m³] on huoneen tilavuus. Ilmaääneneristävyyden R' lisäksi mittaustulosten avulla voidaan määrittää huoneiden välinen standardisoitu äänitasoero D_{nT} [dB] yhtälöstä (11):

$$D_{nT} = D + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0} \quad (11)$$

jossa $T_0 = 0,5$ s on referenssijälkikaiunta-aika. (SFS-EN ISO 16283-1 2014)

Prosessi toistetaan kunkin kaiutinpaikan mittaustuloksilla, minkä jälkeen voidaan määrittää huoneiden välinen ilmaääneneristävyys R' ja standardisoitu äänitasoero D_{nT} taajuuskaistoittain kaavoista (12) ja (13):

$$R' = -10 \log_{10} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^k 10^{-R'_j/10} \quad (12)$$

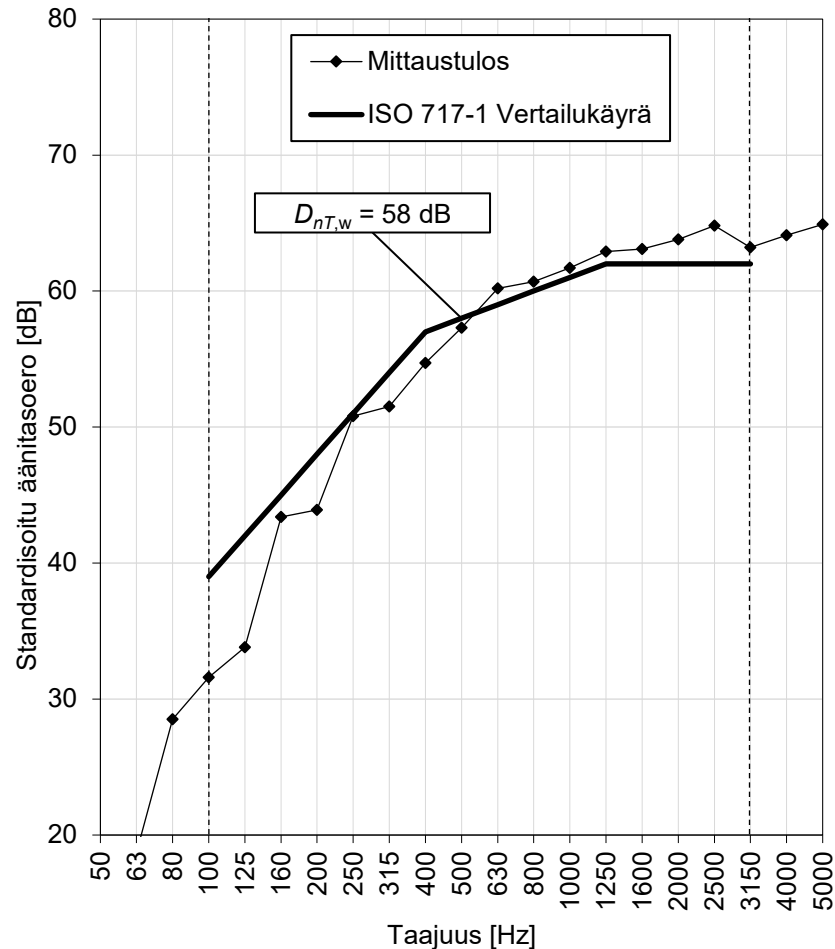
$$D_{nT} = -10 \log_{10} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^k 10^{-D_{nT,j}/10} \quad (13)$$

joissa m on kaiutinpaikkojen lukumäärä. (SFS-EN ISO 16283-1 2014)

Ilmaääneneristävyyden yksilukuarvot R'_{w} ja $D_{nT,w}$ määritetään standardin SFS-EN ISO 717-1 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä. Standardin mukainen vertailukäyrä ilmaääneneristävyyden mittalukujen määrittämiseksi on esitetty taulukossa 4. Esimerkki vertailukäyrän käytöstä on esitetty kuvassa 6.

Taulukko 4. SFS-EN ISO 717-1 (2020) mukainen vertailukäyrä 1/3-oktaavikaistoittain.

Taajuus [Hz]	ISO 717-1 Vertailukäyrä [dB]
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56



Kuva 6. Esimerkki standardin ISO 717-1 (2020) vertailukäyrämenettelystä.

Yksilukuarvot määritetään siirtämällä vertailukäyrää 1 dB kerrallaan kohti mitattua ilmaääneneristävyyden R' tai standardisoidun äänitasoeroluvun D_{nT} käyrää, kunnes vertailukäyrän ja mittaustuloksen välinen epäsuotuisa poikkeama on mahdollisimman suuri. Jos vertailu tehdään terssikaistoittain, saa epäsuotuisien poikkeamien summa olla enintään 32 dB. Epäsuotuisa poikkeama ilmenee niillä terssikaistoilla, joilla vertailukäyrän arvo ylittää mittaustuloksen arvon. Kun vertailukäyrä on sijoitettu mahdollisimman korkeaan asemaan, voidaan ilmaääneneristävyyden yksilukuarvo lukea vertailukäyrältä 500 Hz:n terssikaistan kohdalta. (SFS-EN ISO 717-1 2020)

2.2.2 Askelääneneristävyyden kenttämittaus

Askelääneneristävyyden kenttämittaukset suoritetaan standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaisesti. Askelääneneristävyys tilojen välillä mitataan taajuusalueella 100–3150 Hz, mutta tarvittaessa taajuusaluetta voidaan laajentaa. Suomessa askelääneneristävyyden määräykset koskevat standardisoitua askeläänitasolukua $L'_{nT,w}$ spektri-

painotustermillä $C_{I,50-2500}$ (YM 2017). Askelääneneristävyyden $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ mittauksen taajuusalue tulee pienillä taajuuksilla ulottaa myös 1/3-oktaavikaistoihin 50–80 Hz spektripainotusterman $C_{I,50-2500}$ määrittämiseksi.

Huoneiden välisen askelääneneristävyyden mittaus koostuu kolmesta eri vaiheesta:

- Vastaanottohuoneen äänenpainetason L_2 mittaus
- Vastaanottohuoneen taustäänitason L_b mittaus
- Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajan T mittaus

Askelääneneristävyyden mittauksessa yksi huone valitaan lähetyshuoneeksi, ja toinen vastaanottohuoneeksi. Lähetyshuoneessa tuotetaan runkoäänierä standardin SFS-EN ISO 10140-5 (2010) mukaisella askeläänikojeella. Askeläänikojetta varten lähetyshuoneesta valitaan vähintään neljä kojepaikkaa siten, että kojeen etäisyys lattian reunoista on vähintään 0,5 metriä ja koje on 45° kulmassa kantaviin lattiarakenteisiin nähden. Vastaanottohuoneen äänenpainetaso mitataan vähintään kahdesta eri mittauspisteestä jokaista kojepaikkaa kohden. Yhteensä äänenpainetaso mitataan siis vähintään 8 kertaa. Mittauspisteiden sallitut vähimmäisetäisyydet toisistaan ja vastaanottohuoneen pinnoista on esitetty standardin kohdassa 7.6. (SFS-EN ISO 16283-2 2020)

Askelääneneristävyyden yhteydessä mitataan vastaanottohuoneen taustäänitaso L_b standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaisesti, sekä vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika T standardin SFS-EN ISO 3382-2 (2008) mukaisesti. Taustäänitason ja jälkikaiunta-ajan mittausten kulku on esitetty kappaleessa 2.2.1 ilmaääneneristävyyden kenttämittauksen yhteydessä.

Mitatuista äänenpainetasoista määritetään ensin vastaanottohuoneen äänenpainetason energiakeskiarvo L_2 taajuuskaistoittain kutakin askeläänikojepaikkaa kohden yhtälöstä (6), minkä jälkeen vastaanottohuoneen äänenpainetasolle tehdään taustäänikorjaus yhtälön (7) mukaisesti. Taustäänikorjatun äänenpainetason L_2 avulla voidaan määrittää taajuuskaistoittain sekä normalisoitu askeläänitaso L'_n että standardisoitu askeläänitaso L'_{nT} yhtälöistä (14) ja (15):

$$L'_n = L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (14)$$

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (15)$$

jossa $A_0 = 10 \text{ m}^2$ on referenssiabsorptioala. Prosessi toistetaan jokaiselle askeläänikojepaikalle, minkä jälkeen kojepaikkakohtaiset tulokset keskiarvoistetaan (SFS-EN ISO 16283-2 2020):

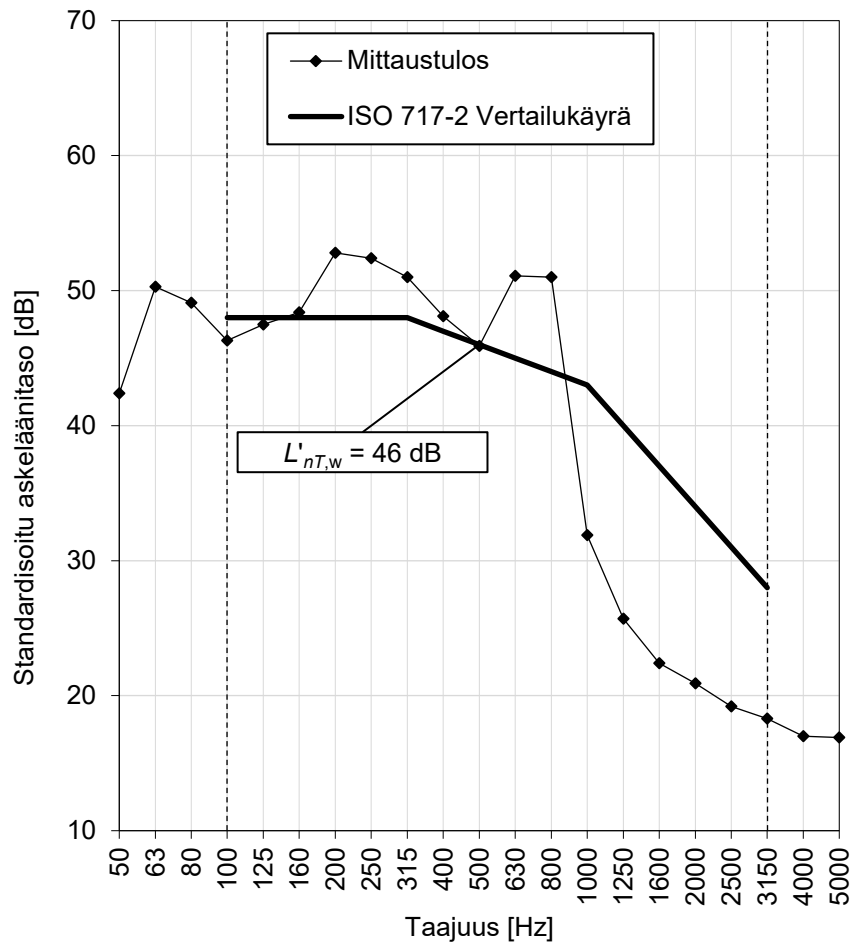
$$L'_n = 10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{L'_{n,j}/10} \right) \quad (16)$$

$$L'_{nT} = 10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{L'_{nT,j}/10} \right) \quad (17)$$

Kun normalisoitu askeläänitaso L'_n ja standardisoitu askeläänitaso L'_{nT} tunnetaan taajuuskaistoittain, voidaan askelääneneristävyyden yksilukuarvot $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ määrittää standardin SFS-EN ISO 717-2 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä. Askelääneneristävyyden yksilukuarvojen määrittämisessä käytettävä vertailukäyrä on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. SFS-EN ISO 717-2 (2020) mukainen vertailukäyrä 1/3-oktaavikaistoittain.

Taajuus [Hz]	ISO 717-2 Vertailukäyrä [dB]
100	62
125	62
160	62
200	62
250	62
315	62
400	61
500	60
630	59
800	58
1000	57
1250	54
1600	51
2000	48
2500	45
3150	42



Kuva 7. Esimerkki standardin ISO 717-2 (2020) vertailukäyrämenettelystä. Kuvassa esitetty vaakasuuntaisen askelääneneristävyyden mittaustulos.

Taulukon 5 vertailukäyrää siirretään 1 dB kerrallaan kohti mitattua askeläänitasoa L'_n tai L'_{nT} käyrää, kunnes epäsuotuisa poikkeama on mahdollisimman suuri. 1/3-oktaavikaistoittain mitattuja arvoja tarkasteltaessa epäsuotuisien poikkeamien summa saa olla enintään 32 dB. Epäsuotuisa poikkeama esiintyy silloin, kun mitattu askeläänitaso ylittää vertailukäyrän arvon. Askelääneneristävyyden yksilukuarvo luetaan vertailukäyrältä 500 Hz:n terssikaistan kohdalta kun vertailukäyrä on asetettu lopulliseen asemaansa. (SFS-EN ISO 717-2 2020)

Spektripainotusermi $C_{I,50-2500}$ määritetään standardissa SFS-EN ISO 717-2 (2020) mukaisesti. Spektripainotusermin määrittämiseksi lasketaan mitattujen standardisoitujen askeläänitasojen L_{nT} energettinen summa 1/3-oktaavikaistoilla 50–2500 Hz:

$$L'_{nT,summa} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^k 10^{L'_{nT,i}/10} \quad (18)$$

Kun 1/3-oktaavikaistojen standardisoitujen askeläänitasojen energieettinen summa ja standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$ tunnetaan, voidaan spektripainotusermi $C_{I,50-2500}$ määrittää yhtälöstä

$$C_{I,50-2500} = L'_{nT,summa} - 15 - L'_{nT,w} \quad (19)$$

Tilojen välinen askelääneneristävyyden esitetään muodossa $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$.

2.3 Standardin SFS-EN ISO 12354 laskentamalli

Vuonna 1979 Gerretsen (1979) kehitti laskentamallin, jonka avulla voidaan tarkastella ilma- ja askelääneneristävyyttä tilojen välillä erillisten äänen sivutiesiirtymäreittien avulla (ks. kuva 2). Gerretsenin laskentamalli vastaa ensimmäisen kertaluvun approksimaatiota tilastollisesta energia-analyysistä (*statistical energy analysis*, SEA). Laskentamalli perustuu oletukseen siitä, että äänen kulkureittejä voidaan käsitellä toisistaan erillisinä, ja että lähetys- ja vastaanottohuoneissa ja niiden rakenteissa vallitsevat ääni- ja värähtelykentät ovat diffuuseja. Gerretsenin malli huomioi äänen kulkeutumisen suoraan tiloja erottavan rakenteen lävitse, sekä ensimmäisen kertaluvun sivutiesiirtymät. Laskentamallin ensimmäinen versio käsitteli vain ilmaääneneristävyyttä tilojen välillä (Gerretsen 1979). Myöhemmin Gerretsen sovelsi kehittämänsä laskentamallia myös askelääneneristävyyden arvioimiseen tilojen välillä (Gerretsen 1986).

Standardit SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) perustuvat Gerretsenin (1979; 1986) työhön. Standardeissa esitetään laskentamallit ilma- ja askelääneneristävyyden määrittämiseksi tilojen välillä. Standardien laskentamalliin pätevät samat oletukset diffuuseista ääni- ja värähtelykentistä sekä toisistaan riippumattomista äänen sivutiesiirtymäreiteistä kuin Gerretsenin (1979; 1986) laskentamallissa. Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) mukaan ennustemallia voidaan näillä oletuksilla käyttää yleisesti kaikenlaisten rakennekokonaisuuksien tarkasteluun. Standardin mukaan laskentamallin käyttöä rajoittavat lähtötietojen saatavuus, erityisesti liitosten eristävyyden kannalta. Lisäksi laskentamalli soveltuu vain vierekkäisten tai päällekkäisten huoneiden tarkasteluun. (SFS-EN ISO 12354-1 2017)

Standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamallin soveltuvuutta on tarkasteltu kirjallisuudessa. Pedersen (1999) totesi standardin laskentamallin olevan soveltuva pohjoismaisten asuinhuoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden ja pystysuuntaisen askelääneneristävyyden tarkasteluun. Galbrun (2008) tarkasteli standardin laskentamallin tarkkuutta vertailemalla sitä mittaustuloksiin sekä ensimmäisen ja korkeamman kertaluvun SEA-malleihin. Galbrunin mukaan standardin laskenta-

mallin tarkkuus riippuu vahvasti laskennassa käytettyjen lähtötietojen tarkkuudesta; erityisesti rakennusosien välisten liitosten suuntakeskiarvoistetun nopeustasoeron *in situ* $\overline{D_{v,lj,situ}}$ tarkka määrittäminen vaatisi laboratoriomittauksia tai kattavampien laskennallisten menetelmien, esimerkiksi FE-menetelmän, käyttöä (Galbrun 2008).

Toinen standardin laskentamallin tarkkuuteen vaikuttava seikka on korkeamman kertaluvun sivutiesiirtymäreitit, eli äänen sivutiesiirtymäreitit, jotka kulkevat useamman rakenteellisen liitoksen ylitse. Korkeamman kertaluokan sivutiesiirtymät voivat vaikuttaa tilojen väliseen ääneneristävyyteen merkittävästi (Craik 2001; Galbrun 2008). Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laskentamalli huomioi vain ensimmäisen kertaluvun sivutiesiirtymät, joten korkeamman kertaluvun sivutiesiirtymien vaikutusta standardin mallilla ei voida arvioida. Korkeamman kertaluvun äänen sivutiesiirtymäreittien vaikutus on kuitenkin todennäköisesti vähäisempi, kun tarkastellaan ääneneristävyyttä esimerkiksi kerrostalossa laboratoriotilanteen sijaan (Galbrun 2008).

2.3.1 Ilmaääneneristävyys tilojen välillä

Tilojen välisen ilmaääneneristävyyden laskennalliseen arviointiin käytetään standardia SFS-EN ISO 12354-1 (2017). Standardissa esitellään kaksi vaihtoehtoista laskentamallia: laaja (*detailed model*) ja yksinkertaistettu laskentamalli (*simplified model*). Laaja malli ottaa huomioon äänen suoran reitin, rakenteelliset sivutiesiirtymäreitit sekä suorat ja epäsuorat ilmareitit esimerkiksi käytävän tai ilmastointikanavan kautta. Laajassa mallissa laskelmat tehdään terssi- tai oktaavikaistoittain. Yksinkertaistetun mallin laskennassa taas käytetään erottavan ja sivuavien rakenteiden ääneneristävyyden yksilukuarvoja R_w . (SFS-EN ISO 12354-1 2017) Tässä tutkimuksessa tarkastellaan vain laajaa laskentamallia.

Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laaja laskentamalli huomioi eri sivutiesiirtymäreitit reittikohtaisten läpäisysuhteiden τ avulla. Ilmaääneneristävyys kahden tilan välillä määritellään yhtälöllä

$$R' = -10 \log \tau' \quad (20)$$

jossa τ' on kokonaisläpäisysuhde huoneiden välillä. Kokonaisläpäisysuhde määritellään vastaanottotilaan siirtyvän äänitehon W_{tot} [W] ja huoneita erottavaan rakenteeseen kohdistuvan tehon W_1 suhteena (SFS-EN ISO 12354-1 2017):

$$\tau' = \frac{W_{tot}}{W_1} \quad (21)$$

Tilojen välinen kokonaisläpäisysuhde τ' [-] voidaan määrittää äänen eri kulkureittien läpäisysuhteista kaavan (22) mukaisesti

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (22)$$

jossa τ_d [-] on erottavan rakenteen läpäisysuhde, τ_f [-] sivuavan rakennusosan läpäisysuhde, τ_e [-] erottavan rakenteen elementin läpäisysuhde ja τ_s [-] epäsuoran ilma-reitit läpäisysuhde. Erottavan rakenteen läpäisysuhde τ_d koostuu suorasta reitistä erottavan rakenteen lävitse Dd sekä niistä sivutiesiirtymistä, joissa huoneita erottava rakenne säteilee vastaanottohuoneen ilmatilaan Fd (ks. kuva 2). Vastaavasti sivuavien rakenteiden läpäisysuhteet koostuvat niistä reiteistä, joissa sivuava rakenne säteilee vastaanottotilaan, eli reiteistä Df ja Ff . Standardissa SFS-EN ISO 12354-1 (2017) läpäisysuhteet on määritelty yhtälöin:

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{F=1}^n \tau_{Fd} \quad (23)$$

$$\tau_f = \tau_{Df} + \tau_{Ff} \quad (24)$$

jossa

$$\tau_{Dd} = 10^{-R_{Dd}/10} \quad (25)$$

$$\tau_{ij} = 10^{-R_{ij}/10} \quad (26)$$

joissa R_{Dd} [dB] on ääneneristävyys erottavan rakenteen lävitse, ja R_{ij} [dB] on ilmaääneneristävyys sivutiesiirtymäreittiä ij pitkin. Rakenteellisia sivutiesiirtymäreittejä tarkasteltaessa alaindeksi i kuvastaa lähetyshuoneessa herätettävää rakennusosaa, ja alaindeksi j vastaanottohuoneeseen säteilevää rakennusosaa.

Standardissa erilaiset rakennusosat luokitellaan tyypeihin A ja B. A-tyypin rakennusosiksi lukeutuvat ne rakenteet, joiden rakenteellinen jälkikaiunta-aika määräytyy osaan liittyvien rakenteiden perusteella, ja joissa liitosta vasten kohtisuorassa suunnassa värähtelytaso rakenteessa vaimenee enintään 6 dB. Tyypin A rakennusosat voivat koostua esimerkiksi paikallavalubetonista, massiivipuusta tai lasista. Tyypin B rakennusosia ovat puolestaan kaikki ne, jotka eivät ole tyypin A rakennusosia. Elementti voidaan luokitella tyypin A tai B rakennusosaksi vain osassa tarkasteltavaa taajuusaluetta, jos edellä mainitut kriteerit täyttyvät. (SFS-EN ISO 12354-1 2017)

Laajassa laskentamallissa lähtötietoina käytettävät rakennusosien ilmaääneneristävyydet R muunnetaan laboratorio- tai laskennallisista arvoista *in situ*-arvoiksi, minkä jälkeen määritetään kunkin äänen siirtymäreitin ääneneristävyys. Rakennusosan ilmaääneneristävyyden *in situ* arvon määrittäminen riippuu siitä, tarkastellaanko tyypin A vai B rakennusosaa. Tyypin A rakennusosien tapauksessa rakennusosan ilmaääneneristävyyden laboratorioarvo muunnetaan *in situ* arvoksi kaavan (27) mukaisesti:

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (27)$$

jossa R_{situ} on rakenteen ilmaääneneristävyys *in-situ*, $T_{s,situ}$ [dB] on rakennusosan rakenteellinen jälkikaiunta-aika *in-situ*, ja $T_{s,lab}$ [dB] rakenteellinen jälkikaiunta-aika laboratoriossa. Tässä kontekstissa *in situ* tarkoittaa tarkasteltavaa tilannetta, eli laskentatilannetta. Standardin mukaan ilmaääneneristävyyden *in situ* arvoa voidaan myös approksimoida käyttämällä rakennusosan ilmaääneneristävyyden laboratorioarvoa R . (SFS-EN ISO 12354-1 2017)

Tyypin B rakennusosilla rakenteellinen jälkikaiunta-aika ei riipu pääasiassa rakenteellisista kytkennöistä, vaan rakenteesta itsestään. Tällöin rakennusosan jälkikaiunta-aika *in situ* $T_{s,situ}$ ajatellaan yhtä suureksi kuin rakenteellinen jälkikaiunta-aika laboratoriossa, jolloin kaavan (27) korjaustermi katoaa ja saadaan

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} = R - 10 \log \frac{T_{s,lab}}{T_{s,lab}} = R \quad (28)$$

Huoneita erottavan rakenteen lävitse kulkevan reitin Dd ilmaääneneristävyys R_{Dd} [dB] koostuu erottavan rakennusosan ilmaääneneristävyydestä *in situ* $R_{s,situ}$ [dB] sekä siihen mahdollisesti lisättyjen levytysten ilmaääneneristävyyden parannuksista yhtälön (29) mukaisesti:

$$R_{Dd} = R_{s,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ} \quad (29)$$

jossa $\Delta R_{D,situ}$ [dB] on lähetyspuolelle lisättyjen levytysten ilmaääneneristävyyden parannusluku, ja $\Delta R_{d,situ}$ [dB] on vastaanottopuolelle lisättyjen levytysten ilmaääneneristävyyden parannusluku.

Myös äänen sivutiesiirtymäreittien ilmaääneneristävyyttä voidaan parantaa lisäämällä rakennusosien pintaan ääntä eristäviä kerroksia, esimerkiksi kipsilevyjä. Rakennusosan pintaan lisätyn kerroksen tuomana ilmaääneneristävyyden parannuksena *in situ* voidaan käyttää parannuksen laboratorioarvoa ΔR [dB]:

$$\Delta R_{situ} = \Delta R \quad (30)$$

Levytyksen tuomaa parannusta voidaan myös arvioida standardin liitteen D avulla. (SFS-EN ISO 12354-1 2017)

Sivutiesiirtymäreittien (Ff , Fd ja Df) ilmaääneneristävyyttä määritettäessä on otettava huomioon sivuavien rakenteiden ilmaääneneristävyys, ilmaääneneristävyyden parannusluvut eri rakennusosien pinnoilla sekä rakenteellisten liitosten vaikutus runkoäänen vaimenemiseen. Sivutiesiirtymäreitin ij ilmaääneneristävyys voidaan määrittää yhtälöstä (31) (SFS-EN ISO 12354-1 2017):

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + \left(10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \quad (31)$$

jossa

- $R_{i,situ}$ [dB] on reitin lähetyspuolen rakennusosan ilmaääneneristävyys *in situ*
- $\Delta R_{i,situ}$ [dB] on reitin lähetyspuolen ilmaääneneristävyyden parannusluku
- $R_{j,situ}$ [dB] on reitin vastaanottopuolen rakennusosan ilmaääneneristävyys *in situ*
- $\Delta R_{j,situ}$ [dB] on reitin vastaanottopuolen ilmaääneneristävyyden parannusluku
- $\overline{D_{v,ij,situ}}$ [dB] on sivutiesiirtymäreitin rakennusosia yhdistävän liitoksen suunta-keskiarvoistettu nopeustasoero *in situ*
- S_s [m²], S_i [m²] ja S_j [m²] ovat huoneita erottavan rakenteen pinta-ala, sekä sivuavan rakennusosan pinta-alat lähetys- ja vastaanottohuoneissa.

Jos liitokseen kytkeytyy tyyppin A rakennusosia, liitoksen eristävyyttä kuvaava suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero *in situ* $\overline{D_{v,ij,situ}}$ saadaan yhtälöstä (32):

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}}; \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \text{ dB} \quad (32)$$

jossa K_{ij} [dB] on rakennusosien i ja j välisen liitoksen liitoseristävyys, l_{ij} [m] on osien välisen liitoksen pituus ja a_i [m] sekä a_j [m] ovat sivuavan rakennusosan ekvivalentit absorptiopituudet lähetys- ja vastaanottohuoneissa. (SFS-EN ISO 12354-1 2017) Liitoseristävyyden K_{ij} käsitettä ja määrittämistä käsitellään kappaleessa 2.3.3.

Ekvivalentit absorptiopituudet a_i ja a_j riippuvat rakenteen pinta-alasta ja rakenteellisesta jälkikaiunta-ajasta kaavojen

$$a_i = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (33)$$

$$a_j = \frac{2,2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (34)$$

mukaisesti, joissa f [Hz] on taajuus ja $f_{ref} = 1000$ Hz on referenssitaajuus. Jos liitos koostuu sekä tyyppin A että tyyppin B rakennusosista, määritetään tyyppin B elementin ekvivalentti absorptiopituus yhtälöstä:

$$a_i = \frac{S_i}{l_0} \quad (35)$$

$l_0 = 1$ m on referenssipituus. Jos liitos koostuu vain tyyppin B elementeistä, käytetään liitoksen toiminnan kuvaamiseen normalisoitua suuntakeskiarvoistettua nopeustasoeroa $\overline{D_{v,ij,n}}$ [dB] liitoseristävyyden K_{ij} sijaan (SFS-EN ISO 12354-1 2017):

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \overline{D_{v,ij,n}} - \left(10 \log \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}} \right); \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \text{ dB} \quad (36)$$

Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laskentamenetelmällä saaduista ilmaääneneristävyyden arvoista voidaan määrittää ilmaääneneristävyyden luku R'_w standardin SFS-EN ISO 717-1 (2020) vertailukäyrämenettelyllä. Suomessa käytettävän standardisoidun äänitasoeron D_{nT} ja ilmaääneneristävyyden R' välillä on yhteys

$$D_{nT} = R' + 10 \log \frac{C_{sab} V}{T_0 S_s} = R' + 10 \log \frac{0,32V}{T_0} \quad (37)$$

jossa $C_{sab} = 0,16$ s/m on Sabinen vakio (SFS-EN ISO 12354-1 2017).

2.3.2 Askelääneneristävyyden tilojen välillä

Askelääneneristävyys huoneiden välillä voidaan määrittää standardin ISO 12354-2 (2017) mukaisesti. Kuten ilmaääneneristävyyden tapauksessa myös askelääneneristävyyden määrittämiseksi standardissa esitellään sekä laaja että yksinkertaistettu laskentamalli. Askelääneneristävyyden laskentamalli kuitenkin erittelee tapaukset, joissa tarkasteltavat huoneet ovat päällekkäin ja tapaukset, joissa tarkasteltavat huoneet ovat vierekkäin. Standardin askelääneneristävyyden laskentamallissa lähetyshuoneen lattiaa kuvataan alaindeksillä i , ja vastaanottohuoneeseen säteilevää rakennusosaa alaindeksillä j .

Kun tarkasteltavat huoneet ovat päällekkäin, normalisoitu askelääneneristävyys huoneiden välillä määritetään yhtälöstä (38):

$$L'_n = 10 \log \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^m 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (38)$$

missä $L_{n,d}$ on normalisoitu askeläänitaso suoraan erottavan rakenteen kautta, $L_{n,ij}$ on normalisoitu askeläänitaso sivutiesiirtymäreittiä ij pitkin ja m on sivutiesiirtymäreittien lukumäärä. (SFS-EN ISO 12354-2 2017)

Mikäli tarkastellaan askelääneneristävyyttä vaakatasossa, normalisoitu askelääneneristävyys määritetään puolestaan yhtälöstä (39) (SFS-EN ISO 12354-2 2017):

$$L'_n = 10 \log \left(\sum_{j=1}^m 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (39)$$

Kaavasta (39) havaitaan, että tarkasteltaessa askelääneneristävyyttä vaakasuunnassa standardi ei huomioi suoraan tiloja erottavan seinän kautta siirtyvää ääntä. Tällöin laskennalliseen askelääneneristävyyteen vaikuttavat vain äänen sivutiesiirtymäreiitit suoraan lattian kautta ja lattiasta huoneita erottavaan seinään.

Laskettaessa askelääneneristävyyttä huoneiden välillä lähetyshuoneen lattian askelääneneristävyys ja sivuavien rakenteiden ilmaääneneristävyydet muutetaan laboratorio-arvoista *in situ* arvoiksi. Tyypin A elementeille *in situ* arvot saadaan kaavojen (27) ja (40) mukaisesti:

$$L_{n,i,situ} = L_{n,i} - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (40)$$

Ilma- ja askelääneneristävyyden *in situ* arvoja voidaan approksimoida käyttämällä laboratoriotuloksia. (SFS-EN ISO 12354-2 2017)

Kun tarkastellaan päällekkäisiä huoneita askelääneneristävyys suoraan tiloja erottavan rakennusosan lävitse saadaan yhtälöstä :

$$L_{n,d} = L_{n,i,situ} - \Delta L_{i,situ} - \Delta L_{d,i,situ} \quad (41)$$

jossa $\Delta L_{i,situ}$ [dB] on lattianpäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutus lähetyshuoneessa ja $\Delta L_{d,i,situ}$ [dB] on alaslasketun katon askelääneneristävyyden parannusvaikutus. Lattianpäällysteiden, alaslasketujen kattojen ja muiden lisäkerrosten tuoma askel- tai ilmaääneneristävyyden parannus *in situ* määritetään kaavojen (30), (67) ja (69) mukaisesti:

$$\Delta L_{i,situ} = \Delta L_i \quad (42)$$

$$\Delta L_{d,i,situ} = \Delta L_{d,i} \quad (43)$$

joissa ΔL on lattianpäällysteen laboratoriossa mitattu askelääneneristävyyden parannus ja ΔL_d on alakaton laboratoriossa mitattu askelääneneristävyyden parannus, kun vastaanottohuone sijaitsee lähetyshuoneen alapuolella. (SFS-EN ISO 12354-2 2017)

Kun tarkasteltavat huoneet koostuvat tyyppin A rakennusosista, sivutiesiirtymäreitin ij askelääneneristävyys saadaan yhtälöstä (44):

$$L_{n,ij} = L_{n,i,situ} - \Delta L_{i,situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - \left(10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \quad (44)$$

jossa $L_{n,i,situ}$ on lattiarakenteen normalisoitu askeläänitaso, $R_{i,situ}$ on lattiarakenteen ilmaääneneristävyys lähetyshuoneessa ja $R_{j,situ}$ reitin vastaanottopuolen rakennusosan ilmaääneneristävyys.

Suomessa askelääneneristävyyttä tarkastellaan standardisoidun askelääneneristävyyksluvun $L_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ avulla, jossa on myös mukana spektripainotusermi $C_{I,50-2500}$ (Ympäristöministeriö, 2017). Normalisoidun askeläänitason L'_n ja standardisoidun askeläänitason L'_{nT} , välillä on yhteys (SFS-EN ISO 12354-2 2017):

$$L'_{nT} = L'_n - 10 \log \left(\frac{C_{sab} V}{A_0 T_0} \right) \quad (45)$$

Spektripainotusermi $C_{I,50-2500}$ määritetään kappaleessa 2.2.2 esitetyllä tavalla.

2.3.3 Liitoseristävyys

Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laskentamallissa äänen etenemistä liitoksen yli tarkastellaan suuntakeskiarvoistetun nopeustasoeron *in situ* $\overline{D_{v,ij,situ}}$ (yhtälö (32)) avulla. Nopeustasoero $\overline{D_{v,ij,situ}}$ kuitenkin riippuu tarkasteltavasta tilanteesta: liitoksen dimensiot, liittyvien rakennusosien häviöt ja reunaehdot kaikki vaikuttavat rakennusosien ja liitoksen värähtelykäyttäytymiseen, ja täten myös nopeustasoeroon $\overline{D_{v,ij,situ}}$. Suuntakeskiarvoistetun nopeustasoeron määritelmässä yhtälössä (32) esiintyy tarkasteltavan liitoksen liitoseristävyys K_{ij} . Gerretsen (1996) määritteli liitoseristävyyden K_{ij} tilanteesta riippumattomaksi suureeksi, jolla liitoksen värähtelykäyttäytymistä voidaan kuvata.

Liitoseristävyys K_{ij} voidaan mitata standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) mukaisella menetelmällä. Standardissa liitoseristävyys K_{ij} rakennusosien i ja j liitoksen yli määritellään yhtälöllä (46):

$$K_{ij} = \overline{D_{v,ij}} + 10 \log \left(\frac{1}{\sqrt{a_i a_j}} \right) = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \left(\frac{1}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \quad (46)$$

jossa a_i ja a_j ovat liittyvien rakennusosien ekvivalentit absorptiopituudet mittaustilanteessa. Liitoksen mitattu suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero normalisoidaan rakennusosien rakenteellisilla jälkikaiunta-ajoilla, jolloin vain liitoksen itsensä vaikutus värähtelyn vaimenemiseen jää jäljelle.

Liitoseristävyys voidaan standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) mukaan mitata joko kentällä tai laboratoriossa. Liitoseristävyden laboratoriomittausta varten rakennetaan koeliitos, jolle mittaukset suoritetaan. Koeliitoksen mitat valitaan standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) kohdan 6.1 mukaan.

Liitoseristävyden mittaus standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) mukaisesti perustuu liittyvien rakennusosien välisen suuntakeskiarvoistetun nopeustasoeron $\overline{D_{v,ij}}$ ja liittyvien rakennusosien rakenteellisten jälkikaiunta-aikojen T_s mittaamiseen. Suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero $\overline{D_{v,ij}}$ määritetään mittaamalla nopeustasoerot $D_{v,ij}$ [dB] ja $D_{v,ji}$ [dB] liitoksen yli kumpaankin suuntaan, ja laskemalla näiden tasoerojen aritmeettinen keskiarvo (SFS-EN ISO 10848-1 2017)

$$\overline{D_{v,ij}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \quad (47)$$

Liitoseristävyden mittaus tehdään käyttäen runkoääniherätettä. Herätteenä voidaan käyttää joko standardin SFS-EN ISO 10140-5 (2010) mukaista askeläänikojetta, vasaraa tai elektromagneettista tärhistintä. Askeläänikojetta käytettäessä tulee askeläänikoje asettaa 45° kulmaan herätettävän rakennusosan pituussuuntaan nähden. (SFS-EN ISO 10848-1 2017)

Nopeustasoeron mittaamiseksi ensin rakennusosalta i valitaan vähintään neljä herätepistettä, jos kyseessä on tyyppin A rakennusosa. Tyyppin B rakennusosille herätepisteiden vähimmäismäärä on kuusi. Tämän jälkeen sekä rakennusosalta i että rakennusosalta j valitaan vähintään kolme mittauspistettä. Herätepisteiden valinnassa noudatetaan standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) kohdan 7.2.5 ohjeita:

- Herätepisteiden etäisyys rakennusosan reunalta on oltava vähintään 0,5 metriä
- Herätepisteiden välisen etäisyyden on oltava vähintään 1,0 metri (tyyppi A)
- Herätepisteiden välisen etäisyyden on oltava vähintään 0,7 metriä (tyyppi B)
- Herätepisteiden etäisyys tarkasteltavasta liitoksesta tulee olla vähintään 1 metri

Vastaavasti mittauspisteiden paikkojen valinnassa noudatetaan seuraavia ohjeita:

- Mittauspisteiden ja herätepisteiden välinen etäisyys tulee olla vähintään 1,0 metri.
- Mittauspisteiden etäisyys rakennusosan reunalta on oltava vähintään 0,25 metriä.
- Mittauspisteiden välisen etäisyyden tulee olla vähintään 0,5 metriä.

Mittaus suoritetaan herättämällä ensin rakennusosa i valitulla herätteellä, ja mittaamalla sekä osan i että osan j pinnan normaalin suuntainen nopeus v [m/s] kaikissa kolmessa mittauspisteessä. Mittaus toistetaan kullekin rakennusosalta i valitulle herätepisteelle. Mitattujen pintanopeuksien v avulla määritetään kunkin rakennusosan keskimääräinen nopeustaso yhtälöstä (48):

$$L_v = 10 \log \left(\frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} v^2(t) dt}{v_0^2} \right) \quad (48)$$

jossa T_m on mittauksen kesto, ja $v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$. Kun käytetään ajasta riippumatonta (*steady state*) herätettä, eli askeläänikojetta tai tärastintä, voidaan nopeustaso määrittää myös yhtälöstä :

$$L_v = 10 \log \left(\frac{\tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_2^2 + \dots + \tilde{v}_n^2}{n \cdot v_0^2} \right) \quad (49)$$

jossa \tilde{v}_1 , \tilde{v}_2 ja \tilde{v}_n ovat rakennusosan pinnasta mitatut RMS (root-mean-square) nopeudet n mittauspisteestä. Kun mittaus on suoritettu, valitaan standardin mukainen määrä herätepisteitä rakennusosalta j , sekä mittauspisteet kummaltakin rakennusosalta ja toistetaan mittaus toiseen suuntaan liitoksen yli. Nopeustasoero rakennusosasta i osaan j ja päinvastoin määritetään yhtälöstä (50) (SFS-EN ISO 10848-1 2017):

$$\begin{aligned} D_{v,ij} &= L_{v,i} - L_{v,j} \\ D_{v,ji} &= L_{v,j} - L_{v,i} \end{aligned} \quad (50)$$

Liitoseristävyyden määrittämiseksi on tunnettava nopeustasoerojen lisäksi myös tarkasteltavien rakennusosien rakenteelliset jälkikaiunta-ajat mittaustilanteessa $T_{s,i}$ ja $T_{s,j}$. Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan mittaus suoritetaan standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) kohdan 7.3 mukaisesti käyttäen standardin SFS-EN ISO 3382-2 (2008) mukaista integroidun impulssivasteen menetelmää. Rakenteen impulssivaste mitataan käyttäen herätteenä vasaraa tai sähkömagneettista tärinintä. Rakenteen vaste mitataan käyttäen kiihtyvyyssantureita. Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan mittaamiseksi rakenteeseen kohdistetaan heräte vähintään kolmessa pisteessä, joista jokaista kohden valitaan vähintään kolme mittauspistettä. (SFS-EN ISO 10848-1 2017)

Standardin SFS-EN ISO 10848-1 kohdan 4.3.3 mukaan tarkasteltavien rakennusosien välisen suuntakeskiarvoistetun nopeustasoeron $\overline{D_{v,ij}}$ on täytettävä ehto:

$$\overline{D_{v,ij}} \geq 3 \text{ dB} - 10 \log \left(\frac{m'_i f_{c,j}}{f_{c,i} m'_j} \right) \quad (51)$$

jossa f_c [Hz] on rakennusosan koinsidenssin rajataajuus ja m' [kg/m²] rakennusosan pintamassa. Mikäli ehto ei täyty, ovat rakennusosat liian vahvasti kytkeytyneet toisiinsa, eikä liitoseristävyys K_{ij} välttämättä kuvaa liitoksen toimintaa kaikissa tilanteissa. Standardin mukaan nopeustasoeroa voidaan kasvattaa lisäämällä rakennusosien häviöitä kasvattamalla niiden kokoa, ja kytkemällä ne muihin rakenteisiin. Tällöin rakennusosien välisen vahvan kytkennän vaikutus vähenee. (SFS-EN ISO 10848-1 2017)

Koska liitoseristävyyden mittaaminen ei ole aina mahdollista, standardin SFS-EN 12354-1 (2017) liitteissä E ja F esitetään raskarakenteisten ja kevytrakenteisten rakennusten liitosten liitoseristävyyksiä perustuen teoriaan ja empiiriseen tutkimukseen. Liite on kuitenkin informatiivinen, eivätkä siinä esitetyt liitoseristävyydet päde kaikkiin tilanteisiin. Liite ei myöskään sisällä kaikkiin tilanteisiin sopivia liitoseristävyyksiä. Kappaleessa E.3 liitoseristävyydet määritetään suuren M [-] avulla, joka saadaan yhtälöstä (52):

$$M = \log \frac{m'_{\perp,i}}{m'_i} \quad (52)$$

jossa m'_i [kg/m²] on rakennusosan i pintamassa ja $m'_{\perp,i}$ [kg/m²] osaan i kohtisuorasti liittyvän rakennusosan pintamassa. Standardin osiossa E.3 liitoseristävyydet K_{ij} määritellään suureen M funktiona erilaisille raskaiden rakenteiden välisille liitostyypeille. Liitteessä käsitellään myös kevyiden (tyypin B) rakennusosien liitokset raskaisiin rakenteisiin. Osassa E.3 liitoseristävyyttä käsitellään pääasiassa taajuudesta riippumattomana suurena. (SFS-EN ISO 12354-1 2017) Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa: liitosten liitoseristävyyden on useassa eri tapauksessa todettu olevan taajuudesta riippuva suure (Ramis et al. 2012; Poblet-Puig & Guigo-Carter 2015; Hopkins et al. 2016). Liitoksessa

mahdollisesti esiintyvien epäjatkuvuuskohtien vaikutus värähtelyn vaimenemiseen on niin ikään taajuuudesta riippuva (Cremer et al. 2005; Fujiwara 1983)

Gerretsenin (1979) alkuperäisen laskentamallin mukaan liitoksen eristävyys riippuu pääasiassa liittyvien rakennusosien massojen suhteesta. Crispin et al. (2014) osoittivat kuitenkin myöhemmin mittausten ja numeeristen simulaatioiden avulla, että karakterististen momentti-impedanssien avulla määritetyt liitoseristävyudet K_{ij} vastaavat paremmin mitaus- ja simulaatiotuloksia kuin standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) kohdassa E.3 esitetyt approksimaatiot. Hopkins et al. (2016) vahvistivat Crispinin (2014) havainnot, minkä johdosta standardiin lisättiin kohta E.4, jossa esitetään numeerisiin simulaatioihin perustuvia lausekkeita liitoseristävyuden laskemiseksi joillekin liitostyypeille. Lausekkeissa esitetään liitoksen runkoäänän läpäisykerroin γ_{ij} [-] karakterististen momentti-impedanssien suhteen funktiona. Standardissa suhdetta kutsutaan PC-suhteeksi, ja se on määritelty liitoksen muodostavien rakennusosien pintamassojen ja kriittisten taajuuksien avulla (SFS-EN ISO 12354-1 2017):

$$PC\text{-suhde} = \frac{m'_{\perp,i}}{m'_i} \left(\frac{f_{c,i}}{f_{c,\perp,i}} \right)^{3/2} \quad (53)$$

PC-suhteen avulla voidaan edelleen määrittää liitoksen runkoäänän läpäisykerroin γ_{ij} (SFS-EN ISO 12354-1 2017). Homogeenisten rakennusosien liitoksen eristävyys voidaan määrittää liitoksen runkoäänän läpäisykerroimen γ_{ij} avulla yhtälöstä

$$K_{ij} = -10 \log \left(\gamma_{ij} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_{c,i}}} \right) = -10 \log \left(\gamma_{ij} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_{c,j}}} \right) \quad (54)$$

jossa $f_{c,i}$ ja $f_{c,j}$ ovat rakennusosien i ja j kriittiset taajuudet (Gerretsen 1996).

Numeerisia simulaatioita on käytetty liitosten toiminnan tarkasteluun kirjallisuudessa paljon. Hopkins (2003) tarkasteli värähtelyn etenemistä rakenteissa ja niiden liitoksissa käyttäen elementtimenetelmää (FEM) ja värähtelymittauksia, keskittyen erityisesti muurattuihin rakenteisiin, joiden ominaismuotoiheys on matala. Hopkins osoitti, että elementtimenetelmä soveltuu nopeustasoerojen määrittämiseen betoni- ja muuratuissa rakenteissa.

Crispin et al. (2014) käyttivät FEM-simulaatioita tarkastellakseen karakterististen momentti-impedanssien suhteen soveltuvuutta liitoseristävyuden laskennalliseen määrittämiseen. Poblet-Puig & Guigou-Carter (2015) puolestaan käyttivät perinteisen elementti-

menetelmän lisäksi spektraalielementtimenetelmää (SFEM) nopeustasoeron $\overline{D_{v,lj}}$ ja liitoseristävyyden K_{ij} parametriseen analyysiin tarkastellakseen eri tekijöiden vaikutusta liitoseristävyyteen.

Hopkins et al. (2016) käyttivät niin ikään FEM- ja SFEM-laskentaa sekä tilastollista energia-analyysiä liitoseristävyyden tarkasteluun tarkoituksenaan tukea tuolloin työn alla olutta standardin EN ISO 12354-1 päivitystä. Astolfi et al. (2019) käyttivät FEM-simulaatioita tarkastellakseen Hopkins et al. (2016) ja Crispin et al. (2014) työn tuloksena standardiin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) lisätyn kohdan E.4 soveltuvuutta perinteisten ja kevytrakenteisten rakenteiden liitoksien tarkasteluun.

2.3.4 Rakenteellinen jälkikaiunta-aika

Rakenteellinen jälkikaiunta-aika T_s kuvaa värähtelyn vaimenemisen nopeutta rakenteessa, samoin kuin jälkikaiunta-aika T kuvaa äänen vaimenemista huoneen ilmatilassa. Tavanomaisin tapa määrittää rakenteellinen jälkikaiunta-aika on mittaamalla standardin ISO 10848-1 (2017) mukaisesti.

Koska rakenteellisen jälkikaiunta-ajan mittaaminen ei usein ole mahdollista rakennuksen suunnitteluvaiheessa, eikä tarkasteltavaan tilanteeseen sopivaa mittausdataa välttämättä ole saatavilla, standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) liitteessä C esitetään keinoja rakenteen jälkikaiunta-ajan T_s arvioimiseksi laboratorio ja *in situ* -tilanteissa. Liitteen C menetelmät perustuvat rakenteen kokonaishäviökertoimen η_{tot} arviointiin. Kokonaishäviökertoimen määrittäminen standardin mukaisesti sekä muilla menetelmillä on esitetty kapaleessa 2.3.5. Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan ja kokonaishäviökertoimen välillä on yhteys (SFS-EN ISO 12354-1 2017):

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{tot}}. \quad (55)$$

Standardin menetelmillä voidaan arvioida rakenteen jälkikaiunta-aikaa sekä laboratoriotilanteessa että *in situ* -tilanteessa (SFS-EN ISO 12354-1 2017).

2.3.5 Kokonaishäviökerroin

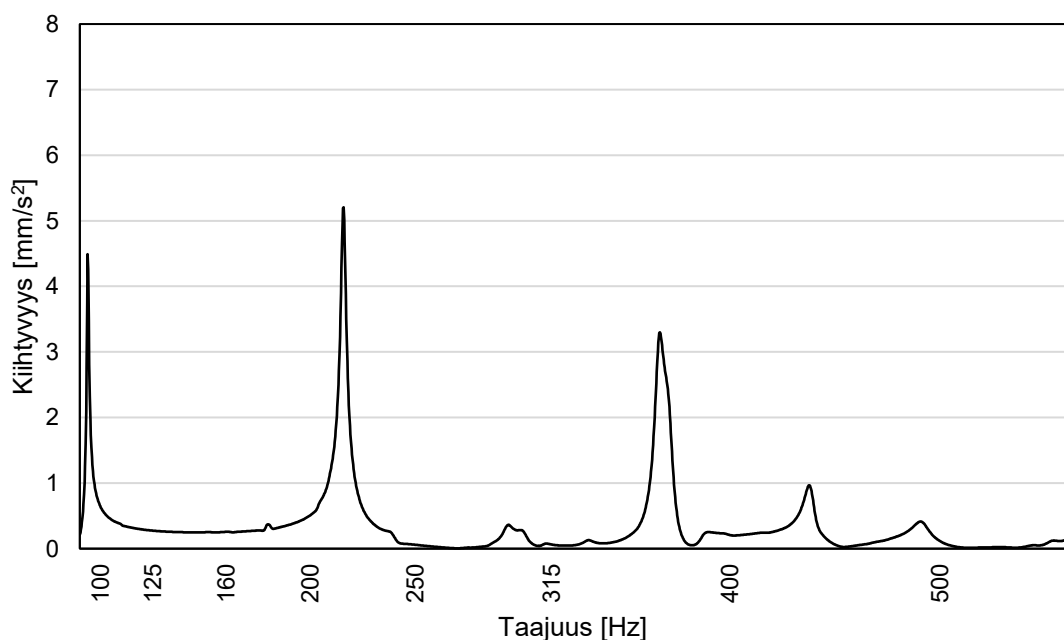
Rakennusosan kokonaishäviökerroin on suure, joka kuvaa värähtelyn vaimenemista rakenteessa. Rakennusosan kokonaishäviökerroin koostuu osan sisäisistä häviöistä, kytkentöjen aiheuttamista häviöistä ja säteilyhäviöistä. Rakennusosan sisäisillä häviöillä tarkoitetaan rakennusosan värähtelyenergian muuttumista muiksi energiamuodoiksi, erityisesti lämmöksi. Kytkennöistä johtuvat häviöt riippuvat rakennusosaan liittyvistä raken-

nusosista ja siitä, kuinka tehokkaasti värähtely kykenee siirtymään näiden rakennusosien välillä. Rakennusosa on myös kytkeytynyt sen rajaaman huonetilan ilmaan, johon osa sen värähtelyenergiasta siirtyy, herättäen ilmaääniä ilmatilassa. Tätä kutsutaan säteilyhäviöksi. (Hopkins 2007).

Rakenteen kokonaishäviökerroin voidaan määrittää kokeellisesti erilaisilla menetelmillä. Kokonaishäviökerroin voidaan määrittää esimerkiksi käyttämällä puolen tehon kaistanleveysmenetelmää (*half-power bandwidth*, HPB) tai tarkastelemalla rakenteen värähtelyn vaimenemista ajan suhteen (*decay rate*). (Lyon & Dejong 1995)

Rakenteen vaimenemisnopeus voidaan määrittää mittaamalla rakenteen vasteen amplitudi ajan suhteen. Kun rakenteeseen kohdistettu heräte kytketään äkillisesti pois, rakenteen värähtely alkaa vaimenemaan sen häviöiden vaikutuksesta. Rakenteen ajan suhteen mitatun vasteen amplitudin avulla voidaan määrittää joko sen vaimenemisnopeus tai rakenteellinen jälkikaiunta-aika T_s , joista voidaan edelleen määrittää rakenteen kokonaishäviökerroin. (Lyon & DeJong 1995)

Toinen kokeellinen tapa määrittää rakenteen kokonaishäviökerroin on HPB-menetelmä, jossa tarkastellaan rakenteen taajuusvasteen resonanssipeikkien kaistanleveyksiä. Yleensä tarkastellaan niin sanottua puolen tehon kaistanleveyttä, eli niiden kahden taajuuden etäisyyttä, joilla rakenteen taajuusvasteen arvo on laskenut 3 dB resonanssin maksimiarvosta. (Lyon & DeJong 1995) HPB-menetelmällä voidaan määrittää rakenteen kokonaishäviökerroin sen ominaistaajuuksilla, tai taajuusvasteen huippukohtia vastaavilla taajuuksilla. Esimerkki rakenteen kiihtyvyydvasteesta taajuustasolla on esitetty kuvassa 8.

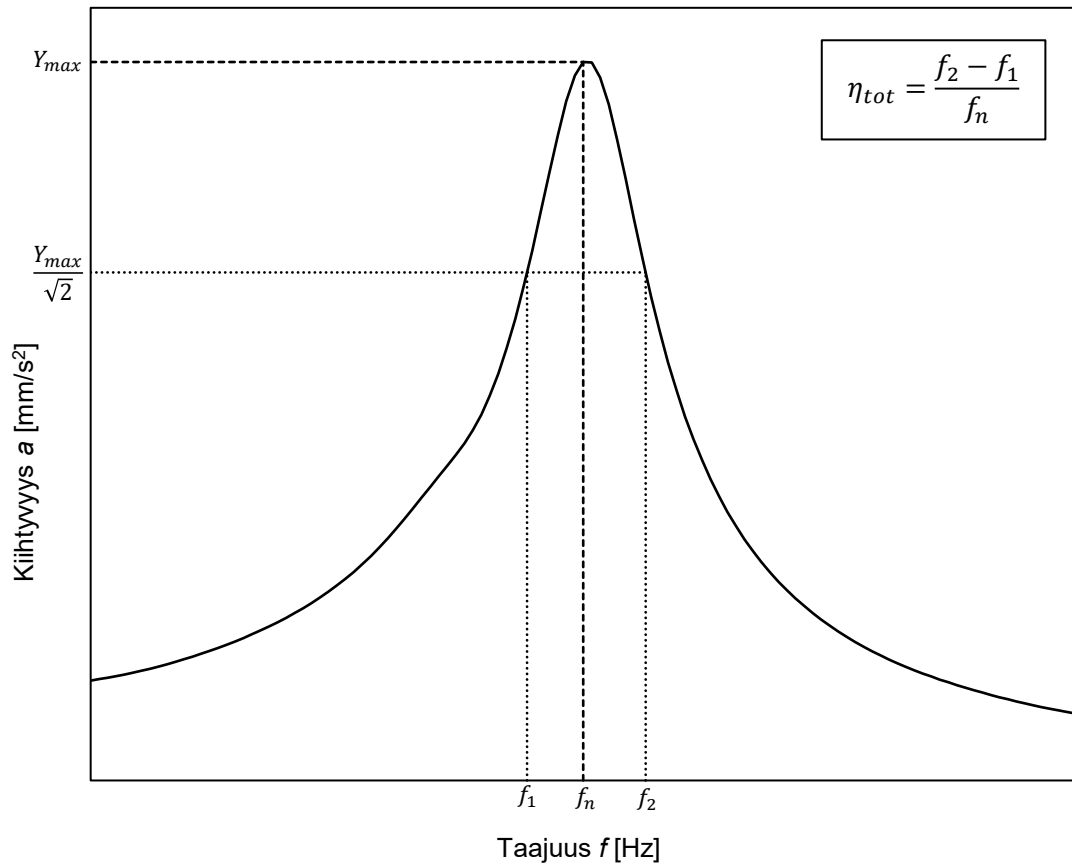


Kuva 8. *Esimerkki rakenteen taajuusvasteesta. Kuvaajassa on esitetty rakenteen pinnan normaalisuuntainen kiihtyvyys taajuuden funktiona.*

Kun rakenteen vaste esitetään lineaarisessa asteikossa, voidaan resonanssin huippuarvoa 3 dB alempi arvo määrittää kaavasta

$$\frac{Y_{max}}{\sqrt{2}} \quad (56)$$

jossa Y_{max} on vasteen huippuarvo (Rydberg 2013). Kun resonanssin huippuarvo Y_{max} ja sitä 3 dB alhaisempi taso tunnetaan, voidaan taajuusvastekäyrältä määrittää puolta tehoa vastaavat taajuudet f_1 ja f_2 . Puolen tehon rajataajuuksien määrittämisen periaate on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. *Puolen tehon kaistanleveyden määrittäminen systeemin taajuusvasteen avulla.*

Kokonaishäviökerroin η_{tot} määritetään rakenteen taajuusvasteen huippuarvoa vastaavan taajuuden f_n sekä rajataajuuksien f_1 ja f_2 avulla kaavasta

$$\eta_{tot} = \frac{f_2 - f_1}{f_n} \quad (57)$$

HPB-menetelmän käyttö edellyttää, että rakenteen vaste voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella kaistanleveyksien määrittämiseksi. Vasteen määrittämisessä käytettävän taajuushilan tiheys voidaan määrittää kaavasta (Rydberg 2013)

$$\frac{\Delta f}{2} = \frac{f_n \eta_{tot}}{2} \quad (58)$$

Taajuushilan tiheyden määrittäminen vaatii ennakkotietoa tarkasteltavien häviöiden suuruusluokasta. Materiaalien sisäinen häviökerroin yleensä tunnetaan, joten kokonaishäviökertoimen suuruusluokan arvioiminen on mahdollista kohtuullisella tarkkuudella.

Rakenteen kokonaishäviökerrointa voidaan myös arvioida erilaisten sovitteiden avulla. Standardin ISO 12354-1 (2017) liitteessä C esitetään ohjeita laattamaisten rakenneosien kokonaishäviökertoimen arvioimiseen. Standardin mukaan kokonaishäviökerrointa *in situ* voidaan arvioida kaavalla (59)

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{X}{\sqrt{f}} \quad (59)$$

jossa X on vakio, joka riippuu tarkasteltavasta rakennejärjestelmästä. Mitä suurempi vakion X arvo on, sitä suurempi on myös kokonaishäviökerroin. Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) mukaan vakiolle X voidaan käyttää mm. seuraavia arvoja:

- $X = 1$ muuratuille tai betonisille elementeille, kun ne kytkeytyvät ainakin kahteen seinään jokaisella sivullaan.
- $X = 0,05$ raskarakenteisille elementeille, jotka kytkeytyvät pääasiassa kevyisiin rakenteisiin.

Kokonaishäviökerroin voi vaihdella riippuen tarkasteltavasta rakenteesta ja sen kytkennöistä, ja se voi poiketa kaavan (59) approksimaatiosta. Hopkinsin (2007) mukaan vakion X arvot $0,3 \leq X \leq 1$ kattavat tavanomaisimmat kokonaishäviökertoimen arvot muuratuille rakenteille ja betonirakenteille. Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) liitteessä C esitetään myös sovite laboratorioaukkoon asetetun rakenteen taajuusriippuvaiselle kokonaishäviökertoimelle, joka voidaan määrittää yhtälöstä (60)

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (60)$$

jossa m' on tarkasteltavan rakenteen pintamassa.

2.4 Tilastollinen energia-analyysi

Tilastollinen energia-analyysi (*statistical energy analysis, SEA*) on laskennallinen menetelmä, jolla voidaan tarkastella esimerkiksi äänen siirtymistä tilojen välillä. Tilastollisen energia-analyysin käyttö perustuu tarkasteltavan systeemin muodostavien osasysteemien välisen energian siirtymisen tarkasteluun. Tilastollisessa energia-analyysissä oletetaan, että osasysteemien välinen energiatiheysero pyrkii tasaantumaan osasysteemejä yhdistävien kytkentöjen kautta. Esimerkiksi äänen siirtymistä huoneiden välillä tarkasteltaessa huoneen muodostavat rakennusosat voidaan ajatella omiksi osasysteemeikseen, ja kunkin huoneen ilmatilat omiksi systeemeikseen. (Uosukainen 2013)

Tilastollisen energia-analyysin käytöllä on tiettyjä edellytyksiä. Tarkasteltavissa osasysteemeissä vallitsevien ääni- ja värähtelykenttien on käyttäydyttävä tilastollisesti, eli niiden on oltava diffuuseja. Lisäksi osasysteemien ominaismuotoiheyksien on oltava suuria, ja niiden välisten kytkentöjen heikkoja. (Uosukainen 2013) SEA-malleilla on kuitenkin merkittäviä etuja verrattuna deterministisiin laskentamalleihin: tarkastelemalla vain osasysteemien energiavastetta, vähenee tarkasteltavien vapausasteiden määrä merkittävästi deterministisiin malleihin verrattuna. Lisäksi se, että SEA-mallit perustuvat energiavirtojen tarkastelemiseen, mahdollistaa tärkeimpien energian siirtymisreittien löytämisen osasysteemien välillä. (Lyon & DeJong 1995)

SEA-laskentamalleilla on monia hyötypuolia, mutta niiden käytölle asetetut ehdot rajoittavat niiden soveltuvuutta rakennusakustisten ongelmien ratkaisussa. Monien rakennuksissa tyypillisesti esiintyvien rakenteiden, esimerkiksi betonirakenteiden, ominaismuotoiheydet ovat matalia. Tällöin SEA-malleilla on tapana yliarvioida osasysteemien välistä kytkentymistä, mikä voi johtaa virheellisiin laskentatuloksiin (Hopkins 2003).

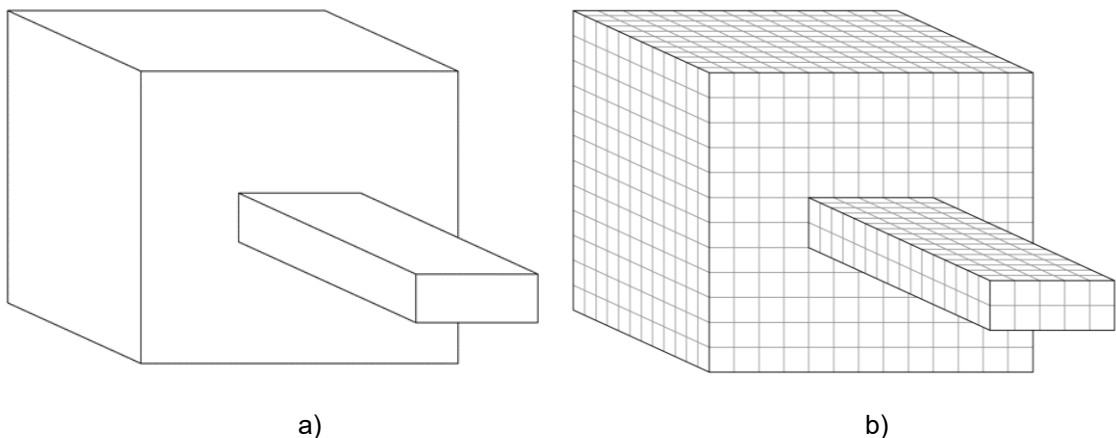
2.5 Elementtimenetelmä

Fyysisiä ilmiöitä kuvaavien differentiaaliyhtälöiden ratkaiseminen voi ongelman luonteesta riippuen olla varsin vaikeaa. Tällöin numeeristen menetelmien avulla voidaan approksimoida riittävän tarkka ratkaisu. Elementtimenetelmää voidaan käyttää fyysisten ilmiöiden mallintamiseen, joiden tutkiminen analyttisillä matemaattisilla malleilla ei ole mahdollista ongelman monimutkaisuuden vuoksi. Elementtimenetelmää käytetään esimerkiksi autoteollisuudessa, elektroniikassa ja nano- ja bioteknologian saralla. (Reddy 2019). FE-menetelmä soveltuu myös rakennusakustisten ongelmien tarkasteluun (Howard & Cazzolato 2015).

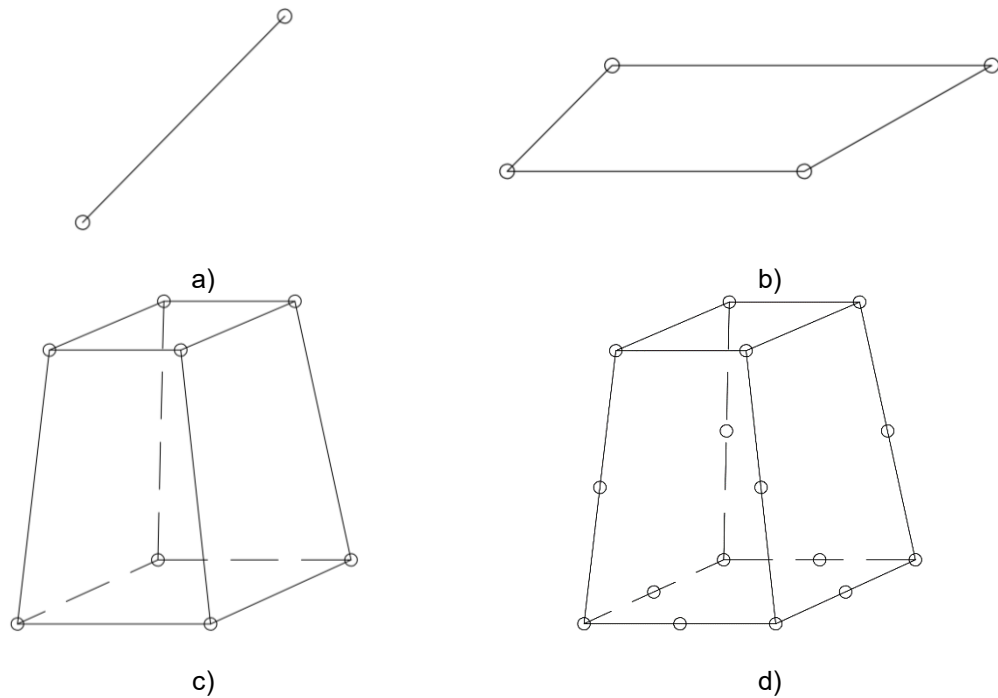
2.5.1 Elementtimenetelmän periaatteet

FE-analyysissä käsiteltävää fysikaalista ilmiötä kuvaavien osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisua approksimoidaan määrittämällä osittaisdifferentiaaliyhtälöiden heikko integraalimuoto ja sen ratkaisu. Osittaisdifferentiaaliyhtälöstä voidaan muodostaa sen vahva integraalimuoto, joka vastaa alkuperäistä yhtälöä. Yhtälön vahva integraalimuoto ei kuitenkaan huomioi tarkasteltavan ongelman reunaehtoja. Ongelman ratkaisemiseksi muodostetaan edelleen yhtälön heikko integraalimuoto, joka on approksimaatio vahvan integraalimuodon ratkaisusta. Osittaisdifferentiaaliyhtälön heikko integraalimuoto huomioi tarkasteltavaan tilanteeseen liittyvät reunaehdot. Lisäksi se sisältää matalamman asteen derivointia kuin vahva integraalimuoto. (Atalla & Sgard 2015)

FE-menetelmässä tarkasteltava geometria jaetaan pienempiin osasiin, joita kutsutaan elementeiksi (kuva 10). Tarkasteltavaa fysikaalista ilmiötä kuvaavan osittaisdifferentiaaliyhtälön ratkaisun approksimaatio määritetään kussakin elementissä. (Reddy 2019) Elementit ovat yleensä yksinkertaisia geometrisia muotoja, kuten viivoja, suorakaiteita tai tetraedrejä. (Atalla & Sgard 2015) Esimerkkejä erilaisista elementtityypeistä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 10. Esimerkki yksinkertaisen rakenteen elementtiverkosta. Kuvassa a) on verkottamaton rakenne, ja kuvassa b) on sama rakenne jaettuna elementteihin.



Kuva 11. Esimerkkejä eri elementtityypeistä.
 Ympyrät kuvastavat elementtien solmukohtia.
 a) palkkielementti b) 2D-kuorielementti
 c) lineaarinen heksaedri 3D-elementti
 d) kvadraattinen heksaedri 3D-elementti.
 Perustuu ANSYS®-manuaaliin (ANSYS Element Reference 2021)

Elementtimenetelmässä voidaan hyödyntää erilaisia elementtityyppejä, esimerkiksi palkki-, kuori- ja 3D-elementtejä. Lisäksi on olemassa erilaisiin käyttötarkoituksiin kehitettyjä elementtitekniikoita, kuten esimerkiksi elementit, jotka kuvaavat ääretöntä tai täysin absorboivaa reunaehtoa. Kuhunkin malliin sopiva elementtitekniikka on valittava mallinnettavan geometrian perusteella. Ohuiden, levyäisten rakenteiden mallinnuksessa kuorielementit ovat 3D-elementtejä parempi valinta, kun taas monimutkaisen 3D-geometrian mallinnus vaatii 3D-elementtien käyttöä. Yksinkertaisia viivamaisia muotoja, esimerkiksi palkkeja tai pilareita, voidaan puolestaan mallintaa palkkielementteinä.

2.5.2 Elementtimenetelmä akustiikassa

Elementtimenetelmää voidaan käyttää monien eri akustiikan ilmiöiden tarkasteluun. FEM-mallinnuksella on esimerkiksi mahdollista määrittää rakenteiden ilmaääneneristävyyksiä, materiaalien absorptio-ominaisuuksia tai tarkastella äänen säteilyä värähtelevästä pinnasta. (Howard & Cazzolato 2015)

Elementtimenetelmä mahdollistaa useita erilaisia analyysityyppejä, joita voidaan hyödyntää akustiikan ongelmien tarkastelussa. ANSYS® -ohjelmistossa voidaan tehdä esimerkiksi seuraavia tarkasteluja (Howard & Cazzolato 2015):

- Moodianalyysi
- Harmoninen analyysi
- Transienttianalyysi

Moodianalyysin avulla voidaan tutkia jonkin rakenteen moodi- eli ominaistajuuksia (*natural frequency, mode frequency*). Moodianalyysin tuloksia voidaan hyödyntää harmonisessa tai transienttianalyysissa, kun mallin vasteen ratkaisemiseen käytetään niin sanottua moodisuperpositio-tekniikkaa (*modal superposition, MSUP*). (Howard & Cazzolato 2015)

Harmonisen analyysin avulla voidaan tarkastella mallin ajasta riippumatonta (*steady state*) vastetta, harmoniseen herätteeseen. Herätteenä voi toimia esimerkiksi voima, siirtymä tai akustinen paine (Howard & Cazzolato 2015). Harmoninen analyysi voidaan tehdä useilla eri taajuuksilla mallin vasteen selvittämiseksi halutulla taajuusalueella. Harmoninen analyysi voidaan ratkaista myös käyttäen hyödyksi edellä mainittua moodianalyysia. Moodianalyysin avulla selvitettyjen mooditaajuuksien avulla mallin vaste harmoniselle herätteelle voidaan ratkaista MSUP-tekniikalla. (Howard & Cazzolato 2015). MSUP-tekniikalla mallin mooditaajuuksia vastaavia moodimuotoja yhdistelemällä voidaan ratkaista mallin vaste myös muilla kuin mooditaajuuksilla (Howard & Cazzolato 2015).

Harmonisessa analyysissä puhtaasti rakenteellisen mallin vaste harmoniseen herätteeseen ratkaistaan liikeyhtälöstä

$$(-\omega^2[M_S] + j\omega[C_S] + [K_S])\{u\} = \{f_S\} \quad (61)$$

jossa $\{u\}$ [m] on rakenteen siirtymävektori, $\{f_S\}$ on rakenteen herätevoimavektori ja $[M_S]$, $[C_S]$ ja $[K_S]$ ovat rakenteen massa-, vaimennus- ja jäykkyysmatriisit. (ANSYS Mechanical APDL Theory Reference 2022) Puhtaasti akustisen mallin vaste ratkaistaan vastaavasti liikeyhtälöstä:

$$(-\omega^2[M_F] + j\omega[C_F] + [K_F])\{p\} = \{f_F\} \quad (62)$$

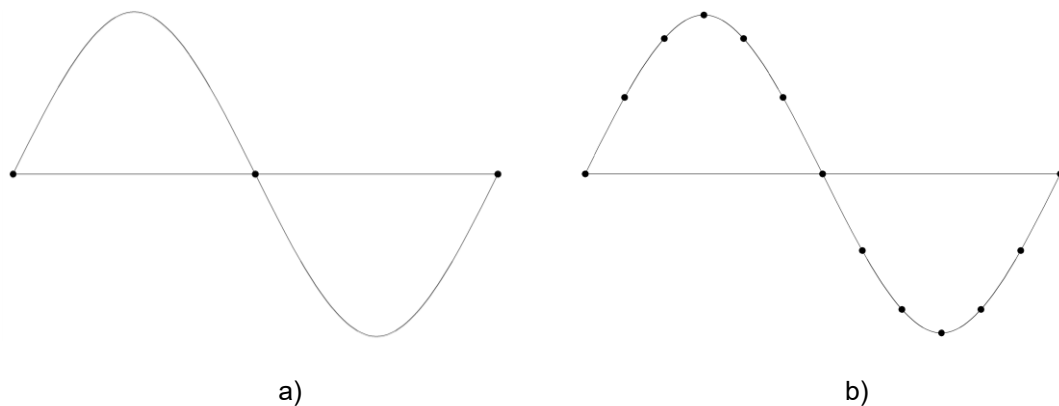
jossa ω [1/s] on kulmataajuus, $\{p\}$ [Pa] on äänenpainevektori, $\{f_F\}$ on malliin kohdistuva harmoninen voimavektori, $[M_F]$ on fluidin massamatriisi, $[C_F]$ fluidin vaimennusmatriisi ja $[K_F]$ fluidin jäykkyysmatriisi (ANSYS Mechanical User's Guide 2022). Jos mallissa tarkastellaan akustisen fluidin, esimerkiksi ilman, ja rakenteen välistä vuorovaikutusta (*fluid structure interaction, FSI*), voidaan mallin harmoninen vaste ratkaista yhtälöstä:

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \bar{\rho}_0[R]^T & [M_F] \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_S \\ f_F \end{Bmatrix} \quad (63)$$

jossa $\bar{\rho}_0$ ja $[P]$ ovat rakenteen ja fluidin kytkentään liittyviä alimatriiseja (ANSYS Mechanical APDL Theory Reference 2022).

Transienttialyysissä ratkaistaan mallin vaste ajan suhteen. Transienttialyysi ei ole lineaarinen kuten yllä mainitut moodi- ja harmoninen analyysi, vaan transienttialyysi voi myös sisältää epälineaarisia ilmiöitä. Transienttialyysiä voidaan käyttää esimerkiksi huoneen jälkikaiunta-ajan simulointiin. (Howard & Cazzolato 2015).

Kun elementtimenetelmää käytetään akustisten ongelmien tarkasteluun, analyysin tarkkuuden kannalta tärkeä asia on äänen ja värähtelyn aallonpituuden suhde mallin elementtiverkon tiheyteen. Jotta äänen värähtelyä akustisessa fluidissa tai rakenteessa voidaan tarkastella riittävällä tarkkuudella, täytyy mallin elementtiverkon koon olla riittävän pieni. Elementtiverkon tiheys määräytyy tarkasteltavan aaltoliikkeen aallonpituuden perusteella. Elementtiverkon solmukohtien täytyy olla riittävän tiheässä, jotta akustisen fluidin tai rakenteen vaste voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella. Kuvassa 12 on esitetty elementtikoon vaikutus mallin vasteen määrittämiseen, kun käytetään lineaarisia elementtejä.



Kuva 12. Elementtikoon vaikutus mallin vasteen määrittämisessä. Pisteet kuvastavat elementtien solmukohtia. Sinimuotoinen viiva kuvastaa rakenteessa tai ilmassa etenevää ääniaaltoa.

a) Mallin elementtikoko on $1/2$ äänen aallonpituudesta.

b) Mallin elementtikoko on $1/12$ äänen aallonpituudesta.

Kuvasta 12a huomataan, että liian harva elementtiverkko johtaa siihen, että rakenteen tai fluidin vasteen huippuarvot voivat jäädä kokonaan havaitsematta. Kuvassa 12b, jossa elementtiverkko on merkittävästi tiheämpi, pystytään mallin vaste määrittämään huomattavasti tarkemmin. Akustisessa analyysissä sopiva elementtikoko on $1/12$ äänen aallonpituudesta, kun käytetään lineaarisia elementtejä. Käytettäessä kvadraattisia elementtejä $1/6$ aallonpituudesta riittää, sillä kvadraattisessa elementissä on yksi solmu myös

elementin sivun keskellä (ks. kuva 11). (Howard & Cazzolato 2015). Äänen aallonpituus λ [m] voidaan määrittää yhtälöstä (64):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (64)$$

jossa c [m/s] on äänen etenemisnopeus väliaineessa (Hopkins 2007).

2.6 Täyttövalun vaikutuksen tarkastelu

Rakennuksessa lattiarakenteena käytettävä tilojen välillä jatkuva ontelolaatasto toimii äänen sivutiesiirtymäreittinä, heikentäen tilojen välistä ääneneristävyyttä. Ääni pääsee kulkeutumaan ontelolaataston kautta runkoäänenä tilasta toiseen. Lisäksi on mahdollista, että avoimen ontelon ilmatilassa heräävä ilmaääni voimistaa ontelolaatan värähtelyä tilojen välisen seinän toisella puolella. Jatkuvan ontelolaataston sivutiesiirtymän hallitsemiseksi Helimäki & Kääriäinen (2013) ehdottivat ontelolaataston täyttövalua tiloja erottavan väliseinän kohdalla, silloin kun tilojen välinen seinä on kevytrakenteinen. Jatkuvan ontelolaatavälipohjan sivutiesiirtymän hallinta ontelolaataston täyttövalulla on teoriassa perusteltua, sillä rakenteeseen lisätty massa vaimentaa rakennetta pitkin etenevää värähtelyä (Cremer et al. 2005). Epäjatkuvuuskohtan vaikutus rakenteiden liitoksessa on kuitenkin kirjallisuuden mukaan vähäinen pienillä taajuuksilla (Cremer et al. 2005; Fujiwara 1983). Täyttövalun vaikutusta ontelolaataston kautta tapahtuvaan sivutiesiirtymään ei kuitenkaan ole kirjallisuudessa tutkittu. On siis mahdollista, että täyttövalu ei juurikaan vaikuta tilojen väliseen ääneneristävyyteen kokonaisuudessaan, ja vaatimusten täytyminen riippuu ennemminkin muista rakenneratkaisuista, talotekniikasta ja rakennustyön laadusta.

Täyttövalun vaikutusta tilojen väliseen ääneneristävyyteen päätettiin tutkia kenttämittausten avulla sekä laskennallisesti. Kenttämittauksilla voidaan tarkastella ääneneristävyyttä tilojen välillä kokonaisuutena. Vertailemalla mittaustuloksia kohteista, joissa täyttövalua on käytetty kohteisiin, joissa täyttövalua ei ole, voidaan arvioida täyttövalun tarpeellisuutta nykyisten ääneneristävyysvaatimusten saavuttamisessa. Kenttämittauksilla ei kuitenkaan voida määrittää itse täyttövalun vaikutusta, sillä tilojen väliseen ääneneristävyyteen vaikuttavat lukuisat muutkin tekijät. Lisäksi valmiiden rakennusten välillä on eroavaisuuksia käytetyissä rakennetyypeissä, huonetilojen koossa, rakennustyön laadussa sekä rakennusten käyttötarkoituksessa. Tällöin täyttövalun vaikutuksen yksilöiminen on käytännössä mahdotonta.

Täyttövalun vaikutusta liitoksen toimintaan päätettiin tarkastella käyttämällä FEM-simulaatioita liitoksen liitoseristävyyden määrittämiseksi. Liitoseristävyys erilaisille liitostyypeille voidaan määrittää standardin SFS-EN 12354-1 (2017) liitteen E avulla. Standardin liite kuitenkin tarjoaa liitoseristävyyksiä vain rajatulle määrälle erilaisia liitostyyppejä, ja osin empiiristen kaavojen tarkkuus ei välttämättä ole riittävä. Tällöin voidaan käyttää vaihtoehtoisia laskentatapoja liitoseristävyyden määrittämiseksi, esimerkiksi SEA-laskentamalleja tai FEM-simulaatioita. Tässä tutkimuksessa päätettiin ontelolaataston ja tilojen välisen seinän liitosta tarkastella FEM-mallilla, sillä täyttövalun huomioiminen standardin approksimaatioilla ei ole mahdollista.

Elementtimenetelmä on kirjallisuuden perusteella toimiva tapa tarkastella rakenteiden ja liitosten värähtelykäyttäytymistä ja liitoseristävyyttä (Ramis et al. 2012; Crispin et al. 2014; Poblet-Puig & Guigou-Carter 2015; Hopkins et al. 2016; Astolfi et al. 2019). FEM soveltuu SEA-pohjaisia laskentamalleja paremmin sellaisten rakenteiden tarkasteluun, joiden ominaismuototiheys on pieni (Hopkins 2003). Lisäksi ontelolaatan toimintaan vaikuttavat sen periodisuus, ortotrooppisuus ja poikkileikkauksen yksityiskohdat, joiden huomioiminen SEA-mallissa olisi vaikeaa, ellei mahdotonta.

Täyttövalun vaikutusta tilojen väliseen ilma- ja askelääneneristävyyteen tarkastellaan laskennallisesti standardien ISO 12354-1 (2017) ja 12354-2 (2017) mukaisilla laskentamenetelmillä. Käyttämällä laskennassa FEM-mallilla määritettyjä liitoseristävyyksiä ontelolaataston sivutiesiirtymäreitille voidaan nähdä täyttövalun vaikutus ääneneristävyyteen kokonaisuutena. Standardien laskentamallien validoimiseen käytetään edellä mainittuja kenttämittauksia.

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Kenttämittaukset

Ontelolaataston täyttövalun vaikutusta tilojen väliseen ääneneristävyyteen tutkittiin sarjalla ääneneristävyydsmittauksia kohteissa, joissa sopivia rakenteita esiintyy. Kaikki mittaukset tehtiin vaakasuuntaan vierekkäisten tilojen välillä. Ääneneristävyydsmittauksissa käytettiin seuraavaa laitteistoa:

- Äänitasomittari Nor140 + kalibraattori Nor1251
- Aktiivipallokaiutin Look Line D203
- Askeläänikoje Sources-Line EM50

Ääneneristävyydsmittauksia suoritettiin sekä kohteissa, joissa ontelolaataston ja kevyen väliseinän liitoskohdassa oli tehty ontelolaataston täyttövalu, että kohteissa, joissa täyttövalua ei olla tehty. Näin pystyttiin tutkimaan ontelolaataston täyttövalun vaikutusta sekä tarpeellisuutta ääneneristävyyksvaatimuksien saavuttamiseksi.

3.1.1 Mittauskohteet

Tutkimusta varten etsittiin Suomesta rakennuskohteita, joissa oli käytetty Helimäen & Kääriäisen (2013) suosittamaa ontelolaataston täyttövalua tilojen välisen kevyen väliseinän yhteydessä. Sopivia mittauskohteita löydettiin neljä kappaletta, joista kolmessa oli käytetty ontelolaataston täyttövalua. Kohteissa mitattiin tilojen välinen standardisoitu äänitasoero $D_{nT,w}$ sekä standardisoitu askeläänitasoluku $L_{nT,w} + C_{I,50-2500}$. Mittauskohteet on esitetty kootusti taulukossa 6.

Taulukko 6. *Tutkimuksessa tarkasteltujen mittauskohteiden tiedot.*

Kohde	Rakennuksen tyyppi	Rakennusvuosi/ valmistumisvuosi	Täyttövalu
Kohde 1	Hotellirakennus	2019	Ei
Kohde 2	Palvelukoti	Kesken	Kyllä
Kohde 3	Asuinkerrostalo	Kesken	Osittain
Kohde 4	Asuinkerrostalo	Kesken	Kyllä

Anonymiteetin säilyttämiseksi mittauskohteisiin viitataan tunnuksilla kohde 1–4. Vertailun vuoksi etsittiin myös kohde, jossa ontelolaattojen täyttövalua ei käytetty (kohde 1). Suurin osa kohteista oli vielä työn alla mitausten aikana, sillä mitausten järjestäminen työmaakohteisiin onnistui helpommin kuin jo asutettuihin kohteisiin. Lisäksi rakenteilla

olevien kohteiden detajjikasta oli helpommin tietoa saatavilla kuin jo valmiiden kohteiden. Mittaukset järjestettiin siten, että työn alla olevien kohteiden rakennustyöt eivät häirinneet mittauksia.

Ilma- ja askelääneneristävyydsmittauksia suoritettiin kussakin kohteessa kaksi kappaletta mittausepävarmuuden minimoimiseksi. Mittaukset tehtiin siten, että yhden huoneparin välinen ilma- ja askelääneneristävyys mitattiin kumpaankin suuntaan huoneiden välillä, pl. kohde 3. Kohteessa 3 mittaukset tehtiin kahden huoneparin välillä yhteen suuntaan johtuen työmaaolosuhteista.

Sekä ilma- että askelääneneristävyyden mittauksissa on käytössä niin sanottu *low-frequency procedure*, joka koskee pienten tilojen mittauksia. LF-menetelmää sovelletaan ilmaääneneristävyyden mittauksessa, jos jompikumpi tarkasteltavista tiloista on tilavuudeltaan alle 25 m³ (SFS-EN ISO 16283-1 2014). Askelääneneristävyydessä LF-menetelmää puolestaan sovelletaan, mikäli vastaanottotilan tilavuus on alle 25 m³ (SFS-EN ISO 16283-2 2020). Askelääneneristävyyden tapauksessa LF-menetelmän käytöstä luopumista on ehdotettu, sillä sen on todettu vääristävän askelääneneristävyyden yksiluku-arvoja (Kylliäinen et al. 2022). Tämän tutkimuksen puitteissa ei kuitenkaan tarkasteltu näin pieniä tiloja, joten LF-menetelmää ei ollut tarpeen käyttää.

Taulukossa 7 on esitetty mittauskohteissa tarkasteltujen tilojen rakennetyypit.

Taulukko 7. Mittauskohteissa esiintyneet rakennetyypit.

Kohde	Tiloja erottava seinä	Väli pohja	Sivuava seinä 1	Sivuava seinä 2
Kohde 1	Kipsilevy EK 13 mm Kipsilevy 13 mm Teräsranka 95 mm / mineraalivilla 95 mm Kipsilevy 13 mm Kipsilevy EK 13 mm	Pehmeä kokolattiamatto Tasoite 15 mm O32	Sama kuin tilojen välinen seinä	Ulkokuori, betoni 80 mm Lämmöneriste 220 mm Sisäkuori, betoni 150 mm
Kohde 2	Kipsilevy EK 13 mm Kipsilevy 13 mm Puurunko 66 mm / mineraalivilla 50 mm Ilmaväli 16 mm Puurunko 66 mm / mineraalivilla 50 mm Kipsilevy 13 mm Kipsilevy EK 13 mm	Parketti/laminaatti alusmateriaaleineen Tasoite 15 mm O37	Betoni 200 mm	Rappaus 20 mm Mineraalivilla 220 mm Sisäkuori, betoni 150 mm
Kohde 3	Kipsilevy EK 13 mm Kipsilevy 13 mm Teräsranka 66 mm / mineraalivilla 50–70 mm Ilmaväli 16 mm Teräsranka 66 mm / mineraalivilla 50–70 mm Kipsilevy 13 mm Kipsilevy EK 13 mm	Parketti/laminaatti alusmateriaaleineen Tasoite 15 mm O37	Betoni 200 mm	Tiilimuuraus 135 mm Tuuletusrako 40 mm Tuulensuojavilla 30 mm Lämmöneriste 150 mm Sisäkuori, betoni 150 mm
Kohde 4	Kipsilevy R 13 mm Kipsilevy EK 13 mm Teräsranka 66 mm / mineraalivilla 50 mm Ilmaväli 20 mm Teräsranka 66 mm / mineraalivilla 50 mm Kipsilevy EK 13 mm Kipsilevy R 13 mm	Parketti/laminaatti alusmateriaaleineen Tasoite 20 mm O37	Sama kuin tilojen välinen seinä.	Ulkokuori, betoni 80 mm Lämmöneriste 220 mm Sisäkuori, betoni 150 mm

Taulukosta 7 nähdään, että huolimatta mittauskohteiden erilaisista käyttötarkoituksista niissä käytetyt rakennetyypit ovat varsin samankaltaisia. Kaikissa kohteissa välipohjara-kenne koostui kantavasta ontelolaatastosta, jonka pinnassa oli 15–20 mm tasoite. Lat-tian pintamateriaalina oli useimmissa kohteissa joko parketti tai laminaatti. Mittauskoh-teissa esiintyi kahta eri ontelolaattapaksuutta: O32 ja O37.

Mittauskohteiden ulkoseinärakenteissa esiintyi enemmän vaihtelua. Kaikissa yhteisenä tekijänä oli kuitenkin 150 mm paksu betoninen ulkoseinän sisäkuori. Tilojen väliset seinät olivat kaikissa kohteissa kevytrakenteisia. Kohteessa 1 tilojen välinen seinä oli yksirun-koinen, kaikissa muissa kohteissa seinät taas olivat kaksirunkoisia.

3.1.2 Ilmaääneneristävyyden mittaus

Ilmaääneneristävyyden mittaukset suoritettiin kappaleessa 2.2.1 esitellyn mittausmene-telmän mukaisesti. Äänilähteenä käytettävän kaiuttimen sijainnit lähetyshuoneessa va-littiin standardin SFS-EN ISO 16283-1 (2014) kohdan 7.2.2 mukaisesti. Lähetyshuo-neesta valittiin kaksi kaiutinpaikkaa seuraavien kriteerien mukaisesti:

- Kaiuttimen keskiö oli vähintään 0,5 metrin päässä huonepinnoista
- Kaiuttimen keskiö oli vähintään 1,0 metrin päässä huoneita erottavan rakenteen pinnasta.
- Kaiutinpaikkojen välinen etäisyys oli vähintään 1,4 metriä mitattuna kaiuttimen keskiöstä keskiöön. Lisäksi kaiuttimen korkeutta muutettiin kaiutinpaikkojen vä-lillä.

Mittauksessa käytettiin yhtä mikrofonia, jota siirrettiin mittausten välillä. Kutakin kaiutin-paikkaa kohden valittiin sekä lähetys- että vastaanottohuoneesta viisi mittauspistettä standardin SFS-EN ISO 16283-1 (2014) kohdan 7.6 mukaisesti:

- Mittauspisteiden välinen etäisyys oli vähintään 0,7 metriä.
- Mittauspisteiden etäisyys huoneen pinnoista oli vähintään 0,5 metriä.
- Mittauspisteiden etäisyys pallokaiuttimesta oli vähintään 1,0 metriä.

Mittaus aloitettiin asettamalla pallokaiutin ensimmäiseen kaiutinpaikkaan lähetyshuo-neessa. Seuraavaksi sekä lähetys- että vastaanottohuoneessa mitattiin äänenpainetaso viidessä pisteessä, jotka valittiin yllä mainittujen kriteerien mukaisesti. Tämän jälkeen kaiutin siirrettiin toiseen kaiutinpaikkaan, ja äänenpainetaso mitattiin jälleen kussakin huoneessa viidestä eri pisteestä. Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika ja taustaääni-taso mitattiin kappaleen 3.1.4 mukaisesti.

Mittaustulosten käsittely tehtiin kappaleessa 2.2.1 esitellyn menetelmän mukaisesti. Mittaustulosten perusteella määritettiin standardin SFS-EN ISO 717-1 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$. Mittausten tulokset on esitetty luvussa 4.1.

3.1.3 Askelääneneristävyyden mittaus

Askelääneneristävyyden mittaukset tehtiin kappaleen 2.2.2 mukaisesti. Askelääneneristävyyden mittaamiseksi lähetyshuoneesta valittiin yhteensä neljä askeläänikojeapaikkaa. Kojepaikat valittiin siten, että askeläänikojeen etäisyys huoneen seinäpinoista oli vähintään 0,5 metriä, ja etäisyys tiloja erottavasta rakenteesta oli vähintään 1 metri. Kutakin askeläänikojeapaikkaa kohden valittiin vastaanottohuoneesta neljä mittauspistettä seuraavien kriteerien mukaisesti:

- Mittauspisteiden välinen etäisyys oli vähintään 0,7 metriä.
- Mittauspisteiden etäisyys huoneen pinnoista oli vähintään 0,5 metriä.
- Mittauspisteiden etäisyys pallokaiuttimesta oli vähintään 1,0 metriä.

Yhteensä vastaanottohuoneen äänenpainetaso mitattiin siis 16 kertaa. Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika ja taustaäänitaso mitattiin kappaleen 3.1.4 mukaisesti.

Askelääneneristävyyden mittaustulokset käsiteltiin standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaisella menetelmällä, joka on esitelty kappaleessa 2.2.2. Askelääneneristävyyden yksilukuarvo $L'_{nT,w} + C_{L,50-2500}$ määritettiin standardin SFS-EN ISO 717-2 (2020) mukaisella vertailukäyrämenettelyllä.

3.1.4 Jälkikaiunta-ajan ja taustaäänitason mittaus

Vastaanottohuoneen taustaäänien mittaus suoritettiin yhdestä mittauspisteestä huoneen keskeltä, 1,5 metrin korkeudelta huoneen lattiapinnasta. Standardin SFS-EN ISO 16283-1 (2014) mukaisesti taustaäänimittauksen kesto voi olla yhtä pitkä kuin edellä mainittujen äänitasomittausten, mikäli huoneen taustaääni on tasaista ja jatkuvaa. Taustaäänimittauksen kestoksi valittiin 60 sekuntia, jolloin lyhytkestoisten häiriöäänien vaikutus ekvivalenttiin taustaäänitasoon on pienempi. Jos mittauksen aikana esiintyi mittaustulokseen vaikuttavia häiriöääniä, taustaäänien mittaus suoritettiin uudelleen.

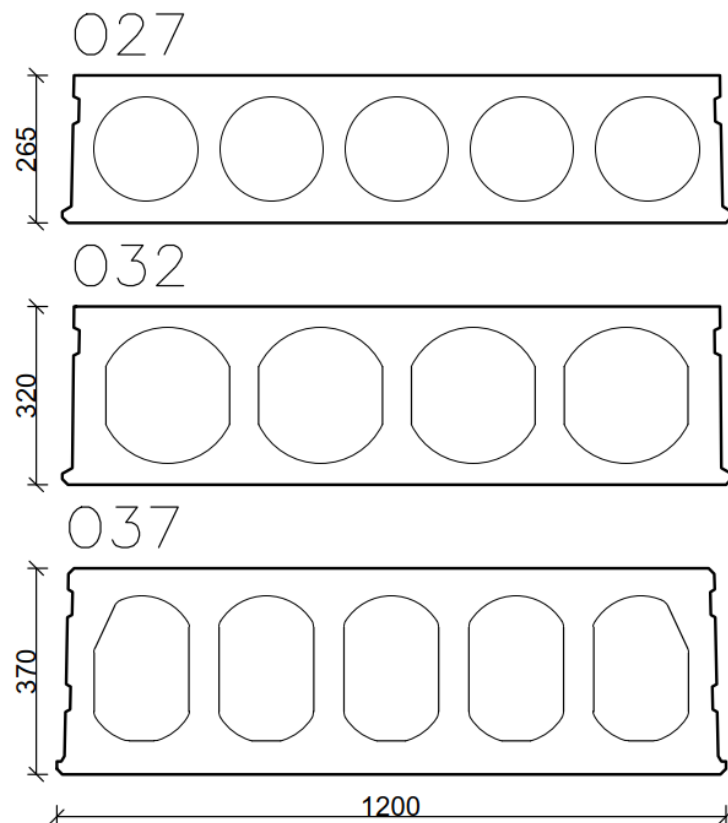
Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajan mittausta varten vastaanottohuoneesta valittiin kaksi kaiutinpaikkaa siten, että kaiuttimen keskiön etäisyys oli vähintään 0,5 metriä huoneen pinnoista, ja kaiutinpaikkojen välinen etäisyys keskiöstä keskiöön oli vähintään 1,4 metriä. Kutakin kaiutinpaikkaa kohden vastaanottohuoneesta valittiin vähintään neljä

mittauspistettä. Mittauspisteiden sijoittelussa käytettiin samoja kriteerejä kuin äänenpainetason mittauksessa.

Vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika mitattiin standardin SFS-EN ISO 3382-2 (2008) mukaisesti katkaistun kohinan menetelmää käyttäen. Jälkikaiunta-aika mitattiin kussakin mittauspisteessä kahdesti. Tällöin vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika mitattiin yhteensä vähintään 16 kertaa. Jälkikaiunta-ajan mittauksessa äänilähteen annettiin tuottaa signaalia kunnes huoneen äänikenttä oli tasaantunut; tarkasteltavasta tilasta riippuen sopiva aika oli n. 5 s. Tämän jälkeen äänilähde kytkettiin pois, minkä jälkeen Nor140-äänitasomittarin avulla mitattiin huonetilan jälkikaiunta-aika.

3.2 Laskennallisesti tarkasteltavat rakenteet ja liitokset

Tutkimuksessa tarkasteltiin laskennallisesti kolmea Suomessa yleistä ontelolaattatyyppiä: O27 (paksuus 265 mm), O32 (paksuus 320 mm) ja O37 (paksuus 370 mm). Kullekin näistä ontelolaattatyypeistä määritettiin laskennallisesti laboratoriotilannetta vastaava ilma- ja askelääneneristävyys. Betoniteollisuus ry toimitti tutkimusta varten eri valmistajien ontelolaattapoikkileikkauksia, joita käytettiin laskennassa. Laskennassa käytetyt, erään valmistajan ontelolaattapoikkileikkaukset on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. *Laskennassa tarkastellut ontelolaattapoikkileikkaukset.*

Tilojen välistä ääneneristävyyttä tarkasteltiin kappaleessa 3.1 kuvailtujen mittauskohteiden perusteella mallinnettujen tilojen välillä. Toiselta sivultaan tarkasteltavat tilat rajautuvat ulkoseinään, ja toiselta sivultaan taas tilan ja porraskäytävän väliseen seinään. Väli-pohjarakenteina laskennassa käytettiin eri paksuisia ontelolaattaväli-pohjia pintamateriaaleineen. Tilojen välisen ääneneristävyyden laskennassa käytetyt rakennetyypit on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Laskennassa tarkasteltujen tilojen rakennetyypit.

Tunnus	Rakennekerrokset	Selite
HVS	<ul style="list-style-type: none"> - Kipsilevy EK 13 mm - Kipsilevy 13 mm - Ranka 66 mm / villa 50 mm - Ilmaväli 16 mm - Ranka 66 mm / villa 50 mm - Kipsilevy 13 mm - Kipsilevy EK 13 mm 	Kevytrakenteinen tiloja erottava seinä
SW80	- Betoni C30/37 80 mm	Ulkoseinärakenne, sisäkuori 80 mm
SW120	- Betoni C30/37 120 mm	Ulkoseinärakenne, sisäkuori 120 mm
SW150	- Betoni C30/37 150 mm	Ulkoseinärakenne, sisäkuori 150 mm
SW180	- Betoni C30/37 180 mm	Ulkoseinärakenne, sisäkuori 180 mm
US.K	<ul style="list-style-type: none"> - Lautaverhous 23 mm - Tuuletusväli 48 mm - Tuulensuojakipsilevy 9 mm - Puurunko 198 mm / villa 200 mm - Koolaus 48 mm / villa 50 mm - Kipsilevy EK 13 mm 	Kevytrakenteinen ulkoseinä
RPHS	- Betoni C30/37 200 mm	Raskas porrashuoneen ja tilan välinen seinä
KPHS	<ul style="list-style-type: none"> - Kipsilevy EK 13 mm - Kipsilevy 13 mm - Ranka 66 mm / villa 50 mm - Ilmaväli 16 mm - Ranka 66 mm / villa 50 mm - Kipsilevy 13 mm - Kipsilevy EK 13 mm 	Kevytrakenteinen porrashuoneen ja tilan välinen seinä
VP.O27	<ul style="list-style-type: none"> - Parketti 14 mm - Parketin alusmateriaali - Pumpattava tasoite 15 mm - Ontelolaatta O27 	Ontelolaattavälipohja, O27
VP.O32	<ul style="list-style-type: none"> - Parketti 14 mm - Parketin alusmateriaali - Pumpattava tasoite 15 mm - Ontelolaatta O32 	Ontelolaattavälipohja, O32
VP:O37	<ul style="list-style-type: none"> - Parketti 14 mm - Parketin alusmateriaali - Pumpattava tasoite 15 mm - Ontelolaatta O37 	Ontelolaattavälipohja, O37

Standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) mukaisesti laskennassa huomioitiin vain betonirakenteisen ulkoseinien sisäkuori. Suurimmassa osassa mittauskohteita ontelolaattavälipohjan pintarakenteena oli parketti- tai laminaattilattia alusmateriaaleineen. Tästä

syystä laskennassa käytettiin niin ikään ontelolaattaväli­pohjien pintamateriaalina parket­tia alusmateriaaleineen. Näin pystyttiin myös tarkastelemaan Helimäen & Kääriäisen (2013) väitettä parkettiresonanssin vaikutuksesta ääneneristävyyteen huoneiden välillä. Parketin ilmaääneneristävyyden parannusvaikutus ΔR arvioitiin käyttäen Datakustik® Bastian® -ohjelmiston tietokannasta löydettyjen ΔR arvojen keskiarvoa. Parkettilattian askelääneneristävyyden parannusvaikutuksena ΔL puolestaan käytettiin Kylliäinen et al. (2015) mittaamaa parketin askelääneneristävyyden parannusvaikutusta ontelolaataston päällä.

3.3 Ontelolaataston ääneneristävyyden FEM-mallinnus

Ontelolaatosten ilma- ja askelääneneristävyyden määrittämiseksi muodostettiin FEM-mallit, jotka validoitiin mittaustuloksien. FEM-malleilla määritettyjä ääneneristävyyksiä käytettiin myöhemmin standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamalleissa lähtötietona.

Validoimalla ontelolaataston FEM-mallit mittaustuloksiin voitiin varmistua siitä, että ontelolaataston FEM-malli toimii oikein myös myöhemmissä nopeustasoeron ja rakenteellisen jälkikäiunta-ajan FEM-mallinnuksissa. Ontelolaataston ilma- ja askelääneneristävyyden FEM-mallien validoimiseen käytettiin Mahnin (2018) tuottamia ontelolaattojen ilma- ja askelääneneristävyyden mittaustuloksia. FEM-mallinnus tehtiin ANSYS® Workbench 2020 R1 -ohjelmistolla.

3.3.1 Geometria ja materiaaliominaisuudet

Ontelolaattojen 3D-geometria mallinnettiin kuvan 13 kaksiulotteisten CAD-poikkileikkausten pohjalta. Ilma- ja askelääneneristävyyden mallissa ratkaistiin ontelolaataston äänensäteily vastaanottopuolen ilmatilaan. Vastaanottohuonetta kuvastavan ilmatilan ilma määritettiin huoneenlämpöiseksi ja äänennopeudeksi ilmassa asetettiin 346 m/s.

Ontelolaattojen rungon materiaaliksi määritettiin C40/45 luokan betoni, ja laataston saumavalujen materiaaliksi luokan C20/25 betoni. Lujuusluokkia vastaavat kimmomoduulit valittiin standardin SFS EN 1992-1-1 (2015) mukaan. Betonimateriaaleille määritettiin yhtälön (60) mukainen laboratoriotilannetta vastaava taajuusriippuvainen kokonais­häviökerroin. Betonin sisäisenä häviökertoimena käytettiin Hopkinsin (2007) mukaista arvoa $\eta_{int} = 0,005$.

3.3.2 Elementtiverkko

Ilma- ja askelääneneristävyyden laskentamalleissa geometriamallin verkottamiseen käytettiin ANSYS Mechanical-ohjelmistoa. Mallin verkottamiseen käytettiin kvadraattisia elementtejä (ks. kuva 11) elementtien määrän minimoimiseksi. Mallin rakenteelliset osat (ontelolaataston runko ja saumat) verkotettiin käyttäen ANSYS:n SOLID186-elementtejä. Mallin akustiset fluidit puolestaan verkotettiin käyttäen FLUID220-elementtejä. Ilma- ja askelääneneristävyyden simuloinnissa käytettiin mallin elementtiverkon tiheyden kriteerinä kappaleessa 2.5.2 esitettyä ilmassa etenevän ääniaallon aallonpituuden kuudenesaa $\lambda/6$.

3.3.3 Reunaehdot

Ontelolaataston reunaehdoilla pyrittiin mallintamaan ontelolaataston tuentaa laboratorioaukossa. Parhaiten laboratorioaukkoa vastaavan tuennan määrittämiseksi ilmaääneneristävyyden validointi tehtiin kolmella eri tuentatavalla:

1. Ontelolaatta oli tuettu reunoiltaan nivelellisesti
2. Ontelolaatta oli tuettu reunoiltaan jäykästi
3. Ontelolaatta oli vapaasti tuettu

Sekä ilma- että askelääneneristävyys määritettiin kaikilla kolmella tuentatavalla parhaiten laboratorioaukkoa vastaavan tuennan valitsemiseksi. Validoinnin tuloksena päädyttiin mallintamaan loput ontelolaatat vapaasti tuettuna.

3.3.4 Ilmaääneneristävyyden simulointi

Ontelolaataston laboratoriotilannetta vastaava ilmaääneneristävyys mallinnettiin käyttäen ANSYS[®] Mechanical-ohjelmistoa. Ilmaääneneristävyyden mallinnuksessa käytettiin ANSYS Mechanicalin *Harmonic Acoustics*-analyysiä. Ilmaääneneristävyys määritettiin kohdistamalla ontelolaataston pintaan diffuusi äänikenttä käyttäen ANSYS Mechanicalin *Diffuse Sound Field* -herätettä (DSF) (ANSYS Mechanical User's Guide 2022). Ontelolaataston ilmaääneneristävyys määritettiin siihen DSF-herätteen kohdistaman ja rakenteen säteilemän äänitehon perusteella yhtälön (2) mukaisesti.

Ontelolaataston ilmaääneneristävyys määritettiin taajuusalueella 50–3150 Hz. Laskenta suoritettiin 1/27-oktaavikaistoittain, jolloin laskentataajuuksia oli yhdeksän terssiä kohden. Tämä tarkkuus valittiin, jotta ontelolaataston ominaismuotojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen tulisi otettua huomioon. Ilmaääneneristävyys määritettiin FEM-mallilla

taajuusalueella 50–2000 Hz. Tätä suuremmilla taajuuksilla ilmaääneneristävyys määritettiin käyttäen A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n parametrissa laskentamallia (Riitakangas 2020).

3.3.5 Askelääneneristävyyden simulointi

Ontelolaataston laborioritilannetta vastaavan askelääneneristävyyden mallinnus suoritettiin ANSYS® Mechanical-ohjelmistolla. Askelääneneristävyyden laskennassa käytettiin lineaarista *Harmonic Acoustics* -analyysia. Askelääneneristävyyden simuloimiseksi mallinnettiin askeläänikojeen ontelolaataston pintaan tuottama heräte käyttäen viiden pistevoiman sarjaa.

Standardin SFS-EN ISO 10140-5 (2010) mukaisessa askeläänikojeessa askeläänihäeräte tuotetaan viiden vasaran avulla. Vasarat sijaitsevat janalla, ja niiden keskiöiden välinen etäisyys on (100 ± 3) mm. Kunkin vasaran massa on 500 g, ja niiden pudotuskorkeus on 40 mm. Askeläänikojeen ontelolaatastoon kohdistama voimahäeräte mallinnettiin käyttäen Wittstockin (2012) häerätettä. Wittstockin mallissa askeläänikojeen vasaroiden rakenteeseen kohdistamia iskuja kuvataan harmonisilla pistevoimilla.

Wittstockin (2012) mallissa askeläänikojeen vasaroita kuvataan ns. estetyin voiman (*blocked force*) ja niiden massan avulla. Estetyin voiman suuruuteen vaikuttavat vasaran pudotusnopeus ja massa, jotka on määritelty standardissa SFS-EN ISO 10140-5 (2010), sekä vasaran ja rakenteen välisen törmäyksen kimmoisuus. Yksittäisen vasaran rakenteeseen kohdistaman voiman magnitudi F_0 [N] voidaan määrittää estetyin voiman sekä rakenteen ominaisuuksien avulla.

Standardin SFS-EN ISO 10140-5 (2010) mukaisessa askeläänikojeessa vasaraniskujen välinen aika on 100 ms. Lisäksi vasaroiden lyömäjärjestys on 1–3–5–2–4 (Wittstock 2012). Wittstockin (2012) laskentamallissa vasaroiden iskujen välinen aika ja lyömäjärjestys huomioidaan määrittämällä vasaroita kuvaavien pistevoimien välille vaihe-ero.

FEM-mallissa häerätteenä käytettävien pistevoimien etäisyys toisistaan valittiin standardin SFS-EN ISO 10140-5 (2010) mukaisesti. Häeräte asetettiin 45° kulmaan ontelolaataston pituussuuntaa vasten standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) kohdan 7.2.2 mukaisesti. Standardista poiketen ontelolaatastolle määritettiin vain yksi häerätteen sijainti neljän sijaan, mikä aiheuttaa laskentatuloksiin hieman epävarmuutta.

Simuloinnin tuloksena määritettiin ontelolaataston taustapuolen säteilemä äänitehotaso L_w . Äänitehotason avulla voitiin määrittää laataston taustapuolelle syntyvä normalisoitu askeläänitaso L_n yhtälön (67) mukaisesti:

$$L_n = L_w - 10 \log \frac{A}{4} \quad (65)$$

jossa yhtälön jälkimmäinen termi on niin sanottu huonevaimennus. Askelääneneristävyyden laskennan tarkkuuteen vaikuttaa normalisoidun askeläänitason L_n määritelmä; sen määrittäminen vaatii tuntemusta vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajasta. Jälkikaiunta-aika taas riippuu vastaanottohuoneen koosta ja absorptiomateriaalin määrästä, jotka eivät ole vakioita, vaan ne riippuvat vahvasti tilanteesta. Askelääneneristävyyden määrittämiseksi käytettiin arviona vastaanottohuoneen absorptioalasta $A = 10 \text{ m}^2$.

Ontelolaataston askelääneneristävyys määritettiin laskennallisesti taajuusalueella 50–3150 Hz. Askelääneneristävyys määritettiin FEM-mallilla välillä 50–1600 Hz. 1/3-oktaavikaistoilla 2000–3150 Hz askelääneneristävyys määritettiin käyttäen standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) liitteessä B esitettyä homogeenisen lattiarakenteen askelääneneristävyyden yhtälöä (66):

$$L_n \approx 155 - 30 \log \frac{m'}{1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} + 10 \log \frac{T_s}{1 \text{ s}} + 10 \log \sigma + 10 \log \frac{f}{f_{ref}} \quad (66)$$

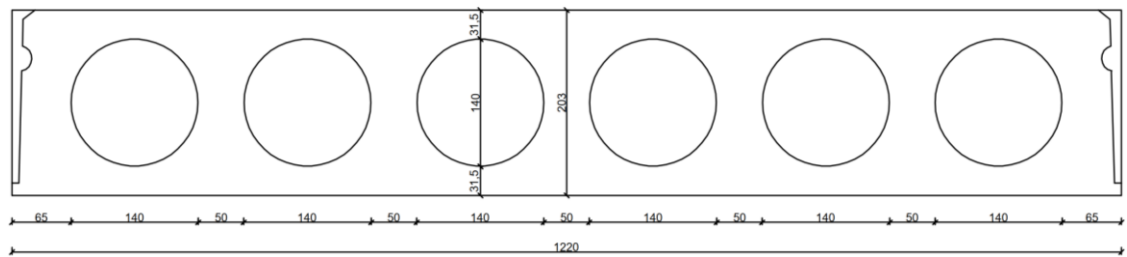
jossa σ on tarkasteltavan lattiarakenteen säteilykerroin. Standardin mukainen ääneristävyyden laskentamalli ei sovellu suoraan ontelolaatan tarkasteluun, sillä ontelolaatta ei ole homogeeninen ja isotrooppinen rakenne. Suurien taajuuksien vaikutus askelääneneristävyyden yksilukuarvoihin on kuitenkin vähäinen, johtuen standardin SFS-EN ISO 717-2 (2020) vertailukäyrämenettelystä. Lisäksi ontelolaataston pintaan lisättävien pintamateriaalien, esimerkiksi parketin, askelääneneristävyyden parannusvaikutus on suurin juuri suurilla taajuuksilla. Standardin laskentamallia voidaan siis käyttää askelääneneristävyyden FEM-mallilla saadun laskentatuloksen täydentämiseen.

3.3.6 Validointi

Ontelolaattojen ilma- ja askelääneneristävyyden laskenta validoitiin Mahnin (2018) raportissa esitettyjen mittaustulosten avulla. Mahnin tutkimusraportissa ei mainittu käytettyjen ontelolaattojen materiaalitietoja pois lukien laattojen pintamassa, joten simulaatioissa käytettävät materiaaliparametrit valittiin ontelolaatastoille tyypillisten arvojen mukaisesti. Ontelolaattojen lujuusluokka on yleensä C40/50 (elementtisuunnittelu.fi // betonilujuudet 2021) ja saumavalujen K30, mikä vastaa nykyistä C20/25 lujuusluokkaa (Suomen Betonitieto Oy 2002). Laattojen esivaletun betonin ja saumavalujen tiheydet voitiin määrittää Mahnin (2018) raportin pintamassojen avulla. Betonin lujuusluokkia vastaavat kimmomoduulit E valittiin standardin SFS-EN 1992-1-1 (2015) mukaisesti.

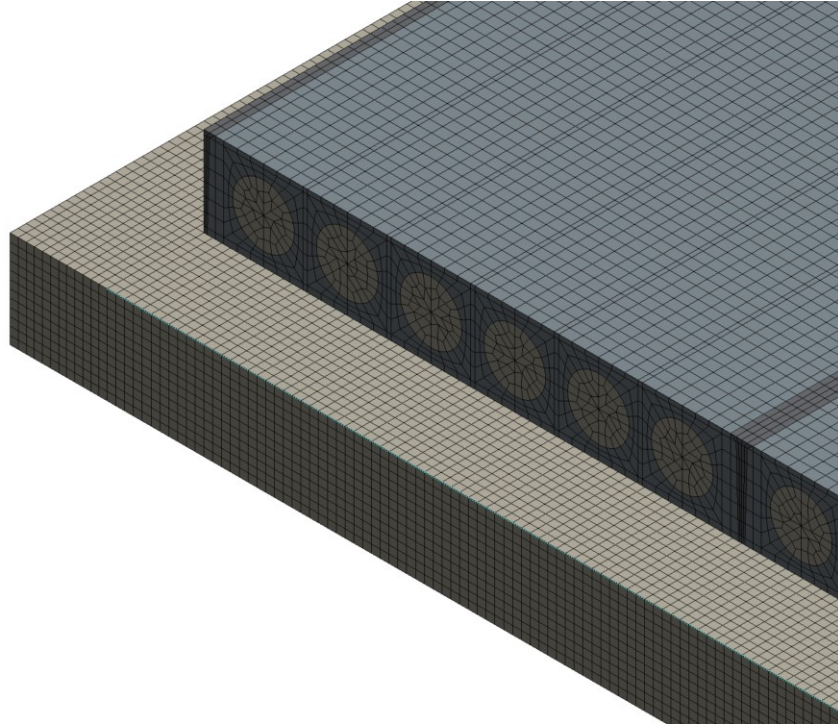
Kokonaishäviökertoimen määrittämisessä käytettiin Mahnin (2018) raportin mukaista koko rakenteen pintamassaa. Laataston sisäiseksi häviökertoimeksi η_{int} valittiin Hopkinsin (2007) mukaisesti betonin sisäinen häviökerroin 0,005. Ontelolaataston kokonaishäviökerroin määritettiin kaavan (60) avulla Mahnin (2018) ilmoittaman pintamassan perusteella.

Mahnin (2018) tutkimien ontelolaattojen geometria jäljennettiin mahdollisimman tarkasti Mahnin mittausraportin perusteella, sillä tarkkaa tietoa ontelolaatoista ei ollut saatavilla. Mahnin esittämien poikkileikkausmittojen ja kuvien avulla pyrittiin mahdollisimman tarkasti jäljentämään ontelolaatan poikkileikkaus. Validointilaskelmissa käytetty ontelolaatan poikkileikkauksen CAD-geometria on esitetty kuvassa 14.



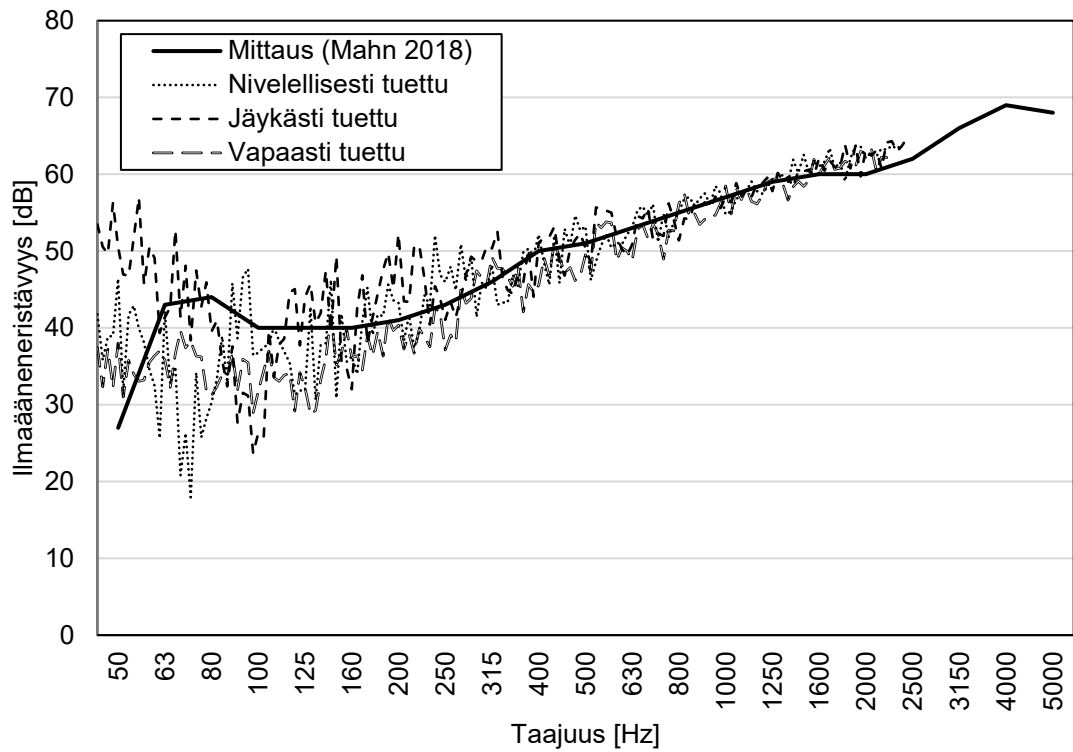
Kuva 14. Validointitapauksen ontelolaatan poikkileikkauksen CAD-geometria.

Ilma- ja askelääneneristävyyden laskentamalleissa ontelolaataston ja siihen liittyvien tilojen verkotuskriteerinä käytettiin ilman verkotuskriteeriä $\lambda/6$. Koko mallille käytettiin tässä tapauksessa samaa verkotuskriteeriä mallin yksinkertaisuuden vuoksi. Ilman verkotuskriteeri on varmasti riittävä myös ontelolaatastolle, sillä äänen aallonpituus ilmassa on lyhyempi kuin betonissa tarkasteltavalla taajuusalueella. Validointimallin elementti-verkko eräällä taajuudella on esitetty kuvassa 15.

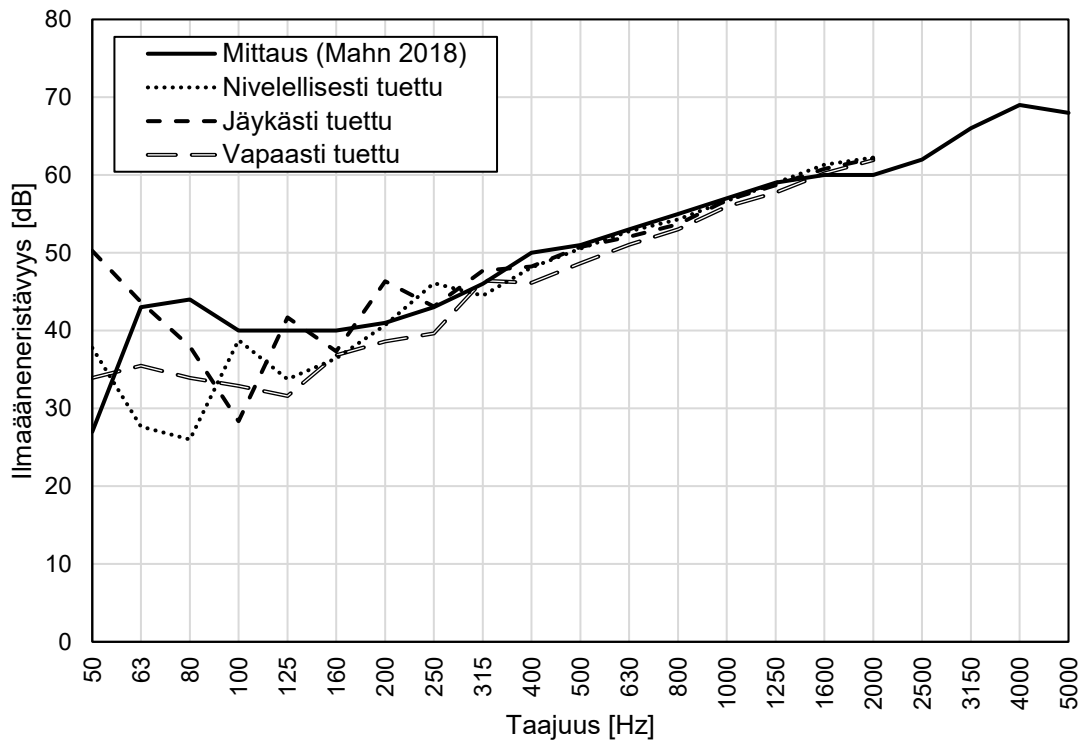


Kuva 15. Elementtiverkko ontelolaataston ääneneristävyyden laskentamallissa.

FEM-mallien validoimiseksi niillä määritettyjä laskennallisia ilma- ja askelääneneristävyyksiä verrattiin kirjallisuudesta löydettyihin mittaustuloksiin. Mahnin (2018) mittaama paljaan 203 millimetriä (8 tuumaa) paksun ontelolaataston ilmaääneneristävyys on esitetty laskennallisen ilmaääneneristävyyden rinnalla kuvissa 16 ja 17. Saman ontelolaataston mitattu ja laskennallisesti määritetty normalisoitu askeläänitaso L_n on puolestaan esitetty kuvassa 18.



Kuva 16. Mitattu ja laskennallinen ontelolaataston ilmajääneneristävyyys. Laskentatulokset on esitetty 1/27-oktaavikaistoittain. Paljas ontelolaatta 203 mm (8”).

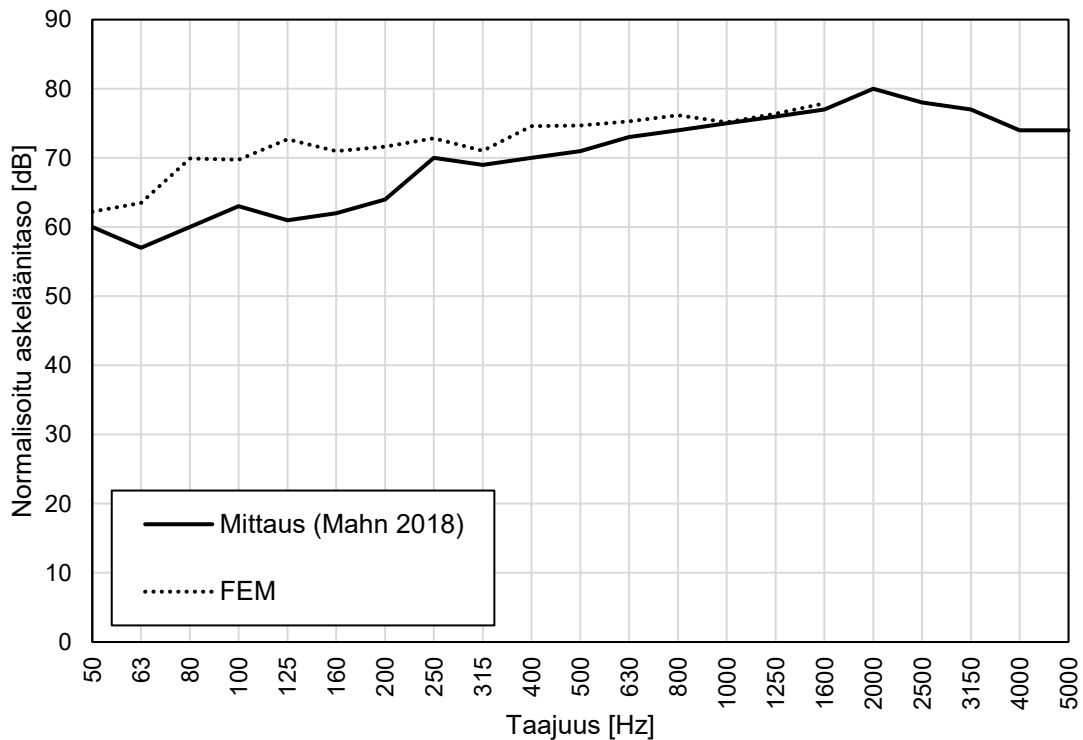


Kuva 17. Mitattu ja laskennallinen ontelolaataston ilmajääneneristävyyys. Laskentatulokset on esitetty 1/3-oktaavikaistoittain. Paljas ontelolaatta 203 mm (8”).

Kuvista 16 ja 17 nähdään että laskennallinen ilmajääneneristävyyys vastaa hyvin Mahnin (2018) mittaamaa ilmajääneneristävyyttä, pois lukien pienet taajuudet, joilla mittauksen

ja laskennan välillä esiintyy eroavaisuuksia. Suurimman poikkeaman esiintymistaajuus riippuu tuennasta. Nivelellisesti tuetulla mallilla suurin poikkeama esiintyy 80 Hz:n terssikaistalla, jossa FEM-mallilla määritetty ilmaääneneristävyys on 18 dB pienempi kuin mitattu. Jäykästi tuetulla mallilla puolestaan suurin poikkeama esiintyy 50 Hz:n terssikaistalla, jossa laskennallisesti määritetty ilmaääneneristävyys on 23,2 dB mitattua suurempi.

Askelääneneristävyyden mittaus- ja laskentatulokset 203 mm ontelolaatalle on esitetty kuvassa 18. Kuten ilmaääneneristävyydenkin tapauksessa, alle 200 Hz:n taajuuksilla mittauksen ja laskennan välillä esiintyy eroavaisuuksia. Poikkeama on samaa suuruusluokkaa kuin ilmaääneneristävyyden tuloksissa. Yli 200 Hz:n taajuuksilla vastaavuus mittauksen ja laskennan välillä on jälleen merkittävästi parempi.



Kuva 18. Mitattu ja laskennallinen normalisoitu askeläänitaso. Laskentatulokset esitetty 1/3-oktaavikaistoittain.

Mahnin (2018) mittauksissa, joihin laskentatuloksia verrattiin, oli käytetty jokseenkin normaalista poikkeavaa reunatuentaa: ontelolaataston ja laboratorioaukon välinen rako oli tukittu hiekalla aukon tiivistämiseksi. Ontelolaatastoa ympäröivä hiekka tekee laataston tuennasta epälineaarisen, mitä ei voida lineaarisessa akustisessa analyysissä ottaa huomioon. Kuvista 16 ja 17 kuitenkin nähdään, että ontelolaataston reunatuenta vaikuttaa pääasiassa pienillä taajuuksilla (<200 Hz). Tarkkaa tietoa käytettyjen ontelolaattojen poikkileikkauksesta ja materiaalitiedoista ei ollut saatavilla, mikä vaikuttaa laskennan tarkkuuteen. Lisäksi askelääneneristävyyden määrittämiseen vaikuttaa vastaanottotilan

absorptioala, jota Mahnin (2018) mittausraportissa ei ilmoitettu. Näistä puutteista huolimatta laskennan tarkkuus on varsin hyvä.

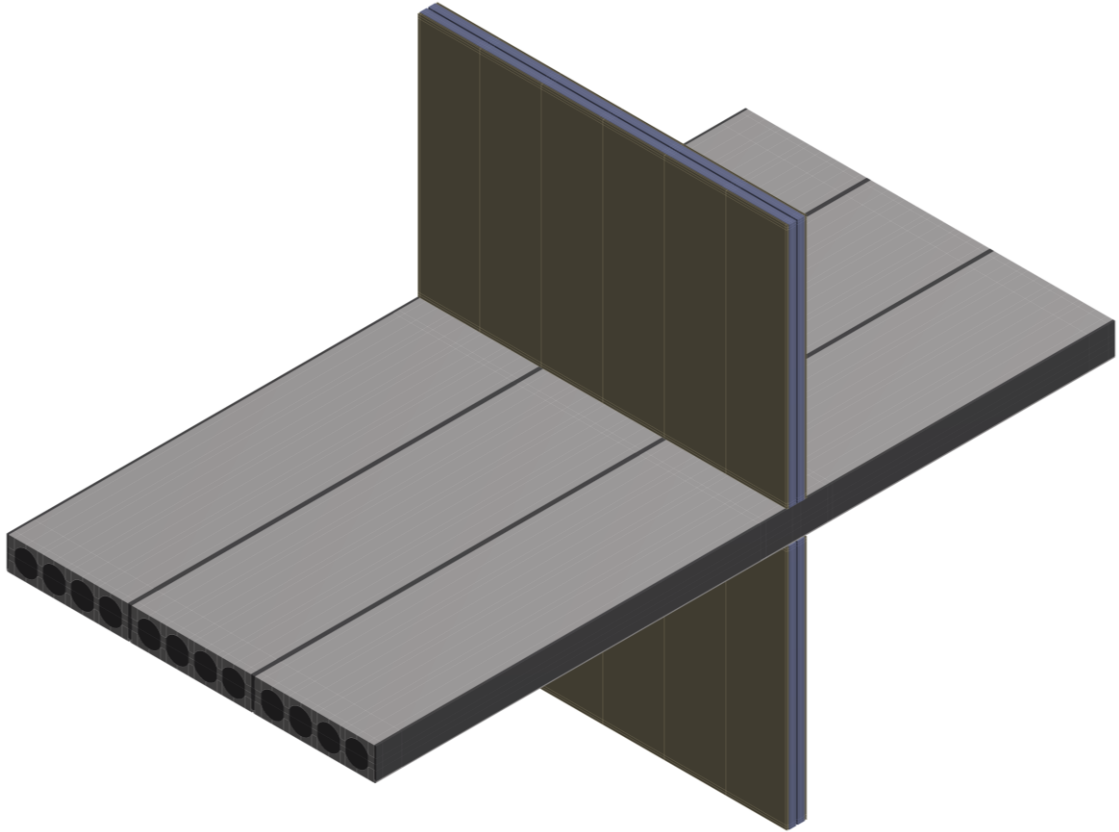
3.4 Liitoseristävyden FEM-mallinnus

Ontelolaataston ja kevytrakenteisen tiloja erottavan seinän liitoksen (ks. kuva 1) liitoseristävyden K_{ij} määrittämiseksi luotiin kolmiulotteinen FEM-malli, jonka avulla kyettiin määrittämään sekä liitoksen suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero $\overline{D_{v,ij}}$ että kytkeytyvien rakenteiden rakenteellinen jälkikaiunta-aika standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) sovitteita tarkemmin. Liitoseristävyys määritettiin näiden suureiden avulla yhtälöstä (46). Liitoseristävyys määritettiin laskennallisesti suoralle sivutiesiirtymäreitille ontelolaatastoa pitkin sekä tilanteessa, jossa ontelolaatastossa on täyttövalua että tilanteessa jossa täyttövalua ei ole. Liitoseristävyden laskentamalli validoitiin käyttäen Mahnin (2017) suorittamaa liitoseristävyden mittausta, jossa Mahn tarkasteli ontelolaataston ja muuratun väliseinän liitosta.

3.4.1 Geometria ja materiaaliominaisuudet

Ontelolaataston geometria mallinnettiin hieman kappaleen 3.3 menetelmästä poiketen. Toisin kuin ääneneristävyden laskentamalleissa, liitoseristävyden laskentamallissa ontelolaataston onteloiden ilmatilat verkotettiin muuta rakennetta tiheämmin. Kevytrakenteiset kaksoisrankaseinät mallinnettiin mukailien kappaleen 3.1 kenttämittauskohteissa käytettyjä rakennetyyppejä.

Seinien puurangat mallinnettiin isotrooppisina 3D-kappaleina. Seinien kipsilevyt puolestaan mallinnettiin isotrooppisina 2D-kuorina laskentakapasiteetin säästämiseksi. Päälekkäiset kipsilevyt kytkettiin toisiinsa seinärankojen kohdalta viivamaisesti kontakteilla. Sisemmät kipsilevyt kytkettiin seinän rankoihin niin ikään viivamaisilla kontakteilla. Tämän jälkeen kevytrakenteinen levyseinä liitettiin viivamaisesti ontelolaatan pintaan. Simulaatiossa käytetty ristiliitoksen geometriamalli on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. ANSYS Mechanicalissa mallinnettu ontelolaataston O32 ja kevytrakenteisen tilojen välisen seinän ristiliitoksen geometriamalli. Ontelolaatastoon liittyviä rakenteita ei ole selkeyden vuoksi esitetty.

Alustavien laskelmien perusteella yhtälön (51) mukainen vaatimus nopeustasoerolle $\overline{D_{v,ij}}$ ei täytynyt kaikilla taajuuksilla, joten standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) suosituksen mukaisesti laataston häviöitä pyrittiin kasvattamaan lisäämällä sen ympärille kytkeytyviä rakenteita. Ympäröivät rakenteet mallinnettiin todellista käyttötilannetta vastaaviksi käyttäen kappaleen 3.1 mittauskohteissa esiintyneitä rakennekokonaisuuksia referenssinä. Ontelolaataston päihin mallinnettiin 200 mm paksut teräsbetoniseinät, ja ontelolaataston ympärille vaakatasossa mallinnettiin ontelolaataston jatke isotrooppisena levynä. Näin laskentatilanne saatiin myös vastaamaan tarkasteltavalle liitokselle tyypillistä ympäristöä. Laatastoa ympäröivät lisärakenteet mallinnettiin siten, että niiden kautta ei syntynyt uusia sivutiesiirtymäreittejä, jotka olisivat voineet vaikuttaa laataston nopeustasojen määrittämiseen.

Liitoseristävyiden FEM-mallissa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Ristiliitoksen FEM-mallissa käytetyt materiaaliominaisuudet

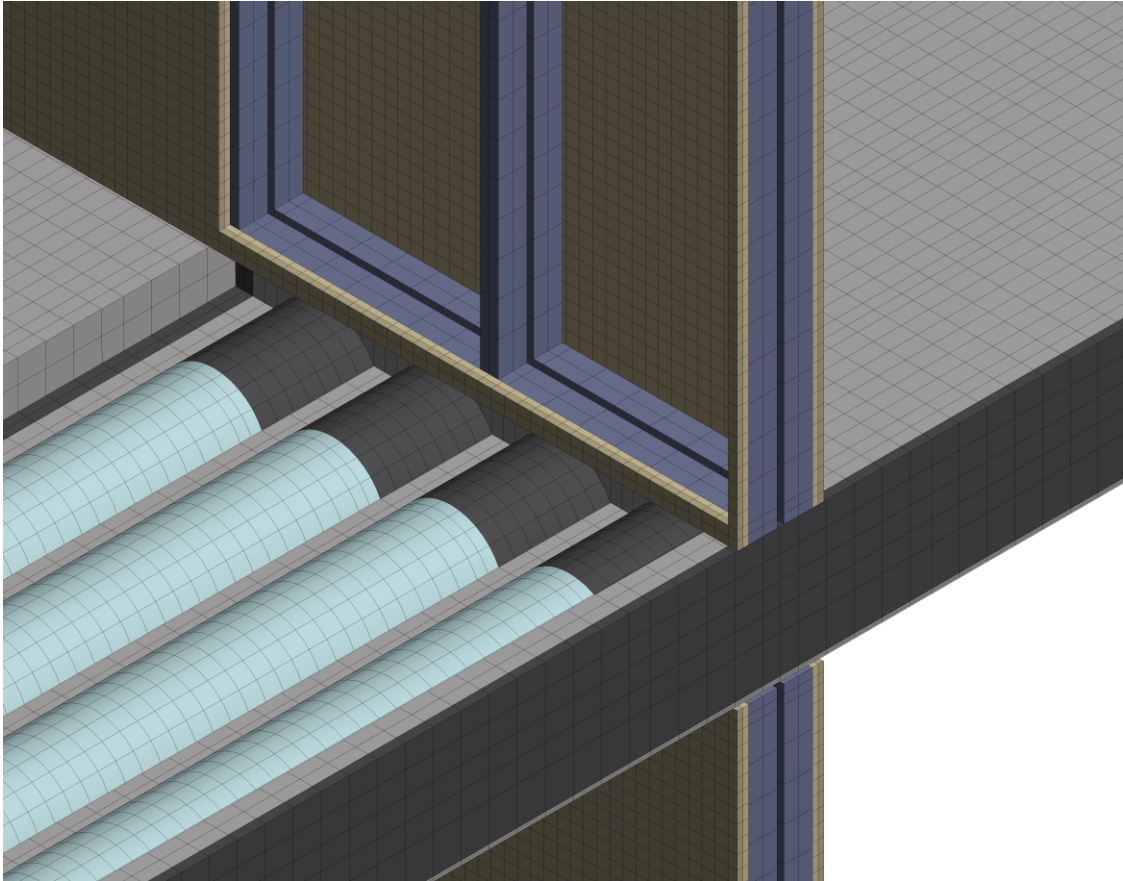
Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Kimmomoduuli E [MPa]	Poisson' vakio ν [-]	Sisäinen häviökerroin η_{int} [-]
Puu	500	10000	0,28	0,01
Kipsilevy, erikoiskova	~820	3500	0,28	0,003
Kipsilevy, normaali	~650	2600	0,28	0,003
Esivalettu betoni (C40/45)*	2500	35000	0,2	0,005
Saumabetoni (C20/C25)*	2500	30000	0,2	0,005
Kantavat teräsbetoni- seinät (C30/37)*	2500	33000	0,2	0,005
Ontelolaataston jatke O27	~1450	~23200	0,2	0,005
O32	~1340	~20400	0,2	0,005
O37	~1350	~14400	0,2	0,005

* Materiaalitiedot standardin SFS-EN 1992-1-1 (2015) mukaisesti.

Ontelolaataston jatkeen materiaaliominaisuudet määritettiin kunkin ontelolaataston materiaali- ja jäykkyysominaisuuksien perusteella. Sekä teräsbetoniväliseinät että ontelolaataston jatke mallinnettiin 2D-kuorielementein. Kipsilevyjen materiaaliominaisuudet valittiin erään kipsilevyvalmistajan tuotetietojen perusteella.

3.4.2 Elementtiverkko

Ristiliitoksen geometriamallin suuruuden ja monimutkaisuuden vuoksi koko mallin verkottaminen ilman verkotuskriteerillä $\lambda/6$ ei ollut mahdollista. Tästä syystä mallin rakenteellisten osien elementtiverkon tiheys valittiin rakenteessa etenevän värähtelyn taivutusaallonpituuden λ_B mukaisesti. Hopkinsin (2003) mukaisesti ontelolaataston rungon sekä sauma- ja täyttövalujen elementtiverkon kokokriteerinä käytettiin taivutusaallonpituuden kuudesosaa $\lambda_B/6$. Kuvassa 20 on esitetty osa ristiliitoksen geometriasta verkotettuna.



Kuva 20. Esimerkki ontelolaataston FEM-mallin verkotuksesta. Eri verkotuskriteereillä verkotetut osat liitettiin toisiinsa ANSYS Mechanicalin kontakteja hyödyntäen.

Äärettömässä levyssä etenevien taivutusaaltojen vaihenopeus c_B [m/s] voidaan määrittää kaavasta (67):

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B}{m'}} \sqrt{\omega} = \sqrt[4]{\frac{B}{m'}} \sqrt{2\pi f} \quad (67)$$

jossa B on levyn taivutusjäykkyys (Cremer et al. 2005). Taivutusaallonpituus λ_B voidaan määrittää taivutusaallon vaihenopeuden avulla käyttäen kaavaa (64).

Ontelolaataston elementtiverkon tiheydenä käytettiin vähintään suurinta laskentataajuutta vastaavan taivutusaallonpituuden kuudesosaa $\lambda_B/6$. Erityisesti pienillä taajuuksilla käytettiin kuitenkin vielä tätä kriteeriä tiheämpää verkkoa elementtien laadun parantamiseksi, sekä ontelolaataston geometrian mallintamiseksi riittävällä tarkkuudella.

Ontelolaatan onteloiden ilmatilat verkotettiin käyttäen kriteerinä äänen aallonpituutta ilmassa. Ilmatilojen verkon tiheydeksi valittiin vähintään aallonpituuden kuudesosa $\lambda/6$. Myös ilmatilojen verkotuksessa käytettiin minimikriteeriä tiheämpää verkotusta, mikäli

elementtien laatu oli liian matala, tai harvempi verkko ei ollut riittävä onteloiden geometrian mallintamiseksi. Erityisesti pienillä taajuuksilla ilmatilojen verkosta tehtiin minimikriteeriä tiheämpi.

Kipsilevyseinille asetettiin kaksi eri verkotuskriteeriä: kipsilevyille oma kriteerinsä ja puurangoille omansa. Kipsilevyjen kriteerinä käytettiin äärettömän levyn taivutusaallonpituuden kuudesosaa. Taivutusaallonpituus voidaan määrittää kaavoista. Puurankojen kriteerinä käytettiin myös taivutusaallonpituuden kuudesosaa. Äärettömän pitkän sauvan taivutusaallon vaihenopeus voidaan määrittää kaavasta (68):

$$c_{B,beam} = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{\rho_l}} \quad (68)$$

jossa ρ_l [kg/m] on sauvan massa pituusyksikköä kohti (Hopkins 2007). Kun vaihenopeus tunnetaan, voidaan jälleen aallonpituus määrittää kaavasta (64).

Mallin elementtimäärät vaihtelivat merkittävästi riippuen ontelolaatan paksuudesta, ja taajuudesta. Ontelolaatalla O27 pienillä taajuuksilla ristiliitoksen mallissa oli noin 140 000 elementtiä ja noin 650 000 solmua. Suurinta ontelolaattapoikkileikkausta O37 tarkasteltaessa suurilla taajuuksilla elementtien lukumäärä mallissa oli puolestaan >1 400 000 ja solmujen lukumäärä >6 000 000.

Ontelolaatan O37 kevyen väliseinän verkotusta kevennettiin, sillä käytetyn laitteiston laskeutoteho ei riittänyt mallin käsittelyyn suurimmilla tarkasteltavilla taajuuksilla. Pienten taajuuksien tulosten perusteella todettiin kuitenkin, että seinän elementtiverkon harvennaminen vaikutti tuloksiin hyvin vähän, joten saatu tulos on edelleen käyttökelpoinen.

3.4.3 Reunaehdot

Kirjallisuudessa liitosmallin tuennassa on sovellettu joitakin toisistaan poikkeavia lähestymistapoja. Crispin et al. (2014) mallinsivat liitosmallin reunat jäykästi tuettuina. Hopkins et al. (2016) puolestaan käyttivät nivelellistä tuentaa mallin vapailla reunoilla, kuten tekivät myös Poblet-Puig & Guigou-Carter (2015). Tästä syystä mallinnuksessa päädyttiin kirjallisuuden perusteella käyttämään nivelellistä tuentaa kaikilla mallin vapailla reunoilla, eli ontelolaataston jatkeiden vapaat reunat ja kaikkien seinien vapaat reunat tuettiin nivelellisesti.

Ontelolaataston ja väliseinän liitoskohdan tuennalla voidaan vaikuttaa siihen, syntyykö liitoskohtaan vain taivutusaaltoja, vai myös leikkaus- ja näennäispitkittäisaaltoja. Vapaan liitoksen on todettu vastaavan todellista tilannetta, jossa taivutusaaltojen lisäksi myös muiden aaltotyyppien syntyminen ja eteneminen liitoksen yli on mahdollista, kun taas

nivelellisesti tuettu liitos taas sallii vain taivutusaaltojen etenemisen liitoksen yli (Hopkins 2003). Muiden kuin taivutusaaltojen huomioiminen on tärkeää, sillä tasossa etenevät aallot, esimerkiksi näennäispitkittäisaallot, ovat värähtelyn etenemisen kannalta merkittäviä (Hopkins 2007). Tästä syystä liitoskohta jätettiin vapaasti tuetuksi.

3.4.4 Ristiliitoksen nopeustasoeron simulointi

Liitoksen nopeustasoeron FEM-tarkastelu tehtiin soveltaen standardin ISO 10848-1 (2017) mukaista liitoseristävyuden mittausmenetelmää. Liitoseristävyuden mittauksen kulku on kuvattu kappaleessa 2.3.3. Liitoksen suuntakeskiarvoistetun nopeustasoeron $\overline{D_{v,lj}}$ mallinnus tehtiin ANSYS® Workbench® 2020 R1 -ohjelmistolla käyttäen *Harmonic Acoustics* -analyysiä.

Kirjallisuudessa on nopeustasoeron simuloinnissa usein mukailtu standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) mukaista mittausmenetelmää. Tyypillinen lähestymistapa on standardin mukaisesti kohdistaa lähetyspuolella rakenteeseen vähintään kolme pistevoimaa, ja määrittää rakenteiden pintanopeudet sekä lähetys- että herätepuolella (Hopkins et al. 2016; Ramis et al. 2012; Crispin et al. 2014).

Paremmiin Gerretsenin (1979; 1986; 1996) alkuperäisen laskentamallin vaatimusta diffuuseista värähtelykentistä vastaava heräte on niin sanottu *Rain-On-the-Roof*-heräte (ROR), jossa herätettävän rakenteen kaikkiin vapaisiin pisteisiin kohdistetaan magnitudiltaan samansuuruinen, satunnaisessa vaiheessa oleva pistevoima (Hopkins, 2007). ROR-heräte toimii tilastollisesti toisistaan riippumattomien pistevoimien tavoin SEA-laskennan vaatimusten mukaisesti. ROR-herätettä on myös kirjallisuudessa käytetty onnistuneesti liitoksen suuntakeskiarvoistetun nopeustason $\overline{D_{v,lj}}$ määrittämiseen (Hopkins 2003), sekä liitoseristävyuden määrittämiseen (Astolfi et al. 2019). Standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) mukaisilla yksittäisillä herätepisteillä pyritään approksimoimaan diffuusia värähtelykenttää herättämällä rakennusosa useasta pisteestä ja keskiarvoistamalla näitä herätepisteitä vastaavat tulokset. ROR-heräte on kuitenkin yksittäisiä pistevoimia parempi approksimaatio diffuusista värähtelykentästä, sillä pistevoimilla voidaan käytännössä kohdistaa herätevoima vain hyvin pieneen osaan herätettävän rakennusosan pinnasta. ROR-heräte puolestaan kohdistetaan koko herätepintaan.

ROR-heräte kohdistettiin standardin SFS-EN ISO 10848-1 (2017) mukaiselle alueelle ontelolaataston yläpintaan: herätepisteet sijaitsivat vähintään 0,5 metrin päässä laataston reunoilta, sekä vähintään 1 metrin päässä tarkasteltavasta liitoksesta. Myös mittauspisteet valittiin standardin mukaiselta alueelta, eli vähintään 0,25 metrin päästä laataston

reunoista. Mittauspisteitä oli tarkasteltavasta rakennusosasta riippuen 2000–4000. Kussakin pisteessä määritettiin ontelolaataston pinnan normaalin suuntainen värähtelynopeus v .

Laskenta suoritettiin herättämällä ontelolaatasto kultakin puolelta kevyttä väliseinää vuorotellen, ja määrittämällä kussakin tapauksessa kummankin ontelolaataston puoliskon pintanopeudet. FEM-mallin avulla laskettujen pintanopeuksien avulla määritettiin ontelolaataston pinnan nopeustaso L_v yhtälöstä (48). Nopeustasojen avulla voitiin määrittää yhtälöstä (50) nopeustasot $D_{v,ij}$ ja $D_{v,ji}$, joista edelleen saatiin yhtälön (47) mukaisesti liitoksen suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero $\overline{D_{v,ij}}$.

3.4.5 Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan määrittäminen

Kaavassa (46) esiintyvien absorptiopituuksien a_i ja a_j määrittämiseksi on tunnettava tarkasteltavien rakennusosien rakenteelliset jälkikaiunta-ajat $T_{s,i}$ ja $T_{s,j}$ laskentatilanteessa. Rakenteellinen jälkikaiunta-aika riippuu rakenteen kokonais-häviökertoimesta η_{tot} kaavan (55) mukaisesti. Rakenteellinen jälkikaiunta-aika vaikuttaa liitoseristävyuden laskentaan, joten sen määrittäminen mahdollisimman tarkasti on oleellista liitoseristävyuden laskennan kannalta.

Yksinkertaisin tapa arvioida rakenteellinen jälkikaiunta-aika on kaavojen (55) ja (59) avulla. Mahnin (2017) mittaustilanteessa tarkasteltava rakenne oli varsin kevyesti kytkeytynyt ympäröiviin rakenteisiin: ontelolaatastot tukeutuivat toisesta päästään telineisiin, ja toisesta päästään tarkasteltavaan liitokseen. Tästä syystä kaavan (59) muuttujan X arvo valittiin siten, että se kuvastaa kevyesti kytkeytynyttä rakennetta. Kokonaishäviökertoimen määrittäminen kahdella perustellulla vakion X arvolla terssikaistoittain kaavan (59) mukaisesti. Kokonaishäviökertoimen avulla määritettiin edelleen ontelolaataston rakenteellinen jälkikaiunta-aika kaavasta (55).

Standardin sovitteen lisäksi rakenteellista jälkikaiunta-aikaa päätettiin tarkastella FEM-mallinnuksen avulla siltä varalta, että standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) approksimaation tarkkuus ei ole riittävä. Rakenteellista jälkikaiunta-aikaa tarkasteltiin jälleen ontelolaataston kokonaishäviökertoimen kautta, joka määritettiin käyttäen elementti- ja HPB-menetelmiä. Kokonaishäviökertoimen määrittäminen HPB-menetelmällä on esitelty kappaleessa 2.3.5.

Tarkasteltavan ontelolaataston taajuusvaste määritettiin ANSYS Mechanicalin *Harmonic Response* -analyysillä. Ontelolaatastoon kohdistettiin pistevoima, ja sen pinnan normaalin suuntaisen kiihtyvyyden amplitudi määritettiin tiheällä taajuushilalla 50–100 pisteestä. Validointilaskelmien (kappale 3.4.6) perusteella päädyttiin siihen, että taajuusvasteen

määrittämiseen riittää yksi herätepiste. Lisäksi todettiin, että HPB-menetelmän käyttö on tarpeen vain alle 500 Hz:n taajuuksilla, sillä validointilaskelmien mukaan yhtälön (59) sovite sopi HPB-menetelmällä määritettyihin arvoihin tätä suuremmilla taajuuksilla. Lopullisissa laskelmissa sovitea käytettiin myös täydentämään laskentatuloksia silloin, kun kaikkien taajuuskaistojen häviöitä ei kyetty määrittämään HPB-menetelmän ja interpolaation avulla ja sovitteella määritetyt arvot sopivat HPB-menetelmällä määritettyihin arvoihin. Erityisesti paksumman O37 ontelolaataston tapauksessa pienten taajuuksien (50–80 Hz) häviöiden määrittäminen osoittautui HPB-menetelmällä mahdottomaksi.

Kun ontelolaataston kiihtyvyydvaste oli määritetty FEM-mallin avulla, laataston kokonaishäviökerroin määritettiin HPB-menetelmällä kunkin laskentapisteen vasteesta. Kokonaishäviökerroin määritettiin terssikaistoittain laskemalla kunkin terssikaistan alueelle osuvia ominaistajuuksia vastaavien kokonaishäviökertoimien aritmeettinen keskiarvo. Terssikaistan kaistanleveys voidaan arvioida kaavasta (69):

$$0.23 \cdot f_{centre} \tag{69}$$

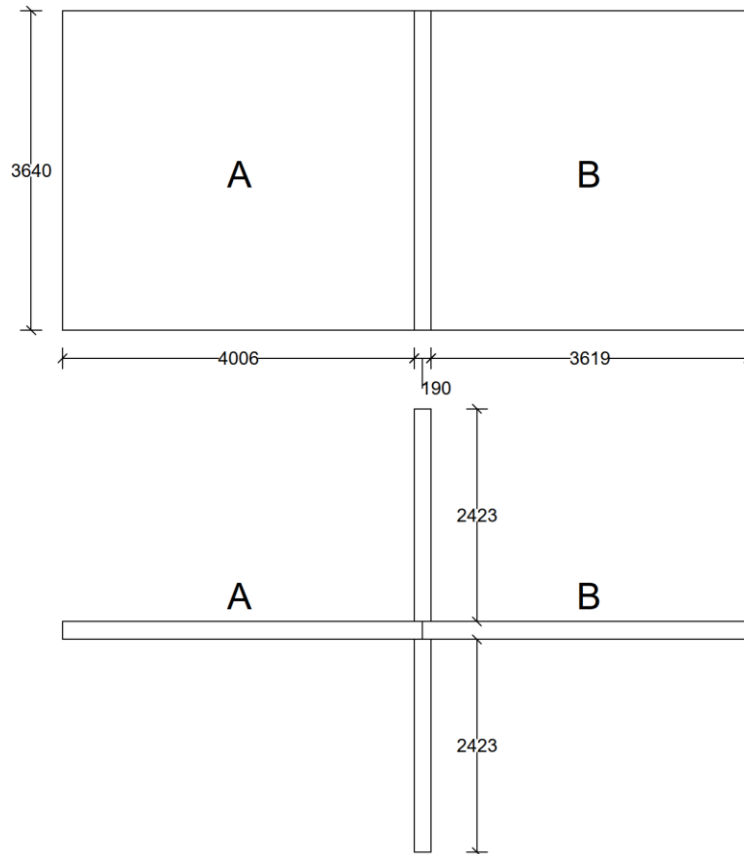
jossa f_{centre} [Hz] on 1/3-oktaavikaistan keskitaajuus (SFS-EN ISO 10848-4 2017). Joissakin tapauksissa häviökerrointa ei voitu määrittää kaikilla terssikaistoilla. Tämä johtui siitä, että tarkasteltavalla rakenteella ei ollut riittävästi ominaistajuuksia kyseisellä terssikaistalla. Tällöin määritetyt häviökertoimen arvot olivat joko täysin epärealistisia, tai häviökertoimia ei kyetty määrittämään ollenkaan kyseisellä taajuuskaistalla. Mikäli jonkin kaistan häviökerrointa ei kyetty määrittämään riittävällä tarkkuudella alhaisen ominaismuotoisuuden vuoksi, käytettiin puuttuvien arvojen määrittämiseen lineaarista interpolaatiota, tai yhtälön (59) sovitea.

Kokonaishäviökerroin määritettiin terssikaistoittain jokaisessa mittauspisteessä. Tämän jälkeen kokonaishäviökerroin keskiarvoistettiin vielä heräte- ja mittauspisteiden yli, jolloin saatiin koko rakenteen kokonaishäviökerroin terssikaistoittain. Häviökertoimen avulla voitiin edelleen määrittää rakenteellinen jälkikaiunta-aika T_s terssikaistoittain kaavan (55) avulla.

3.4.6 Validointi

Ristiliitoksen FEM-malli validoitiin vertaamalla mallin avulla määritettyä, suuntakeskiarvoistettua nopeustasoeroa $\overline{D_{v,lj}}$ ja liitoseristävyyttä K_{ij} Mahnin (2017) suorittamiin liitoseristävyuden mittauksiin. Mahnin tutkimusraportissa on esitetty liitoseristävyuden ja rakenteellisen jälkikaiunta-ajan T_s mittaustulokset. Mahnin mittaama suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero $\overline{D_{v,lj}}$ määritettiin laskennallisesti mitatun liitoseristävyuden ja rakenteellisen jälkikaiunta-ajan arvoista kaavan (46) mukaisesti.

Validointia varten mallinnettiin mahdollisimman hyvin Mahnin (2017) tutkimusraportin mukainen ristiliitos, jonka mitat on esitetty kuvassa 21. Mahnin mittauksessa käytetyistä ontelolaatoista ei ollut saatavilla tarkkaa poikkileikkausta tai materiaalitietoja. Ontelolaatan poikkileikkaus piirrettiin CAD-ohjelmistolla vastaamaan mahdollisimman hyvin mitaustilanteen ontelolaattaa. Ontelolaataston, saumavalujen ja muuratun väliseinän materiaaliominaisuudet valittiin rakenteille tyypillisiksi. Validointimallissa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 10.



Kuva 21. Validointimallin geometrian dimensiot. Mitat ovat millimetreinä. Perustuu Mahnin (2017) mittausraporttiin.

Taulukko 10. Validointimallissa käytetyt materiaaliominaisuudet.

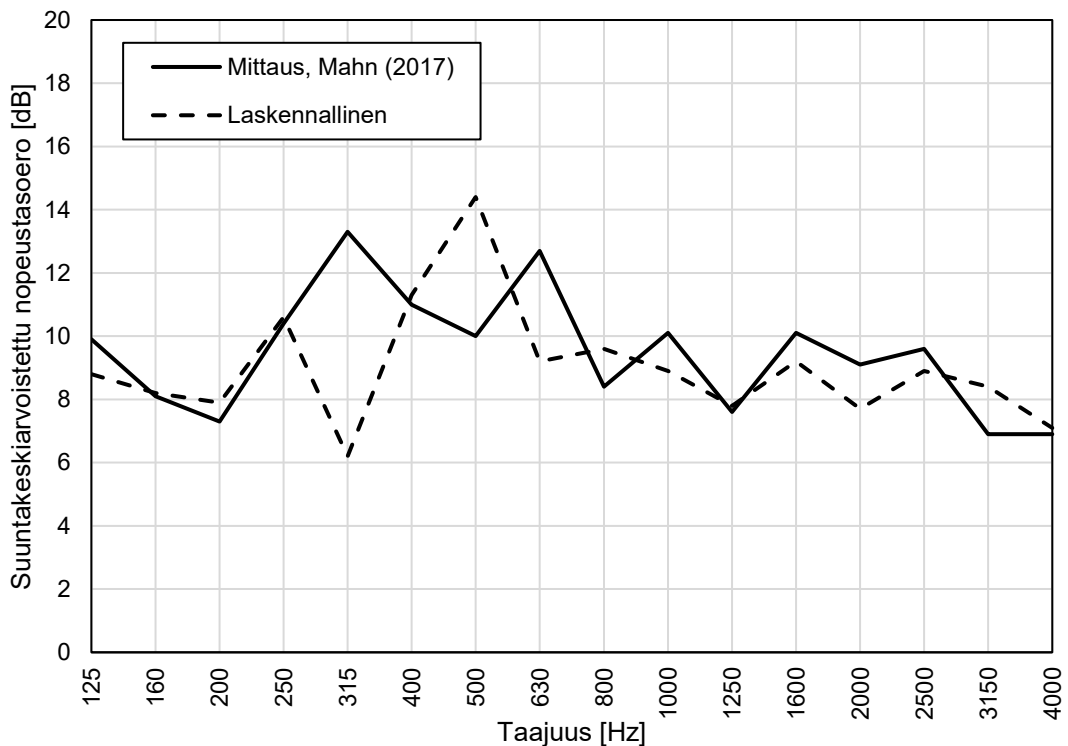
Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Youngin moduuli E [MPa]	Poisson' vakio ν [-]	Sisäinen häviökerroin η_{int} [-]
Esivalettu betoni	1620*	35000	0,2	0,005
Paikallavalettu betoni	2000*	30000	0,2	0,005
Harkko	1250*	5000	0,2	0,01

* Tiheys laskettu Mahnin (2017) ilmoittaman pintamassan perusteella.

Ontelolaatastoon liittyvä harkkoseinä mallinnettiin homogeenisenä ja isotrooppisena levyä, sillä kirjallisuuden perusteella runkoäänen etenemistä koskevissa laskelmissa muuratut rakenteet voidaan mallintaa isotrooppisina (Hopkins 2007).

Ontelolaatastoon ja harkkoseinän ristiliitos mallinnettiin täysin vapaasti tuettuna, pl. alemman harkkoseinän alareuna, joka oli nivelellisesti tuettu. Tämän tuennan todettiin vastaavan parhaiten Mahnin (2017) mittaustilanteen tuentaa. Lisäksi ontelolaatastojen vapaisiin päihin määritettiin absorboiva reunaehto kuvaamaan onteloihin syntyvän ilmaään siirtymistä laboratorio huoneilmaan.

Ristiliitoksen laskennallisesti ja Mahnin (2017) mittaama suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero $\overline{D_{v,lj}}$ on esitetty kuvassa 22. Kuvasta nähdään, että laskentamallilla määritetty nopeustasoero vastaa mitattua tulosta erittäin hyvin. Mittaustuloksen ja laskennan välillä on suuria eroja vain yksittäisillä taajuuskaistoilla. Laskennallinen ja mitattu nopeustasoero, sekä laskennan ja mittauksen väliset erot on esitetty myös taulukossa 11.



Kuva 22. Mahnin (2017) mittaama ja FEM-mallilla laskennallisesti määritetty suuntakeskiarvoistettu nopeustasoero.

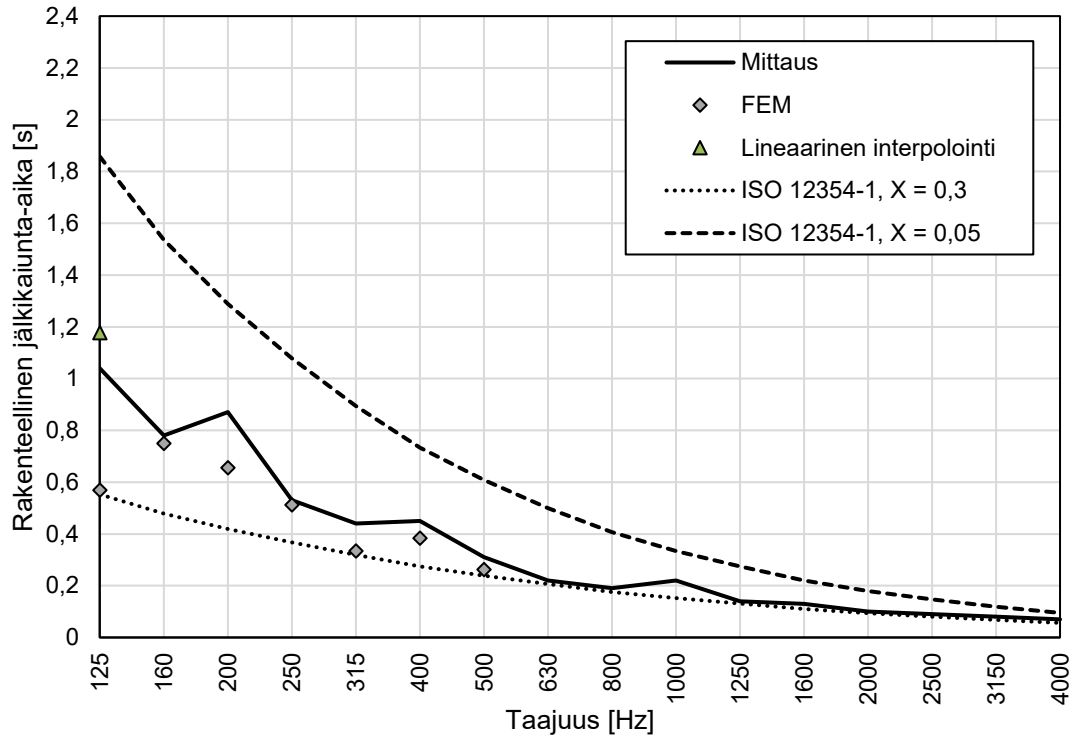
Taulukko 11. *Mitattu (Mahn 2017) ja laskennallinen nopeustasoero, sekä laskennallisen tuloksen poikkeama mitatusta.*

f [Hz]	Mittaus $\overline{D}_{v,y}$ [dB]	Laskennallinen $\overline{D}_{v,y}$ [dB]	Poikkeaman itseisarvo [dB]
125	9,9	8,8	1,1
160	8,1	8,2	0,1
200	7,3	7,9	0,6
250	10,4	10,6	0,2
315	13,3	6,2	7,1
400	11	11,3	0,3
500	10	14,4	4,4
630	12,7	9,2	3,5
800	8,4	9,6	1,2
1000	10,1	8,9	1,2
1250	7,6	7,8	0,2
1600	10,1	9,2	0,9
2000	9,1	7,7	1,4
2500	9,6	8,9	0,7
3150	6,9	8,4	1,5
4000	6,9	7,1	0,2

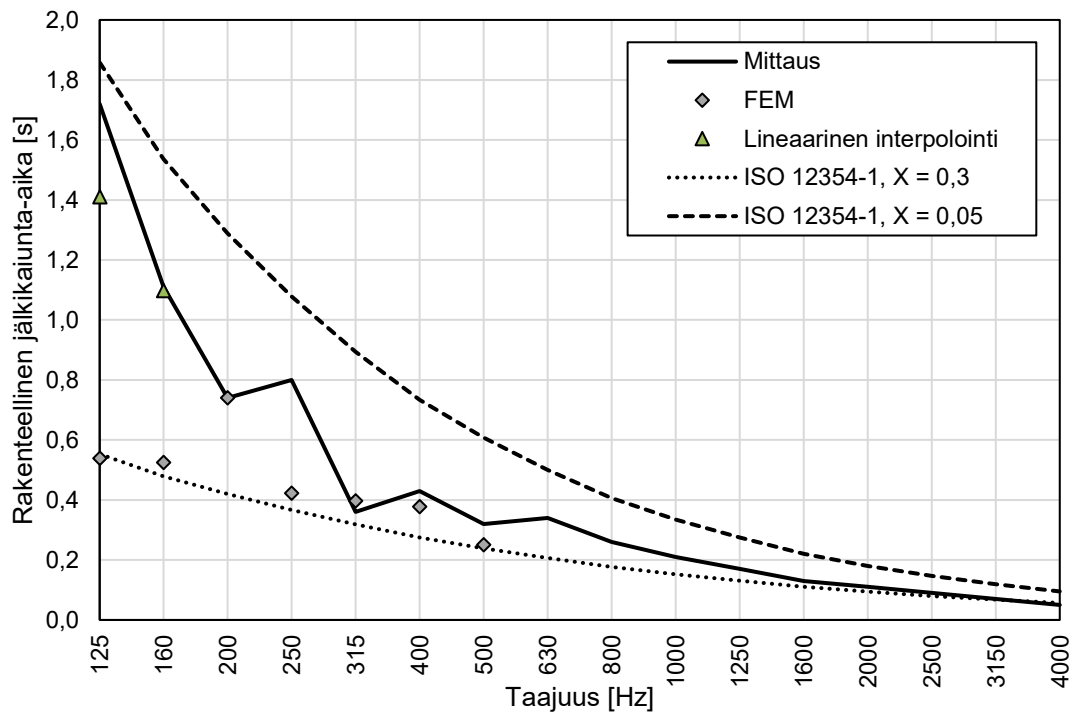
Taulukosta 11 nähdään, että itseisarvoltaan suurimmat poikkeamat mittaustuloksesta tapahtuvat 315 Hz:n, 500Hz:n ja 630 Hz:n terssikaistoilla, jossa erotukset ovat 7,1 dB, 4,4 dB ja 3,5 dB. Keskimääräinen poikkeama mittaustuloksen ja laskennallisen tuloksen välillä on 1,5 dB. Mahdolliset eroavaisuudet laskennan ja mittausten välillä johtunevat osin lähtötiedoista; Mahnin (2017) mittauksessa käytettyjen ontelolaattojen ja harkkoseiniä materiaaliominaisuuksia ei esitetty mittausraportissa, pois lukien lattioiden ja seinien pintamassat. Lähtötietojen lisäksi rakenteen tuennan mallintaminen täysin mittaustilannetta vastaavaksi osoittautui vaikeaksi. Tulosten eroavaisuuteen vaikuttaa myös Mahnin (2017) mittauksen mittausepävarmuus.

Liitoseristävyden laskemisessa käytetyt ontelolaatosten kokonaishäviökertoimet määritettiin kappaleen 2.3.5 mukaisesti HPB-menetelmällä. Ontelolaataston taajuusvaste määritettiin käyttäen MSUP-analyysia, jonka periaate on kuvailtu kappaleessa 2.5.2. MSUP-analyysi suoritettiin käyttäen ANSYS Mechanicalin *Harmonic Response*-analyysia. MSUP-analyysissä ontelolaatostoon kohdistettiin pistevoima neljästä eri herätepisteestä. Pistevoiman aiheuttaman värähtelyn kiihtyvyyden amplitudi ontelolaataston pinnan normaalin suunnassa määritettiin vähintään 50 pisteestä. Ontelolaataston kiihtyvyydsvaste määritettiin kummallakin puolella liitosta.

Laskennallisesti määritetty ja Mahnin (2017) mitaama ontelolaataston rakenteellinen jälkikaiunta-aika liitoksen eri puolilla on esitetty kuvassa 23. Lisäksi kuvassa on esitetty standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) liitteen C avulla määritetty rakenteellinen jälkikaiunta-aika kahdella vakion X perustellulla arvolla.



a)



b)

Kuva 23. Mahnin (2017) mitaama ja laskennallisesti määritetty ontelolaataston rakenteellinen jälkikaiunta-aika. a) Laataston A rakenteellinen jälkikaiunta-aika b) Laataston B rakenteellinen jälkikaiunta-aika.

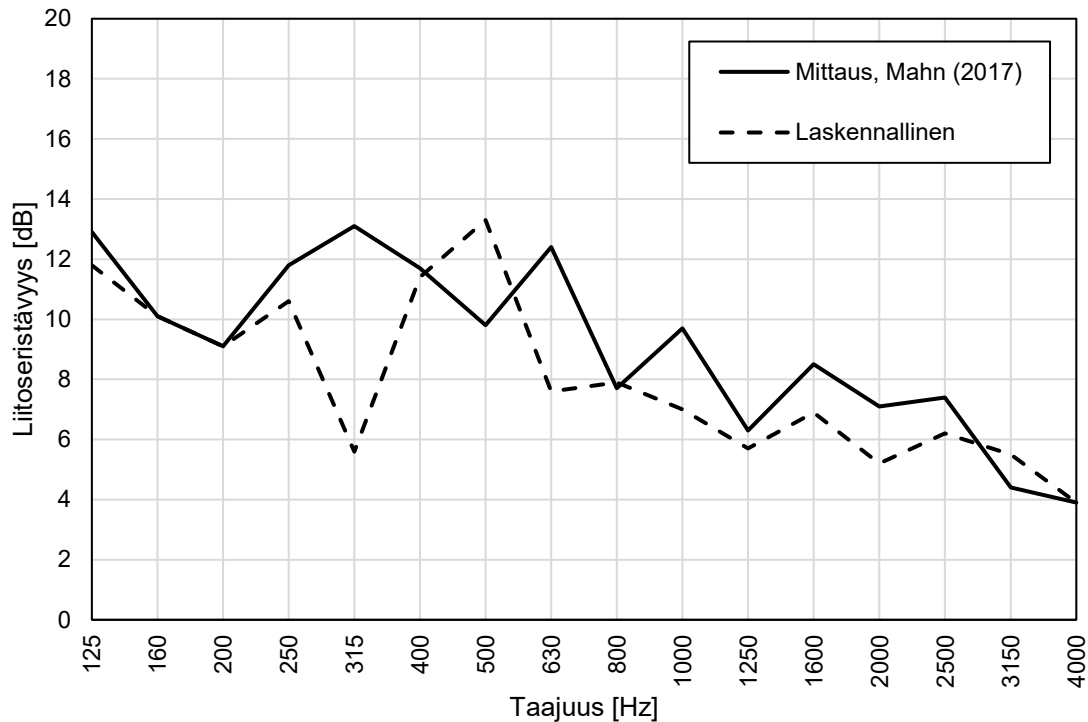
Kuvasta 23 nähdään, että standardin approksimaatiot eivät vastaa Mahnin (2017) mitaustulosta. Tämä selittynee sillä, että kaavan (59) approksimaatio on tarkoitettu kokonaishäviökertoimen tarkasteluun valmiissa rakennuksessa. Mahnin (2017) mittaustilanteessa ontelolaatatot kytkeytyvät vain tarkasteltavaan ristiliitokseen, sekä lepäävät toisesta päästään telineen päällä. Laatastojen käyttäytyminen ei tällöin Mahnin tapauksessa vastaa ontelolaataston käyttäytymistä valmiissa rakennuksessa, jossa ontelolaatasto kytkeytyy melko jäykästi kaikilta sivuiltaan muihin rakenteisiin. Vakion arvolla $X = 0,3$ standardin approksimaatio aliarvioi ontelolaataston rakenteellista jälkikaiunta-aikaa, kun taas arvolla $X = 0,05$ approksimaatio yliarvioi rakenteellista jälkikaiunta-aikaa merkittävästi.

FEM-mallin ja HPB-menetelmän avulla määritetty rakenteellinen jälkikaiunta-aika vastaa Mahnin (2017) mittausta merkittävästi paremmin. Kuvassa 23a 125 Hertzin terssikaistalla ja kuvassa 23b 125 ja 160 Hertzin kaistoilla HPB-menetelmän avulla määritetty rakenteellinen jälkikaiunta-aika poikkeaa merkittävästi mitatusta. Suuri ero laskennan ja mittauksen välillä johtuu ontelolaataston matalasta ominaismuototiheydestä, jonka vuoksi ennen mainituilla terssikaistoilla HPB-menetelmä ei sovellu kokonaishäviökertoimen määrittämiseen. On myös mahdollista, että ANSYS:n moodianalyysi ei löydä kaikkia mallin ominaisuuksia.

Kuvassa 23 on esitetty myös lineaarisella interpolaatiolla määritetyn kokonaishäviökertoimen avulla laskettu jälkikaiunta-aika niillä kaistoilla, joilla laskennallinen arvo poikkeaa merkittävästi. Kuvasta nähdään, että interpoloitu arvo vastaa paremmin mitaustulosta. Interpolaation käyttäminen kuitenkin aiheuttaa epävarmuutta tulokseen.

Koska standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) approksimaation ja mitaustuloksen vastaavuus yli 500 Hz:n taajuuksilla on varsin hyvä, päätettiin käyttää HPB-menetelmää kokonaishäviökertoimen määrittämiseen vain alle 500 Hz:n taajuuksilla laskenta-ajan säästämiseksi. Yli 500 Hz:n taajuuksilla kokonaishäviökertoimen ja rakenteellinen jälkikaiunta-aika laskettiin kaavojen (59) ja (55) avulla.

Liitoseristävyys määritettiin yhtälöstä (46) käyttäen laskennallisesti määritettyjä suunta-keskiarvoistetun nopeustasoeron $\overline{D_{v,ij}}$ ja rakenteellisen jälkikaiunta-ajan T_s arvoja. Liitoseristävyuden K_{ij} mittaus- ja laskentatulokset on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Mahnin (2017) mitaama ja FEM-mallilla määritetty liitoseristävyys.

Kuvasta 24 nähdään, että vastaavuus mittauksen ja laskennan välillä on erittäin hyvä. Verrattuna nopeustasoeroon, liitoseristävyyden laskentatuloksen ja mitaustuloksen väliset erot ovat paikoin pienempiä ja paikoin suurempia. Muutokset johtuvat liitoseristävyyden normalisoinnista mitaustilanteen rakenteellisen jälkikaiunta-ajan avulla (yhtälö (46)). Vaikka laskennallisesti määritetyn rakenteellisen jälkikaiunta-ajan vastaavuus mitattuun oli varsin hyvä, liitoseristävyyden normalisointi on varsin herkkä rakenteellisen jälkikaiunta-ajan muutoksille: pienikin ero jälkikaiunta-ajan arvossa vaikuttaa liitoseristävyyteen. Laskennallisesti määritetty liitoseristävyys vastaa kuitenkin normalisoinnista huolimatta mitaustulosta varsin hyvin, joten laskentamalli voidaan todeta toimivaksi.

3.5 SFS-EN ISO 12354 sivutiesiirtymälaskenta

Ontelolaataston täyttövalun vaikutusta ääneneristävyyteen tilojen välillä tarkasteltiin standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) mukaisten ilma- ja askelääneneristävyyden laskentamenetelmien avulla. Laskennan lähtötietona tarvittavat ontelolaattojen ilma- ja askelääneneristävyydet määritettiin kappaleen 3.3 mukaisesti. Muiden sivuavien rakenteiden ja tiloja erottavan seinän ilmaääneneristävyydet määritettiin A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n kehittämällä parametrisellä laskentamallilla, jonka Riitakangas (2020) on osoittanut toimivaksi erilaisten rakenteiden ilmaääneneris-

tävyyksien tarkasteluun. Ontelolaataston ja kevytrakenteisen tilojen välisen seinän liitoksen liitoseristävyys suoralle reitille ontelolaatastoa pitkin määritettiin kappaleen 3.4 mukaisella FEM-mallilla.

Tilojen välistä ääneneristävyyttä tarkasteltaessa rakennusosien välisten liitosten liitoseristävyydet K_{ij} ja tarvittaessa normalisoidut nopeustasoerot $\overline{D_{v,ij,n}}$ määritettiin standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) liitteiden E ja F mukaisesti, pois lukien ontelolaataston ja tiloja erottavan seinän liitos, jonka liitoseristävyys määritettiin kappaleen 3.4 mukaisesti FE-menetelmällä.

Huoneiden välisen ääneneristävyyden laskennassa rakennusosien kokonaishäviökertoimien η_{tot} määrittämiseen käytettiin yhtälöiden (59) ja (60) sovitteita, sillä ontelolaataston häviökertoimien todettiin vastaavan sovitteita melko hyvin. Lisäksi kaikkien rakennusosien häviökertoimien määrittäminen laskentatilanteessa kappaleessa 3.4.5 esitetyn menetelmän avulla olisi ollut erittäin aikaa vievää, ellei jopa täysin mahdotonta rakennusosien suuren määrän vuoksi.

3.5.1 Tarkasteltavat tilanteet

Tilojen välisen ilma- ja askelääneneristävyyden yhteydessä tarkastellut rakennetyypit on esitetty taulukossa 8. Yhteensä erilaisia rakennetyypiyhdistelmiä oli 30 kappaletta. Jokaisella rakennetyypiyhdistelmällä määritettiin tilojen välinen ilmaääneneristävyys standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) mukaisesti. Tilojen välinen askelääneneristävyys määritettiin vain kuudessa tapauksessa johtuen siitä, että standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamallissa otetaan huomioon vain tiloja erottava seinä ja sivuava lattiarakenne, kun tarkastellaan vaakasuuntaista askelääneneristävyyttä.

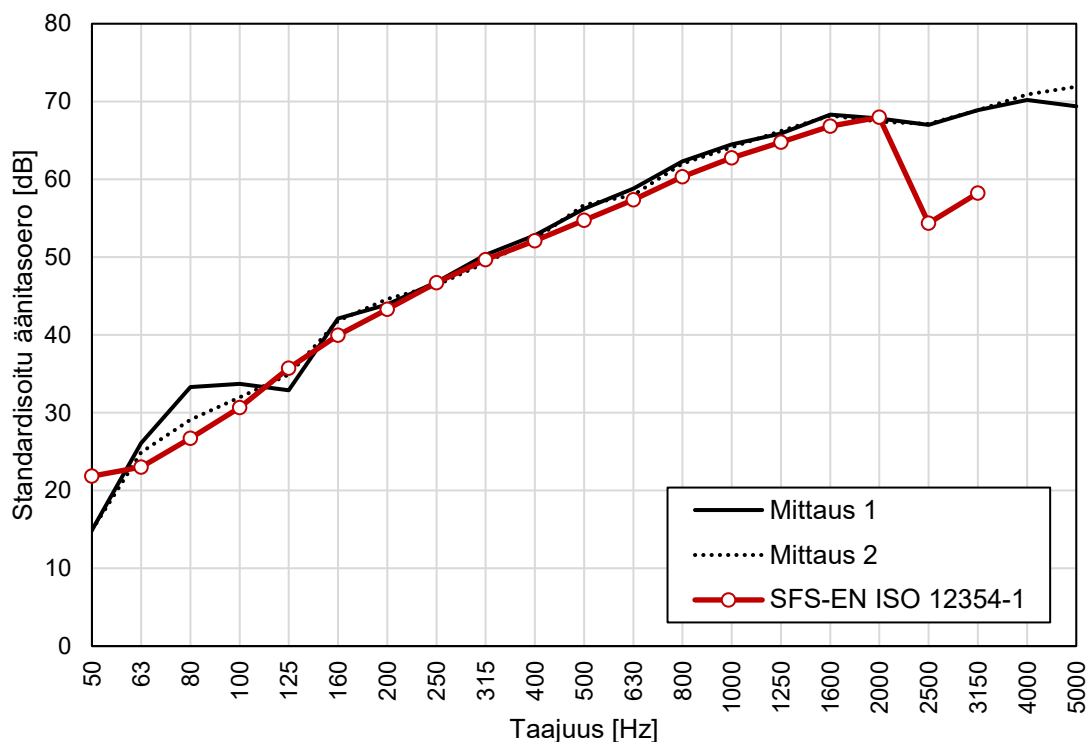
Ontelolaataston täyttövalun vaikutuksen arvioimiseksi laskenta suoritettiin kaikissa tapauksissa sekä täyttövalulla että ilman. Täyttövalun vaikutus otettiin huomioon käyttämällä kappaleen 3.4 mukaisesti määritettyjä liitoseristävyyksiä.

Helimäki & Kääriäinen (2013) pitivät parketti- ja laminaattilattioiden vaikutusta osasyynä heikolle tilojen väliselle ääneneristävyydelle. Tästä syystä täyttövalun vaikutuksen lisäksi tarkasteltiin parkettiresonanssin vaikutusta tilojen väliseen ilma- ja askelääneneristävyyteen määrittämällä tilojen välinen ääneneristävyys kaikissa tarkastelluissa tilanteissa sekä parketilla että ilman.

3.5.2 Validointi

Standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamallien tarkkuuden varmistamiseksi mallien laskentatuloksia vertailtiin kappaleessa 3.1 esitellyjen kenttämittausten tuloksiin. Kenttämittauksiin vertaamalla voitiin myös varmistua siitä, että standardien laskentamallit soveltuvat tarkasteltavien rakenteiden toiminnan tarkasteluun.

Tilojen välisen ilmasteneristävyyden validointikohteeksi valittiin mittauskohde 2. Kohteen 2 mitattu tilojen välinen standardisoitu äänitasoero sekä standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laskentamallilla määritetty ilmasteneristävyys on esitetty kuvassa 25.

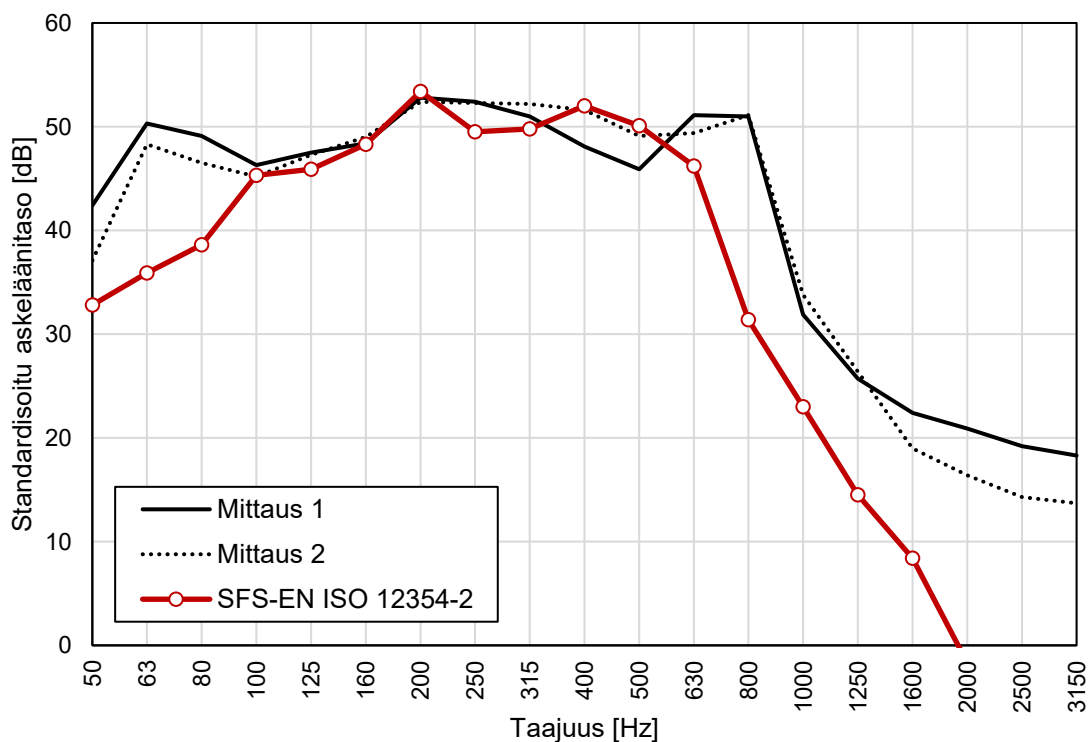


Kuva 25. Kohteessa 2 mitattu sekä laskennallisesti määritetty tilojen välinen standardisoitu äänitasoero.

Kuvasta 25 havaitaan, että vastaavuus kenttämittausten ja laskennan välillä on erittäin hyvä taajuusalueella 50–2000 Hz. Suurilla taajuuksilla (2500–3150 Hz) laskennan ja mittauksen välillä esiintyy poikkeama. Laskentatuloksessa 2500 Hz:n kaistalla havaittava äänitasoeron heikentyminen johtuu tiloja erottavan kaksirankaisen levyseinän kipsilevyjen rajataajuudesta; kipsilevyn koinsidenssin rajataajuus on ~2500 Hz, joka vastaa kuvaajassa havaittavaa pudotusta. Koska levyseinä on symmetrinen, tämän koinsidenssin ilmasteneristävyyttä heikentävä vaikutus kertaantuu laskennassa. Mittaustuloksissa 2500 Hz:n kaistalla havaitaan myös heikennys äänitasoerossa, mutta kuitenkin lasken-

taa huomattavasti pienempi. Tämä johtuu laskennan ideaalisuudesta, ja toisaalta todellisuuden epäideaalisuudesta: todellisuudessa kipsilevyt eivät ole täysin identtisiä, eikä niiden kiinnitys seinärankoihin ole täysin identtinen seinän kullakin puolella. Laskennassa taas levyt käyttäytyvät ideaalisesti, jolloin koinsidenssin rajataajuuden vaikutus on selkeämpi.

Askelääneneristävyyden laskelmien validoinnissa käytettiin mittauskohteen 2 sijaan kohdetta 4. Askelääneneristävyyden validointilaskelmiin valittiin toinen mittauskohde johtuen kohteen 2 askelääneneristävyyden mittauksissa esiintyneistä erikoisuuksista, sekä kohteen vahvasti muista poikkeavista mittaustuloksista. Kohteen 4 tilojen välinen mitattu ja laskennallisesti määritetty askelääneneristävyys on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Kohteessa 4 mitattu ja laskennallisesti määritetty tilojen välinen standardisoitu askeläänitaso.

Kuvasta 26 nähdään, että vastaavuus mitattujen ja laskennallisten askeläänitasojen välillä on varsin hyvä välillä 100–630 Hz. Taajuusalueilla 50–80 Hz ja 800–3150 Hz vastaavuus mittausten ja laskennan välillä on taas heikompaa. Mittaus- ja laskentatulosten välinen ero voi johtua standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamallin rajoittuneisuudesta. Laskentamalli huomioi vain kaksi ensimmäisen kertaluvun äänen sivutiesiirtymäreittä. Tällöin yksittäisen reitin vaikutus korostuu laskennassa verrattuna todelliseen tilanteeseen, jossa myös korkeamman kertaluokan sivutiesiirtymät vaikuttavat tilojen väliseen ääneneristävyyteen. Mittauskohteessa käytetyn lattianpäällysteen materiaality-

toja ei myöskään tiedetä tarkasti, mikä aiheuttaa epävarmuutta laskentaan. Askelääne-neristävyden laskentamallia voidaan kuitenkin pitää toimivana, sillä mitatut askelääne-neristävyden yksilukuarvot $L'_{nT,w} + C_{L,50-2500}$ olivat 46 ja 47 dB, kun taas laskennallinen arvo oli 45 dB. Yksilukuarvon kannalta laskennan tarkkuus on siis hyväksyttävällä tasolla.

4. TULOKSET

4.1 Mittaustulokset

Kenttämittausten tulokset on esitetty taulukossa 12. Tulokset on esitetty käyttäen niitä mittalukuja, joilla määräystasot on ilmoitettu Suomessa. Ilmaääneneristävydestä on esitetty standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ ja askelääneneristävydestä standardisoitu askeläänitasoluku spektripainotustermillä $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$. Sekä ilma- että askelääneneristävyys mitattiin kussakin kohteessa kahdesti mittaasepävarmuuden minimoimiseksi.

Taulukko 12. *Kenttämittausten tulokset*

Kohde	$D_{nT,w}$		$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	
Kohde 1	58 dB	57 dB	41 dB	41 dB
Kohde 2	57 dB	57 dB	66 dB*	63 dB*
Kohde 3	54 dB	52 dB	49 dB	49 dB
Kohde 4	53 dB	54 dB	47 dB	46 dB

* Spektripainotustermi $C_{I,50-2500}$ oli negatiivinen. Ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä mukaisesti vain positiiviset spektripainotustermit huomioidaan.

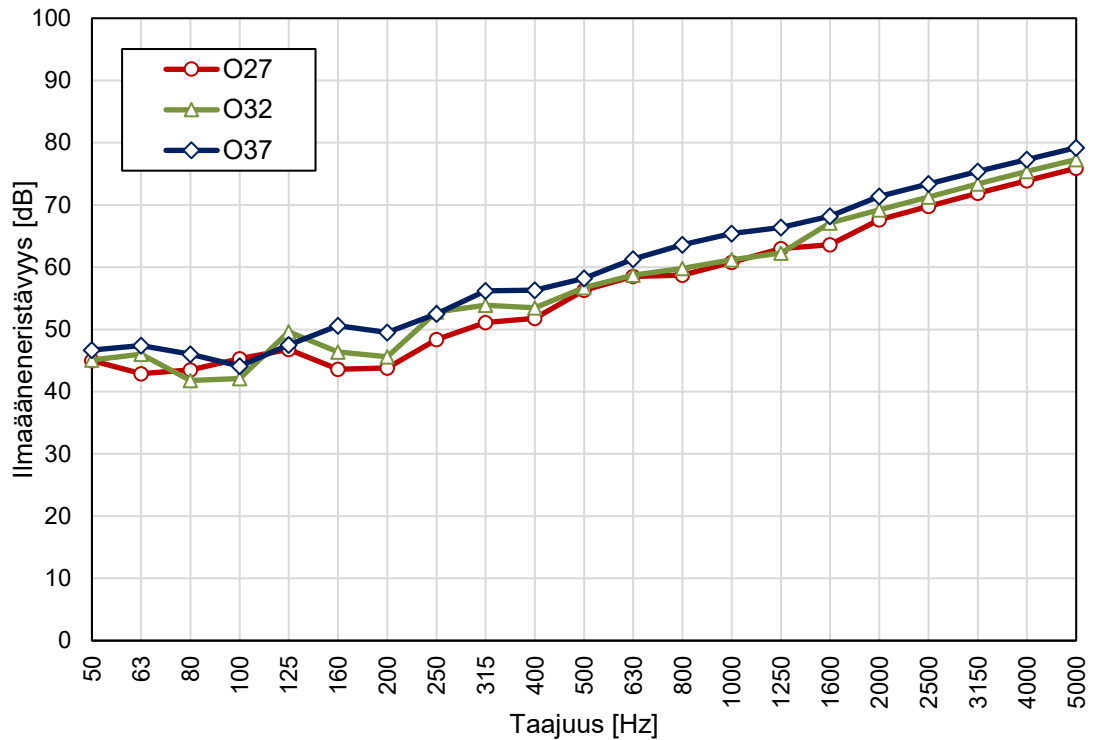
Mittaustuloksista nähdään, että kaikkien kohteiden rakenneratkaisut eivät täytä Ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 (2017) vaatimusta asuinhuoneistojen välisestä ilmaääneneristävydestä $D_{nT,w} \geq 55 \text{ dB}$. Kaikki kohteet paitsi kohde 2 täyttävät ympäristöministeriön asetuksen (2017) vaatimuksen huoneistojen välisestä askelääneneristävydestä $L'_{nT,w} + C_{I,50-2000} \leq 53 \text{ dB}$. Kohteessa 2 tarkasteltujen tilojen jälkikaiunta-ajat olivat erityisen pitkiä: taajuusalueella 160–1000 Hz mitattu jälkikaiunta-aika oli yli 2 s, mikä on erittäin pitkä mitatun kokoiselle huoneelle. Lisäksi askelääneneristävyden mittauksen aikana vastaanottohuoneessa havaittiin vahva, kumiseva ääni. Näistä syistä kohteen 2 askelääneneristävyden mittaustuloste ei pidetty vertailukelpoisena. Mittaustulokset terssikaistoittain, sekä niistä määritetyt ilma- ja askelääneneristävyden yksiluarvot ($D_{nT,w}$, $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$) on esitetty liitteessä A.

4.2 Laskennan tulokset

Tässä kappaleessa esitellään kappaleissa 3.3, 3.4 ja 3.5 esitellyillä laskentamenetelmillä saadut tulokset.

4.2.1 Ontelolaataston ääneneristävyys

Ontelolaatastojen ilmääneneristävyys laskentatulokset on esitetty kuvassa 27. Ontelolaatastojen ilmääneneristävyys määritettiin kappaleessa 3.3.4 esitellyllä ontelolaataston ilmääneneristävyys FEM-mallilla, jota täydennettiin käyttäen A-Insinöörit Oy:n kehittämää parametrissa ilmääneneristävyyslaskentasovellusta (Riitakangas 2020).

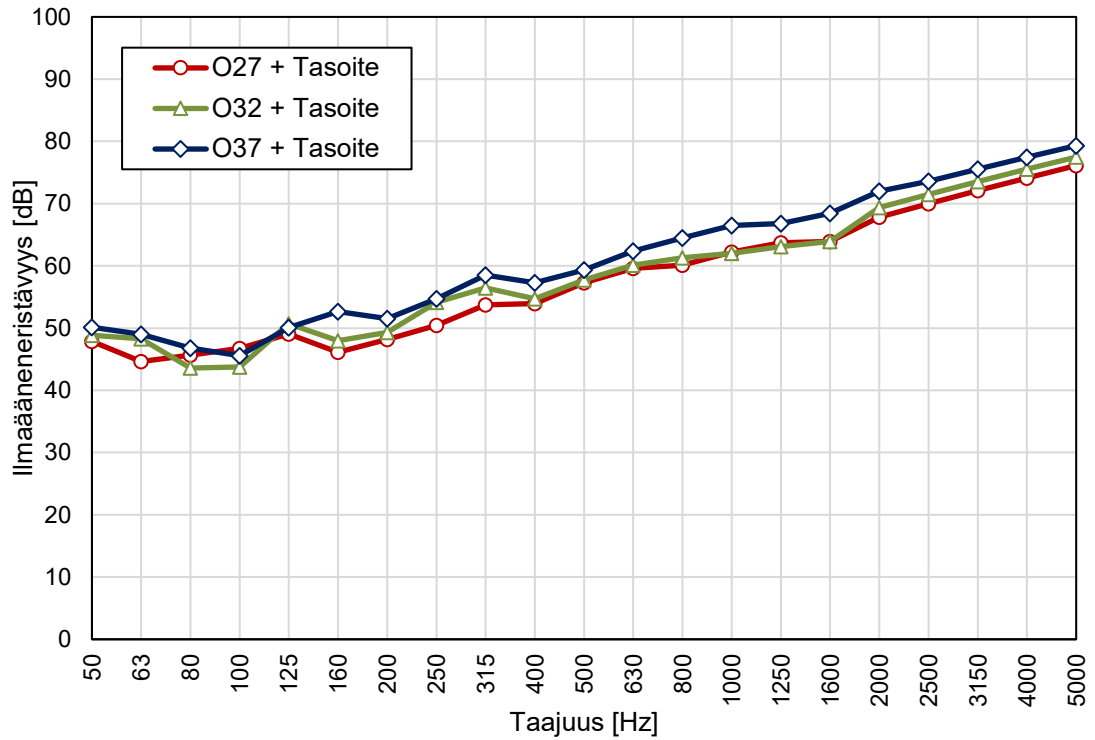


Kuva 27. Ontelolaatastojen laskennallisesti määritetyt ilmääneneristävyys. Tulokset esitetty 1/3-oktaavikaistoittain.

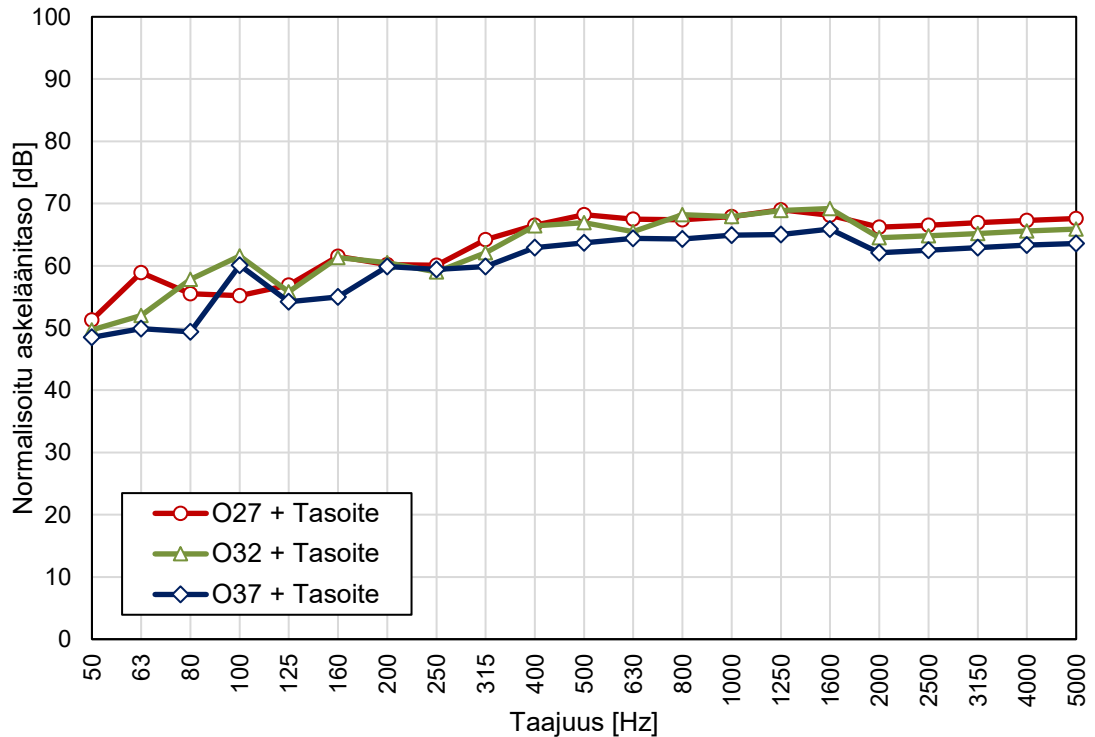
Kuvasta 27 nähdään, että mitä suurempi massa ontelolaatastolla on, sen parempi on sen ilmääneneristävyys. Ontelolaatastojen O27 ja O37 ilmääneneristävyys keskimääräinen ero on n. 3,5 dB. Käyräparvesta havaitaan, että keski- ja suurilla taajuuksilla laatastojen moodikäyttäytyminen on vähäistä, ja ilmääneneristävyyskäyrät nousevat tasaisesti. Pienillä taajuuksilla ontelolaatastojen ominaistaajuudet vaikuttavat niiden ilmääneneristävyyskäyrän jonkin verran, mikä havaitaan piikkeinä ja kuoppina käyrällä. Eri-tyyppisen selkeästi ominaistaajuuksien vaikutus on havaittavissa ontelolaatalla O32.

Tilojen välisen ääneneristävyys laskelmia varten määritettiin myös ontelolaataston ilmääneneristävyys silloin, kun sen pinnassa on tasoite. Tasoitteen paksuudeksi valittiin 15 mm mittauskohteiden mukaisesti. Tasoitteen vaikutus määritettiin A-Insinöörit Oy:n parametrilla ilmääneneristävyys laskentasovelluksella (Riitakangas 2020). Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 28. Kuvassa 29 on puolestaan esitetty ontelolaataston askelääneneristävyys laskentatulokset, kun ontelolaataston pinnassa on tasoite.

Askelääneneristävyydet määritettiin kappaleessa 3.3.5 esitellyllä menetelmällä käyttäen sekä FEM-mallinnusta että standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) liitteen B homogeenisen rakenteen askelääneneristävyyden laskentamenetelmää. Tasoitteen vaikutus askelääneneristävyyteen määritettiin standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) liitteen B laskentamenetelmällä.



Kuva 28. Ontelolaatastojen laskennallisesti määritetyt ilmaääneneristävyydet, kun laatastaston pinnassa 15 mm paksu tasoite.

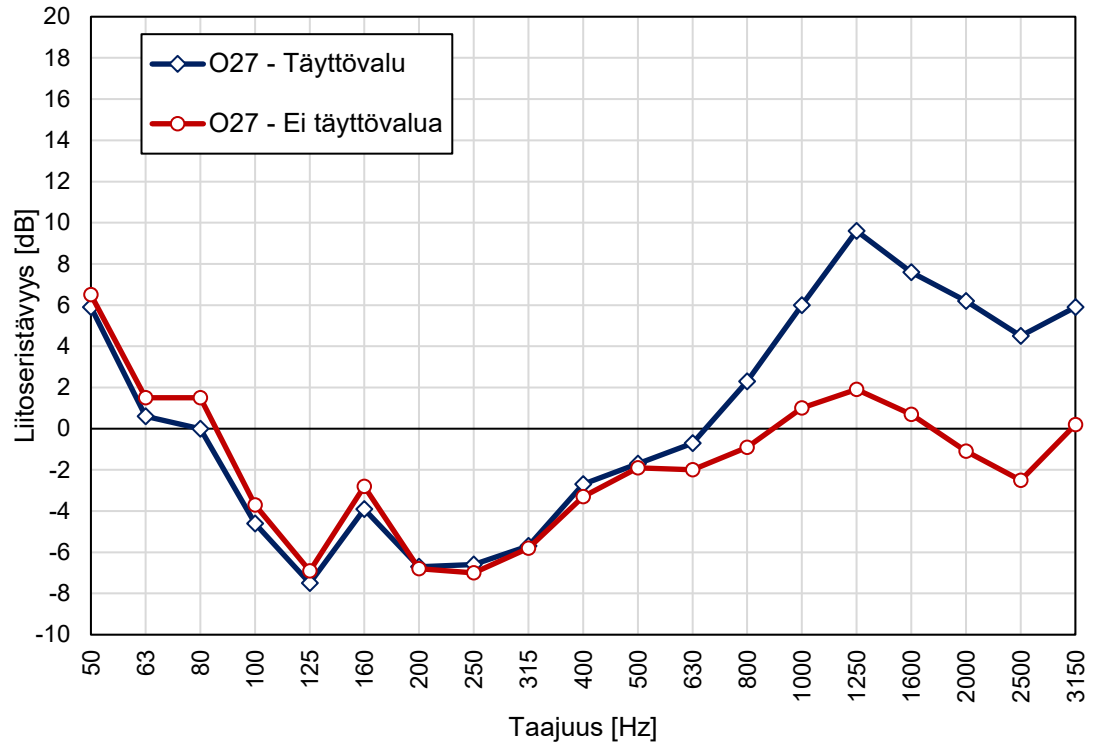


Kuva 29. Ontelolaatastojen laskennallisesti määritetyt askelääneneristävyydet, kun ontelolaataston pinnassa on 15 mm paksu tasoite.

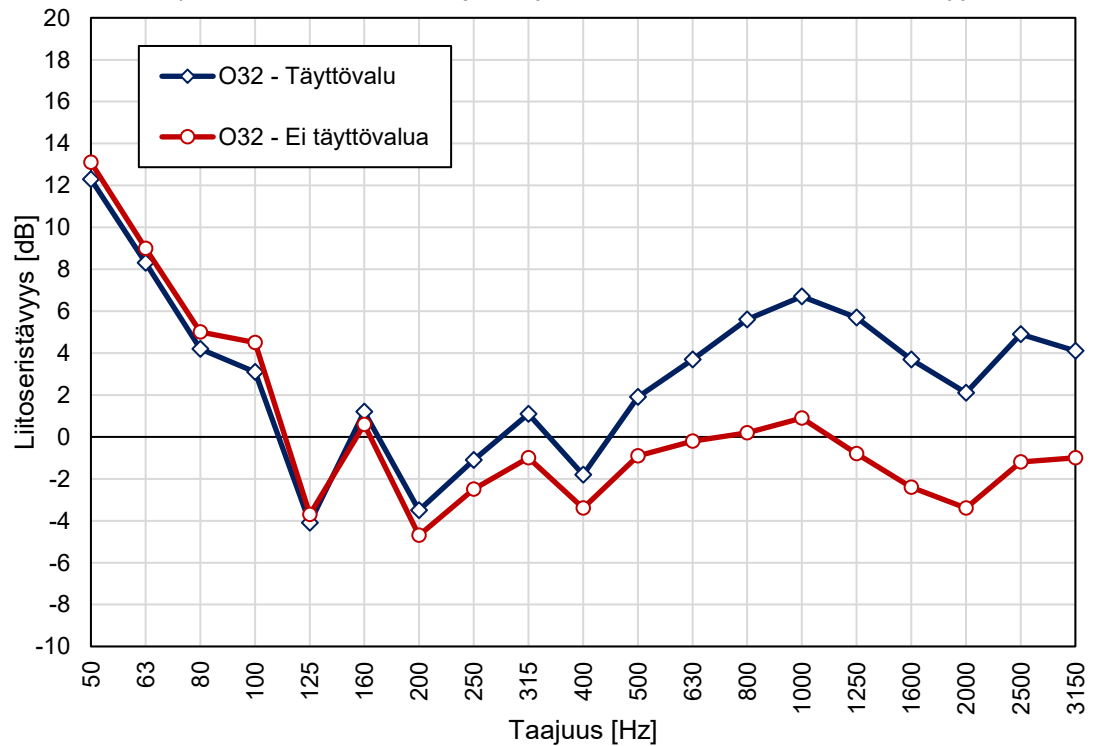
Kuten ilmapääneneristävyyden tapauksessa, kuvasta 29 nähdään että ontelolaataston askelääneneristävyys paranee, kun sen massaa kasvatetaan. Erot ovat kuitenkin jokseenkin pienempiä, kuin laatastojen ilmapääneneristävyyden tapauksessa.

4.2.2 Ontelolaataston ja kevyen väliseinän liitoksen eristävyys

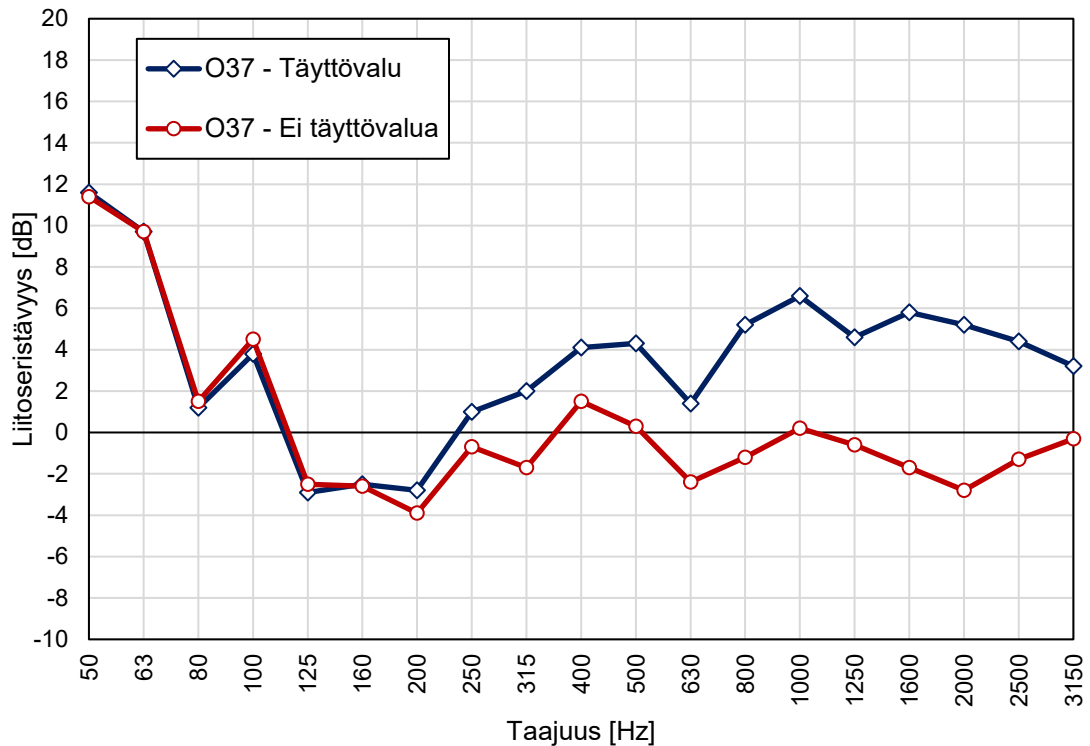
Tässä kappaleessa on esitetty laskennallisesti määritettyjä tuloksia ontelolaataston ja kevytrakenteisen tilojen välisen seinän liitoksen liitoseristävyydelle sekä ontelolaataston täyttövalulla että ilman täyttövalua. Kuvassa 30 on esitetty ontelolaatastojen O27, O32 ja O37 sekä kevytrakenteisen, kaksirankaisen tilojen välisen seinän liitoksen liitoseristävyys K_{ij} 1/3-oktaavikaistoittain.



a) Ontelolaataston O27 ja kevyen väliseinän liitoksen liitoseristävyys.



b) Ontelolaataston O32 ja kevyen väliseinän liitoksen liitoseristävyys.

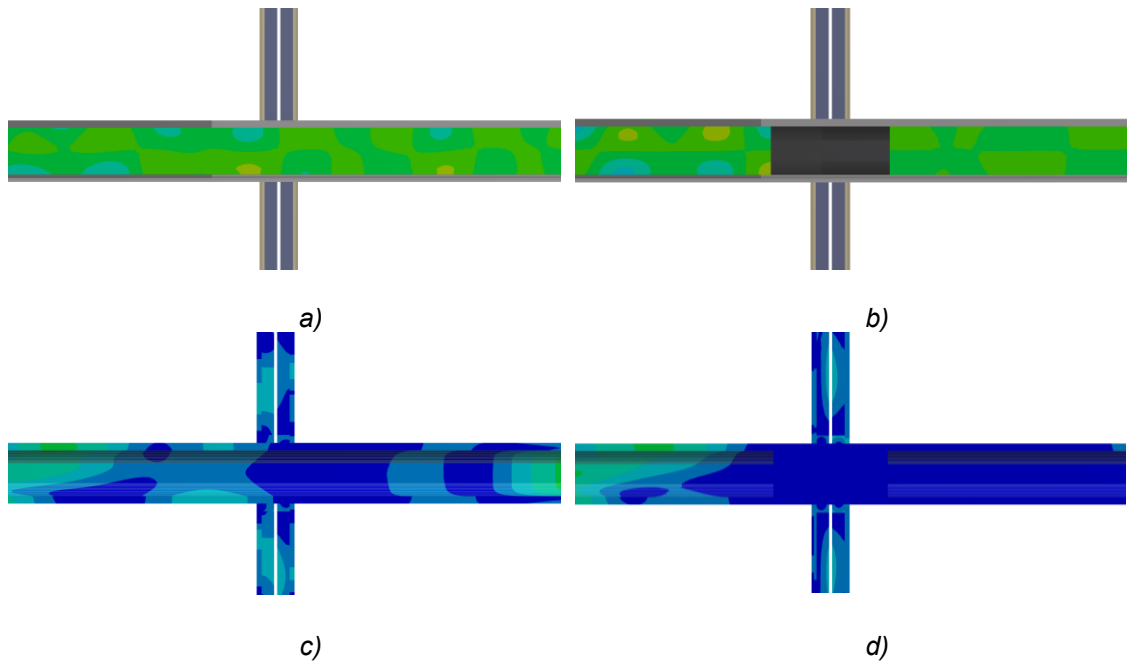


c) Ontelolaataston O37 ja kevyen väliseinän liitoksen liitoseristävyys.

Kuva 30. Ontelolaataston ja kevyen väliseinän liitoksen liitoseristävyiden laskentatulokset.

Kuvista 30b ja c nähdään, että n. 200 Hz:n yläpuolella ontelolaataston täyttövalu kasvattaa liitoseristävyyttä, joskin ero täyttövaluttomaan liitokseen on vain noin 2–4 dB alle 500 Hz:n taajuuksilla. Sen sijaan alle 200 Hz:n taajuuksilla täyttövalun vaikutus on käytännössä merkityksetön, ja 80–100 Hz:n kaistoilla täyttövalu jopa heikentää nopeustasoeroa hieman. Kevyimmän ontelolaataston O27 tapauksessa (kuva 30a) täyttövalun vaikutus alkaa muista poikkeavasti näkyä vasta 500 Hz:n yläpuolella.

Täyttövalun vaikutusta ontelolaataston ja kevytrakenteisen seinän liitoksen käyttäytymiseen on kuvattu myös kuvassa 31, jossa on esitetty FE-menetelmällä määritetty liitoksen rakenteellinen kokonaissiirtymä ja ontelolaataston onteloiden äänenpaineen vaihtelu. Kuvassa on esitetty ontelolaatasto O32 taajuudella ~1000 Hz, jolla täyttövalun vaikutus on selkeimmin havaittavissa (ks. kuva 30b).



Kuva 31. Ontelolaataston O32 ja kevytrakenteisen seinän liitoksen FEM-mallin tuloksia taajuudella ~ 1000 Hz. a) Onteloiden äänenpaine, ei täyttövalua. b) Onteloiden äänenpaine, täyttövalua. c) Liitoksen kokonaissiirtymä, ei täyttövalua. d) Liitoksen kokonaissiirtymä, täyttövalua.

Kuvasta 31 nähdään miten täyttövalua vaimentaa sekä ontelolaatastossa etenevää värähtelyä, että ontelolaataston onteloissa etenevää ilmaääntä. FE-menetelmällä saaduista laskentatuloksista voidaan siis päätellä, että täyttövalua parantaa liitoksen kykyä estää värähtelyn etenemistä, ja lisäksi se vaimentaa onteloissa etenevää ilmaääntä.

4.2.3 Tilojen välinen ääneneristävyys

Ontelolaataston täyttövalun vaikutusta tilojen väliseen ääneneristävyyteen tarkasteltiin tekemällä sarja laskelmia standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) mukaisilla laskentamenetelmillä. Tarkastellut tilat sekä tarkastellut rakennusosat on esitetty kappaleessa 3.5. Tilojen välinen laskennallinen standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ eri rakennetyyppiyhdistelmillä on esitetty taulukossa 13. Tilojen välinen standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ on puolestaan esitetty taulukossa 14.

Taulukko 13. Täyttövalun vaikutus tilojen väliseen ilmastäneristävyyteen.

VP	US	PHS	Ei täyttövalua	Täyttövalu	Erotus [dB]
			$D_{nT,w}$ [dB]	$D_{nT,w}$ [dB]	
VP.O27	SW80	RPHS	51	51	0
VP.O27	SW120	RPHS	53	53	0
VP.O27	SW150	RPHS	54	54	0
VP.O27	SW180	RPHS	55	55	0
VP.O27	US.K	RPHS	56	56	0
VP.O27	SW80	KPHS	51	51	0
VP.O27	SW120	KPHS	53	53	0
VP.O27	SW150	KPHS	55	55	0
VP.O27	SW180	KPHS	55	55	0
VP.O27	US.K	KPHS	56	56	0
VP.O32	SW80	RPHS	51	51	0
VP.O32	SW120	RPHS	54	54	0
VP.O32	SW150	RPHS	55	55	0
VP.O32	SW180	RPHS	56	56	0
VP.O32	US.K	RPHS	57	58	1
VP.O32	SW80	KPHS	51	51	0
VP.O32	SW120	KPHS	54	54	0
VP.O32	SW150	KPHS	56	56	0
VP.O32	SW180	KPHS	57	57	0
VP.O32	US.K	KPHS	58	58	0
VP.O37	SW80	RPHS	51	51	0
VP.O37	SW120	RPHS	54	54	0
VP.O37	SW150	RPHS	55	56	1
VP.O37	SW180	RPHS	56	57	1
VP.O37	US.K	RPHS	58	58	0
VP.O37	SW80	KPHS	51	51	0
VP.O37	SW120	KPHS	54	54	0
VP.O37	SW150	KPHS	56	56	0
VP.O37	SW180	KPHS	57	57	0
VP.O37	US.K	KPHS	59	59	0

Taulukko 14. Täyttövalun vaikutus tilojen väliseen askelääneneristävyyteen.

VP	Ei täyttövalua	Täyttövalu	Erotus [dB]
	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ [dB]	
VP.O27	53	53	0
VP.O32	49	48	-1
VP.O37	46	44	-2

Taulukosta 13 nähdään, että ontelolaataston täyttövalu kasvattaa tilojen välistä äänita-soerolukua $D_{nT,w}$ vain yksittäisissä tapauksissa. Todellisuudessa näissä tapauksissa täyttövalulla saatu hyöty on suuruusluokkaa 0,1–0,4 dB, ja näennäinen 1 dB parannus ilmaääneneristävyyden yksilukuarvoon johtuu pyörityssäännöistä. Taulukosta 14 taas nähdään, että täyttövalun vaikutus askelääneneristävyyteen tilojen välillä on 0–2 dB, eli hieman enemmän kuin ilmaääneneristävyyden tapauksessa.

Parkettiresonanssin vaikutuksen arvioimiseksi tilojen välinen ääneneristävyys määritettiin edellä mainituissa tapauksissa myös ilman parkettia. Laskentatulokset ilmaääneneristävyyden osalta on esitetty taulukossa 15, ja askelääneneristävyyden osalta taulukossa 16.

Taulukko 15. *Parkettiresonanssin vaikutus tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen.*

VP	Täyttövalu	US	PHS	Parketti $D_{nT,w}$ [dB]	Ei parkettia $D_{nT,w}$ [dB]	Erotus [dB]
VP.O27		SW80	RPHS	51	51	0
VP.O27		SW120	RPHS	53	54	-1
VP.O27		SW150	RPHS	54	55	-1
VP.O27		SW180	RPHS	55	56	-1
VP.O27		US.K	RPHS	56	57	-1
VP.O27		SW80	KPHS	51	51	0
VP.O27		SW120	KPHS	53	54	-1
VP.O27		SW150	KPHS	55	55	0
VP.O27		SW180	KPHS	55	56	-1
VP.O27		US.K	KPHS	56	57	-1
VP.O32		SW80	RPHS	51	51	0
VP.O32		SW120	RPHS	54	54	0
VP.O32		SW150	RPHS	55	55	0
VP.O32		SW180	RPHS	56	56	0
VP.O32		US.K	RPHS	57	58	-1
VP.O32		SW80	KPHS	51	51	0
VP.O32		SW120	KPHS	54	54	0
VP.O32		SW150	KPHS	56	56	0
VP.O32		SW180	KPHS	57	57	0
VP.O32		US.K	KPHS	58	59	-1
VP.O37		SW80	RPHS	51	51	0
VP.O37		SW120	RPHS	54	54	0
VP.O37		SW150	RPHS	55	56	-1
VP.O37		SW180	RPHS	56	57	-1
VP.O37		US.K	RPHS	58	58	0
VP.O37		SW80	KPHS	51	51	0
VP.O37		SW120	KPHS	54	54	0
VP.O37		SW150	KPHS	56	56	0
VP.O37		SW180	KPHS	57	57	0
VP.O37		US.K	KPHS	59	59	0
VP.O27	x	SW80	RPHS	51	51	0
VP.O27	x	SW120	RPHS	53	54	-1
VP.O27	x	SW150	RPHS	54	55	-1
VP.O27	x	SW180	RPHS	55	56	-1
VP.O27	x	US.K	RPHS	56	57	-1

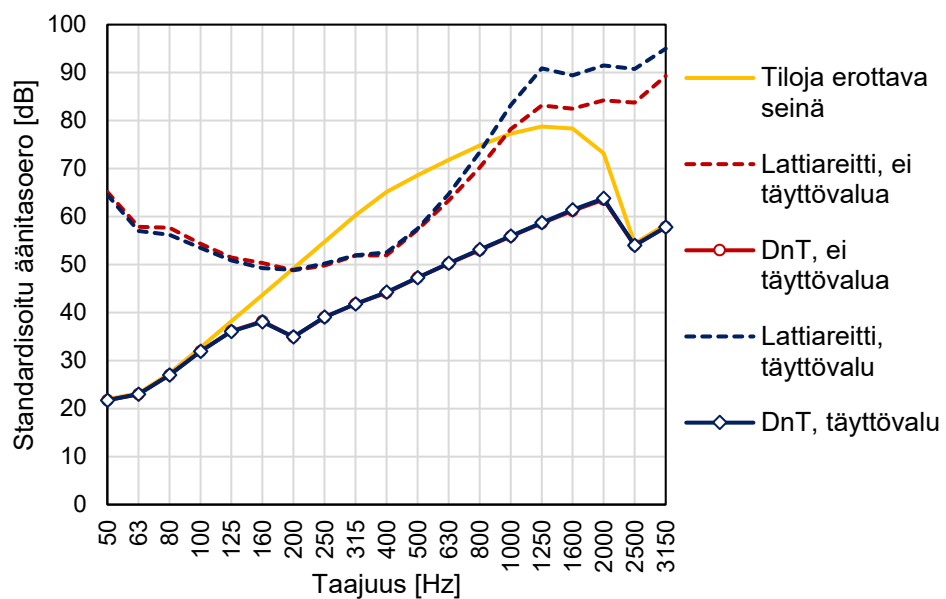
VP.O27	x	SW80	KPHS	51	51	0
VP.O27	x	SW120	KPHS	53	54	-1
VP.O27	x	SW150	KPHS	55	55	0
VP.O27	x	SW180	KPHS	55	56	-1
VP.O27	x	US.K	KPHS	56	57	-1
VP.O32	x	SW80	RPHS	51	51	0
VP.O32	x	SW120	RPHS	54	54	0
VP.O32	x	SW150	RPHS	55	56	-1
VP.O32	x	SW180	RPHS	56	57	-1
VP.O32	x	US.K	RPHS	58	58	0
VP.O32	x	SW80	KPHS	51	51	0
VP.O32	x	SW120	KPHS	54	54	0
VP.O32	x	SW150	KPHS	56	56	0
VP.O32	x	SW180	KPHS	57	57	0
VP.O32	x	US.K	KPHS	58	59	-1
VP.O37	x	SW80	RPHS	51	51	0
VP.O37	x	SW120	RPHS	54	54	0
VP.O37	x	SW150	RPHS	56	56	0
VP.O37	x	SW180	RPHS	57	57	0
VP.O37	x	US.K	RPHS	58	58	0
VP.O37	x	SW80	KPHS	51	51	0
VP.O37	x	SW120	KPHS	54	54	0
VP.O37	x	SW150	KPHS	56	56	0
VP.O37	x	SW180	KPHS	57	57	0
VP.O37	x	US.K	KPHS	59	59	0

Taulukko 16. *Parkettiresonanssin vaikutus tilojen väliseen askelääneneristävyyteen.*

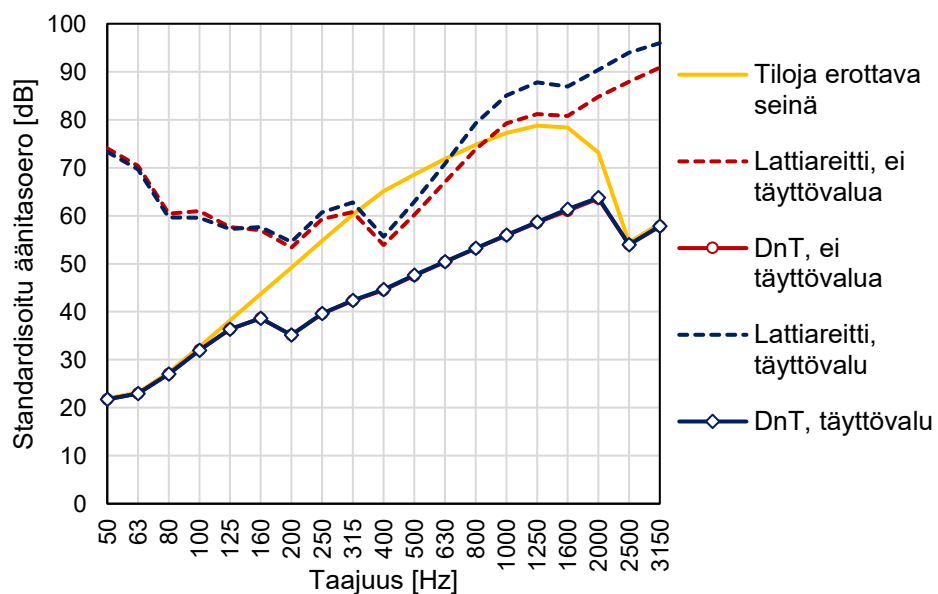
VP	Täyttövalu	Parketti	Ei parkettia	Erotus
		$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	
		[dB]	[dB]	[dB]
VP.O27		53	51	-2
VP.O32		49	47	-2
VP.O37		46	44	-2
VP.O27	x	53	51	-2
VP.O32	x	48	45	-3
VP.O37	x	44	43	-1

Taulukosta 15 nähdään, että parkettiresonanssi heikentää tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä suuressa osassa tapauksista 1 dB:n. Erityisesti parkettiresonanssin vaikutus on huomattavissa tapauksissa, joissa lattiarakenteena on ontelolaatasto O27. Näistä tapauksista 70 %:ssa parkettiresonanssi heikentää tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä. Parkettiresonanssi vaikuttaa ilmaääneneristävyyteen tilojen välillä myös muutamissa tapauksissa, joissa ontelolaatasto on joko O32 tai O37. Askelääneneristävyyteen parkettiresonanssi vaikuttaa jälleen enemmän kuin ilmaääneneristävyyteen. Taulukosta 16 nähdään, että ilman täyttövalua parkettiresonanssin vaikutus on 2 dB kaikilla ontelolaattapaksuuksilla. Täyttövalun kanssa parkettiresonanssin vaikutus on välillä 1–3 dB.

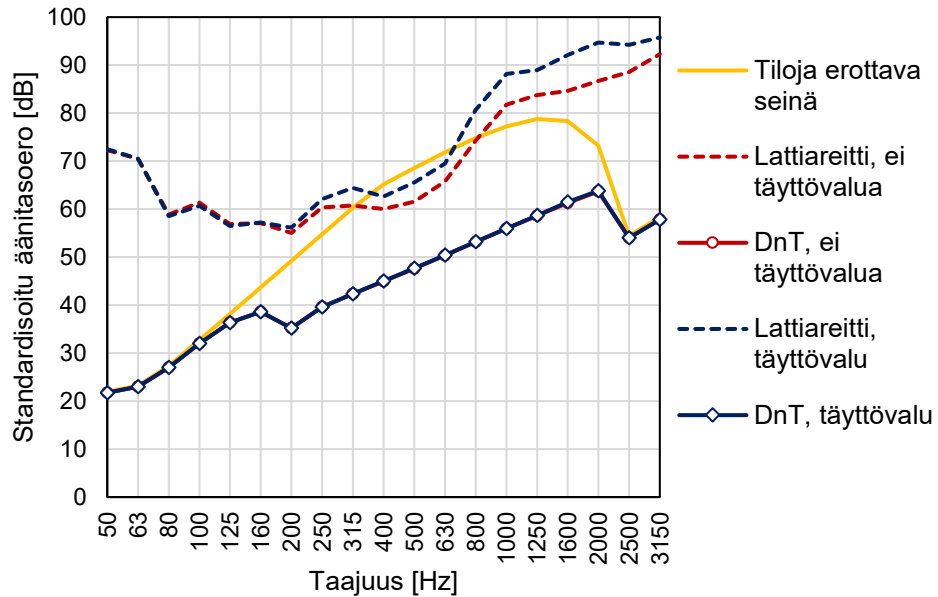
Taulukon 13 perusteella tilojen välinen ilmaääneneristävyyden on vahvasti riippuvainen tilojen sivuavasta ulkoseinärakenteesta. Kuvassa 32 on esitetty tilojen välisen ilmaääneneristävyyden laskentatuloksia eri ontelolaatastoilla niissä tapauksissa, joissa tilojen välinen ilmaääneneristävyys on heikoimmillaan. Heikoin ilmaääneneristävyys saavutetaan silloin, kun sivuava ulkoseinärakenne on 80 mm paksu betoniseinä (SW80). Esitetyissä tilanteissa porrashuoneen seinä oli kevytrakenteinen. Kuvassa 32 on esitetty tilojen välinen ja ontelolaattalattian kautta kulkevan sivutiesiirtymäreitin standardisoitu äänitasoero D_{nT} sekä täyttövalulla että ilman täyttövalua. Lisäksi kuvassa on esitetty tiloja erottavan seinän standardisoitu äänitasoero. Kaikkia äänen sivutiesiirtymäreittejä ei ole esitetty selkeyden vuoksi.



a) Laskentatulos, O27, SW80, KPHS



b) Laskentatulos, O32, SW80, KPHS

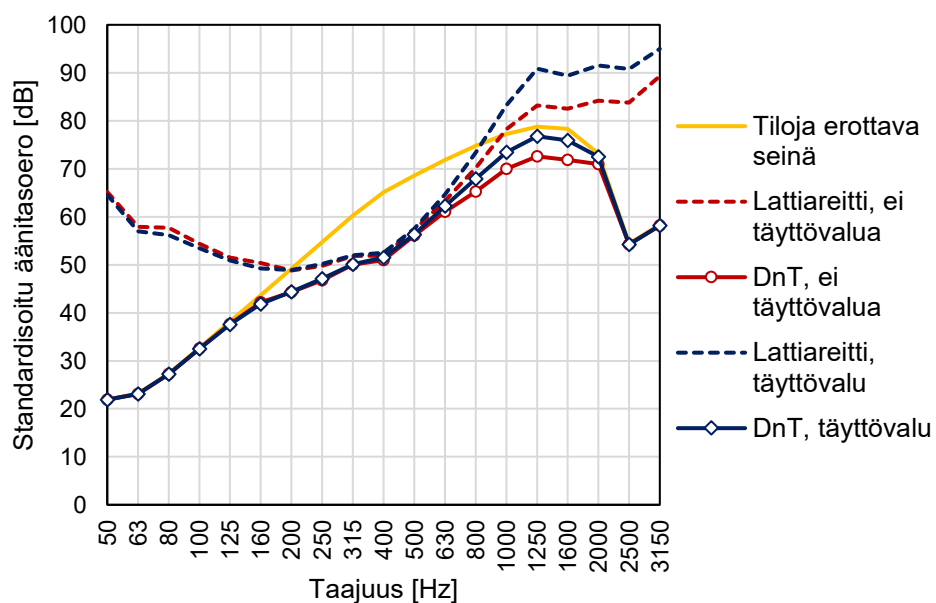


c) Laskentatulokset, O37, SW80, KPHS

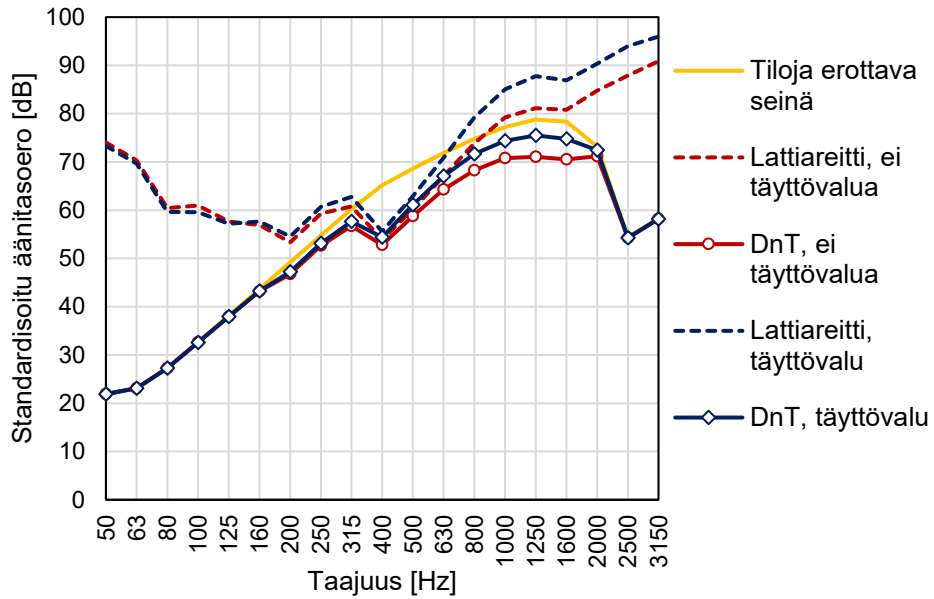
Kuva 32. Laskennallinen tilojen välinen standardisoitu äänitasoero, lattian kautta kulkevan äänen sivutiesiirtymäreitin standardisoitu äänitasoero sekä tiloja erottavan seinän standardisoitu äänitasoero.

Kuvasta 32 nähdään, että ontelolaattalattian kautta kulkeva äänen sivutiesiirtymäreitti ei vaikuta tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen ulkoseinän ollessa 80 mm betoniseinä, vaan ulkoseinän kautta kulkeva äänen sivutiesiirtymä rajoittaa tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä.

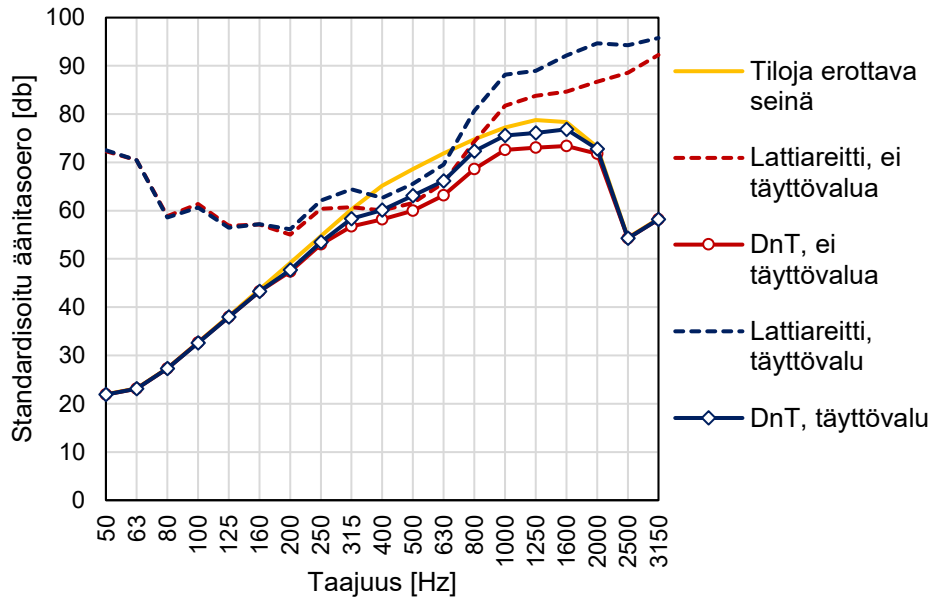
Vertailun vuoksi kuvassa 33 on esitetty samat tapaukset kuin kuvassa 32, mutta sivuava ulkoseinärakenne on kevytrakenteinen. Taulukon 13 perusteella kevytrakenteisellä sivuavalla ulkoseinärakenteella saavutetaan paras tilojen välinen ilmaääneneristävyys.



a) Laskentatulokset, O27, US.K, KPHS



b) Laskentatulokset, O32, US.K, KPHS



c) Laskentatulokset, O37, US.K, KPHS

Kuva 33. Laskennallinen tilojen välinen standardisoitu äänitasoero, lattian kautta kulkevan äänen sivutiesiirtymäreitin standardisoitu äänitasoero sekä tiloja erottavan seinän standardisoitu äänitasoero.

Kuvista 32 ja 33 nähdään, että ontelolaataston kautta kulkeva äänen sivutiesiirtymäreitti ei vaikuta tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen silloin, kun ulkoseinärakenne on 80 mm betoni. Silloin kun ulkoseinärakenne on kevytrakenteinen, ontelolaataston kautta kulkevan äänen sivutiesiirtymän ja myös täyttövalun vaikutus voidaan havaita suurilla taajuuksilla.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kenttämittausten tulosten perusteella voidaan arvioida, että ontelolaataston täyttövalu ei ole määräävä tekijä tilojen välisen ääneneristävyyden kannalta. Kohteessa 1, jossa täyttövalua ei ollut käytetty, saatiin parhaat ilma- ja askelääneneristävyyden mittaustulokset kaikista tarkastelluista kohteista. Sen sijaan kohteissa 3 ja 4, joissa täyttövalua oli käytetty joko koko liitoksen matkalta tai osittain, ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 (2017) mukainen ilmaääneneristävyyden vaatimus $D_{nT,w} \geq 55 \text{ dB}$ ei täytynyt. Askelääneneristävyyden osalta kaikki kohteet paitsi kohde 2 täyttivät asetuksen vaatimuksen $L'_{nT,w} + C_{L,50-2500} \leq 53 \text{ dB}$. Kenttämittaustulokset viittaavat siihen, että muilla tekijöillä on täyttövalua suurempi vaikutus tilojen väliseen ääneneristävyyteen. Kenttämittauksia suoritettiin kuitenkin vain neljässä kohteessa, joten otoskoko on varsin pieni.

Liitoseristävyyden FE-analyysin perusteella täyttövalun aiheuttama epäjatkuvuuskohta ontelolaatastossa vaimentaa värähtelyn etenemistä tietyn rajataajuuden yläpuolella. Ontelolaatastojen O32 ja O37 tapauksessa tämä rajataajuus vaikuttaa olevan alueella 160–200 Hz, O27 tapauksessa taas 500 Hz:n 1/3-oktaavikaistalla (kuva 30). Laskennan tulokset vastaavat Fujiwaran (1983) laskennallisia havaintoja siitä, että lisämassa rakennusosien liitoksessa vaikuttaa värähtelyn etenemiseen liitoksen yli pääasiassa suurilla taajuuksilla. Kuvan 30 perusteella nähdään myös, että täyttövalun vaikutus on suurempi ohuella O27 ontelolaatalla, kun taas paksuimmalla O37 laatalla täyttövalun vaikutus on hieman vähäisempi. Tämä ero johtunee siitä, että lisämassan suuruus suhteessa rakennusosan itsensä poikkileikkaukseen vaikuttaa lisämassan toimivuuteen (Cremer et al. 2005).

Tilojen välisen ilmaääneneristävyyden laskentatulosten perusteella ontelolaataston täyttövalu vaikuttaa tilojen väliseen standardisoituun äänitasoeroon $D_{nT,w}$ vain alle desibelin. Tilojen välisen ilmaääneneristävyyden kannalta täyttövalulla siis ei ole juurikaan merkitystä. Tilojen välisen askelääneneristävyyden $L'_{nT,w} + C_{L,50-2500}$ laskennallisiin arvoihin täyttövalu vaikuttaa enemmän. Ontelolaatastosta riippuen täyttövalun vaikutus askelääneneristävyyteen tilojen välillä on 0–2 dB. Suurempi parannus askelääneneristävyyden tapauksessa johtunee kuitenkin standardin SFS-EN ISO 12354-1 (2017) laskentamallista. Laskentamalli huomioi vain kaksi äänen sivutiesiirtymäreittä, jolloin yksittäisen sivutiesiirtymäreitin vaikutus laskentatulokseen korostuu. Todellisuudessa ääneneristävyyteen tilojen välillä vaikuttavat myös pidemmät sivutiesiirtymäreitit, joita standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamalli ei huomioi. Lisäksi niissä tapauksissa, joissa täyttövalu parantaa tilojen välistä askelääneneristävyyttä, laskennalliset arvot täyttävät

tilojen välisen askelääneneristävyyden vaatimuksen $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500} \leq 53 \text{ dB}$ (YM, 2017) ilman täyttövaluakin.

Taulukosta 13 nähdään, että tilojen välinen ilmaääneneristävyys on riippuvainen tiloja sivuavasta ulkoseinärakenteesta. Tarkastelemalla tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä sivutiesiirtymäreiteittäin havaittiin, että ontelolaataston kautta kulkeutuva sivutiesiirtymä vaikuttaa tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen eniten silloin, kun muut sivutiesiirtymäreitit ovat vahvimmillaan. Toisin sanottuna ontelolaataston kautta kulkeva äänen sivutiesiirtymä ei ole tilojen välisen ilmaääneneristävyyden kannalta määräävin sivutiesiirtymäreitti, vaan muilla äänen sivutiesiirtymillä on suurempi merkitys.

Parkettiresonanssin vaikutuksen tarkastelemiseksi tilojen välinen ääneneristävyys määritettiin myös ilman parkettilattiaa. Laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että parkettiresonanssi heikentää tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä erityisesti silloin kun kantava lattiarakenne on tarkastelluista ontelolaatastoista kevyin O27 (taulukko 15). Parkettiresonanssin aiheuttama heikennys standardisoituun äänitasoerolukuun $D_{nT,w}$ oli 1 dB. Tilojen välistä askelääneneristävyyttä parkettiresonanssi heikentää ontelolaataston paksuudesta riippumatta. Lisäksi heikennys on suurempi kuin ilmaääneneristävyyden tapauksessa, tosin parkettiresonanssin suurempi vaikutus askelääneneristävyyteen voi johtua standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamallin rajoittuneisuudesta. Laskentatulosten valossa on kuitenkin selvää, että parkettiresonanssilla on tilojen välistä ääneneristävyyttä heikentävä vaikutus. Heikennyksen suuruus riippuu käytetyn parkettitai laminaattilattian ominaisuuksista sekä kantavasta lattiarakenteesta. Taulukoista 15 ja 16 nähdään myös, että ontelolaataston täyttövalu ei sovellu parkettiresonanssin aiheuttaman ääneneristävyyden heikennyksen korjaamiseen, vaan parkettiresonanssin ääneneristävyyttä heikentävä vaikutus havaitaan suuressa osassa tapauksista täyttövalusta riippumatta. FE-analyysin perusteella ontelolaataston täyttövalun vaikutus liitoseristävyyteen parkettiresonanssin kannalta kriittisillä taajuuksilla (~500 Hz) on vähäistä (kuva 30), jolloin täyttövalu ei vaikuta parkettiresonanssin aiheuttamaan ääneneristävyyden heikennykseen.

6. YHTEENVETO

Ontelolaataston täyttövalun vaikutusta ontelolaataston ja kevytrakenteisen tilojen välisen seinän liitoksessa tarkasteltiin kenttämittauksin sekä laskennallisesti. Mittaustulosten perusteella kohteiden ääneneristävyys oli kutakuinkin samalla tasolla, pois lukien kohteen 2 askelääneneristävyys, joka oli merkittävästi muita heikompi. Vertailukohteessa, jossa täyttövalua ei ollut käytetty, saatiin paras ilma- ja askelääneneristävyysmittaustulos tarkastelluista kohteista. Kenttämittaustulosten perusteella muiden tekijöiden vaikutus tilojen väliseen ääneneristävyyteen on suurempi kuin ontelolaataston täyttövalun.

Liitoseristävyyslaskennan tuloksista nähdään, että täyttövalu vaikuttaa liitoksen toimintaan parantaen ontelolaatastoa pitkin kulkevan äänen sivutiesiirtymäreitin liitoseristävyyttä suurilla taajuuksilla melko voimakkaasti. Täyttövalun merkityksellisyyttä ääneneristävyyteen kokonaisuuden kannalta tarkasteltiin standardien SFS-EN ISO 12354-1 (2017) ja SFS-EN ISO 12354-2 (2017) mukaisilla tilojen välisen ääneneristävyyden laskelmilla. Laskelmien tuloksista nähtiin, että vaikka täyttövalu parantaa liitoksen liitoseristävyyttä, se ei siitä huolimatta riitä parantamaan tilojen välistä ääneneristävyyttä merkittävästi. Ilmaääneneristävyyttä tarkasteltaessa täyttövalulla saadaan joissakin tapauksissa 1 dB:n parannus standardisoituun äänitasoerolukuun $D_{nT,w}$. Tämä ero johtuu kuitenkin yksilukuvarvon pyöristämissäännöistä. Todellinen täyttövalulla tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen saatu hyöty on luokkaa 0,1–0,4 dB.

Tilojen välisen vaakasuuntaisen askelääneneristävyyden laskennassa täyttövalulla saavutettiin hieman suurempi parannus. Ontelolaataston O32 tapauksessa standardisoitu askeläänitasoluku $L_{nT,w} + C_{l,50-2500}$ laski 1 dB:n, ja ontelolaatastolla O37 2 dB. Standardin SFS-EN ISO 12354-2 (2017) laskentamalli vaakasuuntaiselle askelääneneristävyydelle on kuitenkin erittäin yksinkertaistettu, sillä se ottaa huomioon vain kaksi äänen sivutiesiirtymäreittiä, kun taas esimerkiksi ilmaääneneristävyyden laskentamallissa ottaa huomioon jopa 13. Tämä yksinkertaistus voi vaikuttaa siihen, että ontelolaataston kautta kulkevan äänen sivutiesiirtymäreitin vaikutus korostuu, mikä ei välttämättä vastaa todellisuutta. Laskentatuloksia analysoimalla havaittiin myös, että muiden sivuavien rakenteiden vaikutus tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen oli ontelolaataston kautta kulkeutuvaa reittiä suurempi. Erityisesti tiloja sivuava ulkoseinä rakenne vaikutti vahvasti tilojen väliseen ilmaääneneristävyyteen.

Laskentatulosten perusteella parkettiresonanssi heikentää tilojen välistä ilma- ja askelääneneristävyyttä. Heikennyksen suuruus riippuu käytettävästä parketti- tai laminaattilattiasta sekä kantavasta lattiarakenteesta. Tutkimuksen tulokset osoittavat myös sen, että ontelolaataston täyttövalulla ei voida kompensoida parkettiresonanssin aiheuttamaa tilojen välisen ääneneristävyyden heikennystä, sillä täyttövalun vaikutus parkettiresonanssin kannalta tärkeällä taajuusalueella on varsin vähäinen.

Laskennan perusteella ontelolaataston täyttövalu ei merkittävästi paranna tilojen välistä ääneneristävyyttä, eikä se myöskään auta parkettiresonanssin aiheuttamaan ääneneristävyyden heikennykseen. Kenttämittausten ja laskentatuloksien valossa ontelolaataston kautta kulkeva äänen sivutiesiirtymäreitti ei myöskään ole määräävin tilojen välisen ääneneristävyyden kannalta. Näistä syistä täyttövalun käyttö ei ole tarpeen tilojen välisen ilma- ja askelääneneristävyyden parantamiseksi.

LÄHTEET

ANSYS® Mechanical, Release 2021 R2, Help System, Element Reference, ANSYS, Inc. Viitattu: 15.12.2021.

ANSYS® Mechanical, Release 2022 R1, Help System, Mechanical APDL, Theory Reference, ANSYS, Inc. Viitattu: 19.2.2022.

ANSYS® Mechanical, Release 2022 R1, Help System, Mechanical Application, Mechanical User's Guide, ANSYS, Inc. Viitattu: 19.2.2022.

Astolfi, A., Caccherano, E., Carullo, A., Castellana, A., Griginis, A., Masoero, M., Puglisi, G.E., Shtrepi, L. (2019). FEM Numerical simulations to predict the vibration reduction index of traditional and lightweight building junctions. In the proceedings of IBPSA. Roma, Italia.

Atalla, N. & Sgard, F. (2015). Finite element and boundary methods in Structural acoustics and Vibration. CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, Boca Raton, Florida, Yhdysvallat.

BES-järjestelmän rakenteita koskeva suositus 1979. (1979). Julkaisu n:o 15. Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö SBK. Helsinki, Suomi.

Betonirakenteiden äänitekniikka. (2000). Rakennustuoteteollisuus RTT. Helsinki, Suomi.

Brunskog, J. (2002). Flanking transmission of continuous ground plates. In the proceedings of Inter-Noise 2002. Dearborn, Michigan, Yhdysvallat.

Boverket (2008). Bullerskydd i bostäder och lokaler. Karlskrona, Ruotsi.

Craik, R.J.M. (2001). The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings. Applied Acoustics, Vol. 62.

Cremer, L., Heckl, M., Petersson, B.A.T. (2005). Structure-borne sound. Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies. 3rd edition. Springer. Saksa. ISBN: 3-540-22696-6.

Crispin, C., De Geetere, L., Ingelaere, B. (2014). Extensions of EN 12354 vibration reduction index expressions by means of FEM calculations. In the proceedings of Inter-Noise 2014.

Elementtisuunnittelu // Runkorakenteet // Betonilujuudet, Betoniteollisuus ry, verkkosivu. Saatavissa (Viitattu 15.12.2021): <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/betonilujuudet>

- Fujiwara, K. (1983). Numerical study on the structure-borne sound propagation through the junctions with blocking-masses. *Journal of the acoustical society of Japan*, Vol 4.
- Galbrun, L. (2008). The prediction of airborne sound transmission between two rooms using first-order flanking paths. *Applied Acoustics*, Vol 69.
- Gerretsen, E. (1979). Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures. *Applied Acoustics*, Vol. 12.
- Gerretsen, E. (1986). Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings. *Applied Acoustics*, Vol. 19
- Gerretsen, E. (1996). Vibration reduction index Kij, A new quantity for sound transmission at junctions of building elements. In the proceedings of Inter-Noise 1996. Liverpool, Iso-Britannia.
- Halme, A. (1974). Asuminen ja ääneneristys. Asuntohallitus. Tutkimus- ja suunnitteluosasto.
- Halme-Salo, E. (1983). Sivutiesiirtymäilmiöistä rakennuksessa. Julkaisu C 56. Arkkitehtiosasto, Rakennussuunnittelun laitos, Teknillinen korkeakoulu. Espoo, Suomi.
- Helimäki, H., Huhtala, T., Länsimies, P. (2009). Asuinrakennusten äänitekniikan täydentävä suunnitteluohje. Rakennusteollisuus RT, Betonikeskus ry.
- Helimäki H. & Kääriäinen, M. (2013). Levyrakenteinen HVS ontelolaatan jännevälillä. Helimäki Akustikot Oy, Lausunto 5626-1a. Helsinki. Saatavilla (Viitattu 8.9.2021.): <https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/aanieristys/rakennetyypit-ja-liitokset>.
- Hongisto, V. (2001). A case study of flanking transmission through double structures. *Applied Acoustics*, Vol. 62.
- Hopkins, C. (2003). Vibration transmission between coupled plates using finite element methods and statistical energy analysis. Part 1: Comparison of measured and predicted data for masonry walls with and without apertures. *Applied Acoustics*, Vol. 64.
- Hopkins, C. (2007). *Sound insulation*, 1st edition. Butterworth-Heinemann. Oxford, Iso-Britannia.
- Hopkins, C., Crispin, C., Poblet-Puig, J., Guigou-Carter, C. (2016). Regression curves for vibration transmission across junctions of heavyweight walls and floors based on finite element methods and wave theory. *Applied Acoustics*, Vol. 113.
- Howard, C.Q. & Cazzolato, B.S. (2015). *Acoustic analyses using MATLAB® and ANSYS®*. CRC Press, Boca Raton, Florida, Yhdysvallat.

- Hytönen, Y. & Seppänen, M. (2009). Tehdään elementeistä. Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia. Gummerus Kirjapaino, Jyväskylä, Suomi.
- Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V., Hongisto, V. (2015). Correlation between single-number-quantities of impact sound insulation and various noise ratings of walking on concrete floors. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol 101.
- Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D., Hongisto, V. (2016). Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings. *Applied Acoustics*, Vol 102.
- Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D., Rekola, L. (2019). Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor various coverings. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol 103.
- 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*, Vol 185.
- Lasanen, L. (1972). Suunnittelijoiden osuus kerrostalojen ääneneristyksen parantamisessa. Rakennustekniikan laboratorio, tiedonanto 17. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo, Suomi.
- Lietzén, J., Kylliäinen, M., Takala, J. (2016). Justification of standardized impact sound pressure levels in rating of impact sound insulation of floors. In the proceedings of Inter-Noise 2016. Hampuri, Saksa.
- Lyon, R. & DeJong, R. (1995). Theory and application of statistical energy analysis. Second edition. Butterworth-Heinemann, Newton, Massachusetts, Yhdysvallat.
- Mahn, J. (2017). Measurement of the Vibration reduction index between Concrete Masonry Walls and Precast Hollow Core Floors. National Research Council Canada. Report A1-008727.1.
- Mahn, J. (2018). The Transmission Loss of 203 mm Thick Prestressed Precast Concrete Hollowcore Floors. National Research Council Canada. Report A1-012467.2.
- Malinen, U. (1977). Ääneneristys kerrostaloissa. Rakennustekniikan laboratorio, tiedonanto 37. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo, Suomi.
- Parmanen, J., Sysiö, P., Heinonen, R.E. (1989). Rakennuksen ääniolojen parantaminen. LVI-tekniikan laboratorio. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo, Suomi.
- Pedersen, D.B. (1999). Evaluation of EN 12354 part 1 and 2 for nordic dwelling houses. *Building acoustics*, Vol 6.

- Pohjalainen, P.J. & Parmanen, J. (1976). Pitkäläaattalojen ääneneristys. Rakennustekniikan laboratorio, tiedonanto 24. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo, Suomi.
- Poblet-Puig, J. & Guigou-Carter, C. (2015). Using spectral finite elements for parametric analysis of the vibration reduction index of heavy junctions oriented to flanking transmissions and EN-12354 prediction method. *Applied Acoustics*, Vol. 99.
- Manual for the design of hollow core slabs. Second edition. (1998). PCI, Precast/Pre-stressed concrete institute. Chicago, Yhdysvallat.
- Ramis, J., Segovia, E., Alba, J., Carbajo, J., Godinho, L. (2012). Numerical evaluation of the Vibration Reduction Index for Structural Joints. *Archives of acoustics*, Vol. 37.
- Reddy, J. N. (2019). Introduction to the finite element method. McGraw-Hill Education.
- Riitakangas, J. (2020). Ilmaääneneristävyyden parametrinen laskentamallin validointi. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu, Suomi.
- Rydberg, S. (2013). Prediction of vibrational amplitude in composite sandwich structures, prediction and implementation of the orthotropic damping in carbon-fibre-reinforced epoxy. Master's thesis, Applied mechanics. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Ruotsi.
- SFS 5907 (2004). Rakennusten akustinen luokitus. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki.
- SFS-EN 1992-1-1 (2015) Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.
- SFS-EN ISO 717-1:2020 (2020) Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1:2020). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.
- SFS-EN ISO 717-2:2020 (2020) Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (ISO 717-2:2020). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.
- SFS-EN ISO 10140-2:2010 (2010) Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation (ISO 10140-2:2010). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.
- SFS-EN ISO 10140-3:2010 (2010) Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation (ISO 10140-3:2010). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

SFS-EN ISO 10140-5:2010 (2010) Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 5: Requirements for test facilities and equipment (ISO 10140-5:2010). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

SFS-EN ISO 12354-1:2017 (2017) Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms (ISO 12354-1:2017). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

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 (ISO 12354-2:2017). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

SFS-EN ISO 16283-1:2014 (2014) Acoustics. Field measurement of sound insulation and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (ISO 16283-1:2014). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

SFS-EN ISO 16283-2:2020 (2020) Acoustics. Field measurement of sound insulation and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (ISO 16283-2:2020). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

SFS-EN ISO 10848-1:2017 (2017) Acoustics. Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms. Part 1: Frame document (ISO 10848-1:2017). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

SFS-EN ISO 10848-4:2017 (2017) Acoustics. Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms. Part 4: Application to junctions with at least one type A element (ISO 10848-4:2017). Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, Suomi.

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

Betonielementtien saumavalut. (2002) Suomen Betonitieto Oy, Forssan kirjapaino Oy. ISBN: 952-5075-50-8.

Uosukainen, S. (2013) Akustinen kenttäteoria. Aalto-yliopiston julkaisusarja, Tiede + Teknologia8 17/2013. Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, sähkötekniikan korkeakoulu, Aalto-yliopisto. Helsinki, Suomi.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017. (2017) Ympäristöministeriö. Helsinki, Suomi.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Määräykset ja ohjeet 1998. (1998) Ympäristöministeriö. Helsinki, Suomi.

Werner, K., Alexander, S., Algaard, E., Høstøien, C. O. (2008) Betongelementboken. Bind E. Isolasjon. Del 2. Lyd – isolering, absorpsjon. Betongelementforeningen. Norja.

Wittstock, V. (2012) On the spectral shape of the sound generated by standard tapping machines. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 98.

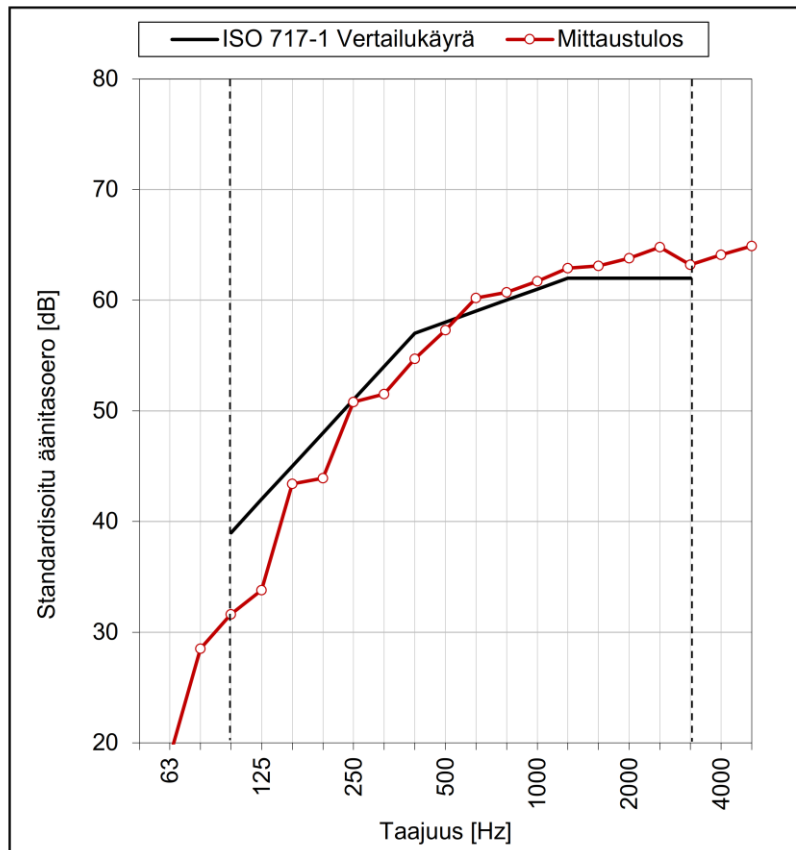
LIITE A: MITTAUSTULOKSET

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus

1(16)

Kohde:	1
Mittauksen päivämäärä	27.5.2021
Rakennuksen tyyppi:	Hotelli
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsrangat 95 mm k600 + Villa 95 mm, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	42 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	42 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	13,6
63	18,7
80	28,5
100	31,6
125	33,8
160	43,4
200	43,9
250	50,8
315	51,5
400	54,7
500	57,3
630	60,2
800	60,7
1000	61,7
1250	62,9
1600	63,1
2000	63,8
2500	64,8
3150	63,2
4000	64,1
5000	64,9



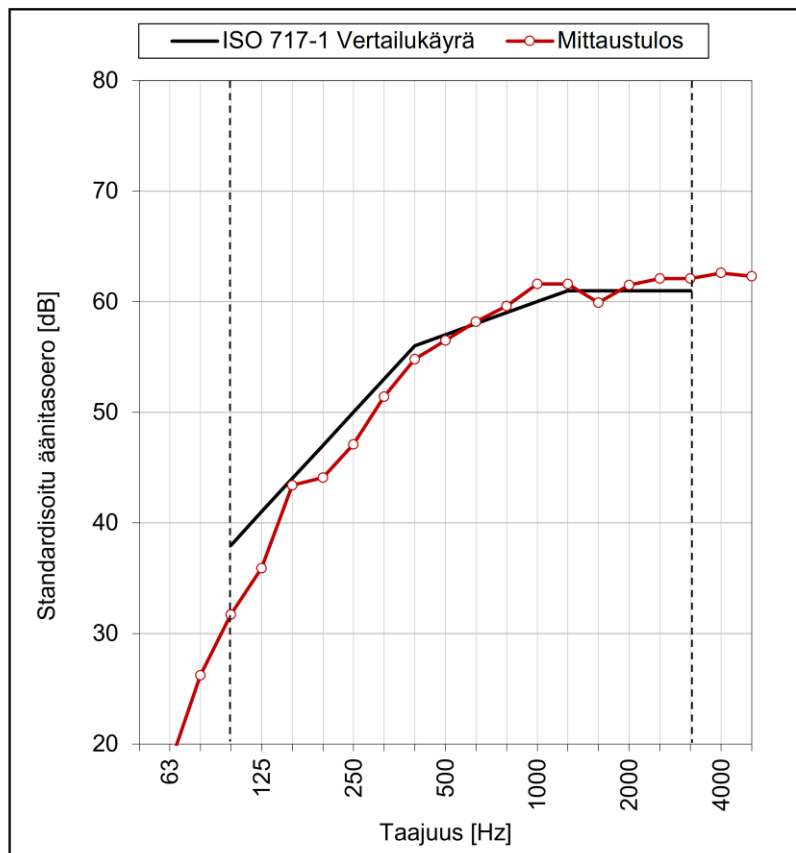
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	58 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittausta

2(16)

Kohde:	1
Mittauksen päivämäärä	27.5.2021
Rakennuksen tyyppi:	Hotelli
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsraangat 95 mm k600 + Villa 95 mm, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	42 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	42 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	15,9
63	18,1
80	26,2
100	31,7
125	35,9
160	43,4
200	44,1
250	47,1
315	51,4
400	54,8
500	56,5
630	58,2
800	59,6
1000	61,6
1250	61,6
1600	59,9
2000	61,5
2500	62,1
3150	62,1
4000	62,6
5000	62,3



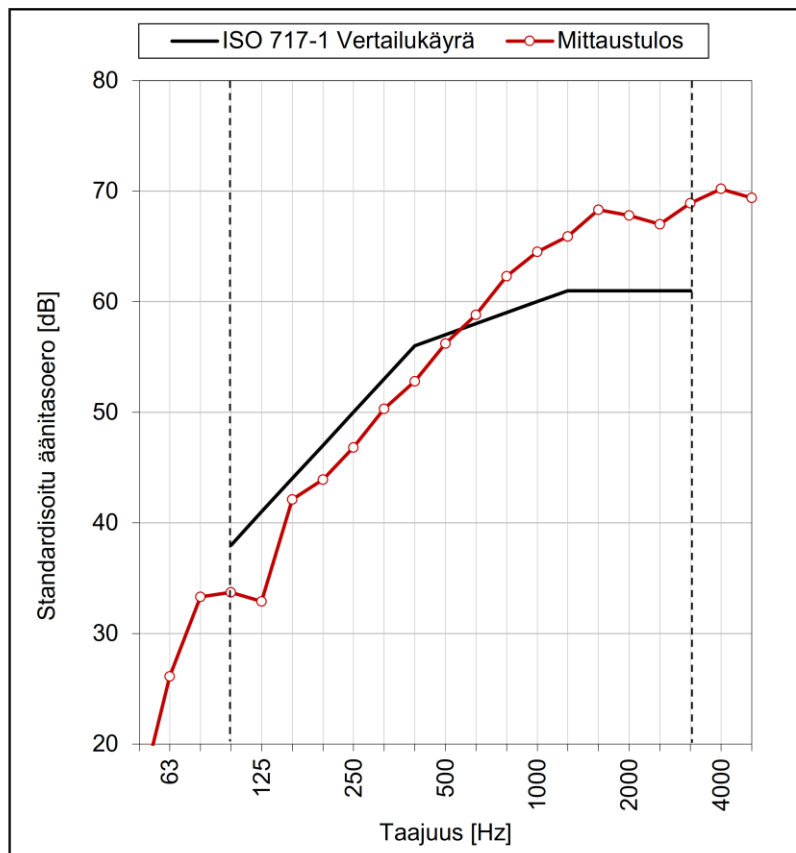
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	57 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus

3(16)

Kohde:	2
Mittauksen päivämäärä	12.8.2021
Rakennuksen tyyppi:	Palvelutalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Puuranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Puuranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	51 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	51 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	14,9
63	26,1
80	33,3
100	33,7
125	32,9
160	42,1
200	43,9
250	46,8
315	50,3
400	52,8
500	56,2
630	58,8
800	62,3
1000	64,5
1250	65,9
1600	68,3
2000	67,8
2500	67,0
3150	68,9
4000	70,2
5000	69,4



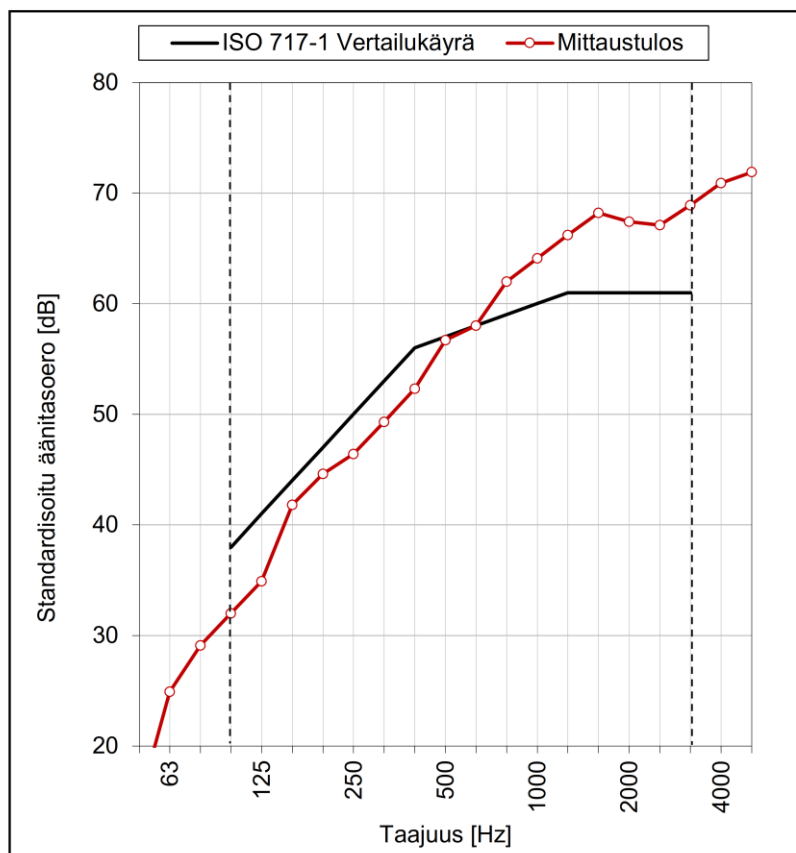
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	57 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus

4(16)

Kohde:	2
Mittauksen päivämäärä	12.8.2021
Rakennuksen tyyppi:	Palvelutalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Puuranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Puuranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	51 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	51 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	14,9
63	24,9
80	29,1
100	32,0
125	34,9
160	41,8
200	44,6
250	46,4
315	49,3
400	52,3
500	56,7
630	58,0
800	62,0
1000	64,1
1250	66,2
1600	68,2
2000	67,4
2500	67,1
3150	68,9
4000	70,9
5000	71,9



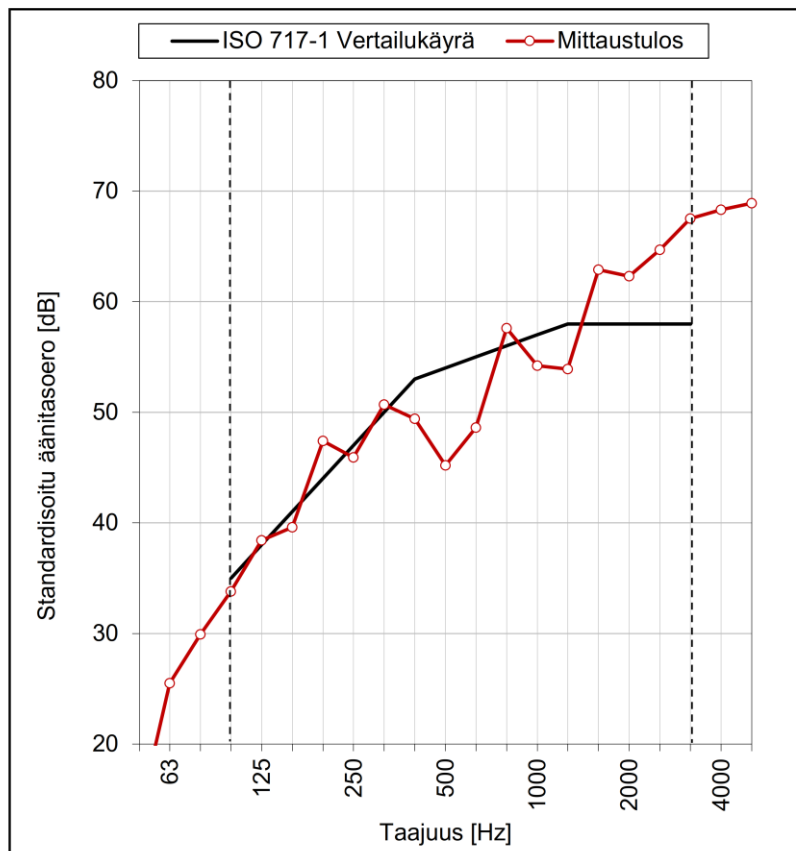
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	57 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus

5(16)

Kohde:	3
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Teräsranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	42 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	42 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	13,5
63	25,5
80	29,9
100	33,8
125	38,4
160	39,6
200	47,4
250	45,9
315	50,7
400	49,4
500	45,2
630	48,6
800	57,6
1000	54,2
1250	53,9
1600	62,9
2000	62,3
2500	64,7
3150	67,5
4000	68,3
5000	68,9



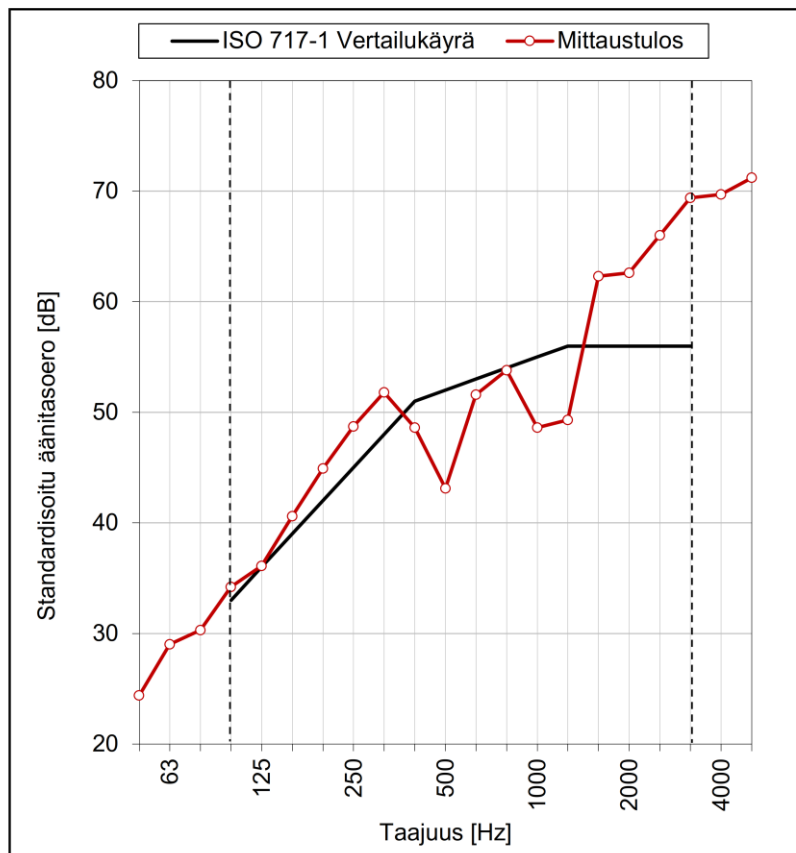
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	54 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mitta

6(16)

Kohde:	3
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Teräsranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	47 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	46 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	24,4
63	29,0
80	30,3
100	34,2
125	36,1
160	40,6
200	44,9
250	48,7
315	51,8
400	48,6
500	43,1
630	51,6
800	53,8
1000	48,6
1250	49,3
1600	62,3
2000	62,6
2500	66,0
3150	69,4
4000	69,7
5000	71,2



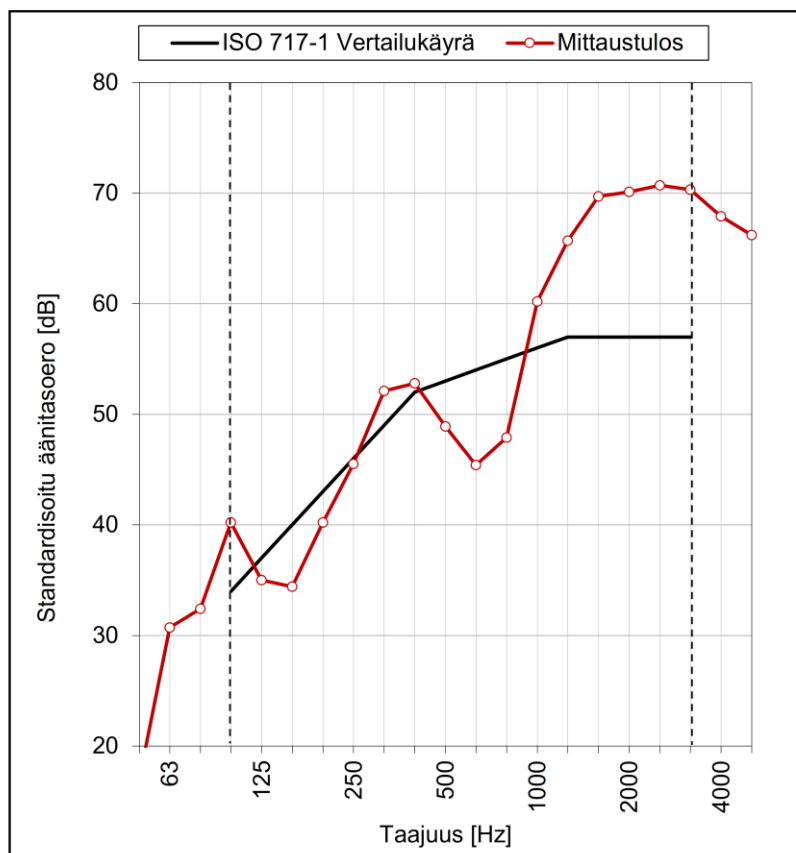
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	52 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus

7(16)

Kohde:	4
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy R 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Ilmaväli 20 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy R 13 mm
Lähetystilan tilavuus	58 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	58 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	17,0
63	30,7
80	32,4
100	40,2
125	35,0
160	34,4
200	40,2
250	45,5
315	52,1
400	52,8
500	48,9
630	45,4
800	47,9
1000	60,2
1250	65,7
1600	69,7
2000	70,1
2500	70,7
3150	70,3
4000	67,9
5000	66,2



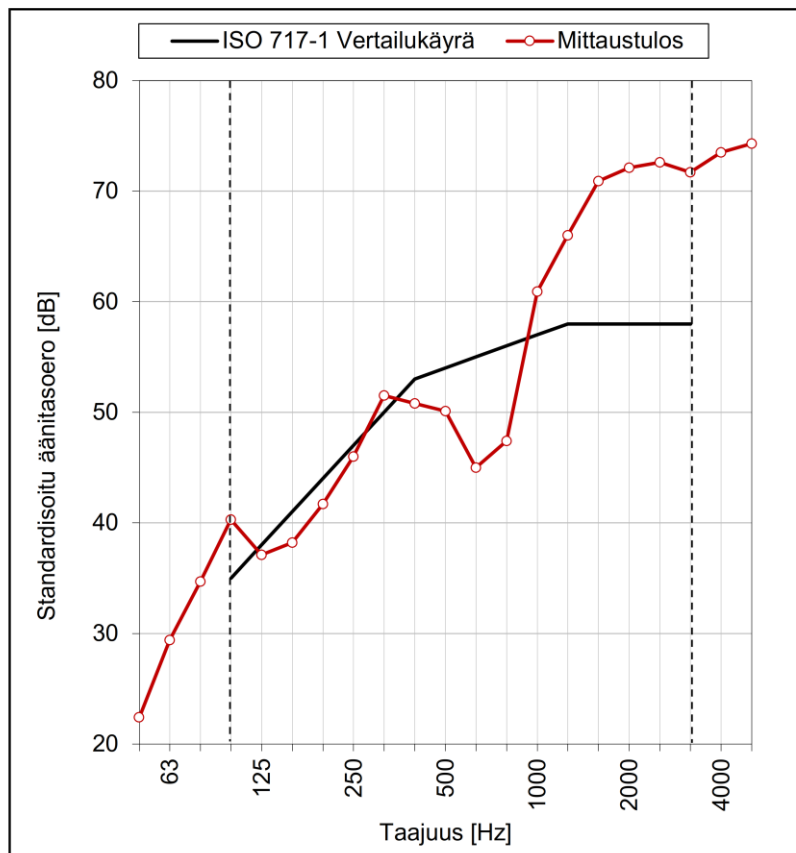
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	53 dB
---	-------

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaus

8(16)

Kohde:	4
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy R 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Ilmaväli 20 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy R 13 mm
Lähetystilan tilavuus	58 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	58 m ³

f Hz	D_{nT} dB
50	22,4
63	29,4
80	34,7
100	40,3
125	37,1
160	38,2
200	41,7
250	46,0
315	51,5
400	50,8
500	50,1
630	45,0
800	47,4
1000	60,9
1250	66,0
1600	70,9
2000	72,1
2500	72,6
3150	71,7
4000	73,5
5000	74,3



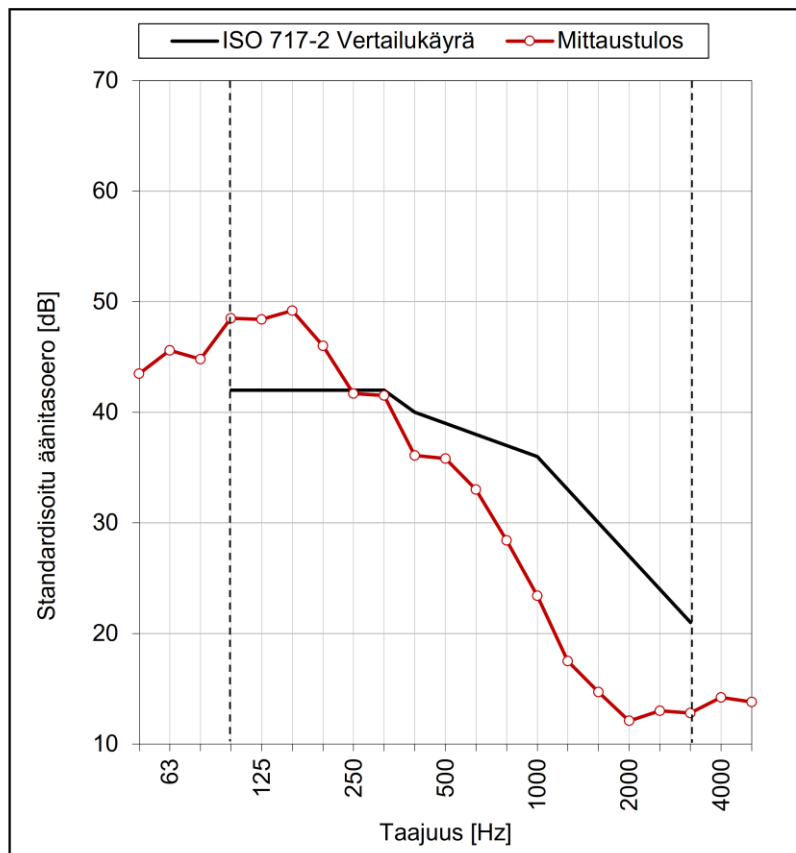
Standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$	54 dB
---	-------

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

9(16)

Kohde:	1
Mittauksen päivämäärä	27.5.2021
Rakennuksen tyyppi:	Hotelli
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsrangat 95 mm k600 + Villa 95 mm, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	42 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	42 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	43,5
63	45,6
80	44,8
100	48,5
125	48,4
160	49,2
200	46,0
250	41,7
315	41,5
400	36,1
500	35,8
630	33,0
800	28,4
1000	23,4
1250	17,5
1600	14,7
2000	12,1
2500	13,0
3150	12,8
4000	14,2
5000	13,8



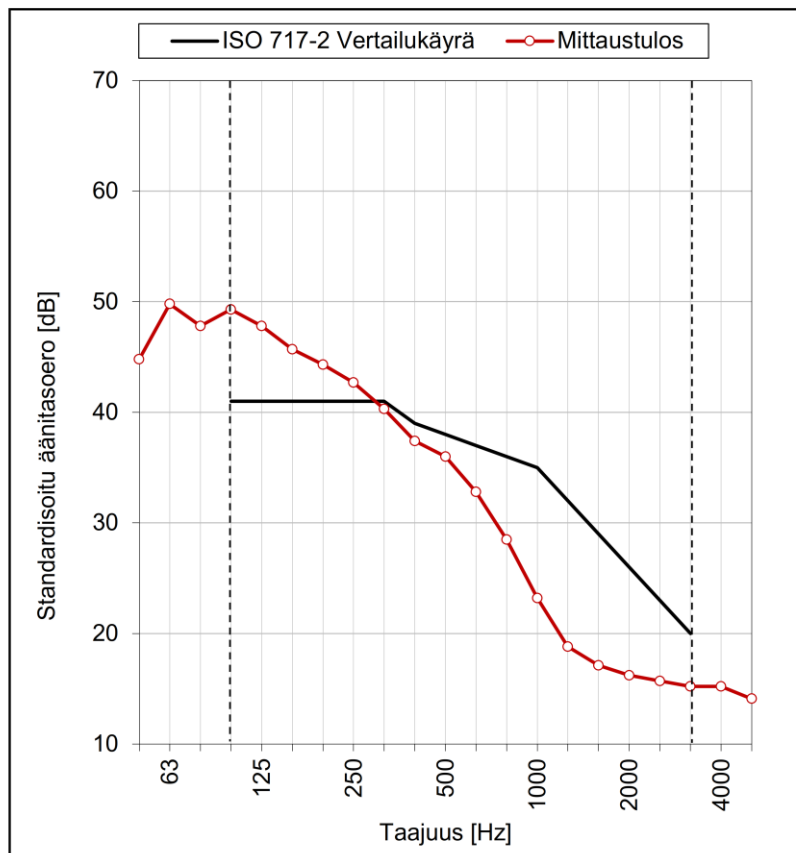
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	39 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	2 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	41 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

10(16)

Kohde:	1
Mittauksen päivämäärä	27.5.2021
Rakennuksen tyyppi:	Hotelli
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsrangat 95 mm k600 + Villa 95 mm, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	42 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	42 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	44,8
63	49,8
80	47,8
100	49,3
125	47,8
160	45,7
200	44,3
250	42,7
315	40,3
400	37,4
500	36,0
630	32,8
800	28,5
1000	23,2
1250	18,8
1600	17,1
2000	16,2
2500	15,7
3150	15,2
4000	15,2
5000	14,1



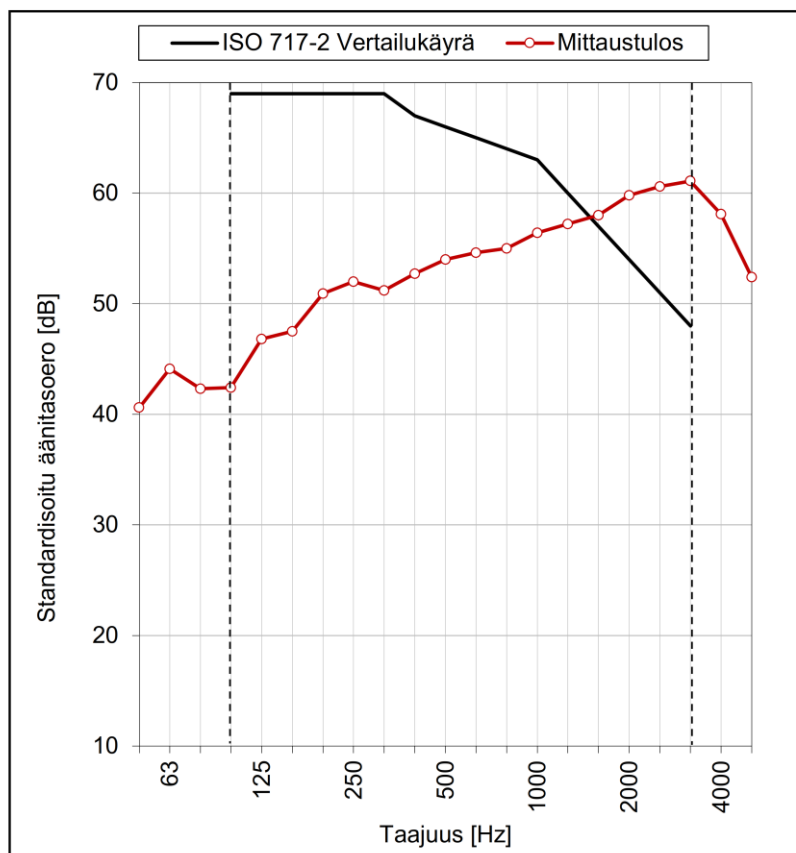
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	38 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	3 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	41 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

11(16)

Kohde:	2
Mittauksen päivämäärä	12.8.2021
Rakennuksen tyyppi:	Palvelutalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Puuranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Puuranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	51 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	51 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	40,6
63	44,1
80	42,3
100	42,4
125	46,8
160	47,5
200	50,9
250	52,0
315	51,2
400	52,7
500	54,0
630	54,6
800	55,0
1000	56,4
1250	57,2
1600	58,0
2000	59,8
2500	60,6
3150	61,1
4000	58,1
5000	52,4



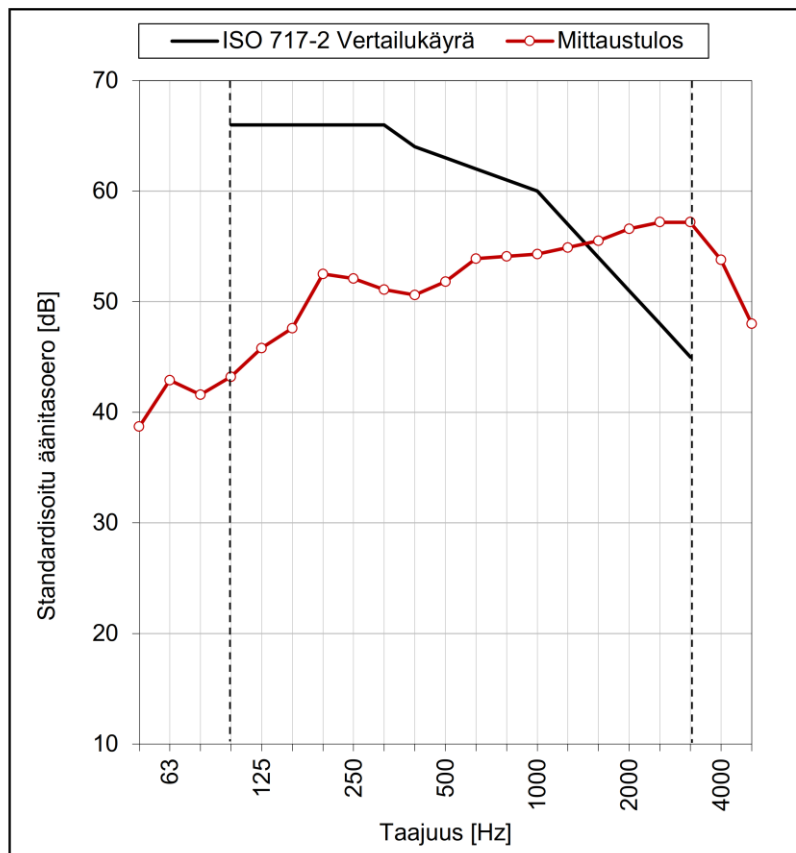
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	66 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	-14 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	66 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

12(16)

Kohde:	2
Mittauksen päivämäärä	12.8.2021
Rakennuksen tyyppi:	Palvelutalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Puuranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Puuranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	51 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	51 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	38,7
63	42,9
80	41,6
100	43,2
125	45,8
160	47,6
200	52,5
250	52,1
315	51,1
400	50,6
500	51,8
630	53,9
800	54,1
1000	54,3
1250	54,9
1600	55,5
2000	56,6
2500	57,2
3150	57,2
4000	53,8
5000	48,0



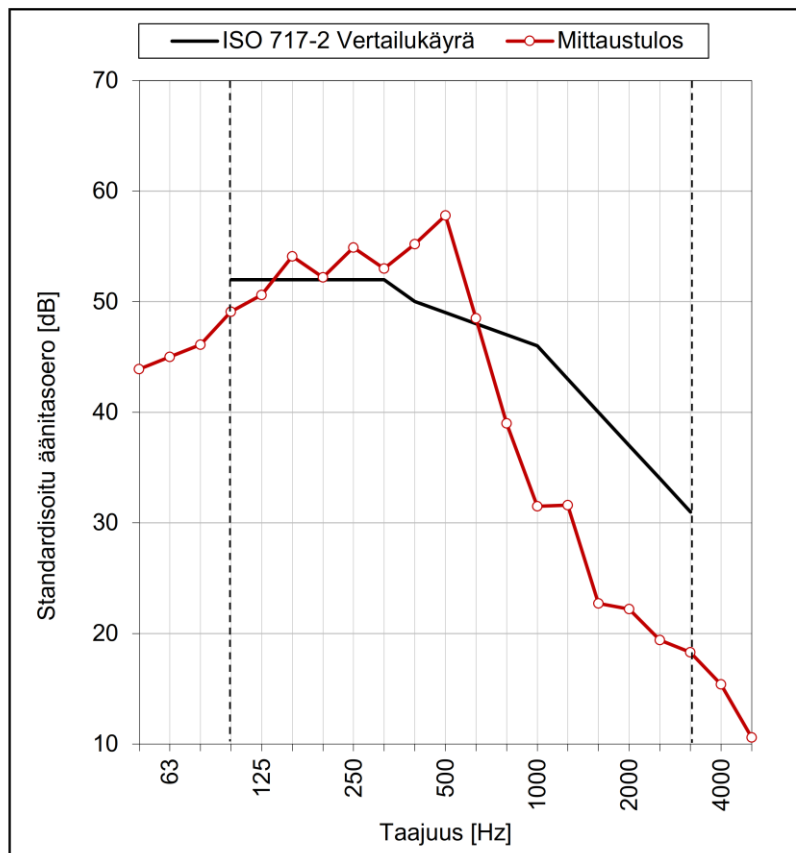
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	63 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	-13 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	63 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

13(16)

Kohde:	3
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Teräsranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	42 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	42 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	43,9
63	45,0
80	46,1
100	49,1
125	50,6
160	54,1
200	52,2
250	54,9
315	53,0
400	55,2
500	57,8
630	48,5
800	39,0
1000	31,5
1250	31,6
1600	22,7
2000	22,2
2500	19,4
3150	18,3
4000	15,4
5000	10,6



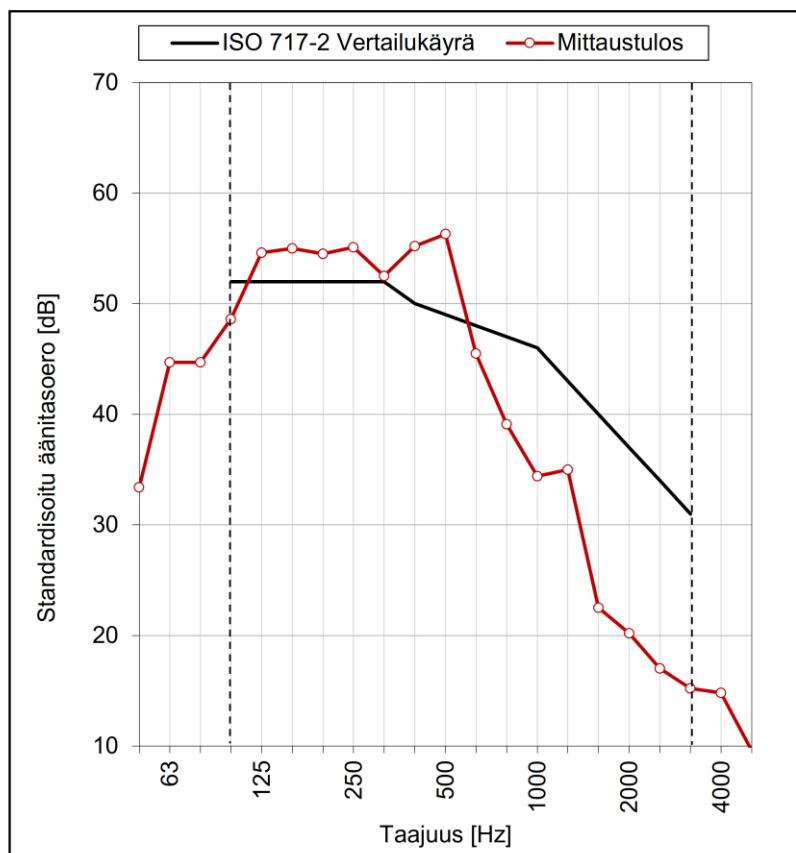
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	49 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	0 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	49 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

14(16)

Kohde:	3
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy 13 mm, Teräsranka 66 mm+Villa, Ilmaväli 16 mm, Teräsranka 66mm+Villa, Kipsilevy 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm
Lähetystilan tilavuus	47 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	46 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	33,4
63	44,7
80	44,7
100	48,6
125	54,6
160	55,0
200	54,5
250	55,1
315	52,5
400	55,2
500	56,3
630	45,5
800	39,1
1000	34,4
1250	35,0
1600	22,5
2000	20,2
2500	17,0
3150	15,2
4000	14,8
5000	9,6



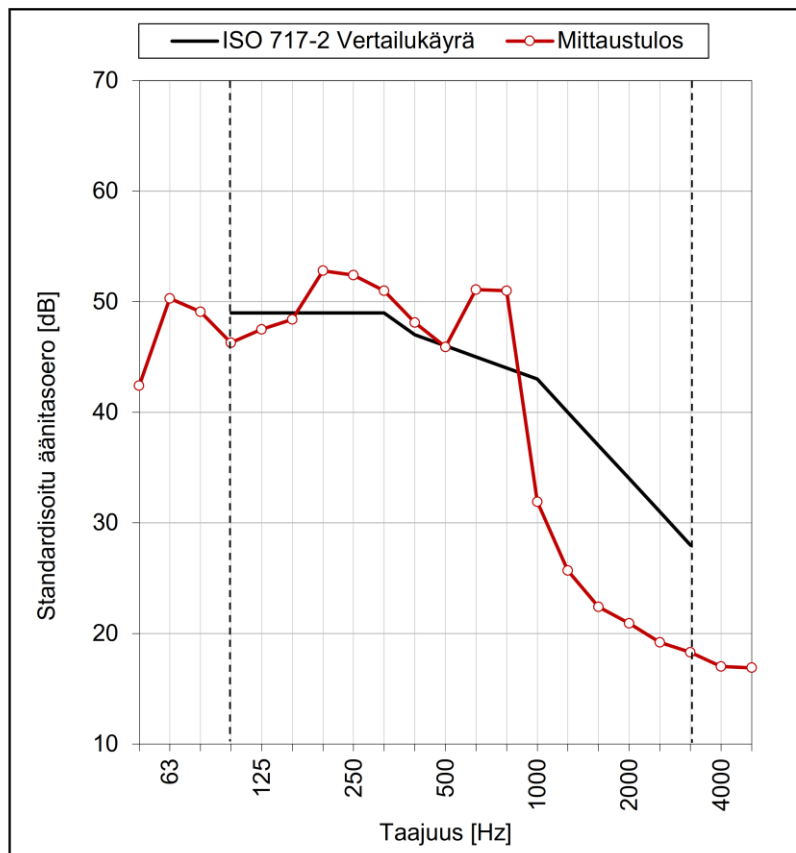
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	49 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	0 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	49 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

15(16)

Kohde:	4
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy R 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Ilmaväli 20 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy R 13 mm
Lähetystilan tilavuus	58 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	58 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	42,4
63	50,3
80	49,1
100	46,3
125	47,5
160	48,4
200	52,8
250	52,4
315	51,0
400	48,1
500	45,9
630	51,1
800	51,0
1000	31,9
1250	25,7
1600	22,4
2000	20,9
2500	19,2
3150	18,3
4000	17,0
5000	16,9



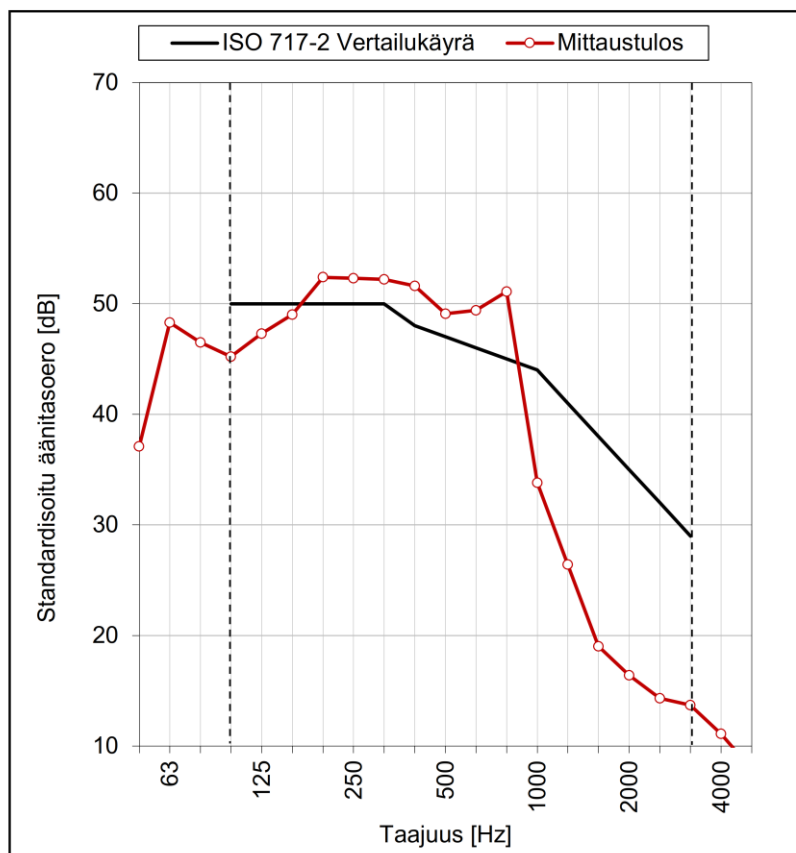
Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	46 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	0 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	46 dB

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ mittaus

16(16)

Kohde:	4
Mittauksen päivämäärä	7.9.2021
Rakennuksen tyyppi:	Asuinkerrostalo
Erottava rakenne	Kipsilevy R 13 mm, Kipsilevy EK 13 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Ilmaväli 20 mm, Teräsrangat 66 mm+Villa, Kipsilevy EK 13 mm, Kipsilevy R 13 mm
Lähetystilan tilavuus	58 m ³
Vastaanottotilan tilavuus	58 m ³

f Hz	L'_{nT} dB
50	37,1
63	48,3
80	46,5
100	45,2
125	47,3
160	49,0
200	52,4
250	52,3
315	52,2
400	51,6
500	49,1
630	49,4
800	51,1
1000	33,8
1250	26,4
1600	19,0
2000	16,4
2500	14,3
3150	13,7
4000	11,1
5000	7,9



Standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$	47 dB
Spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$	-1 dB
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	47 dB