



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO ROININEN  
ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄ MASSIIVIPUURAKENTEISTEN TILA-  
ELEMENTTIEN VÄLILLÄ

Diplomityö

Tarkastajat: Tekn. lis. Mikko Kylliäinen ja professori Sami Pajunen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
talouden ja rakentamisen koulutus-  
varadekaanin päätöksellä 27. maaliskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**MIKKO ROININEN:** Äänen sivutiesiirtymä massiivipuorakenteisten tilaelementtien välillä

Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 61 sivua, 5 liitesivua  
Elokuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: tekn. lis. Mikko Kylliäinen

Tarkastaja: professori Sami Pajunen

Avainsanat: rakennusakustiikka, ääneneristävyys, ilmaääneneristävyys, sivutiesiirtymä, puorakenteet, puukerrostalo, tilaelementti

Massiivipuorakenteisten tilaelementtien välinen ilmaääneneristävyys ei aina täytä rakentamismääräysten vaatimuksia asuinhuoneiden välillä. Välipohjarakenne tilaelementtien välillä on yleensä luonnostaan kaksinkertainen ja sen laskennallinen ilmaääneneristävyys voi olla suuri. Äänen rakenteellisen sivutiesiirtymän vaikutus on kuitenkin niin suuri, että sivuaville rakenteille tarvitaan ääneneristävyttä parantavia ratkaisuja.

Massiivipuorakenteet kuten CLT voidaan rinnastaa muihin massiivirakenteisiin ja esimerkiksi joustavan kerroksen vaikutus rakenteiden liitoksessa on hyvin samanlainen massiivipuorakenteilla ja betonirakenteilla. Massiivipuulla on kuitenkin suuremmat sisäiset häviöt ja pienempi pintamassa kuin betonilla. Massiivipuorakenteilla on tehty liitoseristävyyden ja värähtelytaseroituksen mittauksia, mutta tilaelementtirakenteilla hyvin vähän.

Tässä diplomityössä tarkastellaan rakenteellista äänen sivutiesiirtymää puorakenteisten tilaelementtien välillä tutkimustiedon avulla, laskennallisesti ja mittauksin. Diplomityön keskeisin osa on standardin ISO 10848 mukaisen liitoseristävyyden mittaumenetelmän testaus ja kehitys. Mitattua ilmaääneneristävyttä  $R'$  verrataan standardin EN 12354-1 mukaan laskettuun ilmaääneneristävyyteen. Mitattua liitoseristävyyttä  $K_{ij}$  verrataan tutkimuksista saatuihin liitoseristävyyksiin sekä mitattuun ilmaääneneristävyyteen.

Yksi tämän tutkimuksen keskeisistä havainnoista on liitoseristävyyden ja ilmaääneneristävyyden välinen yhteys. Kun mitattu ilmaääneneristävyys oli suurempi, mitattiin myös suurempi liitoseristävyys. Tämä voi kertoa rakenteellisesta äänen sivutiesiirtymästä. Tutkimuksessa saadut mittaustulokset mukailevat Ågrenin & Ljunggrenin (2016) tilaelementeillä tehdyn mittauksen tuloksia, mutta suurilla taajuuksilla liitoseristävyys ei lähde samalla tavalla jyrkkään kasvuun. Tutkimuksen lopussa arvioidaan, että menetelmä on sellaisenaan liian työläs sivutiesiirtymän arviointiin kenttämittauksilla.

## ABSTRACT

**MIKKO ROININEN:** Flanking sound transmission between room module elements made of massive timber  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 61 pages, 5 Appendix pages  
August 2017  
Master's Degree Programme in Civil Engineering  
Major: Structural Engineering  
Examiner: Lic. Tech. Mikko Kylliäinen  
Examiner: Associate professor Sami Pajunen

**Keywords:** building acoustics, sound insulation, airborne sound insulation, flanking transmission, timber structures, multi-story timber apartment buildings, room module element

Airborne sound insulation between room module elements made of massive timber do not always fulfill the requirements given in the National Building Code of Finland. The intermediate floor structure between the modules has practically at least two layers separated by an air gap, thus the calculated sound reduction index for the structure can be high. However, the effect of structure borne flanking transmission is significant enough for the flanking structures to require additional layers to improve the airborne sound insulation.

Massive timber structures like CLT are comparable to other massive structures and for example the effect of an elastic layer in a joint is very similar for massive timber and concrete structures. The internal losses are higher and the surface mass is smaller in massive timber than in concrete, though. Measurements of the vibration reduction index  $K_{ij}$  and vibration level difference have been done with massive timber structures, but very few with room module element structures.

In this thesis, the structural flanking transmission between room module elements made of massive timber is studied through international research papers, calculations and in-situ measurements. The central part of this thesis is the development and testing of a measurement method for flanking transmission according to the standard ISO 10848. Measured values of airborne sound reduction index  $R'$  are compared to values calculated according to the standard EN 12354. Measured values of vibration reduction indexes  $K_{ij}$  are compared to values obtained in research papers and to measured values of airborne sound reduction indexes.

One of the key observations made is a consistency between the vibration reduction index and the airborne sound reduction index. When the airborne sound insulation was higher a higher value for the flanking transmission index was also measured. It can be a sign of structural flanking transmission. The results of the measurements resemble the results from Ågren & Ljunggren (2016), except on high frequencies where a similar steep slope was not measured. Feasibility of the measurement method for evaluating flanking transmission in-situ is discussed and concluded that the method is too labor-intensive for in-situ measurements as it is in the standard.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty työsuhteessa Akukon Oy:lle. Tarkoituksena oli selvittää äänen sivutiesiirtymän standardoidun mittausmenetelmän soveltuvuutta puurakenteisissa tilaelementtirakennuksissa. Keskeisin osa tutkimusta olivat mittausmenetelmän testaus sekä mittausten ohjelmointi, toteutus ja analysointi.

Kiinnostus puurakenteiden ääneneristävyyteen heräsi, kun tutustuin akustiikkasuunnittelun kautta puurakentamiseen. Puurakentamista tuodaan teollisuuden puolesta esiin asuin-kerrostalorakentamisen kannalta ympäristö- ja terveystargumenteilla, kun perinteisesti puusta rakennetaan pientaloja. Puukerrostalojen akustiikka on nuoren teollisuuden takia erityisen kiinnostavaa, koska rakennuksia tehdään hyvin erilaisilla rakenteilla ja puukerrostalojen rakentamisvolyymi on vielä koerakentamistasolla.

Suurin haaste tässä työssä oli analyysiohjelma IMC Famosin ohjelmointikieli. En ole aikaisemmin juurikaan ollut tekemisissä ohjelmoinnin kanssa, joten lähdin lähes nollasta opettelemaan ohjelmointia sovelluskohtaisella kielellä. Monesti sain kuulla, että MATLABilla tämäkin olisi helpompaa, mutta esimerkkien ja työtoverien vinkkien avulla sain ohjelmoitua mittausohjelmat tätä diplomityötä varten.

Antoisin vaihe oli suunnittelemani mittausten toteutus kohderakennuksessa. Kahden tiiviin mittauspäivän aikana – pienten alkukankeuksien jälkeen – saatiin kaikki suunnitellut mittaukset tehtyä ja lisäksi kokeiltiin erilaisia sovellettuja mittauksia. Erityisen hienoa oli päivän päätteeksi tunne siitä, että nyt on tehnyt jotain konkreettista diplomityön edistämiseksi.

Haluan erityisesti kiittää ohjaajaani Jukka Ahosta (Akukon) palautteesta ja ohjeista, joiden avulla työtä oli helpompi viedä eteenpäin. Kiitokset mittausten kanssa suuresti avustaneille Henrille ja Laurille (Akukon), sekä tarkastajilleni Mikko Kylliäiselle (TTY) ja Sami Pajuselle (TTY) tuesta ja kommentteista. Kiitokset myös koko Akukon Oy:n välle kannustavasta ilmapiiristä.

Helsingissä, 22.8.2017

Mikko Roininen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tausta .....	1
1.2	Rakenteiden ääneneristävyys .....	2
1.3	Äänen sivutiesiirtymä.....	3
1.4	Tilaelementit.....	4
1.5	Puutuotteet rakenteissa .....	4
1.6	Tämän tutkimuksen tavoite .....	5
2.	ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄ.....	6
2.1	Värähtely levyrakenteissa .....	6
2.2	Koinsidenssi .....	7
2.3	Paksut levyt .....	7
2.4	Värähtelyn välittyminen levystä ilmaan.....	8
2.5	Rakenteellinen absorptio ja häviökertoimet.....	9
2.6	Liitoseristävyys .....	10
2.7	Värähtely ortotrooppisessa aineessa.....	11
2.8	Puurakenteet ja sivutiesiirtymä .....	12
2.9	Värähtelytaseroitus CLT-rakenteiden välillä .....	13
2.10	Välipäätelmät .....	15
3.	KOHDERAKENNUKSEN ESITTELY .....	17
3.1	Kohderakennuksen rakenteet .....	17
3.2	Ilmaääneneristävyyden mittaukset kohteessa.....	18
4.	ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄN LASKENNALLINEN TARKASTELU.....	20
4.1	Laskennallinen tarkastelu standardin EN 12354 mukaan .....	20
4.2	Laskennan reunaehdot.....	22
4.3	Laskenta puurakenteilla.....	22
4.4	Laskennan tulokset kohderakennuksessa .....	23
5.	ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄN MITTAAMINEN .....	28
5.1	Mittaaminen standardin ISO 10848 mukaan.....	28
5.2	Mittauksen reunaehdot .....	30
6.	VÄRÄHTELYMITTAUKSET JA ANALYYSI.....	32
6.1	Käytetyt mittalaitteet .....	32
6.2	Analyysi .....	33
6.3	Koemittaus betonirakenteella.....	35
6.4	Koemittaus rankarakenteisella kipsilevyseinällä .....	37
6.5	Johtopäätökset koemittausten perusteella .....	40
7.	MITTAUKSET JA TULOKSET KOHTEESSA.....	41
7.1	Mittaukset kohderakennuksessa .....	41
7.2	Liitoseristävyyden mittaustulokset kohteessa .....	43
7.3	Mittausten reunaehto- ja toteutumisen arviointi.....	46
8.	TULOSTEN TARKASTELU .....	49

8.1 Tulosten vertailu.....	49
8.2 Mittausmenetelmän käyttökelpoisuuden arviointi .....	53
9. YHTEENVETO .....	56
LÄHTEET.....	57

LIITE A: RAKENTEELLISET JÄLKIKAIUNTA-AJAT

LIITE B: VÄRÄHTELYKIIHTYVYYDEN TASOEROTUKSET

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Puukerrostalojen rakennejärjestelmiä vasemmalta oikealle: Tilaelementti, pilari-palkkijärjestelmä ja rankarakenteiset suurelementit. [17]</i> .....	1
<b>Kuva 2.</b>	<i>Yksinkertaisen rakenteen ääneneristävyyskuvaaja.</i> .....	3
<b>Kuva 3.</b>	<i>Kiinteän aineen aaltotyyppejä.</i> .....	6
<b>Kuva 4.</b>	<i>Kirjallisuudesta saatuja <math>K_{ij}</math> ja <math>D_{v,ij}</math> arvoja. [19, 20, 27, 29, 39, 43]</i> .....	15
<b>Kuva 5.</b>	<i>Tilaelementit A, B ja C sekä pinnat S2, S3, S4, K2 ja K3.</i> .....	17
<b>Kuva 6.</b>	<i>Pystyleikkaus kantavan linjan kohdalta.</i> .....	18
<b>Kuva 7.</b>	<i>Mitattu ilmaääneneristävyys tilaelementtien välillä kohteessa.</i> .....	19
<b>Kuva 8.</b>	<i>80 mm paksun CLT-paneelin ilmaääneneristävyys.</i> .....	25
<b>Kuva 9.</b>	<i>Laskennallinen liitoseristävyys 120 mm CLT-levyjen välillä T-liitoksessa.</i> .....	26
<b>Kuva 10.</b>	<i>Laskennallinen ilmaääneneristävyys kohderakennuksessa.</i> .....	27
<b>Kuva 11.</b>	<i>Esimerkkikuvia anturin kiinnitystavoista vasemmalta oikealle: kemiallisella metallilla suojateipin päälle, magneetilla seinään ruuvattuun naulauslevyyn ja ruuvilla puuhun.</i> .....	33
<b>Kuva 12.</b>	<i>Iskuvasaran kärkiä vasemmalta oikealle: pehmeä kumi, kovempi kumi ja kova muovi.</i> .....	33
<b>Kuva 13.</b>	<i>Suodattimien jälkikaiunta-aika.</i> .....	35
<b>Kuva 14.</b>	<i>Ensimmäisen koemittauksen mittausjärjestelyt.</i> .....	36
<b>Kuva 15.</b>	<i>Iskuvasaran eri kärjillä saadut kiihtyvyyden spektrit.</i> .....	37
<b>Kuva 16.</b>	<i>Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus betoniseinällä, pehmeä kumikärki.</i> .....	37
<b>Kuva 17.</b>	<i>Toisen koemittauksen mittausjärjestelyt.</i> .....	38
<b>Kuva 18.</b>	<i>Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus levyseinällä, pehmeä kumikärki.</i> .....	39
<b>Kuva 19.</b>	<i>Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus levyseinällä, kovempi kumikärki.</i> .....	39
<b>Kuva 20.</b>	<i>Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus levyseinällä, kova muovikärki.</i> .....	40
<b>Kuva 21.</b>	<i>Mittausjärjestelyt kohteessa. Merkityt herätepisteet ja kiinnitettyjä antureita.</i> .....	41
<b>Kuva 22.</b>	<i>Seinä-seinä mittausten vertailu.</i> .....	43
<b>Kuva 23.</b>	<i>Seinä-katto mittausten vertailu.</i> .....	44
<b>Kuva 24.</b>	<i>Tilaelementtien A ja B välisten mittausten vertailu.</i> .....	45
<b>Kuva 25.</b>	<i>Tilaelementtien B ja C välisten mittausten vertailu.</i> .....	45
<b>Kuva 26.</b>	<i>Anturin massan vertailu massan vaikutuksen laskennalliseen raja-arvoon.</i> .....	46
<b>Kuva 27.</b>	<i>Pintojen moodiluvun tarkastelu.</i> .....	47
<b>Kuva 28.</b>	<i>Pintojen moodien limittymiskertoimen tarkastelu.</i> .....	47
<b>Kuva 29.</b>	<i>Seinä-seinä liitoseristävyysvertailu ilmaääneneristävyysvertailuun.</i> .....	49
<b>Kuva 30.</b>	<i>Seinä-katto liitoseristävyysvertailu ilmaääneneristävyysvertailuun.</i> .....	50
<b>Kuva 31.</b>	<i>Mitattujen liitoseristävyysvertailu kirjallisuudesta saatuihin liitoseristävyysvertailuihin [19].</i> .....	51

<b>Kuva 32.</b>	<i>Laskennallisen ilmastäneristävyyden vertailu mitattuun ilmastäneristävyyteen.....</i>	<i>52</i>
<b>Kuva 33.</b>	<i>Mitattujen kokonaishäviökerrointen vertailu seinäpinoilla laskennalliseen kokonaishäviökertoimeen EN 12354 mukaan.....</i>	<i>53</i>
<b>Kuva 34.</b>	<i>Mitattujen kokonaishäviökerrointen vertailu kattopinoilla laskennalliseen kokonaishäviökertoimeen EN 12354 mukaan.....</i>	<i>53</i>



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CLT	<i>Cross-laminated timber</i> on kerroksittain ristiin liimattua sahatavaraa.
LVL	<i>Laminated veneer lumber</i> eli viilupuu on viiluista liimattu puutuote.
NRC	<i>National Research Council Canada</i> , Kanadan kansallinen tutkimusneuvosto.
SEA	<i>Statistical energy analysis</i> , tilastollinen energia-analyysi.
$\alpha_j$	Rakenneosan ekvivalentti absorptiopituus ( <i>Equivalent absorption length of an element</i> ) on rakenneosan $j$ kuvitteellisen täysin absorboivan liitoksen pituus, kun kriittinen taajuus on oletettu olevan 1000 Hz. Kokonaishäviö on sama kuin rakenneosan $j$ kokonaishäviö tietyssä käyttötilanteessa [m].
$\gamma_{ij}$	Tehon välityskerroin ( <i>Structure borne power transmission factor</i> ).
$\Delta R$	Ilmaääneneristävyyden parannusluku [dB].
$\eta_{\text{int}}$	Sisäinen häviökerroin ( <i>Internal loss factor</i> ).
$\eta_{ij}$	Liitoshäviökerroin ( <i>Coupling loss factor</i> ).
$\eta_{\text{tot}}$	Kokonaishäviökerroin ( <i>Total loss factor</i> ).
$\Lambda$	Muuttuja pakkovärähtelyn säteilytehokkuuden laskennassa.
$\lambda$	Aallonpituus [m].
$\mu$	Taajuuksista riippuva muuttuja säteilytehokkuuden laskennassa.
$\nu$	Poissonin luku.
$\rho$	Tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ].
$\rho_0$	Ilman tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ].
$\sigma$	Säteilytehokkuus ( <i>Radiation efficiency</i> ).
$\sigma_f$	Pakkovärähtelyn säteilytehokkuus ( <i>Radiation factor for forced transmission</i> ).
$\tau$	Läpäisysuhde ( <i>Transmission factor</i> ). Kuvaa rakenneosan kykyä välittää ilmaääntä. Pienempi arvo tarkoittaa suurempaa ilmaääneneristävyyttä ja arvo 1 tarkoittaa, että kaikki ilmaääni välittyy.
$a_i, a_j$	Kiihtyvyyys pinnalla $i$ tai $j$ pinnan normaalin suuntaan [ $\text{m/s}^2$ ].
$a_0$	Kiihtyvyyden referenssitaso ISO 10848 mukaan: $1 * 10^{-6} \text{ m/s}^2$ [2].
$B_p$	Taivutusjäykkyys [ $\text{Nm}^2$ ].
$b$	Taajuuskaista $0,23f_{1/3}$ [Hz].
$c_0$	Äänen nopeus ilmassa [m/s].
$C_{BC}$	Levyn reunaehdoista riippuva vakio.
$C_{OB}$	Levyn tuennan suunnasta levyyn nähden riippuva vakio.
$c_L$	Näennäispitkittäisaaltojen nopeus väliaineessa [m/s].
$D_{a,ij}$	Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus ( <i>Acceleration level difference</i> ) [dB].
$D_{v,ij}$	Värähtelyn nopeuden tasoerotus ( <i>Velocity level difference</i> ) [dB].
$(D_{a,ij})_{mn}$	Värähtelyn kiihtyvyydestasoerotus yhdelle herätepisteelle $m$ ja yhdelle anturipisteparille $n$ [dB].
$\overline{D}_{a,ij}$	Suuntakeskiarvoistettu värähtelykiihtyvyyden tasoerotus ( <i>Direction-averaged acceleration level difference</i> ) [dB].
$\overline{D}_{a,ij,n}$	Normalisoitu ja suuntakeskiarvoistettu värähtelykiihtyvyyden tasoerotus ( <i>Normalized direction-average acceleration level difference</i> ) [dB].

$E$	Kimmoduuli [Pa].
$f$	Taajuus [Hz].
$f_{11}$	Rakenteen alin ominaistaajuus [Hz].
$f_{1/3}$	Terssikaistan keskitaajuus [Hz].
$f_{B(\text{thin})}$	Ohuen levyn rajataajuus taivutusaalloille [Hz].
$f_c$	Koinsidenssin rajataajuus [Hz].
$f_h$	Leikkausaaltojen rajataajuus [Hz].
$f_{\text{ref}}$	Referenssitaajuus ISO 10848 mukaan: 1000 Hz [2].
$h$	Levyn paksuus [m].
$I$	Neliömomentti [m <sup>4</sup> ].
$k$	Aaltoluku.
$K_{ij}$	Liitoseristävyys ( <i>Vibration reduction index</i> ) [dB].
$L_{a,j}$	Keskimääräinen värähtelykiihtyvyyden taso pinnalla $j$ ( <i>Average acceleration level on element j</i> ) [dB].
$l_0$	Referenssipituus ISO 10848 mukaan: 1 m [2].
$l_1$	Rakenneosan lyhyempi sivumitta [m].
$l_2$	Rakenneosan pidempi sivumitta [m].
$l_{ij}$	Rakenneosien $i$ ja $j$ liitoksen pituus [m].
$L'_{n,w}$	Askeläänitasoluku, joka on mitattu kentällä [dB].
$N_n$	Moodiluku ( <i>Mode count</i> ).
$n$	Modaalitiheys ( <i>Modal density</i> ).
$M_n$	Moodien limittymiskerroin ( <i>Modal overlap factor</i> ).
$m'$	Pintamassa [kg/m <sup>2</sup> ].
$R$	Ääneneristävyys [dB].
$R'_w$	Ilmaääneneristysluku, joka on mitattu kentällä [dB].
$S_j$	Rakenneosan $j$ pinta-ala [m <sup>2</sup> ].
$S_{m,j}$	Rakenneosan $j$ pinta-ala, jolla mittaus on suoritettu [m <sup>2</sup> ].
$S_s$	Tiloja erottavan rakenteen pinta-ala [m <sup>2</sup> ].
$T_m$	Integrointiaika [s].
$T_{s,j}$	Rakenneosan $j$ rakenteellinen jälkikaiunta-aika ( <i>Structural reverberation time of element j</i> ) [s].
$U$	Rakenneosan piiri [m].
$Y_{dp}$	Mobiliteetti [m/Ns].

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Puukerrostalorakentamista ovat viemässä eteenpäin elementtijärjestelmät, joiden avulla teollinen rakentaminen tehdään mahdolliseksi. Esimerkiksi betonirakentamisessa on jo kymmeniä vuosia käytetty tehtaalla valmistettuja elementtejä, jotka kootaan valmiiksi rakennukseksi työmaalla. Nyt samankaltaista rakentamistapaa käytetään myös puurakentamisessa. [16, 17]

Puurakenteisten kerrostalojen rakentaminen helpottui vuonna 2011, kun Suomen rakentamismääräyskokoelman palomääräyksiä sisältävää osaa E1 [8] muutettiin. Muutos kohdistui 5 – 8 kerroksisiin ja enintään 26 metriä korkeisiin puutaloihin P2-paloluokassa, joita varten ei enää edellytetä toiminnallista tapauskohtaista tarkastelua, mikäli käytetään automaattista sammutuslaitteistoa [33]. Ympäristöministeriössä on myös valmisteilla asetus, jolla on tarkoitus mahdollistaa puun käytön laajentamista majoitus- ja hoitolaitoksiin ja lisätä mahdollisuuksia puurakenteiden jättämiseksi näkyville [32]. Vuosina 2011 - 2016 Suomessa on valmistunut Puuinfo Oy:n sivuilla olevien tietojen mukaan 6 yli 5-kerroksista puukerrostaloa [18].

Puukerrostalojen rakennejärjestelmiä ovat esimerkiksi suurelementit, tilaelementit ja pilari-palkkirunko. Kantavissa rakenteina voidaan käyttää puun lisäksi betonia ja terästä. Monissa puukerrostaloissa on myös päädytty tekemään yksi tai useampi alin kerros betonista, jotta sinne voidaan sijoittaa esimerkiksi paikoitus- tai väestönsuojatiloja. Esimerkkejä rakennejärjestelmistä on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 1). [17]



**Kuva 1.** Puukerrostalojen rakennejärjestelmiä vasemmalta oikealle: Tilaelementti, pilari-palkkijärjestelmä ja rankarakenteiset suurelementit. [17]

## 1.2 Rakenteiden ääneneristävyys

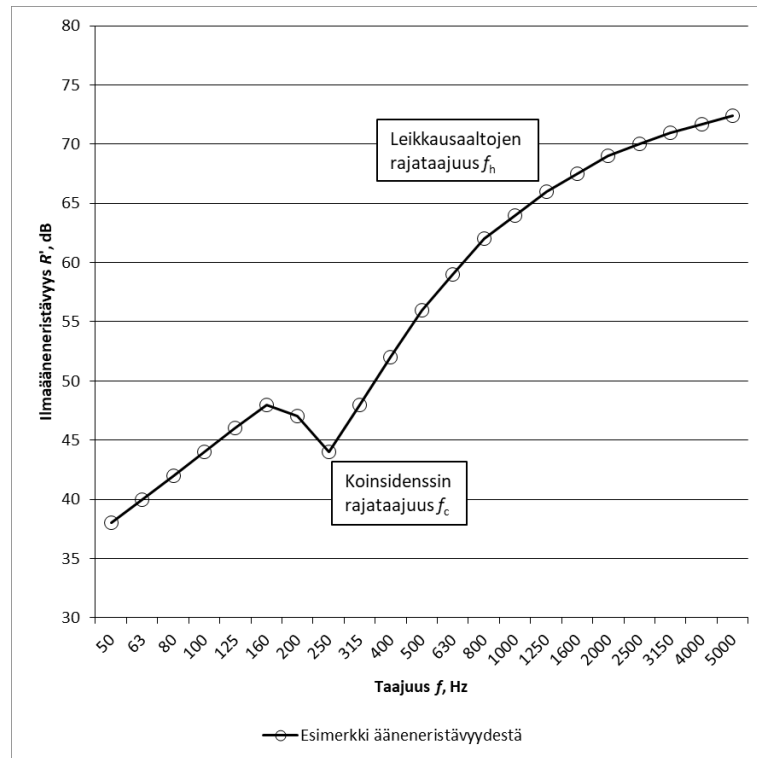
Rakenteiden ääneneristävyyden arviointiin käytetään ilmaääneneristyslukua ja askeläänitasolukua. Ilmaääneneristysluku  $R'_w$  kuvaa kahden tilan välistä ilmaääneneristävyyttä ja askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  askeläänikojeen vasaroiden lattiaan kohdistuvista iskuista toiseen tilaan aiheutuvaa äänitasoa. [5, 6] Tässä tutkimuksessa keskitytään rakenteiden ilmaääneneristävyyteen.

Suomessa asuinhuoneistojen välisestä ääneneristävyydestä määrätään Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 [14]. Määräysten mukaan ilmaääneneristysluvun  $R'_w$  tulee olla vähintään 55 dB asuinhuoneistojen välillä ja vähintään 39 dB asuinhuoneiston ja uloskäytävän välillä, kun välissä on ovi. Askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  asuinhuoneistoon saa yleisesti olla enintään 53 dB sekä uloskäytävästä asuntoon enintään 63 dB. Rakentamismääräyksiä ollaan päivittämässä vuoden 2018 aikana ja vaatimukset saattavat muuttua [1].

Ilmaääneneristysluvun ja askeläänitasoluvun mittaamiseen käytetään yleisesti kansainvälisiä standardeja ISO 140 ja ISO 16283. Vuonna 2014 julkaistu ISO 16283 on korvannut vanhemman standardin ISO 140, mutta käytännössä siirtymä uuden standardin käyttöön on edelleen käynnissä. Suurimmat erot uudessa standardissa vanhaan verrattuna ovat ympärisäteilevän äänilähteen käyttö, mikrofonilla käsin skannaamisen menetelmä ja menetelmä ääneneristävyyden mittaamiseksi pienillä taajuuksilla terssikaistoilla 50 Hz, 63 Hz ja 80 Hz. [6, 13]

Akustisesti rakenteet voidaan jakaa yksi- tai useampikerroksisiin rakenteisiin. Yksinkertaisella rakenteella tarkoitetaan yhdestä materiaalikerroksesta koostuvaa rakennetta ja useampikerroksisissa rakenteissa kerrosten välissä on ilmapäli, joka voi olla kokonaan tai osittain täytetty absorptiomateriaalilla. Useampikerroksisten rakenteiden välit toimivat massa-jousisysteemin jousina ja kerrokset massoina. Yksi- ja useampikerroksiset rakenteet käyttäytyvät akustisesti eri tavalla riippuen kerrosten kytkentätavasta ja ilmapälistä. [34, 48]

Yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyyden taajuusalue voidaan jakaa kolmeen osaan. Rakenteen alimman ominaistaajuuden  $f_{11}$  ja koinsidenssin rajataajuuden välillä ilmaääneneristävyyteen vaikuttaa lähinnä rakenteen massa. Tätä taajuusaluetta kutsutaan niin sanotun massalain alueeksi, jolloin ääneneristävyys kasvaa 6 dB oktaavilla. Lähellä koinsidenssin rajataajuutta ääneneristävyys heikkenee selvästi ja koinsidenssin rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla rakenteen ilmaääneneristävyys kasvaa jyrkästi sekä lähes tyy massalain mukaista ilmaääneneristävyyttä. Leikkausaallojen rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla leikkausaallot levyssä vaikuttavat rakenteen ääneneristävyyteen, eikä rakenteen ääneneristävyys enää kasva massalain mukaisesti. Esimerkki yksinkertaisen rakenteen ääneneristävyyskuvaajasta on alla olevassa kuvassa (Kuva 2). [12, 34, 48]



**Kuva 2.** Yksinkertaisen rakenteen ääneneristävyytkuvaaja.

Koska puu on kevyt materiaali, sen käyttöön liittyy haasteita riittävän ääneneristyksen saavuttamiseksi. Rakenteista tehdään tyypillisesti akustisesti kaksinkertaisia esimerkiksi kelluvilla lattioilla tai joustavasti ripustetuilla alakatoilla ääneneristävyyden takia. Lisäksi tiloja sivuaviin rakenteisiin ja liitoksiin täytyy tehdä ääneneristävyyttä parantavia rakenneratkaisuja. [25, 38, 46] Monimutkaiset rakenteet ja liitokset lisäävät rakennusvirheiden riskiä.

### 1.3 Äänen sivutiesiirtymä

Ääneneristävyyteen vaikuttaa tiloja suoraan erottavan rakenteen ääneneristävyyden lisäksi äänen sivutiesiirtymä. Äänen sivutiesiirtymä tarkoittaa äänen kulkeutumista esimerkiksi ilmanvaihtokanavan tai tiloja sivuavien rakenteiden kautta. Sivutiesiirtymäreittejä ovat kaikki muut reitit paitsi äänen välittyminen tiloja suoraan erottavan rakenteen kautta. Tässä tutkimuksessa keskitytään äänen sivutiesiirtymään sivuavien rakenteiden kautta. [12, 34, 48]

Äänen rakenteellinen sivutiesiirtymä on äänen kytkeytymistä ilmasta tiloja sivuaviin rakenteisiin ja etenemistä kiinteän aineen värähtelynä rakenteessa. Värähtelevä rakenne säteilee ääntä takaisin ilmaan. Välittyvän äänen voimakkuus riippuu muun muassa rakenteiden häviöistä. Rakenteessa tapahtuu materiaalin sisäisiä häviöitä, liitoshäviöitä kytkeytyviin rakenteisiin ja säteilyhäviöitä värähtelyn välittyessä väliaineeseen. [12, 31, 48]

## 1.4 Tilaelementit

Tilaelementit ovat pitkälle vietyä valmisosarakentamista, joihin voidaan asentaa tehtaalla valmiiksi pintamateriaalit, kiinteät kalusteet, ovet ja ikkunat. Myös tilaelementtikohtaiset sähkö- ja LVI-asennukset voidaan tehdä jo tehtaalla samoin kuin viimeistelytyöt kuten listoitus ja maalaus. Rakennustyömaalla tilaelementit nostetaan paikoilleen, liitetään toisiinsa ja liitetään rakennuksen LVIS-asennuksiin. [17]

Tilaelementtirakenteisten asuntojen välinen rakennetyyppi on luonnostaan kaksinkertainen rakenne, sillä vierekkäisten tilaelementtien uloimmat rakenteet ovat vastakkain. Rakenteiden välisessä ilmatilassa tarvitaan kerros huokoista materiaalia ääneneristävyyden parantamiseksi ja se on yleensä mineraalivillaa. [36] Usein paloteknisten vaatimusten vuoksi tilaelementtien kantavien seinien sisäpinnoille tarvitaan palosuojaukseksi esimerkiksi kipsilevykerrokset, jotka lisäävät rakenteen massaa ja ääneneristävyyttä.

Liitosten onnistuminen on tilaelementtien välisen ääneneristävyyden kannalta olennaista. Tilaelementit pyritään pitämään toisistaan irrallaan, jotta ääni ei pääse välittymään rakenteita pitkin tilaelementtien välillä. Yksittäisetkin jäykät kytkeytymiset heikentävät tilojen välistä ääneneristävyyttä ja mahdollisia kytkeytymiskohtia on juuri liitoksissa. [36]

Tilaelementtien välisillä tukipinnoilla käytetään joustavaa tärinäeristysmateriaalia, joilla pyritään vähentämään värähtelyn välittymistä tilaelementtien välillä. Tärinäeristysmateriaali on yleensä elastomeeria ja se asennetaan joko jatkuvina kaistoina tai paloina tilaelementtien tukipintojen alle. Tärinäeristimien mitoitus perustuu yleensä oletukseen yhden vapausasteen massa-jousi-vaimennin-systeemistä, jonka ominaistajuus mitoitetaan mahdollisimman kauas oletetun herätteen taajuudesta. [35, 36]

Rakennuksen jäykistyksen takia tilaelementit liitetään toisiinsa teräksisillä kiinnitysosilla. Kiinnitysosat ovat usein levymäisiä kappaleita, jotka on rei'itetty valmiiksi kiinnikkeitä varten. Kiinnitykseen käytetään ruuvi kiinnikkeitä ja kiinnitysosan ja tilaelementin väliin asennetaan yleensä joustavaa tärinäeristysmateriaalia värähtelyn välittymisen vähentämiseksi. [26, 28]

## 1.5 Puutuotteet rakenteissa

Rakenteissa voidaan käyttää erilaisia puutuotteita. Rakennesahatavaraa käytetään yleensä rankarakenteisissa seinissä. LVL:ää eli viilupuuta (*Laminated veneer lumber*) käytetään yleensä pilareissa ja erityisesti palkeissa sekä lisäksi massiivilevyinä ja rankarakenteissa. Pilareissa ja palkeissa yleinen puumateriaali on liimapuu, josta on edelleen kehitetty massiivipuulevytuote CLT eli ristiin liimattu sahatavara (*Cross-laminated timber*). [17]

CLT koostuu ristikkäin liimatuista sahatavaralevykerroksista. Kerrosten paksuus ja määrä vaihtelevat, mutta yleensä kerroksia on pariton määrä ja vähintään 3. Koska puulla

ortotrooppisena materiaalina on eri ominaisuudet syiden suunnassa ja syitä vastaan kohtisuoraan, ristiin liimaaminen parantaa syitä vastaan kohtisuoraa kestävyyttä. Ristiin liimaaminen vähentää myös levyn kosteuden vaihtelusta aiheutuvia muodonmuutoksia, sillä puussa kosteuden vaihtelu aiheuttaa paljon vähemmän muodonmuutoksia syiden suunnassa, kuin syitä vastaan kohtisuorassa. [9, 17, 28]

Rakentamisessa käytetään yleensä tehtaalla valmiiksi hiottuja ja koneistettuja CLT-levyjä. Levyihin tehdään koneistamalla esimerkiksi aukkoja ikkunoita, ovia ja läpivientejä varten, uria sähkö- ja muita asennuksia varten sekä loveuksia levyjen kiinnitystä ja tuentaa varten. Levyjen enimmäiskoot riippuvat tehtaan valmistuslinjaston mitoista. CLT-tilaelementtejä valmistetaan tehtaalla valmiiksi suunnitelluista CLT-levyistä.

## 1.6 Tämän tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena on testata äänen sivutiesiirtymän mittaamenetelmää ja vertailla mitattua ja laskennallista dataa keskenään. Äänen sivutiesiirtymää tarkastellaan ilmastoineristävyyden näkökulmasta kirjallisuuden kautta, laskennallisesti ja mittauksella. Sivutiesiirtymän mittauksella saatuja tuloksia verrataan mitattuun ja laskennalliseen ilmastoineristävyyteen. Lisäksi arvioidaan mittaamenetelmän soveltuvuutta kenttämittauksiin.

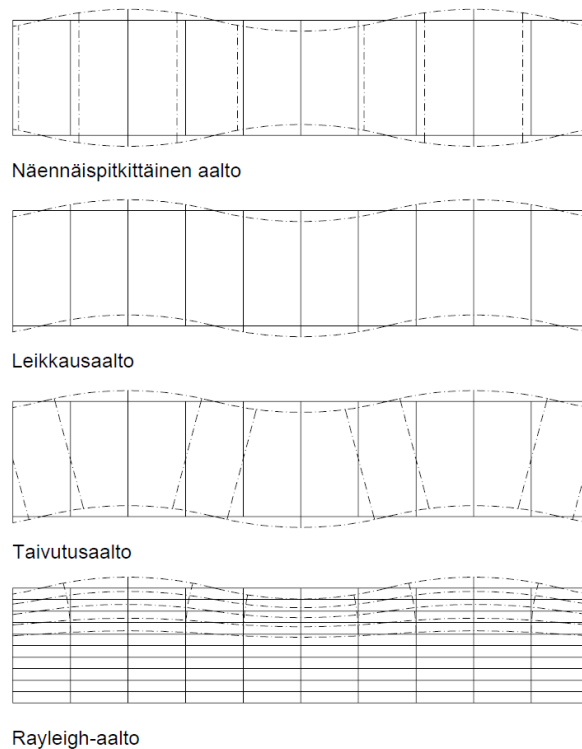
Luvussa 2 kerrotaan äänen sivutiesiirtymästä ja siihen vaikuttavista tekijöistä levyrakenteissa. Luvussa käydään läpi levyrakenteiden värähtelyjä ja värähtelyn välittymistä rakenteissa. Luvun lopussa keskitytään puurakenteisiin. Rakenteiden ääneneristävyyttä ja äänen sivutiesiirtymää on käsitelty runsaasti kirjallisuudessa. Tässä tutkimuksessa on hyödynnetty suomenkielisestä kirjallisuudesta Kylliäisen [34] ja Hongiston [30] kirjoja. Kansainvälisestä kirjallisuudesta on hyödynnetty Hopkinsin [31] ja Vigranin [48] kirjoja sekä lisäksi kansainvälisiä standardeja, konferenssijulkaisuja ja julkaisuja alan lehdissä.

Luvussa 3 esitellään erään puukerrostalon rakenteita ja rakennuksessa tehtyjen ilmastoineristävyyden mittausten tuloksia. Luku 4 sisältää äänen sivutiesiirtymän laskennallista tarkastelua standardin EN 12354 [12] mukaan ja luku 5 äänen sivutiesiirtymän mittaamista standardin ISO 10848 [10] mukaan. Luvussa 6 kerrotaan mittausten käytännön järjestelyistä ja koemittauksista. Kohteessa tehtiin äänen sivutiesiirtymän mittauksia, jotka kuvataan luvussa 7. Luvussa 8 vertaillaan tuloksia keskenään ja tehdään johtopäätöksiä. Lopuksi luvussa 9 on yhteenveto tutkimuksesta.

## 2. ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄ

### 2.1 Värähtely levyrakenteissa

Levyrakenteissa esiintyy useita eri tyyppisiä kiinteän väliaineen aaltoja. Näennäispitkitäisissä aalloissa poikkileikkausta vastaan kohtisuorassa tulee pieniä muodonmuutoksia. Leikkausaallot ja taivutusaallot muistuttavat toisiaan, mutta leikkausaallossa vaikuttaa vain leikkausrasituksia ja muodonmuutokset pinnan normaalin suhteen ovat pieniä. Taivutusaallot ovat äänen säteilyn kannalta tärkein aaltotyyppi, sillä taivutusaaltojen pintaa vastaan kohtisuora siirtymä on muihin aaltotyyppihin verrattuna huomattavasti suurempi. Rayleigh-aallot muistuttavat taivutusaaltoja. Rayleigh-aaltoja esiintyy vain huomattavan paksujen levyjen pinnalla, eikä rakentamisessa yleensä käytetä erittäin paksuja levyjä. Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on esitetty eri aaltotyyppisiä. [30, 31]



**Kuva 3.** Kiinteän aineen aaltotyyppisiä.

Levyssä etenevät aallot vaimenevat sisäisten häviöiden ja liitoshäviöiden vaikutuksesta. Sisäiset häviöt tarkoittavat värähtelyenergian muuttumista absorption vaikutuksesta lämmöksi rakenteessa. Liitoshäviöt tarkoittavat värähtelyenergian häviöitä rakenteen ja ympäröivien rakenteiden rajapinnoissa. Liitoshäviönä voidaan myös pitää häviötä värähtelyn välittymisessä ilmaan tai ilmasta levyyn. Häviöt vaikuttavat siten, että suuremmilla häviöillä ilmaaneneristävyys on suurempi. Kokonaishäviö on yleensä riippuvainen taajuudesta. [31]



Seuraavissa luvuissa esitetyissä kaavoissa on taustalla oletus diffuusista värähtelykentästä. Diffuusissa värähtelykentässä aaltojen saapumissuunnan todennäköisyys on sama kaikille suunnille, eli aaltoja saapuu tasaisesti kaikista suunnista. Tämä ei kuitenkaan toteudu pienillä taajuuksilla, joilla ominaistaajuuksia on harvemmassa kuin suurilla taajuuksilla tai rakenteen mitat eivät ole aallonpituutta suuremmat. [10, 31]

## 2.2 Koinsidenssi

Koinsidenssin rajataajuudella  $f_c$  värähtelyn aallonpituus ilmassa ja taivutusaallon aallonpituus rakenteessa ovat yhtä suuret. Koinsidenssin vaikutus näkyy rakenteen ilmaääneneristävyyskäyrässä taajuudella, joka riippuu rakenteeseen kohdistuvan äänen tulokulmasta. Koinsidenssin rajataajuudella äänen tulosuunta on kohtisuorassa rakennetta vastaan. Koinsidenssialueella levy värähtelee voimakkaasti ja rakenteen ääneneristävyys on viereisiä taajuuskaistoja heikompi. Koinsidenssin rajataajuus voidaan laskea kaavalla [12, 48]

$$f_c \approx \frac{c_0^2}{1,8c_L h} \quad (1)$$

jossa  $c_0$  on äänen nopeus ilmassa,  $c_L$  on näennäispitkittäisaaltojen nopeus levyssä ja  $h$  on levyn paksuus.

Koinsidenssin rajataajuutta pienemmillä taajuuksilla yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyys määräytyy massalain perusteella. Tällä taajuusalueella suurin osa äänienergiasta säteilee nurkka- ja reuna-alueilta. Koinsidenssin rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla suurin osa äänienergiasta säteilee pintasäteilynä levyn keskialueelta. Tämän vuoksi levyn ääneneristävyys koinsidenssin rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla on sama kuin vastaavalla äärettömän suurella levyllä. [31]

## 2.3 Paksut levyt

Paksuilla levyillä taivutusaallon aallonpituus ei enää ole suuri levyn paksuuteen verrattuna. Paksuilla levyillä ääneneristävyyteen vaikuttavat myös leikkausaallot ja rajataajuutta kutsutaan myös leikkausaaltojen rajataajuudeksi. Leikkausaaltojen rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla ilmaääneneristävyys ei enää kasva massalain mukaisesti. Rajataajuus voidaan laskea kaavalla [30, 34]

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left( \frac{c_0}{6h} \right)^2 \quad (2)$$

Suurilla taajuuksilla levyn ilmaääneneristävyys ei enää kasva, vaan lähestyy yhtä lukuarvoa. Rajana ilmaääneneristävyyden kasvulle voidaan pitää 4 kertaa ohuen levyn rajataajuutta suurempaa taajuutta [31, 37]. Ohuen levyn rajataajuus taivutusaalloille voidaan arvioida kaavalla [31]

$$f_{B(\text{thin})} \approx \frac{0,05 \cdot c_L}{h} \quad (3)$$

Laskettu taajuus vastaa tilannetta, jossa taivutusaaltojen aallonpituus  $\lambda_B = 6h$ . Yllä annetut kaavat (2) ja (3) ovat yhtä suuret, kun koinsidenssin rajataajuus lasketaan luvussa 2.2 annetulla kaavalla (1). Näennäispitkittäisaaltojen nopeus levyissä lasketaan kaavalla [31, 48]

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (4)$$

jossa  $E$  on rakenteen kimmomoduuli,  $\rho$  rakenteen tiheys ja  $\nu$  rakenteen poissonin luku.

Levyn ääneneristävyys ei kasva rajattomasti. Standardissa ISO 12354-1 [4] annetaan levyn ilmaääneneristävyydelle enimmäisarvo

$$R = -10 \log \left( \left( \frac{4\rho_0 c_0}{1,1\rho c_L} \right)^2 \frac{0,02}{\eta_{\text{tot}}} \right) \quad (5)$$

jossa  $\rho_0$  on ilman tiheys ja  $\eta_{\text{tot}}$  levyn kokonaishäviökerroin.

## 2.4 Värähtelyn välittyminen levystä ilmaan

Rakenteen kykyä välittää värähtelyä ilmaan sanotaan säteilytehokkuudeksi  $\sigma$ . Säteilytehokkuus riippuu taajuudesta ja on suurin koinsidenssin rajataajuudella. Rajataajuuden yläpuolella laskennallinen säteilytehokkuus lähestyy arvoa 1. Hopkinsin mukaan yleensä on syytä rajoittaa säteilytehokkuuden arvio olemaan enintään 1, sillä tämä alaraja-arvio on usein lähempänä todellista säteilytehokkuutta, kuin laskennallinen yläraja-arvio. [31]

Säteilytehokkuus taajuuden funktiona äärelliselle levyllä koinsidenssin rajataajuuden alapuolella voidaan Hopkinsin mukaan laskea kaavalla [31]

$$\sigma = \frac{U}{2\pi\mu k S \sqrt{\mu^2 - 1}} \left[ \ln \left( \frac{\mu+1}{\mu-1} \right) + \frac{2\mu}{\mu^2 - 1} \right] [C_{BC} C_{OB} - \mu^{-8} (C_{BC} C_{OB} - 1)] \quad f < f_c \quad (6)$$

jossa  $U$  on levyn ympärysmitta ja  $S$  on levyn pinta-ala.  $C_{BC}$  on levyn reunaehdoista riippuva vakio, joka on 1 nivelellisesti tuetulle tai 2 jäykästi tuetulle levyllä.  $C_{OB}$  on levyn tuennan suunnasta levyyn nähden riippuva vakio, joka on 1, kun tuenta ja levy ovat samassa tasossa, tai 2, kun tuenta on kohtisuoraan levyä vastaan. Muuttuja  $\mu$  lasketaan kaavalla

$$\mu = \sqrt{\frac{f_c}{f}} \quad (7)$$

Aaltoluku  $k$  lasketaan kaavalla

$$k = \frac{2\pi f_c}{c_0} \quad (8)$$

Koinsidenssin rajataajuuden alapuolella alimman ominaistaajuuden säteilytehokkuus on suurin. Koinsidenssin rajataajuuden kohdalla säteilytehokkuus voidaan laskea kaavalla

$$\sigma \approx \left(0,5 - \frac{0,15l_2}{l_1}\right) \sqrt{k} \sqrt{l_2} \quad f \approx f_c \quad (9)$$

jossa  $l_1$  on suorakulmaisen levyn suurempi ja  $l_2$  pienempi sivumitta. Rajataajuuden yläpuolella säteilytehokkuus voidaan laskea kaavalla

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} \quad f > f_c \quad (10)$$

jolla säteilytehokkuuden arvo lähestyy arvoa 1, kun taajuus kasvaa.

Standardin EN 12354 liitteessä B annetaan erilaiset kaavat säteilytehokkuuden laske-  
miseksi. Niitä ei esitetä tässä, koska standardissa annetaan ymmärtää, että tuoreemmassa  
kirjallisuudessa on vaihtoehtoisia kaavoja. [12]

## 2.5 Rakenteellinen absorptio ja häviökertoimet

Rakenteellinen jälkikaiunta-aika kuvaa rakenteen absorption määrää. Levyrakenteissa  
absorptio määritetään absorptiopituutena  $\alpha_i$  ja suurempi luku kuvaa suurempaa absorp-  
tiota. Levyn absorptiopituus lasketaan kaavalla [10]

$$\alpha_i = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i}} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \quad (11)$$

jossa  $T_s$  on levyn rakenteellinen jälkikaiunta-aika taajuudella  $f$ . Kaavaa voidaan käyttää  
homogeenisilla levyillä, joiden koinsidenssin rajataajuus on tunnettu. Levyillä, joiden  
koinssidenssin rajataajuutta ei voida tarkasti määrittellä tai niitä on useita, se korvataan  
referenssitaajuudella  $f_{ref} = 1000$  Hz. Tällöin absorptiopituutta sanotaan ekvivalentiksi ab-  
sorptiopituudeksi.

Rakenteellinen jälkikaiunta-aika voidaan arvioida rakenteen kokonaishäviökertoimen  
avulla kaavalla

$$T_s \approx \frac{2,2}{f \eta_{tot}} \quad (12)$$

jossa  $\eta_{tot}$  on rakenteen kokonaishäviökerroin, joka voidaan laskea kaavalla [12]

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f m'} + \frac{c_0}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k \quad (13)$$

jossa  $\eta_{\text{int}}$  on rakenteen sisäinen häviökerroin,  $l_k$  liitoksen pituus rajapinnalla  $k$  ja  $\alpha_k$  absorptiokerroin taivutusaalloille rajapinnalla  $k$ , joita on yleensä 4 kpl. Kokonaishäviökerroin taajuudella  $f$  voidaan myös arvioida alle  $800 \text{ kg/m}^2$  rakenteille kaavalla [12]

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{int}} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (14)$$

Kokonaishäviökerroin  $\eta_{\text{tot}}$  sisältää kaikki rakenteen häviöt mukaan lukien sisäiset häviöt, säteilyhäviöt ja liitoshäviöt. Sisäinen häviökerroin  $\eta_{\text{int}}$  kuvaa materiaalin vaimennuskykyä. Sisäiset häviöt muuttavat värähtelyenergiaa lämmöksi ja siksi suuri sisäinen häviökerroin on ääneneristävyyden kannalta parempi kuin pieni. Säteilähäviöt ovat värähtelyenergian muuttumista äänienergiaksi. Liitoshäviöt ovat värähtelyenergian välittymistä rakenteesta toisiin rakenteisiin. Liitoshäviöt ovat levyrakenteilla usein merkittävimpiä häviöitä. [31, 48]

## 2.6 Liitoseristävyys

Liitoseristävyys  $K_{ij}$  kuvaa liitoksen kykyä välittää värähtelyä rakenteiden välillä. Suurempi liitoseristävyyden arvo tarkoittaa, että liitoksen kautta välittyy vähemmän värähtelyä. Suuri liitoseristävyyden arvo on toivottu, kun halutaan mahdollisimman vähän äänen sivutiesiirtymää sivuavien rakenteiden kautta. Kun tunnetaan rakenteiden absorptiopituuudet ja rakenteiden välinen värähtelytaseroitus, liitoseristävyyden arvo saadaan kaavalla [10]

$$K_{ij} = \overline{D_{v,ij}} + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{\alpha_i \alpha_j}} \right) \quad (15)$$

jossa  $\overline{D_{v,ij}}$  on rakenteiden välinen suuntakeskiarvoistettu värähtelytaseroitus ja  $l_{ij}$  liitoksen pituus.  $\overline{D_{v,ij}}$  lasketaan kaavalla

$$\overline{D_{v,ij}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \quad (16)$$

jossa värähtelytaseroituksista  $D_{v,ij}$  suuntiin  $ij$  ja  $ji$  lasketaan keskiarvo. Värähtelytaseroitus lasketaan mitattujen värähtelytasojen mukaan kaavalla

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \quad (17)$$

jossa  $L_{v,i}$  ja  $L_{v,j}$  ovat värähtelynopeuden tasot pinnoilla  $i$  ja  $j$ . Tason referenssinopeutena käytetään  $v_0 = 1 * 10^{-9} \text{ m/s}$ . Värähtelynopeuden sijaan voidaan myös käyttää kiihtyvyyttä, jolloin referenssikiihtyvyytenä käytetään standardin mukaan lukuarvoa  $a_0 = 1 * 10^{-6} \text{ m/s}^2$ .

Liitoseristävyys voidaan standardin EN 12354-1 liitteen E.2 mukaan myös arvioida ras-kaille homogeenisille rakenneosille perustuen rakenteelliseen tehon välityskertoimeen  $\gamma_{ij}$  tai liitoshäviökertoimeen  $\eta_{ij}$  [12]. Tällöin liitoseristävyys voidaan laskea kaavoilla

$$K_{ij} = -10 \log \gamma_{ij} + 5 \log \frac{f_{c,j}}{f_{ref}} \quad (18)$$

$$K_{ij} = -10 \log \eta_{ij} \frac{\pi^2 S_i}{c_{olij}} \sqrt{\frac{f_{c,i}}{f_{c,j}}} \sqrt{f_{ref} f} \quad (19)$$

Standardiluonnoksen ISO 12354 liitteessä E.3 [4] annetaan empiirisiin mittauksiin perus-tuvia kaavoja erilaisten massiivisten rakenteiden liitosten liitoseristävyydelle. Kaavoissa rakenteiden liitoksen muuttujana on rakenteiden pintamassojen  $m'$  suhde ja kaava riippuu liitoksen tyypistä. Standardiluonnoksen liitteessä E.4 [4] esitellään numeeriseen simu-lointiin perustuvia kaavoja liitoseristävyydelle. Kaavoissa käytetään karakterististen mo-mentti-impedanssien suhdetta  $\psi/\chi$ , joka on Crispinin et al. (2014) mukaan parempi suh-deluku liitoseristävyyden laskemisessa kuin pintamassojen suhde, jota käytetään nykyi-nessä standardissa [23].

Liitoseristävyys on riippuvainen taajuudesta, kun liitoksessa on joustava kerros. Tämä on otettu huomioon standardiluonnoksessa ISO 12354 annetuissa liitoseristävyyden lasken-takaavoissa [4]. Crispinin et al. (2006) tutkimuksessa taajuusriippuvaisuus on todettu mit-tauksin ja riippuvuuden suhteeksi esitetään massiivisilla rakenteilla yhden liitoksen yli  $10 \log f$ . Crispinin et al. tutkimuksessa todetaan myös, että liitoseristävyyden tarkka sel-vittäminen edellyttää mittauksia käyttötilanteessa ja halutulla taajuusalueella. [24]

## 2.7 Värähtely ortotrooppisessa aineessa

Ortotrooppisessa materiaalissa voidaan yleensä käyttää kahden eri suunnan parametrien keskiarvoa keskimääräisenä parametrina. Esimerkiksi puussa kimmomoduuli on huomattavasti suurempi syiden suunnassa kuin syitä vastaan kohtisuorassa, minkä vuoksi pitkit-täisaaltojen aallonnopeus myös eroaa näissä suunnissa.

Ortotrooppisella materiaalilla on kaksi koinsidenssin rajataajuutta – yksi kumpaankin suuntaan. Mikäli rajataajuudet ovat melko lähekkäin, materiaali voidaan mallintaa iso-trooppisena ja käyttää tehollista taivutusjäykkyyttä. Mikäli rajataajuudet ovat riittävän kaukana toisistaan, koinsidenssialue laajenee ja ylintä rajataajuutta suuremmilla taajuuk-silla materiaali käyttäytyy tehollisen taivutusjäykkyyden mukaan. Nyrkkisääntönä voi-daan pitää, että kun rajataajuudet ovat kauempana kuin kahden terssikaistan päässä toi-sistaan, levy tulisi mallintaa ortotrooppisena. Tehollinen taivutusjäykkyys voidaan laskea kaavalla [31]

$$B_{p,xy} \approx B_{p,eff} = \sqrt{B_{p,x} B_{p,y}} \quad (20)$$

jossa  $B_{p,x}$  ja  $B_{p,y}$  ovat taivutusjäykkyydet  $EI$  x- ja y-suuntiin. Myös tehollinen koinsidenssin rajataajuus voidaan laskea x- ja y-suuntien rajataajuuksista kaavalla

$$f_c = \sqrt{f_{c,x}f_{c,y}} \quad (21)$$

Santonin et al. (2016) tutkimuksessa havaittiin säteilytehokkuuden mittauksissa CLT-levyillä ortotrooppiselle materiaalille tyypilliset 2 koinsidenssin rajataajuutta. Tutkimuksessa käytettiin kahta 80 mm ja yhtä 100 mm CLT-levyä, joiden säteilytehokkuus mitattiin käyttäen mekaanista herätettä ja ilmaääniherätettä. 80 mm levyillä alemmat rajataajuudet olivat 100 Hz ja 200 Hz sekä ylempi 500 Hz terssikaistalla. 100 mm levyillä alempi rajataajuus oli 250 Hz ja ylempi 1000 Hz terssikaistalla. [40]

## 2.8 Puurakenteet ja sivutiesiirtymä

CLT-levyt ovat ortotrooppisia rakenteita, joten niiden akustisia ominaisuuksia tulee laskea joko molempiin kohtisuoriin suuntiin tai yksinkertaistaa ne isotrooppisiksi ja käyttää tehollisia lähtöarvoja. Standardissa ISO 10848 massiivipuu, kuten CLT-levyt, voidaan lukea riittävän homogeenisiksi, että niissä voi olla osalla taajuusaluetta diffuusi värähtelykenttä [2].

Värähtelyn välittyminen rakenteiden välillä riippuu liitoksen toteutuksesta. Liitoksen akustinen käyttäytyminen muuttuu viivamaisesta liitoksesta pistemäisiksi liitoksiksi, kun liittimien väli on noin puolet taivutusaallon aallonpituudesta [31]. Schoenwaldin et al. (2014) tutkimuksessa havaittiin liitoseristävyuden mittauksessa, että CLT-levyjen välinen liitos, joka on toteutettu pistemäisillä kiinnikkeillä, käyttäytyy pienillä taajuuksilla viivamaisena ja suuremmilla taajuuksilla pistemäisten liitosten sarjana [42].

Tärinäeristimet vähentävät välittyvää värähtelyä systeemin ominaistajuutta selvästi suuremmilla taajuuksilla. Tutkimuksissa on todettu joustavan kerroksen liitokseen lisäämisellä olevan liitoseristävyttä kasvattava vaikutus [27, 35]. Muilla ääneneristävyttä parantavilla toimenpiteillä ei saada Ljunggrenin & Ågrenin (2011) mukaan kuin marginaalisia parannuksia [36].

Puurakenteilla sisäiset häviöt ovat suuria verrattuna raskaampiin betonirakenteisiin. Betonirakenteilla sisäinen häviökerroin on arviolta 0,005 [31] ja CLT-levyillä noin 0,05 [42]. Suuri sisäinen häviökerroin voi johtaa värähtelyn vaimenemiseen etäisyyden kasvaessa rakenteessa. [31, 48]

Bolmsvikin (2008) tutkimuksessa verrattiin rakenteellisen herätteen aiheuttamaa äänitasausta ja pintojen värähtelykiihtyvyyden tasoja. Yläpuolisessa tilaelementissä lattiarakennetta herätettiin sähködynaamisella täryttimellä ja alapuolisessa tilaelementissä mitattiin kiihtyvyyttä seinä- ja kattopinnoilla sekä äänenpainetasoa. Tutkimuksen johtopäätöksenä

oli, että kiihtyvyyssanturien ja mikrofonien yhteiskäytöllä voidaan vertailla sivutiesiirtymäreittien osuuksia tilan äänitasosta. [22]

Van Dammen et al. (2015) tutkimuksen mukaan CLT:n dynaaminen kimmomoduuli voi olla riippuvainen taajuudesta. Tutkimuksessa verrattiin 3-kerroksisten CLT-palkkien dynaamisia ominaisuuksia, kun näytteet leikattiin CLT-levyistä sekä pintakerroksen että sisäkerroksen suunnassa. Tapauksessa, jossa näytteen taivutusjäykkyys riippui pääasiassa keskimmäisestä kerroksesta, näyte käyttäytyi homogeenisesti. Kun näyte leikattiin pinta-kerroksen suuntaan, leikkausmuodonmuutoksilla oli suuri vaikutus ja kimmomoduuli oli taajuusriippuvainen. [47]

## 2.9 Värähtelytasoerotus CLT-rakenteiden välillä

Värähtelyn välittymistä CLT-rakenteissa on tutkittu erityisesti askeläänen kannalta. Tutkimuksissa on usein valittu pinnoiksi lattia ja seinä, koska ne edustavat yleisintä sivutiesiirtymäreittiä askeläänelle. Mittausmenetelmänä on käytetty ISO-10848 kuvaamia menetelmiä tai sovellettu esimerkiksi askeläänikojetta värähtelyherätteenä.

Perézin & Fuenten (2013) tutkimuksen mukaan T-liitoksessa CLT-levyjen välillä värähtelynopeuden tasoerotus  $D_{v,ij}$  kasvaa 500 Hz terssikaistalta ylöspäin, vaikka liitoksessa ei olisi joustavaa kerrosta. Tutkimuksessa oli käytetty 80 mm 3-kerroksisia CLT-levyjä seinässä ja 135 mm 5-kerroksisia CLT-levyjä lattiasa. Lähes kaikissa tapauksissa joustavan kerroksen lisääminen kasvattaa värähtelytasoerotusta  $D_{v,ij}$  pintojen välillä. [39]

Perézin & Fuenten (2013) tutkimuksen mukaan rakenteiden erottamisella on suuri merkitys, sillä lattia- ja seinärakenteen risteyskohdassa yhtenäisenä jatkuvalla lattialevyllä on mittauksen koko taajuusalueella pienempi värähtelytasoerotus  $D_{v,ij}$  kuin risteyskohdassa katkaistulla lattialevyllä. Ero katkaisun hyväksi kasvaa 500 Hz terssikaistalta ylöspäin. [39]

Samansuuntaisia tuloksia on saatu Barbaresin et al. (2016) tutkimuksessa, jossa on tehty liitoseristävyden  $K_{ij}$  mittauksia CLT-levyillä. Tutkimuksessa on tehty X-risteyksen yli eri pinnoille mittauksia, joissa lähes kaikissa on noin 800 Hz terssikaistalta ylöspäin suurempi liitoseristävyden  $K_{ij}$  arvo, kun levy ei jatku yhtenäisenä liitoksen yli. Tutkimuksessa seininä on käytetty 100 mm 3- tai 5-kerroksisia CLT-levyjä ja lattiana 160 mm 5-kerroksisia CLT-levyjä. Tutkimuksessa on myös vertailtu eri valmistajien levyjä keskenään. [20]

Ågrenin & Ljunggrenin (2016) tutkimuksessa on saatu samansuuntaisia tuloksia nopeustasoerotukselle  $D_{v,ij}$  CLT-levyjen välillä. Tutkimuksessa on tehty mittauksia lattiarakenteen ja seinärakenteen välillä. Tutkimuksen perusteella yli 800 Hz terssikaistoilla on suurempi nopeustasoerotuksen  $D_{v,ij}$  arvo. Lattiana on ollut kuvien perusteella 3-kerroksinen

CLT-levy ja seinänä 3-kerroksinen CLT-levy. Levyjen paksuuksia ei ole mainittu lähteessä. [19]

Ågrenin & Ljunggrenin (2016) tutkimuksessa on tehty mittauksia myös tilaelementtien välillä. Tutkimuksen mukaan nopeustasoerotuksessa on jyrkkä lasku 40 Hz terssikaistalta alaspäin ja nousu 1000 Hz terssikaistalta ylöspäin. 40 Hz ja 1000 Hz terssikaistojen välillä nopeustasoerotus  $D_{v,ij}$  pysyy lähes samana tai kasvaa hieman. Tutkimuksessa myös esitetään yleistetty empiiriseen dataan perustuva käyrä värähtelytasoerotukselle lattian ja seinien välillä. Yleistetyssä kuvaajassa esitetään 5 - 6 dB/oktaavi kasvua 31 Hz terssikaistalta alkaen ja 13 - 20 dB/oktaavi kasvua 800 Hz terssikaistalta alkaen. [19]

Dolezalin et al. (2008) tutkimuksessa tutkittiin neljän eri tärinäeristysmateriaalin käyttäytymistä, kun kuorma muuttuu. Tutkimuksessa tehtiin värähtelynopeuden tasoerotuksen mittauksia lattiarakenteen ja seinärakenteen välillä. Lattiarakenteena käytettiin 162 mm 5-kerroksista CLT-levyä, kelluvaa lattiaa ja joustavasti alas laskettua alakattoa. Seinärakenteena käytettiin 94 mm 3-kerroksista CLT-levyä. Tutkimuksessa havaittiin, että eri tärinäeristemateriaalien eristyskyky riippui eri tavalla kuormituksesta. Tutkimuksessa todetaan, että tärinäeristysmateriaalilla on merkittävä äänen sivutiesiirtymää vähentävä vaikutus yli 100 Hz terssikaistoilla. [27]

Sjöströmin et al. (2014) tutkimuksessa tehtiin värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen mittauksia käyttäen suurta määrää kiihtyvyydsantureita ja askeläänikojetta, jossa oli vain yksi vasara käytössä. Tutkimuksessa käytetyistä rakenteista ei anneta tarkkoja tietoja, mutta yksi tutkittu kohde on CLT-rakenteinen. Tutkimuksen mukaan kaikkien tutkittujen rakennusten ääneneristävyys on sivutiesiirtymän osalta hyvä. [43]

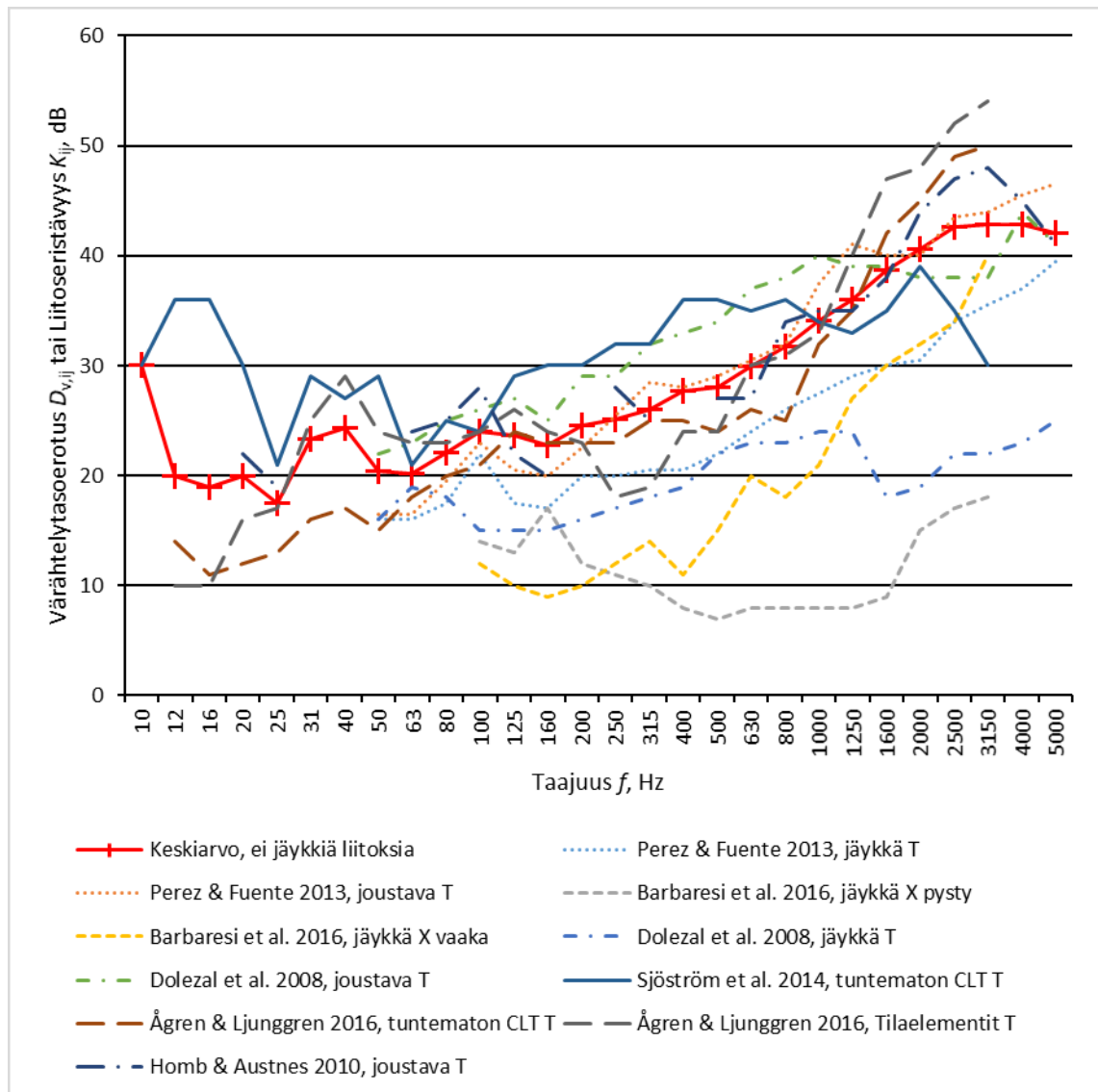
Schoenwaldin et al. (2013) tutkimuksessa tehtiin liitoseristävyuden mittauksia CLT-levyjen X-risteyksen yli kaikilla mahdollisilla sivutiesiirtymäreiteillä. Seinärakenteina käytettiin 78 mm 3-kerroksista CLT-levyä ja lattiarakenteena 175 mm 5-kerroksista CLT-levyä. Tutkimuksessa vertailtiin liitoksen toteutusta erilaisilla kiinnitysmenetelmillä, joilla oli vaikutusta värähtelyn välittymiseen levyjen välillä. [42]

Hombin & Austnesin (2010) tutkimuksessa tehtiin värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen mittaus CLT-rakenteisen lattian ja seinän välillä. Tutkimuksessa käytettiin 120 mm CLT-levyä lattiarakenteena ja 144 mm CLT-levyä seinärakenteena. Tutkimuksen mukaan tasoerotus on 20 - 25 dB alle 630 Hz taajuuksilla ja kasvaa jyrkästi suuremmilla taajuuksilla. Mittaus ei kuitenkaan tekijöiden mukaan ollut täysin onnistunut ja kaikilla taajuuksilla ei saatu tuloksia. [29]

Speranzan et al. (2016) tutkimuksessa tehtiin liitoseristävyuden mittauksia CLT-levyjen X-, T- ja L-risteysten yli monella eri sivutiesiirtymäreitillä. Tutkimuksessa käytettiin seinärakenteena 100 mm 3- tai 5-kerroksisia CLT-levyjä ja lattiarakenteena 160 mm 5-kerroksisia CLT-levyjä. Tutkimuksessa vertailtiin uuden tyyppistä liitosta tavanomaiseen liitokseen ja lisäksi erilaisten joustavien materiaalien käyttöä liitoksessa. [44]



Alla olevaan kuvaan (Kuva 4) on koottu kirjallisuudesta saatuja  $K_{ij}$  ja  $D_{v,ij}$  arvoja. Kuvassa näkyy, että hajonta tulosten välillä on suurta. Tutkimukset eroavat toisistaan mittausjärjestelyiden, käytettyjen materiaalien ja raportoidun taajuusalueen osalta. Mittaustuloksille on yhteistä melko tasainen arvo pienillä taajuuksilla ja joltain taajuudelta alkaen kasvava arvo. Samassa tutkimuksessa jäykällä liitoksella on pienempi värähtelytasoerotus kuin joustavalla liitoksella. Joustavien liitosten keskiarvokuvaajassa näkyy noin 6 dB/oktaavi kasvu noin 315 Hz terssikaistalta alkaen, mutta monissa mittaustuloksissa kasvu on vielä jyrkempi.



**Kuva 4.** Kirjallisuudesta saatuja  $K_{ij}$  ja  $D_{v,ij}$  arvoja. [19, 20, 27, 29, 39, 43]

## 2.10 Välipäätelmät

Sivutiesiirtymäreitillä äänen välittymiseen vaikuttavat liitoshäviöt ja sisäiset häviöt sekä säteilevän pinnan säteilytehokkuus. Värähtelyn välittymistä pintojen välillä kuvataan lii-

toseristävyydellä, joka on rakenteiden absorptioon normalisoitu värähtelytasoerotus pintojen välillä. Värähtelytasoerotus ja liitoseristävyys voidaan mitata ja niiden avulla voidaan arvioida sivutiesiirtymää.

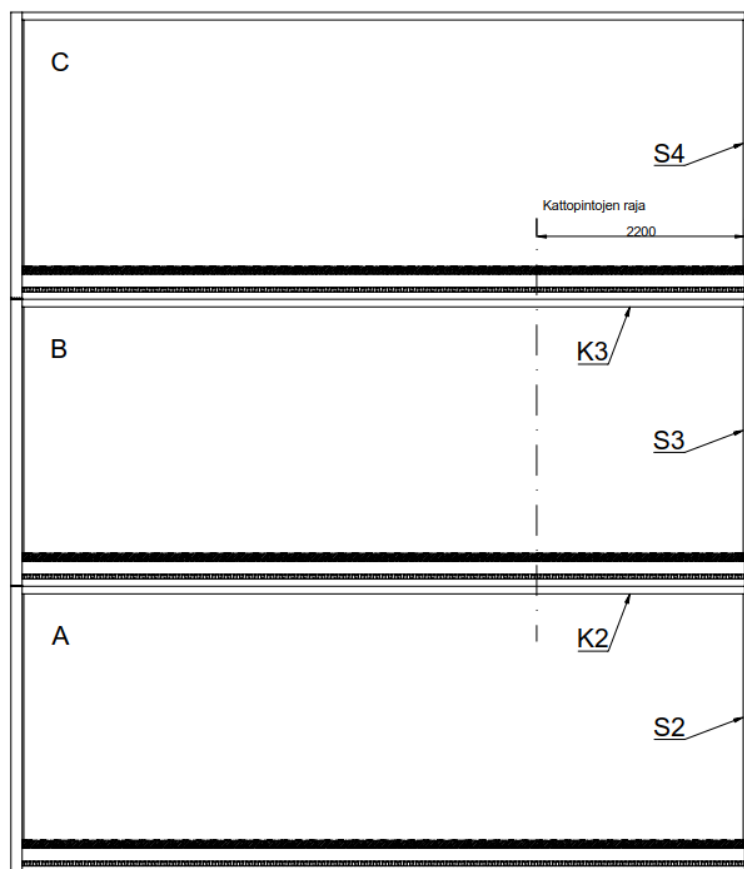
Äänen sivutiesiirtymää puurakenteissa pyritään minimoimaan käyttämällä joustavaa materiaalia rakenteiden liitoksissa. Materiaalin valinnalla ja mitoituksella on merkitystä liitoseristävyuden kannalta ja suorituskykyyn vaikuttavat myös mekaaniset liittimet sekä kuormituksen vaihtelu.

Värähtelytasoerotuksia pintojen välillä on mitattu puurakenteilla, mutta tilaelementtirakenteilla hyvin vähän. Mittaustulokset riippuvat paljon rakenteista ja harvassa tutkimuksessa on tehty kattavaa vertailua erilaisten liitosten välillä. Niissä tutkimuksissa, missä vertailua on tehty, on saatu paljon vaihtelua erilaisten rakenteiden kesken. Mittauksia on tehty paljon enemmän laboratorio-olosuhteissa kuin rakennuksissa. Alalla on edelleen jatkettava tutkimuksia, jotta saadaan tarkempaa tietoa rakenteiden ja liitostyyppien vaikutuksesta äänen sivutiesiirtymään puurakenteissa.

### 3. KOHDERAKENNUKSEN ESITTELY

#### 3.1 Kohderakennuksen rakenteet

Tässä luvussa on kuvattu rakenteet puukerrostalossa, jota käytetään tässä tutkimuksessa mittauksissa ja ääneneristävyyden laskennassa. Kohde on tilaelementtirakenteinen puukerrostalo, josta on valittu kolme päällekkäistä tilaelementtiä tarkastelua varten. Alla olevassa kuvassa (Kuva 5) on esitetty päällekkäin sijaitsevien tilaelementtien periaatekuva. Kuvaan on myös merkitty katkoviivalla kattopinnalla tehtyjen värähtelymittausten raja.

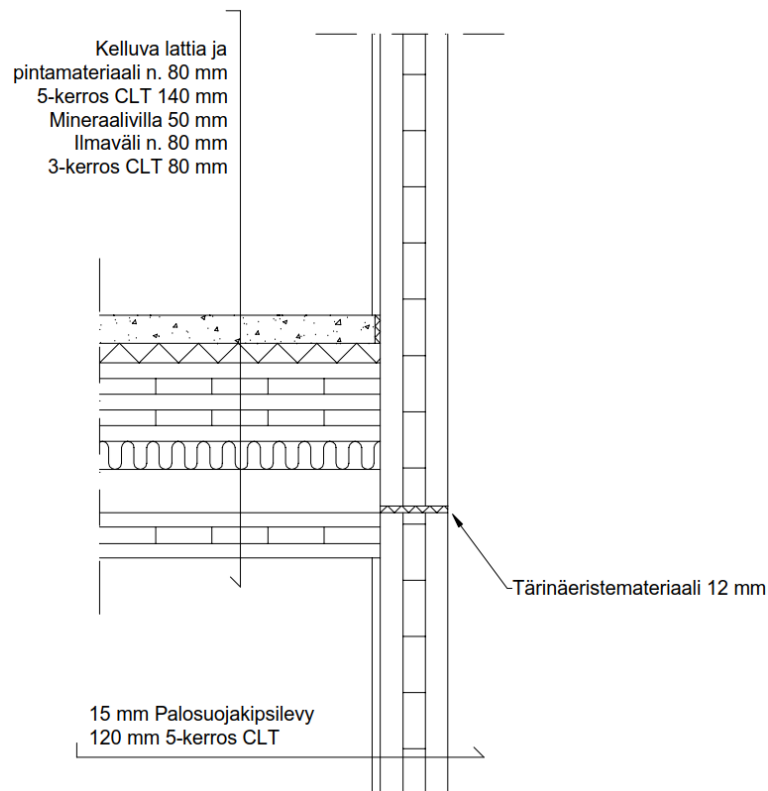


**Kuva 5.** Tilaelementit A, B ja C sekä pinnat S2, S3, S4, K2 ja K3.

Tilaelementtien rakenteena ovat CLT-levyt. Kantavina seininä on 120 mm CLT, kattona 80 mm CLT ja kantavana lattiarakenteena 140 mm CLT. Tilaelementeissä A ja C seinän pintaan on kiinnitetty 1 kpl 15 mm kipsilevyä palosuojausta varten ja tilaelementissä B kipsilevyjä on 2 kpl. Lattian kantavan CLT:n päälle on tehty betoninen kelluva lattia EPS-kellutuksella. Tilaelementin toinen pitkä sivu on osittain avoin ja siksi sillä osalla on liimapuupalkki ja -pilari kantavana rakenteena. Tilaelementit on liitetty toisiinsa teräksisillä liitososilla, jotka on sijoitettu kantaville linjoille.

Päällekkäisissä tiloissa on identtinen pohjaratkaisu, mutta pieniä eroja liitosten toteutuksessa. Tilaelementtien A ja B välillä on jäykempi tärinäeristysmateriaali pitkän sivun kantavalla seinälinjalla ja enemmän teräksisiä liitososia lyhyen sivun seinälinjalla, kuin tilaelementtien B ja C välillä.

Tärinäeristys tilaelementtien välillä on toteutettu käyttäen solumaisesta polyuretaanielastomeerista valmistettua mattoa. Materiaalia on asennettu kantavien linjojen alle jatkuvina kaistoina ja pilarien alle pilarin poikkileikkauksen kokoisina paloina. Lisäksi tilaelementtien nurkkiin on asennettu pala jäykempää materiaalia, kuin kantavilla linjoilla. Materiaalilla on nimelliskuormaa pienemmillä kuormilla melko lineaarinen jäykkyys ja kaistat oletetaan mitoitetuksi rakennuksen mitoituskuormilla materiaalin optimaaliselle kuormitusalueelle. Alla olevassa kuvassa (Kuva 6) on esitetty periaateleikkaus kantavan linjan kohdalta. Leikkauksessa näkyy seinien ja välipohjan rakenne ja tärinäeristysmateriaalin sijainti.

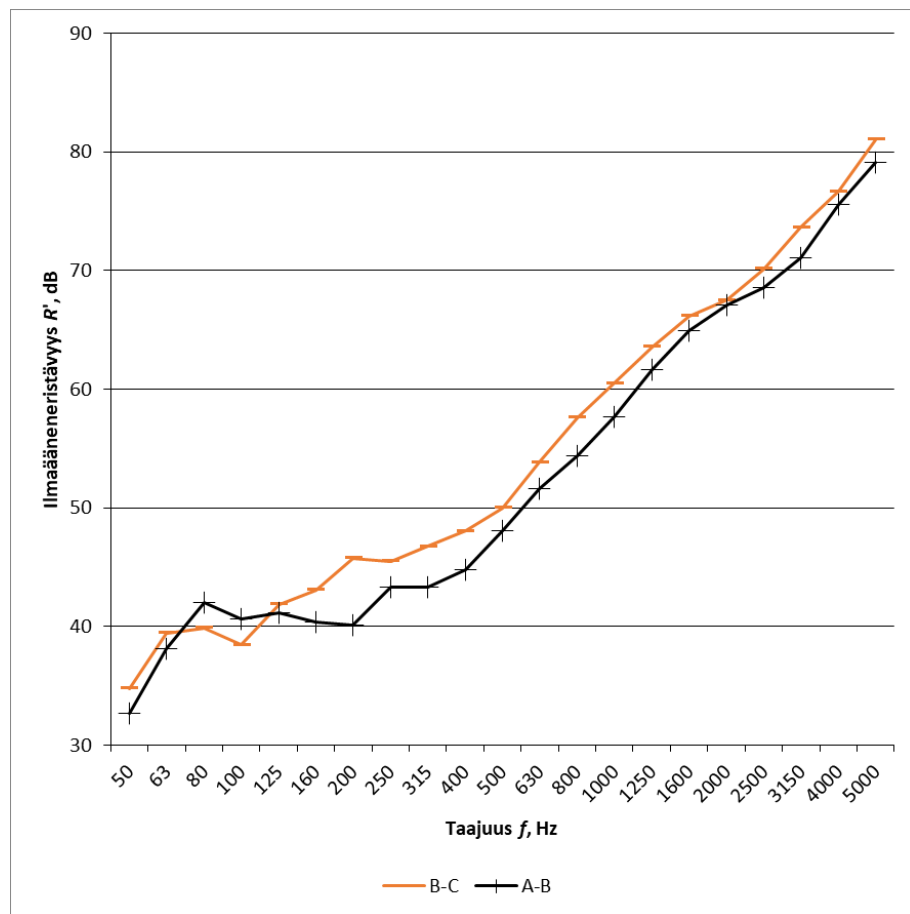


**Kuva 6.** Pystyleikkaus kantavan linjan kohdalta.

### 3.2 Ilmaääneneristävyyden mittaukset kohteessa

Kohteessa tehtiin ilmaääneneristävyyden mittaukset tilaelementtien A ja B sekä B ja C välillä standardin ISO 140-4 mukaan. Mittausten tulokset on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 7). Mittausten perusteella tilaelementtien A ja B välillä on 125 Hz terssikaistalla ja suuremmilla taajuuksilla suurempi ilmaääneneristävyys, kuin tilaelementtien B ja C

välillä. Erot ilmaääneneristävyydessä terssikaistoittain ovat 0,4 – 5,7 dB. Mitattu ilmaääneneristysluku  $R'_w$  tilaelementtien A ja B välillä on 53 dB ja tilaelementtien B ja C välillä 57 dB.



**Kuva 7.** Mitattu ilmaääneneristävyys tilaelementtien välillä kohteessa.

## 4. ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄN LASKENNALLINEN TARKASTELU

### 4.1 Laskennallinen tarkastelu standardin EN 12354 mukaan

Standardissa EN 12354-1 kuvataan ilmasteneristävyyden laskennallinen tarkastelu tilojen välillä [12]. Standardin menetelmä on alun perin kehitetty massiivisille muuratuille rakenteille ja betonirakenteille, minkä vuoksi se toimii parhaiten niiden ääneneristävyyden laskemisessa. Kanadan kansallinen tutkimusneuvosto NRC on julkaissut menetelmään perustuvan ohjeen RR-331, jossa laskentaa käydään esimerkein läpi eri rakenteilla mukaan lukien CLT-levyillä [49].

Menetelmällä voidaan laskea kahden tilan välinen ilmasteneristävyys ottaen huomioon äänen sivutiesiirtymä tiloja sivuavien rakenteiden kautta. Sivutiesiirtymän laskenta perustuu rakenteiden laboratorioissa mitattuihin ilmasteneristävyyksiin  $R$ , joita korjataan mitatuilla liitoseristävyyksillä  $K_{ij}$  sekä lisäkerroksen ilmasteneristävyyden parannusluvulla  $\Delta R$ . Lisäksi laskettu lukuarvo normalisoidaan erottavan rakenteen pinta-alan ja erottavan liitoksen pituuden mukaan.

Standardissa tiloja erottavaa pintaa merkitään kirjaimella  $D$  ja sivuavia pintoja kirjaimella  $F$ . Vastaanottotilan tunnuksia merkitään pienillä kirjaimilla  $d$  ja  $f$ . Kirjainyhdistelmät merkitsevät tiettyjä reittejä, esimerkiksi reitti lähetystilan sivuavalta pinnalta vastaanottotilan tiloja erottavalle pinnalle merkitään  $Fd$ . Kahden tilan välinen ääneneristävyys  $R'$  määritellään standardissa kaavalla

$$R' = -10 \log \tau' \quad (22)$$

jossa  $\tau'$  on läpäisykerroin eli vastaanottotilaan säteilevän kokonaisäänitehon ja tiloja erottavaan rakenteeseen kohdistuvan äänitehon suhde. Äänitehojen suhde voidaan jakaa äänieristykseen vaikuttaville osille kaavalla

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (23)$$

jossa  $\tau_d$  on tiloja erottavan rakenteen vastaanottotilaan säteilevän äänitehon ja erottavaan rakenteeseen kohdistuvan äänitehon suhde eli läpäisykerroin.  $\tau_d$  sisältää reitit  $Dd$  ja  $Fd$ .  $\tau_f$  on sivuavan rakenteen vastaanottotilaan säteilevän äänitehon ja erottavaan rakenteeseen kohdistuvan äänitehon suhde.  $\tau_f$  sisältää reitit  $Ff$  ja  $Df$ .  $\tau_e$  on tiloja erottavassa rakenteessa suoraan ilmastääntä välittävän elementin vastaanottotilaan säteilevän äänitehon ja erottavaan rakenteeseen kohdistuvan äänitehon suhde.  $\tau_s$  on epäsuorasti ilmastääntä vastaanotto-

tilaan säteilevän äänitehon ja erottavaan rakenteeseen kohdistuvan äänitehon suhde. Indekseistä  $n$  tarkoittaa sivuavien rakenteiden lukumäärää,  $m$  suoraan ilmaaäntä välittävien elementtien määrää ja  $k$  epäsuorasti ilmaaäntä välittävien järjestelmien määrää.

Sivuaville rakenteille ilmaääneneristävyys voidaan laskea kaavalla

$$R_{ij} = \frac{R_{i,\text{situ}}}{2} + \Delta R_{i,\text{situ}} + \frac{R_{j,\text{situ}}}{2} + \Delta R_{j,\text{situ}} + \overline{D_{v,U,j,\text{situ}}} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (24)$$

jossa  $R_{i,\text{situ}}$  on rakenteen kentällä mitattu ilmaääneneristävyys ja  $S_s$  tiloja erottavan rakenteen pinta-ala. Se voidaan myös laskea perustuen mitattuihin rakenteellisiin jälkikaiunta-aikoihin kentällä ja laboratoriossa sekä laboratoriossa mitattuun ilmaääneneristävyyteen  $R$ . Lisäkerrosten ilmaääneneristävyyttä parantava vaikutus huomioidaan termeillä  $\Delta R_{i,\text{situ}}$ , jotka ovat samoja kuin laboratoriossa mitatut termit  $\Delta R$ . Liitoksen vaikutus otetaan huomioon mitatulla suuntakeskiarvoistetulla värähtelytaseroituksella  $\overline{D_{v,U,j,\text{situ}}}$  ja termit  $S$  ovat pinta-alat tiloja erottavalle ja sivuaville rakenteille.

Standardin liitteessä B kuvataan ilmaääneneristävyyden laskenta monoliittisille rakenteille. Standardissa annetaan seuraavat kaavat läpäisy-suhteen laskemiseksi:

$$\tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f \eta_{\text{tot}}} \quad f > f_c \quad (25)$$

$$\tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2\eta_{\text{tot}}} \quad f \approx f_c \quad (26)$$

$$\tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left( 2\sigma_f \left[ 1 - \frac{f^2}{f_c^2} \right]^{-2} + 2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{4f \eta_{\text{tot}}} \right) \quad f < f_c \quad (27)$$

jossa  $\sigma_f$  on pakkovärähtelyn säteilytehokkuus, joka standardin mukaan lasketaan kaavoilla

$$\sigma_f = 0,5 [\ln(k_0 \sqrt{l_1 l_2}) - \Lambda] \quad \sigma_f \leq 2 \quad (28)$$

$$\Lambda = -0,964 - \left( 0,5 + \frac{l_2}{\pi l_1} \right) \ln \frac{l_2}{l_1} + \frac{5l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_0^2} \quad (29)$$

Leikkausaaltojen vaikutus ääneneristävyyteen suurilla taajuuksilla huomioidaan tehollisella koinsidenssin rajataajuudella. Sitä käytetään laskennassa koinsidenssin rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla ja se lasketaan standardin mukaan kaavalla

$$f_{c,\text{eff}} = f_c \left( 4,05 \frac{hf}{c_L} + \sqrt{1 + \left( 4,05 \frac{hf}{c_L} \right)^2} \right) \quad f > f_c \quad (30)$$

## 4.2 Laskennan reunaehdot

Standardin kuvaama laskenta rajoittuu yksinkertaisiin rakenteisiin, joissa voidaan erottaa tiloja erottavien rakenteiden osat selvästi ja ne voidaan kuvata yhtenä rakenteena. Lisäksi laskennan lähtötiedoiksi tarvitaan tunnettuja arvoja, jotka on saatu mittauksin tai jotka voidaan arvioida tunnettuihin arvoihin perustuen.

Laskentamalli ottaa huomioon vain yhden liitoksen sivutiesiirtymäreittä kohden ja jättää useamman liitoksen reitit huomiotta. Tämä voi vaikuttaa esimerkiksi useammista levykerroksista ja rangoista koostuvan levyseinän mallinnuksessa. Yleensä useamman liitoksen reitit eivät ole merkittäviä.

Laskentamenetelmä perustuu tilastolliseen energia-analyysiin SEA:han, jolloin siihen pätee SEA:n reunaehdot. SEA perustuu systeemien välisiin yhteyksiin ja niiden välillä tapahtuviin häviöihin. Sivutiesiirtymän tarkastelu rajoitetaan koinsidenssin rajataajuutta suuremmille taajuuksille, missä levyn värähtelyn katsotaan olevan resonanssivärähtelyä. Koska mitatuissa ääneneristävyyksissä on lähes aina mukana myös pakkovärähtelyn vaikutus, on standardissa päädytty huomioimaan asia tarkasteltavalla taajuusalueella. Koinssidenssin rajataajuus on usein rakennusakustiikan kannalta olennaisella 100 Hz – 3150 Hz taajuusalueella. Ohuilla levyillä, kuten kipsilevyillä, koinsidenssin rajataajuus on yleensä suuri, joten menetelmä ei sellaisenaan ole sopiva kevyille levyrakenteille. [12, 31]

Laskennassa käytetään liitoseristävyyden  $K_{ij}$  keskiarvoa, vaikka sen arvo on usein riippuvainen taajuudesta. Mikäli liitoseristävyydet mitataan kentällä, ne sisältävät paljon häviöitä muihin rakenteisiin eivätkä vain kahden levyn välisiä häviöitä. Standardissa vaaditaan kentällä mitattujen liitoseristävyyksien käyttöä.

## 4.3 Laskenta puurakenteilla

Standardia EN 12354 on tarkoitus laajentaa kattamaan myös kevyet rakenteet. Päivitetty standardi ISO 12354 julkaistiin heinäkuussa 2017. Standardiin on tulossa muun muassa laskentaesimerkkejä ja empiiriseen dataan perustuvia taulukoita ja laskentakaavoja liitoseristävyydelle. [4]

Kevyillä rakenteilla lisäkerrosten vaikutus sivutiesiirtymään ei ole yhtä suuri kuin massiivisilla rakenteilla. Lisäkerroksen parannusluku sivuaville rakenteille voidaan arvioida kaavalla

$$\Delta R_f = \frac{\Delta R_d}{2} \quad (31)$$



Rakenneosat jaetaan kahteen ryhmään, joista ensimmäisen rakenteellinen jälkikaiunta-aika määräytyy pääasiassa liittyvillä rakenteilla, ja toinen ryhmä on muut rakenteet. Muita rakenteita ovat esimerkiksi rankarakenteet ja suurten sisäisten häviöiden rakenteet.

Useampikerroksisilla rakenteilla huomioidaan joko rakenne kokonaisuudessaan tai rakenteen sisäpuolinen kerros. Tulkinnalla on suurin vaikutus sivutiesiirtymän laskennassa, jossa sivuavana tai erottavana rakenteena on useampikerroksinen rakenne, kuten esimerkiksi kaksirunkoinen levyseinä.

Standardin liitteessä B.2 esitetään korjausta äänen resonoivan välittymisen arvioimiseen. Korjauksen laskeminen perustuu ilmaäänien ja epäsuoran rakenteellisen herätteen säteilytehokkuuksiin ja se lasketaan kaavalla

$$R^* = R + 10 \log \frac{\sigma_a}{\sigma_s} \quad (32)$$

Säteilytehokkuutta kevyille ja jäykistetyille rakenteille ei standardin mukaan saada helposti laskettua, mutta tavanomaisille homogeenisille rakenteille se voidaan laskea melko tarkasti. [4]

Liitoseristävyydelle  $K_{ij}$  annetaan CLT-rakenteiden T- ja X-liitostyypeille empiiriseen dataan perustuvia laskentakaavoja liitteessä F.3. Standardissa painotetaan, että empiiristä dataa liitoksille on vain rakenteille, joiden pintamassojen suhde on välillä 0,5 – 2. Esimerkiksi T-liitoksen suoralle osuudelle, jossa levy ei jatku liitoksen yli, lasketaan liitoseristävyys  $K_{13}$  kaavalla

$$K_{13} = 22 + 3,3 * \log(f/f_k) \quad (33)$$

jossa  $f_k$  on 500 Hz.

#### 4.4 Laskennan tulokset kohderakennuksessa

Tässä luvussa esitetään ilmaääneneristävyyslaskennan tulokset kohteen rakenteilla kahden tilaelementin välillä. Laskennan lähtötiedot on koottu alla olevaan taulukkoon (Taulukko 1). Laskenta tehtiin yllä kuvatulla standardin EN 12354-1 mukaisella menetelmällä. Säteilytehokkuuden laskennassa käytettävien liitosten reunaehdoista riippuvien vakioiden  $C_{BC}$  ja  $C_{OB}$  arvoksi valittiin 1, koska arvolla 2 saatiin liian pieni ilmaääneneristävyys koincidenssin rajataajuutta pienemmillä taajuuksilla.

**Taulukko 1.** Ilmaääneneristävyytlaskennan lähtötiedot.

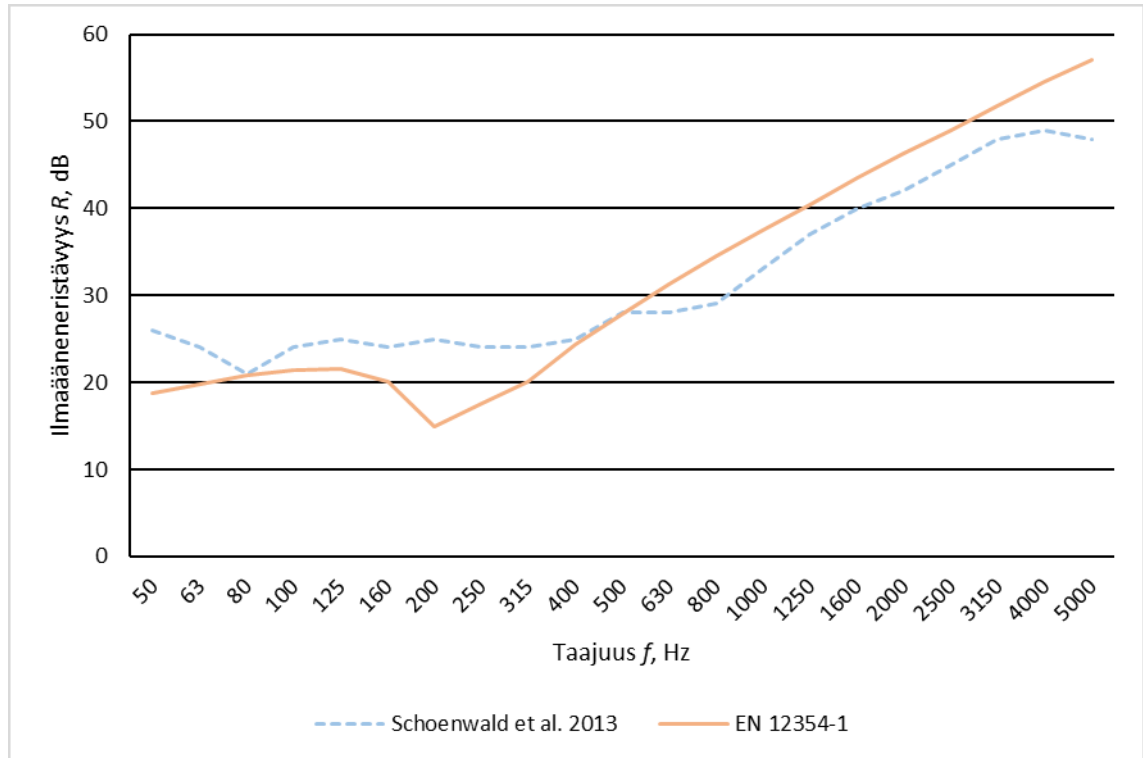
äänen nopeus ilmassa	$c_0$	343 m/s
CLT:n tiheys	$\rho$	450 kg/m <sup>3</sup>
näennäispitkittäisaaltojen nopeus CLT:ssä	$c_L$	3500 m/s
CLT:n tehollinen kimmomoduuli	$E_{eff}$	12 GPa
Poissonin luku	$\nu$	0,3
Sisäinen häviökerroin	$\eta_{int}$	0,03
Absorptiokerroin liitokselle	$\alpha_k$	0,1
Erottavan rakenteen pinta-ala	$S$	18,8 m <sup>2</sup>
Huoneiden tilavuus	$V$	48,8 m <sup>3</sup>

CLT:n kimmomoduuli  $E$  vaihtelee tutkimuksissa melko paljon. Steigerin et al. (2012) tutkimuksessa mitattiin kimmomoduulin keskiarvoja välillä 5 GPa – 11 GPa erilaisilla koekappaleilla ja mittausten variaatiokerroin oli enintään 20,4 % [45]. Rakennesahatavaran C24 kimmomoduuli syiden suuntaan on eurokoodin EC5 mukaisen lyhennetyt suunnitteluohjeen (2011) mukaan 11 GPa ja liimapuun GL28c 12,6 GPa [7]. Schickhoferin et al. (2016) tutkimuksessa CLT:n kimmomoduuliksi esitetään 11,6 GPa [41].

Poissonin luku  $\nu$  CLT-levyille vaihtelee myös paljon. Bogenspergerin et al. (2011) tutkimuksessa on käytetty poissonin lukua välillä 0,4 – 0,6 [21]. Yhdysvaltain maatalousministeriön metsätuotelaboratorion julkaisun ”*Wood Handbook*” (2010) mukaan pehmeiden puulajien poissonin luku voi vaihdella välillä 0,25 – 0,53 ja keskiarvo poissonin luvulle  $\nu_{RT}$  on 0,43 [9].

Sisäinen häviökerroin CLT:lle on valittu Schoenwaldin et al. tutkimuksen (2013) perusteella. Tutkimuksen mukaan sisäinen häviökerroin 3- ja 5-kerroksisille CLT-levyille on suurempi kuin standardissa EN 12354-1 esitetty raja rakenteille, joilla on suuret sisäiset häviöt  $\eta_{int} \geq 0,03$ . Tällöin laboratorioissa mitattuja lähtöarvoja voidaan käyttää suoraan ilman rakenteelliseen jälkikäiunta-aikaan normalisointia. Sisäisen häviökertoimen arvo laskennassa on ollut yksi lukuarvo, joka on valittu kuvaamaan suurten taajuuksien häviöitä. [42]

Rakenteiden ilmaääneneristävyys laskettiin standardin EN 12354-1 liitteen B mukaan. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) on esitetty CLT-levyjen laskennallisia arvoja eri levypaksuuksilla. Ilmaääneneristysluku 80 mm CLT-paneelille  $R_w = 31$  dB on lähes sama kuin Schoenwaldin et al. (2013) tutkimuksessa mitattu  $R_w = 33$  dB, vaikka levyn laskennallisen ääneneristävyyden kuvaaja (Kuva 8) ei olekaan samanlainen kuin mittauksessa [42].



**Kuva 8.** 80 mm paksun CLT-paneelin ilmaääneneristävyys.

**Taulukko 2.** CLT-levyjen laskennallisia ominaisuuksia 16 m<sup>2</sup> levyille.

			80 mm	120 mm	140 mm
Pintamassa	$m'$	kg/m <sup>2</sup>	36	54	63
Alin ominaistaajuus	$f_{11}$	Hz	16	24	28
Koinsidenssin rajataajuus	$f_c$	Hz	233	156	133
Ilmaääneneristysluku	$R_w$	dB	34	39	40

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 3) on esitetty kaksinkertaisen rakenteen arvoja. Kaksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyyslaskennassa on huomioitu kelluvan lattian massa 200 kg/m<sup>2</sup>. Kelluvaa lattiaa ei ole laskettu kolmantena kerroksena ja yksinkertaistus ei tässä tapauksessa johtanut suureen eroavaisuuteen mitatun ilmaääneneristävyyslaskennan kanssa. Tarkempi arvo rakenteen ilmaääneneristävyyslaskennalle saadaan ottamalla kelluva laatta huomioon kolmantena rakennekerroksena.

**Taulukko 3.** Kaksinkertainen rakenne 80 mm CLT, 80 mm ilmväli, 140 mm CLT ja kelluvan lattian massa.

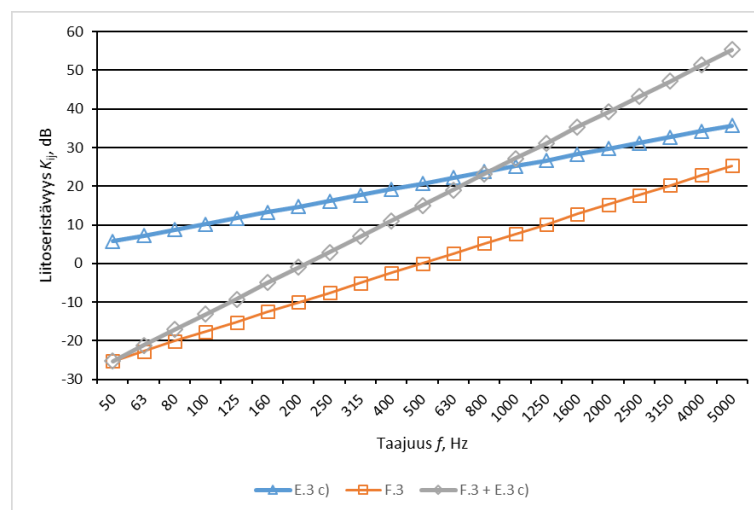
Massa-jousi-massa-systeemin resonanssitaajuus	$f_{mam}$	38 Hz
Ilmajousen ominaistaajuuden yläraja	$f_d$	683 Hz
Ilmaääneneristysluku	$R_w$	62 dB

Tilojen välisen välipohjarakenteen puoliskot ovat kytköksissä toisiinsa vain tärinäeristimien välityksellä kantavien linjojen kohdalla sekä liitososilla. Liitoseristävyys eri pintojen välillä voidaan tulkita olevan sama kaikilla yhden liitoksen sivutiesiirtymäreiteillä.

Sivuavia rakenteita laskennassa olivat tilaelementtien yksi päätyseinä ja yksi sivuseinä. Toisella sivuseinällä on rakennuksessa liimapuupilari ja tilaelementti on jaettu ei-kantavalla rankarakenteisella kipsilevyseinällä kahdeksi tilaksi. Äänen rakenteellisen sivutiesiirtymän reittejä muodostuu tilaelementtejä erottavan välipohjarakenteen, yhden päätyseinän ja yhden sivuseinän välille. Laskennassa huomioitavia sivutiesiirtymäreittejä oli siis yhteensä 6 kpl.

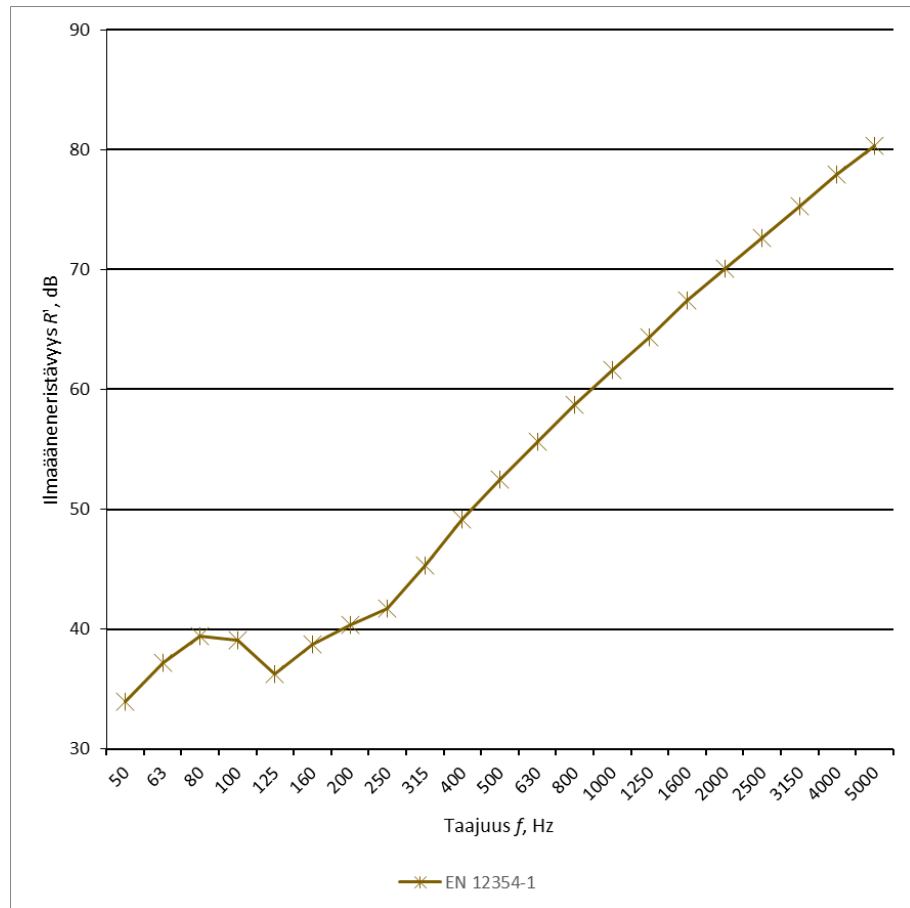
Seinärakenteiden laskennassa on huomioitu seinille lisätyt palosuojakipsilevyt massana  $8 \text{ kg/m}^2$ . Yksinkertaistus ei tässä tapauksessa johtanut suureen eroavaisuuteen mitatun ilmastäneristävyyden kanssa. Tarkempi arvo rakenteen ilmastäneristävyydelle saadaan ottamalla lisätty kipsilevykerros huomioon toisena rakennekerroksena.

Liitoseristävyiden arvoja laskettiin standardiluonnoksen ISO 12354 liitteiden E.3 ja F.3 mukaan. Lasketut liitoseristävyiden on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 9). Liitoseristävyiden arvoksi valittiin 200 Hz – 1250 Hz taajuusalueen keskiarvo  $K_{ij} = 20 \text{ dB}$ , joka laskettiin perustuen CLT-levyjen T-liitokselle annettuun empiiriseen kaavaan liitteessä F.3 ja liitteen E.3 kohdan c) mukaiseen joustavan kerroksen tuoman parannukseen. [4]



**Kuva 9.** Laskennallinen liitoseristävyys 120 mm CLT-levyjen välillä T-liitoksessa.

Laskennallinen ilmastäneristävyys tässä tutkimuksessa käytettyjen tilaelementtien välillä on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 10). Laskennallinen ilmastäneristysluku  $R'_w$  oli 55 dB.



**Kuva 10.** Laskennallinen ilmaääneneristävyyden kohderakennuksessa.

## 5. ÄÄNEN SIVUTIESIIRTYMÄN MITTAAMINEN

### 5.1 Mittaaminen standardin ISO 10848 mukaan

Äänen sivutiesiirtymän mittaamista varten ollaan julkaisemassa kansainvälisen standardin päivitetty versio, jonka luonnoksen nimi on ”ISO/DIS 10848: *Acoustics – Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms*” [2]. Maaliskuussa 2017 luonnoksen vaihe oli 50.00 *Approval* ja päivitetty standardi julkaistaneen vuoden 2017 loppuun mennessä. Suurin ero vuoden 2006 versioon on se, että kenttämittaukset otetaan huomioon. Samankaltainen mittausmenetelmä kuvataan myös Nordtestin ohjeessa ”NT ACOU 090: *Building structures, junctions: Transmission of vibrations – field measurements*” [15].

Standardiluonnoksessa ISO 10848-1 kuvataan mittausmenetelmä äänen sivutiesiirtymän mittaamiseksi laboratoriossa tai valmiissa rakennuksessa [2]. Menetelmän lähtökohtana on oletus diffuusista värähtelykentästä rakenteessa ja värähtelyn välittyminen vain mittauksen kohteena olevien pintojen välillä. Kentällä mitattaessa värähtely välittyy myös muihin rakenteisiin ja siksi on odotettavissa suurempia vaimenemisen arvoja. Mittausten tuloksia voidaan käyttää esimerkiksi samankaltaisten liitosten vertailuun tai standardin EN 12354 mukaisen laskennan lähtötietoina.

Rakenteet jaetaan kahteen rakenneosatyyppiin A ja B. Tyypin A rakenteet on määritelty diffuusin värähtelykentän perusteella siten, että värähtelytaso laskee rakenteen alueella erottavasta liitoksesta kohtisuorassa suunnassa enintään 6 dB alle 1000 Hz taajuusalueella. Tyypin A rakenteet ovat tyypillisesti homogeenisia ja massiivisia rakenteita, kuten betoni-, massiivipuu- tai metallirakenteita. Tyypin B rakenteita ovat kaikki muun tyyppiset rakenteet, kuten esimerkiksi rankarakenteiset levyseinät tai muuratut seinät.

Mitattavan suureen valintaa ohjataan rakenneosatyyppin ja olosuhteiden kautta. Standardin sivulla 12 olevassa taulukossa ”*Table 1 – Different measurement methods according to the types of junction and test elements*” luetellaan tiettyihin liitos- ja rakenneosatyyppihin sopivat mittausmenetelmät. Tyypin A rakenteille suositellaan taulukossa vain liitoseristävyyden mittaamista ja sallitaan sen mittaaminen myös kentällä.

Herätteenä voidaan käyttää jatkuvaa tai iskumaista herätettä. Iskuvasaralla tai pudotettavalla painolla saadaan iskumaisia herätteitä ja sähködynaamisella täryttimellä, ilmaäänilähteellä tai muunnetulla askeläänikojeella jatkuvia herätteitä. Muunnetulla askeläänikojeella tarkoitetaan sitä, että askeläänikojeen vasaran iskut voidaan toistettavasti kohdistaa seinä- ja kattopintoihin. Iskuvasaralla voidaan lyödä yksittäisiä lyöntejä tai 20 -30 sekunnin sarjoja samanlaisella voimalla 1 – 2 m<sup>2</sup> alueelle.

Mittalaitteina voidaan käyttää herätteestä riippuen kiihtyvyyssantureita tai mikrofoneja. Antureilla värähtelyä voidaan mitata suoraan sivutiesiirtymään osallistuvilta pinnoilta, kun taas mikrofoneilla mitataan tilan keskiäänitasoa. Manuaalisia herätteitä käytettäessä antureilla tulee mitata yhtä aikaa heräte- ja vastaanottopinnoilla.

Ilmäänilähdettä ja mikrofoneja käytettäessä kaikki muut paitsi mittaukseen käytettävät pinnat kummassakin tilassa tarvitsee suojata, jotta mitataan vain tutkittavaa sivutiesiirtymäreittä. Askeläänikojetta ja mikrofoneja käytettäessä vain vastaanottotilassa tarvitaan suojaukset muille kuin mitattavalle pinnalle. Suojaukseen esitetään standardissa 2 – 3 kerrosta kipsilevyjä ja 100 mm ilmaväliä osittaisella mineraalivillatäytöllä. Suojaustarpeen vuoksi menetelmä keskiäänitasoja mitattaessa on työlämpi kuin suoraan pinnoilta tehtävät mittaukset.

Vähimmäismäärä anturi- ja herätepisteitä määritellään myös rakenneosatyypin perusteella. Tyyppin A rakenteilla tarvitaan vähintään 3 herätepistettä ja tyyppin B rakenteilla vähintään 6. Jokaista herätepistettä kohti tarvitaan vähintään 3 anturipistettä sekä lähetysettä vastaanottopinnoilla. Anturi- ja herätepisteille annetaan minimietäisyydet pinnan reunoihin ja toisiinsa nähden. Herätepisteille etäisyysvaatimukset ovat suuremmat erityisesti testattavan liitoksen suhteen, kuin anturipisteille.

Kun käytetään kiihtyvyyssantureita ja mitataan kiihtyvyyttä, antureiden kiihtyvyyssignaaleista lasketaan värähtelykiihtyvyyden taso  $L_a$  kaavalla

$$L_a = 10 \log \left( \frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} a^2(t) dt}{a_0^2} \right) \quad (34)$$

jossa  $T_m$  on integrointiaika,  $a$  on kiihtyvyyden arvo ajanhetkellä  $t$  ja  $a_0$  referenssikiihtyvyyden  $a_0 = 1 * 10^{-6} \text{ m/s}^2$ . Kun kiihtyvyyttä mitataan samanaikaisesti lähetys- ja vastaanottopinnoilla  $i$  ja  $j$ , voidaan suoraan laskea värähtelykiihtyvyyden tasoerotus yhdelle herätepisteelle  $m$  ja yhdelle anturiparille  $n$  kaavalla

$$(D_{a,ij})_{mn} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{T_m} a_i^2(t) dt}{\int_0^{T_m} a_j^2(t) dt} \right) \quad (35)$$

jossa  $a_i$  ja  $a_j$  ovat kiihtyvyydet pinnoilla  $i$  ja  $j$ . Tällöin värähtelykiihtyvyyden tasoerotus pintojen  $i$  ja  $j$  välillä voidaan laskea kaavalla

$$D_{a,ij} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (D_{a,ij})_{mn} \quad (36)$$

Värähtelykiihtyvyyden tasoerotukset mitataan molempiin suuntiin  $ij$  ja  $ji$ , jolloin voidaan laskea tasoerotusten suuntakeskiarvo kaavalla

$$\overline{D_{a,ij}} = \frac{1}{2} (D_{a,ij} + D_{a,ji}) \quad (37)$$

Tästä voidaan edelleen laskea liitoseristävyys kaavalla

$$K_{ij} = \overline{D_{a,ij}} + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{\alpha_i \alpha_j}} \right) \quad (38)$$

jossa  $l_{ij}$  on pintojen  $i$  ja  $j$  välisen liitoksen pituus sekä  $\alpha_i$  ja  $\alpha_j$  rakenteiden ekvivalentit absorptiopituudet. Kun tunnetaan rakenteen rakenteellinen jälkikaiunta-aika  $T_{s,j}$ , ekvivalentti absorptiopituus  $\alpha_j$  lasketaan kaavalla

$$\alpha_j = \frac{2,2\pi^2 S_j}{T_{s,j} c_0 \sqrt{\frac{f}{f_{\text{ref}}}}} \quad (39)$$

jossa  $S_j$  on rakenteen pinta-ala,  $T_{s,j}$  on rakenteen rakenteellinen jälkikaiunta-aika taajuudella  $f$ ,  $c_0$  on äänen nopeus ilmassa ja  $f_{\text{ref}}$  on referenssitaajuus 1000 Hz.

## 5.2 Mittauksen reunaehdot

Liitoseristävyys on määritelty perustuen tilastollisen energia-analyysin SEA:n yksinkertaistettuun muotoon, jolloin tiettyjen SEA:n reunaehtojen on toteuduttava, jotta liitoseristävyys on relevantti. Pintojen  $i$  ja  $j$  välillä on heikko kytkentä ja ne voidaan lukea erillisiksi SEA:n alijärjestelmiksi sekä värähtelykentät rakenteissa ovat diffuusit. Rakenteiden välillä voi olla vahva kytkentä, jos seuraava ehto ei toteudu

$$D_{a,ij} \geq 3 - 10 \log \left( \frac{m'_i f_{c,j}}{m'_j f_{c,i}} \right) \quad (40)$$

jossa  $m'$  ovat rakenteiden pintamassat ja  $f_c$  ovat rakenteiden koinsidenssin rajataajuudet.

Tyypin A rakenteilla liitoksilla on merkittävä vaikutus rakenteen käyttäytymiseen. Pie-nillä taajuuksilla moodiluku  $N_n$  ja moodien limittymiskerroin  $M_n$  ovat mittaustarkkuuden kannalta tärkeitä parametreja. Moodiluku  $N_n$  terssikaistalle lasketaan kaavalla

$$N_n = bn \quad (41)$$

jossa  $b$  on taajuuskaista  $0,23f_{1/3}$  terssikaistan keskitaajuudella  $f_{1/3}$  ja  $n$  on modaalitiheys, joka lasketaan kaavalla

$$n = \frac{\sqrt{3}S}{hc_L} = \frac{\pi S f_c}{c_0^2} \quad (42)$$

jossa  $S$  on rakenteen pinta-ala,  $h$  rakenteen paksuus,  $c_L$  näennäispitkittäisaaltojen nopeus,  $f_c$  koinsidenssin rajataajuus ja  $c_0$  äänen nopeus ilmassa. Moodien limittymiskerroin  $M_n$  lasketaan kaavalla

$$M_n = \frac{2,2n}{T_s} \quad (43)$$



jossa  $T_s$  on rakenteellinen jälkikaiunta-aika. Moodiluku  $N_n$  terssikaistalla tulee olla mahdollisimman suuri ja lukuarvoa 5 voidaan yleensä pitää riittävänä. Moodien limittymiskerroin  $M_n$  tulee olla kaikilla mitattavilla rakenteilla yli 250 Hz terssikaistoilla vähintään 1. Taajuuksilla, joiden moodien limittymiskerroin on alle 1, mitattu liitoseristävyys on yleensä yliarvioitu. [3]

Kiihtyvyyssanturit tulee kiinnittää jäykästi pinnan normaalin suunnassa ja niiden massan tulee olla riittävän pieni. Liian painava anturi voi vaikuttaa mittaustulokseen varsinkin suurilla taajuuksilla. Massan vaikutus voidaan välttää, kun täytetään seuraava ehto anturin massalle  $m_{acc}$  [2]

$$m_{acc} < \frac{1}{2\pi f Y_{dp}} \quad (44)$$

jossa  $Y_{dp}$  on mobiliteetti, joka voidaan arvioida ohuelle isotrooppiselle levyille kaavalla

$$Y_{dp} = \frac{1}{8\sqrt{B_p m'}} = \frac{1}{2,3m'c_L h} \quad (45)$$

Ortotrooppisille levyille voidaan käyttää tehollista taivutusjäykkyyttä.

## 6. VÄRÄHTELYMITTAUKSET JA ANALYYSI

Tässä luvussa esitellään mittauksissa käytetyt mittalaitteet ja ohjelmistot, datan analysointi sekä koemittauksista saadut tulokset. Koemittauksista esitellään mittausjärjestelyt ja mittausten keskeiset havainnot. Luvun lopuksi tehdään johtopäätöksiä mittausmenetelmän kehityksestä.

### 6.1 Käytetyt mittalaitteet

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) on lueteltu mittauksissa käytetyt laitteet. Mittauksissa oli käytössä yhteensä 10 kpl kiihtyvyyssantureita. Kiihtyvyyssanturit ja iskuvasara kytkettiin mittausjärjestelmään, joka vuorostaan yhdistettiin tietokoneeseen mittauksen ohjelmointia ja datan tallentamista varten.

*Taulukko 4. Käytetyt mittalaitteet.*

	Valmistaja	Malli
<b>Mittausjärjestelmä</b>	imc Meßsysteme GmbH	CRONOSflex
<b>Kiihtyvyyssanturit</b>	Vibrametrics	8002ST 0168
		8002
		8002HS
<b>Iskuvasara</b>	PCB	

Mittausjärjestelmänä käytetty imc CRONOSflex on saksalaisen imc Meßsysteme GmbH:n modulaarinen mittausjärjestelmä. Se koostuu yksittäisistä moduuleista, jotka voidaan kytkeä toisiinsa keskitetysti mekaanisesti tai hajautetusti verkkokaapelin välityksellä. Sitä myös ohjataan verkkoyhteyden välityksellä tietokoneella, mikä mahdollistaa etäohjauksen. Valmistajan ilmoittamien tietojen mukaan järjestelmä tukee enintään 100 000 näytettä sekunnissa kanavaa kohti ja yhteensä 2 000 000 näytettä sekunnissa.

Kiihtyvyyssantureina käytettiin Vibrametricsin ICP-antureita. Esimerkki käytetystä anturista on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 11). Valmistajan verkkosivuilla olevien tietojen mukaan herkimpien HS-tyyppisten anturien herkkyys on 500 mV/g ja tavallisten anturien on 100 mV/g. Pelkkien anturien paino on 45 grammaa, mutta kiinnitysmagneetit, kaapelit ja kiinnitykseen käytetyt naulauslevyt lisäävät anturipisteiden massaa. Valmistajan ilmoittamien tietojen mukaan anturien tarkin ( $\pm 5\%$ ) taajuusalue on 2 Hz – 5 kHz.



**Kuva 11.** Esimerkkikuvia anturin kiinnitystavoista vasemmalta oikealle: kemiallisella metallilla suojateipin päälle, magneetilla seinään ruuvattuun naulauslevyyn ja ruuvilla puuhun.

Iskuvasarana käytettiin alla olevassa kuvassa (Kuva 12) olevaa vasaraa. Vasaran voimaanturin herkkyys on 170 mV/N. Vasaraan oli saatavilla erilaisia kärkiä, joista kolmen eroja testattiin koemittauksella. Vasaran massa on noin 10 kg.



**Kuva 12.** Iskuvasaran kärkiä vasemmalta oikealle: pehmeä kumi, kovempi kumi ja kova muovi.

## 6.2 Analyysi

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu mittauksissa ja datan käsittelyssä käytetyt ohjelmistot. Mittaukset ohjelmoitiin, käynnistettiin ja tallennettiin tietokoneella. Mittauksista saadun datan käsittelyyn käytettiin mittausjärjestelmän valmistajan omaa ohjelmistoa ja laskennan tulokset tulostettiin taulukkolaskentaohjelmaan jatkokäsittelyä varten.

**Taulukko 5.** Käytetyt ohjelmistot.

	Ohjelmisto	Versio
<b>Analyysiohjelmisto</b>	imc Famos Professional	6.3
<b>Mittausohjelmisto</b>	imc Devices	2.8
<b>Taulukkolaskenta</b>	Microsoft Excel	2016

Mittausohjelmistona käytetty imc Devices on mittausjärjestelmän valmistajan kehittämä ohjelmisto mittausten ohjelmointiin. Mittauksen ohjelmoinnissa voidaan määrittää muun muassa tallennettavan signaalin näytteenottotaajuus, tallenteen pituus, käytetyt syötteet ja tallennettavien kanavien määrä. Signaalien tallennuksen lisäksi voidaan ohjelmoida reaaliaikaisia laskentoja virtuaalisiksi syötteiksi, kuten esimerkiksi Fourier-muunnos signaalin tarkastelemiseksi taajuustasossa.

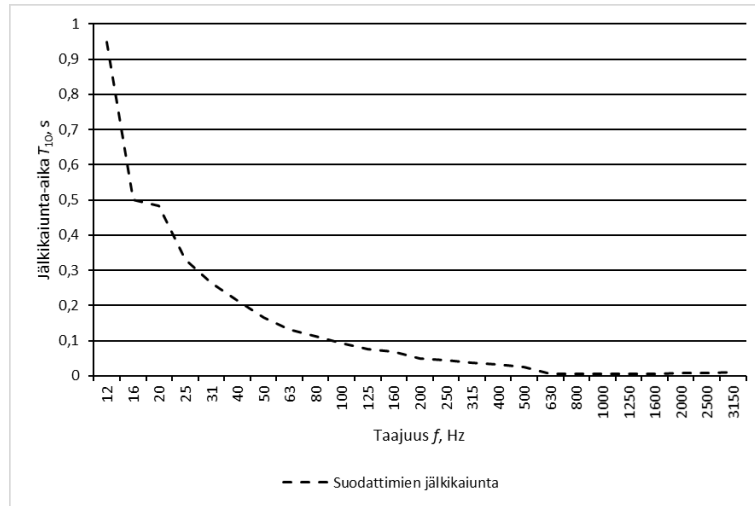
Tallennuksen aloitusta varten ohjelmoitiin käynnistin, joka aktivoitui 100 N voimasta iskukasualta. Tallennuksen pituus oli 30 sekuntia iskusta iskusarjoille ja 10 sekuntia iskusta yksittäisille iskuille.

Signaalinkäsittelyyn käytetty imc Famos on mittausjärjestelmän valmistajan kehittämä ohjelmisto, jolla voi käsitellä mittausjärjestelmän tuottamaa dataa. Tätä tutkimusta varten kehitettiin ohjelmiston laskentakielellä uusia ohjelmia, joista ensimmäinen laskee yhden mittauksen kiihtyvyytasoerotukset  $D_{a,ij}$  ja keskimääräiset kiihtyvyytaset  $L_{a,j}$  sekä tulostaa ne Excel-tiedostoon. Toinen ohjelma laskee rakenteelliset jälkikaiunta-ajat  $T_{s,j}$  ja tulostaa ne Excel-tiedostoon. Arvot laskettiin ISO 10848 mukaan.

Kiihtyvyytasoerotuksen laskentaa varten pinnoilla mitatut kiihtyvyydet tuodaan ohjelmaan. Ohjelma tehtiin käsittelemään enintään 16 kanavaa ja tuoduista kanavista puolet ovat pinnalta  $i$  ja toinen puoli pinnalta  $j$ . Kiihtyvyyssignaalit suodatettiin terssikaistoittain 12 – 3150 Hz ja laskenta tehtiin suodatetuilla kiihtyvyyssignaaleilla.

Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan laskentaa varten mitatut kiihtyvyydet tuodaan ohjelmaan samoin, kuin kiihtyvyytasoerotuksen laskentaa varten. Ennen suodatusta terssikaistoittain signaaleista tehdään käänteiset ja niihin lisätään signaalin pituuden verran nollia. Käänteisellä suodatuksella vältetään suodattimien nousuajasta johtuva viive.

Suodattimilla saatava pienin mahdollinen jälkikaiunta-aika laskettiin yksikköimpulssia vastaavalle signaalille. Nollasignaalin keskimäinen näyte muutettiin nollasta poikkeavaksi ja signaali käsiteltiin edellä kuvatulla ohjelmalla. Ohjelman laskemat jälkikaiunta-ajat yksikköimpulssille on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 13). Kuvassa näkyy, että suodattimen vaikutus kasvaa eksponentiaalisesti kohti pieniä taajuuksia, eikä lyhyen jälkikaiunta-ajan mittaaminen kyseisillä suodattimilla ole pienillä taajuuksilla mahdollista.

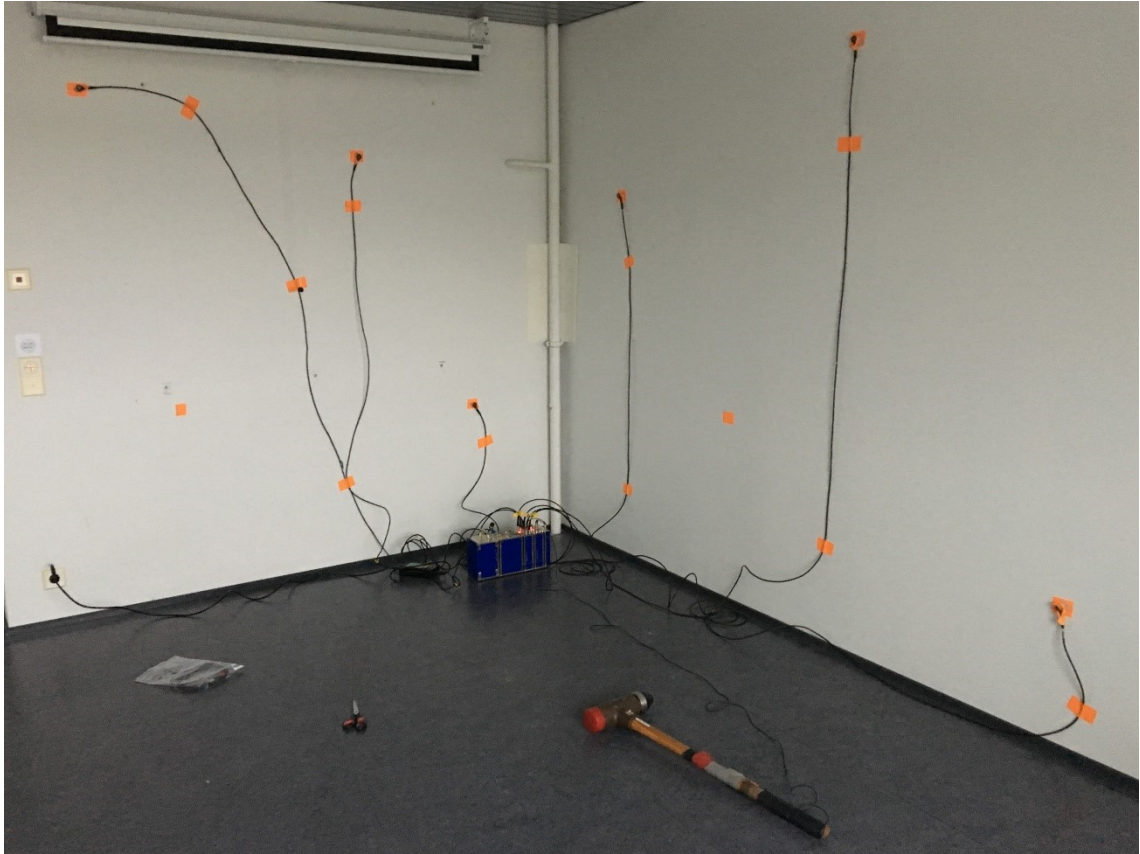


*Kuva 13. Suodattimien jälkikäiunta-aika.*

### 6.3 Koemittaus betonirakenteella

Betonirakenteisessa toimistorakennuksessa järjestettiin standardin ISO 10848 mukaisia koemittauksia. Koemittausten tavoitteena oli tuottaa dataa analyysimenetelmän kehittämiseksi ja testata mittausjärjestelyitä käytännössä. Koemittauksissa testattiin myös iskuvasaran kärkien vaikutusta herätesignaaliin ja kiihtyvyysanturien kiinnitystavan merkitystä.

Ensimmäinen menetelmän testaus tehtiin rakennuksen ulkovaipan kantavan seinän ja kantavan väliseinän T-liitoksella. Molemmat seinärakenteet ovat betonia ja arviolta 300 mm paksuja. Mittauksessa käytettiin yhteensä kuutta kiihtyvyysanturia ja kahta iskuvasaran pistettä. Kiihtyvyysanturit kiinnitettiin seinälle suojateipin päälle kemiallisella metallilla. Mittauksen tavoitteena oli mittausohjelman testaaminen ja datan tuottaminen laskennan kehitystä varten. Mittausjärjestely on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 14).



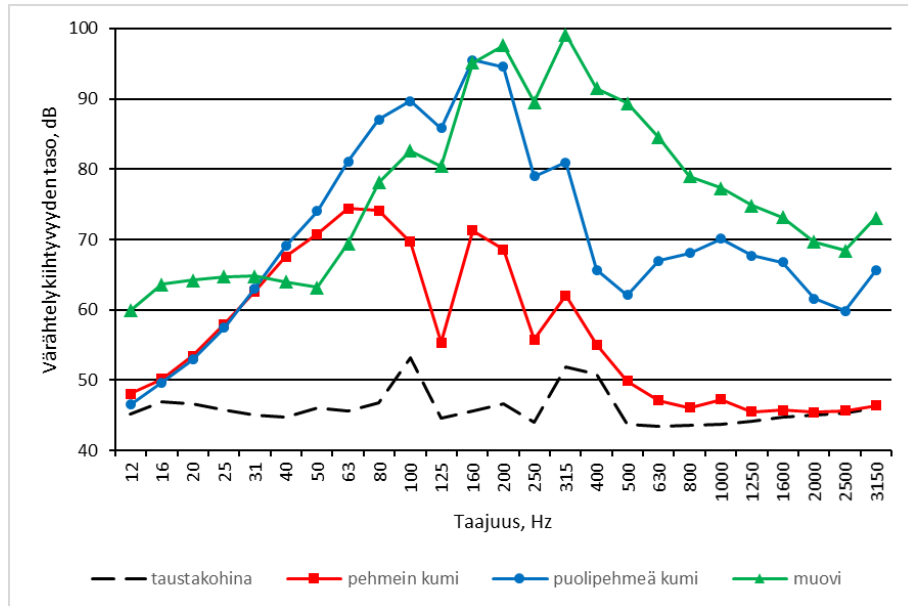
**Kuva 14.** Ensimmäisen koemittauksen mittausjärjestelyt.

Mittauksissa kumpaankin herätepisteeseen iskettiin vuorollaan 60 sekunnin ajan 1 – 2 Hz taajuudella. Kiihtyvyyssignaali tallennettiin 10 kHz näytteenottotaajuudella. Mitattua kiihtyvyyssignaalia käytettiin värähtelyn kiihtyvyystasoerotuksen  $D_{a,ij}$  laskennan kehittämiseen. Pinnoilla tehtiin myös rakenteellisen jälkikaiunta-ajan koemittauksia.

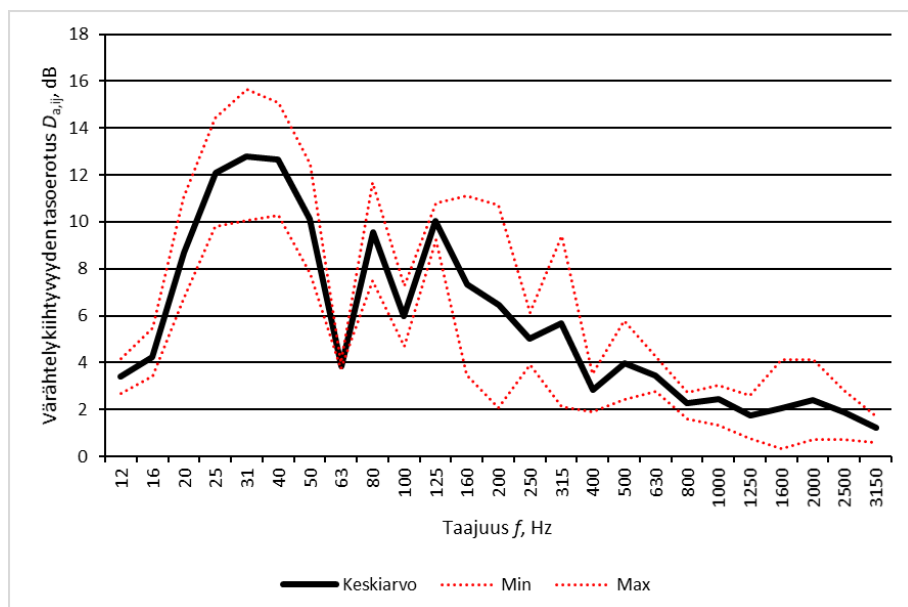
Alla olevassa kuvassa (Kuva 15) on esitetty iskuvasaran eri kärjillä saadut värähtelykiihtyvyyden tasot terssikaistoittain. Koemittaus tehtiin betonirakenteisella seinällä. Kuvassa näkyy, että kovemmallalla kärjellä saadaan laajakaistaisempi heräte.

Pehmeämmällä kumikärjellä lyöntivoima vaihteli välillä 1,3 – 2,3 kN. Kovemmallalla kumikärjellä lyöntivoima vaihteli välillä 3,5 – 3,7 kN. Muovikärjellä lyöntivoima vaihteli välillä 3,6 – 3,8 kN.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 16) on esitetty betonirakenteella tehdyn värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen mittaustulos. Mittauksessa saavutettiin standardin mukaan riittävä signaalikohinasuhde 25 Hz – 200 Hz terssikaistoilla. Mittauksen mukaan värähtelykiihtyvyyden tasoerotus on 4 – 13 dB betonirakenteen T-liitoksella.



**Kuva 15.** Iskuvasaran eri kärjillä saadut kiihtyvyyden tasot.



**Kuva 16.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus betoniseinällä, pehmeä kumikärki.

## 6.4 Koemittaus rankarakenteisella kipsilevyseinällä

Toinen koemittaus tehtiin ei-kantavien rankarakenteisten kipsilevyseinien nurkkaliitoksella. Mittauksissa käytettiin yhteensä kahta kiihtyvyyssanturia ja kahta iskuvasaran pistettä. Kiihtyvyyssanturit kiinnitettiin magneeteilla seinään teipattuun metallilevyyn. Mittausjärjestely on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 17).



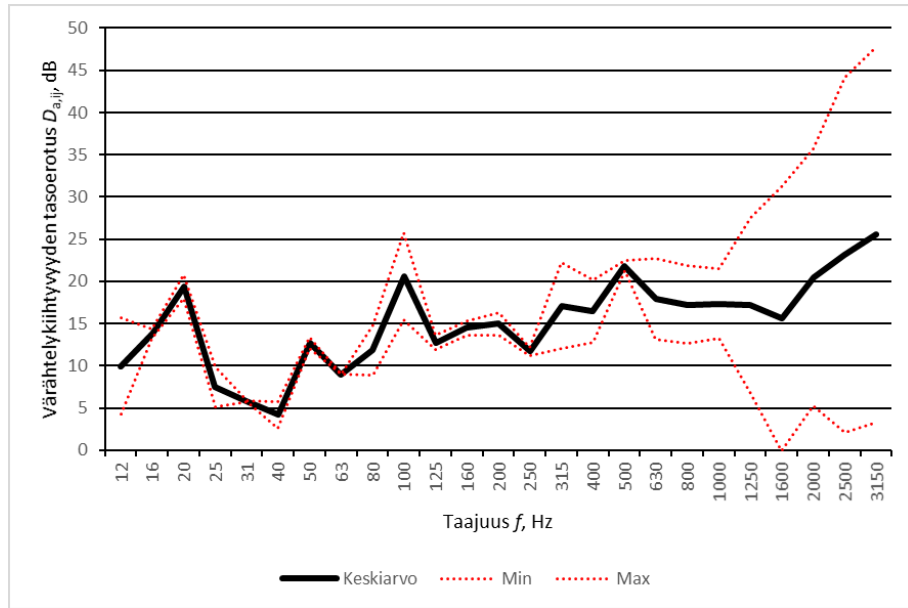


*Kuva 17. Toisen koemittauksen mittausjärjestelyt.*

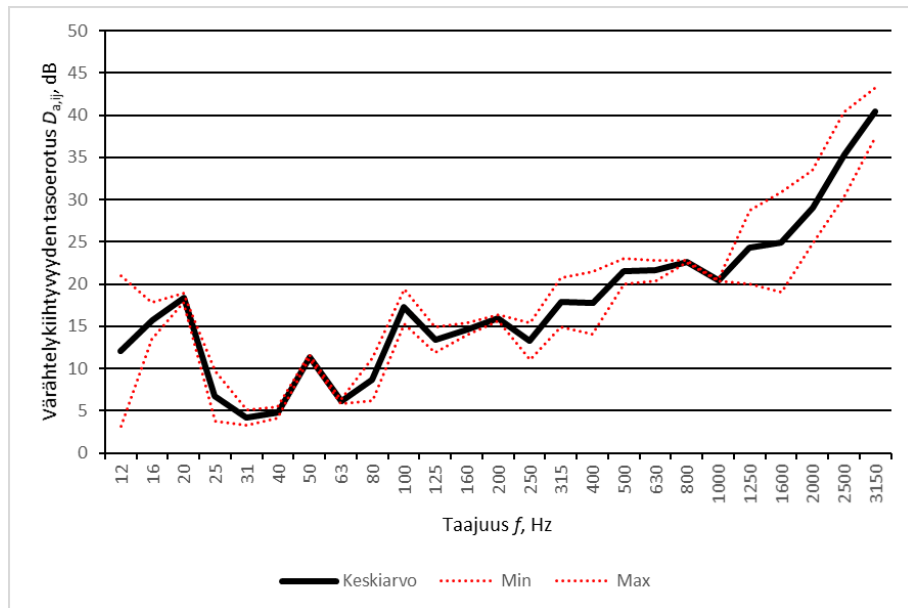
Mittauksissa kumpaankin herätepisteeseen iskettiin vuorollaan 60 sekunnin ajan 1 – 2 Hz taajuudella. Kiihtyvyyssignaali tallennettiin 10 kHz näytteenottotaajuudella. Mittauksessa testattiin iskuvasaran eri kärkityyppejä ja tavoitteena oli valita sopivin kärki varsinaista mittausta varten.

Alla olevissa kuvissa (Kuva 18 - Kuva 20) on esitetty värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen mittaustulokset kolmella eri iskuvasaran kärjellä. Kuviin on myös merkitty tasoerotuksen vaihteluväli, joka on pieni johtuen vähäisestä anturien ja herätepisteiden määrästä. Mittauksissa saavutettiin hyvä signaalikohinasuhde, joka oli enemmän kuin 10 dB kaikissa tapauksissa taajuuksilla 12 Hz – 2000 Hz. Mittausten mukaan värähtelykiihtyvyyden tasoerotus on 5 – 20 dB rankarakenteisen kipsilevyseinän L-liitoksella. Mittausten mukaan värähtelykiihtyvyyden tasoerotus kasvaa 2 – 3 dB oktaavilla 31 – 1600 Hz terssikaistoilla ja suuremmilla taajuuksilla kasvu on jyrkempää.

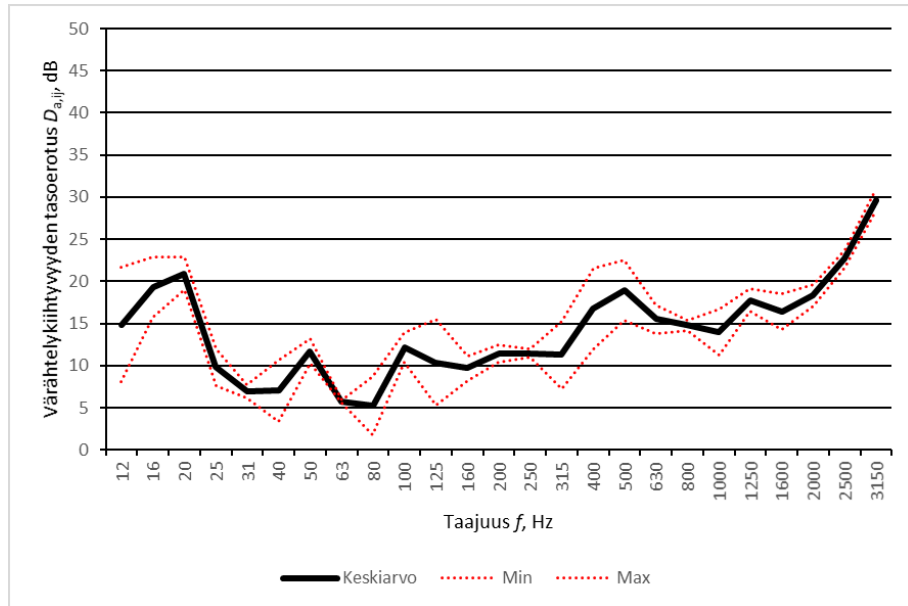




**Kuva 18.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus levyseinällä, pehmeä kumikärki.



**Kuva 19.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus levyseinällä, kovempi kumikärki.



*Kuva 20. Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus levyseinällä, kova muovikärki.*

## 6.5 Johtopäätökset koemittausten perusteella

Koemittauksilla testattiin liitoseristävyuden mittaus- ja analyysimenetelmää. Koemittauksissa saatiin selville, että kovempi iskuvasaran kärki on parempi kuin pehmeä laajakaistaisemman herätteen tuottamisessa. Pehmeällä kärjellä ei välttämättä saavuteta riittävää signaalikohinasuhdetta suurilla taajuuksilla.

Mitatut värähtelykiihtyvyyden tasoerotukset voivat vaihdella anturipisteparien välillä huomattavasti. Kun samalla anturipisteparilla ja herätepisteellä toistetaan mittauksia, vaihtelu on pienempää. Syitä vaihtelulle voivat olla erot signaalikohinasuhteessa, anturien etäisyys herätepisteeseen, anturien kiinnitystapa ja anturien sijainti mittauspinnalla. Ongelmia voidaan ehkäistä noudattamalla standardissa annettuja ohjeita ja käyttämällä riittävää määrää erilaisia anturi- ja herätepisteitä.

## 7. MITTAUKSET JA TULOKSET KOHTEESSA

### 7.1 Mittaukset kohderakennuksessa

Mittaukset CLT-tilaelementtien välillä tehtiin eräässä tilaelementtirakenteisessa kerrostalossa, jota esiteltiin kappaleessa 3. Mittaukset tehtiin päällekkäisissä tilaelementeissä A, B ja C (Kuva 5). Mittauksessa käytettiin tilaelementtien lyhyen sivun kantavaa päätyseinää sekä kattoa heräte- ja vastaanottopintoina. Alla on kuva (Kuva 21) mittausjärjestelyistä.



*Kuva 21. Mittausjärjestelyt kohteessa. Merkityt herätepisteet ja kiinnitettyjä antureita.*

Mittauksissa käytetyt tilat valittiin rakennuksessa aiemmin tehtyjen ilma- ja askelääneneristysmittausten perusteella. Toisella mittausvälillä oli saavutettu määräysten mukainen ilmaääneneristysluku, mutta toisella mittausvälillä oli määräyksiä heikompi ilmaääneneristys. Mittauksissa käytetyiksi pinnoiksi valittiin suurimmat yhtenäiset pinnat standardissa olevien anturi- ja herätepisteiden vähimmäisetäisyyksien vaatimusten vuoksi.

Mittausten tavoitteena on vertailla mittausmenetelmällä saatavia tuloksia kahden lähes samanlaisen mittausvälin kesken. Kiihtyvyytasoerotusmittauksilla on tarkoitus selvittää,

onko äänen sivutiesiirtymässä kerrosten välillä eroja. Koska ilmaääneneristävyydessä on 4 dB ero, on syytä olettaa liitoseristävyyksissä olevan myös eroja.

Mittauksissa käytettiin 4 herätepistettä ja 5 anturipistettä seinäpinoilla sekä 2 herätepistettä ja 3 anturipistettä kattopinnoilla. Seinäpinoilla kahta anturia oli siirrettävä kahden herätepisteen jälkeen, joten anturipisteitä oli yhteensä 7 kullakin seinäpinnalla. Anturipa-reja oli yhtä herätepistettä kohti kerrallaan yhteensä 25 seinäpinoilla ja 9 kattopinnoilla.

Anturit sijoitettiin pääsääntöisesti pintojen reuna-alueille ja herätepisteet keskemmälle. Standardissa annettujen minimietäisyysvaatimusten täyttämiseksi anturi- ja herätepisteiden sijoittelusta pinnoille tehtiin suunnitelmat etukäteen. Kiinnitysvaiheessa pisteiden sijainnit vaihtelivat suunnitelluista enintään 15 cm. Mittauksissa käytetyt pinnat on lueteltu alla olevassa taulukossa (Taulukko 6).

**Taulukko 6.** Mittauksissa käytetyt pinnat

Tilaelementti	Pinta	Pinnan numerointi
<b>A</b>	Tilaelementin katto	K2
	Tilaelementin päätyseinä	S2
<b>B</b>	Tilaelementin katto	K3
	Tilaelementin päätyseinä	S3
<b>C</b>	Tilaelementin päätyseinä	S4

Anturit kiinnitettiin seinille käyttäen seinään ruuvattuja naulauslevyjä ja antureihin kiinnitettyjä magneetteja. Ruuvit ulottuivat kipsilevykerroksen läpi puuhun asti. Kattoon anturit kiinnitettiin suoraan ruuvaamalla oksankohtiin jälkien minimoimiseksi. Herätepisteet merkittiin pintoihin teipillä, joka samalla suojasi pintoja hieman.

Mittauksissa käytettiin koemittausten perusteella valittua vasaran kärkeä. Vasaran kärjeksi valikoitui vaihtoehtoista laajakaistaisimman herätteen saavuttanut muovinen kärki. Mittauksissa herätepisteisiin iskettiin vuorollaan 60 sekunnin ajan 1 – 2 Hz taajuudella. Kiihtyvyyssanturien signaalit tallennettiin 10 kHz näytteenottotaajuudella tietokoneella käsittelyä varten.

Kiihtyvyyssignaalit analysoitiin tietokoneella ja niistä laskettiin tarvittavat arvot kappa-leessa 6.2 kuvatuilla ohjelmilla. Tulokset vietiin taulukkolaskentaohjelmaan analysoinnin jatkamista ja kuvaajien piirtämistä varten.

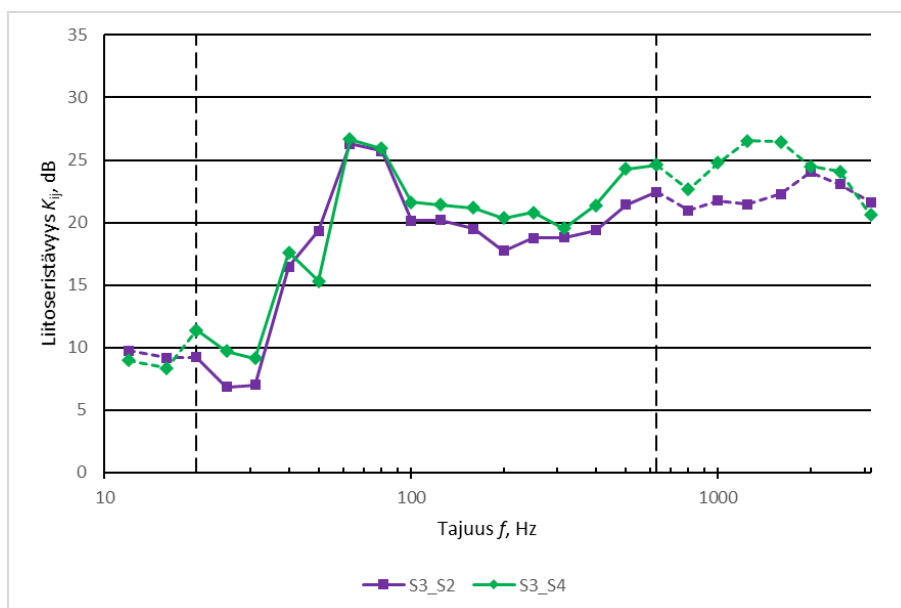
## 7.2 Liitoseristävyyden mittaustulokset kohteessa

Alla olevissa kuvissa (Kuva 22 - Kuva 25) on esitetty kohteessa tehtyjen liitoseristävyyden mittausten tuloksia. Kuviin on merkitty pystyyn katkoviivoilla taajuusalue, jolla saavutettiin standardin vaatima 10 dB signaali-kohinasuhde. Tämän taajuusalueen ulkopuoliset tulokset on piirretty katkoviivoilla.

Liitteessä B on esitetty mitatut värähtelykiihtyvyyden tasoerotukset  $D_{a,ij}$ . Värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksista on esitetty liitteen kuvissa yhteensä 8 mittauksen keskiarvo, minimi- ja maksimiarvot sekä liitoseristävyyden arvo. Kuvista voidaan nähdä, että värähtelykiihtyvyyden tasoerotus vaihtelee mittauksissa paljon.

Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan mittauksissa lyönnin voima vaihteli välillä 0,8 – 2,9 kN. Värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen mittauksissa lyöntivoima vaihteli välillä 0,4 – 2,2 kN. Yksittäisessä mittauksessa vaihteluväli oli enintään 1,2 kN. Voimakkaammilla iskuilla saatiin parempi signaalikohinasuhde.

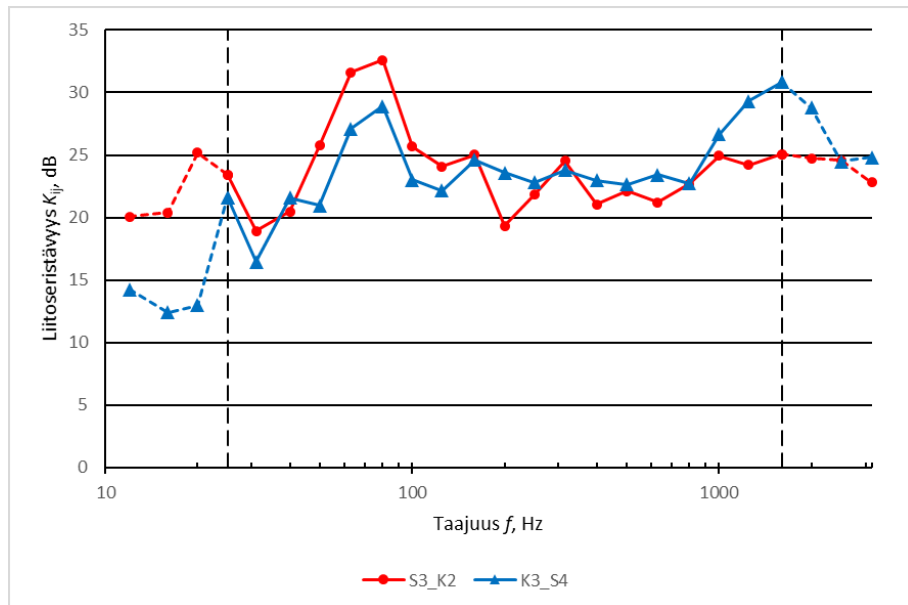
Alla olevassa kuvassa (Kuva 22) on esitetty tilaelementtien seinäpintojen välillä tehtyjen liitoseristävyyden mittausten tulokset. Kuvassa näkyy, että pintojen S3 ja S4 välillä on suurempi liitoseristävyys, kuin pintojen S3 ja S2 välillä.



**Kuva 22.** Seinä-seinä mittausten vertailu.

Standardin vaatima signaalikohinasuhde 10 dB saavutettiin pääsääntöisesti 20 Hz – 1600 Hz terssikaistoilla. Kaikissa tapauksissa signaalikohinasuhde oli riittävä 20 Hz – 500 Hz terssikaistoilla.

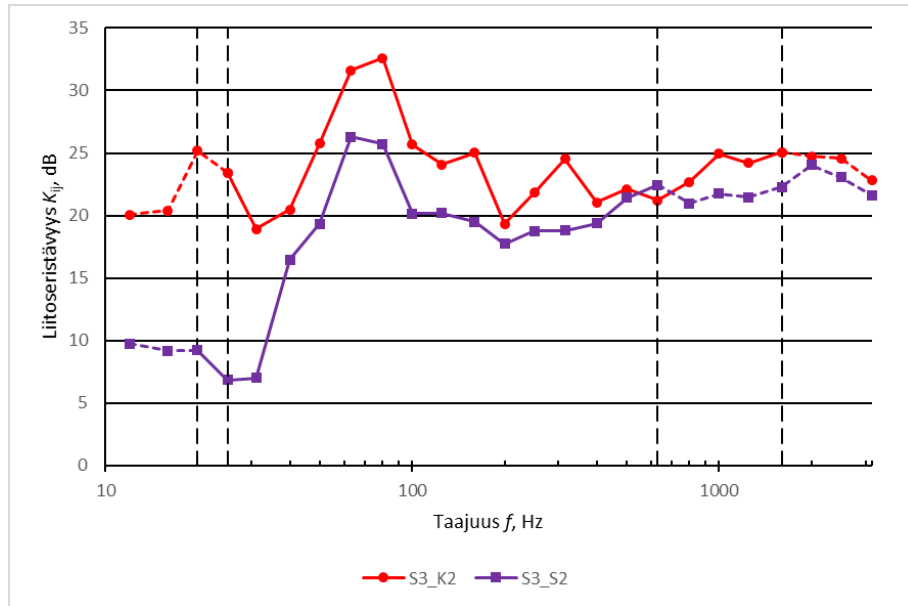
Alla olevassa kuvassa (Kuva 23) on esitetty tilaelementtien seinä- ja kattopintojen välillä tehtyjen liitoseristävyyden mittausten tulokset. Kuvassa näkyy, että pintojen K3 ja S4 välillä on suurempi liitoseristävyys, kuin pintojen S3 ja K2 välillä.



**Kuva 23.** Seinä-katto mittausten vertailu.

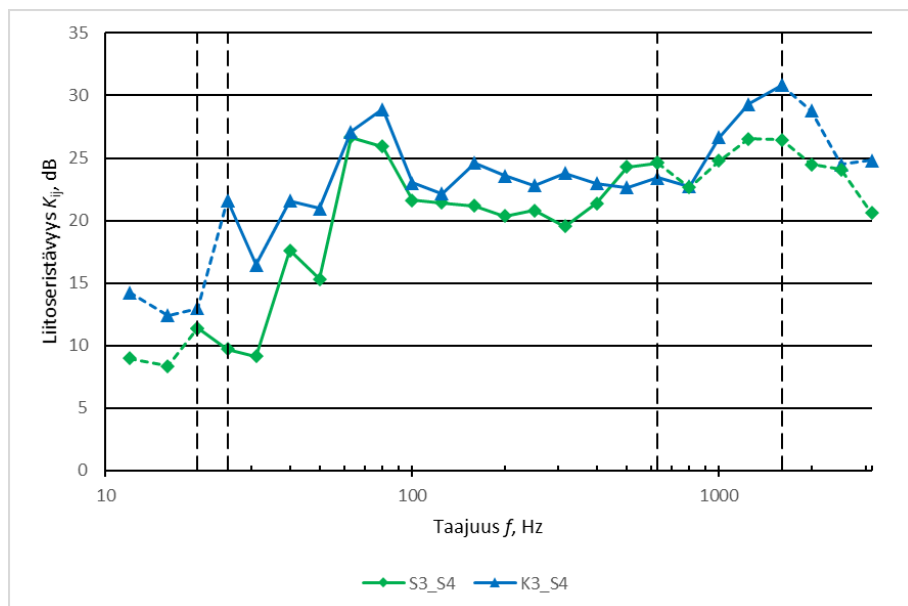
Standardin vaatima signaalikohinasuhde 10 dB saavutettiin pääsääntöisesti 25 Hz – 2000 Hz terssikaistoilla. Kaikissa tapauksissa signaalikohinasuhde oli riittävä 31,5 Hz – 1250 Hz terssikaistoilla.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 24) on esitetty tilaelementtien A ja B välisten liitoseristävyyden mittausten vertailu. Kuvassa näkyy, että katon K2 ja seinän S3 välillä on hieman suurempi liitoseristävyys, kuin seinän S3 ja seinän S2 välillä.



**Kuva 24.** Tilaelementtien A ja B välisten mittausten vertailu.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 25) on esitetty tilaelementtien B ja C välisten liitoseristävyyden mittausten vertailu. Kuvassa näkyy, että katon K3 ja seinän S4 välillä on hieman suurempi liitoseristävyys, kuin seinän S3 ja seinän S4 välillä.



**Kuva 25.** Tilaelementtien B ja C välisten mittausten vertailu.

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 7) on esitetty mittausten perusteella lasketut yksiluarvot  $\overline{K_{ij}}$ . Yksiluarvoista voidaan nähdä, että tilaelementtien A ja B välillä on noin 2 dB pienempi liitoseristävyys kuin tilaelementtien B ja C välillä. Seinä-seinä ja seinä-katto mittausten välillä erot ovat 1,4 dB ja 2,1 dB.

**Taulukko 7.** Mittausten perusteella lasketut yksilukuarvot liitoseristävyydelle.

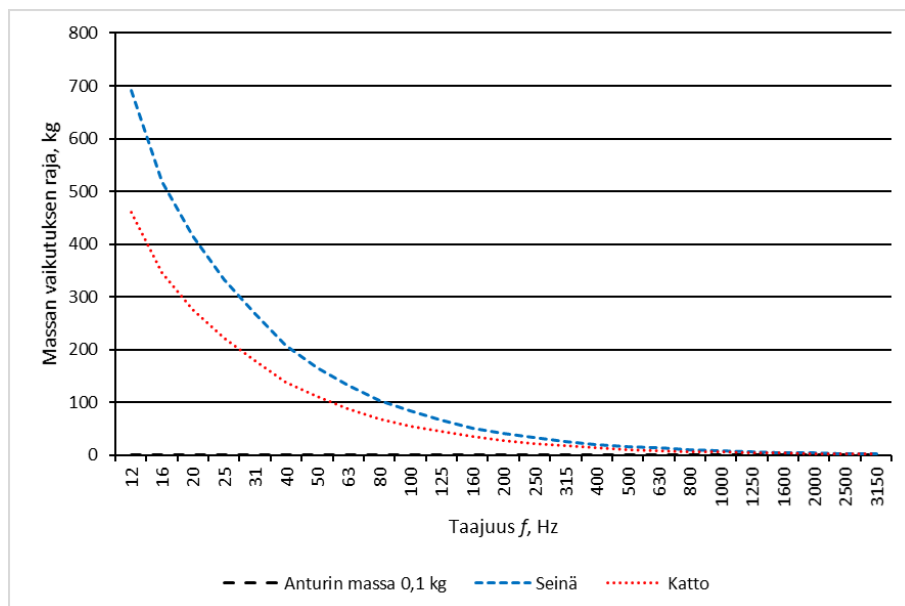
	$\overline{K_{ij}}$
S3_S2	20,3
S3_S4	22,8
S3_K2	22,4
K3_S4	24,2

Ero liitoseristävyyksissä  $K_{ij}$  tilaelementtien A ja B sekä B ja C välillä johtuu todennäköisesti pienistä eroista liitosten toteutuksessa. Työvirheen mahdollisuus ei kuitenkaan ole poissuljettu ja tilaelementtien A ja B välillä voi olla mekaaninen kytkentä. Tarkan kytkentäpaikan etsimiseksi voitaisiin tehdä uusi mittaus suuremmalla anturimäärällä liitoskohdan lähellä.

### 7.3 Mittausten reunaehtojen toteutumisen arviointi

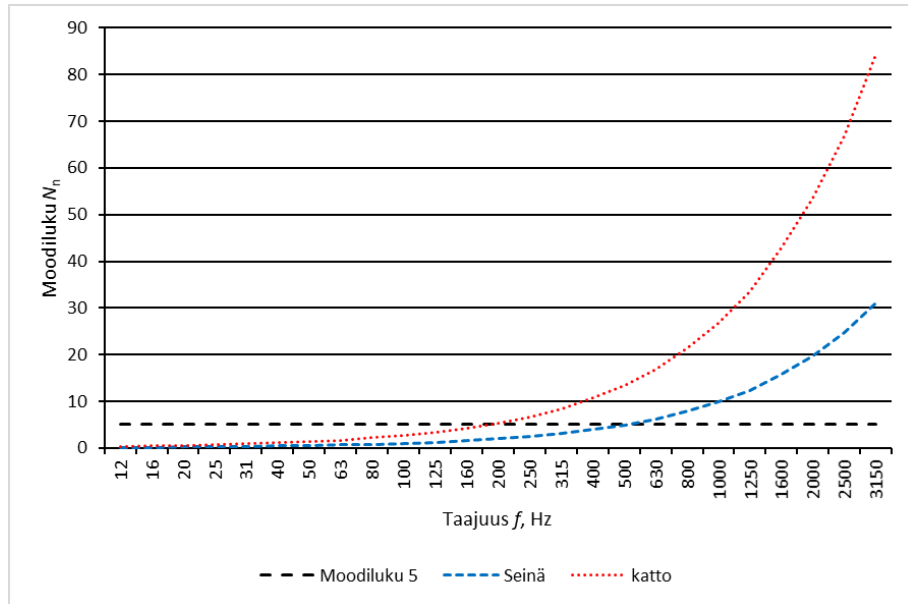
Alla olevissa kuvissa on esitetty anturien massan (Kuva 26), pintojen moodiluvun (Kuva 27) ja moodien limittymiskertoimen (Kuva 28) tarkastelu luvussa 5.2 esitettyihin kaavoihin perustuen. Laskennassa käytetyt lähtöarvot on esitetty luvussa 4.4 (Taulukko 1). Pintojen rakenteelliset jälkikäiunta-ajat on esitetty liitteessä A.

Anturin massa ei tarkastelun perusteella ole liian suuri (Kuva 26). Moodien limittymiskerros on yli 1 seinäpinnalla yli 315 Hz taajuuksilla ja kattopinnalla yli 125 Hz taajuuksilla (Kuva 28). Riittävä moodiluku saavutetaan seinäpinnalla 630 Hz terssikaistalla ja kattopinnalla 200 Hz terssikaistalla (Kuva 27). Pienemmillä taajuuksilla liitoseristävyys on todennäköisesti yliarvioitu.

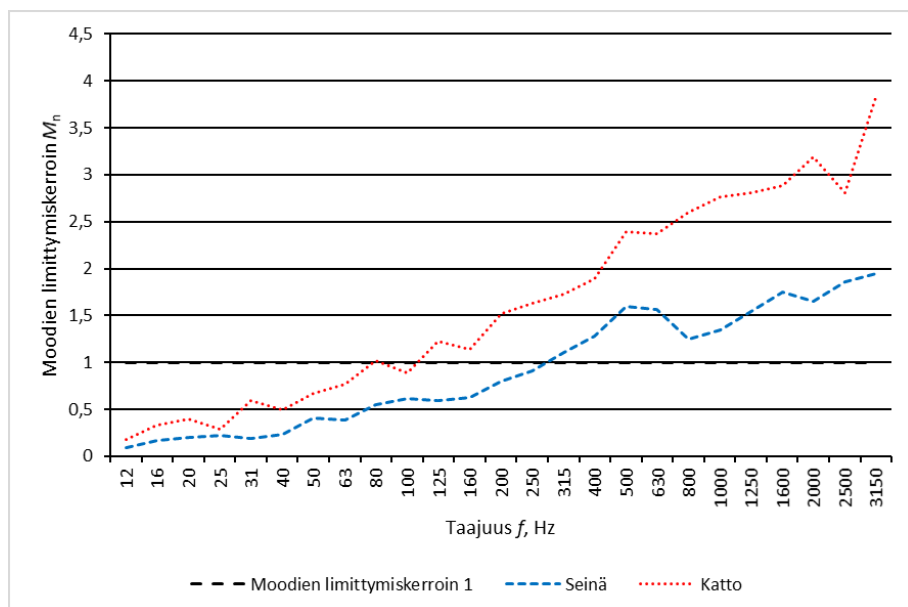


**Kuva 26.** Anturin massan vertailu massan vaikutuksen laskennalliseen raja-arvoon.





**Kuva 27.** Pintojen moodiluvun tarkastelu.



**Kuva 28.** Pintojen moodien liittymiskertoimen tarkastelu.

Mittaustuloksissa on paljon vaihtelua eri herätepisteillä anturipisteparien välillä. Liitteessä B esitettyjen värähtelykiihtyvyyden tasoerotusten vaihteluvälien pituudet terssi-kaistalla on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 8). Parhaimmillaan mittaustuloksen vaihtelu on ollut  $\pm 1$  dB, heikoimmillaan  $\pm 11$  dB ja keskimäärin  $\pm 5$  dB.

Koska herätteen voimakkuudessa oli eroja, osassa mittauksia suureen vaihteluväliin voi olla syynä pieni signaalikohinasuhde. Varsinkin kattopintaan tasaisen iskusarjan iskeminen iskuvasaralla on haastavaa ja osa iskuista on jäänyt liian heikoiksi. Kun liitoseristävyys on suuri, vaatii sen mittaaminen voimakkaan herätteen.

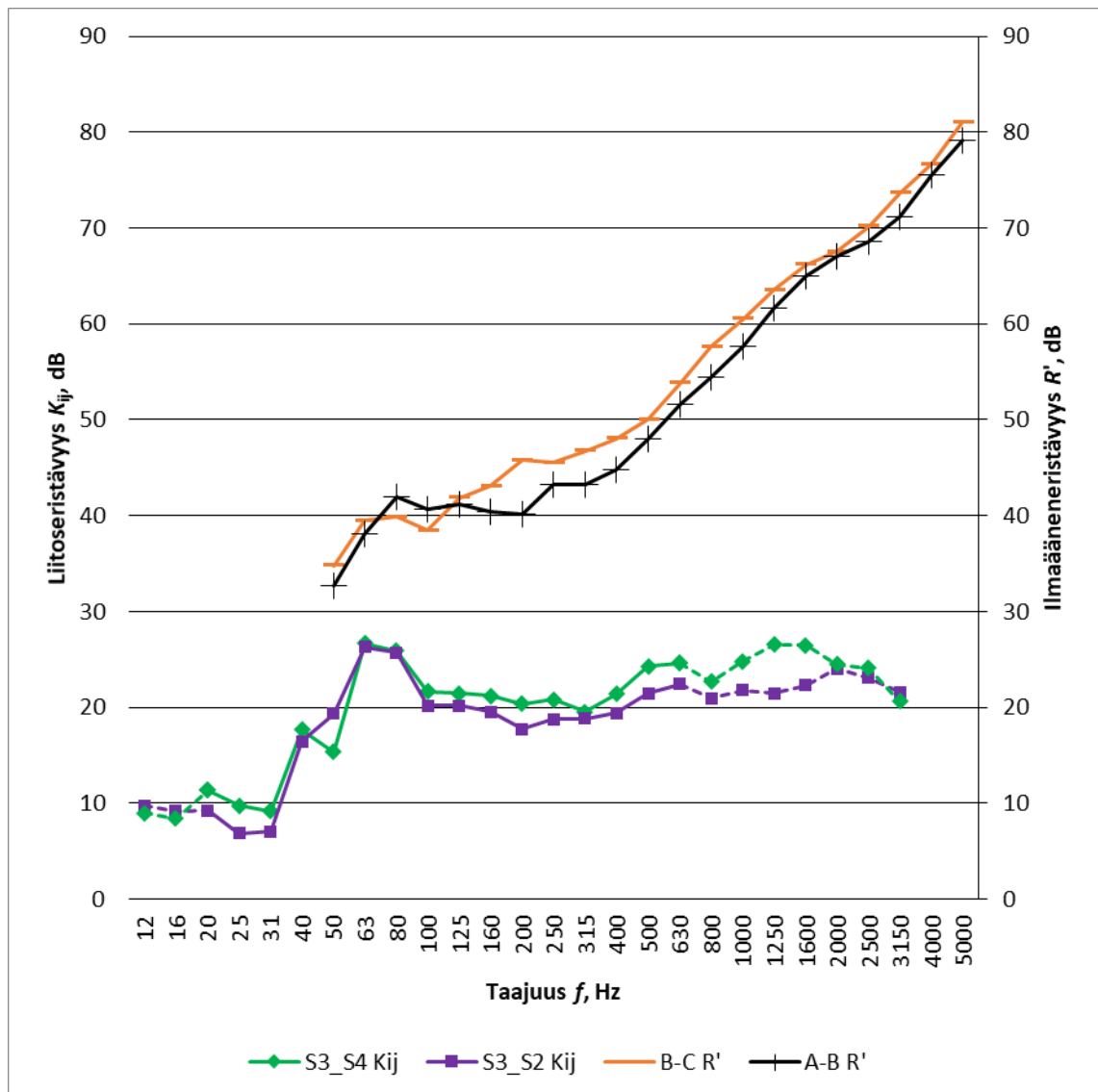
	<b>Pienin</b>	<b>Suurin</b>	<b>Kes- kiarvo</b>
<b>S3_S2</b>	2	11	7
<b>S3_K2</b>	2	23	12
<b>S3_S4</b>	2	13	8
<b>K3_S4</b>	6	18	12

***Taulukko 8.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen mittaustulosten vaihteluvälin pituus desibeleinä terssikaistoilla 25 – 1250 Hz.*

## 8. TULOsten TARKASTELU

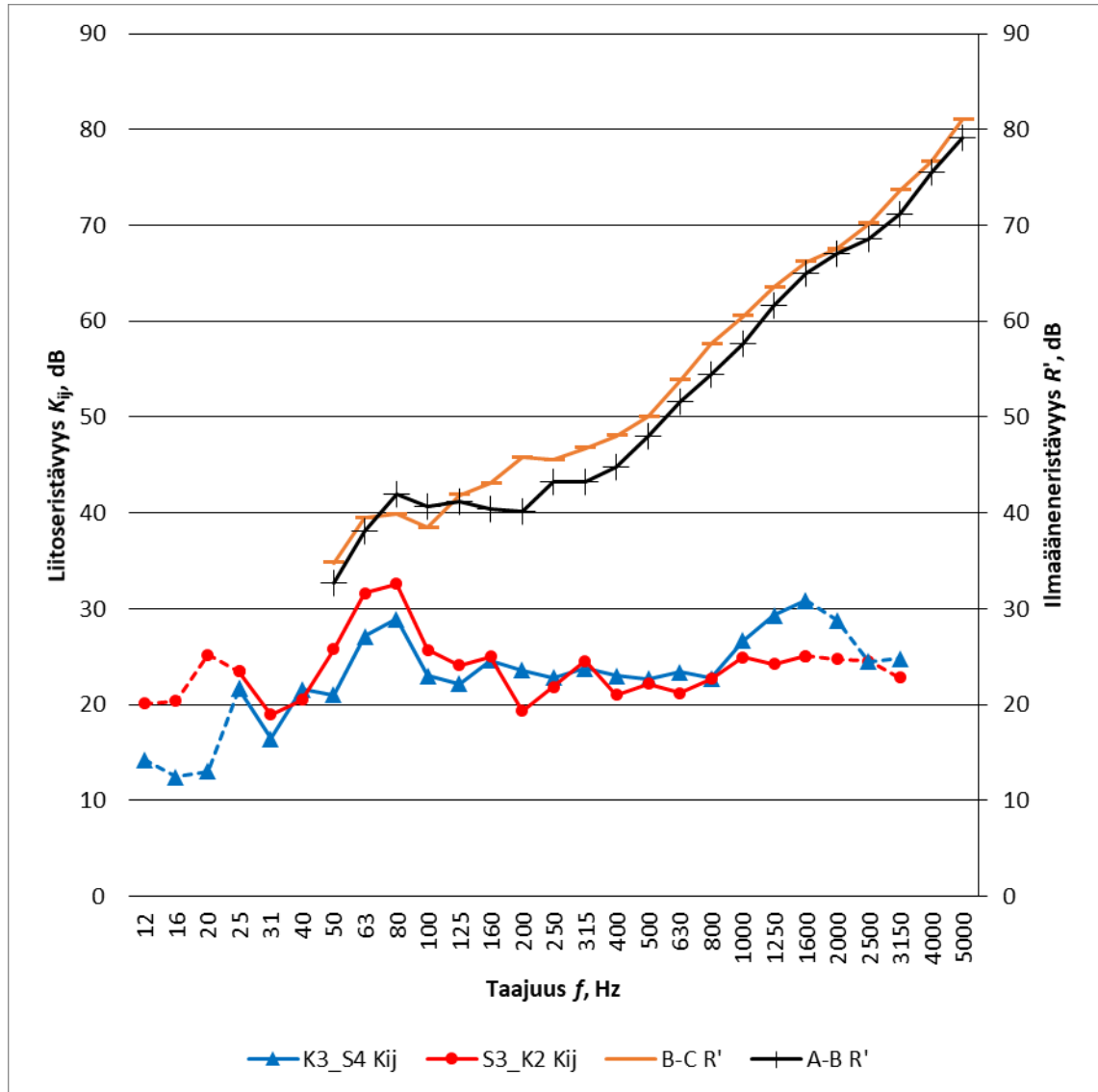
### 8.1 Tulosten vertailu

Alla olevassa kuvassa (Kuva 29) on esitetty seinä-seinä liitoseristävyyden mittausten tulosten vertailu ilmaääneneristävyyden tuloksiin. Liitoseristävyyden mittauksissa saatiin mitatun ilmaääneneristävyyden kanssa johdonmukaisia tuloksia. Tilaelementtien B ja C välillä on suurempi ilmaääneneristävyys ja liitoseristävyys, kuin tilaelementtien A ja B välillä yli 125 Hz terssikaistoilla.



*Kuva 29. Seinä-seinä liitoseristävyyden vertailu ilmaääneneristävyyteen.*

Alla olevassa kuvassa (Kuva 30) on esitetty seinä-katto liitoseristävyyden mittausten tulosten vertailu ilmaääneneristävyyden tuloksiin. Liitoseristävyyden mittaustulokset eivät ole ilmaääneneristävyyden kanssa yhtä johdonmukaisia, kuin edellä seinä-seinä tapauksessa.

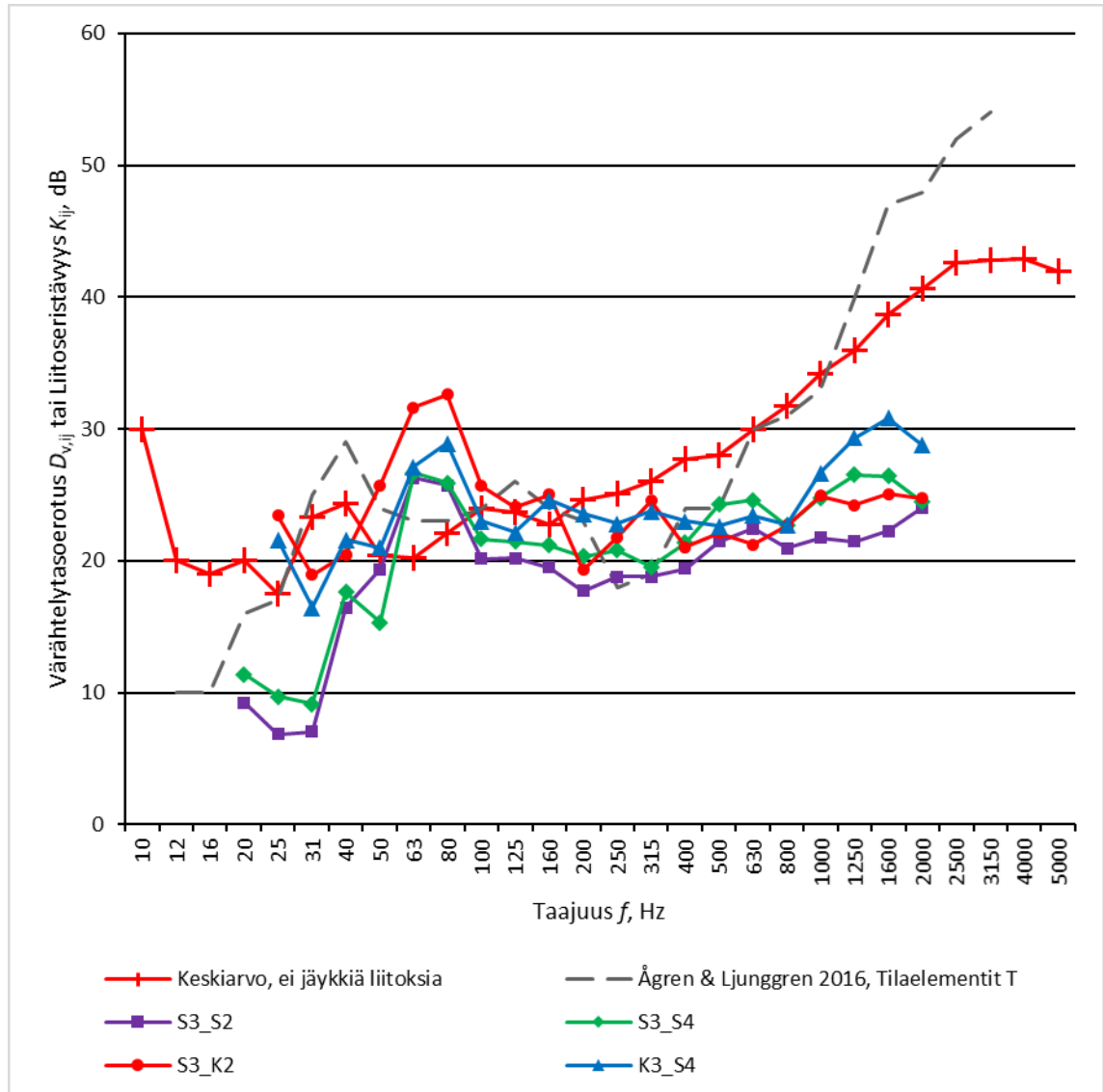


**Kuva 30.** Seinä-katto liitoseristävyyden vertailu ilmaääneneristävyyteen.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 31) on esitetty mitattujen liitoseristävyyksien vertailu kirjallisuudesta saatuihin liitoseristävyyden arvoihin. Pienillä ja keskitaajuuksilla mittaustulokset mukailevat Ågrenin & Ljunggrenin (2016) [19] mittauksen kuvaajaa, joka lähtee 630 Hz terssikaistalla jyrkkään kasvuun. Kuvassa on myös esitetty keskiarvo kirjallisuudesta saaduista liitoseristävyyden tai värähtelytaseroituksen arvoista.

Mitatut liitoseristävyydet eivät Ågrenin & Ljunggrenin mittauksen tavoin lähde jyrkkään kasvuun, vaan niiden arvot pysyvät tasaisina. Vain mittauksen K3\_S4 kuvaaja lähtee

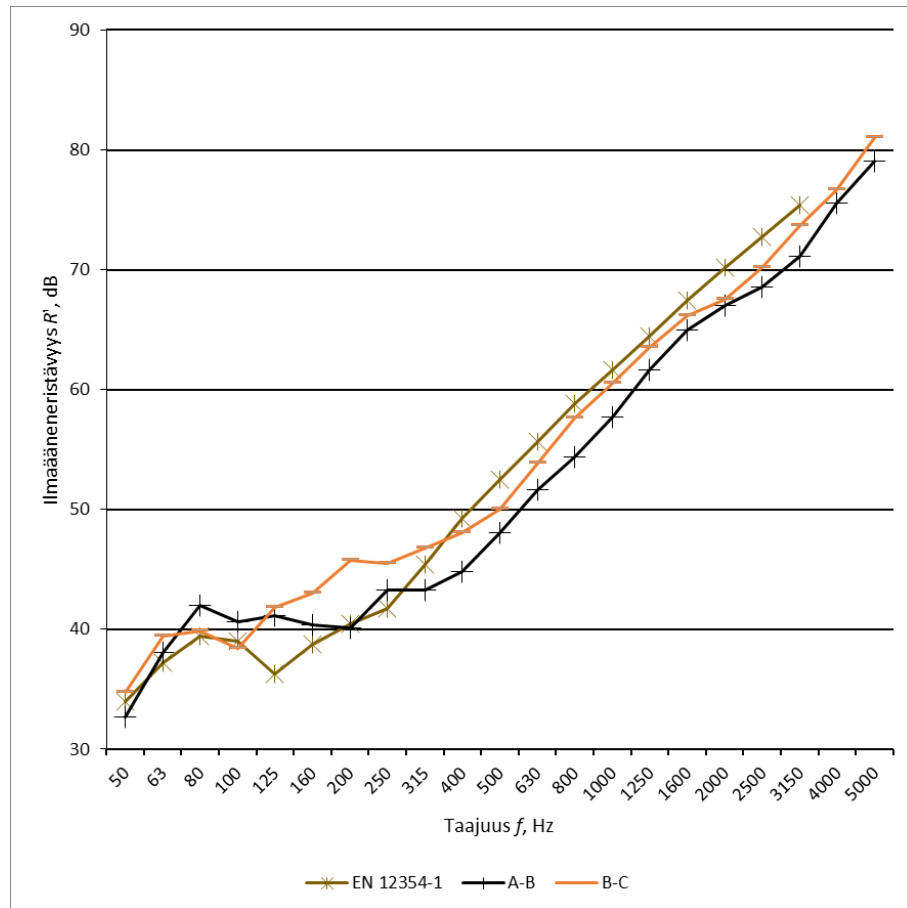
1000 Hz terssikaistalla selvästi kasvuun. Tämä johtuu todennäköisesti pienestä signaali-kohinasuhteesta yli 1250 Hz taajuuksilla. Alle 1250 Hz taajuuksilla se johtuu todennäköisesti tilaelementtien liitosten toteutuksesta.



**Kuva 31.** Mitattujen liitoseristävyyksien vertailu kirjallisuudesta saatuihin liitoseristävyyksiin [19].

Alla olevassa kuvassa (Kuva 32) on esitetty laskennallisen ilmasteneristävyyden vertailu mitattuun ilmasteneristävyyteen. Kuvaajasta näkyy, että laskennallinen ilmasteneristävyys on pienillä taajuuksilla pienempi ja suurilla taajuuksilla suurempi kuin mitattu. Laskennassa käytettiin liitoseristävyyden arvoa  $K_{ij} = 20$  dB.

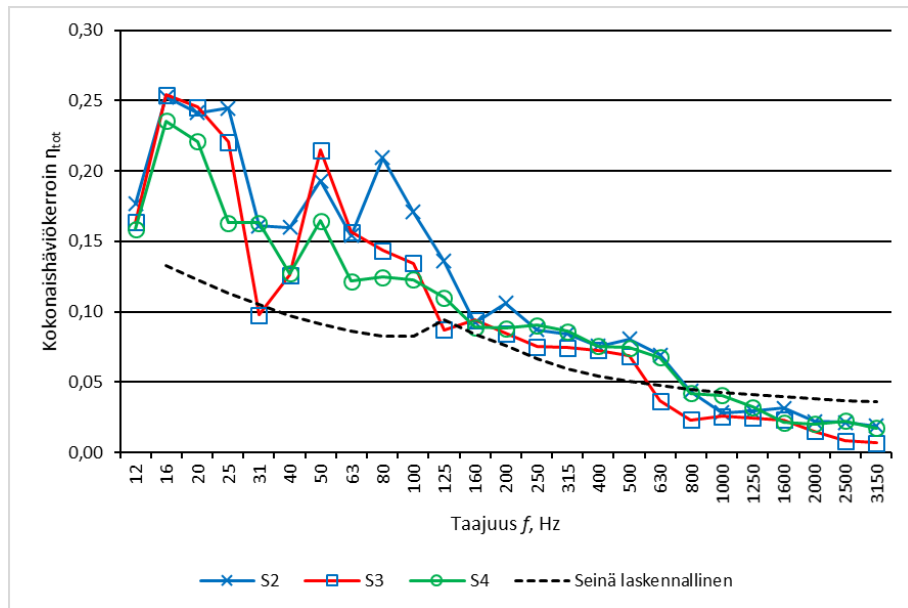
Ilmasteneristävyydellä on suuri mittausepävarmuus varsinkin pienillä taajuuksilla. Alle 200 Hz terssikaistoilla mittausepävarmuus on standardin ISO 12999-1 mukaan 2 dB tai enemmän [11]. Pienillä taajuuksilla ero laskennallisen ja mitatun ilmasteneristävyyden kanssa voi johtua mittausepävarmuudesta.



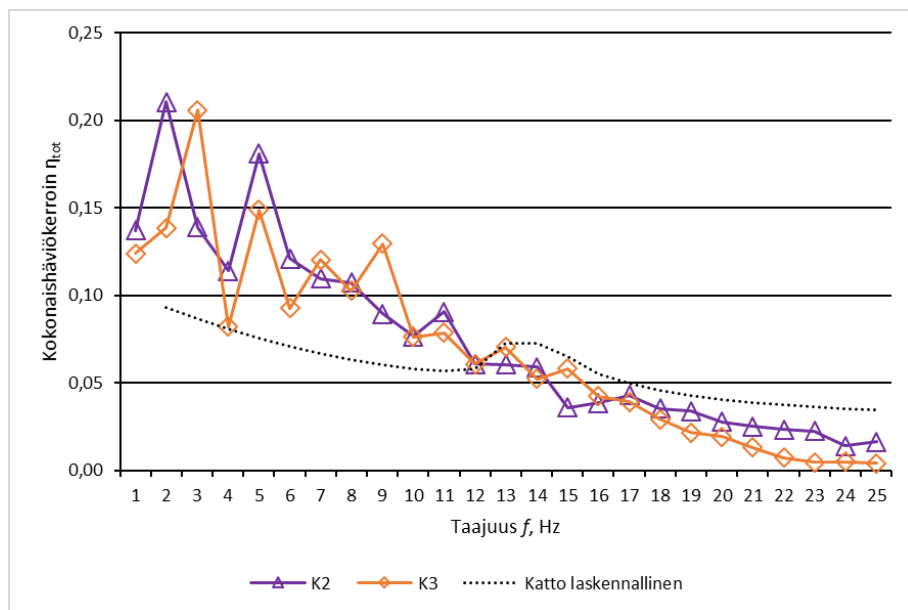
**Kuva 32.** Laskennallisen ilmaääneneristävyyden vertailu mitattuun ilmaääneneristävyyteen.

Alla olevissa kuvissa (Kuva 33 ja Kuva 34) on esitetty mitattujen kokonaishäviökerrointen vertailu laskennalliseen kokonaishäviökertoimeen EN 12354 mukaan [12]. Mitatut rakenteelliset jälkikaiunta-ajat on esitetty liitteessä A. Kuvissa näkyy, että laskennallinen häviökerroin on pienillä taajuuksilla pienempi ja suurilla taajuuksilla suurempi, kuin mitattu. Tähän vaikuttaa laskennassa käytetty yksilukuarvo sisäiselle häviökertoimelle, joka todellisuudessa on taajuusriippuvainen. Muuttamalla sisäinen häviökerroin laskennassa taajuusriippuvaiseksi voidaan korjata ilmaääneneristävyyden laskentatulosta.

Laskennassa käytettiin yksilukuarvoa liitoseristävyydelle. Liitoseristävyys on todellisuudessa taajuusriippuvainen ja sen arvolla on suuri merkitys laskentatulokseen. Käyttämällä laskennassa arvoa  $K_{ij} = 23$  dB arvon 20 dB sijaan muuttuu ilmaääneneristysluku arvosta 55 dB arvoon 57 dB. Tämän tutkimuksen mittausten ja Ågrenin & Ljunggrenin (2016) mittausten perusteella liitoseristävyyden arvo tilaelementtien välillä vaihtelee laajalla taajuusalueella melko vähän, joten yksilukuarvon käyttö laskennassa on perusteltua.



**Kuva 33.** Mitattujen kokonaishäviökerrointen vertailu seinäpinnoilla laskennalliseen kokonaishäviökertoimeen EN 12354 mukaan.



**Kuva 34.** Mitattujen kokonaishäviökerrointen vertailu kattopinnoilla laskennalliseen kokonaishäviökertoimeen EN 12354 mukaan.

## 8.2 Mittausmenetelmän käyttökelpoisuuden arviointi

Mittauksilla saatiin tuloksia, joista käy ilmi eroja kahden lähes samanlaisen liitoksen välillä. Tulosten perusteella vertailtiin kahta eri sivutiesiirtymäreittä tilaelementtien välillä. Liitoksen tarkempaa tarkastelua varten tarvittaisiin enemmän anturi- ja herätepisteitä.

Mitatuissa värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksissa on paljon vaihtelua. Jos liitoseristävyiden mittausepävarmuutena pidetään värähtelykiihtyvyyden tasoerotuksen keskimääräisen vaihteluvälin pituuden puolikasta eli 5 dB, mahtuvat kaikki tässä tutkimuksessa mitatut liitoseristävytydet mittausepävarmuuden rajoihin. Tämä tulkinta johtaisi siihen, että tässä tutkimuksessa tehtyjen mittausten välillä ei ole mittaasepävarmuuden puitteissa juurikaan eroja. Liitoseristävytyden mittaustulokset ovat kuitenkin johdonmukaisesti saman suuntaisia kuin ilmaääneneristysmittausten tulokset, joten tällainen tulkinta olisi liian tiukka. Todellinen mittaasepävarmuus on todennäköisesti pienempi kuin 5 dB.

Sellaisenaan mittausmenetelmä on aikaa vievä ja raskas. Yhden työpäivän (7,5 h) aikana voidaan ehtiä mitata 3-4 värähtelytasoerotusta kahden tilan välillä, jos vain antureita tarvitsee siirtää. Kaapeloinnin siirtäminen on huomattavasti työläämpää ja vaatii enemmän aikaa. Myös datan analysointi vaatii paljon aikaa analyysitavasta riippuen.

Laitteiston pystytykseen ja testaukseen ennen mittausten suorittamista kului aikaa 1 – 2 tuntia. Yhden standardin ISO 10848 mukaisen mittauksen suorittamiseen kului aikaa noin tunti. Samoin laitteiston purkuun kului aikaa hieman yli tunti. Mittausta voitaisiin nopeuttaa käyttämällä pintoihin kiinnitettävien anturien sijaan lasersädettä hyödyntävää mittausjärjestelmää, skannaavaa laser-vibrometriä. Lisäksi langattoman tekniikan hyödyntäminen voi nopeuttaa järjestelyitä.

Herätteen voima vaihteli mittausten välillä melko paljon. Iskujen voima pysyi melko tasaisena yksittäisessä mittauksessa, mutta mittausten välillä oli paljon vaihtelua. Voimakkaammilla iskuilla saatiin parempi signaalikohinasuhde suurilla taajuuksilla. Iskujen voiman tulisi olla 2 – 3 kN riittävän signaalikohinasuhteen saavuttamiseksi.

Sähködynaamista tärytintä käyttämällä voidaan saada tasaisempi heräte laajemmalla taajuusalueella, kuin iskuvasaralla. Tunnettua ja toistettavaa herätettä käytettäessä ei tarvitse mitata yhtä aikaa lähetys- ja vastaanottopinnoilla. Se voi myös mahdollistaa koko rakennusakustisissa mittauksissa tyypillisesti käytetyn taajuusalueen 100 – 3150 Hz [13] tarkastelun.

Mittausdatan käsittely on syytä automatisoida mahdollisimman pitkälle. Mitä enemmän mittauspisteitä saadaan käsiteltyä yhdellä laskentakierroksella, sitä nopeammin dataa saadaan analysoitua. Tämän tutkimuksen mittausten analysoinnissa dataa käsiteltiin vain yksi herätepiste kerrallaan, jolloin jokaisen mittauksen käsittely vaati monta laskentakierrosta. Datan analysointi olisi nopeutunut, jos yhdellä laskentakierroksella olisi käsitelty useampia mittauspisteitä. Ongelma on ratkaistavissa analyysiohjelmiston tarjoamalla keinoilla.

Mittauksilla laboratorio-olosuhteissa voitaisiin saada kansainvälisen tutkimustiedon kanssa vertailukelpoisempaa tietoa. Monet aikaisemmissa tutkimuksissa tehdyt mittaukset on tehty laboratorioissa. Laboratoriossa sivutiesiirtymäreittejä voidaan hallita paremmin ja värähtely voidaan rajata tutkittaviin rakenteisiin. Lisäksi laboratoriossa voitaisiin



helpommin tehdä muutoksia liitoksiin ja vertailla erilaisia ratkaisuja keskenään. Mittauksia tulisi myös tehdä useamman eri pinnan välillä sivutiesiirtymän kannalta olennaisimpien reittien selvittämiseksi.

## 9. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa selvitettiin äänen sivutiesiirtymää CLT-tilaelementtien välillä. Sivutiesiirtymää tarkasteltiin tutkimustiedon kautta, laskennallisesti ja mittauksella. Mittaustuloksia verrattiin tutkimustietoon ja laskennallisiin arvoihin.

Laskennallinen ilmasteneristävyyden on pienillä taajuuksilla vähemmän ja suurilla taajuuksilla enemmän kuin mitattu. Ero johtuu todennäköisesti laskennassa käytetystä yksiluarvosta sisäiselle häviökertoimelle, joka on todellisuudessa taajuusriippuvainen, sekä ilmasteneristävyyden mittausepävarmuudesta pienillä taajuuksilla. Myös liitoseristävyyden on taajuusriippuvainen ja sen arvolla on suuri vaikutus laskentatulokseen. Laskennallisen ilmasteneristävyyden kuvaaja kuitenkin mukaillee mitatun ilmasteneristävyyden kuvaajaa hyvin.

Mittausmenetelmällä saatiin tuloksia, joissa näkyi ero liitoseristävyydessä kahden lähes samanlaisen liitoksen välillä. Liitoseristävyyden mittauksissa saatiin mitatun ilmasteneristävyyden kanssa johdonmukaisia tuloksia. Mitattu liitoseristävyys on suurempi tilaelementtien B ja C välillä, kuin tilaelementtien A ja B välillä, samoin kuin ilmasteneristävyyden. Liitoksen tarkempaa tarkastelua varten tarvittaisiin enemmän anturi- ja herätepiteitä.

Moodiluvun ja moodien limittymiskertoimen tarkastelun perusteella pienillä taajuuksilla mitattu liitoseristävyys on todennäköisesti yliarvioitu. Suurilla taajuuksilla heräte ei ollut tarpeeksi voimakas riittävän signaalikohinasuhteen saavuttamiseksi. Liitoseristävyyden mittauksissa saavutettiin riittävä signaalikohinasuhde pääasiassa 25 Hz – 1250 Hz terssi-kaistoilla.

Mittausmenetelmä on sellaisenaan liian raskas sivutiesiirtymän arviointiin kenttämittauksilla. Mittauksia varten joudutaan kiinnittämään antureita pintoihin ja kytkemään ne kaikki kaapeleilla mittausjärjestelmään. Menetelmästä kannattaisi kehittää nopeampaa arviointia varten kevyempi vaihtoehto, jolla voisi yhden työpäivän aikana tutkia useampia sivutiesiirtymäreittejä.

Samankaltaiset mittaukset olisi hyvä tehdä kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa, jolloin ympäröivien rakenteiden vaikutus äänen sivutiesiirtymään olisi pienempi. Anturipisteiden määrää on myös syytä lisätä ja mahdollisuuksien mukaan mitata useammalla pinnalla samanaikaisesti. Mittauksilla voitaisiin selvittää, monenko liitoksen yli välittyi tilan keskiäänitason kannalta olennainen määrä värähtelyä ja mitkä liitokset ovat sivutiesiirtymän kannalta kaikkein tärkeimpiä.

## LÄHTEET

- [1] Luonnos ympäristöministeriön asetukseksi rakennuksen ääniympäristöstä, Luonnos 3.5.2017, 2017. Available: [http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Lausuntopyynnot\\_ja\\_lausuntoyhteenvedot/2017/Lausuntopyynto\\_luonnoksesta\\_ymparistomin\(42921\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Lausuntopyynnot_ja_lausuntoyhteenvedot/2017/Lausuntopyynto_luonnoksesta_ymparistomin(42921)).
- [2] ISO/DIS 10848-1, Acoustics. Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms. Part 1: Frame document, the International Organization for Standardization, Geneva, 2016.
- [3] ISO/DIS 10848-4, 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, the International Organization for Standardization, Geneva, 2016.
- [4] ISO/DIS 12354-1, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms, the International Organization for Standardization, Geneva, 2016.
- [5] ISO 16283-2, Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation, the International Organization for Standardization, Geneva, 2015.
- [6] ISO 16283-1, Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation, Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 2014.
- [7] Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje: Eurokoodi 5, Kolmas painos ed., Puuinfo OY, Helsinki, 2011.
- [8] Suomen rakentamismääräyskokoelma Osa E1, Rakennusten paloturvallisuus - määräykset ja ohjeet, 2011. Available: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus).
- [9] General Technical Report FPL-GTR-190, Wood handbook—Wood as an engineering material, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA, 2010.
- [10] ISO 10848-1, Acoustics. Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms. Part 1: Frame document, the International Organization for Standardization, Geneva, 2006.
- [11] ISO 12999-1, Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics - Part 1: Sound insulation, the International Organization for Standardization, Geneva, 2004.

- [12] SFS-EN 12354-1, Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms, European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
- [13] ISO 140-4, Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms, the International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
- [14] Suomen rakentamismääräyskokoelma Osa C1, Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa - Määräykset ja ohjeet, 1998. Available: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Meluntorjunta\\_ja\\_aaniolosuhteet](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Meluntorjunta_ja_aaniolosuhteet).
- [15] NT ACOU 090, Building Structures, Junctions: Transmission of Vibrations — Field Measurements, Nordtest, Espoo, 1994.
- [16] Elementtirakentamisen historia, Betoniteollisuus Ry, web page. Available (accessed 6.6.2017): <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>.
- [17] Puutieto, Puuinfo Oy, web page. Available (accessed 15.5.2017): <http://www.puuinfo.fi/puutieto>.
- [18] Valmistuneet puukerrostalot, Puuinfo Oy, web page. Available (accessed 8.3.2017): <http://www.puuinfo.fi/articles/valmistuneet-puukerrostalot>.
- [19] A. Ågren, F. Ljunggren, In situ measured flanking transmission in light weight timber houses with elastic flanking isolators - Part II, InterNoise 2016: 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, Hamburg, Germany, August 21-24, 2016, German Acoustical Society, Berlin, pp. 3772-3781.
- [20] L. Barbaresi, F. Morandi, M. Garai, A. Speranza, Experimental measurements of flanking transmission in CLT structures, Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, Argentina, September 5-9, 2016, Ibero-american Federation of Acoustics (FIA) and the Argentinian Acousticians Association (AdAA), Buenos Aires, pp. 10.
- [21] T. Bogensperger, M. Augustin, G. Schickhofer, Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane, Proceedings of the 44th meeting of W018 on Timber Structures, Alghero, Italy, August 28 - September 1, 2011, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Delft, pp. 15.
- [22] Å Bolmsvik, Evaluation of vibration distribution from a full scale measurement in an eight storey wooden house, Proceedings of ISMA2008, September 15-17, 2008, The Noise and Vibration Research Group, Leuven, pp. 593-607.
- [23] C. Crispin, L. De Geetere, B. Ingelaere, Extensions of EN 12354 vibration reduction index expressions by means of FEM calculations, Proceedings of 43rd International

Congress on Noise Control Engineering, Melbourne, November 16-19, 2014, Australian Acoustical Society, Toowong DC QLD, pp. 10.

[24] C. Crispin, B. Ingelaere, M. Van Damme, D. Wuyts, The Vibration Reduction Index Kij: Laboratory Measurements for Rigid Junctions and for Junctions with Flexible Interlayers, *Building Acoustics*, Vol. 13, Iss. 2, 2006, pp. 99-112.

[25] F. Dolezal, Unterdrückung der Schall-Längsleitung im Massivholzbau, Referate Internationale Holzbau-Forum 2009, Garmisch-Partenkirchen, Germany, December 2-4, 2009, Forum Holzbau, Biel, pp. 16.

[26] F. Dolezal, T. Bednar, M. Teibinger, Flankenübertragung bei Massivholzkonstruktionen - Teil 2: Einfluss von Befestigungsmitteln auf die Verbesserung durch den Einbau elastischer Zwischenschichten, *Bauphysik*, Vol. 30, Iss. 5, 2008, pp. 314-319.

[27] F. Dolezal, T. Bednar, M. Teibinger, Flankenübertragung bei Massivholzkonstruktionen – Teil 1: Verbesserung der Flankendämmung durch Einbau elastischer Zwischenschichten und Verifizierung der Anwendbarkeit von EN 12354, *Bauphysik*, Vol. 30, Iss. 3, 2008, pp. 143-151.

[28] S. Gagnon, C. Pirvu, CLT handbook: cross laminated timber, FPInnovations, Quebec, 2011, 626 p.

[29] A. Homb, J.A. Austnes, Experiences with sound insulation for cross-laminated timber floors, Proceedings of BNAM2010, Bergen, May 10-12, 2010, Nordic Acoustics Association, Bergen, pp. 7.

[30] V. Hongisto, Meluntorjunta, Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, Espoo, 2015, 213 p.

[31] C. Hopkins, Sound insulation, First edition ed. Elsevier Ltd., Oxford, 2007, 622 p.

[32] J. Jantunen Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta lausunolle, Ympäristöministeriö, web page. Available (accessed 8.3.2017): [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Maankayton\\_ja\\_rakentamisen\\_valmisteilla\\_oleva\\_lainsaadanto/Ymparistoministerion\\_asetus\\_rakennusten\\_\(41415\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Maankayton_ja_rakentamisen_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Ymparistoministerion_asetus_rakennusten_(41415)).

[33] J. Jantunen Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta - perustelumuistio, Ympäristöministeriö, web page. Available (accessed 8.3.2017): Helsinki, [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus).

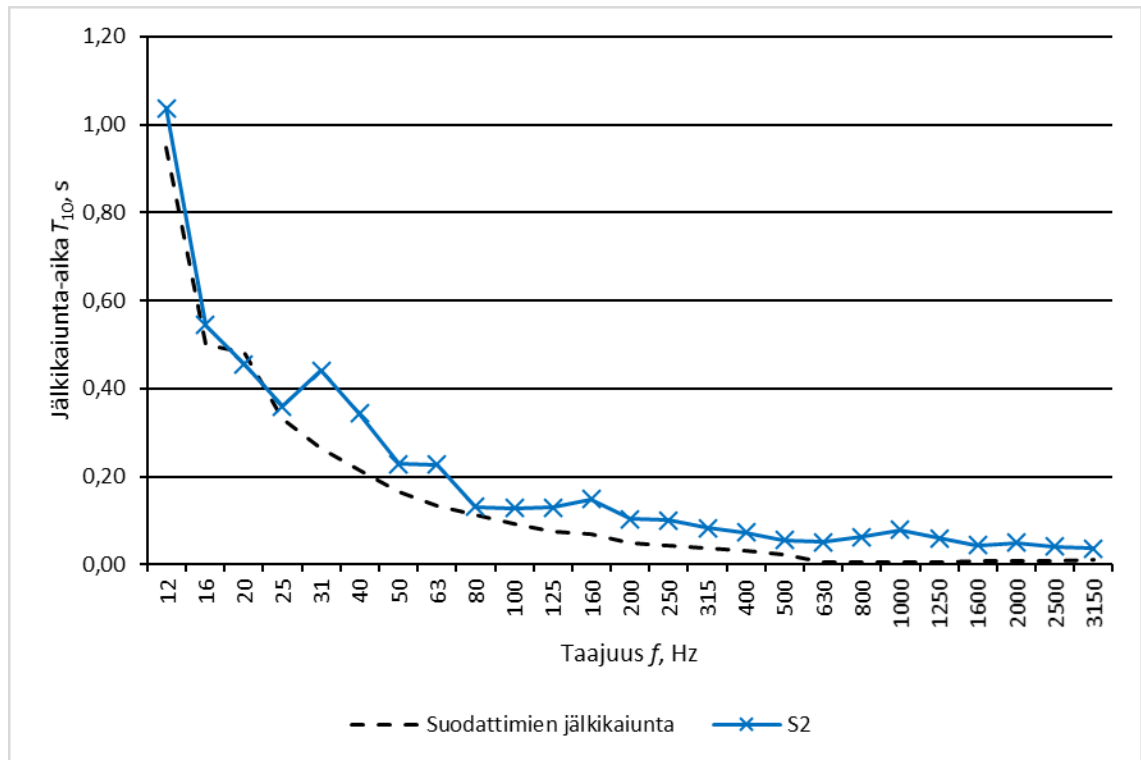
[34] M. Kylliäinen, Talonrakentamisen akustiikka, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, Tampere, 2006, 205 p.

[35] F. Ljunggren, Using elastic layers to improve sound insulation in volume based multi-storey lightweight buildings, 38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2009: INTER-NOISE 2009, Ottawa, Canada, August 23 - 26, 2009, Red Hook, NY: Curran Associates, Inc., New York, pp. 252-257.

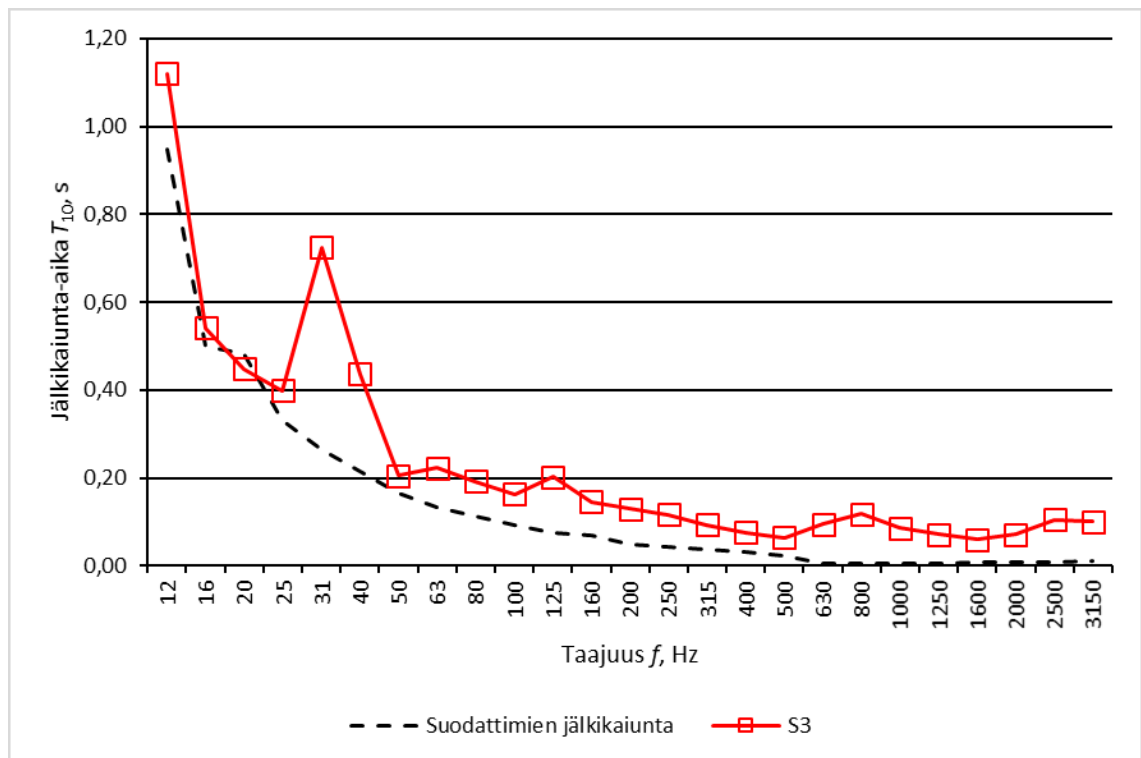
- [36] F. Ljunggren, A. Ågren, Potential solutions to improved sound performance of volume based lightweight multi-storey timber buildings, *Applied Acoustics*, Vol. 72, Iss. 4, 2011, pp. 231-240.
- [37] S. Ljunggren, Airborne sound insulation of thick walls, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, Iss. 5, 1991, pp. 2338-2345.
- [38] R. Öqvist, Variations in sound insulation in lightweight timber constructions, Luleå University of Technology, Department of Human Work Sciences, Division of Sound and Vibration, Luleå, 2010, 76 p. Available: <http://tu.diva-portal.org/smash/rec-ord.jsf?pid=diva2%3A999608&dswid=4995>.
- [39] M. Pérez, M. Fuente, Acoustic design through predictive methods in Cross Laminated Timber (CLT) panel structures for buildings, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013 (INTER-NOISE 2013): Noise Control for Quality of Life, Innsbruck, Austria, September 15–18, 2013, Austrian Noise Abatement Association, Vienna, pp. 5539-5547.
- [40] A. Santoni, P. Bonfiglio, P. Fausti, S. Schoenwald, H.-M. Tröbs, Sound radiation efficiency measurements on cross-laminated timber plates, *InterNoise 2016: 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future*, Hamburg, Germany, August 21-24, 2016, German Acoustical Society, Berlin, pp. 3697-3707.
- [41] G. Schickhofer, R. Brandner, H. Bauer, Introduction to CLT, Product Properties, Strength Classes, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings, Stockholm, Sweden, March 10-11, 2016, KTH Royal Institute of Technology, Division of Building Materials, Stockholm, pp. 22.
- [42] S. Schoenwald, B. Zeitler, I. Sabourin, F. King, Sound insulation performance of cross laminated timber building systems, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013 (INTER-NOISE 2013): Noise Control for Quality of Life, Innsbruck, Austria, September 15–18, 2013, Austrian Noise Abatement Association, Vienna, pp. 10.
- [43] A. Sjöström, J. Negreira, D. Bard, G. Sandberg, C. Novak, H. Ule, Flanking transmission in three different lightweight wooden building types, Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, *InterNoise 2014*, Melbourne, November 16-19, 2014, The Australian Acoustical Society, Toowong DC QLD, pp. 6.
- [44] A. Speranza, L. Barbaresi, F. Morandi, Experimental analysis of flanking transmission of different connection systems for CLT panels, *WCTE 2016 e-book*, Vienna, August 22-25, 2016, TU Verlag, Vienna, pp. 2872-2879.
- [45] R. Steiger, A. Gülzow, C. Czaderski, M. Howald, P. Niemz, Comparison of bending stiffness of cross-laminated solid timber derived by modal analysis of full panels and by bending tests of strip-shaped specimens, *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 70, Iss. 1, 2012, pp. 141-153.

- [46] M. Teibinger, Bauphysikalische Eigenschaften von Brettsper Holz, Der 3. Europäische Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz Referate EBH2010, Köln, June 9-10, 2010, Forum Holzbau, Biel, pp. 12.
- [47] B. Van Damme, S. Schoenwald, M.A. Blanco, A. Zemp, Limitations to the use of homogenized material parameters of cross laminated timber plates for vibration and sound transmission modelling, Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration 2015 (ICSV 22), Florence, July 12-16, 2015, International Institute of Acoustics & Vibration, Auburn, pp. 3017-3022.
- [48] T.E. Vigran, Building Acoustics, Taylor & Francis, London, 2008, 362 p.
- [49] B.W. Zeitler, J.D. Quirt, C. Hoeller, J. Mahn, S. Schoenwald, I. Sabourin, Guide to calculating airborne sound transmission in buildings, NRC Publications Archive RR-331, National Research Council Canada, Ottawa, Research Report (National Research Council Canada. Construction) 2016, 137 p. Available: <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=shwart&index=an&req=21277599&lang=en>.

## LIITE A: RAKENTEELLISET JÄLKIKAIUNTA-AJAT

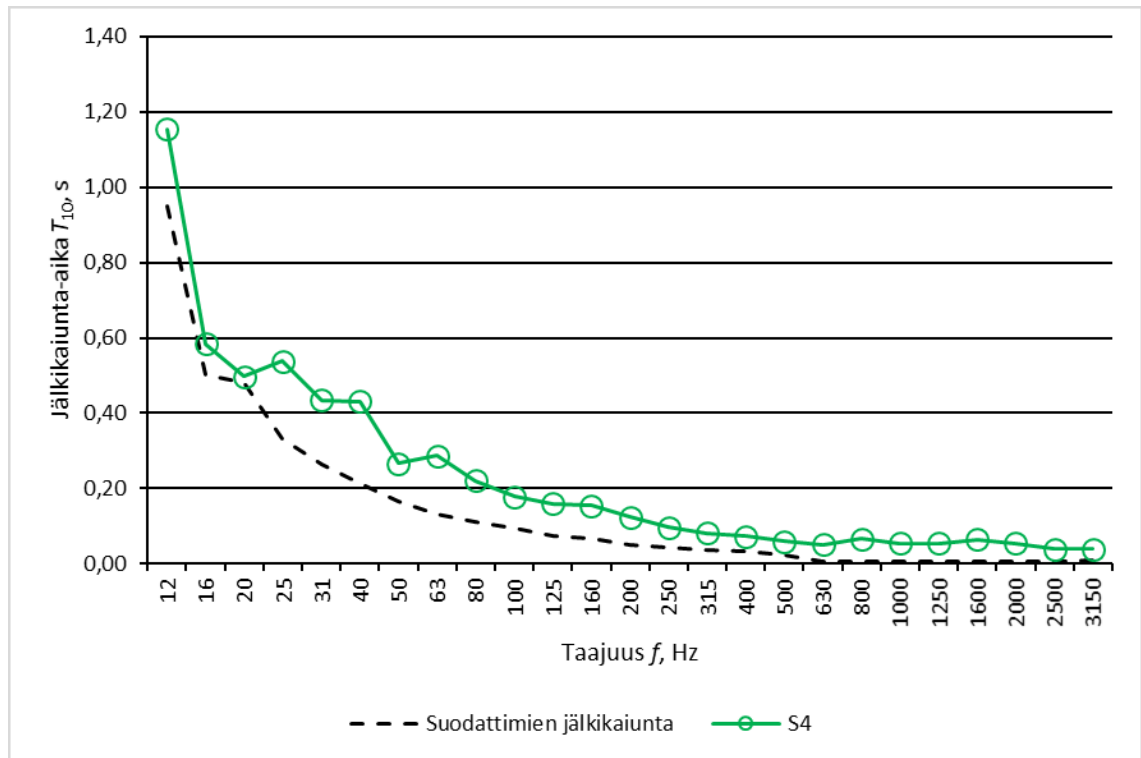


*Kuva A1. Rakenteellinen jälkikaiunta-aika pinnalla S2.*

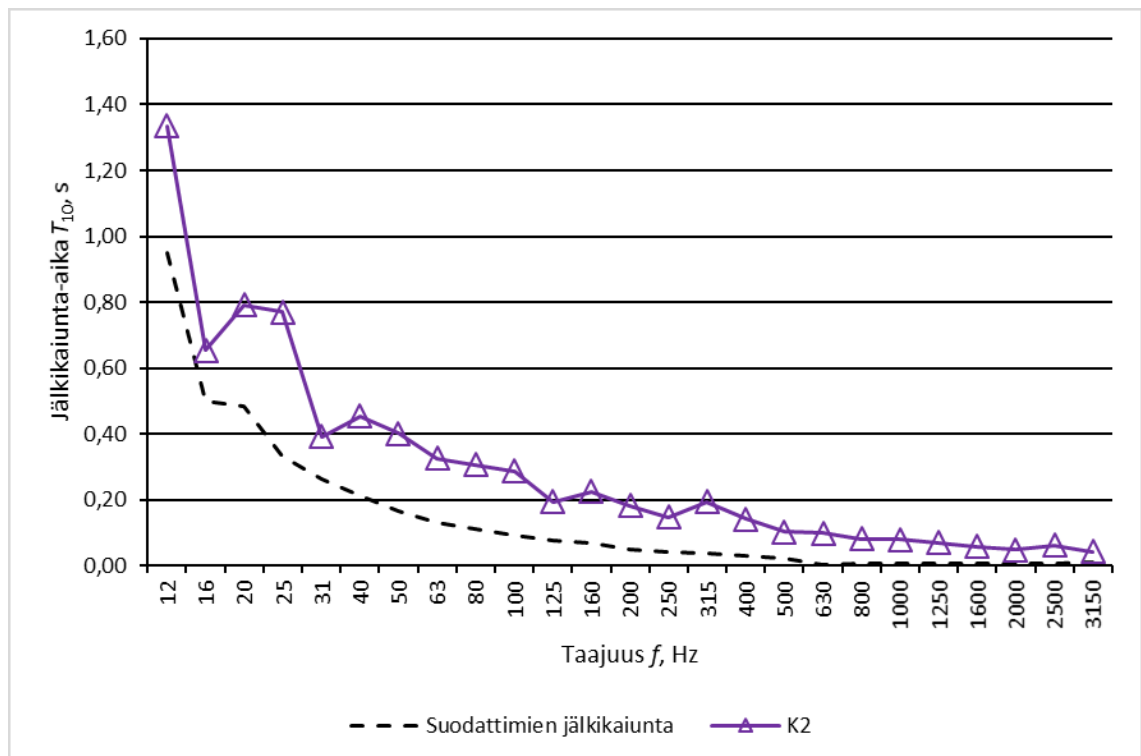


*Kuva A2. Rakenteellinen jälkikaiunta-aika pinnalla S3.*

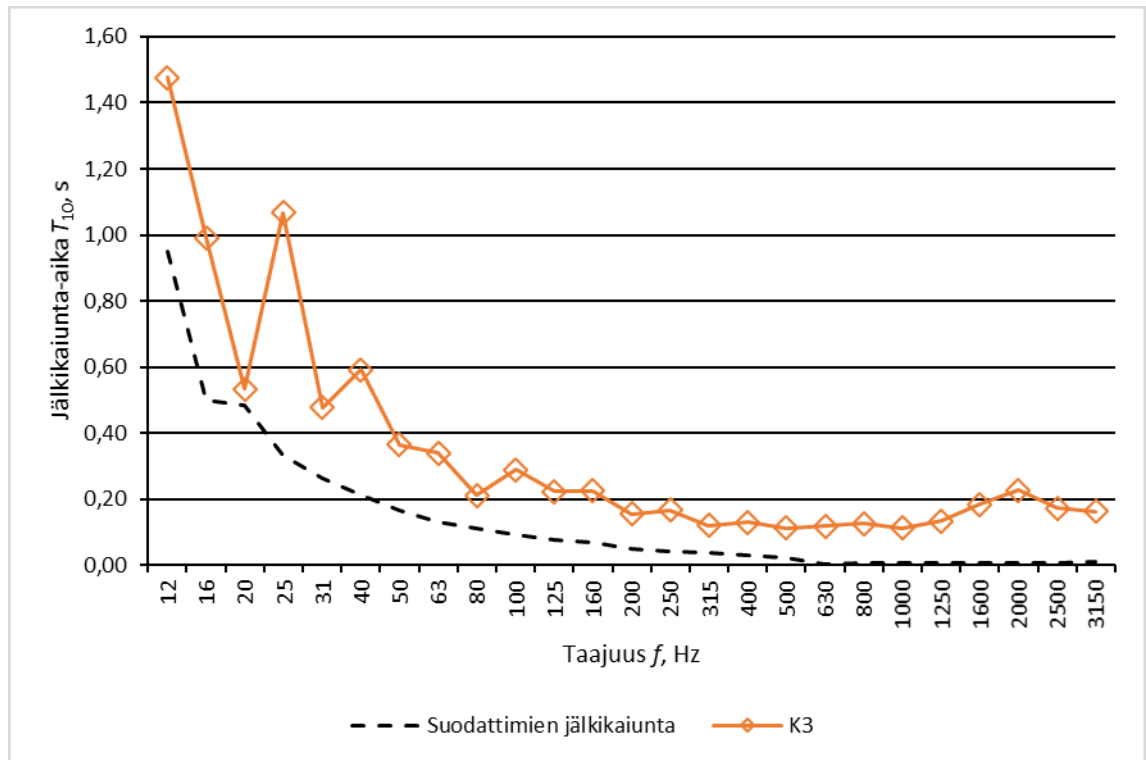




**Kuva A3.** Rakenteellinen jälkikaiunta-aika pinnalla S4.

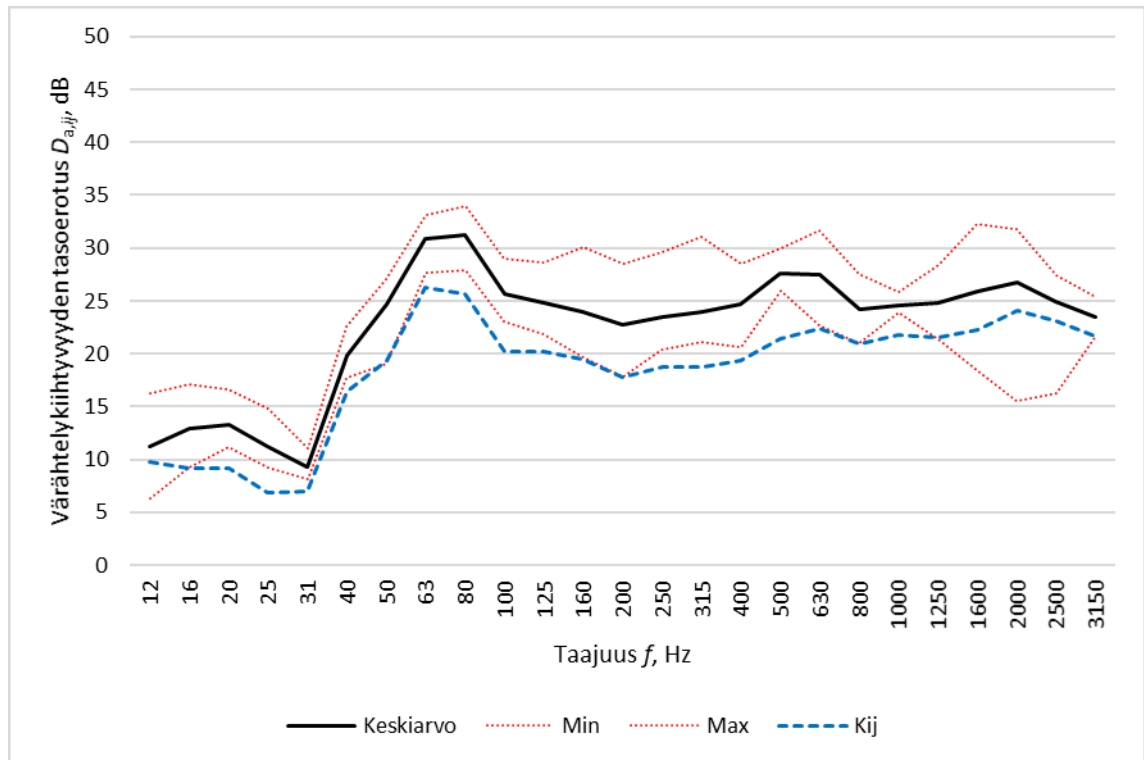


**Kuva A4.** Rakenteellinen jälkikaiunta-aika pinnalla K2.

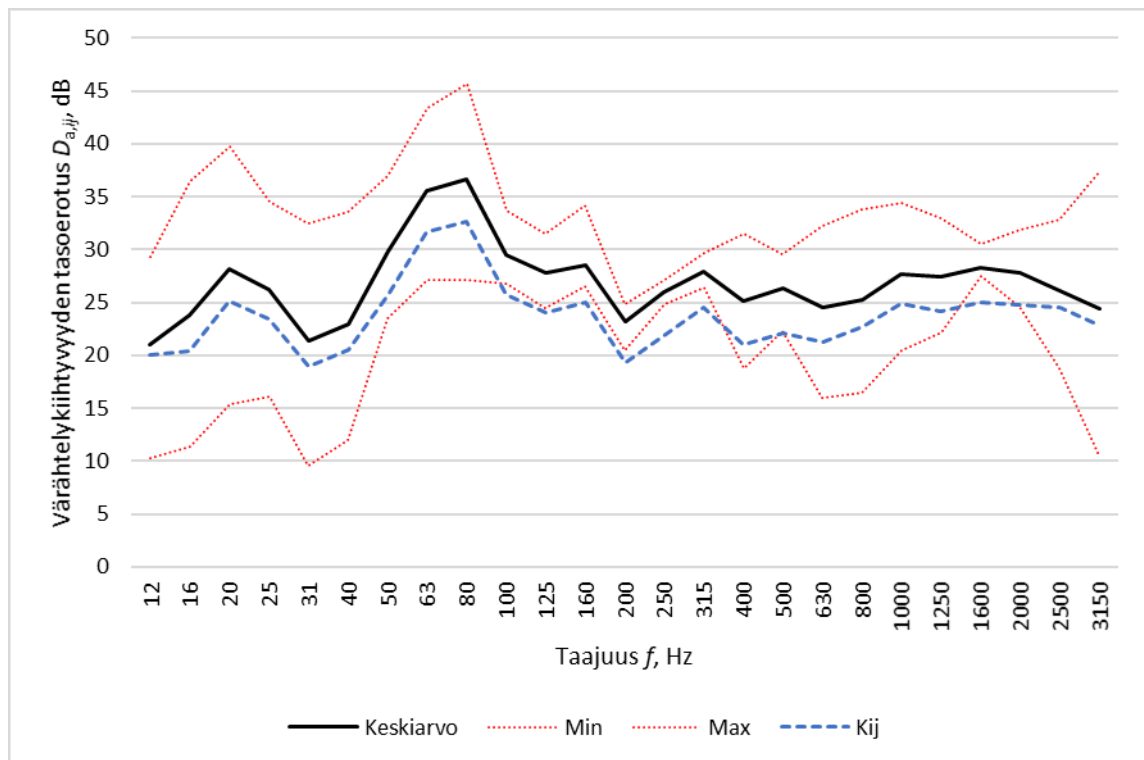


**Kuva A5.** Rakenteellinen jälkikaiunta-aika pinnalla K3.

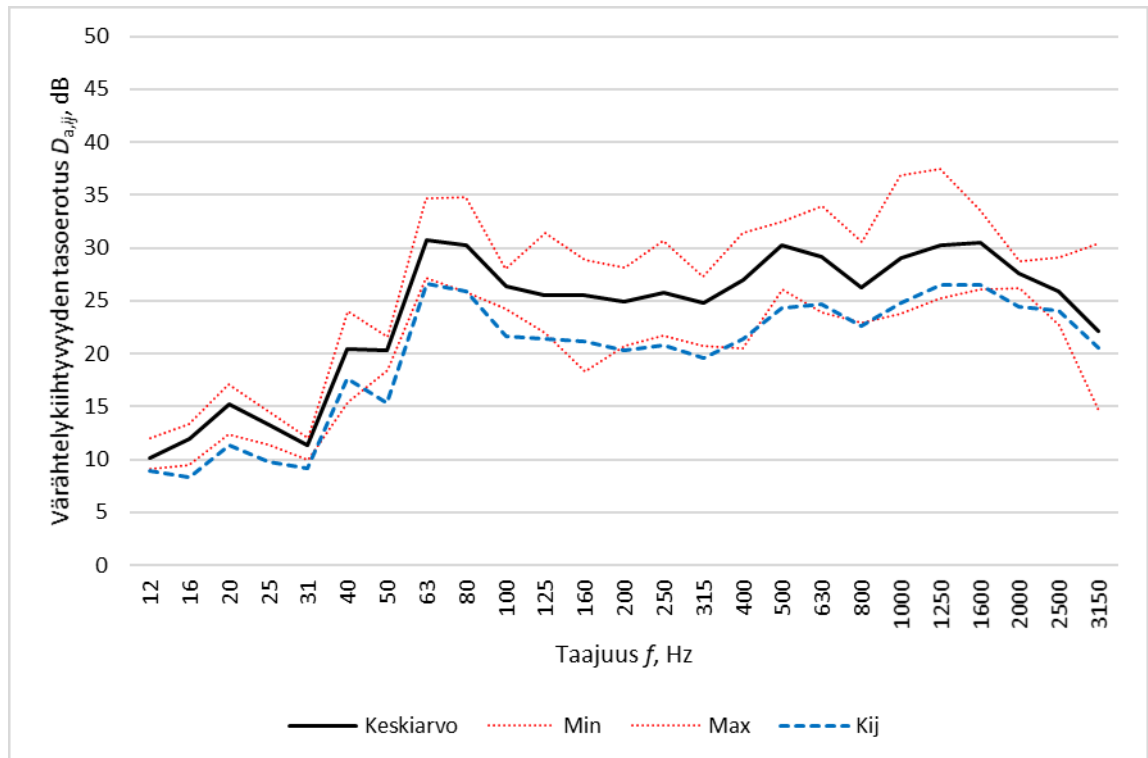
## LIITE B: VÄRÄHTELYKIIHTYVYYDEN TASOEROTUKSET



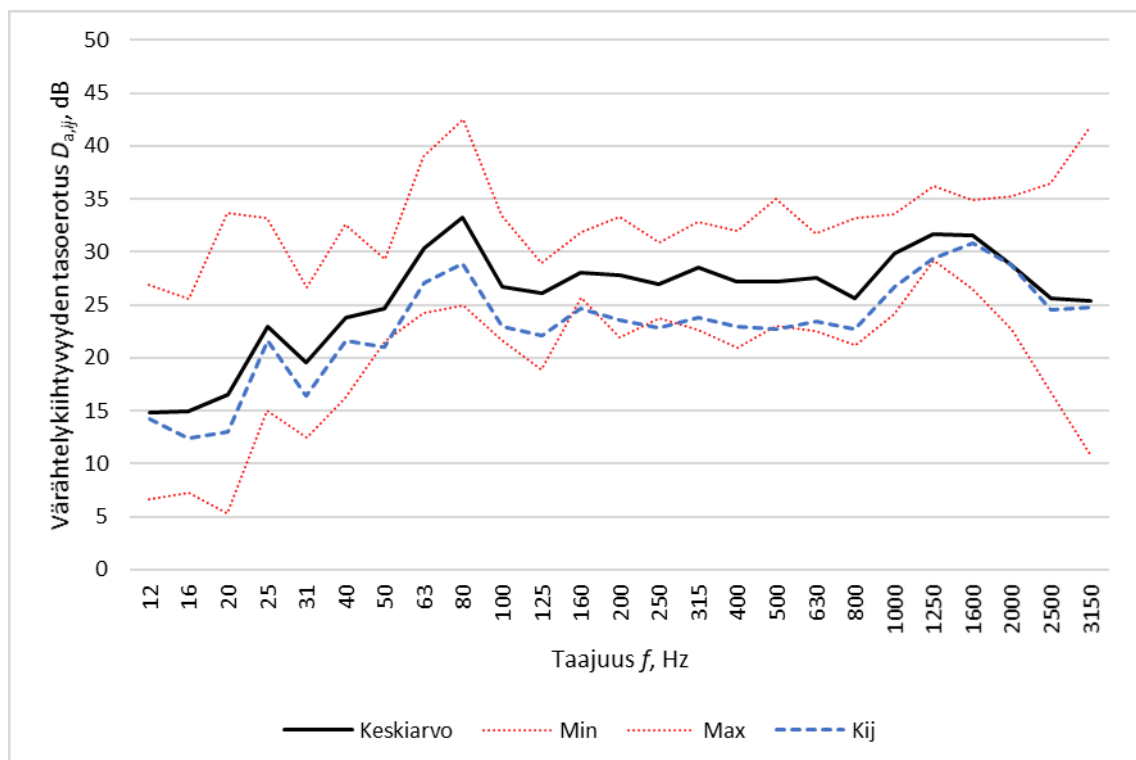
**Kuva B1.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus mittauksessa S3\_S2.



**Kuva B2.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus mittauksessa S3\_K2.



**Kuva B3.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus mittauksessa S3\_S4.



**Kuva B4.** Värähtelykiihtyvyyden tasoerotus mittauksessa K3\_S4.