



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Äänen rakenteelliset sivutiesiirtymät puurakennuksissa

Mikko Pura

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Diplomityö

Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Äänen rakenteelliset sivutiesiirtymät puurakennuksissa

Mikko Pura

Oulun yliopisto, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 101 s. + liite

Työn ohjaajat: TkT Mikko Kylliäinen, Professori Antti Niemi ja DI Ville Kovalainen

Rakenteiden välityksellä tapahtuva äänen siirtyminen on puurakennuksissa monimutkaisempi ilmiö kuin vastaavassa betonirakennuksessa. Puurakennuksesta monimutkaisemman tekevät rakenteiden kiinnitysjärjestelmät, rakenteiden ja niiden liitoksien geometria sekä puun mekaaniset ja akustiset ominaisuudet. Rakentamista ohjaavissa määräyksissä erilaisten tilojen väliselle ääneneristävyydelle on asetettu vaatimuksia, joiden täyttäminen edellyttää sivuavien rakenteiden välityksellä siirtyvän äänen huomioimista rakennusten suunnittelussa. Jotta sivuavien rakenteiden välityksellä siirtyvä ääni voidaan huomioida suunnittelussa, täytyy ilmiö ja sen suuruuteen vaikuttavat tekijät tuntea puurakentamisen erityispiirteet huomioiden.

Tutkimuksessa puurakennuksien sivutiesiirtymiin vaikuttavia tekijöitä etsittiin kansainväliseen kirjallisuuteen keskittyvällä *state of the art* -kirjallisuuskatsauksella. Myös tilojen välisen ääneneristävyyden tarkasteluun vakioitunutta arviointimallia, sen kehittämistä ja soveltuvuutta puurakenteiden arvioimiseen tarkasteltiin. Kirjallisuuskatsauksessa havaittuja ilmiöön liittyviä epämääräisyyksiä tutkittiin tarkemmin ja epävarmuuksien huomioimista rakennusten suunnittelussa pohdittiin arviointimallin käytännön soveltamisen kannalta. Arviointimallilla laskennallisesti määritettyjä tilojen välistä ääneneristävyyttä verrattiin ääneneristävyyksmittauksien tuloksiin. Lopulta kuvitteellisten esimerkkitulojen ääneneristysvaatimukset täyttävät rakenneratkaisut määritettiin laskennallisesti.

Puurakennusten sivutiesiirtymiä on tutkittu kattavasti ainoastaan ranka- ja CLT (ristiiniimattu massiivipuu) -rakenteisissa puurakennuksissa. Puurakenteiden liitoksille on tyyppillistä niiden liitoseristävyyden merkittävä taajuusriippuvaisuus ja betonirakenteiden liitoksiin verrattuna useampi siirtymäteiden määrä sekä geometrian monimutkaisuus ja periodisuus. Rankarakenteiden tarkastelun haastavuutta lisää myös niiden äänen säteilyyn ja etäisyyden suhteen tapahtuvaan vaimenemiseen liittyvät ilmiöt. CLT:n dynaamiseen

toimintaan liittyvät epävarmuudet vaikeuttavat sen lähtötietona tarvittavien ominaisuuksien määrittämistä ja toisaalta arviointimallissa käytettävän menetelmän valintaa ja soveltamista. Usean tutkimukseen perustuen CLT-tuotteiden sisäisen häviökertoimen lukuarvot saattavat erota merkittävästi eri laboratorioiden tai valmistajien tuotteiden välillä.

CLT-rakenteille laskennallisesti määritetyt tilojen väliset ääneneristävyydet vastasivat kohtalaisesti mittauksien tuloksia, mutta epävarmuuksia oli etenkin oikeanlaisen liitoseristävyyden valinnassa ja ilmaääneneristävyyden määrittämisessä. Sivutiesiirtymä vaikutti merkittävästi CLT-rakenteiden kokonaisääneneristävyyteen. Rankarakenteisessa kohteessa laskennan tulos ei vastannut mitattua tulosta yhtä hyvin, mutta taajuustasossa esitetyistä sivuteiden ääneneristävyyksistä oli silti pääteltävissä jotain.

Esimerkkituloille tehdyt mitoitukset ehdottavat, ettei kaikkia tyypillisesti tehtäviä rakenteiden katkaisuja tai lisävuorauksia ole tarpeellista tehdä. Ainoastaan merkittävien sivuteiden eristävyyden parantamisella on vaikutusta tilojen väliseen kokonaisääneneristävyyteen.

Puurakennuksissa tilojen välisen ääneneristävyyden laskennalliseen määrittämiseen liittyy useita epävarmuuksia, joihin alan tutkimus ei vielä vastaa. Arviointimenetelmää voi kuitenkin käyttää suunnittelun apuna tarkkuutta noudattaen, kun siihen liittyvät epävarmuudet on tiedostettu. Merkittävin jatkotutkimuksen aihe on diplomityön perusteella liitoseristävyyden määrittäminen laskennallisesti.

Asiasanat: puurakentaminen, ääneneristävyys, sivutiesiirtymä, akustiikka

ABSTRACT

Flanking sound transmission in wooden buildings

Mikko Pura

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2021, 101 pp. + Appendix

Supervisors: D.Sc. Mikko Kylliäinen, Professor Antti Niemi, M.Sc. Ville Kovalainen

Sound transmission via flanking elements is a more complex phenomenon in wooden buildings than in corresponding concrete buildings. Complexity of the sound transmission in wooden buildings is a consequence of complicated joints, geometry of the elements and connections and the mechanical and the acoustical properties of wood. Regulations guiding the construction sets requirements for sound insulation between different kind of rooms, thus flanking sound transmission must be concerned in structural design of buildings. Prediction of flanking sound transmission in structural design requires understanding of the phenomena and the significance of the attributes defining it relating to wooden construction must be known.

In this thesis, the phenomena defining flanking sound transmission in wooden buildings were explored as *state-of-the-art* -literature review, which was focused on international research. Also, the standardized prediction model for prediction of the sound insulation between adjacent rooms, its development and suitability for wooden buildings were studied. Uncertainties discovered in the literature review were further investigated and the consideration of the uncertainties were discussed in terms of application of the prediction model for design work. The prediction model was applied to reference rooms and the results were compared to the results obtained from measurements. Finally, the prediction model was applied to imaginary example rooms and the structural details for different requirements were determined with the use of the prediction model.

Research concerning the flanking sound transmission in wooden buildings is currently available only for lightweight framed buildings and CLT (cross-laminated-timber) buildings. For wooden junctions, the quantity expressing the attenuation of vibration in junction is typically frequency-dependent and compared to junctions made of concrete the

number of sound transmission paths is greater and the geometry is typically more complex and periodic. Framed structures exhibit difficulties regarding to sound radiation and attenuation of the vibration in terms of distance. The uncertainties regarding to dynamic properties of CLT complicate the prediction of properties of CLT needed as input data for the prediction model and also complicate the application of the prediction model with structures involving CLT-elements. Based on several publications, the internal loss factor of CLT can vary significantly between different laboratories or manufacturers.

For CLT-based rooms, the predicted sound insulation between rooms corresponded moderately with results obtained from measurements, but there are uncertainties concerning especially the quantities expressing the junction attenuation and the prediction of airborne sound insulation of single CLT-element. Flanking sound transmission significantly affects the total sound insulation in CLT-based rooms. For framed structures, the predicted sound insulation between rooms did not match well with the measurement results, but something can still be deduced from the results.

The results of investigations relating to example rooms suggest, that the typical disconnections of the elements or the additional linings are not always necessary. Only the improvement of the flanking sound insulation of significant flanking path will lead to improvements in total sound insulation.

In the prediction of the sound insulation of adjacent rooms in wooden buildings, there are several uncertainties which research does not answer yet. The prediction model can still be used as a design tool with precision when the uncertainties are well known by the designer or the engineer. The most remarkable subject for further research is defining the quantities describing the attenuation of vibration in junctions by means of numerical simulations.

Keywords: wooden construction, sound insulation, flanking sound transmission, acoustics

ALKUSANAT

Aloitin diplomityön työstämisen kesällä 2020 työskenneltyäni A-Insinööreillä akustiikkasuunnittelun parissa noin puolen vuoden ajan. Tutkimuksessa tarkasteltavaksi ilmiöksi valikoitui mielenkiintoihini sopiva, puurakennusten ääneneristävyys. Diplomityössä tavoiteltiin äänen siirtymismekanismien ymmärtämistä puurakenteisissa rakennuksissa sekä erilaisten tilojen rakenteilta vaadittavien suunnitteluratkaisujen laskennallista selvittämistä. Haluan kiittää A-Insinöörit Suunnittely Oy:tä tutkimuksen rahoittamisesta ja erinomaisten puitteiden järjestämisestä.

Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat A-Insinööreiltä TkT Mikko Kylliäinen ja DI Ville Kovalainen sekä Oulun yliopistosta professori Antti Niemi. Mikko Kylliäistä haluan kiittää ensinnäkin koko diplomityön mahdollistamisesta ja toisaalta asiantuntevasta ohjaamisesta. Ville Kovalaista kiitän etenkin työn laskennalliseen osaan liittyvästä avusta, neuvoista sekä kriittisistä kommentteista. Antti Niemeä kiitän arvokkaista kommentteista ja työn tarkastamisesta. Lisäksi kiitokset ansaitsee A-Insinöörien akustiikkasuunnittelun väki, josta moni edesauttoi työn valmistumista tavalla tai toisella.

Kaiken kaikkiaan diplomityöprojekti oli antoisa ja mielenkiintoinen.

Oulu, 21.12.2020



Mikko Pura

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	8
1.1 Ääneneristysmääräykset ja puurakentaminen.....	8
1.2 Sivutiesiirtymä	10
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	12
2 Rakenteelliset sivutiesiirtymät puurakennuksissa	13
2.1 Äänen rakenteellinen siirtyminen tilojen välillä.....	13
2.1.1 Äänen rakenteellinen siirtymätie	14
2.1.2 Liitoksen eristävyden määrittäminen	17
2.1.3 Värähtely levyssä	19
2.1.4 Koinsidenssi.....	22
2.1.5 Säteilytehokkuus	22
2.1.6 Häviöt	23
2.2 Standardin SFS-EN ISO 12354:2017 arviointimenetelmä.....	24
2.2.1 Arviointimalli.....	25
2.2.2 Rakenteiden tyypitys.....	26
2.2.3 Sivutien määrittäminen kenttätilanteessa	26
2.2.4 Rajoitukset	27
2.2.5 Lähtötiedot.....	28
2.2.6 Ilmääneneristävyden korjaaminen kriittisen taajuuden alapuolella	28
2.2.7 Askelääneneristävyys	30
2.3 Massiivipuorakenteiden tutkimus	31
2.3.1 Kiinnikkeiden vaikutus massiivipuorakenteiden värähtelykäyttäytymiseen	31
2.3.2 Joustavien eristimien vaikutus rakenteelliseen sivutiesiirtymään.....	35
2.3.3 Massiivipuutuotteiden eroavaisuudet valmistajien välillä.....	37
2.3.4 Liitoksen massasuhteiden vaikutus liitoseristävyyteen.....	38
2.3.5 Rakenteiden katkaisemisen vaikutus liitoseristävyyteen	39
2.3.6 CLT-elementtien rakenteen vaikutus liitoseristävyyteen	39
2.3.7 Lisävuoraus massiivipuorakenteilla	40
2.3.8 CLT:n akustiset ja mekaaniset ominaisuudet	40
2.4 Rankarunkoisten puorakenteiden tutkimus	43
2.4.1 Vaimeneminen etäisyyden funktiona	44
2.4.2 Rankarakenteiden sekä niiden levytyksien katkaiseminen.....	45
2.4.3 Rankarakenteiden lisävuoraukset.....	46

2.4.4 Muita vaikuttavia tekijöitä.....	46
2.5 Liitoseristävyyden laskennallinen määrittäminen.....	48
2.6 Yhteenveto kirjallisuuskatsauksesta.....	52
3 Menetelmät.....	53
3.1 Rakenteiden ääneneristävyys.....	53
3.1.1 Ilmaääneneristävyys.....	53
3.1.2 CLT:n ilmaääneneristävyys.....	54
3.2 CLT:n häviöt ja tyypitys.....	57
3.3 Rakenteiden ilmaääneneristävyyksien korjaaminen.....	61
4 Vertailu- ja esimerkkikohteet.....	64
4.1 Vertailukohteet.....	65
4.1.1 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 1 – CLT T1.....	65
4.1.2 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 2 – CLT T2.....	66
4.1.3 Rankarakenteinen rivitalo - RANKA.....	66
4.2 Esimerkkikohteet.....	67
4.2.1 Toimistohuone - TOIM.....	67
4.2.2 Vastaanottotila - VAST.....	68
4.2.3 Luokkahuone - LH.....	68
5 Tulokset ja niiden tarkastelu.....	70
5.1 Vertailukohteiden tulokset.....	70
5.1.1 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 1 – CLT T1.....	70
5.1.2 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 2 – CLT T2.....	73
5.1.3 Rankarakenteinen rivitalo - RANKA.....	75
5.2 Esimerkkimitoitukset.....	77
5.2.1 Toimistohuone – TOIM.....	77
5.2.2 Vastaanottotila - VAST.....	79
5.2.3 Luokkahuone LH.....	81
5.3 Tulosten pohdinta.....	83
6 Johtopäätökset ja suositukset.....	86
7 Yhteenveto.....	89
LÄHDELUETTELO.....	92
LIITE:	
Liite 1. Esimerkki ja vertailukohteiden rakennetyypit ja liitokset.	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BEM	<i>Boundary element method</i> , reunaelementtimenetelmä
CLT	<i>Cross-laminated timber</i> , ristiinliimattu massiivipuu
COST	<i>European cooperation in science and technology</i> , eurooppalainen tutkijaverkosto
CSTB	<i>The Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i> , ranskalainen tutkimusorganisaatio
DLT	<i>Dowel-laminated timber</i> , puutapeilla koottu massiivipuu
EFA	<i>Energy Flow Analysis</i> , energiavirta-analyysi
FEM	<i>Finite element method</i> , elementtimenetelmä
NLT	<i>Nail-laminated timber</i> , naulaloilla koottu massiivipuu
NRC	<i>National Research Council</i> , Kanadan kansallinen tutkimusneuvosto
SEA	<i>Statistical energy analysis</i> , tilastollinen energia-analyysi
TMM	<i>Transfer matrix method</i> , siirtomatriisimenetelmä
a	absorptiopituus [m]
B	levyn taivutusjäykkyys [Nm]
b, c	levyn sivujen pituudet [m]
c_0	äänen nopeus ilmassa [m/s]
D_{ij}	värähtelytasoero
$\overline{D_{v,ij}}$	suuntakeskiarvoistettu värähtelynopeuden tasoerotus (<i>direction-averaged velocity level difference</i>)
$\overline{D_{v,ij,n}}$	normalisoitu ja suuntakeskiarvoistettu värähtelynopeuden tasoerotus (<i>normalized direction-averaged velocity level difference</i>)
D_{nT}	standardisoitu äänitasoero [dB]
$D_{nT,w}$	standardisoitu äänitasoeroluku [dB]
E	kimmokerroin [Pa]
f	taajuus [Hz]
f_c	koinsidenssin rajataajuus [-]
f_{ref}	referenssitaajuus [Hz]
h	levyn paksuus [m]
i	viittaa rakenteeseen lähetyshuoneessa [-]

j	viittaa rakenteeseen vastaanottohuoneessa [-]
K_{ij}	värähtelyeristävyys [dB]
L'	kenttätilannetta vastaava askeläänitaso [dB]
L_n	normalisoitu askeläänitaso [dB]
$L_{n,ij}$	sivutien askeläänitaso [dB]
l_0	referenssipituus [1 m]
l_{ij}	liitoksen pituus [m]
l_k	sivun pituus kehällä k [m]
M	massasuhde
m	pintamassa [kg/m^2]
ΔR	ilmääneneristävyuden parannusluku [dB]
R_{ij}	sivutien ilmääneneristävyys [dB]
R'	kenttätilannetta vastaava ilmääneneristävyys [dB]
R'_w	ilmääneneristysluku [dB]
S	rakenteen pinta-ala [m^2]
S_s	erottavan rakenteen pinta-ala [m^2]
s_m	pinta-ala, jolta värähtelynopeus on keskiarvoistettu [m^2]
T_s	rakenteellinen jälkikaiunta-aika [s]
V	tilavuus [m^3]
v	värähtelynopeus [m/s]
W	ääniteho [W/m^2]
α_k	taivutusaaltojen absorptiokerroin kehällä k [-]
γ_{ij}	tehon läpäisysuhde [-]
η	häviökerroin [-]
μ	Poissonin suhde [-]
ψ	kriittisen taajuuden ja taajuuden suhde [-]
σ	säteilykerroin [-]
σ_a	ilmääniherätteellä määritetty säteilykerroin [-]
σ_s	voimaherätteellä määritetty säteilykerroin [-]
τ	läpäisysuhde [-]

1 JOHDANTO

1.1 Ääneneristysmääräykset ja puurakentaminen

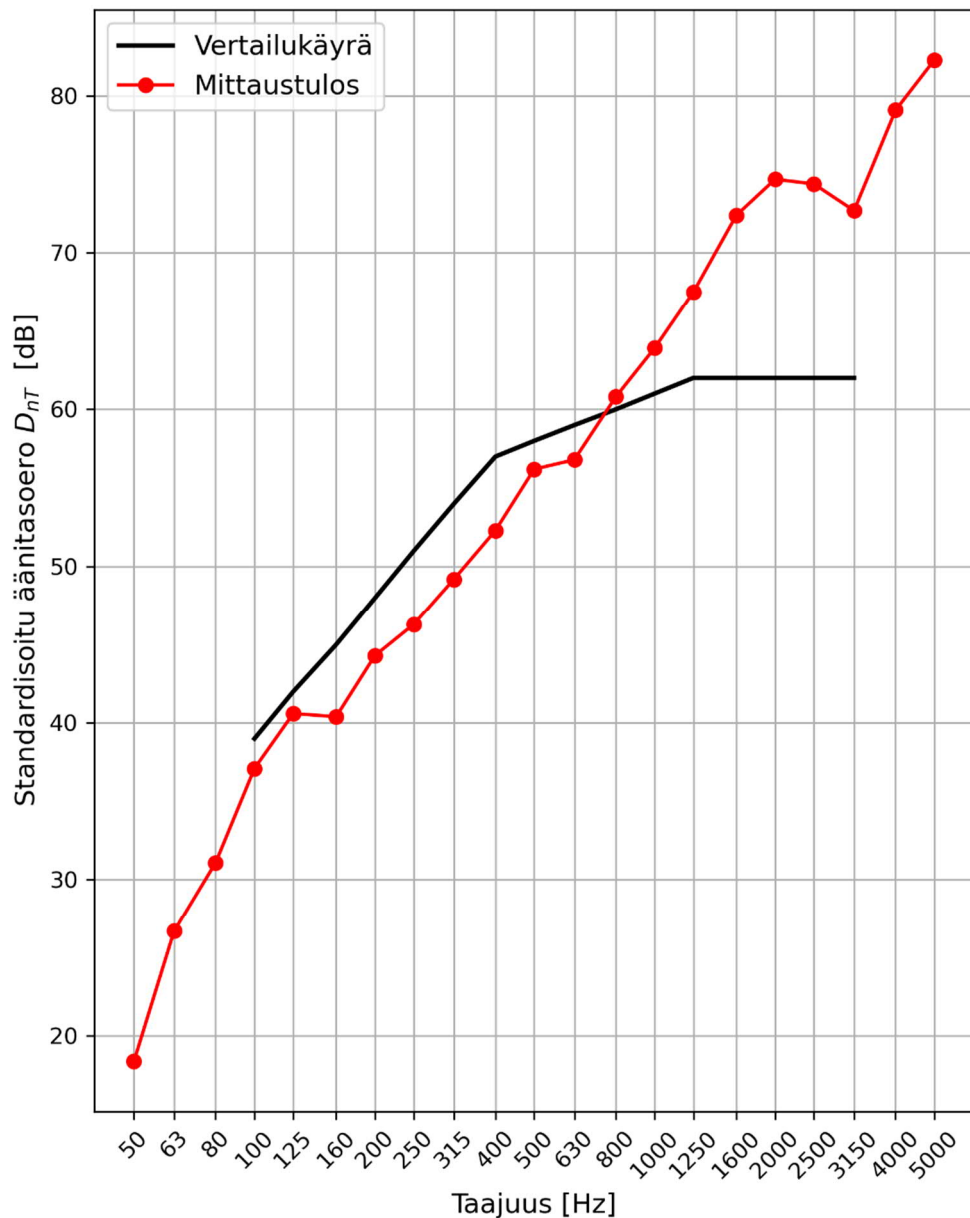
Suomessa rakennusten ääniolosuhteita koskeva lainsäädäntö on määritelty maankäyttö- ja rakennuslaissa, jonka säätämistä ohjaa Euroopan unionin rakennustuotedirektiivi (Maankäyttö- ja rakennuslaki, 1999; Kylliäinen et al., 2017). Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan rakenteiden ääneneristävyys on oltava sellaista, ettei rakennuksessa oleskelevan uni ja lepo häiriinny sekä rakennuksen käyttötarkoituksen mukainen toiminta on ääniolosuhteiden puolesta mahdollista. Ympäristöministeriö voi asetuksillaan tarkentaa rakentamista koskevia säädöksiä, kuten ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä (Ympäristöministeriö, 2017) ja asetuksessa sen muuttamisesta (Ympäristöministeriö, 2019). Näissä asetuksissa uusien asuinrakennusten sekä majoitus- ja potilashuoneita sisältävien rakennusten tilojen välisille ääneneristävyyksille on annettu velvoittavia vaatimuksia. Ympäristöministeriön ohjeessa (2018) on esitetty ääneneristävyysohjeita muunlaisille tiloille, joita on tyypillisesti koulu-, päiväkotij- ja toimistorakennuksissa sekä terveydenhuollon rakennuksissa.

Suomessa ja yleisesti Euroopassa ääneneristysvaatimukset on annettu tilojen välille, jolloin ne eivät tarkoita yksittäisen tilojen välillä olevan rakennusosan ääneneristävyyttä, vaan ne sisältävät kaikki mahdolliset äänen siirtymisreitit (COST Action TU0901, 2014). Tällöin rakennuksien suunnittelussa on otettava huomioon ilma- ja askeläänen sivutiesiirtymät. Nämä vaatimukset saadaan täytettyä betonirakennuksissa rakenteiden massan ja liitoksien jäykkyyden ansiosta käyttötarkoitukseltaan tavanomaisissa työ- ja oleskelutiloissa ilman akustisia erikoisratkaisuja. Lisäksi betonirakentaminen on pitkälle kehitettyä ja standardisoitua, joten erilaisia suunnittelun ratkaisuja ja niihin liittyvää lähtötietoa on saatavilla runsaasti. (Kylliäinen, 2011)

Kiinnostus puuta kohtaan rakennusmateriaalina on selkeästi kasvamassa ja se on nousemassa kilpailijaksi tai vaihtoehdoksi betonirakentamiselle esimerkiksi sen vähäisten hiilidioksidipäästöjen, rakentamisprosessien nopeuden ja korkean esivalmistusasteen vuoksi (Di Bella ja Mitrovic, 2020; Heino, 2019; Ympäristöministeriö, 2020). Puu on kuitenkin ääneneristysominaisuuksiltaan selkeästi vastaavan paksuista betonirakennetta heikompi sekä liitoksiltaan ja värähtelykäyttäytymiseltään betonia monimutkaisempi materiaali.

Vaativien rakennuksien runkomateriaalina puu on myös verrattain uusi rakennusmateriaali, joten sen akustista toimivuutta ei ole vielä tutkittu perusteellisesti. Puurakennuksissa tiloja erottavat rakenteet koostuvat yleensä useammasta levykerroksesta ja niiden välisestä ääntä vaimentavasta materiaalista, koska riittävää ääneneristävyttä ei voida saavuttaa pelkästään massan avulla. Lisäksi nykyisillä suunnitteluratkaisuilla tilojen välillä si-
vuavat rakenteet eivät jatku tilasta toiseen, vaan ne katkaistaan äänen siirtymisen ehkäi-
semiseksi. Etenkin nämä katkot ja toisaalta vähäinen suunnittelua tukeva lähtötieto vai-
keuttavat puurakennuksien suunnittelua ja toteutusta sekä rajoittavat puurakentamisen
kilpailukykyä koulu-, päiväkotij- ja kerrostalohankkeissa. (Kylliäinen et al. 2017; Di Bella
ja Mitrovic, 2020)

Määräyksissä ilmaääneneristävyydelle asetetut vaatimukset on annettu yksilukuarvoina
esitettyinä. Nykyisin Suomessa käytettävä yksilukuarvo on standardisoitu äänitasoero-
luku $D_{nT,w}$. Useassa Euroopan maassa käytetään sekä Suomessa ennen vuotta 2018 käy-
tettiin ilmaääneneristävyyslukua R'_w . Yksilukuarvot ovat eräänlaisia keskiarvoistuksia,
sillä ilmaääneneristävyys riippuu voimakkaasti taajuudesta. Rakennusten akustiikassa
tarkastellaan yleensä taajuuksia 50 Hz ja 5000 Hz välillä. Standardisoidun äänitasoerolu-
vun ja ilmaääneneristävyysluvun määrittämiseen käytetään standardissa SFS-EN ISO
717-1 määritettyä vertailukäyrämenetelmään, millä taajuustasossa määritetyistä ääne-
neristävyysarvoista saadaan laskettua puheäänien taajuusjakaumaan ja korvan herkkyyy-
teen perustuva yksilukuarvo. Askelääneneristävyuden mittalukujen määrittämisessä käy-
tetään saman kaltaista menetelmää. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki standardisoidun ää-
nitasoeron mittaustuloksesta ja vertailukäyrä asennossa $D_{nT,w}$ 58 dB. (Ympäristöministe-
riö, 2018; COST Action TU0901; 2014, Kylliäinen ja Hongisto, 2007; SFS-EN ISO 171-
1)



Kuva 1. Esimerkki ilmaääneneristävyyden mittaustuloksesta. Yksilukuarvo määritetään vertailukäyrän avulla mittaustuloksesta niin, että vertailukäyrää siirretään, kunnes mittaustuloksen ja vertailukäyrän epäsuotuisa poikkeama on enintään 32 dB. Yksilukuarvo luetaan siirretystä vertailukäyrästä 500 Hz kohdalta.

1.2 Sivutiesiirtymä

Rakennuksissa ääni siirtyy tilasta toiseen tiloja erottavien rakennusosien lisäksi niitä sivuavien rakenteiden, ilmareittien ja teknisten järjestelmien kautta. Äänen siirtymistä muita reittejä kuin tiloja erottavan rakenteen kautta kutsutaan sivutiesiirtymäksi. Valmiissa rakennuksessa tiloja erottavan rakenteen kautta siirtyvän äänen lisäksi sivuavien rakenteiden välittämä ääni voi vaikuttaa merkittävästi saavutettavaan ääneneristävyyteen. Ääni voi siirtyä tilojen välillä myös kokonaan sivutietä pitkin, jos tiloilla ei ole yhteistä pinta-alaa. (Rindel, J. H., 2007; Vigran, T. E., 2008)

Rakenteellisella sivutiesiirtymällä tarkoitetaan rakennuksen rakenteiden kautta tapahtuvaa sivutiesiirtymää. Toisin kuin muiden sivutiesiirtymien tapauksessa, rakenteelliset sivutiesiirtymät riippuvat rakennuksen runkoratkaisusta sekä materiaalista. Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan rakenteellisiin sivutiesiirtymiin, sillä muita sivutiesiirtymiä voidaan tarkastella puurakennuksissa samoin kuin muussa rakentamisessa. (Kylläinen et al., 2017)

Nykyistä rakennusten sivutiesiirtymien tutkimusta on ohjannut standardin SFS-EN ISO 12354 kehittäminen (Gerretsen, 2005). Gerretsenin (1979 ja 1986) tutkimukset loivat pohjan standardin arviointimallin kehittämiseen. Tutkimuksissa äänen siirtyminen tilojen välillä jaetaan toisistaan riippumattomiin siirtymäteihin, joita pitkin tapahtuvaa äänen siirtymistä lähetys- ja vastaanottotilojen välillä arvioidaan sivuavien rakenteiden ominaisuuksien sekä tilojen rakenteiden liitoksien aiheuttaman värähtelyn vaimenemisen kautta.

Standardi julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 2000 (SFS-EN ISO 12354:2000). Standardi on kehitetty vastaamaan julkaisuajankohtansa aikaista rakentamista, joten siinä esitetty laskentamalli palveli parhaiten raskaista ja monoliittisista rakenteista koostuvia rakennejärjestelmiä. Samaan aikaan rakentaminen alkoi muuttua: kiinnostus kevyitä rakenteita kohtaan heräsi, kaupungistuminen kiihtyi ja äänilähteiden määrä rakennuksissa kasvoi. Toisaalta ihmisten vaatimustaso asuntojen ääniolosuhteita kohtaan kasvoi. (Gerretsen, 2003)

Kirjallisuudessa ja tutkimustuloksissa on osoitettu, että standardissa SFS-EN ISO 12354-1 esitetty laskentamalli vastaa riittäväällä tarkkuudella mittaustuloksia raskaiden ja monoliittisten rakenteiden osalta (Gerretsen, 2006), tosin huomautuksia esimerkiksi sivutiesiirtymien taajuusriippuvaisuudesta on esitetty (Hopkins, 2014). Standardin alkuperäisessä versiossa esitetty lähtötieto osoittautui epätarkaksi kevyiden rakenteiden osalta (Mahn, 2008) ja jo standardin julkaisun yhteydessä tiedettiin arviointimalliin liittyvän epäkohtia kevyiden rakenteiden tapauksessa (Nightingale, 1995). Näistä syistä standardia lähdettiin kehittämään tarkoituksena korjata kevyitä rakenteita koskevat puutteet ja laajentaa standardi koskemaan yleistävää puurakentamista (COST Action FP0702).

Standardin päivitetty versio julkaistiin vuonna 2017 pitkään jatkuneen kehitystyön jälkeen (SFS-EN ISO 12354:2017, osat 1 ja 2). Uusimmassa versiossa arviointimalli on laajennettu huomioimaan myös kevyet rakenteet, lähtötietoa on esitetty laajemmin ja CLT on sisällytetty uutena materiaalina lähtötietoihin. Päivityksen lähtötietojen keräämiseen

käytettiin mittauksien lisäksi numeerisia menetelmiä (Crispin et al., 2014; Poblet-Puig ja Guigou-Carter C., 2015; Hopkins et al., 2016). Standardin julkaisun jälkeen tutkimukset ovat kyseenalaistaneet standardissa esitettyä tietoa ja nostaneet esille tarpeen jatkotutkimuksille (Barbaresi et al., 2016; Morandi et al., 2018; Morandi et al., 2020).

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää äänen siirtymismekanismit puurunkoisissa rakennuksissa sillä tarkkuudella, että erilaisten käytännön suunnitteluratkaisujen vertaileminen on mahdollista. Tavoite voidaan jakaa alatavoitteisiin seuraavasti:

1. Puurakenteissa äänen siirtymiseen vaikuttavien tekijöiden ja niiden merkittävyyden selvittäminen kansainväliseen tutkimukseen keskittyvällä *state of the art* -kirjallisuuskatsauksella.
2. Suomessa asetettujen ääneneristysvaatimusten täyttävien rakenneratkaisujen tarkastelu käyttötarkoitukseltaan erilaisissa tiloissa.

2 RAKENTEELLISET SIVUTIESIIRTYMÄT PUURAKENNUKSISSA

2.1 Äänen rakenteellinen siirtyminen tilojen välillä

Tilassa toimiva ilmaäänihäiriö tai suoraan rakenteeseen kohdistuva voimahäiriö saavat tilan rakenteet värähtelemään, jolloin värähtely etenee rakennuksessa ympäröiviin tiloihin sekä erottavan rakenteen kautta että rakennuksen runkoa pitkin. Ympäröivissä tiloissa värähtelevien rakenneosien pinnoiltaan säteilemä ääni on havaittavissa ilmaääninä. (Kylläinen ja Hongisto, 2007)

Tilojen välinen ilmaääneneristävyys R' määritellään (1):

$$R' = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau'} \right), \quad (1)$$

missä kokonaisläpäisyysuhde τ' [-] sisältää kaikki äänen siirtymisreitit. Läpäisyysuhdeella kuvataan erottavan rakenneosan tai sivutien kautta välittyvää ääntä (2):

$$\tau = \frac{W_t}{W_i}, \quad (2)$$

missä W_t on tarkasteltavan siirtymäreitien vastaanottohuoneeseen säteilemä ääniteho [dB] ja W_i on tarkasteltavan siirtymätien rakenneosaan kohdistuva ääniteho lähetyshuoneessa [dB]. W_i voidaan myös valita kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa samaksi, jolloin eri sivuteille lasketut ilmaääneneristävyudet ovat vertailukelpoisia. Usein tiloja erottava rakenne valitaan vertailurakenteeksi. (Vigran, 2008)

Myös askelääntä siirtyy sivuteitä pitkin, mutta usein ensimmäisen kertaluvun sivuteiden määrä on ilmaääneneristävyteen verrattuna pienempi. Ensimmäisen kertaluvun sivutiellä tarkoitetaan äänen siirtymisreittiä, missä on mukana ainoastaan yksi liitos. Tilasta toiseen välittyvä askeläänitaso määritellään kaavalla (3):

$$L' = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{L_{n,ij}/10} \right), \quad (3)$$

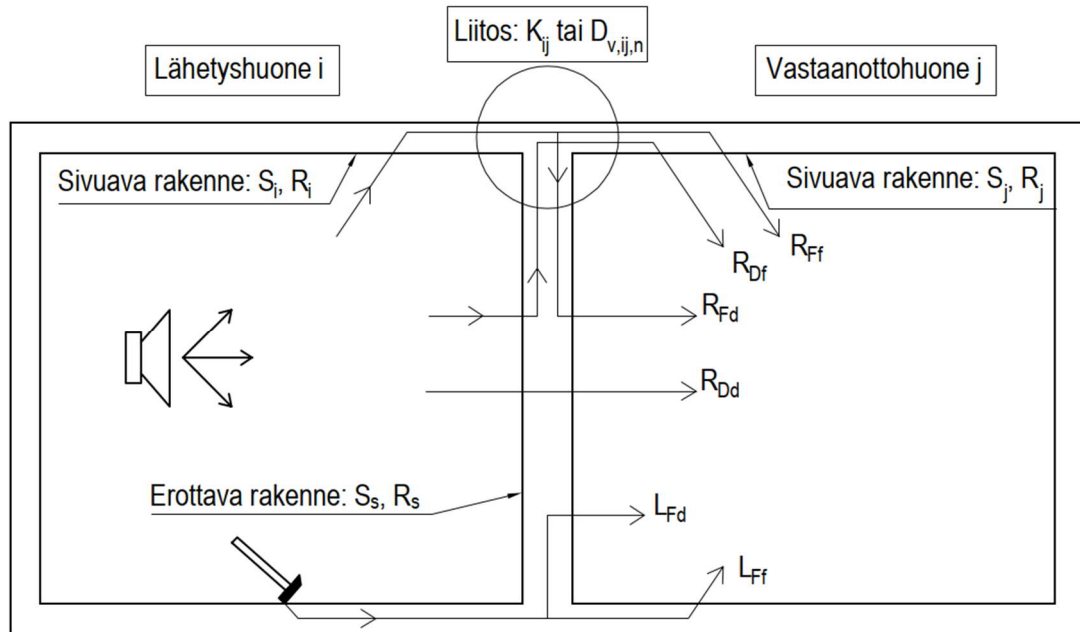
missä L' on askeläänitaso [dB], $L_{n,ij}$ on yksittäisen äänen siirtymätien aiheuttama normalisoitu askeläänitaso vastaanottohuoneessa [dB]. (Rindel, 2007).

Ilma- ja askelääneneristävyyksien mittalukuja korjataan eri tavoin määritetyillä termeillä, jotta ne saadaan vertailukelpoisiksi erilaisten kenttätilanteiden välillä. Nykyisissä standardeissa korjaus tehdään joko normalisoimalla tai standardisoimalla. Normalisointi tarkoittaa, että korjaus tehdään 10 m^2 referenssiabsorptioalan suhteen. Standardisoinnissa korjaus tehdään jälkikäiunta-ajan suhteen, jonka referenssiarvona käytetään 0,5 sekuntia. Mittaluvuissa normalisoituun arvoon viitataan alaindeksillä n ja standardisointiin alaindeksillä T . Suomen määräyksissä käytetään standardisoituja mittalukuja, sillä niiden on havaittu vastaavan suomalaisten asuinhuoneiden ääniolosuhteita normalisoituja mittalukuja paremmin. (Takala, 2013; Kylliäinen et al., 2016)

2.1.1 Äänen rakenteellinen siirtymätie

Rakennusten akustiikassa rakenteellisten sivuteiden tarkastelu rajataan yleensä ensimmäisen kertaluvun sivuteihin: sivutiellä lähetys- ja vastaanottohuoneissa on yksi rakennusosa sekä näiden välissä yksi liitos (Vigran, 2008). Useamman liitoksen yli on havaittu siirtyvän äänienergiaa. Craikin (2001) laskennalliseen tarkasteluun perustuvassa tutkimuksessa havaittiin, että ylempien kertalukujen vaikutus kokonaiseristävyyteen voi olla jopa kolme desibeliä. Hongiston (2020) mukaan ylemmän kertalukujen sivuteiden huomioimatta jättäminen aiheuttaa 1-2 desibelin aliarvioinnin, mutta muihin virhelähteisiin verrattuna määrä ei ole merkittävä.

Kuvassa 2 on esitetty sivutiesiirtymien tarkastelemiseen käytettävän mallin periaate. Rakenteiden ominaisuuksia ovat pinta-ala S [m^2], ilmaääneneristävyys R [dB] sekä askeläänitaso L [dB]. Liitoksien aiheuttamaa värähtelyn vaimenemista kuvataan joko värähtelyeristävyydellä K_{ij} [dB] tai normalisoidulla ja suuntakeskiarvoistetulla värähtelynopeuden tasoerotuksella $\overline{D_{v,ij,n}}$ [dB]. Lähetys- ja vastaanottohuoneisiin viitataan alaindeksissä kirjaimilla i ja j sekä näitä erottavaan rakenteeseen kirjaimella s . Yksittäisen sivutien alaindeksissä f tarkoittaa sivuavaa rakennetta ja d erottavaa rakennetta, isolla kirjaimella viitataan tarkasteltavan sivutien lähetyshuoneeseen ja pienellä kirjaimella vastaanottohuoneeseen. Kuvassa 2 esitettyjä sivuteitä muodostetaan kaikkien sivuavien rakenteiden kautta.



Kuva 2. Äänen siirtyminen tilojen välillä.

Värähtelyn etenemistä ja vaimenemista liitoksissa on tutkittu useilla menetelmillä sekä laskennallisesti että kokeellisesti. Laskennallisessa tarkastelussa on käytetty ainakin tilastollisia (SEA, *statistical energy analysis*, tilastollinen energia-analyysi), analyttisiä ja numeerisia menetelmiä sekä näiden yhdistelmiä. Tilastollinen energia-analyysi perustuu värähtelevän systeemin jakamiseen alisysteemeihin, jotka varastoivat värähtelyenergiaa ominaismuotoihinsa (Lyon ja DeJong, 1994). Alisysteemeiden energianvaihto lasketaan niiden välistä kytkentää kuvaavien kertoimien avulla, jolloin energiatasapainon muodostuessa tarkasteltavan systeemin tila on keskiarvoinen ja siten tilastollinen. Mitä enemmän systeemin alisysteemeillä on ominaismuotoja tarkasteltavalla taajuuskaistalla, sitä paremmin se vastaa oletusta tilastollisesta käyttäytymisestä (Lyon ja DeJong, 1994).

Liitoksen arviointiin käytettävä menetelmän soveltuvuus riippuu liitoksen rakenteesta – mitä monimutkaisempi liitos on geometrialtaan, materiaaliltaan tai reunaehdoiltaan, sitä enemmän se asettaa rajoituksia käytettävälle menetelmälle. Raskaille ja monoliittisille rakenteille tilastollisia malleja on käytetty paljon, koska ne toimivat koko rakennusakustiikan taajuusalueella ja soveltuvat hyvin osittain tilastollisesti käyttäytyville rakenteiden akustiikan ilmiöille. Rakennusakustiikan taajuusalueella tarkoitetaan yleisesti taajuuksia 50 Hz ja 5000 Hz välillä. Myös aaltoyhtälöihin perustuvia analyttisiä menetelmiä on käytetty raskaiden ja monoliittisten rakenteiden tarkasteluun yhdessä tilastollisten mallien kanssa. Useita numeerisia menetelmiä on käytetty liitoksien tarkasteluun, näistä etenkin elementtimenetelmään (FEM, *finite element method*) perustuvista malleista on tehty

useita tutkimuksia. (Hopkins, 2007; Winter, 2018; Guigou-Carter, 2013, Atalla ja Sgard, 2015, Hopkins et al., 2016)

Gerretsen (1979 ja 1986) esitti tutkimuksissaan rakennusten akustiikalle soveltuvan mallin äänen rakenteellisen sivutiesiirtymän arvioimiseen. Kyseinen malli jakaa äänen siirtymisen tilojen välillä yksittäisiin, toisistaan riippumattomiin sivuteihin. Sivutietä pitkin tapahtuvaa äänen siirtymistä lähestytään yksittäisten rakenneosien ominaisuuksien sekä niiden liitoksissa tapahtuvan värähtelyenergian jakaantumisen kautta. Askeläänen siirtymisen arvioimiseen tarvittavan lattian läpäisytermiä lukuun ottamatta samalla lähtötiedolla pystyttiin arvioimaan sekä ilma- että askeläänen sivutiesiirtymistä (Gerretsen, 1986).

Gerretsenin (1986) mukaan sivutien ilmaääneneristävyys R_{ij} määritetään siihen kuuluvien rakenneosien i ja j ilmaääneneristävyysien R [dB], säteilytehokkuuden σ [-] ja rakenneosien pinta-alojen S [m²] sekä rakenneosien värähtelytasoeron D_{ij} avulla (4), kun tarkasteltavat rakenteet ovat raskaita sekä monoliittisia:

$$R_{ij} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_{ij}} \right) = R_i + D_{ij} + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_i S_s}{\sigma_j S_j} \right), \quad (4)$$

missä S_s on tiloja erottavan rakenteen pinta-ala. Värähtelytasoero D_{ij} tarkoittaa rakenneosien i ja j pintojen värähtelynopeuksien erotusta ja kuvaa liitoksen aiheuttamaa värähtelyn vaimenemista (5):

$$D_{v,ij} = -10 \log_{10} \left(\frac{\langle v_j^2 \rangle}{\langle v_i^2 \rangle} \right), \quad (5)$$

missä $\langle v^2 \rangle$ on värähtelynopeuden tehollinen ja alueellinen keskiarvo rakenteessa i tai j [m/s]. Sivutiesiirtymän suunnasta riippumattomassa tarkastelussa käytetään suuntakeskiarvoistettua värähtelynopeuden tasoerotusta $\overline{D_{v,ij}}$ (6) (Vigran, 2008):

$$\overline{D_{v,ij}} = \frac{1}{2} (D_{v,ij} + D_{v,ji}) \quad (6)$$

Olettamalla sivutiesiirtymän läpäisy-suhteen suunnasta riippumattomaksi, Gerretsen (1986) onnistui poistamaan säteilytehokkuuden kaavasta (4) ja kirjoitettua sivutien ilma-ääneneristävyyden muotoon (7):

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \overline{D_{v,ij}} + 10 \log_{10} \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right), \quad (7)$$

Gerretsen (1994 ja 1996) täydensi sivutien ääneneristävyyden laskentamallia liitosten akustisen suorituskyvyn arvioimisen osalta. Täydennetty laskentamalli toimi perustana eurooppalaisen standardin EN 12354-1:2000 arviointimenetelmälle. Standardin laskentamalli on käytännöllinen, koska sen avulla voidaan tarkastella sivuteiden ääneneristävyyttä kokeellisesti tai laskennallisesti määritetyn lähtötiedon avulla (Hopkins, 2007).

2.1.2 Liitoksen eristävyden määrittäminen

Liitoksen värähtelytaseroitus riippuu valmiissa rakennuksessa liitoksen rakenneosien reunaehdoista, vaimennuksesta ja dimensioista. Liitostyyppien akustisen suorituskyvyn kuvaamiseen on kehitetty tilanteesta riippumaton suure, värähtelyeristävyys K_{ij} , jonka avulla liitoksen yli tapahtuva värähtelytasero voidaan selvittää. Värähtelyeristävyys liitoksen elementtien i ja j välillä saadaan (8) (Gerretsen 1996):

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log_{10} \left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right), \quad (8)$$

missä l_{ij} on rakenneosien i ja j välisen liitoksen pituus [m], a on rakenneosan absorptiopi-tuus [m] (9):

$$a_i = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}}, \quad (9)$$

missä c_0 on äänen nopeus ilmassa [m/s], T_s on rakenteellinen jälkikaiunta-aika [s], f_{ref} on referenssitaajuus [1000 Hz] ja f on tarkasteltava taajuus [Hz]. Absorptiopi-tuus on tapa kuvata rakenteen vaimennusominaisuuksia kuvitteellisen täysin absorboivan reunan avulla. (Gerretsen 1996)

Homogeenisille rakenneosille värähtelyeristävyys voidaan määrittellä myös taivutusaallon tehon läpäisy-suhteesta γ_{ij} (10) (Gerretsen, 1996):

$$K_{ij} = -10 \log_{10} \gamma_{ij} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_{c,i}}}, \quad (10)$$

missä $f_{c,i}$ on levyn i kriittinen taajuus [Hz].

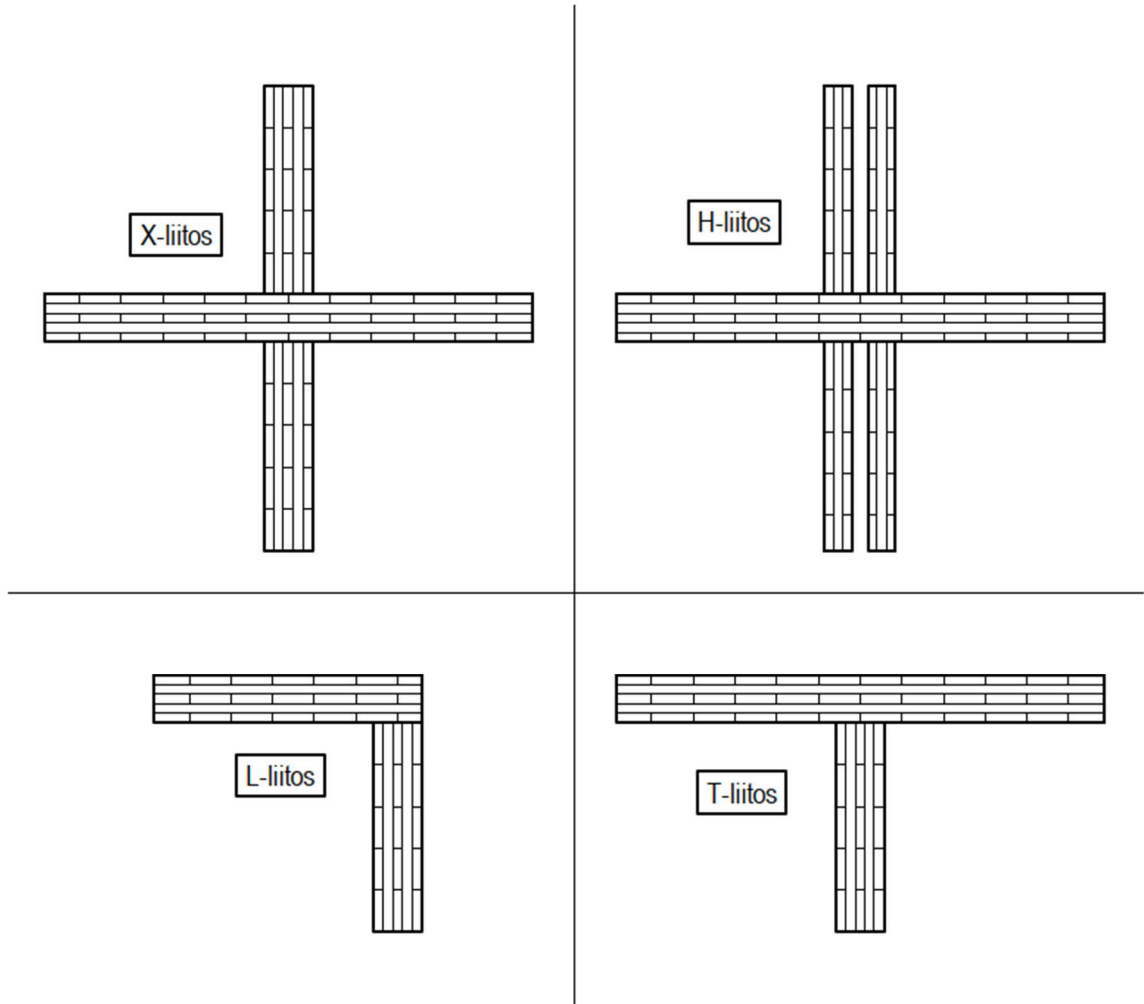
Gerretsen (1996) määritteli värähtelyeristävyuden aikaisempien tutkimusten (1976 ja 1986) menetelmillä. Värähtelyeristävyys on sievennettävissä myös Nightingalen (2003) SEA:lla johtamassa kaavoissa, joten SEA:n rajoitukset, kuten riittävä mooditiheys, diffuusi värähtelykenttä ja kohtalainen vaimennus, pätevät myös värähtelyeristävyyteen. Värähtelyeristävyys ei siten sovellu esimerkiksi rakenteille, joiden sisäiset häviöt määrittävät rakenteen kokonaishäviöin, kuten tyypillisesti rankalevyrakenteissa. Toisaalta vahvasti vaimennettujen rakenneosien värähtelykäyttäytyminen ei eroa kenttätilanteiden välillä, koska liitoksista muihin rakenteisiin syntyvät häviöt ovat merkityksettömiä rakenteen sisäisiin häviöihin verrattuna. Tällöin liitostyyppin normalisointi vaimennuksen suhteen ei ole tarpeellista eikä rakenteellista jälkikäiunta-aikaa tarvitse tarkastella. Käytännöllinen tapa tarkastella liitoksen aiheuttamaa vaimennusta on tällöin normalisoitu ja suuntakeskiarvoistettu värähtelynopeuden tasoerotus $\overline{D_{v,ij,n}}$ (11):

$$\overline{D_{v,ij,n}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log_{10} \left(\frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{s_{m,i} s_{m,j}}} \right), \quad (11)$$

missä l_0 on referenssipituus [1 m], s_m on rakenteen pinta-ala, jolta värähtelynopeus on keskiarvoistettu [m^2]. Standardisoitu ja normalisoitu suuntakeskiarvoistettu värähtelynopeuden tasoerotus sisällytettiin myös standardiin SFS-EN ISO 12354-1:2017 rakenneosille, joille värähtelyeristävyuden käyttäminen ei ole sopivaa. (COST FP0702 Chapter 1, 2012; Gerretsen, 2015; SFS-EN ISO 12354-1:2017)

Tästä eteenpäin termiä ”liitoseristävyys” käytetään värähtelyeristävyuden ja normalisoidun ja suuntakeskiarvoistetun värähtelynopeuden tasoerotuksen kattavana yläkäsitteenä.

Rakennuksien tavallisimpia liittostyyppiä ovat kuvassa 3 esitetyt L-, X-, T- ja H- liittokset. Standardeissa ja kirjallisuudessa esitetyt liittoseristävyydet esitetään yleensä liittostyypeittäin laskelmiin, simulointeihin tai mittauksiin perustuen erilaisten suureiden funktiona.

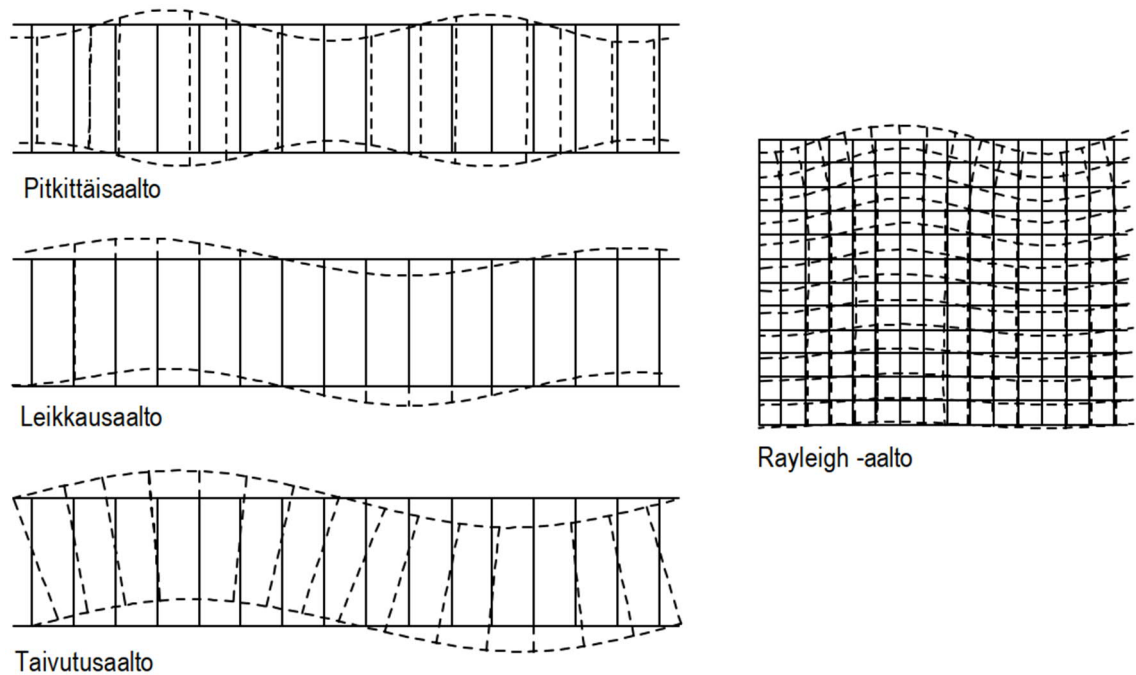


Kuva 3. Yleisimmät liittostyydit.

2.1.3 Värähtely levyssä

Levyrakenteissa etenevä värähtely voidaan jakaa neljään aaltomuotoon (kuva 4): taivutusaaltoon, leikkausaaltoon, näennäispitkittäiseen aaltoon ja Rayleigh-aaltoon. Näistä aaltotyypeistä taivutusaalto ja poikittainen leikkausaalto ovat rakenteiden akustiikan kannalta tärkeimpiä, koska ne värähtelevät levyn pintaan nähden kohtisuorassa ja aiheuttavat levyrakenteisiin muita aaltomuotoja suurempia siirtymiä, jotka johtavat suurempaan ilmäaänen säteilyyn. Näennäispitkittäisiä ja tasoleikkausaaltoja kutsutaan tasoaalloiksi. Niissä värähtely sekä aaltoliike etenevät levyn pinnan suuntaisesti, jolloin levyn pinnalla tapahtuvat venymät ovat seurausta Poissonin venymäilmiöstä (Vigran, 2008). Rayleigh-

aaltoja esiintyy ainoastaan huomattavan paksuissa levyissä, jotka jäävät rakennusakustiikan sovelluksien ulkopuolelle. (Rindel, 2007; Hopkins, 2007)



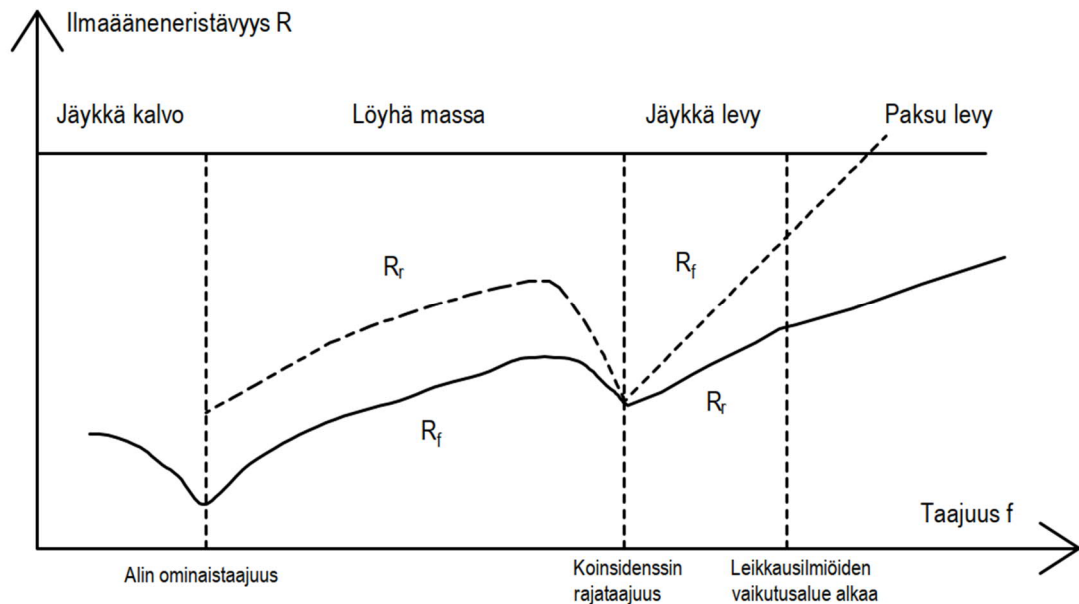
Kuva 4. Aaltotyypit levyssä

Hopkins (2007) totesi kirjassaan että, sivutiesiirtymien vierekkäisten huoneiden tapauksessa ainoastaan taivutusaaltojen tarkastelu on tarpeellista, mutta kun aalto etenee rakenteissa pitkälle, tasoaaltojen huomioon ottaminen on tarpeellista. Standardin SFS-EN EN ISO 12354-1 päivitetystä versiossa todetaan tasoaaltojen aiheuttavan raskaiden rakenteiden liitoseristävyyden taajuusriippuvuutta keskitaajuuksista ylöspäin.

Levyrakenteen värähtely voidaan jakaa resonoivaan värähtelyyn ja pakkovärähtelyyn. Pakkovärähtely tarkoittaa värähtelyä, missä levy on pakotettu liikkeeseen ilman liikettä vastaavaa ominaisuutta. Ilmääniheräte aiheuttaa levyyn pakkovärähtelevän värähtelykentän, minkä aaltoluku vastaa yleensä levyä ympäröivän ilmatilan värähtelykenttää. Resonoiva värähtely on rakenteen ominaisuutensa mukaan värähtelyä, mikä aiheutuu rakenteiden akustiikassa yleensä levyn reunoilta heijastuneesta pakkovärähtelystä. (Rindel, 2007)

Kaavassa (7) viitataan ainoastaan ilmäneristävyyden R resonoivaan osaan, koska sen johtamisessa oletettiin rakenteissa etenevän värähtelyn olevan ainoastaan resonoivaa. Raskailla ja monoliittisilla rakenteilla tämä oletus on perusteltu, koska rakenteiden kriit-

tiset taajuudet (kappale 2.1.4) ovat matalia, jolloin resonoiva värähtely dominoi rakenteiden värähtelykenttiä rakennusten akustiikan taajuusalueilla (Rindel, 2007). Kun kaavaa (7) ja standardin menettelyä sovelletaan rakenteisiin, joilla on suuri kriittinen taajuus, täytyy kriittisen taajuuden alapuolella värähtelykenttää hallitseva pakkovärähtely huomioida sivutien ilmääneneristävyyden arvioinnissa (Schoenwald, 2012). Kuvassa 5 on esitetty isotrooppisen levyrakenteen ilmääneneristävyyden määrittävät tekijät sekä pakko- ja resonoivan värähtelyn osuudet ilmääneneristävyydessä.



Kuva 5. Levyrakenteen ilmääneneristävyyden määrittävät tekijät taajuustasossa. R_r ilmääneneristävyyden resonoiva komponentti, R_f pakotettu komponentti.

Nightingalen et al. (2003) tutkimuksessa tarkasteltiin ensimmäisen kertaluvun rakenteellisia sivuteitä SEA:lla ja päädyttiin lopulta standardin EN12354-1:2000 kaavaan (7) nähdessä identtiseen lopputulemaan, kun käytetään rakenneosien ilmääneneristävyydestä ainoastaan resonoivaa osaa. Standardin laskentamalli ei ollut varsinaisesti johdettu SEA:lla, joten tämä tutkimustulos osoitti SEA:n rajoitusten pätevän standardin mukaiseen laskentamalliin.

Villot ja Guigou-Carter (2000) tutkivat analyttisesti pakko- ja resonoivan värähtelyn etenemistä vapaasti tuetussa liitoksessa päätyen lopputulokseen, jonka mukaan liitoksen yli etenevästä värähtelystä pakkovärähtelyn osuus voidaan jättää huomioimatta. Kirjallisuudessa tähän tutkimukseen on viitattu usein, kun oletusta ainoastaan resonoivan värähtelyn etenemisestä on haluttu perustella. Dave ja Irwin (2016) osoittivat kuitenkin Villotin ja

Guigou-Carterin laskelmat virheellisiksi ja totesivat, ettei pakkovärähtelyä voi jättää huomioimatta Villotin ja Guigou-Carterin perusteluilla. Toisaalta Dave ja Irwin eivät pystyneet osoittamaan, että pakkovärähtely etenee liitoksen yli.

2.1.4 Koinsidenssi

Tärkein levyn akustiseen käyttäytymiseen vaikuttava rajataajuus on koinsidenssin rajataajuus, jonka alinta arvoa tulokulmalla 90° kutsutaan kriittiseksi taajuudeksi. Taivutusaallon nopeus levyssä on taajuusriippuvainen suure, toisin kuin muiden aaltotyyppien etenemisnopeus. Taivutusaallon nopeus kasvaa taajuuden kasvaessa, jolloin tietyllä taajuudella taivutusaallon nopeus levyssä on yhtä suuri kuin ilmassa etenevän ääniaallon. Tällöin myös molempien aaltojen aallonpituudet ovat yhtä suuret, jolloin aaltomuodot kytkeytyvät tehokkaasti ja ääniaalto läpäisee levyn juurikaan vaimenematta. Koinsidenssin rajataajuus lasketaan yhtälöllä (12):

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)m}{Eh^3}}, \quad (12)$$

missä μ on Poissonin suhde [-], m on levyn pintamassa [kg/m^2], E on levyn kimmokerroin [Pa] ja h on levyn paksuus [m]. (Rindel, 2007; Hongisto, 2020)

2.1.5 SäteilYTEHOKKUUS

Värähtelevä levy ei välttämättä säteile ääntä tehokkaasti. Tätä ilmiötä kuvataan säteilYTEHOKKUUDELLA σ [-]. SäteilYTEHOKKUUS määritellään äänilähteen säteilemän äänitehon ja ekvivalentin jäykän männän säteilemän äänitehon avulla (13):

$$\sigma = \frac{W}{\rho_0 c_0 S \langle v^2 \rangle}, \quad (13)$$

missä W on levyn säteilemä ääniteho [W], ρ_0 on ilman tiheys [kg/m^3], S levyn pinta-ala ja $\langle v^2 \rangle$ on levyn keskimääräinen tehollinen värähtelyn nopeus [m/s]. SäteilYTEHOKKUUS voi teoriassa saada arvoja nollan ja noin neljän väliltä, mutta käytännön mittauksissa se rajoittuu pienempiin arvoihin. Kriittisen taajuuden alapuolella taivutusaallon aiheuttamat äänenpainet kumoutuvat osittain akustisen oikosulun myötä ja levy ei siten säteile ääntä

koko pinta-alaltaan. Kriittisellä taajuudella ja sen yläpuolella levy säteilee ääntä tehokkaasti, jolloin säteilytehokkuus saa arvoja läheltä ykköstä tai sen yläpuolelta. (Rindel, 2007; Hongisto, 2020)

Säteilytehokkuuden määrittäminen on haastavaa kriittisen taajuuden alapuolella. Leppingtonin (1981) mukaan säteilytehokkuus voidaan laskea kriittisen taajuuden alapuolella, kun oletetaan levyn olevan homogeeninen, suorakulmainen sinimuotoisilla ominaismuodoilla ja levyn mooditiheys on riittävä säteilytehokkuuden tarkastelemiseen jatkuvana funktiona taajuuden suhteen (14):

$$\sigma = \frac{b + c}{\pi \psi k b c \sqrt{(\psi^2 - 1)}} \left(\ln \left(\frac{\psi + 1}{\psi - 1} \right) + \frac{2\psi}{\psi^2 - 1} \right), \quad (14)$$

missä b ja c ovat levyjen sivujen pituudet [m], ψ on kriittisen taajuuden ja tarkasteltavan taajuuden suhde [-]. Kaava olettaa levyn vapaan tuennan. Leppington päivitti myöhemmin kaavaan termin levyn reunaehtojen huomioimiseksi. Kriittisen taajuuden yläpuolella säteilytehokkuus saadaan Leppingtonin mukaan (15):

$$\sigma = \frac{1}{1 - \psi^2}, \quad (15)$$

Säteilytehokkuuden määrittämiseen on Leppingtonin tutkimuksien jälkeen kehitetty tarkempia, mutta huomattavasti monimutkaisempia menetelmiä, kuten Davy (2009).

2.1.6 Häviöt

Häviökertoimella η [-] ilmaistaan resonoivan värähtelykentän vaimenemista rakenteessa. Rakenteen häviökerroin koostuu useasta tekijästä, kuten sisäisistä häviöistä, rakenteen kytkennöistä aiheutuvista häviöistä ja säteilyhäviöistä. Kokonaishäviökertoimella η_{kok} tarkoitetaan rakenteiden kaikkien häviökertoimien summaa ja se voidaan määrittää kokeellisesti (16):

$$\eta_{\text{kok}} = \frac{2,2}{f T_s}, \quad (16)$$

Kokonaishäviökerroin voidaan jakaa komponentteihin (17):

$$\eta_{\text{kok}} = \eta_{\text{int}} + \frac{2\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f m} + \frac{c_0}{\pi^2 S \sqrt{f f_{\text{cr}}}} \sum l_k \alpha_k, \quad (17)$$

missä η_{int} on sisäinen häviökerroin [-], l_k on tarkasteltavan rakenteen liitoksen sivun pituus kehällä k [m], α_k on taivutusaaltojen absorptiokerroin kehällä k [-]. Kaavan keskimäinen termi edustaa säteilyä ja viimeinen kytkentöjä. (SFS-EN ISO 12354-1:2017)

Sisäiset häviöt syntyvät materiaalin sisällä värähtelyenergian muuttumisesta lämmöksi (Hopkins, 2007). Kytkennästä aiheutuvat häviöt ovat seurausta värähtelyaaltojen ja energian siirtymisestä kytkentöjen kautta ympäröiviin rakenteisiin tai sen rakenteen rajapinnoissa tapahtuvan heijastumisen aiheuttamasta heikkenemisestä. Säteilähäviöt syntyvät edellisessä kappaleessa esitellyn ilmiön seurauksena. Rakenteiden kokonaishäviö on yleensä taajuusriippuvainen suure. (Hongisto, 2020)

2.2 Standardin SFS-EN ISO 12354:2017 arviointimenetelmä

Tässä kappaleessa esitetään lyhyesti standardin SFS-EN ISO 12354:2017 osien 1 ja 2 mukainen menettely tilojen välisen ääneneristävyyden määrittämiseksi tämän tutkimuksen kannalta merkittävien osien. Standardi julkaistiin alun perin vuonna 2000, jolloin se oli suunniteltu käytettäväksi pääasiassa aikansa mukaisten raskaiden rakenteiden arviointiin. Alkuperäisen julkaisun jälkeen rakentaminen alkoi kehittyä yhä enemmän kohti kevyempiä rakenteita, jolloin kasvavan kysynnän vuoksi standardia päivitettiin vuonna 2017 soveltumaan paremmin kevyiden rakenteiden arviointiin. (Gerretsen, 2003; SFS-EN ISO 12354:2017)

Tilojen välillä tapahtuva äänen siirtyminen on monimutkainen ilmiö, joten käytännöllinen suunnittelutyöhön sopivan arviointimalli on standardisoitu ilmiön arvioimiseksi ja toisaalta ilmiön tarkastelun yhtenäistämiseksi. Standardin menetelmä perustuu äänen siirtymisen arviointiin rakenneosien mitattavien ominaisuuksien perusteella, jolloin menetelmä soveltuu Euroopan Unionin vapaan kaupan asettamiin vaatimuksiin (Gerretsen, 2008). Standardin laskentamalli on laajasti käytössä Euroopassa ja sen kehittämiseen liittyen on tehty paljon rakenteellisia sivutiesiirtymiä koskevaa tutkimusta.

2.2.1 Arviointimalli

Standardissa SFS-EN ISO 12354-1:2017 tilojen välinen ääneneristävyys R' on määritelty identtisesti kaavan (1) kanssa, mutta kokonaisläpäisysuhdetta on tarkennettu jakamalla se sivutietyypeittäin läpäisysuhteisiin (18):

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s, \quad (18)$$

missä yksittäiset läpäisysuhteet vastaavat yksittäiseen sivutiehen sisältyvän vastaanottohuoneen rakenneosan vastaanottohuoneeseen säteilemän äänitehon suhdetta erottavan rakenteen pinnalle lähetyshuoneessa kohdistuvaan äänitehoon. Alaindeksillä d viitataan erottavaan rakenteeseen ja alaindeksillä f viitataan sivuaviin rakenteisiin. Termeillä τ_e ja τ_s kuvataan suoraa ja epäsuoraa ilmatien välityksellä tapahtuvaa sivutiesiirtymää, joskin niitä ei tässä työssä tarkastella, koska ne eivät ole rakenteellisia sivutiesiirtymäreittejä. Termeillä n , m ja k kuvataan sivutietyyppihin liittyvien siirtymäreittien lukumäärää. (SFS-EN ISO 12354-1:2017)

Standardin menettelytavalla rakenteen vastaanottohuoneeseen säteilevä ääni voidaan katsoa usean rakenteellisen sivutien kautta siirtyvän runkoäänen summaksi. Lähetyshuoneessa sijaitsevaa rakennetta merkataan kirjaimella i ja vastaanottohuoneessa olevaa rakenneosaa merkataan kirjaimella j , jolloin jokaiseen sivutiehen liittyvää läpäisysuhdetta τ_{ij} voidaan kuvata sivutiesiirtymän ilmaääneneristävyydellä R_{ij} (19):

$$\tau_{ij} = 10^{\frac{-R_{ij}}{10}}, \quad (19)$$

Suomessa tilojen väliset ääneneristysvaatimukset on annettu standardisoituna äänitasoerona, jolloin ilmaääneneristävyys R' täytyy muuttua vastaamaan määräyksiä (Ympäristöministeriö, 2018). Standardisoidun äänitasoeron ja ilmaääneneristävyuden yhteys on esitetty kaavassa (20):

$$D_{nT} = R' + 10 \log_{10} \left(\frac{0,32V}{S_s} \right), \quad (20)$$

missä V on vastaanottohuoneen tilavuus [m^3]. (SFS-EN ISO 12354-1)

2.2.2 Rakenteiden tyypitys

Standardi jakaa rakenteet kahteen tyyppiin: A ja B. Tyypin A rakenne määritellään rakenteeksi, jonka rakenteellinen jälkikaiunta-aika (ts. kokonaishäviö) määräytyy pääasiassa siihen kiinnittyvien rakenteiden perusteella ja rakenteen pituussuunnassa liitoksesta poispäin tapahtuva värähtelyn vaimeneminen on vähemmän kuin kuusi desibeliä (tarkasteltuna terssikaistoittain vähintään 1000 Hz saakka). Tyypin A rakenteiksi standardi luokittelee betonin, massiivipuun sisältäen CLT:n, lasin, metallin ja muuratut rakenteet.

Tyypin B rakenne on rakenne, joka ei ole tyypin A rakenne. Tyypin B rakenteesta annetaan esimerkiksi rankarunkoiset kipsilevyseinät. Tyypin B rakenteiden vaimennus on siis niin suurta, ettei rakenteiden kiinnittäminen muihin rakenteisiin aiheuta niiden värähtelykäyttäytymiseen muutoksia. Rakenteen tyyppi voi myös vaihdella tarkasteltavan taajuusalueen mukaan. Tyypin A rakenteiden liitoksia kuvataan värähtelyeristävyydellä K_{ij} ja tyypin B rakenteiden liitoksia normalisoidulla ja suuntakeskiarvoistetulla värähtelynopeuden tasoerotuksella $\overline{D_{v,ij,n}}$.

2.2.3 Sivutien määrittäminen kenttätilanteessa

Standardi esittää kaksi mallia sivutiesiirtymän laskemiseen: yksinkertaistetun ja yksityiskohtaisen mallin. Yksinkertaistetussa mallissa laskenta suoritetaan yksilukuarvoilla ja yksityiskohtaisen mallin mukaisia korjauksia tekemättä.

Yksityiskohtaisen laskennan mukaan laboratoriotilannetta vastaava lähtötieto täytyy muuttaa vastaamaan kenttätilannetta, missä tarkasteltava rakenne liittyy rakennuksen muihin rakenteisiin. Rakennuksessa tehtävään tarkasteluun viitataan alaindeksillä *situ*. Sivuteiden määrittäminen jaetaan kahteen eriävään menettelyyn rakenteiden tyyppien mukaan. Tyypin A rakenteille sivutien ilmaääneneristävyys R_{ij} määritellään (21):

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log_{10} \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right), \quad (21)$$

missä $R_{i,situ}$ on rakenteen i ilmaääneneristävyys [dB], $\Delta R_{i,situ}$ on rakenteen i pinnalle rakennetun kevyen lisävuorauksen parannusluku [dB], $\overline{D_{v,ij,situ}}$ on kenttätilannetta vas-

taava suuntakeskiarvoistettu värähtelynopeuden tasoerotus [dB] ja S_s on erottavan rakenteen pinta-ala [m²]. $\overline{D_{v,ij,situ}}$ saadaan vähentämällä värähtelyeristävydestä kenttätilan-teen arvoilla laskettu normalisointitermi. Tähän tarvitaan kenttätilannetta vastaava rakenteellinen jälkikaiunta-aika, jonka laskemiseen tietyn tyyppisillä rakenteilla on annettu ohjeita standardin liitteessä C. Tyypin A rakenteiden ilmääneneristävydet tulee standardin mukaan korjata kenttätilannetta vastaaviksi kaavalla (22):

$$R_{situ} = R - 10 \log_{10} \left(\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right), \quad (22)$$

missä T_s on rakenteellinen jälkikaiunta-aika kenttätilanteessa (*situ*) ja laboratoriossa (*lab*).

Tyypin B rakenteille sivutien ilmääneneristävyys R_{ij} määritellään (23):

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,n}} + 10 \log_{10} \left(\frac{S_s}{l_0 l_{ij}} \right), \quad (23)$$

missä rakenteiden ilmääneneristävydellä viitataan ainoastaan resonoivaan osaan, l_0 on referenssipituus [1 m], l_{ij} liitoksen pituus [m]. Kytkemättömän kaksirunkoisen rakenteen tapauksessa tulee määritellä, tarkastellaanko kokonaista seinärakennetta vai ainoastaan toista puoliskoa.

2.2.4 Rajoitukset

Mallin käyttöä rajoittavia tekijöitä annetaan viisi:

- a) Mallia voidaan käyttää ainoastaan rakenteille, joiden värähtelyeristävyys tai normalisoitu ja suuntakeskiarvoistettu värähtelytasoerotus tunnetaan tai voidaan laskennallisesti selvittää.
- b) Malli toimii ainoastaan rakenteilla, joiden äänen säteilyominaisuudet ovat samantlaiset.
- c) Isoja lattioita tai lattioita, missä on pilareita ja kevyitä seiniä, huoneen lattiaa ei voida käsitellä yksittäisenä rakenteena. Niiden tapauksessa on annettu ohjeita standardin liitteessä J.
- d) Ainoastaan ensimmäisen kertaluvun siirtymäreitit huomioidaan.
- e) Malli toimii ainoastaan vierekkäisille tai päällekkäisille tiloille.

2.2.5 Lähtötiedot

Standardin laskentamalli tarvitsee lähtötietoa liitoksien värähtelykäyttäytymisestä, joka voidaan hankkia joko kokeellisesti, laskennallisesti tai näiden yhdistelmänä. Standardin liitteissä E ja F on annettu lähtötietoa raskaille ja kevyille rakenteille. Raskaiden rakenteiden osalta annettu tieto perustuu mittaustuloksiin ja numeerisiin mallinnuksiin. Kevyiden rakenteiden osalta tietoa on annettu erikseen CLT-rakenteille, joita kuvataan värähtelyeristävyydellä ja rankarakenteille, joita kuvataan normalisoidulla ja suuntakeskiarvoistetulla värähtelynopeuden tasoerotuksella.

CLT-rakenteiden värähtelyeristävyydelle on annettu kaavoja T- ja X-liitoksen tapauksissa kenttätilanteissa tehtyihin mittauksiin perustuen. Värähtelyeristävyys riippuu jokaisessa tapauksessa taajuudesta ja ainoastaan yhdessä tapauksessa liitoksen rakenteiden massasuhteista. Standardi ilmoittaa lähtötiedon toimivan ainoastaan, kun rakenteiden massasuhteet ovat välillä $0,5 < m_1/m_2 < 2$, eikä rakenteiden kiinnityksistä ole annettu tietoa. (SFS-EN ISO 12354-1:2017)

Normalisoidulla ja suuntakeskiarvoistetulla värähtelynopeuden tasoerolla kuvatuille liitoksille annettu lähtötieto koskee puu- ja teräsrankaisia rakenteita, missä massaerot rakenteiden välillä eivät ole suuria. Rankarakenteiden tapauksessa on enemmän rajoituksia kuin CLT-rakenteilla ja mittaustiedon, mihin empiirinen malli perustuu, hajonnan kerrotaan olevan ± 6 dB. Tästä syystä kansallisen lähtötiedon keräämistä suositellaan. Lähtötietoa on annettu muutamille T- ja X-liitoksille, kuten CLT:n tapauksessa, lähtötieto on taajuusriippuvaista.

2.2.6 Ilmaääneneristävyyden korjaaminen kriittisen taajuuden alapuolella

Alkuperäisessä vuonna 2000 julkaistussa standardissa huomautettiin, että kriittisen taajuuden alapuolella rakenneosien ilmaääneneristävyyden tulisi perustua ainoastaan resonoivasti värähtelevään osaan, mutta standardi ei antanut ohjeistusta tämän ilmiön huomioimiseen (Gerretsen, 2005, EN-12354-1:2000). Kevyissä rakenteissa kriittinen taajuus nousee yleensä suurimmille taajuuksille kuin raskailla rakenteilla, joten ilmiön huomioiminen sai merkittävästi huomiota standardin päivitetyn version kehitystyössä (COST FP0702, 2012; Schoenwald, 2012).

Nightingale (1995) esitti kevyitä, kaksirunkoisia rankarakenteita koskevassa tutkimuksessaan kriittisen taajuuden alapuolella kaavan (7) toimivan, kun siitä korjataan pois pakkovärähtelevä osuus. Tutkimuksessa verrattiin kaavaa (7) intensiteettimittauksilla saatuihin arvoihin pakkovärähtelyn osalta korjatuilla lähtöarvoilla ja ilman korjausta. Korjaus tehtiin kriittisen taajuuden alapuolella pakko- ja vapaasti värähtelevien värähtelykenttien nopeuksien avulla, jotka mitattiin pakkovärähtelyn yhteydessä ilmaääniherätteellä ja vapaan värähtelyn yhteydessä rakenteeseen kiinnitetyllä voimaherätteellä. Korjatuilla arvoilla tehdyt laskelmat johtivat hyviin tuloksiin sivutien eristävyysien ja tilojen välillä mitattujen kokonaiseristävyysien tarkastelussa.

Eurooppalaisessa COST-hankkeessa FP0702 (2012) resonoivan ilmasteneristävyyden määrittämistä tutkittiin ja tuloksena vaihtoehtoiset menetelmät saatiin vähennettyä kolmeen: Gerretsenin menetelmään (COST FP0702), laskennallisesti saatavaan korjauskertoimen menetelmään (EN12354-1:2000, Liite B) ja ranskalaisen tutkimuskeskuksen CSTB:n mukaiseen säteilytehokkuuksiin perustuvaan korjauskertoimen menetelmään (Guigou-Carter et al., 2006). Mahn ja Pearse (2012) vertailivat tutkimuksessaan näitä kolmea menetelmää sekä CSTB:n esittämää uudenlaista määritelmää sivutien ilmasteneristävyydelle, missä koko sivutien ilmasteneristävyys määritellään ilmaääniherätteellä eikä rakenneteiden resonoivia ilmasteneristävyyksiä tarvitse määrittää (Villot ja Guigoi-Carter, 2006). Tutkimuksessa CSTB:n menetelmillä saavutettiin mittauksiin verrattuna parhaat tulokset muiden menetelmien osoittautuessa epätarkoiksi. Yleisesti CSTB:n menetelmä uudelleen määritetyllä sivutien ilmasteneristävyydellä johti parhaaseen tulokseen ja CSTB:n korjauskertoimen menetelmä toimi parhaiten standardin menetelmään tehtävään korjaukseen perustuvista menetelmistä. Tulos on mielenkiintoinen, koska pakkovärähtelyn sisältävä malli osoittautui parhaaksi menetelmäksi standardin EN 12354:2000 oletuksen vastaisesti. Tutkimus huomauttaa, että pakkovärähtely eteneminen liitoksen yli pitäisi huomioida, erityisesti kaksinkertaisilla rakenteilla.

Schoenwald (2012) vertasi tutkimuksessaan CSTB:n menetelmää, osittain empiiriseen SEA:an perustuvaa menetelmää (Schoenwald, 2008) sekä Gerretsenin (2005) esittämää korjausta EN 12354-1 menetelmään pohjoisamerikkalaiselle rakentamiselle tyypillisessä kaksirunkoisessa X-liitoksessa. CSTB:n ja Schoenwaldin menetelmät ovat muuten samanlaisia, mutta Schoenwaldin menetelmässä käytetään voimaherätettä ja CSTB:n menetelmässä ilmaääniherätettä värähtelytaseroitusten määrittämiseen. Kaikki kolme menetelmää antoivat hyvin samanlaisia ja mittauksia vastaavia tuloksia, etenkin CSTB:n ja

Schoenwaldin menetelmät. Tutkimuksen liitoksessa oli rankojen välissä ääntä vaimentavaa materiaalia, joten vaimentamattoman kaviteetin tarkastelun huomautetaan olevan tulevaisuudessa tarpeellista, koska silloin kaviteetin ilmassa etenevä pakkovärähtely ei vaimene tehokkaasti ja menetelmien välille odotetaan eroavaisuuksia. Ilmaäänierätettä käyttävän mallin heikkoudeksi ja käyttöä rajoittavaksi tekijäksi ilmoitetaan massiiviset koejärjestelyt rakenteiden suojaamiseksi.

Lopulta standardiin päädyttiin tekemään korjaus säteilytehokkuuksiin perustuvalla CSTB:n korjauskertoimella (24):

$$R^* = R + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right), \quad (24)$$

missä R^* on rakenteen ilmaaneneristävyyden resonoivan värähtelyn osa [dB], σ_a on ilmaäänierätteellä mitattu säteilytehokkuus [-] ja σ_s on voimaherätteellä mitattu säteilytehokkuus [-].

2.2.7 Askelääneneristävyys

Askeläänen sivutiesiirtymän arviointimalli on esitetty standardin osassa kaksi. Askeläänen siirtymisen arviointiin voidaan käyttää samoja suureita kuin ilmaäänen siirtymisen yhteydessä, kun suureet on määritetty resonoivan värähtelyn suhteen (Schoenwald, 2012). Standardin mukaan askeläänitaso L'_n [dB] määrittään (25):

$$L'_n = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right), \quad (25)$$

missä $L_{n,d}$ on normalisoitu askeläänitaso erottavan rakenteen kautta [dB], $L_{n,ij}$ normalisoitu askeläänitaso sivuavien rakenteiden kautta [dB] ja n on rakenteiden määrä. Normalisoitu askeläänitaso erottavan rakenteen kautta saadaan tyypin A rakenteelle kaavan (26) mukaisesti:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right), \quad (26)$$

missä ΔL_{situ} on lattiarakenteen parannusluku kenttätilanteessa [dB]. Tyyppin B rakenteilla käytetään kaavaa (27):

$$L_{n,ij} = L_{n,\text{situ}} - \Delta L_i + \frac{R_i - R_j}{2} - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{S_i}{l_0 l_{ij}}} \right) \quad (27)$$

2.3 Massiivipuurakenteiden tutkimus

Massiivipuutuotteet koostuvat liimaamalla tai mekaanisilla kiinnikkeillä toisiinsa kiinnitetystä puutavarasta. Tavanomaisia seinä- ja laattarakenteina käytettäviä tuotteita ovat esimerkiksi ristiinliimattu massiivipuu CLT (*cross-laminated timber*), puutapeilla kootut massiivipuulevyt DLT (*dowel-laminated timber*) ja nauloilla kootut massiivipuulevyt NLT (*nail-laminated timber*). (Puu-Info, 2020)

Mahn ja Müller-Trapet (2019 ja 2020) tutkivat Kanadassa yleisimpien laminoitujen puutuotteiden sivutiesiirtymien kannalta merkittävimpiä akustisia ominaisuuksia NRC:n (*engl. National Research Council*, Kanadan kansallinen tutkimusneuvosto) laboratoriossa. Tutkimusta hankaloitti äänen vuotaminen levyissä olevista ilmaraoista, mikä oli pahinta NLT:llä. Koolauksin paljaan massiivipuurakenteen sisäpintaan tehtävät vuoraukset osoittautuivat mittausten perusteella tarpeellisiksi useimpien maiden ääneneristävyysvaatimuksien täyttämiseen. Vertailluista massiivipuutuotteista CLT osoittautui ääneneristysominaisuuksien puolesta parhaiten toimivaksi.

CLT:n suosio puurakenteisten kerrostalojen runkomateriaalina näkyy tehdyssä tutkimuksessa – etenkin sivutiesiirtymiä koskevaa tutkimusta on muista massiivipuurakenteista tehty selkeästi vähemmän. Tämä kappale käsittelee siten pääasiassa CLT-rakenteille tehtyä tutkimusta.

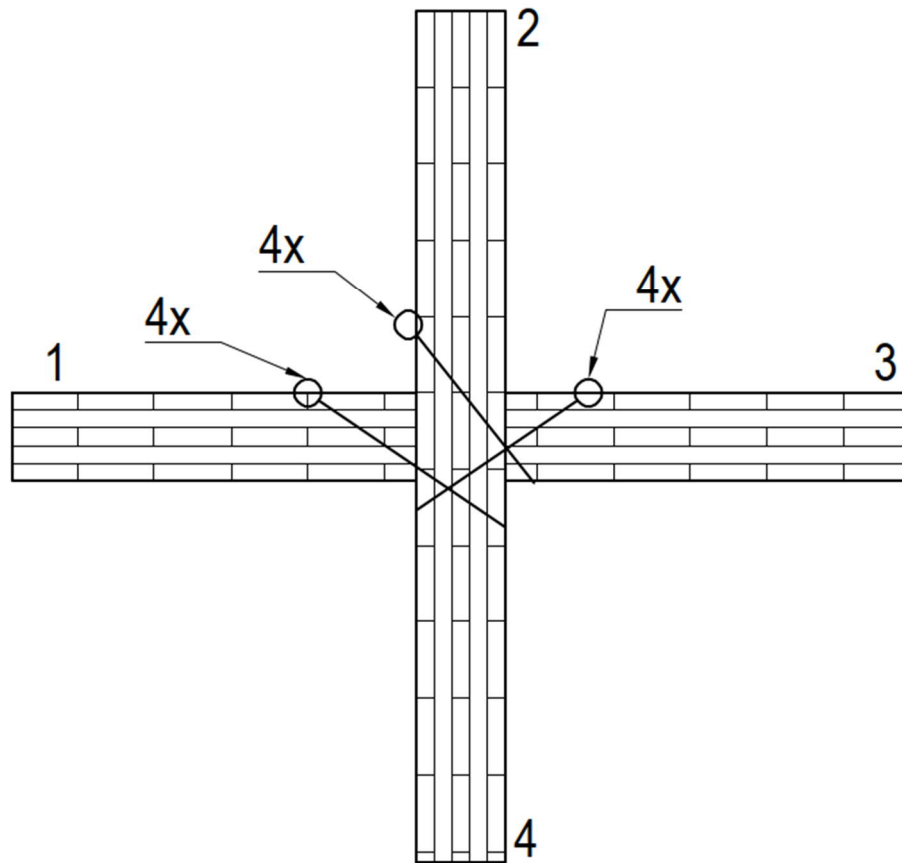
2.3.1 Kiinnikkeiden vaikutus massiivipuurakenteiden värähtelykäyttäytymiseen

Massiivipuurakenteet ovat raskaiden rakenteiden tavoin yksikerroksisia sekä niiden kontaktipinnat muihin rakenteisiin ovat lineaarisia. Betonirakenteista poiketen massiivipuu-

rakenteiden liitokset muihin rakenteisiin eivät kuitenkaan ole jäykkiä, vaan liitokset toteutetaan yleensä erilaisilla kiinnikkeillä, jolloin ne ovat joustavia sekä käyttäytyvät periodisesti. (Morandi et al., 2018; Schoenwald et al., 2013)

Kiinnityksien vaikutusta CLT-rakenteissa tutkittiin laajasti *flanksound* -projektissa, jonka tuloksia esiteltiin useissa tieteellisissä julkaisuissa sekä tutkimuksessa kerättyä dataa on levitetty rakenteiden akustiikan suunnittelijoille hyödynnettäväksi. Tutkimuksessa useita liitostyyppjä tutkittiin täysikokoisella laboratoriomallilla seitsemän eri CLT-valmistajan tuotteilla. Levyjen erilaisten kiinnitysten vaikutusta värähtelyeristävyyteen tutkittiin dokumentoiden tutkittavat kiinnitystilanteet tarkasti ja kiinnityksen asennukset toteuttivat kaikissa tilanteissa samat asentajat. Tutkittavissa CLT-paneeleissa oli yhtä valmistajaa lukuun ottamatta viisi lautakerrosta. (Morandi et al., 2018; Speranza et al., 2016; Barbaresi et al., 2016)

Morandin et al. (2018) julkaisussa analysoitiin *flanksound* -projektin tutkimustuloksia metallisien kiinnikkeiden vaikutuksesta värähtelyeristävyyteen. Vertailu tehtiin ruuvien, kulmalevyjen ja vahvistettujen kulmakiinnikkeiden välillä. Ruuvien vaikutusta liitoksessa tapahtuvaan energian siirtymiseen tutkittiin pysty-X-liitoksella, missä osittain kier-teistetyt ruuvit olivat asennettu kuvan 6 mukaisesti:



Kuva 6. X-liitos ruuvikiinnityksellä Morandi et al. (2018) mukaan.

Liitoksessa mitatun värähtelyeristävyyden tuloksista havaittiin mielenkiintoinen ilmiö: reittien 1-2 ja 2-3 välillä liitoseristävyydessä oli merkittäviä eroja, vaikka ilman kiinnikkeitä värähtelyeristävyyden pitäisi olla reittien välillä yhtä suuret. Parhaat liitoseristävyyden arvot saavuttivat reitit 1–3 ja 1-2. Reitit 1-3 suuri liitoseristävyys oli odotettua, koska levyt ovat erotettu toisistaan, mutta reitin 1-2 yltäminen samoihin arvoihin oli mielenkiintoinen tulos. Kun kiinnikkeitä ei ollut levyjen välillä, päästiin samoihin arvoihin kuin erotetuilla levyillä, vaikka levyillä oli yhteinen kosketuspinta. Yleisesti liitoksen värähtelyeristävyydestä huomataan, että sen taajuuksiin riippuvaisuus on lineaarista 400 Hz alapuolella, jonka jälkeen se nousee kiinnitystavan mukaan. (Morandi et al., 2018)

Toinen Morandin et al. (2018) tekemä mielenkiintoinen havainto liittyy käytettävään ruuvityyppiin – täysin ja osittain kierteistettyjen ruuvien välillä on havaittavissa eroja. Täysikierreruuvi ei kytke levyjä yhtä tehokkaasti yhteen kuin osittain kierteistetty ruuvi, joka ”yhdistää” levyt paremmin vastaten paremmin laskentamallien lineaarista kytkentää. Ruuvityyppien välillä energian siirtyminen on merkittävää pystyliitoksen tapauksessa. Tällöin levyjen välinen kiinnitys on vahvemmin kiinnikkeiden varassa kuin vaakaliitoksissa, missä levyt ovat yleensä päällekkäin, jolloin painovoima kytkee ne yhteen ja ener-

giaa siirtyy tehokkaasti myös levyjen rajapintojen kautta. Ruuvien tyypin ja määrän vaikutusta L-liitoksessa analysoivat myös Speranza et al. (2016), jolloin täysin kierteistetyt ruuvit eivät aiheuttaneet kuoppaa liitoseristävyyteen pienillä taajuuksilla, toisin kuin osittain kierteistetyt ruuvit. Ruuvien määrän puolittaminen johti noin 3-5 desibelin parannukseen liitoseristävyydessä. L-liitos valittiin tarkasteltavaksi liitokseksi, koska siinä energia jakaantuu ainoastaan kahdelle levyille ja kiinnikkeiden vaikutuksen voidaan olettaa olevan suuri. Tästä syystä muissa liitoksissa vaikutukset saattavat olla pienempiä, koska energia jakaantuu useampaan levyyn.

Seuraavaksi Morandin et al. (2018) tutkimuksessa tarkasteltiin ruuvien lisäksi kulmarautojen ja vahvistettujen kulmakiinnikkeiden lisäämisen vaikutusta X-liitoksen värähtelyeristävyyteen. Tarkastelussa huomattiin, ettei kiinnitystapojen välillä pystytty havaitsemaan enää merkittäviä eroavaisuuksia kiinnikkeiden määrän kasvaessa, kun liittyviä paneeleita on monta. Myös lisäkiinnityksien yhteydessä on havaittavissa liitoseristävyyden määräytyvän ennemmin kiinnitystavan perusteella kuin paneelien sijoittautumisen toistensa suhteen. Saman tutkimuksen kulmalevyjen ja vahvistettujen kulmakiinnikkeiden lisäämisen vaikutusta esitteli myös Barbaresi et al. (2016), osoittaen myös kiinnikkeiden lisäämisen johtavan merkityksettömään muutokseen liitoseristävyydessä.

Speranza et al. (2016) analysoivat *flanksound* -projektin mittaustuloksia perinteisten kiinnitystapojen ja uudenlaisen CLT-levyjen nurkista kiinnitettävien kiinnitysvälineiden välillä. Perinteiset ruuviliitokset saavuttivat hieman suuremman liitoseristävyyden, tosin tulokset olivat värähtelyeristävyyden epävarmuuden sisällä.

Flanksound -projektin mittausten tuloksina saatuja värähtelyeristävyyden arvoja verrattiin SFS-EN ISO 12354-1:2017 standardin empiirisiin mittauksiin perustuvaan lähtötietoon. Tuloksista havaittiin standardin yliarvioivan liitoseristävyyttä huomattavasti pienillä taajuuksilla ja aliarvioivan sitä hieman suurillalla taajuuksilla. CLT-rakenteiden ääneneristävyyssominaisuudet ovat heikoimpia pienillä taajuuksilla, joten standardin ja tutkimuksen erot on syytä huomata. Samojen tutkijoiden aikaisemmassa tutkimuksessa on esitetty tämän tutkimusten tuloksilla tehdyn laskennan johtavan parempiin tuloksiin (Di Bella et al., 2017). (Morandi et al., 2018)

Tutkimustulosten osoittaessa värähtelyn siirtyvän kiinnikkeiden kautta, *flanksound* -projektissa päädyttiin tarkastelemaan vielä CLT-levyjen vaimennusominaisuuksia. Sisäisiä

häviökertoimia mitattiin erilaisilla tuentatapauksissa ja huomattiin, ettei kiinnitystapa vaikuta CLT-levyjen rakenteelliseen jälkikaiunta-aikaan. Rakenteellisen jälkikaiunta-ajan tarkastelu herättää epäilyksiä CLT-rakenteiden värähtelykentän diffuusisuudesta pienillä ja keskitaajuuksilla. Myös CLT-levyn moodien limittäytymistä tutkittiin ja havaittiin sen saavuttavan arvon yksi suhteellisen suurilla taajuuksilla. Näiden havaintojen perusteella värähtelyeristävyyden käyttäminen ja CLT:n luokittelu matalan sisäisen häviön materiaaliksi kyseenalaistetaan. (Morandi et al., 2018; Barbaresi et al., 2016)

Schoenwald et al. (2013) tutkivat kiinnikkeiden vaikutusta laboratorio-olosuhteissa vaaka-H-liitoksessa, jossa lattiaa edustava CLT-levy jatkui yhtenäisenä liitoksen yli (kuva 3, H-liitos). Kiinniketyypit olivat samat kuin *flanksound* -projektissa, mutta niiden asennusjärjestys oli eroava. Kyseisessä tutkimuksessa kiinnitykset tehtiin ensin kulma-raudoilla, sitten ruuveilla ja viimeisenä lisättiin vahvistetut kulmakiinnikkeet. Tuloksista on huomattavissa yhteneväisyys *flanksound* -projektin kanssa – kun kiinnitykset on jo tehty yhdellä kiinnikkeellä, kiinnikkeiden lisääminen ei muuta yleensä värähtelyeristävyyttä merkittävästi. Tässä tutkimuksessa huomattiin kuitenkin vahvistettujen kulmakiinnikkeiden tapauksessa poikkeus lattiarakenteiden läpi menevän reitin 2-4 kohdalla. Vahvistettujen kulmakiinnikkeiden lisääminen aiheutti värähtelyeristävyyden vähenemisen yli 10 desibelillä suurimmalla osalla tarkasteltavasta taajuusalueesta. Tutkimuksen mukaan kiinnikkeet toimivat viivamaisina kytkentöinä pienillä taajuuksilla ja muuttuvat pistemäisiksi suurilla taajuuksilla, jolloin niiden vaikutus värähtelyn siirtymisessä liitoksen yli on vaatimatonta yhtenäisenä jatkuvassa rakenteessa.

2.3.2 Joustavien eristimien vaikutus rakenteelliseen sivutiesiirtymään

Perinteinen tapa vähentää liitoksen yli siirtyvää värähtelyä on käyttää elastisia eristimiä liitoksen rakenteiden välillä, joiden tarkoitus on heikentää liitoksen rakenteiden välistä kytkentää (Kylliäinen et al., 2017). Näitä eristimiä käytetään myös puurakenteiden yhteydessä ja niiden vaikutusta rakenteiden ääneneristävyyteen sekä värähtelykäyttäytymiseen on tutkittu useassa julkaisussa.

Tärinäeristimillä saavutetaan eristävyyttä rakenteiden ja eristimien muodostaman systeemin alimman ominaistaajuuden yläpuolella, jolloin eristävyys perustuu kuormituksen aiheuttamaan painumaan eristimessä. Lisäksi eristimillä on kuormitusalue, jolla ne toimivat optimaalisesti sekä suurin sallittu jännitys, minkä ne kestävät ilman muutoksia niiden me-

kaanisiin ominaisuuksiin. Näistä syistä tärinäeristimet täytyy mitoittaa niihin kohdistuvien kuormitusten perusteella, jotka vastaavat mahdollisimman yleistä kuormitustilannetta. Tämä johtaa usein siihen, että eristimet on mitoitettava joka kerroksessa sekä kerroksen sisällä kuormituksen mukaan erikseen. (Kylliäinen et al., 2017)

Di Bella et al. (2019) suorittivat täysikokoisen laboratoriotutkimuksen useille CLT-rakenteisille vaaka- ja pystyliitoksille ilman joustavia eristimiä ja niiden kanssa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös värähtelyn siirtymistä liitoksen monimutkaisuuden suhteen sekä eristimien vaikutusta CLT-elementtien sisäisiin häviöihin. Tutkimuksen mukaan joustavilla eristimillä on mahdollista saavuttaa merkittäviä parannuksia värähtelyeristävyyteen, mutta niillä voidaan myös heikentää joidenkin reittien eristävyttä. Esimerkiksi vaaka-X-liitoksessa, missä lattiaa vastaava rakenne jatkuu yhtenäisenä liitoksen yli, värähtelyeristävyys laski huomattavasti, kun siihen liittyviä seiniä edustavat rakenteen eristettiin. Tässä tilanteessa värähtelyenergia ei pääse jakaantumaan lattiarakenteesta seiniin, jolloin suurempi osuus värähtelyenergiasta menee lattiarakennetta pitkin liitoksen yli. Näin ollen jatkuva rakenne ei ole yleensä ole käytäntöön sopiva rakenne. Rakenteellisen jälkikäytön ajan ei havaittu muuttuvan merkittävästi eristimien lisäyksen seurauksena.

Perez ja Fuente (2013) tarkastelivat laboratoriomallilla CLT-rakenteilla eri materiaaleista valmistetuilla eristimillä saavutettavaa parannusta värähtelyeristävyyteen. Mittaukset suoritettiin vaaka-T-liitokselle, jossa eristinmateriaalina käytettiin kuutta erilaista materiaalia: kierrätettyä kumia, puukuitua, kaksikerroksista kierrätettyä kumia, polyuretaania, elastista polystyreeniä, kumia ja lisäksi mittaus suoritettiin ilman eristintä. Tutkituista materiaaleista polyuretaani ja korkki toimivat parhaiten parantaen liitoksen värähtelytaasoeroa etenkin suurilla taajuuksilla. Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi eristimien vaikutusta kulmarautojen alla, mutta tutkimuksen mukaan merkittäviä vaikutuksia kulmarautojen ja ruuvein alle lisätyt eristinkerrokset eivät aiheuttaneet.

Myös *flanksound* -projektissa tutkittiin joustavien eristimien vaikutusta liitoseristävyyteen sekä eristimien toimintaa eri suuruisten kuormituksen alaisena seinä-lattia liitoksessa. Kolmea eri dynaamiselta jäykkyydeltään eroavaa eristinmateriaalia verrattiin keskenään, joista yhden tapauksessa tarkasteltiin myös kuormituksen vaikutusta eristimen toimintaan. Odotetusti eristinkaistalla on saavutettu merkittävää parannusta värähtelyeristävyyteen systeemin resonanssitaajuuden yläpuolella ja saavutettu lisävärähtelyeristävyys kasvoi materiaalin dynaamisen jäykkyyden laskiessa. Lisäkuormituksen oletettiin

laskevan liitoksen alinta ominaistajuutta, jolloin eristimellä saavutettavan parannuksen pitäisi alkaa pienillä taajuuksilla. Näin ei kuitenkaan mittaustulosten perusteella käynyt, vaan tilanteiden välillä ei ollut juurikaan eroavaisuuksia. Tämän epäiltiin johtuvan rakentamisprosessista - vaikka muut kiinnikkeet poistettiin ennen lisäkuormitusta, ruuvit jätettiin paikoilleen ja niiden epäiltiin kantavan osan kuormasta. Myös eristinmateriaalin sijoittamista kulmalevyjen alle tutkittiin, mutta kuten Perezin ja Fuenten (2013) tutkimuksessa, tässäkään tapauksessa sillä ei havaittu olevan vaikutusta. (Morandi et al., 2018)

Myös Barbaresi et al. (2016) tarkastelivat *flanksound* -projektissa kerättyä tietoa joustavien eristimien (kuminen EPDM-kaista) vaikutuksien osalta. Tutkimuksessa värähtelyeristävyiden arvoja vertailtiin pystyliitoksessa eristimien kanssa ja ilman liitoksessa, jonka kiinnikkeet olivat ruuveja. Täysikierreruuvein kiinnitettyssä liitoksessa joustava kaista aiheutti suuremman erotuksen tilanteiden välillä kuin osittain kierteistetyillä ruuveilla. Mielenkiintoista tuloksissa on kuitenkin, että molemmissa tapauksissa tilanteiden välinen erotus on pienillä taajuuksilla negatiivinen, koska CLT-rakenteissa ääneneristävyyden tiedetään määräytyvän yleensä pienten taajuuksien perusteella.

Eristimien lisäkuormittamista tutkivat myös Mecking et al. (2015) CLT-rakenteisessa L-liitoksessa. Tässäkään tutkimuksessa kuorman lisääminen ei aiheuttanut muutosta värähtelyeristävyyteen. Yleisesti eristimen lisääminen tuottaa huomattavan parannuksen värähtelyeristävyyteen pieniä taajuuksia lukuun ottamatta.

Joustavien eristimien vaikutusta kokonaisen rakenteen värähtelykäyttäytymiseen on tutkittu. Eristimien on havaittu laskevan ominaismuotojen ominaistajuuksia, mutta erot eivät ole käytännön kannalta merkittäviä. Joustavien eristimien käyttäminen voi myös aiheuttaa värähtelykiihtyvyyden kasvamisen matalilla taajuuksilla verrattaessa tilanteeseen ilman eristimiä. (Bolmsvik, 2012)

2.3.3 Massiivipuutuotteiden eroavaisuudet valmistajien välillä

CLT-tuotteiden valmistamisessa on valmistajakohtaisia eroavaisuuksia, joten neljän eri valmistajan paneelien värähtelyeristävyksiä vertailtiin pysty-X-liitoksessa samoilla kiinnitysjärjestelmillä Barbaresi et al. (2016) toimesta. Tuloksena saatujen värähtelyeristävyksien käyrät ovat muodoiltaan yhteneviä ja yleisesti lukuarvoiltaan samansuuruisia, mutta valmistajien välillä on kuitenkin havaittavissa merkittäviä eroja. Joidenkin liitosten

värähtelyeristävyyksien käyrissä on havaittavissa yhden valmistajan poikkeavan merkittävästi muista – tämä valmistaja vaihtelee liitoksien välillä. Myös suurimman ja pienimmän käyrän erotus on joissain liitoksissa huomattava. Tutkimuksessa paneelien asentaminen oli suoritettu erityistä tarkkaavaisuutta noudattaen, joten eroavaisuuksien oletetaan johtuvan eri valmistajien tuotteiden eroavista mekaanisista ominaisuuksista. Yhden valmistajan yhteydessä käytetty kiinnitysjärjestelmä tosin erosi muista, jolloin sen tulokset erosivat merkittävästi muiden valmistajien tuloksista.

2.3.4 Liitoksen massasuhteiden vaikutus liitoseristävyyteen

Energiavirta liitoksen raskaammasta rakenteesta kevyempää on huomattavasti suurempaa kuin toisinpäin. Liitoksen suuntakeskiarvoistus tehdään osittain tästä syystä. Raskaille rakenteille standardissa SFS-EN ISO 12354-1:2017 annetut värähtelyeristävyyden arvot on annettu liitoksen rakenteiden massasuhteiden funktiona. Massasuhde huomioidaan liitoseristävyyden kaavalla (28) laskettavalla lisätermillä:

$$M = \log_{10} \left(\frac{m_{\perp}}{m_i} \right), \quad (28)$$

missä m_i on rakenneosan i pintamassa [kg/m^2] ja m_{\perp} on rakenneosaan i kohtasuoran rakenneosan pintamassa [kg/m^2]. Massasuhteiden vaikutusta CLT-rakenteilla on tutkittu. Tutkimuksissa on havaittu, että sivuavan rakenteen jatkuessa yhtenäisessä T-liitoksessa massasuhde ei vaikuta liitoseristävyyteen merkittävästi. Jos T-liitoksen sivuava elementti katkaistaan, sivutien ilmaääneneristävyys voi erota merkittävästi kohtisuoran ja sivuavan rakenteen massasuhteiden mukaan. (Rabold et al., 2015)

Standardin EN 12354-1:2017 CLT:lle annetun lähtödatan esitetään koskevan ainoastaan taajuusaluetta $0,5 < m_1/m_2 < 2$. Ainoastaan X-liitoksen yhtenäisenä jatkuvan sivutien ilmoitetaan riippuvan massasuhteista, muissa CLT-rakenteille annetuissa kaavoissa termiä massasuhteille ei ole.

Rabold et al. (2019) keräsivät lähtötietoa standardin malliin useista eri lähteistä. Kerätyssä lähtötiedossa on mukana massariippuvaisuus. CLT-liitoksille esitetty massariippuvuus ei tässäkään tiedossa ole merkittävää, ellei rakenteessa esiinny katkoja.

2.3.5 Rakenteiden katkaisemisen vaikutus liitoseristävyyteen

Rakenteiden katkaiseminen ja erottaminen ilmavälillä on perinteinen tapa vähentää rakenteissa etenevää runkoääntä. Katkojen vaikutuksia on tutkittu useassa tutkimuksessa ja niiden on huomattu johtavan useimmissa tapauksissa merkittävään liitoseristävyyden paranemiseen. Raboldin (2019) keräämässä liitostiedossa tämä näkyy selkeästi. (Rabold et al., 2019)

Tilojen välillä yhtenäisenä vaakasuunnassa jatkuvan välipohjan katkaisemista on tutkittu runsaasti, sillä se on tunnistettu merkittäväksi äänen siirtymäreitiksi ja toisaalta sen katkaiseminen aiheuttaa rakenteiden suunnittelulle haasteita. Liitoksessa seinärakenne on yleensä kaksinkertainen, jolloin liitosta kutsutaan H-liitokseksi. Pérezin ja Fuenten (2013) laboratoriomalliin perustuvassa tutkimuksessa kyseisen lattiarakenteen katkaisun vaikutusta värähtelyeristävyyteen tarkasteltiin. Katkaisulla saavutettiin noin 10 desibelin parannus pienillä taajuuksilla, jonka jälkeen saavutettu parannus kasvoi merkittävästi taajuuden funktiona lopulta noin 30 desibeliin. Schoenwald et al. (2014) tutkivat NRC:n laboratoriossa H-liitosta, missä lattiarakenne jatkui yhtenäisenä liitoksen yli. Tutkimuksen tuloksena havaittiin, ettei lattiarakenteen kautta siirtyvä värähtely vaimene juurikaan. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin H-liitoksen kaksinkertaisen seinän värähtelyeristävyyttä. Kaksinkertaisen seinän sivuteiden huomattiin saavan yhtä suuria lukuarvoja pystysuuntaiselle värähtelyeristävyydelle, vaikka tarkastellaan kaksinkertaisia levyjä ristiin.

2.3.6 CLT-elementtien rakenteen vaikutus liitoseristävyyteen

Raboldin et al. (2019) useista tutkimuksista kerätystä liitosdatassa on nähtävissä erilaisten elementtityyppien, CLT-kerroksien suunnan ja elementtien toisiinsa kiinnityksen (ei liitokseen) vaikutus. Pienistä, mekaanisesti toisiinsa kiinnitetyistä CLT elementeistä (pituus 1.25 metriä) kootun seinärakenteen ja isojen (pituus 5 metriä) seinäelementtien värähtelyeristävyyden havaittiin kasvavan taajuuden funktiona voimakkaammin, kuin elementeissä, joissa lautakerrokset olivat kiinnitetty toisiinsa liimaamalla. Voimakkaimmin tämä ilmiö toteutui pienten elementtien tapauksessa, joissa rakenne katkesi värähtelyn etenemissuunnassa useimmin. Sama ilmiö huomattiin vertailtaessa seinä-seinä ja seinä-lattia liitosta. Jatkuvan seinän tapauksessa saatiin huomattavasti pienempiä värähtelyeristävyyden arvoja, kuin liitokseen nähden kohtisuoran pienistä elementeistä kootun ja näin useasti katkeavan lattiarakenteen tapauksessa.

2.3.7 Lisävuoraus massiivipuurakenteilla

Levyrakenteen sisäpintaan koolattavalla, yleensä kipsilevyvuorauksella, voidaan parantaa sivutien ääneneristävyyttä. Massiivisten puurakenteiden tapauksessa näitä lisävuorauksia ei kuitenkaan usein haluttaisi tehdä, sillä ne peittävät näkyvän puupinnan. Standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 mukaan kevyille rakenteille sivuavan ja suoraan siirtymistiehen saavutettavat parannukset tulee mitata erikseen ja sivuavalla tielle käytettävä arvo tulee puolittaa. NRC:n tutkimusraportissa RR-335 (Mahn et al., 2020) tutkittiin massiivipuurakenteissa kevyillä lisärakenteilla saavutettavaa parannusta ilmaääneneristävyyteen. Amerikkalaisen standardin mukaiseen STC-luokitukseen, joka vastaa eurooppalaisen standardin ilmaääneneristävyyttä R , saadaan parannusta massa-ilma-massa resonanssitaajuuksia lukuun ottamatta sekä yksin- että kaksinkertaisilla massiivipuuseinäärakenteilla. Saavutettu parannus riippuu lisävuorauksen kaviteetin paksuudesta.

2.3.8 CLT:n akustiset ja mekaaniset ominaisuudet

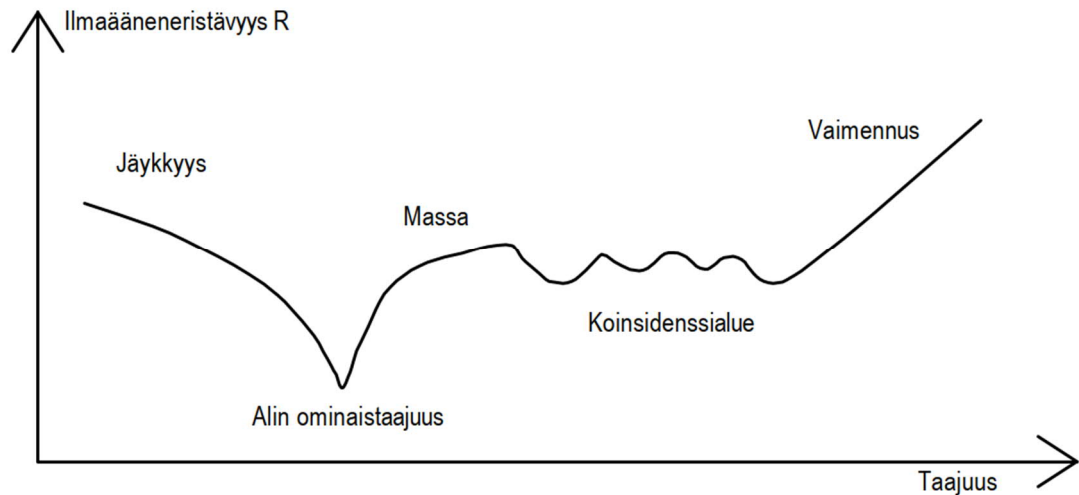
Ääneneristävyyden laskennalliseen tarkasteluun tarvitaan lähtötiedoksi rakenteen mekaanisia ja akustisia ominaisuuksia, kuten jäykkyyttä, vaimennusta ja äänen säteilyä kuvaavia suureita. Puu on ortotrooppinen materiaali, jolloin massiivipuurakenteiden mallintaminen hankaloituu entisestään, kun puutavarasta koostuvia levykerroksia kiinnitetään toisiinsa, esimerkiksi CLT:n tapauksessa ristiin laminoimalla. Laskennallisen tarkastelun yhteydessä CLT:n tai sen kaltaisia materiaaleja pyritään yleensä yksinkertaistamaan, ettei jokaista kerrosta tarvitse käsitellä mallintamisessa erikseen. (van Damme et al., 2015; Winter, 2018)

CLT-levyn yksinkertaistaminen homogeeniseksi materiaaliksi ei ole kuitenkaan yksinkertaista. Kevyiden rakenteiden taajuustasossa tehtävän tarkastelun yhteydessä materiaaliparametrien täytyy edustaa materiaalin dynaamista käyttäytymistä, sillä staattisten tapauksen materiaaliarvoilla tehdyt mallit ovat osoittautuneet epätarkoiksi (van Damme et al., 2015). Vaikka CLT-levyt yleensä täyttävät ohuiden levyteorioiden paksuudelle asetetut vaatimukset, niille tehtyjen moodianalyysien perusteella levykerroksien väliset liimaukset, leikkausmuodonmuutokset ja hitausilmiöt vaikuttavat merkittävästi levyn dynaamiseen käyttäytymiseen. CLT-levyn pääsuuntiin leikatuille palkeille tehdyt tutkimukset osoittavat, että CLT:n dynaaminen toiminta noudattaa eriäviä malleja tarkasteltavan suunnan mukaan. Palkit, joiden sisäinen puukerros jatkuu katkeamattomana palkin pituussuuntaan, toimii kuten Timoshenkon palkkiteorian mukainen paksu palkki. Palkit,

joiden uloin kerros jatkuu katkeamattomana, toimii kuten sandwich -rakenne. Näitä malleja yhdistävää levyteoriaa ei ole vielä kehitetty, jolloin CLT-levyä ei voi homogenisoida taajuudesta riippumattomilla materiaaliarvoilla. Nämä ilmiöt voidaan huomioida taajuusriippuvaisilla, näennäisillä materiaaliominaisuuksilla, jolloin ohuen levyn teorian käyttäminen ja levyn homogenisointi on mahdollista. van Damme et al., tutkimuksissa tarkastellun CLT-levyn keskimäinen lautakerros on sijoitettu siten, että laudat olivat ulompien kerrosten välissä leveyssuunnassa. Yleensä CLT:ssä laudat ovat kerroksien välissä paksuussuunnassa. Santonin et al., (2017) CLT:n materiaaliominaisuuksien mittauksiin keskittyvässä tutkimuksessa havaittiin kuitenkin tavanomaisen CLT-levyn käyttäytyvän kuten van Dammen tutkimuksen CLT:n. (van Damme et al., 2015, 2016 ja 2017)

CLT-levyjen mekaanisia ominaisuuksia on selvitetty useilla erityyppisillä mittauksilla. Rakennusakustiikan vaatimukseen sopiva ja samalla käytännöllinen tapa on mitata levyssä etenevien aaltotyyppien nopeuksia, jolloin kerroksisen levyrakenteen hitaudesta ja leikkausvoimista aiheutuvat ilmiöt saadaan huomioitua taajuusriippuvaisten materiaaliominaisuuksien kautta (Santoni et al, 2017).

Levyn säteilytehokkuus täytyy määrittää usein levyn akustisia ominaisuuksia kuvaaviin malleihin (Santoni et al., 2017). Myös standardin SFS-EN ISO 12354-1 mukainen kriittisen taajuuden alapuolella tehtävä korjaus vaatii tietoa säteilytehokkuuksien määrittämisestä. CLT-levyjen säteilytehokkuuksia on mitattu useassa tutkimuksessa (Mahn ja Müller, 2019; Santonio et al., 2016; Krajci et al, 2012). Säteilytehokkuuksien mittauksissa CLT:n ortotrooppisuus on nähtävissä kahtena kriittisenä taajuutena tai keskitaajuuksilla alueena, jolla ääneneristävyys ei parane, kuten kuvassa 7. Mahn ja Müller (2019) huomattavat CLT:n käyttäytyvän vähemmän ortotrooppisesti kuin muut massiivipuutuotteet eikä äänen vuotaminen ole sen tapauksessa yhtä merkittävä ongelma.



Kuva 7. Ortotrooppiselle levyllä tyypillinen ilmaääneneristävyysskuvaaja ja sen määräävät tekijät taajuustasossa.

Ortotrooppisen levyn säteilytehokkuuden laskennallista määrittämistä tutkivat Krajci et al. (2012) isotrooppisen levyn teorialla käyttäen ekvivalenttista taivutusjäykkyyttä sekä lisäksi äärettömän ortotrooppisen levyn teorialla. Tutkimuksessa käytettiin Davyn (2009) esittelemään säteilytehokkuuden arviointimallia. Mallit toimivat kohtuullisesti ensimmäisen kriittisen taajuuden alapuolella, mutta tämän yläpuolella molemmat mallit toimivat huonosti. Tutkimuksessa todetaan äärellisen ortotrooppisen levyn mallin kehittämisen olevan tarpeellista. Santoni et al. (2016 ja 2017) kehittivät säteilytehokkuuden laskemiseen soveltuvan mallin, joka perustuu ohuen levyn teorioihin ja ajatukseen moodikeskiarvoisesta säteilytehokkuudesta. Hitaudesta ja leikkausvoimista aiheutuvat ilmiöt huomioidaan mallissa käyttämällä aaltoliikkeen etenemisnopeuksien mittauksiin perustuvia taajuusriippuvaisia jäykkyyssuureita. Santoni et al. (2019) esittivät vielä analyttisen moodeihin perustuvan mallin, joka soveltuu kriittisen taajuuden alapuolelle moodikeskiarvoihin perustuvaa mallia paremmin, mutta on laskennallisesti monimutkaisempi. Molemmat mallit antavat mittauksiin verrattaessa hyviä tuloksia kriittisen taajuuden yläpuolella, kun levyn värähtelykenttä on diffuusi. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että CLT:tä voidaan yksinkertaistaa homogeeniseksi rakenteeksi, kun käytetään taajuudesta riippuvaisia materiaaliominaisuuksia. Materiaaliominaisuudet täytyy kuitenkin van Damme et al. (2017) huomautuksen mukaisesti määrittää riittävän useaan suuntaan, pääsuunnista interpoloidut arvot eivät ole riittäviä.

Useissa CLT:n sivutiesiirtymiä tai akustisia ominaisuuksia tarkastelleissa tutkimuksissa on tutkittu myös CLT:n vaimennusominaisuuksia ja rakenteellista jälkikaiunta-aikaa.

Mikäli rakenteen sisäinen häviökerroin on riittävän suuri, rakenteiden suuntakeskiarvoistettua värähtelytaseroitusta laskettaessa ei ole tarpeellista normalisoida tuloksia rakenteellisen jälkikäiunta-ajan suhteen, mikä helpottaa laskentaa huomattavasti. Useiden tutkimusten yhteydessä suoritettujen mittauksien tuloksena on ehdotettu CLT:n sisäisten häviöiden olevan riittävän suuria, jotta rakenteellisen jälkikäiunta-ajan mukaan tehtävä normalisointi voidaan jättää tekemättä (Di Bella et al., 2019; Mahn ja Müller-Trapet, 2019; Morandi et al., 2018; Schoenwald et al., 2013; Mahn et al., 2020). Näissä tutkimuksissa CLT:n vaimennusominaisuuksia on tutkittu sekä CLT:n riippuessa vapaasti vajereiden varassa, kuten Schoenwald 2013, että erilaisten liitostapauksien mukaisissa tuentatilanteissa, kuten Morandi et al. (2018).

Samalla tutkimuksissa on nostettu esiin muita tekijöitä, joiden mukaan CLT:n värähtelykenttä matalilla taajuuksilla ei ole diffuusi, mikä rajoittaa laskentamenetelmien käyttöä (Morandi et al., 2020). Tästä syystä Morandi et al. (2020) tarkastelivat tutkimuksessaan CLT:n värähtelyä matalilla taajuuksilla sekä vertasivat teorian ja kokeellisten tutkimusten eroavaisuuksia. Tutkimuksessa havaittiin tarkastellun CLT-levyn värähtelykentän olleen epädiffuusi alle 550 Hz taajuuksilla, mutta moodien vaimenemisen havaittiin kuitenkin kontrolloivan terssikaistoittain levyn kokonaisvaimenemista.

2.4 Rankarunkoisten puurakenteiden tutkimus

Rankarunkoiset rakenteet ovat kevyitä rakenteita, jotka koostuvat yleensä kahdesta levykerroksesta, joiden välissä on kaviteetti. Kaviteetissa on seinän puu- tai teräsraangoista koostuva runko sekä se on usein täytetty ääntä absorboivalla materiaalilla, kuten mineraalivillalla. Rankarakenteiden sivutiesiirtymien arvioiminen on huomattavasti vaikeampaa kuin massiivisten rakenneosien, koska ohuiden levyjen koinsidenssin rajataajuus on yleensä yli 2000 Hz, jolloin pakkovärähtely dominoi rakenteiden värähtelykenttiä suurimmalla osalla rakennusakustiikassa tarkasteltavasta taajuusalueesta. Myös äänen ja värähtelyn siirtymistapa on rankarakenteissa monimutkainen – värähtelyä voi siirtyä rankarungon tai kaviteettien kautta sekä näiden yhdistelmäreittejä pitkin. Lisäksi levyjen periodinen tuenta ja siitä seuraava epälineaarinen värähtelykenttä asettavat haasteita ja rajoituksia arviointimenetelmille. (Schoenwald, 2008; Hongisto, 2020)

Kuten aikaisemmin todettu, rankarunkoisien rakenteiden sivutiesiirtymiä on tutkittu laajasti standardin EN 12354 ensimmäisen version julkaisun jälkeen. Yksittäisten tutkimuksien ja tutkimussarjojen lisäksi Euroopassa rankarakenteiden sivutiesiirtymiä on tutkittu esimerkiksi yhteiseurooppalaisessa COST (*engl. European cooperation in science and technology*) -hankkeessa (COST FP0702, 2012). Tässä kappaleessa esitellään ja tarkastellaan rankarakenteiden sivutiesiirtymiin vaikuttavia asioita aikaisempiin tutkimuksiin perustuen.

2.4.1 Vaimeneminen etäisyyden funktiona

Liitokseen liittyvän rakenteen suunnassa tapahtuvaa äänen ja värähtelyn vaimenemista rankarakenteissa on tutkittu useassa tutkimuksessa. Periodisen tuennan seurauksena värähtelyn nopeuden on havaittu vaimenevan rankarakenteessa voimakkaasti etäisyyden funktiona. Myös kiinnikkeiden jakoväli, levyjen pintojen kiinnitys toisiinsa, tarkastelu suunta rankoihin nähden, levyn paksuus ja pinnan tyyppi vaikuttavat värähtelyn vaimenemiseen rankarakenteessa. (Schoenwald, 2008; Shöpfer, 2015; Nightingale ja Bosmans, 1999, Crispin et al., 2013)

Rankarakenteiden sivuteiden laskennallista kokeelliseen SEA:an perustuvaa arviointimenetelmää käsittelevässä väitöskirjassaan Schoenwald (2008) esitti ilmeisesti ja voima-herätteellä herätetyn rankalevyseinän värähtelyn nopeuden jakaantumisen tarkasteltavan rakenteen alueella. Värähtelyn nopeuden vaimeneminen on molemmilla herätteillä samankaltaista, rankojen kohdalla tapahtuvan vaimenemisen suuruus kasvaa taajuuden funktiona. Tuloksien perusteella rankarakenteen dynaaminen käyttäytyminen voidaan jakaa kolmeen taajuusalueeseen: pienillä taajuuksilla rangat kiinnittyvät levyihin viivamaisesti, jolloin koko seinä värähtelee kuin yksittäinen ortotrooppinen levy; suurilla taajuuksilla seinä käyttäytyy kuin periodisesti jäykistetty levy ja näiden alueiden välillä kipsilevyt käyttäytyvät pistemäisesti kiinnitetysti, jolloin rakenteen taiputusjäykkyys vastaa yhden levyn jäykkyyttä.

Schöpfer et al. (2016) tutkivat lastulevyillä verhottua rankaseinää Schoenwaldin väitöskirjan kaltaisella kokeellisella menetelmällä. Seinän dynaamiseen käyttäytymiseen liittyvien tuloksien huomattiin olevan yhtenevät Schoenwaldin tutkimuksien kanssa. Lisäksi lastulevyillä vaimenemisen huomattiin olevan suurilla taajuuksilla voimakasta myös levyjen rajapinnoissa. Vaimenemien huomattiin olevan samankaltaista seinärakenteen molemmilla puoliskoilla herätepaikasta riippumatta (rangan tai kaviteetin kohdalta), mutta

rangan kohdalta herätettäessä värähtely oli voimakkaampaa vastakkaisella puolella kuin kaviteetin kohdalta herätettäessä.

Standardin EN 12354-1:2000 päivitystyön yhteydessä tarkasteltiin etäisyysvaimennuksen lisäämistä standardin kaavoihin, jolloin rankarunkoisen liitoksen normalisoitu ja suuntakeskiarvoistettu värähtelytaasoerotus voitaisiin laskea liitoksen värähtelyeristävyyden (lähellä liitosta mitattuna) ja etäisyystermin avulla. Etäisyysvaimennusta kuvattaisiin keskiarvoisella lisävaimennuksella δ [dB/m], joka määritettäisiin geometrisen vaimennuksen lisäksi sisäisen vaimennuksen, absorptiomateriaalin ja aaltotyypin muuntautumisen avulla. Mittalukua käsitelleiden mittauksien tuloksista havaitaan, kuten aikaisemmin, vaimenemisen kasvavan taajuuden funktiona sekä sen olevan suurempaa rankoja nähden kohtisuoraa kuljettaessa, kuin niiden suunnassa. Etäisyysvaimennuksella määritettävää liitoseristävyyden kaavaa ei kuitenkaan sisällytetty standardin päivitettyyn versioon, mutta se on mukana terminä rakenteiden tyyppien määrittämisessä. (COST FP0702, 2012; Crispin et al., 2013; SFS-EN ISO 12354-1:2017)

2.4.2 Rankarakenteiden sekä niiden levytyksien katkaiseminen

Dijkmans ja De Geetere (2019) tutkivat rankarunkoista julkisivuelementtiä kokeellisesti ja arvioivat usean parametrin vaikutusta sivutiesiirtymään. Tutkittava julkisivuelementti oli seinä-lattia-T-liitos, jota muokattiin tutkittavien parametrien mukaan. Parametrien vaikutusta tutkittiin kahdessa tilanteessa: ensimmäisessä julkisivuelementti oli katkaistu kokonaan liitoksen kohdalta ja toisessa se jatkui yhtenäisenä, mutta sisäpuolen kipsilevytykset oli katkaistu kaikissa tilanteissa. Odotetusti julkisivuelementin katkaisemisella saavutettiin merkittävä parannus sivutien ääneneristävyyteen, yksilukuarvona parannus oli noin 9-12 dB. Saavutettu parannus kasvoi yleisesti taajuuden funktiona. Jatkuvalle elementillä kipsilevyjen koinsidenssitaajuudella havaittava kuoppa sivutien ääneneristävyydessä on huomattavin. Myös katkaistun elementin tapauksessa, kun kipsilevyjä sivuavan lattiaelementin jälkeen ei ole katkaistu, koinsidenssikuoppa on merkittävä.

De Greeten et al. (2013) tutkimuksessa kolmesta huoneistosta koostuvalla laboratorio-mallilla eri rankarunkoisten liitosten normalisoitua ja suuntakeskiarvoistettu värähtelytaasoerotusta. Tutkimuksen tuloksista on huomattavissa rankarunkoisten rakenteiden saavan huomattavasti suurempia arvoja värähtelyn vaimenemiselle liitoksessa kuin raskaat ra-

kenteet. Tätä selitetään ruuvikiinnityksestä johtuvalla rakenneosien välisellä heikolla kytkennällä. Yhtenäisenä jatkuva ja rankojen suuntaan etenevä sivutie saa tutkimuksen mukaan muita reittejä merkittävästi alhaisimpia arvoja.

Ingelaeren ja van Dammen (2013) AH+ projektiin liittyvässä konferenssijulkaisussa annetaan ohjeita rankarunkoisten rakennusten ääneneristyksen suunnitteluun. Ohjeistuksesta ilmenee, että käytännössä asuinrakennusten välisiin vaatimuksiin pääseminen edellyttää rankarunkoisilla rakenteilla sivuavien teiden katkaisemista.

2.4.3 Rankarakenteiden lisävuoraukset

Rankarunkoisien seinärakenteiden lisäeristäminen rakenteisiin koolatuilla massoilla on haastavaa, koska se muuttaa rakenteen toimintaperiaatteen usein kolminkertaiseksi ja monimutkaistaa rakenteen dynaamista käyttäytymistä. Tyypillisesti lisärakenteilla pienille taajuuksille tulee ylimääräinen massa-jousi-massa resonanssi, mikä saattaa heikentää paikallisesti ääneneristävyttä. Tämän jälkeen saavutettava lisäeristävyys on positiivista, kuten esimerkiksi Ågrenin ja Ljunggrenin (2016) tutkimuksesta on nähtävissä.

Dijckmansin ja De Geeteren (2019) julkisivuelementtejä koskevassa tutkimuksessa tarkasteltiin myös sisäpuolelle tehtävien koolausten vaikutusta sivutiesiirtymään. Lisäeristyksellä ja lisätyillä kipsilevyillä saavutetaan parannusta keskitaajuuksista ylöspäin. Normalisoidun värähtelytasoerotuksen yksilukuarvoihin saatu parannus on 4-5 desibeliä ja 5-6 desibeliä joustavien rankojen tapauksessa.

2.4.4 Muita vaikuttavia tekijöitä

Rankarunkoisilla rakenteilla mahdollisten liitosvariaatioiden määrä nousee suureksi, sillä rakenteet voidaan koostaa useilla eri tavoilla tai materiaaleilla. Tässä kappaleessa on koottu muita tutkittuja sivuteiden ääneneristävyteen liittyviä asioita kirjallisuudesta.

Rakenteiden välille asennettavia tärinäneristimiä käytetään myös rankarakenteiden yhteydessä ja niiden toimintaperiaatteet ovat samat kuin massiivipuorakenteilla. Ågren ja Ljunggren (2016) havaitsivat rankarunkoisten puorakenteiden ja massiivipuorakenteiden käyttäytyvän suurin piirtein samoin eristimien suhteen. Poikkeuksena julkisivun ja välipohjaliitoksen tilanteessa värähtelytasoerotuksen huomattiin eroavan huomattavasti keskitaajuuksilla, välipohjapalkkien suunnan mukaan. Havainnon syystä ei ollut varmuutta, mutta sen epäiltiin johtuvan seinälle tulevan kuormituksen eroavaisuuksista.

Dijckmansin ja De Geeteren tutkimuksessa tarkasteltiin myös paloeristyksen ja ulkopuolisen levyn vaikutusta julkisivuelementin normalisoituun värähtelytaseroon. Lattia- ja julkisivuelementin kiinnityskohtaan asennettavan paloeristimen vaikutusta tarkasteltiin kivivillan ja polyuretaanin välillä. Kivivillakerroksen paksuuden kasvattaminen tai ylimääräisen levyn lisääminen liitokohtaan ei vaikuttanut tulokseen merkittävästi. Polyuretaanin käyttäminen johti keskitaajuuksilla muutaman desibelin parannukseen, mutta tulosta voidaan pitää merkityksettömänä. Parannuksen oletetaan johtuvan paremmasta ilmatiiveydestä. Julkisivuelementin ulkopuolisen levyn vaihtaminen puukuitusementtilevyn ja polypropeenilevyn välillä ei johtanut merkittäviin muutoksiin.

Seidel ja Hengst (2014) tutkivat rakennustuoteyhtiön metallirankaista T-liitosta, tavoitteenaan tutkia liitokseen suunnitellun muutoksen vaikutusta liitoksen sivuteiden ääneneristävyyteen. Samalla tavoitteena oli tarkastella yleistä oletusta, jonka mukaan ainoastaan sivuavaa tietä voidaan tarkastella rankarunkoisessa T-liitoksessa. Tutkimuksen mukaan reitit sivuavasta rakenteesta erottavaan ja erottavasta sivuavaan voivat olla ääneneristyksiltään muita teitä heikompia oletuksen vastaisesti, mutta yleensä tilojen välistä ääneneristävyyttä tarkastellessa suora reitti on määräävä ja laskelmiin ei tästä syystä tule virhettä. Rankarunkoista T-liitosta optimoitiin sivutiireittien ääneneristävyyden kannalta katkoin, mutta lopulta kaikkien teiden yhteisvaikutukseen ei tullut parannusta.

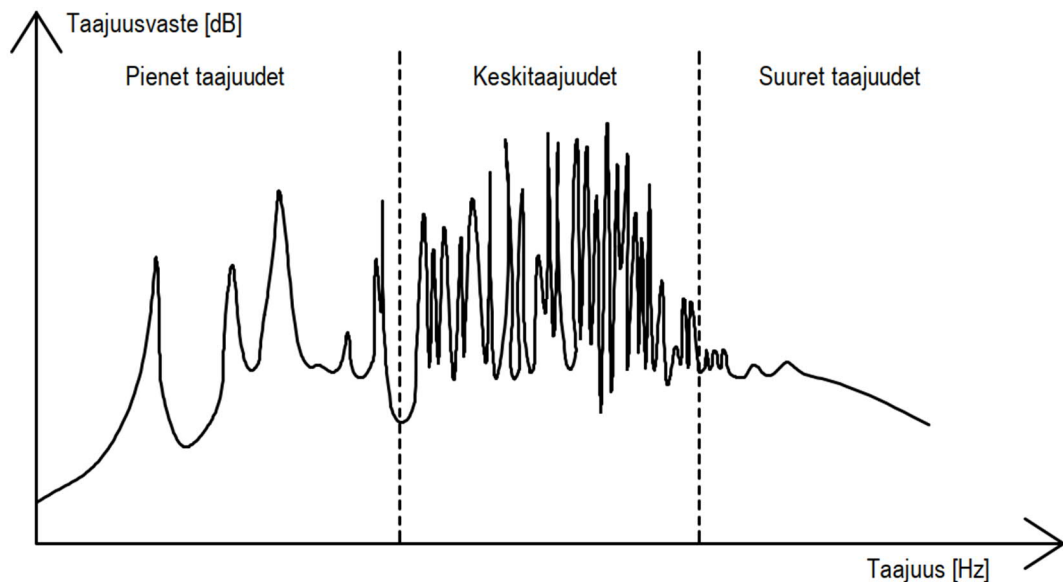
Guigou-Carter et al. (2013) tutkivat numeerisesti elementtimenetelmällä mallintamalla rankarunkoista seinän ja lattian T-liitosta. Tutkimuksessa tarkasteltiin rankojen poikkileikkauksen, seinän levytyksien, lattian palkkien suunnan suhteessa seinään, seinän rankojen ja lattian palkkien sijaintia toistensa suhteen sekä herätetyypin vaikutusta värähtelytaseroerotukseen. Tuloksista nähdään lattiapalkkien poikkileikkauksen vaikutuksen olevan 50 Hz jälkeen merkityksetöntä. Levyjen vaihtelun tuloksista huomataan, että massan lisääminen ei vaikuta merkittävästi suuntakeskiarvoistettuun värähtelytaseroerotukseen, mutta mittauspuolen valinta vaikuttaa hieman tulokseen. Lattiapalkkien suunta seinään nähden vaikuttaa odotetusti suuntakeskiarvoistettuun värähtelytaseroerotukseen odotetusti niin, että seinän suuntaisilla lattiapalkeilla saavutetaan suurempi tasoerotus. Erot tilanteiden välillä jäävät kuitenkin pieneksi. Lattiapalkkien ollessa kohtisuoraan seinää vasten, niiden sijoittumisen vaikutusta rankoihin nähden tarkasteltiin. Tapausten, joissa lattiapalkit olivat rankojen kohdalla tai keskellä niiden välillä, ei havaittu merkittävää eroa tasoerotukseen. Herätetyypin (ilmääni tai voimahäly) välillä ei nähdä suuria eroavaisuuksia, mikä on ristiriidassa käytännön mittauksien kanssa.

Vaativiin rakennuksiin täytyy sijoittaa rakenteita, jotka pystyvät kantamaan suuria aksiaali- ja sivusuuntaisia voimia. Korkean kapasiteetin rankarakenteiden vaikutusta sivutiesiirtymään tutki Zeitler et al. (2013) NRC laboratoriossa. Normaaleihin rankaseiniin lisättiin leikkausvoimaa kantava vanerikerros, jonka vaikutusta suoraan ja sivuavaan ääneneristävyyteen tarkasteltiin. Lopputuloksena vanerin lisääminen vaikuttaa sivutien ääneneristävyyteen 1-2 dB – yleisesti pystysuunnassa vaikutus on positiivinen ja sivusuunnassa negatiivinen.

2.5 Liitoseristävyyden laskennallinen määrittäminen

Liitoseristävyys voidaan määrittää mittauksien lisäksi laskennallisesti. Laskennalliseen tarkasteluun on käytetty useita eri menetelmiä, myös eri menetelmien käyttäminen saman liitoksen arviointiin tarkasteltavan taajuusalueen mukaan on tavanomaista. Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti tärkeimmät sivutiesiirtymien tutkimuksessa liitoseristävyyksien määrittämiseen käytetyt menetelmät.

Kuvassa 8 on esitetty tyypillisen vibroakustisen systeemin taajuusvaste (Atalla ja Sgard, 2015). Kuvaajasta on selkeästi erotettavissa kolme aluetta, joilla systeemin vaste on erilainen: pienet taajuudet, keskitaajuudet ja suuret taajuudet. Pienillä taajuuksilla systeemin vasteessa näkyy selkeästi piikkeinä yksittäiset resonanssit, jolloin moodien määrä taajuuskaistaa kohden on vähäinen ja aallonpituudet ovat pitkiä. Tällöin värähtelevä systeemi käyttäytyy globaalisti ja on deterministinen. Numeeriset menetelmät, kuten FEM ja BEM (engl. *Boundary element method*), soveltuvat tällä alueella systeemin käyttäytymisen arvioimiseen.



Kuva 8. Tyypillisen vibroakustisen systeemin taajuusvaste (Atalla ja Sgard, 2015) mu-
kailten.

Suurilla taajuuksilla systeemin taajuusvasteen kuvaajassa yksittäiset resonanssit eivät ole erotettavissa, mikä tarkoittaa suurta mooditiheyttä ja -määrää. Suurilla taajuuksilla aallonpituudet ovat lyhyitä systeemin muihin mittoihin verrattuna, jolloin systeemi käyttäytyy lokaalisti. Tällöin moodien kuvaamiseen elementtimenetelmällä tarvittavaan todella tiheää elementtiverkkoa, mikä johtaa pitkään laskenta-aikaan. Toisaalta tällä taajuusalueella systeemin vaste on todella herkkä, jolloin deterministisen elementtimenetelmän käyttäminen ei ole soveliaista, koska systeemin vaste eroaa merkittävästi pientenkin muutoksien seurauksena. Tästä syystä suurilla taajuuksilla käytetään tilastollisia ja keskiarvoihin perustuvia malleja, kuten tilastollista energia-analyysiä. (Atalla ja Sgard, 2015)

Edellä kuvattujen taajuusalueiden välillä systeemin vaste on sekoitus pienen ja suuren taajuusalueen vasteista. Tällä alueella systeemi käyttäytyy monimutkaisesti ja sen kuvaamiseen käytetään joko samoja menetelmiä kuin muiden alueiden kuvaamiseen tai niistä koostettuja hybridimenetelmiä. (Atalla ja Sgard, 2015)

Raskaiden, isotrooppisten sekä monoliittisten rakenteiden laskennallinen arviointi on yksinkertaisinta, joten niiden mallintaminen on toiminut lähtökohtana liitoksien laskennallisessa tarkastelussa. Aalto- ja levyteorioihin perustuvia malleja on käytetty yleisesti paljon levyn diffuusin värähtelykentän oletuksen alaisena. Monimutkaisimmissa liitoksissa on käytetty levyn moodien tarkasteluihin perustuvia malleja sekä numeerisia menetelmiä. Tyypillisesti näiden mallien avulla laskettuja parametrejä käytetään SEA:aan perustuvissa malleissa, joilla lopulta arvioidaan kokonaista liitosta. (Hopkins, 2007)

Aaltoteoriaan perustuvan analyttisen laskennan tutkimuksen esitteli kootusti Hopkins (2007). Menetelmä perustuu liitoksen jakamiseen levyiksi, joiden välistä aaltoliikkeen välittymistä tarkastellaan niiden liitoskohtaan kuvitellun palkin avulla. Mallilla on mahdollista tarkastella erikseen taivutus- ja pitkittäisaaltojen etenemistä liitoksessa sekä sen tuloksia on mahdollista hyödyntää tilastollisissa laskentamalleissa. Hopkins (2014) osoitti tähän perustuvan SEA-mallin avulla raskaassa liitoksessa pitkittäisaaltojen aiheuttavan taajuusriippuvaisuutta värähtelyeristävyyteen. Aaltoteoriaan perustuvan mallin käyttöä rajoittaa oletus levyn diffuusista värähtelykentästä ja sen laskennallinen monimutkaisuus yksinkertaisessakin liitoksessa. Dijkmans (2016), esitti tutkimuksessaan raskaalle H-liitokselle aaltoteorialla laskettuja liitoseristävyksiä.

Puurakenteiden arvioimiseen käytettävällä menetelmällä täytyy pystyä kuvaamaan monimutkainen geometria ja materiaalimalli kuten edeltävissä kappaleissa on esitetty, jolloin numeeriset mallit ovat soveltuvia. Elementtimenetelmään tai sen johdannaisiin perustuvat mallit ovat kirjallisuudessa vahvasti esillä ja niitä on käytetty jo standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 lähtötiedon määrittämisessä (Crispin et al., 2014; Poblet-Puig ja Guigou-Carter, 2015; Hopkins et al., 2016). Standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 lähtötietojen numeerisessa mallintamisessa hyödynnettiin SFEM:iä (*engl. spectral finite element method*). SFEM on perinteistä elementtimenetelmään nopeampi, koska se on kehitetty dynaamisia ongelmia varten ja sen johtamiseen käytettävät yhtälöt mahdollistavat rakenteen verkottamisen ainoastaan geometrian suhteen, jolloin tarvittavien elementtien määrä on vähäinen eikä rakennetta tarvitse verkottaa taajuuden mukaan (Poblet-Puig ja Guigou-Carter, 2015). Poblet-Puig ja Guigou-Carter (2017) julkaisivat tutkimuksessaan myös standardissa esittämättömille raskaille liitoksille SFEM:illä määritettyjä värähtelyeristävyksiä. Standardin lähtötietoa on tarkoitus hankkia numeerisen mallintamisen avulla tulevaisuudessa kevyiden rakenteiden osalta, kun tutkimustietoa mallintamisesta saadaan lisää.

Joissain, etenkin numeeriseen mallintamiseen, liittyvissä tutkimuksissa käytetään rakenteiden massasuhteiden tilalla niiden karakteristista momentti-impedanssia, minkä on havaittu soveltuvan massasuhdetta paremmin värähtelyeristävyyden suhdetta kuvaavaksi muuttujaksi. (Crispin ja Ingelaere, 2013). Karakteristisesta momentti-impedanssista käytetään standardissa SFS-EN ISO 12354:2017 nimitystä *pc-ratio* ja se määritellään kaavalla (29) (Crispin et al., 2014):

$$PC \text{ ratio} = \frac{\psi}{\chi} = \sqrt[4]{\frac{m_{\perp i} B_{\perp i}^3}{m_i B_i^3}}, \quad (29)$$

missä m_{\perp} on rakenteeseen i nähden kohtisuoran levyn pintamassa [kg/m^2], B_{\perp} on rakenteeseen i nähden kohtisuoran levyn taivutusjäykkyys [Nm] ja B_i on levyn i taivutusjäykkyys [Nm]. Levyn taivutusjäykkyys lasketaan kaavalla (30):

$$B = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (30)$$

Rankarunkoisia puurakenteita on tutkittu elementtimenetelmällä tutkimushankkeissa kuten COST FP0702 ja *silent timber* (Bard et al., 2017), sekä erilaisissa julkaisuissa (Bolmsvik et al., 2012; Guigou-Carter et al., 2013; Poblet-Puig, 2008) ja analyyseissä käytettävien mallien koostamista on tutkittu (Floden, 2016). Tutkimuksille on tyypillistä, että elementtimenetelmään käytetään pienillä taajuuksilla ja tilastollisia menetelmiä (SEA) suurilla taajuuksilla. Rankarakenteiden mallintamisessa monimutkaisen geometrian mallintamisen lisäksi haasteena on reunaehtojen kuvaaminen, joustavien eristimien vaikutus kokonaisen systeemin värähtelykäyttäytymiseen sekä rankavälien ilmatilojen mallintaminen, joissa saattaa olla vaimentavaa materiaalia. Tutkimuksien tulokset ovat lupaavia, mutta kehitystyötä on vielä tehtävä.

Myös numeerisen mallintamisen yhteydessä massiivipuorakenteiden tutkimusta on tehty eniten CLT-rakenteille. Väitöskirjassaan Winter (2018) tutki äänen siirtymistä CLT-rakenteissa EFA:lla (*engl. Energy Flow Analysis*, energiavirta-analyysi), mikä yhdistää elementtimenetelmään ja tilastollisen energia-analyysin. Winterin mukaan paksun levyn teoriaa täytyy käyttää CLT:llä kohtalaisen pienistä taajuuksista alkaen, jolloin mallintaminen täytyy tehdä solidielementeillä ja jälkikäsitellyssä elementtimenetelmän tuloksiin tehtävällä energia-analyysiin perustuvalla keskiarvoistamisella voidaan saavuttaa siedettävät laskenta-ajat. Paolini et al., (2017) tutkivat CLT-rakenteiden värähtelykäyttäytymistä vertaamalla numeerisen mallintamisen tuloksia laboratoriomittauksien tuloksiin. Tutkimuksessa käytettiin laskennallisesti perinteiseen elementtimenetelmään verrattuna tehokkaampaa p-formulointia, mikä perustuu hierarkisiin muotofunktioihin. Tutkimuksessa CLT-rakenne mallinnettiin tarkasti kerrokset ja elementtien liitokset mukaan lukien. Tuloksien perusteella värähtelykäyttäytyminen pystyttiin kuvaamaan tarkasti matalilla taajuuksilla käyttäen tätä menetelmää. CLT:n mallintamisen vaikeudet liittyvät samoihin,

kappaleessa 2.3 liittyviin ongelmiin, eli liitoksien kuvaamiseen, tarkastelusuunnasta riippuvaan materiaalmalliin ja sisäisiin häviöihin.

Useassa tutkimuksessa on todettu mallintamisen olevan mittauksia mielekkäämpi tapa tutkia sivutiesiirtymiä, koska tutkittavat rakenteet voidaan rajoittaa tarkasti, eikä muiden rakenteiden tai toisen kertoluvun ilmiöiden vaikuttaminen tuloksiin ole mahdollista (Hopkins et al., 2016; Guigou-Carter et al., 2013; Poblet-Puigt, 2008).

2.6 Yhteenveto kirjallisuuskatsauksesta

Kirjallisuuskatsauksessa on esitetty puurakenteiden rakenteellisiin sivutiesiirtymiin vaikuttavia tekijöitä sekä esitelty yleisesti käytetty sivutiesiirtymän arviointimenetelmä ominaisuuksineen. Kirjallisuuskatsauksen havaintojen perusteella puurakenteiden sivutiesiirtymiin vaikuttavia tekijöitä on tunnistettu ja niiden perusteella tiedetään, millaisiin asioihin puurakenteiden suunnittelussa täytyy kiinnittää huomiota. Nykyisiin arviointimalleihin liittyviä epävarmuuksia on kirjallisuuskatsauksen perusteella havaittu.

Tilojen välisen ääneneristävyyden määrittämiseen tarvitaan lähtötiedoksi tietoa liitoseristävyyksistä ja rakenteiden ominaisuuksista. Seuraavaksi liitoseristävyyden arvoja kerätään kirjallisuudesta ja kootaan laskentaa varten. Myös muun tarvittavan lähtötiedon määrittämistä tarkastellaan sekä kirjallisuuskatsauksessa ilmenneitä epävarmuuksia arviointimenetelmään ja puurakenteiden toimintaan liittyen tarkastellaan lisää, jotta tilojen välisen ääneneristävyyden laskennallinen tarkastelu on mahdollista.

Lopulta esimerkkitulojen rakenneratkaisuja tarkastellaan ja vertaillaan, jolloin voidaan määrittää määräykset täyttävät rakenneratkaisut käyttötarkoitukseltaan erilaisissa puurakenteisissa tiloissa.

Askeläänen sivutiesiirtymisen tarkastelemiseen käytetään samoja liitoseristävyyksiä ja rakenteiden ilmaääneneristävyyksiä kuin ilmaäänen sivutiesiirtymisen tarkastelemisessa, joten samalla lähtötiedolla voidaan tarkastella molempien herätetyyppien sivutiesiirtymistä. Ilmaäänellä on kuitenkin yleensä useampi sivutie kuin askeläänellä, joten tässä tutkimuksessa tarkastellaan ainoastaan ilmaäänen sivutiesiirtymistä.

3 MENETELMÄT

Tilojen välisen ääneneristävyyden arviointiin käytetään tässä tutkimuksessa standardissa SFS-EN ISO 12354-1:2017 määritettyä menetelmää. Standardin menetelmälle on kehitetty kilpailevia menetelmiä, mutta ne ovat joko osoittautuneet epätarkoiksi tai kirjallisuudessa ja tutkimuksissa määritetty lähtötieto ei sovellu sellaisenaan niille, jolloin riittävän lähtötiedon kerääminen on mahdotonta (COST FP0702; Villot ja Guigoï-Carter, 2006; Schoenwald, 2008 ja 2012).

Tilojen välisen ääneneristävyyden ja sivutiesiirtymien arvioimiseen tarvitaan lähtötiedoksi tietoa tiloja erottavien ja sivuavien rakenteiden ominaisuuksista, ilma- ja askelääneneristävyyksistä sekä liitoksien liitoseristävyyksistä. Rakenteiden ääneneristävyydet ja liitoksien liitoseristävyydet voidaan molemmat määrittää mittaamalla tai laskennallisesti erilaisilla menetelmillä. Kirjallisuuskatsauksen perusteella liitoseristävyyden laskennallisessa määrittämisessä on vielä useita asioita, joihin tutkimus ei pysty vastaamaan, esimerkiksi materiaalimalleihin ja mallinnuksen yksityiskohtaisuuteen liittyen, joten sivuteiden arviointiin tarvittava tieto liitoseristävyyksistä kerätään kirjallisuuslähteistä. Rakenteiden ilma- ja askelääneneristävyyden laskennalliseen määrittämiseen on lukuisia teorioita, joista tässä työssä käytettyjä on kuvattu kappaleessa 3.1.

Tässä kappaleessa tarkastellaan käytettävään arviointimenetelmän puurakennuksiin soveltamiseen liittyviä haasteita sekä esitellään lähtötiedon hankkimiseen käytettyjä menetelmiä.

3.1 Rakenteiden ääneneristävyys

3.1.1 Ilmaääneneristävyys

Rakenteen ilmaääneneristävyyden määrittäminen laboratoriossa vaatii kohtalaisen suuria koejärjestelyjä, jolloin sen määrittäminen on hidasta ja kallista. Myös erilaisten rakenneariatioiden testaaminen laboratoriossa on hankalaa sekä aikaa vievää, minkä seurauksena ilmaääneneristävyyden laskennalliseen arvioimiseen on kehitetty lukuisia teorioita ja menetelmiä.

Kokonainen rakenne, usein seinä tai välipohja, voidaan jakaa ääneneristävyyden näkökulmasta osiin, joiden toimintaa tarkastellaan sekä yksittäisinä rakenteina että näiden osien muodostamana kokonaisena systeeminä. Tyypillisesti osilla on taajuusalueita, joilla niiden toiminta on muista alueista poikkeavaa. Esimerkkinä kokonaisesta rakenteesta voidaan käyttää kaksinkertaista rankalevyseinää, joka koostuu levyistä sekä niiden välissä olevasta ilmapölyistä ja rankakytkenästä. Tämän rakenteen ilmaääneneristävyyden määrittämiseksi tarvitaan malli kuvaamaan yksittäisen levyn ääneneristävyyttä, toinen malli kuvaamaan ilmapölyin toimintaa sekä kolmas malli kuvaamaan rankojen ja levyjen välistä kytkentää. Lisäksi täytyy huomioida kyseisen systeemin toiminta kokonaisena, mikä tarkoittaa tässä tapauksessa esimerkiksi levyjen ja ilmapölyin muodostaman systeemin resonanssitaajuutta, millä rakenteen ääneneristävyys heikkenee. Tämä resonanssitaajuus toimii myös systeemin kokonaiskäyttäytymistä määrittävänä rajataajuutena. (Kylliäinen ja Hongisto, 2007)

Rakentamisessa käytetään lukuisia kuvattuna kaltaisia rakenteita, joissa voi olla erityyppisiä kytkentöjä, rakennekerroksia ja muita ääneneristävyyteen vaikuttavia tekijöitä. Tässä työssä ilmaääneneristävyyksien määrittämiseen käytetään lähteistä (Sharp, 1978; Kristensen, ja Rindel, 1989; Hongisto, 2003; Hopkins, 2007; Kylliäinen ja Hongisto, 2007; Rindel, 2007; Vigran, 2008) koottua mallia, jolla voidaan huomioida rakennekerroksien massat ja jäykkyydet; ilmapölyt sekä niiden vaimennus; ranka-, piste-, ja sandwich-kytkennät sekä useat resonanssi-ilmiöt. Käytettävät teoriat perustuvat pääosin rakenteiden mallintamiseen äärettöminä ja monikerrosrakenteiden mallintamiseen rekursiivisesti kaksinkertaisina rakenteina.

3.1.2 CLT:n ilmaääneneristävyys

Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin CLT:n dynaamiseen toimintaan liittyviä erikoisuuksia, sekä toisaalta edellisen kappaleen lähteissä ei ole riittävän kattavaa mallia ortotrooppisen levyn mallintamiseen, joten CLT:n ilmaääneneristävyyden laskentaa tarkastellaan tässä erikseen.

Myös ortotrooppisen levyn ilmaääneneristävyyden laskentateorioita ja -malleja on kehitetty useita. Kirjallisuuskatsauksen ja Santonin et al. (2020) mukaan kolme tärkeintä CLT:lle sovellettua mallia ovat ekvivalentteihin taivutusjäykkyyksiin perustuva malli, elliptinen malli ja aaltoprofiileille kehitetty malli. Ekvivalentteihin taivutusjäykkyyksiin perustuva malli olettaa, että tarkasteltavat levyt ovat vain lievästi ortotrooppisia, jolloin

niiden taivutusjäykkyyttä voidaan kuvata taivutusjäykkyyksien geometrisellä keskiarvolla ja levyn tarkastelu voidaan tehdä isotrooppisen levyn teorioilla (Hopkins, 2007). Kirjallisuuskatsauksen perusteella CLT:n taivutusjäykkyydet voivat kuitenkin poiketa toisistaan merkittävästi, joten ekvivalentteihin taivutusjäykkyyksiin perustuvan mallin käyttäminen ei ole perusteltua ja tarkastelu täytyy tehdä yksityiskohtaisemmalla mallilla, kuten elliptinen malli tai aaltoprofiileille kehitetyllä mallilla.

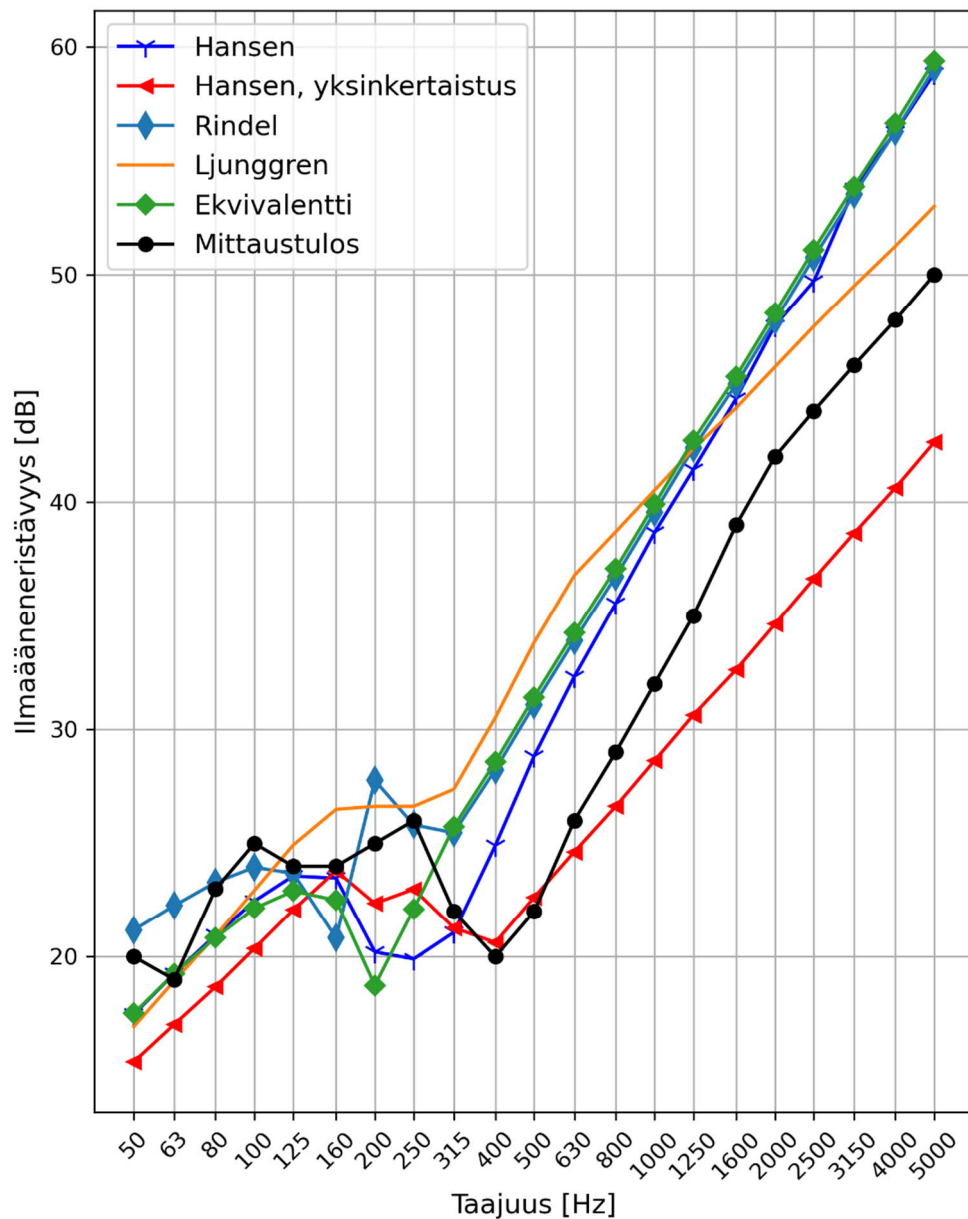
Isotrooppisten levyjen tapauksessa teorian voidaan johtaa siten, että levyn pinnalle saapuvaa ääniaaltoa ei tarvitse tarkastella laskelmissa atsimuuttikulman suhteen. Ortotrooppisen levyn tapauksessa tätä yksinkertaistusta ei kuitenkaan voida tehdä ja kyseisen kulma täytyy huomioida. Elliptisessä mallissa (Piana ja Granzotto, 2014) levyn ominaisuuksia interpoloidaan elliptisellä funktiolla, missä muuttujana on atsimuuttikulma, jolloin taivutusjäykkyys saadaan kuvattu kulman suhteen pääsuunnista elliptisesti interpoloimalla. Santonin et al. (2017) käytti tätä menetelmää yhdessä mitattujen taivutusaallon nopeuksien ja TMM:n (*engl. transfer matrix method*, siirtomatriisimenetelmä) kanssa, päätyen tarkkoihin lopputuloksiin. TMM on tehokas laskentamenetelmä, millä ratkaistaan kaksikulotteinen aallon etenemisiongelma tasoista koostuvan rakenteen läpi. Santoni et al. (2017) tulokset olivat tarkkoja, mutta menetelmän käyttämisestä rajoittaa mittauksien avulla määriteltävä näennäinen taajuusriippuvainen taivutusjäykkyys, minkä määrittäminen pelkästään pääsuuntien suunnassa ei ole riittävää (van Damme et al., 2017). Näennäisellä taajuusriippuvaisella taivutusjäykkyydellä laajennetaan käytettävät levyteoriat kuvaamaan ilmiöitä, joita ei voida muuten sisällyttää perinteisiin levyteorioihin.

Hansen (1992) kehitti erittäin ortotrooppisille aaltoprofiileille sopivan äärettömän levyn mallin klassista ortotrooppisen levyn teoriaa soveltamalla. Hansenin tutkimuksessa profiilipellin ääneneristävyys johdetaan ortotrooppisen levyn liikeyhtälöstä, lopulta niin, että läpäisysuhde saadaan laskettua levyn tulevaan ääniaaltoon kohdistamasta impedanssista. Mallissa levyn jäykkyydet lasketaan tavanomaisilla lujuusopin kaavoilla ja häviötermi sijoitetaan kompleksisena impedanssin yhtälöön. Hansenin (1992) tutkimuksessa on esitetty myös yksinkertaistetut kaavat samasta mallista, jotka voidaan ratkaista ilman integrointia. Yksinkertaistus on tehty olettamalla rakenteen häviökerroin nollassi.

Näiden teorioiden lisäksi Rindel (2007) on esittänyt teorian ortotrooppiselle levyille, mikä perustuu Hansenin (1992) ja klassiseen ortotrooppisen levyn teoriaan, sekä Ljunggren

(2019) on esittänyt CLT:n ilmasteneristävyyden laskemiseen käytettävän yksinkertaisen mallin, joka perustuu empiriseen tietoon ja Sharpin (1978) tutkimuksiin.

Kuvassa 9 on esitetty eri teorioilla laskettuja ilmasteneristävyyksiä 80 mm paksulle kolmikerroksiselle CLT-levylle (15-50-15), jota tarkasteltiin Krajci et al. (2012) tutkimuksessa. Kuvaajasta huomataan aikaisemmin Krajci et al. (2012) esittämä suuntaus: pienillä taajuuksilla nykyiset mallit aliarvoivat CLT:n ilmasteneristävyyden ja suurella, häviökertoimen määrittämällä alueella mallit yliarvoivat ilmasteneristävyyden. Ilmiö toistuu myös muille CLT-rakenteille tehdyissä vertailulaskelmissa.



Kuva 9. CLT-rakenteelle mitattu ja laskettuja ilmasteneristävyyksiä.

Kuvassa esitettyjen käyrien laskennassa ei käytetty näennäisiä jäykkyyksiä, eivätkä kyseiset laskentamallit huomioi levyjen äärellisyyttä tai pienillä taajuuksilla merkittäviä yksittäisiä ominaismuotoja (kuva 8). Kirjallisuudessa ortotrooppisen levyn äärellisyys on huomioitu määrittämällä levyille äärellinen säteilytehokkuus, mutta myös sen laskentaan on käytetty mitattuja jäykkyyssarvoja (Santoni, 2017). Tuoreimmissa tutkimuksissa puukomposiittituotteiden ilmaääneneristävyyksien arvioimiseen on käytetty mallintamalla määritettyjä näennäisiä jäykkyyksiä (Santoni, et al. 2020). Kuvasta 9 nähdään, ettei ilman mittauksiin tai mallintamiseen perustuvia malleja CLT-ilmaääneneristävyyttä pystytä määrittämään kovin tarkasti, joten CLT:n ilmaääneneristävyyden arviointimalleissa on vielä kehitettävää. Tästä syystä tämän työn laskelmissa käytetään Hansenin teoriaa kirjallisuudessa maltillisilla häviökertoimilla, jolloin malli ei yliarvio liikaa ilmaääneneristävyyttä suurilla taajuuksilla.

3.2 CLT:n häviöt ja tyypitys

Kirjallisuuskatsauksessa läpikäydyistä tutkimuksista useassa todettiin, että CLT:n sisäinen vaimennus on suurempi kuin standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 esiversioissa annettu raja-arvo 0,03 tyypin B rakenteelle (Mahn ja Müller-Trapet, 2019; Schoenwald et al., 2013, Mahn et al., 2020). Tutkimuksissa liitoeristävyys ilmoitetaan kuitenkin yleensä värähtelyeristävyydellä, missä vaimennuksen suhteen tehty normalisointi on mukana. Värähtelyeristävyydellä ilmoitettuna liitoseristävyys on ikään kuin varmallalla puolella, sillä jos rakenteen rakenteellinen jälkikaiunta-aika ei muutu eri asennus- tai kenttätilanteiden välillä, tyypin A rakenteille tehtävä korjaus (vähennetään kaavan 8 jälkimmäinen termi värähtelyeristävyydestä kenttätilannetta vastaavilla arvoilla laskettuna) kenttätilanteessa sieventyy tyypin B materiaaleille tehtävää korjausta vastaavaksi kaavaksi (kaava 31, jälkimmäinen termi). Tällöin CLT:tä kenttätilanteen korjaus voidaan tehdä kaavalla (31) sekä sivutien ääneneristävyyden laskenta tyypin A kaavalla (21):

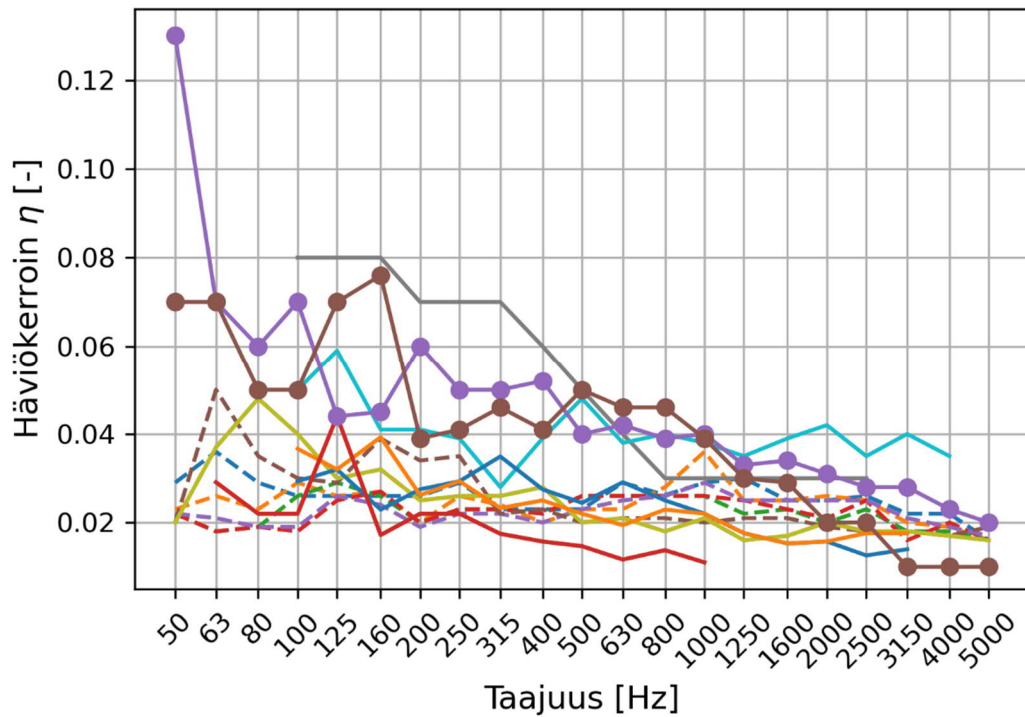
$$D_{v,ij,situ} = K_{ij} + 10 \log_{10} \left(\frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{S_i S_j}} \right), \quad (31)$$

Gerretsen (2017) tutki rakenteiden vaimennuksen vaikutusta SFS-EN ISO 12354-1:2017 mukaiseen arviointimenetelmään. Tutkimuksessaan Gerretsen tarkasteli rakenteita, jotka jäävät selkeästi tyyppiin A ja B luokiteltavien rakenteiden välille, kuten CLT kirjallisuuskatsauksen perusteella. Tutkimuksessa tarkasteltavan rakenteen massaa ja pinta-alaa

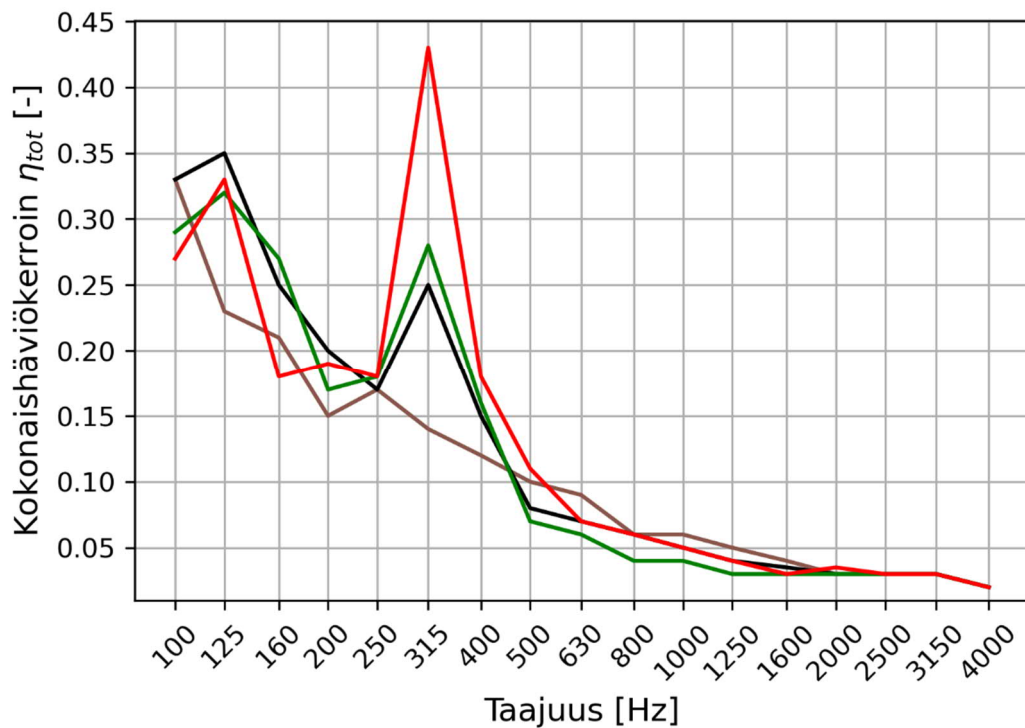
varioitiin olettamalla, että säteilystä aiheutuvat häviöt ovat pieniä ja muut tutkittavaan rakenteeseen liittyvät rakenteet ovat samankaltaisia. CLT:n säteilyhäviöt ovat Schoenwald et al. (2013) mukaan pieniä, jolloin oletuksia voidaan pitää soveltuvina CLT:lle. Tarkastelun perusteella Gerretsen toteaa, että rakenteen sisäisen häviön tulisi olla yleisesti vähintään 0,3, jotta kiinnityksistä aiheutuvia häviöitä voidaan pitää merkityksettöminä. Tämä tulos on vahvasti ristiriidassa esistandardissa esitetyn arvon kanssa, mitä on käytetty useassa tutkimuksessa CLT:n tyypittämisen perusteluna. Pintamassaltaan noin 200 kg/m² rakenteille sama arvo on noin 0,22. Vahvasti vaimennettujen rakenteiden tapauksessa sisäinen häviö on perusteltua kääntää etäisyysvaimennukseksi, jolla 0,3 vastaava arvo on noin 3 dB/m. Standardissa tyypin A materiaalin määrittelyssä sanotaan, että tarkasteltavan rakenteen pituussuunnassa värähtelyn täytyy vaimeta vähemmän kuin 6 dB koko rakenteen matkalla.

Gerretsen (2017) tarkasteli laskennallisesti myös häviöiden huomioimatta jättämisen vaikutuksia sivuteiden ja rakenteiden ilmaääneneristävyyksien arvioinnissa. Ilmaääneneristävyyksille esitetyistä tuloksista voidaan todeta, että häviöiden huomioimatta jättäminen on varmalla puolella, kun CLT-rakenne liitetään kenttätilanteessa muihin suurusluokaltaan yhtä painaviin rakenteisiin. Myös sivutien ääneneristävyydelle laskettu ilmaääneneristävyys tällöin on Gerretsenin laskemien perusteella varmalla puolella, kun rakenteen ilmaääneneristävyyteen ei tehdä korjausta ja liitoseristävyyden määrittämisessä jätetään vaimennus huomioimatta.

Useassa tutkimuksessa on mitattu CLT-rakenteiden sisäisiä- tai kokonaishäviöitä tai rakenteellista jälkikaiunta-aikaa. Näissä tutkimuksissa CLT-rakenteiden jälkikaiunta-aika tai sisäinen häviö ei muuttunut merkittävästi vaihtelemalla rakenteisiin kohdistuvaa kuorimitusta (Mecking et al., 2015; Mecking et al., 2017), joustavien eristimien asentamisen seurauksena (Morandi et al., 2018; Di Bella et al., 2019; Mecking et al., 2015) tai tarkasteltavaan liitosrakenteeseen lisättyjen kenttätilannetta kuvaavien muiden rakenteiden seurauksena (Morandi et al., 2018). Lisäksi CLT:n sisäistä häviöitä tai rakenteellista jälkikaiunta-aikaa on mitattu ainakin tutkimuksissa (Schoenwald, et al., 2013; Santoni et al., 2019; Mahn ja Müller-Trapet, 2019; Mahn et al., 2020; Morandi et al., 2020). Tutkimuksista poimittuja häviökertoimia tai rakenteellisestä jälkikaiunta-ajasta laskettuja häviöker-toimia on esitetty kuvissa (10 ja 11).



Kuva 10. Kirjallisuudesta kerättyjä häviökertoimien arvoja.



Kuva 11. NRC:n laboratoriossa mitattuja kokonaishäviöiden arvoja.

Kuvissa 10 ja 11 on esitetty kirjallisuudesta poimittuja CLT:lle mitattuja häviökertoimien arvoja. Kuvajien arvoista on havaittavissa häviökertoimien epämääräisyys – NRC:n laboratoriossa mitatut tulokset, kuvassa 10 esitetyt kokonaishäviöt ja pisteviivalla merkityt

ripustetusta levystä mitatut sisäiset häviökertoimet kuvassa 11, ovat lukuarvoiltaan selkeästi muita tuloksia suurempia. Pisteviivalla kuvaajaan 10 merkityt sisäiset häviöt (Schoenwald et al., 2013) ovat suurempia kuin muiden tutkimuksien eri laboratorioissa mitatut kokonaishäviöt. Katkoviivoilla kuvaajaan 10 merkityt eri kuormitustilanteissa mitatut arvot ovat Meckingin et al., (2017) tutkimuksessa mitattuja tuloksia, lisäksi kuvaajassa on kaksi samassa tutkimuksessa (Mecking, et al., 2015) mitattua käyrää, jotka asettuvat hyvin lähelle näitä katkoviivalla merkittyjä arvoja. Kuvaajassa 10 on lisäksi esitetty muutamassa ääneneristyslaboratorion mukaisessa tuentatapauksessa mitattuja arvoja. Häviöiden mittauksessa on siis havaittavissa selkeitä eroja eri laboratorioiden välillä, eroavaisuuksien syytä on haastavaa arvioida tutkimuksien tuloksien perusteella, mutta kirjallisuuskatsauksen perusteella ne saattavat johtua esimerkiksi tutkimuskappaleiden valmistusprosessien eroavaisuuksista ja laboratorioiden mittausjärjestelyistä.

Meckingin et al (2017) tutkimusraportissa on esitetty erilaisissa liitostilanteissa mitattuja kokonaishäviöitä ja liitoksen levyjen kytkennästä toisiinsa aiheutuvia, SEA-analyysissä käytettäviä häviökertoimia. Näissä tuloksissa kytkennästä aiheutuvat häviöt ovat lukuarvoiltaan selkeästi kokonaishäviöitä pienempiä, jolloin sisäiset häviöt määrittävät kokonaishäviöt, mitkä ovat suuruusluokaltaan yhtä suurta kuvassa 10 esitettyjen saman tutkimuksen kokonaishäviöiden kanssa. Nämä kokonaishäviöt eivät kuitenkaan ole riittävän suuria Gerretsenin (2017) asettamaan rajaan, minkä mukaan rakenne voidaan luokitella tyyppiin B.

Kirjallisuudesta kerätyistä häviökertoimista ei voida vetää tutkimuksien väliltä johtopäätöksiä, koska tulokset eroavat toisistaan liikaa eivätkä kaikki toisaalta ole mielekkäitä. Useassa yksittäisessä tutkimuksessa tehtyjä havaintoja häviöiden muuttumattomuudesta eri tilanteiden välillä voidaan pitää soveliaina, varsinkin kun sama suuntaus toistuu useassa tutkimuksessa. Tällöin Gerretsenin laskelmien ja jälkikäiunta-ajan muuttumattomuuteen liittyvien havaintojen perustella CLT:tä käsitellään tässä tutkimuksessa liito-eristävyyden kannalta tyyppiin B rakenteena.

3.3 Rakenteiden ilmastueneristävyyksien korjaaminen

Käytettävissä arviointimenetelmässä lähtötieto täytyy korjata vastaamaan kenttätilanetta (kaava 22) sekä ilmastueneristävyyksistä vähennetään pakkovärähtelyä vastaava komponentti (kaava 24). Edellisessä kappaleessa esitetyn perusteella häviökertoimen mukaan tehtävä ilmastueneristävyyden korjaaminen (kaava 22) on haastavaa häviökertoimiin liittyvien epävarmuuksien takia. Toisaalta Gerretsenin (2017) mukaan korjauksen tekemättä jättäminen johtaa kokonaisuuden kannalta varmalla puolella olevaan tulokseen, jolloin insinööritieteiden käytännön sovelluksiin korjaus voidaan jättää tekemättä. Kaavasta (22) huomataan myös, että mikäli kokonaishäviö ei muutu merkittävästi, korjauksen vaikutus on pieni. Tätä tukee myös CLT:n määrittäminen tutkimuksissa tyyppien A ja B välimuodoksi.

Pakkovärähtelyn korjaaminen rakenteen ilmastueneristävyydestä tehdään standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 mukaan ilmastuäni- ja voimaherätteillä mitattujen säteilytehokkuuksien perusteella koinsidenssin rajataajuuden alapuolella. Korjaus perustuu oletukseen, jonka mukaan voimalla herätettynä rakenne värähtelee resonoivasti voiman vaikutuspisteen välittömän lähikentän ulkopuolella. Ilmastuäniherätteen oletetaan aiheuttavan rakenteeseen myös pakkovärähtelevän kentän, jolloin näiden säteilytehokkuuksien suhteesta saadaan määritetty resonoivaa ilmastueneristävyyttä vastaava komponentti. (SFS-EN ISO 12354:2017)

Myös säteilytehokkuus voidaan määrittää sekä kokeellisesti että laskennallisesti, mutta sen määrittämiseen liittyy haasteita etenkin puurakenteiden yhteydessä, kuten kirjallisuuskatsauksessa todettiin. Ohuilla CLT-rakenteilla koinsidenssin rajataajuus voi nousta keskitaajuuksille, jolloin korjaus tulisi tehdä merkittäväällä osalla tarkasteltavasta taajuusalueesta. Krajci et al. (2012) tutkimuksessa käytetty Davyn (2009) malli toimi kohtalaisella tarkkuudella CLT-rakenteilla koinsidenssin rajataajuuden alapuolella, mutta tutkimuksessa käytettiin isotrooppista levyteoriaa ekvivalenteilla jäykkyyksillä, jonka on osoitettu kuvaavan huonosti CLT:n dynaamista käyttäytymistä (Van Damme et al., 2017), jolloin mallin toimivuutta on vaikea arvioida ilman lisätutkimuksia. Myöhemmin Santonin et al. (2016, 2017 ja 2019) kehittämillä malleilla säteilytehokkuudet on onnistuttu arvioimaan tarkasti, mutta nämä mallit tarvitsevat lähtötiedoksi mittauksin määritettyä lähtötietoa, eivätkä siten ole käytännöllisiä. Mittauksin hankittavassa lähtötiedossa on

itse mittausjärjestelyjen (Mahn et al., 2015) ja niistä saatavan tiedon sovittamisen käytännön eri tilanteisiin liittyvien vaikeuksien lisäksi vaikeuksia CLT-rakenteissa havaittujen äänivuotojen takia (Mahn ja Müller-Trapet, 2019; Mahn et al., 2020).

Rankarakenteisilla rakenteilla koinsidenssin rajataajuus nousee suurille taajuuksille, jolloin korjauksella on merkitystä lähes koko rakennusakustiikan taajuusalueella. Rankarakenteiden säteilytehokkuuksien arviointia vaikeuttaa periodisen tuennan vaikutus levyn värähtelyyn. Leppingtonin kehittämän mallin mukaisia kaavoja (kaavat 14 ja 15) on käytetty kirjallisuudessa rankarakenteiden arviointiin, koska malliin sisältyy tuennan vaikutus säteilytehokkuuteen. Schoenwaldin (2008) mittaukset osoittivat Leppingtonin kaavoilla arvioidun resonoivan värähtelyeristävyuden vastaavan hyvin mitattuja arvoja sekä yhden levyn muodostavassa rakenteessa että kaksinkertaisessa rakenteessa, kun levyjä jäykistäviä rankoja ei ole. Schoenwald sovelsi Leppingtonin kaavoja rankalevyrakenteeseen kappaleessa 2.4.1 esitetyn rankalevyseinän taajuusriippuvan käyttäytymisen perusteella. Schoenwald vaihtoi levyjen tuentaa, tarkasteltavaa pinta-alaa, rakenteen jäykkyyttä ja jäykkyyteen osallistuvia rakenteen osia tarkasteltavan alueen mukaan, jolloin resonoivan säteilytehokkuuden arvioiminen onnistui kohtalaisella tarkkuudella. Schoenwaldin menetelmä on kirjallisuuskatsauksen perusteella säteilykertoimen määrittämiseksi kattavin, mutta siinäkin käytettiin kuitenkin mittauksin määritettyä lähtötietoa, mikä rajoittaa menetelmän soveltamista.

Laskentamallin tarkkuuden kannalta kirjallisuudessa on esitetty väitteitä korjauksen tekemiseen nähden puolesta ja vastaan sekä toisaalta korjauksen tekemiseen käytettäviä menetelmiä on vertailtu, kuten kappaleessa 2.2.6 on esitetty. Nightingalen (1995) tutkimuksessa laskentamalli osoittautui huomattavasti tarkemmaksi, kun korjaus tehtiin. De Gretere et al., (2013) rankarunkoiselle tutkimusrakenteelle saatujen tuloksien mukaan korjausta ei tarvitsisi tehdä. De Gretere et al. (2013) tutkimuksessa mittaamiseen käytettiin ilmaäänierätettä, jolloin tulos on mielenkiintoinen kappaleessa 2.2.6 esitetyn CSTB-menetelmää koskevan tutkimuksen tuloksiin verrattaessa (Villot ja Guigou-Carter, 2006). Tutkimuksessa CSTB-menetelmä, missä korjausta ei tehdä ja liitoseristävyys määritetään ilmaäänierähteellä, osoittautui tarkaksi rankarakenteiselle rakenteelle tilojen välistä äänenieristävyyttä mitattaessa. Tämä tulos antaa viitteitä Schoenwaldin (2012) tutkimuksen havaintoihin – pakkovärähtely pääsee etenemään ilmatilassa rakenteisiin nähden tehokkaammin, jolloin se näkyy mittaustuloksissa niin, ettei korjausta tarvitsisi tehdä. Tämä ilmiö olisi todennäköisesti havaittavissa tyhjällä ilmapälillä tehtävässä tutkimuksessa.

Useimmilla CLT-rakenteilla ja paksuuksilla koinsidenssin rajataajuus asettuu alueelle, jolla korjauksella ei ole merkitystä kuin muutaman terssikaistan tulokseen ja toisaalta korjaus ei ole niin lukuarvoltaan niin merkittävä lähellä koinsidenssin rajataajuutta, koska eri herätteillä määritettyjen säteilytehokkuuksien lukuarvojen erotus on pieni, jolloin korjaus (kaava 24, jälkimmäinen termi) on suuruudeltaan pieni. Tällöin CLT-rakenteilla korjauksen vaikutus jää yleensä pieneksi ja se voidaan jättää mitoituksessa varmuusvaraksi. Rankalevyrakenteiden osalta koinsidenssin rajataajuus nousee suurille taajuuksille ja siten korjaus tulisi tehdä laajemmalla taajuusalueella ja toisaalta sen lukuarvo olisi merkittävämpi. Säteilytehokkuuksien määrittämiseen ja korjauksen tekemiseen yleensä liittyy suuria epävarmuuksia, joten korjaus jätetään rankarakenteidenkin osalta tekemättä, jolloin myös sivutien ja liitoseristävyyden kokonaisuudessa tehty oletus toteutuu ja johtaa varmalla puolella olevaan tulokseen.

Käytettävän arviointimenetelmän mukaan lisävuorauksien parannusluvun tulisi myös edustaa ainoastaan resonoivaa värähtelyä. Standardi SFS-EN ISO 12354-1:2017 kuitenkin huomauttaa, ettei mittaluvun määrittämiseen ole vielä hyvin soveltuvaa menetelmää, jolloin kevyiden rakenteiden sivuteille käytettävänä parannuksen arvona voidaan käyttää erottavalle rakenteelle ilmaäänihäirähteellä määritetyn arvon puolikasta. Myös kirjallisuuskatsauksen perusteella tämän asian tutkiminen on vielä kesken, joten tässä työssä käytetään standardin suositusta.

4 VERTAILU- JA ESIMERKKIKOhteet

Tutkimuksen laskennallinen osa eli tilojen välisen ääneneristävyuden arviointimallin soveltaminen jaetaan kahteen osaan. Ensin arviointimallilla laskettuja tuloksia verrataan kenttätilanteissa suoritettujen mittauksien tuloksiin, jolloin arviointimallin mukaisen laskennan vastaavuutta mitattuihin arvoihin voidaan tarkastella sekä laskentamallin soveltamisesta eri tavoin aiheutuvia vaikutuksia voidaan vertailla. Toiseksi arviointimallia käytetään kuvitteellisten esimerkkikohteiden suunnitteluratkaisujen vertailemiseen, millä pyritään selvittämään rakenteiden toteutukselta vaadittavat yksityiskohdat erityyppisissä tiloissa.

Tässä kappaleessa esitellään vertailu- ja tarkastelumitoituksessa käytettävät tilat sekä niiden rakenteet. Tutkimuksen mittaustulokset perustuvat A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n mittaustietokannasta kerättyihin tuloksiin. Työn tekemisvaiheessa puurakenteita koskevia mittauksia oli suoritettu riittävän kattavasti ainoastaan asumiskäyttöön tarkoitetuissa rakennuksissa, joten arviointimallia verrataan asuinrakennuksissa mitattuihin arvoihin ja käyttötarkoitukseltaan asuinrakennuksista eriäviä rakennuksia tarkastellaan kuvitteellisella mitoituksella.

Vertailukohteet kohteet ja niistä käytetyt lyhenteet:

- CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 1 – CLT T1
- CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 2 – CLT T2
- Rankarakenteinen rivitalo - RANKA

Esimerkkikohteet ja niistä käytetyt lyhenteet:

- Toimistotila - TOIM
- Vastaanottotila - VAST
- Luokkahuone - LH

4.1 Vertailukohteet

4.1.1 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 1 – CLT T1

Ensimmäinen vertailukohde on CLT-rakenteinen tilaelementeistä koostuva kerrostalorakenne. Tarkasteltavat tilat ovat pinta-alaltaan 27-neliöisiä yksiöitä, joiden väliltä on mitattulokset vaaka- ja pystysuunnassa. Molemmissa tapauksissa vastaanottohuone on sama ja sen tilavuus on 59,12 m³. Kohteen laskelmissa käytettävät sivuavat ja erottavat rakenteet sekä niiden liitokset on esitetty liitteessä 1.1.

Vaakasuuntaisessa tarkastelussa tiloja erottaa kaksinkertainen huoneistojen välinen väliseinä, jonka pinta-ala on 18,4 m². Sivuvia rakenteita ovat välipohjat, ulkoseinä sekä käytävän väliseinä. Sivuvien rakenteiden pinta-alat [m²] on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. CLT T1 vaakatarkastelun sivuvien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetyshuone	Vastaanottohuone
Alapuolen välipohja	23,5	23,5
Yläpuolen välipohja	23,5	23,5
Ulkoseinä	9,40	9,40
Sivuava väliseinä	4,20	4,20

Vaakasuuntaisessa tarkastelussa erottavan seinän puoliskot on kytketty toisiinsa yläpuolen välipohjasta yhteensä neljällä teräslevyllä erottavan seinän koko pituudelta. Teräslevyt on kiinnitetty välipohjan alapinnan CLT-levyn yläpintaan ruuveilla. Myös sivuavat ulkoseinät on kytketty toisiinsa teräslevyillä, mutta ulkoseinän CLT-levyjen välillä ei ole muuta kytkentää.

Pystysuuntaisessa tarkastelussa tiloja erottava rakenne on välipohja, jonka pinta-ala on 23,5 m². Pystysuuntaan sivuvina rakenteina on kaksi ulkoseinää, käytävän väliseinä sekä huoneistojen välisen väliseinän puolisko. Pystysuunnassa liitoksien rakenteet poikkeavat vaakatilanteesta, siten että kytkentä on voimakkaampaa. Kaikki liitokset ovat T-liitoksia, joissa sivuvia rakenteita ei ole erotettu toisistaan. Sivuvien rakenteiden pinta-alat [m²] on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. CLT T1 pystytarkastelun sivuavien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetyshuone	Vastaanottohuone
Pitkä ulkoseinä	14,0	14,0
Lyhyt ulkoseinä	9,40	9,40
Huoneistojen välinen väliseinä	18,4	18,4
Käytävän väliseinä	4,20	4,20

4.1.2 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 2 – CLT T2

Toinen vertailukohde on myös CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo. Tarkastelu tehdään viidennen kerroksen huoneistoille, missä lähetyshuone on toisen huoneiston keittiö ja vastaanottohuone viereisen huoneiston makuuhuone. Kohteen laskelmissa käytettävät sivuavat ja erottavat rakenteet ja niiden liitokset on esitetty liitteessä 1.2. Rakenteiden liitokset on toteutettu niin, että tilojen välillä on kytkentää ainoastaan välipohjien kautta, joten ainoastaan välipohjan reitit on huomioitu laskennassa.

Tiloja erottavan väliseinän pinta-ala on 11,9 m² ja vastaanottohuoneen tilavuus on 34 m³. Tilaelementit on kytketty toisiinsa kaksinkertaisten erottavien väliseinien ala- ja yläpohjan liitoksien kohdilta kahdella teräslevyllä, joiden ala- ja yläpuolelle on sijoitettu tärinää eristävät kumikaistat. Sivuavat ulkoseinät on erotettu katkolla, eikä ulkoseinällä oli tilaelementtejä kytkeviä teräsosia. Sivuavien rakenteiden pinta-alat [m²] on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Toisen vertailutilaelementtitalon sivuavien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetyshuone	Vastaanottohuone
Alapuolen välipohja	29,7	13,2
Yläpuolen välipohja	29,7	29,7
Ulkoseinä	4,50	7,30

4.1.3 Rankarakenteinen rivitalo - RANKA

Kolmas vertailukohde on puurankarakenteisen rivitalon toisen kerroksen makuuhuoneet. Kohteen rakenteet ovat rankarunkoiselle rakennukselle tyypillisiä ja sivutiesiirtymien näkökulmasta liitokset vastaavat myös rankarunkoisten kerrostalojen rakenteita. Tarkasteltavien yläpuolella on vesikaton ilmatila, missä osastoiva väliseinä katkaisee äänen suoran

ilmareitin. Kohteen laskelmissa käytettävät sivuavat ja erottavat rakenteet ja niiden liitokset on esitetty liitteessä 1.3. Tilojen välillä on sivutie ulkoseinää, välipohjaa ja väliseinää pitkin, joiden rakenteet on katkaistu tilojen välillä. Yläpuolen sivuava reitti on oletettu merkityksettömäksi.

Tiloja erottavan välipohjan pinta-ala on $9,50 \text{ m}^2$ ja vastaanottohuoneen tilavuus $25,6 \text{ m}^3$. Sivuvien rakenteiden pinta-alat [m^2] on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vertailurivitalon sivuvien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetyshuone	Vastaanottohuone
Välipohja	15,9	9,80
Ulkoseinä	11,7	5,90
Väliseinä	8,8	8,8

4.2 Esimerkkikohteet

Tässä kappaleessa esiteltyt esimerkkitalat perustuvat mitoiltaan ja rakenteiltaan tyypillisiin tilatyyppeihin vastaaviin tiloihin. Rakenteet on valikoitu siten, että ne vastaavat mahdollisimman hyvin todellisissa kohteissa käytettäviä rakenteita ja niissä sivutiesiirtymien tarkastelu on aiheellista.

4.2.1 Toimistohuone - TOIM

Ensimmäinen esimerkkikohde on vierekkäiset toimistohuoneet, joiden välinen ääneneristävyyksivaatimus $D_{n,T,w} \geq 40 \text{ dB}$. Rakennus on CLT-runkoinen, missä tarkasteltavat tilat sijaitsevat toisessa kerroksessa ja tilojen ylä- ja alapuolella on sama välipohjarakenne. Vertailulaskelmien asuinkerrostalojen rakenteisiin verrattuna sivuavia rakenteita ei ole katkottu sekä tilojen väliset rakenteet eivät ole kytkemättömällä ilmapölyllä erotettuja. Kohteen laskelmissa käytettävät sivuavat ja erottavat rakenteet sekä niiden liitokset on esitetty liitteessä 1.4.

Tiloja erottaa väliseinä, jonka pinta-ala on $8,1 \text{ m}^2$. Sivuvia rakenteita on välipohjat, ulkoseinä sekä väliseinät. Kaikissa rakenteissa on CLT-runko. Sivuvien rakenteiden pinta-alat [m^2] on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Esimerkkitoimistotilojen sivuavien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetys huone	Vastaanottohuone
Alapuolen välipohja	8,64	8,64
Yläpuolen välipohja	8,64	8,64
Ulkoseinä	7,80	7,80
Sivuava väliseinä	7,80	7,80

4.2.2 Vastaanottotila - VAST

Toinen esimerkkikohde on vierekkäiset tilat, joiden välinen ääneneristysvaatimus on $D_{n,T,w} \geq 48$ dB. Tämän kaltaisia tiloja on tyypillisesti esimerkiksi koulujen oppilashuollon vastaanottotilat tai toimistohuoneet, joiden rakenteilta vaaditaan tavallista parempaa ääneneristävyyttä. Rakennus on CLT-runkoinen ja kaksikerroksinen, missä tarkasteltavat tilat sijoittuvat rakennuksen toiseen kerrokseen. Tilojen alapuolen rakenteet ovat välipohjarakenteita ja yläpuolella on CLT-rakennuksille tyypillinen yläpohja. Kohteen laskelmissa käytettävät sivuavat ja erottavat rakenteet sekä niiden liitokset on esitetty liitteessä 1.5.

Tiloja erottaa väliseinä, jonka pinta-ala on 11,6 m² ja sen toisella puolella on erilliskorokoinen väliseinärakenne, jolloin seinän puoliskojen välillä ei ole kytkentää. Sivuavia rakenteita on välipohja, yläpohja, ulkoseinä sekä väliseinät. Kaikissa rakenteissa on CLT-runko. Sivuavien rakenteiden pinta-alat [m²] on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Esimerkkivastaanottotilan sivuavien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetys huone	Vastaanottohuone
Välipohja	15,5	15,5
Yläpohja	15,3	15,3
Ulkoseinä	14,0	13,6
Sivuava väliseinä	14,0	13,6

4.2.3 Luokkahuone - LH

Kolmas esimerkkikohde on vierekkäiset luokkahuoneet, joiden välinen ääneneristysvaatimus on $D_{n,T,w} \geq 44$ dB. Mitoiltaan luokkahuoneet ovat perinteiselle luokkahuoneelle tyypilliset, jolloin ne ovat muita tarkasteltavia tiloja huomattavasti suurempia. Rakennus on CLT-runkoinen ja kaksikerroksinen, missä tarkasteltavat tilat sijoittuvat rakennuksen

toiseen kerrokseen ja rakenteet ovat koulurakennukselle tyypilliset. Kohteen laskelmissa käytettävät sivuavat ja erottavat rakenteet sekä niiden liitokset on esitetty liitteessä 1.6.

Tiloja erottaa väliseinä, jonka pinta-ala on 26,3 m². Sivuvia rakenteita ovat välipohja, yläpohja, ulkoseinä sekä väliseinät. Kaikissa rakenteissa on CLT-runko. Sivuvien rakenteiden pinta-alat [m²] on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Esimerkkiluokkahuoneen sivuvien rakenteiden pinta-alat.

	Lähetyshuone	Vastaanottohuone
Välipohja	60,2	59,1
Yläpohja	60,2	59,1
Ulkoseinä	22,0	21,7
Sivuava väliseinä	22,0	21,7

5 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

Kappaleessa 5.1 on esitetty vertailuja tilojen välisen ääneneristävyyden laskennallisen määrittämisen ja mittaustuloksien välillä. Vertailua on tehty myös eri lähteistä poimituilla liitoseristävyyksillä silloin kun se on ollut mahdollista. Laskentamallin tarkka validointi vaatisi yksittäisten sivutien ilmaääneneristävyyden määrittämisen mittauksin, mikä ei ole mahdollista tämän tutkimuksen puitteissa. Kappaleen 5.1 tarkoituksena on verrata yksinkertaisesti mitatun ääneneristävyyden vastaavuutta laskentaan, ei koko mallin yksittäisten osien toimivuuden tarkasteleminen.

Kappaleessa 5.2 tarkastellaan kuvitteellisten esimerkkitulojen välistä ääneneristävyyttä ja vaatimukset täyttäviä rakenneratkaisuja.

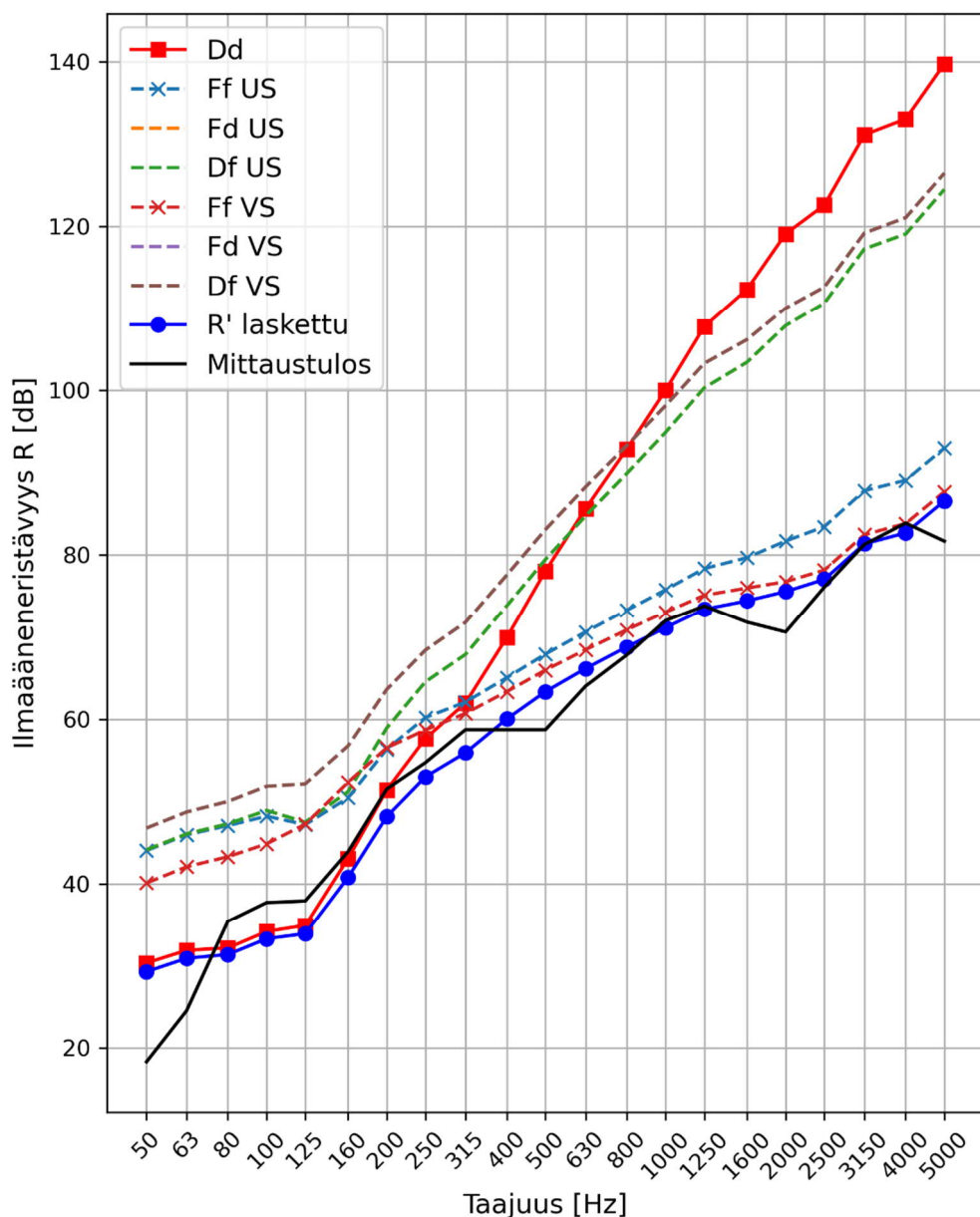
Tuloksia esittävisä kuvaajissa kirjaimilla f ja d viitataan sivuaviin ja erottaviin rakenteisiin kuvan 2 mukaisesti. Kirjaimia seuraavalla lyhenteellä viitataan sivuavaan rakenteeseen, esimerkiksi ”US” tarkoittaa ulkoseinää. Sivuteiden ilmaääneneristävyys on esitetty kuvaajissa katkoviivoilla, mittaustulos mustalla yhtenäisellä viivalla, erottavan rakenteen ilmaääneneristävyys punaisella pisteviivalla ja laskettu yhteiseristävyys sinisellä pisteviivalla.

5.1 Vertailukohteiden tulokset

5.1.1 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 1 – CLT T1

CLT T1 -vertailukohteen vaakatilanteen tarkastelun tulokset Rabold et al. (2019) esitetyillä liitoseristävyyksillä laskettuina on esitetty kuvassa 12. Laskennassa on mukana ainoastaan väli- ja ulkoseinän sivutiet, koska välipohjat on kytketty erottavan seinän kohdalta toisiinsa ainoastaan neljällä teräslevyllä 7,3 metrin matkalla, jolloin kytkentä on löyhää. Lisäksi X-liitoksessa värähtelyenergia jakautuu ulkoseinän T-liitokseen verrattuna useammalle levyille ja löyhän liitoksen seurauksena todennäköisesti yläpuolen CLT-levylle, koska painovoima kytkee sen tehokkaasti välipohjan CLT-levyyn. Kuvasta on havaittavissa, että pienillä taajuuksilla erottavan seinän läpi siirtyvä ääni määrittää tilojen välisen ääneneristävyyden, mutta suurilla taajuuksilla sivutiet määräävät kokonaisuuden. Suurilla taajuuksilla erottavan väliseinän ääneneristävyys on myös huomattavasti korkeampi laskennalliseen ja mitattuun tulokseen verrattuna.

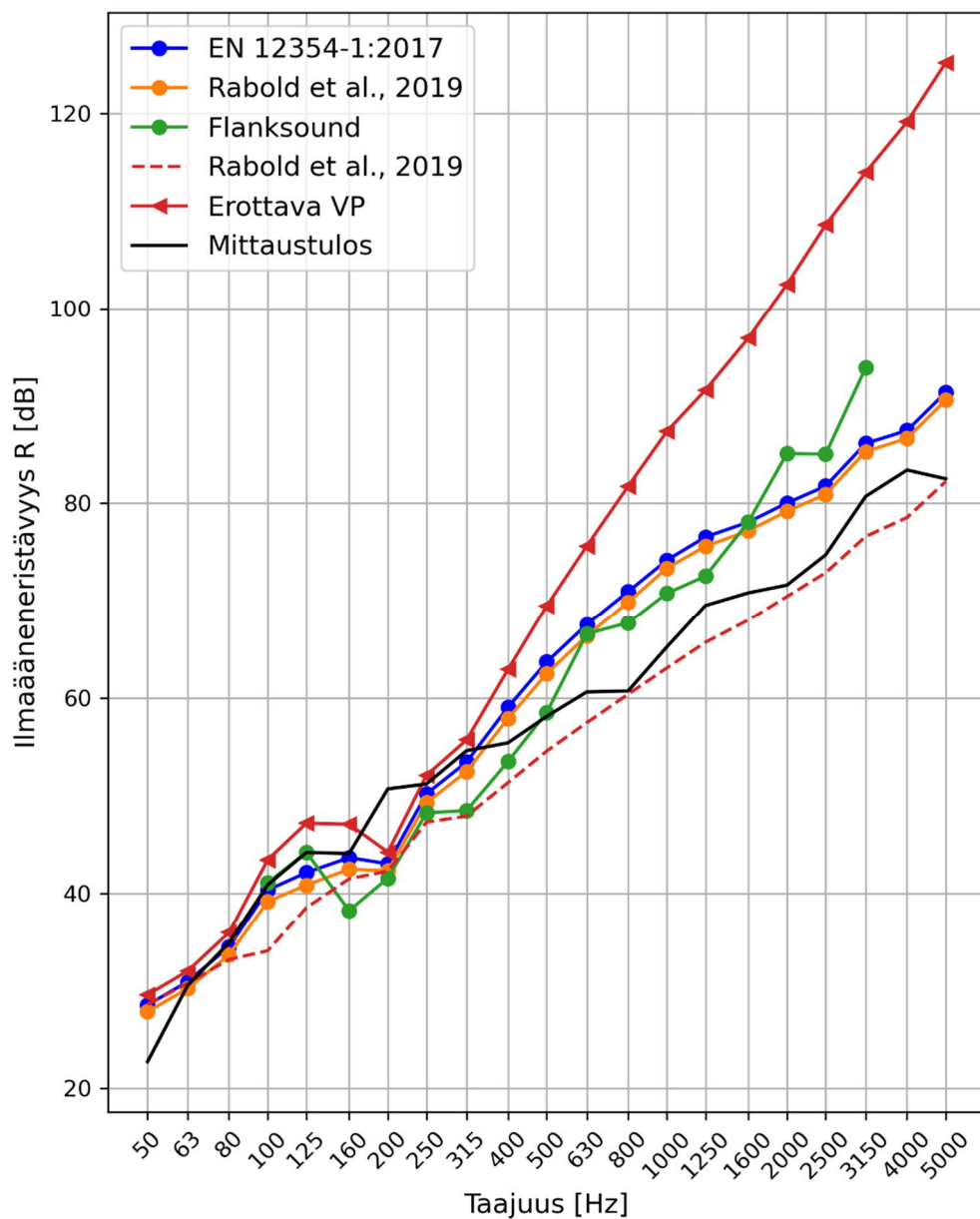
Lasketun käyrän muoto vastaa kohtuudella mittauskäyrää, mutta noin 400 Hz ja 2000 Hz kohdalla näkyvät kuopat eivät näy lasketussa tuloksessa. Tilanteen jokaisen sivuavan rakenteen pinnassa on lisävuoraus, missä on pintakerroksena kaksi paksua kipsilevyä, joiden koinsidenssin rajataajuus osuus 2000 Hz terssikaistalle. Standardin SFS-EN ISO 12354-1 mukaan tehdyssä laskelmassa lisävuorausten vaikutus on puolitettu, joten on mahdollista, ettei kipsilevyjen koinsidenssin vaikutus näy tuloksissa standardin yksinkertaistetun ohjeistuksen vuoksi. 500 Hz kohdalla näkyvän kuopan lähde on vaikea määrittää: se voi olla esimerkiksi jonkun CLT-levyn koinsidenssista aiheutuva kuoppa, pienen reiän resonanssitaajuus tai välipohjan harvan teräslevykiinnityksen liitoseristävyyden piikki.



Kuva 12. CLT T1 vaakatarkastelun tulokset.

Yksilukuarvona esitettynä vaakatilanteessa mittaustulos on R'_w on 62 dB ja laskettu tulos on R'_w on 60 dB. Yksilukuarvona laskennan mukainen arviointi osuu lähelle mitattua arvoa.

Samana kohteen pystytilanteessa liitoksia vastaavaa liitoseristävyttä on saatavilla useassa eri lähteessä. Vertailu eri lähteiden (SFS-EN ISO 12354-1:2017; Rabold et al., 2019; Morandi, 2018) liitoseristävyksillä lasketusta tilojen välisestä pystysuuntaisesta ilmäeneristävydestä on esitetty kuvassa 13. Lisäksi kuvassa on esitetty katkoviivalla Rabold et al. (2019) liitoseristävyksillä laskettu tulos, missä välipohjarakenteeksi on valittu alapinnan CLT-levy ja loput välipohjan rakenteet määritetty lisärakenteiksi.



Kuva 13. CLT T1 pystytilanne eri liitoseristävyksillä.

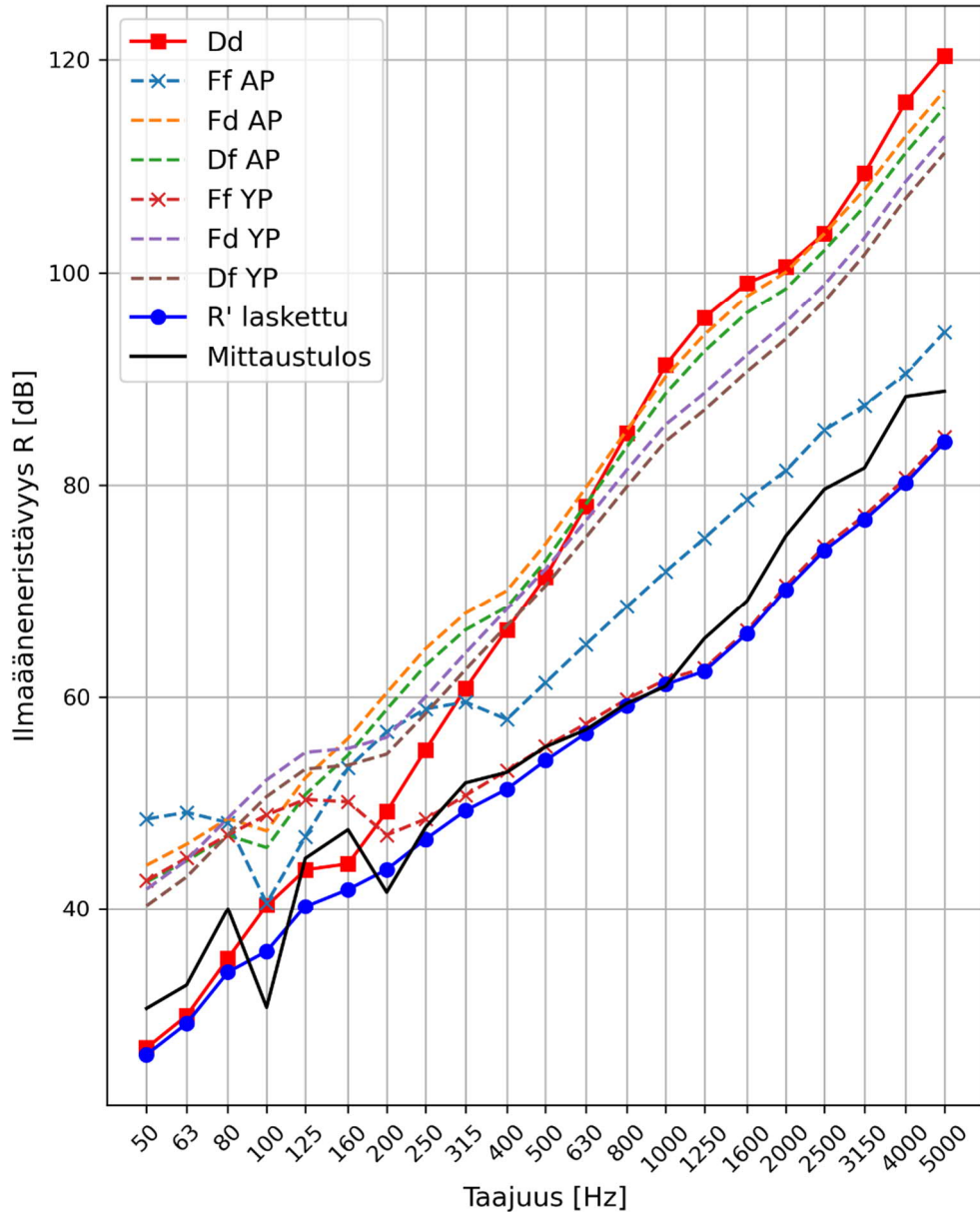
Pystytilanteessa kaikki sivuavat liitokset ovat T-liitoksia, sillä sivuavat seinät ovat joko ulkoseiniä tai kaksinkertaisia seiniä, joiden puoliskojen välillä ei ole kytkentää. Kuvajasta havaitaan, että tässäkin tilanteessa pienillä taajuuksilla välipohjarakenne määrää tilojen välisen ääneneristävyyden ja suurilla taajuuksilla sivutiesiirtymät määrittävät sen. Laskettu tulos eroaa kuitenkin vaakatilanteeseen verrattuna huomattavasti enemmän mitaustuloksesta suurilla taajuuksilla. Tämä johtuu välipohjan ja erottavien seinien monimutkaisesta liitoksesta, jota kuvaavaa liitoseristävyyttä ei ole saatavilla. Välipohjan ylempi rankarakenteinen puolisko on erotettu kytkemättömällä ilmapälillä välipohjan alapuolen CLT-levystä (liite 1.1. liitokset), jolloin erottavaan rakenteeseen liittyvistä sivuteistä tulee monimutkaisia. Liitos aiheuttaa uuden sivutien, missä ääni etenee erottavasta rakenteesta sivuavaan rakenteeseen ja takaisin erottavan rakenteen alapinnan CLT-levyyn. Lisäksi liitos vaikeuttaa puhtaasti sivuavan sivutien arvioimista, sillä kohtisuoran välipohjarakenteen vaikutusta värähtelyn vaimenemiseen on vaikeampi arvioida. Kuvassa 13 katkoviivalla esitetty tilojen välinen ääneneristävyys Rabold et al. (2019) liitoseristävyyksillä vertailun vuoksi, siten että sivuteiden ääneneristävyydessä huomioidaan ainoastaan välipohjan CLT-levy ja muut rakenteet huomioidaan ainoastaan välipohjan suorassa ääneneristävyydessä.

Rabold et al. (2019) liitoseristävyyksissä ja standardin lähtötiedossa on käytetty osittain samoja tutkimuksia, mikä selittää näillä liitoseristävyyksillä laskettujen tuloksien samankaltaisuuden. Morandi et al. (2018) tutkimuksen liitoseristävyyksillä laskettu tulos poikkeaa tässä tilanteessa eniten mitatusta arvosta.

Pystysuunnassa mitattu yksilukuarvo R'_w on 61 dB. Vastaava luku lasketuille arvoille on SFS-EN ISO 12354-1:2017 mukaisilla liitoseristävyyksillä R'_w on 61 dB, Rabold et al. (2019) liitoseristävyyksillä R'_w on 60 dB, Morandi et al. (2018) liitoseristävyyksillä R'_w on 59 dB ja tilanteelle, missä sivuavissa rakenteissa on huomioitu ainoastaan välipohjan CLT, R'_w on 57 dB. Yksilukuarvo painottaa pieniä taajuuksia, joten vaikka suurilla taajuuksilla eri liitoseristävyyksillä lasketut käyrät eroavat merkittävästi, eivät yksilukuarvot poikkea toisistaan yhtä merkittävästi.

5.1.2 CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo 2 – CLT T2

CLT T2 vertailukohteen tarkastelun tulokset Rabold et al. (2019) esitetyillä liitoseristävyyksillä laskettuina on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. CLT T2 vertailukohteen ilmaääneneristävyyden.

Kuvaajasta on tässäkin tapauksessa nähtävissä sama suuntaus kuin aikaisemmissa kohteissa – pienillä taajuuksilla erottava rakenne määrää ääneneristävyyden ja suurilla sivutietyksiirtymät. Kuvaajasta ilmenee, että tässä tapauksessa ääni etenee pääosin yläpuolen muusta välipohjasta erotettua CLT-levyä pitkin. Suurilla taajuuksilla laskettu arvo on hieman mitattu arvoa pienempi, tätä voi selittää Morandi et al. (2018) tutkimuksen liitoseristävyyksistä havaittavissa oleva suuntaus, jonka mukaan vahvoilla pistemäisillä kiinnityksillä pienillä taajuuksilla liitoseristävyyden on lukuarvoltaan pieni ja suurilla taajuuksilla suuri. Liitoseristävyyden on tässä tapauksessa laskettu Rabold et al. (2019) liitoseristävyyksillä, missä kiinnitykset ovat tiheämmin jaettu kuin tässä kohteessa, jossa kytkentä on tehty kahdella teräslevyllä.

Pienillä taajuuksilla mittauskäyrässä näkyy kaksi kuoppaa, jotka eivät ole erotettavissa lasketusta käyrästä. Sivuteiden ääneneristävyyttä tarkastellessa on kuitenkin alapuolen välipohjassa selkeä piikki ensimmäisen mittauskäyrän kanssa samalla taajuuskaistalla ja yläpuolen välipohjassa jälkimmäisen mittauspiikin kohdalla. Piikki alapuolen käyrässä aiheutuvat pintalaatan ja kantavan CLT-rakenteen välisestä dilataatioresonanssista ja yläpuolen CLT-levyn koinsidenssista. Erottavan rakenteen ilmaääneneristävyyden laskennassa on käytetty Hansenin teoriaa, joka kappaleessa 3.1.2 esitetyn mukaisesti aliarvioi ilmaääneneristävyyttä usein pienillä taajuuksilla ja toisaalta Rabold et al. (2019) liitoseristävyys todennäköisesti yliarvio liitoseristävyyden pistemäisillä kiinnityksillä, kuten standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 lähtötieto Morandi et al (2018) mukaan. Nämä selittävät mittauksen ja laskennan eroavaisuuksia, tosin mittauksien epätarkkuus on pienillä taajuuksilla suurimmillaan ja käytetty liitoseristävyys ei vastaa täysin tarkasteltavan tilanteen mukaista tapausta.

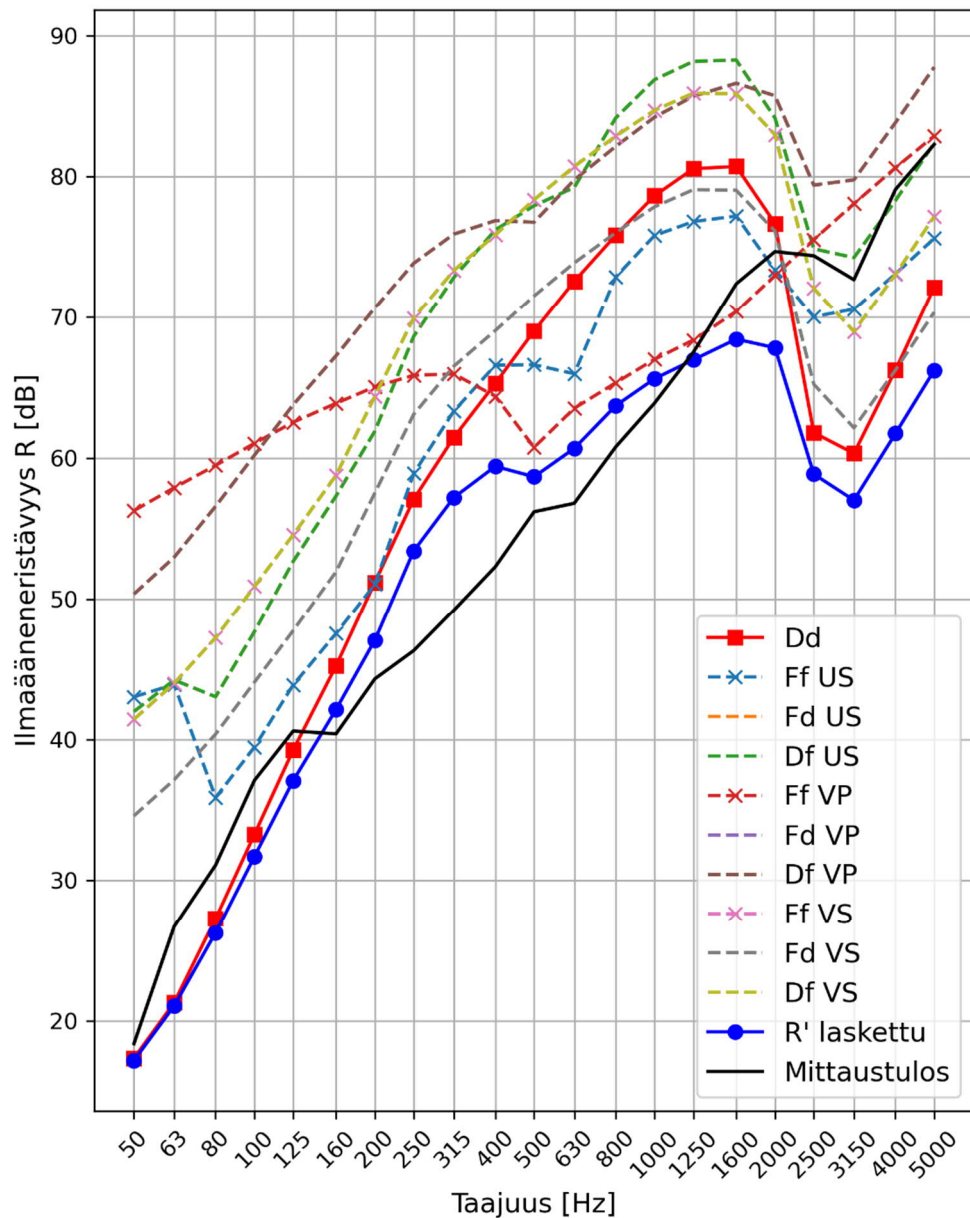
Mitattu vertailukohteen ilmaääneneristävyyden yksilukuarvo R'_w on 58 dB ja laskettu R'_w on 57 dB.

5.1.3 Rankarakenteinen rivitalo - RANKA

Rankarakenteisen rivitalon toisen kerroksen vierekkäisten asuntojen makuuhuoneille laskennallisesti määritetty sekä mitattu ilmaääneneristävyys on esitetty kuvassa 15. Pienillä taajuuksilla erottavan väliseinärakenne määrittää kokonaiseristävyyden ja mittaustulos vastaa kohtalaisesti laskettua kokonaiseristävyyttä. Laskennassa sivuteiden ilmaääneneristävyyteen ei ole tehty korjausta niiden kriittisten taajuuksien alapuolella, joten etenkin pienillä taajuuksilla sivuteiden merkitys kuvaajassa on esitettyä vähäisempi.

Lasketussa käyrässä näkyvä kuoppa 2500 Hz ja 3150 Hz terssikaistoilla on lähes jokaisessa rakenteessa mukana olevan kipsilevyn koinsidenssin rajataajuus. Laskentatulosta yliarvioi koinsidenssitaajuuden vaikutusta, koska laskenta olettaa, että päällekkäin kiinnitetyt kipsilevyt värähtelevät täysin toisistaan riippumatta. Todellisuudessa kipsilevyt vaikuttavat toistensa värähtelyyn ja kuoppa ei ole yhtä merkittävä, niin kuin mittaustuloksesta on nähtävissä. Mittaustulos alittaa erottavan väliseinän ilmaääneneristävyyden selkeästi 200 Hz ja 1600 Hz välisellä alueella ja mittaustuloksesta on havaittavissa kuoppa noin 500 Hz kohdalla. Sivuteiden ääneneristävyyksistä on havaittavissa, että välipohjan vanerilevyn ja ulkoseinän verhouspaneelein rajataajuudet näkyvät sivuteiden kuvaajissa.

Mittaustuloksen eroavaisuus väliseinärakenteeseen saattaa aiheutua näihin liittyvistä rakenteista, sillä muut rakenteet eivät tällä alueella vaikuta merkittävästi, vaikka niiden ääneneristävyyttä parantavaa korjausta ei ole tehty. Laskennassa on oletettu, että rakenteet on toteutettu huolellisesti rakennepiirustusten mukaisesti. Virheellisen tai huolimattoman toteutuksen seurauksena sivuavien rakenteiden välinen kytkentä voi vahventua, jolloin ääni etenee tehokkaammin sivuavia teitä pitkin, kuin laskennassa on oletettu. Mikäli kyseisen laskennan ulkoseinärakennetta tai välipohjaa heikentää niin, että ulkoverhouspaneeli tai vanerilevy ovat määräävämmässä asemassa, laskettu käyrä seuraa paremmin mitattua tulosta. Eroavaisuus voi selittyä myös pienellä raolla.



Kuva 15. Rankarakenteiselle vertailukohteelle laskettu ja mitattu ilmaääneneristävyys.

Rankarakenteilla sopivan liitosta kuvaavan tapauksen ja liitoseristävyyden määrittäminen on haastavaa, sillä rangat ja levykerrokset voidaan sijoittaa liitoksiin usealla eri tavalla, jolloin yleensä täytyy valita parhaiten tilannetta vastaava liitos. Rankarakenteille on myös vähemmän saatavilla mitattujen liitoksien arvoja. Tässä työssä käytetyt rankarakenteiden liitoseristävyydet ovat standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 lähtötietoa.

Yksilukuarvona tilojen välille mitattu arvo R'_w on 58 dB ja laskennallisesti määritetty arvo R'_w on 59 dB.

5.2 Esimerkkimitoitukset

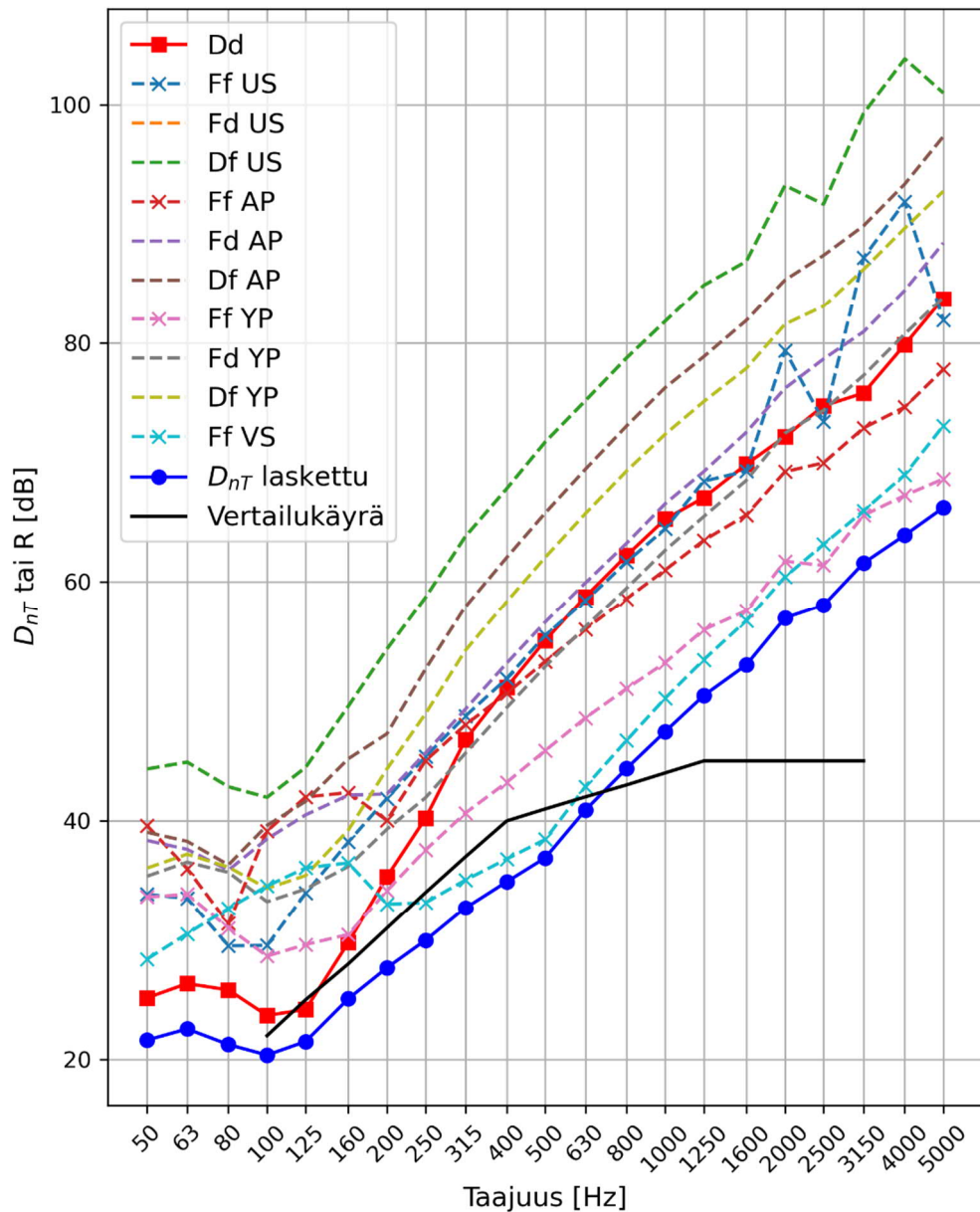
Tässä kappaleessa tarkastellaan esimerkkikohteille tehdyn mitoituksen tuloksia ja kokonaisuuden määrittäviä siirtymisteitä. Edellisen kappaleen perusteella laskentamalli toimii kohtalaisesti, varsinkin kun liitoseristävyys vastaa tutkittavaa liitosta. Tässä kappaleessa tarkasteltujen rakenteiden liitokset vastaavat hyvin kerättyjen liitoseristävyyksien liitoksia.

5.2.1 Toimistohuone – TOIM

Kuvassa 16 on esitetty toimistohuoneiden välinen ilmajääneristävyys, kun sivuavia rakenteita ei ole katkaistu tilojen välillä. Kuvassa katkoviivoilla esitetyt sivuteiden ääneneristävyydet ja erottavan seinän ääneneristävyys on ilmoitettu ilmajääneristävyytenä R ja laskennan tulos standarisoituna äänitasoerona D_{nT} , mitä käytetään nykyisissä määräyksissä. Ilmajääneristävyyden ja standardisoidun äänitasoeron yhteys on esitetty kaavassa 20. Kuvassa mustalla viivalla on esitetty vertailukäyrä, minkä avulla yksilukuarvo $D_{nT,w}$ määritetään.

Yksilukuarvona tilojen välinen standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on 41 dB, jolloin tilojen välille sovellettava ääneneristysvaatimus täyttyy laskelman mukaan ilman rakenteiden katkaisemista. Kuvaajasta havaitaan, että tilojen välisen ääneneristävyyden määrittävät erottava rakenne, sivuava ohut yhdestä CLT-levystä koostuva väliseinä ja suurilla taajuuksilla yläpuolen välipohja. Yläpuolen välipohja ei kuitenkaan vaikuta yksilukuarvoon, koska kokonaiseristävyyden käyrä on vertailukäyrän yläpuolella. Ulkoseinän ja välipohjien kantavat rakenteet ovat siis riittävän massiivisia täyttämään

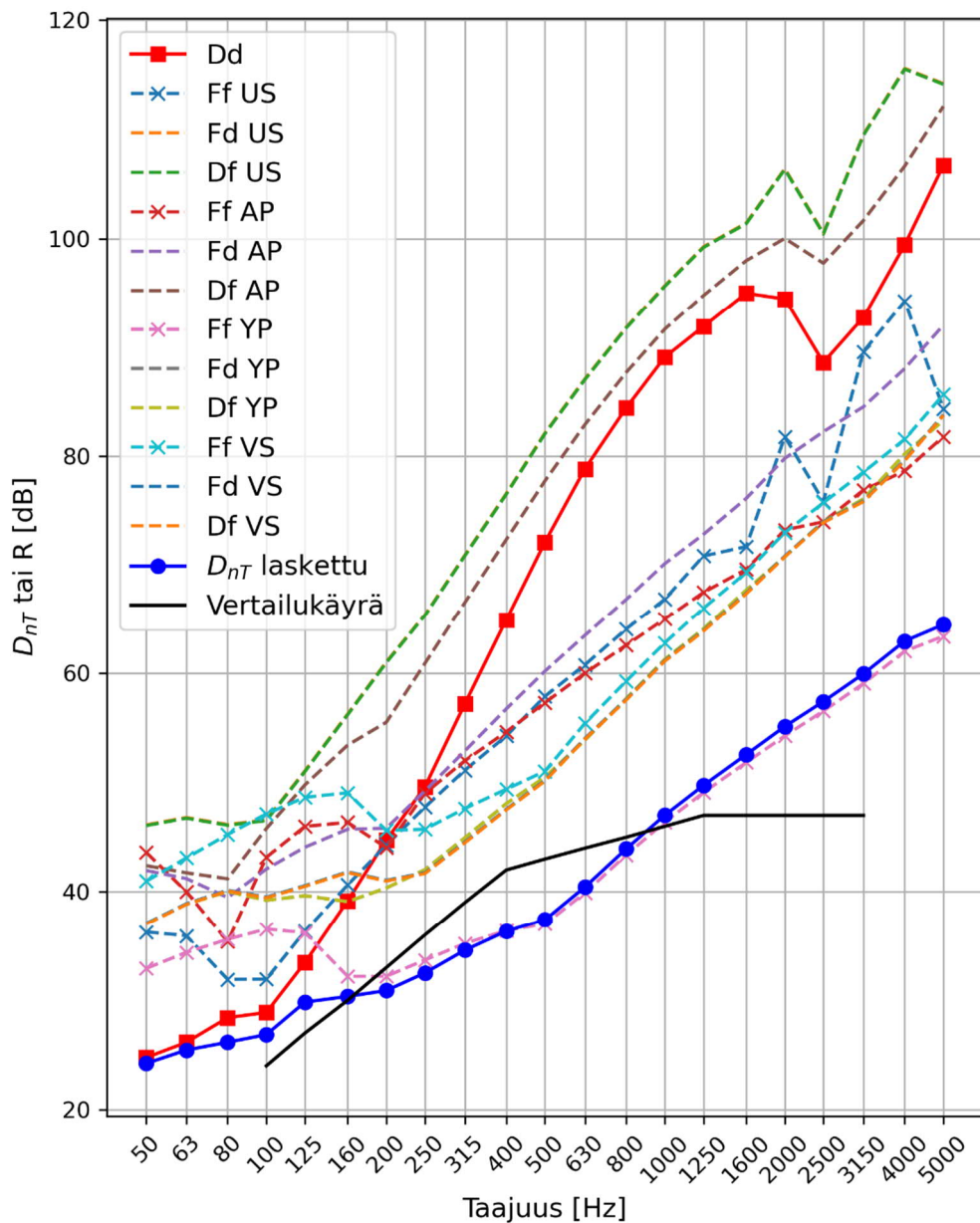
toimistohuoneiden välisen ääneneristävyyssvaatimuksen ilman sivuavien rakenteiden katkaisemista. Mikäli tarkasteltava toimistohuone siirretään paikkaan, missä sivuavat seinärakenteet ovat molemmilta puolilta väliseiniä, ei vaatimusta saada täytettyä yhtenäisenä jatkuvalla väliseinärakenteella ja väliseinärakenne täytyy katkaista tai vuorata. Laskelmassa CLT-levyjen kiinnitykset on oletettu toteutetuksi kulmaraudoilla ja ruuveilla.



Kuva 16. Toimistohuoneiden välinen ääneneristävyys yhtenäisinä jatkuvilla rakenteilla.

5.2.2 Vastaanottotila - VAST

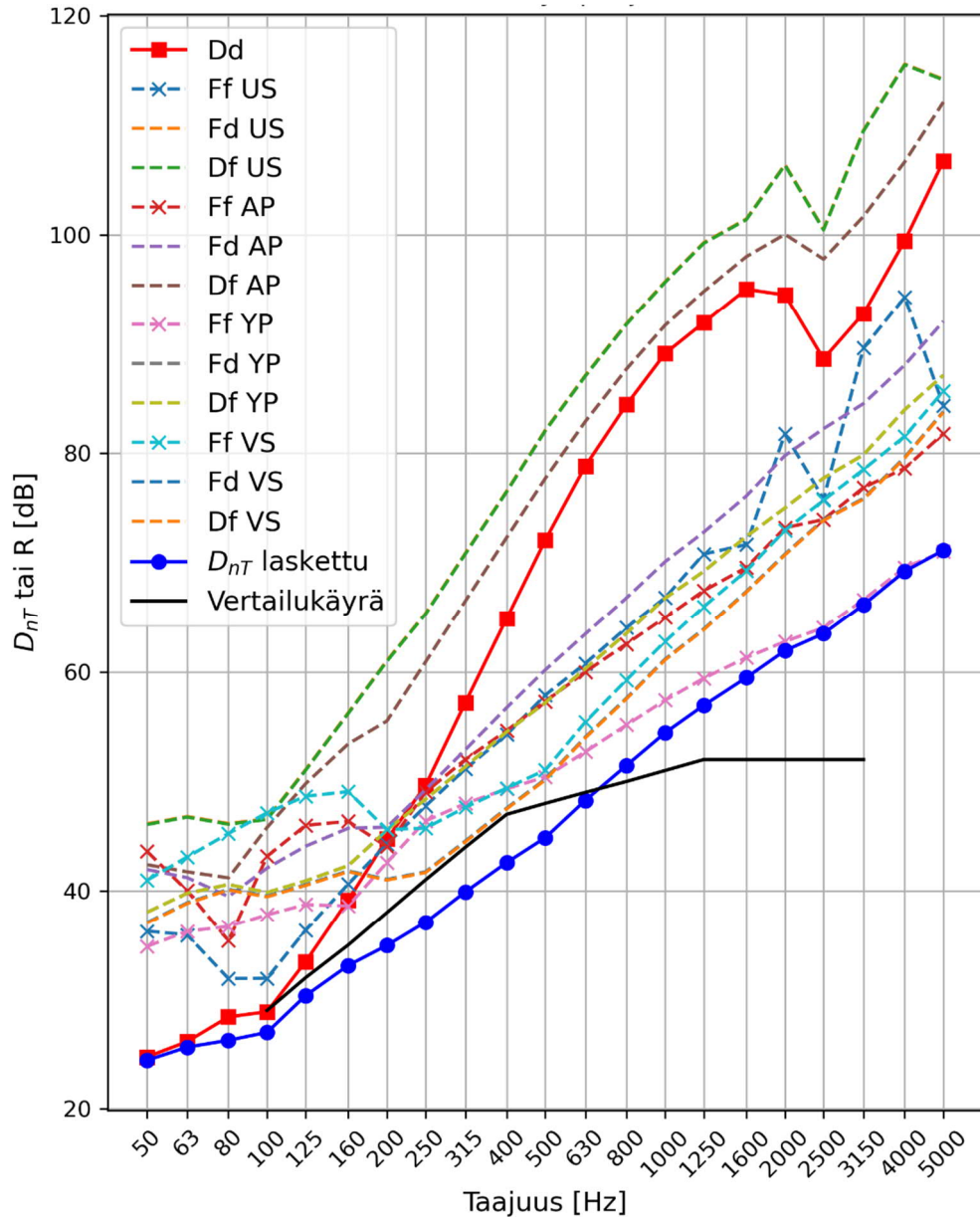
Kuvassa 17 on esitetty tyypillisten vastaanottohuoneiden välille laskettu ilmaääneneristävyyden, kun sivuavia rakenteita ei ole katkaistu tai niiden pinnoille ei ole tehty lisävuorauksia. Yksilukuarvona ääneneristävyys $D_{nT,w}$ on 43 dB. Tilojen välinen erottavassa väliseinässä on 10 mm ilmaväli, missä ei ole sen puolikkaita toisiinsa kytkevää kiinnitystä. Kuvaajasta nähdään, että yläpohjan rakenne määrittää tilojen välisen kokonaisääneneristävyyden ja että erottavan rakenteen ääneneristävyys on huomattavasti kokonaisääneneristävyyttä parempi.



Kuva 17. Vastaanottohuoneiden välinen ilmaääneneristävyys ilman parannuksia.

Vaatimuksen täyttäminen edellyttää yläpohjarakenteen parantamista, se voidaan tehdä joko katkaisemalla rakenne tai lisävuoramalla se. Katkaisemalla yläpohjan CLT-levy

saavutetaan tilojen välinen ääneneristävyys $D_{nT,w}$ 47 dB ja lisävuoraamalla molempien tilojen katto ääneneristävyys $D_{nT,w}$ 48 dB. Kuvassa 18 on esitetty tilanne, missä huoneiden kattoon on tehty lisärakenne ja ääneneristysvaatimus saadaan täytettyä niukasti. Nyt myös muut väliseinän vuoraamattomat sivutiet alkavat vaikuttaa kokonaiseristävyyteen. Tyypillisesti tämän esimerkkitalanteen mukaisissa tiloissa myös ulkoseinälle ja sivuaville väliseinille tehdään ääneneristävyyttä parantava lisävuoraus, mitä laskelman tilanteessa ei tarvittaisi. Laskelmassa sivuava väliseinäliitos on siten, että sivuavaan seinään tulee kaksi saumaa (liite 1.5). Mikäli liitos käännetään niin, ettei saumaa tule tiloja sivuavaan seinään tai huone sijoitetaan niin että ulkoseinästä tulee väliseinä, ääneneristysvaatimus ei enää täyty. Toisaalta tuloksessa on mielenkiintoista, ettei katkolla saavuteta yhtä suurta parannusta kuin puukoolauksella ja kipsilevyllä.

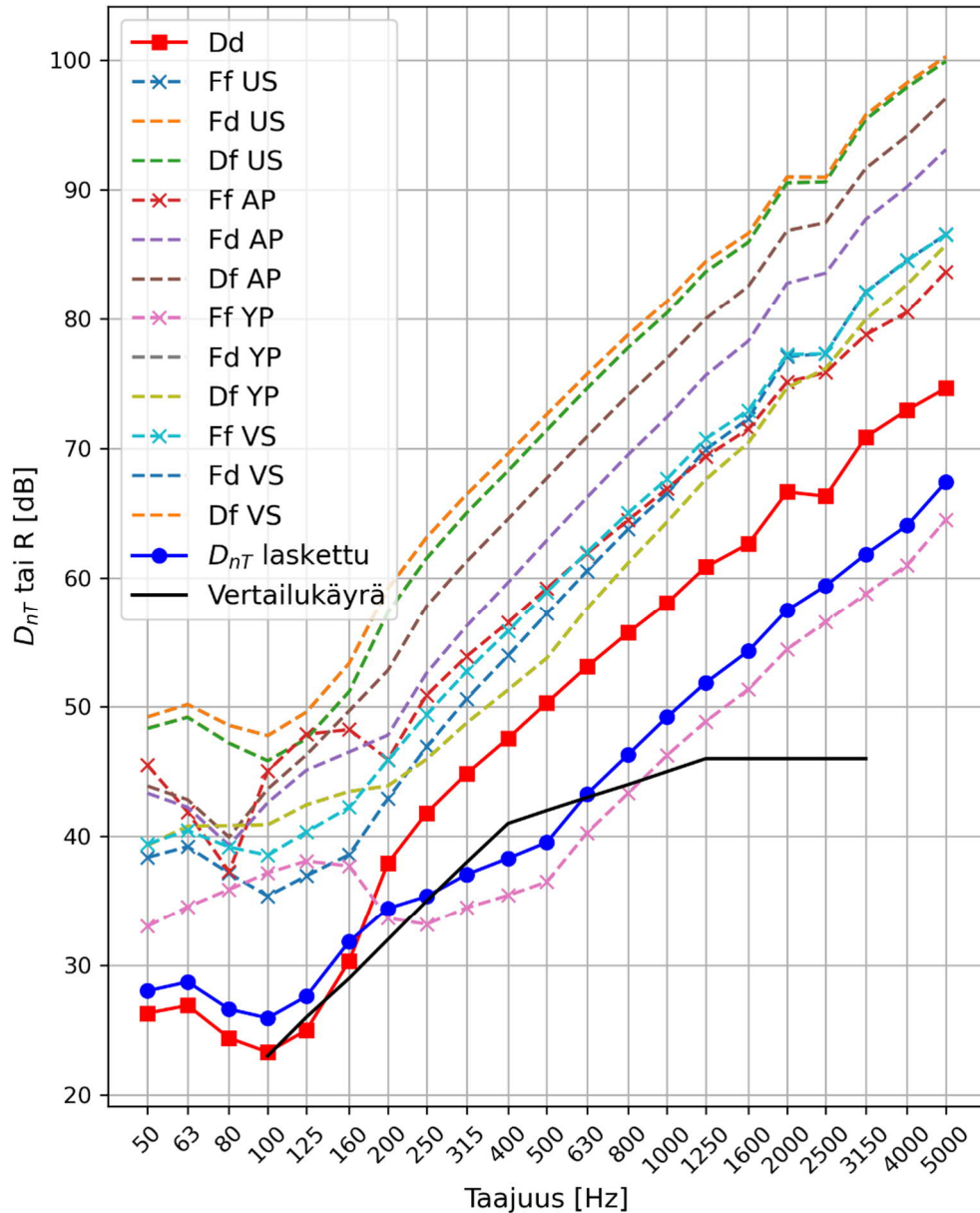


Kuva 18. Vastaanottohuone, kun yläpohjaan on lisätty kipsilevyvuoraus.

Parannetussa tilanteessa erottavan väliseinän ääneneristävyyks on vielä tarpeettoman hyvä, joten sitä voidaan vielä optimoida. Rakenne vaatii kuitenkin vähintään peltirankakoolauksen ja raskaan kipsilevyn, joten kustannussäästöjä erillisrunkoon nähden on tuskin saavutettavissa.

5.2.3 Luokkahuone LH

Esimerkkiluokkahuoneiden välille ilman katkoja tai lisävuorauksia laskettu ilmaääneneristävyyks on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Luokkahuoneiden välillä laskettu ääneneristävyys.

Kuvassa 19 yläpohjan sivutielle laskettu ilmäääneneristävyys R alittaa lasketun kokonai-
seristävyyden D_{nT} , koska D_{nT} :ssä on mukana kaavalla 20 tehty muunnos, mikä on luok-
kahuoneen tapauksessa merkittävä. Työn muissa laskelmissa korjaus on ollut merkityk-
setön.

Laskettu tilojen välinen ääneneristävyys $D_{nT,w}$ on 45 dB, jolloin vaatimus täyttyy. Tarkas-
teltavassa tapauksessa kaikki seinärakenteet ovat kantavia, joten niiden kautta menevien
sivuteiden ääneneristävyys on riittävän hyvä kyseiselle vaatimukselle. Yläpohjan ohuen
CLT-levyn kautta tapahtuu merkittävä sivutiesiirtymä, mutta se ei kuitenkaan ole liian
suuri vaatimukseen nähden. Luokkahuoneiden välillä ei siis tarvitse välttämättä katkaista

tai lisävuorata sivuavia rakenteita, mikäli ne ovat riittävän massiivisia ja pinta-alaltaan sopivia.

5.3 Tulosten pohdinta

Sekä mitatuista vertailukohteista että lasketuista esimerkkikohteista on havaittavissa, että CLT-rakenteilla pienet taajuudet määräävät yleensä yksilukuarvona mitattavan kokonaisääneneristävyyden. Pienillä taajuuksilla erottava rakenne osallistuu muodostuvaan kokonaisääneneristävyyteen vahvemmin kuin suurilla taajuuksilla, missä yleensä sivutiesiirtymät määrittävät kokonaisuuden. Tämä heijastuu ortotrooppisen CLT-levyn ilmaääneneristävyytkuvaajasta, missä ennen levyn toista koinsidenssia ilmaääneneristävyys on vaatimatonta, mutta nousee sen jälkeen yleensä keskitaajuuksista alkaen jyrkästi. Erottavaa rakennetta kevyimmät ja yksinkertaiset sivuavat rakenteet eivät myöskään hyödy ilmapälien tuottamasta parannuksesta suurilla taajuuksilla, jolloin liitoseristävyydestä huolimatta ne siirtävät ääntä erottavaa seinää tehokkaammin.

Vertailukohteiden liitoseristävyyttä kuvaavien liitosten löytäminen osoittautui haastavaksi. Kirjallisuudesta poimitut, kenttätilanteista empiirisesti johdetut liitoseristävyydet johtivat parempiin lopputuloksiin laboratoriossa mitattuja kiinnikkeisiin keskittyvään liitostietoon verrattuna. Kenttätilanteiden perusteella määritetyissä liitoseristävyyksissä taajuusriippuvaisuus on maltillisempaa kuin laboratoriomittauksista kerätyssä tiedossa, jossa pienet taajuudet ovat yleensä eristävyydeltään heikompia ja suuret taajuudet parempia. Työssä CLT-rakenteille käytettävän ilmaääneneristävyyden laskentateorian tiedetään käyttäytyvän liitoseristävyyden taajuusjakaumaan verrattuna päinvastaisesti (Krajci et al., 2012), joten on mahdollista, että nämä ilmiöt tasapainottavat toisiaan ja siksi kenttätilanteista määritetyt liitoseristävyydet johtavat paremmin mittauksia vastaaviin lopputuloksiin. Laboratoriossa määritetty, kiinnikkeitä painottava liitostieto osoittautui myös ongelmalliseksi, kun sivutien ääneneristävyyttä on tarpeellista parantaa – rakenteen katkaisemisen vaikutusta liitoseristävyyteen ei ole esitetty. Toisaalta tämän lähteen liitoksien kiinnitystavat vaikuttivat Suomessa käytettyihin ratkaisuihin verrattaessa vahvempaa kytkentää aiheuttavina. Asuinhuoneiden välisessä vertailutarkastelussa ongelmaksi osoittautui myös kiinnikkeiden jako. Liitoseristävyyden lähteissä on yleensä oletettu, että rakenteissa on kiinnikkeitä jollain tasaisella jaolla, mutta tarkasteltavissa kohteissa rakenteita kytkeviä kiinnikkeitä oli joissain tilanteissa vain muutama koko rakenteen matkalla, epämää-

räisesti sijoitettuna. Esimerkiksi tapauksessa CLT T2 oli ainoastaan kaksi kiinnikettä kyt-kemässä rakenteita, mutta tuloksista oli havaittavissa kuitenkin selkeä sivutiesiirtymä. Kiinnikkeiden vaikutusta tarkastelevan tutkimuksen (Morandi et al., 2018) tuloksista on huomattavissa, että vahvoilla kiinnityksillä liitoseristävyys on heikkoa pienillä taajuuksilla, mutta kasvaa erityisen voimakkaasti suurille taajuuksille, mikä saattaa selittää kyseisen tarkastelun mittaustuloksen ja laskentatuloksen erotuksen suurilla taajuuksilla.

Työn laskelmien liitoseristävyksiä tai ilmaääneneristävyksiä ei korjattu standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 menettelyn mukaisesti rakenteellisen jälkikaiunta-ajan, häviöiden tai säteilytehokkuuksien perusteella. Kirjallisuuskatsauksen perusteella CLT asetuu standardin tyypityksen luokkien A ja B välille, jolloin korjaamisen tekemättä jättämistä on vaikea perustella, mutta sillä ei kuitenkaan ole välttämättä suurta vaikutusta lopputulokseen. Tästä aiheutuvan virheen tarkempi arvioiminen on mahdotonta. Standardi ei anna CLT:lle ohjeistusta korjauksen tekemiseen laskennallisessa tarkastelussa, joten sen tekeminen on muut työssä mainitut CLT:n värähtelykäyttäytymiseen liittyvät vaikeudet huomioiden mahdotonta tehdä nykyisellä tutkimustiedolla. Pakkovärähtelyn korjaaminen johtaa CLT:llä todennäköisesti pieniin muutoksiin, koska CLT:n kriittinen taajuus on usein pieni, jolloin korjaus tehdään ainoastaan muutamalla taajuuskaistalla ja se on lukuarvoltaan pieni. Tutkituilla rankarakenteilla kriittiset taajuudet asettuvat suuremmille taajuuskaistoille, jolloin korjaus on lukuarvoltaan merkittävä. Työssä tarkastellussa kohteessa suuren rajataajuuden omaavien rakenteiden sivutiet eivät kuitenkaan määrittäneet kokonaisuuden ääneneristävyttä niiden rajataajuuksien alapuolella, joten korjauksen tekeminen ei olisi muuttanut tulosta.

Vertailumittauksissa pienten taajuuksien tarkastelua vaikeuttaa myös pienten taajuuksien mittaamiseen liittyvät ongelmat, joiden seurauksena mittauseräpätarkkuus on suurimmillaan pienillä taajuuksilla. Pienillä taajuuksilla myös rakenteiden yksittäiset ominaismuodot sekä rakenteiden äärellisyys saattavat vaikuttaa tuloksiin huomattavasti, jolloin äärellisellä ja moodeja huomioimattomalla mallilla määritetyistä ilmaääneneristävyyksistä aiheutuu mahdollisesti epätarkkuutta (Atalla ja Sgard, 2015; Santoni et al., 2017).

Vaikka mittaustuloksissa näkyy selkeitä sivutiesiirtymiä, on rakenteiden mitoitus mennyt yksilukuarvona usein oikein, koska erottava rakenne osallistuu kokonaisuuteen vahvasti pienillä taajuuksilla, joita yksilukuarvot painottavat. Esimerkkitalanteiden taajuustasossa

esitettyjen sivuteiden ääneneristävyyskäyrien tarkastelun vertaaminen käytettäviin suunnitteluratkaisuihin on mielenkiintoista, koska sen perusteella kokonaisuuden rakenneratkaisuja voidaan optimoida. Useassa tuloksessa on yksittäinen sivutie, joka määrää koko rakenteen ääneneristävyuden jollain alueella niin vahvasti, että se määrittää lopulta kokonaisuuden. Laskennan tuloksena parannustoimenpiteet voidaan osoittaa sinne missä niillä on suurin vaikutus eli ääneneristävyydeltään heikoimpaan äänen siirtymisreittiin, eikä esimerkiksi kaikkia pintoja tarvitse lisävuorata tai rakenteita katkaista.

Rankarakenteisen vertailukohteen laskennallinen tarkastelu vastasi mitattua tulosta kaikista kohteista huonoiten. Rankarakenteiden liitoseristävyksiä on kirjallisuudessa saatavilla muita rakennetyyppejä vähemmän, vaikka rankarakenteita ja niiden liitoksia on mahdollista toteuttaa usein eri tavoin. Rankarakenteiden sivuteiden tarkastelussa ongelmaksi tulee myös sivutien perusrakenteeseen kuuluvien kerroksien määrittäminen – miten esimerkiksi muihin levyihin verrattaessa painava ulkoverhouspaneeli huomioidaan rakenteen ilmaääneneristävyudessa, kun se on koolattu kaksinkertaisen rankaseinän ulkopintaan? CLT- tai betonirakenteissa ulkopuolen kerros huomioitaisiin liitoksen liitoseristävyudessa, mutta perusrakenteen määrittäminen on vaikeampaa rankarakenteilla. Tarkastellun vertailukohteen mittaustuloksesta on havaittavissa mahdollisia viitteitä ulkoverhouspaneelistä tai välipohjan vanerilevyistä, mutta näiden alkuperää on kuitenkin mahdotonta määrittää työn laskelmien perusteella. Rankarakenteisien rakennusten rakenteissa on myös enemmän ilmateisiä sivuteitä, joiden sivuteiden ääneneristävyuden määrittäminen on vaikeaa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Tutkimuksen aiheeseen liittyvät epävarmuudet ja kehitystarpeet voidaan jakaa standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 arviointimallin liittyviin ja sen mukaisen arvioinnin lähtötiedoksi tarvittavan tiedon määrittämiseen liittyviin. Standardin arviointimalliin epävarmuudet ja kehitystarpeet liittyvät siihen, miten hyvin standardin menetelmät kuvaavat äänen siirtymistä tilojen välillä, kun taas lähtötietoon liittyvät asiat koskevat lähtötiedon määrittämiseen liittyviä ilmiöitä, esimerkiksi rakenteiden liitoseristävyyksien tai ilmaääneneristävyyksien määrittämistä.

Standardin menetelmään liittyvät eniten työtä ja sen tuloksia rajoittavat asiat ovat CLT-rakenteiden liitoseristävyysrakenteellisen jälkikäiunta-ajan mukaan tehtävä korjaus ja kevyiden rakenteiden lisävuorausten parannusluvun määrittäminen. Standardissa ei ole annettu ohjeistusta, miten CLT-rakenteiden kenttätilanteen absorptiopituutta voidaan arvioida, joten laskennallista liitoseristävyyskorjaamista ei ole mahdollista tehdä standardin mukaan. Keveiden rakenteiden sivuteiden lisävuoraamisesta standardi antaa todella yksinkertaistetun ohjeen, lisävuorauksella rakenteen ilmaääneneristävyys saatu parannus jaetaan kahdella. Saavutetun parannuksen laskeminen tuskin on näin yksinkertaista ja saavutettavan parannuksen tarkastelemisessa on aihetta jatkotutkimuksille. Myös kriittisen taajuuden alla tehtävä korjaus ilmaääneneristävyysrakenteen ja liitoksen yli etenevän värähtelykentän tarkastelemisessa on vielä aihetta lisätutkimuksille. Massiivipuurakenteilla voimakkaat, pistemäiset kiinnitykset ovat rakenteiden välillä tyypillisiä ja niiden jako ei välttämättä ole jaksollista. Etenkin tämänkaltaisten kiinnityksien huomioiminen on selkeä kehitystarve standardin arviointimalliin. Puurakenteiden kiinnitykset ylipäättään sekä niiden yhteistoiminta katkojen tai lisärakenteiden kanssa tarvitsevat vielä myös lisätutkimuksia.

Puurakenteille on kirjallisuudessa esitetty liitoseristävyysarvoja useanlaisiin liitostilanteisiin liittyen empiirisiin kenttä- tai laboratoriomittauksiin perustuen. Puurakenteita sekä niiden liitoksia on mahdollista toteuttaa todella monella eri tapaan ja jokaisessa liitoksessa on yleensä vastaavaa raskasta ja monoliittista liitosta useampi erilainen siirtymätie. Tarkasteltavaa tilannetta vastaavan liitoseristävyystiedon löytäminen on usein haastavaa ja se rajoitti työssä suoritettuja tarkasteluja muita epävarmuuksia enemmän. Suomalaisessa rakentamisessa ulkoseinä-rakenteissa on tyypillisesti perusrakenteen li-

säksi lisäkerroksia, joiden vaikutus huomioidaan standardin menetelmän mukaan liitoseristävyydessä, mikä taas vaikuttaa kasvattavasti erilaisten liitoksien lukumäärään. Laajemman liitoseristävyystiedon hankkiminen on lisätutkimusten ja suunnittelutyön kannalta merkittävin työssä esille noussut kehitys tai lisätutkimusaihe. Liitoseristävyyksien laboratoriomittaukset vaativat mittavia koejärjestelyitä, jolloin liitoseristävyyden määrittäminen laboratoriossa on hidasta, kallista ja vaikeaa, varsinkin jos tutkittavia rakenteita halutaan varioida. Kenttätilanteissa mittaaminen on myös vaikeaa ja hidasta, koska tuloksesta on vaikea rajata muiden kuin tutkittavien rakenteiden vaikutukset pois sekä mittaus pitää tehdä voimaherätteellä, mikä asettaa mittauksien toteutuksille käytännön ongelmia. Näistä syistä liitoseristävyyden määrittäminen mallintamalla, kuten betonirakenteiden yhteydessä on tehty, on houkutteleva jatkotutkimuksen aihe ja puurakenteiden mallintamiseen liittyvää tutkimusta tehdään tulevaisuudessa todennäköisesti runsaasti. Mittausjärjestelyjen hankaluuden takia sivutiesiirtymän arviointia voitaisiin tulevaisuudessa keskittää enemmän mallintamisen ympärille, kun ensin mallintamista koskevaa tutkimustietoa saadaan enemmän ja menetelmiä kehitettyä. Mallintamiseen perustuvat menetelmät saattaisivat toimia myös paremmin tilanteissa, missä raskaita ja kevyitä rakenteita yhdistellään.

CLT-rakenteiden tarkastelemista vaikeuttaa eniten sen dynaamiseen käyttäytymiseen liittyvät epävarmuudet ja toisaalta sisäiseen häviökertoimen määrittämiseen liittyvät epävarmuudet. Tällä hetkellä CLT:n ilmääneneristävyys on onnistuttu arvioimaan laskennallisesti riittävän tarkasti ainoastaan yhdessä kokeellisten mittauksien kanssa. Menettely on käytännön suunnittelutyön kannalta liian raskas ja vaikea, parempien menetelmien kehittäminen on tarpeellista tulevaisuudessa. Massiivipuutuotteille mittauksista saatava tieto voitaisiin esimerkiksi määrittää mallintamalla (kuten Santoni, 2020) ja mallinnustulosten perusteella määrittää sovitteita, joilla voitaisiin kuvata erityyppisten CLT- tai massiivipuutuotteiden käyttäytymistä. CLT:n dynaamisen käyttäytymisen ymmärtäminen on tärkeää sen ääneneristävyyksien määrittämisen kannalta ja toisaalta mallinnojen kannalta, kun niiden tekeminen tulevaisuudessa yleistyy.

CLT:n sisäiseen häviökerroin on tärkeä, koska se vaikuttaa merkittävästi CLT:n dynaamiseen käyttäytymiseen ja siten esimerkiksi standardissa sen tarkastelemiseen sovelletta-vaan menetelmään. Kirjallisuudessa on havaittavissa huomattavasti toisistaan poikkeavia sisäisen häviökertoimen arvoja. CLT:n häviökertoimien määrittämisessä on siten vielä tutkittavaa. Eri valmistajien tuotteiden eroavaisuuksia ei ole tutkittu riittävän kattavasti ja

toisaalta CLT:n liittämisen muihin rakenteisiin aiheuttamasta vaikutuksesta häviökertoimeen vaatii lisätutkimuksia.

Työssä tarkasteltiin CLT- ja rankarunkoisia rakennuksia, koska muista rakenteista ei ole saatavilla tutkimustietoa riittävän kattavasti. Tulevaisuudessa muiden massiivipuutuotteiden ja niiden rakennejärjestelmien tutkiminen on tarpeellista, jotta niihin sijoitettavien tilojen ääneneristävyksiä pystytään tarkastelemaan. Suomalaisen rakentamisen kannalta hirsirakenteiden sivutiesiirtymät ovat mielenkiintoisia, mutta niistäkään ei ole tutkimustietoa saatavilla.

Tarkastellussa käytetyn kaltaiseen arviointimenetelmään liittyy lukuisia epävarmuuksia ja lisäksi vertailukohteita, jotka vastaavat täysin käytettävissä olevaa liitostietoa ei ollut vielä saatavilla. Arviointimenetelmän mukaiseen tulokseen ei voi suunnittelussa luottaa täysin, mutta sitä voidaan kuitenkin käyttää apuna suunnittelutyössä arvioimaan sivuteiden merkitsevyyteen toisiinsa nähden. Tulevaisuudessa vertailua mitattujen ja laskettujen arvojen välillä voidaan tehdä lisää, kun puurakenteisia rakennuksia valmistuu.

7 YHTEENVETO

Puurunkoisessa rakennuksessa tilojen välillä tapahtuva äänen siirtyminen rakenteiden välityksellä on monimutkaisempi ilmiö kuin vastaavassa betonirakennuksessa. Puurakennuksesta monimutkaisemman tekevät rakenteiden kiinnitysjärjestelmät, rakenteiden ja niiden liitoksien geometria sekä puun mekaaniset ja akustiset ominaisuudet. Puurakentaminen ei ole myöskään betonirakentamiseen verrattuna niin pitkälle kehittynyttä, joten eri tekijöiden rakenneratkaisuissa on huomattavasti enemmän eroavaisuuksia. Puurunkoisen rakennuksen suunnittelu vaatii ääneneristysratkaisujen tarkkaa suunnittelua, jotta tiloille asetetut ääneneristysvaatimukset täyttyvät.

Tilojen välillä tapahtuvaa rakenteellista äänen siirtymistä on tarkasteltu jo pitkään. Nykyisin standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 mukainen tilojen välinen ääneneristävyysarviointimalli on vakioitunut ilmiön tarkasteluun käytettäväksi menetelmäksi ja kansainvälinen tutkimus keskittyy vahvasti sen kehittämisen ympärille. Standardi kehitettiin alun perin raskaille ja monoliittisille rakenteille sopivaksi, mutta puurakentamisen yleistyessä sen mukaista arviointimallia on laajennettu puurakenteille sopivaksi. Arviointimenetelmä perustuu äänen siirtymisen jakamiseen toisistaan riippumattomiin sivuteihin, jotka koostuvat kahdesta rakenteesta sekä niiden välisestä liitoksesta.

Puurakenteiden sivutiesiirtymien tutkimus keskittyy rankarunkoisiin rakennuksiin ja massiivipuorakenteisiin, joista CLT:tä on tutkittu ylivoimaisesti eniten. Muiden puutuotteiden sivutiesiirtymiä ei ole tutkittu kattavasti. Betonirakenteisiin verrattuna puurakenteiden liitokset ovat vähemmän jäykkiä sekä niiden kiinnitykset ovat pistemäisiä. Puurakenteiden liitoksille on tyypillistä merkittävä liitoseristävyysriippuvuus. Puurakenteiden liitoksissa on myös usein enemmän liitoseristävyyseroja kuin samanlaisessa betonirakenteisessä liitoksessa ja liitoksen suunta vaikuttaa liitoseristävyysarvoon.

Puurakenteissa äänen siirtymistä rakenteiden kautta pyritään vähentämään pääasiassa rakenteiden katkaisemisella, niiden pinnoille tehtävillä lisävuorauksilla sekä tärinäneristimillä. Kirjallisuudessa on esitetty tutkimustuloksia, joiden mukaan massiivipuorakenteiden liitoksissa käytettävät kiinnitysjärjestelmät vaikuttavat usein jopa määräävästi niiden liitoksien liitoseristävyysarvoon. Nykyisin käytettävät menetelmät eivät pysty kuvaamaan riittävän tarkasti CLT-tuotteiden dynaamista toimintaa. CLT:n värähtelykäyttäytyminen

yhdistää ortotrooppiselle levyille ja sandwich-rakenteelle tyypillisiä piirteitä. Nykyisissä arviointimenetelmissä CLT:n ilmaääneneristävyyden tarkassa arvioimisessa joudutaan käyttämään osin mittauksiin perustuvaa tietoa. Myös CLT:n sisäiseen häviöön ja CLT-rakenteiden kokonaishäviön muodostumisessa on epäselvyyksiä ja huomattavasti toisistaan poikkeavia tutkimustuloksia. Häviöt ovat työn ilmiön tarkastelun kannalta merkittäviä, koska ne vaikuttavat vahvasti CLT värähtelykäyttäytymiseen ja siten esimerkiksi äänen siirtymisen arviointiin käytettävään menetelmään.

Rankarakenteiden sivutiesiirtymien arviointi on haastavaa, koska niiden rangat aiheuttavat värähtelyn merkittävän vaimenemisen etäisyyden suhteen. Rankarakenteiden tutkiminen on myös haastavaa, koska rankarakenteet eivät tyypillisesti säteile ääntä tehokkaasti koko rakennusakustiikan taajuusalueella, jolloin rakenteen säteilemää ääntä ei voida tarkastella suoraa pinnan värähtelynopeuden avulla. Rangat on mahdollista sijoittaa rankarakenteiden liitoksiin useilla eri tavoin, milloin erilaisia liitosmahdollisuuksia on suuri määrä. Suuresta liitoksien määrästä seuraa tarve suurelle määrälle liitoksien eristävyyskuvaavaa tietoa.

CLT:n ilmaääneneristävyyden arviointiteorioita vertailtiin ja standardin SFS-EN ISO 12354-1:2017 mukaisen arviointimenetelmän mukaisen lähtötiedon siirtämistä kenttälanteeseen tarkasteltiin. Epävarmuuksien huomioimista rakennusten suunnittelussa pohdittiin arviontimallin käytännön soveltamisen kannalta.

Tilojen välisen ääneneristävyyden arviontimallia verrattiin kolmeen vertailukohteeseen, joiden väliltä oli saatavilla mittaustulos. Kaikki tarkastellut vertailukohteet olivat asuinrakennuksia, näistä kaksi oli CLT-rakenteisia ja yksi rankarakenteinen. Tutkimuksen puitteissa arviontimallin tarkkaa jokaisen sivutien sisältämää validointia ei ollut mahdollista toteuttaa, joten mitattua ääneneristävyyttä verrattiin laskettuun ääneneristävyyteen. CLT-rakenteisissa tiloissa sivuteiden havaittiin osallistuvan merkittävästi kokonaisääneneristävyyteen keskitaajuuksista alkaen, joissain tapauksissa myös pienillä taajuuksilla. CLT-rakenteille lasketut tulokset vastasivat kohtalaisesti mittauksen tuloksia, mutta epävarmuuksia oli etenkin oikeanlaisen liitoseristävyyden valinnassa ja ilmaääneneristävyyden laskennassa. Rankarakenteisessa kohteessa laskennan tulos ei vastannut mitattua tulosta yhtä hyvin, mutta taajuustasossa esitetyistä sivuteiden ääneneristävyyksistä oli silti pääteltävissä jotain.

Vertailukohteiden lisäksi kolmen erilaisen kuvitteellisen esimerkkitalan rakenteet mitoitettiin. Esimerkkitalojen rakennetyypit valittiin tilaa vastaavista toteutuneista kohteista. Taajuustasossa tehdyn mitoituksen ja tarkastelun tuloksista havaittiin, että laskennan mukaan kaikissa tiloissa rakenteiden katkaiseminen tai lisävuoraaminen ei välttämättä ole tarpeellista. Laskelmissa oli usein havaittavissa pienten taajuuksien jälkeen yksittäinen sivutie, joka määritteli kokonaiseristävyyden. Tämän sivutien parantaminen riitti ääneneristävyyksivaatimuksen täyttämiseen, jolloin välttyttiin usean pinnan vuoraamiselta tai kaikkien rakenteiden katkaisemiselta.

Puurakenteiden kautta tapahtuvaan äänen siirtymiseen liittyy huomattava määrä epämääräisyyksiä esimerkiksi arviointimenetelmiin tai materiaaleihin liittyen, joihin alan tutkimus ei vielä vastaa. Aiheita jatkotutkimuksille sekä arviointimenetelmän parantamiselle heräsi useita. Merkittävin työn laskelmia rajoittava tekijä oli erilaisten liitoksien liitoseristävyydestietojen puuttuminen. Tärkein jatkotutkimusaihe on liitoseristävyyden määrittäminen, jota ehdotetaan tehtäväksi laskennallisesti. Muita jatkotutkimusaiheita ovat massiivipuutuotteiden häviöiden, dynamiikan ja valmistajakohtaisten eroavaisuuksien tarkastelu, standardin eri korjauksien tekemisen lisätutkimukset ja laskennallisen korjaamisen mahdollistaminen CLT-rakenteilla sekä lisävuorausten kevyille rakenteille tuoman parannuksen tutkiminen. Myös muita puutuotteita koskevaa tutkimusta tarvitaan.

Suuresta epävarmuuksien määrästä ja vertailumahdollisuuksien pienestä määrästä huolimatta arviointimenetelmää voi käyttää suunnittelun apuna varovaisuutta noudattaen. Arviointimenetelmä ei välttämättä arvioi kokonaisuutta oikein, mutta eri sivuteiden merkittävyyttä laskennan perusteella on mahdollista tarkastella.

LÄHDELUETTELO

Atalla, N., Sgard, F., 2015, *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 441 s., ISBN 978-1-4665-9288-9.

Barbesi, B., Morandi, F., Garai, M., Speranza, A., 2016, Experimental measurements of flanking transmission in CLT structures, 22nd International Congress on Acoustics 2016, Buenos Aires.

Bard, D., Negreira, J., Guigou-Carter, C., Borello, G., Kouyoumji, J.L., Speranza, A., Coguenaff, C., Hagberg, K., 2017, Modelling prerequisites – FEM/SEA Impact and Airborne Sound, Silent timer build, RISE Report 2017:56, report no STB01 WG1, 113 s.

Bolmsvik, Å., Linderholt, A., Jarnerö, K., 2012, FE modelling of a lightweight structure with different junctions, Euronoise 2012, Praha.

Crispin, C., De Greeter, L., Ingelaere, B., 2013, Some considerations about the element attenuation (Project AH+, Part 1), Internoise 2013, Innsbruck.

Crispin, C., De Greeter, L., Ingelaere, B., 2014, Extension of EN 12354 vibration reduction index expressions by means of FEM calculations, Internoise 2014, Melbourne.

Crispin, C., Ingelaere, B., 2013, Review of the empirical formulas for the prediction of the vibration reduction index, Belgian Building Research Institute (BBRI) technical report, DIVA2013/CCR003.

Craik, R.J.M., 2001, The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings, *Applied Acoustics*, 62, S. 29-46.

Davy, J., 2009, The forced radiation efficiency of finite size flat panels which are excited by incident sound, *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2), S. 694-702.

Di Bella, A., Dall'Acqua d'Industria, L., Valluzzi, M., Pengo, A., Barbaresi, L., Di Nocco, F., Morandi, F., 2019, Flanking transmission in CLT buildings: comparison between vibration reduction index measurements for different mounting conditions, Internoise 2019, Madrid.

Di Bella, A., Mastinom C.C., Barbaresi, L., Granzotto, N., Baccoli, R., Moradi, F., 2017, Comparative study of prediction methods and field measurements of the acoustic performances of buildings made with CLT elements, *Internoise 2017*, Hong Kong.

Di Bella, A., Mitovic, M., 2020, Acoustic Characteristics of Cross-Laminated Timber Systems, *Sustainability*, 12(14), artikkelinnumero 5612.

Dijckmans, A, 2016, Wave Based Modelling of Vibration Transmission Across Junctions Composed of Rectangular Single and Double Walls, *Acta Acustica united with Acustica*, 102, S. 1011-1026.

Dijckmans, A., De Greeter, L., 2019, Flanking transmission across timber frame façade elements, *Internoise 2019*, Madrid.

Floden, O, 2016, Vibration transmission in lightweight buildings – numerical prediction models, Lund, Lund University, 200 s., ISBN 978-91-7753-082-4.

Gerretsen, E., 1979, Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures, *Applied Acoustics*, 12(6), S. 413-433.

Gerretsen, E., 1986, Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings, *Applied Acoustics*, 19(4), S. 245-264.

Gerretsen, E., 1994, European developments in prediction models for building acoustics, *Acta Acustica*, 2, S. 205-214.

Gerretsen, E., 1996, Vibration reduction index Kij, A new quantity for sound transmission at junctions of building elements, *Internoise 1996*, Liverpool.

Gerretsen, E., 2003, Prediction of sound insulation in buildings: a tool to improve the acoustic quality, *Proceedings DAGA'03 German Annual Conference on Acoustics*, Aachen.

Gerretsen, E., 2005, Development and use of prediction models in Building Acoustics as in EN 12354, *Forum Acusticum*, Budapest.

Gerretsen, E., 2006, Possibilities to improve the modelling in EN 12354 for lightweight elements, Euronoise 2006, Tampere.

Gerretsen, E., 2008, Prediction models for building performance - European need and world-wide use, The Journal of the Acoustical Society of America, 123(5).

Gerretsen, E., 2015, Extending EN 12354 sound insulation modelling to composed, light weight building systems, Internoise 2015, San Francisco.

Gerretsen, E., 2017, The effects of the element damping in sound insulation predictions following EN12354, 173rd Meeting of Acoustical Society of America and 8th Forum Acusticum, Boston.

Guigou-Carter C., Coguenanff, C., Bailhache, S., Villot, M., Modelling lightweight junctions, Internoise 2013, Innsbruck.

Guigou-Carter C., Villot, M., Wetta, R., 2006, Prediction Methods Adapted to Wood Frame Lightweight Constructions, Building Acoustics, 13(3), S. 173-188.

Hansen, C., 1992, Sound Transmission Loss of Corrugated Panels, Noise Control Engineering Journal, 40(2), S. 187-197.

Heino, P., 2019, Puurakentamisen tilanne suomessa, Metsäyhdistys [esitysmateriaali].

Hongisto, V., 2003, Monikerroksisen seinärakenteen ilmäeneristävyyden ennustemalli, Turku: Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raportisarja 2.

Hongisto, V., 2020, Rakennusakustiikka ja meluntorjunta, oppikirja kurssille RAK-33590 Rakennusakustiikka ja meluntorjunta, 189 s.

Hopkins, C., 2007, Sound Insulation, 1. painos, Oxford: Butterworth-Heinemann, 622 s., ISBN 978-0-7506-6526-1.

Hopkins, C., 2014, Determination of vibration reduction indices using wave theory for junctions in heavyweight buildings, Acta Acustica 2014, 100(6), S. 1056-1066.

Hopkins, C., Crispin, C., Poblet-Puig, J., Guigou-Carter, C., 2016, Regression curves for vibration transmission across junctions of heavyweight walls and floors based on finite element methods and wave theory, *Applied Acoustics*, 113, S. 7-21.

Ingelaere, B., Van Damme, M., 2013, Building guidelines for lightweight constructions. Project AH+, part 5, *Internoise 2013*, Innsbruck.

Krajci, L., Hopkins, C., Davy, J.L, Tröbs, H.M, 2012, Airborne sound transmission of cross laminated timber plate with ortotropic stiffness, *Eurnoise 2012*, Praha.

Kristensen, J., Rindel, J.H., 1989, *Bygningsakustik, teori og praksis*, Statens Byggeforsninginstituts anvisning 166.

Kylliäinen. M., 2011, *Kivitalojen ääneneristys*, Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy. 80 s. ISBN 978-952-5785-84-5.

Kylliäinen, M., Hongisto, V., 2007, *Rakennusten akustinen suunnittelu: Akustiikan perusteet.*, 1. painos, Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, 224 s. ISBN 978-951-758-477-7.

Kylliäinen, M., Latvanne, P., Kuusinen, A., Kekki, T., 2017, *Puukerrostalojen ääneneristys: Asiantuntijaselvitys*, Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu, 77 s. ISBN 978-952-275-242-0.

Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D., Hongisto, V., 2016, Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings, *Applied Acoustics*, 102, S. 12-18.

Ljunggren, F., 2019, Sound Insulation prediction of single and double CLT panels, *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen.

Lyon, R.H., DeJong, R.G., 1994, *Theory and application of statistical energy analysis*, toinen painos, Newton: Butterworth-Heinemann, 277 s., ISBN 0-7506-9111-5.

Maankäyttö ja rakennuslaki, 5.2.1999/132, 117 f § (21.12.2012/958)

Mahn, J., 2008, Prediction of Flanking Noise Transmission in Lightweight Building Construction: A Theoretical and Experimental Evaluation of the Application of EN12354-1, University of Canterbury, Christchurch, 139 s.

Mahn, J., Hoeller, C., Zeitler, B., 2015, Measurement of the airborne and resonant radiation efficiencies, ICSV22, Florence.

Mahn, J., Pearse, J., 2012, The calculation of the resonant sound reduction index for use in EN12354, Euronoise 2012, Praha.

Mahn, J., Müller-Trapet, M., 2019, Characterization of Laminated Timber Building Elements to Estimate Flanking Transmission, Internoise 2019, Madrid.

Mahn, J., Quirt, D., Mueller-Trapet, M., Hoeller, C., 2020, RR-335 Apparent Sound Insulation in Mass Timber Buildings, NRC Publications Archive, toinen painos, Canada, 198 s.

Mecking, S., Kruse, T., Winter, C., 2017, Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung, tutkimusraportti, Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 276 s.

Mecking, S., Schanda, U., Kruse, T., 2015, Measurement and calculation of sound transmission across junctions of solid timber building elements, Euronoise 2015, Maastricht.

Morandi, F., De Cesaris, S., Garai, M., Barbaresi, L., 2018, Measurement of flanking transmission for the characterisation and classification of cross laminated timber junctions, Applied Acoustics, 141, S. 213-222.

Morandi, F., Prato, A., Barbaresi, L., Schiavi, A., 2019, On the diffuseness of the vibrational field of a cross-laminated timber plate: Comparison between theoretical and experimental methods, Applied Acoustics, 159.

Nightingale, T.R.T., 1995, Application of the CEN Draft Building Acoustics Prediction Model to a Lightweight Double Leaf Construction, Applied Acoustics, 46, S. 265-284.

Nightingale, T.R.T., Bosmans, I., 1999, Vibration response of lightweight wood frame building elements, Building Acoustics, 6, S. 269-288.

Nightingale, T.R.T., Bosmans, I., 2003, Expressions for first-order flanking paths in homogeneous isotropic and lightly damped buildings, *Acta Acustica*, 89(1), S. 110-122.

Paolini, A., Kollmannsberger, S., Winter, C., Buchschimid, M., Müller, G., Rabold, A., Mecking, S., Schanda, U, Rank, E., 2017, A high-order finite element model for vibration analysis of cross-laminated timber assemblies, *Building Acoustics*, 24(3), S.135-158.

Perez, M., Fuente, M., 2013, Acoustic design through predictive methods in Cross Laminated Timber (CLT) panel structures for buildings, *Internoise 2013*, Innsbruck.

Piana, E. A., Granzotto, N., 2014, Simple Method To Determine The Transmission Loss Of Gypsum Panels, *ICSV 21*, Peking.

Puu-Info, 2020, Insinööripuutuotteet [verkkodokumentti], Helsinki: Puuinfo Oy, Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/> [viitattu 20.10.2020].

Poblet-Puig, J., 2008, Numerical modelling of sound transmission in lightweight structures, Barcelona, Polytechnic University of Catalonia, 244 s.

Poblet-Puig, J., Guigou-Carter, C., 2015 Using spectral finite elements for parametric analysis of the vibration reduction index of heavy junctions oriented to flanking transmission and EN 12354 prediction method, *Applied Acoustics*, 113, S. 7-21.

Poblet-Puig, J., Guigou-Carter, C., 2017, Catalogue of vibration reduction index formulas for heavy junctions based on numerical simulations, *Acta Acustica united with Acustica*, 103(4), S. 624-638.

Rabold, A., Chateauvieux-Hellwig, C., Mecking, S., Schramm, M., 2019, Flanking transmission of solid wood elements in multi-storey timber buildings input data and prediction models for airborne and impact sound excitation, *Internoise 2019*, Madrid.

Rabold, A., Schramm, M., Chateauvieux-Hellwig, C., 2015, SEA based prediction for integrated vibro-acoustical design optimization of multi-storey buildings, *Eurnoise 2015*, Maastricht.

Rasmussen, B., Machimbarrena, M., 2014, COST- Action TU0901-Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe, DiScript Preimpresion, S.L.

Rindel, J., 2007, Sound Insulation in Buildings, luentomoniste, Technical University of Denmark.

Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Marescotti, C., Mazzanti, V., Pompoli, F., 2020 Characterization and Vibro-Acoustic Modeling of Wood Composite Panels, *Materials*, 13(8).

Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Schoenwald, S., Tröbs, H.M., 2016, Sound radiation efficiency measurements on cross-laminated timber plates, *Internoise 2016*, Hamburg.

Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Schoenwald, S., 2017, Predicting sound radiation efficiency and sound transmission loss of orthotropic cross-laminated timber panels, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Volume 30, Boston.

Santoni, A., Davy L., Fausti, P., Bonfiglio, P., 2020, A review of the different approaches to predict the sound transmission loss of building partitions, *Building Acoustics*, 27(3), S. 253-279.

Santoni, A., Schoenwald, S., Van Damme, B., Fausti, P., 2017, Determination of the elastic and stiffness characteristics of cross-laminated timber plates from flexural wave velocity measurements, *Journal of Sound and Vibration*, 400, S. 387-401.

Santoni, A., Shoenwald, S., Fausti, P., Tröbs, H.M., 2019, Modelling the radiation efficiency of orthotropic cross-laminated-timber plates with simply-supported boundaries, *Applied Acoustics*, 143, S. 112-124.

Santoni, A., Schoenwald, S., Van Damme, B., Tröbs, H.M., Fausti, P., 2016, Average sound radiation model for orthotropic cross laminated timber plates, *Euroregio 2016*, Porto.

Schoenwald, S, 2008, Flanking sound transmission through lightweight framed double leaf walls; Prediction using statistical energy analysis (SEA), Eindhoven, Eindhoven University of Technology, 283 s., ISBN 978-90-6814-611-0.

Schoenwald, S, 2012, Comparison of proposed methods to include lightweight framed structures in EN 12354 prediction model, Euronoise 2012, Praha.

Schoenwald, S., Zeitler, B., Sabourin, I., King, F., Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems, Internoise 2013, Innsbruck.

Schoenwald, S., Zeitler, B., Sabourin, I., 2014, Analysis on Structure-borne Sound Transmission at Junctions of Solid Wood Double Walls with Continuous Floors, Forum Acusticum 2014, Krakow.

Schöpfer, F., Hopkins, C., Mayr, A.R., Schanda, U., 2016, Modelling structure-borne sound transmission across a timber-frame wall using SEA, Internoise 2016, Hamburg.

Schöpfer, F., Mayr, A.R., Schanda, U., 2015, Structure-borne sound propagation across a double leaf timber-frame wall, CSV22, Firenze.

SFS-EN ISO 12354-1. Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2000.

SFS-EN ISO 12354-2. Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2000.

SFS-EN ISO 12354-1:2017. Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2017.

SFS-EN ISO 12354-2:2017. Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2017.

SFS-EN ISO 717-1:2013, Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2013.

Sharp, B. H., 1978, Prediction methods for the sound transmission of building elements, *Noise Control Engineering Journal*, 13, S. 56-63.

Seidel, J., Hengst, K., 2014, The Influence of the Design of Metal Stud Wall Junctions on the Flanking Transmission, *Forum, Acusticum*.

Speranza, A., Barbaresi, L., Morandi, F., 2016, Experimental analysis of flanking transmission of different connection systems for CLT panels, *World Conference of Timber Engineering 2016*, Vienna.

Takala, J., 2013, Suomalaisten asuinhuoneiden ääniolosuhteet ja ääneneristävyyden mitaustapa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, Tampere.

van Damme, B., Schoenwald, S., Alvarez-Blanco, M., Zemp, A., 2015, Limitations to the use of homogenized material parameters of cross laminated timber plates for vibration and sound transmission modelling, *ICSV22*, Firenze.

van Damme, B., Schoenwald, S., Tröbs, H.M., 2016, Frequency dependent material properties to model dynamics of cross laminated timber, *Proceedings of the international conference on noise and vibration*, Leuven.

van Damme, B., Schoenwald, S., Zemp, A., 2017, Modelling the bending vibration of cross-laminated timber beams, *European Journal of Wood and Wood Products*, 75, S. 985-994.

Vigran, T.E., 2008, *Building Acoustics*, Abingdon, Tayler & Francis, 362 s. ISBN 0-203-93131-9.

Villot, M., Guigou-Carter C., 2006, Measurement Methods Adapted to Wood Frame Lightweight Constructions, *Building Acoustics*, 13(3), S. 189-198.

Villot, M., Guigoï-Carter C., 2000, Contribution of forced and resonant vibration in sound transmission through partitions and vibration transmission through plate junctions, Proceedings of NOVEM 2000, Lyon

Villot, M., Gerretsen, E., Bard, D., Zhang, B., Ingelaere, B., 2012, COST Action FP0702 Net-Acoustics for timber based lightweight buildings and elements, European cooperation in science and technology, E-Kirja, Saatavissa: <http://extra-net.cstb.fr/sites/cost/ebook/Forms/AllItems.aspx>

Winter, C. K., 2018, Frequency Dependent Modeling for the Prediction of the Sound Transmission in Timber Constructions, Munich, Technical University of Munich, 190 s.

Ympäristöministeriö, 2017, Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 496/2017, Helsinki.

Ympäristöministeriö, 2018, Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä, Helsinki.

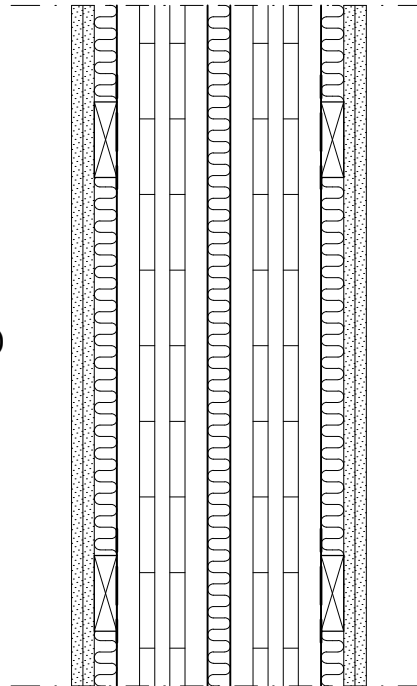
Ympäristöministeriö, 2019, Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä annetun ympäristöministeriön asetuksen 5 ja 6 §:n muuttamisesta 360/2019, Helsinki.

Ympäristöministeriö, 2020, Puurakentamisen ohjelma [verkkosivu], saatavissa: <https://ym.fi/puurakentaminen> [viitattu 20.10.2020].

Ågren, A., Ljunggren, F., 2016, In situ measured flanking transmission in light weight timber houses with elastic flanking isolators – Part II, Internoise 2016, Hamburg.

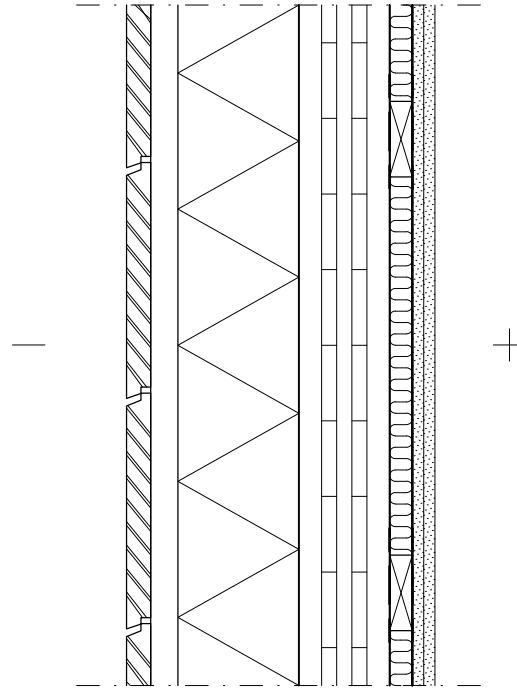
Liite 1. Esimerkki ja vertailukohteiden rakennetyypit ja liitokset.

HUONEISTO



HUONEISTO

2x15 mm	PALOKIPSILEVYT
30 mm	KOOLAUS 30x100 k600 + KOOLAUKSEN JA RUNGON VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA
120 mm	CLT (30+20+20+20+30)
30 mm	ILMARAKO + PEHMEÄVILLA 30mm
120 mm	CLT (30+20+20+20+30)
30 mm	KOOLAUS 30x100 k600 + KOOLAUKSEN JA RUNGON VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA
2x15 mm	PALOKIPSILEVYT

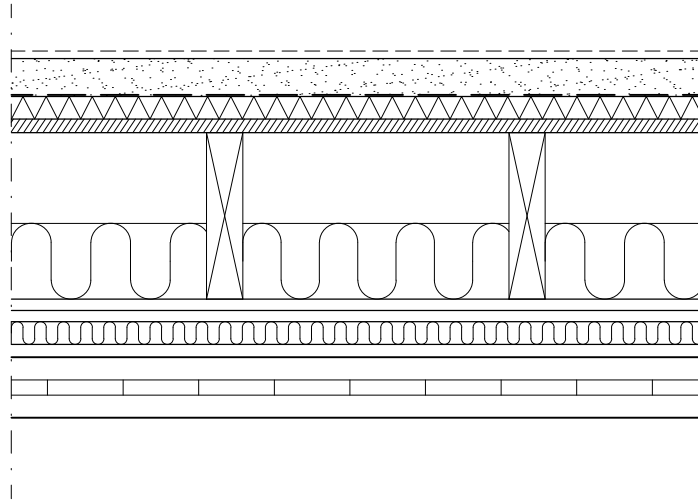


32 mm	ULKOVERHOUSLAUTA
36 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ KOOLAUS 36x92 k600
160 mm	JÄYKKÄ LÄMMÖNERISTE
120 mm	CLT (30+20+20+20+30)
30 mm	KOOLAUS 30x100 k600 + KOOLAUKSEN JA RUNGON VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA
2x15 mm	PALOKIPSILEVYT

HUONEISTO

KÄYTÄVÄ

2x15 mm	PALOKIPSILEVYT
30 mm	KOOLAUS 30x100 k600 + KOOLAUKSEN JA RUNGON VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA
120 mm	CLT (30+20+20+20+30)
3x15 mm	PALOKIPSILEVYT



50 mm	PINTALAATTA
30 mm	ASKELÄÄNIERISTE
18 mm	HAVUVANERI
220 mm	PALKIT 48x220 k400 + VÄLEISSÄ PEHMEÄ VILLA 100 mm
2x15 mm	PALOKIPSILEVY
30 mm	KEVYT MINERAALIVILLA
17 mm	ILMARAKO
80 mm	CLT (30 + 20 + 30)

Liite 1.1

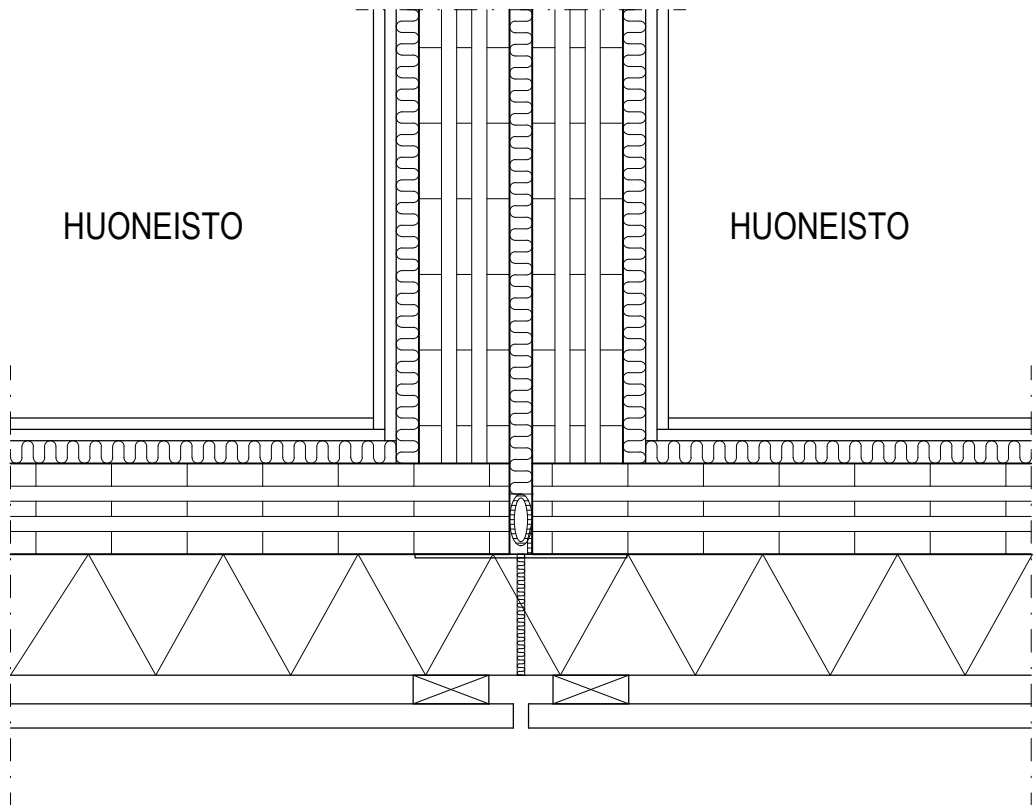
ULKOSEINÄN VAAKALIITOS

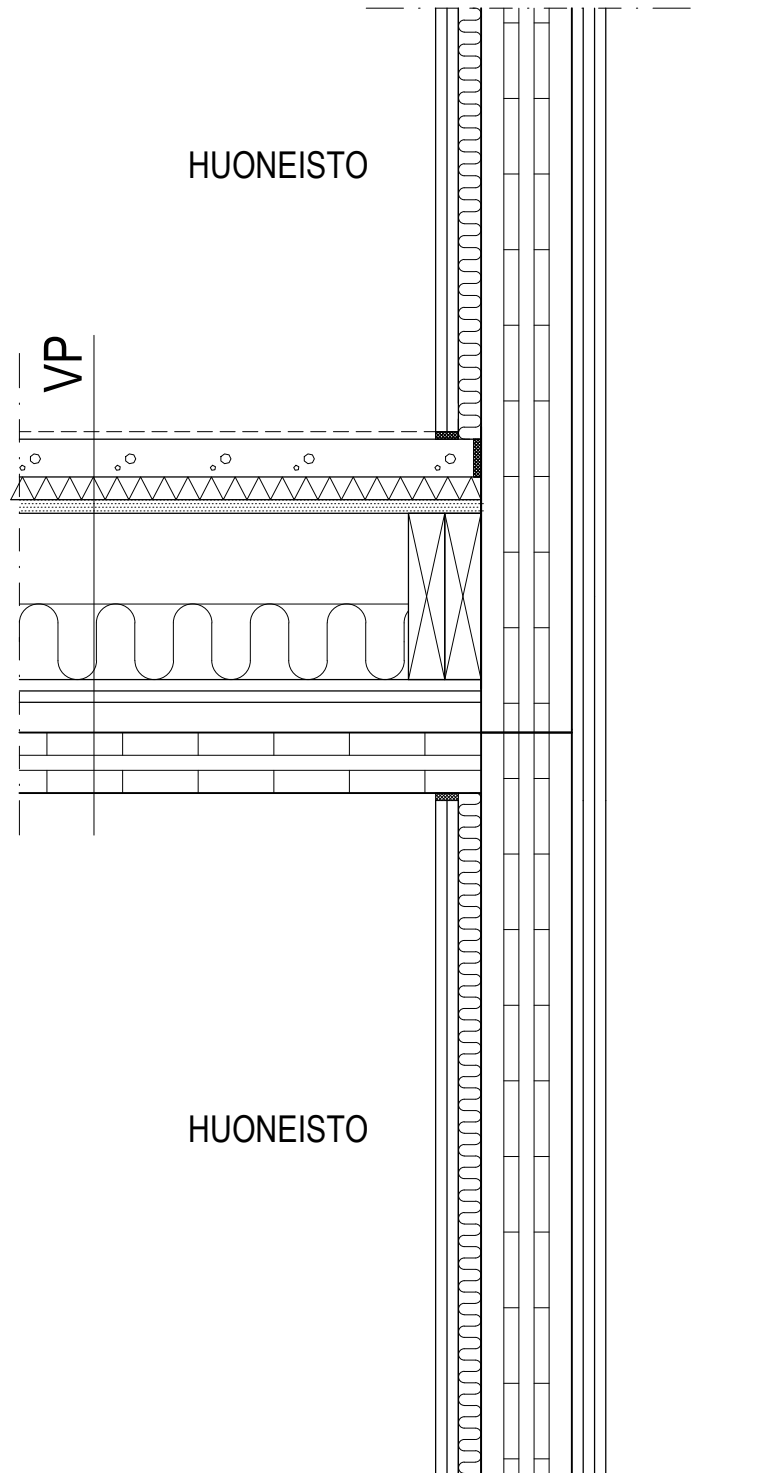
1:10

Diplomityö, Mikko Pura

Päiväys

CLT T1 LUS

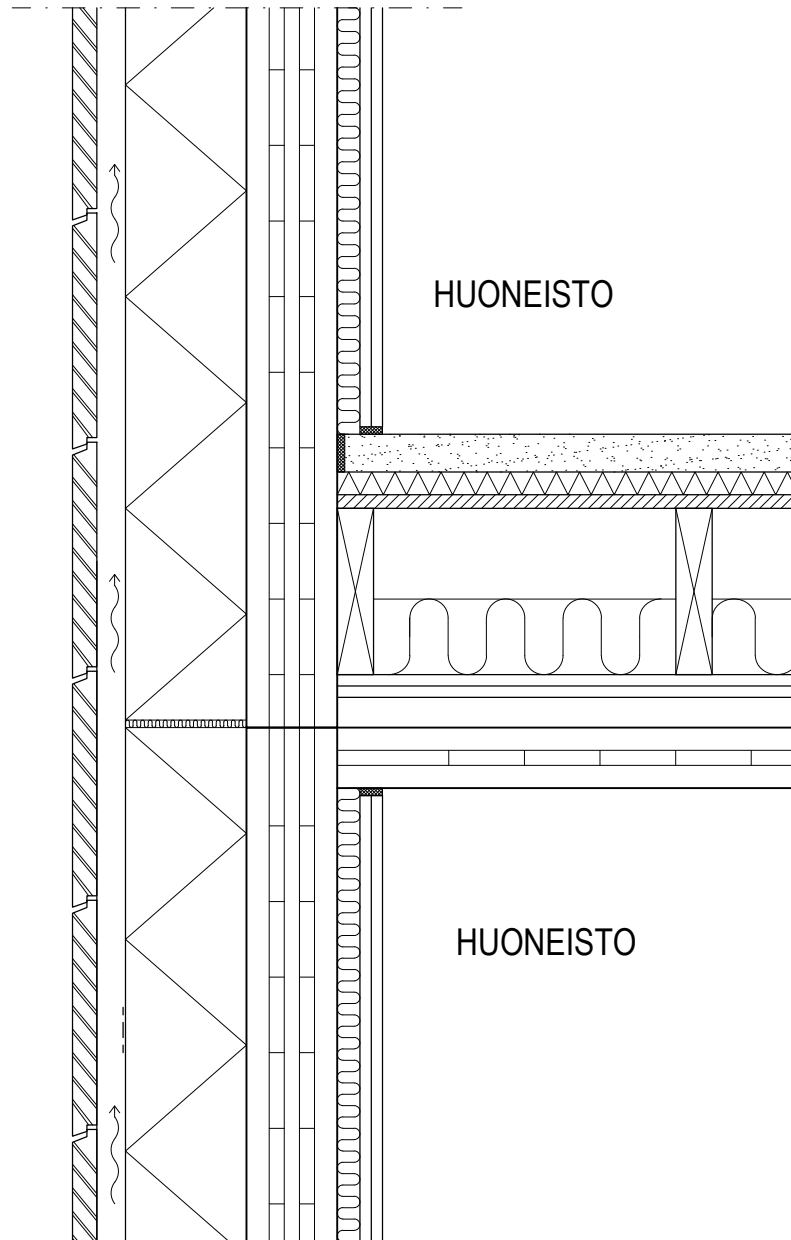


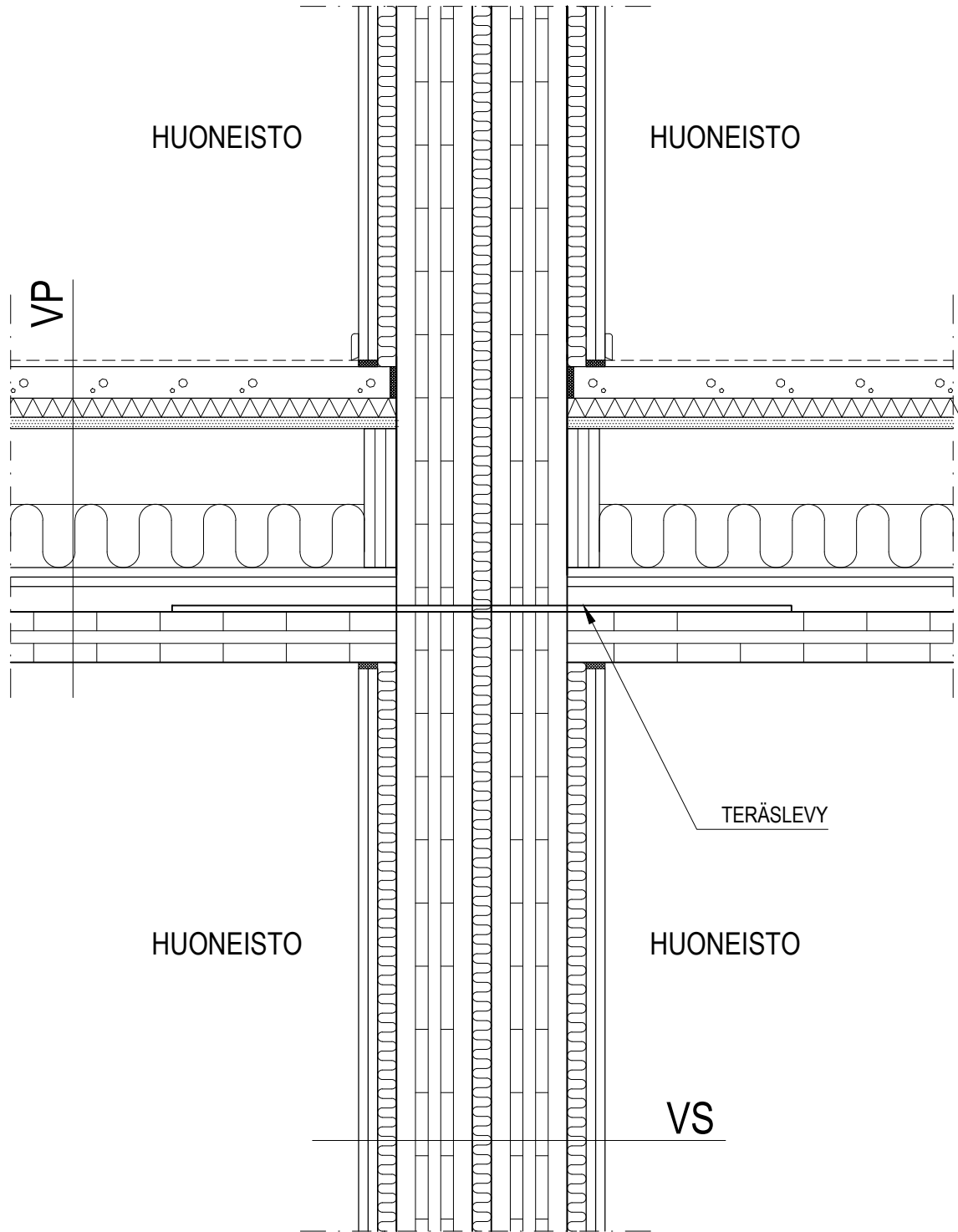


Liite 1.1

Päiväys

Diplomityö, Mikko Pura

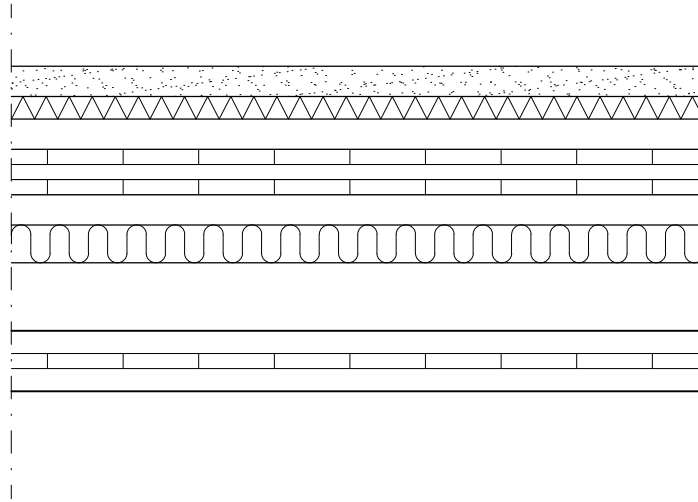




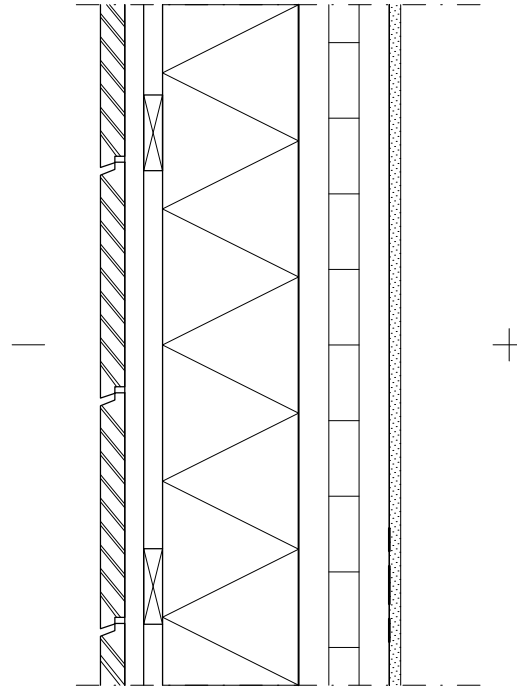
HUONEISTO

HUONEISTO

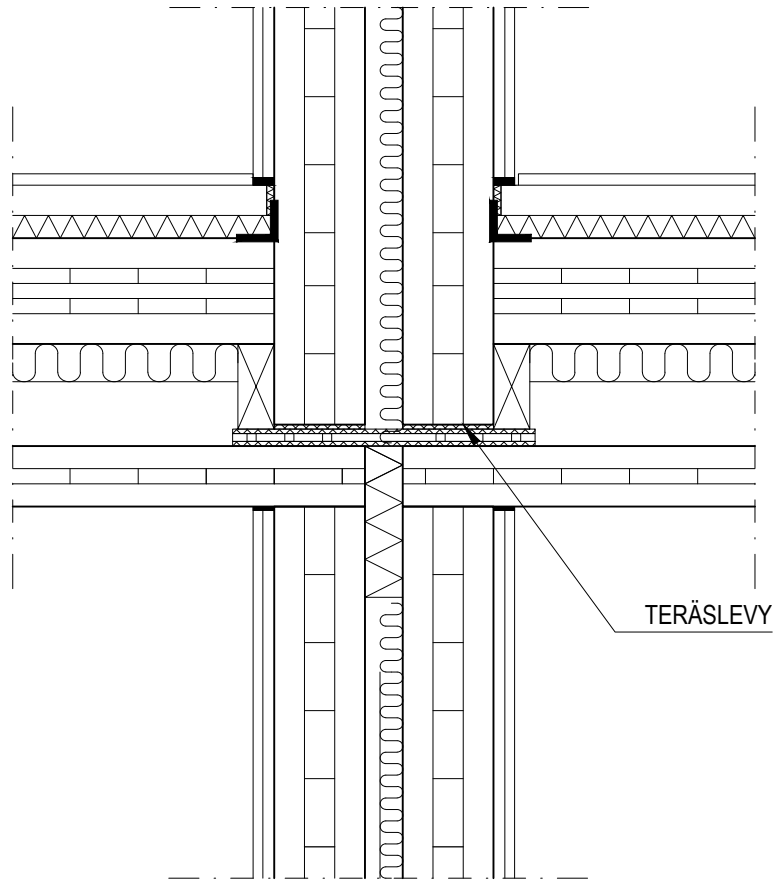
2x15 mm	PALOKIPSILEVYT
100 mm	CLT (30+40+30)
50 mm	ILMARAKO + PEHMEÄVILLA 30mm
100 mm	CLT (30+40+30)
2x15 mm	PALOKIPSILEVYT



50 mm	PINTALAATTA
30 mm	ASKELÄÄNIERISTE
140 mm	CLT (40 + 20 + 20 + 20 + 40)
140 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ PEHMEÄ VILLA 50 mm
80 mm	CLT (30 + 20 + 30)



28 mm	ULKOVERHOUSLAUTA
50 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ RISTIKOOLAUS 2x50x100 k600
160 mm	JÄYKKÄ LÄMMÖNERISTE
120 mm	CLT (40+40+40)
15 mm	PALOKIPSILEVY



Liite 1.2

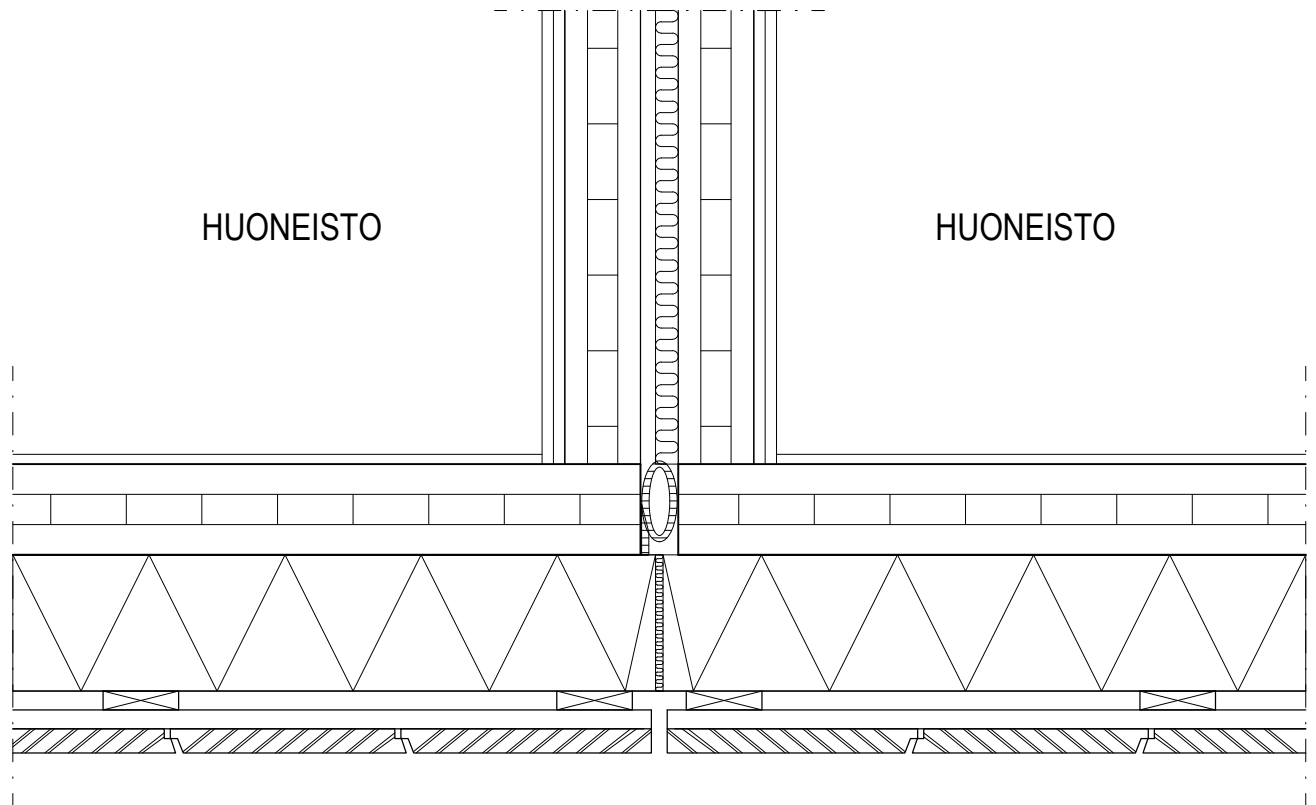
ULKOSEINÄN LIITOS

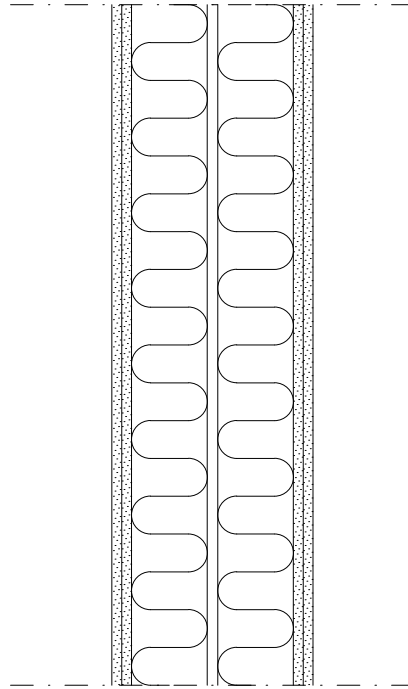
1:10

Diplomityö, Mikko Pura

Päiväys

CLT T2 LUS





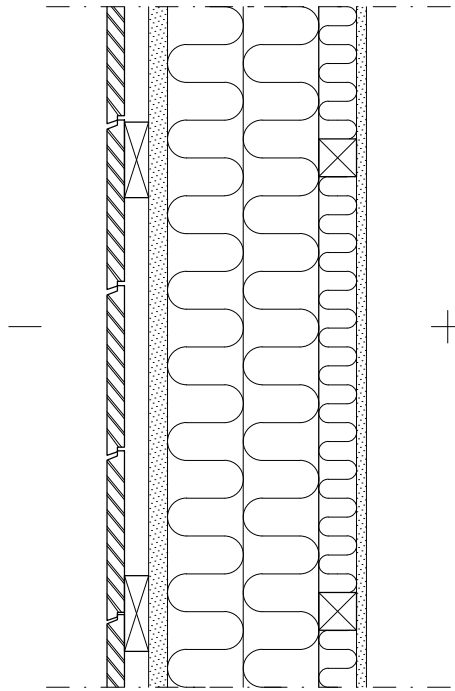
2 x 13 mm KIPSILEVY

100 mm ILMAVÄLI, MISSÄ PUURANKA k600 JA VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA 100 mm

14 mm ILMAVÄLI

100 mm ILMAVÄLI, MISSÄ PUURANKA k600 JA VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA 100 mm

2 x 13 mm KIPSILEVY



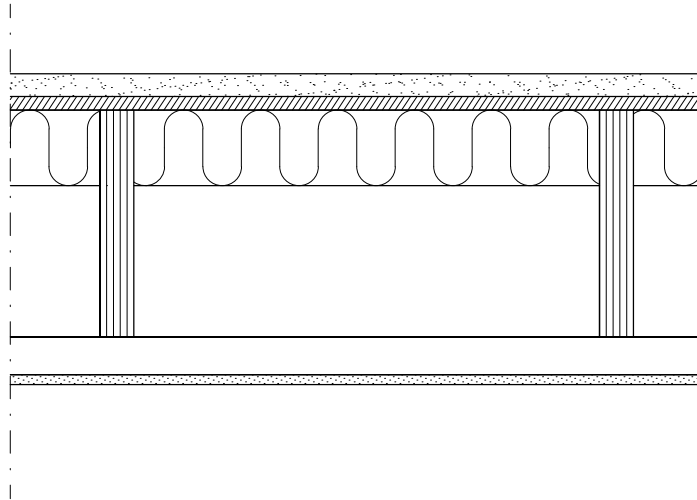
23 mm ULKOVERHOUSLAUTA

32 mm ILMAVÄLI, MISSÄ KOOLAUS 32x100 k600

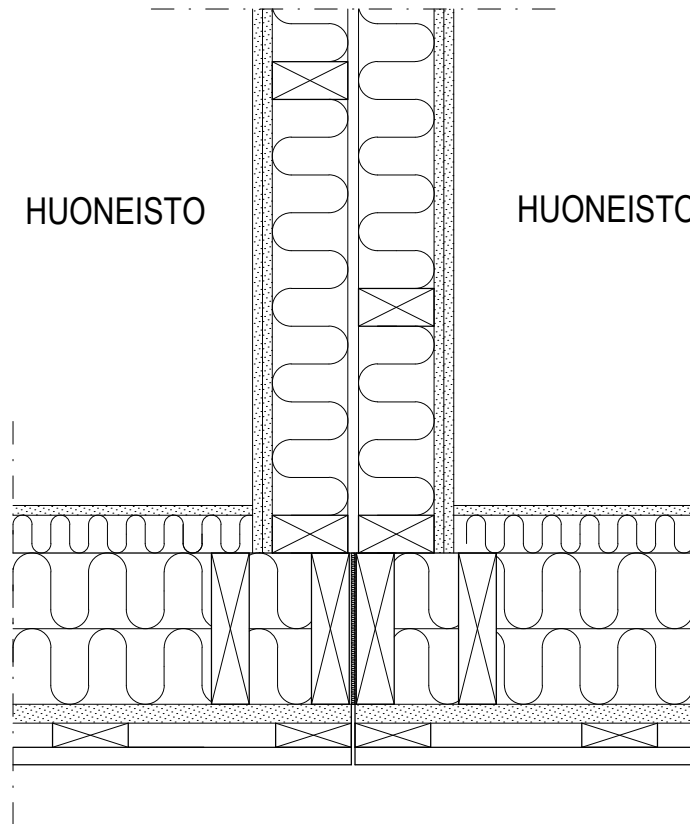
200 mm ILMAVÄLI, MISSÄ PUURANKA 50x200 k600, VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA 200 mm

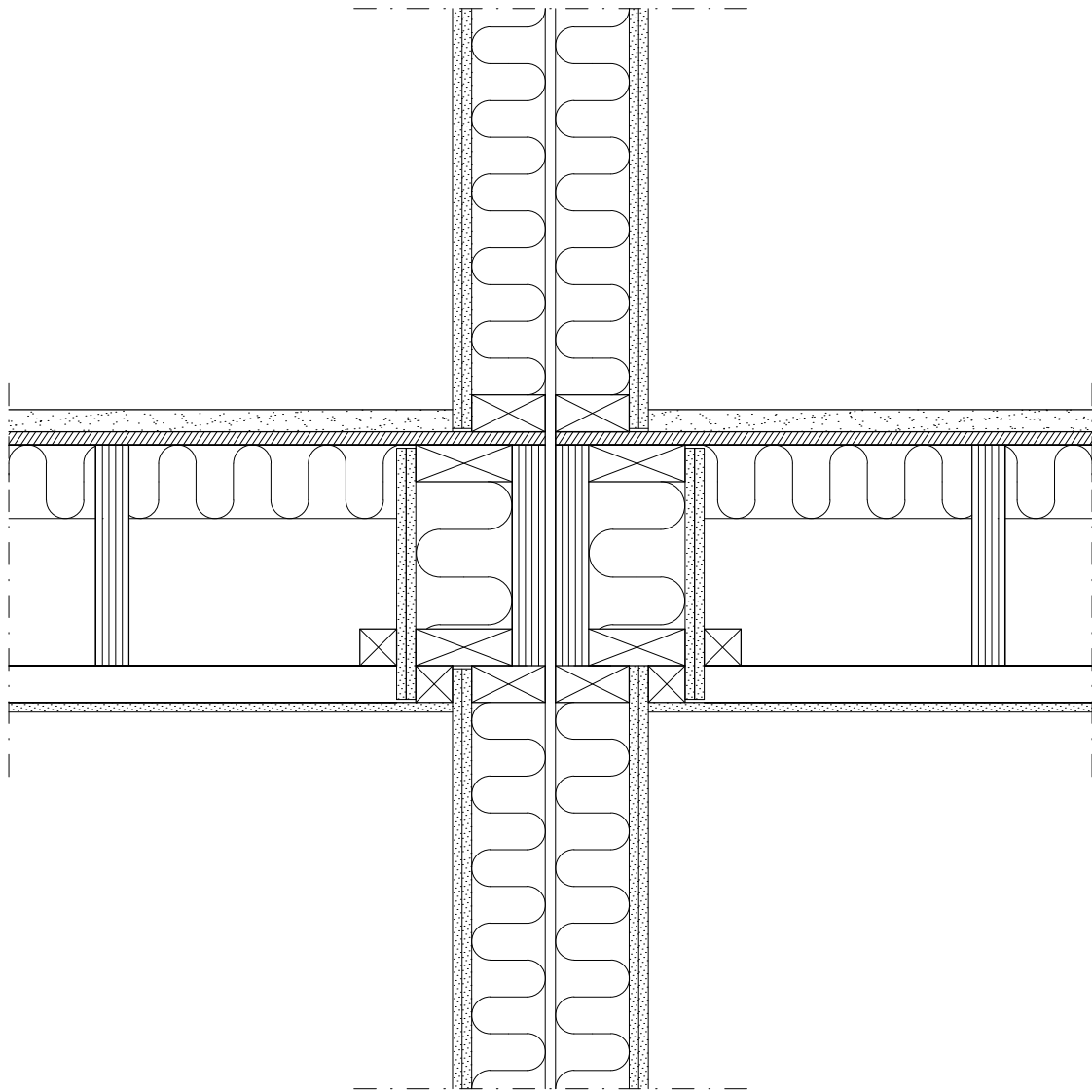
50 mm ILMAVÄLI, MISSÄ PUURANKA 50x50 k600 JA VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA 50 mm

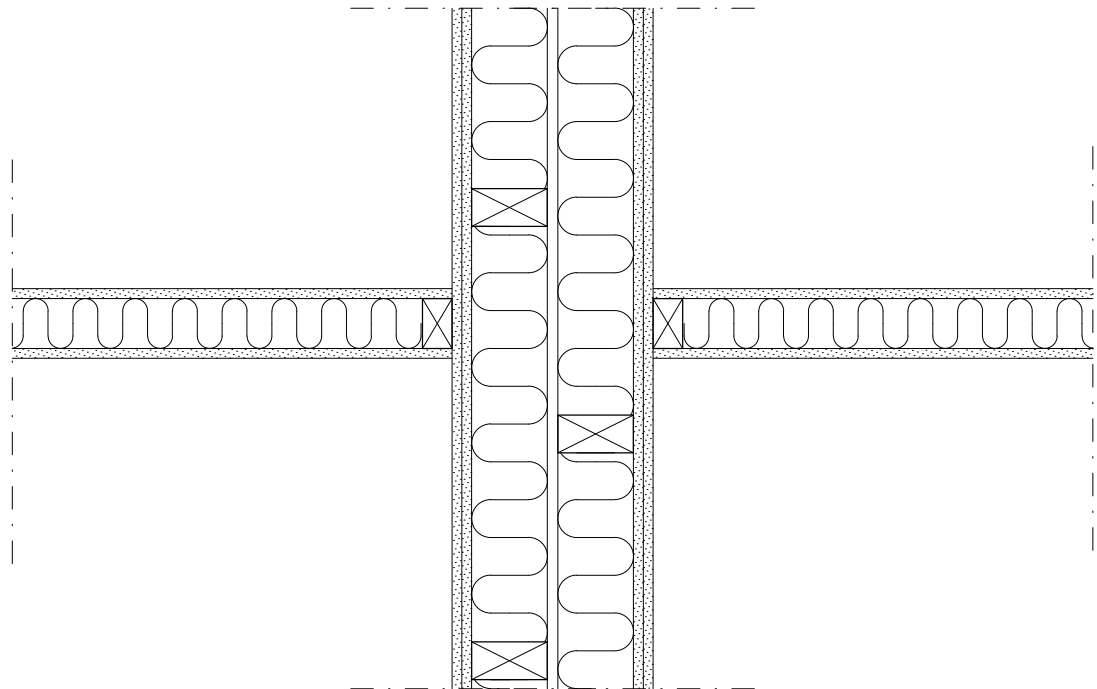
13 mm KIPSILEVY

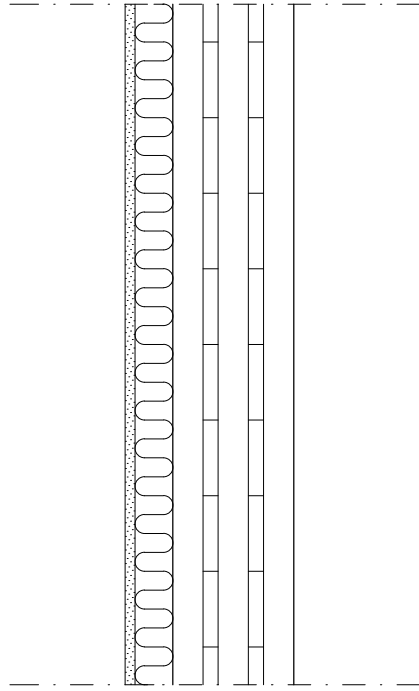


30 mm	PINTALAATTA
18 mm	OSB -LEVY
300 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ PUUPALKIT 300x45 k600, VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA 100 mm
50 mm	PUUKOOLAUS
13 mm	KIPSILEVY





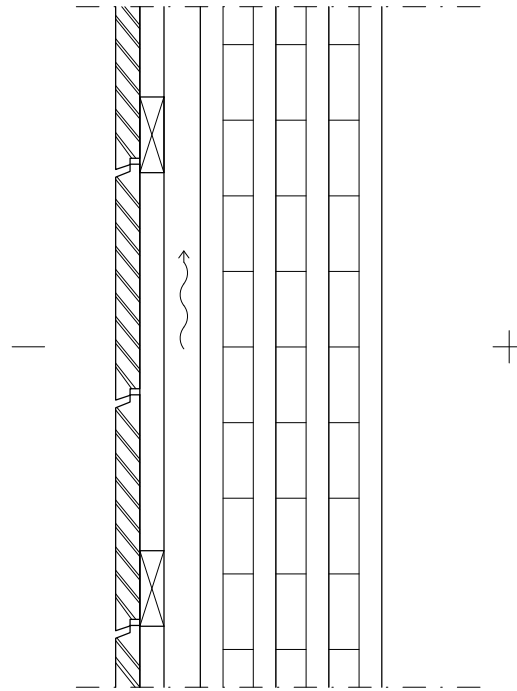




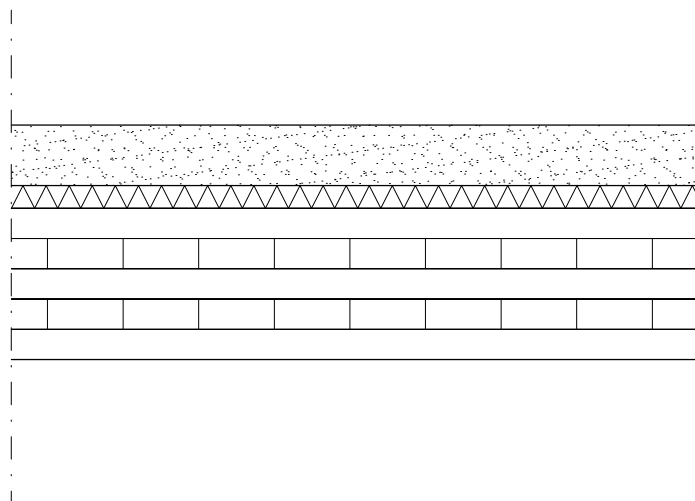
13 mm RASKAS KIPSILEVY

48 mm PELTIRANKAKOOLAUS k600 + KOOLAUSVÄLEISSÄ PEHMEÄ VILLA 50 mm

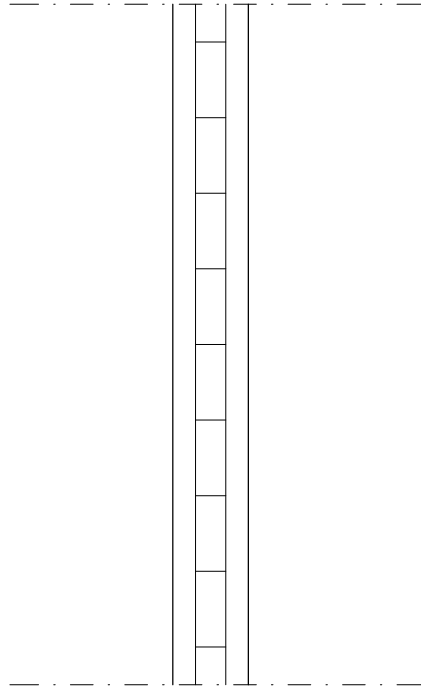
160 mm CLT (40+20+40+20+40)



28 mm	ULKOVERHOUSLAUTA
32 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ VAAKAKOOLAUS 32x100 k600
48 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ PYSTYKoolaUS 48x48 k600
240 mm	CLT (30+40+30+40+30+40+30)

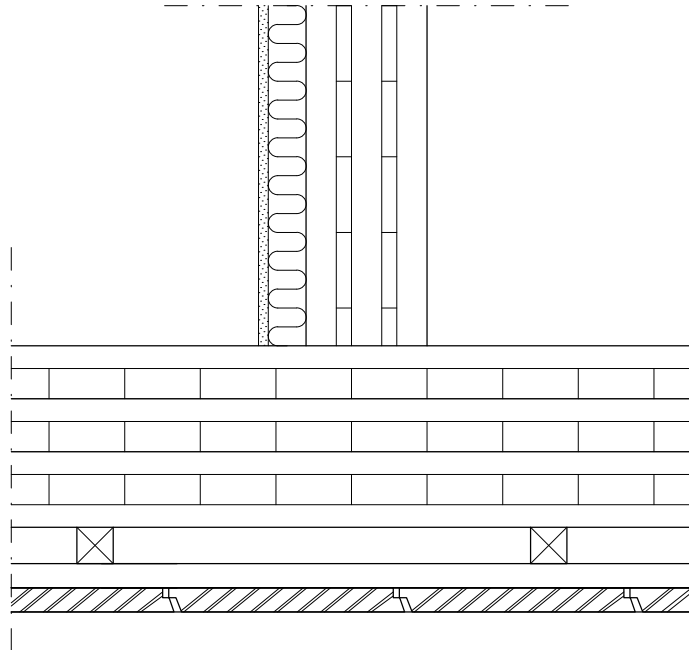


- 80mm PINTALAATTA
- 30 mm ASKELÄÄNIERISTE
- 200 mm CLT (40 + 40 + 40 + 40 + 40)

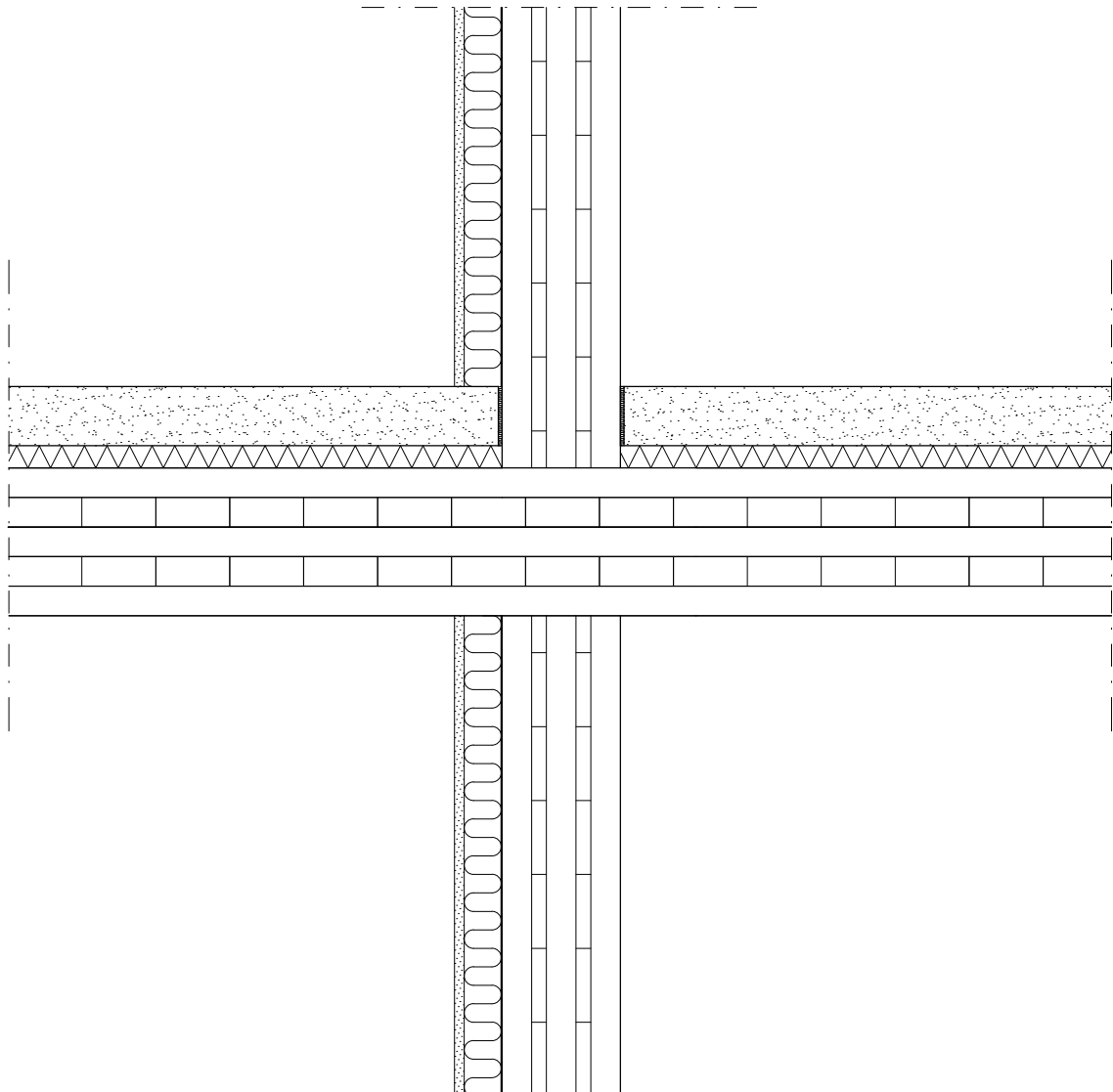


80 mm CLT (20+40+20)

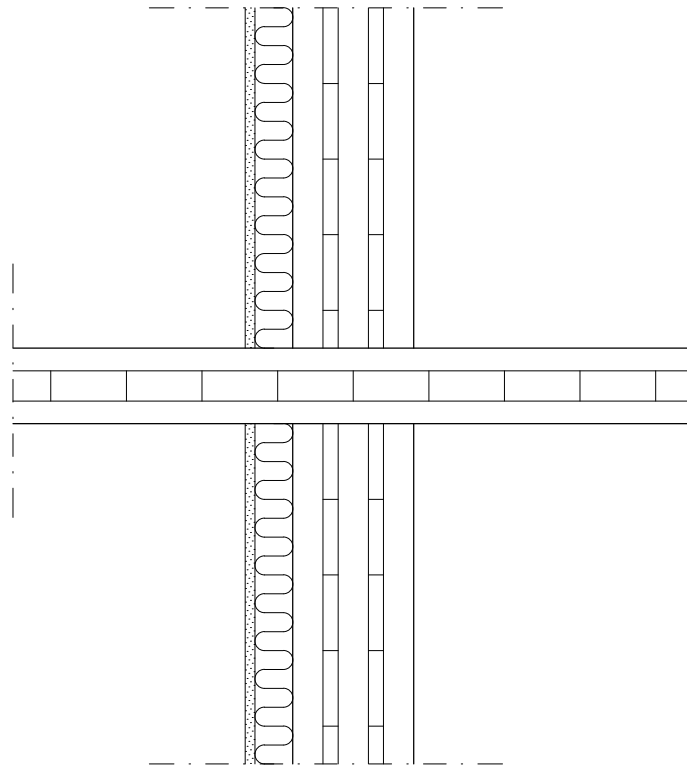
Kiinnitykset ruuveilla ja kulmaraudoilla

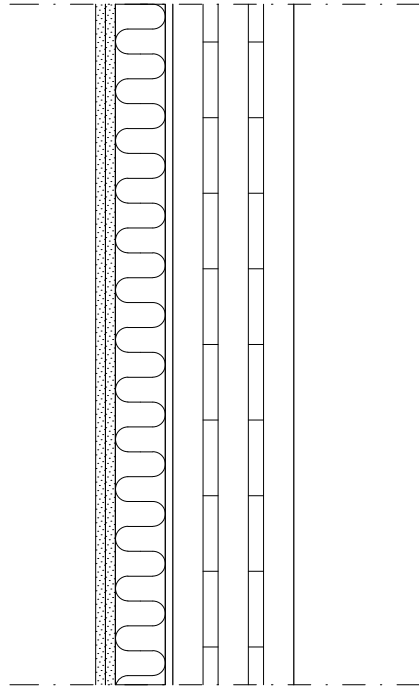


Kiinnitykset ruuveilla ja kulmarauodoilla



Kiinnitykset ruuveilla ja kulmarauodoilla



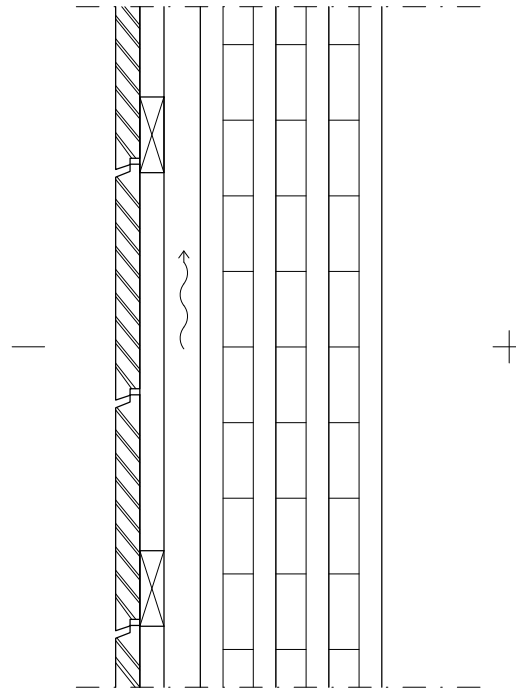


2x13 mm RASKAAT KIPSILEVYT

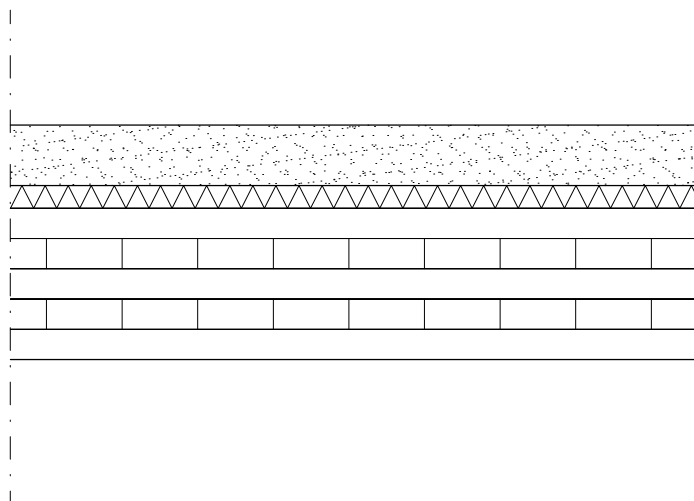
66 mm PELTIRANKA k600 + VÄLEISSÄ PEHMEÄ VILLA 70 mm

10 mm ILMAVÄLI

160 mm CLT (40+20+40+20+40)



28 mm	ULKOVERHOUSLAUTA
32 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ VAAKAKOOLAUS 32x100 k600
48 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ PYSTYKOOLAUS 48x48 k600
240 mm	CLT (30+40+30+40+30+40+30)



- 80mm PINTALAATTA
- 30 mm ASKELÄÄNIERISTE
- 200 mm CLT (40 + 40 + 40 + 40 + 40)

Liite 1.5

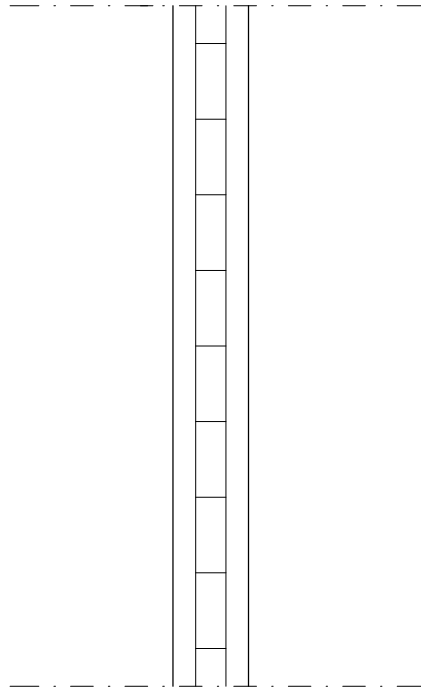
SIVUAVA VÄLISEINÄ

1:10

Diplomityö, Mikko Pura

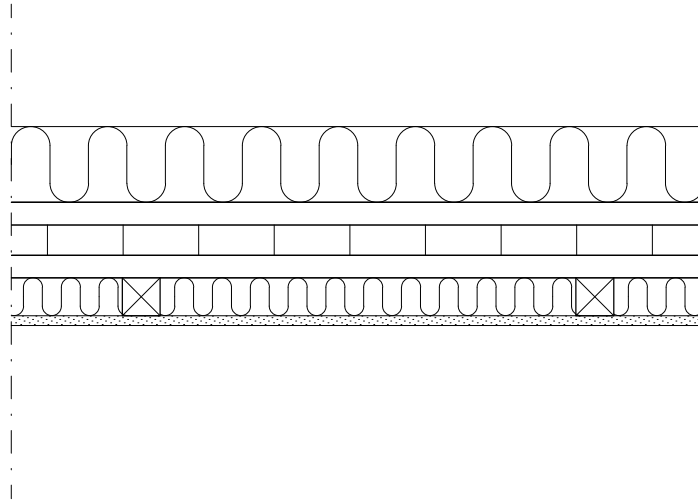
Päiväys

VAST VS



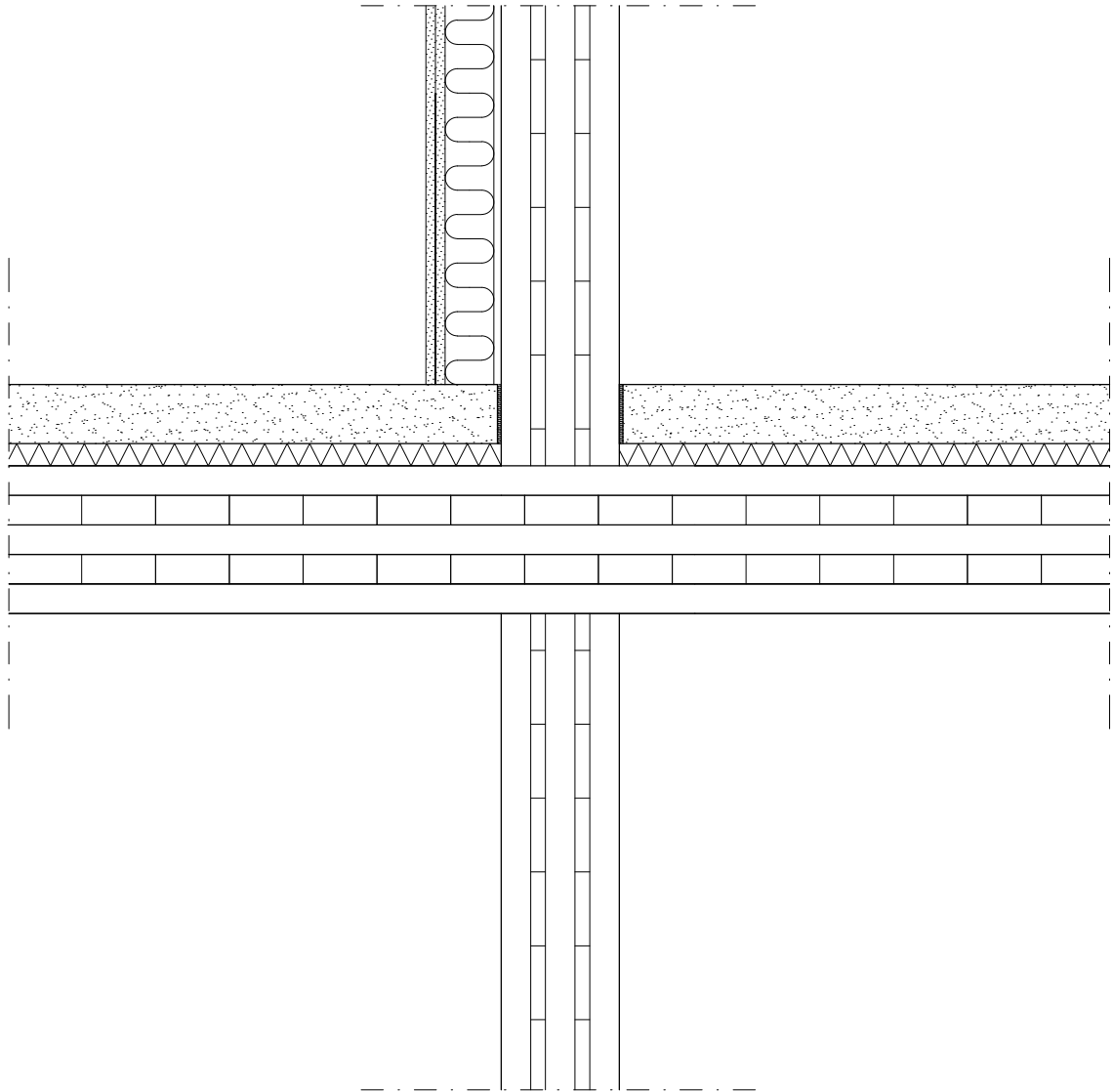
10 mm ILMAVÄLI

80 mm CLT (20+40+20)

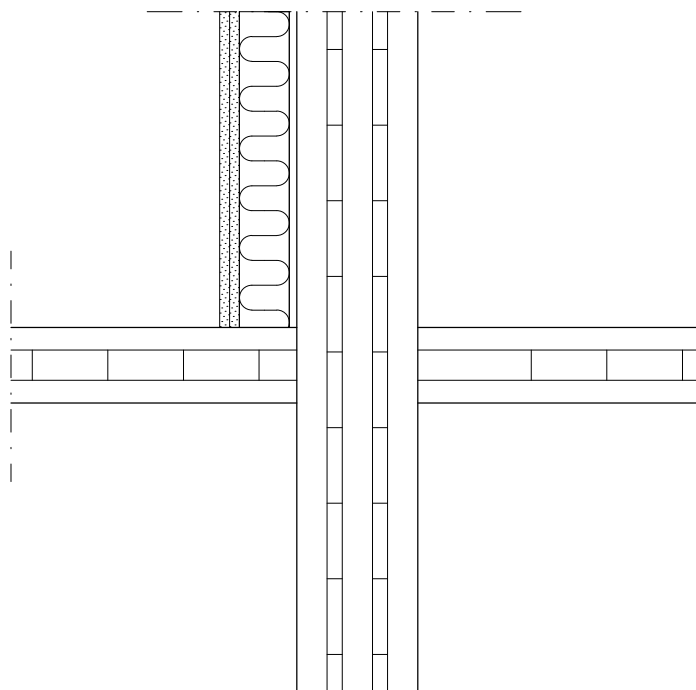


500 mm	PUHALLUSVILLA (EI ESITETTY)
100 mm	PEHMEÄ VILLALEVY
100 mm	CLT (30 + 40 + 30)
50 mm	ILMAVÄLI, MISSÄ PUUKOOLAUS 50x50 k600 JA VÄLISSÄ PEHMEÄ VILLA 50 mm
13 mm	RASKAS KIPSILEVY

Kiinnitykset ruuveilla ja kulmaraudoilla



Kiinnitykset ruuveilla ja kulmaraudoilla



Liite 1.5

YLÄPOHJAN LIITOS

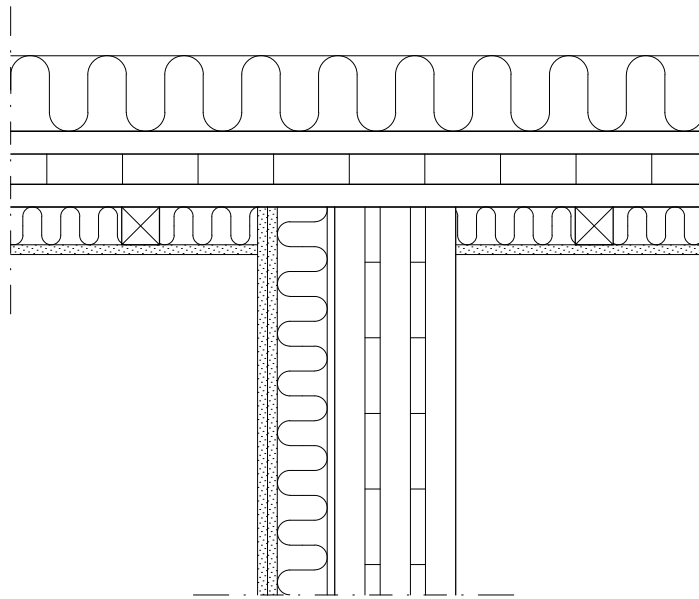
1:10

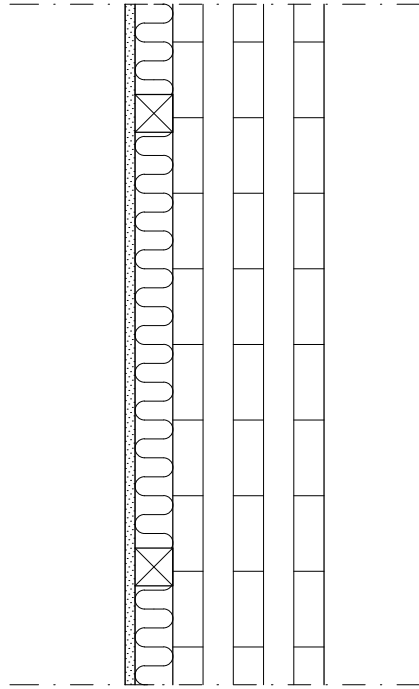
Diplomityö, Mikko Pura

Päiväys

VAST LYP

Kiinnitykset ruuveilla ja kulmarauodoilla

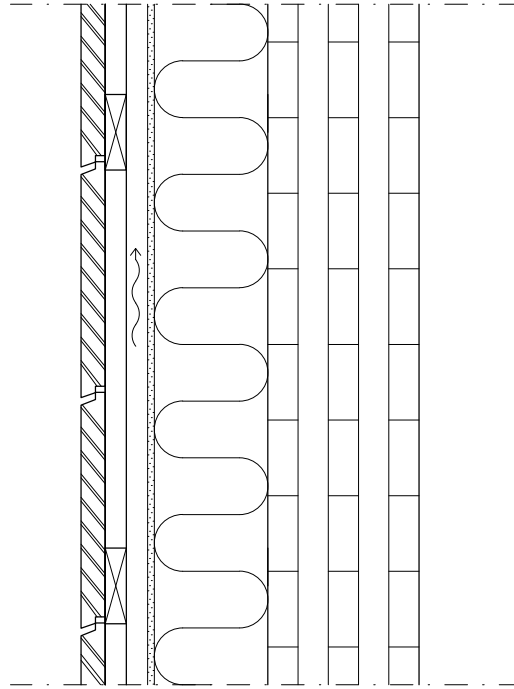




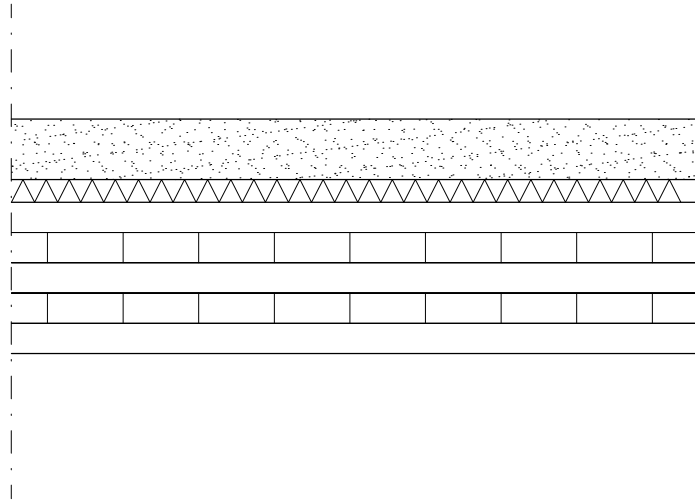
13 mm RASKAS KIPSILEVY

50 mm PUUKOOLAUS k600 + VÄLEISSÄ PEHMEÄ VILLA 50 mm

200 mm CLT (40+40+40+40+40)



28 mm	ULKOVERHOUSLAUTA
28 mm	VAAKAKOOLAUS k600
28 mm	PYSTYKOOLAUS k600
9 mm	TUULENSUOJAKIPSILEVY
150 mm	PYSTYKOOLAUS 50x150 k600 + VÄLEISSÄ PEHMEÄ VILLA 150 mm
200 mm	CLT (40+40+40+40+40)

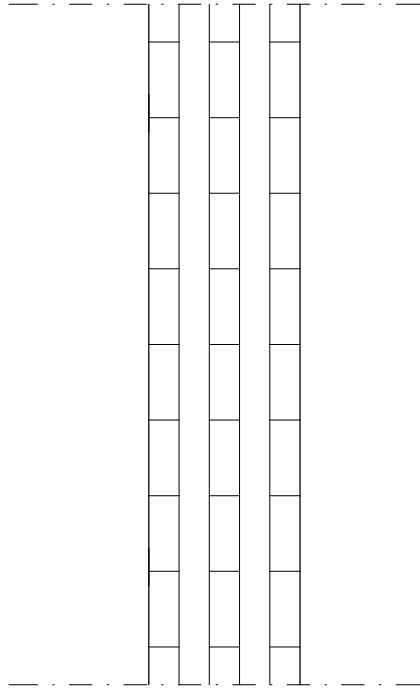


- 80mm PINTALAATTA
- 30 mm ASKELÄÄNIERISTE
- 200 mm CLT (40 + 40 + 40 + 40 + 40)

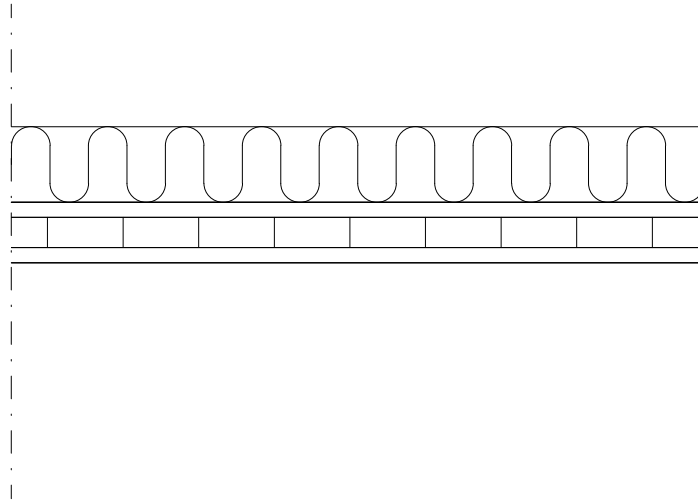
Diplomityö, Mikko Pura

Päiväys

LH VS



200 mm CLT (40+40+40+40)

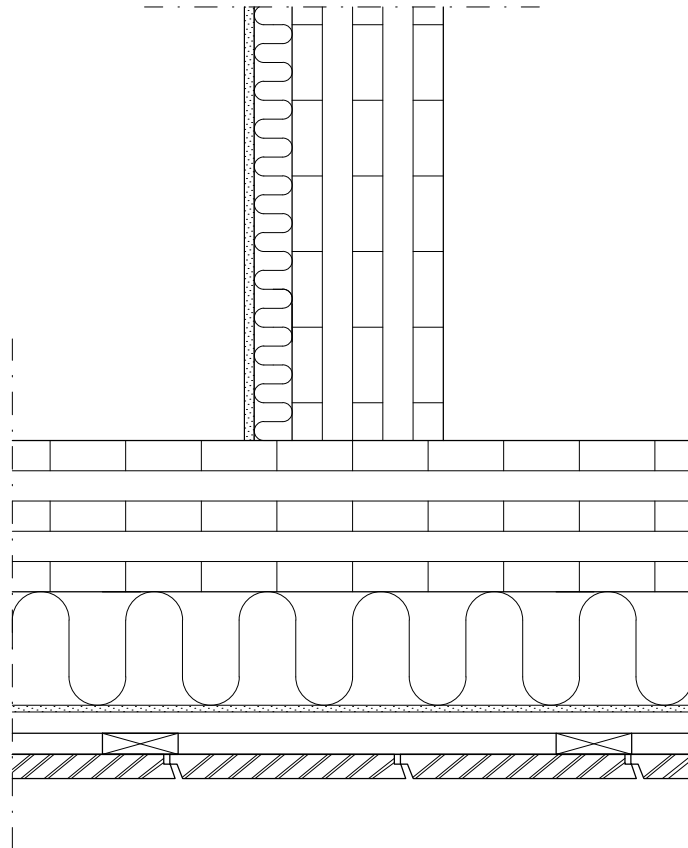


500 mm PUHALLUSVILLA (EI ESITETTY)

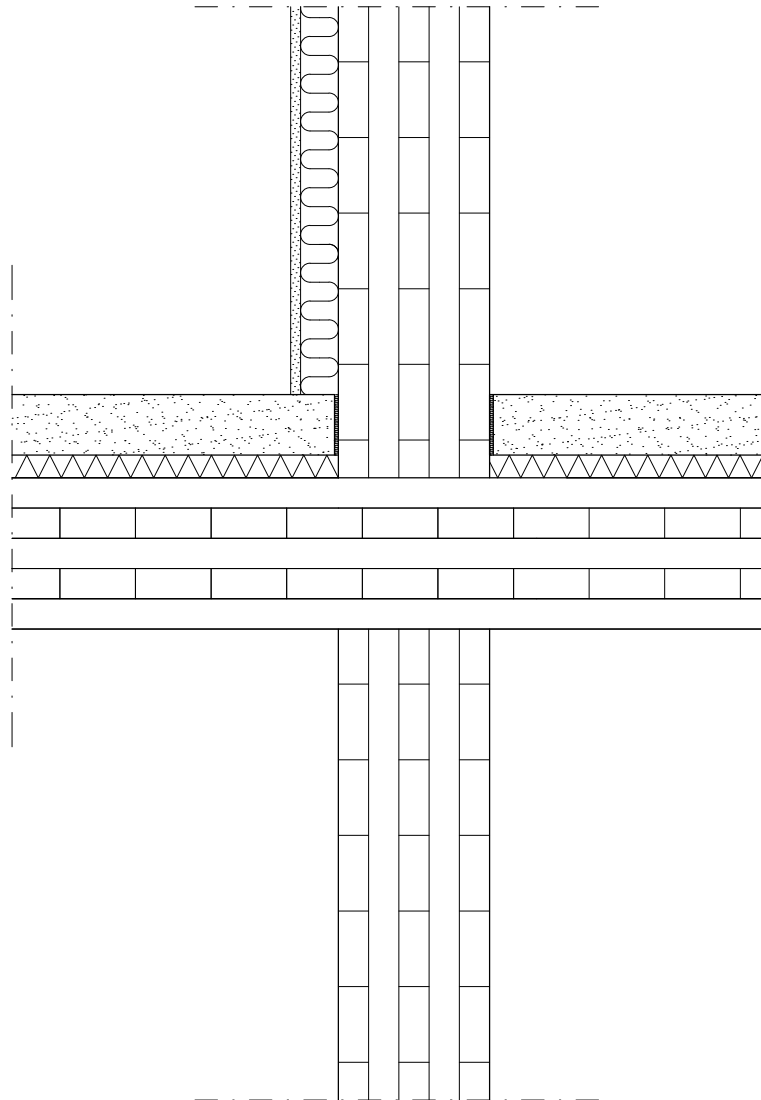
100 mm PEHMEÄ VILLALEVY

80 mm CLT (20 + 40 + 20)

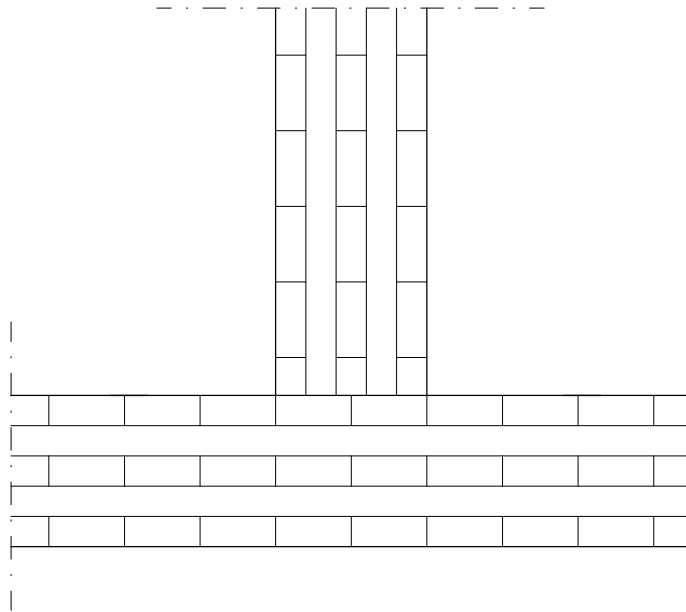
Kiinnitykset ruuveilla ja kulmaraudoilla



Kiinnitykset ruuveilla ja kulmaraudoilla



Kiinnitykset ruuveilla ja kulmarauodoilla



Kiinnitykset ruuveilla ja kulmarauodoilla

