

RAKENTEELLISTEN SIVUTIESIIRTYMIEN LASKENNALLINEN TARKASTELU PUURAKENNUKSISSA

Mikko Pura, Mikko Kylliäinen, Ville Kovalainen

A-Insinöörit

Alasintie 10

90400 OULU

etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

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. Tässä kirjallisuuskatsaukseen perustuvassa tutkimuksessa on kartoitettu näitä puurakenteisiin liittyviä ilmiötä sekä tarkasteltu yleisesti käytetyn laskennallisen mallin avulla sivutiesiirtymien vaikutusta tilojen väliseen ääneneristävyyteen.

1 JOHDANTO

Rakennuksissa ääni siirtyy tilojen välillä erottavien rakennusosien lisäksi myös niitä sivuavien rakenteiden, ilmareittien ja teknisten järjestelmien kautta. Sivuavien rakenteiden kautta tapahtuvaa äänen siirtymistä kutsutaan rakenteelliseksi sivutiesiirtymäksi. Valmiissa rakennuksessa rakenteelliset sivutiesiirtymät vaikuttavat aina tilojen välillä saavutettavaan ääneneristävyyteen, mutta sivutiesiirtymien vaikutus kokonaisääneneristävyyteen riippuu käytettävistä rakenneratkaisuista, materiaaleista sekä tilan mitoista ja rakennusosien pinta-aloista. Rakenteelliset sivutiesiirtymät tulee kuitenkin aina ottaa huomioon tilojen välisen ääneneristävyyden suunnittelussa.

Betonirunkoisissa rakennuksissa ääneneristävyys perustuu betonin massaansa sekä liitoksien jäykkyyteen. Betonirakentamista on harjoitettu pitkään, joten betonirakenteiden rakenneratkaisut ovat pitkälti vakioituneet sekä niiden toteuttamisesta on runsaasti kokemusta ja tutkittua tietoa. Puurakentaminen on vasta yleistymässä, joten näitä vakiintuneita rakenneratkaisuja ei vielä ole olemassa. Toisistaan poikkeavia rakenneratkaisuja kehitetään ja toteutetaan puurakentamisessa siten jatkuvasti. Näitä erilaisia rakenteita on pystyttävä arvioimaan puurakennuksissa myös ääneneristävyyden osalta. Puurakentamisessa ääneneristävyyden ratkaisut eivät voi perustua betonirakentamista vastaaviin ratkaisuihin, sillä puu poikkeaa materiaaliominaisuuksiltaan merkittävästi betonista. Puurakennuksissa tiloja erottavat rakenteet ovat kaksinkertaisia ja sivuaviin rakenteisiin tehdään usein kat-



© 2021 Mikko Pura, Mikko Kylliäinen ja Ville Kovalainen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen – lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

koja. Myös ääneneristävyyden laskennalliseen arviointiin tarvittava lähtötieto sekä menetelmät eivät näistä syistä ole betoni- ja puurakenteiden kesken yhteensopivia.

Standardissa SFS-EN-ISO 12354-1:2017 [1] esitetty laskennallinen menetelmä tilojen välisen ääneneristävyyden arviointiin on alalla vakiintunut. Kilpailevia menetelmiä on kehitetty, mutta kyseisen standardin menetelmän heikkoudet eli lähtötiedot liitoseristävyyksistä ovat kilpailevissa menetelmissä vielä merkittävämpiä [2]. Standardin laskentamenetelmä perustuu tilojen välisen ääneneristävyyden jakamiseen toisistaan riippumattomiin äänen siirtymisreitteihin, joiden summasta saadaan yhdistetyksi tilojen välinen ääneneristävyys. Menetelmässä rakenteellisille sivutiesiirtymille määritellään ääneneristävyys R_{ij} , jonka laskennassa merkittävimmässä osassa ovat sivutiesiirtymän reitillä olevien rakenteiden ilmaääneneristävyydet R sekä näiden välille jäävän liitoksen aiheuttama liitoseristävyys. Standardista julkaistiin uusi puurakentamisen kattava versio vuonna 2017, jonka mukaista laskentamallia on käytetty tämän tutkimuksen tarkasteluissa. Tämän artikkelin tarkasteluissa pitäytyään CLT-massiivipuorakenteissa.

2 RAKENTEELLISET SIVUTIESIIRTYMÄT PUURAKENNUKSISSA

2.1 Puurakenteiden liitoseristävyys

Sivutiesiirtymän laskennallisessa arvioimisessa tilojen välisen rakenteiden liitoksen aiheuttaman värähtelyn vaimeneminen on keskeinen laskennan lähtötieto. Betonirakenteiden liitoseristävyydessä ei ole merkittävää taajuusriippuvuutta [1] tai se on pientä [3]. Puurakenteiden tapauksessa liitoseristävyys muuttuu selkeästi taajuuden mukaan [1, 2, 4, 5, 6]. Puurakenteissa myös liitoseristävyyteen mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä on huomattavasti enemmän kuin betonirakenteissa.

Perinteisin menetelmä puurakenteen liitoseristävyyden parantamiseen on sivuavan rakenteen katkaiseminen tilojen välisessä liitoksessa, pystyrakenteissa tärinäeristimillä ja vaakarakenteissa ilmapälillä. Sivuavan rakenteen katkaisemisella sivutien liitoseristävyys pyritään kasvattamaan niin suureksi, että sivutien vaikutus kokonaisääneneristävyyteen on mitätön. Myös CLT-rakenteiden liitoksien saumoilla on vaikutusta liitoseristävyyteen, vaikka ne eivät varsinaisesti erota rakenteita täydellisesti [4, 7].

Puurakenteiden liitoksille ominaista ovat rakenteiden kiinnittämiseen käytettävät kiinnitysjärjestelmät ja -elimet. Kiinnitysjärjestelmille tyypillistä taas ovat periodisuus sekä pieni jäykkyys, jolloin niiden aiheuttaman kytkennän analysointi poikkeaa merkittävästi betonirakenteiden liitoksista. Sivutiesiirtymiä tutkineessa *Flanksound* -projektissa [5] todettiin, että CLT-rakenteiden liitoksissa kiinnitys saattaa määrittää liitoksen liitoseristävyyden. Tämä ilmeni esimerkiksi X-liitoksessa tarkasteltaessa kiinnityksiä lukuun ottamatta samanlaista äänen siirtymisreittiä, jolloin liitoseristävyydet olivat merkittävästi huonompia kiinnittimien reitillä. Yleisesti ottaen vahvat kytkentätaavat, esimerkiksi välipohjarakenteiden läpi menevät kulmaraudat, heikentävät liitoseristävyyttä merkittävästi ja saattavat jopa mitätöidä elementtien välille sijoitettujen tärinäeristimien vaikutuksen. Tutkimuksissa havaittiin jopa käytettävän ruuvityypin vaikuttavan liitoksella saavutettavaan liitoseristävyyteen. [6]

Betonirakenteiden tapauksessa esimerkiksi standardin SFS-EN ISO 12354-1 mittauksiin perustuvassa lähtötiedossa liitostyyppien eristävyyteen vaikuttavat ainoastaan liitokseen liittyvien rakenteiden massasuhteet. Massiivipuorakenteiden tapauksessa massasuhteiden vaikutus liitoseristävyyteen on vähäistä, mikäli rakenteita ei ole katkaistu liitoksessa. Mi-

käli erottava rakenne katkaisee sivuavan rakenteen liitoksessa tai sivuava rakenne on katkaistu kokonaan, massasuhteilla on merkitystä. [1, 4, 8]

Massiivipuorakenteiden sivutiesiirtymiä voidaan hallita myös sivuavien rakenteiden pinnoille tehtävillä vuorauksilla. Tyypillisesti vuoraukset ovat massiivipuorakenteen pintaan koolattavia kipsilevytyksiä. Kevyiden puorakenteiden tapauksessa lisävuorauksien tuoma ääneneristävyyden parannus ei kuitenkaan välttämättä ole yhtä merkittävää kuin betonirakenteiden, esimerkiksi standardissa SFS-EN ISO 12354-1:2017 laskennallisesti saavutettavasta parannuksesta ohjeistetaan käyttämään vain puolikasta [1].

2.2 Laskennan lähtötieto

Laskennallisen tarkastelun tärkeimmät lähtötiedot ovat rakenteiden liitos- ja ilmaääneneristävyydet. Nämä laboratorio-olosuhteissa määritetyt lähtötiedot täytyy laskennallisessa tarkastelussa siirtää kenttätilanteeseen, missä esimerkiksi rakenteiden dimensiot ja kytkennät viereisiin rakenteisiin poikkeavat laboratoriotilanteesta. Standardissa on esitetty kaksi vaihtoehtoista menetelmää lähtötiedon siirtämiseksi kenttätilanteeseen, joista käytettävä menetelmä valitaan tarkasteltavien rakenteiden vaimennusominaisuuksien perusteella. Rakenteet, joiden vaimennusominaisuuksiin vaikuttavat merkittävästi niiden kytkennät ympäröiviin rakenteisiin käsitellään siis eri menettelyllä kuin rakenteet, joiden sisäiset vaimennusominaisuudet ovat merkittävämmät kuin kytkennöistä aiheutuvat. [1]

Rakenteen sisäinen häviökerroin on siis laskennan kannalta erityisen tärkeä, sillä se vaikuttaa rakenteiden ilmaääneneristävyyteen ja lisäksi olennaisesti menettelyyn, jolla ääneneristävyyttä arvioidaan valmiissa rakennuksessa. Kirjallisuudessa on kuitenkin esitetty runsaasti vaihtelevia arvoja CLT-rakenteiden häviökertoimille ja toisaalta tutkimuksissa on käytetty standardin menettelyjä vaihtelevasti [2]. Tämän artikkelin laskelmissa on käytetty CLT:n ilmaääneneristävyyksien määrittämisessä sisäiselle häviökertoimelle maltillisia arvoja ja sivutiesiirtymien arviointiin standardin menettelyä, missä CLT:n sisäisten häviöiden oletetaan olevan merkittävästi suurempia, kuin kytkennöistä aiheutuvat häviöt [2].

Artikkelin laskelmissa käytetyt liitoseristävyydet on kerätty useista kirjallisuuslähteistä. Rakenteiden ilmaääneneristävyydet puolestaan on määritetty laskennallisesti. Ortotropipisen CLT-levyn ilmaääneneristävyyden arvioimiseen on esitetty kirjallisuudessa useita menetelmiä, mutta yksikään näistä menetelmistä ei kykene kuvaamaan ilmaääneneristävyyttä kovinkaan tarkasti ilman mittauksilla määritettäviä jäykkyysarvoja. Artikkelin laskelmissa käytettiin Hansenin [9] esittämää menettelyä maltillisilla häviökertoimien arvoilla.

3 LASKELMAT JA TULOKSET

3.1 Tarkasteltavat kohteet

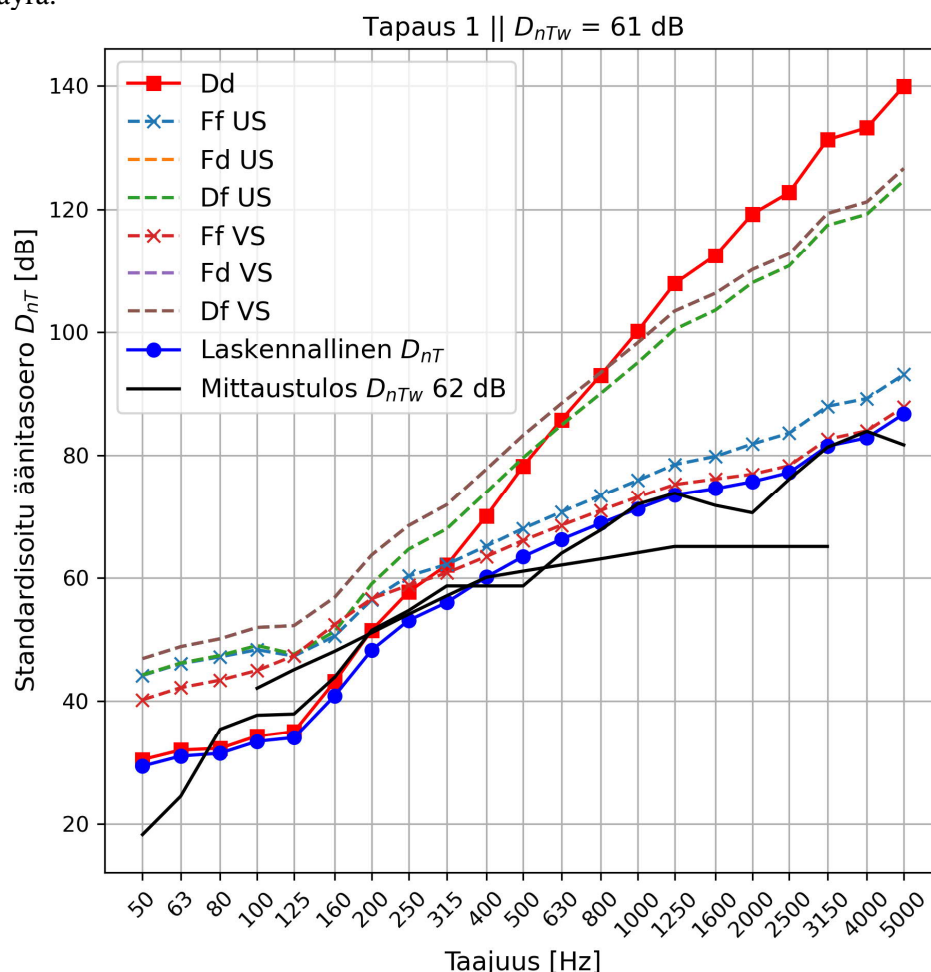
Tämän artikkelin laskelmissa tarkastellaan kahta esimerkimerkkitapausta, jotka molemmat sijaitsevat CLT-rakenteisissa tilaelementtikerrostaloissa. Esitettyjen tilojen mitat ovat suomalaiselle rakentamiselle tyypillisiä. Ensimmäinen tarkastelu tehdään kahden 27-neliöisen yksiön välillä vaakasuuntaan (tapaus 1), missä sivuavia rakenteita ovat ulkoseinä ja käytävän väliseinä. Välipohjat on katkaistu tilojen välillä, jolloin niiden välityksellä tapahtuva sivutiesiirtymä oletetaan merkityksettömäksi. Erottavana rakenteena on kaksi-

runkoinen CLT-väliseinä, jonka sisäpintoihin on koolattu kaksi palokipsilevyä. Myös sivuavien CLT rakenteiden pintoihin on koolattu kipsilevyjä.

Toinen tarkasteltavista kohteista (tapaus 2) on viidennen kerroksen huoneistot, missä tarkastelu suoritetaan eri asuntojen keittiön ja makuuhuoneen välillä. Kuten ensimmäisessä tapauksessa, erottavana rakenteena on kipsilevyillä vuorattu kaksirunkoinen CLT-väliseinä, mutta tässä tapauksessa kipsilevyt on kiinnitetty suoraan CLT:n pintaan ilman koolausta. Sivuvaivina rakenteina ovat ainoastaan välipohjat, sillä ulkoseinä ja väliseinä ovat katkaistu tilojen väliltä ilman minkäänlaista kytkentää, jolloin voidaan olettaa sivu-tien olevan merkityksetön.

3.2 Laskelma - Tapaus 1

Ensimmäisen tapauksen standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaustulos on 62 dB. Laskennallinen tulos on esitetty kuvassa 1. Kuvan selitteissä esitetyt kirjainyhdistelmät viittaavat standardin SFS-EN ISO 12354-1 tapaan merkitä tarkasteltavia rakenteita, kirjaimella d viitataan erottavaan rakenteeseen ja kirjaimella f sivuvaivaan rakenteeseen. Lisäksi kuvaajassa on esitetty mittaustulos ja yksilukuarvon määrittämiseen käytettävä vertailukäyrä.



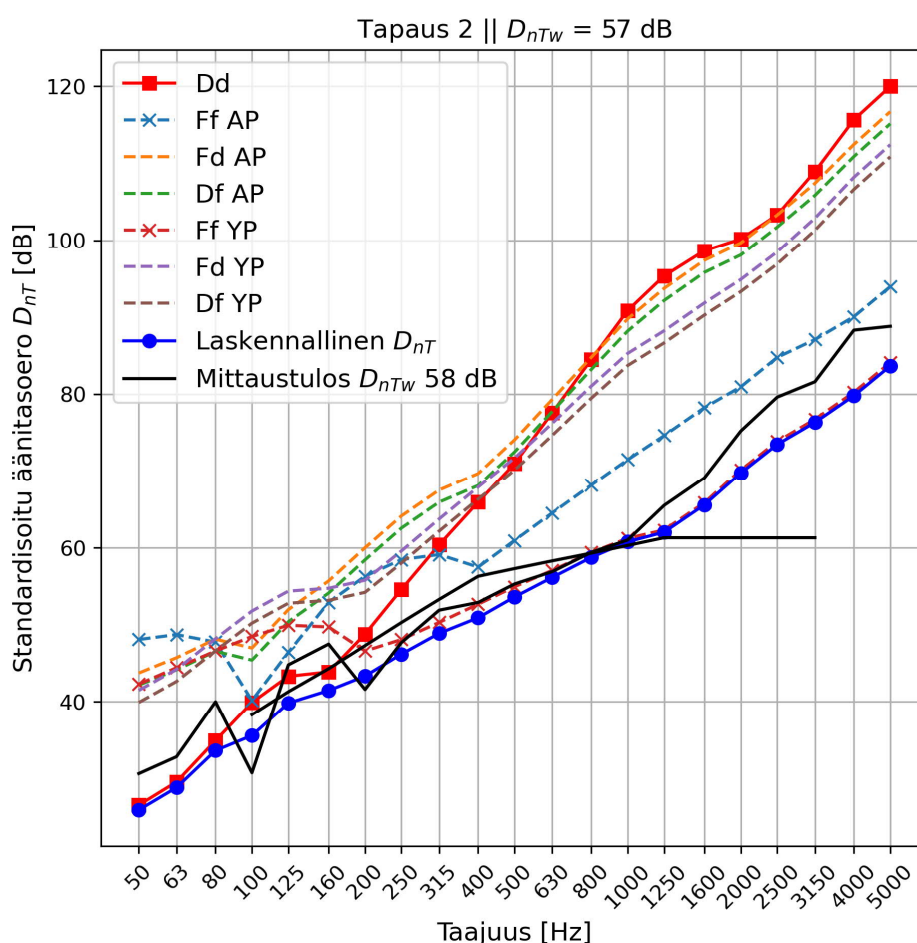
Kuva 1. Laskennalliset ilmaääneneristävyydet laskentatapauksessa 1.

Kuvaajasta on havaittavissa, että pienillä taajuuksilla mittaustuloksen ja erottavan rakenteen ääneneristävyydet eivät poikkea suuresti, mutta noin 400 Hz jälkeen erottavan rakenteen ääneneristävyys on merkittävästi suurempi kuin mittaustulos. Samassa kohtaa on

havaittavissa, että seinärakenteiden kautta tapahtuva sivutiesiirtymä alkaa rajoittaa saavutettavaa ääneneristävyyttä. Tuolla alueella sivuavien seinien välityksellä tapahtuva sivutiesiirtymä määrittää saavutettavan ääneneristävyyden käytännössä kokonaan. Yksiluku-arvona ilmoitettuna laskettu standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on 61 dB.

3.3 Laskelma - Tapaus 2

Toisen tapauksen standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ mittaustulos on 58 dB. Laskennallinen tulos on esitetty kuvassa 2. Kuten ensimmäisessä tapauksessa, myös toisessa tapauksessa erottava rakenne määrittää kokonaisääneneristävyyden pienillä taajuuksilla ja sivuavat rakenteet suuremmilla taajuuksilla. Verrattaessa mittaustulosta laskettuihin arvoihin on mielenkiintoista huomata, että mittaustuloksessa on kuopat samassa kohtaa kuin sivuavan lattiarakenteen pintalaatalla on dilataatioresonanssi ja yläpuolisen välipohjan ohuella CLT-levyllä ensimmäinen koinsidenssitaajuus. Toisen laskelman standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on 57 dB.



Kuva 2. Laskennalliset ilmäääneneristävyydet laskentatapauksessa 2.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Artikkelin laskelmien mukaan tilojen välisen ääneneristävyyden laskennallinen tulos paranee merkittävästi, kun laskelmaan lisätään erottavan rakenteen lisäksi sivutiesiirtymät. Tehdyt esimerkkilaskennat osoittavat, että standardin SFS-EN ISO 12354:2017 mukaisella laskentamallilla tilojen välistä ääneneristävyyttä on mahdollista arvioida kohtalaisen tarkasti, kun käytettävissä on tarvittava lähtötieto.

Vaikka saadut laskennalliset tulokset ovat mittaustuloksiin verrattuna kohtalaisen hyviä, tilojen välisen ääneneristävyyden arvioinnissa on puurakenteiden tapauksessa vielä merkittäviä epävarmuuksia. Laskennallisen tarkastelun suurimmat epävarmuudet liittyvät laskennan lähtötiedoksi tarvittaviin ilmaääneneristävyyksiin ja liitoseristävyyksiin. Puurakenteiden liitoksia on mahdollista toteuttaa useilla eri tavoin, eikä kaikista erilaisista liitoksista ole saatavilla lähtötietoa. Tämä rajoittaa laskentamenetelmän laajaa soveltamista.

Massiivipuorakenteisen CLT:n ilmaääneneristävyyden laskennallisessa määrittämisessä on myös vielä tutkittavaa. Pelkästään laskentaan perustuvaa menettelyä, jolla saadaan tarkkoja tuloksia, ei ole vielä kehitetty. CLT:n osalta myös sen vaimennusominaisuuksissa riittää tutkittavaa, sillä se on käytettävän arviointimenetelmän kannalta olennainen ominaisuus ja kirjallisuudessa esitetyssä tiedossa on suurta hajontaa.

Tarvittavien lähtötietojen määrittäminen laboratoriossa on kallista, aikaa vievää sekä yleisesti vaikeaa. Puurakenteiden tapauksessa analyyttisten laskentamallien kehittäminen näiden lähtötietojen selvittämiseksi on todella haastavaa, joten tulevaisuudessa merkittävimmäksi tutkimusaiheeksi nousee näiden lähtötietojen selvittäminen numeerisen mallintamisen avulla.

VIITTEET

- [1] 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.
- [2] Pura M. Äänen rakenteelliset sivutiesiirtymät puurakennuksissa. Diplomityö, Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma, 2021.
- [3] Hopkins, C., Crispin, C., Poblet-Puig, J., Guigou-Carter, C., 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, 2016.
- [4] Rabold, A., Chateauvieux-Hellwig, C., Mecking, S., Schramm, M., 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, 2019.
- [5] Rothoblaas, Flanksound project, supplement.
- [6] Morandi, F., De Cesaris, S., Garai, M., Barbaresi, L., Measurement of flanking transmission for the characterisation and classification of cross laminated timber junctions, *Applied Acoustics*, 141, S. 213-222, 2018.
- [7] Kylliäinen, M., Latvanne, P., Kuusinen, A., Kekki, T., Puukerrostalojen ääneneristys: Asiantuntijaselvitys, Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu, 77 s. ISBN 978-952-275-242-0, 2017.
- [8] Rabold, A., Schramm, M., Chateauvieux-Hellwig, C., SEA based prediction for integrated vibro-acoustical design optimization of multi-storey buildings, *Euronoise 2015*, Maastricht, 2015.
- [9] Hansen, C., Sound Transmission Loss of Corrugated Panels, *Noise Control Engineering Journal*, 40(2), S. 187-197, 1992.