

# PARAMETRINEN LASKENTAMALLI PUUVÄLIPOHJIEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ARVIOINTIIN

Pekka Latvanne<sup>1</sup>, Mikko Kylliäinen<sup>2</sup>, Ville Kovalainen<sup>1</sup>, Jesse Lietzén<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A-Insinöörit  
Bertel Jungin aukio 9  
00260 Espoo  
[etunimi.sukunimi@ains.fi](mailto:etunimi.sukunimi@ains.fi)

<sup>2</sup>A-Insinöörit  
Puutarhakatu 10  
33210 Tampere  
[etunimi.sukunimi@ains.fi](mailto:etunimi.sukunimi@ains.fi)

## Tiivistelmä

Puuvälipohjien askelääneneristävyuden laskentaan ei ole ollut saatavissa validoituja ja suunnittelutyöhön soveltuvia laskentamenetelmiä tai ohjelmistoja. Siksi puuvälipohjien tuotekehitys on pitkälti perustunut rakenteiden toimivuuden varmistamiseen laboratoriomittauksin, mikä on usein aikaa vievää ja kallista. A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä on kehitetty suunnittelutyöhön ja tuotekehitykseen soveltuva laskentamenetelmä. Menetelmä koostuu analyttisestä laskennasta sekä laajaan kirjallisuustutkimukseen pohjautuvasta parametrisestä mallista. Validoinnin perusteella voidaan todeta, että kehitetyllä laskentamenetelmällä saadaan tuloksia, jotka vastaavat tarkasti mittaustuloksia.

## 1 JOHDANTO

Puukerrostalojen välipohjarakenteelle kohdistuu useita vaatimuksia, kuten kantavuus, palonkesto, taipuma, värähtely ja ääneneristävyys. Välipohjan toteutuskustannukset ovat huomattava osa koko puukerrostalon toteutuskustannuksista ja merkittävässä asemassa, kun arvioidaan puurakentamisen kilpailukykyä betonirakentamiseen nähden. Puuvälipohjien askelääneneristävyuden laskentaan ei ole ollut saatavissa validoituja ja suunnittelutyöhön soveltuvia laskentamenetelmiä tai -ohjelmistoja. [1] A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä on luotu suunnittelutyöhön ja tuotekehitykseen soveltuva askelääneneristävyuden laskentamenetelmä. Menetelmä perustuu laajaan kirjallisuustutkimukseen puuvälipohjien parametrisistä askelääneneristävyysmittauksista [1] sekä A-Insinöörien tutkimus- ja kehitystyöhön. Tämän artikkelin tarkoituksena on esittää kehitetyn laskentamenetelmän validointitulokset.

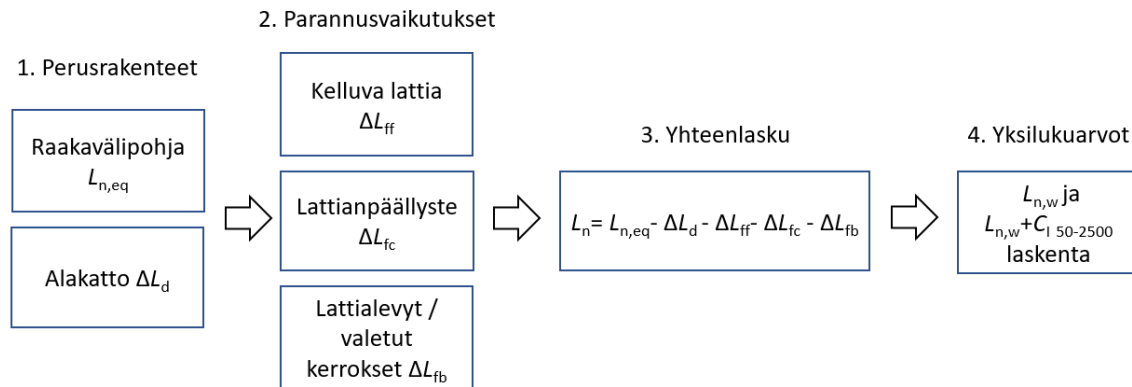


© 2019 Pekka Latvanne, Mikko Kylliäinen, Ville Kovalainen ja Jesse Lietzén. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

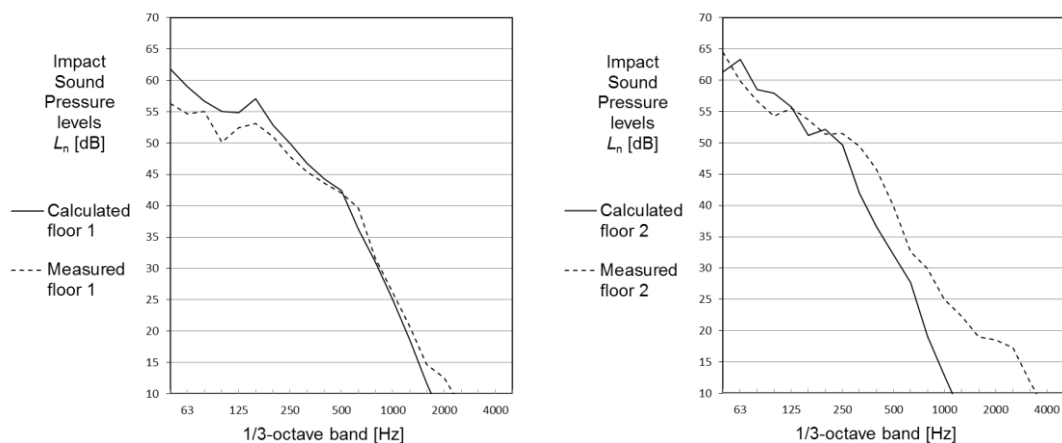
## 2 MENETELMÄ

### 2.1 Parametrinen laskentamalli

Laskennan vaiheet on esitetty kuvan 1 vuokaaviossa. Vaiheissa 1-3 tulokset lasketaan 1/3-oktaavikaistoittain 50-5000 Hz taajuusalueella. Raakavälipohjan askeläänitaso  $L_n$ , ja alakaton vaikutuksen  $\Delta L_d$  laskentaperusteet on esitetty kappaleissa 2.2 ja 2.3. Toisessa vaiheessa arvioidaan mahdollisen kelluvan laatan  $\Delta L_{ff}$ , levykerrosten  $\Delta L_{fb}$  ja lattianpäällysteen  $\Delta L_{fc}$  parannusvaikutus askeläänitasoihin. Parannusvaikutukset voidaan arvioida joko laskennallisesti tai mittausdatan avulla. Kansilevyn päälle asennettujen levykerrosten parannusvaikutukset yhdistetään raakavälipohjan laskennalliseen askeläänitasolukuun Scholl esityksen mukaisesti [3,4]. 1/3-oktaavikaistoittain lasketuista askeläänitasoista  $L_n$  voidaan määrittää yksilukuarvot  $L_{n,w}$  ja  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$  [2]. Kuvassa 2 on esitetty kahden välipohjan mitatut ja laskennalliset askeläänitasot 1/3-oktaavikaistoittain.



Kuva 1. Vuokaavio parametrinen askelääneneristävyyden laskentamallin laskennan vaiheista.



Kuva 2. Mitattujen ja laskennallisten askeläänitasojen  $L_n$  vertailu. Mittaustulokset on esitetty yhtenäisellä viivalla ja A-Insinöörien laskentamallilla määritetyt tulokset katkoviivalla.

## 2.2 Raakavälipohja

Raakavälipohjalla tarkoitetaan tässä tapauksessa välipohjan kantavaa palkistoa ja välipohjan kansilevyä tai CLT-levyä. Kansilevyn tai CLT:n päällä olevat levykerrokset lasketaan kappaleessa 2.4 esitetyin periaattein. Askeläänikojeen vasaran tuottaman voimaherätteen mallintaminen perustuu Lindbladin ja Brunskogin esityksiin [6–7], joissa esitetään ratkaisu herätteen voimayhtälölle taajuustasossa. Mallissa heräte mallinnetaan ensin aikatasossa käyttäen yksinkertaista yhden massan värähtelijää, josta ratkaisu käännetään taajuustasoon. Voimamallissa käytetään vain pintalevyjen jäykkyyden ja impedanssin reaaliarvoja, jolloin pintalevyn pistevoiman mobiliteetti kuvaa äärettömän levyn mobiliteettia. Välipohjapalkkeja ei oteta huomioon laskettaessa rakenteen taivutusjäykkyyttä voimaherätteelle, sillä määrävän iskun oletetaan kohdistuvan jännevälin keskialueelle.

Raakavälipohjarakenteen äänitehon, äänensäteilykyvyn ja pinnanopeuden laskenta on esitetty lähteissä [8–10]. Puuvälipohjien tapauksessa laskennassa tulee ottaa huomioon rakenteen ortotrooppisuus sekä askeläänikojeen vasaran mobiliteetin vaikutus rakenteeseen siirtyvään tehoon [1, 6, 7]. Raakavälipohjarakenteen äänensäteilykykyä laskettaessa on oletettu, että äänensäteily tapahtuu vain palkkien välisestä levyrakenteesta. Levyvälipohjilla, kuten CLT-levyt, koko rakenne osallistuu äänensäteilyyn. Raakavälipohjan tuottamat askeläänitasot  $L_{n,eq}$  lasketaan lähteiden [8–10] perusteella.

## 2.3 Alakatto

Alakaton ja raakavälipohjan liitoksen ollessa joustava, alakaton parannusvaikutus askelääneneristävyyteen  $\Delta L_d$  on yhtä suuri kuin alakaton parannusvaikutus ilmaääneneristävyyteen  $\Delta R$  [1, 10]. Joustava liitos vaimentaa runkoääntä merkittävästi, joten alakattoon kohdistuva ääniheräte on pääosin ilmaääntä [1]. Näin ollen alakaton parannusvaikutus lasketaan vertaamalla laskennallisesti määritettyjä raakavälipohjan ja alakattollisen välipohjan 1/3-oktaavikaistaisia ilmaääneneristävyyksiä  $R$  [11–21]. Jos alakatto on jäykästi kytketty välipohjaan, alakaton parannusvaikutus heikkenee joustavaan kytkentään nähden ja  $\Delta L_d$ - $\Delta R$ -vastaavuus heikkenee [1, 10].

## 2.4 Kelluva laatta ja lattialevyt

Edellä esitetyillä raakavälipohjilla ei yleensä saavuteta riittävää askelääneneristävyyttä vaan askelääneneristävyyttä parannetaan suoraan kansilevyn päälle asennettavilla levy- tai valukerroksilla tai kelluvalla lattialla. Parannusvaikutukset  $\Delta L_{ff}$  ja  $\Delta L_{fb}$  lasketaan [1, 10, 23] perusteella. Nykyisessä laskentamallissa kelluvan laatan parannusvaikutus arvioidaan ISO 12354-2 [10] mukaisesti perustuen alun perin Cremer et al. [24] esittämään teoriaan.

## 2.5 Validointi

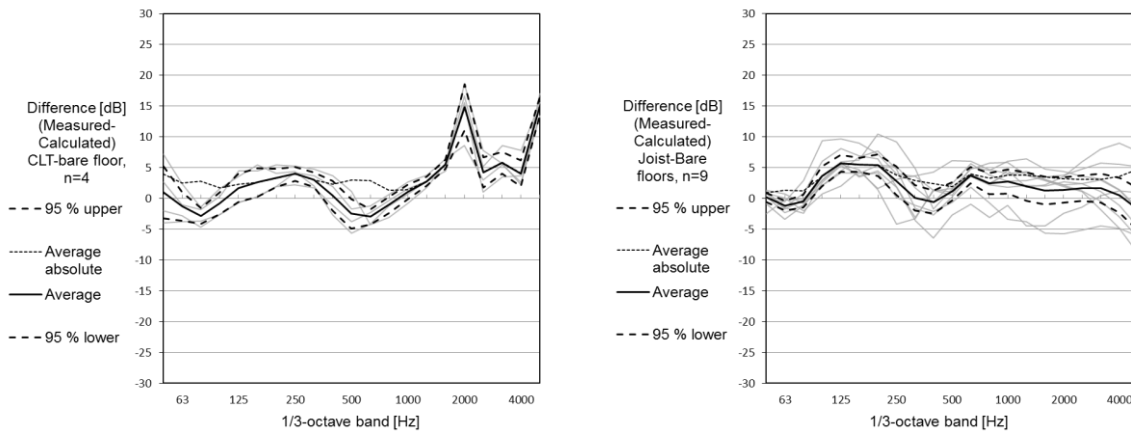
Validointi tehtiin kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin askeläänitasot raakavälipohjille (palkkirakenteet = 9 kpl, CLT-rakenteet = 4 kpl,  $n_{tot} = 13$  kpl). Laskentatuloksia verrattiin vastaaviin laboratorio- ja kenttämittausten mittaustuloksiin [5, 26–33]. Toisessa vaiheessa laskenta- ja mittaustulosten vertailu tehtiin kokonaisille puuvälipohjarakenteille ( $n = 28$  kpl). Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin mitatun ja laskennallisen askeläänitason  $L_n$  erotukset 1/3-oktaavikaistoittain 50–5000 Hz taajuusalueella. Erotuksille laskettiin keskiarvo, itseisarvojen keskiarvo, keskihajonta sekä 95 % luottamusväli. Toi-

sessä vaiheessa määritettiin mitattujen ja laskennallisesti määritettyjen askeläänitasolokujen  $L_{n,w}$  ja  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$  tilastolliset tunnusluvut.

### 3 TULOKSET

#### 3.1 Raakavälipohjat

Validoinnissa oli mukana 9 kpl puupalkki-laattarakenteita ja 4 kpl CLT-laattoja. Validoinnin tulokset on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Raakavälipohjien validointitulokset. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa CLT-laatat ja oikealla palkki-levy rakenteet.

#### 3.2 Kokonaiset välipohjarakenteet

Tässä validoinnissa kokonaisiksi välipohjarakenteiksi katsottiin rakenteet, joissa on raakavälipohja ja vähintään ääntä eristävä alakatto. Suurimmassa osassa rakenteista oli myös pintarakenne, kuten lattialevyjä tai kelluva laatta. Validoiduissa rakenteissa ei ollut lattianpäällystettä. Taulukossa 1 on esitetty mitattujen ja mallinnettujen yksiluarvojen  $L_{n,w}$  ja  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$  erotusten keskiarvo, -hajonta sekä erotusten itseisarvojen keskiarvo.

Taulukko 1. Mittaus- ja laskentatulosten erotukset

	$L_{n,w}$ [2]	$L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ [2]
Erotusten aritm. keskiarvot [dB]	2 dB	-0,4 dB
Erotusten keskihajonta [dB]	7 dB	6 dB
Erotusten itseisarvojen aritm. keskiarvo [dB]	5 dB	4 dB

### 4 TULOSTEN TARKASTELU

Raakavälipohjien laskentatulokset vastasivat mittaustuloksia hyvin koko tarkastellulla taajuusalueella. Validoinnissa havaittiin, että CLT-rakenteiden laskentatulokset olivat erittäin riippuvaisia laskennassa käytetyistä materiaaliparametrien lähtöarvoista. Materiaaliparametrien ja laskentamallien epävarmuustekijät, kuten ortotrooppisten materiaalien värähtelykäyttäytyminen, on tunnistettu jo aiemmassa tutkimuksessa [1].

Kokonaisten välipohjarakenteiden validoinnissa havaittiin, että laskentamallin tulokset vastaavat mittaustuloksia parhaiten 50-1000 Hz taajuusalueella. Laskentamallin epävarmuus kasvaa rakenteen monimutkaistuessa. Materiaalien rajapinnoissa ja sisällä tapahtuvat energiahäviöt ovat kuitenkin edelleen merkittävä epävarmuustekijä.

Validoinnin perusteella nykyinen laskentamenetelmä [10] yliarvioi kelluvan laatan parannusvaikutuksen puuvälipohjilla. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty, että puuvälipohjien tapauksessa kantavan rakenteen ominaisuudet on otettava huomioon kelluvan laatan parannusvaikutuksen arvioinnissa [8, 23, 34]. Lattiapäällysteiden parannusvaikutus on vahvasti riippuvainen tarkastelutaajuudesta ja siitä, millaisen alusmateriaalin päälle lattianpäällyste asennetaan [35]. Lattiapäällysteiden toimivuutta on aiemmin selvitetty lähteissä [1, 30, 31, 36]. Laskentamallin jatkokehitykseen tarvitaan kattavampaa tietoa lattiapäällysteiden ominaisuuksista puuvälipohjilla. A-Insinööreillä kehitetyn laskentamenetelmän jatkokehityksen painopisteet tulevat olemaan voima- ja tehomallinnuksen kehittämisessä, kelluvan laatan ja lattianpäällysteiden parannusvaikutusten laskennassa.

## 5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä kehitetyn puuvälipohjan askelääneneristävyyden laskentamenetelmän perusteet ja menetelmän tarkkuuden arvioimiseksi tehdyn validoinnin tulokset. Kehitetyllä laskentamenetelmällä voidaan arvioida puuvälipohjan askeläänitasot  $L_n$  1/3-oktaavikaistoittain sekä yksilukuarvot  $L_{n,w}$  ja  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ . Validoinnissa laskentamallin tarkkuutta arviotiin määrittämällä mittaus- ja laskentatulosten välinen erotus sekä tilastolliset tunnusluvut erotuksille. Vertailussa oli mukana 28 erilaista välipohjarakennetta. Validointitulosten mukaan laskennalliset askeläänitasot  $L_n$  vastaavat hyvin mittaustuloksia 50-1000 Hz taajuusalueella. Mitatun ja laskennallisen askeläänitasoluvun  $L_{n,w}$  erotusten keskiarvo oli 5 dB ja spektripainotetun askeläänitasoluvun  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$  erotusten keskiarvo 4 dB. A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikkö jatkaa kehitystyötä laskentamallin parantamiseksi. Validoinnissa kehityskohteiksi tunnistettiin raakavälipohjan, lattianpäällysteiden ja kelluvan laatan laskentatarkkuuden parantaminen.

## VIITTEET

- [1] Latvanne, P., The Acoustical properties and calculation models of the wooden intermediate floor constructions, Master's Thesis, Tampere University of Technology, Master's Degree Program in Civil Engineering, 2015
- [2] EN ISO 717-2:2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Brussels, European Committee for Standardization, 2013.
- [3] Scholl, W., Lang, V., V. Wittstock, Rating of sound insulation at present and in future. The revision of ISO 717. *Acustica united with Acta Acustica*, 97, 686–698., 2011.
- [4] Scholl, W., Revision of ISO 717, Why not use impact sound reduction indices instead of impact sound pressure levels?, *Acustica united with Acta Acustica* 97, 503–508., 2011.
- [5] AINS Group Ltd. database.

- [6] Lindblad, S., Impact sound characteristics of resilient floor coverings, a study on linear and nonlinear dissipative compliance, Dissertation, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1968.
- [7] Brunskog, J. and Hammer, P., The Interaction Between the ISO Tapping Machine and Lightweight Floors, *Acta Acustica united with Acustica*, 89, 2003, 296-308.
- [8] Hopkins, C., Sound Insulation, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007.
- [9] Rindel, J.H., Sound Insulation in Buildings, CRC Press, 2017.
- [10] EN ISO 12354-2, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms, International Organization for Standardization, 2017.
- [11] Kovalainen, V. & Kylliäinen, M., Rakenteiden ilmastäneristävyyden mallinnusohjelma RAIMO – käyttöohje. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 2013.
- [12] Gomperts, M. C. , The “sound insulation” of circular and slit-shaped apertures. *Acustica*. Vol. 14, s. 1–16. 1964.
- [13] Gomperts, M. C. & Kihlman, T., The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. *Acustica*, Vol. 18, s. 144-150. 1967.
- [14] Sewell, E. C. Transmission of reverberant sound through a single leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 12, s. 21-32. 1970.
- [15] Sharp, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 11, s. 53–63. 1978.
- [16] Kristensen, J. & Rindel, J. H., Bygningsakustik – teori og praksis. Glostrup, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166. 1989.
- [17] 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. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2017.
- [18] Hongisto, V., Monikerroksisen seinärakenteen ilmastäneristävyyden ennustemalli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2. 2003.
- [19] Rauhala, J., Kylliäinen, M., Eristerapatun betoniseinän ilmastäneristävyys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 142. 119 s + 83 s. 2009.
- [20] Virjonen, P., Hongisto, V. Joustavarankaisen levyrakenneseinän äänenläpäisy. Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.-15.5. Akustinen Seura ry. 2009.
- [21] Kylliäinen, M. & Mikkilä, A. Rakennusosien ilmastäneristävyyksien mallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä. *Rakennusfysiikka 2009*. Tampere, 27.-29.10., Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitos ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 269-278., 2009.
- [22] EN ISO 717-1. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2013.
- [23] Vigran, T.E, Building Acoustics. Taylor& Francis, 2008.
- [24] Cremer, L., Heckl, M. and Petersson, B.A.T., Structure-Borne Sound, Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [25] Zeitler, B., Nightingale, T. and Schoenwald, S., Cremer’s parallel plates applied to lightweight construction, *Proc. of Inter-Noise*, Ottawa, Canada, 2009.
- [26] Sabourin, I., McCartney, C. Measurement of Airborne Sound Insulation of 8 Wall Assemblies, Measurement of Airborne and Impact Sound Insulation of 29 Floor Assemblies, Nordic Engineered Wood report No. A1-006070.10, National Research Council Canada, 2015.

- [27] Warnock, A. C. C., Birta, J. A., Detailed report for consortium on fire resistance and sound insulation of floors: Sound transmission and impact sound insulation data in 1/3 octave bands. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Internal Report IR-811, 2000.
- [28] Warnock, A. C. C., Summary Report for Consortium on Fire Resistance and Sound Insulation of Floors: Sound Transmission and Impact Insulation Data. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report RR-169, 2005.
- [29] Chung, H., Dodd, G., Emms, G., McGunnigle, K., Schmid, G., Maximizing impact sound resistance of timber framed floor/ceiling systems, Volume 3. Australia, Forest and wood products research and development corporation, Project No. PN04.2005, 2006.
- [30] Balanant, N., Guigou, C., Villenave, M., Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois, à vocation logements. Etape 2, Rapport final, Acoubois France, French Institute of Technology for Forest based and Furniture sector (FCBA), 2012.
- [31] Späh, M., Liebl, A., Leistner, P. Measurements in the Laboratory and in Single Family Houses, AcuWood report No. 1. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, Report 2014:14, 2013.
- [32] Zeitler, B., Nightingale, T.R.T., King, F., Methods to control low frequency impact noise in wood frame construction. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-50445, 2008.
- [33] Zeitler, B., Schoenwald, S., Nightingale, T.R.T., Parametric study of sound transmission through lightweight floors. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-53564, 2010.
- [34] Zeiler B., Schneider M., On the relevance of impact source impedance at low frequencies- part 2: Floor with floating toppings, 24th International Congress on sound and vibration 23.-27. July 2017
- [36] Lietzen, J., Miettinen, J., Kylliäinen, M., Measurements of Impact Force Excitation on Wooden Floors, Euronoise 2018, 27-31. May 2018, Heraklion, Greece
- [35] Warnock, A.C.C, Impact Sound Measurements on Floors Covered with Small Patches of Resilient Materials or Floating Assemblies, IRC-IR-802, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Canada, 2015.