

# UUSI MITTALUKU ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ARVIOIMISEKSI

Mikko Kylliäinen<sup>1</sup>, Petra Virjonen<sup>1</sup>, Valtteri Hongisto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tampereen yliopisto  
Rakennettu ympäristö  
[mikko.kylliainen@tuni.fi](mailto:mikko.kylliainen@tuni.fi)

<sup>2</sup> Turun ammattikorkeakoulu  
[etunimi.sukunimi@tuamk.fi](mailto:etunimi.sukunimi@tuamk.fi)

## Tiivistelmä

Jo kauan on tiedetty, että standardin ISO 717-2 mukaiset mittaluvut eivät vastaa erityisen hyvin subjektiivista kokemusta askelääneneristäväydestä asuinrakennuksissa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää mittalukuja, jotka vastaavat hyvin erilaisista asumisen synnyttämistä askeläänistä aiheutuvaa häiritsevyyden kokemusta. Mittalukujen kehittämiseen hyödynnettiin aineistoa sekä välipohjien askelääneneristysmittauksista että psykoakustisesta kokeesta. Viisi tutkittua äänityyppiä olivat kävely kovin kengin, pehmein kengin ja sukin sekä superpallo ja tuolin siirto. Lähtökohtana mittalukujen kehittämisessä oli ensinnäkin askeläänikojeen käyttäminen äänilähteenä sekä toiseksi se, että uusi mittaluku voidaan ilmaista askeläänitasoluvun  $L'_{n,w}$  tai  $L'_{nT,w}$  ja spektripainotustermien summana. Spektripainotustermien laskemiseksi tarvittavat referenssispektrit johdettiin matemaattisen optimoinnin keinoin. Jokaiselle viidelle äänelle johdettiin erikseen referenssispektri, ja lisäksi johdettiin optimoitu spektri, joka perustuu kaikkiin viiteen ääneen. Mittaluku ilmaistuna askeläänitasoluvun ja kaikkiin tutkittuihin ääniin perustuvan optimoidun spektrin perusteella lasketun spektripainotustermien summana vastasi erittäin hyvin subjektiivisesti koettua häiritsevyyttä erilaisista askeläänistä. Lisäksi mittaluku tuotti paremman selitysasteen suhteessa subjektiivisesti koettuun häiritsevyyteen ( $r^2 = 0,93$ ) kuin yksikään standardin ISO 717-2 mukaisista mittaluvuista.

## 1 JOHDANTO

Jo pitkään on tiedetty, että standardin ISO 717-2 [1] mukaiset mittaluvut eivät vastaa erityisen hyvin asukkaiden subjektiivista kokemusta askelääneneristäväydestä asuinrakennuksissa [2]. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on ollut kaksi lähestymistapaa. Ensinnäkin on pyritty muokkaamaan äänilähteenä mittauksissa käytettävää askeläänikojetta tai korvaamaan se uudella äänilähteellä. Hiljattain on kuitenkin saatu viitteitä siitä, että vaihtoehtoiset askeläänilähteet eivät välttämättä johda parempaan vastaavuuteen mittalukujen ja asukkaiden subjektiivisen kokemuksen välillä [3]. Toinen lähestymistapa ongelman selvittämiseksi on ollut askeläänikojeen säilyttäminen äänilähteenä, mutta vuosikymmeniä käytetyn askeläänitasoluvun  $L'_{n,w}$  tai  $L'_{nT,w}$  korvaaminen uudella, paremmin asukkai-



© 2019 Mikko Kylliäinen, Petra Virjonen ja Valtteri Hongisto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –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.

den kokemusta askelääneneristyksestä vastaavalla mittaluvulla. Useita vaihtoehtoisia mittalukuja onkin kehitelty 1960-luvulta lähtien [4–8].

Hiljattain Suomessa on tehty psykoakustinen koe, joka koski betonivälipohjien askelääneneristystä. Kokeen tulokset vahvistivat, että standardin [1] mukaiset mittaluvut  $L'_{n,w}$ ,  $L'_{n,w} + C_1$  ja  $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$  eivät ole erityisen hyvin yhteydessä subjektiivisesti koettuun erilaisten askeläänten äänekkyteen tai häiritsevyyteen [9]. Tämä koski myös neljää vaihtoehtoista mittalukua [5–8].

Tässä selostettavan tutkimuksen tavoitteena oli kehittää uusia askelääneneristävyden mittalukuja, jotka vastaisivat hyvin asukkaiden kokemaa häiritsevyyttä askeläänistä yläkerrassa. Vaihtoehtoiset mittaluvut kehitettiin viidelle äänityypille: kävelylle sukin sekä kova- ja pehmeäpohjaisiin kengin, superpallon pompottelulle sekä tuolin siirrolle. Äänityyppejä on tarkemmin kuvattu lähteessä [9]. Lisäksi tavoitteena oli kehittää yksi mittaluku, joka yksinään vastaisi mahdollisimman hyvin kaikkien viiden äänityypin tuottamaa häiritsevyyttä. Tämä esitys perustuu laajempaan tutkimukseen, joka on kuvattu tarkemmin lähteissä [10] ja [11].

## 2 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 Lähtökohdat

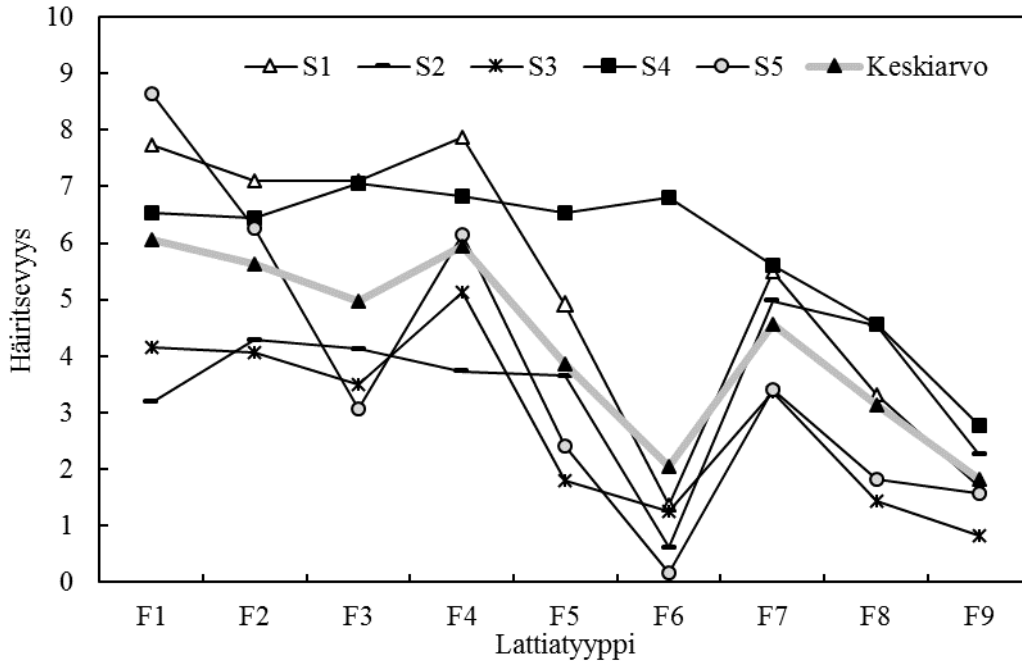
Tällä hetkellä näyttää ilmeiseltä, että askeläänikoje säilyy mittauksissa äänilähteenä [12]. Siksi tutkimuksen lähtökohdana oli, että parempi menetelmä askelääneneristykseen arvioimiseen tulisi löytää johtamalla uusi mittaluku tai vertailukäyrä sen sijaan, että askeläänikoje yritettäisiin korvata uudella äänilähteellä. Lisäksi lähtökohdana oli, että uusi mittaluku voitaisiin ilmaista vanhan askeläänitasoluvun  $L'_{n,w}$  tai  $L'_{nT,w}$  ja uuden spektripainotusterman summana. Uudet mittaluvut kehitettiin taajuusalueelle 50–2500 Hz.

### 2.2 Kokeellinen aineisto

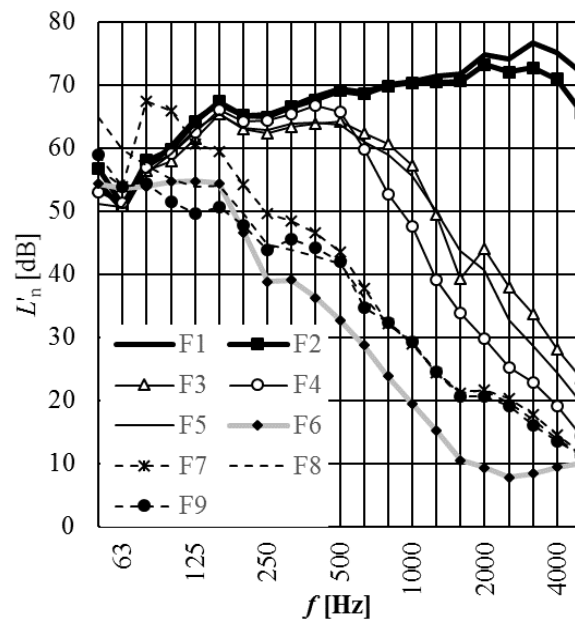
Kokeellinen aineisto tässä tutkimuksessa tuotettiin psykoakustisella laboratoriokokeella, joka käsitteli erilaisten askelääneneristykseen liittyvien äänityyppien subjektiivisesti koettua äänekkyyttä ja häiritsevyyttä. Psykoakustinen koe on selostettu perusteellisesti lähteessä [9]. Kokeessa käytettyjen äänten tuottaminen, tallentaminen ja mittaaminen on raportoitu lähteessä [13].

Kokeessa kuuntelijoille toistettiin 45 erilaista askelääntä. Ne oli saatu aikaan tallentamalla viiden äänilähteen tuottamia ääniä yhdeksällä lattiarakenteella askeläänilaboratoriossa. Lattian kantavana rakenteena oli päällystämätön 265 mm paksu ontelolaatasto (F1), jonka päällä oli kahdeksan lattianpäällystettä. Askeläänitasot  $L'_n$  [dB] mitattiin standardin ISO 140-7 [14] mukaisesti. Lattianpäällysteet ja askelääneneristysmittaukset on selostettu tarkemmin lähteessä [13]. Lattianpäällysteinä olivat: kova muovimatto (F2), joustava muovimatto (F3), parketti alusmateriaaleineen (F4), kova tekstiilimatto (F5), pehmeä tekstiilimatto (F6), kahdesta lattiakipsilevystä ja 13 mm paksusta mineraalivillakerroksesta muodostuva kelluva lattia (F7), kahdesta lattiakipsilevystä ja 50 mm paksusta mineraalivillakerroksesta muodostuva kelluva lattia (F8) ja neljästä lattiakipsilevystä ja 50 mm mineraalivillakerroksesta muodostuva kelluva lattia (F9). Askeläänilaboratoriossa tallennettiin viiden äänilähteen kullakin yhdeksällä lattialla tuottamat äänet. Äänityypit olivat kävely kovapohjaisiin kengin (S1), kävely sukin (S2), kävely pehmeäpohjaisiin kengin (S3), superpallon pompottelu (S4) ja tuolin siirto (S5).

Psykoakustiseen kokeeseen osallistui 55 vapaaehtoista, joista 30 oli naisia ja 25 miehiä. Osallistujien ikä vaihteli 20 ja 57 vuoden välillä. Äänet toistettiin alakaton yläpuolelle asennetuista kaiuttimista siten, että ääni kuulosti tulevan yläkerran naapurista. Kuuntelijat arvioivat kunkin äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10. Arvo 0 tarkoitti, että ääntä ei ollut mahdollista kuulla ja arvo 10, että ääni oli erittäin häiritsevää. Kokeen osallistujien kokeen häiritsevyyden keskiarvot on esitetty kuvassa 1. Lattioiden mitatut normalisoidut askeläänit  $L'_n$  on esitetty kuvassa 2.



KUVA 1. Psykoakustisen kokeen osallistujien eri äänien S1–S5 häiritsevyydsarvioiden keskiarvot lattioilta F1–F9. Lisäksi on esitetty keskiarvo kaikista äänityypeistä.



KUVA 2. Lattioiden F1–F9 mitatut askeläänit  $L'_n$ .

### 2.3 Mittalukujen matemaattinen optimointi

Mittalukujen johtamiseen käytettiin matemaattista optimointia aiemmassa tutkimuskirjallisuudessa [7–8] sovelletun arvaamisenmenettelyn sijasta. Uusien spektripainotustermien laskennassa tarvittavat vertailuspektrit johdettiin kullekin äänityypille erikseen. Lisäksi kehitettiin optimoitu vertailuspektri kaikille viidelle äänityypille yhdessä. Virjonen et al. [15] ovat aiemmin kehittäneet optimoidun vertailuspektrin ilmaääneneristävyydelle. Kehitetty optimointimenetelmä on tehokas ja nopea tapa matemaattisesti perusteltavissa olevan mittaluvun johtamiseen.

Uusiin vertailuspektreihin ja mittalukuihin johtava optimointi on kuvattu perusteellisesti lähteessä [10]. Subjektiiivinen muuttuja kullekin lattia- ja äänityypille määriteltiin 55 koehenkilön antamien häiritsevyyssarvioiden keskiarvona. Subjektiiivisen muuttujan oletettiin riippuvan lineaarisesti mittaluvusta. Tavoitteena oli löytää optimoitu vertailuspektri kullekin äänityypeistä S1–S5. Optimoidusta vertailuspektristä äänityypille S1 käytetään merkintää  $L_{S1}$ . Kullekin äänityypille johdettiin oma vertailuspektrinsä siten, että subjektiivisesti koetulla häiritsevyydellä oli paras mahdollinen pienimmän neliösumman sovitus tuloksena saatujen mittalukujen kanssa. Optimoidut vertailuspektrit määriteltiin muotoilemalla tehtävä rajoitettuna epälineaarisenä optimointiproblemana ja ratkaisemalla se numeerisesti. Optimoitu mittaluku voidaan ilmaista askeläänitasoluvun  $L'_{n,w}$  ja spektripainotustermien summana. Esimerkiksi äänityypille S1 spektripainotustermi  $C_{I,S1}$  on

$$C_{I,S1} = 10 \lg \sum_{j=1}^K 10^{0,1(L_{S1,j} - 78,2 - 10 \lg f_j + L_{n,j})} - 18,9 - L'_{n,w} \quad (1)$$

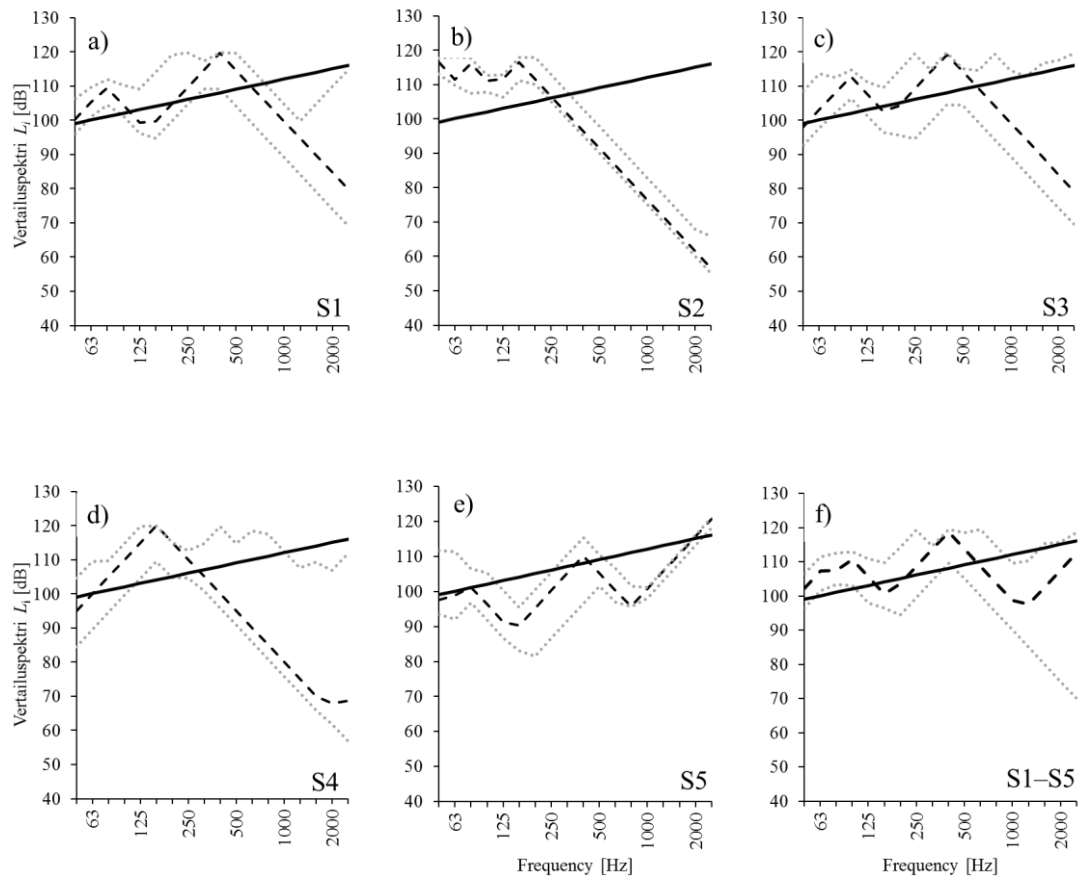
Kullekin äänityypille johdetun optimoidun vertailuspektrin lisäksi johdettiin vertailuspektri kaikille viidelle äänityypille yhdessä. Tämä on tarkoituksenmukaista, sillä rakentamismääräyksissä vaatimustaso ilmoitetaan yhdellä mittaluvulla, jonka tulee edustaa tavanomaisia asumisen äänityyppejä. Äänityyppien S1–S5 oletetaan edustavan äänityyppejä hyvin. Optimoidusta vertailuspektristä käytetään merkintää  $L_{opt}$  ja sen avulla ilmoitettava mittaluku on  $L'_{n,w} + L_{opt}$ . Tämä vertailuspektri perustuu siis 45 erilaiseen ääneen.

## 3 TULOKSET

Optimoidut vertailuspektrit on esitetty kuvassa 3. Selitysasteet standardin [1] mukaisten ja optimoitujen mittalukujen sekä häiritsevyyden kesken on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Selitysasteet  $r^2$  optimoitujen ja standardinmukaisten mittalukujen ja häiritsevyyden kesken kullakin äänityypillä S1–S5. Parhaat arvot on alleviivattu.

<b>Mittaluku</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>
$L'_{n,w} + C_{I,S1}$	<u>0,93</u>	0,38	0,75	0,35	0,73
$L'_{n,w} + C_{I,S2}$	0,41	<u>0,87</u>	0,30	0,01	0,31
$L'_{n,w} + C_{I,S3}$	0,91	0,35	<u>0,77</u>	0,42	0,69
$L'_{n,w} + C_{I,S4}$	0,87	0,24	0,71	<u>0,56</u>	0,59
$L'_{n,w} + C_{I,S5}$	0,75	0,26	0,61	0,20	<u>0,87</u>
$L'_{n,w} + C_{I,opt}$	0,92	0,40	0,75	0,35	0,74
$L'_{n,w}$	0,68	0,09	0,54	0,30	0,80
$L'_{n,w} + C_I$	0,83	0,17	0,68	0,44	0,75
$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	0,82	0,27	0,65	0,29	0,82



KUVA 3. Optimoidut vertailuspektrit  $L_{S1} \dots L_{S5}$  kullekin äänityypille S1–S5.

#### 4 POHDINTA JA PÄÄTELMÄT

Standardoidut mittaluvut  $L'_{n,w}$ ,  $L'_{n,w} + C_1$  ja  $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$  korreloivat kohtalaisesti äänityyppien S1 (kävely kovapohjaisin kengin), S4 (kävely pehmeäpohjaisin kengin) ja S5 (tuolin siirto) kanssa. Sitä vastoin selitysasete oli heikko äänityyppien S1 (kävely sukien) ja S4 (superpallo) kanssa.

Hyvään selitysaseteeseen johtava optimoitu vertailuspektri voitiin määrittää kullekin äänityypille S1–S5. Verrattuna standardin ISO 717-2 [1] mukaisiin mittalukuihin kukin optimoitu mittaluku johti suurempaan korrelaatioon koetun häiritsevyyden kanssa. Virjonen et al [15] päätyivät samaan lopputulokseen optimoidessaan mittalukuja ilmaääneneristävyydelle. Tämä osoittaa, että matemaattinen optimointi on tarkoituksenmukainen ja perusteltu menetelmä uusien ääneneristävyyden mittalukujen johtamiseksi siten, että johdetut mittaluvut vastaavat paremmin asukkaiden kokemusta äänistä.

Käytännössä mittalukujen tulisi vastata kaikkia äänityyppejä yhdessä. Siksi johdettiin myös optimoitu vertailuspektri  $L_{opt}$ , johon sisältyvät kaikki viisi tutkittua äänityyppiä. Taulukon 1 perusteella optimoitu vertailuspektri on varsin hyvä, sillä se tuottaa äänityypeille S1–S3 paremman korrelaation kuin yksikään standardin mukainen mittaluku. Korrelaatio oli varsin hyvä myös äänityypeille S4 ja S5. Siten tutkimuksessa asetettu tavoite pystyttiin saavuttamaan eli kehitettiin askelääneneristävyydelle mittaluku, joka toimii käytössä olevia mittalukuja paremmin.

**VIITTEET**

- [1] ISO 717-2:2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [2] Kylliäinen, M. 2007. Miksi askelääneneristyksen arviointi on niin vaikeaa? Akustiikkapäivät 2007. Espoo, 27.-28.9., Akustinen Seura ry, s. 130-135.
- [3] Gover B N, Bradley J S, Schoenwald S & Zeitler B. Subjective ranking of footstep and low-frequency impact sounds on lightweight wood-framed floor assemblies. Proceedings of the 6th Forum Acusticum; 26 June – 1July 2011; Aalborg, Denmark.
- [4] Gösele K. Zur Bewertung der Schalldämmung von Bauteilen nach Sollkurven. *Acustica* 1965:15, 264–270.
- [5] Fasold W. Untersuchungen über den Verlauf der Sollkurve für den Trittschallschutz im Wohnungsbau. *Acustica* 1965:15, 271–284.
- [6] Gerretsen E. A new system for rating impact sound insulation. *App Ac* 1976:9(4), 247–263.
- [7] Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings. *J. of Sound and Vibration* 1985:102, 381–402.
- [8] Hagberg K. Evaluating field measurements of impact sound. *Building Acoustics* 2010:17, 105–128.
- [9] Kylliäinen M, Hongisto V, Oliva D & Rekola J. Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings. *Acta Acust united Ac.* 2017:103(2), 236–251.
- [10] Kylliäinen M, Virjonen P & Hongisto V. Optimized reference spectrum for rating the impact sound insulation of concrete floors. *J Acoust Soc Am.* 2019:145(1), 407–416.
- [11] Kylliäinen, M. 2019. Rating the impact sound insulation of concrete floors with single-number quantities based on a psychoacoustic experiment. Dissertation. Tampere, Tampere University Dissertations 93.
- [12] Rasmussen B & Machimbarrena M. Building acoustics throughout Europe - Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. COST Action TU0901, Brussels; 2014.
- [13] Kylliäinen M, Lietzén J, Kovalainen V & Hongisto V. Correlation between single number-quantities of impact sound insulation and noise ratings of walking on concrete floors. *Acta Acust united Ac* 2015:101(5), 975–985.
- [14] ISO 140-7:1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [15] Virjonen P, Hongisto V & Oliva D. Optimized single-number quantity for rating the airborne sound insulation of constructions: Living sounds. *J. Acoust. Soc. Am.* 2016:140 (6), 4428–4436.
- [16] Ljunggren F, Simmons C & Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound. *Appl. Acoust* 2014: 85, 57–68.