

HUONETILAN JA SEN REUNAehtojen vaikutus tilojen välillä todennettavaan askelääneneristävyyteen

Alina Lahdensivu¹, Lauri Talus², Jesse Lietzén², Mikko Kylliäinen²

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Akustiikkasuunnittelu
Puutarhakatu 10
33210 TAMPERE
etunimi.sukunimi@ains.fi

² Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5
33720 TAMPERE
etuimi.sukunimi@tuni.fi

Tiivistelmä

Puuvälipohjilla on ongelmia askelääneneristävyydessä alle 100 Hz taajuuksilla, joilla puuvälipohjien alimmat ominaistaajuudet ovat. Kirjallisuuden mukaan vastaanottohuoneella on merkittävä vaikutus puuvälipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen, erityisesti pienillä taajuuksilla. Suomessa käytettävässä askelääneneristävyyden mittaluvussa $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ on alle 100 Hz taajuudet sisältävä spektripainotusermi, mikä lisää pienten taajuuksien merkitystä askelääneneristystarkasteluissa. Puuvälipohjien askelääneneristävyyden ennustamiseen on vain vähän laskentamalleja ja niiden ratkaisut pätevät vain rajatuissa tapauksissa. Malleissa oletetaan usein diffuusi äänikenttä sekä täysin jäykät ja heijastavat huonepinnat. Tässä artikkelissa palataan modaalisen äänikentän teoriaan sekä yksinkertaisesti tuetun levyn moodien ja vastaanottohuoneen äänikentän moodien kytkeytymiseen. Vastaanottohuoneen äänikentän mallinnusta tarkastellaan puuvälipohjien FEM-laskennan yhteydessä.

1 JOHDANTO

Puurakentamisen yleistyessä myös puuvälipohjien askelääneneristävyyden merkitys on kasvanut, sillä askelääneneristävyys on usein puuvälipohjien mitoittava tekijä pienten taajuuksien heikon ääneneristävyyden vuoksi. [1–8] Välipohjan askelääneneristävyyttä arvioidaan huoneen ominaisuuksista riippuvilla normalisoidulla askeläänitasoluvulla $L'_{n,w}$ sekä standardisoidulla askeläänitasoluvulla $L'_{nT,w}$ sekä näihin lisättävillä spektripainotusermeillä. Suomen määräyksissä käytetään spektripainotusermiä $C_{1,50-2500}$, jonka tarkoituksena on ottaa paremmin huomioon terssikaistoilla 50–2500 Hz esiintyvät piikit askeläänitasossa. Mittaluku $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ vastaa paremmin subjektiivista äänenpainetasoa kuin yleisesti Euroopassa käytettävä standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{nT,w}$. [6,8–13]

Puuvälipohjien alimmat ominaistaajuudet ovat yleensä 50–100 Hz taajuuksilla, joilla kävelyn aiheuttama värähtelyenergia on suurimmillaan. Määräyksissä esiintyvä



© 2025 Alina Lahdensivu, Lauri Talus, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen. 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.

spektripainotusermi lisää entisestään pienten alle 100 Hz taajuuksien merkitystä. Välipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavat erityisesti lattianpäällyste, kansilevyn massa ja alakaton massa ja ripustus sekä monet muut tekijät [4]. Lisäksi todennettavaan askelääneneristävyyteen vaikuttavat mittausepävarmuudet sekä vastaanottohuoneen koko ja muoto.

2 HUONEEN VAIKUTUS ÄÄNENERISTÄVYYTEEN

2.1 Huoneen äänikenttä

Huoneen äänikentän ajatellaan jakautuvan Schröderin taajuudella diffuusiin ja modaaliiseen äänikenttään. Schröder määrittä vuonna 1954 [14] diffuusiäänikentän vähimmäisvaatimukseksi moodien limittymiskertoimen $M = 10$, joka vuoden 1962 artikkelissa [15] täsmennettiin $M = 3$ muiden tutkimusten perusteella. Diffuusiäänikentässä äänen energiatiheyden oletetaan olevan sama kaikkialla huoneessa. Tällöin ääni voi kulkea mistä tahansa suunnasta mihin tahansa suuntaan samalla todennäköisyydellä ja äänikenttää voidaan tarkastella tilastollisesti. Äänikenttää ei voida olettaa diffuusiksi kaikilla taajuuskaistoilla vain moodien limittymiskertoimen perusteella. Lisäksi diffuusiäänikentän oletus ei päde pienissä huoneissa, huoneissa, joissa on paljon epätasaisesti jakautuvia absorboivia pintoja sekä huoneissa, joissa ei ole riittävästi ääntä hajottavia ja sirottavia pintoja. [8–9]

Schröderin taajuuden alapuolella huoneen äänikenttä on modaalinen. Modaalisisessa äänikentässä äänenpaineen magnitudi ei muutu ajan suhteen. Moodeja syntyy taajuuksille, joilla vähintään yksi huoneen dimensioista on aallonpituuden puolikkaan monikerta. Moodit jaetaan aksiaalisiin, tangentialisiin ja vinotulokulmaisiin moodeihin sen perusteella, kuinka moneen suuntaan moodi syntyy. [16]

Huoneen reunat oletetaan usein täysin jäykiksi ja heijastaviksi laskennan helpottamiseksi. Kun huoneen seinät eivät ole täysin jäykät, esimerkiksi levyseinien tapauksessa, aaltoyhtälön ominaisarvot ovat kompleksisia. [8–9,16] Kipsilevyseinän impedanssia voidaan arvioida levyresonaattorin impedanssilla, joka voidaan laskea esimerkiksi yhtälöllä

$$Z = r_s + j \left(\omega m - \frac{\rho c}{\omega d} \right) \quad (1)$$

jossa r_s on absorptiomateriaalin virtausresistiivisyys, $j = (-1)^{1/2}$, ω on kulmataajuus, m on laatan pintamassa, $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$, $c = 343 \text{ m/s}$ ja d on ilmvälin kokonaispaksuus [16]. Levyresonaattorin laskennallinen absorptio on hyvin lokaalia sen ominaistajuuden ympärillä. Impedanssin perusteella laskettava absorptiosuhde ei vastaa kevytrakenteisen seinän mitattuja absorptiosuhteita. Impedanssin muunnos absorptiokertoimeksi kadottaa kompleksisen osan, joka kuvaa huoneen reunalla tapahtuvaa vaihesiirtoa.

2.2 Askelääneneristävyyden todentaminen

Askelääneneristävyyden mittaustulos ilmoitetaan normalisoituna tai standardisoituna askeläänitasolukuna. Normalisoidussa askeläänitasoluvussa tulokset on normalisoitu ekvivalentin kokonaisabsorptioalan perusteella, joka riippuu huoneen jälkikaiunta-ajasta sekä huoneen dimensioista. Standardisoidussa askeläänitasoluvussa normalisointi on tehty suoraan huoneen jälkikaiunta-ajan perusteella. [14,16] Normalisoinnilla mittaustuloksesta pyritään poistamaan huoneen dimensioiden ja äänikentän vaikutus. Puuvälipohjille on olemassa vain muutamia analyttisiä laskentamalleja, joilla on ratkaisu vain rajatuissa tapauksissa. Puuvälipohjien askelääneneristävyyttä ennustetaan sekä laskennallisilla että

mittauksiin perustuvilla parametrisillä malleilla sekä elementtimenetelmään perustuvilla numeerisilla laskentamenetelmillä. Suurilla taajuuksilla tilastollisen energia-analyysin hyödyntäminen on yleisempää suuren mooditiheyden vuoksi. [8–9]

2.3 Huoneen ja laatan moodien kytkeytyminen

Huoneessa vallitsevan äänenpainekentän ja levyn moodien kytkeytymiselle on esitetty joi-takin laskentamalleja, joissa ei oleteta diffuusiäänikenttää eikä täysin jäykkiä ja heijastavia reunoja. Kihlman kehitti 1967 laskentamallin [17] äänenpaineen laskentaan vastaanotto-huoneessa, kun äänilähteenä on ympärisäteilevä kaiutin. Neves e Sousa ja Gibbs jatkoivat mallin kehitystä, jotta se soveltuisi askelääneneristävyyden laskentaan [18–19]. Laskenta-mallilla määritetään huoneessa vallitseva äänenpaine, kun pistevoimalla herätetty laatta värähtelee ja säteilee ääntä huoneeseen. Malli ottaa huomioon rakenteen ja huoneen moodit sekä niiden välisen kytkeytymisen. Rakenteen ominaisuudet otetaan huomioon pintamas-san ja kokonaishäviökertoimen avulla ja huoneen ominaisuudet jälkikaiunta-ajasta riippu-van häviökertoimen avulla. Äänenpainetaso vastaanottohuoneen pisteessä (x,y,z) on

$$p(x, y, z) = -j\omega\rho \sum_{n_x, n_y, n_z=0}^{\infty} \frac{c^2(-1)^{n_z} C_{n_x n_y n_z} \varphi_{n_x n_y n_z}(x, y, z)}{\left[(\omega_{n_x n_y n_z} + j\delta)^2 - \omega^2 \right] \Lambda_{n_x n_y n_z}} \quad (2)$$

jossa $j = (-1)^{1/2}$, ω on kulmataajuus, $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$, n_x , n_y ja n_z ovat huonemoodin aal-lonpituuden puolikkaiden lukumäärät, $c = 343 \text{ m/s}$, C_{n_x, n_y} on kytkeytymiskerroin, φ on huo-neen ominaisuusfunktio, ω_{n_x, n_y, n_z} on huoneen ominaiskulmataajuus, $\delta = 6,9/T$ ja $\Lambda_{n_x n_y n_z} = \int \varphi_{n_x n_y n_z}(x, y, z) dV = V/8$. Kun lattia on herätetty pistevoimalla, kytkeyty-miskerroin on

$$C_{n_{x1} n_{y1}} = j \frac{4\omega F}{\pi^2 m} \sum_{n_{x1}, n_{y1}=1}^{\infty} \left\{ \frac{\varphi_{n_{x1} n_{y1}}(x_0, y_0)}{\omega_{n_{x1} n_{y1}}^2 (1 + j\eta) - \omega^2} D \right\} \quad (3)$$

$$D = \frac{[(-1)^{n_{x1}+n_x} - 1][(-1)^{n_{y1}+n_y} - 1]}{n_{x1} n_{y1} \left[\left(\frac{n_x}{n_{x1}} \right)^2 - 1 \right] \left[\left(\frac{n_y}{n_{y1}} \right)^2 - 1 \right]}$$

jossa F on pistevoima, m on lattian pintamassa, n_{x1} ja n_{y1} ovat levymoodin aallonpituuden puolikkaiden määrä, x_0 ja y_0 ovat pistevoiman koordinaatit levyn yläpinnalla, $\omega_{n_{x1} n_{y1}}$ on levyn ominaiskulmataajuus, $\eta = \eta_i + X/\sqrt{f}$ ja n_x ja n_y ovat huonemoodin aallonpituuden puolikkaiden lukumäärä.

3 MENETELMÄT

Tutkimuksessa tarkasteltiin 200 mm paksun betoni- ja CLT-laatan moodien kytkeytymistä huoneen äänikenttään erilaisissa huoneasetelmissa Neves e Sousan ja Gibbsin laskentamal-lilla [18–19]. Välipohjien värähtelyn aiheuttamaa huonevastetta ja moodien kytkeytymis-käyttäytymistä vertailtiin keskenään. Huonevaste laskettiin vastaanottohuoneen pisteistä $(0,7;0,7;0,7)$, $(0,0,0)$ ja $(l_x+0,5; l_y+0,2; 1,5)$ huoneen keskipisteestä katsottuna. Laskennassa laatat olivat reunoilta yksinkertaisesti tuettuja ja laattojen dimensiot olivat $3,3 \times 3 \text{ m}^2$ ja $2,5 \times 4 \text{ m}^2$. Huonetilan korkeutta muutettiin siten, että huoneiden tilavuudet olivat 30 m^3 , 40 m^3 ja 50 m^3 . Laatat oli herätetty keskeltä yläpintaa 5 N pistevoimalla. Laskennassa käytettyjen laattojen ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

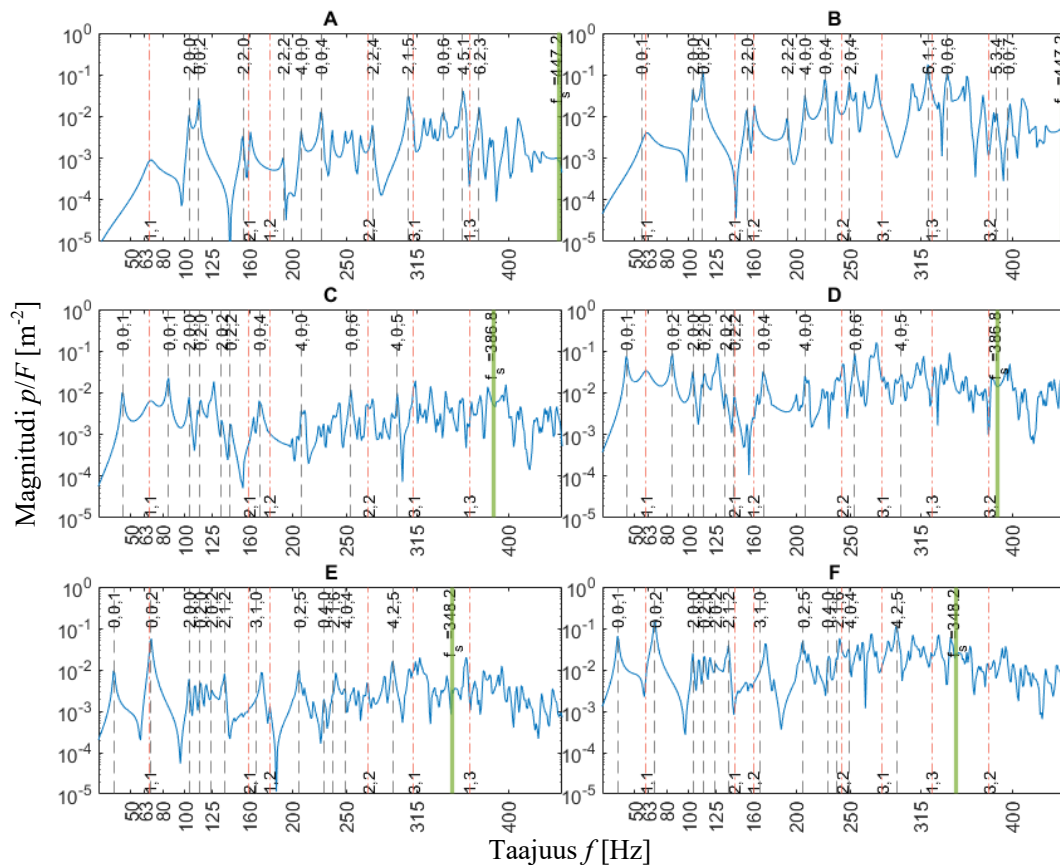
Taulukko 1. Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	ν [-]	η_i [-]
Betoni 200 mm [20]	2 500	33 000	0,2	0,015
CLT 200 mm [21]	420	4 539*	0,4	0,015

* Käytetty efektiivistä kimmokerrointa $E_{eff} = \sqrt{E_x E_y}$

4 TULOKSET

Kuvassa 1 on esitetty laatan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi vastaanottotilan keskipisteessä kolmella huonekoolla. Magnitudi kuvastaa äänikentän yksittäisen mitauspisteen tulosta. Äänenpaineen magnitudissa nähdään huippuja huoneen moodien kohdalla. Suurimmat huiput äänenpaineen magnitudissa ovat alimmilla aksiaalisilla huonemodeilla f_{001} ja f_{002} . Magnitudin muoto on vastaava eri laatoilla samassa huonetilassa, mutta magnitudi on korkeampi CLT-laatoilla. Tämä havaitaan muilla huoneasetelmilla.



Kuva 1. Välipohjan värähtelyn aiheuttama äänenpaineen magnitudi vastaanottohuoneen keskipisteessä taajuuden suhteen. A) betonilaatta $V = 30 \text{ m}^3$, B) CLT laatta $V = 30 \text{ m}^3$, C) betonilaatta $V = 40 \text{ m}^3$, D) CLT laatta $V = 40 \text{ m}^3$, E) betonilaatta $V = 50 \text{ m}^3$, F) CLT laatta $V = 50 \text{ m}^3$. Huonemoodit on merkitty kuvissa pystysuuntaisilla katkoviivoilla, levy moodit pistekatkoviivoilla ja Schröderin rajataajuus yhte-näisellä viivalla. Viivoja vastaavat huonemoodit ovat lukuarvoina kuvaajan yläreunassa ja levy moodit alareunassa.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Tulosten perusteella ensimmäinen pystysuuntainen moodi vaikuttaa eniten homogeenisten betonilaattojen ääneneristävyyteen. Myös toinen pystysuuntainen moodi on merkittävä.

Kuvan 1 huiput magnitudissa viittaavat heikompaan ääneneristävyyteen kyseisillä taajuuksilla. CLT-laattojen korkeampi magnitudi kertoo niiden ääneneristävyyden olevan heikompi betonilaattoihin verrattuna. Betoni- ja CLT-laattojen äänenpaineen magnitudin kuvaajat ovat muodoltaan samanlaisia keskenään samankokoisissa tiloissa. Moodien kytkeytyessä pienillä taajuuksilla äänenpaineen magnitudin muoto määräytyy lattian dimensioiden lisäksi huoneen moodien ja magnitudi rakenteen massan perusteella.

Puuväli­pohjien kannalta hankalimmat tapaukset ovat huoneet, joiden alimmat pystysuuntaiset moodit osuvat 50–100 Hz taajuuksille. Tässä suhteessa kenttäolosuhteet poikkeavat laboratorio-olosuhteista. Kenttäolosuhteet eroavat laboratorio-olosuhteista myös vastaanottotilaa rajaavien pintojen ja huoneen jälkikaiunta-ajan osalta.

Askelääneneristävyyden analyttisissä ennustumalleissa ongelmana ovat tehdyt oletukset ja yksinkertaistukset. Muilla laskentamenetelmillä, kuten FEM-laskennassa voidaan ottaa huomioon myös monimutkaisia reunaehdoja. Reunaehtojen määrittäminen voi kuitenkin olla hankalaa. Askelääneneristävyyden FEM-malleissa usein oletetaan, että tarkasteltava rakenne säteilee ääntä äärettömyyteen [22]. Lietzén et al. [23] mallinsivat kokonaisen puu­testilattian askelääneneristävyyttä laboratorio-olosuhteissa FEM-laskentaa hyödyntäen ja vertasivat tulosta lattian mittaustulokseen. Simulointitulokset eroavat mittaustuloksesta erityisesti 63 ja 80 Hz taajuuskaistoilla. Laboratorion ensimmäinen pystysuuntainen moodi on $f_{001} = 38$ Hz ja toinen moodi $f_{002} = 86$ Hz. Toinen pystysuuntainen moodi voi selittää eroa mitatun ja simuloidun tuloksen välillä. Simulointituloksen ja mittaustuloksen vastaavuutta pienillä taajuuksilla voisi parantaa mallintamalla myös vastaanottohuoneen.

Huoneen reunaehdot tulee määrittää riittävällä tarkkuudella, jotta huone voidaan mallintaa ja kytkeytymistä tarkastella tarkemmin. Viimeaikaiset tutkimukset FE-menetelmää hyödyntäen on tehty aikatasossa tai huoneen reunaehtoina on käytetty vakioimpedanssia tai absorptiokerrointa kaikille pinnoille. Huonepinnoille voidaan antaa reunaehdoksi impedanssi, jäykkä pinta tai pehmeä pinta. Jäykän ja pehmeän pinnan reunaehdot eivät kuvasta huoneen äänikenttää puurakennuksissa. Mikäli levyresonaattorin impedanssista lasketaan absorptiokerroin, huoneeseen syntyvä jälkikaiunta-aika ei vastaa huoneessa vallitsevaa jälkikaiunta-aikaa. Absorptiosuhdereunaehdolla tuloksissa ei ole imaginääriosaa eli vaihe­muutos ei ole mukana tuloksessa, mutta jälkikaiunta-aika on lähempänä todellisuutta.

6 YHTEENVETO

Huoneen alimmilla pystysuuntaisilla moodeilla on selvä vaikutus välipohjan todennettavaan askelääneneristävyyteen. Erityisesti pienissä tiloissa pystymoodien vaikutus voi näkyä mittaustuloksessa korkeampana askeläänitasona alle 100 Hz taajuuksilla. Vastaanottohuoneen mallinnuksella voisi parantaa simuloidun ja mitatun askelääneneristävyyden vastaavuutta. Epäjäykät reunat mallinnetaan vakioimpedanssilla tai absorptiosuhteella. Reunojen mallinnusta tulisi tutkia enemmän.

VIITTEET

- [1] C. Johansson, Low-frequency impact sound insulation of a light weight wooden joist floor, *Appl. Acoust.* 44(2) 1995.
- [2] C. Hopkins and P. Turner, ‘Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies’, *Appl. Acoust.* 66(12) 2005.
- [3] C. Simmons, ‘Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions’, *Acta Acust. United Acust.* 85(1999)

-
- [4] P. Latvanne, Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2015.
- [5] W. E. Blazier & R. B. DuPree, Investigation of low-frequency footfall noise in wood-frame, multifamily building construction, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 96(3) 1994
- [6] B. Rasmussen, Sound insulation between dwellings - Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes, 2019.
- [7] J. Lietzén, Computational Prediction of Impact Sound Insulation of a Timber Floor Based on Simulated Impact Force Excitation of the Standard Tapping Machine, Tampere University, 2024.
- [8] C. Hopkins, Sound Insulation, 1st edn. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007.
- [9] J. H. Rindel, Sound Insulation in Buildings, 1st edn. Cornwall, Great Britain: Taylor & Francis Group, LLC., 2018.
- [10] M. Kylliäinen, Rating the impact sound insulation of concrete floors with single-number quantities based on a psychoacoustic experiment, Tampere University, 2019.
- [11] SFS-EN ISO 10140-3:2021, Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation, Helsinki, Suomi., 2021.
- [12] SFS-EN ISO 10140-4:2021, Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 4: Measurement procedures and requirements, Helsinki, Suomi., 2021.
- [13] SFS-EN ISO 16238-2:2020, Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation, Helsinki, Suomi., 2020.
- [14] M. R. Schroeder, Statistik der Frequenzkurve in Räumen', *Acustica* 1954(4)
- [15] M. R. Schroeder, Frequency-Correlation Functions of Frequency Responses in Rooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 12(34) 1962.
- [16] H. Kuttruff, Room acoustics, 5th edn. Abingdon: Spon Press, 2009.
- [17] T. Kihlman, Sound Radiation into a Rectangular Room. Applications to Airborne Sound Transmission in Buildings, *Acustica* 18(1967)
- [18] A. Neves e Sousa and B. M. Gibbs, Low frequency impact sound transmission in dwellings through homogeneous concrete floors and floating floors, *Appl. Acoust.* 72(4)
- [19] A. Neves e Sousa & B. M. Gibbs, Parameters influencing low frequency impact sound transmission in dwellings, *Appl. Acoust.*, vol. 78, pp. 77–88, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.apacoust.2013.10.013.
- [20] SFS EN 1992-1-1+A1+AC, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Helsinki, Suomi., 2015.
- [21] J. Zhou, Y. H. Chui, M. Gong, and L. Hu, Elastic properties of full-size mass timber panels: Characterization using modal testing and comparison with model predictions, *Compos. Part B Eng.*, vol. 112, 203–212
- [22] N. Atalla & F. Sgard, Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration. CRC Press, 2015.
- [23] J. Lietzén, V. Kovalainen, M. Kylliäinen & S. Pajunen, Computational prediction of impact sound insulation of a full-scale timber floor applying a FEM simulation procedure, *Engineering Structures*, 310(118130).