

ASKELÄÄNIKOJEEN AIHEUTTAMA HERÄTEVOIMA PUUVÄLIPOHJILLA

Jesse Lietzén¹, Mikko Kylliäinen¹, Juha Miettinen², Sami Pajunen¹

¹Tampereen yliopisto
Rakennettu ympäristö
Metalli- ja kevytrakenteet
etunimi.sukunimi@tuni.fi

²Tampereen yliopisto
Tekniikka ja luonnontieteet
Tribologia ja koneenosat
juha.miettinen@tuni.fi

Tiivistelmä

Välipohjarakenteen askelääneneristävyyttä mitataan käyttämällä askeläänikojetta äänilähteenä. Koska koje pudottaa vasaroitaan välipohjan päälle vapaasti, mitattavan rakenteen tyyppi vaikuttaa kojeen aiheuttamaan herätevoimaan. Siten voimaa ei voida pitää rakenteesta riippumattomana vakiona. Tämä seikka on erityisen tärkeä puuvälipohjilla, jotka joustavat vasaroiden alapuolella, mikä taas vaikuttaa aiheutetun herätevoiman spektriin. Kirjallisuudessa on esitetty malleja, jotka kuvaavat askeläänikojeen tuottamaa herätettä, mutta vain muutamia mittaustuloksia on raportoitu. Tässä esitetään menetelmä, jolla askeläänikojeen aiheuttamaa herätevoimaa voidaan mitata. Lisäksi esitetään mittaustuloksia päällystetyltä ja päällystämättömältä CLT-välipohjalla ja määritetään lattianpäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL .

1 JOHDANTO

Välipohjarakenteen askelääneneristävyyttä mitataan käyttämällä äänilähteenä askeläänikojetta, joka tuottaa herätevoiman välipohjan pintaan. Koska koje pudottaa vasaroitaan välipohjan päälle vapaasti, mitattavan rakenteen tyyppi vaikuttaa kojeen aiheuttamaan herätevoimaan [1]. Kojeen tuottaman voiman spektri on erilainen puu- ja betonivälipohjilla. Voimaa ei siten voida pitää rakenteesta riippumattomana vakiona. Tietoa kojeen tuottamasta herätevoimasta tarvitaan, jotta voidaan määrittää puuvälipohjan askelääneneristävyys laskennallisesti. Ensinnäkin tietoa tarvitaan rakenteeseen kohdistuvan askeläänitehon määrittämiseen. Toiseksi sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi lattianpäällysteiden askelääneneristävyyden parannuksen ΔL laskennalliseen tarkasteluun.

Kirjallisuudessa on esitetty useita malleja, joiden perusteella voitaisiin laskennallisesti arvioida askeläänikojeen välipohjaan tuottamaa herätettä [1–6]. Mallit vaihtelevat varhaisista yksinkertaisista malleista uudempiin yleisempiin malleihin. Varhaiset mallit [2–4] kehitet-



© 2019 Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen, Juha Miettinen ja Sami Pajunen. 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.

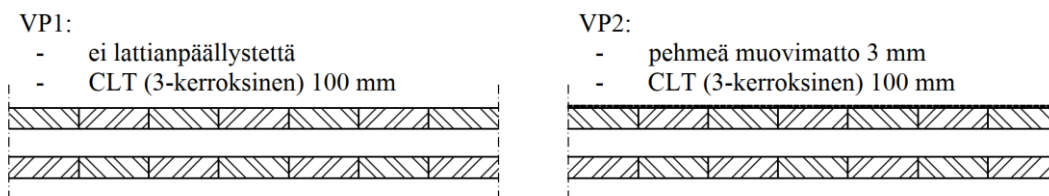
tiin askelääniherätteen mallintamiseen betonivälipohjilla, joten ne eivät aina sovellu voimaherätteen mallintamiseen betonivälipohjia joustavammilla puuvälipohjilla. Yleisemmät mallit [1, 5, 6] taas on kehitetty herätevoiman mallintamiseen välipohjilla yleensä, ja ne ottavat välipohjien ominaisuudet tarkemmin huomioon. Kirjallisuudessa on esitetty vain harvoja askeläänikojeen herätevoiman mittaustuloksia [esim. 5]. Mittaustulosten puute johtunee mittausten työläydestä ja siitä, että betonivälipohjien suunnittelemiseksi tietoa voimaherätteestä ei ole juuri tarvittu. Tämän artikkelin tavoitteena on kuvata menetelmä askeläänikojeen aiheuttaman herätevoiman mittaamiseksi sekä esittää mittaustuloksia kahdelle puuvälipohjalle ja johtaa tuloksista askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL .

2 MENETELMÄT

2.1 Mittaukset ja rakenteet

Askeläänikojeen puuvälipohjalle tuottamaa herätevoimaa mitattiin käyttäen askeläänilähteenä instrumentoitua askeläänikojetta. Kojeen keskimmäistä vasaraa muokattiin ja varustettiin voima- ja kiihtyvyyssensoreilla. Erikoisvalmisteisella iskupäällä varustettu voimasensori (Kistler type 9712B5000) asennettiin kojeen vasaran alaosaan, jotta voitiin mitata vasaran aiheuttamaa voimaa kojeen operoidessa normaalisti. Kiihtyvyyssanturi (Kistler type 8202A10) asennettiin vasaran yläpäähän, jotta vasaran liikkeestä saatiin lisätietoa. Vasaraa myös muokattiin siten, että instrumentoitu askeläänikoje täytti standardissa ISO 16283-2 askeläänikojeelle asetetut vaatimukset.

Testattujen kahden puuvälipohjan kantavana rakenteena oli 3-kerroksinen 100 mm paksu ristiinlaminoitu puulevy (CLT). Välipohjat (kuva 1) käsittivät päällystämättömän CLT-välipohjan (VP1) ja pehmeällä muovimatolla päällystetyn CLT:n (VP2). Pehmeän muovimaton dynaaminen jäykkyys s' oli n. 2280 MN/m³. Rakenteiden koko oli 2,4 x 2,7 m², josta jänneväli oli 2,7 m. CLT-levy tuettiin molemmista päistään jäykästi ruuviliitoksin tärinäneneristettyihin palkkirakenteisiin. Herätevoiman mittaukset suoritettiin aikatasossa ja voiman aikahistoria tallennettiin. Kunkin mittauksen pituus oli noin 30 s. Mittauksen alussa askeläänikoje oli levossa ja sen instrumentoitu vasara sattumanvaraisessa asennossa liikeradallaan. Askeläänikoje toimi viidessä herätepisteessä S1...S5 rakenteen päällä. Sijainnit määritettiin siten, että niiden etäisyys rakenteen reunaan oli vähintään 0,5 m. Piste S3 sijaitsi rakenteen keskellä.



Kuva 1. Rakenteet.

2.2 Mittaustulosten jälkikäsitely

Koska herätevoimaa mitattiin käyttäen vasaraan kiinnitettyä sensoria, vasaran kiihtyvyys aiheutti vähäisen voiman myös rakenteeseen kohdistuneiden iskujen välissä, kun vasarat olivat jatkuvassa liikkeessä. Kuitenkin mitatun voiman vastavoima herättää tässä tapauksessa rakenteen vain niissä tilanteissa, jossa vasara ja rakenteen pinta ovat kontaktissa. Jotta saatiin tieto varsinaisesta välipohjaa herättävästä voimasta, kaikki herätevoimapulssit ha-

ettiin ja näiden välillä voima asetettiin nollassi. Koska askeläänikojeen vasaran asento mittauksen alussa oli sattumanvarainen eikä ensimmäinen rakenteeseen kohdistunut isku ollut täysi, tämän aiheuttama voimapulssi poistettiin mittausdatasta. Lisäksi aikadata viimeisen iskun alusta mittauksen loppuun poistettiin, koska tätä seuraavan iskun ajankohta ei ollut tiedossa (voimapulssien välinen aika ei ollut tarkalleen 0,5 s). Jälkikäsitelty herätevoiman aikahistoria suodatettiin 1/3-oktaavikaistasuotimin taajuusalueella 20–5000 Hz. Kullekin taajuuskaistalle määritettiin rms-voima F_{rms} . Herätevoiman spektrin arvot ovat pieniä verrattuna voimapulssien huippuarvoihin aikatasossa, koska välipohjaa herättävä voima on voimapulssien välissä nolla, ja F_{rms} määritettiin koko mittaushistorian perusteella.

2.3 Askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL

Lattianpäällysteen parannusvaikutus ΔL määritetään yleensä laboratoriomittauksin välipohjan alapuoleiseen tilaan syntyvien askeläänitasojen tai rakenteen kiihtyvyydestasojen perusteella (vrt. standardit ISO 10140 ja ISO 16251-1). Tässä tutkimuksessa lattianpäällysteen parannusvaikutus ΔL määritettiin laskennallisesti Vérin mukaan [2] käyttäen lähtötietona mitattua herätevoimaa. Laskenta tehtiin 1/3-oktaavikaistaisesti kullekin herätepisteelle S1...S5 kaavalla

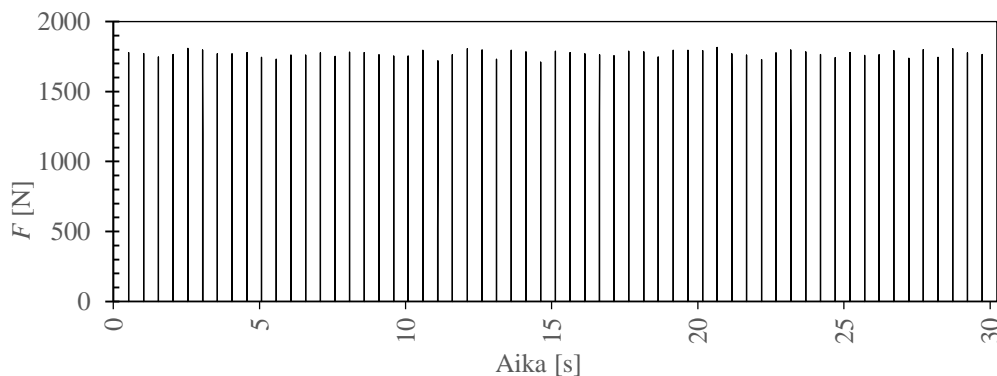
$$\Delta L = 20 \log \left(\frac{F_{\text{rms,ei_päällystetty}}}{F_{\text{rms,päällyste}}} \right), \quad (1)$$

jossa $F_{\text{rms,ei_päällystetty}}$ ja $F_{\text{rms,päällyste}}$ ovat rms-herätevoimia, kun välipohjalla ei ollut lattianpäällystettyä (VP1) ja kun välipohjalla oli lattianpäällyste (VP2). Tulokset määritettiin taajuusalueella 20–5000 Hz. Koska askeläänikojeessa oli vain yksi instrumentoitu vasara, oletettiin, että kukin kojeen vasara tuottaa rakenteeseen samanlaisen herätevoiman.

3 TULOKSET

3.1 Herätevoima aikatasossa

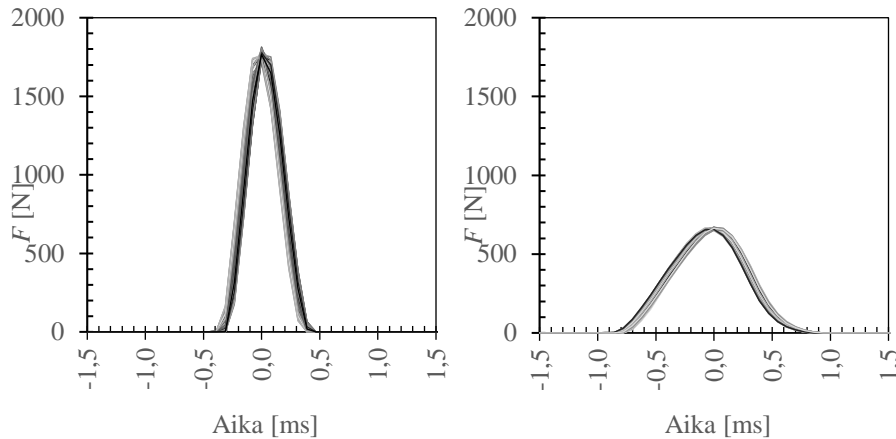
Kuvassa 2 on esitetty esimerkki mitatusta herätevoiman aikahistoriasta. Siinä on kuvattu koko jälkikäsitelty herätevoiman mittaustulos välipohjalla VP1 herätepisteessä S3. Mitattu voiman huippuarvo sekä askeläänikojeen vasaran iskutiheys on nähtävissä kuvasta.



Kuva 2. Mitattu herätevoiman aikahistoria (välipohja VP1, herätepiste S3).

Kuvassa 3 on esitetty esimerkit yksittäisistä herätevoimapulsseista askeläänikojeen vasaran ja välipohjan pinnan ollessa kontaktissa. Mittaustulokset on esitetty molemmilla välipohjilla samassa herätepisteessä S3. Kootut herätevoimapulsstit rakenteelle VP1 ovat siis

samat kuin kuvassa 2 esitetyt. Tässä pulssit on keskitetty kuvaan siten, että niiden aiheuttama huippuarvo tapahtuu ajankohtana 0,0 s. Vasaroiden iskujen määrä lattiaan vaihteli välillä 60–61 (ilman ensimmäistä ja viimeistä iskuja, ks. kohta 2.2). Kun verrataan kuvassa 3 voimapulsseja, voidaan havaita lattianpäällysteen vaikutus syntyvään voimapulssiin muotoon: pulssin huippuarvo oli merkittävästi alhaisempi ja pulssi oli leveämpi, kun välipohjan päällä oli pehmeä lattianpäällyste.

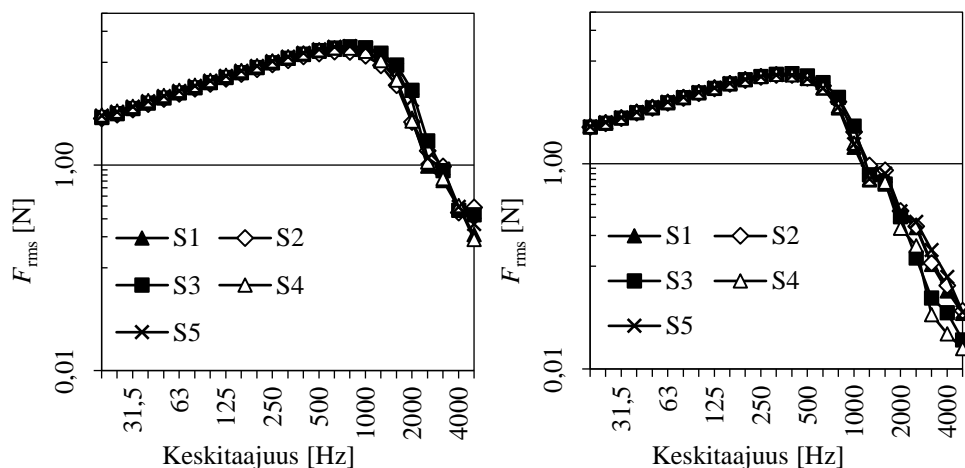


Kuva 3. Mitatut voimapulsit herätepisteestä S3 (vasemmalla VP1, oikealla VP2).

3.2 Herätevoiman spektri

Välipohjilla VP1 ja VP2 saadut tulokset herätevoiman spektreille on esitetty kuvassa 4. Tulosten perusteella pienillä- ja keskitaajuuksilla voima F_{rms} kasvaa taajuustasossa, kunnes äkillisesti pienenee suurilla taajuuksilla lähelle nollaa. Herätevoiman F_{rms} maksimiarvot olivat keskimäärin 13,7 ja 7,4 N välipohjille VP1 ja VP2. Tulokset olivat koko taajuusalueella suuremmat välipohjalla VP1 kuin välipohjalla VP2, koska pehmeä lattianpäällyste pienensi herätevoimaa. Voimien erot välipohjien välillä olivat suurimmillaan 1000 Hz keskitaajuudella.

Spektrin huippuarvon taajuus riippui välipohjasta. Välipohjalla VP1 voimaspektrin arvo oli suurimmillaan 800 Hz keskitaajuudella, kun taas välipohjalla VP2 huippuarvo sijaitsi 315 Hz keskitaajuudella. Tämä johtuu voimapulssien leveyden eroista: nopea pulssi herättää suurempia taajuuksia [4].

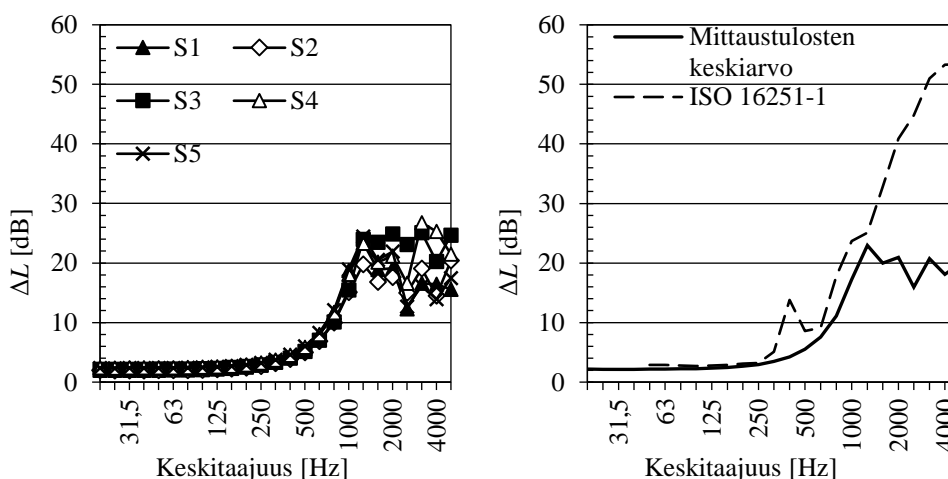


Kuva 4. Voimaherätteen spektrit herätepisteittäin S1...S5. (vasemmalla VP1 ja oikealla VP2).

Herätepisteiden välillä oli vain pieniä eroja samalla välipohjalla erityisesti pienillä taajuuksilla. Välipohjan VP1 tapauksessa voimaspektrin erot olivat suurimmillaan 500–2000 Hz taajuusalueella. Välipohjalla VP2 erot herätepisteiden välillä olivat pieniä. Tulokset viittaavat siihen, että tutkituilla välipohjilla askeläänikojeen aiheuttamat herätevoimat ovat samanlaiset mittauspisteestä riippumatta.

3.3 Askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL

Askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL sai positiivisia arvoja ja oli melko tasainen pienillä taajuuksilla 250 Hz keskitaajuudelle saakka (kuva 5). Tällä taajuusalueella ΔL :n arvot vaihtelivat välillä 2–3 dB. Keskitaajuuksilla 250–1250 Hz ΔL kasvoi eksponentiaalisesti aina yli 20 dB arvoon. Keskitaajuutta 1250 Hz suuremmilla taajuuksilla ΔL laski tai pysyi samalla tasolla pienempään taajuusalueeseen verrattuna. Eri herätepisteissä määritettyjen askelääneneristävyyksien parannusvaikutusten ΔL välillä oli vähäisiä eroja pienillä- ja keskitaajuuksilla 1000 Hz:iin saakka. Suurimmat erot eri pisteiden välillä olivat pienillä taajuuksilla 0,4 dB ja 1000 Hz keskitaajuudella 3,8 dB. Yli 1000 Hz taajuuksilla erot pisteiden välillä olivat suuremmat ja vaihtelivat välillä 4,7–11,4 dB. Mittaustulosten keskiarvoa verrattiin tuloksiin standardin ISO 16251-1 mukaisesta mittauksesta, joka tehtiin Turun AMK:ssa pienellä betonilaatta-mock-upilla ($h = 200$ mm, $m' = 400$ kg/m²). Tuloksia vastaavalla lattiamateriaalilla on esitetty myös lähteessä [7].



Kuva 5. Vasemmalla kaavan (1) perustella määritetty mitattu askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL herätepisteittäin. Oikealla on vasemmalla esitettyjen mittaustulosten keskiarvo verrattuna standardin ISO 16251-1 mukaiseen mittaustulokseen.

Mittaustulosten keskiarvo kuvassa 5 vastasi hyvin standardinmukaista mittaustulosta pienillä taajuuksilla 50–250 Hz. Taajuusalueella 315–1250 Hz mittaustulosten väliset erot olivat 1,5–9,6 dB. Tällä taajuusalueella suurin ero oli 400 Hz keskitaajuudella, jossa standardin ISO 16251-1 mukaisen mittauksen tuloksessa oli havaittavissa piikki. Betonilaatta-mock-upilla saatuihin mittaustuloksiin verrattuna 1250 Hz keskitaajuus näyttäisi toimivan eräänlaisena rajataajuutena, jonka jälkeen muovimaton ΔL arvo ei enää kasva, kuten betonilaatalla, vaan pysyy melko tasaisena. Tämä johtuu luultavasti välipohjan VP1 pienemmästä herätevoimasta suurilla taajuuksilla betonivälipohjiin verrattuna, mikä on havaittu aiemmassa tutkimuksessa [8, 9]. Betonivälipohjilla herätevoiman spektrin arvo kasvaa vielä suurilla taajuuksilla, jolloin voimaero ja ΔL päällystämättömän ja päällystetyn välipohjan välillä kasvaa. CLT-välipohjan lattianpäällysteiden askelääneneristävyyden parannusvaikutusta ΔL on käsitelty lisää tutkimuksessa [10].

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Askeläänikojeen välipohjaan aiheuttama herätevoima riippuu välipohjarakenteesta. Erityisesti herätteen spektri sai kauttaaltaan alhaisempia arvoja, kun välipohjan päällä oli pehmeä muovimatto. Lisäksi spektrin maksimiarvot sijaitsivat mitatuilla välipohjilla eri taajuuksaistoilla. Askeläänikojeen voimaherätteen tulee olla tiedossa, kun välipohjan askelääneneristävyyttä arvioidaan laskennallisesti. Herätepisteiden välillä mittaustulosten väliset erot olivat pieniä, joten askeläänikojeen aiheuttama herätevoima ei näyttäisi olevan erityisen paikkariippuvainen massiivisilla puuvälipohjilla.

Askelääneneristävyyden parannusvaikutuksen ΔL tulokset vastasivat pienillä taajuuksilla hyvin standardin ISO 16251-1 mukaisia mittaustuloksia. Keskitaaajuus 1250 Hz toimi eräänlaisena rajataajuutena, jonka jälkeen CLT-välipohjalla muovimaton ΔL ei kasvanut. Betonivälipohjilla saatuja ΔL :n mittaustuloksia nähtävästi voitaisiin käyttää puuvälipohjien askelääneneristävyyden arvioinnissa tärkeällä alle 1000 Hz taajuualueella.

KIITOKSET

Kirjoittajat kiittävät rakennusmateriaalit lahjoittaneita Christian Berner Oy:tä, Saint-Gobain Finland Oy:tä, Stora Enso Oy:tä ja Upofloor Oy:tä sekä Valtteri Hongistoa ja Pekka Saarista (TuAMK), jotka suorittivat standardin ISO 16251-1 mukaiset vertailumittaukset.

LÄHTEET

- [1] Brunskog, J., & Hammer, P. 2003. The interaction between the ISO tapping machine and lightweight floors. *Acta Acustica united with Acustica* Vol. 89(2), s. 296-308.
- [2] Vér, I. L. 1971. Impact noise isolation of composite floors. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 50(4), s. 1043-1050.
- [3] Scholl, W. & Maysenhölder, W. 1999. Impact sound insulation of timber floors: Interaction between source, floor coverings and load bearing floor. *Journal of Building Acoustics* Vol. 6(1), s. 43-61.
- [4] Cremer, L., Heckl, M. & Petersson, B. A. T. 2005. *Structure-Borne Sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5] Rabold, A., Buchschmid, M., Düster, A., Müller, G. & Rank, E. 2010. Modelling the excitation force of a standard tapping machine on lightweight floor structures. *Journal of Building Acoustics* Vol. 17(3), s. 175-197.
- [6] Wittstock, V. 2012. On the spectral shape of the sound generated by standard tapping machines. *Acta Acustica united with Acustica* Vol. 98(2), s. 301-308.
- [7] Keränen, J, Lietzén, J, Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2013. Improvement of impact sound reduction by floor coverings – measurements using a small floor mock-up and an impact sound laboratory. *Proceedings of Inter-noise 2013*, paper no. 530.
- [8] Balanant, N., Guigou, C. & Villenave, M. 2012. Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois, à vocation logements. Etape 2, Rapport final, Acoubois France, Qualitel, CSTB and FCBA.
- [9] Latvanne, P. 2015. Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka.
- [10] Valjakka, S., Lietzén, J., Kylliäinen, M. & Pajunen, S. 2019. Lattianpäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutus CLT-välipohjilla. Oulu, Akustiikkapäivät, 28.-29.10.2019.