PUUVÄLIPOHJILLA ASKELÄÄNTEN HÄIRITSEVYYS SELITTYY YHTÄ HYVIN YKSILUKUARVOLLA $L_{n,w}$ KUIN ARVOLLA $L_{n,w}+C_{I,50}$

Johann Laukka[1], **Valtteri Hongisto** [1], **Reijo Alakoivu**[1], **Jarkko Hakala**[1]

[1] Turun ammattikorkeakoulu
Joukahaisenkatu 3–5
20520 Turku
johann.laukka@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Suosituimmat yksilukuarvot (SNQ), jotka kuvaavat välipohjan askeleääneneristystä Euroopassa, ovat $L'_{n,w}$ja $L'_{nT,w}$. Ne perustuvat mittauksiin taajuusalueella 100–3150 Hz. Suomen ja Ruotsin rakentamismääräykset soveltavat yksilukusuuretta $L'_{nT,w}$ $+C_{I,50}$ (50–3150 Hz). Äskettäin eräs tutkimus ehdotti puulattioille yksilukusuuretta $L'_{nT,w}$ $+C_{I,25}$, jossa mittauksia laajennettaisiin 25 Hz:iin. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mikä näistä kolmesta mittaluvusta ennustaa parhaiten luonnollisten iskuäänten aiheuttamaa häiritsevyyttä puuvälipohjilla. Ensin rakensimme 15 erilaista puuvälipohjaa äänieristyslaboratorioon, jossa askeleääneneristys mitattiin standardin ISO 10140-3 mukaisesti ja mittalukujen arvot määritettiin standardin ISO 717-2 mukaisesti. Lisäksi jokaiselle välipohjalle nauhoitettiin viisi erilaista luonnollista iskuäänityyppiä (kävely, tasahyppely, tuolintyöntö, kumipallon pudotus ja teräspallon pudotus). Tämän jälkeen suoritimme psykoakustisen kokeen, jossa 52 osallistujaa arvioi 75 iskuäänen häiritsevyyttä (15 välipohjaa viittä äänityyppiä kohti). Lineaarisen korrelaatioanalyysin perusteella $L_{n,w}$ selitti luonnollisten iskuäänien ärsytyksen yhtä hyvin tai hieman paremmin kuin kaksi muuta. Näyttää siltä, että puuvälipohjien askeleääneneristävyys riittää mitata taajuusalueella 100–3150 Hz käyttäen yksilukusuuretta $L_{n,w}$. Näin myös suurin osa Euroopan maista menettelee.

1 JOHDANTO

Yleisimmät yksilukusuureet (SNQs) iskuäänieristykselle Euroopassa ovat $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ [1], jotka perustuvat askeleääneneristävyyden (ISI) mittauksiin taajuusalueella 100–3150 Hz. Suomen ja Ruotsin rakennusmääräykset soveltavat yksilukusuuretta $L'_{nT,w}$ $+C_{I,50}$ (50–3150 Hz), jossa kolme alinta taajuuskaistaa ovat mukana (50–80 Hz).

Eräs tutkimus [2] ehdotti, että askeleääneneristävyyden mittaukset tulisi tehdä alueella 25–3150 Hz puuvälipohjilla, ja että suureen $L'_{nT,w}+C_{I,25}$ tulisi korvata suure $L'_{nT,w}$ $+C_{I,50}$. Ehdotus perustui asukaskyselyyn useissa kerrostaloissa. Asukaskyselyt kärsivät kolmesta epävarmuuden lähteestä, jotka liittyvät ärsykevoimakkuuteen: a) askeleäänieristävyyttä ei mitata joka vastaajan asunnossa, b) yläkerran naapurin aiheuttamat iskuäänien voimakkuus, taajuus ja tyyppi vaihtelevat yläkerran asukkaiden kesken, ja c) oman toiminnan peittoäänitaso vaihtelee vastaajien kesken. Lisäksi asuntojen subjektiivisiin häiritsevyyden

© 2023 Johann Laukka, Valtteri Hongisto. 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.

arvioihin vaikuttaa erilaisia ei-akustisia tilannetekijöitä ja sosiaalisia tekijöitä, kuten suhtautuminen naapuriin ja elämäntilanteet. Siksi ehdotus vaatii varmistusta psykoakustisella laboratoriokokeella, jossa ärsykevoimakkuus on täsmälleen sama joka tutkittavalle.On tärkeää käyttää yksilukusuureita, jotka asettavat välipohjat samaan järjestykseen kuin ihmiset subjektiivisesti ne asettavat. Objektiivinen järjestäminen tapahtuu askeläänneneristävyyden mittauksilla, joissa käytetään askeläänikonetta ärsykkeenä. Askeläänikone tuottaa välipohjalle jatkuvan ja voimakkaan laajakaistaisen rakenneväräh telyn. Mittaukset suoritetaan 1/3 oktaavikaistoilla laboratoriossa ja rakennuksissa käyttäen ISO 10140-3- ja ISO 16283-2-standardeja. Tämän jälkeen yksilukusuureiden arvot ($L'_{nT,w}$ ja $L'_{nT,w}$ $+C_{I,50}$) määritetään ISO 717-2-standardin mukaisesti. Kuitenkin subjektiivinen havainto asuinhuoneistossa perustuu yläkerran naapureiden tuottamiin luonnollisiin iskuääniin. Esimerkiksi kävelyn spektri ja voima poikkeavat askeläänikoneesta. Siksi psykoakustisissa kokeissa tulee käyttää luonnollisia iskuääniä, joissa voima on aito ja iskuäänten spektrit ovat toisistaan poikkeavia.

Hiljattain kumipallo (pehmeä/raskas iskunlähde) on otettu käyttöön vaihtoehtoisena äänilähteenä em. standardeissa, koska sen ääni muistuttaa lasten juoksua. Siksi on perusteltua käyttää kumipalloa myös psykoakustisissa tutkimuksissa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mikä kolmesta mittaluvusta, $L'_{nT,w}$, $L'_{nT,w}+C_{I,50}$ vai $L'_{nT,w}+C_{I,25}$, ennustaa parhaiten luonnollisten iskuäänten aiheuttamaa häiritsevyyttä puuvälipohjilla. Tutkimus julkaistu kansainvälisesti [3].

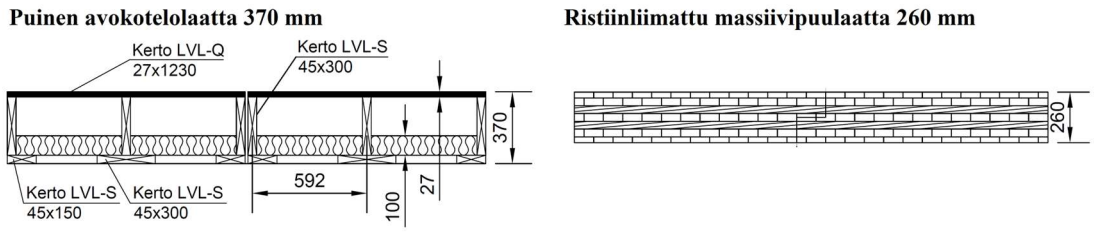
2 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

2.1 Välipohjille tehdyt tutkimukset

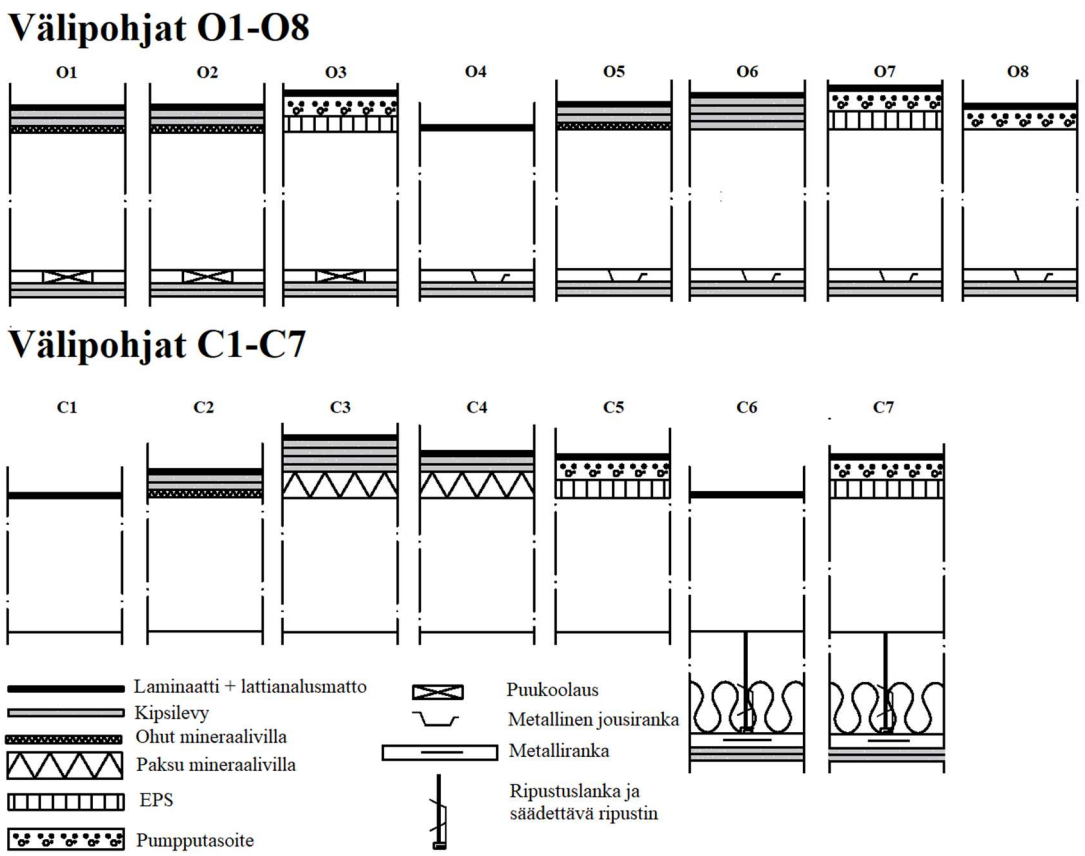
Tutkimuksen aluksi tehtiin äänieristysmittaukset ja luonnollisten iskuäänten nauhoitukset 30:lle puuvälipohjarakenteelle Turku AMK:n laboratoriossa. Mittaustulokset on raportoitu yksityiskohtaisesti [4–6].

$L'_{nT,w}$-vaatimukset vaihtelevat Euroopassa välillä 48–68 dB [1]. Psykoakustista koetta varten valittiin 15 puuvälipohjaa niin, että ne kattavat tämän vaihteluvälin, jotta tuloksia voidaan soveltaa koko Euroopassa. Valituissa välipohjissa oli kahdentyyppistä kantavaa laattaa (Kuva 1). Välipohjat (Kuva 2) koostuivat kantavasta laatasta, johon oli liitettynä alakatto, kelluva laatta tai molemmat. Kaikissa välipohjissa oli laminaattipinta ja sen alla lattianalusmatto.

Askeläänneneristävyysmittausten tulokset on esitetty taulukossa 1. Kenttämittauksissa käytetään suureita $L'_{n,w}$ tai $L'_{nT,w}$. Ne eroavat $L_{n,w}$-arvosta tietyllä vakiomäärällä, kun mittaus tehdään tietyssä huoneessa. Siksi tutkimuksemme johtopäätökset pätevät kaikkiin näihin kolmeen suureeseen.



Kuva 1. Tutkituissa puuvälipohjissa käytetyt kantavat laatat O (vasen) ja C (oikea).



Kuva 2. Periaatteelliset rakennekuvat viidestätoista tutkitusta välipohjasta. Kantavat laatat näytetään tässä tyhjinä laatikkoina, koska niiden rakenteet on näytetty kuvassa 1.

Osallistujille esitetyt koeäänet koostuivat äänitallenteista, jotka tehtiin jokaiselle puuvälipohjalle. Koska asumisen iskuäänten spektri vaihtelee paljon, valitsimme luonnollisia iskuäänityyppejä, jotka eroavat toisistaan taajuussisällön osalta. Jokaisella välipohjalla nauhoitettiin viisi erilaista luonnollista iskuääntä: **kumipallon pudotus** (2,5 kg, 25 cm pudotuskorkeus), **teräspallon** pudotus (33 g, 25 cm pudotuskorkeus), **kävely** (120 askelta/min), **tasahyppely** (140 hyppyä/min) ja **tuolintyöntö** (4,3 km/h).

Iskuäänet tallennettiin heti välipohjan ääneneristysmittausten jälkeen välipohjan alapuoleisessa huoneessa. Tallennusten aikana huone muutettiin vähän kaikuvaksi tilaksi (jälkikaiunta-aika alle 0,50 s) jäljitelläksemme tyypillisten olohuoneiden huoneakustiikkaa. Tämä saavutettiin asentamalla kiinteät absorptiolevyt kiinteille paikoille. Taustamelun äänenpainetaso oli kuulokynnyksen alapuolella. Tallennus tehtiin kondensaattorimikrofonilla ja 2-kanavaisella tallentimella kahdessa pisteessä (A ja B), jotta saataisiin huomioitua myös huonemoodien aiheuttamat äänenpaineen vaihtelut tilassa. Kaksi eri tallennuspaikkaa mahdollisti sen, että teimme kaksi perättäistä psykoakustista koetta A ja B.

2.2 Psykoakustinen koe

Psykoakustisen kokeen ääninäytteet olivat noin 8 sekunnin mittaisia, koska useissa aiemmissa tutkimuksissa on osoitettu, että subjektiivinen arvio muodostuu jo muutaman sekunnin kuuntelun jälkeen. Äänityypit kävely, tasahyppely ja tuolintyöntö esitettiin alkuperäisellä tempollaan. Kumipallon ja teräspallon pudotukset esitettiin niin, että sama impulssi toistui 60 iskua minuutissa.

Tallennetut äänet esitettiin osallistujille Turku AMK:n psykoakustiikan laboratoriossa. Sen taustamelutaso oli normaalin ilmanvaihdon aikana erittäin matala, 14 dB L_{Aeq} (kuulokynnyksen alapuolella). Koeäänet esitettiin osallistujille kuulokkeilla (Beyerdynamic DT 1990). Kuulokkeiden taajuusvaste korjattiin käyttäen 1/3-oktaavikaistasuodatusta. Toiston voimakkuus mitattiin ennen tutkimusten aloittamista keinopäällä varmistaaksemme, että osallistujat kuulivat äänet täsmälleen samalla tavalla kuin ne oli tallennettu. Voimakkuudet säädettiin niin, että mitattu taso erosi korkeintaan 1,5 dB L_{Aeq} tasosta, joka oli mitattu iskuäänen tallennuksen aikana.

Taulukko 1. Puuvälipohjien askeleääneneristävyyden yksilukusuureiden arvot [dB].

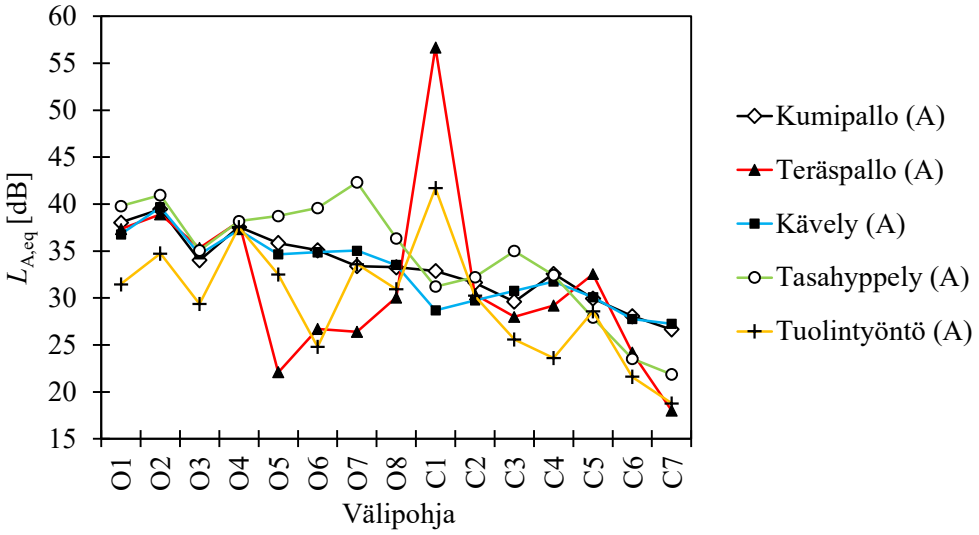
Välipohja	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
$L_{n,w}$	61	63	60	56	46	44	47	46	65	55	45	47	60	39	38
$L_{n,w} + C_{I,50}$	65	66	64	58	49	47	48	48	65	59	51	53	63	42	44
$L_{n,w} + C_{I,25}$	66	67	64	60	56	57	57	56	65	59	54	55	63	53	54

Psykoakustiseen kokeeseen osallistui 52 normaalikuuloista tutkittavaa (keski-ikä 27 v).

Koe koostui viidestä osasta: kuulokynnystestaus, ääniin perehtyminen, arviointiharjoittelu, Koe A (75 ääntä) ja Koe B (75 ääntä). Tässä artikkelissa esitetään vain kokeen A:n tulokset, koska tulokset olivat samankaltaiset kokeessa B.

Kokeessa arvioitiin äänien häiritsevyyttä käyttäen 11-portaista arviointiasteikkoa (0 Ei lainkaan, 10 Erittäin paljon). Osallistujien tuli kuunnella jokaista ääntä 8 sekunnin ajan ennen kuin arviointiasteikko tuli näkyviin. Ääni soi taustalla, kunnes arviointi annettiin.

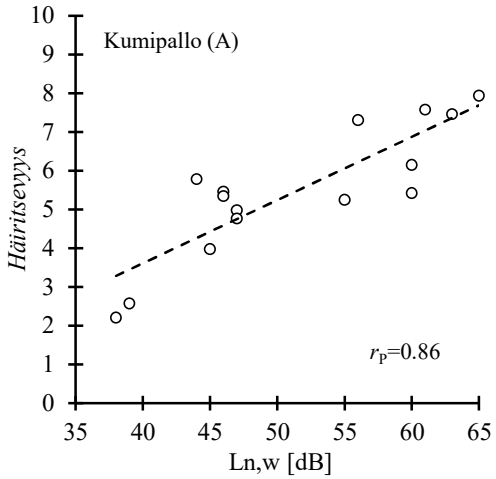
Tutkittavat äänet esitettiin blokeissa niin, että kunkin äänilajin äänet esitettiin kullekin 15 välipohjalle peräjälkeen. Sekä blokkien että blokkien sisäinen välipohjien järjestys satunnaistettiin niin, ettei kenelläkään tutkittavalla ollut samaa äänijärjestystä.



Kuva 3. A-painotettu ekvivalentti äänenpainetaso 75 koeäänelle kokeessa A (5 äänityyppiä, 15 välipohjaa). Taustamelun taso tallennusten aikana oli 16 dB.

Analyysissä selvitettiin yhteyttä kaikkien osallistujien keskimääräisten häiritsevyyksien ja välipohjien askeleäänikojeella mitattujen yksilukuarvojen välillä. Analyysi tehtiin käyttäen

Pearsonin korrelaatiokerrointa r_P. Korrelaatioanalyysi tehtiin erikseen jokaiselle äänityypille. Analyysimenetelmän esimerkki on esitetty kuvassa 4. Kertoimen arvot, jotka ylittivät 0,64, ovat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0{,}01$, 2-suuntainen käsittely). 52 osallistujan keskiarvoa oli mahdollista käyttää, koska 52 osallistujan vastaukset olivat suurelta osin normaalisti jakautuneita.



Kuva 4. Korrelaatioanalyysin havainnollistus. Kumipallon pudotuksen aiheuttaman häiritsevyyden ja askeläänitasoluvun $L_{n,w}$ välinen korrelaatio. Kukin ympyrä edustaa yhtä 15:sta välipohjasta.

3 TULOKSET

Tulokset on esitetty taulukossa 2. Mitä suurempi arvo, sitä parempi yhteys vallitsee yksilukuarvojen ja häiritsevyyden välillä. $L_{n,w}$ saavutti korkeimman arvon jokaiselle äänityypille. Korrelaatiokertoimien väliset erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkittäviä minkään äänityypin kohdalla. $L_{n,w}$ selitti siis luonnollisten iskuäänten aiheuttamaa häiritsevyyttä tilastolliselta kannalta yhtä hyvin kuin $L_{n,w}+C_{I,50}$ tai $L_{n,w}+C_{I,25}$.

Taulukko 2. Pearsonin korrelaatiokertoimet lattioille mitattujen objektiivisten yksilukuarvojen ja subjektiivisten häiritsevyyksien välillä äänilajeittain.

	Yksilukusuure		
Äänilaji	$L_{n,w}$	$L_{n,w} + C_{I,50}$	$L_{n,w} + C_{I,25}$
Kumipallo	0.86	0.81	0.84
Teräspallo	0.80	0.76	0.71
Kävely	0.69	0.68	0.68
Tasahyppely	0.59	0.54	0.57
Tuolintyöntö	0.75	0.65	0.64

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Spektripainotustermeillä $C_{I,50}$ tai $C_{I,25}$ ei lisätty selitysvoimaa sille, miten ihmiset kokevat luonnollisten iskuäänten häiritsevyyden. Häiritsevyyden selittämisen kannalta on riittävää suorittaa puuvälipohjien askeläänneneristävyyden mittaukset 100–3150 Hz:n taajuusalueella ja tiivistää askeläänneneristyskyky käyttäen yksilukusuureita $L_{n,w}$ (laboratorio) ja $L'_{nT,w}$ (rakennus).

4 KIITOKSET

Tutkimuksen rahoitti ympäristöministeriö (sopimus VN/14328/2019). Kiitämme rakennusmateriaalien toimittajia: VVR-Wood Oy, CLT Finland Oy ja Saint-Gobain Finland Oy.

VIITTEET

[1] Rasmussen, B. (2019). Sound insulation between dwellings – Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes. Proc. 23rd Int. Congr. Acoust. ICA 2019, 5102–5109. 9–13 Sep 2019, Aachen, Germany.

[2] Ljunggren, F., Simmons, C. (2022). Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, Part III. Appl. Acoust. 197 108955 10 pp.

[2] Hongisto, V., Laukka, J., Alakoivu, R., Virtanen, J., Hakala, J., Linderholt, A., Jarnerö, K., Olsson, J., Keränen, J. (2023). Suitability of standardized single-number ratings of impact sound insulation for wooden floors – Psychoacoustic experiment. Building and Environment 244 110727. Avoin pääsy: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110727.

[4] Hongisto, V., Alakoivu, R., Virtanen, J., Hakala, J., Saarinen, P., Laukka, J., Linderholt, A., Olsson, J., Jarnerö, K., Keränen, J. (2023). Sound insulation dataset of 30 wooden and 8 concrete floors tested in laboratory conditions. Data in Brief 49 109393. Avoin pääsy: https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109393.

[5] Hongisto, V., Keranen, J., Laukka, J., Alakoivu, R., Hakala, J., Virtanen, J. (2023). TUAS 2023 Floor Sound Insulation Rev1. Mendeley Data, 16 Jun. Avoin pääsy: https://data.mendeley.com/datasets/y83p8mpryd/2.

[6] Hongisto, V., Alakoivu, R., Virtanen, J., Hakala, J., Laukka, J. & Keränen, J. (2023). Puu- ja betonivälipohjien ääneneristävyyden laboratoriomittaustuloksia. Turun ammattikorkeakoulun tutkimuksia 52, Turun ammattikorkeakoulu, Turku. ISBN 978-952-216-858-0. Avoin pääsy: https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-216-858-0.