

Askelääneneristyksen mittausmenetelmän ongelmien tausta

Mikko Kylliäinen

Tiivistelmä. Askelääneneristyksen mittausmenetelmän muotoutuminen alkoi 1930-luvulla äänilähteen kehittämisestä. Askelääneneristyksen oikeaa mittaustapaa on etsitty siitä lähtien, mutta edelleenkin ei ole pystytty löytämään menetelmää, joka kaikissa olosuhteissa vastaisi ihmisten subjektiivisia käsityksiä välipohjien paremmuusjärjestyksestä. Kritiikkiä nykyisin käytössä olevaa menetelmää kohtaan alettiin esittää pian sen standardoimisen jälkeen 1960-luvulla. Tämän artikkelin tarkoituksena on selvittää tutkimuskirjallisuuden avulla, miten askelääneneristyksen mittausmenetelmä on kehittynyt, mitkä ovat sen ongelmat ja miten ongelmia on yritetty ratkaista.

Avainsanat: ääneneristys, rakennusakustiikka, askelääneneristys

Johdanto

Akustiikassa käytettävien suunnittelu- ja mittausmenetelmien kehittymiseen ovat vaikuttaneet akustiikan ja muiden tieteenalojen edistymisen lisäksi eri aikoina työskennelleiden tutkijoiden ratkaisut, joiden joukossa on edelleen vaikuttavia virheitä ja väärinkäsityksiä. Esimerkiksi rakennusakustisten mittausten taajuusalueen alarajaksi valittiin 100 Hz siksi, että menetelmiä 1940- ja 1950-luvulla kehittäneiden tutkijoiden mielestä mittaaminen tätä matalammilla taajuuksilla olisi ollut liian epävarmaa [1–2]. Asiaa ei perusteltu tarkemmin eikä olisi voitukaan perustella, koska esimerkiksi Schroederin äänikentän tilastollisia ominaisuuksia koskeva työ oli tuolloin kesken [3]. Nykyisin kuitenkin tiedetään, että askelääneneristysmittauksissa mittaaminen 50 Hz taajuuskaistalla ei ole juuri epätarkempaa kuin mittaaminen 200 Hz taajuuskaistalla [4].

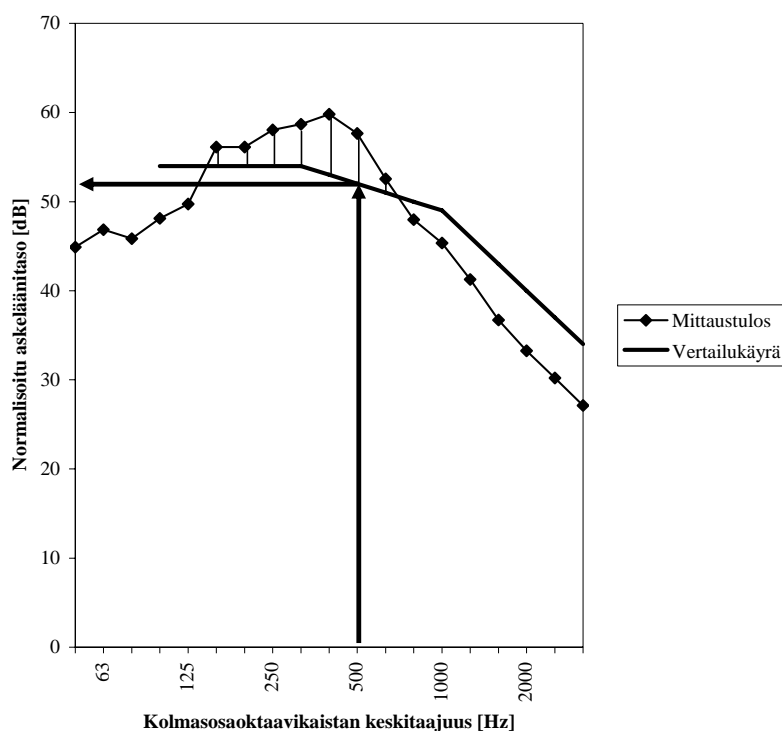
Monilla menetelmillä on pitkä historia, jonka tunteminen helpottaa niiden puutteiden ymmärtämistä. Askelääneneristyksen mittausmenetelmän muotoutuminen alkoi 1930-luvulla äänilähteen kehittämisestä. Kritiikkiä nykyisin käytössä olevaa menetelmää kohtaan alettiin esittää pian sen standardoimisen jälkeen 1960-luvulla.

Mittausmenetelmän kehittyminen

Ennen 1930-lukua askelääneneristystä oli arvioitu subjektiivisilla menetelmillä: kuulaa pudotettiin lattiaan eri korkeuksilta ja koehenkilöt kuulostelivat syntyvää ääntä. Askelääneneristystä kuvaava indeksi vastasi korkeutta, jolta pudonnutta kuulaa koehen-

kilöt eivät enää havainneet [5–6]. 1930-luvun tutkijat pitivät kuitenkin tarpeellisena kehittää objektiivinen laite, jonka tuottama ääni vastaisi ”normaalaa askelääntä”. Vuosikymmenen loppuun mennessä tällaisiksi ajateltuja laitteita oli käytössä Saksassa, Britanniassa ja Yhdysvalloissa [6–8].

Ensimmäinen ehdotus askeläänikokeen standardoimiseksi tehtiin ilmeisesti Saksassa 1936 [6]. Standardoitavaksi ehdotetun kojeen ominaisuudet oli määritelty jokseenkin samalla tavalla kuin nykyisin: viisi 500 grammaa painavaa teräslieriötä putoaa 4 cm korkeudelta kukin kahdesti sekunnissa. Tutkittavan rakenteen alapuolella mitattiin kokonaisäänitaso. Mittaustulos normalisoitiin taajuusalueella 600–1200 Hz mitatun keskimääräisen absorptioalan suhteella 1 m^2 vertailuabsorptioalaan. Askeläänitasojen mittaamista taajuuskaistoittain ehdotettiin vuonna 1947 [9], koska saksalainen menetelmä oli osoittautunut epäluotettavaksi. Välipohjaa verrattiin normivälipohjaan. Mittaluku oli mitatun rakenteen ja normivälipohjan tuottamien äänenpainetasojen erotusten keskiarvo 125-1600 Hz taajuusalueella. Seuraavana vuonna menetelmän standardointia ehdotettiin Lontoossa pidetyssä kansainvälisessä konferenssissa [10].



Kuva 1. Askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ luetaan 500 Hz kohdalta vertailukäyrältä, jonka paikka määrätty mittaustulosten ja vertailukäyrän välisten epäsuotuisten poikkeamien perusteella.

Gösele [11] aloitti 1949 uuden askelääneneristystä kuvaavan mittaluvun kehittämisen esittämällä menetelmälle vaatimukset. Vertailukäyrä askel- ja ilmäääneneristysluvun määrittämiseksi kehitettiin Saksassa 1950-luvulla [1]. Tällöin ryhdyttiin mittaamaan kojeen tuottamia askeläänitasoja oktaavi- tai kolmannesoktaavikaistoittain. Normalisoinnin vertailuabsorptioalaksi määriteltiin 10 m^2 . Mittausalueeksi valittiin 100–3200 Hz, koska korkeammilla taajuuksilla askeläänitasoilla ei ole käytännön merkitystä ja matalampien taajuuksien mittausepävarmuutta pidettiin liian suurena. Ver-

tailukäyrä määriteltiin vastaamaan käytännössä hyväksi todettua ja taloudellisesti toteuttamiskelpoista välipohjarakennetta. Vertailukäyrän matalan pään vaakasuoraa osaa tasolla 70 dB pidettiin subjektiivisen kokemisen siedettävänä raja-arvona. Mittaustulos ilmoitettiin normikäyrän ja mittaustulosten perusteella paikalleen asetetun vertailukäyrän erotuksena.

Askeläänikoje standardoitiin vuonna 1960 standardissa ISO R140 ja vertailukäyrä vuonna 1968 standardissa ISO R717. Mitatut askeläänitasot saivat poiketa epäsuuntaan suuntaan enintään 32 dB. Yksittäisellä taajuuskaistalla poikkeama sai olla enintään 8 dB. Säännöt sallituista poikkeamista poistettiin standardeja uudistettaessa vuosina 1978 ja 1982. Viimeksi standardit on uudistettu vuosina 1996–1998, jolloin esitettiin ns. spektripainotusermit. Mittaustapaa koskevien ohjeiden tarkentuessa perusajatus rakenteiden askelääneneristykseen mittaamisessa on säilynyt samana: äänilähteenä on 70 vuotta sitten kehitetty askeläänikoje ja askelääneneristystä arvostellaan 50 vuotta käytössä olleella vertailukäyrämenettelyllä (kuva 1).

Standardimenetelmän ongelmia

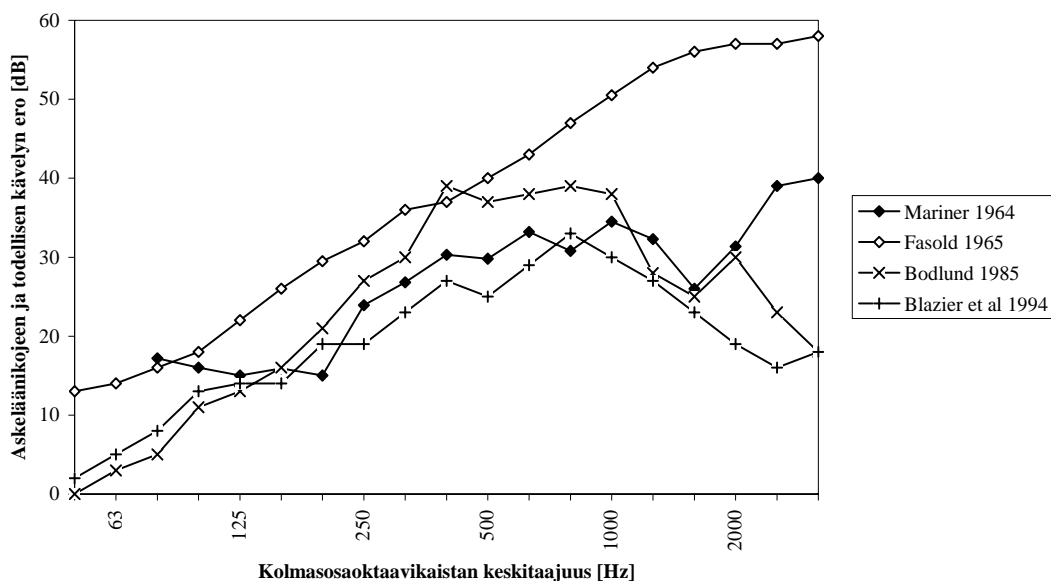
Ensimmäiset askeläänikojetta kritisoivat tutkimukset julkaistiin 1960-luvun alussa pian kojeen standardoimisen jälkeen. Jo Gösele oli vuonna 1949 todennut, että askeläänikojeen vasaran massan ja pudotuskorkeuden vuoksi koje tuottaa niin korkeita äänitasoja, että korvan herkkyys on yleensä suunnilleen yhtä suuri riippumatta taajuudesta [11]. Kojeen ominaisuudet oli valittu näin, jotta mittauksia pystyttäisiin luotettavasti suorittamaan. Kävelyn tuottamat äänitasot ovat kojeeseen verrattuna pienempiä, ja korvan herkkyys riippuu taajuudesta.

Todellisten askeläänien äänispektrit painottuvat matalalle taajuusalueelle [2, 12]. Askeläänikojeen tuottamat äänitasot ovat kävelyyn verrattuna sitä suurempia, mitä korkeampi taajuus on. Fasold ulotti 1965 tutkimuksensa 50 Hz asti; tällä taajuuskaistalla kävelyn ja kojeen aiheuttamien äänitasojen ero oli pienimmillään (kuva 2). Myös Watters [13] totesi 1968, että askeläänikojeen tuottama äänispektri sisältää enemmän komponentteja korkealla taajuusalueella kuin todelliset askeläänit kävelystä korkeakorkoisilla kengillä. Vastaavat tulokset saatiin myös Alankomaissa 1976 tehdyssä tutkimuksessa [14].

Vuonna 1973 osoitettiin, että puuvälipohjien askelääneneristykseen kannalta merkittävimpiä ovat todellisista askelista syntyvät äänitasot 80 Hz keskitaajuudella tai alemmilla kaistoilla. Standardin mukainen menetelmä jättää siten oleellisimman taajuusalueen kokonaan vaille huomiota [15]. Pohjois-Amerikan puukerrostaloissa matalat askeläänit on havaittu ongelmallisiksi muissakin tutkimuksissa 1970-luvulta alkaen [16–17].

Standardikokeella saadaan yleisesti selville lähinnä rakenteen vaste herätteenä toimivalle standardikojeelle. Koska kojeen tuottama ja todellinen heräte eivät vastaa toisiaan, on mahdollista, että välipohjarakenteiden arviointi kojeen tuottaman herätteen perusteella asettaa rakenteet väärään järjestykseen subjektiivisen aistimuksen kannalta. Esimerkiksi massiivisen betonirakenteen ja kelluvan rakenteen tuottama kuuloaistimus on erilainen, mutta kelluva lattia saa paremman askeläänitasoluvun standardikokeessa [4]. Siten vertailukäyrään perustuva askeläänitasolukukaan ei korreloi kovin hyvin asukkaiden subjektiivisen aistimuksen kanssa. Asumistottumukset ovat muuttuneet as-

keläänikojeen standardointivuodesta, mutta vastaavia tutkimustuloksia on joka vuosikymmeneltä 1960-luvulta saakka. Ruotsissa saatujen tulosten [18] mukaan korrelaatio askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ ja asukkaiden subjektiivisten havaintojen välillä on 60 %. Menetelmä on alun perin kehitetty massiivisten kivrakenteisten välipohjien askeläänispektrien perusteella ja se toimii edelleen varsin hyvin niitä arvioitaessa. Sitä vastoin kevytrakenteiset puu- ja teräsvälipohjat sekä ohuilla kelluvilla rakenteilla päällystetyt kivrakenteiset välipohjat poikkeavat äänispektriltään suuresti massiivisista rakenteista, eikä askeläänitasoluku kuvaa niiden ääniominaisuuksia riittävän hyvin.



Kuva 2. Esimerkkejä askeläänikojeen ja kävelyn tuottamien äänenpainetasojen eroista.

Äänilähteen kehittämismahdollisuudet

Askelääniä ovat kävelyn tuottamien äänien lisäksi muun muassa putoavista esineistä ja huonekalujen siirtämisestä syntyvät äänet. Kävelystä aiheutuvat äänet riippuvat muun muassa kävelijän sukupuolesta, massasta ja kävelytyylistä sekä kengistä. Askelääneneristyksen arvioinnissa lähtökohtana on pidetty kävelystä aiheutuvia ääniä, vaikka esimerkiksi lasten juoksu ja leikkimisen äänet on koettu kävelyä häiritsevämmiksi. Yhtenä ratkaisuna ongelmaan on esitetty askeläänikokeiden suorittamista niin, että koehenkilöt kuuntelevat, kun erilaiset ihmiset kävelevät erilaisissa rakennuksissa. Tällöin saataisiin kuitenkin tietoa vain siitä, kuinka tyydyttäviä erilaiset rakenteet ovat. Sitä vastoin subjektiiviset kokeet eivät tuottaisi fysikaalista tietoa siitä, miksi näin on. Subjektiivinen arviointi on kuitenkin ainoa menetelmä, joka täysin varmasti tuottaa asukkaiden kanalta ”oikean” tuloksen [12, 19].

Standardien mukaisen mittaus- ja arviointimenetelmän korvaamiseksi on yritetty kehittää askeläänikojeen korvaava uusi koje. Lindblad [20] kokeili 1968 modifioitua standardikojetta, jossa vasaroiden pudotuskorkeus oli säädetty pienemmäksi. Muunnellun kojeen ääni saatiin korreloimaan häiritsevimpänä pidetyn todellisen askeläänien, korkeakorkoisilla kengillä kävelevän naiskävelijän, kanssa. Lindblad päätyi ehdot-

tamaan erilaisten todellisten askelherätteiden tutkimista ja askeläänikojeen kehittämistä vastaamaan paremmin niitä. Todelliseen askelten herätteeseen vaikuttaa myös kulttuuri: Japanissa häiritsevimpänä äänenä on pidetty lasten hyppimistä tatamimatolla. Tätä ääntä on simuloitu kojeella, joka iskee rengasta lattiaan tietyltä korkeudelta. Maissa, joissa puukengät ovat käytössä, tarvittaisiin erilainen heräte [16]. Nykyisin tällainen tarve tosin lienee poistumassa. Norjassa on tutkittu kumipalloa pudottavaa kojetta äänilähteenä [21]. Monet standardikojeen vaihtoehdoksi esitetyt vaihtoehtoiset kojeet ovat osoittautuneet epäkäytännöllisiksi, kuten 1960-luvulla ideoitu kävelyrobotti. Useimmat esitetyt kojeet ovatkin jääneet tutkijoiden omiksi kokeiluiksi.

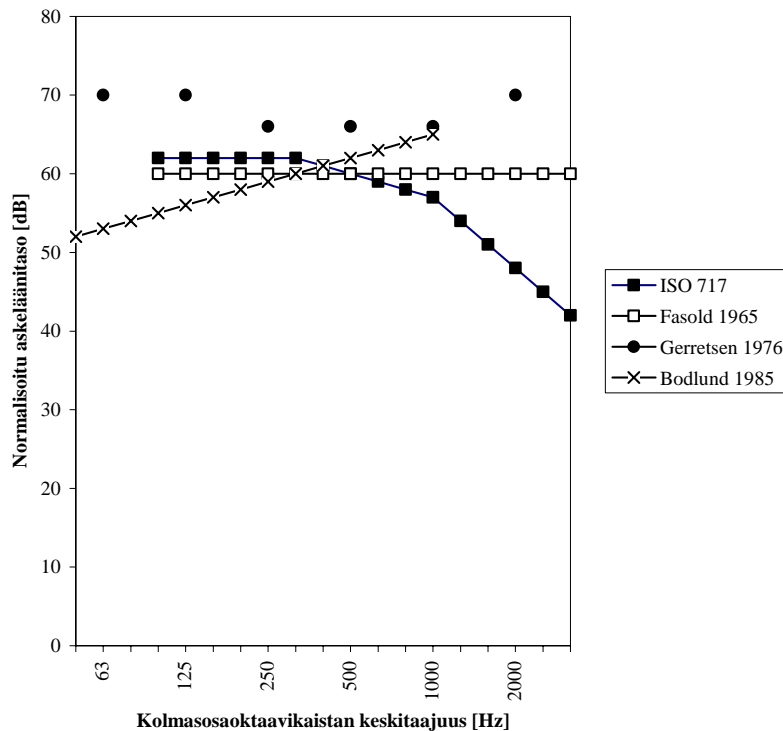
Schultz [16] totesi 1976, että kojeen ja kävelyn tuottaman äänitason ei tarvitse olla sama, mutta niiden erotuksen tulisi olla vakio riippumatta lattianpäällysteestä tai välipohjarakenteesta. Erotus ei kuitenkaan voi olla vakio, vaan se muuttuu välipohjan massan, lattianpäällysteen ja kantavan rakenteen vaihdellessa. Siksi kävelyä tai muuta lattiaan kohdistuvaa herätettä kaikissa tapauksissa vastaavaa äänilähdettä on vaikeaa tai jopa mahdotonta suunnitella.

Vertailukäyrämenettelyn kehittämismahdollisuudet

Ongelmaa on myös lähestytty toisella tavalla: lähtökohtaisesti on hyväksytty nykyinen koje äänilähteeksi, mutta sen puutteet on pyritty korvaamaan kehittämällä uusi vertailukäyrä – tällöin menetelmä kokonaisuutena vastaisi subjektiivista kuuloaistimusta. Fasold [2] tutki koe-henkilöiden tuottamien askeläänispektrien lisäksi huonekalujen siirtämisen ja imuroinnin aiheuttamia äänispektrejä. Niiden ja askeläänikojeen erotusten perusteella hän määrittä korjaus-käyrän ”keskimääräiselle asumismelulle”. Tuloksena oli uusi vaakasuora vertailukäyrä (kuva 3). Käyrä alkoi 100 Hz keskitaajuudesta, vaikka Fasold totesi 100 Hz alhaisempien taajuus-kaistojen suuren merkityksen. Fasoldin esittämän käyrän todettiin vastaavan asukkaiden käsityksiä ISO-käyrää paremmin myös Pohjois-Amerikassa tehdyssä tutkimuksessa [19].

Gerretsen [14] esitti 1976 vertailukäyrän, joka perustui NR-käyriin. Kävelyn äänispektrin NR-arvo määräytyi tutkimuksessa yleensä taajuusalueen 250-500 Hz perusteella. Gerretsen lisäsi NR 45 -käyrään askeläänikojeen ja todellisen kävelyn äänispektrin eron oktaavikaistoittain, jolloin tuloksena oli kuvassa 3 esitetty vertailukäyrä.

Vaihtoehtoisista vertailukäyristä laajimmin käytetty lienee Bodlundin 1985 [22] kehittämä käyrä (kuva 3). Sitä on käytetty erityisesti Pohjoismaissa 1990-luvulla kehitettäessä puurakenteista kerrostaloa [23–24]. Bodlundin tutkimus sai alkunsa 1980-luvun alussa Norjassa havaituista ongelmista puuvälipohjien askelääneneristyksessä. Löytääkseen asukkaiden subjektiivisten arvioiden kanssa parhaiten korreloivan vertailukäyrän Bodlund generoi erimuotoisia käyriä. Korrelaatio mittaustuloksen ja asukkaiden subjektiivisen arvion kanssa oli sitä parempi, mitä enemmän vertailukäyrä painotti pieniä taajuuksia 50–100 Hz [22].



Kuva 3. Standardissa ISO 717-2 esitetyn vertailukäyrän korvaavaksi vertailukäyräksi esitettyjä vaihtoehtoja.

Johtopäätökset

Gösele määritteli vuonna 1949 vaatimukset askelääneneristyksen mittaamenetelmälle [11]: ”Välipohjarakenteen arvostelua varten tarvitaan objektiivinen mittaamenetelmä, jonka tuottamat mittaustulokset vastaavat mahdollisimman hyvin kävelyn aiheuttamaa kuuloaistimusta. Kun kaksi välipohjarakennetta tuottaa samanlaisen kuuloaistimuksen, myös mittaamenetelmän tulee tuottaa sama mittaustulos.” Mariner määritteli mittaamenetelmälle vuonna 1964 seuraavat vaatimukset [12]: tarvitaan objektiivinen äänilähde; äänilähteen tuottama ääni on kyettävä mittaamaan ja analysoimaan fysikaalisesti; fysikaaliset mittaustulokset on muutettava lukuarvoksi, joka vastaa subjektiivista käsitystä hyvistä ääniolosuhteista; kyseiselle luku-arvolle pitää olla olemassa raja-arvo, joka määrittelee hyväksyttävän rakenteen.

Askelääneneristysmittausten ongelmat tiivistyvät Marinerin luettelon kolmanteen kohtaan: vieläkään ei tiedetä, mikä taajuusalue on askeläänten subjektiivisen kokemuksen kannalta oleellinen ja minkälainen äänispektri on edullinen tai häiritsevä. Ongelmana on lisäksi fysikaalisten suureiden muuntaminen ihmisen kokemuksia vastaavaksi mittaluvuksi. Nykyistä menetelmää korvaavaa mittaustapaa ei ole onnistuttu kehittämään, mutta mitattavan taajuusalueen laajentaminen 50 Hz saakka on saanut yhä laajempaa tukea. Ratkaisua fysikaalisten suureiden muuntamiseen subjektiivista kokemusta vastaaviksi mittaluvuksi etsitään äänekkyydestä.

Lähteet

1. Cremer, L., *Der Sinn der Sollkurven. Schallschutz von Bauteilen*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960.
2. Fasold, W., *Untersuchungen über den Verlauf der Sollkurve für den Trittschallschutz im Wohnungsbau*, *Acustica* 15(1965), 271–284.
3. Schroeder, M. R., *Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen*, *Acustica* 4(1954), 594–600.
4. Kylliäinen, M., *Uncertainty of impact sound insulation measurements in field*. Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, Research Report 125, Tampere 2003.
5. Hofbauer, G., *Ein Trittschallmaßstab*, *Gesundheitsingenieur* 58(1935), 109–111.
6. Gastell, A., *Schalldämmungen in der Praxis und Vorschläge zur Normung des Schallschutzes von Wohnungstrennwänden und Decken*, *Akustische Zeitschrift* 1(1936), 24.
7. Kaye, G. W. C., *The acoustical work of the national physical laboratory*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 7(1936), 167–177.
8. Lindahl, R. & Sabine, H., *Measurement of impact sound transmission through floors*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 11(1940), 401–405.
9. Ingerlev, F., Nielsen, A. K. & Larsen, S. F., *The measuring of impact sound transmission through floors*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 19(1947), 981–987.
10. Beranek, L., *A report on the international conference on acoustics, London 1948*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 21(1949), 264–269.
11. Gösele, K., *Zur Meßmethodik der Trittschalldämmung*. *Gesundheitsingenieur* 70(1949), 66–70.
12. Mariner, T., *Technical problems in impact noise testing*. *Building Research* 1(1964), 53–60.
13. Watters, B. G., *Impact noise characteristics of female hard heeled foot traffic*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 37(1968), 619–630.
14. Gerretsen, E., *A new system for rating impact sound insulation*, *Applied Acoustics* 9(1976), 247–263.
15. Belmondo, V. E., Heebink, T. E. & Brittain, F. H., *Ranking the impact sound transmission of wood-framed floor-ceiling assemblies*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 54(1973), 1433–1441.
16. Schultz, T. J., *Alternative test method for evaluating impact noise*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 60(1976), 645–655.
17. Blazier, W. E. & Dupree, R. B., *Investigation of low-frequency footfall noise in wood-frame, multifamily building construction*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 96(1994), 1521–1533.
18. Hagberg, K., *Ratings adapted to subjective evaluation for impact and airborne sound and its application in building regulations – a literature survey*, 17th International Congress on Acoustics, Rooma 2.–7.9.2001.
19. Olynyk, D. & Northwood, T. D., *Assessment of footstep noise through wood-joist and concrete floors*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 43(1968), 730–733.

20. Lindblad, S., *Impact sound characteristics of resilient floor coverings*, Lund Institute of Technology, Division of Building Technology, Bulletin 2, Lund 1968.
21. Homb, A., *Ball method for combined low frequency sound insulation and vibration measurements*, COST Action E5 Workshop “Acoustic performance of medium-rise timber buildings”, Dublin, 3.–4.12.1998.
22. Bodlund, K., *Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings*, Journal of Sound and Vibration 102(1985), 381–402.
23. Keronen, A. & Kylliäinen, M., *Sound insulating structures of beam-to-column framed wooden apartment buildings*. Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering. Publication 77, Tampere 1997.
24. Hveem, S., *Trehus i flere etasjer – Lydteknisk prosjektering*. Norges byggforskningsinstitutt. Anvisning 37, Oslo 2000.

Mikko Kylliäinen
Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy
Pinninkatu 58 A
33100 Tampere