

ÄÄNENERISTYSMITTAUSTEN MITTAUSEPÄVARMUUDEN ARVIOINTI

Henry Niemi¹, Mikko Kylliäinen² ja Antti Mikkilä¹

¹ Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy
Pinninkatu 58 A, 33100 TAMPERE
etunimi.sukunimi@helimaki.fi

² Tampereen teknillinen yliopisto
Rakennustekniikan laitos
PL 600, 33101 TAMPERE
mikko.kylliainen@tut.fi

1 JOHDANTO

Fysikaalisten suureiden määrittämiseen mittauksin liittyy aina epävarmuutta. Jotta mittaustuloksiin ylipäättään voitaisiin luottaa, tämä epävarmuus tulisi tuntea riittävällä tarkkuudella ja ottaa jollakin tavalla huomioon tuloksia raportoitaessa. Ääneneristysmittausten tuloksista kuitenkin harvoin ilmoitetaan mittausraporteissa epävarmuusarvioita, vaikka standardeissa mitta-usepävarmuuden määrittämiseksi on esitetty toistettavuuden ja uusittavuuden käsitteet [1]. Käytännössä näitä epävarmuusarvioita on tehty varsin vähän, mikä johtunee erityisesti menetelmän monimutkaisuudesta ja raskaudesta.

Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty standardimenettelylle vaihtoehtoisia tapoja mitta-usepävarmuuden arvioimiseksi. Ne perustuvat yleensä joillakin kriteereillä yleistettyihin äänikentän suureiden (äänenpainetaso, jälkikaiunta-aika) hajontoihin, mutta käytännössä äänikentän ominaisuudet ja hajonta ovat aina tilakohtaisia ilmiöitä. Epävarmuusarvion tarve tulee merkittäväksi silloin, kun mitattu suure on yhtä suuri tai hieman heikompi kuin tavoitteena ollut raja-arvo. Tällöin olisi tärkeää tietää mitta-usepävarmuuden suuruus juuri tässä kyseisessä mittaustilanteessa. Jos yksittäisen mittaustuloksen mitta-usepävarmuus on tuntematon, on mahdollista, että vaatimukset tosiasiallisesti täyttävä rakenne voidaan katsoa mittaustuloksen perusteella virheelliseksi tai epäkelpo rakenne tulkita vaatimukset täyttäväksi. Tämän artikkelin tarkoituksena on luoda katsaus siihen, millaisin tavoin ääneneristävyuden mittalukujen epävarmuutta on pyritty arvioimaan.

2 STANDARDIN MUKAINEN EPÄVARMUUSARVIO

Standardissa ISO 140-2 [1] on esitetty standardien ISO 140-4 ja 140-7 [2–3] mukaan mitattujen suureiden, ilmaääneneristävyuden ja askelääneneristävyuden, epävarmuuskäsitteet, niiden määrittäminen, ja niiden soveltaminen mittaustuloksen varmentamiseen. Epävarmuuskäsitteet perustuvat toistuviin itsenäisiin mittauksiin samanlaisissa olosuhteissa. Mittaustulosten keskihajonnoista määritellään epävarmuudelle mittaluvut toistettavuus ja uusittavuus (*repeatability* ja *reproducibility*).

Toistettavuus r kuvaa yksittäisten mittaustulosten erotusta tilanteessa, jossa toisistaan riippumattomat mittaukset on tehty lyhyen aikavälin sisällä, identtisellä testimateriaalilla, samassa laboratorioissa, samalla laitteistolla ja saman mittaajan toimesta. Uusittavuudella R taas kuvataan tulosten erotusta tilanteessa, missä mittaukset on tehty identtisellä testimateriaalilla, mutta eri laboratorioissa, eri laitteistolla ja eri mittaajan toimesta. Toistettavuus ja uusittavuus il-

moittavat määritelmän mukaisesti kahden toistettavuus- tai uusittavuuskriteerien mukaisesti suoritettun mittauksen suurimman erotuksen 95 % todennäköisyydellä.

Standardissa ISO 140-2 [1] on taulukoitu terssikaistoittain vuosina 1976–1986 tehtyjen laboratoriodenvälisten testien perusteella laskettuja toistettavuus- ja uusittavuusarvoja ilmaääneneristävyydelle. Uusittavuusarvot on taulukoitu erikseen laboratoriomittauksille ja kenttämittauksille, vaikka ilmaääneneristävyydelle ne ovat kummassakin tapauksessa samat. Ilmaääneneristysluvun R_w epävarmuudesta on standardissa [1] mainittu ainoastaan se, että yksinumeroisille suureille on kokemuksen perusteella laboratoriossa mahdollista saada aikaan toistettavuudelle arvo 1 dB ja uusittavuudelle 1...3 dB. Toisin sanoen yksittäisen ilmaääneneristysluvun laboratoriomittauksen 95 % epävarmuus on 1...3 dB välillä. Kenttämittauksen ilmaääneneristysluvulle ei ole standardissa ilmoitettu epävarmuusarviota lainkaan.

Parhailtaan on valmisteilla standardin ISO 140-2 korvaava standardi ääneneristysmittausten epävarmuuden arvioimiseen [4]. Standardiluonnoksessa esitettävät menetelmät perustuvat toistettavuus- ja uusittavuusarvoihin eikä yksittäisen mittaustuloksen mittausedpävarmuutta suoranaisesti edelleenkaan johdeta.

3 KIRJALLISUUDESSA ESITETTYJÄ TULOKSIA JA MENETELMIÄ

Ääneneristysmittausmenetelmät kehittyivät pitkän ajan kuluessa 1930-luvulta 1960-luvulle [esim. 5–8]. Äänikentän tilastolliset ominaisuudet sekä mitattavien suureiden mittausedpävarmuus tulivat tutkijoiden kiinnostuksen kohteeksi 1950-luvulta alkaen erityisesti Schroederin ja Kuttruffin työn johdosta [9–10]. Analyttisin ja kokeellisin menetelmin haettiin mm. raja-taajuutta, jonka yläpuolella äänikenttä voitiin katsoa diffuusiksi, selvitettiin äänikentän paikasta ja jälkikaiunta-ajasta riippuvia hajontaominaisuuksia sekä herätteen vaikutusta äänikentän ominaisuuksiin [esim. 11–14].

Teoreettiset tarkastelut eivät antaneet suoraan vastausta siihen, millainen yksittäisen mittaustuloksen epävarmuus voi olla. Tutkijat ovat pyrkineet arvioimaan mittausedpävarmuutta myös määrittämällä mittaustulosten hajontaa laboratorio- ja kenttämittauksissa. Kenttämittauksista aineistoa on huomattavasti vähemmän kuin laboratoriomittauksista, mikä johtunee siitä, että tutkimuslaitoksilla on paljon enemmän laboratorioaineistoa käytettävissään [15–22]. Selvitämällä mitattavien suureiden – äänenpainetasojen ja jälkikaiunta-ajan – hajontaa eri taajuus-alueilla voidaan arvioida mittausedpävarmuutta taajuuden suhteen, mutta luottamusvälilausekkeiden johtaminen rakennusakustiikan mittaluvuille, jotka määräytyvät 16 terssikaistalla mitatuista arvoista vertailukäyräalgoritmilla on analyttisesti jokseenkin mahdotonta tai vähintäänkin monimutkaista.

Vuonna 2003 Goydke et al [23] ehdottivat, että standardin ISO 140-2 [1] mukaisista toistettavuuden ja uusittavuuden käsitteistä luovuttaisiin kokonaan, ja esittivät vaihtoehtoisen tavan tutkia mittausedpävarmuutta Monte Carlo -menetelmäksi kutsuttavan numeerisen simuloinnin avulla. Esimerkkinä tutkimuksessa käytettiin ilmaääneneristysluvun R_w laboratoriomittauksia. Jokaista terssikaistoittain mitattua ilmaääneneristävyyttä R kuvattiin todennäköisyysjakaumana. Yksittäisellä simulaatiokerralla poimittiin ilmaääneneristävyyden jakaumasta satunnainen arvo kullakin 16 terssikaistalla, minkä jälkeen laskettiin ilmaääneneristysluku R_w . Simulointia toistamalla saatiin tulokseksi ilmaääneneristysluvun R_w todennäköisyysjakauma. Menetelmä edellytti siten tietoa ilmaääneneristävyyksien R hajonnasta kullakin 16 terssikaistalla. Tutkimuksessa nämä hajonnat johdettiin standardissa ISO 140-2 [1] esitetyistä uusittavuusarvoista.

Wittstockin tutkimuksessa vuodelta 2006 [24] johdettiin analyttinen menetelmä ilmaääneneristysluvun R_w epävarmuuden määrittämiseksi. Epävarmuus lasketaan menetelmän mu-

kaan terssikaistoittain ilmaääneneristävyyksien R epävarmuuksista. Ilmaääneneristävyyksien R epävarmuutta ei tutkittu, vaan ne johdettiin jälleen standardin ISO 140-2 [1] uusittavuusarvoista. Tulokset tarkistettiin Goydken et al tapaan Monte Carlo -simuloinnilla [12]. Wittstock selvitti myös, kuinka ilmaääneneristysluvun R_w määrittäminen vertailukäyrämenetelmällä useamman desimaalin tarkkuudella vaikuttaa sen odotusarvoon. Ilmaääneneristysluvun odotusarvo nousee noin 0,5 dB kun se lasketaan 0,01 dB tarkkuudella. Wittstock suosittelikin, että ilmaääneneristysluvun laskenta tulisi tehdä yhden desimaalin tarkkuudella.

Kenttämittaustulosten mittausepävarmuusarviot ovat paljolti perustuneet mittausten toistamiseen joko niin, että sama mittaaja tekee mittaukset samalla kalustolla tai niin, että mittauksia toistettaessa tekijä ja kalusto vaihtuvat [esim. 22]. Tällainen menettely ei kuitenkaan yleensä ole mahdollinen, vaan mittausepävarmuutta tulisi pystyä arvioimaan yksittäisen mittaustapah-tuman perusteella ilman toistoja. Navacerradan et al [25] tutkimuksessa käytettiin ilmaääneneristyslukujen R'_w ja askeläänitasolukujen $L'_{n,w}$ mittausepävarmuuden arvioimiseen kenttämittauksissa havaittuja äänenpainetasojen ja jälkikaiunta-aikojen hajontoja, mutta tutkimuk-sen tarkoituksena ei niinkään ollut selvittää mittausepävarmuuden suuruutta vaan tehdä verta-luja erilaisten epävarmuusarviomenetelmien välillä.

4 ESIMERKKI: ILMAÄNENERISTYSLUVUN R'_w SIMULOINTI

4.1 Monte Carlo -menetelmä

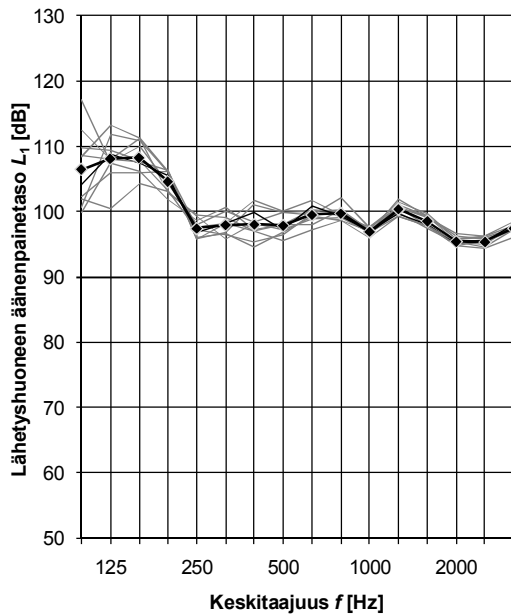
Monte Carlo -menetelmä on yleinen nimitys laskentamenetelmälle jossa ongelmalle luodaan laskentamalli, generoidaan satunnaisesti suuri määrä lähtöarvoja ja toistetaan laskenta useita kertoja vaihdellen näitä arvoja joka laskentakerralla [26]. Otetaan esimerkiksi yksinkertainen laskentamalli $x = a \cdot b$. Jos halutaan tutkia miten suure x muuttuu arvojen a ja b vaihdellessa, voidaan generoida satunnaisesti, esimerkiksi normaalijakauman mukaan, joukko lähtöarvo-ja $\{a_1, a_2$ ja $a_3\}$ sekä $\{b_1, b_2$ ja $b_3\}$. Tämän jälkeen x :n arvoja aletaan laskea numeerisesti eri lähtöarvoilla a ja b taulukon 1 mukaisesti. Simuloinnin tuloksena saadaan aikaan tarkastelta-van suureen todennäköisyysjakauma.

Taulukko 1. Yksinkertainen esimerkki Monte Carlo -menetelmällä lasketuista tuloksista.

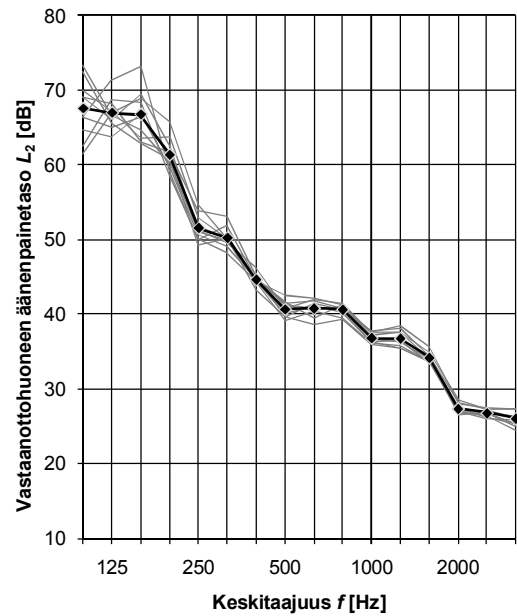
$x_{11} = a_1 \cdot b_1$	$x_{21} = a_2 \cdot b_1$	$x_{31} = a_3 \cdot b_1$
$x_{12} = a_1 \cdot b_2$	$x_{22} = a_2 \cdot b_2$	$x_{32} = a_3 \cdot b_2$
$x_{13} = a_1 \cdot b_3$	$x_{32} = a_2 \cdot b_3$	$x_{33} = a_3 \cdot b_3$

4.2 Ilmaääneneristysluvun R'_w simulointi

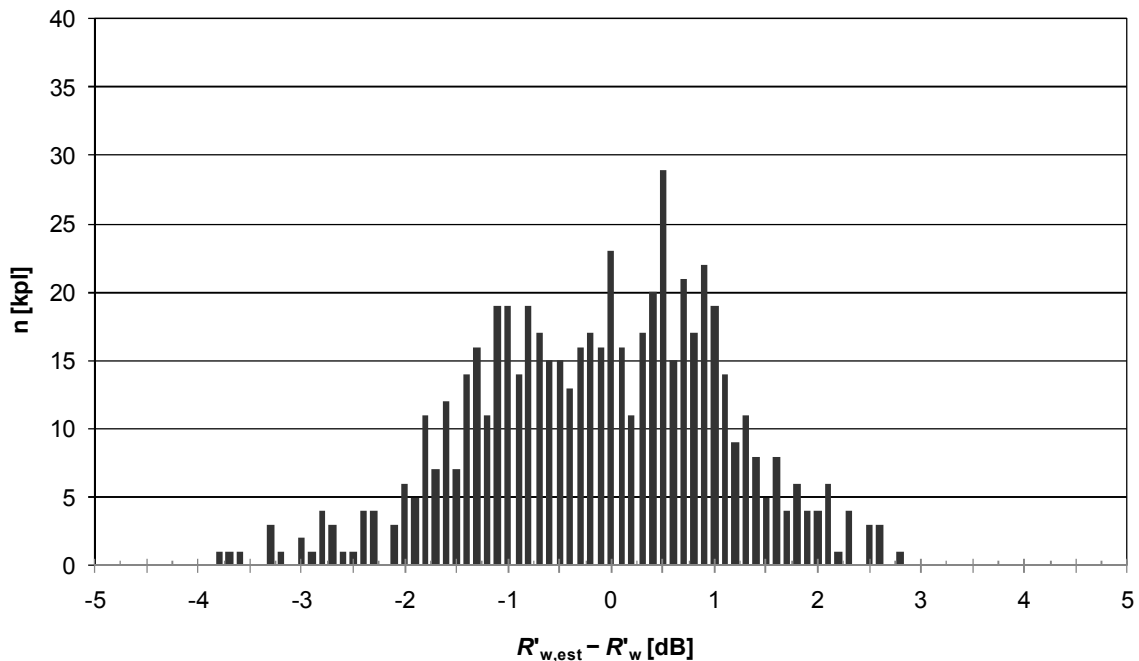
Rakennuksessa mitattu ilmaääneneristysluku R'_w kuvaa sitä, kuinka suuri osa äänilähteen tuottamasta äänitehosta siirtyy rakenteiden kautta yhdestä tilasta toiseen. Ilmaääneneristysl-u-vun mittausta perustuu oletukseen diffuusista äänikentästä. Tämä oletus ei tosiasiallisesti kui-tenkaan päde, minkä vuoksi ilmaääneneristysluvun määrittämiseksi on mitattava äänen-painetasoja ja jälkikaiunta-aikoja vaihtelemalla kaiuttimen sekä mikrofonipisteiden paikkaa [2]. Ilmaääneneristävyydet R' ja edelleen ilmaääneneristysluvut R'_w lasketaan näissä pisteissä saatujen tulosten keskiarvojen perusteella.



Kuva 1. Esimerkkimittauksessa lähetyshuoneesta taajuusalueelta 100–3150 Hz mitatut äänenpainetasot L_1 . Paksumpi viiva esittää äänenpainetasojen energettistä keskiarvoa.



Kuva 2. Esimerkkimittauksessa vastaanottohuoneesta taajuusalueelta 100–3150 Hz mitatut äänenpainetasot L_2 . Paksumpi viiva esittää äänenpainetasojen energettistä keskiarvoa.



Kuva 3. Simuloitujen ilmäääneneristyslukujen $R'_{w,est}$ jakauma. x-akselilla on esitetty simuloitujen ilmäääneneristyslukujen $R'_{w,est}$ erotus standardin mukaisesti määritettyyn, 0,1 dB tarkkuudella laskettuun ilmäääneneristyslukuun R'_w nähden. Tulosten frekvenssi on y-akselilla.

Kukin yksittäisessä mittauspisteessä saatu tulos kuvaa osatotuutta äänikentän ominaisuuksista huoneessa, jossa mittaus tehdään. Esimerkkitapauksessa on mitattu ilmäääneneristysluku R'_w rakennuksessa kahden vierekkäisen asuinhuoneiston välillä [27]. Huoneistoja erottava raken-

ne on 180 mm paksu betoniväliseinä. Lähetys- ja vastaanottohuoneiden tilavuudet ovat $63,3 \text{ m}^3$ ja tiloja erottavan rakenteen pinta-ala $14,2 \text{ m}^2$. Ilmaääneneristysluvun laskentaa varten on mitattu 10 lähetyshuoneen äänenpainetasokäyrää L_1 (kuva 1), 10 vastaanottohuoneen äänenpainetasokäyrää L_2 (kuva 2) ja 12 vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aikakäyrää T .

Ilmaääneneristysluku R'_w laskettiin ensin standardin ISO 717-1 [28] mukaisesti mittaustulosten keskiarvoista. Tämän jälkeen laskettiin ilmaääneneristysluvut kaikista käyristä L_1 , L_2 ja T . Näin ollen simuloinnin tuloksena saatiin 600 ilmaääneneristävyyskäyrää ja ilmaääneneristyslukua $R'_{w,est}$. Kaikki arvot on laskettu $0,1 \text{ dB}$ tarkkuudella. Kuvassa 3 standardin mukaan laskettu ilmaääneneristysluku on asetettu nollakohdaksi, jolloin nähdään simuloitujen tulosten poikkeama standardin mukaisesta mittauksesta. Poikkeamien keskiarvo on $-0,3 \text{ dB}$ ja keskihajonta $1,1 \text{ dB}$.

5 YHTEENVETO

Monte Carlo -menetelmä on osoittautunut lupaavaksi työkaluksi ääneneristysmittauksista saatavien mittalukujen mittausepävarmuuden arvioimiseen. Aikaisemmissa mittausepävarmuutta käsittelevissä tutkimuksissa esitettyjen Monte Carlo -simulaatiota käyttävien menetelmien puute on ollut lähinnä siinä, että epävarmuutta ei ole niissä määritetty erikseen yksittäisestä tilasta, vaan yleistämällä esimerkiksi standardeissa esitettyjä hajontoja käyttäen. Ilmaääneneristysluvun mittausepävarmuus riippuu kuitenkin hyvin vahvasti tilan ominaisuuksista, kuten tilavuudesta. Siten tulevaisuudessa tulisi epävarmuusarvioita kehittää niin, että jokaisesta yksittäisestä mittaustuloksesta ilmoitetaan mittausepävarmuus.

VIIITTEET

1. ISO 140-2, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Determination, verification and application of precision data*. International Organization for Standardization, Genève 1991.
2. ISO 140-4, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms*. International Organization for Standardization, Genève 1998.
3. ISO 140-7, *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, Genève 1998.
4. ISO/WD 12999-1, *Determination and application of uncertainties in building acoustics*. International Organization for Standardization, TC 43/SC 2/WG 18.
5. HOFBAUER G, Ein Trittschallmaßstab. *Gesundheitsingenieur* **58**(1935), 109–111.
6. GÖSELE K, Zur Meßmethodik der Trittschalldämmung. *Gesundheitsingenieur* **70**(1949), 66–70.
7. CREMER, L, Der Sinn der Sollkurven. *Schallschutz von Bauteilen*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960.
8. ISO-R 717, Rating of sound insulation in dwellings. International Organization for Standardization, Genève, 1968.
9. SCHROEDER M R, Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen. *Acustica* **4**(1954), 594–600.
10. SCHROEDER M R & KUTRUFF H, On frequency response curves in room. *The Journal of the Acoustical Society of America* **34**(1962), 76–80.

11. ANDRES H G & BRODHUN D, Zur Genauigkeit von Schallabsorptionsgradmessungen in Hallraum. *Acustica* **10**(1960), 330–335.
12. WATERHOUSE R V, Statistical properties of reverberant sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America* **43**(1968), 1436–1444.
13. LUBMAN D, Fluctuations of sound with position in a reverberant room. *The Journal of the Acoustical Society of America* **44**(1968), 1491–1502.
14. LUBMAN D, Precision of reverberant sound power measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America* **56**(1974), 523–533.
15. BODLUND K, Statistical characteristics of some standard reverberant sound field measurements. *Journal of Sound and Vibration* **45**(1976), 539–557.
16. TUOMINEN H T, *ISO 140 -standardin mukaisen ilmaääneneristysmittauksen tarkkuuden arviointi*. VTT, LVI-tekniikan laboratorio, Tiedonanto 42, Espoo 1979.
17. OLESEN H, *Measurements of the acoustical properties of buildings – additional guidelines*. NT Technical Report 203, Nordtest, Espoo 1992.
18. GÖRANSSON C, *Measurements of sound insulation at low frequencies*. Swedish Council for Building Research. Document, Stockholm 1993.
19. SIMMONS C, *Measurements of sound pressure levels at low frequencies in rooms*. Swedish National Testing and Research Institute, Nordtest Project No. 1347-97, Borås 1997.
20. KYLLIÄINEN M, *Uncertainty of impact sound insulation measurements in field*. Tampere University of Technology, Department of Civil Engineering, Research Report 125, Tampere 2003.
21. KYLLIÄINEN M, Standard deviations in field measurements of impact sound insulation at enlarged frequency range from 50 to 3150 Hz. *Proceedings of an International-Ince Symposium “Managing Uncertainties in Noise Measurements and Prediction”*. June 27–29, 2005, Le Mans.
22. SIMMONS C, Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings – Results of a round robin test. *Proceedings of an International-Ince Symposium “Managing Uncertainties in Noise Measurements and Prediction”*. June 27–29, 2005, Le Mans.
23. GOYDKE H, SIEBERT B R L & SCHOLL W, Considerations on the evaluation of uncertainty values of building acoustic single-number quantities. *Proceedings of the 5th European Conference on Noise Control*, May 19–21, 2003, Naples.
24. WITTSTOCK V, On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. *Acta Acustica united with Acustica* **93**(2007), 375–386.
25. NAVACERRADA M A, DÍAZ C, PEDRERO A & IGLESIAS L, Calculus of the uncertainty in acoustic field measurements: comparative study between the uncertainty propagation method and the distribution propagation method. *Acústica 2008*, 20.-22.10., Coimbra.
26. SHREIDER Y A, *A method for statistical testing, Monte Carlo Method*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam 1964.
27. NIEMI H, *Ilmaääneneristysluvun kenttämittausten epävarmuus*. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta, kandidaatintyö, Tampere 2011.
28. ISO 717-1, *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation*. International Organization for Standardisation, Genève 1996.