

# ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN MITTAUSEPÄVARMUUS KENTTÄMITTAUKSISSA

**Mikko Kylliäinen**

Tampereen teknillinen yliopisto  
Rakennustekniikan laitos  
PL 600, 33101 TAMPERE  
[mikko.kylliainen@tut.fi](mailto:mikko.kylliainen@tut.fi)

## 1 JOHDANTO

Niin kuin hyvin tiedetään, kävelyn ja välipohjarakenteiden askelääneneristävyttä mitattaessa käytettävän askeläänikojeen tuottamat äänispektrit poikkeavat huomattavasti toisistaan. Eroavuuksia on sekä syntyvien äänenpainetasojen suuruuksissa että taajuusjakaumassa [1–7]. Askelääneneristävyyden mittausmenetelmä on kehittynyt pitkän ajan kuluessa, ja sitä standardoitaessa mittausalueen alarajaksi valittiin 100 Hz, koska mittausepävarmuuden arvioitiin kasvavan pienemmillä taajuuksilla liiaksi [8]. Nykyisin mittausstandardit mahdollistavat taajuusalueen laajentamisen 50 Hz saakka [9–10], mutta useimmissa maissa, kuten Suomessa, tätä mahdollisuutta ei ole otettu säädösten tasolle [11–12]. Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että nimenomaan 100 Hz pienemmillä taajuuksilla on askelääneneristävyyden subjektiivisen kokemisen kannalta joissakin tapauksissa ratkaiseva merkitys [5–6, 12–17].

Laajennetulla taajuusalueella 50–3150 Hz esiintyvän mittausepävarmuuden suuruutta verrattuna taajuusalueeseen 100–3150 Hz ei ole esitetty standardeissa [9–10, 18]. Ääneneristysmittausten mittausepävarmuutta on tutkittu lähinnä laboratorioissa, soveltamalla laboratoriomittausten epävarmuushavaintoja kenttämittaustulosten epävarmuuden arviointiin tai määrittämällä laajasta aineistosta jokin keskimääräinen arvio mittausepävarmuudelle [19]. Mittausepävarmuus on kuitenkin tilakohtainen ilmiö, minkä johdosta arvio mitaustuloksen mittausepävarmuudesta pitäisi johtaa jokaisen mittauksen yhteydessä erikseen.

Ääneneristysmittausten epävarmuustekijät ovat suuressa määrin myös oikeusturvakysymyksiä. Mittausmenetelmä ei voi olla sellainen, että määräykset tai vaatimukset täyttävä rakenne katsotaan epäkelvoksi liian suuren mittausepävarmuuden vuoksi. Ratkaisevaa on nimenomaan epävarmuus yksittäisessä kenttämittauksessa, sillä kentällä tehdyn mittauksen perusteella ratkaistaan, onko mitaustulos hyväksyttävissä vai ei. Toisaalta pienen taajuusalueen jättäminen huomiotta johtaa tietyissä tapauksissa siihen, että hyväksyttävän mitaustuloksen tuottanut rakenne onkin asukkaan subjektiivisen arvion mukaan epäonnistunut [20].

Tämän artikkelin tarkoituksena on verrata yksilukuisten mittalukujen mittausepävarmuutta eri taajuusalueilla. Aineistona käytetään 50 välipohjarakenteen kenttämitaustuloksia, joista kullakin simuloidaan Monte Carlo –menetelmällä taajuuskaistoittain askeläänitasojen sekä yksilukuisten mittalukujen hajonnat ja jakaumat. Simuloinnissa käytetään siten kussakin tilassa mitattujen suureiden eli äänenpainetasojen ja jälkikaiunta-ajan kentällä havaittuja jakaumia tilakohtaisesti. Mittausepävarmuus riippuu äänikentän hajonnan lisäksi mittauskaluston epätarkkuudesta, mitaajan toiminnasta ja monesta muusta tekijästä. Nämä tekijät kuitenkin sisältyvät käytettyyn aineistoon, joten niiden vaikutusta ei tutkita erikseen. Mittaukset on tehnyt Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy konsulttityönä pääasiassa rakennusliikkeiden tilauksesta. Käytettävät mitaustulokset edustavat todellisia kenttäolosuhteita, sillä niitä ei ole tehty erityisesti tutkimustarkoituksiin. Kaikkia mitaustulokset täyttävät Suomen rakentamismää-

räyskokoelmassa asuinhuoneistojen välille asetetut vaatimukset, joten rakenteellisista virheistä johtuvaa äänenpainetasojen hajontaa mittaustuloksiin ei sisälly tai ainakin tällaisten tekijöiden osuus on vähäinen.

## 2 ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN MITTAUSMENETELMÄ

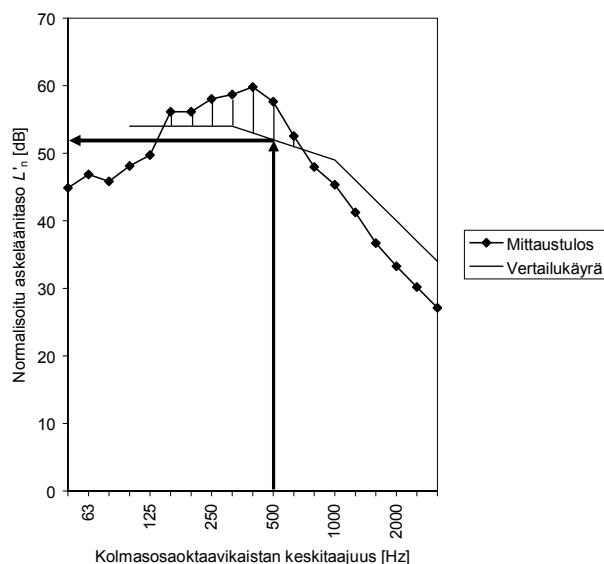
### 2.1 Mittaus taajuusalueella 100–3150 Hz

Rakennusten askelääneneristykseen arvioinnissa käytettävä askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  määritetään standardien ISO 140-7 ja ISO 717-2 mukaisesti [9–10]. Äänilähteenä on lähetyshuoneeseen sijoitettu standardoitu askeläänikoje, jonka tuottamia äänenpainetasoja  $L_i$  mitataan tavallisesti lähetyshuoneen alapuolella sijaitsevassa vastaanottohuoneessa. Mitatut äänenpainetasot normalisoidaan jälkikäiunta-ajan ja huoneen tilavuuden perusteella saatavan huoneen absorptioalan  $A$  [m<sup>2</sup>] avulla tavallista kalustettua huonetta vastaavaan 10 m<sup>2</sup> vertailuabsorptioalaan  $A_0$ . Normalisointi tehdään, jotta mittaustulos olisi huoneen kalustuksesta riippumaton. Normalisoitu askeläänitaso on

$$L'_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

Normalisoidut askeläänitasot  $L'_n$  määritetään kolmannesoktaavikaistoittain keskitajuudesta 100 Hz keskitajuuteen 3150 Hz. Askeläänitasoluku luetaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta (kuva 1). Askelääneneristys rakennuksessa on sitä parempi, mitä pienempi askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  on. Kaavassa 1 tarvittava absorptioala  $A$  saadaan lasketuksi vastaanottohuoneessa mitattavasta jälkikäiunta-ajasta  $T$  [s] ja tilavuudesta  $V$  [m<sup>3</sup>]:

$$A = 0,16 \frac{V}{T} \quad (2)$$



Kuva 1. Askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  luetaan 500 Hz kohdalta vertailukäyrältä, jonka paikka määräytyy mittaustulosten ja vertailukäyrän välisten epäsuotuisten poikkeamien perusteella: mitatut askeläänitasot saavat poiketa vertailukäyrästä huonompaan suuntaan eli ylöspäin yhteensä enintään 32 dB.

## 2.2 Mittaus laajennetulla taajuusalueella

Kentällä mitatut spektripainotustermit lasketaan mitatuista normalisoiduista askeläänitasoista  $L'_{n,i}$  sekä askeläänitasoluvusta  $L'_{n,w}$  seuraavasti:

$$C_1 = 10 \lg \sum_{j=1}^n 10^{L'_{n,i}/10} - 15 - L'_{n,w} \quad (3)$$

Spektripainotustermi  $C_1$  lasketaan taajuuskaistoilla 100–2500 Hz ja  $C_{1,50-2500}$  taajuuskaistoilla 50–2500 Hz. Spektripainotustermin arvo on lähellä nollaa silloin, kun mitatut askeläänitasoluvut muodostavat suunnilleen vertailukäyrän muotoisen käyrän. Jos poikkeamat vertailukäyrän yläpuolelle taajuusalueella 100–3150 Hz ovat suuria, spektripainotustermi  $C_1$  saa sitä suurempia positiivisia arvoja, mitä suurempia poikkeamat ovat. Termi kuvaa siten äänispektirin kapeakaistaisuutta. Jos askelääninpainetasot ovat suuria alle 100 Hz taajuuksilla, spektripainotustermi  $C_{1,50-2500}$  saa positiivisia arvoja. Termi kuvaa sekä kapeakaistaisuutta että askelääninpainetasojen suuruutta pienillä taajuuksilla.

## 3 MONTE CARLO -SIMULOINTI

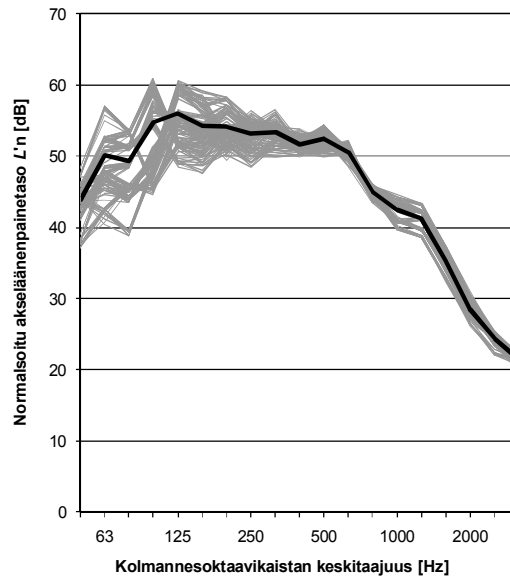
### 3.1 Simuloinnin systematiikka

Mittalukujen johtaminen vertailukäyrämenetelmällä 16 tai 19 keskitaajuudella mitatuista äänenpainetasoista ja jälkikaiunta-ajoista tekee tilastolliset tarkastelut ja esimerkiksi luottamustasojen johtamisen varsin monimutkaiseksi. Tällaisissa akustiikan suureiden epävarmuustarkasteluissa on viimeisen vuosikymmenen aikana käytetty Monte Carlo -menetelmää [19, 21–23]. Käytössä olevassa aineistossa mittaluvut on johdettu standardin mukaisesti 12 äänenpainetasokäyrän  $L_i$  energettisen keskiarvon ja 12 jälkikaiunta-aikakäyrän  $T_i$  keskiarvojen perusteella. Jokainen yksittäinen käyrä sisältyy vaihteluväliin, jossa mitattu suure mittaustilanteessa vaihteli. Jos normalisoitu askeläänitaso  $L'_n$  lasketaan jokaisesta yksittäisestä käyrästä tai niiden yhdistelmästä erikseen, saadaan 12 x 12 eli 144 käyrää ( $L'_{n,est}$  kuva 2). Käyrät saadaan kaavoilla 1 ja 2 yhdistelemällä äänenpainetasot  $L_i$  ja jälkikaiunta-ajat  $T_i$  taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Normalisoitujen askeläänitasojen  $L'_{n,est}$  laskenta.

Yhdistelmä	$L_i$	$T_i$
$L'_{n,1}$	$L_1$	$T_1$
$L'_{n,2}$	$L_1$	$T_2$
...		
$L'_{n,12}$	$L_1$	$T_{12}$
$L'_{n,13}$	$L_2$	$T_1$
...		
$L'_{n,143}$	$L_{12}$	$T_{11}$
$L'_{n,144}$	$L_{12}$	$T_{12}$

Jokaisesta taulukon 1 mukaisesta käyrästä voidaan laskea erikseen askeläänitasoluvut  $L'_{n,w,est}$  ja askeläänitasoluvun ja spektripainotusterman summa  $L'_{n,w,est} + C_{I,50-2500,est}$  eli molemmista mittaluvuista saadaan 144 tulosta. Standardin mukaan askeläänitasolukua  $L'_{n,w}$  määritettäessä vertailukäyrän paikkaa siirretään korkeussuunnassa 1 dB välein [10]. Jotta simuloitujen ja standardin mukaan määritettyjen mittalukujen erotuksesta saadaan mahdollisimman tarkka käsitys, mittaluvut on laskettu 0,1 dB tarkkuudella. Aiemmin onkin todettu, että 1 dB laskentatarkkuus johtaa ääneneristysominaisuuksien lievään aliarvioimiseen [22].



Kuva 2. Monte Carlo –simuloinnilla aikaansaatu käyräparvi, joka kuvaa sitä, millainen normalisoidun askeläänepainetaso  $L'_n$  vaihteluväli voi olla yhdessä mittauksessa. Tummallalla viivalla on esitetty standardin mukaan keskiarvoista laskettu käyrä.

### 3.2 Mittausepävarmuus eri taajuusalueilla

Yksilukuisten mittalukujen  $L'_{n,w}$  ja  $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$  mittausepävarmuuden vertailemiseksi on laskettu erotuksia simuloitujen arvojen ja standardin mukaan laskettujen arvojen välillä seuraavasti:

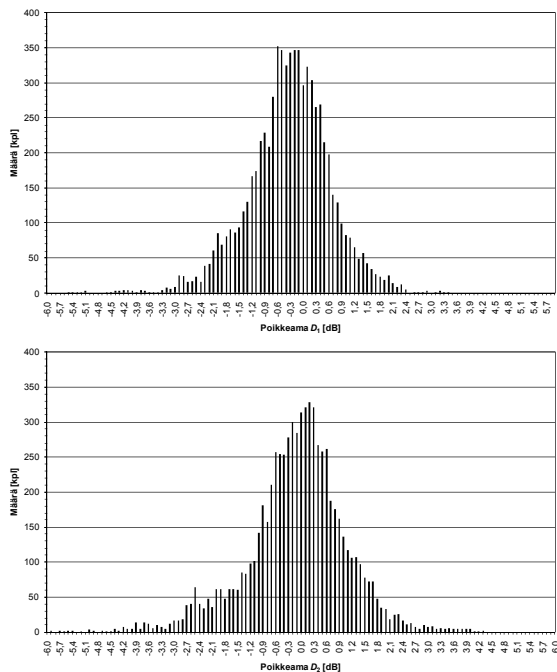
$$D_1 = L'_{n,w,est} - L'_{n,w} \quad (4)$$

$$D_2 = (L'_{n,w,est} + C_{I,50-2500,est}) - (L'_{n,w} + C_{I,50-2500}) \quad (5)$$

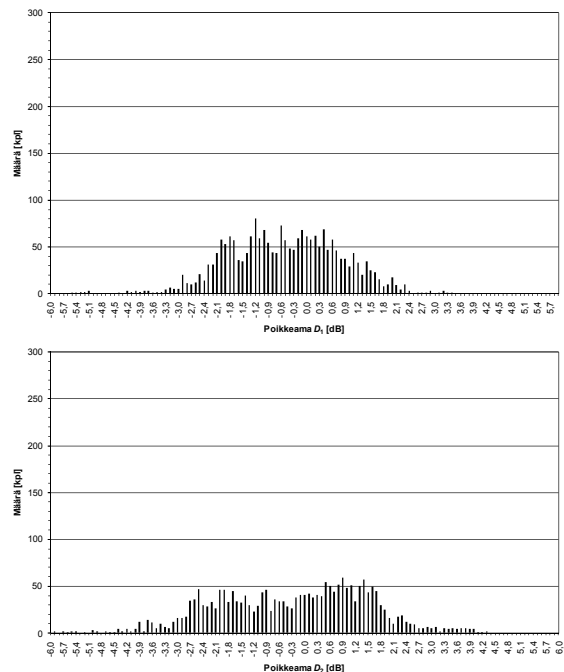
Poikkeamien  $D_1$  ja  $D_2$  positiivinen arvo tarkoittaa, että simuloitu arvo on suurempi kuin standardin mukainen arvo. Negatiivinen arvo vastaavasti tarkoittaa sitä, että simuloitu arvo on standardin mukaista pienempi. Kuvassa 3 on esitetty poikkeamien  $D_1$  ja  $D_2$  jakaumat. Jakaumiin sisältyvät kaikkien 50 kenttämittaustuloksen simuloitut arvot (7200 arvoa). Kuvan 3 perusteella näyttää siltä, että mittausepävarmuus ei muutu, kun taajuusaluetta laajennetaan.

Kuvassa 4 on kuvan 3 jakaumista erotettu rakenteet (15 kenttämittaustulosta, 2160 simuloitua arvoa), joilla spektripainotusterman  $C_{I,50-2500}$  arvo standardin mukaan laskettuna on vähintään 2 dB. Kuvassa 4 poikkeamat  $D_1$  ja  $D_2$  jakautuvat leveämmälle alueelle kuin kuvassa 3. Verrattaessa kuvan 4 poikkeamien  $D_1$  ja  $D_2$  jakaumia keskenään havaitaan, että taajuusalueen laajentaminen 50 Hz levittää jakaumaa vai vähän. Vertailun perusteella voidaankin todeta, että jos mittaustarkkuus kyseenalaistetaan taajuusalueella 50–100 Hz, se on kyseenalaistettava myös suuremmilla taajuuksilla silloin, kun rakenne tuottaa spektripainotusterman  $C_{I,50-2500}$  ar-

voksi vähintään 2 dB. Tämä tarkoittaisi kuitenkin sitä, että suurta osaa käytössä olevista rakenteista ei voitaisi lainkaan mitata.



Kuva 3. Kaikkien 50 välipohjarakenteen simuloitujen mittalukujen poikkeama standardin mukaisista arvoista. Yllä poikkeamat  $D_1$  (taajuusalue 100–3150 Hz) ja alla poikkeamat  $D_2$  (taajuusalue 50–3150 Hz).



Kuva 4. Poikkeama standardin mukaisista arvoista rakenteilla, jotka tuottavat spektripainotusermin  $C_{1,50-2500}$  arvoksi vähintään 2 dB. Yllä poikkeamat  $D_1$  (taajuusalue 100–3150 Hz) ja alla poikkeamat  $D_2$  (taajuusalue 50–3150 Hz).

#### 4 YHTEENVETO

Kenttämittaustuloksiin perustuva Monte Carlo –simulointi osoittaa, että askelääneneristävyyttä kuvaavien yksilukuisten mittalukujen mittausepävarmuus kasvaa jonkin verran silloin, kun rakenne tuottaa spektripainotusermin  $C_{1,50-2500}$  arvoksi vähintään 2 dB. Näiden rakenteiden mittausepävarmuus on kuitenkin myös taajuusalueella 100–3150 Hz suurempi kuin sellaisten rakenteiden, jotka tuottavat spektripainotusermin arvoksi  $C_{1,50-2500}$  noin nollan. Mittausepävarmuuden perusteella ei siltikään ole mahdollista kyseenalaistaa mitattavan taajuusalueen laajentamista, koska tällöin olisi kyseenalaistettava mittausten riittävä tarkkuus myös 100 Hz keskitajuudella ja sitä suuremmillakin taajuuksilla.

#### VIITTEET

1. GÖSELE K, Zur Meßmethodik der Trittschalldämmung. *Gesundheitsingenieur* **70**(1949), 66–70.
2. MARINER T, Technical problems in impact noise testing. *Building Research* **1**(1964), 53–60.
3. WATTERS B G, Impact noise characteristics of female hard heeled foot traffic. *The Journal of the Acoustical Society of America* **37**(1968), 619–630.
4. GERRETSEN E, A new system for rating impact sound insulation. *Applied Acoustics* **9**(1976), 247–263.

5. 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.
6. SCHULTZ T J, Alternative test method for evaluating impact noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* **60**(1976), 645–655.
7. KYLLIÄINEN, M, Askelääneneristykseen mittausmenetelmän ongelmien tausta. *Rakenteiden Mekaniikka* **41**(2008), 58–65.
8. CREMER, L, Der Sinn der Sollkurven. *Schallschutz von Bauteilen*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960.
9. 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.
10. ISO 717-2, *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation*. International Organization for Standardization, Genève 1998.
11. *Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa – Määräykset ja ohjeet*. Helsinki 1998, ympäristöministeriö.
12. RASMUSSEN, B & RINDELL, J H, Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe. *Applied Acoustics* **71**(2009), 171–180.
13. 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.
14. BODLUND K, Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings. *Journal of Sound and Vibration* **102**(1985), 381–402.
15. 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.
16. SIPARI P, HEINONEN R & PARMANEN J, *Acoustic properties of wooden floor slabs*. VTT Publications 345, Espoo 1998.
17. HAGBERG K, Ratings adapted to subjective evaluation for impact and airborne sound and its application in building regulations – a literature survey. *17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*, 2.–7.9.2001, Rooma.
18. 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.
19. NIEMI H, *Ilmaääneneristysluvun kenttämittausten epävarmuus*. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta, kandidaatintyö, Tampere 2011.
20. KYLLIÄINEN M, Spektrisovitustermien käyttö välipohjien askelääneneristykseen arvioinnissa. *Akustiikkapäivät 2003*, 6.-7.10.2003, Turku, s. 23–28.
21. 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, paper ID: 481-IP.
22. WITTSTOCK V, On the Uncertainty of Single-Number Quantities for Rating Airborne Sound Insulation. *Acta Acustica united with Acustica* **93**(2007), 375–386.
23. 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.