

SEINÄRAKENTEIDEN ÄÄNENERISTÄVYYDEN MALLINNUKSESSA TARVITTAVIEN PARAMETRIEN MITTAUSMENETELMÄT

Riikka Helenius, Mika Lindgren, Petteri Laitinen, Esa Nousiainen ja Valtteri Hongisto

Työterveyslaitos, Ilmastointi- ja akustiikkalaboratorio
Lemminkäisenkatu 14-18 B, 20520 TURKU
riikka.helenius@occuphealth.fi

1 JOHDANTO

Työterveyslaitoksen akustiikkalaboratoriossa Turussa alkoi vuonna 1999 tutkimushanke, jonka tavoitteena oli laatia ilmaääneneristävyuden ennustemalli. Mallilla on tarkoitus pystyä laskemaan seinärakenteen ääneneristävyys taajuuksittain, kun rakenteen fysikaaliset ominaisuudet tunnetaan. Seinärakenne koostuu tyypillisesti levyistä, huokoisista kerroksista ja erilaisista kytkennöistä niiden välillä. Tällaisen rakenteen ääneneristävyuden mallintamisessa tarvitaan sellaisia materiaalien fysikaalisia ominaisuuksia, joita ei ole riittävästi taulukoitu kirjallisuudessa. Tärkeimmät ovat rakennuslevyn kokonaishäviökerroin ja kimmomoduli, huokoisen materiaalin virtausresistiivisyys, rakennetekijä ja dynaaminen jäykkyys sekä tukirangan dynaaminen jäykkyys [1]. Tämän tutkimuksen tavoitteena on koota yhteen mittausmenetelmät, joilla kyseiset parametrit voidaan määrittää.

2 MITTAUSMENETELMÄT

2.1 Rakennuslevyn kokonaishäviökerroin (η_{tot})

Häviökerroin kertoo levyn värähtelyn vaimennuksesta. Ääneneristävyuden mallinnuksen kannalta on olennaista tuntea levyn kokonaishäviökerroin, joka on sisäisen häviökertoimen, kytkentähäviökertoimen ja säteilyhäviökertoimen summa. Merkittävin näistä on kytkentähäviökerroin, josta kuvastuvat levyn reunaehdot.

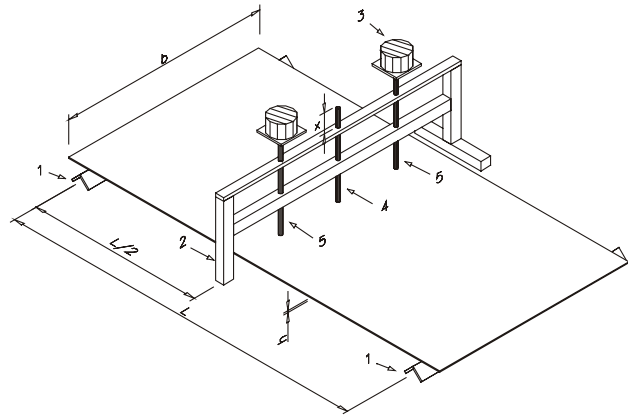
Rakennuslevyjen häviökertoimet mitattiin ääneneristävyuden mittausstandardin ISO 140-3:1995(E) liitteen E mukaisesti. Mittauksissa käytettiin MLS-menetelmää, joka mahdollistaa lyhyiden jälkikaiunta-aikojen mittaamisen [2]. Perinteisellä menetelmällä mitattaessa (1/3-oktaaveittain) häviökertoimen maksimiarvo on $\eta = 0,032$. Ajassa käännettyä (time-reversed) MLS-menetelmää käyttäen maksimiarvo on lähes neljä kertaa suurempi eli $\eta = 0,125$. MLS-menetelmä on perinteistä menetelmää parempi myös herätteen suhteen. Vasaraherätteen käytössä on havaittu epälineaarisuutta, sillä häviökertoimen arvon on havaittu kasvavan, kun vasaraherätteen voimakkuus kasvaa [2].

Levynäytteeseen kohdistettiin sauvan avulla MLS-herätesignaali, joka tuotettiin tärstimellä (B&K 4805 + B&K 4813). Levyn jälkikaiunta-aika T (s) mitattiin näytteeseen kiinnitetyllä kiihtyvyyssanturilla (B&K 4370) ja reaaliaika-analysointorilla (Norsonic RTA 840). Herätys suoritettiin kolmessa eri kohdassa. Jokaista herätyspaikkaa kohden anturilla oli kaksi paikkaa, joissa molemmissa suoritettiin kaksi mittausta. Kokonaishäviökertoimet kullekin näytemateriaalille määritettiin käyttäen yhtälöä $\eta_{tot} = 2,2 / fT$, missä f on taajuus (Hz).

2.2 Rakennuslevyn kimmomoduli (E)

Kimmomoduli kertoo levyn jäykkyydestä. Levyn kriittinen taajuus ja ominaistaajuudet voidaan määrittää kimmomodulin perusteella. Menetelmää käytetään jatkossa ortotrooppisten levyjen kimmomodulien ja tukirankojen taivutusjäykkyyksien määrittämiseen.

Rakennuslevyjen kimmomodulit määritettiin tarkoitusta varten valmistetulla taivutuslaitteella (TaipuMet), joka on kuvassa 1. Tuet asetettiin betonilattialle riittävälle etäisyydelle toisistaan ja näytelevy laskettiin symmetrisesti niiden päälle. Näytteen keskikohtaan asetettiin kuormitusteline. Punnuksia lisättiin vaiheittain ja vastaavat levyn taipumat mitattiin joko mittakelloa tai työntömittaa käyttäen. Kimmomoduli E (Pa) laskettiin käyttäen yhtälöä [3] $E = FL^3 / 48\nu I$, missä F on näytteen keskikohtaan vaikuttanut voima (N), L on tukipisteiden välinen etäisyys (m), ν on taipuma näytteen keskellä (m) ja I on näytteen poikkileikkauksen hitausmomentti (m⁴). Tasaisen levyn hitausmomentti saatiin yhtälöstä $I = bh^3 / 12$, missä b on näytteen poikkileikkauksen leveys ja h on poikkileikkauksen korkeus.



Kuva 1. Taivutuslaite muodostuu kahdesta tuesta (1), kuormitustelineen kehikosta (2), punnuksista (3), mittasauvasta (4) ja kahdesta voimatangosta (5).

2.3 Huokoisen materiaalin virtausresistiivisyys (r)

Virtausresistiivisyys kuvastaa huokoisen materiaalin kykyä estää ilman virtausta sen läpi tai materiaalin kykyä muuttaa huokosissa tapahtuva ilmaliike kitkalämmöksi.

Huokoisten materiaalien virtausresistiivisyydet mitattiin standardin ISO 9053:1991(E) mukaisesti [4,5]. Pyöreä näyte (halkaisija 10,5 cm) asetettiin kahdesta putkesta koostuvan mittausputken yläosaan. Mittausputken alaosaan ohjattiin ilmavirta, joka tuotettiin tyhjiöpumpulla (KNF Neuberger). Tilavuusvirtausnopeutta U (m³/s) säädeltiin ohivirtausventtiilillä ja virtausnopeuden arvo havaittiin rotametrillä (Kytölä). Näytteen eri puolille muodostunut paine-ero P (Pa) mitattiin mikromanometrillä (Mikor TT470S). Mittauslaitteisto esitetään kuvassa 2 vasemmalla.

Tilavuusvirtausnopeutta U kasvatettiin asteittain välillä 10 – 25 l/min ja vastaavat paine-erot P (Pa) havaittiin. Virtausresistiivisyys laskettiin vain niitä mittaustuloksia käyttäen, joilla suhde $R = P/U$ pysyi vakiona, koska ilmavirtaus oli tällöin ollut laminaarista. Virtausresistiivisyys r (Pa·s/m²) laskettiin yhtälöstä $r = SP / Ud$, missä S on näytteen pinnan ala (m²) ja d on näytteen paksuus (m). Varsinainen virtausresistiivisyyden arvo saatiin

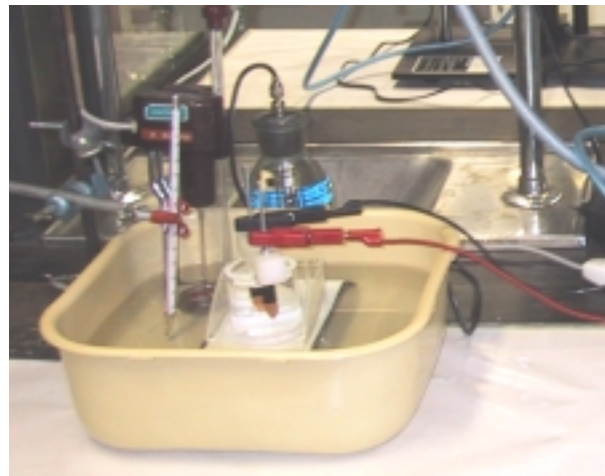
extrapoloimalla virtausnopeuden arvoon $U = 0,25$ l/min, joka vastaa 0,2 Pa:n (80 dB re 20 μ Pa) äänenpainetta kyseiselle näytepinnalle. Näytteen virtausresistiivisyys määritettiin kolmen erillisen mittauksen keskiarvona.

2.4 Huokoisen materiaalin rakennetekijä (α_∞)

Rakennetekijä kuvaa ilma-aallon reitin pituutta huokoisessa materiaalissa. Mitä pidempi on reitti sitä suurempi on rakennetekijä. Ilmahuokoisten ja kiinteän rungon välinen inertiaalinen kytkentä on suoraan verrannollinen rakennetekijään.

Huokoisten materiaalien rakennetekijät mitattiin Brownin [6] teorian mukaisesti. Mittaukset suoritettiin Åbo Akademin Fysikaalisen kemian laitoksella sähkönjohtokykykennoa ja konduktometriä (Konduktoskop E 365 B) käyttäen. Kenno koostui kahdesta kuparilevystä tehdystä terävästä kärjestä. Elektrolyytinä käytettiin kaliumkloridiliuosta. Mittaukset tehtiin vakioämpötilassa 22 °C. Mittalaitteisto esitetään kuvassa 2 oikealla.

Rakennetekijä α_∞ laskettiin käyttäen yhtälöä $\alpha_\infty = \phi (S_1 / S_2)$, missä ϕ on näytteen huokoisuus, S_1 (mS) on pelkän kaliumkloridiliuoksen konduktiviteetti ja S_2 (mS) on kaliumkloridiliuoksella kyllästetyn näytteen konduktiviteetti. Kuitumaisen näytteen huokoisuus laskettiin yhtälöstä $\phi = 1 - (\rho_m / \rho_f)$, missä ρ_m on näytteen tiheys (kg/m^3) ja ρ_f on kuitumateriaalin tiheys (kg/m^3). Mineraalivillalle $\rho_f \approx 2500 \text{ kg/m}^3$.



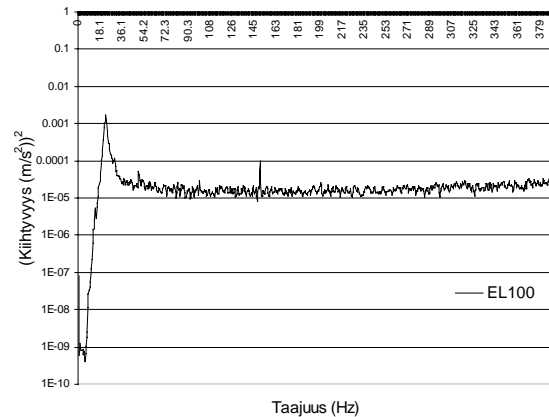
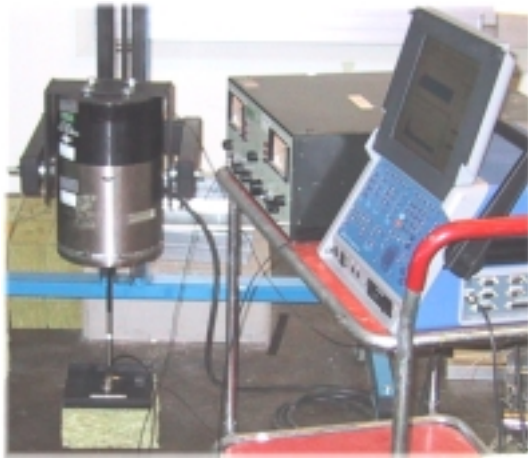
Kuva 2. Vasemmalla on mineraalivillan virtausresistiivisyyden ja oikealla huokoisen materiaalin rakennetekijän määrittämisessä käytetty laitteisto.

2.5 Huokoisen materiaalin dynaaminen jäykkyys (s')

Dynaaminen jäykkyys huokoisilla materiaaleilla on merkittävä, kun materiaali on kahden massan välissä kiinteästi, esim. kelluvassa lattiassa tai sandwich-levyssä. Dynaaminen jäykkyys esitetään mineraalivilloille yksikköalaa kohti, koska materiaali on jatkuva.

Huokoisten materiaalien dynaamiset jäykkyydet mitattiin standardin ISO 9052-1:1989 (E) mukaisesti. Neliönmuotoinen testikappale asetettiin kovalle alustalle ja sen päälle laitettiin teräksestä valmistettu kuormalevy, jonka massa oli 7,81 kg ja ala 0,04 m². Testikappaleen ja kuormalevyn muodostama systeemi saatiin värähtelemään tärhistintä (B&K 4805 + B&K 4813) käyttäen. Systeemin värähtely havaittiin kuormalevyyn kiinnitetyllä kiihtyvyyssanturilla (B&K

4370), joka oli yhdistetty reaaliaika-analysointoriin (Norsonic RTA 840). Taajuuden suhteen mitatusta kiihtyvyydestä voitiin suoraan määrittää testikappaleen resonanssitaajuus. Kuvassa 3 esitetään mittauksissa käytetty laitteisto ja esimerkki resonanssitaajuuden määrittämisestä.



Kuva 3. Vasemmalla on mineraalivillan dynaamisen jäykkyyden määrittämisessä käytetty laitteisto ja oikealla esimerkki mitatusta värähtelyn kiihtyvyydestä.

Resonanssitaajuuden f_r avulla voitiin laskea testikappaleen dynaaminen jäykkyys s' (N/m^3) yhtälöllä $s' = 4\pi^2 m'_t f_r^2$, missä m'_t on näytteen päällä olevan kuormamassan pintamassa (kg/m^2). Materiaalin dynaaminen jäykkyys riippuu myös sen lateralisesta virtausvastuksesta välillä $100 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2 > r \geq 10 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$. Tällöin materiaalin todellinen dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohti saatiin siten, että edelliseen yhtälöön lisättiin näytteen sisällä olevan ilman dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohti, joka laskettiin yhtälöstä $s'_a = p_0 / d\phi$, missä p_0 (Pa) on ilmanpaine ja d (m) on näytekappaleen paksuus kuormalevyn alla.

2.6 Tukirangan dynaaminen jäykkyys (K')

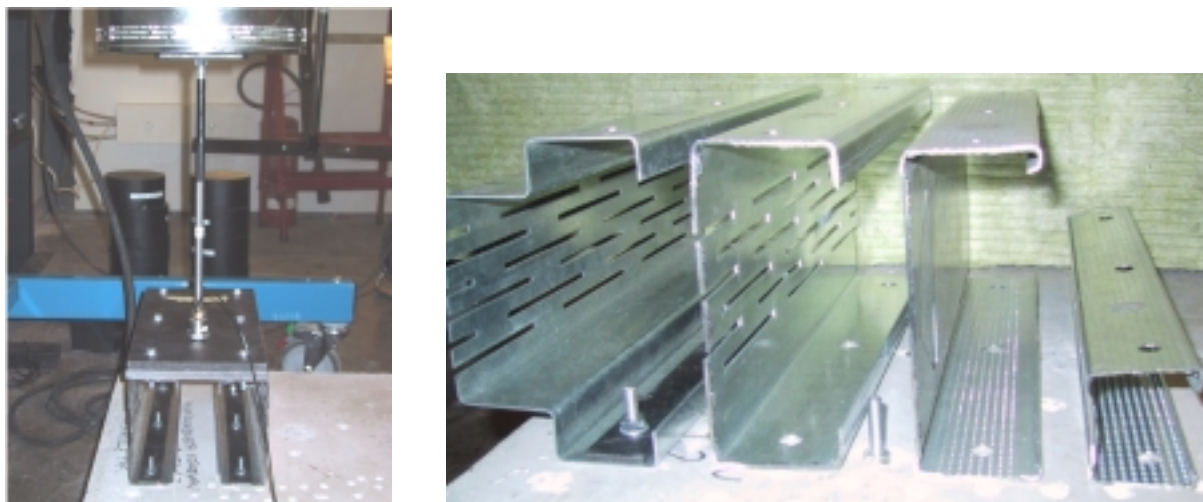
Seinäarakenteissa käytettävät puurangat katsotaan yleensä jäykiksi, mutta teräsraangat voidaan muotoilla joustaviksi. Eri muotoisilla ja vahvuisilla rangoilla on huomattavia joustavuuseroja, mikä vaikuttaa saavutettavaan ääneneristävyyteen.

Rankojen dynaamiset jäykkyydet mitattiin samoin kuin huokoisten materiaalien dynaamiset jäykkyydet. Koska ranka ei täytä koko ilmaväliä, määritetään jäykkyys yksikköpituutta kohti. Kaksi 0,3 metrin pituista testikappaletta asetettiin vastakkain kovalle alustalle ja niiden päälle laitettiin kuormalevy ($0,15 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$), jonka massa oli $m_t = 7,02 \text{ kg}$. Systemi saatiin värähtelemään tärhistintä käyttäen ja värähtely havaittiin kuormalevyyn kiinnitetyllä kiihtyvyyssanturilla. Resonanssitaajuuden perusteella laskettiin rangon dynaaminen jäykkyys metriä kohti K' (N/m) yhtälöstä $K' = 4\pi^2 m_t f_r^2 / L$, missä L on kahden rangon yhteispituus. Kuvassa 4 vasemmalla esitetään tukirangan dynaamisen jäykkyyden mittausten menetelmä ja oikealla mitatut rangat.

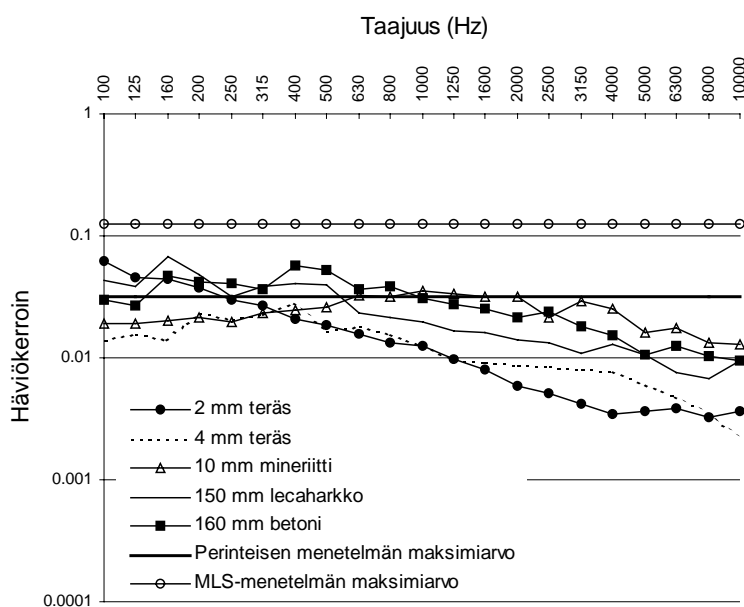
3 TULOKSET

Kokonaishäviökertoimet määritettiin viidelle eri materiaalille. Tuloksista (kuva 5) voidaan havaita, että arvot ovat 10 – 100 kertaa suurempia kuin materiaaleille tyypillisesti ilmoitetut sisäisen häviökertoimen arvot [1]. Taivutuslaitteen toiminta testattiin mittaamalla 4 mm

paksuisen teräslevyn kimmomodulin arvo. Tuloksena saatiin $E \approx 210 \times 10^9$ Pa, joka on sama kuin kirjallisuudessa esitetty arvo [3]. Neljälle eri tiheyden omaavalle mineraalivillalle mitatut virtausresistiivisyydet ja dynaamiset jäykkyydet esitetään taulukossa 1. Kahdelle mineraalivillalle eri kuitusuuntiin (lomavilla / poikkivilla) määritetyt rakennetekijät esitetään taulukossa 2. Neljälle eri teräsrankalle mitatut dynaamiset jäykkyydet esitetään taulukossa 3. Tietokantoja on tarkoitus laajentaa vielä siten, että tyypillisimmät materiaalit on katettu. Tämän jälkeen ääneneristävyden mallintaminen on helpompaa käytännön suunnittelussa ja tuotekehityksessä.



Kuva 4. Vasemmalla esitetään tukirangan dynaamisen jäykkyyden mittausmenetelmä ja oikealla mitatut rangat (järjestyksessä vasemmalta : AWS, TC, LR ja LPR).



Kuva 5. Rakennuslevyille mitatut kokonaishäviökertoimet käytännön reunaehdoilla.

Taulukko 1. Neljälle mineraalivillalle mitatut virtausresistiivisyydet ja dynaamiset jäykkyydet.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Virtausresistiivisyys r [Pas/m ²]	Dynaaminen jäykkyys s' [MN/m ³]
TAKU-H 30	63	30 000	8,9
TAKU-H 50	57	20 000	6,3
PAL 30	121	110 000	14,4
PAL 50	113	70 000	11,7

Taulukko 2. Kahdelle mineraalivillalle eri kuitusuuntiin määritetyt rakennetekijät.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Rakennetekijä α_∞
R70 (lomavilla)	115	1,01
R70 (poikkivilla)	115	1,07
RAN50 (lomavilla)	85	1,06
RAN50 (poikkivilla)	85	1,19

Taulukko 3. Neljälle teräsrangalle mitatut dynaamiset jäykkyydet.

Ranka	Rangan paksuus [m]	Dynaaminen jäykkyys K' [MN/m]
AWS	0,125	0,2
LPR	0,042	0,9
TC	0,125	2,8
LR	0,120	3,3

LÄHTEET

1. HONGISTO V, *Airborne sound insulation of wall structures – measurement and prediction methods*. Väitöskirja, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 56, Espoo, 2000.
2. MEIER A & SCHMITZ A, Application of Total Loss Factor Measurements for the Determination of Sound Insulation. *Build Acoust* **6**(1999)2, 71 - 84.
3. PENNALA E, *Lujuusopin perusteet*. 407 Otatieto, Espoo 1994, 89-99.
4. NOUSIAINEN E, *Virtausvastus kuitumaisten materiaalien akustisia ominaisuuksia määräävänä tekijänä*. Pro Gradu, Turun yliopisto, Fysiikan laitos, 2000.
5. NOUSIAINEN E, HONGISTO V & LINDGREN M, Acoustical characterization of fibrous materials by using measured flow resistivity data. *Proceedings of Internoise 2000*, August 27-30, Nice, France, 3875-3878.
6. BROWN R J S, Connection between Formation Factor for Electrical Resistivity and Fluid-Solid Coupling Factor in Biot's Equations for Acoustic Waves in Fluid-Filled Porous Media. *Geophysics* **45**(1980)8, 1269-1275.