

# RAKENTEIDEN ILMAÄÄNENERISTÄVYYDEN ARVIOINTI ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ

Jesse Lietzén, Ville Kovalainen

A-Insinöörit  
Akustiikkasuunnittelu  
Puutarhakatu 10  
33210 Tampere  
[etunimi.sukunimi@ains.fi](mailto:etunimi.sukunimi@ains.fi)

## Tiivistelmä

Rakenteiden ilmajääneristävyyttä arvioidaan laskennallisesti tyypillisesti analyttisiä tai parametrisia malleja hyödyntäen. Nämä menetelmät ovat hyvin tehokkaita silloin, kun tarkasteltava rakenne on menetelmän rajoitteiden tai reunaehtojen puitteissa. Monimutkaisten rakenteiden ilmajääneristävyyttä voidaan laskennallisesti määrittää numeerisia menetelmiä käyttäen. Näistä ehkä yleisimmin käytetty on elementtimenetelmä (FEM), jonka soveltuvuus akustisten ongelmienkin ratkaisemiseksi on hyvin laaja. FE-menetelmää kuitenkin pidetään tyypillisesti pientaajuusongelmien ratkaisijana, mistä syystä ääneneristävyyden laskennassa usein hyödynnetään myös muita menetelmiä laajemman taajuusalueen kattamiseksi. Tässä artikkelissa on esitetty FE-menetelmällä saatuja laskennallisia ilmajääneristävyyden tuloksia betonilaa-talle ja ripalaatalle. Tulokset osoittavat vastoin yleistä käsitystä, että FEM so-veltuu hyvin rakenteiden ilmajääneristävyyden laskentatyökaluksi laajalla-kin taajuusalueella. Analyttisen laskentamallin avulla saatuihin tuloksiin tehty vertailu osoittaa, että FE-menetelmällä saavutetaan hyötyä rakenteen käyttäytymisen analysointiin.

## 1 JOHDANTO

Ilmajääneristyslaskenta on aktiivinen akustiikan tutkimushaara, jonka saralla on kehitetty laskentamenetelmiä analyttisistä malleista numeerisiin menetelmiin. Tyypillisesti raken-teiden, kuten seinien tai lattioiden, ja rakennusosien, kuten ovien tai ikkunoiden, ilmajää-neristävyyttä arvioidaan laskennallisesti näistä ensimmäistä tapaa hyödyntäen. Analyttiset mallit ovat hyvin tehokkaita silloin, kun tarkasteltava rakenne on menetelmän rajoit-teiden tai reunaehtojen puitteissa. Näiden menetelmien heikkous kuitenkin piilee juuri nii-den soveltuvuudessa, joka usein rajautuu yksinkertaisiin tapauksiin. Esimerkkinä tästä mainittakoon levy, jonka ilmajääneristävyyden laskemiseksi on esitetty useita malleja, kuten [1-6]. Tästä huolimatta äärellisen levyn mallintamisessa on edelleen avoimia kysy-kyksiä, koska tämän matemaattinen kuvaaminen on hyvin monimutkaista [7].

Monikerrosrakenteiden akustinen käyttäytyminen on monimutkaista, kun rakenteet koos-tuvat useasta eri tavoin käyttäytyvästä rakenteellisesta osasta ja akustisista väliaineista.



© 2021 Jesse Lietzén, Ville Kovalainen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka nou-dattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen -lisenssiä (CC BY 4.0). Te-osta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaiste-oksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Soveltuvin osin näiden arviointi on mahdollista parametrisilla laskentamalleilla, jotka usein yhdistelevät analyttisten laskentamallien tuloksia tai akustisin mittauksin kerrytettyä dataa. Vaihtoehdon parametrisille malleille muodostavat erilaiset numeeriset laskentamenetelmät, joiden soveltuvuus akustisten ongelmien ratkaisemiseen on erittäin laaja. Numeerisista laskentamenetelmistä ehkä yleisimmin käytetty on elementtimenetelmä (FEM), joka soveltuu myös ilmääneneristävyyden laskentaan erityisesti pienillä ja keskitaajuuksilla.

Elementtimenetelmää on yleisesti pidetty pientaajuusongelmien ratkaisijana [8] mistä johtuen ääneneristävyyden ratkaisemiseksi koko rakennusakustiikassa kiinnostavalla taajuusalueella (50–5000 Hz) monesti hyödynnetään useita numeerisia menetelmiä käyttäviä hybridimenetelmiä [9-11]. Tämä johtuu lähinnä siitä, että laajojen FE-ongelmien ratkaiseminen suurilla taajuuksilla on hidasta [8]. Nykyaikaisen laskentakapasiteetin avulla rakenteiden ilmääneneristävyyttä voidaan arvioida suurille taajuuksillekin asti. Tässä artikkelissa tätä on haluttu havainnollistaa betonilaatan ja puisen ripalaatan ilmääneneristävyyden laskennan avulla.

## 2 LASKENTAMENETELMÄT

Rakenteiden ilmääneneristävyyden laskenta suoritettiin alla esitetyllä analyttisillä menetelmillä sekä FE-menetelmällä. Valittu analyttinen laskentamenetelmä oli klassinen äärettömän isotrooppisen elastisen levyn impedanssiin perustuva menetelmä, jossa ilmääneneristävyys lasketaan Paris:n yhtälöllä (1)

$$R = -10 \log \left( \frac{\int_0^{\theta_l} \tau(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\theta_l} \sin \theta \cos \theta d\theta} \right) \quad (1)$$

jossa  $\tau(\theta)$  on tulokulman  $\theta$  mukainen äänenläpäisykerroin,  $\theta$  tarkasteltavan äänen tulokulma (0–90°) ja  $\theta_l$  suurin äänen tulokulma. Yksittäisen tulokulman mukainen äänenläpäisykerroin on

$$\tau(\theta) = \left| 1 + \frac{Z_w(\theta) \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right|^{-2} \quad (2)$$

jossa  $Z_w(\theta)$  on levyn impedanssi tulokulman  $\theta$  mukaan ja  $\rho_0 c_0$  on ilman akustinen impedanssi [12]. Laskennassa käytetään levyn impedanssina Sharpin [3] mallia, jossa rakenteen häviökerroin  $\eta$  on huomioitu taivutusjäykkyydessä  $B \rightarrow B(1+i\eta)$  [5]

$$Z_w(\theta) = j\omega m \left( 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \sin^4 \theta \right) + \eta \omega m \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \sin^4 \theta \quad (3)$$

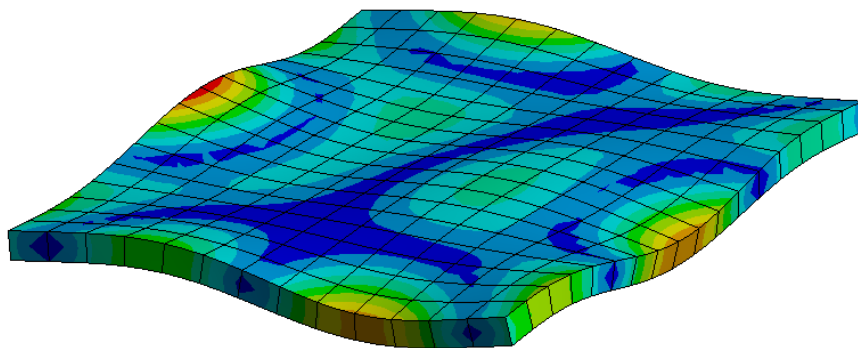
jossa  $j$  on imaginääriyksikkö,  $\omega$  on kulmataajuus,  $m$  on levyn pintamassa,  $f$  on taajuus,  $f_c$  on rakenteen koinsidenssin rajataajuus ja  $\eta$  on rakenteen kokonaishäviökerroin. Esitetyn klassisen menetelmän lisäksi laskenta suoritettiin Rindelin [6] menetelmällä, jossa äärettömän levyn sijaan levy pyritään ratkaisemaan äärellisenä, joka on reunoiltaan yksinkertaisesti tuettu. Isoimpina eroina klassiseen teoriaan on äärellisen rakenteen säteilykertoimen määrittäminen, levyn alimman ominaistajuuden vaikutuksen huomioon ottaminen sekä numeerisen integroinnin puuttuminen.

FEM-ohjelmistolla (Ansys 21R1) laskenta suoritettiin lineaariharmonisella analyysillä. Laatan pintaan kohdistettiin diskretisoitu diffuusi äänikenttä ja määritettiin rakenteen säteilemä äänitehotaso ilmaan. Rakenteen pintaan kohdistuvan ja rakenteen toiselle puolelle

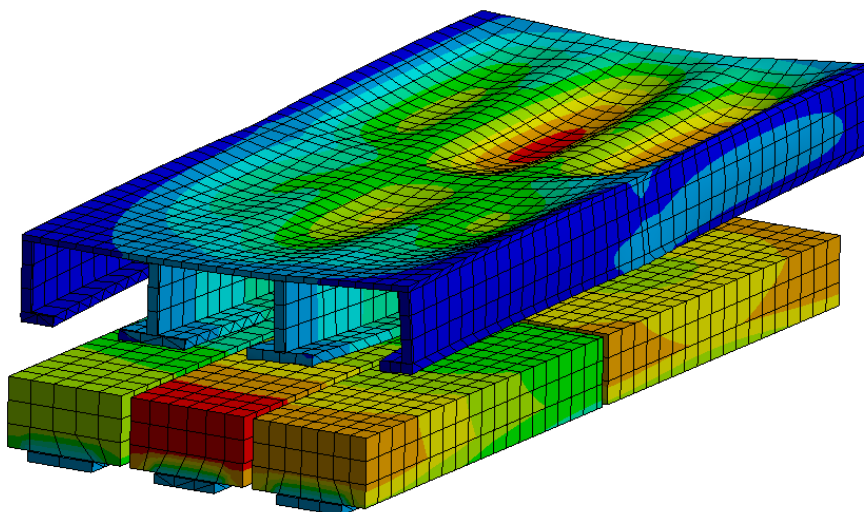
ilmaan säteilemän äänitehotason perusteella määritettiin tehojen logaritminen suhde eli ilmääneneristävyys  $R$ .

Tutkituille rakenteille oli tiedossa laboratorioissa mitatut ilmääneneristävydet, tarkat mitatiedot sekä käytössä olleet materiaalit ja tuotteet [13]. Betonilaatan tuennan vaikutusta ilmääneneristävyyteen tarkasteltiin kahdella tapaa ja betonin kuvaamiseen käytettiin isotrooppista lineaarielastista materiaalmallia. Ripalaatan FEM-mallinnuksessa otettiin huomioon rivat, ripojen välissä oleva ilma ja mineraalivilla, jolloin jaetun ilmatilan vaikutukset sisältyvät mallinnukseen. Puuta kuvaamaan käytettiin ortotrooppista lineaarielastista materiaalmallia, jonka parametrit määritettiin kirjallisuudesta ripalaatan eri puuosille. Ripalaatan alapuolella ei ollut alakattolevyjä. Rakenne asetettiin mallissa laboratorioaukkoon tärinäneristimien päälle, eikä rakennetta ole erityisemmin kiinnitetty muihin rakenteisiin.

Välipohjien ympäröivä rakenteita ei mallinnettu, jolloin laboratorioaukon aiheuttamat häviöt betonilaatassa otettiin huomioon laskennallisesti käyttäen laboratorioaukon sovitetta kokonaishäviökertoimelle [14]. Diffuusin äänikentän tulokulmat rajattiin tarkasteluissa välille  $0-78^\circ$ , jolloin tulokset ovat tämän kannalta vertailukelpoisia. Puuvälipohjan ilmääneneristävyyttä ei voida riittävän tarkasti esitetyllä klassisella menetelmällä määrittää, joten malleja (kaavat (1)-(3) ja [6]) käyttäen laskenta suoritettiin vain betonilaatalle. Esimerkkikuvat FEM-mallien värähtelymuodoista yksittäisillä taajuuksilla on esitetty kuvissa 1 ja 2.



Kuva 1. Betonilaatan deformaatio yksittäisellä taajuudella.



Kuva 2. Ripalaatan deformaatio yksittäisellä taajuudella. Ylempänä rakenteen deformaatio ja alapuolella ripojen välissä olevan ilman ja mineraalivillan akustinen kenttä.

### 3 TULOKSET

Ilmaääneneristävyyden mitatut, analyyttisen mallin ja FEM-mallin mukaiset tulokset on esitetty kuvissa 3 ja 4 betoni- ja puuväli pohjille. FEM-mallin tulokset määritettiin taajuusalueella 50–2500 Hz kolmannesoktaavikaistoille. Tulosten perusteella tuennan merkitys pienillä taajuuksilla on merkittävä sekä betoni- että ripalaatalla. Molemmat rakenteet mallinnettiin sekä vapaina laattoina että reunoiltaan tuettuina laattoina. Betonilaatta tuettiin reunoiltaan yksinkertaisesti ja ripalaatta asetettiin mallissa tärinäneristimille. Molemmilla rakenteilla saavutettiin hyvä vastaavuus mittaustuloksen ja FEM-mallinnuksen välillä.

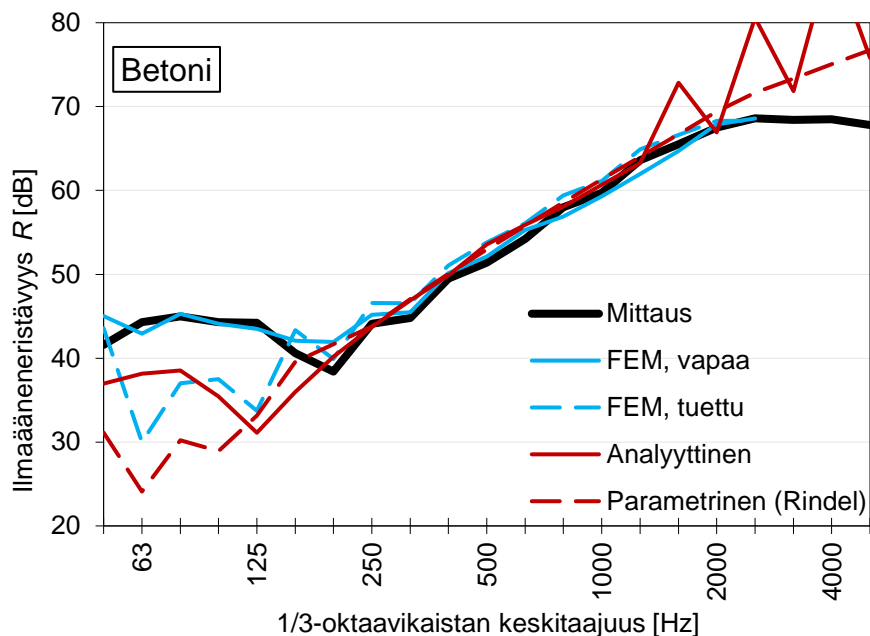
Betonilaatalla näkyy mittaustuloksessa ja simulaatiossa vapaasti tuettuna 200 Hz taajuuskaistalla ilmaääneneristävyyden heikennys, jota ei näy analyyttisten mallien tuloksissa tällä taajuuskaistalla (kuva 3). Betonilaatan koinsidenssin rajataajuus on luokkaa 110 Hz tuetun laatan analyyttisen mallin mukaan, mutta tämä ei näy vapaan betonilaatan simulaatio- tai mittaustuloksissa. Koinsidenssin rajataajuuden näennäiseen siirtymiseen vaikuttavat ainakin kaksi asiaa [6]: resonoivan värähtelyn säteilykerroin  $\sigma$  ja äänen tulokulma  $\theta$ . Paksuilla ja raskailla rakenteilla on ominaista, että resonoivan säteilyn maksimiarvo siirtyy koinsidenssin rajataajuutta suuremmalle taajuudelle  $f_b$ , jonka suuruus voidaan arvioida äänennopeuden  $c_0$  ja laatan piirin  $U$  perusteella seuraavasti

$$f_b = f_c + \frac{5c_0}{U} \quad (4)$$

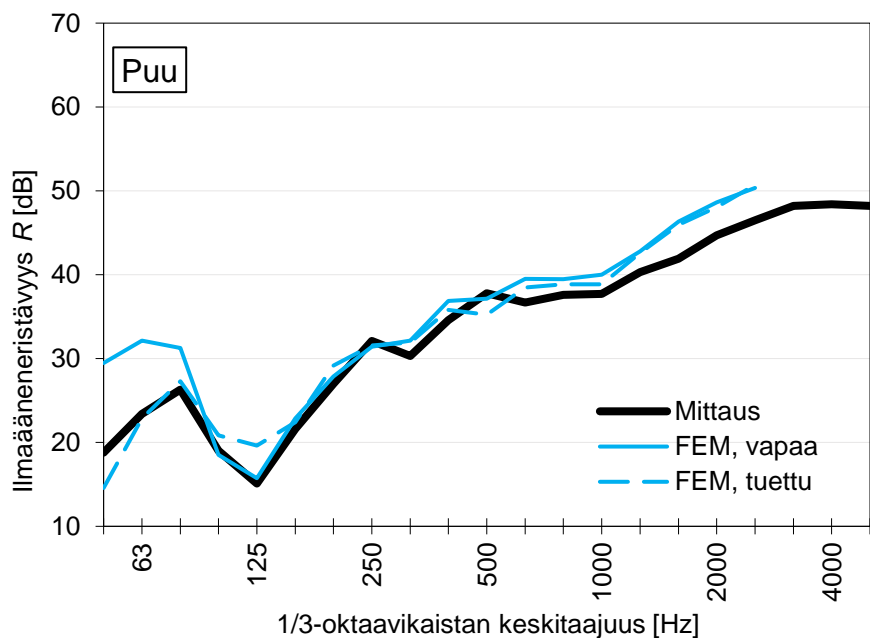
Siten  $10 \text{ m}^2$  näytekoolla rajataajuuden siirtyminen on noin 130 Hz, jolloin lopullinen maksimisäteily aiheutuisi taajuudella 240 Hz. Rindelin malli [6] ottaa tämän huomioon, mutta ilmiö ei ole yhtä selvästi kuvaajasta nähtävissä kuin mittaustuloksesta. Toisaalta yksinkertaisesti tuetun betonilaatan heikennys ei ole yhtä selvästi nähtävissä FEM-mallinnuksen tuloksessakaan tällä taajuuskaistalla. FEM-mallin avulla tehdyn moodianalyysin perusteella tuetun betonilaatan alin ominaistajuus oli 61,2 Hz, jonka vaikutus näkyy taajuuskaistalla 63 Hz ilmaääneneristävyyden heikennyksenä tuetun laatan FEM-mallin ja Rindelin mallin mukaisissa tuloksissa.

Äänen tulokulman vaikutus näkyy numeerisesti integroidussa klassisen laskentamenetelmän tuloksessa: kun maksimitulokulma on rajoitettu  $78^\circ$ , koinsidenssin rajataajuuden heikennys siirtyy taajuuskaistalta 100 Hz taajuuskaistalle 125 Hz. Ero näkyy analyyttisen mallin ja Rindelin mallin [6] tulosten välillä; koinsidenssin rajataajuus ei siirry Rindelin mallissa. Koinsidenssin rajataajuuden heikennys näkyy vastaavasti myös numeerisissa mallinnustuloksissa, kun laatan tuenta muutetaan yksinkertaiseksi.

Ripalaatta ei ole kuvattavissa esitetyillä analyyttisellä laskentamenetelmällä tai Rindelin mallilla [6] johtuen erityisesti palkkien vaikutuksesta rakenteen ominaisuutoihin sekä ripavälissä olevasta mineraalivillasta. Tästä johtuen ripalaatan ilmaääneneristävyys määritettiin vain FEM-mallinnuksen avulla (kuva 4). Mittaustilanteessa ripalaatta oli asennettu tärinäneristimien päälle, minkä huomioon ottaminen paransi mitatun ja mallinnetun ilmaääneneristävyyden vastaavuutta pienillä taajuuksilla. Suurilla taajuuksilla saattaa vaikuttaa rakenteelle arvioidut häviökertoimet.



Kuva 3. Betonilaatan tulokset.



Kuva 4. Ripalaatan tulokset.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

FEM-mallinnusten tulokset vastaavat hyvin laboratoriossa mitattuja ilmaääneneristävyyksiä tutkituilla rakenteilla suurillakin taajuuksilla. Lisäksi havaittiin, että rakenteet ovat herkkiä tuennan vaikutukselle erityisesti pientaajuusalueella ja klassisten teorioiden ulkopuolelle jäävien rakenteiden tarkka mallinnus on mahdollista FE-menetelmää hyödyntäen. Analyttisten mallien ja FEM-mallinnuksen tulosten välillä oli havaittavissa suhteellisen suuria eroja yksinkertaisen betonilaatankin kohdalla, vaikka yksinkertaisesti tuettu isotrooppinen levyrakente kuuluu perinteisesti parametrinen menetelmien sovellusalueeseen. Tosiasiallisesti äärellisen levyn ilmaääneneristävyyden määrittäminen tarkasti ei siis ole kaikilla

analyttisillä menetelmillä kaikissa tapauksissa mahdollista, vaikkakin suunnittelukäytössä konservatiivinen arvio ei aina ole haitaksi. FEM-mallinnuksella on mahdollista ottaa huomioon hyvin monimutkaisiakin tekijöitä, jotka eivät välttämättä aina sijaitse pientaajuusalueella, joka on normaalisti mielletty FEM-mallinnuksen sovellusalueeksi.

## VIITTEET

- [1] Cremer, L. 1942. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. *Akustische Zeitschrift*, Vol. 7, 81–104.
- [2] London, A. 1949. Transmission of reverberant sound through single walls. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 42, 605-615.
- [3] Sharp, B. 1973. A study of techniques to increase the sound insulation of building elements, Wyle laboratories report WR 73-5.
- [4] Koval, L. R. 1976. Effect of air flow, panel curvature, and internal pressurization on field-incidence transmission loss. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59 (6), 1379-1385.
- [5] Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyyden ennustemalli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2.
- [6] Rindel, J. H. 2018. *Sound insulation in buildings*. Boca Raton, CRC Press.
- [7] Brunskog, J. 2012. The forced sound transmission of finite single leaf walls using a variational technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132 (3), 1482-1493.
- [8] Atalla, N., Sgard, F. 2015. *Finite element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. Boca Raton, CRC Press.
- [9] Brunskog, J., Davidsson, P. 2004. Sound Transmission of Structures. A Finite Element Approach with Simplified Room Description. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 90, 847-857.
- [10] Pates, C. S., Shirahatti, U. S., Mei, C. 1995. Sound–structure interaction analysis of composite panels using coupled boundary and finite element methods. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98 (2), 1216-1221.
- [11] Wu, F., He, Z. C., Liu, G. R., Li, G. Y., Cheng, A. G. 2016. A novel hybrid ES-FE-SEA for mid-frequency prediction of transmission losses in complex acoustic systems. *Applied Acoustics*, Vol. 111, 198-204.
- [12] Cremer, L., Heckl, M., Ungar EE. 1973. *Structure-borne sound*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- [13] A-Insinöörien mittaustietokanta. Sisältää kerättyä mittausdataa tutkimuksista.
- [14] SFS-EN ISO 12354-1. 2017. *Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms*. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.