

## MONIKERROKSISTEN ABSORPTIORAKENTEIDEN MALLINTAMINEN

David Oliva, Henna Häggblom, Valtteri Hongisto

Sisäympäristölaboratorio, Työterveyslaitos  
Lemminkäisenkatu 14-18B, 20520, TURKU  
david.oliva@ttl.fi

### TIIVISTELMÄ

Tavoitteena oli kehittää validoitu laskentamalli, jolla voidaan laskea monikerrosrakenteiden absorptiosuhde normaalilla tulokulmalla. Malli perustuu impedanssilaskentaan. Jokaiselle kerrokselle määritetään impedanssiyhtälöt, jotka liitetään yhteen tätä varten kehitetyillä algoritmeilla. Lopputuloksena saadaan rakenteen kokonaisimpedanssi ja absorptiosuhde  $\alpha$ . Rakente voi koostua erilaisista kerroksista, kuten huokoisista materiaaleista, tiiviistä levyistä, tiiviistä kalvosta, reikälevystä tai ilmakerroksesta. Mallin vertailu mittaustuloksiin tehtiin noin 200 rakenteelle. Useimmissa tapauksissa absorptiosuhteen tarkkuus oli  $\Delta\alpha = \pm 0.1$  kun tarkasteltiin taajuusalueita 100-3150 Hz, normaalia tulokulmaa ja tyypillisimpiä sisäkattorakenteita.

## 1 JOHDANTO

Absorptiomateriaalien käyttö yleistyy jatkuvasti ja vaihtoehtoisten materiaalien määrä on kasvamassa. Samalla on yleistynyt monikerrosrakenteiden käyttö, jolloin samaan rakentamiseen voi liittyä muita kuin akustisia erityisvaatimuksia, kuten lämmöneristys ja tähän liittyvä höyrynsulku, mekaaninen kestävyys, ääneneristys, läpinäkyvyys, palonkesto-ominaisuus tai erityinen pinnoite esimerkiksi visuaalisen ilmeen takia. Äänenabsorptio liitetään myös yhä useammin kalusteisiin kuten toimistoseinäkkeisiin tai kaapistoihin.

Monikerrosrakenteet voivat olla hyvin monimutkaisia koostuen ilmapäleistä, reikälevyistä, huokoisista materiaaleista, höyrynläpäisyä estävistä kalvoista tai rakenteen osittain peittävästä kerroksista kuten tukirakenteista. Absorptiomateriaalien kehitys tapahtuu useimmiten mittaus- ja empiirisen kokemuksen pohjalta. Pienissä kehitysprojekteissa tämä on usein toimivin kehitystapa. Laajemmissa projekteissa kehitystyö voisi olla rationaalisempaa, jos apuna olisi matemaattinen mallinnusmenetelmä, johon lähtötietojen syöttäminen ei vaatisi paljon työtä. Absorptiosuhde voidaankin määrittää laskennallisesti, kun tunnetaan materiaalikerrosten akustiset ominaisuudet kuten virtausvastus, paksuus ja reikäala.

Tavoitteena oli kehittää yksinkertainen ennustemalli, jolla voidaan laskea monikerroksisen absorptiomateriaalin absorptiosuhde normaalilla tulokulmalla. Mallin tarkkuutta tutkittiin vertaamalla ennustemallin ja mittaus- tuloksia keskenään. Mittaukset tehtiin impedanssiputkella (ISO 10534-1998). Mittausmenetelmää ja mittaussarjaa käsiteltiin viimekertaisessa kongressissa [1].

## 2 MALLIN KUVAUS

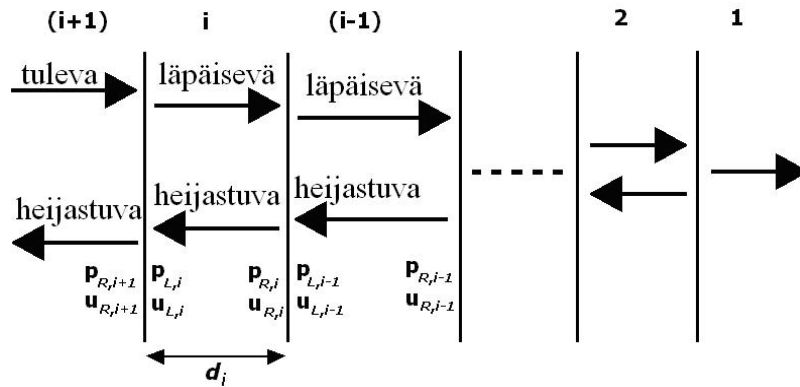
Malli olettaa, että kahden kerroksen järjestelmän kokonaisimpedanssi saadaan yksittäisten kerrosten impedansseista yhtälöllä, kuva 1.

$$z_{R,i+1} = z_{L,i} = \frac{-jz_{R,i}z_i \cot(k_i d_i) + z_i^2}{z_{R,i} - jz_i \cot(k_i d_i)} \quad (1)$$

jossa  $z_{R,i+1}$  on pintaimpedanssi  $(i+1)$ :n kerroksen oikealla puolella,  $z_{L,i}$  ja  $z_{R,i}$  ovat vastaavasti pintaimpedanssit  $i$ :n kerroksen vasemmalla puolella ja oikealla puolella,  $z_i$  on materiaalin ominaisimpedanssi,  $d_i$  on kerroksen  $i$  paksuus [m], ja  $k_i$  on sen kompleksinen aaltoluku [ $m^{-1}$ ]. Monikerrosrakenteissa tätä oletusta voi käyttää rekursiivisesti rakennejärjestelmässä oikealta vasemmalle, kunnes kaikki impedanssit on yhdistetty [3]. Kerrokset voivat olla joko levyä, rei'itettyä levyä, ilmväliä tai huokoista materiaalia. Rakenteiden absorptiosuhde,  $\alpha$ , saadaan rekursiivisesti lasketusta kokonaisimpedanssista  $z_L$ :

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad ; \quad \text{kun } R = \frac{z_L - z_0}{z_L + z_0} \quad (2)$$

jossa  $R$  on heijastussuhde ja  $z_0$  on ilman ominaisimpedanssi [ $kg/m^2s^2$ ].



Kuva 1. Kerrosrakenteen  $i$ -indeksointi alkaa alimmasta kerroksesta.

Tutkimuksessa vertailtiin useiden eri kirjallisuuslähteiden mukaisia impedanssimalleja. Näistä valikoitiin parhaiten toimivat yhtälöt vertaamalla mallin tuloksia impedanssiputkella saatuihin mittaustuloksiin. Vertailussa lisäehtona oli, että lähtöparametrit olisivat helposti löydettävissä. Huokoisiin materiaaleihin Qunlin [4] empiiriset kaavat (3) toimivat paremmin kuin Delanyn ja Bazleyn mallit matalilla taajuuksilla ja suurilla. Ominaisimpedanssi ja etenemisvakio saadaan yhtälöillä

$$z_a = z_0 \left( 1 + 0.209 X^{-0.548} - j0.105 X^{-0.607} \right) \quad (3)$$

$$k_a = \frac{\omega}{c} \left( 1 + 0.188 X^{-0.554} - j0.163 X^{-0.592} \right) \quad ; \quad \text{jossa } X = \frac{\rho_0 f}{\sigma}$$

jossa  $\omega$  on kulmanopeus [ $s^{-1}$ ],  $c$  on äänen nopeus ilmassa [ $m/s^2$ ],  $\rho_0$  on ilman tiheys [ $kg/m^3$ ],  $f$  on taajuus [Hz] ja  $\sigma$  on spesifinen virtausresistiivisyys [ $kg/m^2s$ , rayl/m].

Rei'itetyn levyn impedanssi on (4)

$$z_p = r_p + j \left[ \omega m_p - z_0 \cot(kd) \right] \quad (4)$$

missä rei'itetyn levyn pintamassa  $m_p$  [ $kg/m^2$ ] on

$$m_p = \frac{\rho_0}{\varepsilon} \left[ d + \delta a + \sqrt{\frac{8v}{\omega} \left( 1 + \frac{d}{a} \right)} \right] \quad (5)$$

jossa  $\varepsilon$  on rei'ityssuhde,  $\delta = 0.8 (1-1.4\varepsilon^{1/2})$  on korjauskorroin,  $a$  on reiän halkaisija [m], ja  $\nu$  on ilman viskositeetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Kun rei'itetyllä levyn takana ei ole huopaa, rei'itetyn levyn resistanssi [rayl] on

$$r_p = \frac{\rho_0}{\varepsilon} \sqrt{8\nu\omega} \left(1 + \frac{d}{a}\right) \quad (6)$$

Rei'itetyillä levyillä takapintaan on usein liimattu huokoinen kerroshuopa, jolloin rei'itetyn levyn resistanssi on

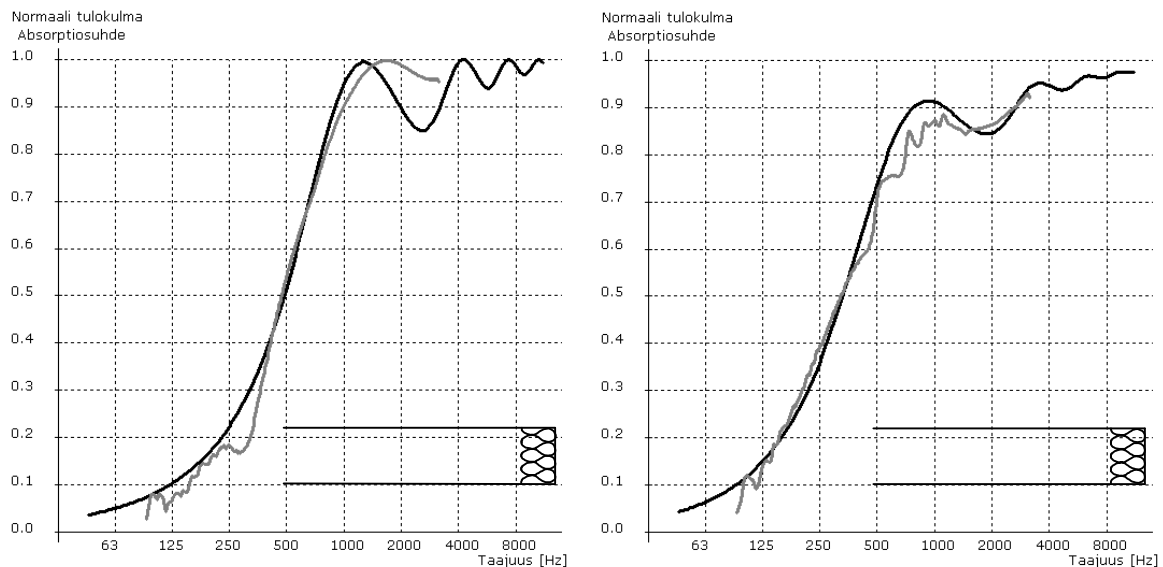
$$r_p = \frac{\sigma d}{\varepsilon} \quad (7)$$

missä  $\sigma$  [rayl/m] on huovan virtausresistiivisyys. Kun levyssä ei ole reikiä  $r_p = 0$  ja  $m_p = \rho/d$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]. Tässä tutkimuksessa taustahuovan resistiivisyys mitattiin kipsilevyn kanssa, jolloin  $d$ :n arvona oli levyn kokonaispaksuus 13 mm.

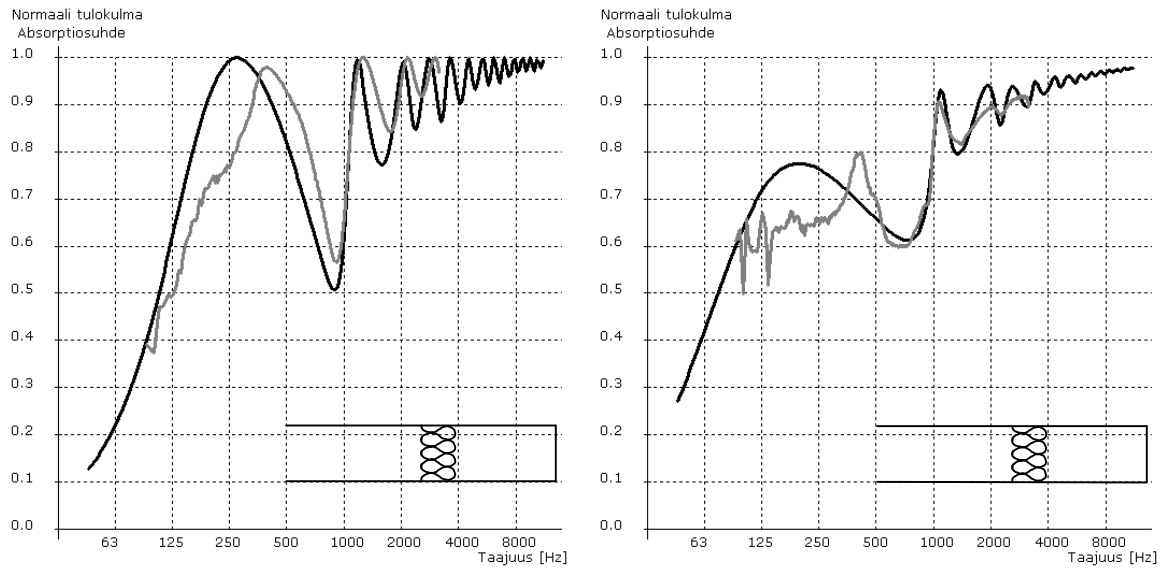
Qunlin impedanssimalli huokoisille materiaaleille oli osin epätarkka, kun villan tiheys oli pieni (kuvat 2a ja 3a). Tähän sopi paremmin Delanyn ja Bazleyn malli. Toisaalta se toimi huomommin pienillä taajuuksilla ja suuren virtausvastuksen materiaaleilla. Mallin valinnassa edellytettiin kohtalaista tarkkuutta kaikenlaisilla materiaaleilla koko taajuusalueella 100-3150 Hz. Esim. Qunlin malli oli ainoa, joka toimi hyvin alaslasketuille villoille, jotka olivat tiheitä.

### 3 TULOKSET

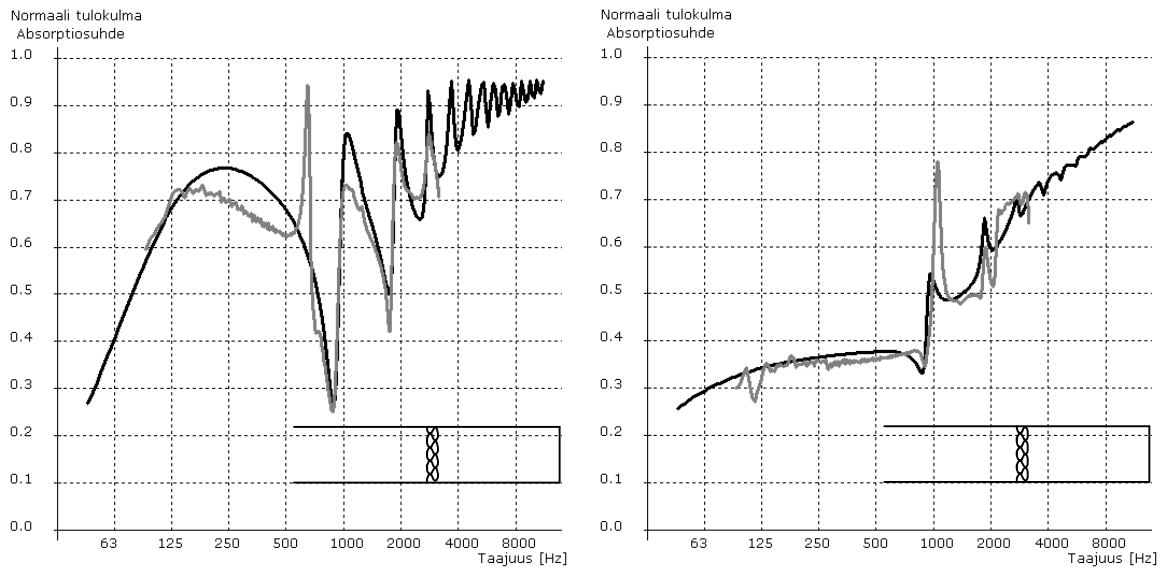
Mallin tarkkuutta tutkittiin vertaamalla ennustemallin ja absorptioputkimittausten tuloksia keskenään n. 200 rakenteella. Kuvissa 2-7 esitetään 12 rakenne-esimerkkiä, joissa ennustemallin tulokset ovat mustalla viivalla ja mittaustulokset harmaalla viivalla. Harmaan viivan erottaa kapeammasta taajuuskaistasta.



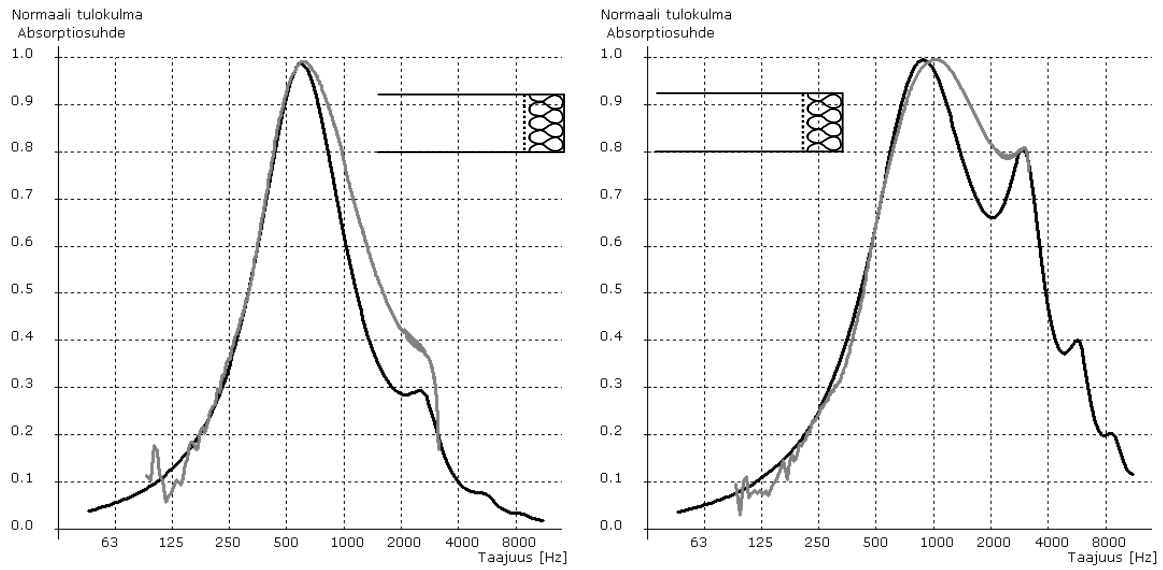
Kuva 2 (a) 50 mm villa,  $18 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 9600 rayl/m. (b) 50 mm villa,  $76 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 28000 rayl/m.



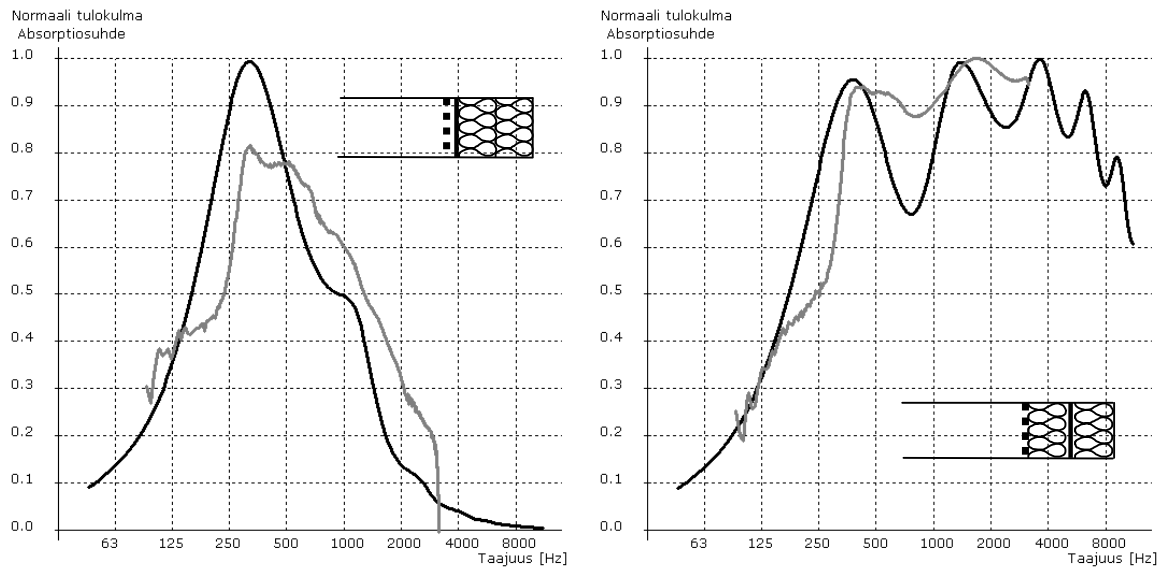
Kuva 3 (a) 50 mm villa,  $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $9600 \text{ rayl/m}$  + 150 mm ilmaväli. (b) 50 mm villa,  $76 \text{ kg/m}^3$ ,  $28000 \text{ rayl/m}$  + 150 mm ilmaväli.



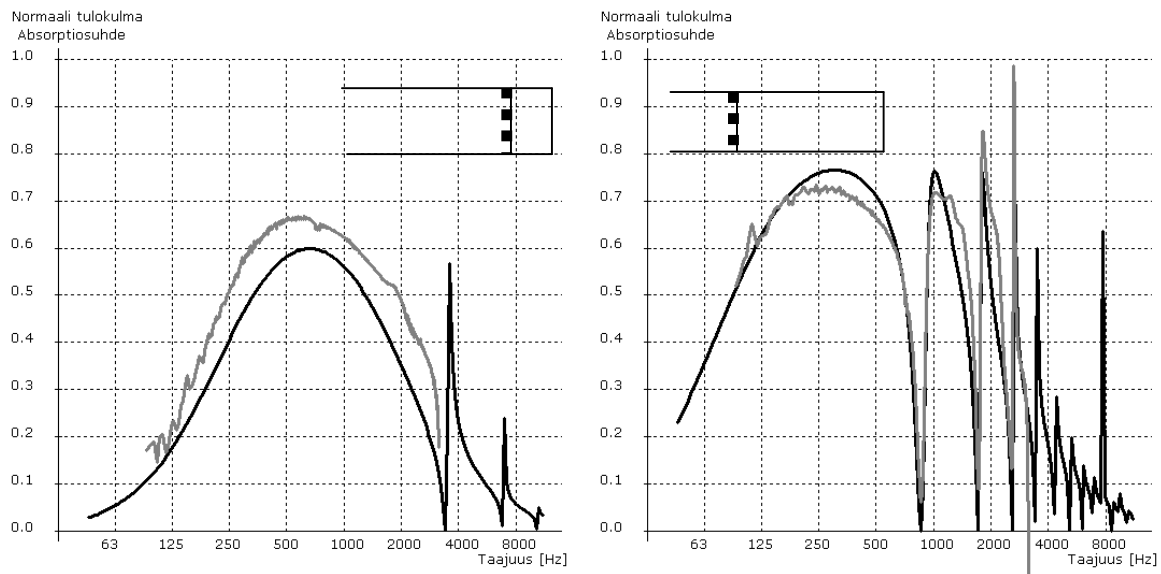
Kuva 4 (a) 18 mm pinnoitettu villa,  $150 \text{ kg/m}^3$ ,  $72000 \text{ rayl/m}$  + 182 mm ilmaväli. (b) 18 mm pinnoitettu villa,  $201 \text{ kg/m}^3$ ,  $215000 \text{ rayl/m}$  + 182 mm ilmaväli.



Kuva 5 (a) 0.9 mm rei'itetty pelti, reikähalkaisija 1.3 mm, rei'itysprosentti 1.3 % + 50 mm villa, 18 kg/m<sup>3</sup>, 9600 rayl/m<sup>3</sup>. (b) 0.9 mm rei'itetty pelti, 1.3 mm, 4.2 % + 50 mm villa, 18 kg/m<sup>3</sup>, 9600 rayl/m.



Kuva 6 (a) 0.9 mm rei'itetty pelti, 4 mm, 23.8 % + 0.2 mm muovikalvo, 920 kg/m<sup>3</sup> + 100 mm villa, 18 kg/m<sup>3</sup>, 9600 rayl/m. (b) 0.9 mm rei'itetty pelti, 4 mm, 23.8 % + 50 mm villa, 18 kg/m<sup>3</sup>, 9600 rayl/m + 0.2 mm muovikalvo, 920 kg/m<sup>3</sup> + 50 mm villa, 18 kg/m<sup>3</sup>, 9600 rayl/m.



Kuva 7 (a) 13 mm rei'itetty kipsi, 6 mm, 13 %, 140000 rayl/m + 50 mm ilmaväli (b) 13 mm rei'itetty kipsi, 12x12 mm, 19 %, 91000 rayl/m + 200 mm ilmaväli.

#### 4 POHDINTA

Mallin vertailu mittaustuloksiin tehtiin 36 materiaalille ja yli 200 näistä kootulle monikerrosrakenteelle. Useimmissa tapauksissa absorptiosuhteen ennustetarkkuus oli  $\Delta\alpha=\pm 0.1$  kun tarkastellaan taajuusaluetta 100-3150 Hz.

Mallin ja mittauksen vertailu on tehty ainoastaan normaalilla tulokulmalla. Tulevaisuudessa implementoitavassa ennustemallissa huomioidaan diffuusin äänikentän vaikutus, jolloin päästään käsiksi tilastolliseen absorptiosuhteeseen. Tällöin ennustemallin tuloksia voidaan verrata ISO 354 mukaisiin mittaustuloksiin.

#### KIITOKSET

Tämä tutkimus on osa MAKSI tutkimushanketta, jonka rahoittivat Tekes, Työterveyslaitos sekä useat yritykset. Materiaaleja toimittivat mm. Ecophon Oy, Paroc Oy, Raniplast Oy ja Ruukki Oyj. Materiaalitoimituksissa auttoi lisäksi SisustusNummi Oy.

#### VIITTEET

1. OLIVA D. et al, Absorptiosuhteen riippuvuus materiaaliparametreista. *Akustiikkapäivät 2007*, 27.-28.9.2007, Espoo, 124-129.
2. OLIVA D. et al, Sound absorption coefficient in multi-layered materials - an experimental study. Work Environment Report Series, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki 2009 (*painossa*).
3. QUNLI W, Empirical relations between acoustic properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam. *Appl Acoust* 25(1988):141-148.
4. COX T.J., D'ANTONIO P., Acoustic absorbers and diffusers; theory design and application. Ch.5, Ch. 6. Spon press.