

# AVOTOIMISTOTYÖPISTEIDEN VÄLINEN AKUSTIIKKA - LABORATORIOTUTKIMUS

**Jukka Keränen, Petra Larm, Riikka Helenius, Jarkko Hakala, Valtteri Hongisto**

Työterveyslaitos, Ilmastointi- ja akustiikkalaboratorio  
Lemminkäisenkatu 14-18 B, 20520 TURKU  
jukka.keranen@ttl.fi

## 1 JOHDANTO

Avotoimistoissa tehtyjen kyselytutkimusten mukaan avotoimistoissa häiritsevin melunlähde on viereisestä työpisteestä kuuluvat puheäännet.[1] Ilmanvaihdon aiheuttamaa taustamelua tai tilan kaiuntaisuutta ei yleensä koettu yhtä häiritsevinä. Puheäännten häiritsevyyden arvioimiseen soveltuu parhaiten puheenerotettavuus, joka voidaan objektiivisesti mitata puheensiiroindeksillä (STI/RASTI). Puheenerotettavuuteen vaikuttaa ensisijaisesti puhkehinasuhde, jonka minimointiin avotoimistoissa tulisi pyrkiä. Tällöin puheäännten häiritsevyys olisi vähäistä. Tämä vaatii alakaton absorptioon, seinäkekorkeuden ja taustamelutason samanaikaista huomiointia. Kirjallisuudesta ei löytynyt kokeellisia tutkimuksia, joissa tätä asiaa olisi perinpohjaisesti selvitetty.[2]

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää laboratoriotesteillä seinäkkeen korkeuden, seinäkkeen, alakaton ja lattiapäällysteen pintamateriaalien absorptioon, alakaton asennuskorkeuden sekä taustamelutason vaikutus työpisteiden väliseen äänenvaimennukseen ja puheenerotettavuuteen.

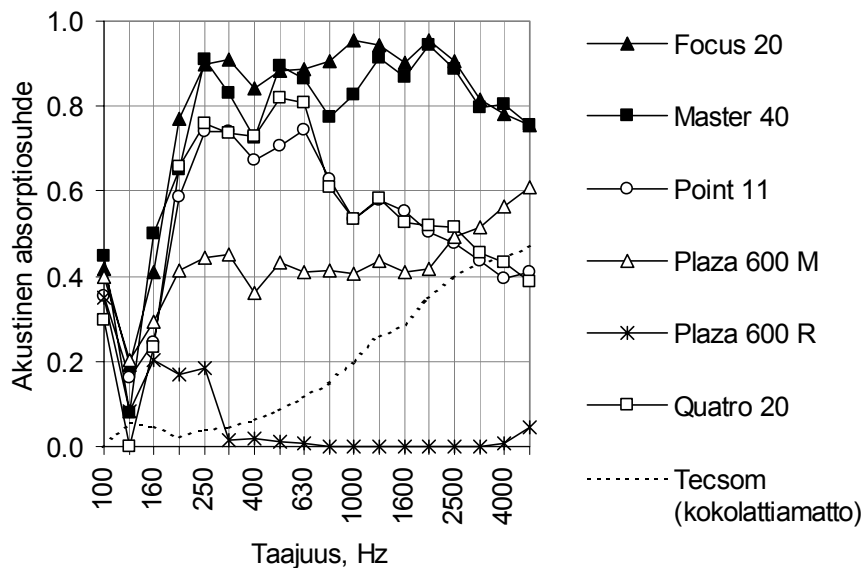
## 2 MATERIAALIT

Laboratoriossa tutkittiin 30 erilaista alakatto-, seinäke- ja taustameluyhdistelmää. Käytössä oli kolme eri korkuista (130, 168 ja 210 cm) kova- ja pehmeäpintaista seinäkettä. Osa seinäkkeistä oli kaupallisia (Kanvas, Stacks) ja osa ei (12 mm lastulevy, lasivillapinnoitus). Alakaton absorptioon vaikutusta tutkittiin kolmella eri alakattomateriaalilla (Plaza 600 R, Master 40 ja Point 11). Lisäksi tutkittiin pehmeän lattiamateriaalin (Tecom) absorptioon vaikutusta.

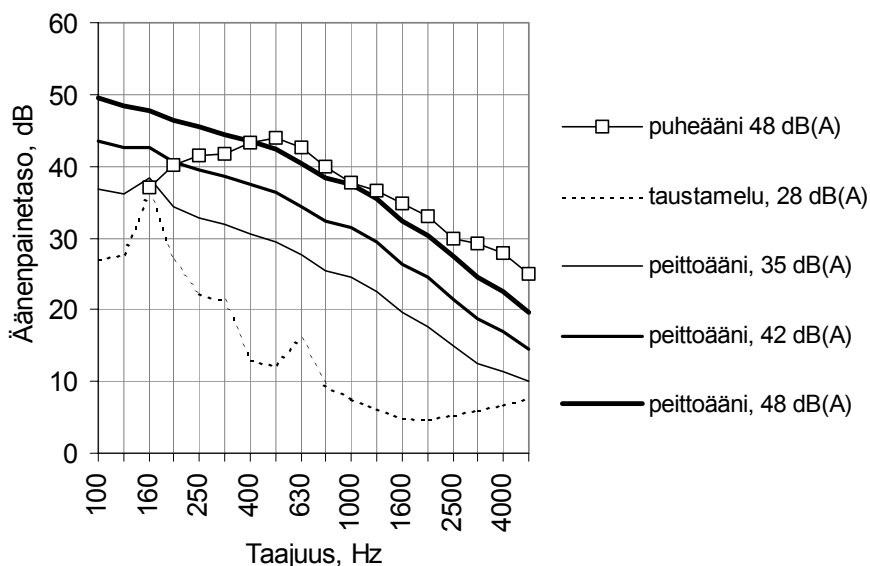
Kuvassa 1 esitetään alakattomateriaaleille 200 mm alaslaskulla ja pehmeälle lattiamateriaalille ISO 354 standardin mukaan mitatut akustiset absorptiosuhteet. Laboratoriotutkimuksessa alaslasku oli huomattavasti suurempi, 1100 mm.

Kuvassa 2 esitetään taustamelun ja peittoäännten spektrit puheenerotettavuusmittauksissa. Lisäksi kuvassa esitetään ANSI S3.5 standardin mukainen spektri puheäännele. Taustamelu aiheutui laboratoriorakennuksen äänistä. Peittoäännet tuotettiin peittoäänijärjestelmällä. Peittoäännten spektrit muokattiin Beranekin suosituksen mukaiseksi.[3] Peittoäännen taso säädettiin siten, että kuulijan paikalla mitattu äänenpainetaso  $L_{A,eq}$  oli 35, 42 tai 48 dB.

Kaikki mittaustilanteet esitetään taulukossa 1.



Kuva 1. Alakattomateriaalien akustiset absorptiosuhteet 200 mm alaslaskulla.



Kuva 2. Taustamelun, peittoäänten ja puheäänen spektrit.

### 3 MENETELMÄT

Tutkittavat parametrit olivat seinäkkeen lisäsvaimennus, standardoidun puheen äänitaso ja puheensiirtoindeksi (RASTI) seinäkkeen takana ja tilan jälkikaiunta-aika ( $T_{20}$ ). Tutkimus suoritettiin Turun alueterveyslaitoksen akustiikkalaboratorion testihuoneessa, jonka mitat ovat 7.0 x 4.4 x 3.6 m. Huoneen kaikki seinäpinnat on pinnoitettu 300 mm lasivillalla, jonka absorptiosuhde on yli 0.90 taajuuksilla 100-10000 Hz. Tämä vastasi tilannetta, jossa työpistepari on keskellä suurta avotoimistoa ja heijastavien seinäpintojen merkitys on vähäinen. Lattia on maalattua betonia. Alakatto asennettiin 600 x 600 elementeistä alaslaskettuna 2.5 m korkeuteen, mikä on tyyppinen ratkaisu avotoimistoissa. Alakaton yläpuolelle jäi 1.1 m ilmapäli. Myöhemmin raportoidaan myös tulokset alakaton asennuskorkeudella 3.3 m. Seinäke asennettiin tilan keskelle seinästä seinään siten, että se jakoi tilan kahteen yhtäsuureen osaan eikä ääni päässyt kiertämään seinäkettä. Kova seinäke

oli 15 mm lastulevyä. Pehmeän seinäkkeen puhujan puoleiseen pintaan kiinnitettiin 45 mm Isover lasivillaa. Martelan seinäkkeet (Stacks, Kanvas) asennettiin valmistajan ohjeiden mukaisesti. Seinäkkeen molemmille puolille sijoitettiin työpöytä ja kaksi tuolia (kuva 3) tärykaiunnan estämiseksi. Kaiutin (Genelec 1029A) sijoitettiin *puhujan paikalle* 1.2 m korkeuteen ja etäisyydelle seinäkkeen pinnasta. Mikrofonit (B&K 4190, esivahvistin B&K 2669) sijoitettiin seinäkkeen toiselle puolelle *kuulijan paikalle* seinäkkeen 1.2 m korkeuteen 1.2 m etäisyydelle seinäkkeen pinnasta.

Seinäkkeiden äänenvaimennus mitattiin ISO 11821 standardin mukaan seinäkkeen kanssa ja ilman seinäkettä kuulijan paikalla mitattujen äänenpainetasojen erotuksena. Äänenvaimennuksista määritettiin painotettu äänenvaimennusluku,  $DL_{s,w}$ , ISO 10053 standardin mukaan. Mittauksen testisignaalina käytettiin vaaleanpunaista kohinaa, jonka voimakkuus säädettiin siten, että taustamelukorjausta ei tarvittu.

Puheenerotettavuuden mittaustilanne esitetään kuvassa 3. Puheenerotettavuus mitattiin RASTI menetelmällä IEC 60268-16 standardin mukaisella mittalaitteistolla (B&K 3361), johon kuuluu lähetin ja vastaanotin. Lähetin sijoitettiin puhujan paikalle ja vastaanotin kuulijan paikalle. Lähetin ja vastaanotin suunnattiin toisiaan kohti. Mittaus tehtiin kuvassa 2 esitetyillä peittoäänien tasoilla.

Peittoääni tuotettiin erillisellä järjestelmällä, jonka kaiutin (4" elementti 2.75 litran suljetussa kotelossa) sijoitettiin alakattoon mikrofonin yläpuolelle. Peittoäänien spektri muokattiin taajuussuotimella (Behringer 8024 DSP Ultra Curve Pro) ja vahvistettiin vahvistimella (Pioneer A-339).

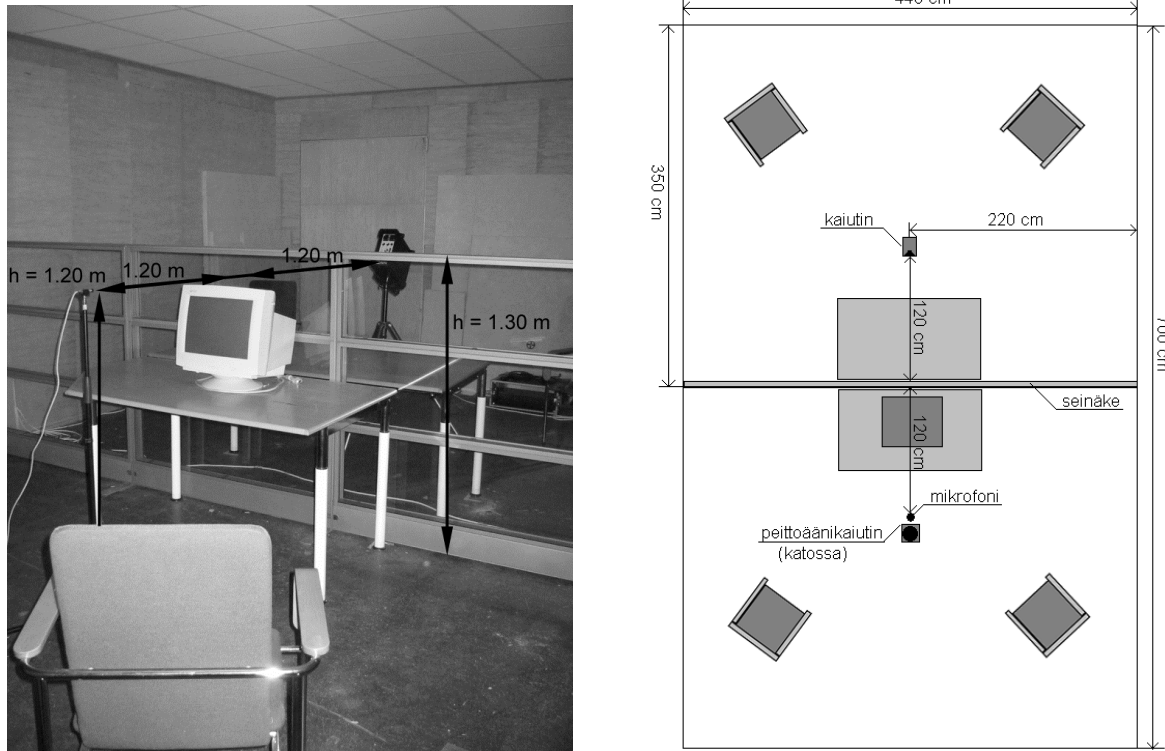
Puheääni toistettiin CD-soittimella (Marantz 4000CD) ja puhujan paikalle sijoitetulla kaiuttimella (Genelec 1029A). Järjestelmän vahvistus säädettiin siten, että puheen  $A$ -taajuuspainotettu äänenpainetaso  $L_{A,eq}$  vapaassa kentässä 1 m etäisyydellä oli 59 dB ja spektri vastasi ANSI S3.5 standardissa normaaliääniselle puheelle esitettyä. Puheen äänenpainetaso mitattiin kuulijan paikalla 1/2" kondensaattorimikrofonilla (B&K 4190, esivahvistin B&K 2669) ja analysaattorilla (Norsonic 840 RTA).

Tilan jälkikaiunta-aika,  $T_{20}$ , mitattiin analysaattorilla (Norsonic 840 RTA) MLS-menetelmää käyttäen. Signaalikohinasuhteelle asetettiin minimivaatimukseksi  $S/N > 30$  dB. Jälkikaiunta-aika mitattiin kolmen pisteen keskiarvona.

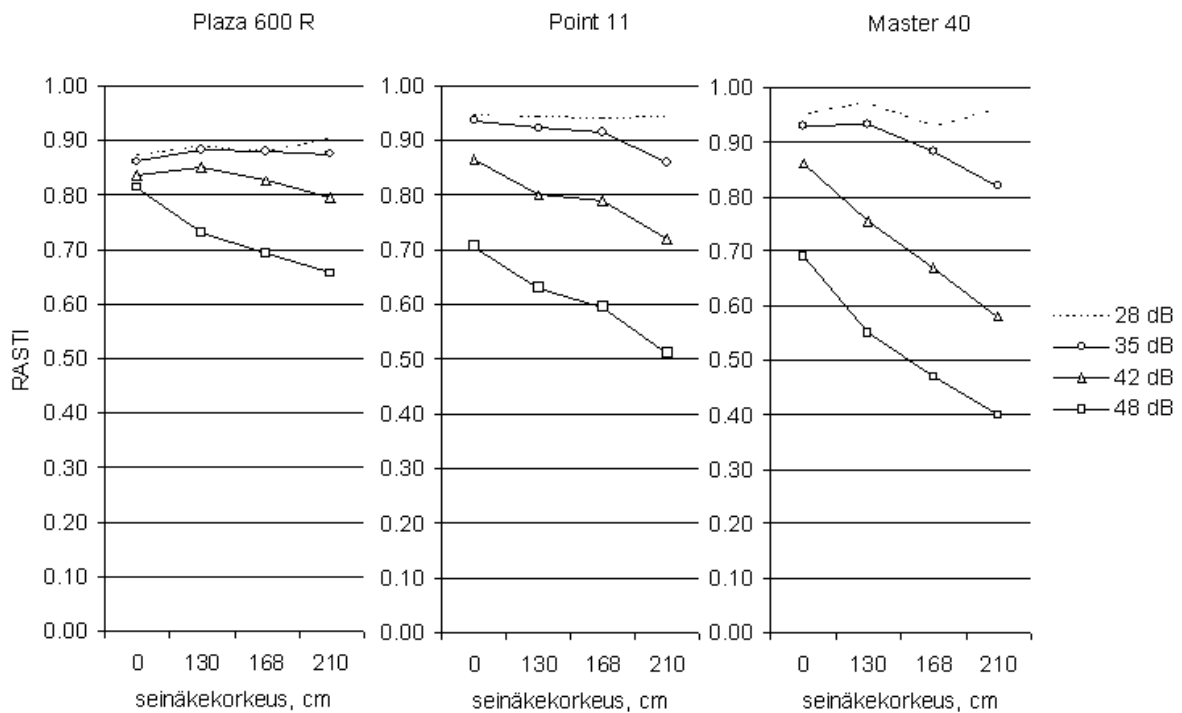
#### 4 TULOKSET

Mittaustulosten yhteenveto esitetään taulukossa 1. Taulukossa esitetään mitattu puheenerotettavuus, RASTI, puheen äänitaso,  $L_S$ , kuulijan paikalla, seinäkkeen äänenvaimennusluku,  $DL_{s,w}$ , ja jälkikaiunta-aika,  $T_{20}$ , taajuuksien 0.5-10 kHz keskiarvona.

Kuvassa 4 esitetään kovan seinäkkeen korkeuden vaikutus puheenerotettavuusindeksiin kuulijan paikalla kolmella eri alakattomateriaalilla ja peittoäänitasolla sekä taustamelutasolla 28 dB.



Kuva 3. Työpisteiden välisten akustisten mittausten järjestelyt laboratoriossa.



Kuva 4. Seinäkekorkeuden vaikutus RASTI-arvoon eri alakattomateriaaleilla ja peittoäänitasoilla (alakatto 2.5 m korkeudella, kova seinäke).

Taulukko 1. Mittaustilanteet laborioritesteissä. Alakatto asennettiin 2.5 m korkeuteen.

Katto- Koe	Katto- materiaali	Seinäke- materiaali	Seinäke- korkeus cm	Lattia- päällyste	RASTI				$L_S$ dB	$DL_{s,w}$ dB	$T_{20}$ s
					25 dB	35 dB	42 dB	48 dB			
1	Plaza 600 R	kova	210		0.90	0.88	0.80	0.66	47	6	0.54
2	Plaza 600 R	pehmeä	210		0.93	0.90	0.80	0.62	44	7	0.36
3	Plaza 600 R	kova	168		0.88	0.88	0.83	0.69	49	5	0.52
4	Plaza 600 R	kova	168	Tecsom	0.90	0.89	0.84	0.72	49	5	0.34
5	Plaza 600 R	pehmeä	168		0.92	0.90	0.85	0.70	48	5	0.29
6	Plaza 600 R	kova	130		0.89	0.88	0.85	0.73	51	3	0.47
7	Plaza 600 R	pehmeä	130		0.92	0.90	0.87	0.73	50	4	0.36
8	Plaza 600 R	Stacks pehmeä	168		0.91	0.89	0.85	0.71	48	5	0.35
9	Plaza 600 R	Stacks kova	168		0.89	0.87	0.83	0.71	48	5	0.44
10	Plaza 600 R	Stacks kova	130		0.90	0.88	0.84	0.73	50	3	0.43
11	Plaza 600 R	Stacks pehmeä	130		0.91	0.88	0.86	0.76	50	4	0.38
12	Plaza 600 R	Kanvas	168		0.89	0.88	0.85	0.70	49	5	0.41
13	Plaza 600 R	ei seinäkettä			0.87	0.86	0.84	0.81	55		0.42
14	Master 40	kova	210		0.96	0.82	0.58	0.40	40	11	0.13
15	Master 40	pehmeä	210		0.96	0.73	0.52	0.31	38	12	0.11
16	Master 40	kova	168	Tecsom	0.94	0.87	0.68	0.47	43	10	0.11
17	Master 40	kova	168		0.93	0.88	0.67	0.47	43	9	0.12
18	Master 40	pehmeä	168		0.94	0.86	0.65	0.44	42	10	0.10
19	Master 40	kova	130		0.97	0.93	0.75	0.55	46	5	0.09
20	Master 40	pehmeä	130		0.97	0.93	0.73	0.55	45	6	0.08
21	Master 40	Kanvas	168		0.94	0.85	0.66	0.47	44	9	0.10
22	Master 40	ei seinäkettä			0.95	0.93	0.86	0.69	53		0.08
23	Point 11	kova	210		0.94	0.86	0.72	0.51	42	7	0.25
24	Point 11	pehmeä	210		0.94	0.84	0.65	0.45	40	8	0.20
25	Point 11	kova	168	Tecsom	0.95	0.90	0.79	0.61	49	6	0.18
26	Point 11	kova	168		0.94	0.91	0.79	0.60	44	6	0.23
27	Point 11	pehmeä	168		0.94	0.91	0.76	0.57	43	7	0.17
28	Point 11	kova	130		0.94	0.92	0.80	0.63	47	4	0.20
29	Point 11	pehmeä	130		0.96	0.93	0.80	0.64	45	4	0.16
30	Point 11	ei seinäkettä			0.95	0.94	0.87	0.71	52		0.15

## 5 POHDINTA

Paras äänenvaimennus  $DL_{s,w} = 12$  dB saavutettiin hyvin absorboivalla katolla (Master 40) ja 210 cm korkealla pehmeäpintaisella seinäkkeellä. Kovalla katolla (Plaza 600 R) ja 210 cm korkealla pehmeäpintaisella seinäkkeellä vaimennus oli vain 7 dB. Mitatut vaimennukset olivat ennaltaodotettua pienemmät, vaikka mittaustilanne oli ideaalinen.

Kattomateriaalin vaihtaminen absorboivampaan lisäsi seinäkkeen tuottamaa vaimennusta enemmän kuin seinäkekorkeuden kasvatus. Kattomateriaalin muutos kovasta (Plaza 600 R) absorboivaan (Master 40) paransi vaimennusta 2-5 dB. Sekä kovalle että pehmeälle seinäkkeelle vaimennus oli lähes kaksinkertainen absorboivalla katolla verrattuna kovalla katolla mitattuun.

Jälkikaiunta-ajoista nähdään, että tila oli hyvin ääntä absorboiva, joten kaiunta ei juurikaan vaikuttanut puheenerotettavuuteen. Tässä laboratoriotilanteessa puheenerotettavuuden määräsi

puhe- ja taustamelutason suhde. Seinäkkeen pintamateriaalilla tai korkeudella tai kattomateriaalilla ei yksistään ollut selvästi alentavaa vaikutusta puheenerotettavuuteen. Kun taustamelutaso oli 35 dB tai alle, alakaton absorption lisääminen kylläkin vaimensi puheen äänitasoa seinäkkeen takana, mutta samalla lisäsi puheenerotettavuutta kaiun poistumisen myötä.

Taustamelutason ollessa 42 dB tai enemmän seinäkkeen korkeuden ja katon äänenabsorptiosuhteen merkitys lisääntyi. Taustamelun ollessa 48 dB saavutettiin 168 cm tai korkeammalla seinäkkeellä avotoimistoa ajatellen riittävän alhainen puheenerotettavuus ( $RASTI < 0.50$ ), kun samanaikaisesti katto oli hyvin ääntä absorboiva (Master 40).

Vaikka kattoabsorption vaikutus on osittain odotetun vastainen lähekkäisissä työpisteissä, on katon absorptiolla keskeinen merkitys äänen leviämässä koko toimistotilaan (muihin työpisteisiin). Vastaavasti pehmeällä lattiapinnoitteella ei ollut vaikutusta kahden lähekkäisen työpisteen välillä, mutta suuressa tilassa se ehkäisee äänen kantautumista kauempana oleviin työpisteisiin.

Käytännön työpaikoilla ei näitä laboratorio-olosuhteissa mitattuja tuloksia tulla saavuttamaan, koska alakatoissa on yleensä osittain kovia pintoja, seinäkkeet ovat kapeita, niissä on rakoja ja sivuavat seinät heijastavat ääntä. Tuloksista on kuitenkin merkittävää apua akustiselle suunnittelulle, koska vastaavia mittaustuloksia ei ole aiemmin ollut saatavilla.

## 6 SOVELLUTUKSET JA JATKOKEHITYS

Laboratoriotutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää avotoimistojen akustiikkasuunnittelussa. Tuottava toimisto 2005 -hankkeessa laaditun työpisteiden välisen puheenerotettavuuden laskentamallin [2] validointiin käytetään tämän tutkimuksen tuloksia. Hankkeessa myöhemmin laadittavan avotoimistojen akustisen suunnittelun ohjeessa otetaan huomioon tässä tutkimuksessa saadut tulokset seinäkkeiden sekä katon ominaisuuksien yhteisvaikutuksesta työpisteen ääniympäristöön avotoimistoissa.

## 7 KIITOKSET

Tämä tutkimus on osa Tuottava toimisto 2005 -hanketta, jonka rahoittajia ovat Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Työsuojelurahasto, Työterveyslaitos sekä hankkeeseen osallistuneet yritykset. Laboratoriotesteihin materiaaleja toimittivat Saint-Gobain Ecophon Oy, Knauf-Kipso Oy, Gyproc Oy, Martela Oyj ja Tarkett Sommer Oy.

## LÄHTEET

1. HONGISTO V., Toimistojen ääniolosuhteet, Sisäympäristön vaikutus terveyteen, tuottavuuteen ja viihtyvyyteen esitutkimus, *Tuottava toimisto 2005 -julkaisusarja, raportti I*, Teknillinen Korkeakoulu & Työterveyslaitos, Vantaa, Suomi, 2001, s. 49-70.
2. HONGISTO V., KERÄNEN J., LARM P., Simple model for the acoustical design of open-plan offices, *submitted to Acta Acoustica*, 2003.
3. BERANEK LEO L., *Noise and vibration control*, McGraw-Hill, New York, USA, 1971, s. 592-594.