

AVOTOIMISTOAKUSTIIKAN MITTAUS JA MALLINNUS

Jukka Keränen, Petra Virjonen, Valteri Hongisto

Työterveyslaitos, Sisäympäristölaboratorio
Lemminkäisenkatu 14-18 B, 20520 TURKU
jukka.keranen@ttl.fi

1 JOHDANTO

Kyselytutkimusten perusteella melu on häiritsevin sisäympäristön häirtatekijä avotoimistoissa. Toisista työpisteistä kuuluvat puheäännet ja ihmisten toiminnan aiheuttamat äännet koetaan kaikkein häiritsevimpinä [1]. Avotoimistojen akustiikan mittaamiselle ei toistaiseksi ole yhteistä menetelmää eikä tulosten arviointiin soveltuvia ohjeita tai määräyksiä.

Tässä julkaisussa esitetään uusi avotoimistoakustiikan mittaamenetelmä, jolla saatavat tulokset vastaavat ihmisten kokemusta tilan ääniympäristön laadusta. Lisäksi esitetään mittaamenetelmälle soveltuvat suositusarvot, joiden avulla voidaan luokitella avotoimiston akustiset olosuhteet. Lopuksi esitetään yksinkertainen ennustemalli, jonka avulla avotoimiston akustiikka on helpommin suunniteltavissa.

2 MATERIAALI JA MENETELMÄT

2.1 Materiaali

Mittaamenetelmä on kehitetty Työterveyslaitoksella avotoimistojen akustiikkaan liittyvien ongelmien selvittämistä varten. Tutkimusten pohjalta kehitettiin ennustemalli, jolla voidaan suunnitella avotoimiston ääniolosuhteet etukäteen. Malli perustuu mittaustuloksiin 15 hyvin erilaisessa avotoimistossa. Valitut 15 kohdetta edustavat kattavasti Suomen avotoimistoissa esiintyviä akustisia olosuhteita. Yleisiä tietoja näistä kohteista esitetään Taulukossa 1.

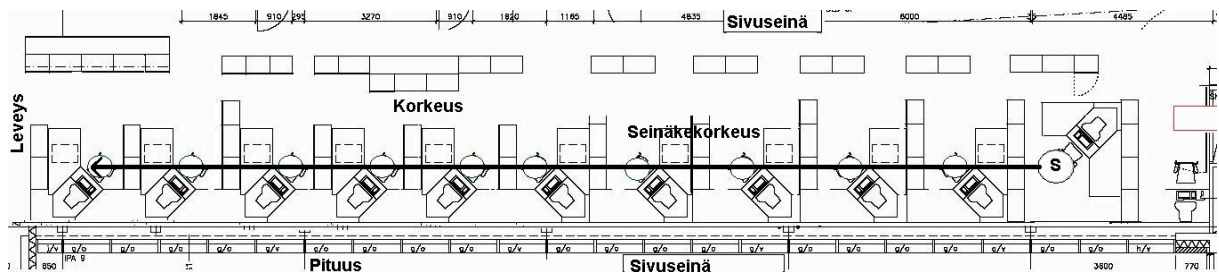
Taulukko 1. Tietoja tutkimukseen valituista avotoimistoista: huonemitat [m], seinäkekorkeus [m], katon absorptiosuhde α_c , kaiunta-ajat [s] sekä LVIS-äänitaso L_{pBA} [dB].

	pituus x leveys x korkeus	seinäkekorkeus	α_c	T_{20} / EDT / L_{pBA}
1	16,1 x 16,7 x 3,1	1,3	0,5	0,46 / 0,36 / 39
2	27,0 x 6,8 x 2,9	...	0,5	0,87 / 0,63 / 45
3	16,0 x 6,0 x 3,2	1,3	0,8	0,48 / 0,47 / 42
4	60,4 x 10,9 x 4,5	1,7	0,3	0,76 / 0,71 / 41
5	18,3 x 17,7 x 3,3	1,4	0,7	0,32 / 0,31 / 35
6	35,7 x 5,5 x 5,9	2,1	0,2	1,15 / 1,37 / 44
7	18,8 x 15,0 x 3,3	1,3	0,5	0,53 / 0,55 / 31
8	19,0 x 7,2 x 2,7	1,3	0,7	0,44 / 0,64 / 39
9	42,1 x 11,6 x 2,5	1,2	0,1	0,77 / 0,77 / 40
10	23,3 x 24,0 x 3,3	1,5	0,8	0,57 / 0,66 / 39
11	34,2 x 5,5 x 3,3	1,7	0,8	0,41 / 0,53 / 35
12	32,1 x 45,5 x 3,0	1,3	0,6	0,46 / 0,54 / 37
13	35,8 x 6,1 x 3,0	1,6	0,8	0,46 / 0,60 / 31
14	34,5 x 4,3 x 3,3	2,2	0,8	0,58 / 0,75 / 31
15	70,1 x 14,1 x 2,6	1,6	0,7	0,53 / 0,64 / 31

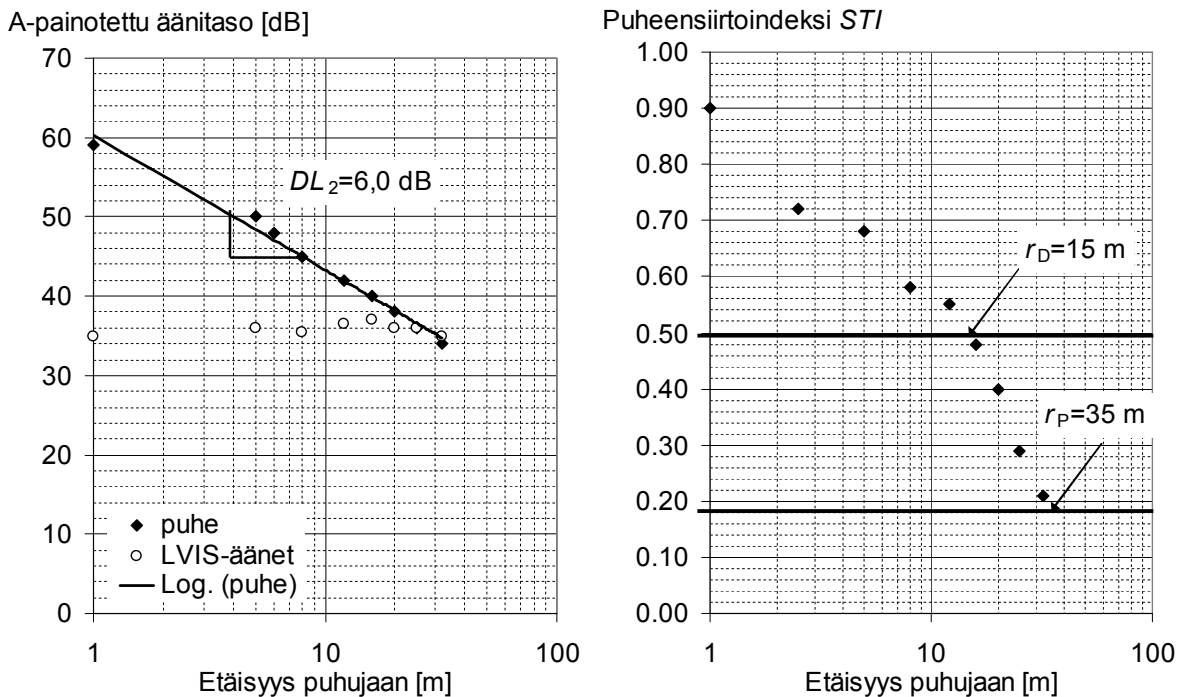
2.2 Mittausmenetelmä

Vaaleanpunaista kohinaa toistava pallokaiutin sijoitettiin yhteen työpisteeseen 1,2 m korkeudelle ja sen tuottamaa äänenpainetasoa mitattiin valittuun suuntaan useissa työpisteissä istuvan työntekijän korvan korkeudelta, 1,2 m. Työpisteet pyrittiin valitsemaan siten, että ne olivat suoralla linjalla (Kuva 1). Jokaisessa työpisteessä mitattiin pallokaiuttimen tuottama äänitaso, LVIS-äänitaso sekä impulssivaste, jonka avulla määritettiin mm. jälkikaiunta-ajat T_{20} , EDT ja puheensirtoindeksi [2,3].

A-taajuuspainotetun puheäänien leviämismuunnos avotoimistoissa määritettiin laskennallisesti äänilähteen työpisteisiin tuottamista äänenpainetasoista. A-taajuuspainotetun puheäänien leviämismuunnosaste, DL_2 , määritettiin ISO 14257 standardissa kuvatulla tavalla (Kuva 2). Lisäksi määritettiin A-taajuuspainotetun puheäänien äänenpainetaso 4 metrin etäisyydellä kaiuttimesta, L_{pSA4m} . Samalla selvitettiin puheensirtoindeksin, STI , pieneneminen etäisyyden suhteen. STI määritetään käyttäen huonetilassa vallitsevaa LVIS-äänitasoa. Tässä esitettyyn mittausmenetelmään perustuva kansainvälinen standardi on valmisteilla [4].



Kuva 1. Esimerkki mittauslinjasta avotoimistossa (nuoli äänilähteestä S poispäin). Mittaukset suoritetaan aina työpisteissä, vaikka ne eivät sijaitisi täsmälleen suoralla mittauslinjalla.



Kuva 2. Esimerkki A-painotetun puheäänien leviämismuunnosasteen DL_2 määrittämisestä puheen äänitasojen avulla ja häiritsevyyssäteen r_D määrittämisestä STI :n avulla.

Mittausten yhteydessä kirjattiin tilan ja kalusteiden mitat, huonepintojen, seinäkkeiden ja kalusteiden absorptiosuhteet sekä seinäkkeiden ja kalusteiden sijoittelu pohjakuvaan.

2.3 Puheäänien leviämisen ennustemalli

Akustiikkamittausten tulokset ja tilasta kerätyt tiedot analysoitiin lineaarista regressioanalyysia käyttäen. Yksikään tarkasteltu parametri ei yksinään ennustanut DL_2 tai L_{pSA4m} -arvoja riittävän tarkasti. Usean muuttujan yhtäaikaista tarkastelua voitiin leviämismuunnosasteelle, DL_2 , ja puhetasolle 4 m etäisyydellä puhujasta, L_{pSA4m} , johtaa empiiriset yhtälöt 1 ja 2. Näiden avulla voidaan ennustaa A-taajuuspainotettu puhetaso, L_{pSA} , etäisyydellä r puhujasta [5].

$$L_{pSA4m} = L_{pSA1m} - 3,23h - 0,09W + 0,44\alpha_{hz} - 5,75\alpha_c \quad (1)$$

$$DL_2 = 7h/H + 0,17L/H + 1,52\alpha_{hz} + 4,28\alpha_c \quad (2)$$

$$L_{pSA}(r) = L_{pSA4m} - 3,3DL_2[\lg(r) - \lg(4)] \quad (3)$$

Yhtälössä 1 L_{pSA1m} on tavallisesti 59 dB, mikä vastaa A-taajuuspainotettua puhetasoa vapaassa kentässä 1 m etäisyydellä puhujasta. Yhtälöissä L on tilan pituus mittaussuunnan suuntaan, W tilan leveys ja H huonekorkeus. Seinäkkeiden ja kaappien keskimääräinen korkeus on h . Horisontaalinen absorptiosuhde ja katon absorptiosuhde ovat α_{hz} ja α_c . Horisontaalinen absorptiosuhde arvioidaan seinäpintojen ja kalusteiden absorptiosuhteiden perusteella. Katon absorptiosuhde määritellään kattomateriaalin ja vapaasti näkyvän kattopinta-alan perusteella.

Mallin tarkkuutta arvioitiin vertaamalla ennustettuja DL_2 ja L_{pSA4m} arvoja tutkimuksen 15 avoimistossa mitattuihin arvoihin. Lisäksi vertailtiin jokaisessa 15 toimistossa työpisteissä mitattuja A-taajuuspainotettuja puhetasoja vastaavalla etäisyydellä ennustettuihin puhetasoihin.

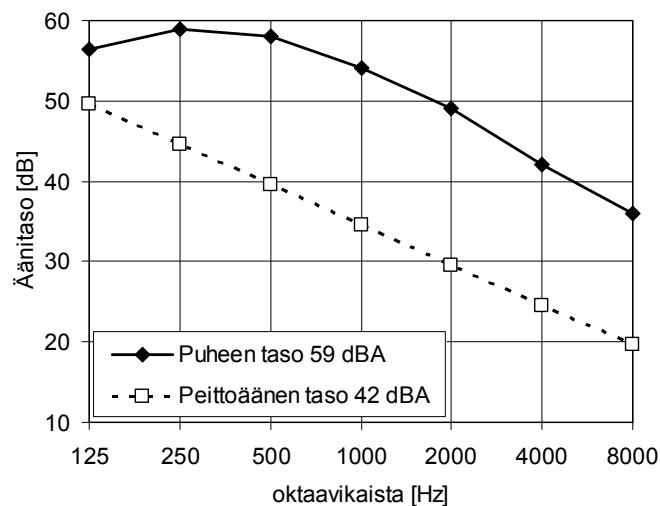
2.4 Puheen erotettavuuden ennustaminen

Puheäänien voimakkuus ei yksin selitä puheen häiritsevyyttä, koska se ei ota huomioon puheen ymmärrettävyydessä taustamelun peittovaikutusta. Tutkimusten mukaan puheen häiritsevyyden ja puheyksityisyyden arviointiin soveltuvin parametri on puheensiirtoindeksi, STI [6]. Puheensiirtoindeksin perusteella määritellään häiritsevyyssäde, r_D , joka on se etäisyys puhujasta, jolla STI laskee alle arvon 0,50.

Puheensiirtoindeksi määritettiin ennustetun puhetason ja peittoäänien (taustamelu) tasoeron, $L_{SN} = L_{pSA} - L_{pBA}$, sekä ennustetun jälkikaiunta-ajan avulla [7]. Puhetason ja peittoäänitaso spektrit oletettiin Kuvan 3 mukaisiksi. Oletettu puheen spektri vastaa normaalia puheääntä ja peittoäänien spektri on yleisten suositusten mukainen [8]. Koska mittauksissa T_{20} ja EDT välinen ero oli yleensä vähäinen eikä EDT :n ennustamiseksi ole yksinkertaista mallia, varhainen jälkikaiunta-aika ennustettiin tässä Sabinen yhtälöllä:

$$EDT = 0,16V/A \quad (4)$$

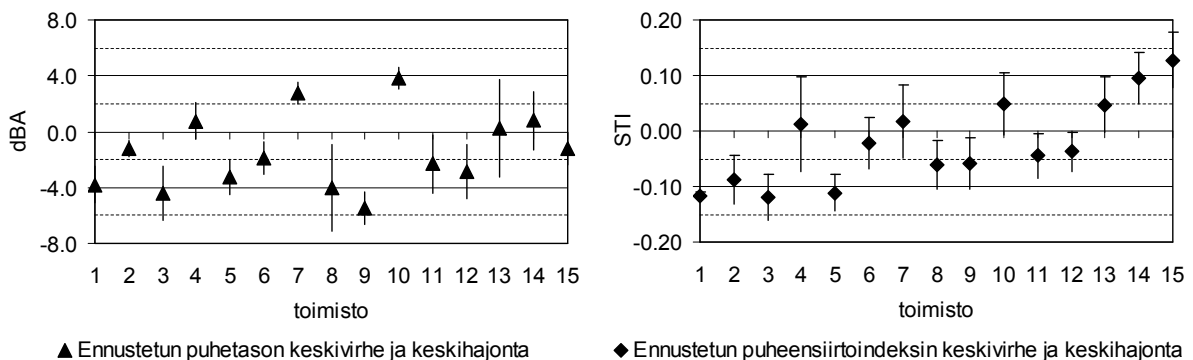
missä V on huonetilavuus [m^3] ja A kokonaisabsorptioala [m^2 -Sab].



Kuva 3. Puheensirtoindeksin, STI , ennustamisessa käytetyt puheen ja peittoäänen spektrit.

3 TULOKSET JA POHDINTA

A-taajuuspainotetun puheäänien leviämismuunnosasteen, DL_2 , ennustetarkkuuksien keskiarvo oli +0,4 dB ja keskihajonta 1,4 dB tutkimuksen 15 avotoimistossa. A-taajuuspainotetun puhetason 4 m etäisyydellä puhujasta, L_{pSA4m} , ennustetarkkuuksien keskiarvo oli -0,2 dB ja keskihajonta 2,2 dB. Näissä 15 toimistossa A-taajuuspainotetun puhetason ennustetarkkuus oli keskimäärin -5,5...+3,8 dB ja ennustetarkkuuden keskihajonnat 0,6...3,5 dB (Kuva 4). Puheensirtoindeksien ennustetarkkuuksien keskiarvot olivat -0,12...+0,13 ja keskihajonnat 0,01...0,09 (Kuva 4). Ennustemallin tarkkuus on käytännön akustiikkasuunnittelua ajatellen riittävä. Mallia kehitetään edelleen. Esimerkiksi seinäkkeiden ja seinäpintojen absorptiolle ei löydy vielä tyydyttävän laajaa vaihtelua 15 toimiston joukosta. Myös EDT:n ennustamiselle voisi löytyä tarkempia malleja. Kuitenkin on selvää, että mallintamisen suurin epävarmuus on mallin lähtötietojen oikeellisuudessa. Erityisen vaikeaa on arvioida pystypintojen absorptiota.



Kuva 4. A-taajuuspainotetun puhetason, L_{pSA} , ja puheensirtoindeksin, STI , ennustetarkkuus 15 avotoimistossa.

4 SUOSITUKSET AVOTOIMISTOILLE

Taulukossa 2 ehdotetaan suositusarvot A-taajuuspainotetun puheäänien leviämismuunnosasteelle, DL_2 , ja häiritsevyyssäteelle, r_D , avotoimistoissa. Luokittelussa molempien parametrien tulee olla esitetyllä välillä.

Taulukko 2. Suositusarvot avotoimistojen ääniolosuhteiden luokitteluun käyttäen leviämismuunnosastetta DL_2 ja häiritsevyyssädettä r_D .

Luokka	Akustinen luokittelu	DL_2 [dBA]	r_D [m]
A	erinomainen	11 tai yli	5 tai alle
B	hyvä	8 - 11	5 - 8
C	kohtalainen	5 - 8	8 - 11
D	kehno	5 tai alle	11 tai yli

5 MALLINNUSOHJELMA

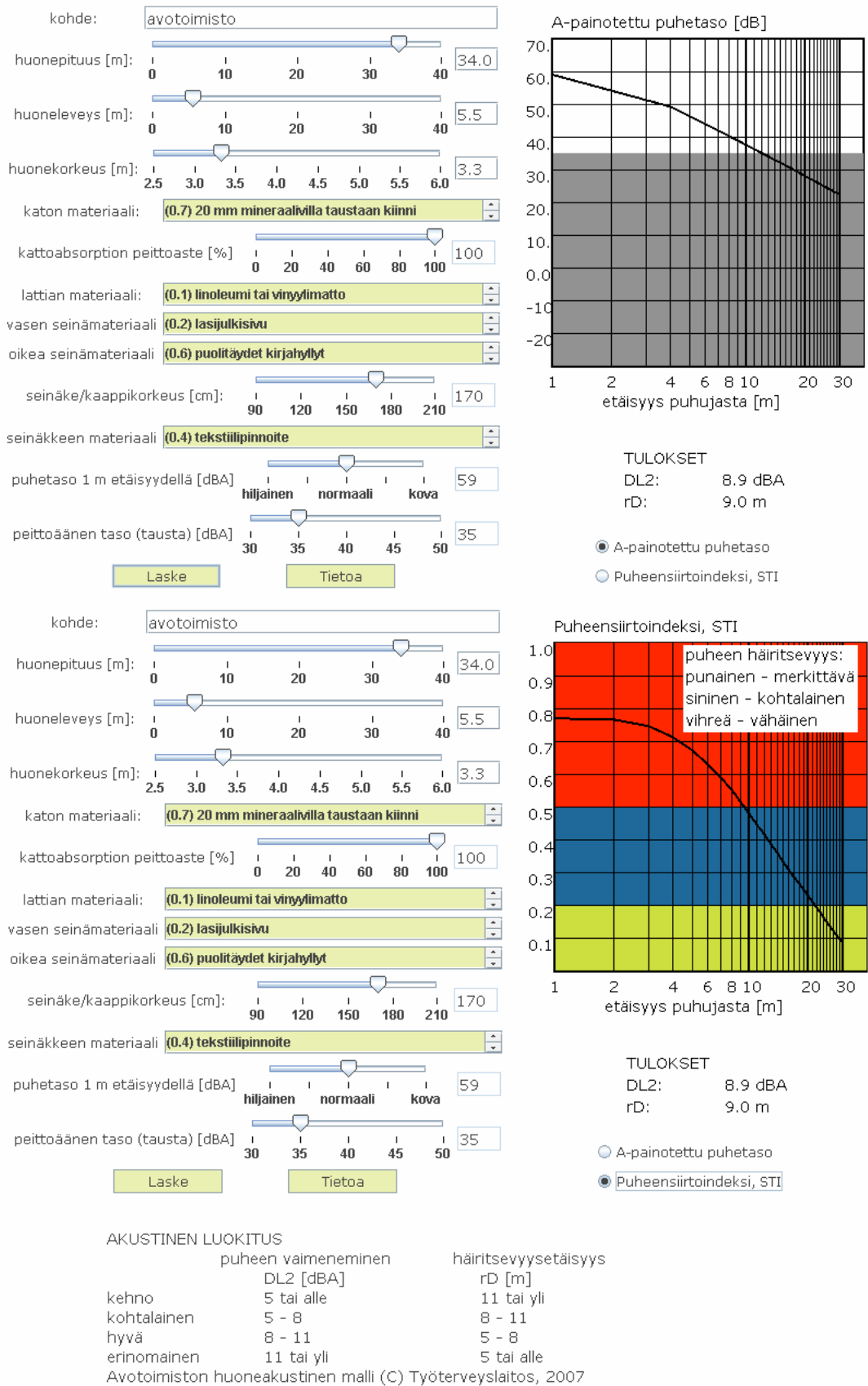
Tässä esitetyistä malleista on tehty yksinkertainen selainpohjainen suunnitteluohjelma, joka on vapaasti käytettävissä internetissä [9]. Ohjelman käyttöliittymässä (Kuva 5) valitaan huoneen pituus, leveys ja korkeus, seinäkkeiden korkeus sekä materiaalit katto-, lattia- ja seinäpinnoille sekä seinäkkeille. Puhe- ja peittoäänitasoa voi myös säätää. Ohjelma ennustaa tilan DL_2 ja r_D -arvot sekä esittää graafisesti sekä puhetasoa että puheensirtoindeksin leviämismuunnosastetta. Taulukon 2 suositusarvot esitetään myös käyttöliittymässä.

6 KIITOKSET

Tutkimus toteutettiin MAKSI - Mallinnettu ja koettu sisäympäristö tutkimushankkeessa, jonka rahoittivat Tekes, Työterveyslaitos ja hankkeeseen osallistuneet yritykset. Kiitämme yrityksiä, joiden tiloissa saimme suorittaa akustiset mittaukset. Lisäksi kiitämme tutkijoita ja asiantuntijoita sekä akustiikkamateriaalien ja toimistokalusteiden valmistajia, jotka auttoivat tutkimuksen toteuttamisessa.

LÄHTEET

- HELENIUS R, KESKINEN E, HAAPAKANGAS A, HONGISTO V, Acoustic environment in Finnish offices - the summary of questionnaire studies. *19th International Congress on Acoustics 2007*, 2.-7.9.2007, Madrid.
- VIRJONEN P, KERÄNEN J, HONGISTO O. V, Determination of acoustical conditions in open plan offices, submitted for publication, *Acta Acustica united with Acustica* (2007).
- HONGISTO V, VIRJONEN P, KERÄNEN J, Determination of acoustic conditions in open offices and suggestions for acoustic classification. *19th International Congress on Acoustics 2007*, 2.-7.9.2007, Madrid.
- Standardiehdotus ISO CD 3382-3: *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan spaces* (ISO TC 43 SC 2 N 890, 2007-06-18)
- KERÄNEN J, VIRJONEN P, HONGISTO V, A new model for acoustic design of open offices. *19th International Congress on Acoustics 2007*, 2.-7.9.2007, Madrid.
- HONGISTO V, A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance, *Indoor Air* **15** (2005), 458–468.
- HOUTGAST T, STEENEKEN HJM, A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *J Acoust Soc Am* **77(3)** (1985), 1069–1077.
- SFS 5907:2004, *Rakennusten akustinen luokitus*, Helsinki, 2004.
- Selainpohjainen ohjelma: www.ttl.fi/avotoimistoakustiikka, www.ttl.fi/openofficeacoustics.



Kuva 5. Avotoimistoakustiikan suunnitteluohjelman käyttöliittymä: ylhäällä A-taajuuspainotetun puhetason ja alhaalla puheensiirtindeksin esitys.