

Avotoimistoakustiikan mittaus ja mallinnus

Jukka Keränen, Petra Virjonen ja Valteri Hongisto

Tiivistelmä. Tutkimusten mukaan häiritsevin melunlähde avotoimistoissa on toisista työpisteistä kuuluva puhe. Puhemelun häiritsevyyteen voidaan vaikuttaa huoneakustisilla toimenpiteillä, joita ovat akustointimateriaalit, korkeat seinäkkeet sekä peittoääni-järjestelmät. Näiden yhteisvaikutuksen hallitseminen on vaikeaa, koska puheäänten häiritsevyys ja puheyksityisyys pitäisi määrittää sekä lähellä että kaukana tarkasteltavasta puhujasta. Tässä artikkelissa kuvataan uusi avotoimistoakustiikan mittausmenetelmä, ohjeavot menetelmällä saataville tuloksille ja ennustemalli, jolla voidaan suunnitella avotoimiston akustiset olosuhteet. Mittausmenetelmä perustuu

A-taajuuspainotetun puheäänitason ja puheensirtoindeksin mittauksiin eri etäisyyksillä. Mittaustuloksista määritetään leviämismuunnosaste ja häiritsevyyssäde. Tutkimuksessa saatujen kokemusten perusteella esitetään ohjeavot häiritsevyyssäteelle ja A-taajuuspainotetun puheäänien leviämismuunnosasteelle. 15 erilaisessa avotoimistossa mitattujen tulosten pohjalta kehitettiin malli, jolla voidaan ennustaa puheäänien vaimeneminen ja puheen häiritsevyys avotoimistossa.

Avainsanat: avotoimisto, äänen leviämismuunnos, häiritsevyyssäde, puheyksityisyys

Johdanto

Kyselytutkimusten perusteella melu on häiritsevin sisäympäristön häiritsejä avotoimistoissa. Toisista työpisteistä kuuluvat puheäänit ja ihmisten toiminnan aiheuttamat äänit koetaan kaikkein häiritsevimpinä [1]. Avotoimistojen akustiikan mittaamiselle ei toistaiseksi ollut yhtenäistä menetelmää eikä tulosten arviointiin soveltuvia ohjeita tai määräyksiä.

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

Materiaali

Mittausmenetelmä 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], seinäke-korkeus [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

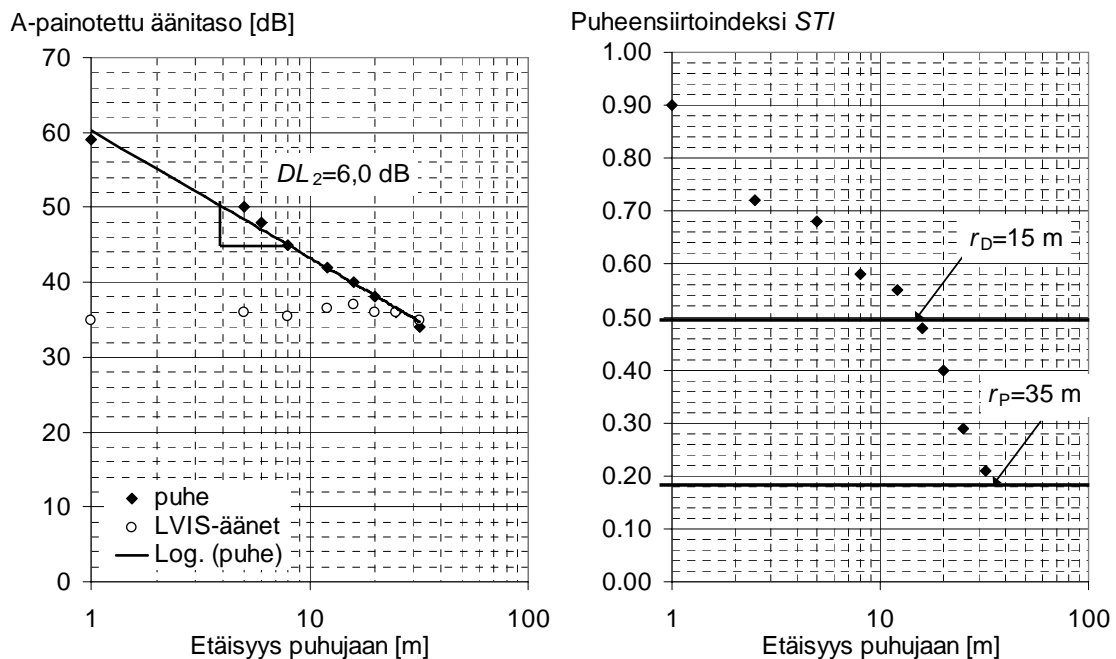
Mittausmenetelmä

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} ja EDT sekä puheensiirtoindeksi [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 äänen



Kuva 1. Esimerkki mittauslinjasta avotoimistossa (nuoli äänilähteestä S pois päin). 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.

painetaso 4 metrin etäisyydellä kaiuttimesta, L_{pSA4m} . Samalla selvitettiin puheensiirtoindeksiin, STI , pieneneminen etäisyyden suhteen. STI määritetään käyttäen huonetilassa vallitsevaa LVIS-äänitasoa. Tässä esitettyyn mittausmenetelmään perustuva kansainvälinen standardi on valmisteilla [4].

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

Puheäänen leviämisen ennustemalli

Akustiikkamittausten tulokset ja tilasta kerätyt tiedot analysoitiin lineaarista regressio-analyysiä käyttäen. Yksikään tarkasteltu parametri ei yksinään ennustanut DL_2 tai L_{pSA4m} -arvoja riittävän tarkasti. Usean muuttujan yhtäaikaisella tarkastelulla 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].

$$L_{pSA4m} = L_{pSA1m} - 3h - 0,1W - 0,8\alpha_{hz} - 4,6\alpha_c \quad (1)$$

$$DL_2 = 8h / H + 0,16L / H + 1,7\alpha_{hz} + 4\alpha_c \quad (2)$$

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

Yhtälössä 1 L_{pSA1m} on tavallisesti 59 dB, mikä vastaa A-taajuuspainotettua puhetasoa vapaassa kentässä 1 m etäisyydellä puhujasta. Yhtälöissä L on tilan pituus mitauslinjan 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 absorptio-suhteiden perusteella. Katon absorptiosuhde määritellään kattomateriaalin ja vapaasti näkyvän kattopinta-alan perusteella.

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

Puheen erotettavuuden ennustaminen

Puheäänen 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.

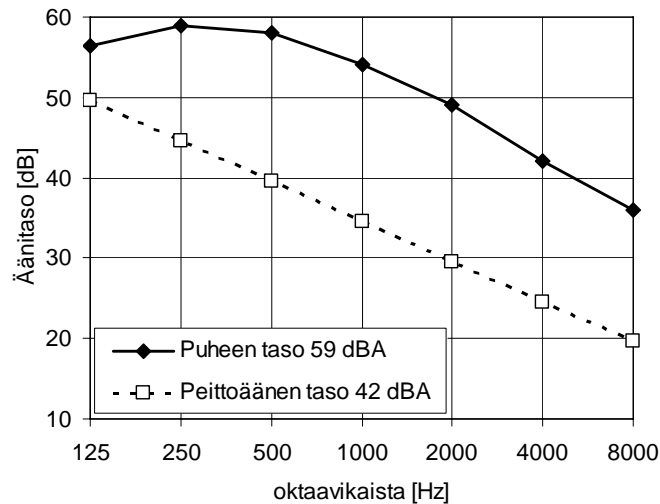
Puheensiirtoindeksi määritettiin ennustetun puhetason ja peittoäänien (taustamelu) tasoeron, $L_{SN}=L_{pSA}-L_{pBA}$, sekä ennustetun jälkikaiunta-ajan avulla [7]. Puhetason ja peittoäänitaso spektrit oletettiin Kuvan 3 mukaisiksi. Oletettu puheen spektri vastaa normaalia puheääntä ja peittoäänien spektri 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:

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

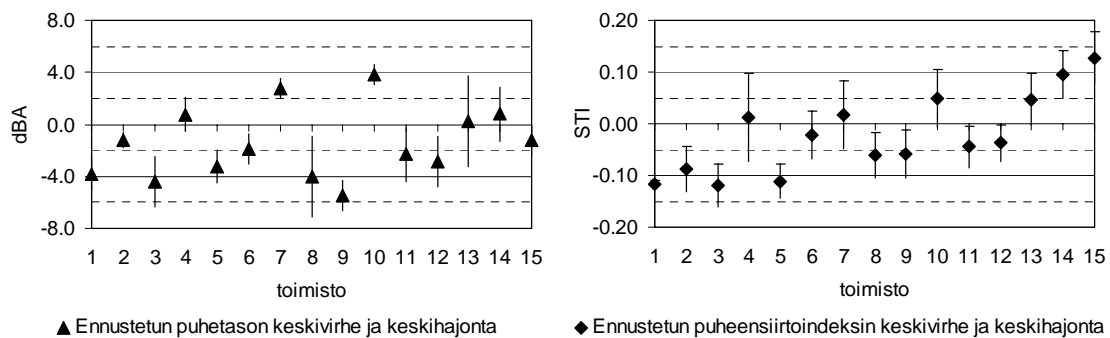
missä V on huonetilavuus [m^3] ja A kokonaisabsorptioala [m^2 -Sab].

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 3. Puheensirtoindeksin, STI , ennustamisessa käytetyt puheen ja peittoäänien spektrit.



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

Suosituksset avotoimistoille

Taulukossa 2 esitetään RIL 243-3 ohjearvot A-taajuuspainotetun puheäänien leviämismuunnosasteelle, DL_2 , ja häiritsevyyssäteelle, r_D , avotoimistoissa [9]. Luokittelussa molempien parametrien tulee olla esitetyllä välillä.

Taulukko 2. RIL 243-3 ohjearvot avotoimistojen ääniolosuhteiden luokitteluun käyttäen leviämismuunnosastetta DL_2 ja häiritsevyyssädettä r_D . Luokka A vastaa parasta olosuhdetta ja D huonointia.

Luokka	DL_2 [dBA]	r_D [m]
A	yli 11	alle 5
B	9-11	5-8
C	7-9	8-11
D	alle 7	yli 11

Mallinnusohjelma

Tässä esitetystä mallista on tehty yksinkertainen selainpohjainen suunnitteluohjelma, joka on vapaasti käytettävissä internetissä [10]. 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 puhe- ja peittoäänitason että puheensirtoindeksin leviämismuunnosasteen. Taulukon 2 ohjearvot esitetään myös käyttöliittymässä.

kohde: avotoimisto

huonepituus [m]: 0 10 20 30 40 34.0

huoneleveys [m]: 0 10 20 30 40 5.5

huonekorkeus [m]: 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 3.3

katon materiaali: (0.7) 20 mm mineraalivilla taustaan kiinni

kattoabsorptio peittoaste [%]: 0 20 40 60 80 100 100

lattian materiaali: (0.1) linoleumi tai vinyylimatto

vasen seinämateriaali: (0.2) lasijulkisivu

oikea seinämateriaali: (0.6) puolitäydetyt kirjahuoneet

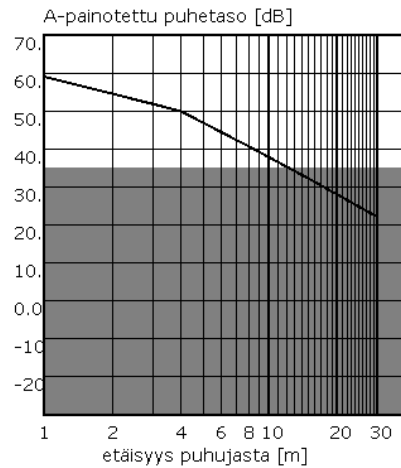
seinäke/kaappikorkeus [cm]: 90 120 150 180 210 170

seinäkkeen materiaali: (0.4) tekstiilipinnoite

puhetaso 1 m etäisyydellä [dBA]: hiljainen normaali kova 59

peittoäänen taso (tausta) [dBA]: 30 35 40 45 50 35

Laske Tietoa



TULOKSET
DL2: 9.2 dBA
rD: 9.0 m

- A-painotettu puhetaso
 Puheensirtoindeksi, STI

kohde: avotoimisto

huonepituus [m]: 0 10 20 30 40 34.0

huoneleveys [m]: 0 10 20 30 40 5.5

huonekorkeus [m]: 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 3.3

katon materiaali: (0.7) 20 mm mineraalivilla taustaan kiinni

kattoabsorptio peittoaste [%]: 0 20 40 60 80 100 100

lattian materiaali: (0.1) linoleumi tai vinyylimatto

vasen seinämateriaali: (0.2) lasijulkisivu

oikea seinämateriaali: (0.6) puolitäydetyt kirjahuoneet

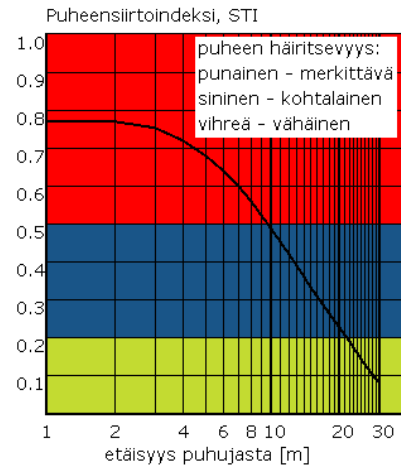
seinäke/kaappikorkeus [cm]: 90 120 150 180 210 170

seinäkkeen materiaali: (0.4) tekstiilipinnoite

puhetaso 1 m etäisyydellä [dBA]: hiljainen normaali kova 59

peittoäänen taso (tausta) [dBA]: 30 35 40 45 50 35

Laske Tietoa



TULOKSET
DL2: 9.2 dBA
rD: 9.0 m

- A-painotettu puhetaso
 Puheensirtoindeksi, STI

AKUSTINEN LUOKITUS

puheen leviämismuunnosaste häiritsevyys

	DL2 [dBA]	rD [m]
D (kehno)	7 tai alle	11 tai yli
C (kohtalainen)	7 - 9	8 - 11
B (hyvä)	9 - 11	5 - 8
A (erinomainen)	11 tai yli	5 tai alle

Avotoimiston huoneakustinen malli (C) Työterveyslaitos, 1.11.2007

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

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

1. 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.
2. Virjonen P, Keränen J, Hongisto O. V, *Determination of acoustical conditions in open plan offices, submitted for publication*, Acta Acustica united with Acustica (2007).
3. 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.
4. 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)
5. 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.
6. Hongisto V, *A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance*, Indoor Air 15 (2005), 458–468.
7. 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.
8. SFS 5907:2004, *Rakennusten akustinen luokitus*, Helsinki, 2004.
9. RIL 243-3-2008 *Rakennusten akustinen suunnittelu. Toimistot*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki, 2008.
10. Selainpohjainen ohjelma: www.ttl.fi/avotoimistoakustiikka,

Jukka Keränen, Petra Virjonen ja Valteri Hongisto
Työterveyslaitos
Sisäympäristölaboratorio
Lemminkäisenkatu 14–18 B
20520 Turku