

AVOTOIMISTON AKUSTISEN SUUNNITTELUN MALLI

Valtteri Hongisto, Jukka Keränen, Petra Larm

Työterveyslaitos, Ilmastointi- ja akustiikkalaboratorio
Lemminkäisenkatu 14-18 B, 20520 Turku
valtteri.hongisto@ttl.fi

1 JOHDANTO

Aiemmin julkaistujen kansainvälisten tutkimusten mukaan ääniympäristöllä on aivan keskeinen vaikutus viihtyvyyteen avotoimistoissa [1]. Toiminnan aiheuttamat äänet ja puhe etenevät tilassa helposti, koska eristämiseen tai vaimentamiseen ei kiinnitetä tarpeeksi huomiota. On myös havaittu, että ilmanvaihdon aiheuttamat taustamelutasot ovat avotoimistoissa liian alhaisia, jolloin puhe erottuu selvästi pitkänkin matkan takaa. Myös Työterveyslaitoksen suorittamien kyselytutkimusten mukaan melu koetaan keskeiseksi sisäympäristöongelmaksi toimistoissa [2,3]. Keskittymistä häiritsevin äänilähde on yleensä läheltä kantautuvat puheäänet. Subjektiiiviset arviot tukevat oletusta, että ääniympäristö vaikuttaa myös työn tuottavuuteen.

Työtilasuunnittelijoilla ei ole käytettävissään yhtenäisiä ohjeita avotoimistojen ääniolosuhteiden suunnittelemista varten. Aina ei ole myöskään riittävästi käytettävissä akustista asiantuntemusta rakennusprojekteissa. Akustisten parannustoimenpiteiden takaisinmaksuaikaa parantuneen työtehon muodossa on vaikea arvioida. Siksi akustiset investoinnit voivat jäädä helpommin perusteltavien investointien polkemiksi. Näistä syistä johtuen toimistojen akustinen laatu vaihtelee suuresti Suomessa.

Perinteisesti toimistojen akustisina suunnitteluparametreina on käytetty keskiäänitasoa, ääneneneristävyyttä ja jälkikaiunta-aikaa. LVIS-melu pyritään normaaleissa toimistotiloissa mitoittamaan $L_{A,eq}=35$ dB tasolle. Tämä äänitaso ei kuitenkaan kerro mitään työpäivän aikana vallitsevasta keskiäänitasosta. Puhe, toiminta ja laitteet kohottavat sen yleensä 45...55 dB:n tasolle. Jälkikaiunta-ajalle ei ole olemassa suunnitteluarvoja toimistoja varten. Yksikäsitteistä jälkikaiunta-ajan tavoitetasoa on vaikea asettaa, koska tilojen korkeudet ja kokonaistilavuudet vaihtelevat suuresti. Keskittymistä vaativaa työtä tekevät ja luottamuksellisia keskusteluja käyvät henkilöt tulisi sijoittaa omiin työhuoneisiin. Tällöin yleensä seinärakenteiden ääneneneristävyys mitoitetetaan $R_w=40$ dB tasolle ja tarvittaessa valitaan hyvin ääntäeristävät ovet.

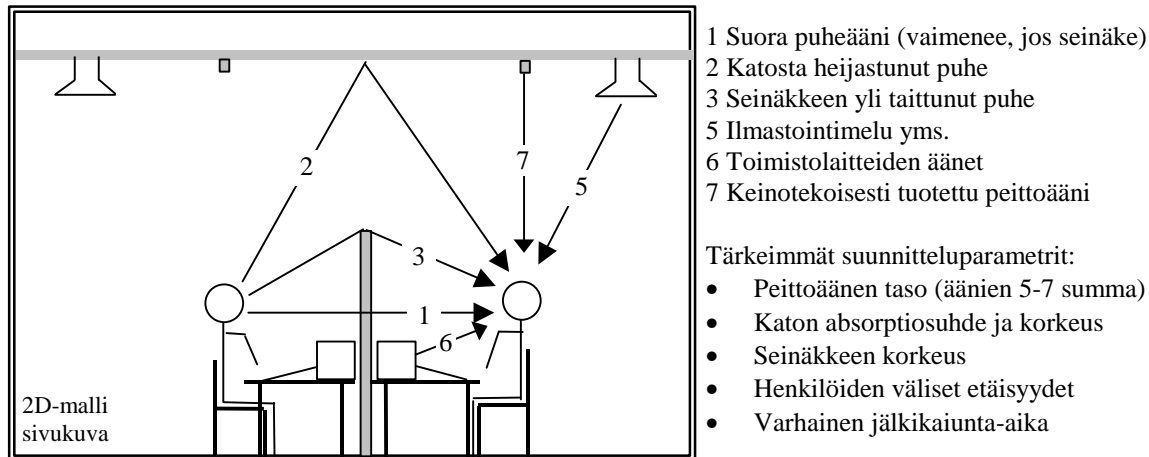
Nykyään yhä useammin valitaan työtilaksi avotoimisto, vaikka työ olisi keskittymistä vaativaa. Tällöin käytetään toimistoseinäkkeitä jakamaan työpisteet visuaalisesti ja akustisesti. LVIS-äänitason, ääneneneristävyyden ja jälkikaiunta-ajan avulla ei voida suunnitella avotoimistojen akustiikkaa, koska kyseessä on ensisijaisesti vierekkäisten työpisteiden välinen ääniympäristösuunnittelu. Vasta toissijaisena on koko tilan akustiikka. Esimerkiksi säteenseurantaan perustuvat huoneakustiset tietokonemallit eivät sovellu avotoimistojen akustiseen suunnitteluun toisin kuin esimerkiksi teollisuustilojen suunnitteluun, koska mallit eivät huomioi diffraktiota [4].

Toimistojen ääniympäristön suunnittelussa tulisi pyrkiä alhaiseen puheenerotettavuuteen työpisteiden välillä. Avotoimistoissa suunnittelu pitää tehdä huomattavasti huolellisemmin kuin yhden hengen toimistohuoneiden välillä, koska seiniä ei ole.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on esittää malli avotoimistojen akustista suunnittelua varten sekä määrittää mallin ennustetarkkuus vertaamalla ennusteita kenttämittauksiin. Lopuksi esitetään käyrästöt, joita suunnittelijat voivat käyttää.

2 MALLIN TOIMINTAPERIAATE

Mallin periaate on esitetty kuvassa 1. Yksityiskohtainen kuvaus mallista on esitetty toisaalla [5]. Malli käsittää kaksi vierekkäistä työpistettä, joista toisessa on puhuja ja toisessa kuulija. Seuraavassa on esitetty keskeiset tekijät, jotka malli huomioi.



Kuva 1 - Avotoimiston akustisen suunnittelumallin pääkomponentit.

Mallin tulosparametrina on puheensieritoindeksi *STI* (*speech transmission index*), jonka arvojoukko on 0.00 ... 1.00. Esimerkiksi *STI*=0.75 tarkoittaa karkeasti ottaen 75 %:n tavuerotettavuutta. Esimerkiksi luokkatiloissa tavoitteena on *STI*>0.75 kun taas asuinhuoneistojen välillä se on *STI*=0. Toimistotyöpisteiden välillä tavoite on jossain näiden välillä.

Puheen signaalikohinasuhde (puhekohinasuhde) määritellään yhtälöllä

$$L_{SN} = L_S - L_N \quad (1)$$

Puheen taso, L_S , kuulijan paikalla lasketaan yhtälöstä

$$L_S = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{L_{p,i}/10} \quad (2)$$

missä $i=1 \dots 4$ (ks. kuva 1). Puhujan äänenvoimakkuudeksi oletetaan ANSI S3.5:1997 mukainen normaali taso, jonka oktaavikaistaspektri on esitetty kuvassa 2a. Seinäkkeen yli taittuva säde (3) lasketaan ISO/DIS 17624 mukaista diffraktiomallia käyttäen, jolla saadaan seinäkkeen äänenvaimennus (*IL*) taajuuksittain. Tätä varten on tunnettava seinäkkeen korkeus sekä puhujan että kuulijan paikat seinäkkeeseen ja lattiaan nähden. Katosta heijastuvan äänen (2) voimakkuus riippuu seinäkkeen yläpuolisen alakaton absorptiosuhteesta ja huonekorkeudesta. Suora ääni (1) on lähes merkityksetön mutta seinäkkeen puuttuessa tärkein.

Puhetta peittävän äänen taso, L_N , lasketaan samoin kuin L_S , mutta $i=5,6,7$.

Puheensiirtoindeksi lasketaan MTF menetelmällä (*modulation transfer function*). Sen ensimmäinen vaihe on laskea modulaation vähennyskerroin $m(F, f)$ 14 modulaatiotaajuudella F_i (0.63, 0.80, 1.00, 1.25, 1.60, 2.00, 2.50, 3.15, 4.00, 5.00, 6.30, 8.00, 10.00 ja 12.5 Hz) ja kuudella oktaavikaistalla f_j (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 ja 8000 Hz)

$$m(F, f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (T(f) \cdot 2\pi F / 13.8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-L_{SN}(f)/10}} \quad (3)$$

missä $T(f)$ on paikallinen varhainen jälkikaiunta-aika (Early Decay Time or T_{10}). Näennäinen signaalikohinasuhde lasketaan edellä saaduille 98:lle m -arvolle yhtälöstä

$$SN_{app} = 10 \lg \frac{m}{1 - m} \quad (4)$$

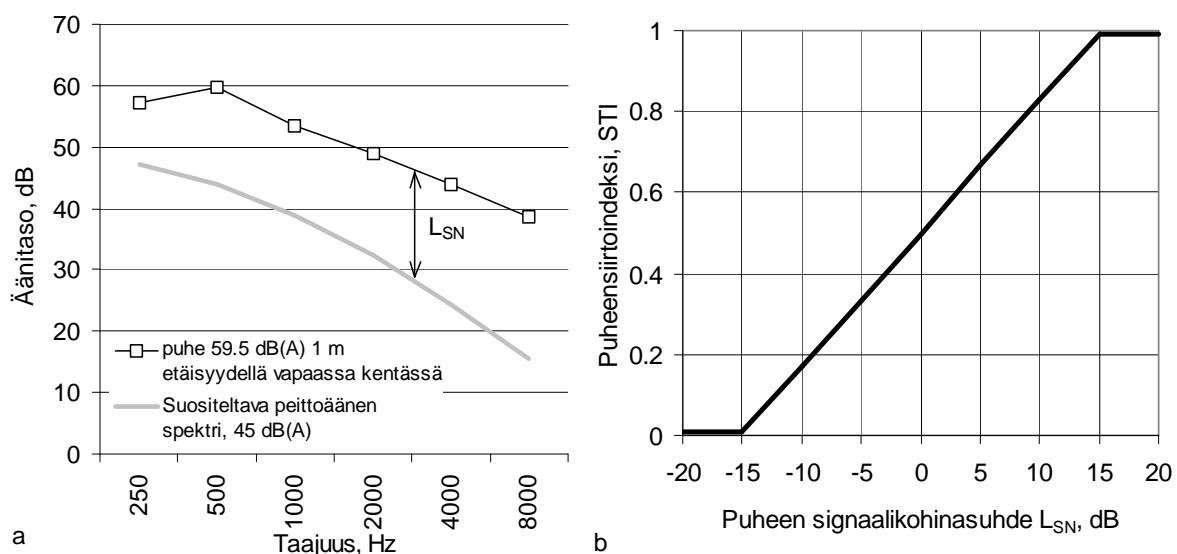
Jos $SN_{app} > 15$ dB, käytetään $SN_{app} = 15$ dB. Vastaavasti jos $SN_{app} < -15$ dB, käytetään $SN_{app} = -15$ dB. STI lasketaan tämän jälkeen yhtälöstä

$$STI = \frac{1}{30} \left\{ 15 + \sum_{j=1}^7 k_j \cdot \left(\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SN_{app}(F_i, f_j) \right) \right\} \quad (5)$$

missä oktaavikaistojen 125 ... 8000 Hz painotuskertoimet k_j ovat 0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17 ja 0.14. STI :n lyhennetty versio eli $RASTI$, *rapid speech transmission index*, käyttää vain 9 datapistettä:

$$RASTI = \frac{1}{30} \left\{ 15 + \frac{1}{9} \left(\sum_{i=3,6,9,12} SN_{app}(F_i, 500 \text{ Hz}) + \sum_{i=2,5,8,11,13} SN_{app}(F_i, 2000 \text{ Hz}) \right) \right\} \quad (6)$$

STI :n riippuvuutta L_{SN} :stä kaiuttomassa tilanteessa kuvaa karkeasti kuvan 2b käyrä.



Kuva 2 - a) Puheen spektri 1 m päässä puhujasta sekä ideaalinen peittoäänen spektri. b) Puheensiirtoindeksin STI riippuvuus puheen signaalikohinasuhteesta.

3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Malli validoitiin vertaamalla mallin ennusteita mittauksiin 30 erilaisella työpisteparilla. Mittauksia tehtiin 7 eri työpaikalla. Puheenerotettavuus mitattiin RASTI-laitteistolla kuvan 3 osoittamalla tavalla (Bruel & Kjaer 3361). Lähetin tuottaa puheen tyyppistä moduloitua kohinaa oktaavikaistoilla 0.5 ja 2 kHz. Vastaanotin mittaa lähettimeltä kuulijan paikalle siirtyvän signaalin heikkenemisen alkuperäiseen nähden. Yksi mittaus kestää 32 sekuntia.

Mallintamista varten rekisteröitiin taustamelutaso L_N , katon korkeus h_C , seinäkkeen korkeus h_S ja katon absorptiosuhde α_C . Lisäksi mitattiin varhainen jälkikaiunta-aika T_{10} . Katon absorptiosuhdetta ei voitu mitata mutta materiaalityypin perusteella se voitiin arvioida 10-20 % tarkkuudella tietokantojen avulla.



Kuva 3 - RASTI-mittaus työpisteiden välillä. Kaiuttimen ja mikrofonin etäisyydet lattiaan ja seinäkkeeseen olivat 1.2 metriä.

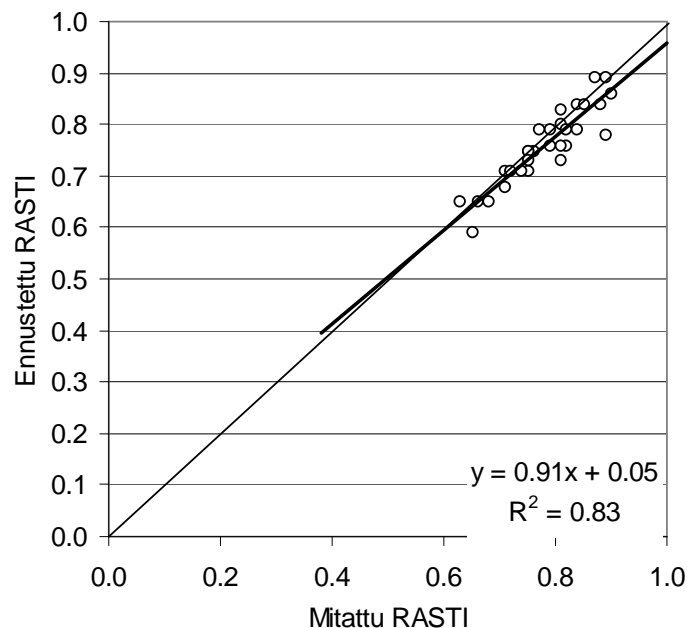
4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Kuvassa 4 on esitetty korrelaatio mitatun ja ennustetun RASTI-arvon välillä. Tilastollisin mitarein ilmaistuna mallin tarkkuus on -0.03 ± 0.04 ($n=30$). Tämä tarkoittaa, että ennusteet ovat keskimäärin 0.03 liian alhaisia ja keskihajonta on 0.04 (68.4 % luottamusväli). Larmin laboratoriotutkimusten mukaan jo pelkästään RASTI-mittausmenetelmän vaihtelut ovat 0.02:n sisällä [6]. Kenttäolosuhteissa vaihtelut olivat 0.04...0.08 johtuen mm. ilmanvaihtomelun sykinästä. Ottaen huomioon mittausmenetelmän virhemahdollisuudet, voidaan mallin arvioida olevan riittävän tarkka käytännön suunnittelua ajatellen.

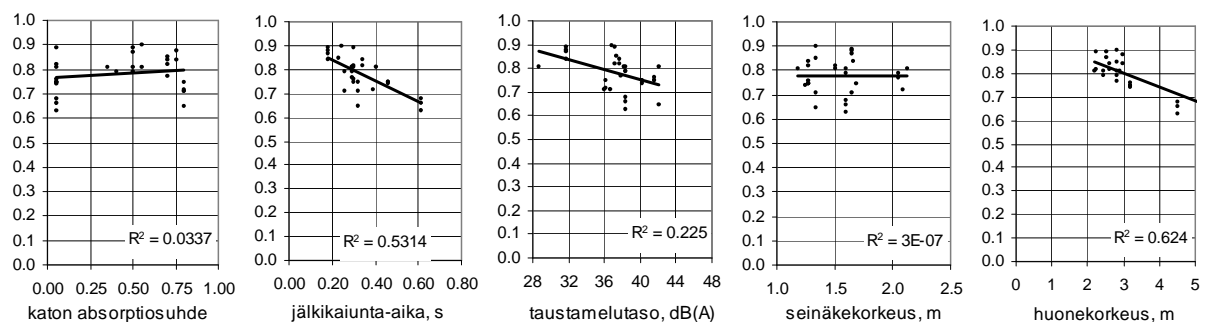
Näytejoukosta puuttuvat erityisesti alhaiset *STI*-arvot. Kentältä saatiin vain arvoja välillä 0.6 ... 0.9. Mallin testausta on tarkoitus jatkaa laboratoriomittauksien kanssa [7].

Kuvassa 5 on esitetty vielä korrelaatiot mitatun RASTI-arvon ja yksittäisten huoneparametrien välillä. Taustamelua ja huonekorkeutta kohottamalla RASTI laskee. Seinäkkeen korkeus ei vaikuta suuntaan eikä toiseen, koska mittauksissa korkeilla seinäkkeillä katot sattuivat olemaan kovia ja taustamelut alhaisia. Kohottamalla katon absorptiosuhdetta tai lyhentämällä jälkikaiunta-aikaa *STI*-arvot kasvoivat, mikä äkkiseltään tuntuu epäloogiselta. Riippuvuus olisi toinen, jos taustamelut ja seinäkkeet olisivat korkeampia. Yksittäinen huoneparametri ei

siten kerro välttämättä mitään *STI*-arvosta. Yksittäisillä akustisilla toimenpiteillä ei saada hyvää akustiikkaa avotoimistoon vaan kaikki huoneparametrit pitää ottaa huomioon yhtäaikaan.



Kuva 4 - Mitatun ja ennustetun RASTI:n korrelaatio.



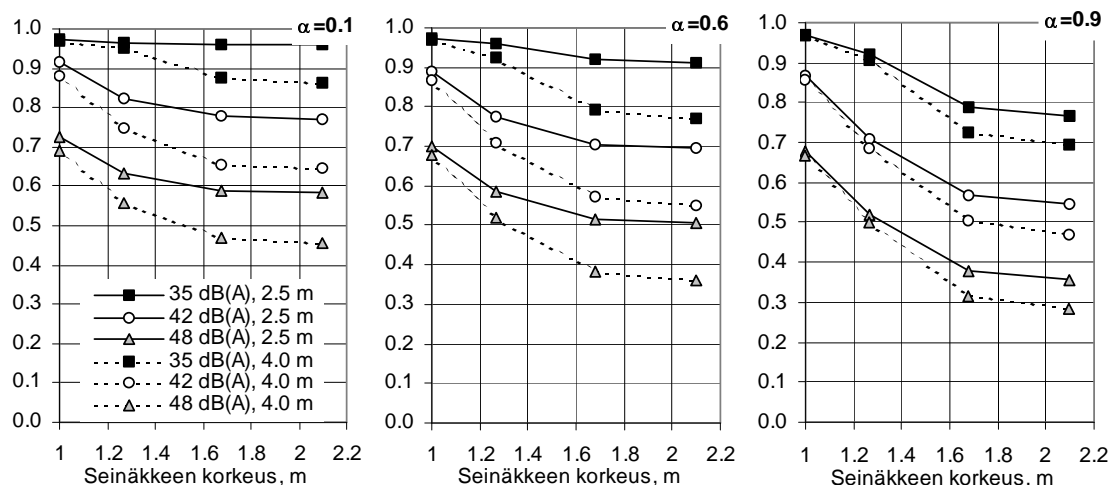
Kuva 5 - Korrelaatiot yksittäisten huoneparametrien ja *STI*:n välillä ($n=30$). Trendit pätevät vain tähän otokseen. Niitä ei tule soveltaa toisistaan riippumattomasti.

4 MALLIN HYÖDYNTÄMINEN SUUNNITTELUSSA

Tutkitut toimistot edustavat melko hyvin keskimääräistä suomalaista avotoimistoa. Keskeisin johtopäätös on se, että taustamelutasot ovat alhaisia, absorptiomateriaalia on katossa satunnaisesti ja seinäkkeet ovat varsinkin uudemmissa toimistoissa liian matalia. Jos halutaan akustisesti toimivia avotoimistoja, pitää pyrkiä siihen, että puheen signaalikohinasuhde on lähellä nollaa tai sen alle. Tähän pääsemiseksi on huomioitava kaikki tekijät (riittävä taustamelu, absorptio ja seinäkekorkeus) yhtäaikaan. Yhden tai kahden tekijän huomiointi ei välttämättä riitä.

Kuvassa 6 on esitetty suunnittelukäyrästä, johon on tiivistetty yhtäaikaaisesti oleellisimpien akustisten suunnitteluparametrien (huonekorkeus, katon absorptiosuhde, seinäkkeen korkeus ja taustamelutaso) yhtäaikaiset vaikutukset puheensiirtoindeksiin.

Esimerkki hyvästä akustiikkasuunnitelmasta voisi olla seuraava: Taustamelutaso on noin 45 dB, seinäkkeen korkeus 1.65 m, huonekorkeus 3 m ja katon absorptiosuhde keskimäärin 0.8. Tällöin saadaan *STI*-arvoksi noin 0.35.



Kuva 6 – Seinäkkeen korkeuden vaikutus puheensirtoindeksiin eri kattoabsorptiosuhteilla α . Kussakin kuvassa esitetään käyrät kolmella eri taustamelutason arvolla, 35, 42 ja 48 dB. Yhdenäinen käyrä vastaa huonekorkeutta $h_c=2.5$ m ja katkoviiva korkeutta $h_c=4.0$ m.

LÄHTEET

- HONGISTO V, Toimistojen ääniolosuhteet, Kirjassa: Seppänen Olli, ym. "Sisäympäristön vaikutus terveyteen, tuottavuuteen ja viihtyvyyteen - esitutkimus", sivut 49-70, Tuottava Toimisto 2005, Teknillinen korkeakoulu, Työterveyslaitos, Espoo, 2001, 110 s.
- JOKITULPPO A, KAARLELA A, HELENIUS R, HONGISTO V, Toimistojen ääniolosuhteet - Esitutkimusten tuloksia, *Sisäilmastoseminaari*, Espoo 19-20.3.2003
- HELENIUS R, YM ... *Akustiikkapäivät 2003*, 6-7.10.2003, Turku.
- KERÄNEN J, HONGISTO V, AIRO E, OLKINUORA P, Validity of ray-tracing method for the application of noise control in workplaces, accepted for publication, *acta acustica & acustica*, 2003.
- HONGISTO V, KERÄNEN J, LARM P, Simple model for the acoustical design of open-plan offices, submitted for publication, *acta acustica & acustica*, May 2003.
- LARM P, Puheenerotettavuuden ennuste- ja mittausmenetelmät, pro gradu tutkielma, *Turun yliopisto*, Fysiikan laitos, 2003.
- KERÄNEN J, YM, *Akustiikkapäivät 2003*, 6-7.10.2003, Turku.