

AVOTOIMISTOJEN HUONEAKUSTIIKAN MALLINNUKSEN TARKKUUS

Pekka Saarinen¹, Jukka Keränen¹, Valtteri Hongisto¹

¹ Akustiikkalaboratorio
Turun ammattikorkeakoulu
Joukahaisenkatu 7
20520 Turku
pekka.saarinen@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Tavoitteena oli selvittää, miten tarkasti kaupallinen huoneakustiikan mallinnusohjelma laskee äänenpainetasot 84 m² avotoimistossa. Työssä tutkittiin avotoimistoa, jossa varioitiin työpisteiden välisten sermien materiaalia ja korkeutta sekä huonepintojen absorptiota 22 eri tavalla. Mallinnustuloksia on verrattu samoissa tilanteissa saatuihin mittaustuloksiin ISO 3382-3 mukaan. Mallinnukset suoritettiin käyttäen kaupallista mallinnusohjelmistoa (Odeon).

Vertailu paljasti, että mallinnus- ja mittaustulokset vastasivat hyvin toisiaan vaimentamattomissa tilanteissa, jolloin ääni pääsi sermien taakse katosta heijastumalla. Varsinkin katon ollessa absorboiva mallinnetut äänitasot olivat kuitenkin selvästi mitattuja alempia. Tällöin merkittävä osa sermien taakse päässeestä äänestä saapuu joko yläreunan yli taipumalla tai sermien läpi kulkeutumalla, joten joko taipuminen ei mallintunut oikein tai sermit päästivät ääntä lävitseen. Koska heikoin vastaavuus saatiin tilanteissa, joissa katto ja seinät olivat absorboivia ja sermit olivat absorboivia ja korkeita (yli 1,6 m), näyttää ilmeiseltä, että sermien läpäisyn puuttuminen on tärkeä mallinnusvirheiden lähde.

1 JOHDANTO

Vaikka huoneakustiikan tietokonemallinnusta on sovellettu yli 30 vuotta suunnittelussa, avotoimistoissa mallinnuksen toimivuutta on tutkittu vähän. Tiedossamme ei ole aiempaa tutkimusta, jossa olisi systemaattisesti käyty läpi avotoimiston erilaisia absorptiomateriaalitoteutuksia ja verrattu mallinnustuloksia mittauksiin. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on vastata tähän puutteeseen.

2 TILANTEET, MITTAUKSET JA MALLINNUKSET

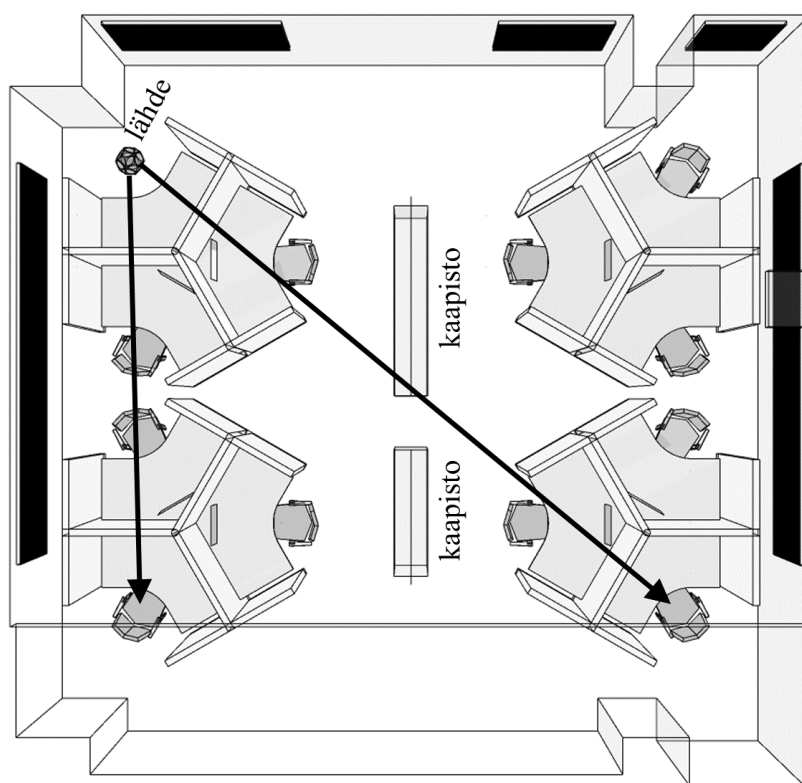
Tutkimuksen kohteena oli 12 työpisteen avotoimisto (9,4 × 8,9 × 2,55 m), jonka pinta-ala oli 84 m². Tässä toimistossa testattiin kaikkiaan 22 erilaista tilannetta (taulukko 1). Ser-



© 2021 Pekka Saarinen, Jukka Keränen ja Valtteri Hongisto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen – lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisiteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

mien korkeutta varioitiin (0; 1,3; 1,7 ja 2,1 m). Sisäsermit (so. työpöytien väleissä olevat sermit) olivat joko kovia tai absorboivia (ISO 11654 luokka B). Ulkosermit olivat aina kovia. Alakatto oli joko kova tai 90 % alalta absorboiva (luokka B). Seinät olivat kovat tai 20 % alaltaan absorboivat (luokka A).

Äänilähteenä käytettiin pallokaiutinta, joka oli sijoitettu yhteen nurkkatyöpisteeseen 1,2 m korkeudelle, ja johon syötettiin kohinaa. Mittaukset tehtiin ISO 3382-3 standardin mukaan, jolloin tuloksena saadaan standardoidun puheäänien A-painotettu äänenpainetaso kussakin mittauspisteessä. Äänikenttää mitattiin kuudessa mittauspisteessä, jotka oli sijoitettu muihin työpisteisiin kahdelle mittauslinjalle niin ikään 1,2 m korkeudelle (kuva 1). Näin ollen äänilähteestä ei ollut suoraa näköyhteyttä mikrofoniin lukuun ottamatta sermittömiä tilanteita. Puolet mittauspisteistä oli sijoitettu seinän suuntaiselle linjalle ja puolet diagonaalisesti. Taulukon 1 tilanteiden mittaustulokset on julkaistu [1].



Kuva 1. Tutkittu avotoimisto koostui neljästä kolmen työpisteiden ryhmästä. Työpisteet erotettiin toisistaan sermein, joiden korkeudet olivat joko 0; 1,3; 1,7 tai 2,1 m. Kerrallaan oli käytössä vain yhtä sermityyppiä. Kuvassa on esitetty myös kaiuttimen sijainti sekä mittauslinjat ja seinävaimennusten paikat (mustat levyt).

Tilanteiden mallinnukset suoritettiin kaupallisella mallinnusohjelmistolla (Odeon Auditorium), joka on energiaperusteinen (ei interferenssiä), säteenjäljitykseen perustuva ratkaisija. Ohjelmisto osaa kuitenkin ottaa huomioon diffraktion enintään kahden reunan yli [2]. Huonepinnoille käytettiin mittauksiin perustuvia absorptiosuhteita, jotka löytyvät viitteestä [1]. Absorboiville materiaaleille käytettiin sirontakerrointa 0,5 ja muille 0,1. Säteilylähde mallinnettiin ympärisäteileväksi pistelähteeksi ja ratkaisijaa käytettiin suur-

tarkkuustilassa. Kaiuttimen äänitehotaso määritettiin ISO 3741 mukaan ja samaa arvoa käytettiin ISO 3382-3 mukaisissa mittauksissa ja mallinuksissa.

Taulukko 1. Tutkittujen tilanteiden kuvaukset ($N = 22$). Kahdessa viimeisessä sarakkeessa on esitetty pienin ja suurin yksittäisessä mittauspisteessä saatu A-painotettujen äänenpainetasojen erotus (mitattu – mallinnettu).

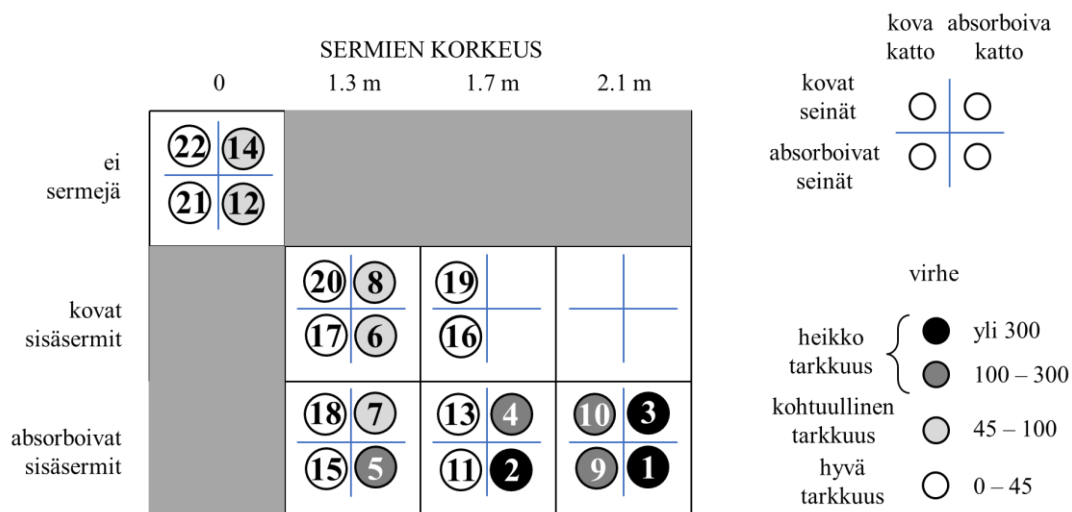
Tilanne	Absorptiosuhde			Sermien korkeus h [m]	pienin erotus [dB]	suurin erotus [dB]
	katto	seinät	sermit			
	α_w	α_w	α_w			
1	0.9	1.0	0.8	2.1	4.4	12.6
2	0.9	1.0	0.8	1.7	3.3	8.9
3	0.9	0.1	0.8	2.1	3.7	10.1
4	0.9	0.1	0.8	1.7	2.1	8.5
5	0.9	1.0	0.8	1.3	0.2	6.6
6	0.9	1.0	0.2	1.3	0.2	5.6
7	0.9	0.1	0.8	1.3	-0.9	5.8
8	0.9	0.1	0.2	1.3	-1.3	4.5
9	0.0	1.0	0.8	2.1	2.7	9.0
10	0.0	0.1	0.8	2.1	2.4	7.5
11	0.0	1.0	0.8	1.7	0.5	4.3
12	0.9	1.0	-	-	1.8	3.8
13	0.0	0.1	0.8	1.7	1.2	3.8
14	0.9	0.1	-	-	1.2	4.1
15	0.0	1.0	0.8	1.3	-0.4	1.2
16	0.0	1.0	0.2	1.7	-0.5	3.6
17	0.0	1.0	0.2	1.3	0.9	2.4
18	0.0	0.1	0.8	1.3	0.3	1.2
19	0.0	0.1	0.2	1.7	-0.1	2.3
20	0.0	0.1	0.2	1.3	1.0	2.4
21	0.0	1.0	-	-	-0.2	1.5
22	0.0	0.1	-	-	0.3	1.4

3 TULOSTEN POHDINTAA

Mallinnuksen **virhe** yksittäisessä tilanteessa määritettiin laskemalla mallinnetun ja mitatun standardipuheen A-painotetun äänenpainetaso, $L_{p,S,A}$ [dB], erotus kaikissa kuudessa mittauspisteessä ja ottamalla erotuksista neliösumma. Näin tosin menetetään informaatio siitä, olivatko mallinnetut arvot suurempia vai pienempiä kuin mitatut. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä, sillä lähes aina mallinnettu tilanne oli mitattua hiljaisempi, eli mallinnus pääsääntöisesti yliarvioi vaimennusta.

Virheet vaihtelivat hyvin suurella skaalalla. Parhaassa tilanteessa virhe oli alle 3, mutta heikoimmassa 502. Sen selvittämiseksi, millaisissa tilanteissa mallinnus tarkkaan ottaen epäonnistuu, on virheet kuvassa 2 ryhmitelty siten, että eri parametrien vaikutus saadaan näkyviin. Ryhmittelyn pohjana on ruudukko, jossa sermien korkeus kasvaa vasemmalta

oikealle ja sermien absorptiosuhde ylhäältä alas. Jokaisen ruudun sisällä on edelleen 2×2 -taulukko, jossa ovat kaikki katto/seinä -kombinaatiot siten, että absorboivan katon tilanteet ovat oikealla ja absorboivien seinien tilanteet alhaalla. Tilanteiden virheet on värikoodattu siten, että tummempi väri merkitsee suurempaa virhettä. Tilanteet on numeroitu samoin kuin Keräsen ym. [1] artikkelissa ja taulukossa 1.



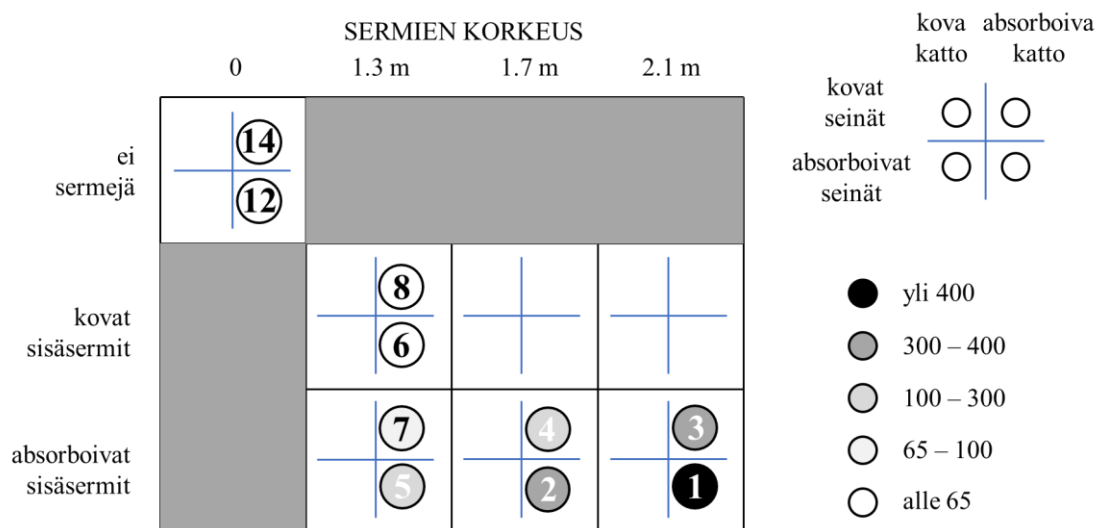
Kuva 2. Tilanteiden virheet ryhmiteltyinä absorptioon mukaan. Mitä tummempi ympyrän väri on, sitä suurempi on mittauksen ja mallinnuksen ero. Ulompi ruudukko on järjestetty sermien ominaisuuksien mukaan. Sisempi ruudukko on ryhmitelty katon ja seinien absorptioon perusteella. Numerot viittaavat taulukkoon 1.

Kuvasta 2 nähdään, että mallinnuksen tarkkuus on hyvä tilanteissa, joissa on heijastava katto (ruutujen vasemmanpuoleiset tilanteet) ja riittävästi tilaa heijastuksille (sermikorkeus alle 2,1 m). Tuloksista voidaan päätellä, että katon kautta tapahtuvat heijastukset ovat tällöin tärkein äänenleviämismekanismi mittauspisteisiin, ja mallinnus toistaa ne hyvällä tarkkuudella.

Kuvassa 3 tarkastellaan pelkästään absorboivalla katolla varustettuja tilanteita, joissa siis kattoheijastukset ovat vähäisiä. Harmaasävyyskaalaa on muutettu kuvaan 2 nähden siten, että tilanteiden erot saadaan näkyviin. Kun myös seinille asennetaan absorptiolevyt, heijastuksia on entistä vähemmän, ja mallinnuksen tarkkuus heikkenee entisestään. Tämä näkyy selvästi kuvassa 3 verrattaessa ruutujen sisäisten taulukoiden ylempiä ja alempia tilanteita. Näissä tilanteissa heijastusten osuus on kaikkein pienin, ja koska äänilähteestä ei ole suoraa näköyhteyttä mittauspisteisiin (pl. kaksi sermitöntä tilannetta), jäljelle jäävät äänensiirtomekanismit ovat diffraktio ja mahdollinen sermien läpäisy.

Mallinnus näyttää epäonnistuvan erityisesti tilanteissa, joissa on käytetty absorboivia sisäsermejä. Koska sermien yläreunoilla oli aina samanlainen kova metallilista, sermien yli tapahtuva diffraktio on kuitenkin yhtä voimakas kovilla ja absorboivilla sermeillä. Odeonin myös väitetään mallintavan diffraktiota hyvin [2], joskin kokeellinen tutkimustieto avotoimistoista puuttuu. Johtopäätös on siis, että absorboivat sermit todennäköisesti päästävät ääntä lävitseen. Läpäisy taas riippuu äänen taajuudesta, mutta taajuusriippuva lä-

päisy ei ole optiona ohjelmistossa. Tämä puute voisi selittää suuret mallinnusvirheet absorboivien sisäsermien tapauksessa.



Kuva 3. Virheet tilanteissa, joissa katto on absorboiva.

Kuvassa 4 tuloksia on analysoitu toisesta näkökulmasta. Mittauspisteiden sijaan mallinnettujen ja mitattujen äänenpainetasojen erotusten neliöt onkin summattu kaikkien tilanteiden yli. Näin saadaan yksilöllinen virhesumma jokaiselle mittauspisteelle. Kun edellä oleva analyysi osoitti, miten erilaiset absorptiot vaikuttavat mallinnuksen tarkkuuteen, kuva 4 paljastaa, miten mittauspisteen sijainti siihen vaikuttaa.

Suorin reitti äänilähteestä mittauspisteisiin M1–M4 kulkee yhden tai kahden sisäsermin (vaaleat) läpi. Jos siis sisäsermien läpäisyn puute aiheuttaa virheen, näissä mittauspisteissä voidaan odottaa suuria neliösumman arvoja. Juuri näin on tapahtunutkin. Sen sijaan mittauspisteessä M5 ulkosermi ja huoneen keskellä sijaitseva kaapisto tukkivat sisäsermin läpi kulkevan reitin (katkoviiva kuvassa 4). Voidaan siksi olettaa, että mallinnustulos ei ole yhtä herkkä sisäsermien läpäisevyydelle. Mallinnus on todella ennustanut selvästi paremmin äänenpainetasot tässä pisteessä. Mittauspisteet M6 ja M3 sijaitsevat huoneen nurkissa sisäsermien takana, ja mallinnuksen ennustuskyky on molemmissa yhtä huono.

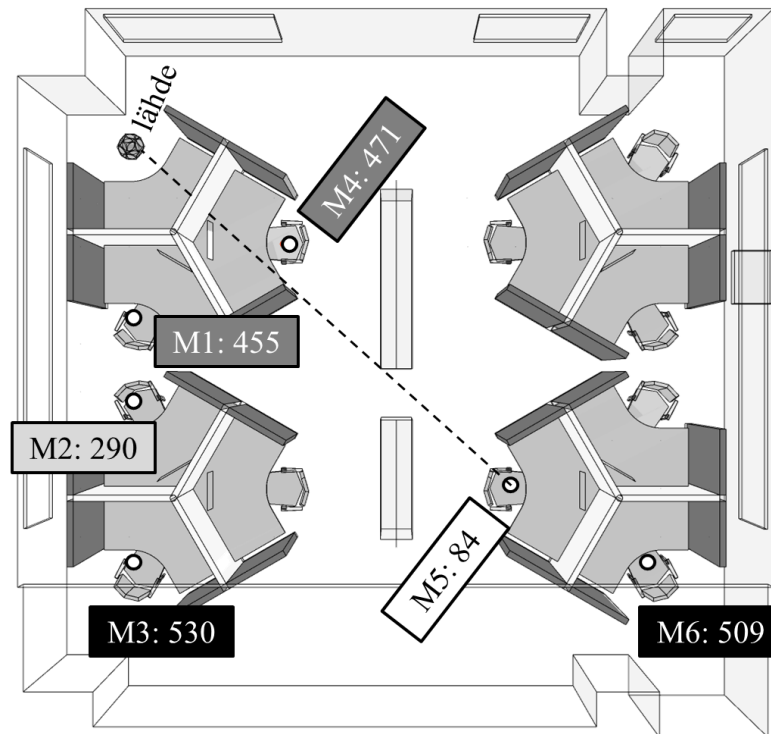
4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mallinnus- ja mitaustulosten välisiä eroja analysoitiin edellä kahdella eri tavalla; kiinnittämällä tilanne (so. absorptioratkaisu) ja summaamalla neliöidyt erotukset yli mittauspisteiden ja päinvastoin. Kummallakin tavalla päädyttiin siihen johtopäätökseen, että todennäköisin selitys mallinnus- ja mitaustulosten eroille on absorboivien sermien äänen läpäisy, jota ei tunnettu ja jota ei voitu mallintaa.

Koska absorptiomateriaalit yleensä kiinnitetään seinä- ja kattopintoihin, ei niiden läpäisevyydellä ole merkitystä. Sermejä sen sijaan käytetään avotoimistoissa erottamaan työpisteitä toisistaan, jolloin sermin takana on yleensä toinen työpiste, ja absorboivan sermin mahdollisesta läpäisevyydestä tulee oleellinen parametri. Virhetarkastelun perus-

teella vaikuttaa siis siltä, että mallinnettaessa avotoimistojen ääniympäristöä on sermien läpäisevyys tärkeä parametri, joka tulisi ottaa huomioon taajuusriippuvana. Läpäisy voidaan mitata ilmaääneneristävyyden testin ISO 10140-2 mukaan laboratoriossa.

Löydöksellä on käytännön merkitystä silloin, kun sermit ovat korkeita (yli 1,3 m) ja läpihuokoisia (huono ilmaääneneristävyys, ei kiinteää levyä sermin pehmeiden pintojen välissä), jolloin sermin läpäisevä ääni voi olla voimakkaampi kuin sermin yli taittunut ääni. Jos sermit ovat tätä matalampia, mallinnusvirhe jää pieneksi.



Kuva 4. Virheet mittauspisteittäin (M1–M6). Vaaleat sermit ovat sisäsermejä (suuri tai pieni absorptio) ja tummat ulkosermejä (aina pieni absorptio).

VIITTEET

[1] Keränen J, Hakala J, Hongisto V. "Effect of sound absorption and screen height on spatial decay of speech—Experimental study in an open-plan office." *Applied Acoustics* 166(2020): 107340.

[2] Rindel J, Nielsen G, Christensen C. "Diffraction around corners and over wide barriers in room acoustic simulations." *Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow, 2009.*