

*Maija-Liisalle*



Juhani Kuronen

## **JATKUVAN ÄÄNITEHOJAKAUTUMAN ALGORITMI PITKIEN KÄYTVIEN ÄÄNIKENTTIEN MALLINTAMISEEN**

Väitöskirja tekniikan tohtorin tutkintoa varten esitetään tuotantotalouden tiedekunnan luvalla julkisesti tarkastettavaksi Lappeenrannan teknillisen yliopiston luentosalissa 1382, perjantaina 16. elokuuta 2013 klo 12.00.

Ohjaajat  
Dosentti, TkT Heikki Laitinen  
Turvallisuusjohtaminen  
Arvoverkkojen johtaminen  
Tuotantotalouden tiedekunta  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Professori, FT Matti Heiliö  
Sovellettu matematiikka  
Matematiikan ja fysiikan laitos  
Teknillinen tiedekunta  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Esitarkastajat  
Dosentti, TkT Rauno Pääkkönen  
Työterveyslaitos  
Tampere

Dosentti, FT Esko Toppila  
Työterveyslaitos  
Helsinki

Vastaväittäjät  
Dosentti, TkT Rauno Pääkkönen  
Työterveyslaitos  
Tampere

Dosentti, FT Esko Toppila  
Työterveyslaitos  
Helsinki

ISBN 978-952-265-426-7  
ISBN 978-952-265-427-4 (PDF)

ISSN-L 1456-4491  
ISSN 1456-4491

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Yliopistopaino 2013

## TIIVISTELMÄ

Juhani Kuronen

### JATKUVAN ÄÄNITEHOJAKAUTUMAN ALGORITMI PITKIEN KÄY- TÄVIEN ÄÄNIKENTTIEN MALLINTAMISEEN

Lappeenranta 2013

138 sivua

Acta Universitatis Lappeenrantaensis 522

Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto

ISBN 978-952-265-426-7, ISBN 978-952-265-427-4 (PDF)

ISSN-L 1456-4491, ISSN 1456-4491

**JÄKÄLA**-algoritmi (Jatkuvan Äänitehojakautuman algoritmi Käytävien Äänikenttien **L**askentaan) ja sen NUMO- ja APPRO-laskentayhtälöt perustuvat käytävällä olevan todellisen äänilähteen kuvalähteiden symmetriaan. NUMO on algoritmin numeerisen ratkaisun ja APPRO likiarvoratkaisun laskentayhtälö. Algoritmia johdettaessa oletettiin, että absorptiomateriaali oli jakautunut tasaisesti käytävän ääntä heijastaville pinnoille. Suorakaiteen muotoisen käytävän kuvalähdetason muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi sisältää kolme muokausvaihetta. Aluksi suorakaiteen kuvalähdetaso muunnetaan neliön muotoiseksi. Seuraavaksi neliön muotoisen kuvalähdetason samanarvoiset kuvalähteet siirretään koordinaattiakselille diskreetiksi kuvalähdejonoiksi. Lopuksi kuvalähdejono muunnetaan jatkuvaksi äänitehojakautumaksi, jolloin käytävän vastaanottopisteen äänenpainetaso voidaan laskea integroimalla jatkuvan äänitehojakautuman yli.

JÄKÄLA-algoritmin validiteetin toteamiseksi käytettiin testattua kaupallista AKURI-ohjelmaa. AKURI-ohjelma antoi myös hyvän käsityksen siitä, miten NUMO- ja APPRO-yhtälöillä lasketut arvot mahdollisesti eroavat todellisilla käytävillä mitatuista arvoista. JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöitä testattiin myös vertaamalla niiden antamia tuloksia kolmen erityyppisen käytävän äänenpainetasomittauksiin.

Tässä tutkimuksessa on osoitettu, että akustisen kuvateorian pohjalta on mahdollista johtaa laskenta-algoritmi, jota voidaan soveltaa pitkien käytävien äänikenttien pika-arvioinnissa paikan päällä.

Sekä teoreettinen laskenta että käytännön äänenpainetasomittaukset todellisilla käytävillä osoittivat, että JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden ennustustarkkuus oli erinomainen ideaalikäytävillä ja hyvä niillä todellisilla käytävillä, joilla ei ollut ääntä heijastavia rakenteita. NUMO- ja APPRO-yhtälöt näyttäsivät toimivan hyvin käytävillä, joiden poikkileikkaus oli lähes neliön muotoinen ja joissa pintojen suurin absorptiokerroin oli korkeintaan kymmenen kertaa pienintä absorptiokerrointa suurempi.

NUMO- ja APPRO-yhtälöiden suurin puute on, etteivät ne ota huomioon pintojen erilaisia absorptiokertoimia eivätkä esineistä heijastuvia ääniä. NUMO- ja APPRO-laskentayhtälöt poikkesivat mitatuista arvoista eniten käytävillä, joilla kahden vastakkaisen pinnan absorptiokerroin oli hyvin suuri ja toisen pintaparin hyvin pieni, ja käytävillä, joissa oli massiivisia, ääntä heijastavia pilareita ja palkkeja. JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöt antoivat tutkituilla käytävillä kuitenkin selvästi tarkempia arvoja kuin Kuttruffin likiarvoyhtälö ja tilastollisen huoneakustiikan perusyhtälö.

JÄKÄLA-algoritmin laskentatarkkuutta on testattu vain neljällä todellisella käytävällä. Algoritmin kehittämiseksi tulisi jatkossa käytävän vastakkaisia pintoja ja niiden absorptiokertoimia käsitellä laskennassa pareittain. Algoritmin validiteetin varmistamiseksi on mittauksia tehtävä lisää käytävillä, joiden absorptiomateriaalien jakautumat poikkeavat toisistaan.

Asiasanat: Meluntorjunta, äänikenttien mallintaminen, akustinen kuvateoria, pitkät käytävät

UDC 534.6:534.3:519.673:62-533.6:72.012.8

## **ABSTRACT**

Juhani Kuronen

### **CONTINUOUS SOUND POWER DISTRIBUTION ALGORITHM FOR MODELLING NOISE LEVELS IN LONG CORRIDORS**

Lappeenranta 2013

138 p.

Acta Universitatis Lappeenrantaensis 522

Diss. Lappeenranta University of Technology

ISBN 978-952-265-426-7, ISBN 978-952-265-427-4 (PDF)

ISSN-L 1456-4491, ISSN 1456-4491

The new JÄKÄLA algorithm is based on the symmetry of the image sources of the real sound source in the corridor. There are three editing steps in the modification of the image plane of a rectangular-shaped corridor having the ratio of cross-section dimensions not more than one and half, into continuous sound power distribution.

First, an oblong-shaped image plane is converted to a square-shaped one. Next, the equivalent power image sources of the square-shaped plane image are transferred to a coordinate axis as a discrete image source string. Finally, the image source string is converted to a continuous sound power distribution, and now the sound level in the corridor can be calculated by integrating over the continuous sound power distribution.

The accuracy of the formulae of the derived algorithm to predict sound levels in long corridors were tested by comparing the sound the levels in the imaginary ideal corridor reception points calculated with the derived formulae and those calculated with commercial AKURI program with each other. In addition, noise measurement results of four long corridors were compared with the sound levels calculated by the algorithm formulae and the AKURI program. Both the theoretical calculations and practical sound level measurements showed that the prediction accuracy of the formulae were excellent in ideal corridors and good in corridors meeting the structural postulates set for the corridor.

In the reception points of the ideal imaginary and real corridors the calculation results the NUMO integral formula of the JÄKÄLA algorithm and the AKURI program differed about half a dB in all tested distances and values of the coefficient of absorption. The APPRO formula reached the same accuracy, when the average absorption coefficient of the corridor was 0,1 or higher. In the reception points of real corridors the measured sound levels and those calculated with the AKURI program and the with NUMO and APPRO formulas differed at the most by one decibel when the absorption coefficient of the corridor was 0,1 or greater. In a very hard corridor with beams in the ceiling and pilasters on the walls, the greatest difference between the measured sound level and the one calculated with the AKURI program and NUMO formula was 2 dB in the middle of the corridor, and with the APPRO formula 3,5 dB in the near field of the sound source. When comparing the sound level calculation times of the reception points in a very hard corridor, it was noticed that a desktop PC calculated the sound levels hundreds of times faster by using the NUMO integral formula than by using the double sum formula of the AKURI program.

In urgent contract and site negotiation situations, the NUMO and APPRO formulae of the JÄKÄLA algorithm facilitate the evaluation of the effect of different acoustic measures on the sound field in the corridor. With a quick "hand tool", unsuitable acoustic options can be eliminated and the focus can be directed to further development of the best option with heavier computational programs, when necessary. This way the acoustic design can be controlled in real time, instead of making detailed and possibly erroneous design work in advance. When using the NUMO integration formula in an acoustic computer program, a lot of computing time is saved, especially if the entire sound field of the corridor is wanted to be printed by octave bands instead of the sound level of a single entry point.

Key words: Noise control, modelling of sound fields, acoustic image theory, long corridors

UDC 534.6:534.3:519.673:62-533.6:72.012.8



## ALKUSANAT

Kiinnostukseni akustiikkaan ja meluntorjuntaan heräsi yli kolmekymmentä vuotta sitten työskennellessäni Lappeenrannan aluetyöterveyslaitoksella työturvallisuusinsinöörinä. Tuona vajaan kymmenen vuoden aikana teimme työtoverini Pertti Närhen kanssa lukuisia teollisuuden meluselvityksiä sekä rakennusten huoneakustisia mittauksia ympäri Suomea.

Heikki Laitinen, silloinen esimieheni, sai minut innostumaan jatkotutkinnosta. Ajatus teollisuustilojen äänikenttien tietokonemallinnuksesta alkoi kiehtoa mieltäni yhä enemmän. Tuohon aikaan, 1980-luvun alkupuolella tietokoneet olivat hitaita nykyisiin verrattuna, eikä akustisia valmisohjelmia ollut tarjolla. Ohjelma oli tehtävä itse. Tutkimustyön tuloksena syntyi akustiseen kuvateoriaan perustuva laskeenta-algoritmi ja tietokoneohjelma, jolla voitiin laskea suorakulmaisen särmiön muotoisten hallien äänikenttiä. Vuosien uurastuksen jälkeen olin suorittanut lissensiaatintutkimuksen.

Siirryttyäni Työterveyslaitoksen asiantuntijaorganisaatiosta turvallisuusjohtamisen lehtoriksi silloisen Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun tiedeyhteisöön tuntui luontevalta aloittaa väitöskirjan kirjoittaminen opetustyön ohella. Akustiikkaan liittyvän monogrammiväitöskirjan kirjoittaminen tiedeyhteisössä, jossa ei ole alan professuuria eikä tutkimusta, osoittautui haasteellisemmaksi kuin olin kuvitellut. Olen kiitollinen niille tiedeyhteisömme jäsenille, joiden kanssa olen voinut keskustella akustiikan hienouksista ja problematiikasta. Näin jälkikäteen ajatellen kokonellaväitöskirja olisi ollut monogrammiväitöskirjaa parempi ratkaisu, koska silloin olisin voinut hyödyntää myös kansainvälistä tutkijaverkoston.

Väitöskirjatyötäni ovat ohjanneet Lappeenrannan teknisen yliopiston turvallisuusjohtamisen dosentti Heikki Laitinen sekä sovelletun matematiikan professori Matti Heiliö. He ovat seuranneet työni edistymistä, antaneet neuvoja tieteelliseen kirjoittamiseen ja opastaneet matemaattisissa pohdiskeluissa sekä kannustaneet minua etenkin työni ”kalkkiviivoilla”. Tästä lausun suuret kiitokset heille.

Työni esitarkastajina ovat olleet dosentti Rauno Pääkkönen sekä dosentti Esko Toppila Työterveyslaitokselta. Heitä kiitän rakentavasta kritiikistä, arvokkaista parannusehdotuksista sekä rohkaisusta.

Ilman mentorini Antti Lehmusvaaran kannustusta tuskin olisin jaksanut saattaa tutkimustyötäni loppuun. Antti on myös auttanut minua pysymään hyvässä fyysisessä kunnossa. Hänen kanssaan olemme useana aamuna viikossa ennen töiden alkua tavanneet Lappeenrannan uimahallilla. Myös työyhteisön tuki on ollut tärkeä. Kiitän kaikkia työtovereitani niin Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla kuin Saimaan ammattikorkeakoululla hyvin sujuneesta yhteistyöstä kuluneina vuosina.

Haluan kiittää vaimoani Maija-Liisaa kärsivällisyydestä ja ymmärtäväisyydestä. Pitkään kestäneen tutkimusprosessin aikana olen usein ollut poissaolevan tuntainen. Kiitän myös veljeäni Tapania rohkaisevista keskusteluista, miellyttävistä ulkomaan matkoista sekä viisaista neuvoista, jota vuosien varrella olen häneltä saanut.

Nyt kun kevät on kauneimmillaan, teen viimeisiä korjauksia väitöskirjaani ja kirjoitan työni alkusanoja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto on ollut minulle hyvin mieluisa työpaikka. Tunnen haikeutta, kun väitöstyöni myötä sanon hyvästit tälle työyhteisölle ja sen henkilökunnalle. Uskon kuitenkin, että tuleva syksy ja sen tarjoamat uudet haasteet lieventävät eläkeläisen ikävää!

Taipalsaarella, toukokuussa 2013

Juhani Kuronen

*Comede in laetitia panem tuum  
et bibe cum gaudio vinum tuum.  
Soli Deo gloria!*

## SISÄLTÖ

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Käytetyt merkinnät

Kreikkalaiset kirjaimet, määritelmät ja lyhenteet

1	JOHDANTO.....	19
1.1	Akustisen suunnittelun haasteita .....	19
1.2	Huoneakustisista mallinnusohjelmista .....	20
1.2.1	Aaltoyhtälömallit .....	22
1.2.2	Äänisädemallit .....	23
1.2.3	Laskentamallien kehitys.....	26
1.3	Käytävämelu – aliarvostettu ongelma .....	28
1.4	Pitkien käytävien äänikenttien arvioinnin problematiikasta .....	29
1.5	Tutkimuksen tavoitteet ja rakenne.....	33
2	HUONEAKUSTISET TEORIAT.....	37
2.1	Aaltoyhtälöteoria.....	37
2.2	Tilastollisen huoneakustiikan teoria .....	41
2.2.1	Diffuusi äänikenttä.....	42
2.2.2	Tilan pintaan absorboitunut äänienergia .....	43
2.2.3	Kaikukentän energiatiheys.....	45
2.3	Geometrisen huoneakustiikan teoria .....	46
2.3.1	Geometrisen huoneakustiikan perusolettamukset.....	46
2.3.2	Äänisäteen peiliheijastus.....	48
2.3.3	Äänisäteen diffuusi heijastus .....	49
3	UUDEN JÄKÄLA-LASKENTA-ALGORITMIN JOHTO .....	55
3.1	Tutkimusasettelu .....	55
3.2	Teoreettisten ja todellisten käytävien kuvaukset .....	55
3.2.1	Teoreettisten käytävien koejärjestelyt .....	55
3.2.2	Todellisten käytävien koejärjestelyt.....	56
3.3	Todellisen äänilähteen kuvalähteet.....	57
3.4	Käytävän kuvalähdetason muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi .....	63

3.4.1	Suorakaiteen muotoisen käytävän muunto neliön muotoiseksi .....	63
3.4.2	Kuvalähteiden siirto koordinaattiakselille.....	65
3.4.3	Diskreetin kuvalähdejonon muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi .....	65
3.5	Äänitehokäyrän kertoimen $B$ määrittely.....	66
3.6	Vastaanottopisteen äänenpainetason numeerinen ratkaisu NUMO .....	69
3.7	Vastaanottopisteen äänenpainetason likiarvoratkaisu APPRO .....	71
4	TUTKIMUKSEN TULOKSET .....	82
4.1	JÄKÄLA-algoritmin johdossa tehtyjen kuvalähdetason kolmen muokkausvaiheen vaikutus alkuperäisen ideaalikäytävän AKURI-ohjelmalla laskettuihin tuloksiin.....	82
4.1.1	Suorakaiteen kuvalähdetason muunto neliön muotoiseksi .....	83
4.1.2	Neliön kuvalähdetason siirto kuvalähdejonoksi koordinaattiakselille .....	87
4.1.3	Kuvalähdejonon muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi.....	91
4.2	JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden tulosten vertailu AKURI-ohjelman tuloksiin teoreettisilla käytävillä.....	95
4.2.1	Numeerinen NUMO -yhtälö .....	95
4.2.2	Likiarvoyhtälö APPRO.....	96
4.2.3	Käytävät, joissa absorptiomateriaali on jakautunut epätasaisesti .....	100
4.3	JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden tulosten vertailu mitattuihin sekä muilla yhtälöillä laskettuihin äänenpainetasoihin todellisilla käytävillä .....	111
4.3.1	Ykkösrakennusvaiheen käytävä.....	111
4.3.2	Kirjaston käytävä.....	115
4.3.3	Vanha yhdyskäytävä.....	118
4.3.4	Uusittu yhdyskäytävä.....	120
5	POHDINTA .....	123
5.1	Tutkimustarve .....	123
5.2	Hypoteesit ja niiden testaus.....	123
5.2.1	Ensimmäinen alahypoteesi.....	123
5.2.2	Toinen alahypoteesi .....	124
5.2.3	Kolmas alahypoteesi .....	124
5.2.4	Neljäs alahypoteesi .....	125
5.3	JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden käyttökelpoisuus .....	125
5.4	Jatkotutkimuksen tarve.....	129
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	130

LÄHTEET

LIITTEET

liite 1 Laskuesimerkki

## KÄYTETYT MERKINNÄT

A	kokonaisabsorptio (m <sup>2</sup> ); pinta-ala (m <sup>2</sup> )
A <sub>i</sub>	osa-alueen kokonaisabsorptio (m <sup>2</sup> )
a	etäisyys äänilähteestä käytävällä (m)
B <sub>o</sub>	intensiteetti pinnan normaalin suhteen (W/m <sup>2</sup> )
B	jatkuvan äänitehokäyrän kerroin
c	äänen nopeus (m/s)
D	energiatiheys (Ws/m <sup>3</sup> , J/m <sup>3</sup> )
D <sub>Oxyz</sub>	vastaanottopisteen O <sub>xyz</sub> energiatiheys (Ws/m <sup>3</sup> , J/m <sup>3</sup> )
E <sub>1</sub>	pisteeseen 1 suoraan tullut äänienergia (J)
E <sub>2</sub>	pisteeseen 2 suoraan tullut äänienergia (J)
E <sub>r</sub>	heijastunut äänienergia (J)
E <sub>spec</sub>	peiliheijastuneen äänienergian kerroin
E <sub>total</sub>	heijastuneen äänienergian kerroin
f <sub>(l,m,n)</sub>	seisovan aallon resonanssitaajuus (Hz)
H <sub>o</sub>	käytävän redusoitu korkeus (m)
H	käytävän laskentakorkeus = 0,8H <sub>o</sub> (m)
H <sub>x</sub>	hallin pituus (m)
H <sub>y</sub>	hallin leveys (m)
H <sub>z</sub>	hallin korkeus (m)
h	käytävän todellinen korkeus (m)
I	kokonaisintensiteetti (W/m <sup>2</sup> )
I <sub>a</sub>	äänen intensiteetti etäisyydellä a äänilähteestä (W/m <sup>2</sup> )
I <sub>tod</sub>	todellisen äänilähteen intensiteetti vastaanottopisteessä (W/m <sup>2</sup> )
I <sub>dx</sub>	kuvalähdealkion intensiteetti vastaanottopisteessä (W/m <sup>2</sup> )
I <sub>k</sub>	kuvalähteiden intensiteetti vastaanottopisteessä (W/m <sup>2</sup> )
I <sub>o</sub>	pintaan kulmassa δ <sub>o</sub> tuleva intensiteetti (W/m <sup>2</sup> )
i	√-1
i	ääniheijastusten lukumäärä katon ja lattian suhteen (kpl)
j	ääniheijastusten lukumäärä päätyseinien suhteen (kpl)
k	ääniheijastuksen lukumäärä sivuseinien suhteen (kpl)
k	aaltoluku (rad/m)

$L_{Aeq,30s}$	kolmenkymmenen sekunnin ekvivalenttinen A-äänitaso (dB)
$l$	käytävän todellinen leveys (m)
$\bar{l}$	keskimääräinen matka tilan pintatörmäysten välillä (m)
$L_x$	hallin dimensio (m) x-akselin suunnassa
$L_y$	hallin dimensio (m) y-akselin suunnassa
$L_z$	hallin dimensio (m) z-akselin suunnassa
$L_w$	äänitehotaso (dB)
$L_p$	äänenpainetaso (dB)
$l, m, n$	kokonaisluvut 0, 1, 2, ...
$m$	ilman matkavaimennuskerroin ( $m^{-1}$ ), jatkossa vaimennuskerroin
$m_x, m_y, m_z$	kuvalähteen koordinaatit (m)
$n$	kuvalähteen järjestysluku pinnan suhteen, heijastusluku (kpl)
$N$	kuvalähteiden lukumäärä (kpl), valittujen äänisäteiden lukumäärä (kpl)
$n_{ka}$	katon peiliheijastusten lukumäärä (kpl)
$n_{la}$	lattian peiliheijastusten lukumäärä (kpl)
$n_{es}$	etuseinän peiliheijastusten lukumäärä (kpl)
$n_{ts}$	takaseinän peiliheijastusten lukumäärä (kpl)
$n_{vs}$	vasemman seinän peiliheijastusten lukumäärä (kpl)
$n_{os}$	oikean seinän peiliheijastusten lukumäärä (kpl)
$O$	vastaanottopiste
$O_{xyz}$	vastaanottopisteen O koordinaatit xyz (m)
$p$	äänenpaine (Pa)
$p_{l,m,n}(x,y,z)$	seisovan aallon äänenpaine vastaanottopisteessä x,y,z, (Pa)
$r$	pallon säde (m), pisteen etäisyys pinnasta tai pinta-alkiosta (m)
$Q$	suuntatekijä
$R_{ni}$	kuvalähteen etäisyys todellisesta äänilähteestä (m)
$\bar{R}_n$	kuvalähteiden yhteenlaskettujen etäisyyksien keskiarvo äänilähteestä (m)
$r_{jki}$	etäisyys äänilähteestä vastaanottopisteeseen (m)
$s$	pinnan sirontakerroin

$S_{xyz}$	äänilähteen S koordinaatit xyz (m)
$S_z$	kuvalähteen etäisyys xy-tasosta (m)
$S_x$	kuvalähteen etäisyys yz-tasosta (m)
$S_y$	kuvalähteen etäisyys xz-tasosta (m)
$S_{jki}$	kuvalähteen S koordinaatit jki (m)
$S$	pinta-ala, vaipan ala ( $m^2$ ), kuvalähteiden äänitehosumma (W)
$S_A$	katon ja lattian kuvalähteiden äänitehosumma (W)
$S_V$	koordinaattiakselien välisten kuvalähdesarakkeiden äänitehosumma (W)
$S_i, S$	äänilähde
$T$	heijastava pinta
$t$	aika (s)
$U$	käytävän poikkileikkauksen piirin pituus (m)
$\vec{U}$	yksikkösuuntavektori
$V$	tilavuus ( $m^3$ )
$v_n$	hiukkasnopeuden normaalikomponentti pinnan suhteen (m/s)
$W$	ääniteho (w)
$w$	yhden säteen ”ääniteho” jaettuna avaruuskulma-alkiolle (w)
$x, y, z$	suorakulmaisen koordinaatiston koordinaatit
$Z$	ominaisaaltovastus ( $kg/m^2s$ )

## KREIKKALAISET KIRJAIMET, MÄÄRITELMÄT JA LYHENTEET

$\alpha$	absorptiokerroin
$\alpha_{\text{spec}}$	peiliheijastavan pinnan absorptiokerroin
$\bar{\alpha}$	keskimääräinen absorptiokerroin
$\beta$	heijastuskerroin
$\beta_{\text{la}}, \beta_f$	lattian heijastuskerroin
$\beta_{\text{ka}}, \beta_c$	katon heijastuskerroin
$\beta_{\text{os}}, \beta_{\text{wl}}$	oikean seinän heijastuskerroin
$\beta_{\text{vs}}, \beta_{\text{w2}}$	vasemman seinän heijastuskerroin
$\beta_{\text{es}}$	etuseinän heijastuskerroin
$\beta_{\text{ts}}$	takaseinän heijastuskerroin
$d\Omega$	avaruuskulma (sr)
$\theta$	äänisäteen suuntakulma (rad)
$\varphi$	äänisäteen suuntakulma (rad)
$\rho$	tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$\omega$	kulmataajuus (rad/s)
$\tau$	aika (s)
$\nabla^2$	Laplacen operaattori
$\delta$	saapuvan äänisäteen kulma pinnan normaalin suhteen (rad)
$\delta_o$	heijastuvan äänisäteen kulma pinnan normaalin suhteen (rad)
$si(y)$	$-\int_y^\infty \frac{\sin(t)}{t} dt$
$ci(y)$	$-\int_y^\infty \frac{\cos(t)}{t} dt$
$\sum \Delta L$	äänenpainetasojen kokonaispoikkeama (dB)
$\Delta L$	äänenpainetasojen kumulatiivinen poikkeama (dB)
$\Delta l$	äänenpainetasojen poikkeama (dB)



**A-äänitaso:**

Lineaarisen äänenpainetason taajuuspainotus, jossa vaimennetaan pieniä ja erittäin suuria taajuuksia standardin SFS 2877/IEC 651 mukaisella A-suodattimella. Painotus pyrkii jäljittelemään normaalikuuloisen ihmisen kuulon taajuusvastetta heikoilla äänillä (Asumisterveysohje 2003).

**Melun häiritsevyys:**

Häiritsevyys (disturbance, interference) on meluärsyksen aiheuttama kielteisenä koettu elämyspiirre (Jauhiainen et al. 2007).

**Melun kiusallisuus:**

Kiusallisuus (annoyance) on melulle altistuneen elämyksellinen kokemus, jonka hän kokee tai arvioi itseään häiritseväksi, ei-toivotuksi, kielteiseksi, tahi elämisen tai asuinympäristön laatua huonontavaksi. Melun kokeminen häiritseväksi, se on toimintoja tai suorituksia vaikeuttavaksi, lisää yleensä melun kiusallisuutta. (Asumisterveysohje 2003.)

**Melun äänekkyyys:**

Äänekkyyys eli kuuluvuus (loudness) on ääniaistimuksen elämyksellinen voimakkuus (Jauhiainen et al. 2007).

AKURI	Työterveyslaitoksen kaupallinen akustinen ohjelma
APPRO	Integraalin approksimaatioon perustuva laskentayhtälö
JÄKÄLA	Jatkuvan Äänitehojakautuman algoritmi Käytävien Äänikenttien LAskentaan
NUMO	Numeerisen integraalin laskentaan perustuva yhtälö
2D	2 Dimensions (kaksi dimensionaalinen)
3D	3 Dimensions (kolme dimensionaalinen)

2-1/2-D	Two-And-a-Half-Dimensional (kaksi ja puoli dimensionaalinen)
CAD	Computer Aided Design (tietokoneavusteinen suunnittelu)
BEM	Boundary Element Method (reunaelementtimenetelmä)
FEM	Finite Element Method (äärellisten elementtien menetelmä)
FDTD	Finite Difference Time-Domain (äärellinen differenssimenetelmä)
DWM	Digital Waveguide Mesh (aaltojohtoverkko)
SVP	Space Volume Partition (tila-alkio)
SEA	Statistical Energy Analysis (tilastollinen energia-analyysi)

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Akustisen suunnittelun haasteita

Melua pidetään yhtenä pahimmista elämän ja elinympäristön laatua heikentävistä tekijöistä (Lahti 2003, s. 25; Jauhiainen et al. 2007, s. 7). Melu on sekä paikallinen että maailmanlaajuinen ongelma. Paikallinen ongelma se on siinä mielessä, ettei melu muiden ympäristöhaittojen tavoin kulkeudu kauas eikä aiheuta jäämiä, ei ainakaan siinä mielessä kuin ilman ja vesien saastuminen. Melusaaste häviää välittömästi, kun melulähde lakkaa toimimasta. Melulla on kuitenkin myös pitkäaikaisvaikutuksia esimerkiksi kuuloon ja uneen (Jokitulppo 2009, s. 10; Jauhiainen 2007, s. 7). Melua esiintyy jatkuvasti kaikkialla, mihin ihminen on rakentanut infrastruktuuria ja teollisuutta. Tässä mielessä sitä voidaan pitää myös maailmanlaajuisena ongelmana (Lahti 2003, s. 7).

Melun ihmiselle aiheuttaman kiusan objektiivinen arviointi on vaikeaa. Tutkijat ovat vuosikymmenien ajan etsineet melusuuretta, joka mittaisi yksiselitteisesti ja tarkasti ihmisen kokeman melun kiusallisuutta (annoyance) (Asumisterveysohje 2003, s. 54). Tällaista ei ole löytynyt. Yhden luotettavan suureen sijaan on kehitetty lukuisa joukko eri menetelmiä melun kiusallisuuden arvioimiseksi (Pesonen 2005). Melun näkymättömyys on ehkä vaikuttanut siihen, että sen haittavaikutuksia ei ole otettu aiemmin täysin vakavasti. Nykyisin melun vaarallisuudesta ei ole epäilystäkään (Jokitulppo 2009; Babisch et al. 2005). Melu, häiritsevä (disturbance, interference) tai haitallinen ääni, ei aina johdu koneista ja laitteista. Tutkimusten mukaan muualta kantautuva keskustelu häiritsee eniten avotoimiston työntekijöitä (Hongisto et al. 2007; Hongisto et al. 2004, s. 481). Myös puhe ja nauru voivat olla melua (Virjonen et al. 2009, s. 279).

Meluntorjunta on investointi, jonka onnistuminen edellyttää hyvää suunnittelua. Siihen kuuluu sekä teknisen toteutuksen suunnittelu, että eri torjuntavaihtoehtojen edullisuusvertailut (Kuronen et al. 1985). Hyvä suunnittelu ja edullisuusvertailut on tärkeää, koska esimerkiksi akustisen verhouksen materiaali- ja asennuskustannukset ovat korkeat (Keränen 2010) ja jälkikäteen tehdyt muutokset valmiissa rakennuksessa ovat työläitä ja kalliita (Siltanen et al. 2008, s. 410). Tämän vuoksi myös käytävän verhoiluun käytetyn akustisen materiaalin kustannus-hyötysuhde tulee optimoida.

Konsulttitoimistot tarjoavat nykyään konserttisalien ja teattereiden akustiseen suunnitteluun sekä tehdassalien meluntorjuntaan tehokkaita kaupallisia akustiikkaohjelmia, joilla ehdotettuja akustisia toimenpiteitä voidaan tarkastella (Siltanen et al. 2009; Gerretsen 2006). Näillä ohjelmilla kohteen mallinnus on aikaa vievää ja kallista sekä tarpeettoman yksityiskohtaista pelkistettyjen tilojen, kuten sileäpin- taisten käytävien, luokkahuoneiden, voimistelusalien tai avotoimistojen akustiseen suunnitteluun. Kaupallisten ohjelmien käyttämiseen tarvitaan harjaantumista sekä erikoisosaamista, ja ne soveltuvat pikemminkin akustiikan tutkimustyöhön kuin insinöörien ja suunnittelijoiden työkaluiksi (Gerretsen 2006).

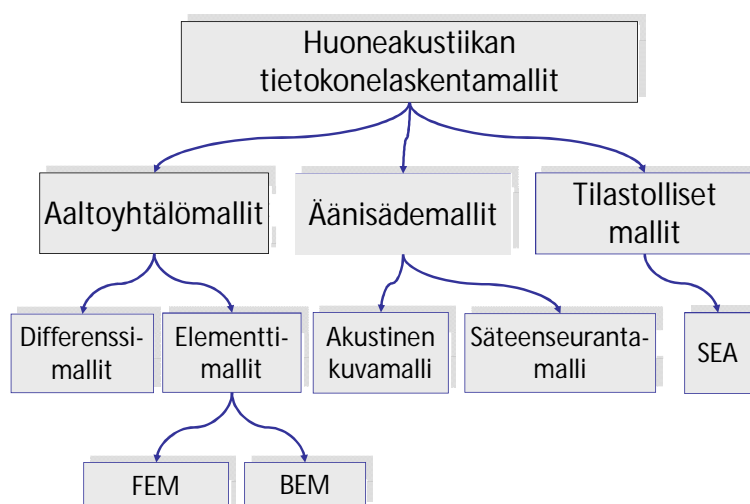
Suunnittelukustannusten tulisi olla mahdollisimman alhaiset ja järkevässä suhteessa akustisten ratkaisujen toteutuskustannuksiin (Keränen et al. 2003). Talonrakentajilta puuttuu edelleen helppokäyttöinen ”käsityökalu”, jolla voidaan urakkaneuvotteluissa tai työmaakokouksissa nopeasti ja riittävän tarkasti reaaliajassa vertail- la esimerkiksi kattoverhoilun vaikutusta käytävän äänikenttään *in situ*. Jos on tehtävä päätös käytävän katon verhoilusta puolen päivän aikataululla, ei tässä neuvot- telutilanteessa ennätetä hakea tietoa konsultilta, eikä se olisi edes taloudellisesti järkevää. Nopealla laskentamenetelmällä voitaisiin helposti karsia sopimattomat akustiset vaihtoehdot ja keskittyä tarvittaessa vain parhaimman vaihtoehdon jatko- kehitykseen raskaammilla laskentaohjelmilla. Näin voidaan ajan tasalla ohjata akustista suunnittelua, sen sijaan, että tehtäisiin pitkälle vietyä yksityiskohtaista ja ehkä virheellistäkin suunnittelutyötä etukäteen.

Nopean ja joustavan laskentatyökalun puuttuessa akustinen suunnittelu jää etenkin pienissä ja lyhytkestoisissa rakennusprojektissa tekemättä. Toisena vaihtoehtona on suuri houkutus käyttää tilastollisen huoneakustiikan yksinkertaisia diffuusin ää- nikentän yhtälöitä, jotka antavat kuitenkin pitkissä käytävissä virheellisen tuloksen (Kang 2002).

## **1.2 Huoneakustisista mallinnusohjelmista**

Akustisessa mallinnuksessa käytettyjen tietokoneohjelmien laskenta-algoritmit pe- rustuvat äänen aaltomuodon huomioon ottavaan aaltoyhtälöteoriaan (Wave-Based Modeling) ja aaltomuodon unohtavaan geometriseen sädeteoriaan (Ray-Based

Modeling) sekä tilastolliseen huoneakustiikkaan (Statistical Modeling) (Zhong-Jin Jiang et al. 2008). Tilastollisen huoneakustiikan menetelmiä, kuten tilastollista energia-analyysia (SEA), käytetään pääasiassa ennustamaan melutasoja kytketyissä tiloissa, joissa äänen eteneminen rakenteiden välillä on merkittävä tekijä. Huoneakustiikassa äänisädemallit ovat suosituimmat menetelmät akustisessa simuloinnissa (Zeng Xiangyang et al. 2002). Kuvassa 1 on esitetty huoneakustisten mallinnusohjelmien jaottelu (Savioja 1999, s. 19).



**Kuva 1.** Huoneakustisten mallinnusohjelmien jaottelu (Savioja 1999, s. 19).

Tietokoneita on käytetty akustisten ilmiöiden simulointiin jo 1970-luvulta lähtien (Schroeder 1970). Ensimmäisissä tietokonesovellutuksissa simuloitiin tyhjen hallein äänikenttiä. Matalissa ja laajoissa tai suorakulmisen särmiön muotoisissa halleissa käytettiin akustista kuvamallia (Image Source Method, Mirror Method). Heijastusten oletettiin tapahtuvan vain lattia- ja kattopintojen välillä. Epäsäännöllisen muotoisissa halleissa sovellettiin säteenseurantamallia (Ray-Tracing Technique). (Stephenson 2010; Ondet et al. 1989.) Seuraavassa vaiheessa malleihin otettiin mukaan kalusto: rakenteet, koneet, laitteet, esineet ja materiaalit (Valeau et al. 2007). Tämä paransi simuloinnin tarkkuutta, sillä kalustolla on suuri vaikutus tilan äänikenttiin (Lindqvist 1981). Hodgson (1988), Jovicic (1979), Lindqvist (1982) ja

Kurze (1997) olettivat kaluston jakautuvan tilaan isotrooppisesti. Lemire ja Nicolas (1985) mallinsivat ensimmäisinä kaluston lattialle ja käyttivät termiä keskimääräinen kalustokorkeus (Average Fitting Height) (Dance et al. 1997). Borish, Kirsztstein ja Allen ovat korvanneet epäsäännöllisen muotoiset kalusteet palloilla tai sylintereillä ja simuloineet yksittäisten säteiden sirontaa (Janczur et al. 1993). Ondetin mielestä paras tapa simuloida hallin kalustoa näyttäisi olevan äänisädemallit tai tilastollinen malli, jota Kuttruff käytti kuvatessaan äänen etenemistä metsässä (Ondet et al. 1989).

### 1.2.1 Aaltoyhtälömallit

Aaltoyhtälöön perustuvia numeerisia menetelmiä ovat elementtimenetelmät ja integraaliyhtälömenetelmät. Näiden menetelmien varjopuolena ovat suuri muistikapasiteettivaatimus ja pitkät laskenta-ajat. Äärellisten elementtien menetelmä FEM (Finite Element Method) ja reunaelementtimenetelmä BEM (Boundary Element Method) ovat työläitä ja suuren laskentatehovaatimuksien takia soveltuvat vain pienten tilojen ja matalien taajuuksien mallintamiseen (Siltanen et al. 2008; Zhong-Jin Jiang et al. 2008). Ero näiden menetelmien välillä on mallin elementtirakenteessa. Äärellisten elementtien menetelmässä (FEM) koko tutkittava tila täytetään säännöllisen muotoisilla elementeillä. Reunaelementtimenetelmässä (BEM) vain tilan rajapinnat kuvataan elementeillä. FEM-malleissa elementtien lukumäärä on kertaluokkaa suurempi kuin BEM-malleissa, mutta toisaalta BEM-mallien käsittely ja ratkaiseminen on laskennallisesti huomattavasti raskaampaa.

Vaihtoehtoinen numeerinen menetelmä on FDTD (Finite Difference Time-Domain) tilan akustiseen kuvaamiseen. Menetelmässä aaltoyhtälön derivaatat korvataan vastaavilla, äärellisillä differensseillä (Savioja 1999, s. 19). Eräs FDTD:n sovellus on aaltojohtoverkko (Digital Waveguide Mesh), joka on yksiulotteisen aaltojohtotekniikan laajennus useampaan ulottuvuuteen. Aaltoyhtälöverkkoa voidaan käyttää koko impulssivasteen simuloimiseen. Heijastuksen suunnat ja saapumisajat saadaan oikein, koska verkko on aito fysikaalinen malli tilasta. Koska menetelmä sisältää diffraktio- ja interferenssi-ilmiöiden mallintamisen, sitä voidaan käyttää myös pienten tilojen ja matalien taajuuksien tarkasteluun. Yksiulotteiselle aaltoyhtälölle saadaan tarkka ratkaisu aaltoyhtälömallin avulla.

Numeeriset menetelmät, kuten FEM ja FDTD eivät ole kovin laajalti käytössä äänikenttien simuloinnissa korkeiden laskentakustannusten vuoksi (Godinho et al. 2002). Kaikkien Wave-Based menetelmien vaikeutena on tilan reunaehtojen määrittäminen. Kirjallisuudesta on vaikea löytää pintojen kompleksisia impedanssiarvoja. Kolmessa ulottuvuudessa tapahtuva laskenta on raskasta, aikaa vievää ja kallista. Tätä ongelmaa on yritetty ratkaista menetelmillä, joissa väliaine esitetään kahdessa dimensiossa (2D) mutta äänilähde kolmessa dimensiossa (3D) (Two-And-a-Half-Dimensional, 2-1/2-D).

### 1.2.2 Äänisädemallit

Geometrisen sädeakustiikan menetelmiä ovat säteenseurantamallit (Ray-Tracing, Particle tai Beam Tracing), akustinen kuvamalli (Mirror Method, Image Source Method) sekä näiden yhdistelmämenetelmät (Stephenson 2010; Lokki 2002; Huopaniemi 1999; Stephenson 1990 sekä Lee et al. 1988). Lisäksi Distributed Source Boundary Point Method-menetelmää on käytetty lähikentän akustisessa tutkimuksessa. Äänisädemallia käytetään sekä suljettujen tilojen että vapaan äänikentän laskennassa (Stephenson 1990; Lee et al. 1988). Tietokoneiden laskentatehojen kasvaessa ovat etenkin geometriseen akustiikkaan perustuvat äänisädemallit tulleet hyvin monipuolisiksi. Ohjelmilla voidaan kuvata työtilan kalusteet ja yksityiskohdat sekä myös diffuusit ääniheijastukset tarvittavassa laajuudessa.

Äänisädemallien perusolettamukset äänen sädeominaisuuksista ovat samanlaiset, mutta menetelmien laskenta-algoritmit poikkeavat toisistaan. Säteenseurantamallissa äänisäteitä seurataan äänilähteen ja vastaanottopisteen välillä. Suurin osa laskenta-ajasta kuluu säteiden ja pintojen leikkauskohtien etsimiseen. Se, kuinka nämä leikkauskohdat löydetään tehokkaasti, on kriittinen kysymys äänikenttien ennustamisessa. Säteenseurantamallissa oletetaan, että jokaisen säteen äänienergiasta osa heijastuu peiliheijastuksena, ja osa diffuusina heijastuksena Lambertin heijastuslakia noudattaen (Zen Xiangyang 2002). Lindqvistin mukaan korkeilla taajuuksilla pinnasta heijastuvasta äänienergiasta puolet siroaa ja puolet heijastuu peiliheijastuksena eteenpäin (Lindqvist 1981). Diffuusien heijastusten kuvaaminen riittävän tarkasti geometrisen huoneakustiikan keinoin on osoittautunut haastavaksi

tehtäväksi. Hodgson sovelsi Lambertin heijastuslakia mallintaessaan tyhjän hallin äänikenttiä säteenseurantamenetelmällä (Hodgson 1991). Hän havaitsi, että diffuusien heijastusten merkitys pienissä huoneissa oli vähäinen, kun taas suurissa halleissa diffuusit heijastukset voivat olla merkittäviä. Dalenbäck esitti algoritmin (Approximate Cone Tracing), jossa hän pirstoi sädekimput (Cone), jotka osuivat diffuusisti heijastavaan pintaan (Dalenbäck 1995).

Säteenseurantamallissa äänilähteen ääniteho  $W$  jaetaan valitulle määrälle ( $N$ ) äänisäteitä, jolloin yhden säteen "ääniteho"  $w = W/N$  jakautuu avaruuskulmaan:

$$d\Omega = 4\pi / N \quad (1)$$

Pallokoordinaatistossa äänilähteestä lähtevän säteen suunnan määrää yksikkösuuntavektori:

$$\vec{U} = (\cos \theta \cos \phi, \sin \theta \cos \phi, \sin \phi) \quad (2)$$

jonka suuntakulma  $\theta$  valitaan satunnaisesti väliltä  $(0, 2\pi)$  ja  $\cos \phi$  väliltä  $(-1, 1)$  (Hemilä et al. 1991; Ondet et al. 1989). Kalustamattomassa tilassa etenevän äänisäteiden intensiteettiä pienentävät etäisyysvaimennus, pintojen törmäysabsorptio sekä ilman absorptio. Jokaista tilassa etenevää äänisädettä seurataan niin kauan, kunnes määrätty määrä heijastuksia on tapahtunut tai säteen intensiteetti on pienentynyt halutulle tasolle.

Säteiden seurantamallissa tila jaetaan joko kaksi- tai kolmiulotteisiin vastaanottoalueisiin (Reception Cells). Nämä vastaanottoalueet edustavat tarkkailupisteitä, joissa äänenpainetaso halutaan laskea. Kaksiulotteiset vastaanottoalueet ovat usein samankokoisia suorakulmioita. Kun etenevä äänisäde läpäisee vastaanottoalueen, intensiteetti ei keskity lävistyspisteeseen vaan jakaantuu ellipsin alalle, joka on suuntavektorin  $\vec{U}$  ympärille muodostuneen kartion kantapinta vastaanottoalueella. Kunkin tarkastelupisteen äänenpainetaso lasketaan sitä edustavan vastaanottoalueen kokonaisintensiteetistä, joka on syntynyt useiden säteiden lävistäessä vastaanottoalueen.

Kolmiulotteiset vastaanottoalueet voivat olla kuution tai pallon muotoisia. Kuution muotoisilla vastaanottoalueilla on yleensä kaikilla sama tilavuus ja niiden



keskipisteet sijaitsevat samalla tasolla. Pallon muotoiset vastaanottoalueet voivat olla erikokoisia, ja niiden keskipisteet voivat sijaita eri tasoilla. Kun äänisäde etenee tilassa, tarkkaillaan, mitkä vastaanottoalueet säde lävistää ja kuinka pitkän matkan se kulkee niiden sisällä. Kolmiulotteisten vastaanottoalueiden käyttö antaa tarkemmat tulokset mutta vaatii pitemmän laskenta-ajan kuin tasovastaanottoalueiden käyttö (Ondet et al. 1989; Hodgson 1988).

Säteenseurantamallilla päästään monimutkaisen muotoisten tilojen äänikenttien simuloinnissa yleensä lyhempiin laskenta-aikoihin kuin akustisella kuvateorialla. Vaikka äänilähteen vaste vastaanottpisteessä voidaan laskea varsin lyhyessä ajassa, ei voida kuitenkaan olla täysin varmoja, että kaikki merkitsevät äänisäteet ovat laskennassa mukana. Mallia sovellettaessa saattaa joitakin merkittäviä äänisäteitä jäädä pois laskennasta, ja saman tilan laskentatulokset saattavat vaihdella laskentaa uusittaessa. Tämä tuo tietyn epävarmuuden laskentamenetelmään. Säteenseurantamallissa ei ole yleispätevää sääntöä vastaanottoalueen muodosta, suuruudesta ja laskennassa käytettävien äänisäteiden määrästä. Menetelmä ei myöskään sovi hyvin impulssivasteen laskemiseen (Lee et al. 1988).

Akustisessa kuvamallissa oletetaan yleensä, että pinnoista tapahtuvat heijastukset ovat peiliheijastuksia. Malli soveltuu parhaiten suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisten tilojen äänikenttien laskemiseen (Gensane et al. 1979). Akustisessa kuvamallissa ei äänisädettä seurata, vaan vastaanottpisteen äänen intensiteetti saadaan todellisista ja kuvalähteistä suoraan saapuvien äänisäteiden intensiteettien summana. Kuvamalli ottaa huomioon kaikkien pintojen heijastuskombinaatiot, eikä pelkoa jonkin merkittävän äänisäteen pois jäämisestä ole. Tämän vuoksi akustinen kuvamalli on säteen seurantatekniikkaa tarkempi ja nopeampi menetelmä suorakulmaisen särmiön muotoisissa tiloissa (Janczur et al. 1993; Lee et al. 1988). Nykyisissä akustiseen kuvateoriaan perustuvissa laskentamalleissa voidaan myös diffraktoituneen äänisäteen komponentit ottaa huomioon laskennassa (Lokki 2002).

Teollisuushallit ja käytävät ovat yleensä suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisia. Tällaisessa tilassa todellisen äänilähteen kuvalähteet (Images)

sijaitsevat avaruudessa tietyn säännön mukaisesti. Kun etsitään yhä korkeamman kertaluvun kuvalähteitä, syntyy avaruuteen alkuperäisen äänilähteen kolmiulotteisen kuva-avaruus. Heijastuslakia apuna käyttäen voidaan äänen kulkeman matkan pituus kuvalähteestä vastaanottopisteeseen määrittellä ilman, että heijastuskulmia tarvitsee laskea. Kuvalähteiden etäisyyksien ja äänitehojen laskemiseksi on kehitetty monia algoritmeja, esimerkiksi Galatsis et al. (1976), Allen et al. (1979), Lemire et al. (1985), Kuronen (1986) sekä Ohta et al. (1992). Kuva-avaruuden luomisen jälkeen voidaan hallin pinnoista tapahtuvat heijastukset korvata kuvalähteillä ja hallin pinnat unohtaa. Kuva-avaruuden todelliset ja kuvalähteet oletetaan vapaassa tilassa palloaaltoa säteileviksi monopolilähteiksi. Kuvalähteiden äänitehot määräytyvät pintojen absorptiokertoimien ja heijastuskertojen lukumäärän perusteella. Lopullinen intensiteetti kussakin vastaanottopisteessä on todellisesta äänilähteestä ja sen kuvalähteistä tulevien äänisäteiden intensiteettien summa (Ohta et al. 1992).

Epäsäännöllisen muotoisessa tilassa olevan todellisen äänilähteen kuvalähteiden koordinaatteja ei löydetä yhtä helposti kuin suorakulmaisen suuntaissärmiön tapauksessa. Kuvalähteiden paikat on ratkaistava esimerkiksi koordinaatistomuunnosten avulla, jolloin laskenta-algoritmi monimutkaistuu ja laskenta-aika pitenee (Lee et al. 1988).

### **1.2.3 Laskentamallien kehitys**

Huoneakustisten laskentamallien kehittymistä ovat edistäneet erilaiset testiturnaukset (Round Robin Tests), joissa eri mallien laskentatuloksia on vertailtu keskenään sekä kentällä mitattuihin arvoihin (Young-Ji Choi et al. 2006). Testiturneita ovat järjestäneet ainakin Vorländer (1995) ja Bork (2000, 2005). Etenkin geometrinen laskentamallien yksinkertaistamiseksi tehdään paljon tutkimustyötä. Koska akustiset ongelmat mutkistuvat ja laskentavaatimukset kasvavat on tilan äänikenttien mallintamiseksi kehitettävä jatkuvasti uusia laskenta-algoritmeja ja ohjelmia (Godinho et al. 2002). Nykyisin ovat yleistyneet niin kutsutut hybridimallit (Hybrid Methods), joissa eri laskentateoriat on yhdistetty. Kehitys on kohdistunut kuitenkin pääasiassa laskenta-algoritmeihin ja ohjelmien käytettävyyteen, ei itse akustisten ilmiöiden mallintamiseen (Stephenson 2010). Malleilla on tapaustutki-

muksissa päästy  $\pm 2$  desibelin tarkkuuteen, jota pidetään riittävänä (Hodgson 1997).

Vaikka huoneakustiset simulointimenetelmät, kuten säteenseuranta ja sen versiot, ovat vakiinnuttaneet paikkansa akustisessa suunnittelussa 30 viime vuoden aikana, niissä on edelleen vakavia puutteita äänen aalto-ominaisuuksien mallintamisessa (Stephenson 2006). Geometrisen akustiikan sädemallinnuksessa unohdetaan perinteisesti äänen aalto-ominaisuudet, ennen kaikkea diffraktio ja diffuusio. Näitä ilmiöitä on jälkikäteen pyritty ottamaan huomioon lisäämällä malleihin erilaisia toisen asteen äänilähteitä (Secondary Sources), kuten kuva-, pinta- ja särmälähteitä (Lokki 2002).

Akustisen suunnittelun kannalta olisi joustavaa, jos akustikot voisivat käyttää suunnittelunsa pohjana samaa 3D-mallia kuin arkkitehdit. Vaikka kehittyneimmät akustiikkaohjelmistot mahdollistavat joidenkin CAD-kuvien siirron akustiseen ohjelmaan, ovat arkkitehtien käyttämät visualisointikuvat liian monimutkaisia ja sisältävät liikaa akustisesti merkityksettömiä yksityiskohtia (Siltanen et al. 2008). Kolmiulotteisten 3D-mallien pelkistäminen (Reducing) on ollut tietokonegrafiikan kiintoisa tutkimuskohde viime vuosisadan lopusta alkaen. Tietokoneiden grafiikkatekniikoilla ei luoda ainoastaan mallinnettavien tilojen kolmiulotteisia kuvia, vaan niiden avulla voidaan kehittää nopeita algoritmeja säteenseurantatekniikalle. Laajalti käytettyjä graafisia tekniikoita ovat esimerkiksi Pyramidal Beam Tracing-, Octree Method- ja Space Volume Partition -menetelmät (Stephenson 1996). Nopeassa SVP-algoritmissä (Two-Level Space Volume Partition) kolmiulotteinen ääniavaruus jaetaan kaksiulotteisiksi tasoalkioiksi (Voxels) (Zhong-Jin Jiang et al. 2008; Stephenson 2006). Toinen huomionarvoinen menetelmä on Volumetric Geometry Simplification eli tilavuuspohjainen geometrian yksinkertaistaminen (Siltanen et al. 2008). Haasteena on karsia 3D-malli mahdollisimman pelkistetyksi mutta säilyttää silti sen akustiikan kannalta tärkeät ominaisuudet.

Tällä hetkellä ei ole käytettävissä 3D-algoritmia, joka tehokkaasti ottaisi huomioon myös geometrisen huoneakustiikan mallinnustarpeet (Siltanen et al. 2008). Lisäksi geometrisen mallintamisen suurena puutteena on, ettei moninkertaista diffraktioilmiötä pystytä mallintamaan riittävän tarkasti (Stephenson 2010). On myös

huomattava, että useiden algoritmien vaatimat laskenta-ajat ovat varsin pitkiä (Stephenson 2006). Näistä syistä on kehitetty tämän työn osassa 3 esitetty laskentamalli.

### 1.3 Käytävämelu – aliarvostettu ongelma

Akustisesti kovat käytävät ovat erittäin ongelmallisia, sillä ne välittävät tehokkaasti melua eri tilojen välillä. Tällaisissa tiloissa ääni etenee kuin putkessa vaimentuen vain vähän kulkiessaan käytävän päädyistä toiseen. Käytävää pidetään akustisesti erittäin kovana (Live Room), jos käytävän pintojen keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} \leq 0,05$  ja erittäin pehmeänä (Dead Room) jos  $\bar{\alpha} \geq 0,4$ . Käytävä on kova, jos  $0,05 < \bar{\alpha} \leq 0,2$  ja pehmeä, jos  $0,2 < \bar{\alpha} < 0,4$ , (Beranek 1971, s. 227; Andersson 1998, s. 104 ). Koulumaailmassa tehdyssä tutkimuksessa on havaittu, että käytävältä luokkahuoneeseen kantautuva voimakas melu on suurin syy huonoon puheen ymmärrettävyyteen luokassa (Smirnowa et al. 2005, s. 103). Käytäviä pidetään usein luentosaleja toisarvoisimpina tiloina, joten niiden akustisen suunnittelu unohtuu helposti. Koulurakennuksissa luokkahuoneet, sairaaloissa potilashuoneet sekä toimistoissa työhuoneet sijaitsevat pitkien käytävien kahta puolta. Koska käytäviltä huoneisiin johtavien ovien ääneneristävyys on yleensä heikko, tunkeutuu käytävän melu huoneisiin ja häiritsee opetusta, työskentelyä tai sairaaloissa potilaiden lepoa (Wu Dasheng et al. 1987). Kaikuisan luokkahuoneen ääniympäristöä voidaan parantaa lisäämällä katto- ja seinäpintoihin ääntä absorboivaa materiaalia (Smirnowa et al. 2005, s. 103). On kuitenkin huomattava, että runsas vaimennusmateriaalin käyttö tekee huoneesta kaiuttoman, akustisesti ”kuolleen”. Kaiuttimuus ei yleensä paranna puheen ymmärrettävyyttä. Päinvastoin, vaimennettuun luokkahuoneeseen kantautuvat käytävän äänet entistä selvemmin, koska luokan oma taustamelu on alentunut.

Käytävämelun häiritsevyyttä voidaan torjua äänilähteitä vaimentamalla, rakenteiden ääneneristävyyttä parantamalla sekä käytävän ja työtilojen absorptiota lisäämällä. Paras meluntorjuntavaihtoehto, käytävän äänilähteiden vaimentaminen, on harvoin mahdollista (Davies 1973). Huoneiden käytävän puoleisten seinärakenteiden ääneneristävyyden lisääminen ei aina tuo toivottua tulosta, sillä ääntä siirtyy huoneisiin myös ovirakenteiden ja sivutiesiirtymän kautta. Esimerkiksi sairaaloissa ja hoitolaitoksissa vuode- ja pyörätuolipotilaiden siirtoa huoneesta toiseen

helpotetaan usein jättämällä ovien kynnykset asentamatta. Kynnyksen puuttuminen heikentää ovien ääneneristävyttä merkittävästi. Jos oven ja lattian välinen rako on 10 millimetriä, saadaan ovirakenteella vain noin 23 desibelin ääneneristävyys. Käytävän kovien pintojen verhoileminen absorptiomateriaalilla on tehokas ja myös taloudellisesti kilpailukykyinen ratkaisu käytävämeluongelmiin. Akustinen verhoilu vähentää käytävän äänenpainetasoa ja lyhentää kaiuntaa. Toimenpide pienentää myös usein käytävän varrella sijaitsevien huoneiden lisäakustoinnin tarvetta.

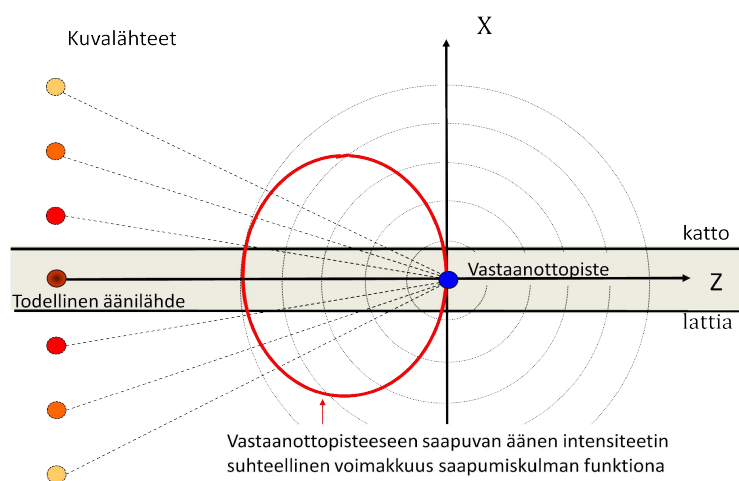
#### **1.4 Pitkien käytävien äänikenttien arvioinnin problematiikasta**

Poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisten käytävien jälkikaiunta-aikamittauksissa on havaittu jälkikaiunta-aikojen olevan lyhimpiä äänilähteen välittömässä läheisyydessä (Kang 2002; Kang 1996). Edettäessä äänilähteestä pois päin jälkikaiunta-ajat kasvoivat nopeasti maksimiinsa, jonka jälkeen ne laskivat hitaasti, kun matka äänilähteeseen piteni. Pitkien käytävien jälkikaiunta-aika ei siis ole vakio, kuten klassiset Sabine (1927) ja Eyringin (1930) huoneakustiikan yhtälöt olettavat. Käytävien äänikenttien arviointiin ei tulisi soveltaa tilastollisen huoneakustiikan yhtälöitä, koska oletus diffuusista äänikentästä ei pidä paikkaansa. Siitä huolimatta näitä yhtälöitä käytetään hyvin usein myös diffuusiottomien äänikenttien arviointiin.

Aaltoyhtälöteorian mukaa tyhjään, suorakulmaisen särmiön muotoiseen, kovapintaaiseen tilaan syntyvä äänikenttä voidaan kuvata tilan ominaistajuuksien avulla. Poikkileikkaukseltaan neliön muotoisen pitkän käytävän, jonka päätyseinien ääniheijastukset ovat heikot, ominaistajuusjakautuma on hyvin epätasainen ja harva (Kang 2002, s. 29). Tälläkään teorialla ei käytävän äänikenttää voi kuvata luotettavasti.

Toisin kuin normaalin huoneen lähes diffuusissa äänikentässä, käytävässä jatkuva toimisen äänilähteen synnyttämä äänitaso laskee matkan äänilähteestä kasvaessa. Tätä ilmiötä voidaan selittää akustisella peilikuvateorialla (Mirror Method). Akustinen peilikuvateoria unohtaa äänen aalto-ominaisuudet. Teorian mukaan, riippumatta taajuudesta, etenevä ääni esitetään äänisäteinä, joiden intensiteettiä

pienentää etäisyysvaimennus sekä pintatörmäysten taajuusriippuvainen absorptiovaimennus. Teoria ei ota huomioon esimerkiksi tilaan syntyviä seisovia aaltoja. Kun tarkastellaan akustisella peilikuvateorialla luoduista kuvalähteistä vastaanottopisteeseen tulevia äänisäteitä, havaitaan, että äärettömän pitkässä käytävässä, jonka päätyseinät eivät heijasta ääntä, äänisäteet tulevat vastaanottopisteeseen pelkästään puoliavaruudesta, eivät kaikista suunnista, kuva 2 (Kang 2002, s. 26).



**Kuva 2.** Osa vastaanottopisteeseen saapuvista kuvalähteiden äänisäteistä (Kang 2002, s. 26).

Mitä kauempana käytävällä vastaanottopiste on äänilähteestä, sitä pitemmän matkan heijastuneiden äänisäteiden on kuljettava ja sitä pienempi on vastaanottopisteen äänenpainetaso. Tämäkin havainto osoittaa, ettei pitkän käytävän äänikenttä ole diffuusi, kuten klassiset teoriat olettavat.

Eri teorioihin perustuvia laskentamalleja pitkien käytävien äänikenttien arvioimiseksi on Kangin mukaan johdettu jo 1960-luvulta alkaen: Yamamoto (1961), Davies (1973), Leschnik (1976), Jovicic (1979), Hirata (1979), Said (1981), Redmore (1982), Osipov (1987), Kuno (1989), Kuttruff (1985) (Kang 2002).

Kuttruff on soveltanut akustista peilikuvateoriaa pitkään, tyhjäan käytävään, jonka poikkileikkaus on  $h \times l$ . Kun käytävän päätyseinien heijastuksia ei oteta huomioon, on äänilähteen synnyttämä kuva-avaruus kaksiulotteinen. Jos käytävän kaikkien pintojen heijastuskerroin on  $\beta$ , saadaan energiatiheyden yhtälöksi etäisyydellä  $a$  äänilähteestä (Kuttruff 1989, s. 54):

$$D = \frac{W}{4\pi c} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\beta^{|m|+|n|}}{(mh)^2 + (nl)^2 + a^2} \quad (3)$$

jossa  $D$  on energiatiheys,  $W$  on äänilähteen ääniteho,  $m$  ja  $n$  ovat kuvalähteiden järjestysluvut,  $c$  on äänen nopeus ja  $\beta$  on pintojen keskimääräinen äänen heijastuskerroin ja  $a$  on vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä. Kun tila on akustisesti erittäin kova ( $\alpha \leq 0,05$ ), tarvitaan äänikentän vastaanottopisteen tarkkaan laskentaan noin  $3,6 \times 10^5$  kuvalähdettä. Käytävän yhden vastaanottopisteen energiatiheyden laskemiseksi yhtälöllä (3) kannettava tietokone (Dell Inter® Core (TM) DUO CPU P8700 @ 2,53 GHz 3,48GB RAM) käyttää aikaa noin 30 sekuntia.

Kuno on johtanut likiarvoyhtälön summayhtälölle (3) (Kang 2002, s. 42). Kunon mukaan äänen energiatiheys vastaanottopisteessä on:

$$D = -\frac{W}{2S} [ci(y)\cos y + si(y)\sin y] \quad (4)$$

jossa tekijä  $y$  on:

$$y = (U / \pi S) a \lg \beta \quad (5)$$

$W$  on ääniteho,  $U$  on käytävän poikkileikkauksen piirin pituus ja  $S$  on poikkileikkauksen pinta-ala,  $a$  etäisyys äänilähteestä ja  $\beta$  pinnan heijastuskerroin.

Yamamoto on esittänyt yhtälön, joka ottaa huomioon poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen särmiön  $h \times l$  muotoisen, äärettömän pitkän käytävän pintojen erilaiset absorptiokertoimet (Kang 2002 s. 43). Yamamoton mukaan pitkän käytävän äänenpainetaso etäisyydellä  $a$  äänilähteessä on:

$$\begin{aligned}
L_p = L_w - 11 - 10 \lg & \left[ \frac{1}{a^2} + \sum_{m=0} \sum_{n=0} \frac{(\beta_f \beta_c)^n (\beta_{w1} \beta_{w2})^m}{a^2 + (2n+1)^2 h^2 + (2m+1)^2 l^2} \right. \\
& \times (\beta_c \beta_{w1} + \beta_f \beta_{w1} + \beta_c \beta_{w2} + \beta_f \beta_{w2}) \\
& + \sum_{m=0} \sum_{n=1} 2 \frac{(\beta_f \beta_c)^n (\beta_{w1} \beta_{w2})^m}{a^2 + (2n)^2 h^2 + (2m+1)^2 l^2} (\beta_{w1} + \beta_{w2}) \\
& + \sum_{m=1} \sum_{n=0} 2 \frac{(\beta_f \beta_c)^n (\beta_{w1} \beta_{w2})^m}{a^2 + (2n+1)^2 h^2 + (2m)^2 l^2} (\beta_f + \beta_c) \\
& + \sum_{m=1} \sum_{n=1} 4 \frac{(\beta_f \beta_c)^n (\beta_{w1} \beta_{w2})^m}{a^2 + (2n)^2 h^2 + (2m)^2 l^2} \\
& + \sum_{n=1} 2 \frac{(\beta_f \beta_c)^n}{a^2 + (2n)^2 h^2} + \sum_{n=0} \frac{(\beta_f \beta_c)^n}{a^2 + (2n+1)^2 h^2} (\beta_f + \beta_c) \\
& \left. + \sum_{m=1} 2 \frac{(\beta_{w1} \beta_{w2})^m}{a^2 + (2m)^2 l^2} + \sum_{m=0} \frac{(\beta_{w1} \beta_{w2})^m}{a^2 + (2m+1)^2 l^2} (\beta_{w1} + \beta_{w2}) \right] \quad (6)
\end{aligned}$$

jossa  $L_p$  on äänenpainetaso etäisyydellä  $a$  äänilähteestä,  $L_w$  on äänilähteen äänitehotaso,  $m$  ja  $n$  ovat kuvalähteiden järjestysnumeroita sekä termit  $\beta_c$ ,  $\beta_f$ ,  $\beta_{w1}$ ,  $\beta_{w2}$  ovat katon, lattian ja sivuseinien heijastuskertoimet. Kun yhtälön (3) antama äänen energiatiheys muunnetaan äänenpainetasoksi, antavat yhtälöt (3) ja (6) saman tuloksen, kun käytävän kaikkien pintojen absorptiokertoimet ovat yhtä suuret (Kang 2002, s. 43).

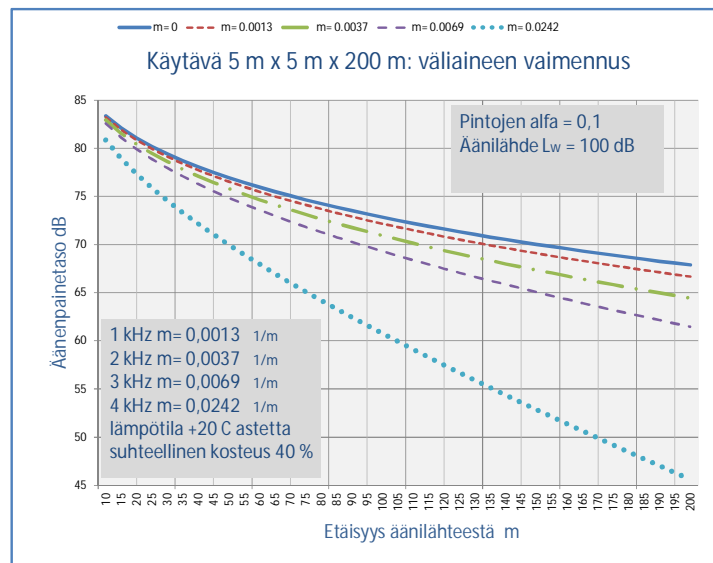
Keränen on lisensiaatintyössään tarkastellut Sergeyevin pienoismallimitauksista johtamaa yhtälöä, josta Työterveyslaitos on julkaissut selainpohjaisen mallinnus-työkalun (Keränen 2006, s. 23; Osipov et al. 1987). Käytävän A-äänitaso etäisyydellä  $a$  todellisesta äänilähteestä on esitetty yhtälöllä:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left[ \frac{1}{2\pi a^2} + \frac{(1-\alpha)(a+l)J(\alpha, \sigma)}{hl(a+h)} \right] \quad (7)$$

$$\text{jossa } J(\alpha, \sigma) = 0.1 \times \left[ \alpha + \sigma^2 \exp(0.65\sigma) \right]^{-1} \text{ ja } \sigma = -aS \ln(1-\alpha)/4V \quad (8)$$



Yhtälössä  $a$  on etäisyys äänilähteestä,  $l$  on tilan leveys,  $h$  korkeus,  $V$  tilavuus,  $S$  vaipan ala ja  $\alpha$  pintojen keskimääräinen absorptiokerroin. Edellä esitetyissä kaavoissa ei ole otettu huomioon ilman ja kaluston vaimennusta. Pelkästään jo ilman vaimennuksella on suuri merkitys pitkissä käytävissä, etenkin korkeilla taajuuksilla, kuva 3.



**Kuva 3.** Ilman vaimennusvaikutus pitkässä käytävässä (Kuttruff 1979, s. 129).

Pitkien käytävien äänenvaimennusmateriaalin optimointi ilman kaupallisia tietokoneohjelmia on tällä hetkellä työlästä, koska yksinkertaista laskentayhtälöä ei ole käytettävissä (Gerretsen 2006; Heerema 1999). Tämän vuoksi on tärkeää kehittää uusia nopeakäyttöisiä laskentamalleja käytännön akustiikan tarpeisiin.

### 1.5 Tutkimuksen tavoitteet ja rakenne

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan pitkiä, poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisia, sileäpintaisia käytäviä, joiden päätyseinien ääniheijastukset eivät ole merkittäviä. Tällaisia käytäviä ovat muun muassa hotellien, sairaaloiden, virastojen, kasarmien, päiväkotien sekä koulujen käytävät. Tutkimuksessa oletetaan, että tyhjän tai niukasti kalustetun käytävän kaikki dimensiot ovat selvästi suuremmat kuin tarkasteltavan äänen aallonpituus.

Sanakirja määrittelee käytävän suhteellisen kapeaksi, pitkänomaiseksi kulkutilaksi (Nykysuomen sanakirja 1975). Käytävä on pitkänomainen, jos sen pituus on vähintään kuusi kertaa korkeutta ja leveyttä suurempi (Kang 2002). Tutkimuksessa ei tarkastella suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisia, laajapohjaisia tiloja (Flat Rooms), joiden yksi dimensio (yleensä korkeus) on kahta muuta selvästi pienempi.

Akustisen kuvateorian mukaan hyvin kaukana äänilähteestä olevan vastaanottopisteen äänenpainetaso ei riipu tilan dimensioista vaan ainoastaan äänilähteen äänitehosta, äänilähteen ja vastaanottopisteen välisestä etäisyydestä sekä tilan pintojen absorptiokertoimista. Tällaisessa tapauksessa vastaanottopisteen äänenpainetason laskeminen on helppoa, etenkin jos ilman vaimennusta ei tarvitse ottaa huomioon (Kuttruff 1989, s. 54). Jos äänilähteen synnyttämä äänenpainetaso halutaan laskea lähellä äänilähdettä, vaikuttavat myös tilan dimensiot vastaanottopisteen äänenpainetasoon. Tällöin todellisen äänilähteen äärettömän kuvalähdeavaruuden vastaanottopisteeseen synnyttämän äänenpainetason laskenta johtaa perinteisen kuvateorian mukaan työlääseen ja aikaa vievään kolmoissumman laskentaan. Pitkällä käytävällä olevan äänilähteen kuvalähdeavaruus kutistuu kuvalähdetasoksi, jos käytävän kahden vastakkaisen seinän ääniheijastuksia ei tarvitse ottaa huomioon (Kuttruff 1989, s. 54). Poikkileikkaukseltaan neliön muotoisen käytävän keskipisteessä olevan äänilähteen kuvalähteet ovat symmetrisiä molempien koordinaattiakselien suhteen. Jos käytävä korkeus ja leveys eivät ole yhtä suuria, ovat kuvalähteet symmetrisiä vain toisen koordinaattiakselin suhteen.

Käytävän pinnoista tulevat ensimmäiset ääniheijastukset ovat merkittäviä äänilähteen läheisyydessä. Mitä enemmän käytävän poikkileikkauksen dimensiot eroavat toisistaan, sitä suurempi on pinnoista vastaanottopisteeseen saapuvien äänenpainetasojen erot. Jatkossa suorakaiteen muotoinen käytävä korvataan neliönmuotoisella käytävällä, jonka poikkileikkauksen pinta-ala on yhtä suuri kuin alkuperäisen käytävän. Koska käytävän tilavuus ei muutu ja vaipan ala pienenee vain vähän, on pintojen välissä heijastuvien äänisäteiden pituuksien keskiarvo lähes sama molemmissa käytävissä (Gibbs et. al. 1972). Kun suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisen käytävän poikkileikkauksen suuremman dimension suhde pienempään valitaan siten, että se on enintään 1,5, jää kyseisen käytävän ja vastaavan neliön

muotoisen käytävän ensimmäisten kuvalähteiden origoon aiheuttaman äänenpaine-tason poikkeama maksimissaan 0,35 desibeliin.

Tämän akustiseen kuvamalliteoriaan perustuvan väitöstutkimuksen päätavoitteena on kehittää käytännön akustiseen suunnitteluun laskentamenetelmä, jolla voidaan nopeasti ja edullisesti sekä riittävän luotettavasti arvioida pitkien, suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisten käytävien melukenttiä sekä akustisen verhouksen vaikutusta niihin. Geometriset äänisädemallit (Ray-Based Modelling) unohtavat äänen aaltomuodon (Zhong-Jin Jiang et al. 2008). Sekä matala- että korkeataajuisen äänen oletetaan etenevän samalla tavalla äänisäteinä, eikä esimerkiksi aaltoyhtälöteorian mukaisia seisovia aaltoja oteta huomioon.

Tutkimuksen **päähypoteesina** on, että akustisen kuvateorian pohjalta voidaan kehittää yksinkertaistettu laskenta-algoritmi, jolla on mahdollista ennustaa pitkän käytävän äänikenttää ja absorptiomateriaalin vaikutusta siihen.

Päähypoteesi jaetaan neljään alahypoteesiin seuraavasti:

- 1) Suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisen käytävän kuvalähteet voidaan laskennassa korvata neliön muotoisen käytävän symmetrisillä kuvalähteillä aiheuttamatta lopputulokseen liian suurta virhettä, jos alkuperäisen käytävän poikkileikkauksen suuremman dimension suhde pienempään on enintään 1,5. Korvaavan neliönmuotoisen käytävän poikkipinta-alan tulee olla yhtä suuri kuin alkuperäisen käytävän poikkipinta-alan.
- 2) Poikkileikkaukseltaan neliönmuotoisen käytävän kaksikulotteisen kuvalähdeavaruuden kuvalähteet on mahdollista liian suurta virhettä aiheuttamatta siirtää koordinaattiakselille diskreetiksi kuvalähdejonoksi.
- 3) Diskreetti kuvalähdejono voidaan edelleen muuntaa jatkuvaksi äänitehojakautumaksi, jolloin käytävällä olevan vastaanottopisteen äänitaso voidaan hankalan kaksoissummalaskennan sijaan tehdä integroimalla esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmalla tai numeerisen integrointiin pystyvällä taskulaskimella.

4) Integrointilausekkeen sisältävää laskentayhtälöä on edelleen mahdollista yksinkertaistaa riittävän tarkan tuloksen antavaksi likiarvoyhtälöksi, jolloin laskenta onnistuu ilman integrointia.

Tämän tutkimuksen luvussa 2 esitellään äänikenttien matemaattiseen mallintamiseen yleisesti käytettyjä teorioita: aaltoyhtälöteoria, tilastollisen huoneakustiikan teoria ja geometrisen huoneakustiikan teoria.

Luvussa 3 johdetaan hypoteesien mukaisesti **Jatkuvan Äänitehojakautuman** algoritmi **Käytävien Äänikenttien LAskentaan (JÄKÄLA)**, jolla voidaan nopeasti arvioida akustisen vaimennusmateriaalin vaikutus pitkien käytävien äänikenttiin. Uusi algoritmi perustuu käytävällä olevan todellisen äänilähteen kuvalähteiden symmetriaan. Suorakaiteen muotoisen käytävän, jonka poikkileikkauksen dimensioiden suhde on enintään puolitoista, kuvalähdetason muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi sisältää kolme muokkausvaihetta. Laskenta-algoritmissa muodostetaan aluksi suorakaiteen muotoisen käytävän todellisen äänilähteen kuvalähteet, jotka muunnetaan neliön muotoon. Näin saadun kuvalähdetason samanarvoiset kuvalähteet siirretään seuraavaksi koordinaattiakselille kuvalähdejonoiksi. Tämän jälkeen kuvalähdejono muunnetaan jatkuvaksi äänitehojakautumaksi. Lopuksi johdetaan jatkuvan äänitehojakautuman käytävän vastaanottopisteeseen synnyttämän äänitason laskemiseksi NUMO-yhtälö ja sen APPRO-likiarvoyhtälö.

Luvun 4 alussa esitetään johdettujen yhtälöiden testauksen koejärjestelyt. Tämän jälkeen tarkastellaan johdetun JÄKÄLA-algoritmin kahden NUMO- ja APPRO-laskentayhtälön käyttökelpoisuutta vertaamalla johdetuilla yhtälöillä sekä kaupallisella AKURI-ohjelmalla laskettuja kuvitteellisen ideaalikäytävän vastaanottopisteiden äänitasoja keskenään. Lisäksi neljän pitkän todellisen käytävän mittaus tuloksia verrataan algoritmin kaavoilla sekä AKURI-ohjelmalla laskettuihin äänitasoihin.

Viimeisessä luvussa 5 arvioidaan laskentamenetelmän ja sillä saatujen laskentatulosten validiteettia ja reliabiliteettia, nopeutta ja helppokäyttöisyyttä. Lisäksi tarkastellaan menetelmän kehitystarpeita ja -mahdollisuuksia sekä esitetään jatkotutkimusaiheita.

## 2 HUONEAKUSTISET TEORIAT

Suljettujen tilojen äänikenttien matemaattiseen mallintamiseen on perinteisesti käytetty joko aaltoyhtälöteoriaa, tilastollisen huoneakustiikan teoriaa tai geometrisen huoneakustiikan teoriaa (Stephenson 2010). Aaltoyhtälö, eli Helmholtz-yhtälö, jossa äänikenttä esitetään tilassa etenevien paineaaltojen summana, on tarkin menetelmä äänikenttien kuvaamiseen. Yhtälön analyttinen ratkaiseminen on kuitenkin työlästä, usein jopa mahdotonta. Käytännön akustiikassa aaltoyhtälöteoriaa voidaan hyödyntää vain matalilla taajuuksilla suorakulmaisen särmiön muotoisissa tyhjissä tiloissa, joiden pintojen absorptiokertoimet ovat yhtäläiset. Esimerkkinä tästä ovat ilmastointikanavat. (Prager et al. 2007.) Tästä syystä aaltoyhtälöteorialla ei ole suurta hyötyä käytännön huoneakustiikassa.

Akustiikan käytännön sovellutuksiin sopivat paremmin tilastollisen ja geometrisen huoneakustiikan teoriat, jotka eivät ota huomioon äänen aalto-ominaisuutta. Geometrisessä teoriassa äänienergian etenemistä ja jakautumista tilassa kuvataan havainnollisesti äänisäteiden avulla. Tilastollisessa teoriassa äänen ajatellaan olevan yksinkertaisesti suljettuun tilaan varastoitunutta äänienergiaa, jonka keskimääräistä energiatiheyttä tarkastellaan. Kun halutaan mallintaa tarkasti ihmisen koko kuuloalue taajuuksilla 20 Hz – 20 000 Hz, joudutaan käyttämään eri menetelmien kombinaatioita (Aretz 2009).

Tietokonesimulointitekniikkaa on käytetty huoneakustisessa suunnittelussa jo 1970-luvulla (Schroeder 1970). Ensimmäiset akustiseen suunnitteluun sopivat ohjelmat ilmestyivät Euroopan markkinoille 1980 (Stephenson 2010; Dance et al. 1997). Tietokoneiden laskentanopeuksien huima kasvu viime vuosikymmeninä on mahdollistanut uusien numeeristen laskenta-algoritmien käytön äänikenttien nopeaan ja tarkkaan mallintamiseen (Blanc-Benon 2007).

### 2.1 Aaltoyhtälöteoria

Teoreettisen akustiikan perustan loi englantilainen John Strutt (1842–1919) kolmiulotteisen tilan seisovien aaltojen teoriaa käsittelevällä teoksellaan ”The Theory of Sound” (Malecki 1969). Aaltoyhtälöteoriaa kehittivät 1900-luvun alkupuoliskolla muun muassa Bolt, Cremer, van den Dungen, Morse ja Rzhevkin (Malecki 1969).

Suljetun tilan äänikenttä voidaan teorian mukaan kuvata määrittelemällä jokainen tilan pinnasta heijastunut ääniaalto parametriensa avulla ja laskemalla kaikki heijastukset yhteen. Äänikentän kuvaus lähestyy asymptoottisesti tarkkaa arvoa, kun heijastusten lukumäärä lähestyy ääretöntä. Morse (1939) esitti ensimmäisenä aaltoyhtälöteoriaan perustuvan toimivan mallin äänen etenemisestä pitkissä kanavissa, jota Cremer (1953) täydensi. Morsen ja Creamerin aaltoyhtälöteoriaan perustuvalla mallilla voitiin poikkileikkaukseltaan suorakulmion muotoisten kanavien matalataajuisia äänikenttiä kuvata moodien avulla. Korkeilla taajuuksilla mallin käyttö tulee mahdottomaksi, koska moodien lukumäärä kasvaa voimakkaasti (Galitsis et al. 1976).

Aaltoyhtälöteoria perustuu Helmholtzin yhtälöön (Kuttruff 1997, s. 1101):

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (9)$$

Yhtälössä  $p$  on paineen kompleksinen amplitudi,  $k = \omega / c$  aaltoluku,  $\omega$  kulmataajuus,  $c$  äänennopeus ja  $\nabla^2$  on Laplacen operaattori.

Tilan pinnat ja kalustus vaikuttavat äänen käyttäytymiseen suljetussa äänikentässä. Pintojen vaikutus äänikenttään voidaan ottaa huomioon asettamalla aaltoyhtälölle reunaehtoja, jolloin mallintaminen on huomattavasti vaikeampaa kuin vapaassa kentässä. Jos pinnat ovat äänikenttään paikallisesti reagoivia, reunaehdot voidaan asettaa kompleksisen pintaimpedanssin  $Z$  avulla, joka on äänentaajuuden funktio (Kuttruff 1997, s. 1101):

$$\rho\omega \times p + iZ \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

jossa  $\partial p / \partial n$  on äänenpaineen gradientti pinnan normaalin suunnassa ja  $\rho$  on väliaineen tiheys. Aaltoyhtälöön perustuvia tarkkoja malleja on kehitetty vain täysin jäykille, akustisesti koville pinnoille. Jos rakenne on jäykkä (rigid), on äänikentän hiukkasnopeus rakenteen pinnan normaalin suunnassa nolla (Allen et al. 1979, s. 944). Pinnan akustinen impedanssi  $Z$  määritellään seuraavasti:

$$Z = \left( \frac{p}{v_n} \right) \quad (11)$$

jossa  $p$  on äänenpaine ja  $v_n$  hiukkasnopeuden normaalikomponentti pinnan suhteen (Vorländer et al. 2004, s. 858). Aaltoyhtälö voidaan ratkaista analyyttisesti, mikäli tutkittava tila on tyhjä, kovapintainen, suorakulmaisen särmiön muotoinen eikä energiahäviöitä oteta huomioon (Kuttruff 1979). Käytännössä täydellisiä seisovia aaltoja ei synny, koska väliaineena oleva ilma absorboi äänienergiaa. Lisäksi ääniaallon osuessa pintaan osa äänienergiasta muuttuu lämmöksi tai läpäisee pinnan. Energiahäviöiden vuoksi vallitsee aina energian nettovirta kohti pintaa, vaikkakin se saattaa olla hyvin pieni verrattuna huoneen kokonaisäänienergiaan. Käytännössä akustinen impedanssi on lähes aina kompleksinen ja äänen tulokulmasta riippuva. Karteesisessa koordinaatistossa aaltoyhtälö voidaan esittää muodossa (Kuttruff 1979, s. 50)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (12)$$

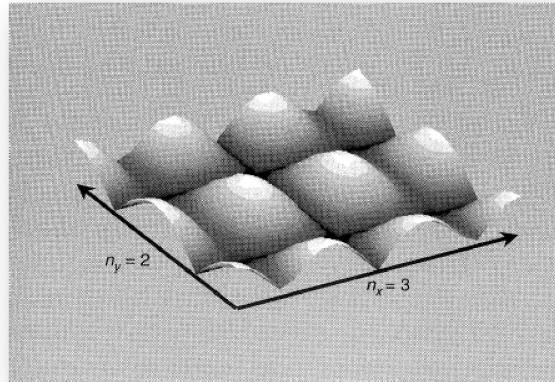
jossa  $p$  on paineamplitudi,  $k$  on aaltoluku ja  $x$ ,  $y$  sekä  $z$  tarkastelupisteen etäisyydet origosta valitussa karteesisessa koordinaatistossa. Oletuksen mukaan tilan pinnat ovat äärettömän jäykät ja sileät. Tällöin pintojen normaalien suuntaiset hiukkasnopeudet ovat nolliä. Koska voima on massan ja nopeuden tulon ensimmäinen derivaatta ajan suhteen, saadaan reunaehdoksi  $x$ -akselin suunnassa, kun  $L_x$  on tilan pituus (Toivanen 1981, s. 483):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \text{ kun } x = 0, x = L_x \quad (13)$$

Samalla tavalla saadaan reunaehdot myös  $y$ - ja  $z$ -akselien suhteen. Näillä reunaehdoilla akustisesti kovapintaisessa, suorakulmaisessa särmiössä painejakautuman ratkaisut ovat muotoa (Kang 2002, s. 11)

$$p_{l,m,n}(x, y, z) = P \cos\left(\frac{\pi l x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{\pi m y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{\pi n z}{L_z}\right) \quad (14)$$

jossa  $P$  on mielivaltainen amplitudivakio,  $L_x$ ,  $L_y$  ja  $L_z$  ovat tilan mitat, ja  $l$ ,  $m$ ,  $n$  ovat positiivisia kokonaislukuja. Kuvassa 4 on esitetty äänenpaineen hetkellinen jakautuma suorakulmaisen särmiön muotoisessa huoneessa (Kang 2002, sivu 12).



**Kuva 4.** Tangentiaalinen moodi (3,2,0) kolmiulotteisena (Kang 2002, s. 12).

Yksi tai useampi luvuista  $l$ ,  $m$ ,  $n$  voi olla myös nolla. Yhtälö esittää kolmiulotteista seisovaa tasoaaltoa, joka on epätäydellinen tässä muodossa, koska siitä puuttuu äänenpaineen aikariippuvuus (Kuttruff 1979). Yhtälössä äänenpaine  $p$  on nolla kaikissa koordinaattipisteissä, joissa jokin kosinilausekkeen arvo tulee nolllaksi.

Äänenpaineen nollakohdat muodostavat kolmenlaisia keskenään ortogonaalisia tasoja, joita kutsutaan nolla-tasoiksi (Nodal Planes). Kutakin lukujen  $l$ ,  $m$ ,  $n$  yhdistelmää vastaavaa äänikenttää sanotaan muodoksi  $(l, m, n)$ . Luvut  $l$ ,  $m$  ja  $n$  ilmoittavat niiden nolla-tasojen lukumäärät, joilla äänenpaine koordinaattiakseleita pitkin mitattuna häviää huoneen sisällä (Kang 2002, s. 11). Suorakulmisen särmiön muotoisessa tilassa seisovien aaltojen resonanssitaajuudet voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä, jossa  $c$  on äänen nopeus:

$$f_{(l,m,n)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (15)$$

Jos jokin tekijöistä  $l$ ,  $m$  tai  $n$  on nolla, etenee tasoaalto yhdensuuntaisesti kaikkien niiden pintojen kanssa, jotka ovat kohtisuorassa kyseistä akselia vastaan. Tätä värähtelymuotoa kutsutaan tangentiaaliseksi muodoksi (Tangential Mode). Tangentiaalisessa moodissa aallot ovat tangentiaalisia yhteen pintapariin nähden, mutta heijastuvat kahdesta muusta yhdensuuntaisesta pinnasta (kaksidimensionaalinen). Jos vain yksi tekijä on nolllasta eroava, etenee tasoaalto vastaavan



koordinaattiakselin suuntaisesti. Silloin puhutaan aksiaalisesta eli yksidimensionaaliseen moodista. Tämä moodimuoto aiheuttaa yhdensuuntaisten seinien välille tärykaikuilmiön. Jos kaikki tekijät  $l$ ,  $m$  ja  $n$  ovat nolasta eroavia, on kysymyksessä kolmidimensionaalinen vino moodi (Oblique Mode), jossa aallot heijastuvat kaikista kuudesta pinnasta (Ginn 1978, s. 42).

Jos tarkasteltava tila on suuri ja poikkeaa suorakulmaisen särmiön muodosta tai sen pinnat eivät ole jäykkiä (rigid), aaltoyhtälölle ei enää löydy analyttisiä ratkaisuja tai ne ovat erittäin monimutkaisia. Monimutkaisen muotoisen, kalustetun suuren tilan äänikentän tarkka analyttinen kuvaaminen aaltoyhtälömallilla on mahdoton tehtävä. Tästä syystä aaltoyhtälön ratkaisuun käytetään usein jotain numeerista menetelmää (Prager et al. 2007).

## 2.2 Tilastollisen huoneakustiikan teoria

Wallace Sabine (1868–1919) tutki viime vuosisadan alussa kokeellisesti huoneen tilavuuden, pintojen ääniabsorptiomateriaalin sekä äänen energiatihedysten välistä yhteyttä ja otti käyttöön ensimmäisenä käsitteen ”huoneen jälkikaiunta-aika” (Gertsen 2006; Galatsis et al. 1976). Jälkikaiunta-ajalla Sabine tarkoitti aikaa, joka kului huoneen äänikentän äänenpainetason vaimenemiseen 60 desibeliä alkuperäisestä, kun huoneessa toiminut äänilähde sammutetaan äkisti. Mittaustulostensa perusteella hän johti jälkikaiunta-ajan yhtälön, joka liitti yhteen huoneen jälkikaiunnan, tilavuuden ja kokonaisabsorption. Sabine oletti, että tutkittavaan tilaan syntyy diffuusi äänikenttä ja että tilan kokonaisabsorptio voidaan määrittellä keskimääräisen absorptiokertoimen avulla (Prodi 2002, s. 842; Kosten 1960; Mehta et al. 1976, s. 209; Gomperts 1965, s. 255). Edelleen hän oletti, että ääniaaltojen kulke-  
man keskimääräisen matkan pituus  $\bar{l}$  pintatörmäysten välillä saadaan yhtälöstä:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S} \quad (16)$$

jossa  $S$  tilan vaipan ala ja  $V$  tilavuus.

Sabinen kokeellisen yhtälön on myöhemmin johtanut teoreettisesti muun muassa Jaeger (Malecki 1969, s. 547). Sabinen jälkikaiuntayhtälö kuvaa hyvin suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisen huoneen akustisia ominaisuuksia, kun huo-

neessa oleva vähäinen absorptiomateriaali on jakautunut tasaisesti tilan pinnoille. Eyring (1930) johti jälkikaiunta-ajalle yhtälön, jossa jälkikaiunta-ajan arvoksi saadaan nolla huoneen pintojen ollessa täysin ääntä absorboivia. Millington (1932) tarkensi jälkikaiunta-aikayhtälöä korvaamalla keskimääräisen absorptiosuhteen kunkin pinnan absorptiosuhteella ja heijastuskerralla. Millingtonin yhtälö yliarvostaa absorptiota ja siten aliarvostaa jälkikaiunta-aikaa, eikä yhtälöä nykyisin käytetä siinä olevan ilmeisen virheen vuoksi (Zhang 2003, s. 857).

Sabinen yhtälön yksinkertaisuus ja helppokäyttöisyys houkuttelee sen soveltamista myös tiloihin, joiden muoto ja absorptiojakautuma eivät ole Sabinen yhtälön oletuksen mukaisia (Gerretsen 2006, s. 797). Kun tarkasteltava tilan poikkeaa suuresti normaalin huoneen mitoista tai absorptiomateriaali on keskitetty huoneen tietylle pinnalle, ei tilaan synny diffuusioäänikenttää. Tällöin laskettujen ja mitattujen arvojen erotus on joskus hyvin suuri. Jos esimerkiksi kuution muotoinen tila muutetaan tilaksi, jonka dimensiot suhtautuvat kuten 6:3:2 ja tilavuus ja absorptio pysyvät vakiona, pitenee tilan jälkikaiunta-aika 63 % (Gomperts 1965, s. 255).

Sabinen ja Eyringin jälkikaiunta-aikakaavoja ovat diffuusiottomaan äänikenttään sopivaksi yrittäneet muokata muun muassa Arau-Puchades (1988), Fitzroy (1959) ja Millington (1932). Jälkikaiunta-aikakaavojen perusteellista muokkausta ovat jatkaneet muun muassa Kendrick et al. (2007), Vesa et al. (2005), Nielsson (2004), Zhang (2003) ja Prodi (2002).

### **2.2.1 Diffuusi äänikenttä**

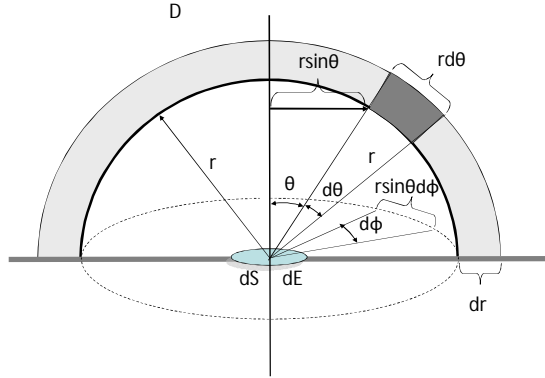
Äänikenttää, jossa äänienergia osuu kentän jokaiseen pisteeseen kaikista mahdollisista suunnista yhtä suurella todennäköisyydellä, kutsutaan diffuusiksi äänikentäksi. Teoriassa täysin diffuusi äänikenttä syntyy mielivaltaisen muotoiseen, suljettuun tilaan, jonka pinnat eivät absorboi ääntä, vaan heijastavat sen diffuusisti Lambertin heijastuslain mukaisesti (kuva 6, sivu 47). Täysin diffuusi äänikenttä on käytännössä mahdottomuus, sillä huoneissa on aina ääntä absorboivaa materiaalia. Lisäksi huoneen pinnat eivät aina heijasta ääntä täysin diffuusisti, vaan esimerkiksi lattiasta ääni heijastuu yksinomaan peiliheijastuksena Snellin lain mukaisesti. Jos akustisesti kovapintaisissa huoneissa on runsaasti ääntä heijastavaa materiaalia,

ääni joutuu heijastumaan lukuisia kertoja eri pinnoista ja osa peiliheijastuksista muuttuu diffuuseiksi heijastuksiksi. Tällaiseen huoneeseen äänikenttää voidaan pitää käytännössä diffuusina.

Tilastollisen huoneakustiikan teoria olettaa huoneeseen syntyvän diffuusin äänikentän (Hodgson 1988; Hurst 1980). Kun huoneessa käynnistetään jatkuvatoiminen äänilähde, virtaa tilaan jatkuvasti äänienergiaa. Äänilähteestä pois päin etenevän äänen ajatellaan käyttäytyvän kuten valkoisen valon. Ääntä ei kuitenkaan kuvata äänisäteillä kuten geometrisessa akustiikassa vaan äänipartikkeilla, joiden tarkasteltuun tilaan synnyttämän äänen keskimääräinen energiatiheuden suuruus riippuu tilan äänilähteistä ja akustisista ominaisuuksista. Äänipartikkelit etenevät suoraviivaisesti vakionopeudella ja heijastuvat takaisin tilan pinnoista. Tilastollisessa teoriassa huonetta pidetään suurena äänienergiavarastona, jonka rajapinnoissa on energiavuotoja (absorptiota). Diffuusin äänikentän energiatiheys ja jälkikäyntä ovat tilastollisen huoneakustiikan peruskäsitteitä, jotka liittyvät kiinteästi yhteen. Tilastollinen teoria ei ota huomioon äänen aaltomuotoa, interferenssiä eikä diffraktio-ilmiötä, jotka esiintyvät heijastavien pintojen välittömässä läheisyydessä. Teoria olettaa, etteivät äänilähteestä suoraan tulevat ja pinnoista heijastuneet äänisignaalit ole keskenään koherenteja. Toisin sanoen ne eivät voi interferoitua. Kaavoja johdettaessa ei ole myöskään otettu huomioon äänen tulokulman vaikutusta pinnassa tapahtuvaan absorptioon (Zhang 2003).

### **2.2.2 Tilan pintaan absorboitunut äänienergia**

Oletetaan, että jatkuvatoiminen äänilähde synnyttää huoneeseen diffuusin äänikentän, jossa äänienergiatiheys  $D$  on vakio huoneen joka kohdassa. Tarkastellaan huoneen lattialla olevaa pinta-alkiota  $dS$  ja siitä  $r$  etäisyydellä olevaa kolmiulotteista kuorialkiota, kuva 5.



**Kuva 5.** Pintaan  $dS$  osunut äänienergia (Ford 1970, s. 67).

Kuvan 5 merkintöjen mukaan kuorialkion tilavuus on:

$$dV = dr(rd\theta)(r \sin \theta d\phi) \quad (17)$$

Koska suljetun tilan energiatiheys  $D$  oletettiin vakioksi, on kuorialkion energia  $DdV$ . Äänienergia etenee diffuusissa kentässä tasaisesti kaikkiin suuntiin, jolloin kuorialkiosta lähtee energiaa  $DdV/4\pi$  avaruusyksikkökulmaa kohti. Pinta-alkioon  $dS$  osuva äänienergia on tällöin:

$$DdVdS \frac{\cos \theta}{4\pi r^2} \quad (18)$$

Äänen intensiteetti on kokonaisääniteho pinta-alayksikköä kohden. Oletetaan äänen etenevän nopeudella  $c$ . Aikayksikössä  $t$  pinta-alalle saapuvat tasoallot etäisyydeltä  $r = ct$ , kun  $t$  kasvaa nollasta ykköseen. Pinta-alaelementille  $dS$  saapuu aikayksikössä äänienergia:

$$dE = Ddr(rd\theta)(r \sin \theta d\phi)dS \frac{\cos \theta}{4\pi r^2} \quad (19)$$

Lasketaan pinta-alayksikköön saapunut intensiteetti aikayksikössä  $t$ .

$$I = D \int_{r=0}^{ct} \left\{ \frac{r^2}{4\pi r^2} \right\} dr \int_{\phi=0}^{2\pi} d\phi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta d\theta \frac{dS}{dS} \quad (20)$$

jolloin saadaan:

$$I = D \left( \frac{c}{4\pi} \right) (2\pi) \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) d\theta = \frac{Dc}{2} \left( \frac{1}{2} \right) = \frac{Dc}{4} \quad (21)$$

Tilan pintaan osunut intensiteetti on siis neljäsosa tasoallon vapaassa kentässä pintaan osuneesta intensiteetistä.

### 2.2.3 Kaikukentän energiatiheys

Tarkastellaan tilaa, johon jatkuvatoiminen äänilähde synnyttää diffuusin äänikentän. Täysin diffuusissa äänikentässä tilan jokaiseen pintaan saapuu äänienergiaa kaikista puoliavaruuden suunnista yhtä suurella todennäköisyydellä. Olkoon pintaan osuvan intensiteetin suuruus  $I$ . Oletetaan, että tila on jaettu osa-alueisiin  $S_i$ , joiden absorptiokertoimet ovat  $\alpha_i$ . Jokaisen tilan osa-alueen absorptioala on:

$$A_i = S_i \alpha_i \quad (22)$$

Tilan kokonaisabsorptio eli ekvivalenttinen absorptiopinta-ala on:

$$A = \sum S_i \alpha_i \quad (23)$$

Kaikukentän energiatihedyn muutos ajan suhteen on tällöin:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{V} [W(t) - AI], \quad (24)$$

jossa  $V$  on tilavuus,  $W(t)$  ääniteho,  $A$  kokonaisabsorptio ja  $I$  on pintaan osunut intensiteetti. Kun pintaan osunut intensiteetti lausutaan energiatihedyn avulla, yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\frac{dD}{dt} + \frac{Ac}{4V} D = \frac{W(t)}{V} \quad (25)$$

Yhtälön ratkaisu on muotoa:

$$D = \frac{1}{V} e^{-(Ac/4V)t} \int_{-\infty}^t e^{(Ac/4V)\tau} W(\tau) d\tau \quad (26)$$

Koska  $W(\tau)$  on vakio koko integrointijakson ajan, saadaan ratkaisuksi (Ford 1970, s. 116):

$$D = \frac{4W}{cA} \quad (27)$$

Tämä on tilastollisen huoneakustiikan perusyhtälö, jonka avulla voidaan johtaa diffuusin äänikentän äänenpainetaso tai määrittää tilassa toimivan äänilähteen äänitehotaso, kaava 28.

$$L_p = L_w + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi a^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{S\bar{\alpha} + 4mV} \right) \quad (28)$$

$L_p$	äänenpainetaso dB
$L_w$	äänitehotaso dB
$Q$	äänilähteen suuntatekijä
$a$	vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä m
$S$	tilan vaipan ala m <sup>2</sup>
$V$	tilavuus m <sup>3</sup>
$\bar{\alpha}$	tilan keskimääräinen absorptiokerroin
$m$	ilman vaimennuskerroin m <sup>-1</sup>

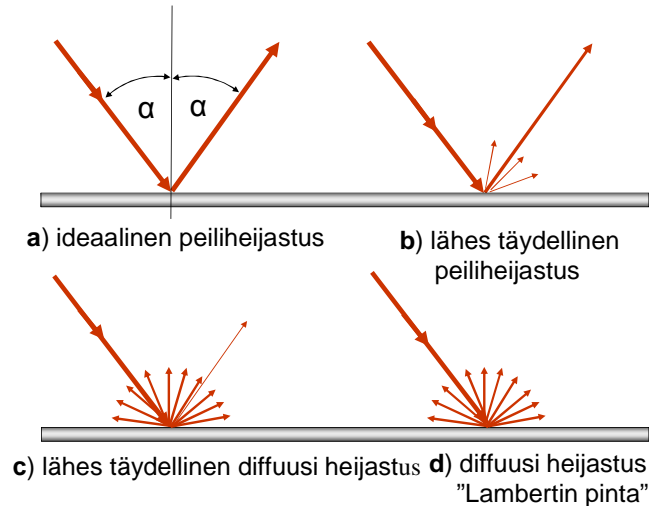
## 2.3 Geometrisen huoneakustiikan teoria

### 2.3.1 Geometrisen huoneakustiikan perusolettamukset

Geometrinen sädeteoria on kolmesta tarkastellusta teoriasta vanhin. Jo Aristoteles havaitsi äänen heijastuvan kovasta pinnasta kuin valon: äänen tulokulma on sama kuin sen heijastuskulma (Kylliäinen 2009). Geometrisessa huoneakustiikassa äänisäteellä ymmärretään pistemäisestä äänilähteestä peräisin olevan palloaallon pientä osaa, jonka intensiteetti on vastaavan palloaallon intensiteetin suuruinen. Yksinkertaistus on oikeutettu, jos sen tilan mitat, jossa ääni etenee, ovat suuria tarkasteltavan äänen aallonpituuteen verrattuna (Toivanen 1981, s. 499; Kuttruff 1979).

Yleensä oletetaan, että heijastavat pinnat ovat täysin jäykät ja tasaiset, jolloin äänisäde heijastuu Snellin heijastuslakia noudattaen. Jos heijastava pinta on epätasainen ja epätasaisuus on tarkasteltavan äänen aallonpituuden suuruusluokkaa, ei peiliheijastusta tapahdu vaan äänienergia siroaa eri suuntiin. Pinnan epätasaisuuden mukaan puhutaan diffuusista tai osittain diffuusista heijastuksesta, kuva 6.

Heijastuksen sanotaan olevan täysin diffuusi, jos siroavan äänienergian suuntajakautuma ei ole riippuvainen pintaan osuneen äänisäteen tulosuunnasta.



**Kuva 6.** Äänisäteiden heijastuminen erilaisista pinnoista.

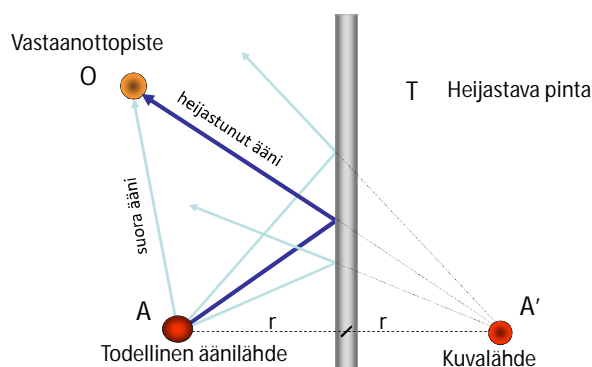
Geometrisessa huoneakustiikassa tehdään yleensä seuraavat ääntä ja sen etenemistä koskevat yksinkertaistukset (Galaitsis et al. 1976, s. 849):

- Äänen aalto-ominaisuus unohdetaan.
- Äänilähteet oletetaan pistemäisiksi ja vakioitehoisiksi.
- Pintoja pidetään akustisesti tasaisina ja jäykkinä.
- Äänisäteiden heijastukset pinnoista ovat peiliheijastuksia ja noudattavat Snellin heijastuslakia.
- Sirontaa ei oteta huomioon.
- Pintojen akustista vastetta kuvaa äänen taajuudesta riippuva absorptiokerroin.
- Kalusteisiin osuneen äänen oletetaan pelkästään siroavan.
- Äänikentän komponentit eivät ole koherenteja toisiinsa nähden: interferenssi- ilmiötä ei oteta huomioon äänikentän komponentteja yhdistettäessä, vaan intensiteetit lasketaan yhteen ottamatta huomioon vaiheeroja.
- Ilmaa pidetään homogeenisena ideaalikaasuna.
- Väliaineiden aiheuttamaa säteen taittumista tai taipumista ei oteta huomioon.

Usein tehdään myös seuraavat oletukset: äänilähteellä ei ole suunta vaikutusta tai se menetetään ensimmäisen heijastuksen jälkeen. Lisäksi pintojen absorptioker- toimien ajatellaan olevan äänen tulokulmasta riippumattomia. Äänisäteen hidas etenemisnopeus on kuitenkin otettava impulssivasteessa huomioon, koska se vai- kuttaa moniin akustisiin ilmiöihin kuten jälkikaiunta-aikaan ja kaikuun. Tehtyjen yksinkertaistuksien vuoksi sädeakustiikalla voidaan kuvata vain todellisen ääni- kentän keski- ja korkeataajuisen äänikentän ominaisuuksia. Käytännön meluntor- junnassa ja melun kiusallisuuden arvioinnissa juuri tällä osalla on merkitystä kun tutkitaan jatkuvatoimisten äänilähteiden synnyttämiä A-äänitasoja sekä työn- tekijöiden melualtistusta.

### 2.3.2 Äänisäteen peiliheijastus

Kun äänisäde osuu jäykkään sileään tasopintaan, sen oletetaan heijastuvan kuin va- lonsäteen peilistä (Specular Reflection) Snellin heijastuslain mukaisesti (Kuttruff 1979). Säteen heijastuskulma on sama kuin sen tulokulma, ja heijastus tapahtuu äänisäteen ja pinnan normaalin määrittelemässä tasossa. Heijastuslaki on voimassa myös kaarevilla pinnoilla. Kun äänisäde osuu kaarevaan pintaan, se heijastuu osu- mispisteen tangenttitasossa. Kuvassa 7 on esitetty todellinen äänilähde ja sen ensimmäinen kuvälähde pinnan suhteen.



**Kuva 7.** Äänisäteen peiliheijastus (Kuttruff 1979, s. 79).



Tarkastellaan kuvassa 7 olevaa todellista äänilähdettä  $A$ , joka sijaitsee etäisyydellä  $r$ , pinnasta  $T$ . Ääni saapuu lähteestä  $A$  vastaanottopisteeseen  $O$  ensiksi suorinta tietä  $AO$  ja sen jälkeen heijastuneena pinnasta  $T$ . Heijastuneen äänisäteen kuvalähde  $A'$  löydetään erottamalla matka  $2r$  pisteen  $A$  kautta kulkevalta tason normaalilta. Äänisäde heijastuu tasosta vastaanottopisteeseen siitä kohdasta, jossa yhdysjana  $A'O$  leikkaa pinnan. Kun kuvalähde  $A'$  on näin löydetty, voidaan heijastava pinta poistaa. Tällöin oletetaan, että kuvalähteen  $A'$  ääniteho ja suuntaominaisuudet ovat samat alkuperäisen äänilähteen  $A$  kanssa (Savioja 1999; Kuttruff 1997).

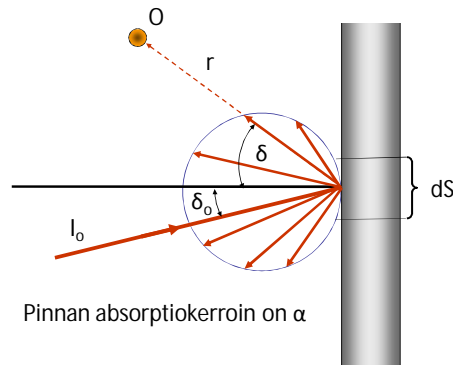
Todellisuudessa vain osa pintaan tulleesta äänienergiasta heijastuu, osa absorboituu pintarakenteeseen. Pinnan ääntä absorboivaa ominaisuutta kuvataan absorptiokertoimella  $\alpha$ , joka on pinnasta heijastumattoman äänen suhde pintaan tulleen ääneen. Kun pinnan  $T$  absorptiokerroin on  $\alpha$ , on kuvalähteen  $A'$  ääniteho  $W(1-\alpha)$ . Absorptiokertoimen arvo riippuu muun muassa vaimentavan materiaalin rakenteesta sekä äänen tulokulmasta ja taajuudesta. Arvo vaihtelee teoreettisten ääriarvojen nollan ja ykkösen välillä. Meluntorjunnassa absorptio- ja heijastusilmiötä yksinkertaistetaan muun muassa unohtamalla tulokulman vaikutus.

### 2.3.3 Äänisäteiden diffuusi heijastus

Erikoistapauksessa kaikki pintaan osunut äänienergia heijastuu diffuusisti, jolloin peiliheijastusta ei synny, kuva 6d. Tällöin sovelletaan usein Lambertin kosinilakia, jonka mukaan sironnut ääni-intensiteetti on suhteessa sironavan säteen kulman kosiiniin.

Tarkastellaan pinta-alkiota  $dS$ , johon osuu äänisäde kulmassa  $\delta_o$  pinnan normaalin suhteen, kuva 8. Jos pintaan kulmassa  $\delta_o$  tulevan äänisäteiden intensiteetti on  $I_o$ , on pinnan normaalin suuntainen intensiteetti  $B_o$ , silloin:

$$B_o = I_o \cos \delta_o \quad (29)$$



**Kuva 8.** Diffuusi heijastus Lambertin lain mukaan (Kuttruff 1979, s. 81).

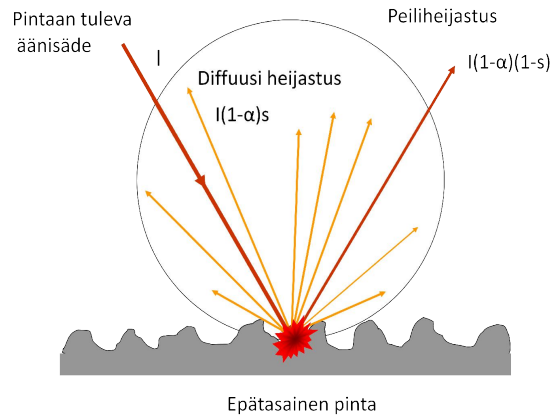
Kulmassa  $\delta$  pinnasta sironneen intensiteetin arvo pisteessä  $O$  etäisyydellä  $r$  pinta-alkiosta  $dS$  on tällöin (Kuttruff 1997, s. 1108):

$$dI(r, \delta) = B_o(1 - \alpha)dS \frac{\cos \delta}{\pi \times r^2} \quad (30)$$

jossa  $B_o$  on aikayksikössä pinta-alayksikköön osunut äänienergia,  $\alpha$  on pinnan absorptiokerroin,  $\delta$  on sirontakulma ja  $r$  on pisteen  $O$  etäisyys pinta-alkiosta.

Täysin diffuusissa heijastuksessa pintaan osunut äänisäde pirstoutuu äärettömän moneen sekundääriseen äänisäteeseen. Yhtälön 30 mukaan jokaista pinta-alkiota on pidettävä sekundäärisenä äänilähteenä, jolloin etäisyys  $r$  tarkastelupisteeseen on laskettava jokaisesta heijastavan pinnan alkiosta erikseen. Tämän vuoksi ei akustista kuvateoriaa eikä säteenseurantateoriaa voi suoraan soveltaa diffuusiin heijastukseen.

Äänen heijastuminen käytännön rakenteista on monimutkainen ilmiö (Lokki 2002). Huoneiden pinnoissa on usein epätasaisuuksia, jolloin pintaan tuleva äänisäde ei heijastu kokonaan peiliheijastuksena, vaan ainakin osa äänestä hajoaa diffuusisti eri suuntiin, kuva 9.



**Kuva 9.** Epätasaisesta pinnasta tapahtuva diffuusi- ja peiliheijastus (Cox et al. 2006, s. 1).

Ääntä diffuusisti heijastavan pinnan sirontakerroin (Scattering Coefficient) määritellään ei-peiliheijastuneen äänitehon suhteena pinnasta heijastuneeseen kokonaisäänitehoon (Embrechts et al. 2001).

Kuvassa 9 pinnasta heijastuneet äänienergiat normalisoituna jäykkään referenssipintaan ovat:

$$E_{spec} = (1 - \alpha)(1 - s) \equiv (1 - \alpha_{spec}) \quad (31)$$

$$E_{total} = (1 - \alpha) \quad (32)$$

jossa  $s$  on pinnan sirontakerroin,  $\alpha$  on absorptiokerroin,  $E_{spec}$  on peiliheijastunut äänienergia ja  $E_{total}$  on heijastunut kokonaisäänenergia. Kerroin  $\alpha_{spec}$  on peiliheijastuksen absorptiokerroin. Yhtälöistä 31 ja 32 saadaan pinnan sirontakerroin:

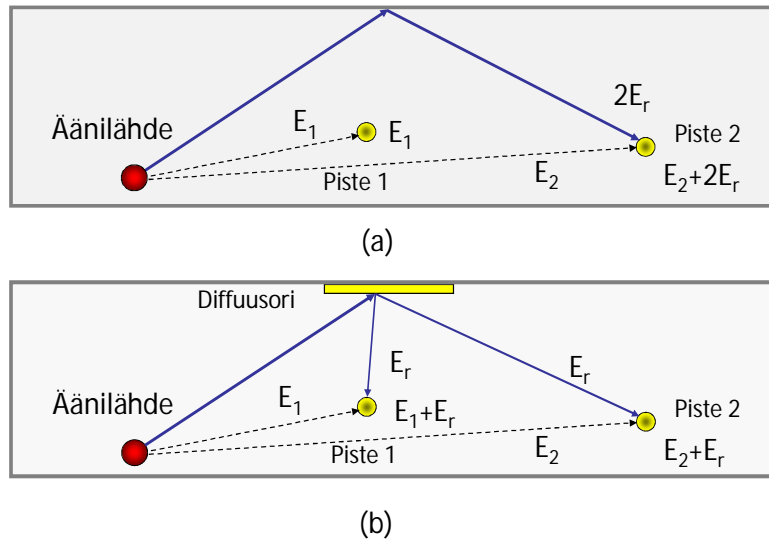
$$s = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} = \frac{\alpha_{spec} - \alpha}{1 - \alpha} \quad (33)$$

Peiliheijastuksen absorptiokerroin  $\alpha_{spec}$  on sama kuin pinnan absorptiokerroin  $\alpha$ , jos sirontakerroin  $s$  on nolla (Redondo et al. 2009, s. 1041; Cox et al. 2006, s. 4)

Suljettujen tilojen äänikenttien laskentamallien tarkkuuden parantamiseksi keskeinen tutkimuskohde on selvittää, kuinka pintaan tuleva äänisäde heijastuu huoneeseen. Huoneen pinnoista tapahtuvalle äänen diffuusille heijastukselle on kehitelty

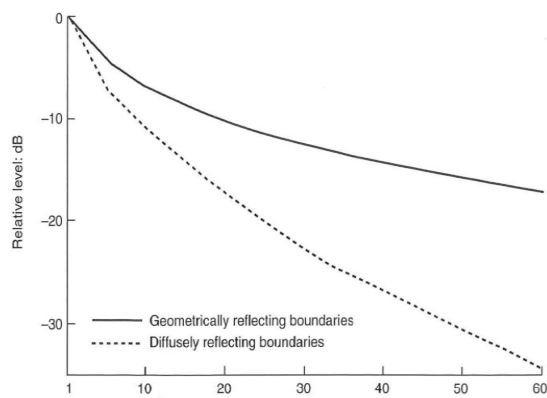
viime vuosina erilaisia tunnuslukuja (Young-Ji Choi et al. 2008, s. 769; Redondo et al. 2009, s. 1040). Kertoimet on tarkoitettu geometrinen akustiikkaohjelmien suunnittelijoille, ääntä hajottavien diffuusoreiden valmistajille ja akustisille suunnittelijoille (Cox et al. 2006). Valitettavasti yhtä idealistista kerrointa, joka tyydyttäisi kaikkien käyttäjäryhmien tarpeet, ei ole pystytty kehittämään. Nykyisin kirjallisuudesta saatavilla diffuusio- tai sirontakertoimilla on jokaisella omat puutteensa käytännön sovelluksissa. Kehitystyön vaikeutta kuvaa se, että tällä hetkellä ollaan standardisoimassa kahta erilaista kertoimen määritelmää. Tämä saattaa aiheuttaa tyytymättömyyttä suunnittelijoiden keskuudessa. On kuitenkin muistettava, että huoneakustiikassa on käytetty jo sata vuotta materiaalin absorptiokertoimia, joiden määrittämiseksi on olemassa kaksi menetelmää: impedanssi putkimenetelmä ja kaikukammion menetelmä. Kummallakin menetelmällä on hyvät ja huonot puolensa, ja niitä käytetään eri tarkoituksiin. Samalla tavalla diffuusin heijastuksen ominaisuudet voidaan määritellä joko vapaassa tai diffuusissa äänikentässä.

Diffuusin pinnan heijastuksessa heijastuneen äänen keskimääräinen matka äänilähteestä vastaanottopisteeseen on pitempi kuin geometrinen pinnan heijastuksessa, joten äänienergiaa absorboituu enemmän väliaineeseen. Lisäksi diffuusissa heijastuksessa äänellä on suurempi mahdollisuus törmätä absorboiviin pintoihin kuin geometrinen heijastuksen tapauksessa. Diffusorit voivat myös lisätä suhteellista vaimennusta pitkin käytävää muuttamalla äänen jakautumista käytävällä. Kuvassa 10 on tästä esimerkki. Asian yksinkertaistamiseksi oletetaan, että diffusorista heijastunut äänienergia on jakautunut tasaisesti vastaanottopisteisiin 1 ja 2. Diffusorin tapauksessa äänienergian alentuminen vastaanottopisteiden välillä on  $2E_r$  pienempi kuin geometrinen heijastuksen tapauksessa. Vaikka diffusorin vaikutuksesta molempien vastaanottopisteiden äänienergia lisääntyy yhtä paljon ( $E_r$ ), kohoa äänenpainetaso vastaanottopisteessä 1 vähemmän kuin vastaanottopisteessä 2, koska  $E_1 > E_2$ . Diffuusissa heijastuksessa vastaanottopisteen 1 äänenpainetaso saattaa olla korkeampi kuin geometrinen heijastuksen ollessa kyseessä. Äänenpainetason kasvun suuruuteen vaikuttavat väliaineen ja pintojen absorptio-ominaisuudet.



**Kuva 10.** Diffusorin vaikutus äänen etenemiseen. Geometrisesti heijastava pinta (a), diffusisesti heijastava pinta (b) (Kang 2002, s. 27).

Kuvassa 11 on vertailtu äänen vaimenemista geometrisesti ääntä heijastavalla käytävällä sekä ääntä diffusisesti heijastavalla käytävällä. Käytävän päätyheijastukset on molemmissa tapauksissa eliminoitu. Käytävän pituus on 60 metriä, leveys on 6 metriä ja korkeus 4 metriä. Pintojen keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,2$ .



**Kuva 11.** Äänenpainetason suhteellinen alentuma geometrisesti ja diffusisesti ääntä heijastavalla käytävällä (Kang 2002, s. 94).

Edellä esitetyt esimerkit osoittavat eron diffuusin äänikentän sekä pitkiin tiloihin syntyvän äänikentän äänienergian jakautuman välillä. Diffuusi äänikenttä on vakio kaiuntasäteen ulkopuolella, kun taas pitkissä tiloissa äänikenttä alenee jatkuvasti, kun matka äänilähteestä kasvaa. Käytävissä, joiden pinnat heijastavat ääntä diffuusisti, on vastaanottopisteeseen tulevien äänisäteiden jakautuma tasaisempi kuin geometrisen heijastuksen tapauksessa. Tämän vuoksi on virheellisesti oletettu, että diffuusisti heijastavissa pitkissä tiloissa klassisen huoneakustiikan kaava toimisi paremmin kuin geometrisesti heijastavissa tiloissa (Kang 2002).

### 3 UUDEN JÄKÄLA-LASKENTA-ALGORITMIN JOHTO

#### 3.1 Tutkimusasettelu

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan pitkiä, poikkileikkaukseltaan suorakaiteen ( $h \times l$ ) muotoisia käytäviä, joiden päätyseinät eivät heijasta tai heijastavat vain heikosti ääntä. Käytävien poikkileikkausten suuremman dimension suhteen pienempään oletetaan olevan korkeintaan 1,5. Tarkasteltavien teoreettisten käytävien tasaisista ja sileistä katto-, lattia- ja sivuseinäpinnoista äänen oletetaan heijastuvan Snellin heijastuslain mukaan peiliheijastuksena. Käytävien absorptiokertoimien arvojen oletetaan riippuvan tarkasteltavan äänen taajuudesta mutta ei äänisäteen tulokulmasta absorptiomateriaaliin. Akustisen peilikuvateorian mukaan tällaisella käytävällä olevan todellisen äänilähteen kuvalähdeavaruus voidaan korvata kuvalähde-  
tasolla.

Aivan äänilähteen välittömässä läheisyydessä hallitsee äänilähteestä suoraan tullut ääni, johon absorptiomateriaalilla ei ole vaikutusta. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan käytävien äänenpainetasoja vastaanottopisteissä, jotka ovat lähimmillään etäisyydellä  $2H_o$  ja kauemmillaan etäisyydellä  $40H_o$  äänilähteestä.  $H_o$  on tarkasteltavan alkuperäisen käytävän poikkileikkauksen ( $h \times l$ ) neliön muotoon redusoidun käytävän sivumitta ( $H_o = \sqrt{h \times l}$ ).

Työssä johdetun algoritmin tarkkuutta testataan vertaamalla erilaisten teoreettisten ja todellisten käytävien algoritmilla laskettuja äänenpainetasoja kaupallisen AKURI-ohjelman antamiin arvoihin sekä todellisiin mittaustuloksiin.

#### 3.2 Teoreettisten ja todellisten käytävien kuvaukset

##### 3.2.1 Teoreettisten käytävien koejärjestelyt

Tarkasteltavan teoreettisen käytävän poikkileikkauksen mitat ovat  $6 \times 9$  metriä ja pituus 300 metriä. Ideaalikäytävän tapauksessa absorptiomateriaalin oletetaan jakautuvan tasaisesti kaikille ääntä heijastaville pinnoille. Teoreettisen käytävän äänenpainetasot lasketaan myös tapauksissa, joissa absorptiomateriaali on jakautunut käytävälle hyvin epätasaisesti. Lisäksi tutkitaan äänilähteen sijainnin vaikutusta käytävän äänenpainetasoihin.

Käytävien teoreettisessa laskennassa jatkuvatoiminen äänilähde ja vastaanottopiste sijoitetaan käytävän poikkileikkauksen keskipisteen kautta kulkevalle käytävän pituusakselin suuntaiselle suoralle. Äänilähteen äänitehotaso 1 kHz:n taajuudella on 100 dB. Käytävissä, joissa absorptiomateriaali on jakautunut epätasaisesti, äänilähde sijoitetaan myös käytävän keskilinjalle, 1,5 metrin korkeudelle lattiasta. Käytävien äänenpainetasot lasketaan viiden metrin välein etäisyydellä 15 - 100 metriä ja viidenkymmenen metrin välein etäisyydellä 100 - 300 metriä todellisesta äänilähteestä. Laskennassa ilman vaimennustekijänä käytetään arvoa  $m = 0,001$ . Tämä vaimennusarvo vastaa ilman vaimennusta 1 kHz:n oktaavikaistalla, kun ilman lämpötila on + 20 C° ja suhteellinen kosteus 40 % (Kuttruff 1979, s. 129).

### 3.2.2 Todellisten käytävien koejärjestelyt

Jatkuvatoimisen äänilähteen synnyttämän äänen etenemistä mitataan kolmella käytävällä, joiden mitat ovat 2,4 x 2,3 x 100 metriä, 2,4 x 3,2 x 30 metriä sekä 2,4 x 4,3 x 50 metriä. Todellisten käytävien äänitasomittauksissa jatkuvatoiminen äänilähde (Sound Source HP 1001, Sound Power Source Type 4205, Brüel & Kjær) asetetaan jalustalle käytävän keskilinjalle, 1,5 metrin korkeudelle lattiasta. Äänilähteen äänitehotaso ( $L_w$ ) on määritelty ISO-standardin 3743 mukaan. Äänilähteen synnyttämät ekvivalenttiset äänenpainetasot ( $L_{eq,30s}$ ) mitataan tarkkuusäänitasomittarilla oktaavikaistoittain 125 - 4000 Hz keskitaajuuksilla (CESVA SC 310 Sound Level Meter Spectrum Analyser) 2,5 metrin välein pitkin käytävän keskilinjaa. Mittauskorkeus on noin 1,5 metriä ja mittausaika jokaisessa vastaanottopisteessä 30 sekuntia. Äänitasomittari kalibroidaan ennen ja jälkeen mitausten<sup>1</sup>.

Vaikka vastaanottopisteiden äänenpainetasot mitataan ja tallennetaan oktaavikaistoittain, käytävämittausten ja niiden mallinluslaskelmat tehdään A-painotettuna äänitasona, koska rakennustyömailla käytettävissä olevat äänitasomittarit mittaavat yleensä vain A-äänitasoa.

---

<sup>1</sup> kalibraattori: Norsonic Sound Calibrator type 1251, IEC 60942–2003 Class 1, sarjanumero: 30935, kalibroitu: 5.11.2012, varustettu Norsonic Adapter type 1443 adapterilla



Käytetyn äänilähteen A-painotettu äänitehotaso ( $L_{WA}$ ) on 90 desibeliä. Käytävien vastaanottopisteiden A-äänitasojen laskentaan tarvittava keskimääräinen absorptiokerroin ( $\bar{\alpha}$ ) saadaan rakennusmateriaalin valmistajien ja akustisten käsikirjojen antamista materiaalien 500, 1000 ja 2000 Hz:n oktaavikaistojen keskiarvoista, joita painotetaan käytävärakenteiden pinta-alojen suhteen. Käytävien pintamateriaalien absorptiokertoimet vaihtelevat akustisesti erittäin kovasta ( $\alpha=0,01$ ) hyvin pehmeään ( $\alpha=0,9$ ). Käytävien lasketut keskimääräiset absorptiokertoimet ( $\bar{\alpha}$ ) ovat välillä  $0,1 - 0,26$ . Rakenteiden epätasaisuuksien (palkit, pilarit, syvennykset) ja ilman yhdistetyn vaimennuskertoimen arvioidaan olevan välillä  $m= 0,01 - 0,02$ .

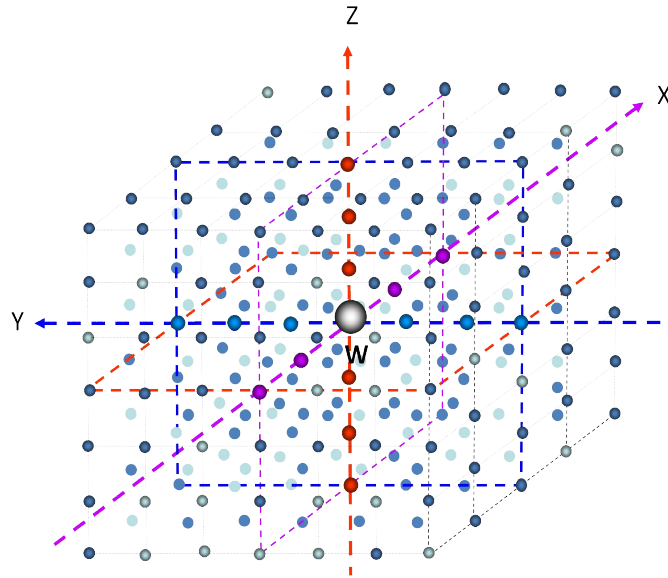
### 3.3 Todellisen äänilähteen kuvalähteet

Suorakulmaisen särmiön muotoisessa tilassa olevan äänilähteen ääniheijastukset katto-, lattia- ja seinäpinnoista voidaan akustisessa peilikuvateoriassa korvata todellisen äänilähteen ympärillä sijaitsevilla kuvalähteillä, kuva 12. Seuraavassa on esitetty algoritmi äänilähteen kolmiulotteisen kuvalähdeavaruuden luomiseksi (Kuronen 1998). Jos tilan kaksi vastakkaista seinää eivät heijasta ääntä tai niistä tulevat heijastukset ovat merkityksettömiä, kuten on tilanne pitkissä käytävissä, pelkistyy kuva-avaruus kaksiulotteiseksi kuvalähdetasoksi, kuva 14.

Suorakulmaisen särmiön muotoisen tilan ympärille, jonka kaikki pinnat heijastavat ääntä, muodostuu akustisen kuvateorian mukaan tilassa olevan todellisen äänilähteen kolmiulotteinen, ääretön kuva-avaruus, tai "kuvapilvi", kuten Eyring (1930) sitä nimitti. Samanarvoisten kuvalähteiden kokonaislukumäärä  $N$ , kun kaikki tilan pinnat heijastavat ääntä, voidaan laskea yhtälöstä:

$$N = (2n - 1)^3 - 1 \quad (34)$$

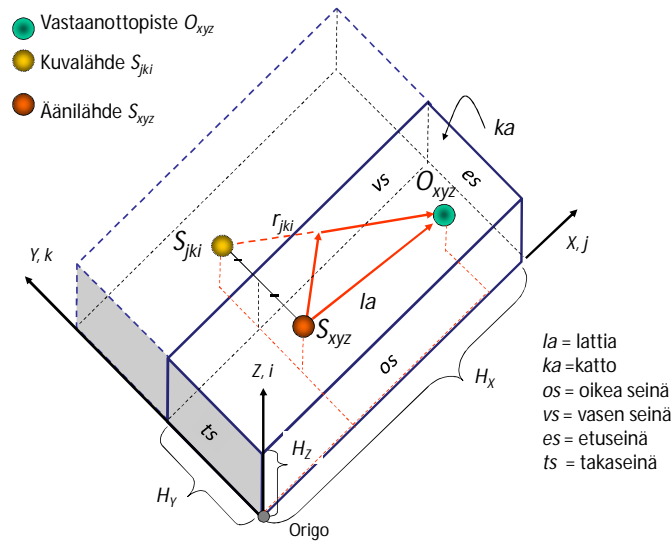
jossa  $n$  on tarkastellun kuvalähteen järjestysluku pinnan suhteen (Lemire et al. 1995; Ohta et al. 1992).



**Kuva 12.** Todellisen äänilähteen kuvälähteitä avaruudessa.

Kuvassa 12 on esitetty osa kuution muotoisen tilan keskipisteessä sijaitsevan todellisen äänilähteen (harmaa ympyrä) kuvälähteistä. Punaisella  $z$ -akselilla ovat katon ja lattian väliset heijastukset. Sinisellä  $y$ -akselilla sijaitsevat kuution vasemman ja oikean seinän väliset heijastukset sekä violetilla  $x$ -akselilla etu- ja takaseinän väliset heijastukset. Vihreänharmaat ympyrät ovat näiden kolmen pääheijastussuunnan heijastuskombinaatioita tarkastellun kuvahilan pintatasoilla ja vaaleat ympyrät pintatasojen sisäpuolella olevia kuvälähteitä.

Tarkastellaan suorakulmaisen särmiön muotoista tilaa, jonka pituus on  $H_x$ , leveys  $H_y$  ja korkeus  $H_z$ . Kuvassa 13 on esitetty todellisen äänilähteen ensimmäinen kuvälähde tilan vasemman seinän suhteen. Jatkuvatoiminen äänilähde  $S$ , jonka ääniteho on  $W$  wattia, on asetettu tilan pisteeseen  $S_{xyz}$ . Äänilähteen synnyttämän äänen intensiteetin vastaanottopiste  $O$  sijaitsee pisteessä  $O_{xyz}$ . Tilan pintojen absorptiokerroimia on merkitty alfalla ( $\alpha$ ), heijastuskertoimia beetalla  $\beta = (1 - \alpha)$  ja  $n$  on äänisäteiden heijastusten lukumäärä tarkastellusta pinnasta. Kertoimen alaindeksi osoittaa, mistä pinnasta kulloinkin on kyse.



**Kuva 13.** Suorakulmaisen särmiön muotoinen halli ( $H_x, H_y, H_z$ ).

Merkitään yhdensuuntaisten pintojen välisiä kokonaisheijastusten lukumäärää akselien  $z$ -,  $x$ -,  $y$ -suunnissa kirjaimilla  $i$  (katto - lattia),  $j$  (etuseinä - takaseinä),  $k$  (oikeaseinä - vasen seinä). Koordinaattiakseleiden suuntaisten kuvalähteiden järjestysnumeroiden ja pareittain yhdensuuntaisten tasojen välillä vallitsee seuraava yhteys:

$$i = |n_{ka}| + |n_{la}|, \quad j = |n_{es}| + |n_{ts}|, \quad k = |n_{os}| + |n_{vs}| \quad (35)$$

jossa  $n_{ka}, n_{la}, n_{es}, n_{ts}, n_{os}, n_{vs}$  ilmaisevat äänisäteiden heijastuskertojen lukumäärän kyseisestä pinnasta. Kun  $i, j$  ja  $k$  ovat parillisia, niin:

$$n_{ka} = n_{la} = \frac{i}{2}, \quad n_{es} = n_{ts} = \frac{j}{2}, \quad n_{os} = n_{vs} = \frac{k}{2} \quad (36)$$

Kun  $i, j$  ja  $k$  ovat parittomia, niin:

$$n_{ka} = \frac{(i+1)}{2}, \quad n_{la} = \frac{(i-1)}{2}, \quad n_{es} = \frac{(j+1)}{2}, \quad n_{ts} = \frac{(j-1)}{2} \quad (37)$$

$$n_{vs} = \frac{(k+1)}{2}; \quad n_{os} = \frac{(k-1)}{2} \quad (38)$$

Jos taas  $i, j$  ja  $k = 0$ , niin:

$$n_{ka} = n_{la} = n_{es} = n_{ts} = n_{vs} = n_{os} = 0 \quad (39)$$

Jatkuvatoiminen äänilähde, jonka ääniteho on  $W$  wattia synnyttää vastaanottopisteessä  $O$  kokonaisintensiteetin  $I$ , joka on todellisesta äänilähteestä ja sen kuvälähteistä  $S_{jki}$  tulevien äänisäteiden intensiteettien summa. (Kuronen 1998; Kuronen 1986.)

$$I = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{W \exp(-mr_{jki})}{4\pi r_{jki}^2} (\beta_{ka}^{n_{ka}} \beta_{la}^{n_{la}} \beta_{vs}^{n_{vs}} \beta_{os}^{n_{os}} \beta_{es}^{n_{es}} \beta_{ts}^{n_{ts}}) \right\} \quad (40)$$

jossa  $i, j, k$  ovat kokonaislukuja miinus äärettömästä plus äärettömään.

$W$  on todellisen äänilähteen ääniteho,  $m$  on väliaineen vaimennustekijä ja  $r_{jki}$  on kuvälähteen  $S_{jki}$  etäisyys vastaanottopisteestä  $O_{xyz}$ . Katon, lattian, etu- ja takaseinän, vasemman sekä oikean seinän heijastusten lukumäärät ovat vastaavasti  $n_{ka}$ ,  $n_{la}$ ,  $n_{es}$ ,  $n_{ts}$ ,  $n_{vs}$ ,  $n_{os}$  ja  $\beta_{ka}$ ,  $\beta_{la}$ ,  $\beta_{es}$ ,  $\beta_{ts}$ ,  $\beta_{vs}$ ,  $\beta_{os}$  ovat vastaavien pintojen heijastuskertoimet. Kuvälähteen  $S_{jki}$ :n etäisyys  $r_{jki}$  vastaanottopisteestä  $O_{xyz}$  on:

$$r_{jki} = \sqrt{(m_x - O_x)^2 + (m_y - O_y)^2 + (m_z - O_z)^2} \quad (41)$$

jossa:

$$\begin{aligned} m_x &= \{2n_{es}(H_x - S_x) + (2n_{ts} + 1)S_x\} \\ m_y &= \{2n_{vs}(H_y - S_y) + (2n_{os} + 1)S_y\} \\ m_z &= \{2n_{ka}(H_z - S_z) + (2n_{la} + 1)S_z\} \end{aligned} \quad (42)$$

$H_x$  on tilan pituus,  $H_y$  leveys ja  $H_z$  on korkeus ja  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$  ovat todellisen äänilähteen koordinaatit eli etäisyydet  $yz$ -,  $xz$ - ja  $yx$ -tasoista.

Etäisyysvaimennuksen lisäksi etenevää äänisädettä vaimentaa myös väliaine, ilma. Oletetaan, että vakiopaksuinen väliainekerros (ilmakerros) absorboi aina saman

määrän kerrokseen tulevasta ääniaallon energiasta (Hemilä et al. 1991, s. 43). Väliainekerros, jonka paksuus on  $dx$ , aiheuttaa intensiteetin muutoksen  $dI = -mI dx$ . Tekijä  $m$  on väliaineen vaimennuskerroin. Lasketaan, kuinka paljon intensiteetti pienenee, kun tasoalto etenee paikasta  $x_1$  paikkaan  $x_2$ .

$$\int_{I(x_1)}^{I(x_2)} \frac{dI}{I} = -m \int_{x_1}^{x_2} dx \quad (43)$$

Integroinnin tuloksena saadaan:

$$I(x_2) = I(x_1) e^{-m(x_2 - x_1)} \quad (44)$$

Etenevän tasoallon intensiteetti pienenee siis eksponentiaalisesti. Väliaineen vaimennuskerroin  $m$  riippuu äänen taajuudesta, ilman lämpötilasta sekä suhteellisesta kosteudesta. Väliaineen vaimennuskertoimella  $m$  voidaan myös approksimoida tasaisesti jakautuneen kaluston vaimennusvaikutusta.

Yhtälöllä (40) voidaan laskea suorakulmaisen särmiön muotoisen hallin mielivaltaisessa pisteessä olevan äänilähteen synnyttämä äänen intensiteetti hallissa valitussa tarkastelupisteessä. Katto-, lattia- ja seinäpintojen absorptiokertoimet voivat erota toisistaan, mutta absorption oletetaan olevan vakio yli koko kyseisen pinnan. Pitkissä käytävissä, joiden päätyseinät ovat avoimet tai ääntä heikosti heijastavia, voidaan päätyseinien ääniheijastukset unohtaa. Tällöin käytävällä olevan todellisen äänilähteen kolmiulotteinen kuvalähdeavaruus kutistuu todellisen äänilähteen kautta kulkevaksi, käytävän poikkileikkauksen suuntaiseksi kuvalähdetasoksi, kuva 14. Kuvalähdetason yksittäisen kuvalähteen  $S_{ik}$  ääniteho  $W_{ik}$  voidaan esittää pinnan heijastuskertoimen ja heijastuskertojen avulla.

$$W_{ik} = W(1 - \alpha)^n = W\beta^n \quad (45)$$

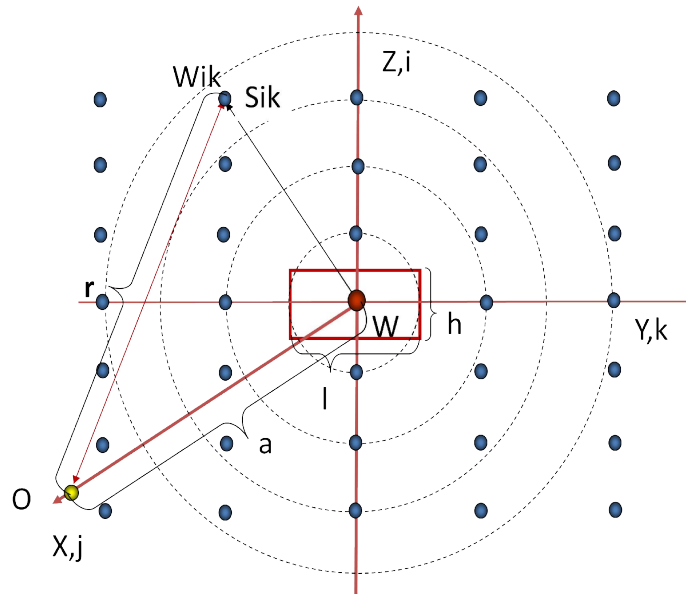
Yhtälössä  $W$  on todellisen äänilähteen ääniteho,  $\beta$  pintojen heijastuskerroin,  $\alpha$  pintojen absorptiokerroin ja  $n$  on heijastusten kertaluku eli äänisäteen heijastusten lukumäärä.

$$n = |j| + |k| \quad (46)$$

Oletetaan, että käytävän ( $h \times l$ ) päätyseinistä ei tule vastaanottopisteeseen merkittäviä ääniheijastuksia ja että heijastuskertoimen  $\beta$  on vakio kaikilla pinnoilla. Kun todellinen äänilähde sijoitetaan käytävän poikkileikkauksen keskipisteeseen ja vastaanottopiste käytävän suuntaiselle, äänilähteen kautta kulkevalle suoralle, voidaan yhtälö 40 kirjoittaa yksinkertaisempaan muotoon:

$$I = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left( \frac{W \exp(-mr)}{4\pi r^2} (\beta^{|i|+|k|}) \right) \quad (47)$$

jossa  $r = \sqrt{(ih)^2 + (kl)^2 + a^2}$



**Kuva 14.** Todellinen äänilähde ja sen kuvalähteitä yz-kuvalähdetasossa.

Kuvan 14 merkintöjä käyttäen saadaan:

$$I_a = \frac{W}{4\pi} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left( \frac{\beta^{|i|+|k|} e^{-m\sqrt{(ih)^2 + (kl)^2 + a^2}}}{(ih)^2 + (kl)^2 + a^2} \right) \quad (48)$$

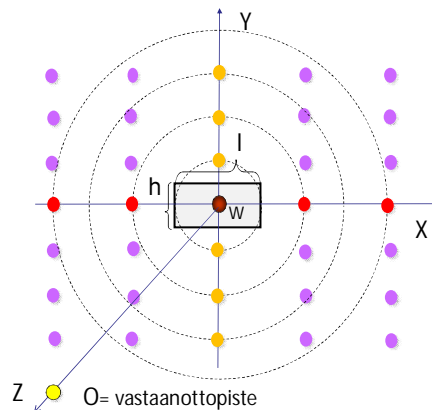
jossa  $r = \sqrt{(ih)^2 + (kl)^2 + a^2}$  on etäisyys todellisesta tai kuvalähteestä vastaanottopisteeseen,

- $I_a$  on äänen intensiteetti etäisyyden  $a$  funktiona äänilähteestä
- $W$  on todellisen äänilähteen ääniteho
- $l$  on käytävän leveys

$h$	on käytävän korkeus
$a$	on todellisen äänilähteen etäisyys vastaanottopisteessä
$i$	on ääniheijastusten lukumäärä katon ja lattian suhteen
$k$	on ääniheijastusten lukumäärä sivuseinien suhteen
$\beta$	on pintojen heijastuskerroin

### 3.4 Käytävän kuvalähdetason muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi

Käytävän poikkileikkauksen keskipisteessä sijaitsevan todellisen äänilähteen ääniheijastukset käytävän tasaisista pinnoista voidaan akustisen peilikuvateorian mukaan korvata todellisen äänilähteen ympärille syntyvällä äärettömällä, diskreetillä kuvalähdevaruudella. Kun käytävän päätyseinät eivät heijasta ääntä, kutistuu kolmiulotteinen kuvalähdevaruus todellisen äänilähteen kautta kulkevaksi, käytävän poikkileikkauksen suuntaiseksi kuvalähdetasoksi, kuva 15. Kun todellisen äänilähteen ja sen kuvalähteiden äänitehot ja etäisyydet käytävällä olevasta vastaanottopisteestä tunnetaan, voidaan vastaanottopisteeseen syntyvä äänenpainetaso laskea vapaan äänikentän teorialla.

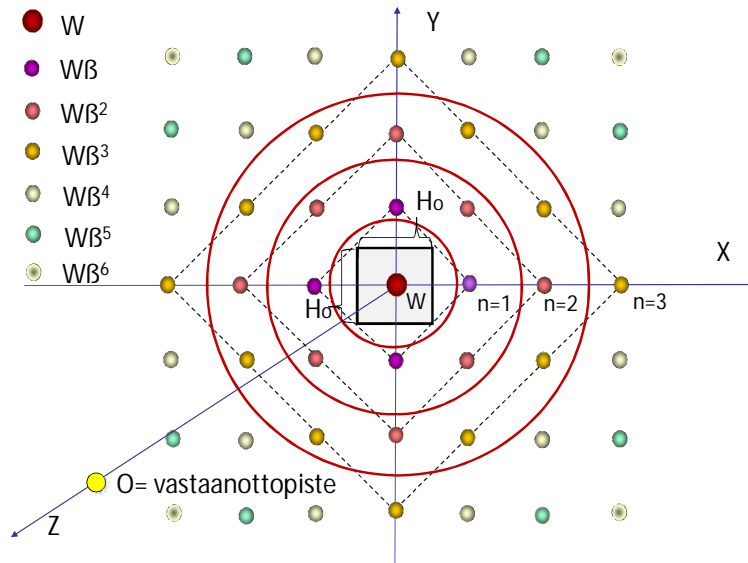


**Kuva 15.** Todellisen äänilähteen kuvalähteitä.

#### 3.4.1 Suorakaiteen muotoisen käytävän muunto neliön muotoiseksi

Tutkimuksessa suorakaiteen muotoinen käytävä ( $h \times l$ ) muunnetaan aluksi neliönmuotoiseksi käytäväksi, jonka sivun pituus  $H_o$  on alkuperäisen poikkileikkauksen pinta-alan neliö:  $H_o = \sqrt{h \times l}$ . Neliön muotoisen käytävän poikkileikkauksen keskipisteessä sijaitsevan todellisen äänilähteen  $n$  kertaluvun ( $W\beta^n$ ) samanarvoisia ku-

valähteitä on  $xy$ -tasossa  $4n$  kappaletta.  $W$  on todellisen äänilähteen teho,  $\beta$  on pintojen keskimääräinen heijastuskerroin ja  $n$  kuvälähteen järjestysnumero, joka ilmoittaa äänisäteiden heijastusten lukumäärän. Kuvälähteistä neljä sijaitsee aina koordinaattiakseleilla etäisyydellä  $nH_o$  todellisesta äänilähteestä. Loput  $4(n-1)$  kappaletta ovat koordinaattiakseleilla olevien kuvälähteiden kautta piirrettyjen  $n$  kertaluvun neliöiden kehällä, kuva 16. Ensimmäisen kertaluvun ( $n=1$ ) kuvälähteet sijaitsevat etäisyydellä  $H_o$  todellisesta äänilähteestä. Koordinaattiakseleilla ja neliön kehällä sijaitsevien  $n$  kertaluvun kuvälähteiden etäisyydet ( $R_{ni}$ ) todellisesta äänilähteestä ovat  $nH_o \geq R_{ni} \geq nH_o \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right)$ , kun  $n \geq 2$ . Esimerkiksi todellisen äänilähteen toisen kertaluvun ( $n=2$ ) kahdeksasta kuvälähteestä neljä sijaitsee etäisyydellä  $2H_o$  ja neljä etäisyydellä  $\sqrt{2}H_o$  todellisesta äänilähteestä, kun  $H_o$  on käytävän sivun pituus.



**Kuva 16.** Kuvälähdetason samanarvoiset kuvälähteet, kun  $n= 1, 2, 3$ .



Lasketaan samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) todellisesta äänilähteestä mitattujen etäisyyksien keskiarvon ( $\bar{R}_n$ ) suhde koordinaattiakselilla olevaan vastaavaan kuvalähteen etäisyyteen todellisesta äänilähteestä. Ensimmäisen kertaluvun tapauksessa etäisyyksien suhde on yksi, koska koordinaattiakselien välissä ei ole kuvalähteitä. Kun kertaluku kasvaa kohti ääretöntä ( $n \rightarrow \infty$ ), lähestyy kuvalähteiden etäisyyksien ( $\bar{R}_n$ ) keskiarvon ja vastaavan koordinaattiakselilla olevan kuvalähteen etäisyyden ( $R_n$ ) suhde arvoa 0,81, taulukot 5, 6, 7 ja 8, sivut 89 ja 90.

### 3.4.2 Kuvalähteiden siirto koordinaattiakselille

Tehdään seuraava yksinkertaistus. Siirretään koordinaattiakseleilla todellisesta äänilähteestä etäisyydellä  $nH_o$  olevat kertaluvun  $n$  kuvalähteet sekä näiden kuvalähteiden kautta piirretyn neliön kehällä olevat samanarvoiset kuvalähteet koordinaattiakselille, etäisyydelle  $H=0,8nH_o$  todellisesta äänilähteestä. Ensimmäisen kertaluvun ( $n=1$ ) kuvalähteiden siirrossa kaikki äänisäteet lyhenevät, jolloin vastaanotto-pisteen äänitaso kohoaa. Koordinaattiakselien välissä sijaitsevat kertalukujen  $n=2,3,4$  samanarvoiset kuvalähteet siirtyvät kauemmas origosta ja kertaluvusta viisi ylöspäin ( $n \geq 5$ ) joidenkin kuvalähteiden etäisyys origoon lyhenee, joidenkin pitenee, kuva 16. Kuvalähteistä, jotka ovat etäisyydellä  $H$  toisistaan, muodostuu koordinaattiakselille suppeneva geometrinen pistelähteiden sarja:

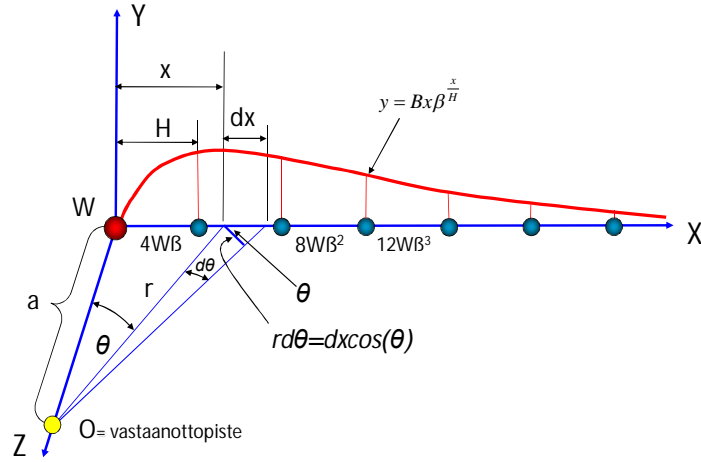
$$4W\beta, 8W\beta^2, 12W\beta^3, 16W\beta^4, 4nW\beta^n \quad (49)$$

### 3.4.3 Diskreetin kuvalähdejono muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi

Pistemäinen äänilähde voidaan korvata viivalähteellä, jos etäisyys viivalähteen normaalilla olevaan vastaanottopisteeseen on suurempi kuin viivalähteen pituus jaettuna ( $\pi$ ) piillä (Rathe 1969). Koska ensimmäinen kuvalähde on vähintään etäisyydellä  $2H_o$  vastaanottopisteestä, voidaan kunkin pistemäisen kuvalähteen ääniteho jakaa matkalle  $H$ , jolloin saadaan jatkuva äänitehojakautuma:

$$y = Bx\beta^{\frac{x}{H}} \quad (50)$$

Yhtälössä  $B$  on todellisen äänilähteen äänitehosta, pintojen heijastuskertoimesta  $\beta$  ja käytävän laskentakorkeudesta  $H=0.8H_o$  riippuva kerroin sekä  $x$  on etäisyys origoon sijoitetusta todellisesta äänilähteestä pitkin kuvalähdeakselia, kuva 17.



**Kuva 17.** Kuvalähdejonon muuttaminen jatkuvaksi jakautumaksi.

### 3.5 Äänitehokäyrän kertoimen $B$ määrittely

Tarkastellaan aluksi käytävän katon ja lattian välisiä heijastuksia. Oletetaan, että kuvalähteiden etäisyys toisistaan on  $H$  ja heijastuskerroin  $\beta$ . Kun todellisen äänilähteen ääniteho on  $W$  wattia ja kummankin pinnan heijastuskerroin  $\beta$ , ovat kuvalähteiden äänitehot muotoa  $W_n = W\beta^n$ . Potenssi  $n$  ilmoittaa äänisäteen pintaheijastusten lukumäärän. Kun ääniheijastukset tapahtuvat vain katon ja lattian välillä, kutistuu kuvan 15 kuvalähdetaso koordinaattiakselin suuntaiseksi kuvasuoraksi, jossa katon ja lattian puoliväliin sijoitetun todellisen äänilähteen kuvalähteet sijaitsevat todellisen äänilähteen kautta piirretyllä katto- ja lattiapintojen normaalilla. Koska absorptiokerroin  $\alpha$  ja heijastuskerroin  $\beta$  ovat aina ykköstä pienempiä, muodostuu todellisen äänilähteen katon sekä lattian kuvalähteistä kaksi suppenevaa geometristä sarjaa.

$$W\beta, W\beta^2, W\beta^3, W\beta^4, W\beta^n \quad (51)$$

Sarjojen summa on:

$$S_A = \frac{2W\beta}{(1-\beta)}, \text{ kun } n \rightarrow \infty \quad (52)$$

Tarkastellaan seuraavaksi koordinaattiakselien väliin syntyviä kuvalähteitä, kuva 15. Koordinaattiakselien positiivisen neljänneksen ensimmäisen kuvalähdesarakkeen summa on:

$$W\beta^2 + W\beta^3 + W\beta^4 + \dots + W\beta^n = \frac{W\beta^2}{(1-\beta)}, \text{ kun } n \rightarrow \infty \quad (53)$$

Positiivisten koordinaattiakselien välissä olevat kuvalähdesarakkeiden summat muodostavat geometrisen sarjan:

$$\frac{W\beta^2}{(1-\beta)}, \frac{W\beta^3}{(1-\beta)}, \frac{W\beta^4}{(1-\beta)}, \frac{W\beta^n}{(1-\beta)} \quad (54)$$

jonka kokonaissumma on:

$$S_V = \frac{W\beta^2}{(1-\beta)^2}, \text{ kun } n \rightarrow \infty \quad (55)$$

Kaikkien kuvalähteiden äänitehosumma  $S$  ilman todellista äänilähdettä on tällöin:

$$S = 4S_V + 2S_A = \frac{4W\beta^2}{(1-\beta)^2} + \frac{4W\beta}{(1-\beta)} = \frac{4W\beta}{(1-\beta)^2} \quad (56)$$

Kertoimen  $B$  määrittämiseksi äänitehokäyrä integroidaan arvosta  $x=0$  arvoon  $x=\infty$ . Tehokäyrän ja positiivisen koordinaattiakselin väliin jäävän pinta-alan on oltava yhtä suuri, kuin kuvalähteiden äänitehosumma:

$$S = \frac{4W\beta}{(1-\beta)^2} \quad (57)$$

Lasketaan integraali:

$$B \int_0^{\infty} x\beta^{\frac{x}{H}} dx = BH \int_0^{\infty} \left( \frac{\beta^{\frac{x}{H}} (x \ln \beta - H)}{(\ln \beta)^2} \right) dx =$$

$$\frac{BH}{(\ln \beta)^2} \left( \beta^{\frac{\infty}{H}} (\infty \ln \beta - H) - \beta^{\frac{0}{H}} (0 \ln \beta - H) \right) = \frac{BH^2}{(\ln \beta)^2} \quad (58)$$

Koska  $\beta$  on aina ykköstä pienempi, on ylärajan termi nolla. Luvun 0 potenssi on 1, joten alarajan termi on -1. Merkitään integrointilausekkeen summa yhtä suureksi kuin äänitehotasosumma  $S$ :

$$\frac{BH^2}{(\ln \beta)^2} = \frac{4W\beta}{(1-\beta)^2} \quad (59)$$

Kertoimen  $B$  arvoksi saadaan:

$$B = \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \quad (60)$$

Yhtälössä  $W$  on todellisen äänilähteen teho,  $\beta$  on pintojen keskimääräinen heijastuskerroin ja  $H$  on koordinaattiakselilla olevien kovalähteiden välinen etäisyys. Äänitehokäyrä on muotoa:

$$y = \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} (x\beta^{\frac{x}{H}}) \quad (61)$$

Tarkastellaan lähemmin äänitehokäyrää  $y = Bx\beta^{\frac{x}{H}}$ . Lasketaan käyrän maksimikohdan sijainti koordinaattiakselilla. Käyrän maksimipiste saadaan derivoimalla äänitehokäyrä ja merkitsemällä derivaatta nolllaksi. Käyrän derivaatta on muotoa:

$$y' = B\beta^{\frac{x}{H}} \left[ 1 + \frac{x \ln(\beta)}{H} \right] \quad (62)$$

Kun sulkulauseke merkitään nolllaksi, saadaan kuva-akselin kohta, joka antaa käyrälle maksimiarvon:

$$x = \left[ \frac{-H}{\ln(\beta)} \right] \quad (63)$$

Akustisesti kovassa käytävässä, jossa heijastuskerroin  $\beta$  on suuri, sijaitsee maksimikohta hyvin kaukana. Kun heijastuskerroin on esimerkiksi  $\beta = 0,99$ , on maksi-

mipiste korkeudella  $x=99,5H$ , jossa  $H$  on käytävän laskentakorkeus. Pehmeässä käytävässä, kun  $\beta = 0,5$ , maksimikohta on korkeudella  $x=1,4H$ .

### 3.6 Vastaanottopisteen äänenpainetason numeerinen ratkaisu NUMO

Lasketaan aluksi kuvalähteiden synnyttämä äänen intensiteetti vastaanottopisteessä  $O$ , joka on käytävän suuntaisella  $z$ -akselilla etäisyydellä  $a$  todellisesta äänilähteestä. Tarkastellaan äänitehokäyrän alkiota  $dx$ , joka on etäisyydellä  $r$  vastaanottopisteestä, kuva 17. Alkion  $dx$  ääniteho on:

$$dW = Bx\beta^{\frac{x}{H}} dx \quad (64)$$

Alkion synnyttämä äänen intensiteetti vastaanottopisteessä  $O$  voidaan laskea yhtälöstä:

$$I_{dx} = \frac{Bx\beta^{\frac{x}{H}} e^{-mr} dx}{4\pi r^2} \quad (65)$$

Tekijä  $e^{-mr}$  kuvaa väliaineen vaimennusta, kun oletetaan, että vakiopakkuinen väliaine absorboi aina saman osan väliainekerokseen tulevasta äänisäteen energiasta (Hemilä et al. 1991). Yhtälössä  $m$  on väliaineen vaimennuskerroin ja  $r$  on äänisäteen kulkema matka. Äänisäteen intensiteetti pienenee siis eksponentiaalisesti etäisyyden funktiona. Kuvalähteiden äänitehokäyrän pisteeseen  $O$  synnyttämä äänen intensiteetti  $I_k$  saadaan integroimalla tehokäyrän yli arvosta  $x=0$  arvoon  $x=\infty$ .

$$I_k = B \int_0^{\infty} \frac{x\beta^{\frac{x}{H}} e^{-mr}}{4\pi r^2} dx \quad (66)$$

Tehdään muuttujan vaihdos. Vaihdetaan muuttujaksi kulma  $\theta$ . Kuvasta 17 saadaan seuraavat yhteydet muuttujien  $x$  ja  $\theta$  välille.

$$r^2 = \frac{a^2}{\cos^2(\theta)} \quad (67)$$

$$r = a\sqrt{1 + \tan^2(\theta)} \quad (68)$$

$$x = a \tan(\theta) \quad (69)$$

$$dx = \frac{ad\theta}{\cos^2(\theta)} \quad (70)$$

Muuttujan vaihdoksen jälkeen on integroinnin alaraja  $\theta_1 = 0$  ja yläraja  $\theta_2 = \left(\frac{\pi}{2}\right)$ .

Yhtälö 66 voidaan nyt kirjoittaa muotoon:

$$I_k = \frac{B}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \quad (71)$$

Otetaan huomioon myös todellisesta äänilähteestä vastaanottopisteeseen  $O$  suoraan

$$\text{tullut äänen intensiteetti: } I_{\text{tod}} = \frac{WQe^{-ma}}{4\pi a^2} \quad (72)$$

Yhtälössä  $Q$  on suuntatekijä, jonka arvo vapaassa äänikentässä on 1. Vastaanotto-  
pisteen kokonaisintensiteetti on:

$$I = \frac{WQe^{-ma}}{4\pi a^2} + \frac{B}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \quad (73)$$

Sijoitetaan yhtälöön tekijä  $B$  ja annetaan suuntatekijälle arvo  $Q=1$ :

$$I = \frac{We^{-ma}}{4\pi a^2} + \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{4\pi H^2(1-\beta)^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \quad (74)$$

Otetaan yhteiseksi tekijäksi  $(W/4\pi)$  ja lasketaan äänenpainetaso käytävällä vastaanottopisteessä  $O$ , joka on etäisyydellä  $a$  todellisesta äänilähteestä. Vapaassa äänikentässä äänen intensiteettitaso on yhtä suuri kuin äänenpainetaso. Intensiteettitason määritelmän perustella voidaan kirjoittaa:

$$L_p = 10 \lg \left\{ \frac{W}{4\pi} \left[ \frac{e^{-ma}}{a^2} + \frac{4\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \right] \right\} 10^{12} \quad (75)$$

Edelleen äänitehotason määritelmän mukaan saadaan JÄKÄLA-algoritmin numeerinen NUMO-yhtälö muotoon:

$$L_p = L_w - 11 + 10 \lg \left[ \frac{e^{-ma}}{a^2} + \frac{4\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \right) \right] \quad (76)$$

Sisin sulkulauseke voidaan ratkaista numeerisella integroinnilla.

### 3.7 Vastaanottopisteen äänenpainetason likiarvoratkaisu APPRO

Jos vastaanottopisteen äänenpainetaso halutaan ratkaista ilman numeerista integrointia, on funktiota  $\tan(\theta)$  yksinkertaistettava. Tarkastellaan tangentin sarjakehitelmää:

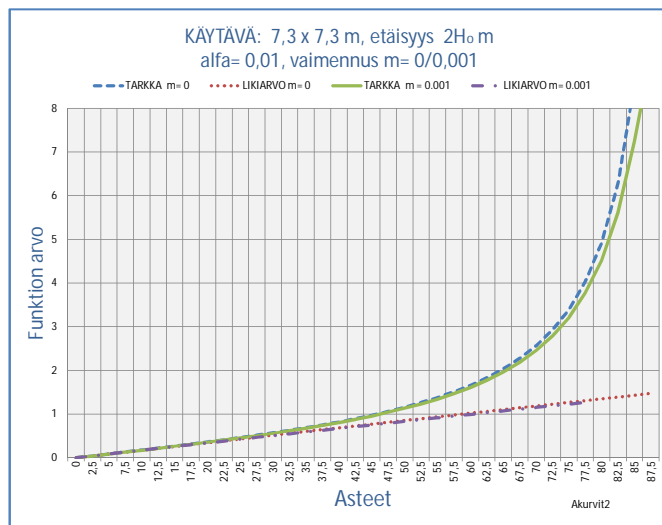
$$\tan(\theta) = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{2}{15}\theta^5 + \frac{17}{315}\theta^7 + \dots; \quad |\theta| < \frac{\pi}{2} \quad (77)$$

Käytävän todellisen äänilähteen kuvalähteiden vastaanottopisteessä synnyttämä äänen intensiteetti  $I_k$  laskettiin yhtälöllä:

$$I_k = \frac{B}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \quad (71)$$

Kuvalähteiden äänen intensiteetin yhtälössä tangentin sarjakehitelmästä on mahdollista hyödyntää vain ensimmäinen termi, koska muuttujan ykköstä korkeammat potenssit eivät integroidu yhtälössä (71) alkeisfunktioiden avulla. Pienillä kulmilla  $\tan(\theta)$  voidaan korvata muuttujan arvolla  $\theta$  ja neliönjuuri  $\sqrt{1+\tan^2(\theta)}$  termillä  $1+0,5(\tan(\theta))^2$  (Kinsler 1982, s. 177). Kinslerin esittämä neliönjuuren approksimaatio ei integroidu yhtälössä alkeisfunktioiden avulla, joten se korvataan kokeellisella suoralla  $y_2=0,4\theta+1$ . Kulman  $\theta$  kasvaessa molempien approksimaatioiden arvot ovat tarkkoja arvoja pienemmät, kuvat 26 ja 27, sivut 80, 81. Kun vastaanottopisteen kuvalähteiden äänen intensiteetin yhtälöön (71) sijoitetaan yllä mainitut approksimaatiot, pienenee integraalilausekkeen ensimmäinen tulontekijä ja toinen suurenee kulman  $\theta$  kasvaessa. Kolmas tulontekijä pienenee kulman kasvaessa arvoon noin  $\pi/6$ , jonka jälkeen se suurenee.

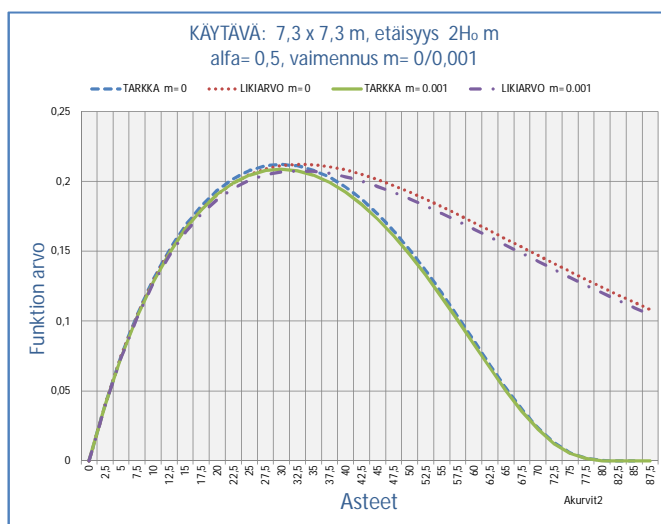
Kuvissa 18 - 23 on tutkittu integroitavan funktion  $(\tan(\theta)\beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}})$  ja sen approksimaatiofunktion  $(\theta\beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0,4\theta+1)})$  kuvaajia  $40H_o$  pitkässä käytävässä, kun muuttuja  $\theta$  saa arvot  $0 \rightarrow \pi/2$ . Ensimmäinen tarkastelupiste on lähellä todellista äänilähdettä ( $2H_o$ ), toinen käytävän puolivälissä ( $20H_o$ ) sekä kolmas käytävän päädyssä ( $40H_o$ ).  $H_o$  on käytävän korkeus. Integraaliyhtälöiden kuvaajat on piirretty ilman väliaineen vaimennusta ja vaimennuksella  $m=0,001$ , kun käytävän absorptiokertoimet ovat  $\bar{\alpha}=0,01$  ja  $\bar{\alpha}=0,5$ .



$$\text{tarkka} = \tan(\theta)\beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}}, \text{ approksimaatio} = \theta\beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0,4\theta+1)}$$

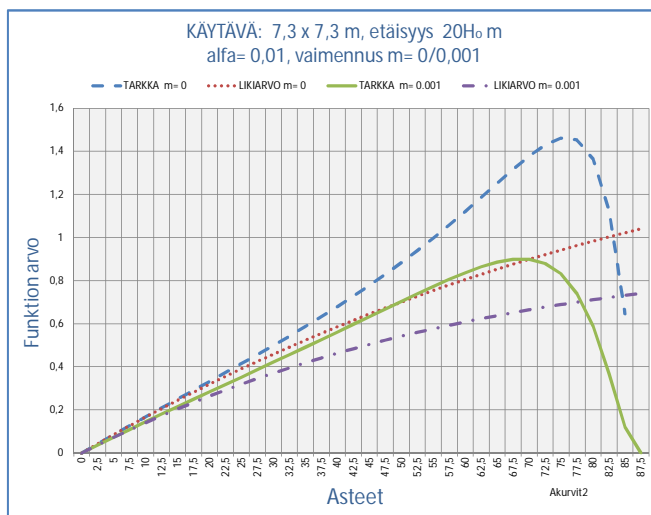
**Kuva 18.** Käyrien kuvaajat akustisesti kovassa käytävässä lähellä todellista äänilähdettä.





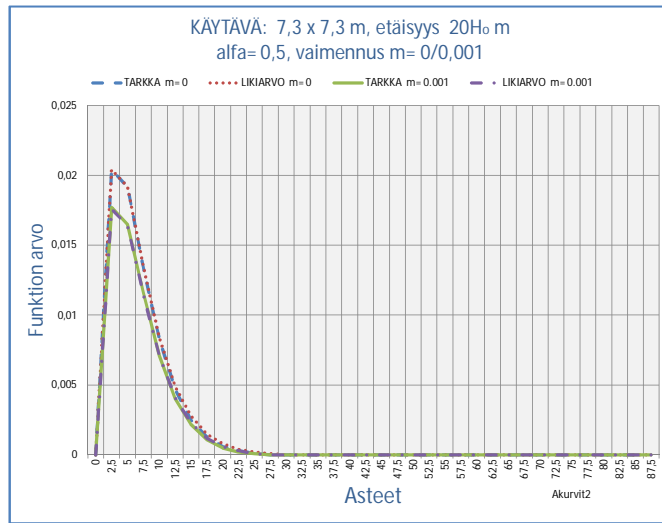
$$\text{tarkka} = \tan(\theta) \beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}}, \text{ approksimaatio} = \theta \beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0.4\theta+1)}$$

**Kuva 19.** Käyrien kuvaajat akustisesti pehmeässä käytävässä lähellä todellista äänilähdettä.



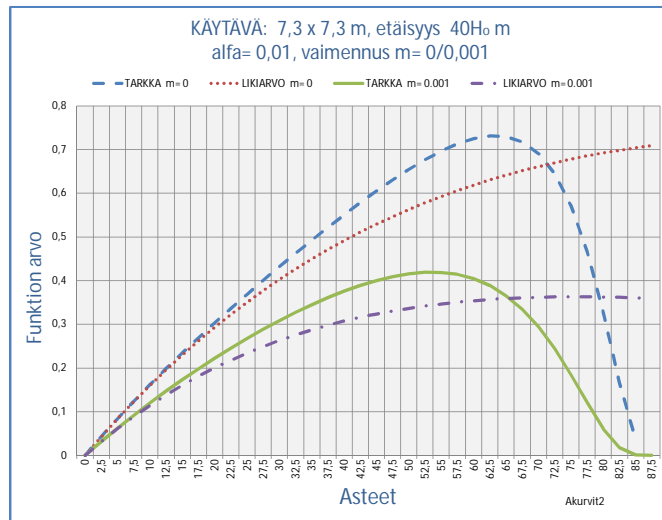
$$\text{tarkka} = \tan(\theta) \beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}}, \text{ approksimaatio} = \theta \beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0.4\theta+1)}$$

**Kuva 20.** Käyrien kuvaajat akustisesti kovan käytävän puolivälissä.



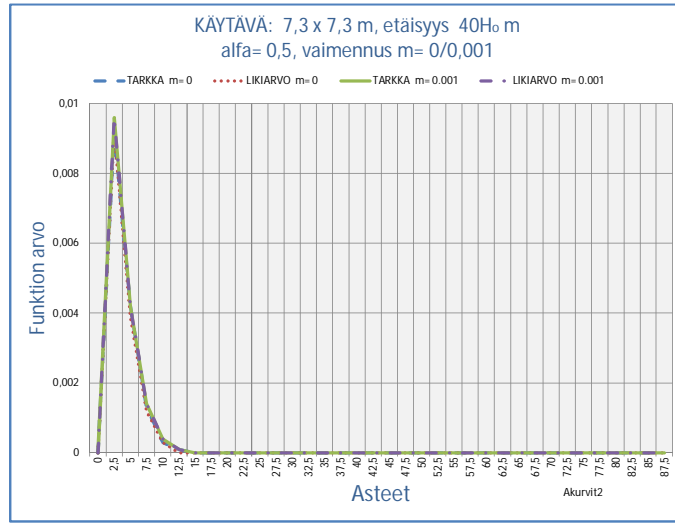
$$\text{tarkka} = \tan(\theta) \beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}}, \text{ approksimaatio} = \theta \beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0.4\theta+1)}$$

**Kuva 21.** Käyrien kuvaajat akustisesti pehmeän käytävän puolivälissä.



$$\text{tarkka} = \tan(\theta) \beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}}, \text{ approksimaatio} = \theta \beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0.4\theta+1)}$$

**Kuva 22.** Käyrien kuvaajat akustisesti kovan käytävän päädyssä.



$$\text{tarkka} = \tan(\theta) \beta \frac{a \tan(\theta)}{H} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}}, \text{ approksimaatio} = \theta \beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(0.4\theta+1)}$$

**Kuva 23.** Käyrien kuvaajat akustisesti pehmeän käytävän päädyssä.

Kuvista 18 - 23 havaitaan, että pienillä kulmilla tarkka integraalifunktio ja sen approksimaatiofunktio ovat yhtenevät. Approksimaatio kuvaa sitä paremmin tarkkaa funktiota, mitä suurempi käytävän absorptioerroin on ja mitä kauempana tarkkailupiste sijaitsee, kuvat 19, 21 ja 23. Kulman  $\theta$  kasvaessa approksimaatioyhtälö aliarvioi integraaliyhtälön akustisesti kovassa ( $\bar{\alpha} = 0.01$ ) käytävässä, lähellä äänilähdettä ( $2H_0$ ), ja yliarvioi sen etäällä äänilähteestä. Akustisesti erittäin pehmeässä ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) käytävässä approksimaatioyhtälö yliarvioi integraalin suurilla kulman arvoilla lähellä äänilähdettä, kuva 19.

Tutkitaan integraalia kulmavälillä  $0 \rightarrow \theta_2$ . Korvataan  $\tan(\theta)$  muuttujan arvolla  $\theta$  ja  $\sqrt{1 + \tan^2(\theta)}$  suoralla  $y_2 = g\theta + 1$ , jonka kulmakerroin  $g = 0,4$ :

$$I_k = \frac{B}{4\pi} \int_0^{\theta_2} \theta \beta \frac{a\theta}{H} e^{-ma(g\theta+1)} d\theta \quad (78)$$

Integroidaan yhtälö

$$I_k = -\frac{BH}{4\pi a^2 (Hgm - \ln(\beta))^2} \int_0^{\theta_2} \left[ e^{-ma(g\theta+1)} \beta \frac{a\theta}{H} \{H(agm\theta + 1) - a \ln(\beta)\theta\} \right] d\theta \quad (79)$$

Sijoitetaan yhtälöön ylärajan arvoksi  $\theta_2$  sekä alarajan arvoksi  $0$  sekä kertoimet  $B$  ja

$g$ :

$$B = \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \quad (60)$$

$$I_k = -\frac{4W\beta(\ln \beta)^2 H}{4\pi a^2 H^2 (1-\beta)^2 (0,4Hm - \ln(\beta))^2} \times \left\{ \left[ e^{-ma(0,4\theta_2+1)} \beta^{\frac{a\theta_2}{H}} \{H(0,4am\theta_2 + 1) - a \ln(\beta)\theta_2\} \right] - e^{-ma} H \right\} \quad (80)$$

Otetaan huomioon äänilähteestä suoraan tullut ääni, jolloin vastaanottopisteen äänen kokonaisintensiteetiksi saadaan:

$$I = \frac{We^{-ma}}{4\pi a^2} - \frac{4W\beta(\ln \beta)^2 H}{4\pi a^2 H^2 (1-\beta)^2 (0,4Hm - \ln(\beta))^2} \times \left\{ \left[ e^{-ma(0,4\theta_2+1)} \beta^{\frac{a\theta_2}{H}} \{H(0,4am\theta_2 + 1) - a \ln(\beta)\theta_2\} \right] - e^{-ma} H \right\} \quad (81)$$

Otetaan tekijä  $(We^{-ma}/4\pi a^2)$  yhteiseksi tekijäksi ja sievennetään lauseketta:

$$I = \frac{We^{-ma}}{4\pi a^2} \left\{ \left[ 1 - \frac{4\beta(\ln \beta)^2}{H(1-\beta)^2 (0,4Hm - \ln(\beta))^2} \times \left[ \left[ e^{-0,4ma\theta_2} \beta^{\frac{a\theta_2}{H}} \{H(0,4am\theta_2 + 1) - a \ln(\beta)\theta_2\} \right] - H \right] \right] \right\} \quad (82)$$

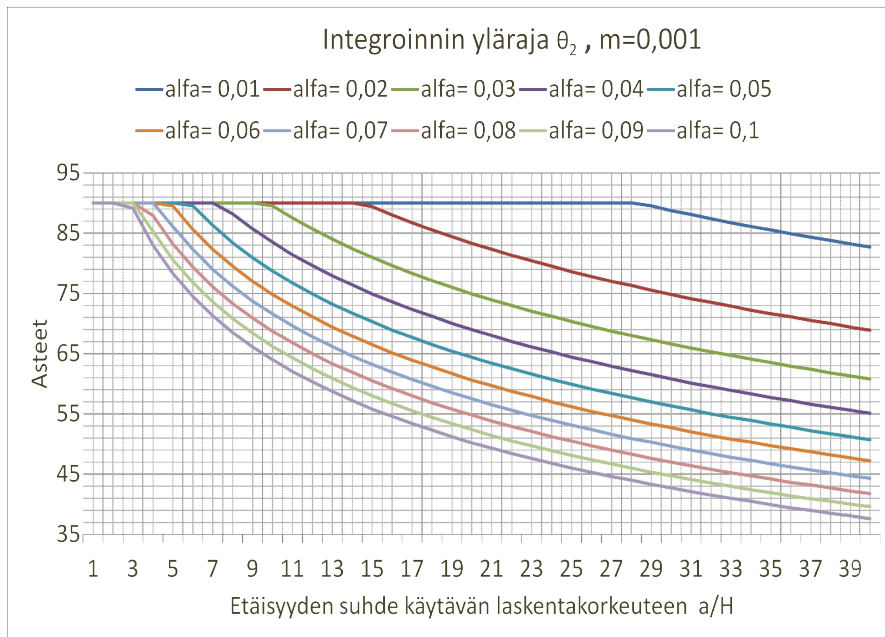
Intensiteettitason ja äänitehotason määrittelmän mukaan saadaan JÄKÄLA-algoritmin numeerinen APPRO-yhtälö muotoon:

$$L_p = L_w - 20 \lg a - 10ma \lg e - 11 + 10 \lg \left\{ \left[ 1 - \frac{4\beta(\ln \beta)^2}{H(1-\beta)^2 (0,4Hm - \ln(\beta))^2} \times \left[ \left[ e^{-0,4ma\theta_2} \beta^{\frac{a\theta_2}{H}} \{H(0,4am\theta_2 + 1) - a \ln(\beta)\theta_2\} \right] - H \right] \right] \right\} \quad (83)$$

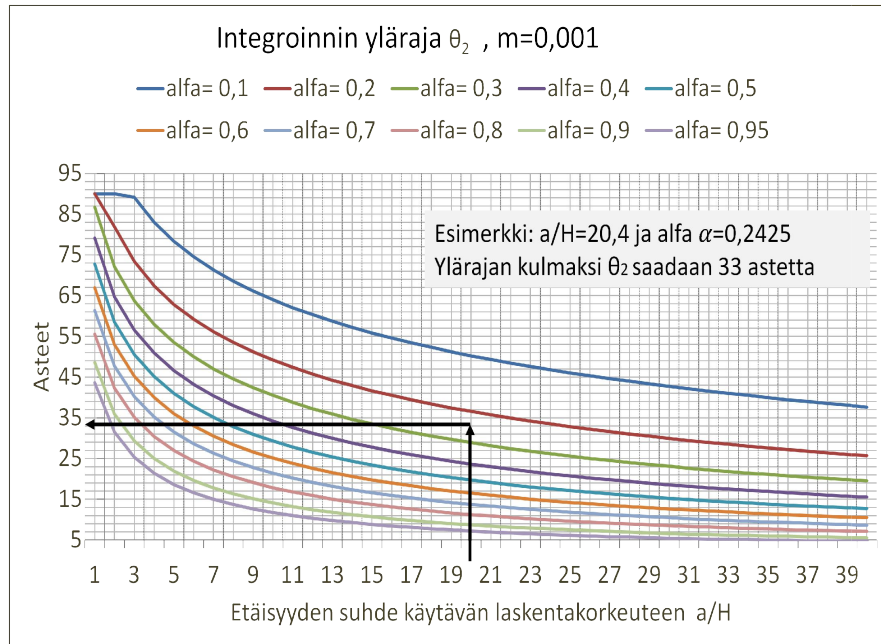
Kun ylärajaksi sijoitetaan  $\theta_2=\pi/2$ , saadaan:

$$L_p = L_w - 20 \lg a - 10 m a \lg e - 11 + 10 \lg \left\{ \left[ 1 - \frac{4\beta (\ln \beta)^2}{H(1-\beta)^2 (0,4Hm - \ln(\beta))^2} \times \left[ e^{-0,2ma\pi} \beta^{\frac{a\pi}{2H}} \left\{ H(0,2am\pi + 1) - a \ln(\beta) \frac{\pi}{2} \right\} \right] - H \right] \right\} \quad (84)$$

Määritellään yhtälön (82) integroinnin yläraja  $\theta_2$  siten, että likiarvokäyrän pinta-ala integroituna  $0 \rightarrow \theta_2$  on yhtä suuri kuin tarkan käyrän pinta-ala integroituna  $0 \rightarrow \pi/2$ . Kuvista 24 ja 25 voidaan lukea integroinnin ylärajan  $\theta_2$  arvot asteina eri absorptiokertoimilla vastaanottopisteen etäisyyden  $a$  ja käytävän laskentakorkeuden  $H$  suhteen funktiona. Väliaineen vaimennus  $m = 0,001$ . Katso liitteen 1 esimerkki.



**Kuva 24.** Integroinnin yläraja  $\theta_2$  asteina absorptiokertoimilla alfa =0,01- 0,1.



**Kuva 25.** Integroinnin yläraja  $\theta_2$  asteina absorptiokertoimilla  $\alpha = 0,1 - 0,95$ .

Tarkastellaan seuraavaksi tapausta, jossa vastaanottopiste on hyvin kaukana äänilähteestä ( $a \gg H$ ) eikä väliaineen vaimennusta oteta huomioon ( $m=0$ ). Kun  $\tan(\theta)$  korvataan muuttujan arvolla  $\theta$  ja  $m=0$ , voidaan yhtälö (83) kirjoittaa muotoon:

$$L_p = L_w - 11 + 10 \lg \left\{ \frac{1}{a^2} \left[ 1 - \frac{4\beta}{H(1-\beta)^2} \times \left[ \beta^{\frac{\alpha\pi}{2H}} \left\{ H - a \ln(\beta) \frac{\pi}{2} \right\} - H \right] \right] \right\} \quad (85)$$

Kun tarkasteluetaisyys  $a$  on hyvin paljon suurempi kuin kuvalähteiden välinen etäisyys  $H$ , niin silloin hakasulkulauseke lähestyy arvoa  $-H$  ja yhtälö saa muodon:

$$L_p = L_w - 11 + 10 \lg \left\{ \frac{1}{a^2} \left[ 1 + \frac{4\beta}{(1-\beta)^2} \right] \right\} \quad (86)$$

Yhtälö on sama kuin Kuttruffin sarjakehitelmään perustuvan yhtälö tapauksille, joissa vastaanottopisteen etäisyys  $a$  äänilähteestä on huomattavasti suurempi kuin käytävän leveys ja korkeus, kun väliaineen vaimennusta ei ole otettu huomioon (Kuttruff 1989, s. 54; Kurze 1997, s. 1184).

Jos kuvista 24 tai 25 määritelty integroinnin ylärajan arvo  $\theta_2$  on  $90^\circ$ , ei yhtälö (83) pysty ennustamaan vastaanottopisteen äänenpainetasoa luotettavasti. Tällöin integ-

rointilausekkeen (71) termit  $\tan(\theta)$  ja  $\sqrt{1 + \tan(\theta)^2}$  on korvattava useammalla suoralla, jotka ovat muotoa:  $y_1 = k\theta + n$  ja  $y_2 = g\theta + v$ . Suorien  $y_1$  ja  $y_2$  yhtälöissä  $k$  ja  $g$  ovat kulmakertoimia ja  $n$  ja  $v$  arvot, joilla suorat leikkaavat pystysuoran koordinaattiakselin. Luvut  $k$ ,  $g$ ,  $n$  ja  $v$  valitaan siten, että suorat ovat mahdollisimman hyvin yhtenevät korvattavien käyrien kanssa. Kun  $\tan(\theta)$  ja  $\sqrt{1 + \tan(\theta)^2}$  korvataan kyseisillä suorilla, saadaan kuvalähteiden äänen intensiteetin yhtälöksi kulmavälillä  $\theta_1 - \theta_2$ :

$$I_k = \frac{B}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (k\theta + n) \beta^{\frac{a(k\theta+n)}{H}} e^{-ma(g\theta+v)} d\theta \quad (87)$$

Integroidaan yhtälö:

$$I_k = -\frac{BH}{4\pi a^2 (Hgm - k \ln(\beta))^2} \times \left[ \int_{\theta_1}^{\theta_2} e^{-ma(g\theta+v)} \beta^{\frac{a(k\theta+n)}{H}} \{H(agkm\theta + agmn + k) - ak \ln(\beta)(k\theta + n)\} d\theta \right] \quad (88)$$

Vastaanottopisteen  $O$  äänen kokonaisintensiteetti saadaan laskemalla suoraan äänilähteestä ja kuvalähteiden äänitehojakautumasta valitulla jakovälillä tulleet intensiteetit yhteen. Lisätään yhtälöön (87) suoraan tullut ääni, sijoitetaan kertoimen  $B$  arvo sekä merkitään haluttua jakoväliä merkillä  $\Sigma$ .

$$B = \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1 - \beta)^2} \quad (60)$$

$$I = \frac{We^{-ma}}{4\pi a^2} + \sum_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{-4W\beta(\ln \beta)^2 H}{4\pi a^2 H^2 (1 - \beta)^2 (Hgm - k \ln \beta)^2} \times \left[ e^{-ma(g\theta+v)} \beta^{\frac{a(k\theta+n)}{H}} \{H(agkm\theta + agmn + k) - ak \ln(\beta)(k\theta + n)\} \right] \quad (89)$$

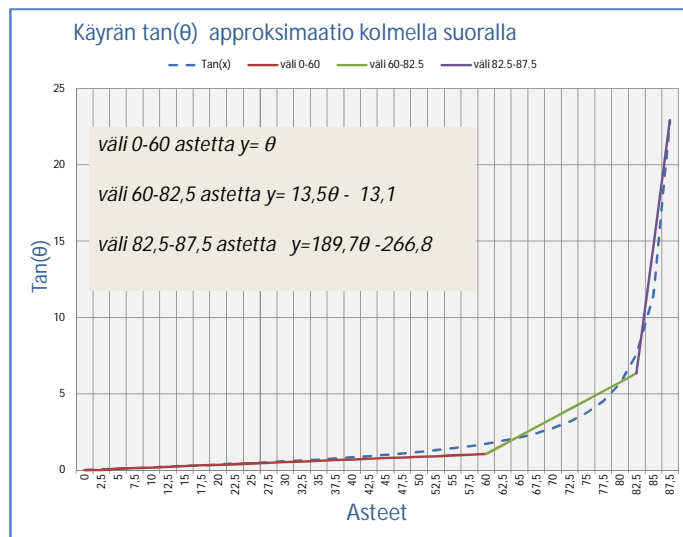
Otetaan  $(W/4\pi a^2)$  yhteiseksi tekijäksi ja sievennetään yhtälöä:

$$I = \frac{W}{4\pi a^2} \left\{ e^{-ma} + \sum_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{-4\beta(\ln \beta)^2}{H(1 - \beta)^2 (Hgm - k \ln \beta)^2} \times \left[ e^{-ma(g\theta+v)} \beta^{\frac{a(k\theta+n)}{H}} \{H(agkm\theta + agmn + k) - ak \ln(\beta)(k\theta + n)\} \right] \right\} \quad (90)$$

Äänen intensiteettitaso ja äänitehotason määritelmien perustella saadaan JÄKÄ-LA-algoritmin APPRO-yhtälö nyt muotoon:

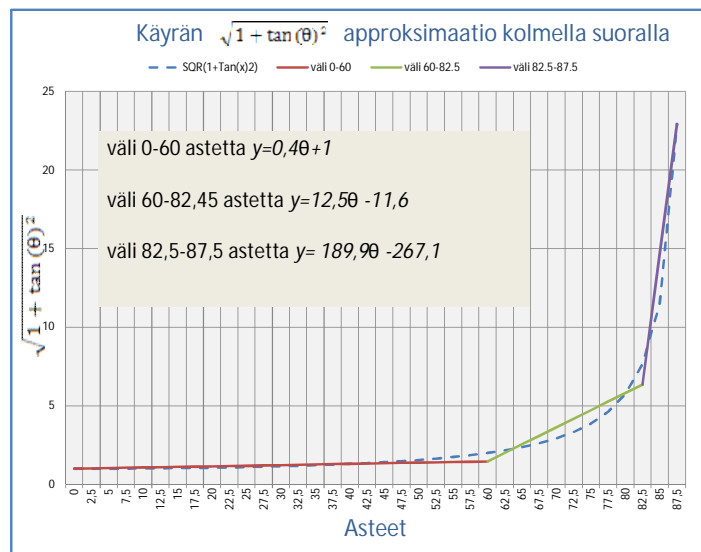
$$L_p = L_w - 20 \lg a - 11 + 10 \lg \left\{ e^{-ma} + \sum_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{-4\beta(\ln \beta)^2}{H(1-\beta)^2 (Hgm - k \ln \beta)^2} \times \left[ e^{-ma(g\theta+v)} \beta^{\frac{a(k\theta+n)}{H}} \{H(agkm\theta + agmn + k) - ak \ln(\beta)(k\theta + n)\} \right] \right\} \quad (91)$$

Kuvissa 26 ja 27 käyrät  $\tan(\theta)$  ja  $\sqrt{1 + \tan(\theta)^2}$  on jaettu kolmeen osaan ja korvattu suorilla. Mitä useammalla suoralla käyrät korvataan, sitä tarkemmaksi ja työläemmäksi approksimaatio tulee.



**Kuva 26.** Käyrän  $\tan(\theta)$  approksimaatio kolmella suoralla.





**Kuva 27.** Käyrän  $\sqrt{1 + \tan(\theta)^2}$  approksimaatio kolmella suoralla.

Kaavoissa on käytetty seuraavia merkintöjä:

- $L_p$  on äänenpainetaso
- $L_w$  on todellisen äänilähteen äänitehotaso
- $I$  on äänen kokonaisintensiteetti vastaanottopisteessä  $O$
- $\beta$  on pintojen heijastuskerroin
- $\theta_1$  on laskennan alaraja
- $\theta_2$  on laskennan yläraja
- $a$  on vastaanottopisteen etäisyys todellisesta äänilähteestä
- $H$  on kuvalähteiden välinen etäisyys
- $m$  on kaluston ja ilman vaimennuskerroin
- $W$  on todellisen äänilähteen teho
- $B$  on todellisen äänilähteen äänitehosta, pintojen heijastuskertoimesta  $\beta$  ja kuvalähteiden välisestä etäisyydestä  $H$  riippuva kerroin

## 4 TUTKIMUKSEN TULOKSET

### 4.1 JÄKÄLA-algoritmin johdossa tehtyjen kuvalähdetason kolmen muokkausvaiheen vaikutus alkuperäisen ideaalikäytävän AKURI-ohjelmalla laskettuihin tuloksiin

Suorakaiteen muotoisen käytävän poikkileikkauksen keskipisteessä olevan äänilähteen kuvalähdetason muunto JÄKÄLA-algoritmillä jatkuvaksi äänitehojakautumaksi sisältää kolme muokkausvaihetta. Aluksi suorakaidekäytävän kuvalähdetaso muunnetaan pinta-alaltaan samansuuruisen neliön muotoisen käytävän kuvalähdetasoksi. Seuraavaksi neliön muotoisen käytävän kuvalähdetason samanarvoiset kuvalähteet siirretään koordinaattiakselille diskreetiksi kuvalähdejonoiksi. Lopuksi kuvalähdejono muunnetaan jatkuvaksi äänitehojakautumaksi. Jokainen muokkausvaihe aiheuttaa poikkeaman alkuperäisen suorakaiteen muotoisen käytävän vastaanottopisteiden äänenpainetasoihin. Poikkeamien suuruudet riippuvat käytävän absorptiokertoimesta sekä vastaanottopisteen etäisyydestä todellisesta äänilähteestä. Seuraavassa kuvalähteiden äänenpainetasoerolla ( $\Delta l$ ) tarkoitetaan kahden eri äänitehojakautuman samanarvoisten (sama kertaluku  $n$ ) kuvalähteiden äänenpainetason erotusta vastaanottopisteessä. Kuvalähteiden kumulatiivisella poikkeamalla ( $\Delta L$ ) tarkoitetaan kahden eri äänitehojakautuman kaikkien kuvalähteiden synnyttämän äänenpainetason erotusta vastaanottopisteessä. Kaikkien kolmen muokkausvaiheen kumulatiivisten poikkeamien ( $\Delta L$ ) summa on kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ).

Taulukoissa 1 - 8 on esitetty kuvalähteiden äänenpainetasot kuvalähteiden kertaluvuittain ( $n$ ) sekä muunnoksista johtuvat äänenpainetasoerot ( $\Delta l$ ) akustisesti erittäin kovan ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) ja erittäin pehmeän ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) käytävän vastaanottopisteissä, jotka ovat etäisyyksillä  $2H_o$  ja  $20H_o$  todellisesta äänilähteestä.  $H_o$  on neliön muotoisen käytävän sivumitta. Taulukoissa on myös kuvalähteiden äänenpainetasojen kumulatiivinen summa ja kumulatiivisen poikkeaman ( $\Delta L$ ) kehittyminen kertaluvun funktiona. Taulukoissa 1 - 4 on tutkittu käytävän vastaanottopisteeseen syntyvää samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoeroa ( $\Delta l$ ) kertaluvuittain ( $n$ ), kun suorakaiteen muotoinen kuvalähdetaso muunnetaan neliön muotoiseksi. Taulukoissa 5 - 8 on tutkittu äänenpainetasoeroa ( $\Delta l$ ), kun neliön muotoinen kuvalähdetaso siirretään koordinaattiakselille äänitehojonoksi. Sivujen 92, 93 ja 94 taulukoissa 9, 10 ja 11 on esitetty pitkän käytävän vastaanottopisteiden eri laskentavai-

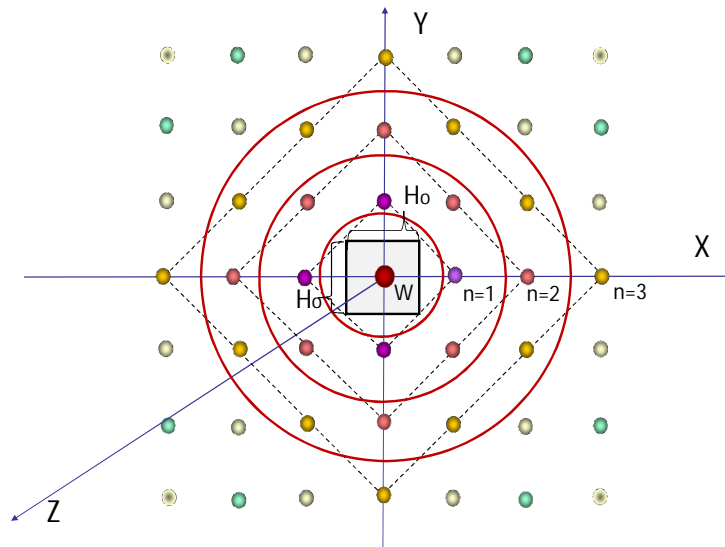
heidien kumulatiiviset poikkeamat ( $\Delta L$ ) sekä kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) kolmella absorptiokertoimen arvolla ilman väliaineen vaimennusta ja suoraa ääntä.

#### 4.1.1 Suorakaiteen kuvalähdetason muunto neliön muotoiseksi

Tarkastellaan suorakaiteen ( $h \times l$ ) muotoista käytävää, jonka poikkileikkauksen suuremman dimension suhde pienempään on enintään 1,5. Muunnetaan käytävä pinta-alaltaan alkuperäisen kanssa yhtä suureksi neliön muotoiseksi ( $H_o \times H_o$ ) käytäväksi.

Suorakaiteen muotoisen käytävän muunnossa neliön muotoiseksi kuvalähteet sekä loittonevat kauemmas että siirtyvät lähemmäs suorakaiteen koordinaatti-akseleita. Kun vastaanottopisteen etäisyys todellisesta äänilähteestä on kaksi kertaa neliön muotoisen käytävän korkeus ( $2H_o$ ) tai suurempi, ovat neliön muotoisen käytävän samanarvoisten kuvalähteiden vastaanottopisteissä synnyttämät äänenpainetasot suuremmat kuin suorakaiteen muotoisen käytävän. Kuvalähteiden kertaluvusta  $n=2$  alkaen käytävän samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) pienenee ja lähestyy nollaa, kun kertaluku  $n$  kasvaa. Kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) pienenee sitä voimakkaammin, mitä pienempi käytävän absorptiokerroin on, taulukot 1 ja 2.

Kaukana äänilähteestä olevassa vastaanottopisteessä ( $20H_o$ ) äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) ja kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) kasvavat aluksi kertaluvun suuretessa. Akustisesti kovassa käytävässä ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) ja kumulatiivinen poikkeaman ( $\Delta L$ ) kasvu pysähtyy pian sen jälkeen, kun alkuperäisen kuvalähdetason samanarvoisten kuvalähteiden ( $n=21$ ) äänenpainetaso on saavuttanut maksimiarvon. Kumulatiivinen poikkeaman itseisarvo ( $\Delta L$ ) pienenee sitä voimakkaammin, mitä suurempi käytävän absorptiokerroin on, taulukot 3 ja 4.



**Kuva 28.** Neliön muotoisen käytävän samanarvoiset kuvalähteet  $n=1,2,3$ .

**Taulukko 1.** Suorakaiteen ja neliömuotoisten käytävän samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot, kumulatiivinen summa sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $2H_0$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,01$ , väliaineen vaimennus  $m=0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz}=100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	suorakaidekäytävä $h \times l$ 2 m x 3 m		neliökäytävä $H_0 \times H_0$ 2,45 m x 2,45 m		kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)
	äänenpainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)	äänenpainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)		
1	80,02918	80,02918	80,07123	80,07123	0,0420456	0,0420456
2	81,63507	83,91624	81,70220	83,97313	0,0671310	0,0568924
3	81,73687	85,97215	81,80145	86,03194	0,0645752	0,0597992
4	81,38025	87,26706	81,43330	87,32512	0,0530471	0,0580597
5	80,88377	88,16601	80,92534	88,22099	0,0415649	0,0549774
6	80,35831	88,83174	80,39084	88,88354	0,0325241	0,0517960
7	79,84409	89,34810	79,86987	89,39698	0,0257797	0,0488815
8	79,35499	89,76265	79,37575	89,80898	0,0207596	0,0463333
9	78,89463	90,10445	78,91164	90,14857	0,0170059	0,0441208
10	78,46262	90,39228	78,47675	90,43449	0,0141296	0,0422058
100	64,84016	93,74924	64,84032	93,77071	0,0001526	0,0214615
200	57,46750	93,99804	57,46746	94,01833	0,0000381	0,0202866
300	51,34219	94,04843	51,34221	94,06853	0,0000153	0,0200958
400	45,70518	94,06162	45,72816	94,08176	0,0000076	0,0201416
500	40,37134	94,06181	40,39433	94,08177	0,0000076	0,0199585

**Taulukko 2.** Suorakaiteen ja neliönmuotoisten käytävän samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot, kumulatiivinen summa sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $2H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,5$ , väliaineen vaimennus  $m=0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz}=100$  dB

kuvalähteen kertaluku (n)	suorakaidekäytävä $h \times l$ 2 m x 3 m		neliökäytävä $H_o \times H_o$ 2,45 m x 2,45 m		kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)
	äänenpainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)	äänenpainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)		
1	77,06253	77,06253	77,10458	77,10458	0,0420456	0,0420456
2	75,70177	79,44553	75,76890	79,49818	0,0671310	0,0526581
3	72,83691	80,30322	72,90149	80,35802	0,0645752	0,0547943
4	69,51364	80,65102	69,56669	80,70567	0,0530472	0,0546569
5	66,05051	80,79903	66,09208	80,85326	0,0415649	0,0542221
6	62,55841	80,86367	62,59093	80,91757	0,0325203	0,0539017
7	59,07753	80,89236	59,10330	80,94608	0,0257759	0,0537186
8	55,62177	80,90524	55,64253	80,95886	0,0207596	0,0536194
9	52,19477	80,91109	52,21177	80,96465	0,0169980	0,0535660
10	48,79610	80,91375	48,81023	80,96730	0,0141344	0,0535507
20	15,91236	80,91604	15,91621	80,96957	0,0038471	0,0535278
24	3,103482	80,91604	3,106177	80,96957	0,0026956	0,0535278
100	-231,82	80,91604	-231,82	80,96957	0	0,0535278

**Taulukko 3.** Suorakaiteen ja neliönmuotoisten käytävän samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot, kumulatiivinen summa sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $20H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,01$ , väliaineen vaimennus  $m=0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz}=100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	suorakaidekäytävä $h \times l$ 2 m x 3 m		neliökäytävä $H_o \times H_o$ 2,45 m x 2,45 m		kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)
	äänenpainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)	äänenpainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)		
1	60,99417	60,99417	60,99503	60,99503	0,0008621	0,0008621
2	63,93842	65,72146	63,93842	65,72343	0,0025482	0,0019760
3	65,61867	68,68066	65,62393	68,68427	0,0052643	0,0036011
4	66,77327	70,84115	66,78214	70,84682	0,0088730	0,0056763
5	67,63409	72,53746	67,64732	72,54558	0,0132217	0,0081177
6	68,30491	73,92791	68,32302	73,93877	0,0181122	0,0108566
7	68,84152	75,10062	68,86487	75,11443	0,0233460	0,0138168
8	69,27763	76,10997	69,30638	76,12688	0,0287476	0,0169144
9	69,63536	76,99198	69,66950	77,01207	0,0341415	0,0200882
10	69,93008	77,77185	69,96947	77,79511	0,0393829	0,0232620
20	70,99899	82,50939	71,06812	82,55707	0,0691223	0,0476761
21	71,00021	82,80584	71,06995	82,85499	0,0697403	0,0491486
22	70,99054	83,08275	71,06059	83,13319	0,0700531	0,0504379
100	64,54390	88,65575	64,55742	88,70093	0,0135193	0,0451813
200	57,39120	89,38509	57,39487	89,42458	0,0036659	0,0394974
300	51,30811	89,5275	51,30976	89,56580	0,0016556	0,0382919
400	45,70895	89,56358	45,70988	89,60162	0,0009346	0,0380325
500	40,38202	89,57401	40,38262	89,61194	0,0006027	0,0379257

**Taulukko 4.** Suorakaiteen ja neliönmuotoisten käytävän samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot, kumulatiivinen summa sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $20H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,5$ , väliaineen vaimennus  $m=0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz}=100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	suorakaidekäytävä $h \times l$ 2 m x 3 m		neliökäytävä $H_o \times H_o$ 2,45 m x 2,45 m		kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)
	äänepainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)	äänepainetaso (dB)	kumulatiivinen summa (dB)		
1	58,02752	58,02752	58,02838	58,02838	0,0008621	0,0008621
2	58,00511	61,02663	58,00766	61,02833	0,0025482	0,0017014
3	56,71871	62,39655	56,72397	62,39922	0,0052643	0,0026703
4	54,90666	63,10890	54,91554	63,11251	0,0088806	0,0036048
5	52,80083	63,49571	52,81406	63,50013	0,0132217	0,0044250
6	50,50500	63,70853	50,52311	63,71362	0,0181122	0,0050850
7	48,07496	63,82563	48,09831	63,83120	0,0233498	0,0055695
8	45,54442	63,88968	45,57317	63,89558	0,0287514	0,0059090
9	42,93549	63,92440	42,96963	63,93053	0,0341415	0,0061340
10	40,26357	63,94305	40,30295	63,94933	0,0393829	0,0062790
20	11,66596	63,96389	11,73508	63,97037	0,0691214	0,0064774
23	2,738241	63,96392	2,808317	63,97039	0,0700767	0,0064774
50	-79,3775	63,96392	-79,3372	63,97039	-0,0403000	0,0064774
100	-232,121	63,96392	-232,108	63,97039	-0,0130000	0,0064774

### Yhteenveto

Kun vastaanottopisteen etäisyys todellisesta äänilähteestä on  $\geq 2H_o$ , antavat suorakaiteesta neliön muotoon muunnetut kuvalähteet vastaanottopisteeseen aina suuremman äänenpainetason kuin alkuperäisen suorakaiteen muotoisen käytävän kuvalähteet. Akustisesti erittäin kovassa ( $\bar{\alpha}=0,01$ ) käytävässä muunnosta aiheutuva kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) ilman väliaineen vaimennusta ja suoraa ääntä suurenee, kun matkan äänilähteestä kasvaa. Käytävän alkupäässä ( $2H_o$ ) kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on 0,020 desibeliä ja loppupäässä ( $40H_o$ ) se on 0,045 desibeliä. Akustisesti erittäin pehmeässä ( $\bar{\alpha}=0,5$ ) käytävässä kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) pienenee matkan äänilähteestä kasvaessa. Käytävän alkupäässä ( $2H_o$ ) kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on 0,053 desibeliä, ja loppupäässä ( $40H_o$ ) se on 0,002 desibeliä. Aina etäisyydelle noin  $7H_o$  asti akustisesti pehmeän käytävän kumulatiiviset poikkeamat ( $\Delta L$ ) ovat suuremmat kuin kovan käytävän, taulukot 9 ja 11.

#### 4.1.2 Neliön kuvalähdetason siirto kuvalähdejonoksi koordinaattiakselille

Tarkastellaan neliön muotoisen kuvalähdetason ja koordinaattiakselille siirrettyjen samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoeroja ( $\Delta I$ ) ja äänenpainetasojen kumulatiivisia poikkeamia ( $\Delta L$ ) käytävän vastaanottopisteissä. Akustisesti erittäin kovassa ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) käytävässä koordinaattiakselille siirrettyjen samanarvoisten kuvalähteiden äänitehojonon maksimikohta on korkealla koordinaattiakselilla, kaukana origosta. Kun käytävän absorptiokerroin kasvaa, äänitehojonon maksimikohta siirtyy lähemmäs origoa, yhtälö 63. Kuvalähteiden siirrosta aiheutuva äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) riippuu vastaanottopisteen etäisyyden ( $a$ ) ja käytävän korkeuden ( $H_o$ ) suhteesta ( $a/H_o$ ). Äänenpainetasojen kumulatiivisten poikkeamien ( $\Delta L$ ) suuruus riippuu edellisen lisäksi käytävän absorptiokertoimesta. Kuvalähteiden siirrosta aiheutunut kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) vastaanottopisteissä on positiivinen, eli koordinaattiakselille siirretyt kuvalähteet antavat vastaanottopisteissä suurempia arvoja kuin alkuperäiset kuvalähteet.

Käytävän todellista äänilähdettä lähellä ( $2H_o$ ) oleviin vastaanottopisteisiin kuvalähteistä saapuvat äänisäteet ovat keskenään hyvin eripituisia. Akustisesti erittäin pehmeällä ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) käytävällä, jossa äänitehojonon maksimikohta on matalalla, ensimmäisten kertalukujen kuvalähteistä tulevat äänisäteet määräävät vastaanottopisteen äänenpainetason, taulukko 6. Tämän vuoksi erittäin kovassa ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) käytävässä, todellisen äänilähteen läheisyydessä, kuvalähteiden siirrosta akselille aiheutunut kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on pienempi kuin akustisesti pehmeässä käytävässä. Kuvalähteiden äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) käytävän alkupään pisteissä pienenee aluksi kertaluvun  $n$  kasvaessa. Tietyn kertaluvun  $n$  jälkeen alkuperäisen kuvalähdetason samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetaso vastaanottopisteessä on suurempi kuin koordinaattiakselille siirrettyjen samanarvoisten kuvalähteiden. Äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) on tästä kertaluvusta  $n$  eteenpäin negatiivinen ja sen itseisarvo kasvaa, taulukot 5 ja 6.

Käytävän keskellä ( $20H_o$ ) oleviin vastaanottopisteisiin kuvalähteistä saapuvat merkitsevät äänisäteet ovat keskenään lähes samanpituisia. Kuvalähteiden siirron vaikutuksesta samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) ja kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) eivät pienenekään kertaluvun  $n$  suuretessa, kuten lähellä to-

dellista äänilähdettä, vaan ne kasvavat. Akustisesti erittäin kovassa käytävässä ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) äänenpainetasoero ( $\Delta I$ ) ja kumulatiivinen poikkeaman ( $\Delta L$ ) kasvu pysähtyy pian sen jälkeen, kun alkuperäisen kuvalähdetason samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetaso vastaanottopisteessä on saavuttanut maksimiarvon. Tämän jälkeen ero ( $\Delta I$ ) on negatiivinen. Äänenpainetasojen kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) kasvaa sitä voimakkaammin, mitä pienempi käytävän absorptiokerroin on, taulukot 7 ja 8.

### **Yhteenveto**

Akustisesti erittäin kovassa ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) käytävässä neliönmuotoisen kuvalähdetason samanarvoisten kuvalähteiden siirrosta koordinaattiakselille ilman väliaineen vaimennusta ja suoraa ääntä aiheutuva suurin kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on 0,036 desibeliä käytävän alkupäässä ( $2H_0$ ). Kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) pienenee aluksi matkan äänilähteestä kasvaessa, jonka jälkeen se on lähes vakio, kunnes kasvaa käytävän loppupäähän ( $40H_0$ ) mennessä, jossa se on 0,019 desibeliä. Pienin kumulatiivinen poikkeaman ( $\Delta L$ ) on 0,011 desibeliä etäisyydellä noin  $13H_0$  äänilähteestä.

Akustisesti erittäin pehmeässä ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) käytävässä kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) pienenee, kun matka äänilähteestä kasvaa. Käytävän alkupäässä ( $2H_0$ ) kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on 0,213 desibeliä, ja loppupäässä ( $40H_0$ ) se on 0,002 desibeliä. Aina etäisyydelle  $14H_0$  asti akustisesti pehmeän käytävän kumulatiiviset poikkeamat ( $\Delta L$ ) ovat suuremmat kuin kovan käytävän, taulukot 9 ja 11.



**Taulukko 5.** Käytävän ( $H_o \times H_o = 2,5 \times 2,5$  m) kuvalähdetason ja koordinaattiakselin samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $2H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,01$ , väliaineen vaimennus  $m = 0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	neliömäisen kuvalähdetason äänenpainetaso (dB)	akselin kuvalähdejonon äänenpainetaso (dB)	kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	$\bar{R}_n/R_n$ etäisyysk-sien suhde
1	80,03635	80,36086	0,32451	0,3245163	1
2	81,63126	81,82365	0,19239	0,2469482	0,9330127
3	81,69757	81,81546	0,11789	0,1990128	0,8880336
4	81,30718	81,38060	0,07342	0,1672897	0,8619792
5	80,78488	80,83085	0,04597	0,1451492	0,8466418
6	80,24100	80,26925	0,02825	0,1289749	0,8371440
7	79,71366	79,73001	0,01635	0,1166840	0,8309492
8	79,21510	79,22314	0,00804	0,1070709	0,8267202
9	78,74778	78,74983	0,00205	0,0993423	0,8237195
10	78,31052	78,30812	-0,00240	0,0929947	0,8215201
20	75,07487	75,05730	-0,01757	0,0623856	0,8141740
100	64,66315	64,64037	-0,02278	0,0341797	0,8117160
200	57,29025	57,26730	-0,02295	0,0310516	0,8116388
1-100	93,62074	93,65492	0,03418	-	-
1-200	93,86686	93,89791	0,03105	-	-
1-300	93,91673	93,94717	0,03044	0,0304413	-
1-400	93,92977	93,95975	0,02998	0,0299835	-

$\bar{R}_n/R_n$  on samanarvoisten kuvalähteiden todellisesta äänilähteestä mitattujen etäisyysk-sien keskiarvon suhde koordinaattiakselilla olevaan vastaavaan kuvalähteen etäisyyteen todellisesta äänilähteestä

**Taulukko 6.** Käytävän ( $H_o \times H_o = 2,5 \times 2,5$  m) kuvalähdetason ja koordinaattiakselin samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $2H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,5$ , väliaineen vaimennus  $m = 0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	neliömäisen kuvalähdetason äänenpainetaso (dB)	akselin kuvalähdejonon äänenpainetaso (dB)	kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	$\bar{R}_n/R_n$ etäisyysk-sien suhde
1	77,06969	77,39421	0,3245163	0,3245163	1
2	75,69796	75,89035	0,1923904	0,2692947	0,9330127
3	72,79762	72,79762	0,1178894	0,2427597	0,8880336
4	69,44057	69,51399	0,0734177	0,2301407	0,8619792
5	65,95162	65,99759	0,0459671	0,2242126	0,8466418
6	62,44108	62,46934	0,0282555	0,2214508	0,8371440
7	58,94710	58,96345	0,0163460	0,2201614	0,8309492
8	55,48189	55,48993	0,0080414	0,2195663	0,8267202
9	52,04791	52,04996	0,0020485	0,2192917	0,8237195
10	48,64399	48,64160	-0,0023921	0,2191620	0,8215201
20	15,7418	15,72426	-0,0175743	0,2190475	0,8141740
50	-78,48553	-78,5076	-0,0221176	0,2190475	0,8120263
100	-232,002	-232,025	-0,0227814	0,2190475	0,8117160
1-100	80,89999	81,11903	0,21904	0,2190475	-

$\bar{R}_n/R_n$  on samanarvoisten kuvalähteiden todellisesta äänilähteestä mitattujen etäisyysk-sien keskiarvon suhde koordinaattiakselilla olevaan vastaavaan kuvalähteen etäisyyteen todellisesta äänilähteestä

**Taulukko 7.** Käytävän ( $H_o \times H_o = 2,5 \times 2,5$  m) kuvalähdetason ja koordinaattiakselin samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $20H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,01$ , väliaineen vaimennus  $m = 0$ , äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	neliömäisen kuvalähdetason äänenpainetaso (dB)	akselin kuvalähdejonon äänenpainetaso (dB)	kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	$\check{R}_n/R_n$ etäisyyksien suhde
1	60,99460	60,99850	0,00390	0,0039024	1
2	63,93967	63,94439	0,00472	0,0044403	0,9987608
3	65,62123	65,62727	0,00604	0,0052338	0,9967321
4	66,77751	66,78532	0,00781	0,0062409	0,9939657
5	67,64027	67,65022	0,00995	0,0074463	0,9905299
6	68,31312	68,32550	0,01238	0,0088043	0,9865053
7	68,85172	68,86674	0,01502	0,0102768	0,9819794
8	69,28965	69,30741	0,01776	0,0118256	0,9770439
9	69,64891	69,66943	0,02052	0,0134354	0,9717895
10	69,94479	69,96803	0,02324	0,0150452	0,9663032
20	70,99961	71,03799	0,03838	0,0275879	0,9121879
25	70,88979	70,92699	0,0372	0,0302887	0,8913593
50	68,85509	68,86669	0,0116	0,0276642	0,8409408
100	64,39118	64,37980	-0,01138	0,0184174	0,8199328
200	57,22049	57,20065	-0,01984	0,0132370	0,8137657
1-100	88,59386	88,61228	0,01842	-	-
1-200	89,30783	89,32107	0,01324	-	-
1-300	89,44719	89,45937	0,01218	0,012177	-
1-400	89,48252	89,49446	0,01194	0,0119400	-

$\check{R}_n/R_n$  on samanarvoisten kuvalähteiden todellisesta äänilähteestä mitattujen etäisyyksien keskiarvon suhde koordinaattiakselilla olevaan vastaavaan kuvalähteen etäisyyteen todellisesta äänilähteestä

**Taulukko 8.** Käytävän ( $H_o \times H_o = 2,5 \times 2,5$  m) kuvalähdetason ja koordinaattiakselin samanarvoisten kuvalähteiden ( $W\beta^n$ ) äänenpainetasot sekä samanarvoisten kuvalähteiden äänenpainetasoero ja kumulatiivinen poikkeama ilman suoraa ääntä vastaanottopisteessä, jonka etäisyys äänilähteestä on  $20H_o$ . Käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,5$ , väliaineen vaimennus  $m = 0$  ja äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

kuvalähteen kertaluku (n)	neliömäisen kuvalähdetason äänenpainetaso (dB)	akselin kuvalähdejonon äänenpainetaso (dB)	kuvalähteiden äänenpainetasoero $\Delta l$ (dB)	kuvalähteiden kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	$\check{R}_n/R_n$ etäisyyksien suhde
1	58,02795	58,03185	0,00390	0,0039024	1
2	58,00637	58,01109	0,00472	0,0043106	0,9987608
3	56,72127	56,72731	0,00604	0,0047760	0,9967321
4	54,91090	54,91871	0,00781	0,0052338	0,9939657
5	52,80701	52,81696	0,00995	0,0056381	0,9905299
6	50,51320	50,52559	0,01239	0,0059624	0,9865053
7	48,08515	48,10017	0,01502	0,0062027	0,9819794
8	45,55643	45,57420	0,01777	0,0063705	0,9770439
9	42,94904	42,96957	0,02053	0,0064850	0,9717895
10	40,27827	40,30151	0,02324	0,0065575	0,9663032
20	11,66657	11,70495	0,03838	0,0066681	0,9121879
1-100	63,96687	63,97354	0,00667	0,0066719	-

$\check{R}_n/R_n$  on samanarvoisten kuvalähteiden todellisesta äänilähteestä mitattujen etäisyyksien keskiarvon suhde koordinaattiakselilla olevaan vastaavaan kuvalähteen etäisyyteen todellisesta äänilähteestä

#### 4.1.3 Kuvalähdejonon muunto jatkuvaksi äänitehojakautumaksi

Neliön muotoisella käytävällä olevan todellisen äänilähteen samanarvoiset kuvalähteet siirrettiin positiiviselle koordinaattiakselille, jolloin akselille syntyi ääretön kuvalähdejono  $4nW\beta^n$ . Kuvalähdejonon kaavassa kokonaislukutekijä  $n$  käy yhdestä äärettömään. Akselin diskreettien kuvalähdejonon äänitehot on muutettu jatkuvaksi äänitehojakautumaksi levittämällä kunkin kuvalähteen ääniteho matkalle  $H=0,8H_o$ , jossa  $H_o$  on käytävän redusoitu korkeus. Diskreetti äänitehojakautuma  $4nW\beta^n$  on korvattu jatkuvalla äänitehokäyrällä:

$$y = Bx\beta^{\frac{x}{H}} \quad (50)$$

$$\text{jossa } B = \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \quad (60)$$

Diskreetin kuvalähdejonon ja jatkuvan äänitehojakautuman vastaanottopisteisiin synnyttämän äänenpainetason eron suuruus riippuu käytävän absorptiokertoimesta ja etäisyydestä äänilähteeseen. Suurin ero jatkuvan jakautuman ja pistejakautuman välillä oli pehmeässä käytävissä lähellä todellista äänilähdettä.

#### Yhteenveto

Kuvalähteiden jatkuva äänitehojakautuma antaa käytävän vastaanottopisteissä suurempia arvoja kuin kuvalähdejono. Akustisesti erittäin kovan ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) käytävän alkupäässä kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) ilman väliaineen vaimennusta ja suoraa ääntä on 0,018 desibeliä ja loppupäässä 0,008 desibeliä. Kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) pienenee aluksi, kun matka äänilähteestä kasvaa, jonka jälkeen se on lähes vakio, kunnes kasvaa käytävän loppupäähän ( $40H_o$ ) mennessä. Pienin kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on 0,003 desibeliä etäisyydellä noin  $10H_o$  äänilähteestä.

Akustisesti erittäin pehmeässä ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) käytävässä kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) pienenee, kun matka äänilähteestä kasvaa. Lähellä äänilähdettä ( $2H_o$ ) kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on 0,162 desibeliä ja käytävän päädyssä ( $40H_o$ ) 0,001 desibeliä. Akustisesti pehmeässä käytävässä kumulatiivinen poikkeama ( $\Delta L$ ) on suurempi kuin kovassa käytävässä, kun tarkkailuetäisyys on pienempi kuin  $20H_o$  äänilähteestä, taulukot 9 ja 11.

**Taulukko 9.** JÄKÄLA-algoritmin kolmen muunnosvaiheen kumulatiiviset poikkeamat ( $\Delta L$ ) ja kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) verrattuna AKURI-ohjelman tuloksiin. Ideaalikäytävän mitat (6×9×300 m), absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,01$  ja väliaineen väimennus  $m = 0$ , ei suoraa ääntä. Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), suorakaide 6.0 x 9.0 m	AKURI (dB), neliö 7.35 x 7.35 m	AKURI, neliön ja suorakaiteen kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	AKSELI (dB) kuva-lahteet akselilla	AKSELI:n ja neliö AKURIN kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMO (dB), jatkuva jakautuma	NUMOn ja AKSELI:n kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMOn ja neliö AKURIN kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMOn ja suorakaide AKURIN kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) dB
2H <sub>0</sub> ~15	84,516	84,536	0,020	84,572	0,036	84,590	0,018	0,054	0,074
20	84,136	84,157	0,021	84,178	0,021	84,190	0,012	0,033	0,054
25	83,809	83,831	0,022	83,847	0,016	83,856	0,009	0,025	0,047
4H <sub>0</sub> ~30	83,522	83,546	0,024	83,559	0,013	83,566	0,007	0,02	0,044
35	83,266	83,290	0,024	83,303	0,013	83,308	0,005	0,018	0,042
40	83,032	83,058	0,026	83,070	0,012	83,075	0,005	0,017	0,043
6H <sub>0</sub> ~45	82,817	82,844	0,027	82,856	0,012	82,860	0,004	0,016	0,043
50	82,618	82,645	0,027	82,657	0,012	82,661	0,004	0,016	0,043
55	82,431	82,459	0,028	82,471	0,012	82,475	0,004	0,016	0,044
8H <sub>0</sub> ~60	82,254	82,284	0,030	82,296	0,012	82,300	0,004	0,016	0,046
65	82,087	82,117	0,030	82,130	0,013	82,134	0,004	0,017	0,047
70	81,929	81,959	0,030	81,972	0,013	81,976	0,004	0,017	0,047
10H <sub>0</sub> ~75	81,777	81,808	0,031	81,822	0,014	81,825	0,003	0,017	0,048
80	81,632	81,664	0,032	81,678	0,014	81,681	0,003	0,017	0,049
85	81,493	81,525	0,032	81,539	0,014	81,543	0,004	0,018	0,050
12H <sub>0</sub> ~90	81,359	81,391	0,032	81,406	0,015	81,410	0,004	0,019	0,051
95	81,232	81,266	0,034	81,277	0,011	81,281	0,004	0,015	0,049
100	81,107	81,141	0,034	81,153	0,012	81,156	0,003	0,015	0,049
20H <sub>0</sub> ~150	80,027	80,065	0,038	80,081	0,016	80,086	0,005	0,021	0,059
200	79,155	79,196	0,041	79,215	0,019	79,221	0,006	0,025	0,066
250	78,41	78,453	0,043	78,474	0,021	78,481	0,007	0,028	0,071
40H <sub>0</sub> ~300	77,755	77,800	0,045	77,819	0,019	77,827	0,008	0,027	0,072

**Taulukko 10.** JÄKÄLA-algoritmin kolmen muunnosvaiheen poikkeamat ( $\Delta L$ ) ja kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) verrattuna AKURI-ohjelman tuloksiin. Ideaalikäytävän mitat (6×9×300 m), absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,1$  ja väliaineen vaimennus  $m = 0$ , ei suoraa ääntä. Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

Vastaanottoisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), suorakaide 6.0 x 9.0 m	AKURI (dB), neliö 7.35 x 7.35 m	AKURI, neljän ja suorakaiteen kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	AKSELI (dB) kuvaalahteet aksella	AKSELI ja neljä AKURIn kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMO (dB), jatkuva jakautuma	NUMOn ja AKSELIin kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMOn ja neljä AKURIn kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMOn ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) dB
2H <sub>0</sub> ~15	79,767	79,807	0,040	79,898	0,091	79,946	0,048	0,139	0,179
20	78,926	78,968	0,042	79,034	0,066	79,065	0,031	0,097	0,139
25	78,192	78,236	0,044	78,289	0,053	78,312	0,023	0,076	0,120
4H <sub>0</sub> ~30	77,537	77,582	0,045	77,628	0,046	77,646	0,018	0,064	0,109
35	76,942	76,989	0,047	77,030	0,041	77,045	0,015	0,056	0,103
40	76,397	76,445	0,048	76,483	0,038	76,495	0,012	0,05	0,098
6H <sub>0</sub> ~45	75,891	75,939	0,048	75,976	0,037	75,986	0,010	0,047	0,095
50	75,418	75,467	0,049	75,502	0,035	75,511	0,009	0,044	0,093
55	74,974	75,024	0,050	75,057	0,033	75,065	0,008	0,041	0,091
8H <sub>0</sub> ~60	74,554	74,604	0,050	74,637	0,033	74,644	0,007	0,04	0,090
65	74,156	74,206	0,050	74,239	0,033	74,245	0,006	0,039	0,089
70	73,778	73,828	0,050	73,859	0,031	73,865	0,006	0,037	0,087
10H <sub>0</sub> ~75	73,416	73,466	0,050	73,497	0,031	73,502	0,005	0,036	0,086
80	73,070	73,119	0,049	73,150	0,031	73,155	0,005	0,036	0,085
85	72,737	72,787	0,050	72,817	0,030	72,821	0,004	0,034	0,084
12H <sub>0</sub> ~90	72,418	72,467	0,049	72,496	0,029	72,500	0,004	0,033	0,082
95	72,110	72,159	0,049	72,188	0,029	72,191	0,003	0,032	0,081
100	71,813	71,861	0,048	71,890	0,029	71,893	0,003	0,032	0,080
20H <sub>0</sub> ~150	69,293	69,336	0,043	69,361	0,025	69,363	0,002	0,027	0,070
200	67,329	67,367	0,038	67,388	0,021	67,389	0,001	0,022	0,060
250	65,714	65,746	0,032	65,764	0,018	65,765	0,001	0,019	0,051
40H <sub>0</sub> ~300	64,341	64,369	0,028	64,384	0,015	64,385	0,001	0,139	0,044

**Taulukko 11.** JÄKÄLA-algoritmin kolmen muunnosvaiheen poikkeamat ( $\Delta L$ ) ja kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) verrattuna AKURI-ohjelman tuloksiin. Ideaalikäytävän mitat (6×9×300 m), absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,5$  ja väliaineen vaimennus  $m = 0$ , ei suoraa ääntä. Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), suorakaide 6.0 x 9.0 m	AKURI (dB), neliö 7.35 x 7.35 m	AKURI, nelion ja suorakaiteen kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	AKSELI (dB) kuvialähteet akselilla	AKSELI:n ja neliö AKURI:n kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMO (dB), jatkuva jakautuma	NUMO:n ja AKSELI:n kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMO:n ja neliö AKURI:n kumulatiivinen poikkeama $\Delta L$ (dB)	NUMO:n ja suorakaide AKURI:n kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) dB
2H <sub>0</sub> ~15	71,374	71,427	0,053	71,640	0,213	71,802	0,162	0,375	0,428
20	69,746	69,796	0,050	69,94	0,144	70,045	0,105	0,249	0,299
25	68,351	68,397	0,046	68,503	0,106	68,578	0,075	0,181	0,227
4H <sub>0</sub> ~30	67,133	67,175	0,042	67,258	0,083	67,314	0,056	0,139	0,181
35	66,055	66,093	0,038	66,159	0,066	66,204	0,045	0,111	0,149
40	65,087	65,122	0,035	65,177	0,055	65,213	0,036	0,091	0,126
6H <sub>0</sub> ~45	64,211	64,242	0,031	64,289	0,047	64,318	0,029	0,076	0,107
50	63,410	63,438	0,028	63,478	0,040	63,503	0,025	0,065	0,093
55	62,673	62,698	0,025	62,733	0,035	62,754	0,021	0,056	0,081
8H <sub>0</sub> ~60	61,990	62,014	0,024	62,044	0,030	62,062	0,018	0,048	0,072
65	61,355	61,376	0,021	61,403	0,027	61,418	0,015	0,042	0,063
70	60,761	60,780	0,019	60,804	0,024	60,818	0,014	0,038	0,057
10H <sub>0</sub> ~75	60,203	60,221	0,018	60,242	0,021	60,254	0,012	0,033	0,051
80	59,678	59,694	0,016	59,713	0,019	59,724	0,011	0,030	0,046
85	59,181	59,196	0,015	59,214	0,018	59,223	0,009	0,027	0,042
12H <sub>0</sub> ~90	58,710	58,725	0,015	58,740	0,015	58,749	0,009	0,024	0,039
95	58,263	58,276	0,013	58,291	0,015	58,298	0,007	0,022	0,035
100	57,837	57,849	0,012	57,862	0,013	57,869	0,007	0,020	0,032
20H <sub>0</sub> ~150	54,421	54,428	0,007	54,434	0,006	54,438	0,004	0,01	0,017
200	51,963	51,967	0,004	51,971	0,004	51,973	0,002	0,006	0,010
250	50,044	50,047	0,003	50,049	0,002	50,051	0,002	0,004	0,007
40H <sub>0</sub> ~ 300	48,471	48,473	0,002	48,475	0,002	48,476	0,001	0,003	0,005

## 4.2 JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden tulosten vertailu AKURI-ohjelman tuloksiin teoreettisilla käytävillä

JÄKÄLA-laskenta-algoritmin numeerista NUMO-yhtälöä (76) sekä APPRO-likiarvoyhtälöä (83) testattiin aluksi teoreettisilla ideaalikäytävillä, joissa absorptiomateriaali oli tasaisesti jakautunut käytävän pinnoille. JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden antamia tuloksia verrattiin AKURI-ohjelmalla saatuihin arvoihin. Laskennassa käytetyn teoreettisten käytävän pituus oli 300 metriä ja poikkileikkauksen mitat ( $h \times l$ )  $6 \times 9$  metriä. Käytävän poikkileikkauksen keskipisteessä sijainneen äänilähteen ja sen kuvalähteiden käytävällä synnyttämät äänenpainetasot laskettiin viiden metrin välein matkalla 15 - 100 metriä ja viidenkymmenen metrin välein matkalla 150 - 300 metriä. Äänilähteen äänitehotaso ( $L_w$ ) oli 1 kHz:n oktaavikaisella 100 dB.

Taulukoissa 12, 13 ja 14 on esitetty AKURI-ohjelmalla sekä JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöillä lasketut äänenpainetasot käytävillä, joissa absorptiomateriaali on jakautunut tasaisesti. Äänenpainetasot on laskettu, kun käytävän keskimääräinen absorptiokerroin on erittäin pieni ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ), pieni ( $\bar{\alpha} = 0,1$ ) ja hyvin suuri ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ). Kaikissa tapauksissa on mukana suora ääni ja väliaineen vaimennus  $m = 0,001$ . Taulukoissa on myös esitetty NUMO- ja APPRO-yhtälöiden äänenpainetasojen kokonaispoikkeamat ( $\Sigma \Delta L$ ) AKURI-ohjelman arvoista.

### 4.2.1 Numeerinen NUMO -yhtälö

Suorakulmion muotoisessa ideaalikäytävässä NUMO-yhtälö antoi kaikissa tutkituissa tapauksissa AKURI-ohjelmaa suurempia arvoja. NUMOn ja AKURIn tulokset poikkesivat eniten käytävän alkupäässä äänilähdettä lähimpinä ( $2H_o$ ) olevissa vastaanottopisteissä. Akustisesti erittäin pehmeässä ( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) käytävässä äänitasojen kokonaispoikkeamat ( $\Sigma \Delta L$ ) olivat etäisyyksillä  $2H_o - 11H_o$  äänilähteestä suuremmat kuin erittäin kovassa ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) käytävässä. Äänenpainetasojen kokonaispoikkeamat ( $\Sigma \Delta L$ ) jäivät kaikissa tutkituissa vastaanottopisteissä alle puolen desibelin, taulukot 12, 13 ja 14.

NUMO-yhtälön ja AKURI-ohjelman vertailussa suurin äänenpainetasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma \Delta L$ ) oli 0,347 desibeliä akustisesti erittäin pehmeässä käytävässä

( $\bar{\alpha} = 0,5$ ) etäisyydellä  $2H_o$  todellisesta äänilähteestä. Pienin kokonaispoikkeama ( $\Sigma\Delta L$ ) oli 0,005 desibeliä samalla käytävällä etäisyydellä  $40H_o$  todellisesta äänilähteestä. Akustisesti erittäin kovassa käytävässä ( $\bar{\alpha} = 0,01$ ) äänitasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma\Delta L$ ) lähellä ( $2H_o$ ) todellista äänilähdettä oli desibelin sadasosa (0,070 dB). Kokonaispoikkeama oli pienimmillään (0,034 dB) etäisyydellä noin  $8H_o$  todellisesta äänilähteestä, jonka jälkeen se kasvoi arvoon 0,065 desibeliä, kun edetään käytävän päätyyn ( $40H_o$ ), taulukko 12. Kun käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} > 0,01$ , pienenee AKURI-ohjelman ja NUMO-yhtälön tulosten välinen kokonaispoikkeama ( $\Sigma\Delta L$ ) sitä nopeammin mitä suurempi absorptiokertoimen arvo on, kun matkan äänilähteestä kasvaa.

#### 4.2.2 Likiarvoyhtälö APPRO

Myös APPRO-yhtälön ja AKURI-ohjelman kokonaispoikkeamat ( $\Sigma\Delta L$ ) jäivät alle puolen desibelin kaikissa tutkituissa vastaanottopisteissä, taulukot 12, 13 ja 14. APPRO-yhtälön suurin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) oli 0,461 desibeliä noin  $27H_o$  metrin etäisyydellä äänilähteestä, kun käytävän absorptiokerroin oli hyvin pieni ( $\bar{\alpha}=0,01$ ). Akustisesti erittäin kovan käytävän ( $\bar{\alpha}=0,01$ ) alkupäässä APPRO-yhtälö antaa AKURia hieman suurempia tuloksia. Noin  $4H_o$  metrin jälkeen APPRO:n antamat arvot ovat AKURin arvoja pienemmät. APPRO:n ja AKURin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) kasvaa aina etäisyyteen  $27H_o$  asti, jonka jälkeen se taas pienenee, taulukko 12.

Akustisesti hyvin pehmeässä käytävässä ( $\bar{\alpha}=0,5$ ) APPRO:n ja AKURin suurin äänenpainetasojen kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) oli 0,338 desibeliä etäisyydellä  $2H_o$  todellisesta äänilähteestä. APPRO-yhtälö antaa AKURI-ohjelmaa suurempia arvoja aivan käytävän päätyä lukuun ottamatta. Pienin kokonaispoikkeaman ( $\Sigma\Delta L$ ) itseisarvo 0,002 desibeliä oli noin  $27H_o$  metrin etäisyydellä todellisesta äänilähteestä.



**Taulukko 12.** Tasainen absorptiojakautuma. Teoreettisen ideaalikäytävän (6×9×300 m) äänenpainetasot (dB) käytävän vastaanottopisteissä laskettuna AKURI-ohjelmalla sekä johdetun JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöillä, kun käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,01$  ja väliaineen vaimennus  $m = 0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1\text{kHz}} = 100$  dB. Suora ääni on mukana.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), suorakaide 6.0 x 9.0 m	NUMO (dB) jatkuva äänitehojakautuma	NUMOn ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama (ZAL) (dB)	APPRO* (dB), jatkuva äänitehojakautuma	Integroinnin yläraja $\theta_2$ (astetta)	APPRO* ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama (ZAL) (dB),
2H <sub>0</sub> ~15	83,912	83,982	0,070	84,198	90,0	0,286
20	83,446	83,496	0,050	83,648	90,0	0,202
25	83,054	83,095	0,041	83,167	90,0	0,113
4H <sub>0</sub> ~30	82,711	82,748	0,037	82,742	90,0	0,031
35	82,403	82,438	0,035	82,362	90,0	-0,041
40	82,122	82,157	0,035	82,020	90,0	-0,102
6H <sub>0</sub> ~45	81,863	81,898	0,035	81,709	90,0	-0,154
50	81,622	81,656	0,034	81,424	90,0	-0,198
55	81,395	81,429	0,034	81,161	90,0	-0,234
8H <sub>0</sub> ~60	81,181	81,215	0,034	80,916	90,0	-0,265
65	80,977	81,012	0,035	80,686	90,0	-0,291
70	80,782	80,817	0,035	80,470	90,0	-0,312
10H <sub>0</sub> ~75	80,595	80,631	0,036	80,265	90,0	-0,330
80	80,415	80,452	0,037	80,069	90,0	-0,346
85	80,242	80,280	0,038	79,882	90,0	-0,360
12H <sub>0</sub> ~90	80,074	80,113	0,039	79,702	90,0	-0,372
95	79,912	79,952	0,040	79,529	90,0	-0,383
100	79,755	79,795	0,040	79,362	90,0	-0,393
20H <sub>0</sub> ~150	78,377	78,426	0,049	77,926	90,0	-0,451
200	77,235	77,289	0,054	76,774	90,0	-0,461
250	76,233	76,292	0,059	75,806	90,0	-0,427
40H <sub>0</sub> ~ 300	75,328	75,393	0,065	74,964	90,0	-0,364

\*käyrä jaettu kolmeen osaan

**Taulukko 13.** Tasainen absorptiojakautuma. Teoreettisen ideaalikäytävän (6×9×300 m) äänenpainetasot (dB) käytävän vastaanottopisteissä laskettuna AKURI-ohjelmalla sekä johdetun JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöillä, kun käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,1$  ja väliaineen vaimennus  $m = 0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1\text{kHz}} = 100$  dB. Suora ääni on mukana.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), suorakaide 6,0 x 9,0 m	NUMO (dB) jatkuva äänitehojakautuma	NUMOn ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama (ΔZL) (dB)	APPRO (dB), jatkuva äänitehojakautuma	Integroinnin yläraja $\theta_2$ (astetta)	APPROn ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama (ΔZL) (dB),
2H <sub>0</sub> ~15	79,747	79,923	0,176	79,427	90	-0,320
20	78,828	78,967	0,139	78,940	90	0,112
25	78,041	78,161	0,120	78,151	85,5	0,110
4H <sub>0</sub> ~30	77,345	77,455	0,110	77,447	81,7	0,102
35	76,716	76,819	0,103	76,813	78,5	0,097
40	76,139	76,238	0,099	76,230	75,7	0,091
6H <sub>0</sub> ~45	75,604	75,701	0,097	75,695	73,3	0,091
50	75,105	75,199	0,094	75,190	71,1	0,085
55	74,635	74,728	0,093	74,722	69,2	0,087
8H <sub>0</sub> ~60	74,191	74,282	0,091	74,273	67,4	0,082
65	73,769	73,859	0,090	73,850	65,8	0,081
70	73,366	73,456	0,090	73,445	64,3	0,079
10H <sub>0</sub> ~75	72,981	73,070	0,089	73,064	63,0	0,083
80	72,612	72,700	0,088	72,692	61,7	0,080
85	72,258	72,344	0,086	72,335	60,5	0,077
12H <sub>0</sub> ~90	71,916	72,001	0,085	71,994	59,4	0,078
95	71,586	71,670	0,084	71,659	58,3	0,073
100	71,267	71,350	0,083	71,345	57,4	0,078
20H <sub>0</sub> ~150	68,534	68,608	0,074	68,599	49,8	0,065
200	66,360	66,425	0,065	66,418	44,8	0,058
250	64,536	64,593	0,057	64,583	41,1	0,047
40H <sub>0</sub> ~ 300	62,953	63,004	0,051	62,996	38,4	0,043

**Taulukko 14.** Tasainen absorptiojakautuma. Teoreettisen ideaalikäytävän (6×9×300 m) äänenpainetasot (dB) käytävän vastaanottopisteissä laskettuna AKURI-ohjelmalla sekä johdetun JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöillä, kun käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,5$  ja väliaineen vaimennus  $m = 0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), suorakaide 6.0 x 9.0 m	NUMO (dB) jatkuva äänitehojakautuma	NUMOn ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) (dB)	APPRO (dB), jatkuva äänitehojakautuma	Integroinnin yläraja $\theta_2$ (astetta)	APPROn ja suorakaide AKURIn kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) (dB),
2H <sub>0</sub> ~15	72,285	72,632	0,347	72,623	58,0	0,338
20	70,471	70,722	0,251	70,716	52,4	0,245
25	68,965	69,160	0,195	69,151	48,1	0,186
4H <sub>0</sub> ~30	67,671	67,829	0,158	67,82	44,7	0,149
35	66,535	66,666	0,131	66,657	41,9	0,122
40	65,520	65,632	0,112	65,626	39,6	0,106
6H <sub>0</sub> ~45	64,604	64,699	0,095	64,691	37,5	0,087
50	63,767	63,850	0,083	63,841	35,7	0,074
55	62,997	63,071	0,074	63,064	34,2	0,067
8H <sub>0</sub> ~60	62,285	62,350	0,065	62,343	32,8	0,058
65	61,621	61,679	0,058	61,671	31,5	0,050
70	61,000	61,052	0,052	61,045	30,4	0,045
10H <sub>0</sub> ~75	60,416	60,463	0,047	60,455	29,3	0,039
80	59,865	59,908	0,043	59,901	28,4	0,036
85	59,344	59,383	0,039	59,375	27,5	0,031
12H <sub>0</sub> ~90	58,849	58,885	0,036	58,877	26,7	0,028
95	58,377	58,411	0,034	58,403	26,0	0,026
100	57,928	57,958	0,030	57,951	25,3	0,023
20H <sub>0</sub> ~150	54,285	54,301	0,016	54,293	20,5	0,008
200	51,607	51,617	0,010	51,609	18,1	0,002
250	49,470	49,476	0,006	49,468	18,2	-0,002
40H <sub>0</sub> ~ 300	47,679	47,684	0,005	47,671	90	-0,008

### 4.2.3 Käytävät, joissa absorptiomateriaali on jakautunut epätasaisesti

AKURI-ohjelmalla tutkittiin myös epätasaisesti jakautuneen absorptiomateriaalin sekä äänilähteen sijainnin vaikutusta pitkän käytävän äänenpainetasoihin. AKURI-ohjelman tuloksia verrattiin NUMO-yhtälön antamiin arvoihin.

Laskennassa käytettiin kahta 300 metriä pitkää käytävää, joiden poikkipintojen ( $h \times l$ ) mitat olivat  $6 \times 9$  metriä ja  $9 \times 6$  metriä. Käytävien pinnat verhoiltiin erilaisilla absorptiomateriaaleilla siten, että keskimääräinen absorptiokerroin ( $\bar{\alpha}$ ) oli aina 0,125 tai 0,25. Kummassakin tapauksessa äänilähteen ja vastaanottopisteen oletettiin olevan käytävän keskilinjalla 1,5 metrin korkeudella lattiasta. Äänilähteen sijainnin vaikutusta tutkittaessa äänilähde sijoitettiin laskennassa myös käytävän poikkipinnan keskipisteeseen.

Aluksi absorptiomateriaalin oletettiin jakautuvan tasaisesti ääntä heijastaville pinnoille. Seuraavaksi materiaali jaettiin siten, että yksi pinta oli vaimennettu ja kolme muuta olivat erittäin kovia ( $\alpha=0,01$ ). Sitten kaksi vastakkaista pintaa vaimennettiin ja toiset kaksi vastakkaista pintaa olivat erittäin kovia. Lopuksi kolme pintaa vaimennettiin ja vain yksi pinta oli erittäin kova. Testisarja toistettiin samoilla keskimääräisen absorptiokertoimien arvoilla siten, että vaimentamattoman pinnan absorptiokerroin  $\alpha$  oli nyt  $0,1$ . Lisäksi tutkittiin tapausta, jossa käytävän kaksi viereistä pintaa oli vaimennettu, muiden pintojen ollessa akustisesti kovia tai erittäin kovia. Saatuja laskentatuloksia verrattiin NUMO yhtälöllä saatuihin tuloksiin, taulukot 15–21.

Äänilähteen sijainnin vaikutusta käytävän äänenpainetasoihin tutkittiin, kun absorptiomateriaali oli jakautunut tasaisesti sekä epätasaisesti ääntä heijastaville pinnoille. Äänilähde sijoitettiin aluksi käytävän poikkileikkauksen keskipisteeseen, kuten JÄLÄLA-algoritmi olettaa. Seuraavaksi äänilähde asetettiin käytävän keskilinjalle, 1,5 metrin korkeudelle lattiasta, ja sitten seinän viereen, 1,5 metrin korkeudelle. AKURI-ohjelman laskentatuloksia verrattiin keskenään, taulukot 22 ja 23.

Kun käytävän pintojen pienin absorptiokerroin  $\alpha$  oli  $0,1$ , erosivat molempien käytävien AKURI-ohjelmalla ja NUMO-yhtälöllä lasketut äänenpainetasot toisistaan

alle kaksi desibeliä kaikilla tutkituilla absorptiokombinaatioilla vastaanottopisteissä, jotka olivat etäisyydellä  $2H_0$  -  $40H_0$  äänilähteestä, taulukot 19–21.

Kun käytävän pintojen pienin absorptiokerroin  $\alpha$  oli 0,01, oli poikkeama alle kaksi desibeliä etäisyyksillä  $2H_0$  -  $20H_0$  äänilähteestä, paitsi seuraavissa kahdessa tapauksessa: kun käytävän kaksi vastakkaista pintaa oli akustisesti erittäin kovia ( $\alpha=0,01$ ) ja kun korkean käytävän (9×6 m) katon absorptiokerroin  $\alpha$  oli 0,97 ja muut pinnat olivat akustisesti erittäin kovia ( $\alpha=0,01$ ), taulukot 19–21.

Tutkituissa tapauksissa suurin poikkeama (5,5 desibeliä) AKURI-ohjelman ja NUMO-yhtälön tulosten välillä oli korkealla käytävällä (9×6 m), jonka sivuseinät olivat erittäin kovat ( $\alpha=0,01$ ) ja katto sekä lattia vaimennetut ( $\alpha=0,49$ ), taulukko 21. Poikkeama suureni, kun etäisyys äänilähteestä lisääntyi ja vaimennettujen pintojen absorptiokerroin kasvoi.

AKURI-ohjelman tuloksista voitiin havaita, että saman absorptiomateriaalimäärän vaimennusteho on huomattavasti parempi, kun käytettävissä oleva absorptiomateriaali jaetaan neljälle tai kolmelle pinnalle yhden sijasta, taulukot 15–21. Todennäköinen syy tälle on se, että kun kovia pintoja on kaksi tai kolme, osa äänisäteistä saavuttaa vastaanottopisteen kohtaamatta vaimennusmateriaalia. Absorptiomateriaalin vaimennus oli vähäisintä silloin, kun kaksi vastakkaista pintaa oli erittäin kovia ja kaksi pintaa oli vaimennettu. AKURI-ohjelman ja NUMO-yhtälön välinen ero riippui käytävän korkeuden ja leveyden suhteista, absorptiomateriaalin jakautumisesta sekä vastaanottopisteen etäisyydestä äänilähteestä.

Äänilähteen sijainnilla ei ole suurta merkitystä käytävän äänenpainetasoihin, oli absorptiomateriaali jakautunut sitten tasaisesti tai epätasaisesti. Suurin äänilähteen sijainnista johtunut muutos käytävän äänikentässä oli 0,04 desibeliä, taulukot 22 ja 23.

**Taulukko 15.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. Käytävän korkeus 6 m, leveys 9 m, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,125$ . Väliaineen vaimennus  $m=0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskilinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,125$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,125$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto $\alpha=0,47$ , muut $\alpha=0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha=0,24$ muut $\alpha=0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha=0,16$ , muut $\alpha=0,01$ ja $\alpha=0,17$ ,	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	79,05	79,25	0,20	78,71	0,54	79,04	0,21	78,92	0,33
20	78,05	78,20	0,15	77,73	0,47	78,10	0,10	77,91	0,29
25	77,19	77,32	0,13	76,91	0,41	77,30	0,02	77,05	0,27
4H <sub>0</sub> ~30	76,43	76,55	0,12	76,20	0,35	76,61	-0,06	76,29	0,26
35	75,75	75,86	0,11	75,56	0,30	76,00	-0,14	75,61	0,25
40	75,12	75,23	0,11	74,99	0,24	75,44	-0,21	74,98	0,25
6H <sub>0</sub> ~45	74,54	74,64	0,10	74,46	0,18	74,93	-0,29	74,40	0,24
50	74,00	74,10	0,10	73,98	0,12	74,46	-0,36	73,86	0,24
55	73,49	73,59	0,10	73,53	0,06	74,02	-0,43	73,36	0,23
8H <sub>0</sub> ~60	73,01	73,10	0,09	73,11	-0,01	73,60	-0,50	72,88	0,22
65	72,55	72,65	0,10	72,71	-0,06	73,21	-0,56	72,43	0,22
70	72,12	72,21	0,09	72,34	-0,13	72,84	-0,63	72,00	0,21
10H <sub>0</sub> ~75	71,70	71,79	0,09	71,98	-0,19	72,49	-0,70	71,59	0,20
80	71,30	71,39	0,09	71,64	-0,25	72,16	-0,77	71,19	0,20
85	70,92	71,01	0,09	71,31	-0,30	71,84	-0,83	70,82	0,19
12H <sub>0</sub> ~90	70,56	70,64	0,08	71,00	-0,36	71,53	-0,89	70,45	0,19
95	70,20	70,29	0,09	70,70	-0,41	71,24	-0,95	70,10	0,19
100	69,86	69,95	0,09	70,42	-0,47	70,95	-1,00	69,77	0,18
20H <sub>0</sub> ~150	66,96	67,03	0,07	67,98	-0,95	68,54	-1,51	66,90	0,13
200	64,67	64,74	0,07	66,05	-1,31	66,62	-1,88	64,65	0,09
250	62,77	62,83	0,06	64,42	-1,59	64,99	-2,16	62,78	0,05
40H <sub>0</sub> ~300	61,13	61,18	0,05	62,99	-1,81	63,56	-2,38	61,16	0,02

**Taulukko 16.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. Käytävän korkeus 9 m, leveys 6 m, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,125$ . Väliaineen vaimennus  $m=0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskilinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,125$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,125$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto $\alpha=0,47$ , muut $\alpha=0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha=0,24$ muut $\alpha=0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha=0,16$ , muut $\alpha=0,01$ ja $\alpha=0,17$ ,	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	79,06	79,25	0,19	79,64	-0,39	79,90	-0,65	79,16	0,09
20	78,04	78,20	0,16	78,72	-0,52	79,02	-0,82	78,16	0,04
25	77,18	77,32	0,14	77,95	-0,63	78,27	-0,95	77,30	0,02
4H <sub>0</sub> ~30	76,42	76,55	0,13	77,27	-0,72	77,62	-1,07	76,55	0
35	75,74	75,86	0,12	76,66	-0,80	77,03	-1,17	75,87	-0,01
40	75,11	75,23	0,12	76,11	-0,88	76,50	-1,27	75,25	-0,02
6H <sub>0</sub> ~45	74,53	74,64	0,11	75,60	-0,96	76,01	-1,37	74,68	-0,04
50	73,99	74,10	0,11	75,13	-1,03	75,54	-1,44	74,14	-0,04
55	73,48	73,59	0,11	74,68	-1,09	75,11	-1,52	73,63	-0,04
8H <sub>0</sub> ~60	73,00	73,10	0,10	74,27	-1,17	74,70	-1,60	73,16	-0,06
65	72,55	72,65	0,10	73,87	-1,22	74,32	-1,67	72,70	-0,05
70	72,11	72,21	0,10	73,49	-1,28	73,95	-1,74	72,27	-0,06
10H <sub>0</sub> ~75	71,70	71,79	0,09	73,13	-1,34	73,60	-1,81	71,86	-0,07
80	71,30	71,39	0,09	72,79	-1,40	73,26	-1,87	71,46	-0,07
85	70,92	71,01	0,09	72,46	-1,45	72,93	-1,92	71,08	-0,07
12H <sub>0</sub> ~90	70,55	70,64	0,09	72,14	-1,50	72,62	-1,98	70,72	-0,08
95	70,20	70,29	0,09	71,83	-1,54	72,32	-2,03	70,37	-0,08
100	69,86	69,95	0,09	71,53	-1,58	72,02	-2,07	70,03	-0,08
20H <sub>0</sub> ~150	66,95	67,03	0,08	68,97	-1,94	69,49	-2,46	67,13	-0,10
200	64,67	64,74	0,07	66,90	-2,16	67,45	-2,71	64,84	-0,10
250	62,77	62,83	0,06	65,15	-2,32	65,70	-2,87	62,93	-0,10
40H <sub>0</sub> ~300	61,13	61,18	0,05	63,61	-2,43	64,17	-2,99	61,29	-0,11

**Taulukko 17.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. Käytävän korkeus **6 m**, leveys **9 m**, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Väliaineen vaimennus  $m=0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskilinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto $\alpha = 0,97$ , muut $\alpha = 0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,49$ muut $\alpha = 0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,33$ , muut $\alpha = 0,01$ ja $\alpha = 0,33$ ,	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	76,33	76,60	0,27	75,29	1,31	76,45	0,15	76,11	0,49
20	74,99	75,20	0,21	74,02	1,18	75,30	-0,10	74,77	0,43
25	73,86	74,03	0,17	72,99	1,04	74,35	-0,32	73,63	0,40
4H <sub>0</sub> ~30	72,86	73,01	0,15	72,12	0,89	73,54	-0,53	72,64	0,37
35	71,97	72,10	0,13	71,37	0,73	72,83	-0,73	71,75	0,35
40	71,16	71,28	0,12	70,71	0,57	72,20	-0,92	70,95	0,33
6H <sub>0</sub> ~45	70,41	70,52	0,11	70,11	0,41	71,63	-1,11	70,21	0,31
50	69,72	69,83	0,11	69,57	0,26	71,11	-1,28	69,53	0,3
55	69,08	69,18	0,10	69,07	0,11	70,62	-1,44	68,89	0,29
8H <sub>0</sub> ~60	68,48	68,57	0,09	68,61	-0,04	70,17	-1,60	68,30	0,27
65	67,91	68,00	0,09	68,18	-0,18	69,75	-1,75	67,74	0,26
70	67,38	67,46	0,08	67,78	-0,32	69,36	-1,90	67,22	0,24
10H <sub>0</sub> ~75	66,87	66,95	0,08	67,40	-0,45	68,98	-2,03	66,72	0,23
80	66,38	66,46	0,08	67,04	-0,58	68,63	-2,17	66,24	0,22
85	65,92	65,99	0,07	66,70	-0,71	68,29	-2,30	65,79	0,20
12H <sub>0</sub> ~90	65,48	65,55	0,07	66,37	-0,82	67,97	-2,42	65,35	0,20
95	65,06	65,12	0,06	66,06	-0,94	67,66	-2,54	64,94	0,18
100	64,65	64,71	0,06	65,76	-1,05	67,36	-2,65	64,54	0,17
20H <sub>0</sub> ~150	61,29	61,33	0,04	63,25	-1,92	64,87	-3,54	61,23	0,10
200	58,74	58,77	0,03	61,29	-2,52	62,92	-4,15	58,72	0,05
250	56,67	56,69	0,02	59,64	-2,95	61,27	-4,58	56,68	0,01
40H <sub>0</sub> ~ 300	54,92	54,94	0,02	58,20	-3,26	59,83	-4,89	54,95	-0,01



**Taulukko 18.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. Käytävän korkeus **9 m**, leveys **6 m**, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Väliaineen vaimennus  $m=0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskilinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto $\alpha = 0,97$ , muut $\alpha = 0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,49$ muut $\alpha = 0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,33$ , muut $\alpha = 0,01$ ja $\alpha = 0,33$ ,	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	76,33	76,60	0,27	76,71	-0,11	77,66	-1,06	76,43	0,17
20	74,97	75,20	0,23	75,47	-0,27	76,56	-1,36	75,10	0,1
25	73,84	74,03	0,19	74,46	-0,43	75,65	-1,62	73,96	0,07
4H <sub>0</sub> ~30	72,84	73,01	0,17	73,60	-0,59	74,87	-1,86	72,96	0,05
35	71,95	72,10	0,15	72,85	-0,75	74,18	-2,08	72,07	0,03
40	71,14	71,28	0,14	72,18	-0,9	73,56	-2,28	71,26	0,02
6H <sub>0</sub> ~45	70,40	70,52	0,12	71,58	-1,06	72,99	-2,47	70,52	0
50	69,71	69,83	0,12	71,03	-1,2	72,46	-2,63	69,83	0
55	69,07	69,18	0,11	70,51	-1,33	71,97	-2,79	69,18	0
8H <sub>0</sub> ~60	68,47	68,57	0,1	70,04	-1,47	71,52	-2,95	68,58	-0,01
65	67,90	68,00	0,1	69,59	-1,59	71,09	-3,09	68,01	-0,01
70	67,37	67,46	0,09	69,17	-1,71	70,68	-3,22	67,48	-0,02
10H <sub>0</sub> ~75	66,86	66,95	0,09	68,77	-1,82	70,29	-3,34	66,97	-0,02
80	66,38	66,46	0,08	68,39	-1,93	69,93	-3,47	66,48	-0,02
85	65,92	65,99	0,07	68,03	-2,04	69,57	-3,58	66,02	-0,03
12H <sub>0</sub> ~90	65,48	65,55	0,07	67,68	-2,13	69,24	-3,69	65,58	-0,03
95	65,05	65,12	0,07	67,35	-2,23	68,91	-3,79	65,16	-0,04
100	64,65	64,71	0,06	67,03	-2,32	68,60	-3,89	64,75	-0,04
20H <sub>0</sub> ~150	61,29	61,33	0,04	64,34	-3,01	65,94	-4,61	61,38	-0,05
200	58,74	58,77	0,03	62,21	-3,44	63,82	-5,05	58,83	-0,06
250	56,67	56,69	0,02	60,42	-3,73	62,04	-5,35	56,76	-0,07
40H <sub>0</sub> ~300	54,92	54,94	0,02	58,86	-3,92	60,48	-5,54	55,01	-0,07

**Taulukko 19.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. Käytävän korkeus **6 m**, leveys **9 m**, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Pienin absorptiokerroin  $\alpha = 0,1$ . Väliaineen vaimennus  $m = 0.001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w|kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskiliinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto $\alpha = 0,7$ , muut $\alpha = 0,1$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,4$ muut $\alpha = 0,1$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,3$ , muut $\alpha = 0,1$ ja $\alpha = 0,3$ ,	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	76,33	76,60	0,27	75,74	0,86	76,19	0,41	76,19	0,41
20	74,99	75,20	0,21	74,41	0,79	74,91	0,29	74,85	0,35
25	73,86	74,03	0,17	73,30	0,73	73,84	0,19	73,72	0,31
4H <sub>0</sub> ~30	72,86	73,01	0,15	72,34	0,67	72,91	0,1	72,72	0,29
35	71,97	72,10	0,13	71,49	0,61	72,09	0,01	71,84	0,26
40	71,16	71,28	0,12	70,73	0,55	71,34	-0,06	71,03	0,25
6H <sub>0</sub> ~45	70,41	70,52	0,11	70,03	0,49	70,66	-0,14	70,29	0,23
50	69,72	69,83	0,11	69,39	0,44	70,03	-0,2	69,61	0,22
55	69,08	69,18	0,1	68,80	0,38	69,45	-0,27	68,97	0,21
8H <sub>0</sub> ~60	68,48	68,57	0,09	68,24	0,33	68,90	-0,33	68,37	0,20
65	67,91	68,00	0,09	67,72	0,28	68,39	-0,39	67,81	0,19
70	67,38	67,46	0,08	67,23	0,23	67,90	-0,44	67,28	0,18
10H <sub>0</sub> ~75	66,87	66,95	0,08	66,77	0,18	67,44	-0,49	66,78	0,17
80	66,38	66,46	0,08	66,32	0,14	67,00	-0,54	66,30	0,16
85	65,92	65,99	0,07	65,90	0,09	66,59	-0,6	65,84	0,15
12H <sub>0</sub> ~90	65,48	65,55	0,07	65,50	0,05	66,19	-0,64	65,41	0,14
95	65,06	65,12	0,06	65,12	0	65,81	-0,69	64,99	0,13
100	64,65	64,71	0,06	64,74	-0,03	65,44	-0,73	64,59	0,12
20H <sub>0</sub> ~150	61,29	61,33	0,04	61,66	-0,33	62,37	-1,04	61,25	0,08
200	58,74	58,77	0,03	59,30	-0,53	60,01	-1,24	58,72	0,05
250	56,67	56,69	0,02	57,36	-0,67	58,08	-1,39	56,67	0,02
40H <sub>0</sub> ~300	54,92	54,94	0,02	55,70	-0,76	56,42	-1,48	54,93	0,01

**Taulukko 20.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. Käytävän korkeus **9 m**, leveys **6 m**, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Pienin absorptiokerroin  $\alpha = 0,1$ . Väliaineen vaimennus  $m = 0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskiliinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto $\alpha = 0,7$ , muut $\alpha = 0,1$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,4$ muut $\alpha = 0,1$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,3$ , muut $\alpha = 0,1$ ja $\alpha = 0,3$ ,	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	76,33	76,60	0,27	76,55	0,05	76,89	-0,29	76,41	0,19
20	74,97	75,20	0,21	75,22	-0,02	75,63	-0,43	75,05	0,15
25	73,84	74,03	0,17	74,12	-0,09	74,56	-0,53	73,92	0,11
4H <sub>0</sub> ~30	72,84	73,01	0,15	73,15	-0,14	73,64	-0,63	72,92	0,09
35	71,95	72,10	0,13	72,30	-0,20	72,81	-0,71	72,03	0,07
40	71,14	71,28	0,12	71,52	-0,24	72,05	-0,77	71,22	0,06
6H <sub>0</sub> ~45	70,40	70,52	0,11	70,81	-0,29	71,36	-0,84	70,48	0,04
50	69,71	69,83	0,11	70,15	-0,32	70,72	-0,89	69,79	0,04
55	69,07	69,18	0,10	69,54	-0,36	70,12	-0,94	69,15	0,03
8H <sub>0</sub> ~60	68,47	68,57	0,09	68,96	-0,39	69,56	-0,99	68,55	0,02
65	67,90	68,00	0,09	68,42	-0,42	69,04	-1,04	67,98	0,02
70	67,37	67,46	0,08	67,91	-0,45	68,54	-1,08	67,45	0,01
10H <sub>0</sub> ~75	66,86	66,95	0,08	67,43	-0,48	68,06	-1,11	66,94	0,01
80	66,38	66,46	0,08	66,97	-0,51	67,61	-1,15	66,45	0,01
85	65,92	65,99	0,07	66,53	-0,54	67,18	-1,19	65,99	0
12H <sub>0</sub> ~90	65,48	65,55	0,07	66,11	-0,56	66,76	-1,21	65,55	0
95	65,05	65,12	0,06	65,71	-0,59	66,36	-1,24	65,13	-0,01
100	64,65	64,71	0,06	65,32	-0,61	65,98	-1,27	64,72	-0,01
20H <sub>0</sub> ~150	61,29	61,33	0,04	62,10	-0,77	62,79	-1,46	61,35	-0,02
200	58,74	58,77	0,03	59,64	-0,87	60,34	-1,57	58,79	-0,02
250	56,67	56,69	0,02	57,63	-0,94	58,34	-1,65	56,72	-0,03
40H <sub>0</sub> ~300	54,92	54,94	0,02	55,92	-0,98	56,63	-1,69	54,97	-0,03

**Taulukko 21.** Epätasainen absorptiojakautuma. AKURIn ja NUMOn vertailu. **Viereiset sivut vaimennettu Käytävän korkeus 9 m, leveys 6 m**, keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Pienin absorptiokerroin. Väliaineen vaimennus  $m=0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähteen ja vastaanottopisteiden korkeus 1,5 metriä käytävän keskilinjalla.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,25$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja sivuseinä $\alpha = 0,49$ muut $\alpha = 0,01$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja sivuseinä $\alpha = 0,4$ muut $\alpha = 0,1$	NUMO - AKURI (dB)	AKURI (dB) katto ja lattia $\alpha = 0,49$ , muut $\alpha = 0,01$	NUMO - AKURI (dB)
2H <sub>0</sub> ~15	76,33	76,60	0,27	75,82	0,78	76,13	0,47	77,66	-1,06
20	74,97	75,20	0,21	74,39	0,81	74,74	0,46	76,56	-1,36
25	73,84	74,03	0,17	73,18	0,85	73,58	0,45	75,65	-1,62
4H <sub>0</sub> ~30	72,84	73,01	0,15	72,13	0,88	72,56	0,45	74,87	-1,86
35	71,95	72,10	0,13	71,19	0,91	71,65	0,45	74,18	-2,08
40	71,14	71,28	0,12	70,34	0,94	70,82	0,46	73,56	-2,28
6H <sub>0</sub> ~45	70,40	70,52	0,11	69,56	0,96	70,07	0,45	72,99	-2,47
50	69,71	69,83	0,11	68,84	0,99	69,37	0,46	72,46	-2,63
55	69,07	69,18	0,10	68,17	1,01	68,71	0,47	71,97	-2,79
8H <sub>0</sub> ~60	68,47	68,57	0,09	67,55	1,02	68,10	0,47	71,52	-2,95
65	67,90	68,00	0,09	66,96	1,04	67,53	0,47	71,09	-3,09
70	67,37	67,46	0,08	66,40	1,06	66,98	0,48	70,68	-3,22
10H <sub>0</sub> ~75	66,86	66,95	0,08	65,88	1,07	66,47	0,48	70,29	-3,34
80	66,38	66,46	0,08	65,38	1,08	65,98	0,48	69,93	-3,47
85	65,92	65,99	0,07	64,90	1,09	65,51	0,48	69,57	-3,58
12H <sub>0</sub> ~90	65,48	65,55	0,07	64,45	1,10	65,07	0,48	69,24	-3,69
95	65,05	65,12	0,06	64,01	1,11	64,64	0,48	68,91	-3,79
100	64,65	64,71	0,06	63,60	1,11	64,23	0,48	68,60	-3,89
20H <sub>0</sub> ~150	61,29	61,33	0,04	60,16	1,17	60,83	0,50	65,94	-4,61
200	58,74	58,77	0,03	57,57	1,20	58,27	0,50	63,82	-5,05
250	56,67	56,69	0,02	55,48	1,21	56,19	0,50	62,04	-5,35
40H <sub>0</sub> ~ 300	54,92	54,94	0,02	53,72	1,22	54,44	0,50	60,48	-5,54

**Taulukko 22.** Äänilähteen sijainnin vaikutus käytävän äänenpainetasoihin. Käytävän korkeus 9 m, leveys 6 m, keskimääräiset absorptiokertoimet  $\bar{\alpha} = 0,01, 0,1$  ja  $0,5$ . Väliaineen vaimennus  $m=0.001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähde poikkipinnan keskellä ja lattialla käytävän keskikilinjalla 1,5 m korkeudella lattiasta.

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,01$ äänilähde poikkileikkauksen keskellä	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,01$ äänilähde keskikilinjalla 1,5 m lattiasta	AKURI (dB) Keskellä - lattialla	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,1$ äänilähde poikkileikkauksen keskellä	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,1$ äänilähde keskikilinjalla 1,5 m lattiasta	AKURI (dB) Keskellä - lattialla	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,5$ äänilähde poikkileikkauksen keskellä	AKURI (dB) kesimääräinen $\alpha = 0,5$ äänilähde keskikilinjalla 1,5 m lattiasta	AKURI (dB) Keskellä - lattialla
2H <sub>0</sub> ~15	83,45	83,46	0,01	79,75	79,75	0	72,28	72,27	-0,01
20	82,93	82,93	0	78,83	78,82	-0,01	70,47	70,44	-0,03
25	82,49	82,49	0	78,04	78,03	-0,01	68,97	68,93	-0,04
4H <sub>0</sub> ~30	82,10	82,10	0	77,34	77,33	-0,01	67,67	67,64	-0,03
35	81,74	81,74	0	76,71	76,71	0	66,54	66,51	-0,03
40	81,42	81,42	0	76,13	76,13	0	65,52	65,50	-0,02
6H <sub>0</sub> ~45	81,11	81,11	0	75,60	75,59	-0,01	64,60	64,58	-0,02
50	80,83	80,83	0	75,10	75,09	-0,01	63,77	63,75	-0,02
55	80,56	80,55	-0,01	74,63	74,62	-0,01	63,00	62,98	-0,02
8H <sub>0</sub> ~60	80,30	80,30	0	74,18	74,18	0	62,29	62,27	-0,02
65	80,05	80,05	0	73,76	73,76	0	61,62	61,61	-0,01
70	79,81	79,81	0	73,36	73,35	-0,01	61,00	60,99	-0,01
10H <sub>0</sub> ~75	79,58	79,58	0	72,97	72,97	0	60,42	60,41	-0,01
80	79,36	79,36	0	72,60	72,60	0	59,87	59,86	-0,01
85	79,14	79,14	0	72,25	72,24	-0,01	59,34	59,34	0
12H <sub>0</sub> ~90	78,93	78,93	0	71,90	71,90	0	58,85	58,84	-0,01
95	78,73	78,73	0	71,57	71,57	0	58,38	58,37	-0,01
100	78,53	78,53	0	71,25	71,25	0	57,93	57,92	-0,01
20H <sub>0</sub> ~150	76,73	76,73	0	68,51	68,51	0	54,29	54,28	-0,01
200	75,18	75,18	0	66,33	66,33	0	51,61	51,61	0
250	73,79	73,79	0	64,50	64,50	0	49,47	49,47	0
40H <sub>0</sub> ~ 300	72,52	72,52	0,01	62,91	62,90	-0,01	47,68	47,68	0

**Taulukko 23.** Äänilähteen sijainnin vaikutus käytävän äänenpainetasoihin. Käytävän korkeus 9 m, leveys 6 m, keskimääräiset absorptiokertoimet  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Väliaineen vaimennus  $m=0,001$ . Äänilähteen äänitehotaso  $L_{w1kHz} = 100$  dB. Suora ääni on mukana. Äänilähde poikkipinnan keskellä ja lattialla käytävän keskilinjalla 1,5 m korkeudella lattiasta. Katto ja lattia  $\alpha = 0,49$ , sivuseinät  $\alpha = 0,01$ .

Vastaanottoasteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), äänilähde käytävän poikkileikkauksen keskellä	AKURI (dB), äänilähde keskilinjalla 1,5 m lattiapinnasta	AKURI (dB), keskellä - lattialla	AKURI (dB), äänilähde käytävän poikkileikkauksen keskellä	AKURI (dB), äänilähde seinän vieressä 1,5 m lattiapinnasta	AKURI (dB) Keskellä - seinän vieressä lattialla	AKURI (dB), äänilähde käytävän poikkileikkauksen keskellä	AKURI (dB), äänilähde seinän vieressä 4,5 m lattiapinnasta	AKURI (dB) Keskellä - seinän vieressä 4,5 m lattiapinnasta
2H <sub>0</sub> ~15	77,68	77,66	0,02	77,68	77,66	0,02	77,68	77,68	0
20	76,59	76,56	0,03	76,59	76,56	0,03	76,59	76,59	0
25	75,68	75,65	0,03	75,68	75,65	0,03	75,68	75,68	0
4H <sub>0</sub> ~30	74,90	74,87	0,03	74,90	74,87	0,03	74,90	74,90	0
35	74,20	74,18	0,02	74,20	74,18	0,02	74,20	74,20	0
40	73,57	73,56	0,01	73,57	73,56	0,01	73,57	73,57	0
6H <sub>0</sub> ~45	73,00	72,99	0,01	73,00	72,99	0,01	73,00	73,00	0
50	72,47	72,46	0,01	72,47	72,46	0,01	72,47	72,47	0
55	71,99	71,97	0,02	71,99	71,97	0,02	71,99	71,99	0
8H <sub>0</sub> ~60	71,53	71,52	0,01	71,53	71,52	0,01	71,53	71,53	0
65	71,10	71,09	0,01	71,10	71,09	0,01	71,10	71,10	0
70	70,69	70,68	0,01	70,69	70,68	0,01	70,69	70,69	0
10H <sub>0</sub> ~75	70,30	70,29	0,01	70,30	70,29	0,01	70,30	70,30	0
80	69,93	69,93	0	69,93	69,93	0	69,93	69,93	0
85	69,58	69,57	0,01	69,58	69,57	0,01	69,58	69,58	0
12H <sub>0</sub> ~90	69,24	69,24	0	69,24	69,23	0,01	69,24	69,24	0
95	68,91	68,91	0	68,91	68,91	0	68,91	68,91	0
100	68,60	68,60	0	68,60	68,60	0	68,60	68,60	0
20H <sub>0</sub> ~150	65,94	65,94	0	65,94	65,94	0	65,94	65,94	0
200	63,82	63,82	0	63,82	63,82	0	63,82	63,82	0
250	62,04	62,04	0	62,04	62,04	0	62,04	62,04	0
40H <sub>0</sub> ~ 300	60,48	60,48	0	60,48	60,48	0	60,48	60,48	0

### 4.3 JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden tulosten vertailu mitattuihin sekä muilla yhtälöillä laskettuihin äänenpainetasoihin todellisilla käytävillä

JÄKÄLA-algoritmin numeerista NUMO-yhtälöä (76) ja APPRO-likiarvoyhtälöä (83) testattiin myös vertaamalla kaavojen antamia tuloksia käytävillä mitattuihin äänenpainetasoihin. Mittauskohteeksi valittiin kolme erityyppistä käytävää. Yksi käytävistä oli poikkileikkaukseltaan neliön muotoinen, akustisesti kova. Toinen valituista käytävistä oli akustisesti pehmeä. Kolmannella käytävällä oli runsaasti ääntä heijastavia palkkeja sekä pilareja, joten se poikkesi eniten ideaalikäytäväoletuksesta. Käytävien äänenpainetasot laskettiin myös tilastollisen huoneakustiikan yhtälöllä (28) sekä Kuttruffin yhtälöllä (86). Vakiotoimisen äänilähteen äänen etenemistä mitattiin käytävillä, joiden korkeus, leveys ja pituus olivat  $2,4 \times 2,3 \times 100$  metriä,  $2,4 \times 3,2 \times 30$  metriä sekä  $2,4 \times 4,3 \times 50$  metriä. Käytävien pintamateriaalien absorptiokertoimet vaihtelivat akustisesti erittäin kovasta ( $\alpha = 0,01$ ) erittäin pehmeään ( $\alpha = 0,7$ ). Väliaineen ja kaluston vaimennuskertoimena on käytetty arvoja välillä  $m = 0,01 - 0,02$ . Äänilähteen A-äänitehotaso  $L_{W(A)}$  oli 90 dB kaikissa käytävämittauksissa.

#### 4.3.1 Ykkösrakennusvaiheen käytävä

Ykkösrakennusvaiheen käytävän korkeus on 2,4 m, leveys 2,3 m ja pituus 100 m. Käytävän sivuseinät ovat maalattua kalkkihiekkatiiltä. Lattiapäällysteenä on Lino-leum-laatta, kuva 29.



**Kuva 29.** Ykkösrakennusvaiheen käytävä.

Alas laskettu katto on U-muotoista, 55 mm leveää, sileää alumiinilistaa, jonka sivut on rei'itetty. Alumiinilistojen välinen ilmarako on 35 mm. Joka toisen listan sisällä on muovikelmuun pakattua mineraalivillaa. Käytävän molemmin puolin on neljän metrin välein työhuoneiden ovia sekä paikka paikoin palo-ovien karmeja sekä käytävän levennyksiä portaiden kohdalla, kuva 29. Käytävän äänepainetasojen laskennassa pintojen keskimääräisenä absorptiokertoimena käytettiin arvoa  $\bar{\alpha} = 0,1$  sekä ovisyvennysten, palo-ovien karmien ja ilman yhteisenä vaimennuskertoimena arvoa  $m = 0,02$ . Taulukossa 24 on vertailtu ykkösrakennusvaiheen käytävän mitattuja sekä AKURI-ohjelmalla ja JÄKÄLA-algoritmin yhtälöillä laskettuja äänepainetasoja vastaanottopisteissä. Taulukossa 25 on vertailtu lisäksi Kuttruffin ja tilastollisen huoneakustiikan yhtälöillä saatuja tuloksia AKURI-ohjelman tuloksiin, kuva 30.

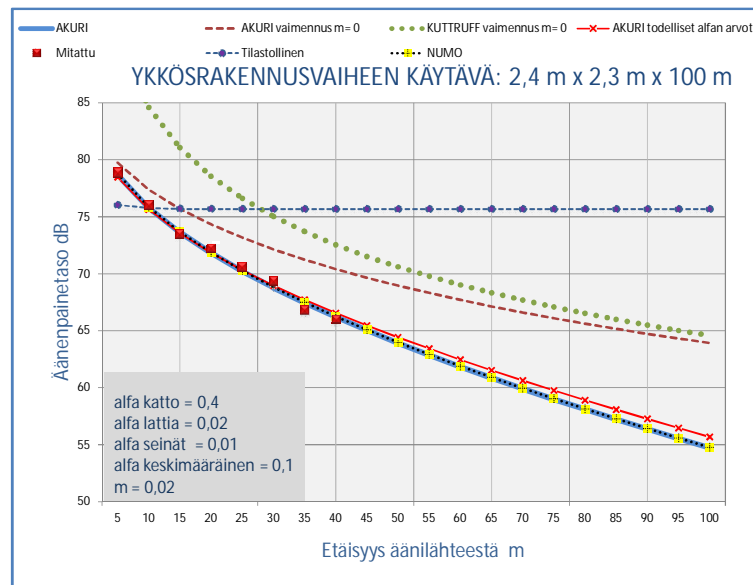


**Taulukko 24.** Ykkösrakennusvaiheen käytävän (2,4×2,3 m) mitatut ja lasketut äänenpainetasot. Absorptiokertoimet:  $\alpha_{\text{katto}}=0,4$ ,  $\alpha_{\text{lattia}}=0,02$ ,  $\alpha_{\text{seinät}}=0,01$ , vaimennuskerroin  $m=0,02$  keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,1$ .

Vastaanottoisteen etäisyys äänilähteestä (m)	Mitatut tasot (dB)	AKURI (dB), todelliset alfat: katto $\alpha=0,4$ , lattia $\alpha=0,02$ , seinät $\alpha=0,01$ , $m=0,02$ ,	AKURI (dB), keskimääräinen $\alpha=0,1$ , $m=0,02$	AKURI (dB), erotus: keskimääräisen $\alpha$ ja todellinen $\alpha$	AKURIn keskim. $\alpha$ ja mitattujen taso- jen kokonaispoikkeama (ZAL) (dB)	NUMO (dB) keskimääräinen aifa	NUMOn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama (ZAL) (dB)	APPRO, (dB) keskimääräinen $\alpha$	APPROn Integroinnin yläraja (astetta)	APPROn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama (ZAL) (dB)
5,0	78,9	78,5	78,6	0,1	-0,3	78,8	-0,1	78,8	90,0	-0,1
7,5	77,8	76,9	77,1	0,2	-0,7	77,2	-0,6	77,2	82,1	-0,6
10,0	76,0	75,6	75,8	0,2	-0,2	75,9	-0,1	75,8	76,3	-0,2
12,5	74,8	74,5	74,6	0,1	-0,2	74,7	-0,1	74,7	72,0	-0,1
15,0	73,5	73,6	73,6	0	0,1	73,7	0,2	73,7	68,6	0,2
17,5	72,8	72,7	72,7	0	-0,1	72,7	-0,1	72,7	65,8	-0,1
20,0	72,3	71,8	71,8	0	-0,5	71,9	-0,4	71,9	63,4	-0,4
22,5	71,6	71,1	71,0	-0,1	-0,6	71,0	-0,6	71,0	61,4	-0,6
25,0	70,6	70,3	70,2	-0,1	-0,4	70,3	-0,3	70,3	59,6	-0,3
27,5	70,3	69,6	69,5	-0,1	-0,8	69,5	-0,8	69,5	58,0	-0,8
30,0	69,4	69,0	68,8	-0,2	-0,6	68,8	-0,6	68,8	56,7	-0,6
32,5	68,5	68,3	68,1	-0,2	-0,4	68,1	-0,4	68,1	55,5	-0,4
35,0	66,8	67,7	67,5	-0,2	0,7	67,5	0,7	67,5	54,4	0,7
37,5	66,6	67,1	66,9	-0,2	0,3	66,9	0,3	66,9	53,5	0,3
40,0	66,0	66,5	66,2	-0,3	0,2	66,3	0,3	66,2	52,6	0,2

**Taulukko 25.** Ykkösrakennusvaiheen käytävän (2,4×2,3 m) lasketut äänenpainetasot 5 - 100 metriin. Absorptiokertoimet:  $\alpha_{\text{katto}}=0,4$ ,  $\alpha_{\text{lattia}}=0,02$ ,  $\alpha_{\text{seinät}}=0,01$ , vaimennuskerroin  $m=0,02$ , keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,1$ .

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	AKURI (dB), todelliset alfafat: katto $\alpha=0,4$ , lattia $\alpha=0,02$ , seinät $\alpha=0,01$ , $m=0,02$ ,	AKURI (dB), keskimääräinen $\alpha=0,1$ , $m=0,02$	AKURI (dB), erotus: keskimääräisen $\alpha$ ja todellinen $\alpha$	NUMO, (dB)	NUMOn ja AKURIn todelliset $\alpha$ kokonaispoikkeama ( $\Delta$ L) (dB)	Kuttruff (dB)	Kuttruffin ja AKURIn todelliset $\alpha$ kokonaispoikkeama ( $\Delta$ L) (dB)	Tilastollinen huoneakustiikka (dB)	Tilastollisen ja AKURIn todelliset $\alpha$ kokonaispoikkeama ( $\Delta$ L) (dB)
5	78,5	78,6	0,1	78,8	0,3	90,6	12,1	74,6	-3,9
10	75,6	75,8	0,2	75,9	0,3	84,6	9,0	74,3	-1,3
15	73,6	73,6	0	73,7	0,1	81,1	7,5	74,2	0,6
20	71,8	71,8	0	71,9	0,1	78,6	6,8	74,2	2,4
25	70,3	70,2	-0,1	70,3	0	76,6	6,3	74,2	3,9
30	69,0	68,8	-0,2	68,8	-0,2	75,0	6,0	74,1	5,1
35	67,7	67,5	-0,2	67,5	-0,2	73,7	6,0	74,1	6,4
40	66,5	66,2	-0,3	66,3	-0,3	72,5	5,9	74,1	7,5
45	65,5	65,0	-0,5	65,1	-0,4	71,5	6,0	74,1	8,6
50	64,4	63,9	-0,5	64,0	-0,4	70,6	6,2	74,1	9,7
55	63,4	62,9	-0,5	62,9	-0,5	69,8	6,4	74,1	10,7
60	62,5	61,9	-0,6	61,9	-0,6	69,0	6,5	74,1	11,6
65	61,5	60,9	-0,6	60,9	-0,6	68,3	6,8	74,1	12,6
70	60,6	59,9	-0,7	60,0	-0,6	67,7	7,1	74,1	13,5
75	59,8	59,0	-0,8	59,0	-0,8	67,1	7,3	74,1	14,3
80	58,9	58,1	-0,8	58,1	-0,8	66,5	7,6	74,1	15,2
85	58,1	57,2	-0,9	57,3	-0,8	66,0	7,9	74,1	16,0
90	57,3	56,4	-0,9	56,4	-0,9	65,5	8,2	74,1	16,8
95	56,5	55,5	-1,0	55,6	-0,9	65,0	8,5	74,1	17,6
100	55,7	54,7	-1,0	54,8	-0,9	64,6	8,9	74,1	18,4



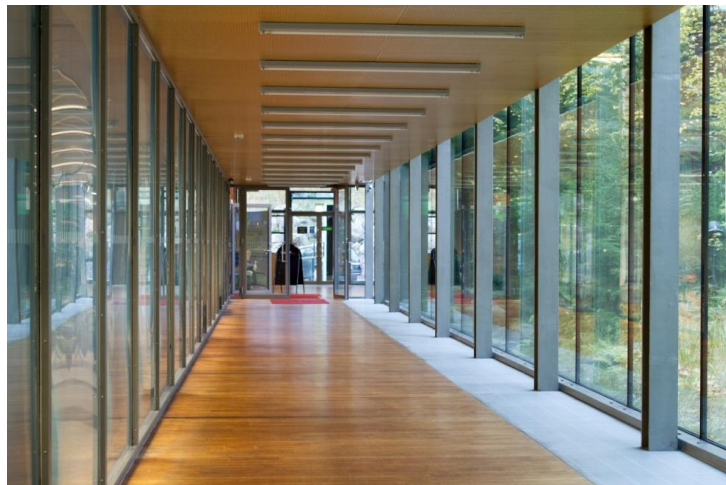
**Kuva 30.** Ykkösrakennusvaiheen käytävän mitatut ja lasketut äänitasot.

NUMO- ja APPRO-yhtälöllä sekä AKURI-ohjelmalla lasketut ykkösrakennusvaiheen kolmannen kerroksen käytävän äänenpainetasot poikkesivat mitatuista alle desibelin. Äänenpainetasot mitattiin alkaen 5 metristä 40 metriin 2,5 metrin välein. Suurin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) kaikissa tapauksissa oli 0,8 desibeliä 27,5 metrin etäisyydellä äänilähteestä, taulukko 24, kuva 30. Koska käytävään ei synny diffusia äänikenttää, ei tilastollinen huoneakustiikka pysty ennustamaan luotettavasti käytävän äänenpainetasoja. Ero mitattuun arvoon oli 40 metrin kohdalla 7,5 desibeliä. Kuttruffin yhtälö ei taas ota huomioon väliaineen vaimennusta, ja se antaa mitattua 5,9 desibeliä suurempia arvoja kyseisessä pisteessä, taulukko 25. Jos väliaineen vaimennusta ei oteta huomioon, lähestyvät AKURI-ohjelman ja Kuttruffin yhtälön tulokset toisiaan, kun matka äänilähteestä kasvaa.

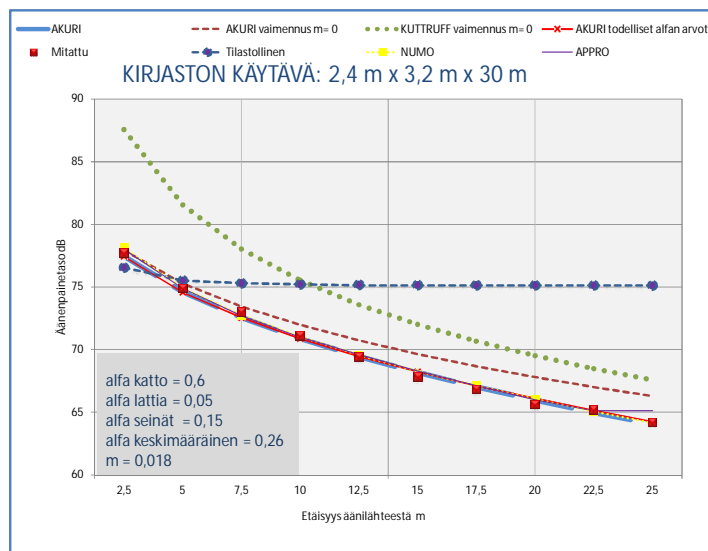
#### 4.3.2 Kirjaston käytävä

Kirjaston käytävän korkeus on 2,4 m, leveys 3,2 m ja pituus 30 m. Käytävän sivuseinät ovat lasia. Ulkoseinän vieressä on H-muotoisia (165 mm x 165 mm) teräspilareita kolmen metrin jaolla. Käytävän lattia on puuta ja katto rei'itettyä puulevyä,

kuva 31. Käytävän äänitasojen laskennassa käytävän pintojen keskimääräisenä absorptiokertoimena käytettiin arvoa  $\bar{\alpha}=0,26$  sekä teräspilareiden ja ilman yhteisenä vaimennuskertoimena arvoa  $m=0,018$ .



**Kuva 31.** Kirjaston käytävä



**Kuva 32.** Kirjaston käytävän mitatut ja lasketut äänitasot.

**Taulukko 26.** Kirjaston käytävän (2,4×3,2 m) mitatut ja lasketut äänenpainetasot. Absorptiokertoimet:  $\alpha_{\text{katto}}=0,6$ ,  $\alpha_{\text{lattia}}=0,05$ ,  $\alpha_{\text{seinät}}=0,15$ , vaimennuskerroin  $m=0,018$ , keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,26$ .

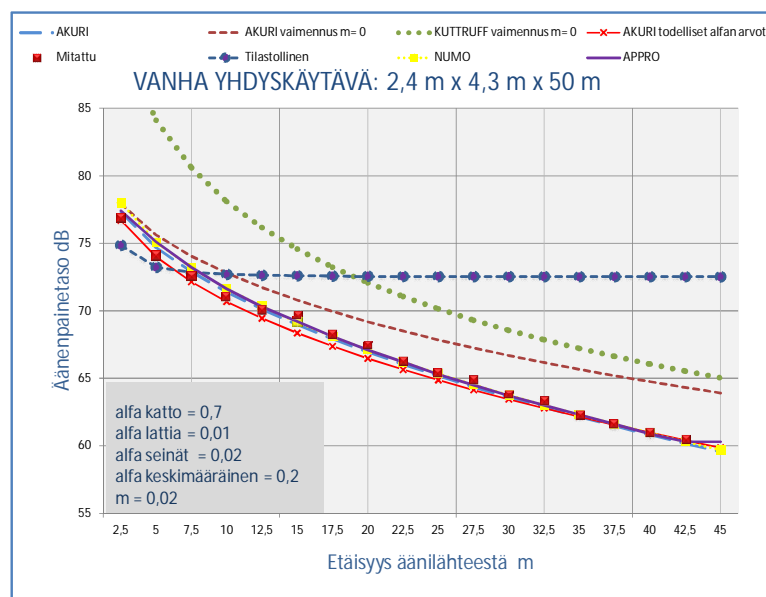
Vastaanottoasteen etäisyys äänilähteestä (m)	Mitatut tasot (dB)	AKURI (dB), todelliset alfat: katto $\alpha=0,6$ , lattia $\alpha=0,05$ , seinät $\alpha=0,15$ , $m=0,018$	AKURI (dB), keskimääräinen alfa=0,26, $m=0,018$	AKURI (dB), erotus: keskimääräisen $\alpha$ ja todelliset $\alpha$	AKURIn keskim., ja mitattujen tasojen koko- naispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) (dB),	NUMO, (dB) keskimääräinen alfa	NUMOn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) (dB)	APPRO, (dB) (keskimääräinen alfa)	APPROn Integroinnin yläraja (astetta)	APPROn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) (dB)
5,0	74,9	74,6	74,6	0	-0,3	74,9	0	74,9	75,6	0
7,5	73,0	72,5	72,5	0	-0,5	72,7	-0,3	72,7	67,5	-0,3
10,0	71,1	70,9	70,9	0	-0,2	71,0	-0,1	71,0	61,9	-0,1
12,5	69,4	69,5	69,4	-0,1	0	69,6	0,2	69,6	57,8	0,2
15,0	67,8	68,2	68,2	0	0,4	68,3	0,5	68,3	54,5	0,5
17,5	66,8	67,1	67,0	-0,1	0,2	67,1	0,3	67,1	51,9	0,3
20,0	65,6	66,1	66,0	-0,1	0,4	66,0	0,4	66,0	49,7	0,4
22,5	65,2	65,1	65,0	-0,1	-0,2	65,1	-0,1	65,1	47,8	-0,1
25,0	64,2	64,3	64,1	-0,2	-0,1	64,1	-0,1	64,1	46,2	-0,1

NUMO- ja APPRO-yhtälöllä sekä AKURI-ohjelmalla lasketut kirjaston käytävän äänenpainetasot poikkesivat mitatuista maksimissaan puoli desibeliä. Kaikissa tutkituissa tapauksissa suurin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma AL$ ) AKURI-ohjelmalla oli 7,5 metrin etäisyydellä äänilähteestä ja NUMO- sekä APPRO-yhtälöillä 15 metrin etäisyydellä äänilähteestä, taulukko 26, kuva 32. Laskettujen ja mitattujen äänenpainetasojen erot olivat suurimmat käytävän puolivälissä.

Suurin ero mitatun, Kuttruffin ja tilastollisen huoneakustiikan yhtälöiden välillä oli 25 metrin etäisyydellä olevassa vastaanottopisteessä. Mitatun ja Kuttruffin yhtälön äänenpainetasojen ero oli 3,4 desibeliä ja mitatun ja tilastollisen huoneakustiikan 10,2 desibeliä, kuva 32. Jos väliaineen vaimennusta ei oteta huomioon, lähestyvät AKURI-ohjelman ja Kuttruffin yhtälön tulokset toisiaan, kun matka äänilähteestä kasvaa.

### 4.3.3 Vanha yhdyskäytävä

Käytävän korkeus on 2,4 m, leveys 4,3 m ja pituus 50 m. Vanhan yhdyskäytävän sivuseinät olivat osittain maalattua betonia, osittain kalkkihiekkatiiltä. Sivuseinillä oli myös ikkunoita. Katto oli verhoiltu 50 mm paksulla, lasikuitukankaalla päällystetyllä akustiikkalevyllä. Lattiapäällysteenä on Linoleum-laatta. Käytävän kantavat pilari- ja palkkirakenteet, joiden jakoväli oli 7 metriä, ulkonivat seinäpinoista noin 0,3 metriä. Käytävän äänitasojen laskennassa pintojen keskimääräisenä absorptiokertoimena käytettiin arvoa  $\bar{\alpha}=0,2$  sekä ilman ja rakenteiden yhteisenä vaimennuskertoimena arvoa  $m=0,02$ .



**Kuva 33.** Vanhan yhdyskäytävän mitatut ja lasketut äänenpainetasot.

Vanhalla yhdyskäytävällä NUMO- ja APPRO-yhtälöiden suurin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) mitattuun äänenpainetasoon oli 1 desibeli 5 metrin etäisyydellä äänilähteestä. AKURI-ohjelmalla suurin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) oli 0,7 desibeliä 15 metrin etäisyydellä äänilähteestä. AKURI-ohjelman sekä NUMO- ja APPRO-yhtälöiden ennustustarkkuus parani käytävän loppupäähän mennessä, jossa yhtälöiden tuloksen erosivat mitatuista desibelin kymmenesosia, taulukko 27, kuva 33. Kuttruffin yhtälön tulos erosi mitatusta 5 desibeliä ja tilas-

tollisen huoneakustiikan yhtälön tulos 12 desibeliä etäisyydellä 42,5 metriä äänilähteestä. AKURI-ohjelman ja Kuttruffin yhtälön tulokset erosivat toisistaan kyseisessä pisteessä 1,2 desibeliä, kun väliaineen vaimennusta ei otettu huomioon, kuva 33.

**Taulukko 27.** Vanhan yhdyskäytävän (2,4×4,3 m) mitatut ja lasketut äänenpainetasot. Absorptiokertoimet:  $\alpha_{\text{katto}}=0,7$ ,  $\alpha_{\text{lattia}}=0,01$ ,  $\alpha_{\text{seinät}}=0,02$ ; vaimennuskerroin  $m=0,02$ , keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,2$ .

Vastaanottopisteen etäisyys äänilähteestä (m)	Mitatut tasot (dB)	AKURI (dB), todelliset alfat: katto $\alpha=0,7$ , lattia $\alpha=0,01$ , seinät $\alpha=0,02$ , $m=0,02$	AKURI (dB), keskimääräinen alfa=0,2, $m=0,02$	AKURI (dB), erotus: keskimääräisen $\alpha$ ja todelliset $\alpha$	AKURIn keskim., ja mitattujen tasojen koko- naispoikkeama (ΣZL) (dB),	NUMO, (dB) keskimääräinen alfa	NUMOn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama (ΣZL) (dB)	APPRO, (dB) (keskimääräinen alfa)	APPROn Integroinnin yläraja (astetta)	APPROn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama (ΣZL) (dB)
5,0	74,1	74,0	74,7	0,7	0,6	75,1	1,0	75,1	83,2	1,0
7,5	72,6	72,1	72,9	0,8	0,3	73,2	0,6	73,2	75,0	0,6
10,0	71,0	70,7	71,4	0,7	0,4	71,7	0,7	71,6	69,4	0,6
12,5	70,1	69,4	70,1	0,7	0	70,3	0,2	70,3	65,2	0,2
15,0	69,7	68,4	69,0	0,6	-0,7	69,2	-0,5	69,2	61,8	-0,5
17,5	68,3	67,4	67,9	0,5	-0,4	68,1	-0,2	68,1	59,1	-0,2
20,0	67,5	66,5	66,9	0,4	-0,6	67,1	-0,4	67,1	56,8	-0,4
22,5	66,3	65,6	66,0	0,4	-0,3	66,2	-0,1	66,2	54,8	-0,1
25,0	65,4	64,9	65,2	0,3	-0,2	65,4	0	65,3	53,2	-0,1
27,5	64,9	64,1	64,4	0,3	-0,5	64,5	-0,4	64,5	51,7	-0,4
30,0	63,8	63,5	63,6	0,1	-0,2	63,8	0	63,7	50,4	-0,1
32,5	63,3	62,8	62,9	0,1	-0,4	63,0	-0,3	63,0	49,4	-0,3
35,0	62,3	62,2	62,2	0	-0,1	62,3	0	62,3	48,4	0
37,5	61,6	61,6	61,5	-0,1	-0,1	61,6	0	61,6	47,6	0
40,0	61,0	61,0	60,8	-0,2	-0,2	61,0	0	60,9	46,9	-0,1
42,5	60,5	60,4	60,2	-0,2	-0,3	60,3	-0,2	60,3	46,3	-0,2

#### 4.3.4 Uusittu yhdyskäytävä

Yhdyskäytävän korkeus on 2,4 m, leveys 4,3 m ja pituus 50 m. Yhdyskäytävää uudistettaessa katosta poistettiin absorptiomateriaali ja katto maalattiin. Käytävän alkuosan betoniseinälle kiinnitettiin keraamista kaakelia. Näiden toimenpiteiden vuoksi käytävän keskimääräinen absorptiokerroin pieneni huomattavasti. Kuvassa 34 näkyvät pyöreät absorptiolevyt, valaisimet ja taulut on lisätty kattoon äänenpainetasomittausten jälkeen. Käytävän äänitason laskennassa pintojen keskimääräisenä absorptiokertoimena käytettiin arvoa  $\bar{\alpha} = 0,01$  sekä betonipalkkien sekä pilareiden ja ilman yhteisenä vaimennuskertoimena arvoa  $m = 0,01$ .



**Kuva 34.** Uusittu yhdyskäytävä. Pyöreät kattoabsorptiolevyt on lisätty mittausten jälkeen.

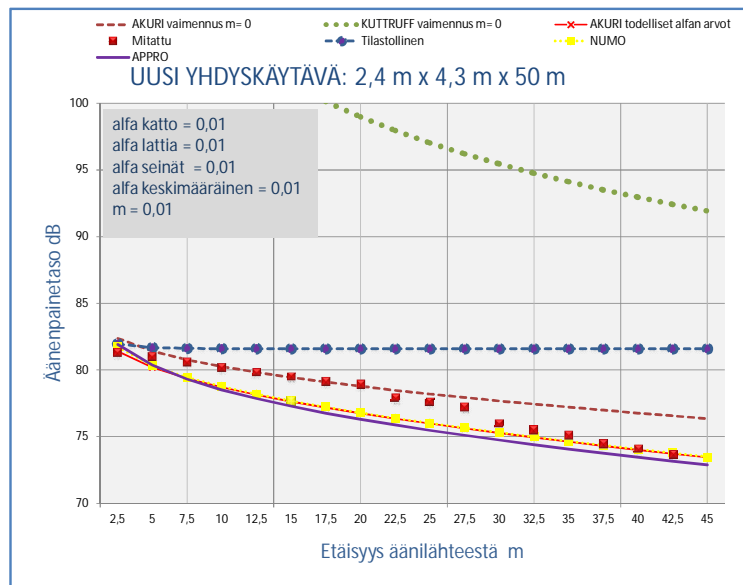
NUMO- ja APPRO-yhtälöllä sekä AKURI-ohjelmalla laskettujen uusitun yhdyskäytävän äänenpainetasojen suurin kokonaispoikkeaman itseisarvo ( $\Sigma\Delta L$ ) oli 20 metrin etäisyydellä äänilähteestä. NUMO-yhtälöllä suurin kokonaispoikkeama ( $\Sigma\Delta L$ ) mitattuun oli -2,1 desibeliä ja APPRO yhtälöllä -2,6 desibeliä. AKURI-ohjelman suurin poikkeama mitattuun oli -2,2 desibeliä. Käytävän loppupäässä NUMO- ja APPRO-yhtälöiden sekä AKURI-ohjelman tulokset poikkesivat vähiten mitatuista arvoista, taulukko 28, kuva 35. Kuttruffin yhtälön tulos erosi mitatuista 18,7 desibeliä ja tilastollisen huoneakustiikan yhtälön tulos 7,9 desibeliä etä-



syydellä 42,5 metriä äänilähteestä. AKURI-ohjelman ja Kuttruffin yhtälön tulokset erosivat toisistaan kyseisessä pisteessä 15,9 desibeliä, kun väliaineen vaimennusta ei otettu huomioon, kuva 35.

**Taulukko 28.** Uuden yhdyskäytävän (2,4×4,3 m) mitatut ja lasketut äänenpainetasot. Absorptiokertoimet:  $\alpha_{\text{katto}}=0,01$ ,  $\alpha_{\text{lattia}}=0,01$ ,  $\alpha_{\text{seinät}}=0,01$ , vaimennuskerroin  $m=0,01$ , keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha}=0,01$ .

Vastaanotto pisteen etäisyys äänilähteestä (m)	Mitatut tasot (dB)	AKURI (dB), todelliset alfat: katto $\alpha=0,01$ , lattia $\alpha=0,01$ , seinät $\alpha=0,01$ , $m=0,01$	AKURI (dB), keskimääräinen alfa= $0,01$ $m=0,01$	AKURI (dB), erotus: keskimääräisen $\alpha$ ja todelliset $\alpha$	AKURIn keskim. ja mitattujen tasojen koko- naispoikkeama ( $\Sigma$ ZL) (dB),	NUMO, (dB) keskimääräinen alfa	NUMOn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma$ ZL) (dB)	APPRO, (dB) (keskimääräinen alfa)	APPROn Integroinnin yläraja (astetta)	APPROn ja mitattujen tasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma$ ZL) (dB)
5,0	81,0	80,2	80,2	0	-0,8	80,3	-0,7	80,4	90,0	-0,6
7,5	80,6	79,4	79,4	0	-1,2	79,4	-1,2	79,3	90,0	-1,3
10,0	80,2	78,7	78,7	0	-1,5	78,8	-1,4	78,5	90,0	-1,7
12,5	79,8	78,1	78,1	0	-1,7	78,2	-1,6	77,8	90,0	-2,0
15,0	79,5	77,6	77,6	0	-1,9	77,7	-1,8	77,3	90,0	-2,2
17,5	79,1	77,2	77,2	0	-1,9	77,2	-1,9	76,8	90,0	-2,3
20,0	78,9	76,7	76,7	0	-2,2	76,8	-2,1	76,3	90,0	-2,6
22,5	77,9	76,3	76,3	0	-1,6	76,4	-1,5	75,9	90,0	-2,0
25,0	77,6	76,0	76,0	0	-1,6	76,0	-1,6	75,6	90,0	-2,0
27,5	77,2	75,6	75,6	0	-1,6	75,7	-1,5	75,1	90,0	-2,1
30,0	76,0	75,3	75,3	0	-0,7	75,3	-0,7	74,7	90,0	-1,3
32,5	75,5	74,9	74,9	0	-0,6	75,0	-0,5	74,4	90,0	-1,1
35,0	75,1	74,6	74,6	0	-0,5	74,7	-0,4	74,1	90,0	-1,0
37,5	74,5	74,3	74,3	0	-0,2	74,4	-0,1	73,8	90,0	-0,7
40,0	74,1	74,0	74,0	0	-0,1	74,1	0	73,5	90,0	-0,6
42,5	73,7	73,7	73,7	0	0	73,8	+0,1	73,2	90,0	-0,5



Kuva 35. Uuden yhdyskäytävän mitatut ja lasketut äänitasot.

## 5 POHDINTA

### 5.1 Tutkimustarve

Kiireellisissä työmaa- ja suunnittelupalavereissa akustikon on pystyttävä perustelemaan ehdotettujen akustisten toimenpiteiden tarpeellisuus. Jos tarkasteltuun tilaan ei synny diffuusaa äänikenttää, ei klassillisen huoneakustiikan yksinkertaisia laskentayhtälöitä voida käyttää. Tässä työssä on akustiikan asiantuntijoille kehitetty kuvateoriaan perustuva JÄKÄLA-algoritmi, jolla voidaan paikan päällä, nopeasti ja riittävän tarkasti arvioida esimerkiksi katon verhoilun vaikutus käytävän äänenpainetasoon. Syöttämällä ohjelmoitavaan taskulaskimeen tai taulukkolaskentaohjelmaan keskeiset parametrit - äänitehotaso, käytävän laskentakorkeus, keskimääräinen heijastuskerroin sekä tarkasteluetäisyys - akustikko voi arvioida ehdotetun toimenpiteen kannattavuutta. Jos numeeriseen integrointiin pystyvää taskulaskintaa ei ole käytettävissä, voidaan tulos saada APPRO-yhtälöllä, jossa integraali on korvattu approksimaatiolla. Tulos ei poikkea juurikaan NUMO-yhtälön antamasta tuloksesta, katso liite 1.

### 5.2 Hypoteesit ja niiden testaus

Tutkimuksen **päähypoteesina** oli, että akustisen kuvateorian pohjalta voidaan kehittää yksinkertaistettu laskenta-algoritmi, joka ennustaa pitkän käytävän äänikenttää ja absorptiomateriaalin vaikutusta siihen. Päähypoteesi on jaettu neljään alahypoteesiin, joista kolme ensimmäistä liittyvät JÄKÄLA-algoritmin johtoon.

#### 5.2.1 Ensimmäinen alahypoteesi

Ensimmäisessä alahypoteesissa oletettiin, että suorakulmaisen suuntaissärmiön muotoisella käytävällä olevan todellisen äänilähteen kuvalähteet voidaan korvata pinta-alaltaan yhtä suuren, neliön muotoisen käytävän kuvalähteillä aiheuttamatta lopputulokseen liian isoa virhettä.

AKURI ohjelmalla laskettujen alkuperäisen suunnikkaan muotoisen ja korvaavan neliön muotoisen kuvalähdetason synnyttämien äänenpainetasojen kumulatiivinen ( $\Delta L$ ) poikkeama oli maksimissaan 0,053 desibeliä ja minimissään 0,002 desibeliä tarkastelluissa vastaanottopisteissä etäisyyksillä  $2H_o$  -  $40H_o$  äänilähteestä, taulukot 9, 10 ja 11.  $H_o$  on neliön muotoisen käytävän korkeus. JÄKÄLA-algoritmin kol-

mesta muokkausvaiheesta ensimmäisen hypoteesin vaihe aiheuttaa lopputulokseen pienimmän poikkeaman. Tulokset tukevat esitettyä hypoteesia.

### 5.2.2 Toinen alahypoteesi

Toisessa alahypoteesissa väitettiin, että neliön muotoisella käytävällä olevan todellisen äänilähteen kuvalähdetason kuvalähteet voidaan siirtää liian suurta virhettä aiheuttamatta todellisen äänilähteen kautta kulkevalle kuvalähdetason koordinaattiakselille diskreetiksi kuvalähdejonoksi.

Neliön muotoisen kuvalähdetason kuvalähteistä ja koordinaattiakselilla olevasta kuvalähdejonosta AKURI-ohjelmalla etäisyyksillä  $2H_o - 40H_o$  äänilähteestä lasketujen vastaanottopisteiden äänenpainetasojen kumulatiivinen ( $\Delta L$ ) poikkeama oli enimmillään 0,213 desibeliä ja pienimmillään 0,002 desibeliä, taulukot 9, 10 ja 11. Tulokset ovat asetetun hypoteesin mukaisia.

### 5.2.3 Kolmas alahypoteesi

Kolmannen alahypoteesin mukaan kuvalähdetason koordinaattiakselilla oleva diskreetti kuvalähdejono voidaan edelleen muuntaa jatkuvaksi äänitehojakautumaksi, jolloin käytävällä olevan vastaanottopisteen äänenpainetaso voidaan hankalan kaksoissummalaskennan sijaan tehdä integroimalla esimerkiksi numeerisen integrointiin pystyvällä taskulaskimella tai Excel-ohjelmalla.

AKURI-ohjelmalla lasketut kuvalähdejonon ja NUMO-yhtälöllä lasketut jatkuvan äänitehojakautuman äänenpainetasojen kumulatiivinen ( $\Delta L$ ) poikkeama vastaanottopisteissä etäisyyksillä  $2H_o - 40H_o$  äänilähteestä oli maksimissaan 0,162 desibeliä ja minimissään 0,001 desibeliä taulukot 9, 10 ja 11. Tulos vahvistaa kolmannen alahypoteesin.

Kolme ensimmäistä alahypoteesia liittyvät JÄKÄLA-algoritmin johtamiseen, jossa poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen särmiön muotoisella käytävällä olevan todellisen äänilähteen kuvalähteet muokattiin kuvalähteiden äänitehon jatkuvaksi jakautumaksi. AKURI-ohjelmalla lasketun alkuperäisen suorakaiteen muotoisen kuvasason ja NUMO-yhtälöllä lasketun, kolme muokkausvaihetta läpikäyneen jatku-

van äänitehojakautuman äänenpainetasojenkuvatasojen kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) vastaanottopisteissä etäisyyksillä  $2H_o - 40H_o$  äänilähteestä oli maksimissaan 0,428 desibeliä ja minimissään 0,005 desibeliä, taulukot 9, 10 ja 11. Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että suorakulmaisen särmiön muotoisen käytävän kuvalähdetaso voidaan liian suurta virhettä aiheuttamatta muuntaa JÄKÄLA-algoritmillä kuvalähteiden jatkuvaksi äänitehojakautumaksi.

#### 5.2.4 Neljäs alahypoteesi

Neljännän alahypoteesin mukaan integrointilausekkeen sisältävää NUMO-laskentayhtälöä on edelleen mahdollista yksinkertaistaa riittävän tarkan tuloksen antavaksi APPRO-likiarvoyhtälöksi, jolloin laskenta onnistuu ilman integrointia.

APPRO-laskentayhtälössä NUMO-yhtälön (76) integrointilausekkeen termit korvattiin suorilla, jotka mahdollisimman hyvin yhtyivät korvattaviin käyriin. Käytävissä, joissa keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} \geq 0,1$ , riittävä tarkkuus saavutettiin, kun kumpikin käyrä korvattiin yhdellä suoralla. Suorakaiteen muotoisella ideaalikäytävällä APPRO-yhtälön ja AKURI-ohjelman tulosten itseisarvon suurin kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) oli 0,338 desibeliä ja pienin 0,002 desibeliä, kun suora ääni ja väliaineen vaimennus otettiin huomioon, taulukot 13 ja 14.

Kun käytävän absorptiokerroin  $\bar{\alpha} < 0,1$ , on integrointialue jaettava useaan osaan. Erittäin kovassa ( $\bar{\alpha}=0,01$ ) käytävässä kumpikin käyrä korvattiin kolmella suoralla. Tässä tapauksessa AKURI-ohjelmalla ja APPRO-yhtälöllä laskettujen äänenpainetasojen itseisarvojen suurin kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ), kun suora ääni ja väliaineen vaimennus otettiin huomioon, oli 0,461 desibeliä ja pienin 0,031 desibeliä, taulukko 12. Tulosta voidaan pitää neljännän alahypoteesin mukaisena.

### 5.3 JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden käyttökelpoisuus

Teoreettisessa tarkastelussa ideaalikäytävän vastaanottopisteissä NUMO- ja APPRO-yhtälöiden suurin kokonaispoikkeama ( $\Sigma AL$ ) AKURI-ohjelman tuloksista oli alle puoli desibeliä. NUMO-yhtälö antoi kaikissa tutkituissa tapauksissa AKURI-ohjelmaa suuremman arvon, taulukot 12, 13 ja 14.

JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöitä testattiin myös vertaamalla niiden antamia tuloksia kolmen erityyppisen käytävän äänenpainetasomittauksiin. Sellaisilla käytävillä, joiden pinnat olivat tasaiset, NUMO- ja APPRO-yhtälöiden antamat tulokset poikkesivat mitatuista arvoista alle desibelin kaikissa vastaanottopisteissä, taulukot 24 ja 25. Käytävillä, joilla oli ääntä heijastavia rakenteita, NUMO- ja APPRO-yhtälöiden tulokset poikkesivat alle kolme desibeliä mitatuista arvoista, taulukot 27 ja 28. Käytävien vastaanottopisteissä Kuttruffin likiarvoyhtälöllä (86) lasketut äänitasot poikkesivat mitatuista arvoista maksimissaan 30 desibeliä ja huoneakustisella yhtälöllä (28) lasketut 12 desibeliä.

Seuraavat tekijät ovat saattaneet aiheuttaa eroja käytävien mitattujen ja JÄKÄLA-algoritmin yhtälöillä laskettujen äänenpainetasojen välille.

1. Merkittävin tekijä näytti olleen palkeista, pilareista ja muista epätasaisuuksista tulevat ääniheijastukset. Heijastukset lisäävät äänenpainetasoa käytävällä äänen tulosuunnassa, jolloin kaukana äänilähteestä oleva äänikenttä pienenee sileäpintaisen käytävän äänikenttää nopeammin.
2. JÄKÄLA-algoritmi olettaa absorptiomateriaalin jakautuvan tasaisesti ääntä heijastaville pinnoille. Tarkasteltujen käytävien katot olivat uusittua yhdyskäytävää lukuun ottamatta muita pintoja akustisesti selvästi pehmeämpiä. Absorptiomateriaalin hyvin epätasainen jakautuminen pinnoille on toinen merkittävä tekijä mitattujen ja laskettujen arvojen eroon.
3. Käytävien sälekatot saattavat ainakin osittain heijastaa ääntä diffuusisti. Diffuusissa heijastuksessa äänienergiaa siirtyy käytävän alkupäähän äänilähdettä kohti, jolloin äänenpainetaso vastaavasti laskee nopeasti käytävän päätyyn mentäessä. Laskennallinen ero peiliheijastavan ja täysin diffuusisti heijastavan käytävän äänenpainetasojen välillä voi olla 60 metrin etäisyydellä äänilähteestä yli 15 desibeliä (Kang 2002, s. 94).
4. Neljäs ilmiö, joka on voinut vaikuttaa mitattujen ja laskettujen äänenpainetasojen eroon akustisesti kovapintaisissa käytävissä, on seisovat aallot. Akustisesti kovapintaisissa käytävissä tehdyissä äänenpainetasomittauksissa

seisovat ääniaallot ovat saattaneet vaikuttaa mittaustuloksiin, vaikka äänenpainetasomittaria liikuteltiin mittauspisteessä ilmiön välttämiseksi. Äänilähteen laajakaistainen äänitehospektri pienentää ilmiön vaikutusta.

Tapaustutkimuksissa, joissa laskentamalleilla on arvioitu absorptiomateriaalin vaikutusta tilan äänikenttiin, on  $\pm 2$  desibelin laskentatarkkuutta yleensä pidetty riittävänä (Hodgson 1997). Ihmisen ei kuitenkaan havaitse 3 desibeliä pienempää äänenpainetaso muutos (standardi EN 352-1; standardi EN 24869-1). Eri aikoina esiintyvien ääni-ilmiöiden täytyy poiketa toisistaan ainakin 5 desibeliä, jotta niiden ero havaittaisiin (Björk 1997; SFS-ISO 131). Kun äänenpainetaso kohoaa tai laskee 10 desibeliä, ihminen kokee äänen kuuluvuuden (loudness) kaksinkertaistuvan tai puolittuvan (Halme 1987).

### **Yhteenveto**

Jos äänikentän tarkasteluetaisyys äänilähteestä on yli kymmenen kertaa käytävän korkeus ja käytävän absorptiomateriaali on hyvin epätasaisesti jakautunut ääntä heijastaville pinnoille, pintaheijastukset ovat lähes täysin diffuuseja, käytävällä on voimakkaasti ääntä heijastavia esineitä tai jos käytävän päätyheijastukset tulevat merkitseviksi, eivät JÄKÄLA-algoritmin laskentayhtälöt sovellu hyvin käytävän äänikentän tarkasteluun.

Tehtyjen teoreettisten laskelmien sekä mittausten perustella näyttäisi siltä, että JÄKÄLA-algoritmin yhtälöt soveltuvat hyvin sellaisten ideaalikäytävien kaltaisten tilojen äänikenttien laskentaan, joissa absorptiomateriaali on jakautunut tasaisesti käytävän pinnoille, eikä käytävällä ole ääntä heijastavia rakenteita. Näissä tapauksissa JÄKÄLA-algoritmin yhtälöiden kokonaispoikkeama AKURI-ohjelmasta ja mitatuista arvoista oli pienempi kuin  $\pm 1$  desibeliä tarkasteluvälillä  $2H_o - 40H_o$  äänilähteestä.  $H_o$  on neliönmuotoisen käytävän korkeus. Yhden desibelin poikkeamalla ei ole merkitystä käytännön akustiikassa.

Kun absorptiomateriaali on jakautunut epätasaisesti, poikkeavat JÄKÄLA-algoritmin tulokset sitä enemmän AKURI-ohjelmalla lasketuista ja mitatuista arvoista, mitä suurempi eri pintojen absorptiokertoimien ero on ja mitä kauempana

äänilähteestä tarkastelupiste sijaitsee. Jos käytävän yhden pinnan absorptiokerroin on enintään 47 kertaa muiden pintojen absorptiokertoimia suurempi, on JÄKÄLA-yhtälöiden tulos alle 3 desibeliä pienempi kuin AKURI-ohjelman laskentatulos etäisyyksillä  $2H_o$  -  $40H_o$  äänilähteestä, taulukot 15 ja 16. Näissä tapauksessa JÄKÄLA-yhtälön ja AKURI-ohjelman tulosten poikkeama jää alle ihmisen kuulon erotuskyvyn. Jos absorptiokertoimien suhde on enintään 97, poikkeaa JÄKÄLA-algoritmin tulos alle 4 desibeliä AKURIn arvosta, taulukot 17 ja 18. Björkin (1997) mukaan ihminen ei pysty havaitsemaan tätä eroa, jos ääni-ilmiöt esiintyvät eri aikaan.

Tutkituissa käytävissä JÄKÄLA-algoritmin yhtälöt poikkesivat eniten AKURI-yhtälöllä lasketuista arvoista, kun käytävän kaksi vastakkaista pintaa olivat akustisesti erittäin pehmeitä ja kaksi muuta erittäin kovia. Tällaisella käytävällä poikkeama AKURIn tuloksiin oli alle 3 desibeliä, kun tarkasteluetaisyys oli pienempi kuin  $9H_o$  ja alle 6 desibeliä, kun etäisyys oli  $40H_o$ , taulukko 18. Äänilähteen läheisyydessä JÄKÄLA-algoritmin yhtälöt toimivat kohtalaisesti, lähellä 3 desibelin rajaa, joka on ihmisen kuulon erotuskyky. Kaukana äänilähteestä ( $40H_o$ ) JÄKÄLA-algoritmin laskentayhtälön tulos oli lähes 6 desibeliä pienempi kuin AKURI-ohjelmalla laskettu arvo. Tällaisen eron pystyy jo selvästi havaitsemaan, vaikkei se saakaan aikaan tunnetta äänekkyyden kaksinkertaistumisesta.

Kun käytävän kaksi vastakkaista pintaa ovat akustisesti erittäin pehmeitä ja kaksi muuta erittäin kovia, saadaan JÄKÄLA-algoritmin yhtälöllä hyvin karkea arvio käytävän äänikentästä kaukana äänilähteestä. Tulos on kuitenkin selvästi parempi, kuin jos se laskettaisiin Kuttruffin likiarvoyhtälöllä (86) tai huoneakustisella yhtälöllä (28).



#### 5.4 Jatkotutkimuksen tarve

NUMO- ja APPRO-yhtälöiden suuri puute on, että ne eivät ota huomioon pintojen erilaisia absorptiokertoimia, eivätkä esineistä tulevia heijastuksia. Poikkeama AKURI-ohjelmaan todettiin olevan suurin silloin, kun käytävän kaksi vastakkaista pintaa ovat akustisesti erittäin kovia ja kaksi erittäin voimakkaasti vaimennettuja.

JÄKÄLA-algoritmia voitaisiin kehittää edelleen akustiseksi tietokoneohjelmaksi. Tietokonesovelluksessa tarkasteltavan tilan kuutta pintaa ja pintojen absorptiokertoimia voitaisiin tarkastella pareittain nyt algoritmista käytetyn neljän pinnan keskimääräisen absorptiokertoimen sijasta. Nämä toimenpiteet lisääisivät laskentatarkkuutta ja poistaisivat tilan poikkileikkauksen dimensioita koskevan rajoituksen. Tilan pintojen mahdolliset diffuusit heijastukset sekä heijastukset suurista esineistä voitaisiin mallintaa erikseen ja yhdistää sitten JÄKÄLA-algoritmin tuloksiin.

JÄKÄLA-algoritmia on tutkittu laskennollisesti usealla teoreettisella ideaalikäytävällä, mutta äänitasomittauksia on tehty vain neljällä todellisella käytävällä. Jos uutta algoritmia halutaan soveltaa kaikkiin suuntaissärmiön muotoisiin tiloihin, joiden kaikki kuusi pintaa heijastavat ääntä, tarvitaan algoritmin validoimiseksi lukuisia uusia mittauksia erilaisissa tiloissa. JÄKÄLA-algoritmin kehittäminen kaupalliseksi tuotteeksi vaatii mittaustulosten analysointia ja erilaisten laskentatilan-ten testausta. Tällaisen uuden ohjelman etuna muihin ohjelmiin verrattuna olisi lähtötietojen syötön yksinkertaisuus ja laskennan nopeus, etenkin jos halutaan laskea tilan melutasot useammassa pisteessä terssi- tai oktaavikaistoittain.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa on osoitettu, että akustiseen kuvateorian pohjalta on mahdollista johtaa laskenta-algoritmi, jota voidaan soveltaa pitkien käytävien äänikenttien pika-arvioinnissa paikan päällä.

Tehtyjen teoreettisten laskelmien ja todellisten käytävämittausten perusteella johdetun JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöt näyttäisivät toimivan hyvin käytävillä, joiden poikkileikkaus oli lähes neliön muotoinen ja joissa pintojen suurin absorptiokerroin oli korkeintaan kymmenen kertaa pienintä absorptiokerrointa suurempi.

NUMO- ja APPRO-laskentayhtälöt poikkesivat mitatuista arvoista eniten käytävillä, joilla kahden vastakkaisen pinnan absorptiokerroin oli hyvin suuri ja toisen pinnan hyvin pieni tai jos käytävällä oli massiivisia, ääntä heijastavia pilareita ja palkkeja. Yhtälöt antoivat kuitenkin selvästi parempia tuloksia kuin tilastollisen huoneakustiikan ja Kuttruffin likiarvokaava.

JÄKÄLA-algoritmin laskentatarkkuutta on testattu vain neljällä todellisella käytävällä. Algoritmin kehittämiseksi tulisi käytävän vastakkaisia pintoja ja niiden absorptiokertoimia käsitellä vastaisuudessa pareittain. Algoritmin validiteetin varmistamiseksi on mittauksia tehtävä lisää käytävillä, joiden absorptiomateriaalien jakautumat poikkeavat toisistaan.

## LÄHTEET

Asumisterveysohje (2003): *Sosiaali- ja terveysministeriö, oppaita 2003:1. Edita Prima Oy, Helsinki 2003.*

Allen, J.B., Berkley, D.A. (1979): Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 66(4), 943-950, 1979.

Andersson, J. (1998): Akustik & buller. *AB Svensk Byggtjänst, Stockholm 1998.*

Arau-Puchades, H. (1988): An Improved Reverberation Formula. *Acustica Vol. 65 (1988), 163–180.*

Aretz, M. (2009): Specification of Realistic Boundary Conditions for the FE Simulation of Low Frequency Sound Fields in Recording Studios. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 95(2009), 874-882.*

Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kernsten, N., Ising, H. (2005): Traffic Noise and Risk of Myocardial Infarction. *Epidemiology, Vol. 16, nro 1, (2005), 33-44.*

Beranek, L. (1971): Noise and Vibration Control. *McGraw-Hill Book Company.*

Blanc-Benon, P. (2007): Computational Methods for Acoustic Propagation. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 93(2007), 874-882. Preface.*

Bork, I. (2005): Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica 91 (2005), 740-763.*

Bork, I. (2000): A Comparison of Room Simulations Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Acustica united with Acustica 86 (2000), 943-956.*

Björk, E. (1997): Meluntorjunta. *Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitos, 1997.*

Cox, T.J., Dalenback, B.-I.L., D'Antonio, P., Embrechts, J.J., Jeon, J.Y., Mommertz, E., Vorländer, M. (2006): A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces. *Acta Acustica united with Acustica Vol. 92 (2006), 1-15.*

Cremer, L. (1953): Theorie der Luftschall-Dämpfung im Rechteck-kanal mit schallschluckender Wand und das sich dabei ergebende höchste Dämpfungsmass. *Acustica 3, 249-263, 1953.*

Dalenbäck, B.I. (1995): The Importance of Diffuse Reflection in Computerized Room Acoustic Prediction and Auralization. *Proc. IoA (UK) 17(1995)*, 24-34.

Dance, S.M.; Shield, B.M. (1997): The Complete Image-Source Method for the Prediction of Sound Distribution in Non-Diffuse Enclosed Spaces. *Journal of Sound and Vibration*, 201(4), (1997), 473-489.

Davies, H.G. (1973): Noise Propagation in Corridors. *The Journal of Acoustical Society of America Vol. 53, Number 5 (1973)*, 1253-1262.

Embrechts, J.J, Archambeau, D., Stan, G.B. (2001): Determination of the Scattering Coefficient of Random Rough Diffusing Surfaces for Room Acoustics Applications. *Acta Acustica - Acustica Vol. 87 (2001)*, 482-494.

EN 352-1 (2002): Hearing protectors – General requirements – Part 1: Ear-Muffs.

EN 4869 (1990): Acoustics - Hearing protectors - Part 1: Subjective method for the measurement of sound attenuation.

Eyring, C. (1930): Reverberation Time in “Dead Rooms”. *J. Acoust. Soc. Am. 1*, 217-241.

Fitzroy, D. (1959): Reverberation Formula which seems to be more Accurate with Non-Uniform Distribution of Absorption. *JASA 31 (1959)*, 893.

Ford, R.D (1970): Introduction to Acoustics. *Elsevier Publishing Company Limited*.

Galaitis, A.G., Patterson, W.N. (1976): Prediction of Noise Distribution in Various Enclosures from Free-Field Measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America 60(4)*, 848-856.

Gensane, M., Santon, F. (1979): Prediction of Sound Fields in Rooms of Arbitrary Shape: Validity of the Image Sources Methods. *Journal of Sound and Vibration (1989) 63(1)*, 97-108.

Gerretsen, E. (2006): Estimation Methods for Sound Levels and Reverberation Time in a Room with Irregular Shape or Absorption Distribution. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 92 (2006)*, 797-806.

Gibbs, B.M., Jones, D.K. (1972): A Simple Image Method for Calculating the Distribution of Sound Pressure Levels within an Enclosure. *ACUSTICA Vol. 26 (1972)*, 24-32.

Ginn, K.B. (1978): Architectural Acoustics. *Bruel & Kjaer* 1978.

Godinho, J.A.L., Tadeu, A. (2002): Reverberation Times Obtained Using a Numerical Model Versus Those Given by Simplified Formulas and Measurements. *Acta Acustica United with Acustica* Vol. 88 (2002), 252-261.

Gomperts, M.C. (1965): Do the Classical Reverberation Formulae Still Have a Right for Existence? *ACUSTICA* 1965/66 Vol. 16, no 5, 255-268.

Halme, A. (1987): Rakennus- ja huoneakustiikka, Meluntorjunta. *Otakustantamo* 378. *Kyriiri Oy, Helsinki* 1987.

Heerema, N., Hodgson M. (1999): Empirical Models for Predicting Noise Levels, Reverberation Times and Fitting Densities in Industrial Workrooms. *Appl. Acoust.* 57 (1999), 51-60.

Hemilä, S., Utriainen, J. (1991): Värähtelyt ja aallot. *Otatieto* 878, *Hämeenlinna* 1991.

Hirata, Y. (1979): Geometrical Acoustics for Rectangular Rooms. *Acustica*, Vol. 43 (1979), 248-252.

Hodgson, M. (1997): Ray-Tracing Prediction of Noise Levels in a Nuclear Power-Generating Station. *Appl. Acoust.* 52 (1997), 19-86.

Hodgson, M. (1991): Evidence of Diffuse Surface Reflections in Rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 89(2) (1991), 765-771.

Hodgson, M. (1988): On the Prediction of Sound Fields in Large Empty Rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 84(1) (1988), 253-261.

Hongisto, V., Virjonen, P. ja Keränen, J. (2007): Avotoimiston uusi akustisen suunnittelun menetelmä. *Työterveyspäivät 23-24. 10.2007 Helsinki*.

Hongisto, V., Keränen, J. JA Larm, P. (2004): Simple Model for the Acoustical Design of Open-Plan Offices. *Acta Acustica United with Acustica* Vol. 90 (2004), 481-495.

Huopaniemi, J. (1999): Virtual Acoustics and 3-D Sound in Multimedia Signal Processing. *Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, julkaisu 53, väitöskirja, Espoo* 1999.

Hurst, C. J. (1980): Sound Transmission between Absorbing Parallel Planes. *J. Acoust. Soc. Am.* 67(1), 1980, 206-13.

- Janczur, R., Oglaza, J., Walerian, E. (1993): Acoustical Field in Space with Obstacles. Part I: Description of the Geometrical Field. *Acustica*, Vol. 78 (1993), 154-162.
- Jauhainen, T., Vuorinen, H., Heinonen- Guzejev, M. (2007): Ympäristömelun vaikutukset. *Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 3, Edita Prima Oy, 2007.*
- Jokitulppo, J. (2009): Non Occupational Noise, Sources, Exposure and Effects on Hearing. *Doctoral dissertation 254, Department of Environmental Science, University of Kuopio, 2009.*
- Jovicic, S. (1979): Anleitung zur Vorausbestimmung des Schallpegels in Betriebsgebäuden. *Herausgegeben vom Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen, 1979.*
- Kang, J. (2002): Acoustics of Long Spaces, Theory and Design Practice. *Thomas Telford Publishing 2002.*
- Kang, J. (2002): Reverberation in Rectangular Long Enclosures with Diffusely Reflecting Boundaries. *Acta Acustica united with Acustica 88 (2002), 77-87.*
- Kang, J. (1996): Reverberation in Rectangular Long Enclosures with Geometrically Reflecting Boundaries. *ACUSTICA / Acta Acustica Vol. 82 (1996), 509-516.*
- Kendrick, P., Li, F., Cox, T.J. (2007): Blind Estimation of Reverberation Parameters for Non-Diffuse Rooms. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 93 (2007), 760-770.*
- Keränen, J. (2006): Akustinen mallintaminen työpaikkojen meluntorjuntasuunnittelussa. *Lisensiaatintutkimus Turun yliopisto, Fysiikan laitos 2006, Turku*
- Keränen, J., Hongisto, V. (2010): Comparison of Simple Room Acoustic Models Using for Industrial Spaces. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 96 (2010), 179-194.*
- Keränen, J., Airo, E., Olkinuora, P., Hongisto, V. (2003): Validity of Ray-Tracing Method for the Application of Noise Control in Workplaces. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 89 (2003), 863-874.*
- Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., Sanders, J. (1982): Fundamentals of Acoustics. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Kosten, C.W. (1960): The Mean Free Path in Room Acoustics. *Acustica 10, 245.*

- Kuronen, J. (1998): Teollisuushallin melukentän kuvaaminen. Erityisesti akustiseen kuvatekniikkaan perustuvalla QAkusti -tietokoneohjelmalla. *Lisensiaatintutkimus, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu 1998, Lappeenranta.*
- Kuronen, J. (1986): Mirror Method in Noise Control. *Third Joint U.S. – Finnish Science Symposium, 22 - 24. 10.1986 USA.*
- Kuronen, J., Laitinen, H. (1985): Meluntorjunnan kannattavuuden arviointi yrityksissä. *Työterveyslaitos, Työolosuhteet 52 (1985), Helsinki 1985.*
- Kurze, U.J. (1997): Sound in Enclosures, *Encyclopedia of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc (1997), 1181-1187.*
- Kuttruff, H. (1997): Sound in Enclosures, *Encyclopedia of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc (1997), 1101-1113.*
- Kuttruff, H. (1989): Stationäre Schallausbreitung in Langräumen. *Acustica, Vol. 69(1989), 53-62.*
- Kuttruff, H. (1985): Stationäre Schallausbreitung in Flachräumen. *Acustica, Vol. 57(1985), 62-70.*
- Kuttruff, H. (1979): Room Acoustics. *Applied Science Publishers LTD, London, 1979.*
- Kylliäinen, M. (2009): Mitä ääni on? Akustiikan vaiheita antiikin ajatuksista nykyaikaisen äänenhallinnan alkuun. *Tekniikan Waiheita 2(2009), s. 5-17, Teknologian historian aikakauslehti.*
- Lahti, T. (2003): Ympäristömelun arviointi ja torjunta. *Ympäristöopas 101, Ympäristöministeriö, Edita Prima Oy, Helsinki 2003.*
- Lee, H., Lee, B.-H. (1988): An Efficient Algorithm for the Image Model Technique. *Applied Acoustics 24 (1988), 87-115.*
- Lemire, G. R., Nicolas, J. (1985): Image Method Prediction of Industrial Hall Noise Levels – A New Algorithm. *Noise Control Engineering Journal. Vol. (24), Number 2 (1985).58-67.*
- Lindqvist, E.A. (1982): Sound Attenuation in Large Factory Spaces. *Acustica Vol. 50 (1982)5, 313-328.*
- Lindqvist, E.A. (1981): Sound Attenuation in Large Factory Spaces Excited by Continuous Noise Sources. *Chalmers University of Technology, Department of Building Acoustics, Report F81-02, 1981.*

- Lokki, T. (2002): Physically-based Auralization – Design, Implementation, and Evaluation. *Teknillisen korkeakoulun tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian julkaisuja TMK-A5, väitöskirja, Espoo 2002.*
- Malecki, I. (1969): Physical Foundations of Technical Acoustics. *Pergamon Press PWN-Polish Scientific Publishers Warszawa 1969.*
- Mehta, M.L., Mulholland, K.A. (1976): Effect of Non-Uniform Distribution of Absorption on Reverberation Time. *Journal of Sound and Vibration (1976), Vol. 46(2), 209-224.*
- Millington, G. (1932): A Modified Formula for Reverberation. *JASA 4 (1932), 69-82.*
- Morse, P. (1939): The Transmission of Sound Inside Pipes. *J. Acoust. Soc. Am. 11, 205-210.*
- Nilsson, E. (2004): Decay Processes in Rooms with Non-Diffuse Sound Fields. Part 1: Ceiling Treatment with Absorbing Material; Part 2: Effect of Irregularities. *Building Acoustics 11, 39-60 and 133-144.*
- Nykysuomen sanakirja (1975), Werner Söderström Oy, Porvoo 1976.
- Ohta, M., Iwashige, H., Nakamura, K., (1992): A New Trial toward the Prediction of a Sound Field in an Incompletely Diffused Room based on the Energy Differential Equation. *Acustica Vol. 77 (1992), 12-20.*
- Ondet, A.M., Barbry, J.L. (1989): Modeling of Sound Propagation in Fitted Workshops Using Ray Tracing. *Journal of the Acoustical Society of America 85, 787-796.*
- Osipov, G.L., Sergeyev, M.V., Shubin, I.L. (1987): Optimum Location of Sound Absorbing Material and Estimation of Its Noise-Reduction Efficiency in Industrial Spaces, *Inter-Noise '87,( 1987), Beijing, China, 683-686.*
- Pesonen, K. (2005): Ympäristömelun haittojen arvioinnin perusteita. *Sosiaali- ja terveysministeriön selvityksiä 2005:14.*
- Prager, J., Petersson, B. (2007): Modelling of Sound in Small Fitted Enclosures Using Probabilistic Approaches. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 93 (2007), 750-759.*
- Prodi, N. (2002): A New Method for Calculating the Sound Energy Density Based on Geometrical Acoustics. *Acta Acustica united with Acustica Vol. 88 (2002), 842-852.*



- Rathe, E.J. (1969): Note on Two Common Problems of Sound Propagation. *J. Sound Vib. (1969) 10(3), 472-479.*
- Redmore, T.L. (1982): A Method to Predict the Transmission of Sound through Corridors. *Applied Acoustics 15 (1982), 133-146.*
- Redondo, J., Pico, R., Avis, M. R., Cox, T. J. (2009): Prediction of the Random-Incidence Scattering Coefficient Using a FDTD Scheme. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 95(2009), 1040-1047.*
- Sabine, W. (1927): Collected Papers on Acoustics. *Dover Publications Inc., New York 1964.*
- Savioja, L. (1999): Modeling Techniques for Virtual Acoustics. *Teknillisen korkeakoulun tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian julkaisuja TML-A3, väitöskirja, Espoo 1999.*
- Schroeder, M.R. (1970): Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces. *The Journal of The Acoustical Society of America, Volume 47, Number 2 (Part 1), (1970), 424-431.*
- SFS-ISO 131 (1989): Akustiikka. Ilmaaänen tai melun fysikaalisen ja subjektiivisen voimakkuuden ilmaiseminen.
- Siltanen, S., Lokki, T., Savioja, L. (2009): Frequency Domain Acoustic Radiance Transfer for Real-Time Auralization. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 95(2009), 106-117.*
- Siltanen, S., Lokki, T., Savioja L. (2008): Geometry Reduction in Room Acoustics Modeling. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 94 (2008), 410–418.*
- Smirnowa, J., Ossowski, A. (2005): A Method for Optimising Absorptive Configurations in Classrooms. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 91(2005), 103-109.*
- Stephenson, U. (2006): Analytical Derivation of a Formula for the Reduction of Computation Time by the Voxel Crossing Technique Used in Room Acoustical Simulation. *Applied Acoustics 67 (2006), 959-981.*
- Stephenson, U. (2010): An Energetic Approach for the Simulation of Diffraction within Ray Tracing Based on the Uncertainty Relation. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 96 (2010), 516–535.*
- Stephenson, U. (1996): Quantized Pyramidal Beam Tracing – a New Algorithm for Room Acoustics and Noise Immission Prognosis. *Acustica - Acta Acustica Vol. 82 (1996), 517-525.*

- Stephenson, U. (1990): Comparison of the Mirror Image Source Method and the Sound Particle Simulation Method. *Applied Acoustics* 29 (1990), 35-72.
- Toivanen, J. (1981): Teknillinen akustiikka. *Otakustantamo 362, Espoo 1981*.
- Vesa, S., Härmä, A. (2005): Automatic Estimation of Reverberation Time from Binaural Signals. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*.
- Valeau, V, Hodgson, M., Picaut, J. (2007): A Diffusion-Based Analogy for the Prediction of Sound Fields in Fitted Rooms. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 93(2007), 94-105*.
- Virjonen, P., Keränen, J., Hongisto V. (2009): Determination of Acoustical Conditions in Open-Plan Offices: Proposal for New Measurement Method and Target Values. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 95 (2009), 279-290*.
- Vorländer, M., Embrechts, J-J., De Greetere, L., Vermeir, G., Gomes, M. (2004): Case Studies in Measurement of Random Incidence Scatting Coefficients. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 90 (2004), 858-867*.
- Vorländer, M. (1995): International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Proceedings of 15<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, 577-580, 1995*.
- Wu Dasheng, Zhang Xiyang (1987): Experimental Research on Absorption Effect in Corridor. *Inter-Noise 1987, 707-710*.
- Zeng Xiangyang, Chen Ke'an, Sun Jioncai (2002): Modeling the Sound Fields in Rooms with Multiple Sources Using a Hybrid Image Method Including Phase. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 88(2002), 88-92*.
- Zhang, X. (2003): A New Formula for Reverberation Time. *Acta Acustica united with Acustica Vol. 89 (2003), 857-862*.
- Zhong-Jin Jiang, Tie-Jun Cui (2008): Spatial Distribution Prediction of Steady-State Sound Field with the Ray-Tracing Method. *ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol.130, number 8, 064503, 1-5*.
- Young-Ji Choi, Fricke, F.R., (2006): A Comparison of Subjective Assessments of Recorded Music and Computer Simulated Auralizations in Two Auditoria. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 92(2006), 604-611*.
- Young-Ji Choi, Dae-Up Jeong (2008): Some Issues in Measurement of the Random-Incidence Scattering Coefficients in a Reverberation Room. *Acta Acustica United with Acustica, Vol. 94(2008), 769-773*.

**LASKUESIMERKKI**

Käytävän korkeus on 2,4 metriä, leveys 3,6 metriä ja pituus 150 metriä. Käytävän pintojen absorptiokertoimet 1 kHz oktaavikaistalla ovat:  $\alpha_{katto} = 0,8$ ,  $\alpha_{lattia} = 0,01$ ,  $\alpha_{vasen\ seinä} = 0,06$  ja  $\alpha_{oikea\ seinä} = 0,1$ . Lasketaan käytävän äänenpainetaso 60 metrin etäisyydellä äänilähteestä AKURI-ohjelmalla, JÄKÄLA-algoritmin NUMO- ja APPRO-yhtälöillä (76 ja 83), Kuttruffin likiarvoyhtälöllä (86) sekä tilastollisen huoneakustiikan yhtälöllä (28). Äänilähteen äänitehotaso  $L_w$  on 100 desibeliä 1 kHz oktaavikaistalla.

**AKURI-ohjelma**

Lasketaan käytävän äänenpainetaso  $L_p$  etäisyydellä  $a = 60$  metriä äänilähteestä:

*Akusti V 1.0 on Työterveyslaitoksen AKURI ohjelman Windows versio*

*Acoustic Image Source Method,*

*Copyright (c) 1998-1999 Lappeenranta University of Technology, P.O: Box 20 53851 Lappeenranta, Finland*

*Sound pressure level at receiver's points.*

*Organization: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Date: 4.2.2013*

*Additional Information: Pitkä käytävä, katto verhoiltu*

*Size of the hall in meters*

Length (X):150 m    Width (Y):3,6 m    Height (Z):2,4 m

*Surface absorption coefficients*

*Ceiling: 0,8*

*Floor: 0,01*

*Right Wall: 0,1*

*Left Wall: 0,06*

*Front Wall: 1*

*Back Wall: 1*

*Reduction coefficient: 0,001000*

*Reverberation time*

*Sabin+Knudsen : 0,395 s*

*Eyring : 0,337 s*

*Akuri : 0,336 s*

**Sound sources**

Nro.	x	y	z	$L_w$ (dB)	W/mW
1	10,000	1,800	1,200	100,000	10,000

**Sound pressure levels at receiver's points**

Nro.	x	y	z	$L_p$ (dB)	No. of Reflections
1	70,000	1,800	1,200	<b>70,158</b> dB	40

**JÄKÄLA-algoritmin NUMO-yhtälö:**

Neliön muotoon muunnetun käytävän (2,4 m × 3,6 m) korkeus  $H_0 = \sqrt{2,4 \times 3,6} = 2,93938$  metriä ja laskentakorkeus  $H = 0,8 \times 2,93938 = 2,3515$  metriä. Käytävä keskimääräinen absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,2425$ . Ilman matkavaimennuskerroin  $m = 0,001 \text{ m}^{-1}$ . Lasketaan käytävän äänenpainetaso  $L_p$  etäisyydellä  $a = 60$  metriä äänilähteestä:

$$L_p = L_w - 11 + 10 \lg \left[ \frac{e^{-ma}}{a^2} + \frac{4\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \beta^{\frac{a \tan(\theta)}{H}} e^{-ma\sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \right) \right] \quad (76)$$

äänilähteen äänitehotaso	$L_w = 100$ desibeliä
etäisyys äänilähteestä	$a = 60$ metriä
absorptiokerroin	$\alpha = 0,2425$
heijastuskerroin	$\beta = 0,7575$
laskentakorkeus	$H = 2,3515$ metriä
matkavaimennuskerroin	$m = 0,001 \text{ m}^{-1}$

$$L_{p60m} = 100 - 11 + 10 \lg \left[ \frac{e^{-(0,001 \times 60)}}{60^2} + \frac{4 \times 0,7575 \times \ln(0,7575)^2}{2,3515^2 \times (0,2425)^2} \times \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan(\theta) \times (0,7575)^{\frac{60 \times \tan(\theta)}{2,3515}} \times e^{-(0,001 \times 60) \sqrt{1+\tan^2(\theta)}} d\theta \right) \right] \quad (92)$$

Numeerisen integraalin arvoksi saadaan  $= 1,700082 \times 10^{-2}$

$$L_{p60m} = 100 - 11 + 10 \lg \{ 0,7415387 \times 1,700082 \times 10^{-2} \} = \mathbf{70,0 \text{ dB}} \quad (93)$$

**JÄKÄLA-algoritmin APPRO-yhtälö:**

$$L_p = L_w - 20 \lg a - 10 m a \lg e - 11 + 10 \lg \left\{ \left[ 1 - \frac{4\beta(\ln \beta)^2}{H(1-\beta)^2(0,4Hm - \ln(\beta))^2} \times \left[ e^{-0,4ma\theta_2} \beta^{\frac{a\theta_2}{H}} \{H(0,4am\theta_2 + 1) - a \ln(\beta)\theta_2\} \right] - H \right] \right\} \quad (83)$$

äänilähteen äänitehotaso	$L_w = 100$ desibeliä
etäisyys äänilähteestä	$a = 60$ metriä
absorptiokerroin	$\alpha = 0,2425$
heijastuskerroin	$\beta = 0,7575$
laskentakorkeus	$H = 2,3155$ metriä
laskennan yläraja	$\theta_2 = 0,5707$ radiaania, $\theta_2$ luetaan kuvan 24 tai 25 taulukosta
matkavaimennuskerroin	$m = 0,001 \text{ m}^{-1}$

Kun käytävän laskentakorkeus  $H=2,3155$  metriä, absorptiokerroin  $\bar{\alpha} = 0,2425$  ja vastaanottopisteen etäisyys  $a$  on 60 metrin äänilähteestä, saadaan laskennan ylärajaksi kuvan 25 taulukosta:  $\theta_2=33$  astetta eli 0,5707 radiaania.

Lasketaan käytävän äänenpainetaso  $L_p$  etäisyydellä  $a = 60$  metriä äänilähteestä:

$$L_{p60m} = 100 - 20 \lg 60 - 10(60 \times 0,001) \lg e - 11 + 10 \lg \left\{ \left[ 1 - \frac{4 \times 0,7575 \times (\ln 0,7575)^2}{2,3155 \times (0,2425)^2 \times (0,4 \times (2,3155 \times 0,001) - \ln(0,7575))^2} \times \left[ e^{-0,4(60 \times 0,001)0,5707} \times 0,7575^{\frac{60 \times 0,5707}{2,3155}} \times \left[ 2,3155 \times (0,4 \times 60 \times 0,001 \times 0,5707 + 1) - 60 \times \ln(0,7575) \times 0,5707 \right] \right] - 2,3155 \right] \right\} = 70,0 \text{ dB} \quad (94)$$

**Kuttruffin likiarvoyhtälö:**  $L_p = L_w - 11 + 10 \lg \left\{ \frac{1}{a^2} \left[ 1 + \frac{4\beta}{(1-\beta)^2} \right] \right\}$  (86)

äänilähteen äänitehotaso	$L_w = 100$ desibeliä
etäisyys äänilähteestä	$a = 60$ metriä
absorptiokerroin	$\alpha = 0,2425$
heijastuskerroin	$\beta = 0,7575$

$$L_p = 100 - 11 + 10 \lg \left\{ \frac{1}{60^2} \left[ 1 + \frac{4 \times 0,7575}{(1 - 0,7575)^2} \right] \right\} = \mathbf{70,6 \text{ dB}}$$
 (95)

**Tilastollisen huoneakustiikan teoria:**  $L_p = L_w + 10 \lg \left( \frac{1}{4\pi a^2} + \frac{4(1-\alpha)}{S\alpha + 4mV} \right)$  (28)

äänilähteen äänitehotaso	$L_w = 100$ desibeliä
etäisyys äänilähteestä	$a = 60$ metriä
absorptiokerroin	$\alpha = 0,257$
käytävän vaipan ala	$S = 1817,28 \text{ m}^2$
käytävän tilavuus	$V = 1296 \text{ m}^3$
matkavaimennuskerroin	$m = 0,001 \text{ m}^{-1}$

Keskimääräisen absorptiokertoimen laskenta:

Sivuseinien, lattian ja katon pinta-ala =  $2 \times (2,4 + 3,6) \times 150 = 1800 \text{ m}^2$ . Käytävän päätyjen pinta-ala =  $2 \times 2,4 \times 3,6 = 17,28 \text{ m}^2$ . Katon pinta-ala =  $480 \text{ m}^2$ . Vaipan kokonaispinta-ala  $S = 1817,28 \text{ m}^2$ . Sivuseinien ja lattian keskimääräinen absorptiokerroin  $\alpha_l = 0,05$  ja katon absorptiokerroin  $\alpha_k = 0,8$ . Käytävän kokonaisabsorptioala  $A = (1800 - 480) \times 0,05 + 480 \times 0,8 + 17,28 = 467,28 \text{ m}^2$ .

Käytävän keskimääräinen absorptiokerroin  $\alpha = \frac{467,28}{1817,28} = 0,257$

Lasketaan käytävän äänenpainetaso  $L_p$  etäisyydellä  $a = 60$  metriä äänilähteestä:

$$L_{p60m} = 100 + 10 \lg \left( \frac{1}{4\pi \times 60^2} + \frac{4(1 - 0,257)}{1817,28 \times 0,257 + 4 \times 0,001 \times 1296} \right) = \mathbf{78,0 \text{ dB}}$$
 (96)

## ACTA UNIVERSITATIS LAPPEENRANTAENSIS

481. KORPIJÄRVI, JUHA. Aging based maintenance and reinvestment scheduling of electric distribution network. 2012. Diss.
482. KORHONEN, JUHAMATTI. Active inverter output filtering methods. 2012. Diss.
483. KLODOWSKI, ADAM. Flexible multibody approach in bone strain estimation during physical activity: quantifying osteogenic potential. 2012. Diss.
484. VUORENMAA, MARKKU. Osaamisen johtaminen pk-yrityksen kansainvälisen kasvun elinkaarella. 2012. Diss.
485. RAUTIAINEN, MARITA. Dynamic ownership in family business systems – a portfolio business approach. 2012. Diss.
486. LILIUS, REIJO. THE FINNISH IT INDUSTRIES IN TRANSITION Defining and measuring the Finnish software product and IT services industries by applying theoretical frameworks . 2012. Diss.
487. TUOMINEN, PASI. The purpose of consumer co-operation: implications for the management and governance of co-operatives. 2012. Diss.
488. SAARI, ESA. Suurnopeus-turbokonerootoreiden termodynaaminen ja mekaaninen mallinnus sekä rakenneanalyysi. 2012. Diss.
489. PAANANEN, MIKKO. On innovative search: the use of internal and external sources of innovation among Finnish innovators. 2012. Diss.
490. BELOVA, POLINA. Quasiclassical approach to the vortex state in iron-based superconductors. 2012. Diss.
491. HIETANEN, IIRO. Design and characterization of large area position sensitive radiation detectors. 2012. Diss.
492. PÄSSILÄ, ANNE. A reflexive model of research-based theatre Processing innovation of the cross-road of theatre, reflection and practice-based innovation activities. 2012. Diss.
493. RIIPINEN, TOMI. Modeling and control of the power conversion unit in a solid oxide fuel cell environment. 2012. Diss.
494. RANTALAINEN, TUOMAS. Simulation of structural stress history based on dynamic analysis. 2012. Diss.
495. SALMIMIES, RIINA. Acidic dissolution of iron oxides and regeneration of a ceramic filter medium. 2012. Diss.
496. VAUTERIN, JOHANNA JULIA. The demand for global student talent: Capitalizing on the value of university-industry collaboration. 2012. Diss.
497. RILLA, MARKO. Design of salient pole PM synchronous machines for a vehicle traction application. 2012. Diss.
498. FEDOROVA, ELENA. Interdependence of emerging Eastern European stock markets. 2012. Diss.
499. SHAH, SRUJAL. Analysis and validation of space averaged drag model for numerical simulations of gas-solid flows in fluidized beds. 2012. Diss.
500. WANG, YONGBO. Novel methods for error modeling and parameter identification of redundant hybrid serial-parallel robot. 2012. Diss.

501. MAXIMOV, ALEXANDER. Theoretical analysis and numerical simulation of spectral radiative properties of combustion gases in oxy/air-fired combustion systems. 2012. Diss.
502. KUTVONEN, ANTERO. Strategic external deployment of intellectual assets. 2012. Diss.
503. VÄISÄNEN, VESA. Performance and scalability of isolated DC-DC converter topologies in low voltage, high current applications. 2012. Diss.
504. IKONEN, MIKA. Power cycling lifetime estimation of IGBT power modules based on chip temperature modeling. 2012. Diss.
505. LEIVO, TIMO. Pricing anomalies in the Finnish stock market. 2012. Diss.
506. NISKANEN, ANTTI. Landfill gas management as engineered landfills – Estimation and mitigation of environmental aspects. 2012. Diss.
507. QIU, FENG. Surface transformation hardening of carbon steel with high power fiber laser. 2012. Diss.
508. SMIRNOV, ALEXANDER. AMB system for high-speed motors using automatic commissioning. 2012. Diss.
509. ESKELINEN, HARRI, ed. Advanced approaches to analytical and systematic DFMA analysis. 2013.
510. RYYNÄNEN, HARRI. From network pictures to network insight in solution business – the role of internal communication. 2013. Diss.
511. JÄRVI, KATI. Ecosystem architecture design: endogenous and exogenous structural properties. 2013. Diss.
512. PIILI, HEIDI. Characterisation of laser beam and paper material interaction. 2013. Diss.
513. MONTO, SARI. Towards inter-organizational working capital management. 2013. Diss.
514. PIRINEN, MARKKU. The effects of welding heat input usability of high strength steels in welded structures. 2013. Diss.
515. SARKKINEN, MINNA. Strategic innovation management based on three dimensions diagnosing innovation development needs in a peripheral region. 2013. Diss.
516. MAGLYAS, ANDREY. Overcoming the complexity of software product management. 2013. Diss.
517. MOISIO, SAMI. A soft contact collision method for real-time simulation of triangularized geometries in multibody dynamics. 2013. Diss.
518. IMMONEN, PAULA. Energy efficiency of a diesel-electric mobile working machine. 2013. Diss.
519. ELORANTA, LEENA. Innovation in a non-formal adult education organisation – multi-case study in four education centres. 2013. Diss.
520. ZAKHARCHUK, IVAN. Manifestation of the pairing symmetry in the vortex core structure in iron-based superconductors. 2013. Diss.
521. KÄÄRIÄINEN, MARJA-LEENA. Atomic layer deposited titanium and zinc oxides; structure and doping effects on their photoactivity, photocatalytic activity and bioactivity. 2013. Diss.





