

Akustinen mallintaminen työpaikkojen meluntorjunta- suunnittelussa

Lisensiaatintyö
Turun yliopisto
Fysiikan laitos
2006
Jukka Keränen
Tarkastajat:
Rauno Pääkkönen
Jyrki Kauppinen

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

KERÄNEN, JUKKA: Akustinen mallintaminen työpaikkojen meluntorjuntasuunnittelussa

Lisensiaatintyö, 69 s., 7 liites.

fysiikka

3. huhtikuuta 2006

Melu on teollisuuden työpaikoilla yksi työympäristön pahimmista fysikaalisista häiritseväistä. Meluntorjunta työpaikoilla on usein pitkä jatkuva prosessi, joka sitoo paljon aikaa ja rahaa. Meluntorjunnan vaikutusten ennustaminen kohtuullisella tarkkuudella on välttämätöntä, jotta voidaan arvioida meluntorjuntaratkaisujen kustannustehokkuutta ja tehdä niiden toteuttamispäätöksiä. Tämän työn tavoite oli löytää kirjallisuudesta mallinnusmenetelmiä, jotka soveltuisivat apuvälineiksi työpaikkojen meluntorjuntatoimenpiteiden suunnitteluun.

Työssä vertailtiin 11 jälkikäytö-aajan ja 14 melun leviämisen mallinnusmenetelmää. Melunleviämismalleissa tarkasteltava parametri oli yksittäisen äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso tarkastelupisteissä. Vertailun avulla selvitettiin menetelmien soveltuvuus työtilojen akustisten parannustoimenpiteiden vaikutuksen ennustamiseen. Mallien tuloksia verrattiin mittaustuloksiin, joita kertyi vuosien 1996-2000 aikana toteutetuista meluntorjuntahankkeista. Tässä työssä mittaustulosta pidettiin referenssiarvona, vaikka mitattuihin arvoihin itseensäkin sisältyy merkittäviä epävarmuustekijöitä, joita on pyritty huomioimaan tulosten pohdintojen yhteydessä. Vertailun perusteella voidaan todeta, että meluntorjuntasuunnitteluun soveltuvat parhaiten säteenseuranta-menetelmään perustuvat mallinnusohjelmat. Eräillä yksinkertaisilla malleilla voidaan kuitenkin ennustaa esimerkiksi lisäakustoinnin vaikutus melutasoon tai jälkikäytö-aikaan, jos ennustetarkkuudelle ei aseteta kovin suuria vaatimuksia.

UNIVERSITY OF TURKU

Department of Physics

KERÄNEN, JUKKA: Acoustical modeling in the design of noise control measures in workplaces

Licentiate thesis, 69 p., 4 appendices.

physics

April 3rd, 2006

Abstract

Building acoustical noise control is usually long and expensive process. Accurate prediction of the effect of noise control measures is very important when the most cost-effective solution is required. In this licentiate thesis several models for predicting the effect of noise control measures were examined. The goal was to find easy and robust models for the design of noise control in workplaces. In this study 11 models for predicting reverberation time and 14 models for predicting sound propagation in workplaces were compared in four workplaces before and after noise control measures. The modeling results were also compared to measurement results obtained in the four workplaces during noise control processes in 1996-2000. The accuracies of the predictions were determined using the measurement results as reference values. The models based on ray-tracing method were the most accurate for predicting the effect of noise control measures. However, some of the simple models were reasonably accurate for predicting the effect of additional absorption on noise level and reverberation time.

ALKUSANAT

Kiinnostukseni akustiikkaan ja meluntorjuntaan on tullut työn kautta. Työskennellessäni tutkijana työpaikkojen meluntorjuntaprojekteissa olen tutustunut erilaisiin tapoihin arvioida ja ennustaa suunniteltavien meluntorjuntaratkaisujen vaikutusta. Vaikka nykyään on käytettävissä tehokkaita menetelmiä tila-akustiikan mallintamiseen, perustuvat meluntorjuntaratkaisujen toteuttamispäätökset edelleen usein melko epävarmoihin arvioihin toimenpiteiden todellisista vaikutuksista – kustannustehokkuudesta puhumattakaan.

Tässä työssä vertailen useita eri malleja, joita viime vuosikymmenten aikana on esitetty melun leviämisen ja jälkikaiunta-ajan ennustamiseen erilaisissa tiloissa. Mallien tarkkuuden arviointiin käytin vertailukohtana mittauksia neljästä eri työpaikasta, joissa toteutettiin meluntorjuntatoimenpiteitä ja niiden vaikutukset tilan akustiikkaan ja melutasoon määritettiin vertailukelpoisin mittauksin. Näissä kohteissa jälkikaiunta-aika- ja melunleviämismittaukset suoritettiin ennen ja jälkeen meluntorjunnan samoilla menetelmillä ja ominaisuuksiltaan vastaavilla mittauslaitteistoilla.

Lisensiaatintyötäni on ohjannut Valtteri Hongisto Työterveyslaitokselta. Lisensiaatintyön ovat tarkastaneet Rauno Pääkkönen Työterveyslaitokselta ja Jyrki Kauppinen Turun yliopistolta, parhaat kiitokset heille.

Kiitän David Oliva Elorzaa, joka on ohjauksessani toteuttanut ja kehittänyt dBworks-mallinnusohjelmaa. Kiitän myös Työterveyslaitoksen ilmastointi- ja akustiikkalaboratorion työtovereitani, jotka ovat auttaneet tutkimuksessani. Lopuksi kiitän vaimoani Tanja Kerästä ja lapsiani Sennaa ja Aarnia kärsivällisyydestä ja henkisestä tuesta tämän työn aikana.

Turussa 3.4.2006

Jukka Keränen

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät	2
1. Johdanto	5
1.1 Tutkimuksen tausta.....	5
1.2 Teollisuustilojen akustinen mallintaminen	6
1.3 Avotoimiston akustinen mallintaminen.....	7
1.4 Opetus- ja puhetilojen akustinen mallintaminen.....	7
1.5 Akustisten mallien tarkkuus.....	8
1.6 Tutkimuksen tavoite	10
2 Äänikenttien akustiset mallintamismenetelmät	10
2.1 Huoneakustiikan mallintaminen pienoismalleilla	11
2.2 Huoneakustiikan tilastollinen mallintaminen	13
2.2.1 Jälkikaiunta-ajan laskenta.....	14
2.2.2 Äänenpainetaso	16
2.2.3 Ilman absorption vaikutus	17
2.3 Huoneakustiikan yksinkertaiset mallit	18
2.3.1 Fribergin malli	18
2.3.2 Thompsonin malli	20
2.3.3 Wilsonin malli	20
2.3.4 Embletonin ja Russelin malli.....	20
2.3.5 Kuttruffin malli	22
2.3.6 Zetterlingin malli	22
2.3.7 Sergeyevin malli	23
2.3.8 Hodgsonin malli.....	24
2.3.9 Heereman malli.....	24
2.4 Huoneakustiikan mallintaminen altoyhtälömalleilla.....	26
2.5 Huoneakustiikan geometrinen mallintaminen	26
2.5.1 Kuvalähdemenetelmä	27
2.5.2 Säteenseurantamenetelmä	32
3 Mittausmenetelmät.....	38
4 Virhetarkastelun menetelmät.....	39
4.1 Vertailtavien mallien verifiointi	39
4.2 Mallinnustulosten virhetarkastelu.....	40
5 Mallinnuskohteet	40
6 Tulokset	45
6.1 Yksinkertaisten mallien verifiointi	45
6.2 Mittaus- ja mallinnustulokset	46
6.3 Virhetarkastelun tulokset.....	55
7 Pohdinta.....	58
7.1 Yksinkertaisten mallien verifiointi.....	58
7.2 Tulosten tarkastelu kohteittain	58
7.2.1. Kohde 1	58
7.2.2. Kohde 2	59
7.2.3. Kohde 3	59
7.2.4. Kohde 4	60
7.3 Äänenpainetasoennustettavuus malleilla	60
7.3.1. Äänenpainetasoennusteen tarkkuus eri taajuuksilla.....	62
7.4 Jälkikaiunta-ajan ennustettavuus malleilla	63
7.5 Yleistä pohdintaa.....	63

8 Yhteenveto.....	64
LÄHDELUETTELO	
LIITTEET	

Käytetyt merkinnät

α	akustinen absorptiosuhde
α_{air}	ilman absorptiosuhde, dB/m
α_c, α_{ka}	katon absorptiosuhde
α_{eff}	tilan efektiivinen absorptiosuhde
α_f, α_{la}	lattian absorptiosuhde
α_k	pinnan k absorptiosuhde
α_{kal}	kalusteiden keskimääräinen absorptiosuhde
α'_k	pinnan k absorptiosuhde Millingtonin yhtälössä
α_m	keskimääräinen kokonaisabsorptiosuhde
α_{qk}	osapinnan absorptiosuhde
α_w, α_{se}	seinien absorptiosuhde
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	vastakkaisten seinien absorptiosuhteiden keskiarvo
Φ	pinnan kallistuskulma kovalähdemenetelmässä
$d\Omega$	avaruuskulma
λ	äänien aallonpituus, m
λ_m	äänien aallonpituus mallissa, m
μ	pienoismallin mittasuhte
μ_f	kalustevaimennustekijä
v	Tilan keskimääräinen sirontataajuus kalusteille
ω, ω''	äänisäteen ja pinnan normaalin välinen kulma, rad
θ	äänisäteen suuntakulma
φ	äänisäteen suuntakulma
ρ_{air}	ilman tiheys (riippuu lämpötilasta), noin 1.18 kg/m ³
γ^2	varianssi
χ	keskihajonta äänitason mallinnuksen virhetarkastelussa
χ_{T60}	keskihajonta jälkikaiunta-ajan mallinnuksen virhetarkastelussa
a	vakio Fribergin mallissa
A	absorptiopinta-ala, m ²
A_{ka}	kattopinnan vaimennustekijä
A_{la}	lattiapinnan vaimennustekijä
A_{se}	seinäpinnan vaimennustekijä
A_T	vakio Fribergin mallissa
A_L	mallinnetun äänitason keskivirhe
A_{T60}	mallinnetun jälkikaiunta-ajan keskivirhe
b	vakio Fribergin mallissa
b_K	vakio Kuttruffin mallissa
BP	ilmanpaine, mbar
c	äänien nopeus ilmassa (riippuu lämpötilasta), noin 334 m/s
C_{a0}, C_{a1}	vakiot oktaavikaistoittain Heereman mallissa (kalustetiheys)
$C_{i0} \dots C_{i9}$	vakiot oktaavikaistoittain Heereman mallissa (äänitaso)
$C_{s0} \dots C_{s6}$	vakiot oktaavikaistoittain Heereman mallissa (äänitaso)
$C_{t0} \dots C_{t2}$	vakiot oktaavikaistoittain Heereman mallissa (jälkikaiunta-aika)
d	diffuusiokerroin
d_{kp}	kalusteen ympärille kuvitellun pallon halkaisija, m
D	äänien energiatiheys, J/m
D_{suo}	suoraan saapuneiden säteiden energiatiheys, J/m
D_{sir}	kalusteiden sirottamien säteiden energiatiheys, J/m
dI_F	vakiot oktaavikaistoittain Hodgsonin mallissa (kalusteet)
dS_{1A}	vakiot oktaavikaistoittain Hodgsonin mallissa (absorptiomateriaali)
dS_{iF}	vakiot oktaavikaistoittain Hodgsonin mallissa (kalusteet)
dL	äänienpainetason muutos, dB
dL_2	äänienpainetason vaimenema etäisyyden kaksinkertaistuessa, dB
E_i	äänisäteen vastaanottoalueeseen tuoma energia, J
f	äänien taajuus, Hz
f_m	äänien taajuus pienoismallissa, Hz
f_{rO}	hopen relaksaatiotaajuus, Hz
f_{rN}	typen relaksaatiotaajuus, Hz
F	modulaatiotaajuus

h	kalustekorkeus, m
h_m	veden moolinen tiheys-%
H	tilan korkeus, m
I_E	vakiot oktaavikaistoittain Hodgsonin mallissa
I_i	äänisäteen intensiteetti, W/m^2
k_T	tilavakio Fribergin mallissa
l_m	keskimääräinen vapaa matka äänisäteille, m
L	tilan pituus, m
$L_{A,eq}$	A-taajuuspainotettu ekvivalenttinen äänenpainetaso, dB
L_m	tilan pituus pienoismallissa, m
L_p	äänenpainetaso, dB re 20 μPa
L_S	puheen äänenpainetaso, dB re 20 μPa
L_N	taustamelun äänenpainetaso, dB re 20 μPa
L_w	äänitehotaso, dB re 1 pW
L_x, L_y, L_z	tilan mitat: pituus, leveys, korkeus, m
m	ilman vaimennustekijä, Np/m
M	modulaation vaimentumiskerroin
$M_{S/N}$	modulaation vaimentumiskerroin puhe-kohina-suhteen perusteella
M_{RT}	modulaation vaimentumiskerroin kaiuntaisuuden perusteella
$m_{received}$	vastaanotetun signaalin modulaatiokerroin
$m_{transmitted}$	lähetetyn signaalin modulaatiokerroin
\mathbf{n}	pinnan normaalivektori (a_n, b_n, c_n)
N	vastaanottopisteiden lukumäärä
N_{okt}	tarkasteltavien oktaavikaistojen lukumäärä
N_f	kalusteiden lukumäärä
N_s	äänisäteiden määrä
n_k	kalustetiheys, m^{-3}
p_i	yksittäisen äänisäteen ääniteho, W
p'	yksittäisen äänisäteen ääniteho tarkastelupisteessä, W
p''	heijastuneen äänisäteen ääniteho, W
p_{diff}''	diffuusisti heijastuneen äänisäteiden ääniteho, W
p_a	ilmanpaine, kPa
p_r	referenssi-ilmanpaine, 101,325 kPa
p_0	äänenpainetason referenssi, 20 μPa
P	äänilähteen ääniteho, W
P_i	pinta säteenseurantamallissa
P_0	äänitehon referenssi, 1 pW
Q	kalustetiheys, m^{-1}
q	äänilähteen suuntaavuus
r	etäisyys äänilähteestä, m
r_i	äänisäteiden kulkema matka, m
r_{ijk}, r_n	kuvalähteen etäisyys vastaanottopisteestä, m
R	huonevakio, m^2
R_i	heijastuspiste
RH	ilman suhteellinen kosteus, %
$RASTI$	puheensiirtoindeksi pikamenetelmällä
S	pintojen kokonaispinta-ala, m^2
S_f	kalusteiden kokonaispinta-ala, m^2
S_{ff}	kalusteiden peittämän lattiapinta-alan suhteellinen osuus
S_{IE}	vakiot oktaavikaistoittain Hodgsonin mallissa
S_{kp}	kalusteen ympärille kuvitellun pallon poikkipinta-ala, m^2
S_k	yksittäisen huonepinnan ala, m^2
S_q	yksittäisen suuren huonepinnan ala, m^2
S_{qk}	yksittäisen suuren huonepinnan osapinnan ala, m^2
S_w	seinien pinta-ala, m^2
S_x	vastakkaisten seinien pinta-alojen summa, m^2
S_y	vastakkaisten seinien pinta-alojen summa, m^2
S_z	vastakkaisten seinien pinta-alojen summa, m^2
SP	äänien etäisyysvaimenema, dB
STI	puheensiirtoindeksi

$(S/N)_{\text{app}}$	näennäinen signaali-kohinasuhde, dB
t	tarkasteluaikaväli, s
T	jälkikaiunta-aika, s
T_1	äänisäteen vastaanottoalueen läpi kulkemiseen kuluva aika, s
T_c	ilman lämpötila, K
T_0	referenssilämpötila, K
T_{01}	veden kolmoispistelämpötila, K
TM	huonelämpötila, °C
\mathbf{u}, \mathbf{u}'	äänisäteen suuntavektori $(l_r, m_r, n_r), (l_r', m_r', n_r')$
u, u', u''	äänisäteen ja pinnan normaalin välinen kulma, rad
V	huonetilavuus, m ³
V_r	vastaanottoalueen tilavuus, m ³
W	tilan leveys, m

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Melu on teollisuuden työpaikoilla yksi työympäristön pahimmista fysikaalisista häiritsejistä. Meluntorjunta työpaikoilla on usein pitkä, jatkuva prosessi, joka sitoo paljon aikaa ja rahaa. Meluntorjunnalla työpaikoilla on pääasiassa pyritty täyttämään lakien ja asetusten määräyksissä, ohjeissa tai suosituksissa annetut vaatimukset. Niissä esitetyt ohjeet koskevat pääasiassa työntekijöiden melualtistusta. Niinpä työntekijöiden altistumista melulle on usein vähennetty helpoimmalla ratkaisulla eli kuulonsuojainten käytöllä. Kuulonsuojaimia on tarjolla monenlaisia ja useimmat työntekijät löytävät niistä itselleen sopivat. Jotkut työntekijät kuitenkin kieltäytyvät kuulonsuojainten käytöstä ja useimmat eivät käytä kuulonsuojaimia aina melussa ollessaan. Kuulonsuojaimia käyttävän työntekijän todellisen melualtistuksen arviointi on melko vaikeaa, vaikka kuulonsuojaimen vaimennusarvojen ja työtilassa mitattujen melutasojen avulla voidaan laskennallisesti arvioida korviin kohdistuvaa melutasoa. Melualtistusta voidaan vähentää myös melussaoloaikaa rajoittamalla esimerkiksi työvuorojärjestelyin, työtehtäväkierrolla ja työn jaksottamisella.

Tällä vuosikymmenellä yhä tärkeämmäksi tekijäksi on noussut työn mielekkyys, tuottavuus ja tehokkuus, joihin työympäristön olosuhteilla on suuri vaikutus. Työympäristön turvallisuus ja viihtyisyys koetaan työn tekemiseen houkutteleviksi ja työpaikan imagoa parantaviksi tekijöiksi. Näiden tavoitteiden saavuttamiseen ei enää riitä kuulonsuojainten käyttö ja melussaoloajan lyhentäminen, vaan myös työtilan melutasoa täytyy alentaa.

Tehokas meluntorjunta ja äänympäristön hallinta edellyttää suunnittelijoilta kokemusta ja äänen etenemiseen ja käyttäytymiseen liittyvän perusteorian osaamista. Aiemmin ja usein vielä nykyäänkin työtilojen akustinen suunnittelu perustuu melko yksinkertaisten yhtälöiden soveltamiseen. Yhtälöt perustuvat joko mittauksista saatuihin kokeellisiin arvoihin tai akustiikan teoriasta johdettuihin yksinkertaisuuksiin. Tärkeimmät tulosparametrit näissä ovat jälkikaunta-aika ja meluavan koneen aiheuttama äänenpainetaso (melutaso) työpisteissä tai tuotantotilassa yleensä.

Toimisto- ja puhetiloihin, kuten avotoimistot sekä neuvottelu- ja luokkahuoneet, suuri melutaso harvemmin on ensisijainen ongelma. Näiden tilojen suunnittelussa lisäparametriksi nousee puheen erotettavuus. Avotoimistoissa puheäänen kantautuminen työpisteestä toisiin aiheuttaa häiriötä ja sitä pyritään vaimentamaan tai peittämään. Opetustiloissa, kuten auditoriot ja luokat, tilanne on päinvastainen ja puheen tulisi kuulua selkeästi joka puolelle tilaan. Tällöin taustamelu pyritään minimoimaan ja puheäänen selkeä kuuluminen kuuntelupisteisiin varmistamaan esimerkiksi vaikuttamalla akustisilla ratkaisulla äänen heijastumiseen tilan pinnoista. Puheen erotettavuuden laskentaan ja mittaamiseen on standardoituja menetelmiä. Niissä lähtötietoina tarvitaan puheen ja taustamelun äänenpainetaso sekä tärkeimmät tilan akustiset parametrit (jälkikaunta-aika, pintojen absorptio-ominaisuudet, suoran äänen etenemistä estävät esineet). Eräs yleisesti käytetty puheen

erotettavuuden määrittäminen, puheensirtoindeksi, esitetään liitteessä 4.

Tilojen akustista mallintamista tietokoneohjelman avulla on tutkittu 1950-luvulta lähtien. Allred ja Newhouse esittivät jo 1958 menetelmän, jonka avulla voitiin laskea esimerkiksi jälkikaiunta-aika.[1,2] Nykyään tarjolla olevilla akustisilla suunnitteluohjelmistoilla on mahdollista tarkastella varsin monimuotoisten tilojen akustiikkaa. Ohjelmistoja on alunperin laadittu konserttisalien ja suurten puhetilojen suunnitteluun, mutta niitä on kyetty tehokkaasti käyttämään myös teollisuustilojen suunnittelussa.

1.2 Teollisuustilojen akustinen mallintaminen

Teollisuustiloissa passiivisia meluntorjuntakeinoja ovat muun muassa äänen absorption lisääminen tilassa peittämällä kovia pintoja ääntä absorboivilla levyillä (akustiikkalevyt), meluisien koneiden kotelointi, siirto tai eristäminen sekä paikallisesti äänen vaimentaminen seinäkkeillä. Ennakoivassa meluntorjunnassa melutasojen ennustaminen suunniteltavassa tuotantotilassa on tarpeen, jotta voidaan välttää virheet tilasuunnitelmassa jo etukäteen. Kaikkein tehokkain ennakoivan meluntorjunnan keino on vähämeluisten koneiden hankinta. Valitettavan usein koneissa ei vain ole tarjolla todella hiljaisia vaihtoehtoja.

Teollisuustilan akustisessa suunnittelussa tärkeimmät mallinnettavat parametrit ovat äänenpainetaso työpisteissä ja tilan jälkikaiunta-aika. Tällöin olennaista on määrittellä äänen etenemistä estävien materiaalien (absorbentit, seinäkkeet, kotelot, väliseinät) tarve, mikä riippuu melua tuottavien äänilähteiden sijainnista ja äänitehosta.

Teollisuustilojen mallintamisen keskeinen ongelma on se, miten tilan irtaimiston (kalusteet, koneet, laitteet, seinäkkeet ja seinät) ja meluntorjuntakeinojen vaikutus äänen etenemiseen otetaan huomioon. Esimerkiksi melunlähteen koteloinnin voi yksinkertaisimmin huomioida mallissa vähentämällä äänilähteen äänitehostasoa vastaavasti. Huomattavasti monimutkaisempi tapa on kuvata mallissa melukotelo, joka ympäröi äänilähdettä. Mallinnettavan kotelon tulisi olla pinnoiltaan osittain ääntä läpäisevä tai koteloon täytyisi jättää aukkoja, jotta yhtään ääntä tulisi kotelosta ulos. Muuten kotelo käyttäytyisi mallissa täysin ääntä eristävänä, mikä ei luonnollisestikaan vastaa todellista tilannetta. Ääneneristykseen mallintamiseen on esitetty lukuisia eri malleja,[3] mutta niiden yhdistäminen tila-akustiikan malliin on hankalaa. Joitakin tutkimuksia aiheesta on tehty lähinnä tilastollisen energia-analyysin (SEA) menetelmiä käyttäen.[4]

Erityisen ongelmallista on arvioida, mitkä pinnat mallinnetaan ja millaiset absorptiosuhteet pinnoille tulisi määrittellä. Absorptiosuhde, jonka arvo voi olla välillä 0.0-1.0, määrää pintaan osuvasta äänienergiasta siihen absorboituvan energian osuuden. Materiaalin absorptiosuhde riippuu sen rakenteen ja ominaisuuksien lisäksi äänen tulokulmasta ja taajuudesta. Akustisissa malleissa käytetään yleensä tulokulmasta riippumattomia kaiuntahuoneessa (diffuusi äänikenttä) oktaavikaistoittain mitattuja arvoja.

Kaikkia tilan todellisia pintoja ei mallissa voida ottaa huomioon vaan niistä hahmotellaan osakokonaisuuksia, joiden akustiset ominaisuudet

arvioidaan kokeilujen kautta. Esimerkiksi jälkikaiunta-aikaa voidaan melko hyvin käyttää tilan kokonaisabsorption määrittämiseen, kun tilan äänikenttä oletetaan diffuusiksi. Lisää pohdittavaa aiheuttaa se, että absorptio on tuotantotiloissa harvoin tasaisesti jakautunutta, jolloin jälkikaiunta-aika voi vaihdella suurestikin eri puolilla tilaa. Tämä tulisi luonnollisesti ottaa huomioon arvioitaessa mallinnustuloksia kussakin tarkastelupisteessä.

1.3 Avotoimiston akustinen mallintaminen

Avotoimistoissa korostuvat tilan kalusteiden mallintamisen ongelmat. Tyypillisen avotoimiston työpisteiden väliset seinäkkeet ovat matalia ja reunoiltaan avoimia. Tilan katto on usein alaslaskettu ja sen absorptiosuhde on kohtuullisen suuri. Tällöin äänen taittuminen seinäkkeen yli on merkittävä äänenkulkureitti työpisteiden välillä. Jos katto on kovapintainen, heijastuu ääni voimakkaasti kattopinnasta, mikä tehostaa äänen kuulumista läheisiin työpisteisiin.

Geometriseen akustiikkaan perustuvat mallit (kappale 2.5) eivät ole soveltuneet kovin hyvin avotoimistojen suunnitteluun, koska keskeinen sisustuselementti työpisteiden välillä on matala seinäke, jonka ylitse ääni taipuu. Tätä ilmiötä ei akustisissa mallinnusohjelmissa ole yleensä huomioitu. Joitakin sovelluksia diffraktion mallintamiseen on esitetty,[5, 6, 7, 8, 9, 10] mutta työtilojen mallinnuksessa niitä on käytetty vähän. Periaatteessa yksittäisen seinäkkeen ylitse taipuvan ja koko tilan kaiuntaisen äänen osuudet voitaisiin laskea erikseen ja lopuksi summata niiden yhteisvaikutus tarkastelupisteessä.

Hongisto ym. kehittivät yksinkertaisen mallin kahden vierekkäisen avotoimistotyöpisteen välisen puheensirtoindeksin STI määrittämiseen.[11] Malli huomioi kuvalähdemenetelmällä katosta ja viereisistä seinistä suoraan heijastuvat äänet, seinäkkeen yli taipuvan, seinäkkeen suoraan läpäisevän ja tilan kaiuntaisen äänen. Mallin tulokset ovat vastanneet melko hyvin avotoimistoissa lähekkäisissä työpisteissä suoritettujen mittauksen tuloksia, mutta malli ei sovellu kauempana, useampien seinäkkeiden takana sijaitsevien työpisteiden tarkasteluun.

1.4 Opetus- ja puhetilojen akustinen mallintaminen

Puhetilojen suunnittelussa on tärkeää, että puheen erotettavuutta heikentäviä äänen heijastuksia tai puheääntä peittävä taustamelua ei ole. Pienissä opetustiloissa hyvä puheen erotettavuus perustuu suoran äänen tehokkaaseen siirtymiseen puhujan paikalta kuuntelupisteisiin. Puheäänien kuulumista voidaan tehostaa sopivilla heijastuksilla sivuavista seinistä ja katosta. Heijastuneiden äänien saapumisaika kuuntelupisteisiin ei saa korvin kuultavasti poiketa suoran äänen saapumisajasta. Heijastuksia ei myöskään saa olla liikaa, jotta tila ei muutu häiritsevän kaiuntaiseksi ja puheen erotettavuus heikkene.

Suurissa puhetiloissa lisäongelmia tuottavat erilaiset äänen vahvistuslaitteet, kuten mikrofonit ja kaiutinjärjestelmät. Esimerkiksi kaiutinjärjestelmän eri kaiuttimille tarvittavien viiveiden ja vahvistustasojen mallintaminen tarkasti on vaikeaa. Kaiutinjärjestelmien ja tila-akustiikan suunnitteluun on markkinoilla esimerkiksi EASE-mallinnusohjelma, joka hyödyntää kuvalähde- ja

säteenseurantamenetelmää.[12]

1.5 Akustisten mallien tarkkuus

Teollisuustilojen melutason ja jälkikaiunta-ajan laskemiseen on käytetty useita eri menetelmiin perustuvia akustisia mallinnusohjelmia. Yksittäisten mallinnusohjelmien tuloksia on vertailtu useissa eri tutkimuksissa. Tavallisimpia ovat tapauskohtaiset tutkimukset, joissa yksittäisestä tilasta on luotu malli, jolla on tarkasteltu muutoksen vaikutusta tilan akustiikkaan. Teollisuustiloissa näitä ovat tehneet mm. Hodgson [13, 14, 15], Hongisto ym. [16], Sorainen ym. [17] ja Christensen ym. [18]

Howarth ja Lam vertailivat ODEON v.2.5 ohjelman, jossa sovelletaan sekä kuvälähde- että säteenseurantamenetelmää, mallinnustuloksia mittaustuloksiin viidessä konserttisalissa, kahdessa teatterissa ja yhdessä kirkossa.[19] Vertailtavia parametreja olivat mm. jälkikaiunta-aika, ja varhainen jälkikaiunta-aika 125-4000 Hz oktaavikaistoilla. Tutkimuksessa todettiin, että mallinnusmenetelmissä on vielä paljon parannettavaa. Toisaalta geometrinen mallinnus ei luonut riittävän diffuusia kenttää ja toisaalta äänen suuntakuviot katosi, jos pyrittiin lisäämään diffuusien heijastusten määrää mallissa. Lisäksi vastaanottoalueilla, jotka olivat seinäkkeiden tai vastaavien takana, olisi pitänyt ottaa huomioon äänen diffraktio seinäkkeen yli ja sivuilta.

Lam vertaili kolmea eri diffuusin heijastuksen mallinnusmenetelmää mittauksiin suorakulmaisen tilan ja konserttisalin 1:50 pienoismalleissa sekä todellisessa auditoriossa.[20] Lam totesi, että diffuusien heijastusten mallintaminen parantaa tulosten tarkkuutta vain spekulariheijastuksia soveltavaan malliin nähden. Diffuuseja heijastuksia soveltavat mallit eivät olleet kovin tarkkoja mallinnettaessa niitä akustisia parametreja, joihin ensimmäisillä heijastuksilla suuri merkitys.

Niironen tarkasteli diffuusien heijastusten mallintamista erityisesti kuvälähde-, säteenseuranta- ja radiositeettimenetelmiä käytettäessä.[21] Niironen sovelsi työssään kuvälähde- ja radiositeettimenetelmää kuvitteellisen yksinkertaisen suorakulmaisen tilan akustiikan tarkastelussa. Yhteenvedossa hän totesi, että sirontakertoimet tulisi määrittellä taajuusriippuvina kuten absorptiosuhteetkin, koska äänen heijastuminen pinnoista riippuu taajuudesta. Lisäksi hänkin totesi, että satunnaiseen säteiden seurantaan perustuva menetelmä on tarkin, kun diffuusit heijastukset otetaan huomioon ja säteiden lukumäärä on riittävä.

Keränen ym. vertailivat ODEON v 3.1 ohjelman mallinnustuloksia kuudessa erilaisessa tuotantotilassa kahdessa tilanteessa.[22] Tarkasteltavat tilanteet olivat alkutilanne ennen meluntorjuntatoimenpiteitä ja muutostilanne meluntorjuntatoimenpiteiden toteuttamisen jälkeen. Vertailtavia parametreja olivat jälkikaiunta-aika ja yksittäisen äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso tarkastelupisteissä. Tutkimuksessa todettiin, että akustisen mallin avulla voidaan kohtuullisen tarkasti ennustaa yksittäisten meluntorjuntatoimenpiteiden vaikutus melutasoon tuotantotilan työpisteissä. Tutkimuksessa käytetyssä mallinnusohjelmassa todettiin samat puutteet kuin edellä esitetyissä tutkimuksissakin.

Myös eri mallinnusohjelmien tuloksia on vertailtu keskenään.

Mallinnusohjelmien ennustetarkkuutta on tarkasteltu vertaamalla keskenään ja mitattuihin arvoihin samoilla lähtöarvoilla yksittäisissä kohteissa saatuja laskentatuloksia (round-robin koe). Tarkasteltavia suureita ovat olleet jälkikaiunta-aika ym. tila-akustiset parametrit ja äänenpainetaso. Round-robin kokeita on suoritettu mm. auditoriossa, konserttisaleissa ja kirkoissa. Vorländer vertaili 16 eri kuvalähde- tai säteenseurantamenetelmään perustuvaa mallinnus-ohjelmaa, joista vain kolme tuotti luotettavia tuloksia.[23] Vertailu suoritettiin 1 kHz oktaavikaistalla. Vertailtavia parametreja olivat jälkikaiunta-aika, varhainen jälkikaiunta-aika sekä muita lähinnä konserttisalien suunnittelussa käytettyjä tila-akustisia parametrejä.

Vastaavan tutkimuksen, jossa mallinnettava kohde oli nykyaikainen konserttisali, julkaisi Bork vuonna 2000.[24] Kaksivaiheisessa tutkimuksessa osallistujia oli 16, joista osa oli mallinnusohjelmien kehittäjiä ja osa käyttäjiä. Useimmat osallistuneista käyttivät mallinnuksessa kuvalähde- ja säteenseurantamenetelmän yhdistelmää. Tulokset osoittivat, että mallinnusohjelmien käyttäjän merkitys on hyvin suuri. Jotta ohjelmilla sai optimoitua mallinnustehtävän, oli oltava riittävästi kokemusta akustiikan ilmiöistä ja tunnettava myös itse laskentaohjelman rajoitteet ja ominaisuudet. Kolmas round-robin tutkimus, jonka kohteena oli pieni äänitysstudio, on juuri julkaistu.[25, 26, 27] Tutkimuksen ensimmäisessä osassa, jossa neljä eri ryhmää suoritti äänitysstudioissa akustisten parametrien mittaukset ISO 3382 standardin mukaan,[28] kiinnitettiin huomiota erityisesti akustisten parametrien mittaamisessa esiintyviin ongelmiin. Tarkasteltavassa äänitysstudioissa oli suuria diffuusoripintoja ja resonaattorirakenteita, joiden absorptio- ja heijastusominaisuuksien määrittäminen tarkasti ei ole helppoa edes laboratorio-olosuhteissa. Suhteellisen pienessä tilassa ongelmia aiheutti alhainen mooditiheys pienillä taajuuksilla. Toisessa osassa keskityttiin mallintamisen ongelmakohtiin. Mallinnus tehtiin kolmessa vaiheessa, joissa asteittain lisättiin yksityiskohtia mallien geometriatiedostoihin. Johtopäätöksissä todettiin, että yksityiskohtien pikkutarkka mallintaminen ei paranna mallinnustulosten tarkkuutta, vaan pienet yksityiskohdat voidaan "sulauttaa" suurempiin pintoihin, kun arvioidaan oikein pintojen absorptio- ja sirontaominaisuudet.

Eräänlaisessa round-robin tutkimuksessa Hodgson vertaili seitsemällä eri mallinnusmenetelmällä laskettuja etäisyysvaimenemia varastohuoneessa (30 x 8 x 3.8 m) ja sen pienoismallissa (1:50) mitattuihin etäisyysvaimenemiin.[29] Menetelmistä viisi perustui kuvalähde-, yksi säteenseuranta-menetelmään ja yksi oli Fribergin empiirinen malli (kappale 2.3.1). Hodgson päätyi tulokseen, että kalustettujen tilojen mallintamisessa säteenseurantamenetelmä on huomattavasti tarkempi ja paremmin sovellettavissa kalustettujen tilojen mallintamiseen kuin kuvalähdemenetelmään perustuvat mallit. Fribergin malli ei tutkimuksen mukaan soveltunut tarkastellun tilan akustiseen mallintamiseen.

Round-robin tutkimuksissa on käytetty vain yhtä äänilähdettä kerrallaan. Ondet ja Barbry vertasivat työpajassa (107 x 42 x 5 m), jossa oli 30 äänilähdettä, neljällä eri mallinnusmenetelmällä laskettuja äänenpainetasoja työpajassa mitattuihin äänenpainetasoihin viidessä eri tilanteessa.[30] Tarkastelluista mallinnusmenetelmistä kolme perustui kuvalähdemenetelmään, joista kaksi yksinkertaistettuja malleja, ja yksi säteenseurantamenetelmään. Säteenseuranta- ja kuvalähdemenetelmä, joissa kalustus otettiin laskennassa huomioon

kalusteiden absorptiosuhteen ja keskimääräisen vapaan matkan avulla, osoittautuivat tarkimmiksi.

1.6 Tutkimuksen tavoite

Tämä tutkimus on eräänlainen round-robin testi. Tavoitteena on tarkastella käytössä olevien menetelmien soveltuvuutta akustisesti erilaisten työtilojen akustiseen suunnitteluun ja meluntorjuntaan. Auditorioiden ja konserttisalien akustisessa suunnittelussa tarkoiksi todettujen mallinnusmenetelmien, kuten säteenseuranta-, kuvalähde- ja elementtimenetelmät, laskenta-ajat ovat tavallisella tietokoneella pitkiä ja ne soveltuvat paremmin tutkimuskäyttöön rajatuilla taajuusalueilla kuin käytännön suunnittelutyöhön, jossa eri vaihtoehtojen tarkastelun pitäisi tapahtua hyvin nopeasti, kuitenkin tinkimättä kohtuuttomasti tulosten tarkkuudesta. Niitä ei kuitenkaan ole yksiselitteisesti osoitettu muita käytössä olevia yksinkertaisempia mallinnusmenetelmiä merkittävästi paremmiksi erilaisten työtilojen suunnittelussa.

Tässä työssä tarkastellaan yksinkertaisten laskentamallien lisäksi kolmea geometriseen akustiikkaan perustuvaa mallinnusohjelmaa, joista ODEON 3.1 on useassa kansainvälisessä vertailutestissä todettu yhdeksi luotettavimmista ja siten sopii vertailukohtaksi muille malleille. dBworks on Työterveyslaitoksella 2004-2005 toteutettu säteenseurantamenetelmään ja Akuri Työterveyslaitoksella 1993 toteutettu kuvalähdemenetelmään perustuva mallinnusohjelma.[31, 32] Molempien mallinnusohjelmien tuloksia on yksittäisissä kohteissa verrattu mittaustuloksiin jo aiemmin edellä viitatuissa lisensiaatintöissä.

Kaikkien tarkasteltavien mallien tuloksia verrataan todellisissa tiloissa tehtyjen mittausten tuloksiin. Vertaamalla mallinnustuloksia mittaustuloksiin määritetään jokaisessa kohteessa mallien keskivirheet sekä ennen että jälkeen meluntorjunnan. Virhetarkastelun perusteella valitaan mallit, jotka soveltuvat työtilojen akustisessa suunnittelussa melun leviämisen ja jälkikaiunta-ajan ennustamiseen.

2 Äänikenttien akustiset mallintamismenetelmät

Tilan äänikenttiä on tarkasteltu esimerkiksi mittauksista johdetuilla empiirisillä yhtälöillä, akustiikan teorian yksinkertaisilla yhtälöillä, pienoismalleilla, ja matemaattisilla malleilla. Yleisimmät matemaattiset mallit perustuvat aaltoyhtälöteoriaan, tilastolliseen tai geometriseen huoneakustiikkaan.

Tässä kappaleessa luodaan katsaus joihinkin yleisesti käytettyihin akustisiin mallinnusmenetelmiin. Ensiksi tarkastellaan todellisilla rakennetuilla pienoismalleilla tehtyjä akustisia tutkimuksia. Toiseksi tarkastellaan tilastolliseen akustiikkaan ja kolmanneksi empiirisiin tutkimuksiin perustuvia melko yksinkertaisia malleja. Neljänneksi sivutaan lyhyesti aaltoyhtälöihin ja viidenneksi geometriseen huoneakustiikkaan perustuvia malleja.

2.1 Huoneakustiikan mallintaminen pienoismalleilla

Pienoismallien etu on se, että äänikenttä käyttäytyy geometrian osalta oikein ja diffraktio sekä diffuusit heijastukset tulevat mukaan tarkasteluun. Pienoismalleja käytetään pääasiassa auditorio- ja konserttisaliakustiikan suunnittelussa. Pienoismallit eivät sovellu työpaikkojen suunnitteluun kovin hyvin, koska yksittäisen mallin rakentaminen on työlästä ja kallista, eikä se välttämättä anna luotettavaa ennustetta työtilaan suunniteltavan akustisen parannustoimenpiteen vaikutuksesta.

Pienoismallissa tilan muodot voidaan toistaa tarkasti. Yksityiskohdat ja kaarevat pinnat, joiden kuvaaminen matemaattisissa malleissa on usein vaikeaa, voidaan rakentaa pienoismalliin helposti. Yksinkertaisissa pienoismalleissa äänen etenemistä tarkastellaan sijoittamalla ympärisäteilevä valonlähde äänilähteen paikalle. Äänen ajatellaan etenevän ja heijastuvan pinnoista samalla tavalla kuin valo. Tällaisissa malleissa käytetään yleensä tarkastelun kannalta tärkeissä pinnoissa valoa hyvin heijastavia materiaaleja.[33] Nämä mallit itsessään eivät vielä anna riittävästi tietoa äänen etenemisestä tilassa. Esimerkiksi äänen heijastusten viiveitä, joilla on merkittävä vaikutus subjektiiviseen kokemukseen tilan kaiuntaisuudesta, ei valomallin avulla saada selville, vaan ne täytyy laskea. Myöskään heijastusten valaiseman alueen kirkkauden perusteella ei voida suoraan arvioida äänen heijastusilmiöitä, koska äänen etenemisnopeus, joka on ilmassa noin miljoonasosa valon nopeudesta, on otettava huomioon tarkasteluissa. Ääniaallot saapuvat eri pinnoista heijastuneena eri aikaan, mikä aiheuttaa äänienergian jakaantumista pidemmälle aikavälille.

Eräs monimutkaisempi tapa tarkastella pienoismalleilla ääni-ilmiöitä tasopinnalla on vesi-aaltomallit.[33] Vesiaaltomallissa lasilevyjen väliin rajataan mallinnettava tila, joka täytetään vedellä ja valaistetaan taustavalolla. Mallissa absorptiota kuvataan säätämällä vesikerroksen syvyyttä tilaa rajaavilla reunoilla (vrt. aaltojen vaimeminen matalaan rantaan). Impulssiheräte mallissa saadaan aikaan esimerkiksi pudottamalla vesipisara malliin. Koska vesiaallot etenevät hitaasti, mallissa voidaan helposti tarkkailla aaltojen heijastumista rajaavista pinnoista. Vesiaaltomallien ongelma on dispersio, jolloin aallonpituus vaikuttaa aallon etenemisnopeuteen. Ilmiöön vaikuttavat mm. maan vetovoima ja veden pintajännitys. Koska vesiaaltomalleilla voidaan tarkastella vain kaksiulotteisia tilanteita ja dispersio-ongelma rajoittaa tarkasteluun soveltuvat taajuudet kapealle alueelle, ei vesiaaltomallien käyttö ole juurikaan yleistynyt.

Tehokkaimmassa ja eniten käytetyssä menetelmässä äänen etenemistä tarkastellaan sopivassa mittasuhteessa rakennetussa pienoismallissa, jossa tarkasteltava äänikenttä skaalataan samassa suhteessa korkeammalle taajuusalueelle. Mallilla voidaan tarkastella kolmiulotteisia akustisia ilmiöitä. Mallissa käytetään pieniä äänilähteitä ja mikrofoneja, joilla tuotetaan ja mitataan äänenpainetta tarkastelupisteissä. Nauhoitettua äänisignaalia voidaan objektiivisen analysoinnin lisäksi arvioida subjektiivisesti, kun skaalataan nauhoituksen toistonopeutta vastaavassa suhteessa kuin mallin muutkin tarkastelut.

Mallin mitat, L_m , valitaan suhteessa, μ , seuraavasti:

$$L_m/L = \lambda_m/\lambda = f/f_m = \mu, \quad (1.)$$

missä λ_m on tarkasteltavan äänen aallonpituus mallissa ja λ aallonpituus todellisessa tilassa. Vastaavasti f on äänen taajuus todellisessa tilassa ja f_m mallissa.

Jos malli rakennetaan esimerkiksi suhteessa 1:10 ja todellisessa tilassa tarkasteltava taajuusalue on 500...2000 Hz, tarkastellaan mallissa taajuusaluetta 5000...20000 Hz. Tässä oletetaan, että äänen nopeus pienoismallissa ja todellisessa tilassa ovat yhtä suuria.

Tarkasteltavan tilan pintojen materiaalit valitaan siten, että akustiset absorptiosuhteet skaalatuilla taajuuksilla vastaavat todellisen tilan absorptiosuhteita vastaavilla skaalaamattomilla taajuuksilla. Tämän lisäksi otetaan huomioon, että ilma absorboi ääntä korkeilla taajuuksilla huomattavasti enemmän kuin matalilla.

Orlowski tarkasteli akustisen pienoismallin avulla melun leviämistä eräässä englantilaisessa tehtaassa, jonka mitat olivat 45 m x 119 m x 12.4 m.[34] Melun leviämistä mitattiin sekä todellisessa tehtaassa että tehtaan pienoismallissa. Tehtaassa oli 12 samanlaista tuotantolinjaa, joissa kussakin oli 10 yhtä suurta konetta. Näiden lisäksi tilassa oli teollisuustiloille tyypillistä sekalaista kalustusta ja koneistoa. Tehtaassa mitattiin jälkikaiunta-aika T ja äänen etäisyysvaimenema $SP(r)$, joka määritellään seuraavasti:

$$SP(r) = L_p(r) - L_w, \quad (2.)$$

missä L_w on äänilähteen äänitehotaso ja $L_p(r)$ etäisyydellä r mitattu äänilähteen tuottama äänenpainetaso. Tehtaassa mitattiin myös katon, seinien ja koneiden absorptiosuhteet, joita tarvittiin mallin rakentamiseen. Lisäksi tehtiin melukartoitus ja koneiden äänitehotasojen määritykset.

Pienoismalli rakennettiin suhteessa 1:16, jolloin pisin sivu oli 7.4 m. Äänenpainetaso mitattiin taajuuksilla 2...64 kHz, joka vastasi todellisessa mittakaavassa taajuusaluetta 125...4000 Hz. Koska mallissa tarkasteltava taajuusalue oli hyvin korkea, malli suljettiin ilmatiiviiseen teltaan, jossa ilman suhteellinen kosteus laskettiin 2 %:iin. Tällä saatiin pienoismallissa skaalattu ilman absorptio vastaamaan kohtuullisen hyvin täysimittakaavamittausten tilannetta. Akustisesti kovat pinnat kuten betonilattia ja tiiliseinät rakennettiin hyvin lakatusta puusta, jonka absorptiosuhde oli luokkaa 0.06 mallin tarkastelutaajuuksilla, mikä vastasi hyvin betonin tai tiiliseinän absorptiosuhdetta taajuusalueella 125...4000 Hz. Katon rakentaminen absorptiosuhteeltaan oikeaksi oli huomattavasti työläämpää, koska todellinen kattorakenne absorboi pienillä taajuuksilla kohtuullisen tehokkaasti ääntä. Pienoismallissa käytettiin Helmholtz resonaattoreita vastaavan absorption aikaansaamiseksi. Tilan kalustus mallinnettiin sopivan kokoisilla terässylintereillä ja puupalikoilla.

Pienoismallissa mitattiin jälkikaiunta-aika T ja etäisyysvaimenema $SP(r)$ vastaavissa pisteissä kuin todellisessa tehtaassakin. Mallissa ja tehtaassa mitatut etäisyysvaimenemat vastasivat hyvin toisiaan (ero alle 2 dB) taajuuksilla 500...2000 Hz. Pienillä taajuuksilla, erityisesti 125 Hz, katon absorptiosuhteen mallintamisen vaikeudesta johtuen tarkkuus oli selvästi huonompi.

Orlowski tutki kaiuntahuoneen pienoismallilla absorptiolevyjen asennuksen ja sijoittelun vaikutusta niiden absorptiosuhteeseen.[35] Tutkimuksessa tarkasteltiin 75 mm paksujen mineraalivillalevyjen (tiheys 100 kg/m^3) absorptiosuhdetta erilaisilla asennustavoilla. Mineraalivillan vastine pienoismallissa oli 4 mm paksu huopa (tiheys 400 kg/m^3), jonka absorptiosuhde oli vastaava skaalatulla taajuusalueella. Tutkimus osoitti, että vapaasti katosta roikkuvat mineraalivillalevyt absorboivat suurilla taajuuksilla enemmän ääntä kuin suoraan kattopintaan kiinnitetyt levyt.

Hodgson tutki pienoismalleilla absorptiolevyjen sijoittelun ja määrän vaikutusta.[36] Tässä tutkimuksessa työtilan pienoismalli rakennettiin mittakaavassa 1:8. Tutkimuksessa tutkittavat parametrit olivat jälkikaiunta-aika T ja etäisyysvaimenema $SP(r)$. Tarkastelun kohteena olivat 48 mm paksut absorptiolevyt, joiden vastineena mallissa käytettiin 6 mm paksua lasivillaa. Tulokset olivat vastaavia kuin Orlowskin tutkimuksessakin.

Pienoismallit ovat pääosin korvautuneet tietokoneella laadittavilla akustisilla malleilla, joita on huomattavasti helpompi muokata ja varioida. Hienoimpien konserttisalien suunnittelussa käytetään edelleen myös pienoismalleja. Kaupallisissa mallinnusohjelmissa on myös apuvälineitä ja työkaluja, joiden avulla voidaan hyödyntää suunnitteluohjelmistoilla laadittuja rakennuspiirroksia. Näin akustisen mallin laatiminen tietokoneella käy nopeammin ja halvemmalla kuin todellisen pienoismallin rakentaminen. Pienoismallien ja tietokoneella laadittavien geometriseen akustiikkaan perustuvien akustisten mallien välillä ei tulosten tarkkuudessa ole merkittävää eroa pois lukien tilanteet, joissa äänen diffraktio, interferenssi, sironna tai äänilähteen lähikenttä ovat dominoivia. Näitä eivät useimmat akustiset mallinnusohjelmat ota huomioon.

2.2 Huoneakustiikan tilastollinen mallintaminen

Tilastollisessa huoneakustiikassa tila ajatellaan äänienergiavarastoksi, jonka rajapinnat absorboivat energiaa, ja ääni partikkeleiksi, jotka kuljettavat saman äänienergian kuin ääniaallot. Partikkelit etenevät vapaassa tilassa suoraviivaisesti äänen nopeudella c ja heijastuvat aina kohdattuun pinnan. Pinnan absorptiosuhde α_k vähentää heijastuvan äänen energiaa.

Jos tilaan asetetaan äänilähde, virtaa lähteestä tilaan jatkuvasti äänienergiaa, joka kasvattaa energiatiheyttä. Kun saavutetaan tasapainotila äänilähteestä huoneeseen tulevan energian, pintoihin absorboituvan ja pinnoista heijastuvan energian välille, syntyy diffuusi äänikenttä. Kun äänikenttä on diffuusi, äänenpaine on vakio kaikissa kentän pisteissä ja äänienergia etenee yhtä suurella todennäköisyydellä kaikkiin suuntiin. Vastaavasti, kun äänilähde sammutetaan, absorboituu tilassa vallitseva äänienergia rajapintoihin ja äänenpainetaso kentän pisteissä vaimenee kunnes tilassa ei ole enää äänilähteen tuottamaa äänienergiaa.

Teoriassa diffuusi äänikenttä syntyy mielivaltaisen muotoiseen tilaan, jonka pinnat eivät lainkaan absorboi ääntä vaan heijastavat sen täysin diffuusisti. Käytännössä tämä on mahdottomuus, koska tilassa on aina ääntä absorboivia pintoja ja heijastukset eivät tapahdu täysin diffuusisti (Lambertin lain mukaan).

Tilastollisen huoneakustiikan teoria ei ota huomioon äänen aaltomuotoa, interferenssiä eikä diffraktiota. Oletetaan, että äänilähteestä suoraan tulevat ja kaikki heijastuneet äänisignaalit eivät ole keskenään koherentteja, jolloin niiden energiat voidaan yksinkertaisesti laskea yhteen.

2.2.1 Jälkikaiunta-ajan laskenta

Sabine loi pohjan tilastolliselle huoneakustiikalle tutkiessaan asuinhuoneiden akustisia ominaisuuksia. Hän loi käsitteen jälkikaiunta-aika, mikä tarkoittaa aikaa, joka kuluu huoneen äänitason vaimentumiseen 60 dB alkuperäisestä, kun huoneessa ääntä tuottava äänilähde sammutetaan. Jälkikaiunta-ajalle Sabine kehitti yhtälön [33]

$$T = 0.16V / \sum_k \alpha_k S_k, \quad (3.)$$

missä V on huonetilavuus, S_k huonepintojen pinta-alat ja α_k pintojen absorptiosuhteet. Yhtälössä vakio 0.16 vastaa tilannetta, jossa lämpötila on 20 °C ja äänen nopeus 343 m/s.

Sabinen yhtälö on edelleen laajalti käytössä, kun arvioidaan tilojen äänenabsorptiota ja materiaalien akustista absorptiosuhdetta.

Eyring kehitti Sabinen yhtälöä edelleen muotoon [37]

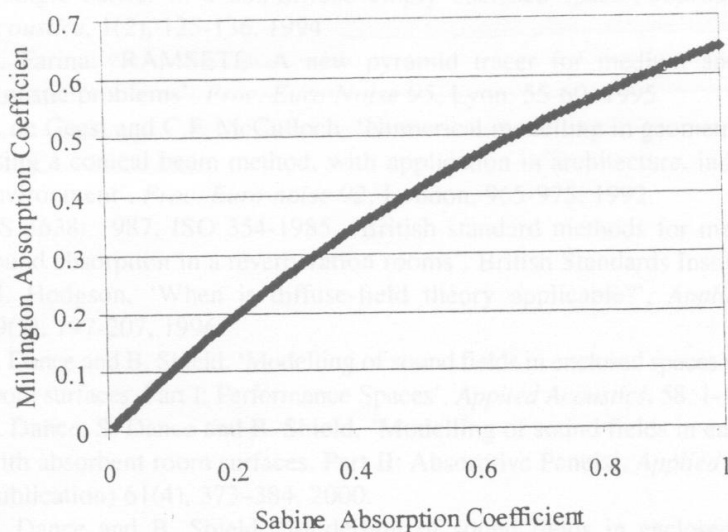
$$T = 0.16V / \{S[-\ln(1 - \sum_k \alpha_k S_k / S)]\}, \quad (4.)$$

missä $S = \sum_k S_k$ on pintojen kokonaispinta-ala. Yhtälössä oletetaan, että yksittäisen pinnan heijastama energia jakautuu uudelleen ja uudelleen muille pinnoille suhteessa niiden pinta-aloihin. Ratkaiseva ero Eyringin ja Sabinen yhtälöissä on se, että Sabinen yhtälössä tulokseen vaikuttavat käytännössä vain eniten absorboivat pinnat, kun taas Eyringin yhtälössä kaikilla pinnoilla on yhtäläinen merkitys.

Millington kehitti Eyringin yhtälöä muotoon [38]

$$T = 0.16V / \{-\sum_k S_k \ln(1 - \alpha'_k)\} \quad (5.)$$

missä äänienergian oletetaan etenevän sarjana heijastuksia jokaiselta pinnalta. Tiloissa, joissa on ääntä tehokkaasti absorboivia pintoja, Millingtonin yhtälö on tarkempi kuin Sabinen yhtälö. Millingtonin yhtälössä pintojen absorptiosuhteiden α'_k tulee aina olla alle 1 eikä Sabinen yhtälöön perustuvilla menetelmillä määritettyjä absorptiosuhteita α_k saa suoraan käyttää, koska yhtälö ei ole reaalinen, jos yksikin α'_k on 1 tai suurempi. Dance ja Shield esittivät muunnoskuvaajan (kuva 1), jonka avulla absorptiosuhteet α'_k Millingtonin yhtälöön voidaan määrittää Sabinen absorptiosuhteista.[39]



Kuva 1. Muunnoskuvaaja Sabinen absorptiosuhteesta Millingtonin absorptiosuhteeksi.

Cremer esitti edelleen Millingtonin ja Eyringin yhtälön yhdistämistä muotoon [33]

$$T = 0.16V / \sum_q S_q [-\ln(1 - \sum_k \alpha_{qk} S_{qk} / S_q)], \quad (6.)$$

missä suurten pintojen q osapintojen q_k absorptiosuhteet α_{qk} ja pinta-
alat S_{qk} keskiarvoistuvat ja summautuvat suurten pintojen vastaaviksi
suureiksi. Yhtälön etu on se, että se sallii Sabinen absorptiosuhteiden
käytön ja yhdistää oletukset rinnakkaisista ja sarjoittaisista
heijastuksista.

Kuttruff esitti Eyringin yhtälöön korjauksen, jolla huomioidaan
paremmin absorboivien pintojen epätasainen jakautuminen tilassa. [40]

$$T = \frac{0.16V}{S \left[-\ln(1 - \alpha_m) \left(1 + \frac{\gamma^2}{2} \ln(1 - \alpha_m) \right) + \frac{\sum_k (1 - \alpha_k)(\alpha_m - \alpha_k) S_k^2}{S^2 (1 - \alpha_m)^2} \right]}, \quad (7.)$$

missä $\alpha_m = \sum_k \alpha_k S_k / S$. Nimittäjässä jälkimmäinen yhteenlaskettava
termi huomioi pinnoille epätasaisesti jakautuneen absorption
vaikutusta. Ensimmäisen termin korjaus perustuu laskennalliseen
varianssiin

$$\gamma^2 = (l_m^2 - l_m^2) / l_m^2, \quad (8.)$$

missä l_m on keskiarvo perättäisten heijastusten välisten vapaiden
matkojen neliöistä. Suorakulmaisille tiloille Kuttruff esitti varianssille
arvon $\gamma^2=0.4$. Varianssin arvot monimuotoisemmille tiloille on
mahdollista laskea tietokoneella esimerkiksi säteenseuranta-
menetelmää soveltaen. Jos $\gamma^2=0$, nimittäjän ensimmäinen
yhteenlaskettava termi on sama kuin Eyringin yhtälössä.

Eyringin ja Sabinen yhtälöillä lasketut jälkikaiunta-ajat poikkeavat huomattavasti mitatuista tiloissa, joissa yksittäisessä suunnassa on selvästi muita absorboivampi pinta, kuten absorptiolevyillä pinnoitettu katto luokkahuoneessa. Tällaiseen tilanteeseen Fitzroy esitti jälkikaiunta-ajalle yhtälön [41]

$$T = (0.16V/S^2)\{-S_x/\ln(1-\alpha_x)\} + \{-S_y/\ln(1-\alpha_y)\} + \{-S_z/\ln(1-\alpha_z)\} \quad (9.)$$

missä S_x , S_y ja S_z ovat vastakkaisten pintojen yhteenlasketut alat ja α_x , α_y , α_z vastaavien pintojen absorptiosuhteiden keskiarvot.

Fitzroyn ideaan perustuen Arau-Puchades esitti jälkikaiunta-ajalle yhtälön [42]

$$T = \frac{0.16V}{S[-\ln(1-\alpha_x)]^{S_x/S} [-\ln(1-\alpha_y)]^{S_y/S} [-\ln(1-\alpha_z)]^{S_z/S}}, \quad (10.)$$

jonka validointiin hän käytti mittaustuloksia auditorioista, teattereista ja televisiostudioista. Suuret ovat samat kuin Fitzroy'n yhtälössä.

2.2.2 Äänenpainetaso

Tyypillinen meluntorjuntatoimenpide työpaikoilla on absorptiolevyjen asennus meluisan tilan kattoon tai seinäpinnoille. Kun jälkikaiunta-aika ennen meluntorjuntatoimenpidettä on T_1 ja sen jälkeen T_2 ($T_2 < T_1$), voidaan toimenpiteen vaikutus keskimääräiseen äänenpainetasoon laskea yhtälöllä [16]

$$dL = 10\lg(T_2/T_1), \quad (11.)$$

kun oletetaan, että äänilähteiden äänitehotasot ja etäisyydet äänilähteistä ovat vakioita, tilan olosuhteet eivät muutu ja äänikenttä on diffuusi.

Yleisimmin sovellettu yhtälö äänenpainetason laskemiseen suljetussa tilassa on [43, 44]

$$L_p(r) = L_w + 10\lg[q/4\pi r^2 + 4/R], \quad (12.)$$

missä L_w on pistemäisen äänilähteen äänitehotaso, q äänilähteen suuntaavuus, r etäisyys äänilähteestä ja R huonevakio, joka voidaan johtaa jälkikaiunta-aikayhtälöistä. Esimerkiksi Sabinen yhtälöstä johdettuna huonevakio on

$$R = S\alpha_m/(1-\alpha_m) \quad (13.)$$

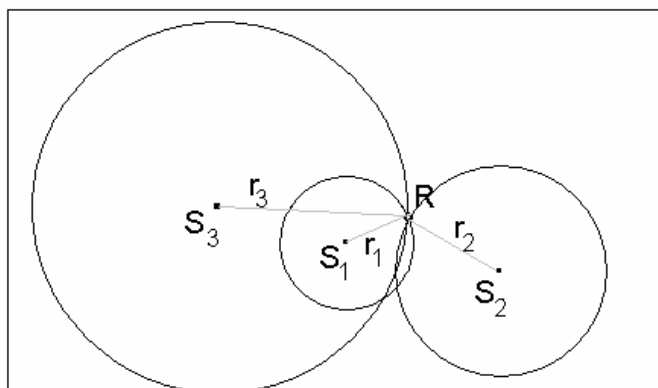
ja Eyringin yhtälöstä

$$R = -S\ln(1-\alpha_m)/(1-\alpha_m) \quad (14.)$$

Yhtälöllä 12 voidaan nopeasti laskea yksittäisen äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso L_p etäisyydellä r äänilähteestä.

Kun äänilähteitä on useita (kuva 2), lasketaan erikseen kunkin äänilähteen tuottama äänenpainetaso tarkastelupisteessä $L_{p,i}$ ja lopuksi lasketaan niiden logaritminen summa

$$L_p = 10\lg\left(\sum_i 10^{L_{p,i}(r)/10}\right). \quad (15.)$$



Kuva 2. Kolmen pisteäänilähteen S_1 , S_2 , S_3 tuottama äänenpainetaso tarkastelupisteessä R .

Kun yhtälön 12 toista termiä merkitään etäisyysvaimenemalla $SP(r)$, tulee yhtälöksi

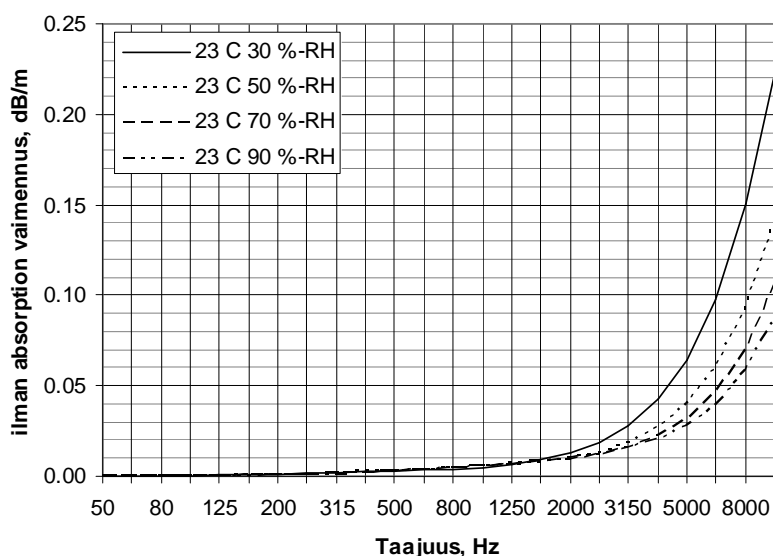
$$L_p(r) = L_w + SP(r). \quad (16.)$$

Tätä esitysmuotoa käytetään tulevilla tarkasteluissa.

2.2.3 Ilman absorptio vaikutus

Edellä esitetyissä tarkasteluissa ei ole huomioitu ilman absorptio vaikutusta. Hyvin suurissa tiloissa yli 2 kHz taajuuksilla ilman absorptio vaikutus alkaa olla merkittävä, joten se tulisi ottaa laskennassa huomioon. Ilman suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja ilmanpaineen vaikutus ilman absorptio kykyyn voidaan huomioida vaimennustekijällä m , joka lasketaan esimerkiksi ISO 354:2003 ja ISO 9613-1:1993 standardeissa esitetyillä yhtälöillä puhtaalle äänekselle taajuudella f . [45, 46] Yhtälöt esitetään liitteessä 1.

Oktaavikaistan vaimennustekijänä voidaan kohtuullisella tarkkuudella käyttää oktaavikaistan keskitaajuudella laskettua puhtaan äänksen vaimennustekijää. Kuvassa 3 esitetään 23 °C lämpötilassa laskettu ilman absorptio vaimennus, kun ilman suhteellinen kosteus on 30, 50, 70 ja 90 %.



Kuva 3. Ilman absorptio vaimennus puhtaille ääneksille.

2.3 Huoneakustiikan yksinkertaiset mallit

Erilaisia malleja tilojen huoneakustiikan kuvaamiseen on useita. Empiiriset mallit perustuvat todellisissa tiloissa suoritettuihin mittauksiin. Empiiristen mallien etuja ovat yksinkertaisuus ja lyhyet laskenta-ajat. Nykyään tietokoneiden laskentatehokkuus on kuitenkin kasvanut huomattavasti, joten laskenta-aika ei ole enää niin merkittävä tekijä mallinnusmenetelmää valittaessa.

Teollisuustilojen akustiseen tarkasteluun parhaiten soveltuvat parametrit ovat jälkikaiunta-aika ja äänenpainetaso. Yksinkertaisella mallilla kokenut akustiikan tai meluntorjunnan asiantuntija voi nopeasti ja helposti ennustaa meluntorjuntatoimenpiteiden vaikutuksia jälkikaiunta-aikaan tai äänenpainetasoon (melutasoon). Esimerkiksi absorptiolevyjen vaikutusta ennustettaessa lasketaan tunnettujen äänilähteiden aiheuttamat äänenpainetasot valituissa tarkastelupisteissä ennen meluntorjuntaa vallitsevaan tilanteeseen sovitulla mallilla ja meluntorjunnan toteutuksen kuvaavalla mallilla, jossa huomioidaan absorptiolevyjen lisäabsorptioala. Vastaavasti voidaan ennustaa äänilähteen äänitehotason muutoksen vaikutus tarkastelupisteissä.

Hodgson vertaili useita yksinkertaisia malleja todellisissa työpaikoissa (30 kohdetta) suoritettuihin mittauksiin omaa malliaan kehittäessään.[47] Vertailtava suure oli etäisyysvaimenema $SP(r)$. Kohteissa mitattiin jälkikaiunta-aika ja etäisyysvaimenema 125-4000 Hz oktaavikaistoilla. Hodgsonin vertailemat mallit esitetään kappaleissa 2.3.1 - 2.3.8. Tulosten pohdinnassa käsitellään myös Hodgsonin johtopäätöksiä näiden mallien tarkkuudesta.

Jokaisessa mallissa lähtötietojen arviointi vaatii kokemusta, koska kaikkien tarvittavien tietojen mittaaminen tarkasti työpaikoilla ei käytännössä ole mahdollista. Kalusteiden ja melunlähteiden tiheyden, tilan mittojen ja pintojen absorptiosuhteiden arviointi ovat tekijöitä, joissa on helppo tehdä virheitä. Tämä kasvattaa luonnollisesti mallinnustulosten epävarmuutta.

Yleensä absorptiosuhteet määritetään jälkikaiunta-aikamittausten perusteella esimerkiksi Sabinen tai Eyringin yhtälöillä, jolloin tilan äänikenttä oletetaan diffuusiksi. Mitatun jälkikaiunta-ajan perusteella lasketaan keskimääräinen kokonaisabsorptiosuhde α_m , joka kuvaa tilan kaikkien pintojen yhteenlaskettua tehollista absorptiota.

Yksittäisten pintojen, kuten katon tai lattian, absorptioala voidaan määrittellä pintamateriaalin perusteella, jos tiedetään pintamateriaalin akustinen absorptiosuhde. Pinnalla olevien esineiden ja kalusteiden vaikutuksen arviointi katon tai lattian kokonaisabsorptioon on huomattavasti vaikeampaa. Osalle malleista tähän on annettu joitakin yleisiä ohjeita (Friberg, Zetterling, Sergejev, Hodgson, Heerema).

2.3.1 Fribergin malli

Friberg esitti teollisuustilojen akustiikalle useiden mittausten perusteella empiirisen fysikaalis-matemaattisen mallin.[48] Jälkikaiunta-ajan malli perustui 139 mittaukseen eri tiloissa, joista 43:ssa oli asennettu absorptiolevyjä ja 30:ssä mittaukset suoritettiin ennen meluntorjuntatoimenpiteitä ja niiden jälkeen.

Jälkikaiunta-aika T lasketaan huomioiden huonekorkeus, katon absorptiosuhde ja huoneen kalustetiheys ja niiden korkeus. Lisäksi pitkissä kapeissa tiloissa (N, Taulukko 1) otetaan huomioon sivuseinien äänen absorptio. Huoneen kalustetiheyden ja korkeuden perusteella valitaan taulukosta 1 sopiva tilavakio k_T empiiriseen yhtälöön

$$T = 0.15H - 1.8\alpha_c + 1.8 + k_T. \quad (17.)$$

Yhtälössä H on huonekorkeus ja α_c katon absorptiosuhde 1 kHz taajuudella. Taulukon 1 tilavakio k_T riippuu katon absorptiosuhteesta, huonekorkeudesta ja kalusteiden korkeudesta. Kalustetiheyden ja -korkeuden perusteella tilat jaetaan kolmeen luokkaan:

H – tiheästi kalustettu, kalusteiden korkeus yli $H/4$

M – keskitiheästi kalustettu, kalusteiden korkeus yli $H/4$ tai tiheästi kalustettu, kalusteiden korkeus välillä $H/8...H/4$

L – kalustamaton, vähän kalustettu tai tiheästi kalustettu, kalusteiden korkeus alle $H/8$.

Taulukko 1: Tilavakio k_T eri katon absorptiosuhteilla ja kalustekorkeuksilla kapeissa N (huoneleveys < 4H) ja suurissa B (huoneleveys > 6H) huoneissa.

absorptiosuhde		$\alpha_c=0$	$\alpha_c=0$	$\alpha_c=0$	$\alpha_c=1$	$\alpha_c=1$	$\alpha_c=1$
kalustekorkeus, m		5	10	15	5	10	15
B	H	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
B	M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	L	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
N	H	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.5	1.0
N	M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N	L	0.0	0.5	1.0	0.0	0.3	0.5

Mallilla ennustetaan äänenpainetaso vaimeneminen, kun etäisyys äänilähteestä kaksinkertaistuu. Mallissa oletetaan äänenpainetasoa vaimentaviksi tekijöiksi katon absorptio ja tilassa olevat kalusteet sekä kapeissa tiloissa lisäksi sivuseinien absorptio, mikä huomioidaan taulukon 2 tilavakioissa a ja b. Äänenpainetaso vaimenema etäisyyden kaksinkertaistuessa dL_2 lasketaan yhtälöstä

$$dL_2 = a \alpha_c + b, \quad (18.)$$

Taulukko 2: Tilavakiot a ja b eri kalustekorkeuksilla kapeissa N (huoneleveys < 4H) ja suurissa B (huoneleveys > 6H) huoneissa.

Tilan muoto	Kaluste-luokitus	a	b
B	H	3.00	4.00
B	M	2.50	3.75
B	L	2.00	3.50
N	H	3.00	3.00
N	M	2.75	2.75
N	L	2.50	2.50

Mallissa äänilähteiden aiheuttama äänenpainetaso tarkastelupisteessä oletetaan jokaisen yksittäisen äänilähteen aiheuttaman

äänepainetason summaksi. Mallin avulla voidaan laskea keskimääräinen lisäabsorptiolla saavutettu lisäsvaimennus L_{diff} seuraavasti:

$$L_{diff} = A_T(dL_a - dL_b) - 1, \quad (19.)$$

missä A_T on äänilähteiden tiheyteen perustuva tilavakio (taulukko 3) ja dL_a ja dL_b ovat toimenpiteen jälkeen ja ennen sitä lasketut dL_2 -arvot.

Taulukko 3: Tilavakio A_T eri äänilähteiden tiheyksillä.

Äänilähteiden tiheys	A_T
Harva (koneiden väli 10 m)	5
tavallinen (koneiden väli 5 m)	4
Tiheä (koneiden väli 2.5 m)	3

2.3.2 Thompsonin malli

Thompson et.al. esittivät diffuusin kentän teorian pohjalta äänen etäisyysvaimenemalle $SP(r)$ yhtälön [49]

$$SP(r) = 10\log[\exp(-mr)/4\pi r^2 + 4V/rS(\alpha_m S_w + 4mV)] + 10\log[(TM+460)/527 + 30/BP], \quad (20.)$$

jossa r on äänilähteen ja tarkastelupisteen välinen etäisyys, α_m tilan keskimääräinen absorptiosuhde, S_w seinien pinta-ala, m ilman vaimennustekijä, V tilan tilavuus, S tilan pintojen kokonaispinta-ala, TM huonelämpötila ja BP barometrinen ilmanpaine.

2.3.3 Wilsonin malli

Wilson esitti erittäin yksikertaistetun version etäisyysvaimeneman laskennalle A-taajuuspainotetulla äänenpainetasolla.[50] Malli soveltuu suorakulmaisille tiloille, joiden pituus ja leveys ovat vähintään nelinkertaiset tilan korkeuteen nähden.

Mallissa oletetaan äänenpainetason vaimenema etäisyyden kaksinkertaistuessa vakioksi seuraavasti:

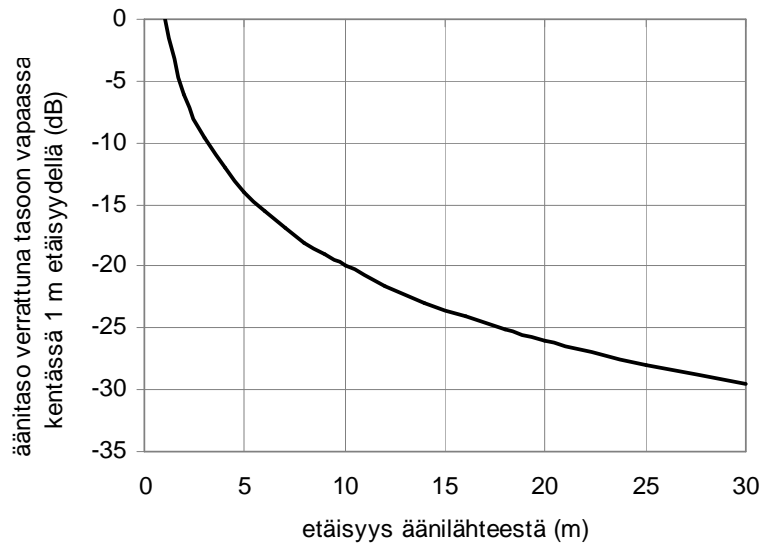
-3 dB tyhjät tilat, joissa ei ole absorptiolevyjä

-4 dB kalustetut tilat, joissa ei ole absorptiolevyjä, tai tyhjät tilat, joissa on absorptiolevyjä

- 5 dB kalustetut tilat, joissa on absorptiolevyjä.

2.3.4 Embletonin ja Russelin malli

Embleton ja Russel kehittivät mallin, jota on käytetty kanadalaisen standardin pohjana.[51] Malli soveltuu tyhjille suorakulmaisille tiloille, joiden korkeus on keskimäärin vakio ja pituus ja leveys ovat vähintään nelinkertaisia tilan korkeuteen verrattuna. Malli ei ota huomioon tilassa olevia esteitä. Mallissa määritetään kuvaajan avulla äänenpainetaso etäisyydellä r äänilähteestä verrattuna äänenpainetasoon vapaassa kentässä 1 m etäisyydellä (kuva 4). Määritetty äänenpainetaso korjataan taulukon 4 korjaustekijöillä, jotka riippuvat etäisyydestä äänilähteeseen, tilan korkeudesta sekä katon absorptiosuhteesta.



Kuva 4. Äänenpainetaso verrattuna äänenpainetasoon vapaassa kentässä 1 m etäisyydellä.

Taulukko 4: Korjaustekijät äänenpainetasoon eri katon absorptiosuhteilla.

etäisyys/ korkeus	hyvin absorboiva katto (dB)	osittain absorboiva katto (dB)	vähän absorboiva katto (dB)
1	0.0	0.0	0.0
1.25	0.0	0.25	1.0
1.6	0.0	1.0	2.0
2	0.0	1.5	3.0
2.5	0.0	2.0	4.0
3.2	0.0	2.5	5.0
4	0.0	3.0	6.0
5	0.0	3.5	7.0
6.3	0.0	4.0	8.0
8	0.0	4.5	9.0
10	0.0	5.0	10.0
12.5	0.0	5.5	11.0
16	0.0	6.0	12.0
20	0.0	6.5	13.0

Sivuseinien absorptiosuhteen perusteella tehdään vielä korjaus, joka on 3 dB (vähän absorboiva), 2 dB (osittain absorboiva), 1 dB (hyvin absorboiva). Pinnan absorboivuuden luokittelu ei ole aivan suoraviivaista. Hodgson käytti tarkasteluissaan seuraavaa jakoa:

$\alpha \leq 0.1$ vähän absorboiva, $0.1 < \alpha \leq 0.5$ osittain absorboiva, $\alpha > 0.5$ hyvin absorboiva. Tässä tutkimuksessa on myös noudatettu tätä jakoa.

2.3.5 Kuttruffin malli

Kuttruff esitti äänen etäisyysvaimeneman ennustamiselle kaksi analyyttistä yhtälöä, jotka soveltuvat suuriin kalustettuihin tiloihin.[52] Mallissa oletetaan, että tilassa olevat kalusteet voidaan esittää diffuusisti heijastavan lattia- ja kattopinnan avulla, jolloin etäisyysvaimeneman yhtälö on

$$SP(r) = 10\log[A(r,H,\alpha_m)], \quad (21.)$$

missä

$$A(r,H,\alpha_m) = 1/(4\pi r^2) + (1-\alpha_m)\{[(1+r^2/H^2)^{-3/2} + b_K(1-\alpha_m)(b_K^2+r^2/H^2)^{-3/2}/\alpha_m]/\pi H^2\} \quad (22.)$$

Yhtälössä H on tilan korkeus, α_m keskimääräinen kokonaisabsorptiosuhde ja b_K taulukoitu tekijä. Taulukko puuttuu Hodgsonin artikkelista, mutta Kuttruffin mukaan arvot ovat tyypillisesti välillä 2,...,3.[40] Tässä tutkimuksessa on kaikissa kohteissa käytetty arvoa $b_K=3$.

Vastaavasti, jos oletetaan, että katto on spekulaisesti heijastava on etäisyysvaimeneman yhtälö

$$SP(r) = 10\log[A(r,H,\alpha_m)+(1-\alpha_c)A(r',2H,\alpha_f)], \quad (23.)$$

missä

$$r' = [r^2 + (2H-3)^2]^{1/2} \quad (24.)$$

ja α_c ja α_f ovat katon ja lattian absorptiosuhteet.

2.3.6 Zetterlingin malli

Zetterling esitti mallin A-taajuuspainotetun äänenpainetason ennustamiseen suorakulmaisissa tiloissa, joissa ei ole suuria esteitä.[53] Malli perustuu kuvaajiin, joiden avulla tilan akustiikka pisteytetään. Pisteisiin vaikuttavat tilan tilavuus V , korkeus H ja leveys W sekä katon ja seinien absorptiosuhteet α_c ja α_w . Etäisyysvaimenema määritetään yhteenlaskettujen pisteiden ja kalustetiheyden Q perusteella erilliseltä käyrästä (kuva 5, attenuation). Kokonaispistemäärä on pieni, jos tilan akustiikka on huono. Maksimipistemäärä on 15. Malli on sovellettavissa vain melko pienillä etäisyyksillä 2,...,20 m.

Esimerkki: Kappaleen 5 kohde 2 kutomo ennen meluntorjuntaa. Tilan tilavuus on 6400 m^3 , josta kuvan (a) perusteella tulee pisteitä 1.5. Tilan korkeus on 8 m ja katon absorptiosuhde 0.02, joista kuvan (b) mukaan tulee 1 piste. Tilan leveys on 20 m ja seinien absorptiosuhde on 0.04, joista kuvan (c) mukaan tulee 1.6 pistettä. Pisteitä tulee yhteensä $1.5+1+1.6=4.1$. Pisteiden perusteella tulkitaan vaimennuskuvaajaa (d3), koska kalustetiheys on $Q=0.1 \text{ m}^{-1}$.

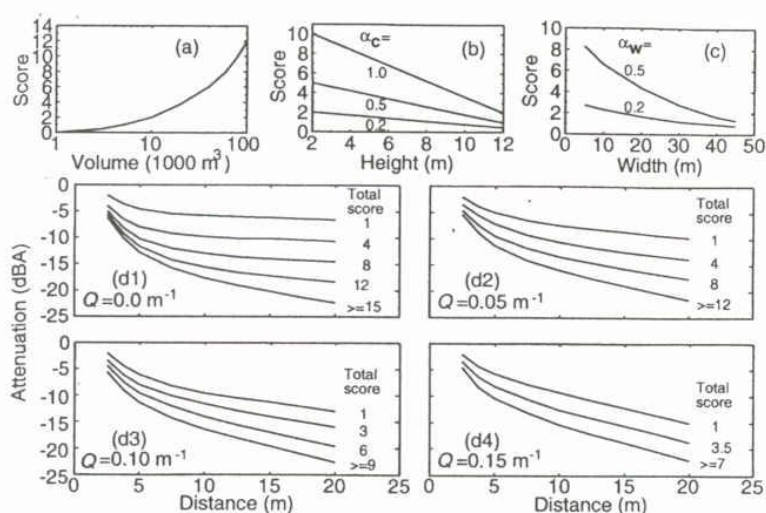


FIG. 2. Curves for predicting noise levels using the Zetterling model (Ref. 8). α_c and α_w are the average mid-frequency ceiling and wall absorption coefficients, respectively. Q is the average fitting density in $1/m$.

Kuva 5. Zetterlingin mallin kuvaajat tilan pisteyttämiseen ja etäisyysvaimeneman määrittämiseen eri kalustetiheyksillä Q .

2.3.7 Sergeyevin malli

Osipov, Sergejev ja Shubin kehittivät mallin, jolla voidaan ennustaa äänenpainetaso etäisyysvaimenema tyyppillisissä suorakulmaisissa teollisuustiloissa, jotka on jaettu neljään ryhmään (tyhjä tila, tekstiiliteollisuus, paperipainoteollisuus ja metalliteollisuus).[54]

Etäisyysvaimenema lasketaan yhtälöllä

$$SP(r) = 10 \log \left\{ \frac{1}{2\pi r^2} + (1 - \alpha_{\text{eff}})(r+W)J(\alpha_{\text{eff}}, \rho) / [HW(r+H)] \right\}, \quad (25.)$$

$$\text{missä } J(\alpha_{\text{eff}}, \rho) = 0.1 / [\alpha_{\text{eff}} + \rho^2 \exp(0.65\rho)] \quad (26.)$$

$$\text{ja } \rho = -rS \ln(1 - \alpha_{\text{eff}}) / 4V. \quad (27.)$$

Yhtälössä α_{eff} on efektiivinen absorptiosuhde (taulukko 5), W tilan leveys, H tilan korkeus, V tilan tilavuus ja S tilan pintojen kokonaispinta-ala.

Taulukko 5: Efektiiviset absorptiosuhteet oktaavikaistoilla 250, ..., 4000 Hz.

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
tyhjä tila	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09
tekstiiliteollisuus	0.25	0.29	0.40	0.40	0.43
paperipainoteollisuus	0.31	0.27	0.26	0.31	0.31
metalliteollisuus	0.32	0.30	0.34	0.34	0.38

Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan ole käytetty taulukon 5 arvoja, vaan kaikilla yksinkertaisilla malleilla samoja absorptiosuhteita, joten efektiivisen absorptiosuhteen sijaan on käytetty keskimääräistä kokonaisabsorptiosuhdetta α_m .

2.3.8 Hodgsonin malli

Hodgson kehitti 30 kohteessa suoritettujen mittausten tilastollisen tarkastelun perusteella yksinkertaisen mallin äänen etäisyysvaimenemalle $SP(r)$. [55] Mallilla voidaan ennustaa äänen etäisyysvaimenema tyhjässä tai kalustetussa tilassa.

Lyhyissä tiloissa ja pitkissä tiloissa etäisyyksillä $r < L/2$, etäisyysvaimenema lasketaan yhtälöllä:

$$SP(r) = (I_E + dI_F) - 3.3(S_{iE} + dS_{iF} + dS_{iA}) \log(r) \quad (28.)$$

ja pitkissä tiloissa etäisyyksillä $r \geq L/2$

$$SP(r) = (I_E + dI_F) - 3.3(S_{iE} + dS_{iF} + dS_{iA}) \log(L/2) - 3.3(S_{iE} + dS_{iF}) \log(r) \quad (29.)$$

Yhtälöissä L on tilan pituus, I_E , S_{iE} ja S_{iE} tyhjässä tilassa tapahtuvaan vaimenemaan liittyviä parametrejä, dI_F , dS_{iF} ja dS_{iF} kalustetuissa tiloissa käytettäviä korjausparametrejä ja dS_{iA} on absorptiolevyjen vaikutuksen huomioiva parametri. Parametreille käytetään taulukoituja arvoja, jotka on määritetty tilastollisin menetelmin erilaisissa työpaikoissa suoritettujen mittausten tuloksista (taulukko 6).

Taulukko 6: Hodgsonin mallin parametrien arvot oktaavikaistoilla 125, ..., 4000 Hz

Taajuus, Hz	I_E	dI_F	S_{iE}	dS_{iF}	dS_{iA}	S_{iE}	dS_{iF}
125	-11.6	1.9	2.2	1.7	0.6	4.6	4.4
250	-11.3	2.1	2.1	1.7	1.0	4.1	5.2
500	-11.5	2.6	2.2	1.3	1.5	4.1	3.2
1000	-11.1	3.3	1.9	1.5	1.4	4.6	2.9
2000	-11.4	2.4	2.1	1.3	0.6	5.3	2.5
4000	-11.2	1.7	2.6	1.7	0.0	7.0	1.7

2.3.9 Heereman malli

Pari vuotta vertailun jälkeen Hodgson ja Heerema julkaisivat uuden empiirisen mallin etäisyysvaimeneman ja jälkikaiunta-ajan ennustamiseen. [56] Mallin perustana ovat samat mittaukset kuin Hodgsonin mallissa. Heereman malli perustuu usean muuttujan logaritmiseen regressioanalyysiin. Malli on sisällytetty akustiseen mallinnusohjelmaan PlantNoise, jossa sitä on käytetty esimerkiksi reaaliaikaisen auralisoinnin laskennassa. [57] Auralisaatiossa toistettavan äänen voimakkuutta säädetään ja taajuussuodatetaan oktaavikaistoittain mallinnetun etäisyysvaimeneman perusteella.

Kalusteet ja koneet oletetaan tasaisesti jakautuneeksi absorptioksi, jolle tehollinen absorptiosuhde on

$$\alpha_{\text{eff}} = C_{a0} + C_{a1}Q \quad (30.)$$

ja kalustetiheys $Q = S_f/4V$.

Yhtälössä S_f on kalusteiden kokonaispinta-ala ja V tilan kokonaistilavuus. C_{a0} ja C_{a1} ovat taulukoituja vakioita (taulukko 7).

Kalusteiden kokonaispinta-ala S_f voidaan määrittää joko mittaamalla kalusteiden mitat tai käyttämällä empiiristä yhtälöä

$$S_f = N_f(0.41l^2 + 2.82hl), \quad (31.)$$

$$\text{jossa } l = [(S_{ff}LW)/(0.41N_f)]^{1/2} \quad (32.)$$

Yhtälöissä h on kalusteiden keskimääräinen korkeus, N_f on kalusteiden lukumäärä ja S_{ff} kalusteiden peittämän lattiapinta-alan suhteellinen osuus, L tilan pituus ja W tilan leveys.

Etäisyysvaimenema lasketaan yhtälöllä

$$SP(r) = I + s \log(r), \quad (33.)$$

missä

$$I = C_{i0} + C_{i1}\alpha_{\text{eff}} + C_{i2}H + C_{i3}\log(H) + C_{i4}Q + C_{i5}h/H + \\ + C_{i6}S/V + C_{i7}V + C_{i8}S + C_{i9}\alpha_{\text{eff}}LW \quad (34.)$$

ja

$$s = C_{s0} + C_{s1}\alpha_{\text{tot}} + C_{s2}H + C_{s3}\log(H) + C_{s4}(1/Q) + C_{s5}h/H + C_{s6}S/V \quad (35.)$$

Yhtälöissä α_{tot} on kokonaisabsorptiosuhde, jossa on mukana pintojen, kalusteiden ja ilman absorptio. H on tilan korkeus, h kalusteiden keskimääräinen korkeus ja S tilan pintojen kokonaispinta-ala. Parametrit $C_{i0}...C_{i9}$ ja $C_{s0}...C_{s6}$ ovat taulukoituja vakioita (taulukko 7).

Vastaavasti mittauksiin perustuen Hodgson ja Heerema kehittivät Eyringin yhtälön pohjalta empiirisen mallin jälkikäiunta-ajan laskemiseen:

$$T = C_{t0} + C_{t1}V/S + C_{t2}(1/\alpha_{\text{tot}}), \quad (36.)$$

missä $C_{t0}...C_{t2}$ ovat taulukoituja vakioita (taulukko 7).

Taulukko 7: Heereman malli, parametrit etäisyysvaimeneman laskentayhtälöön.

parametri	125	250	500	1000	2000	4000
C_{a0}	0.110	0.017	0.099	0.131	0.140	0.135
C_{a1}	4.520	5.800	4.320	2.790	2.280	1.940
C_{s0}	-91.900	-102.000	-87.700	-81.900	-60.500	-70.800
C_{s1}	-16.100	-21.900	-29.900	-26.900	-24.900	-19.200
C_{s2}	-12.100	-14.300	-12.500	-12.500	-8.500	-9.200
C_{s3}	196.000	225.000	194.000	187.000	128.000	146.000
C_{s4}	-0.037	-0.028	-0.007	0.032	0.131	0.135
C_{s5}	-5.080	-3.630	-2.330	-9.790	-11.600	-11.880
C_{s6}	15.000	18.800	17.700	18.000	15.900	13.200
C_{i0}	21.400	25.500	27.900	41.100	29.000	65.900
C_{i1}	-6.320	-2.960	19.400	-16.500	-18.200	-18.300
C_{i2}	5.840	6.580	6.460	8.610	5.590	9.740
C_{i3}	-86.700	-98.000	-99.800	-127.000	-85.500	-155.000
C_{i4}	0.000	0.000	-121.000	48.300	72.200	37.100
C_{i5}	5.030	5.000	5.130	12.400	0.000	0.000
C_{i6}	0.000	0.000	0.000	-9.040	-10.100	-21.400
C_{i7}	-8.33E-005	-6.25E-005	5.64E-005	-1.34E-004	0.000	0.000
C_{i8}	0.000	0.000	0.000	0.000	-4.87E-004	-8.40E-004
C_{i9}	3.10E-003	2.50E-003	1.14E-003	1.82E-003	0.000	2.47E-003
C_{t0}	-2.320	-2.360	-2.680	-2.960	-2.700	-2.060
C_{t1}	0.902	0.988	1.130	1.250	1.130	0.830
C_{t2}	0.387	0.362	0.369	0.368	0.368	0.368

2.4 Huoneakustiikan mallintaminen aaltoyhtälömalleilla

Aaltoyhtälömalleissa tilan äänikenttä kuvataan tilassa etenevien paineaaltojen superpositiona. Rayleigh julkaisi kolmiulotteisen tilan seisovia aaltoja koskevan teorian 1800-luvulla. Teoriaa ovat edelleen kehittäneet Bolt, Cremer, van den Dungen, Morse ja Rzhhevki. Teorian mukaan suljetussa tilassa äänikenttä voidaan kuvata määrittelemällä jokainen heijastunut ääniaalto differentiaaliyhtälöiden avulla ja laskemalla yhteen kaikki heijastukset.

Monimutkaisten kalustettujen tilojen, kuten useimmat teollisuustilat ja avotoimistot, mallintamiseen aaltoyhtälöteoria ei sovellu, koska ratkaistavien differentiaaliyhtälöiden määrä kasvaa nopeasti niin suureksi, ettei niiden ratkaisu ole enää mahdollista. Yksinkertaisissa suljetuissa tiloissa aaltoyhtälömallit soveltuvat hyvin pientaajuisten äänikenttien kuvaamiseen. Laskennan rajoittaa pienille taajuuksille huonemoodien määrä, joka kasvaa huomattavasti suuremmilla taajuuksilla.

Yleisesti käytettyjä aaltoyhtälöiden ratkaisemiseen perustuvia mallinnusmenetelmiä ovat elementtimenetelmät, kuten FEM (Finite Element Method) ja BEM (Boundary Element Method). FEM tarkastelussa tila tai sen rajapinnat jaetaan pieniin elementteihin, jotka kytkeytyvät toisiinsa solmujen kautta. Aaltoyhtälö kuvataan näiden elementtien lineaariyhtälöinä. BEM tarkastelussa tilan rajapinnat kuvataan elementtien avulla ja oletetaan, että paine tai hiukkassnopeus on lineaarikombinaatio äärellisestä määrästä elementtien perusyhtälöistä. Menetelmillä voidaan laskea tarkka numeerinen ratkaisu aaltoyhtälöille, mutta edelleen tarkastelut rajoittuvat pienille taajuuksille ja tyhjiin, melko yksinkertaisen muotoisiin tiloihin, koska suurilla taajuuksilla huonemoodien määrä on niin suuri, ettei elementtien välisten kytkentöjen määrittely ja lineaariyhtälöiden ratkaisu ole käytännössä mahdollista.

FEM ja BEM mallien avulla voidaan tarkastella myös äänienergian siirtymistä pintojen välillä täysin diffuusissa äänikentässä. Tässä elementtien väliset kytkennät kuvataan yleensä tilastolliseen akustiikkaan perustuvilla yhtälöillä. Kun lisäksi huomioidaan äänienergian absorboituminen pintoihin, voidaan laskea äänikentän vaimeneminen ajan funktiona ja sen perusteella määrittää esimerkiksi jälkikaiunta-aika.

2.5 Huoneakustiikan geometrinen mallintaminen

Geometrinen huoneakustiikka (sädeteoria) on hyvin vanha, antiikin Kreikan ajalta. Ensimmäisissä sädeteorian tietokonesovelluksissa simuloitiin tyhjiä tiloja. Suorakulmaisissa matalissa ja laajoissa tiloissa käytettiin kovalähdemenetelmää. Monimuotoisemmissa tai epäsäännöllisissä tiloissa käytettiin säteenseurantamenetelmää.

Kovalähde- ja säteenseurantamenetelmät ovat edelleen eniten käytössä olevat tekniikat tietokonemallinnuksessa. Tekniikoiden oletukset ovat samat, mutta menetelmien laskenta-algoritmit poikkeavat toisistaan. Lisäksi joissakin mallinnusohjelmissa käytetään näiden tekniikoiden yhdistelmiä, jolloin ensimmäiset heijastukset tarkastellaan kovalähdemenetelmää ja muut heijastukset säteenseurantamenetelmää käyttäen.

Geometrisessä huoneakustiikassa äänisäteellä kuvataan pistemäisestä äänilähteestä tulevan palloaallon pientä osaa, jonka intensiteetti on palloaallon intensiteetin suuruinen. Jos tarkasteltavan tilan mitat ovat suuria äänen aallonpituuteen verrattuna, tilan aaltoteoreettinen käytös ei ole merkitsevä ja ääniaaltojen voidaan olettaa etenevän säteen suuntaisesti. Oletus ei kuitenkaan päde pienillä taajuuksilla kapeakaistaisille äänille, joille aaltoteorian mukainen käyttäytyminen tulisi ottaa huomioon.

Geometrisessä huoneakustiikassa tehdään yksinkertaistuksia ja oletuksia: äänen aalto-ominaisuus (interferenssi ja diffraktio) jätetään huomiotta, äänilähteet oletetaan pistemäisiksi ja vakiotehoiksi, ilma oletetaan homogeeniseksi ideaalikaasuksi, useimmiten pintojen absorptio oletetaan tulokulmasta riippumattomaksi ja äänilähteen suuntakuvio jätetään huomiotta.

Pistemäisestä äänilähteestä ympäristöön etenevät ääniaallot esitetään aaltorintaman suuntaisina äänisäteinä. Kun säde osuu tasopintaan, sen oletetaan heijastuvan pinnasta joko peiliheijastuksena tai satunnaiseen suuntaan. Heijastus voi tapahtua myös kaarevasta pinnasta, jolloin heijastava pinta oletetaan kaarevan pinnan tangenttitasoksi.

2.5.1 Kuvalähdemenetelmä

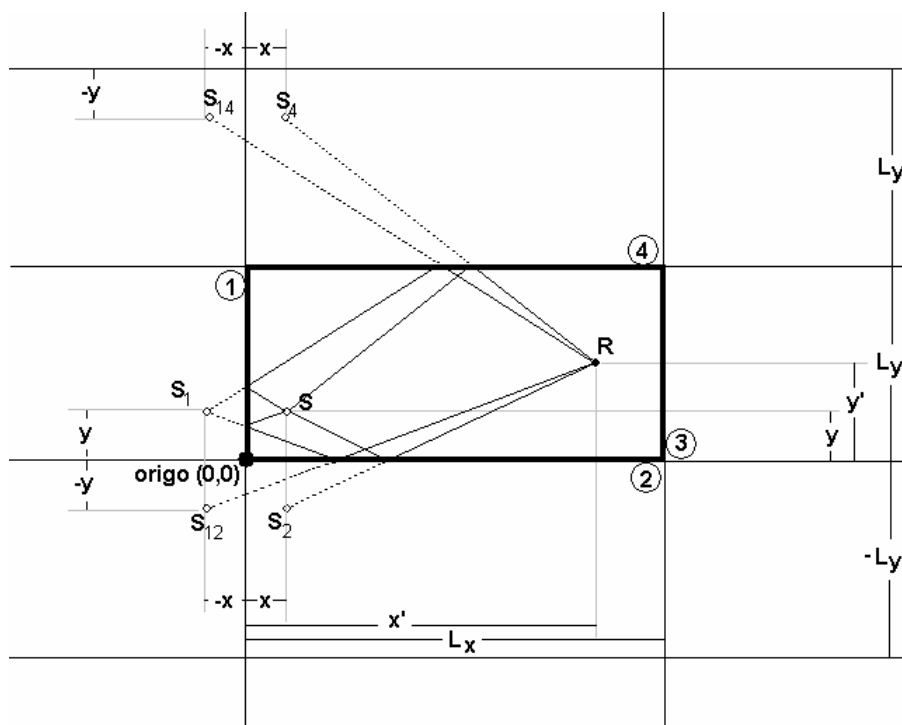
Kuvalähdemenetelmässä tarkasteltavasta äänilähteestä muodostetaan kuvalähteitä peilaamalla ensin äänilähde ja sen jälkeen rekursiivisesti kuvalähteet jokaisen tilan rajapinnan yli, kunnes ennalta määrätty rajaehto (esimerkiksi heijastusten määrä) täyttyy. Kaikki heijastukset ovat siis peiliheijastuksia. Vastaanottopisteessä lasketaan kaikkien siihen esteettömästi näkyvien ääni- ja kuvalähteiden tuottama äänikenttä.

Kuvalähdemenetelmässä vastaanottopisteen energiatiheys lasketaan todellisesta äänilähteestä ja heijastuksista kuvaavista kuvalähteistä suoraan saapuvien äänisäteiden energiatiheyksien summana. Koska heijastustarkastelu suoritetaan kaikille pinnoille, kaikki merkittävät spekulaaristi heijastuneet äänisäteet tulevat mukaan tarkasteluun.

Taulukossa 8 esitetään esimerkkinä suorakulmaisessa tilassa sijaitsevan äänilähteen ja sen kuvalähteiden lukumäärä.[58] Kuvassa 6 esitetään kaksiuolotteinen näkymä äänilähteestä ja joistakin sen kuvalähteistä.

Taulukko 8: Äänilähteiden lukumäärä suorakulmaisessa tilassa kuvalähdemenetelmällä mallinnettaessa.

Heijastavien pintojen lukumäärä	kuvalähteet, jotka heijastuvat n kertaa ($n \neq 0$)	kuvalähteet, jotka heijastuvat enintään N kertaa ($0 < n \leq N$)
2	2	$2n+1$
4	$4n$	$2n^2+2n+1$
6	$4n^2+2$	$1/3(4n^3+6n^2+8n+3)$



Kuva 6. Kaksiulotteinen näkymä äänilähteestä S ja joistakin sen vastaanottopisteeseen R näkyvistä kuvälähteistä S_i .

Kuva-avaruuden todelliset ja kuvälähteet oletetaan monopolilähteiksi, jotka säteilevät vapaassa tilassa palloaaltoa. Todelliselle äänilähteelle voidaan määrittää myös suuntaavuus. Kuvälähteiden äänitehotaso määräytyy pintojen absorptiosuhteiden ja heijastuskertojen lukumäärän perusteella. Lopullinen energiatiheys vastaanottopisteessä on todellisesta äänilähteestä ja sen kuvälähteistä tulevien äänisäteiden summa

$$D = (P/4\pi c) \sum_n [(1 - \alpha)^n \exp(-mr_n) / r_n^2], \quad (37.)$$

missä P on todellisen äänilähteen ääniteho, α pintojen keskimääräinen absorptiosuhde, m ilman absorption vaimennustekijä ja r_n äänilähteen tai kuvälähteen etäisyys vastaanottopisteestä. Etäisyyden r_n laskemiseksi on esitetty useita tapoja.

Kolmiulotteista tilannetta voidaan tarkastella X , Y ja Z suunnassa erikseen, jolloin N heijastusta jaetaan kolmeen tarkasteltavaan osaan

$$N = I + J + K \quad (38.)$$

Kuvasta 6 nähdään, että etäisyyskomponentit r_{nx} , r_{ny} ja r_{nz} voidaan määrittellä seuraavasti:

$$\begin{aligned} r_{nx} &= 2iL_x + x - x', & I &= |2i| \\ r_{nx} &= (2i+2)L_x - x - x', & I &= |2i+1|, \\ r_{ny} &= 2jL_y + y - y', & J &= |2j| \\ r_{ny} &= (2j+2)L_y - y - y', & J &= |2j+1|, \\ r_{nz} &= 2kL_z + z - z', & K &= |2k| \\ r_{nz} &= (2k+2)L_z - z - z', & K &= |2k+1|, \end{aligned} \quad (39.)$$

$i, j, k = -\infty, \dots, \infty$

missä L_x , L_y ja L_z ovat tilan ulkomitat, x , y , z todellisen äänilähteen ja x' , y' , z' vastaanottopisteen paikkakoordinaatit. Näin äänen kulkema matka kuvälähteestä vastaanottopisteeseen voidaan määrittellä ilman, että heijastuskulmia tarvitsee laskea.

Suorakulmaisessa tilassa kahta yhdensuuntaista tasoa, joiden välissä äänilähde sijaitsee, voidaan tarkastella pareittain. Jos tarkastellaan katto- ja lattiapinnan välillä sijaitsevaa äänilähdettä pisteessä (x, y, z) ja vastaanottopistettä (x', y', z') , havaitaan että, tasojen välille syntyy ääretön määrä kuvalähteitä S_i . Kuvalähteen järjestysnumero i ilmaisee, montako heijastusta äänisäteellä on tasojen välillä matkalla vastaanottopisteeseen, eli kokonaisheijastusten määrä

$$|i| = |n_{ka}| + |n_{la}|, \quad (40.)$$

jossa n_{ka} on kattoheijastusten ja n_{la} lattiaheijastusten määrä. Katto- ja lattiaheijastusten välillä on seuraava yhteys:[32]

Jos i on parillinen, niin $n_{ka} = n_{la} = i/2$.

$$\text{Jos } i \text{ on pariton, niin } n_{ka} = (i+1)/2 ; n_{la} = (i-1)/2. \quad (41.)$$

Jos $i = 0$, niin $n_{ka} = n_{la} = 0$.

Katto- ja lattiataason luomien kuvalähteiden paikkakoordinaatit ovat (x, y, z'') , missä

$$z'' = 2n_{ka}(L_z - z) + (2n_{la} + 1)z. \quad (42.)$$

Kuvalähteen etäisyys vastaanottopisteestä lasketaan Pythagoraan yhtälöllä

$$r_i = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z''-z')^2]^{1/2} \quad (43.)$$

Analogisesti kolmiulotteisessa tilassa voidaan tarkastella äänilähteen ja vastaanottopisteen välisiä heijastuksia pareittaisten pintojen välillä. Kokonaisheijastukset X, Y, Z suunnissa ovat i, j, k ja niiden ja pareittaisten pintojen välille määritellään yhteydet:

$$|i| = |n1| + |n2|, |j| = |n3| + |n4| \text{ ja } |k| = |n5| + |n6| \quad (44.)$$

Jos i, j, k ovat parillisia, niin

$$n1 = n2 = i/2, \quad n3 = n4 = j/2, \quad n5 = n6 = k/2, \quad (45.)$$

Jos i, j, k ovat parittomia, niin

$$\begin{aligned} n1 &= (i+1)/2 ; n2 = (i-1)/2, \\ n3 &= (j+1)/2 ; n4 = (j-1)/2, \\ n5 &= (k+1)/2 ; n6 = (k-1)/2. \end{aligned} \quad (46.)$$

$$\text{Jos } i, j, k = 0, \text{ niin } n1 = n2 = n3 = n4 = n5 = n6 = 0 \quad (47.)$$

Vastaanottopisteen (x', y', z') energiatiheys kalustamattomassa suorakulmaisessa tilassa voidaan nyt laskea seuraavasti:

$$D = \sum_k \sum_j \sum_i [P \cdot \exp(-mr_{ijk}) / (4\pi c r_{ijk}^2)] \cdot \{(1-\alpha_{ka})^{|n1|} (1-\alpha_{la})^{|n2|} (1-\alpha_{es})^{|n3|} (1-\alpha_{ts})^{|n4|} (1-\alpha_{vs})^{|n5|} (1-\alpha_{os})^{|n6|}\}, \quad (48.)$$

missä $|n1|, \dots, |n6|$ ovat katto-, lattia-, pääty- ja sivuseinäpintojen heijastusten määrä, $\alpha_{ka}, \dots, \alpha_{os}$ pintojen absorptiosuhteet, m ilman vaimennustekijä, c äänen nopeus, P äänilähteen ääniteho ja r_{ijk} kuvalähteen S_{ijk} etäisyys vastaanottopisteestä (x', y', z') .

Kuvalähteen etäisyys r_{ijk} lasketaan seuraavasti:

$$r_{ijk} = [(x''-x')^2+(y''-y')^2+(z''-z')^2]^{1/2}, \quad (49.)$$

missä

$$\begin{aligned} x'' &= 2n3(L_x-x)+(2n4+1)x, \\ y'' &= 2n5(L_y-y)+(2n6+1)y, \\ z'' &= 2n1(L_z-z)+(2n2+1)z. \end{aligned} \quad (50.)$$

Energiatiheydestä D voidaan laskea äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso vastaanottopisteessä

$$L_p = 10 \lg[D\rho_{\text{air}}c^2/p_0^2], \quad (51.)$$

missä p_0 on 20 μPa , c äänen nopeus ja ρ_{air} ilman tiheys.

Jos tila ei ole suorakulmainen, kuten tilanteessa, jossa jokin seinistä on tietyssä kulmassa Φ kohtisuoraan nähden, voidaan kuvalähteen paikkakoordinaatit määrittää seuraavasti:[59]

$$x'' = L_x - [2(y/\cos\Phi + (L_x - L_y \tan\Phi)\sin\Phi)\sin\Phi] \quad (52.)$$

$$y'' = L_y - [2(y/\cos\Phi + (L_x - L_y \tan\Phi)\sin\Phi)\cos\Phi]$$

Jos katto on kallistettu kulmaan, on z'' vastaavasti

$$z'' = L_z - [2(L_z/\cos\Phi + (z - z \tan\Phi)\sin\Phi)\cos\Phi] \quad (53.)$$

Jos tilan rajaavat pinnat on esitetty tasopintojen yhtälöillä

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (54.)$$

niin kuvalähteen paikka (x'' , y'' , z'') voidaan määrittää äänilähteen paikasta (x , y , z) seuraavasti:

$$\begin{aligned} x'' &= x + \chi A \\ y'' &= y + \chi B \\ z'' &= z + \chi C, \end{aligned} \quad (55.)$$

missä

$$\chi = -2(xA+yB+zC+D)/(A^2+B^2+C^2) \quad (56.)$$

Kuvalähteen ja vastaanottopisteen välillä täytyy lisäksi tarkistaa, että kuvalähde näkyy vastaanottopisteeseen. Tässä tarkistetaan, ettei kuvalähteen ja vastaanottopisteen välissä ole muita rajaavia pintoja kuin se, jonka suhteen kuvalähde muodostettiin.

Kuvalähteen etäisyys vastaanottopisteestä r_{ijk} , vastaanottopisteen energiatiheys D ja äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso L_p lasketaan kuten edellä.

Kalustettujen tilojen mallintaminen on kuvalähdemenetelmällä ongelmallista, koska kalusteiden yksityiskohtainen mallintaminen lisää tarkasteltavien pintojen määrän niin suureksi, että laskennallinen tarkastelu ei käytännössä ole mahdollista. Lisäksi suurin osa peilatuista kuvalähteistä ei edes näy vastaanottopisteeseen, joten tehdään huomattava määrä turhaa laskentaa. Kalusteiden vaikutusta äänen etenemiseen on pyritty huomioimaan erilaisilla kalustetiheyden, kalusteiden kokoon ja kalusteabsorptioon perustuvilla yhtälöillä, joissa kalusteet ajatellaan homogeeniseksi väliaineeksi ja äänen sironna esineiden välillä noudattaa Poissonin

jakaumaa. Tällöin oletetaan kalusteiden jakautuneen tasaisesti ja satunnaisesti tilaan ja äänisäteiden osuvan niihin satunnaisesti ja muista osumista riippumattomasti. Näitä kalustevaimennusmalleja ovat kehittäneet mm. Kuttruff, Auletta, Jovovic, Hodgson, Lindqvist, Kurtze ja Ondet ja Barbry.

Kurosen kehittämässä Akuri-ohjelmassa kalusteen sirontapoikkipinta-ala oletetaan yhtä suureksi kuin kalusteen ympärille kuvitellun pallon poikkipinta-ala S_{kp} . Tilan keskimääräinen sirontataajuus v ja kalustepallojen halkaisija d_{kp} lasketaan seuraavasti [32]

$$v = \sum_i [S_{kp,i}/4]/V \text{ ja } d_{kp} = 2[v/n_k\pi]^{1/2}, \quad (57.)$$

missä V on tilan huonetilavuus ja n_k kalustetiheys (kpl/ V).

Vastaanottopisteen energiatiheys lasketaan suoraan saapuneiden säteiden (D_{suo}) ja kalusteiden sirottamien säteiden (D_{sir}) energiatihyysien summana. Suoraan saapuneiden äänisäteiden energiatiheys voidaan nyt laskea seuraavasti:

$$D_{suo} = \sum_k \sum_j \sum_i [P \cdot \exp[-(v+m)r_{ijk}]/(4\pi c r_{ijk}^2)] \cdot \{(1-\alpha_{ka})^{n1}(1-\alpha_{la})^{n2}(1-\alpha_{es})^{n3}(1-\alpha_{ts})^{n4}(1-\alpha_{vs})^{n5}(1-\alpha_{os})^{n6}\}. \quad (58.)$$

Kalusteiden oletetaan vaimentavan niihin törmänneitä äänisäteitä. Kalusteiden sirottamien äänisäteiden energiatiheys lasketaan vastaavasti

$$D_{sir} = \sum_k \sum_j \sum_i [P \cdot \exp[-(\mu_f + m)r_{ijk}]/(4\pi c r_{ijk}^2)] \cdot \{(1-\alpha_{ka})^{n1}(1-\alpha_{la})^{n2}(1-\alpha_{es})^{n3}(1-\alpha_{ts})^{n4}(1-\alpha_{vs})^{n5}(1-\alpha_{os})^{n6}\}, \quad (59.)$$

missä μ_f on kalustevaimennustekijä, joka riippuu kalusteiden keskimääräisestä absorptiosuhteesta α_{kal} ja sirontataajuudesta v . Kalustevaimennustekijälle on esitetty kokeellinen yhtälö

$$\mu_f = \{[\alpha_{kal}/(1 - \alpha_{kal})] \cdot [d_{kp} / 2(d_{kp} + 1/v)]\} \quad (60.)$$

ProAkustissa sironnien äänisäteiden energiatihyysien laskenta perustuu Lindqvistin esittämään malliin,[60, 61, 32] jossa kalusteet oletetaan tilassa satunnaisesti sijoitelluiksi esineiksi, jotka sirottavat äänienergiaa tasaisesti kaikkiin suuntiin. Suurien kalusteiden varjostamia alueita ei oteta huomioon.

Lindqvistin mallissa sironnien äänisäteiden energiatiheys vastaanottopisteessä lasketaan seuraavasti

$$D_{sir} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{P}{\sqrt{8\pi^3} r_{ijk}^2} \int_{t=0}^{\infty} r_{ijk}^2 \sum_{k=1}^{\infty} (1 - \alpha_{kal})^k \frac{(vct)^k}{k!} \exp[-(v+m)r_{ijk}] \cdot \left[\frac{1}{ct} \sqrt{\frac{3(k+2)}{2}} \right]^3 \exp\left[\frac{-3(k+2)}{4} \left(\frac{r_{ijk}}{ct} \right)^2 \right] [A_{ka} A_{la} A_{se}]^k dt \quad (61.)$$

missä $\{A_{ka}A_{la}A_{se}\}^k$ on tasopintojen kokonaisvaimennus kalusteiden välillä sironneelle äänisäteelle, joka on törmännyt kalusteisiin k kertaa. Katto- (A_{ka}), lattia- (A_{la}) ja seinäpintojen (A_{se}) vaimennustekijät lasketaan seuraavasti

$$\begin{aligned}
 A_{ka} &= \sum_n (1-\alpha_{ka})^n \text{Prob}(n), & n \geq 0 \\
 A_{la} &= \sum_n (1-\alpha_{la})^n \text{Prob}(n), & n \geq 0 \\
 A_{se} &= \sum_n (1-\alpha_{se})^n \text{Prob}(n), & n \geq 0
 \end{aligned} \tag{62.}$$

missä todennäköisyysfunktio $\text{Prob}(n)$ on (kuva 7)

$$\text{Prob}(n) = \{\zeta((2n-1)vh/2) - \zeta((2n+3)vh/2)\}/2, \tag{63.}$$

jossa on käytetty sijoitusta

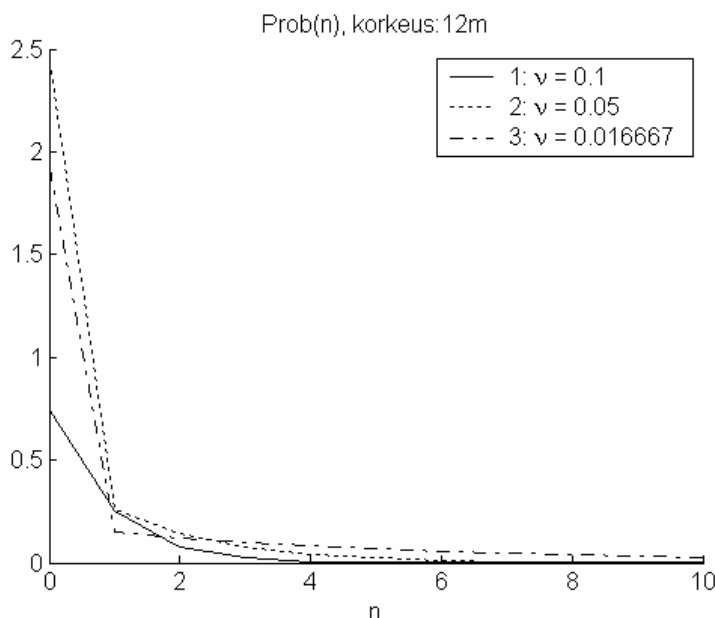
$$\zeta(nvh/2) = \exp(-nvh/2) + nvh \cdot \text{Ei}(-nvh/2) \tag{64.}$$

ja sarjaesitystä eksponentiaalisesta integraalista

$$\text{Ei}(-x) = C + \ln(x) + \sum_j (-x)^j / j \cdot j!, \quad x > 0 \tag{65.}$$

jossa C on Eulerin vakio (0.577216).

Yhtälöissä h on kahden rajaavan tason välinen etäisyys, joten tarkasteltavaa tilannetta vastaavasti suoritetaan sijoitus $h=L_x$, $h=L_y$ tai $h=L_z$.



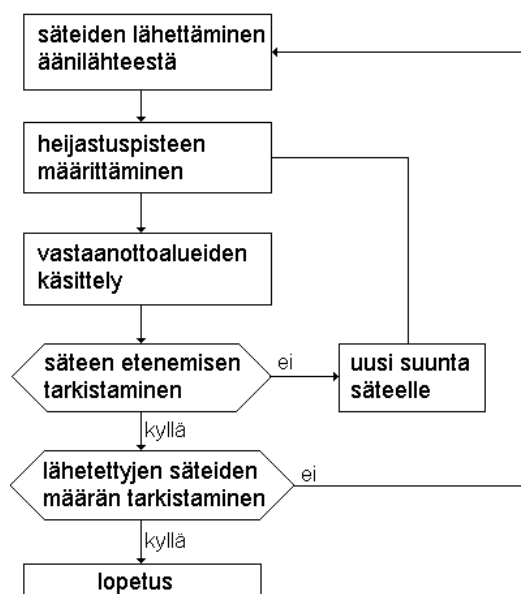
Kuva 7. Prob-funktion kuvaaja katto tai lattiaheijastuksille, kun tilan korkeus on 12 m ja sirontataajuus 0.1, 0.05 ja 0.016667.

Edellä kuvatut tarkastelut rajoittuvat vain suorakulmaisiin tiloihin. Kuvälähdemenetelmällä voidaan tarkastella myös monimuotoisempia tiloja. Esimerkiksi suuret kalusteet voidaan mallissa esittää pintoina (yhtälö 54), mutta tällöin tarkastelu monimutkaistuu nopeasti pintojen lukumäärän kasvaessa. Eniten laskentaa kuormittavat moninkertaiset näkyvyystarkastelut, jotka joudutaan suorittamaan jokaiselle yksittäiselle kuvälähteelle.

2.5.2 Säteenseurantamenetelmä

Säteenseurantamenetelmän periaatteellinen algoritmi esitetään kuvassa 8. Säteenseurantamenetelmässä äänilähteestä lähetetään satunnaisesti äänisäteitä kaikkiin suuntiin. Äänisäteet heijastuvat pinnoista joko peiliheijastuksina tai satunnaisiin suuntiin. Säteiden heijastumisia tilan pinnoista seurataan, kunnes ennalta asetettu rajaehto täyttyy. Rajahtona voi olla esimerkiksi heijastusten määrä,

säteen kantaman energian määrä, säteen kulkema matka tai matkaan kulunut aika. Aina kun säde kulkee vastaanottopisteen kautta, lisätään pisteeseen merkki tai energiayksikkö ja tapahtuman aika. Laskennan lopuksi äänikenttä vastaanottopisteessä lasketaan siihen osuneiden säteiden perusteella. Jos säteet ovat äärimmäisen ohuita, vastaanottopisteet ovat tasopinnalle määriteltyjä alueita (neliö, ympyrä) tai kolmiulotteisia soluja (kuutio, pallo). Vastaanottopisteet voivat olla pistemäisiä, jos äänisäteillä on äärellinen tilavuus, kuten esimerkiksi kartio- (cone tracing) tai pyramidiseurannassa (pyramid tracing). Yleispätevää sääntöä vastaanottoalueen muodosta ja suuruudesta ei ole vaan ne sovitetaan valittuun säteenseurantamenetelmään.



Kuva 8. Säteenseurantamenetelmän periaatteellinen algoritmi.

Säteenseurantamenetelmän mallissa kaikki tilan pinnat määritellään pinnan yhtälöillä (54). Pinnan määrittämiseen tarvitaan vähintään kolme pistettä. Jos pisteitä on enemmän, jokaisen pisteen tulee toteuttaa pinnan yhtälö.

Pinnan P_i normaalivektori (yksikkövektori) on

$$\mathbf{n} = (a_n, b_n, c_n) = (A, B, C) / (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2} \quad (66.)$$

Lisäksi tilan jokaiselle pinnalle määritetään rajaavat reunaehdot, jotka määrittävät pinnalla polygonin, joka kuvaa tilan fyysistä pintaa. Polygoni määritellään kulmapisteiden avulla. Rajaavia polygoneja voi tasopinnalla olla useampiakin. Laskennallisesti helpompaa onkin jakaa rajaavat polygonit kolmion muotoisiin osapintoihin, joiden matemaattinen tarkastelu on yksiselitteisempää. Toisaalta tarkasteltavien pintojen lukumäärä kasvaa.

Esimerkiksi suorakulmion muotoinen tila voidaan määrittellä kuudella tasopinnan yhtälöllä ja näille pinnoille määritellyillä polygonien kulmapisteillä (4/pinta). Koska nurkkapisteet toisensa leikkaavilla pinnoilla ovat samat, tarvitsisi mallin lähtötiedoissa määrittellä vain 8 pistettä.

Jos äänilähteen äänitehotaso on L_w (dB re 1 pW), on sen ääniteho

$$P = P_0 10^{L_w/10}, \quad (67.)$$

missä $P_0 = 1$ pW. Ääniteho P jaetaan valitulle määrälle äänisäteitä N_s , jolloin yhden äänisäteen ääniteho p_i on P/N_s . Äänisäteen ääniteho p_i jakautuu avaruuskulmaan $d\Omega = 4\pi/N_s$, jos oletetaan äänilähde pistemäiseksi vapaassa kentässä. Äänilähteen suuntaavuus voidaan ottaa huomioon lisäämällä tai vähentämällä äänisäteelle annettavaa äänitehoa, kun huolehditaan, ettei äänisäteille annettavien äänitehojen summa poikkea äänilähteelle määritetystä äänitehosta.

Äänilähteestä lähtevän säteen suunta määritetään yksikkövektorilla

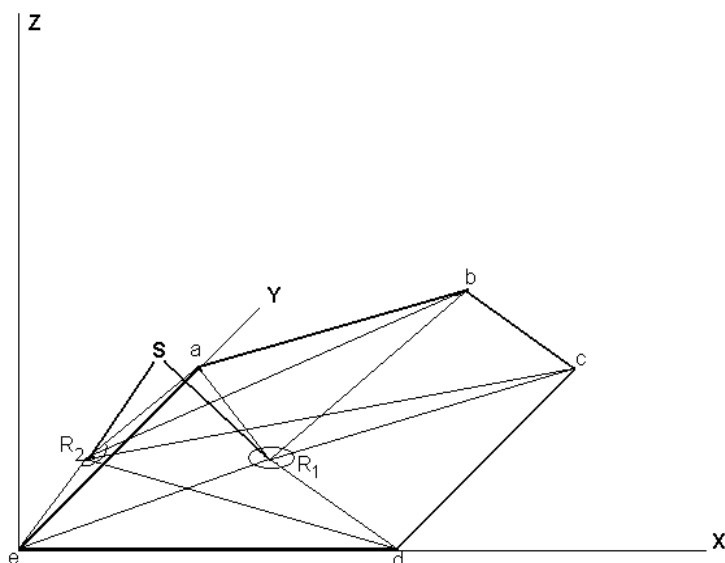
$$\mathbf{u} = (\sin(\theta)\cos(\varphi), \sin(\theta)\sin(\varphi), \cos(\theta))/|\mathbf{u}|, \quad (68.)$$

jonka kulma φ valitaan satunnaisesti väliltä $0 \dots 2\pi$ ja kulma θ väliltä $-\pi/2 \dots \pi/2$. [62] Äänisäteitä lähetetään tilan muodosta ja koosta riippuen useita tuhansia. Tarvittavien säteiden määrälle on erilaisia laskelmia, mutta yleispätevää sääntöä ei ole. Riittävä säteiden määrä on saavutettu, kun säteiden määrää lisäämällä energiatiheys vastaanottopisteissä ei enää kasva.

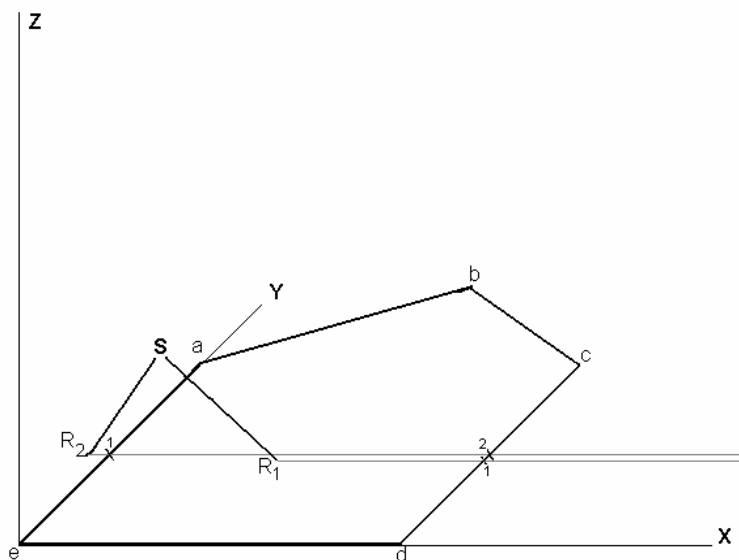
Tilassa etenevän äänisäteen intensiteettiä pienentävät etäisyysvaimennus, ilman absorptio ja pintojen absorptio äänisäteen törmätessä nihin. Osa säteen kantamasta energiasta absorboituu (absorptiosuhde) ja loppuenergia heijastuu. Heijastuksia lasketaan äänisäteelle, kunnes määrätty määrä heijastuksia on tapahtunut tai jokin muu rajaehto toteutuu.

Heijastuspiste R_i pinnalla P_i määritetään säteen suuntavektorin \mathbf{u} ja pinnan leikkauspisteenä matriisioperaatioilla (Cramer's rule). Jos leikkauspiste on rajaavan polygonin sisäpuolella on heijastus mahdollinen. Eräs tapa tarkistaa, onko piste tasopinnalla polygonin rajaamalla alueella, on muodostaa pisteestä polygonin kulmapisteisiin vektorit ja laskea yhteen vierekkäisiin pisteisiin muodostettujen vektorien väliset kulmat. Kulmien tulee olla alle 180 astetta. Jos kaikkien laskettujen kulmien summa on tasan 360 astetta, on piste tasopinnalla polygonin rajaaman alueen sisällä. Muuten piste on alueen ulkopuolella (kuva 9).

Kaksiulotteisella pinnalla tähän "onko piste polygonin rajaaman alueen sisällä?" -tarkasteluun on kehitelty useita eri metodeja, joita voidaan soveltaa, kun tarkasteltava piste ja polygoni projisoidaan lähimmälle ortogonaaliselle tasolle. dBworks-mallinnus-ohjelmassa tarkastelu suoritetaan Jordan Curve -teoreemaan perustuvalla algoritmilla, [63, 31] jossa heijastuspisteestä määritetään vektori johonkin suuntaan ja lasketaan vektorin ja polygonin rajaavan käyrän leikkauspisteet. Jos leikkauspisteitä on pariton määrä, on heijastuspiste polygonin rajaaman alueen sisäpuolella (kuva 10).



Kuva 9. Mahdollisten heijastuspisteiden R_1 ja R_2 tarkastelu tasopinnalle rajatun polygonin (a,b,c,d,e) avulla (360 astetta).



Kuva 10. Mahdollisten heijastuspisteiden R_1 ja R_2 tarkastelu tasopinnalle rajatun polygonin (a,b,c,d,e) avulla (Jordan Curve).

Tarkastelu suoritetaan kaikille mallissa oleville pinnoille ja todellinen heijastuspiste on sillä pinnalla, joka on lähimpänä säteen etenemissuunnassa ja rajaavan polygonin ehdot täyttyvät.

Äänisäteen teho tarkastelupisteessä ilman vaimennustekijä m huomioituna on

$$p' = p_i \exp(-mr_i), \quad (69.)$$

missä r_i on säteen kulkema matka ja vaimennustekijä lasketaan Liitteen 1 yhtälöillä.

Peiliheijastuneen äänisäteen $\mathbf{u}'=(l_r', m_r', n_r')$ suunta voidaan laskea tulevan äänisäteiden suuntavektorin $\mathbf{u}=(l_r, m_r, n_r)$ ja pinnan normaalin $\mathbf{n}=(a_n, b_n, c_n)$ avulla seuraavasti:

$$\mathbf{u}' = (l_r - 2\cos(\omega)a_n, m_r - 2\cos(\omega)b_n, n_r - 2\cos(\omega)c_n), \quad (70.)$$

missä ω on pinnan normaalin ja tulevan äänisäteiden välinen kulma.

Yhtälö 70 voidaan esittää myös muodossa:

$$\mathbf{u}' = (l_r + \psi a_n, m_r + \psi b_n, n_r + \psi c_n), \quad (71.)$$

missä

$$\psi = -2(l_r a_n + m_r b_n + n_r c_n) / (a_n^2 + b_n^2 + c_n^2). \quad (72.)$$

Laskennallisesti yhtälö 71 on tehokkaampi, koska siinä käytetään vain peruslaskutoimituksia eikä trigonometrisiä funktioita.

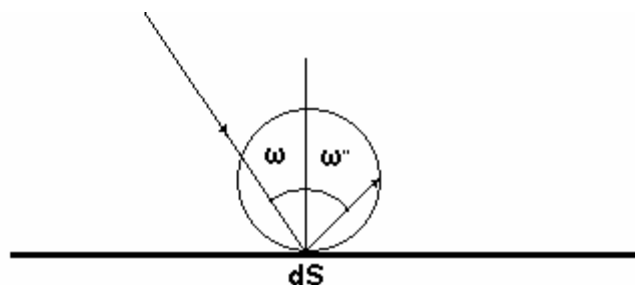
Peiliheijastuneen säteen ääniteho vähenee pinnan absorptiosuhteen α_k mukaisesti

$$p'' = p'(1 - \alpha_k) \quad (73.)$$

Diffuusisti heijastuvalle säteelle ääniteho voidaan laskea Lambertin kosinilain mukaisesti

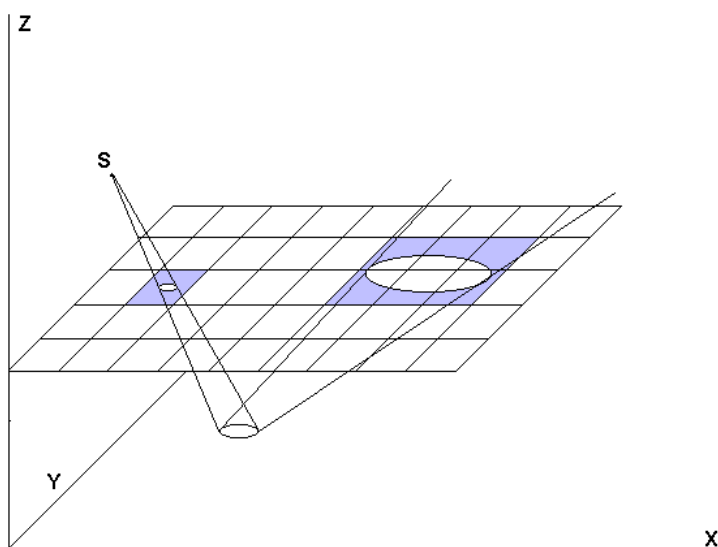
$$p''_{\text{diff}} = p'' \cos(\omega''), \quad (74.)$$

missä ω'' on satunnaisesti valittava suunta heijastukselle (kuva 11).



Kuva 11. Lambertin heijastuslaki.

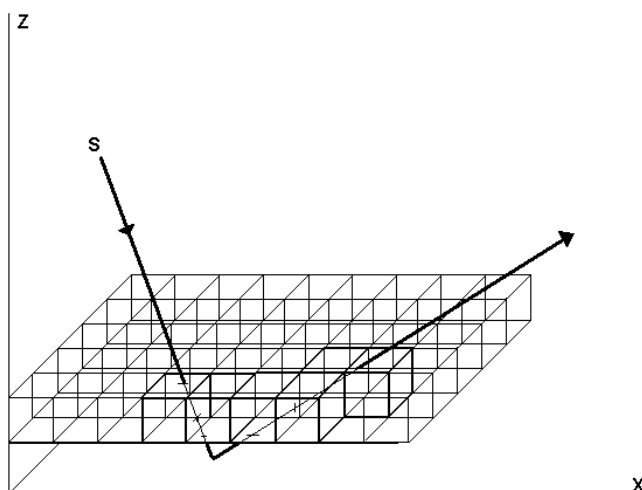
Tilaan voidaan määrittellä vastaanottoalueita tai koko tila voidaan jakaa kaksi- tai kolmiulotteisiin vastaanottoalueisiin. Useimmiten kaksiulotteiset vastaanottoalueet ovat samankokoisia suorakulmioita (kuva 12). Kun äänisäde läpäisee vastaanottoalueen, sen intensiteetti ei keskity lävistyspisteeseen, vaan jakautuu ellipsin alalle, joka on suuntavektorin \mathbf{u} ympärille muodostuneen kartion kantapinta vastaanottopinnalla. Näin ajatellen kauempana äänilähteestä säde voi aktivoida useampia vastaanottoalueita.



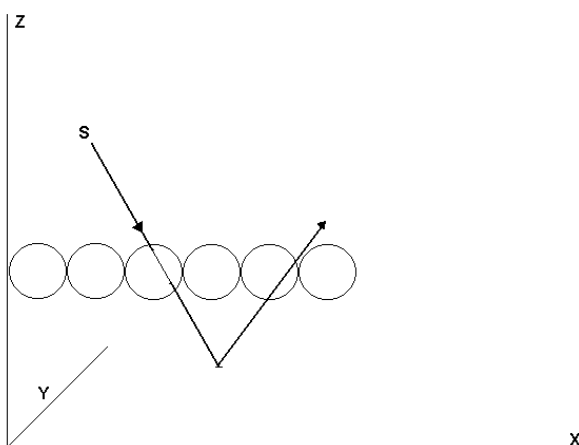
Kuva 12. Kaksiulotteiset vastaanottoalueet tasopinnalla.

Koska säteen energia jaetaan tasan useille vastaanottoalueille, ei menetelmä ole tarkka mallinnettaessa äänikenttää suurten esteiden läheisyydessä, kuten seinäkkeet, suuret koneet ym. Tasomaiset vastaanottoalueet ovat aiemmin olleet käytössä, koska niiden on käsittely on yksinkertaisempaa ja laskenta-aikaa on tarvittu selvästi vähemmän kuin kolmiulotteisia vastaanottoalueita käytettäessä.

Kolmiulotteiset vastaanottoalueet voidaan määritellä esimerkiksi pintojen rajaamina kuutioina (kuva 13) tai vastaanottopisteen ympäröivinä palloina (kuva 14). Useasti kolmiulotteiset vastaanottoalueet on määriteltä vakiokokoisina palloina, joiden säde on 0.5...1.0 m, koska tarkastelu on yksinkertaisempaa kuin kuutioilla. Vastaanottoalueen koon vaikutusta laskentatuloksiin ovat tarkastelleet mm. Lehnert ja Xiangyang ym.[64, 65, 66, 67] Jos vastaanottoalueen tilavuus on hyvin pieni, tarvitaan huomattavan suuri määrä säteitä, jotta niitä osuisi riittävä määrä vastaanottoalueeseen. Muutoin vastaanottoalueeseen kertynyt energia jää vähäiseksi ja niistä laskettu äänenpainetaso on siten liian pieni.



Kuva 13. Kuutiosolut kolmiulotteisina vastaanottoalueina.



Kuva 14. Pallot kolmiulotteisina vastaanottoalueina.

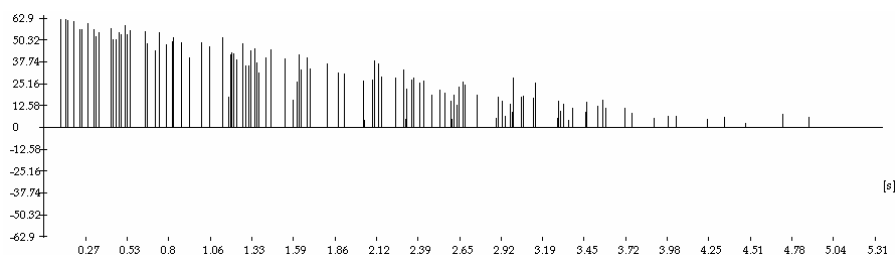
Kolmiulotteisia vastaanottoalueita käytettäessä tarkastellaan, mitkä vastaanottoalueet säde läpäisee ja kuinka pitkän matkan säde kulkee niiden sisällä. Kunkin vastaanottoalueen kokonaisäänenpainetaso lasketaan sen kokonaisenergiatiheydestä tarkasteltavalla aikavälillä t , esimerkiksi $0...T_{60}$

$$L_p = 10 \lg \left[\frac{\int_{t=0}^T \rho_{\text{air}} c I(t) dt}{4 \times 10^{-10}} \right] \Rightarrow 10 \lg \left[\frac{\sum_{t=0}^T \rho_{\text{air}} c I_t}{4 \times 10^{-10}} \right], \quad (75.)$$

missä säteen i intensiteetti I_i on

$$I_i = E_i c / V_r = p_i T_i c / V_r, \quad (76.)$$

kun c on äänen nopeus, V_r vastaanottoalueen tilavuus ja E_i säteen i vastaanottoalueeseen tuoma energia, joka saadaan säteen äänitehosta p_i ja ajasta T_i , joka säteeltä kuluu vastaanottoalueen läpi kulkemiseen. Aika T_i lasketaan esimerkiksi säteen sisääntulo ja poistumispaikoiden välisen etäisyyden ja äänennopeuden c avulla.



Kuva 15. Vastaanottoalueeseen kertynyt äänienergia (Kohde 1, piste 1, 1000 Hz).

Kuvasta 15 voidaan nähdä, että vastaanottoalueeseen on tarkasteluaikavälillä $0...3.31$ s kertynyt säteiden kantamaa äänienergiaa. Kokonaisäänenpainetaso vastaanottoalueessa lasketaan summaamalla logaritmisesti tarkasteluaikavälillä kertyneet äänienergiat (yhtälöt 75 ja 76). Jälkikäyntä-aika puolestaan määritetään äänenpainetason 60 dB vaimenemiseen kuluvan ajan perusteella (ks. kappale 2.2).

3 Mittausmenetelmät

Tässä työssä tarkasteltavissa kohteissa (kappale 5) mitattiin ääniteholtaan tunnetun pallokaiuttimen (kuva 16) tuottama äänenpainetaso useissa pisteissä. Testisignaalinä käytettiin signaaligeneraattorin tuottamaa vaaleanpunaista kohinaa, joka ohjattiin päätevahvistimen kautta pallokaiuttimelle. Pallokaiuttimen suuntaavuus vastasi hyvin ympärisäteilevää pistemäistä äänilähdettä. Äänilähteeksi valittiin ympärisäteilevä pallokaiutin, koska sen äänitehosta voitiin määrittää etukäteen akustiikkalaboratorion kaiuntahuoneessa ja huomattavasti tarkemmin kuin kohteissa olleiden todellisten melunlähteiden äänitehostat. Tämä lisäsi mittaustulosten luotettavuutta ja vertailtavuutta huomattavasti.

Tarkastelupisteet valittiin siten, että mittaustuloksia voitiin käyttää apuna kohteiden meluntorjuntatoimenpiteiden suunnittelussa. Äänenpainetaso tarkastelupisteissä mitattiin tarkkuusäänitasomittarilla sekä oktaavikaistoittain (125-4000 Hz) että A-taajuuspainotettuna ekvivalenttitasona $L_{A,eq}$.



Kuva 16. Pallokaiutin (B&K 4296), signaaligeneraattori ja vahvistin (Neutrik MRI, QSC 1200 W).

Jälkikaunta-aika kohteissa mitattiin usean pisteen keskiarvona. Äänilähteenä käytettiin starttipistoolin laukausta, joka tuotti voimakkaan laajakaistaisen äänen. Jälkikaunta-aika määritettiin 20 dB vaimenemiseen kuluvan ajan perusteella 125-4000 Hz oktaavikaistoilla. Mittauksissa käytettiin analysaattoria, jossa oli jälkikaunta-ajan määrittävä ohjelmisto. Käytännössä teollisuustiloissa ei yleensä voida käyttää 30 dB tai suurempaa vaimenemisaikaa korkean taustamelutason tai äänilähteen ja mittauspisteen välisen suuren etäisyysvaimeneman vuoksi.

Tämän tutkimuksen mittausten aikana melua aiheuttavaa tuotantoa ei ollut, joten taustamelu ei merkittävästi häirinyt mittauksia. Mittaukset toistettiin kohteissa täsmälleen samoissa tarkastelupisteissä ja samoilla pallokaiuttimen paikoilla meluntorjuntatoimenpiteiden toteuttamisen jälkeen, jotta tulokset ennen ja jälkeen meluntorjunnan olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia.

4 Virhetarkastelun menetelmät

4.1 Vertailtavien mallien verifiointi

Yksinkertaiset mallit, kuten kappaleissa 2.2 ja 2.3 esitetyt yhtälöt jälkikaunta-ajalle ja äänenpainetasolle, toteutettiin Excel-taulukkolaskentapohjaa hyödyntäen. Kappaleessa 2.3 esitetyt mallit verifioitiin ennen vertailun aloittamista. Verifiointissa verrattiin laskentapohjalla saatuja tuloksia alkuperäisissä julkaisuissa esitettyihin laskentatuloksiin niissä kuvatuilla lähtöarvoilla.[47, 68].

4.2 Mallinnustulosten virhetarkastelu

Mallinnuksen virhettä tarkasteltiin vertaamalla mallinnettua A-taajuuspainotettua äänenpainetasoa ja jälkikaiunta-aikaa 125,...,4000 Hz oktaavikaistoilla todellisissa tiloissa ennen ja jälkeen meluntorjunnan mitattuihin arvoihin. Mallin tarkkuus määritettiin keskivirheen perusteella. Keskivirhe laskettiin mallinnetulle A-taajuuspainotetulle äänitasolle yhtälöllä

$$A_L = \frac{\sum_{i=1}^N |L_{i,malli} - L_{i,mittaus}|}{N}, \quad (77.)$$

missä N on vastaanottopisteiden lukumäärä.

Oktaavikaistoittain mallinnetulle jälkikaiunta-ajalle määritettiin keskivirhe yhtälöllä

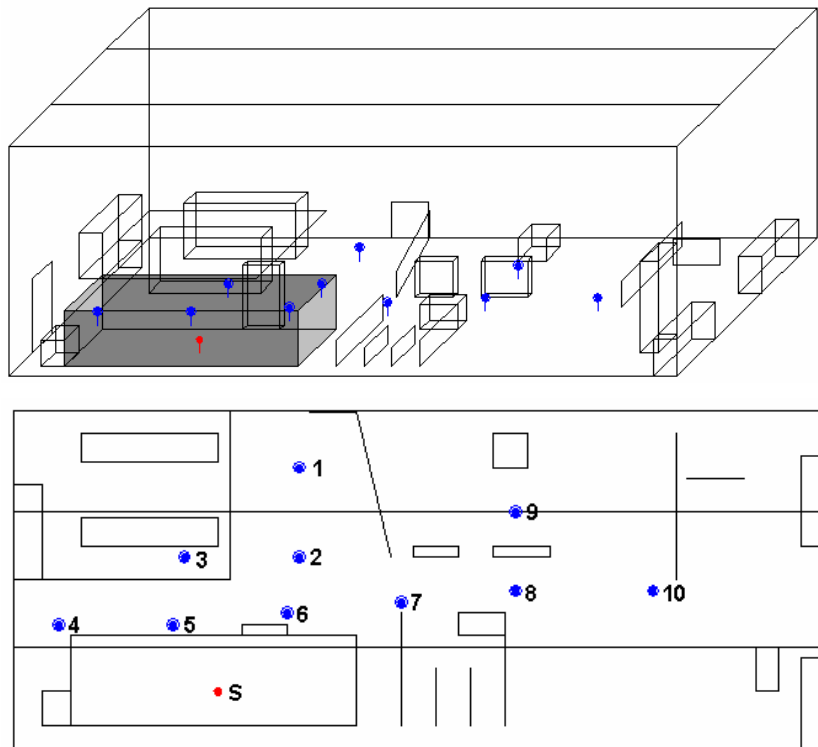
$$A_{T60} = \frac{\sum_{f=125\text{ Hz}}^{4000\text{ Hz}} |T_{f,malli} - T_{f,mittaus}|}{N_{\text{okt}}}, \quad (78.)$$

missä N_{okt} on tarkasteltavien oktaavikaistojen määrä.

5 Mallinnuskohteet

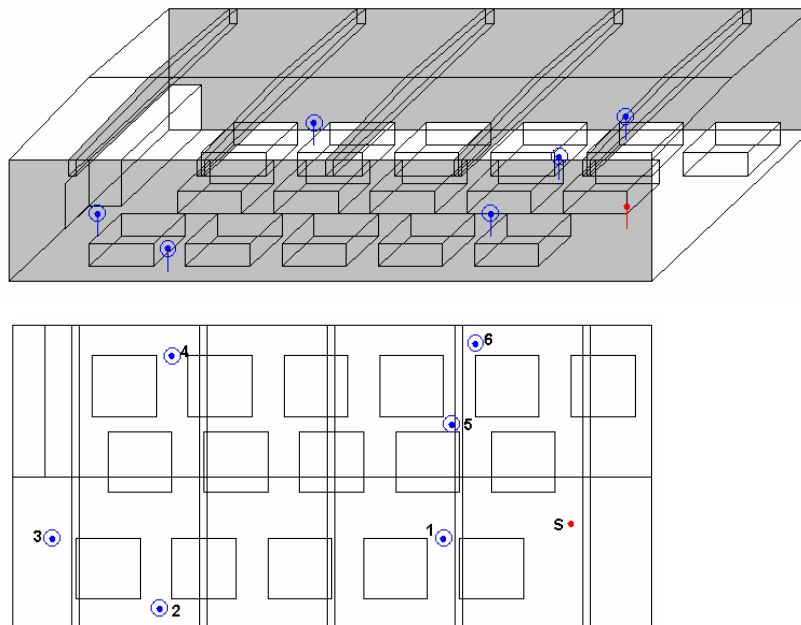
Sovellusesimerkkeinä tarkasteltiin neljää tuotantotilaa, joissa on suoritettu mittaukset ennen ja jälkeen meluntorjuntatoimenpiteiden. Kohteet on aiemmin mallinnettu akustisella mallinnusohjelmalla ODEON 3.1.[22] Tässä työssä mallinnettiin samat kohteet empiirisillä malleilla, kuvalähdemenetelmään perustuvalla Akuri- ja säteenseurantamenetelmään perustuvalla dBworks- mallinnusohjelmilla. Mallinnustuloksia vertailtiin toisiinsa ja mittaustuloksiin. Tarkasteltavat parametrit olivat äänenpainetaso ja jälkikaiunta-aika vastaanottopisteissä.

Kohde 1 oli metalliteollisuuden tuotantotila (72 x 27 x 25 m), jossa pesutyöpisteestä viereisiin työpisteisiin kantautuvaa kovaa melua oli yrityksen omasta toimesta pyritty vaimentamaan korkealla seinäkkeellä (kuvassa 17 harmaalla). Seinäkkeen sisäpuoliseen pintaan kiinnitettiin paikoitellen absorptiolevyjä. Koska tuotantotila oli suuri ja kaikuisa, ei seinäkkeen vaikutus muihin työpisteisiin kantautuvaan melutasoon ollut kovinkaan suuri.



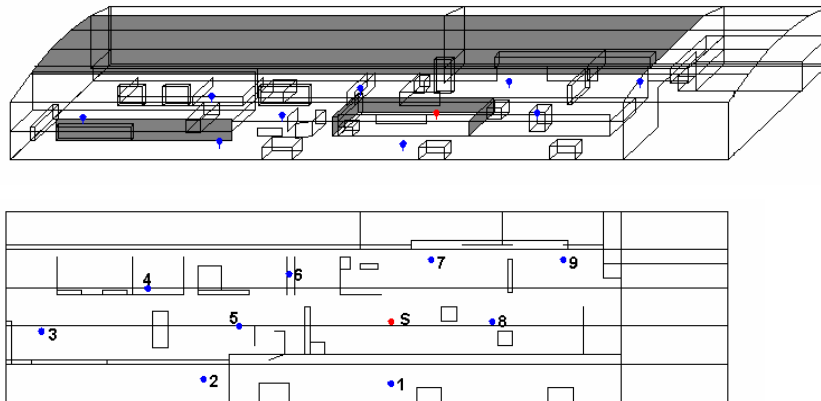
Kuva 17. Kohde 1: metalliteollisuuden tuotantotilan akustinen malli (dBworks). Äänilähde, S, ja vastaanottopisteet 1-10 on esitetty pohjakuvassa.

Kohde 2 oli kutomo (40 x 20 x 8 m), jossa 16 suurta kutomakonetta tuotti kovaa melua koko tuotantotilaan (kuva 18). Mallinnetun tilan toinen pääty oli avoin viereiseen saliin, jota ei sisällytetty tähän malliin, vaan päätyseinä määriteltiin ääntä täysin absorboivana pintana. Tilan sivuseinien ja kattopalkkien pinnoille asennettiin absorptiolevyt (kuvassa harmaalla).



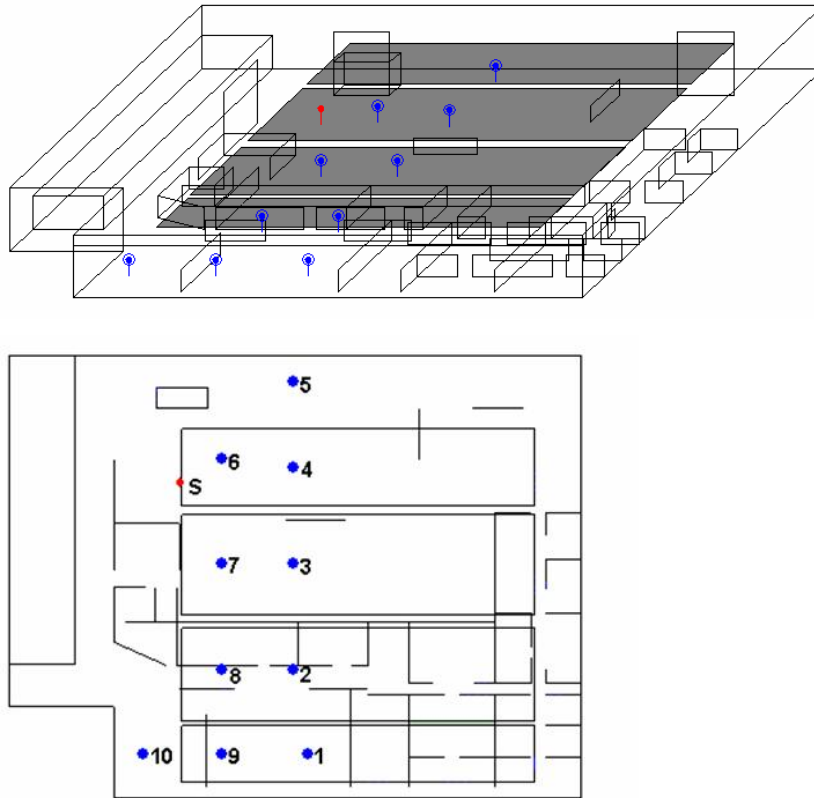
Kuva 18. Kohde 2: kutomon akustinen malli (dBworks). Äänilähde, S, ja vastaanottopisteet 1-6 on esitetty pohjakuvassa.

Kohde 3 oli levytyöhalli (142 x 30 x 12 m), jossa useassa työpisteessä käytettiin voimakasta melua aiheuttavia käsityökoneita. Joidenkin työpisteiden ympärillä oli 2.5-3 m korkeita seinäkkeitä. Lisäksi tilassa oli joitakin 3-6 m korkeita koneita. Tilan katto oli kaareva. Säteenseurantamenetelmään perustuvissa malleissa suurimmat äänen esteet (seinät, seinäkkeet suuret koneet) voitiin kuvata melko todenmukaisesti. Esimerkiksi katon kaarevuutta pyrittiin mallintamaan jakamalla katto viiteen tasopintaan, jolloin äänisäteiden heijastumiset pinnasta vastasivat paremmin kaarevasta pinnasta tapahtuvia heijastuksia (fokusointi). Kattopintaan asennettiin (pinnanmuotoisesti) absorptiolevyt (kuvassa 19 harmaalla).



Kuva 19. Kohde 3: levytyöhallin akustinen malli (dBworks). Äänilähde, S, ja vastaanottopisteet 1-9 on esitetty pohjakuvassa.

Kohde 4 on elektroniikkakokoonpano ja avotoimisto (54 x 42 x 6 m), jossa kokoonpanoalueella syntyvä melu kantautui avotoimistoalueelle. Avotoimiston työpisteiden välillä oli 2 m korkeita pehmeäpintaisia seinäkkeitä. Tilan kattoon asennettiin ruiskutettavaa absorptiomateriaalia (kuva 20).



Kuva 20. Kohde 4: elektronikkakokoonpanon ja avotoimiston akustinen malli (dBworks). Äänilähde, S, ja vastaanottopisteet 1-10 on esitetty pohjakuvassa.

Taulukossa 11 esitetään kaikissa tarkastelluissa akustisissa malleissa käytetyt absorptiosuhteet ja yksinkertaisissa malleissa käytetyt kalusteparametrit. Säteenseurantamenetelmällä mallinnettaessa kalusteet sisällytettiin mallin geometriatietoihin, joten erillistä kalusteparametriä ei käytetty. Koska kalusteet olivat säteenseurantamallissa määritelty pintoina, oli näille pinoille määritetty myös absorptiosuhteet. Näin menettelemällä voitiin jonkin verran parantaa mallin tarkkuutta. Jokaisessa yksinkertaisessa mallissa ja Akurissa käytettiin täysin samoja lähtötietoja, jotta voitiin verrata niiden tarkkuutta peruskäyttäjän näkökulmasta. Mallinnustulosten tarkkuutta voitaisiin lähes aina parantaa optimoimalla absorptio- ja kalusteparametrejä valitun mallin tarpeiden mukaan. Taulukossa 12 esitetään äänilähteen paikka ja mittauspisteet tarkasteltavissa kohteissa. Paikat määräytyivät kohteissa suoritettujen melumittausten yhteydessä. Mittauksissa paikat valittiin siten, että mittauksia voitiin hyödyntää meluntorjuntasuunnittelussa. Taulukossa 13 esitetään äänilähteen äänitehotasot kussakin kohteessa. Äänilähde oli jokaisessa mittauksessa ympärisäteilevä pallokaiutin, mutta äänentuottojärjestelmä ja sen asetukset vaihtelivat eri mittaustilanteissa, joten äänitehotasot eivät olleet samat kaikissa neljässä kohteessa. Äänitehotasot mitattiin kaiuntahuoneessa ISO 3741 standardin mukaisesti.[69]

Taulukko 11. Absorptiosuhteet, kalustekorkeus h ja kalustetiheys Q kohteiden 1-4 akustisissa malleissa (Akuri ja yksinkertaiset mallit).

Kohde numero	rajaava pinta	mallinnettu tilanne	kaluste-korkeus	kaluste-tiheys	Absorptiosuhteet α akustisissa malleissa					
					125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1	katto	ennen			0.40	0.40	0.40	0.32	0.28	0.28
		jälkeen			0.40	0.40	0.40	0.32	0.28	0.28
	lattia	ennen	1.5	0.1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		jälkeen	3.0	0.1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	sivuseinä 1	ennen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12
		jälkeen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12
	sivuseinä 2	ennen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12
jälkeen				0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12	
etuseinä	ennen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12	
	jälkeen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12	
takaseinä	ennen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12	
	jälkeen			0.28	0.17	0.12	0.11	0.10	0.12	
2	katto	ennen			0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
		jälkeen			0.20	0.70	0.90	0.90	0.90	0.90
	lattia	ennen	2.0	0.1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		jälkeen	2.0	0.1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	sivuseinä 1	ennen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
		jälkeen			0.20	0.70	0.90	0.90	0.90	0.90
	sivuseinä 2	ennen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
jälkeen				0.20	0.70	0.90	0.90	0.90	0.90	
etuseinä	ennen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
	jälkeen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
takaseinä	ennen			0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	
	jälkeen			0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	
3	katto	ennen			0.40	0.40	0.40	0.32	0.28	0.28
		jälkeen			0.40	0.40	0.76	0.92	0.92	0.95
	lattia	ennen	3.0	0.1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		jälkeen	3.0	0.1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	sivuseinä 1	ennen			0.15	0.50	0.90	0.90	0.75	0.50
		jälkeen			0.15	0.50	0.90	0.90	0.75	0.50
	sivuseinä 2	ennen			0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
jälkeen				0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05	
etuseinä	ennen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
	jälkeen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
takaseinä	ennen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
	jälkeen			0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
4	katto	ennen			0.10	0.10	0.09	0.08	0.06	0.03
		jälkeen			0.12	0.29	0.76	0.94	0.99	0.99
	lattia	ennen	0.0	0.0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
		jälkeen	2.0	0.2	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
	sivuseinä 1	ennen			0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
		jälkeen			0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
	sivuseinä 2	ennen			0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
jälkeen				0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	
etuseinä	ennen			0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	
	jälkeen			0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	
takaseinä	ennen			0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	
	jälkeen			0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	

Taulukko 12. Äänilähteen paikka ja mittauspisteet kohteissa 1-4.

Kohde			1	2	3	4	
Äänilähde			x	18.0	35.0	76.0	16.2
			y	5.0	7.0	17.0	30.1
			z	1.5	1.5	1.5	1.5
M i t t a u s p i s t e e t	1	x	25.0	27.0	76.0	28.4	
		y	25.0	6.0	4.0	4.1	
	2	x	25.0	9.2	39.0	27.0	
		y	17.0	1.4	5.0	12.2	
	3	x	15.0	2.5	7.0	27.0	
		y	17.0	6.0	15.0	22.4	
	4	x	4.0	10.0	28.0	27.0	
		y	11.0	18.0	24.0	31.6	
	5	x	14.0	27.5	46.0	27.0	
		y	11.0	13.5	16.0	39.7	
	6	x	24.0	29.0	56.0	20.3	
		y	12.0	18.8	27.0	32.4	
	7	x	34.0		84.0	20.3	
		y	13.0		30.0	22.4	
	8	x	44.0		96.0	20.3	
		y	14.0		17.0	12.2	
	9	x	44.0		110.0	20.3	
		y	21.0		30.0	4.1	
	10	x	56.0			12.7	
		y	14.0			4.1	

Taulukko 13. Äänilähteen äänitehotaso tarkastelluissa tilanteissa.

Kohde	mallinnettu tilanne	125	250	500	1000	2000	4000	A
1	ennen	95.2	97.1	104.2	99.5	98.6	92.6	105.3
	jälkeen	95.2	97.1	104.2	99.5	98.6	92.6	105.3
2	ennen	105.1	106.1	106.1	104.2	103.8	96.2	109.5
	jälkeen	106.6	104.8	104.0	102.1	101.0	100.8	108.1
3	ennen	105.1	106.1	106.1	104.2	103.8	96.2	109.5
	jälkeen	105.1	106.1	106.1	104.2	103.8	96.2	109.5
4	ennen	89.1	90.1	90.1	88.2	87.8	80.2	93.5
	jälkeen	86.3	92.8	89.3	84.4	83.4	74.7	91.1

6 Tulokset

6.1 Yksinkertaisten mallien verifiointi

Taulukossa 14 on esitetty yksinkertaisten mallien taulukkolaskentapohjatoteutusten verifiointi. Jokaisen kappaleessa 2.3. esitetyn mallin tuloksia verrattiin Hodgsonin vertailussaan esittämiin laskentatuloksiin,[47] koska useimmista malleista alkuperäistä julkaisua ei ollut saatavilla. Zetterling-malli on jätetty pois verifiointista, koska malli on kokonaisuudessaan vain arvojen lukemista kuvan 5 käyriltä. Wilson-malli on yksinkertaisuutensa vuoksi jätetty pois verifiointista. Heerema-mallin verifiointin vertailuarvot ovat eri lähteestä,[68] koska malli on ilmestynyt vasta Hodgsonin vertailun jälkeen.

Taulukko 14. Yksinkertaisten mallien taulukkolaskentapohjajateutuksen verifiointi.

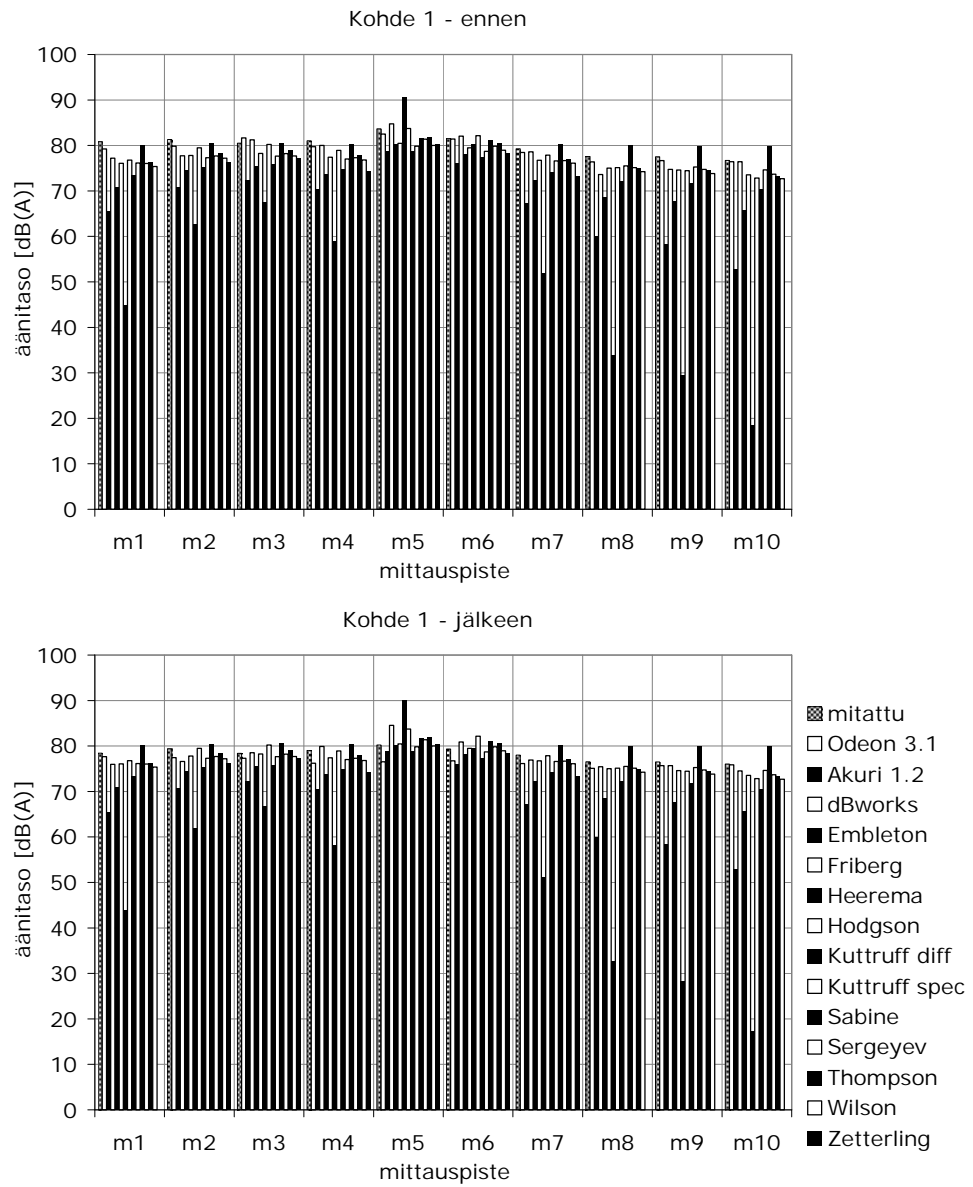
taulukkolaskentapohjana toteutettu malli	ero alkuperäiseen laskentatulokseen dB (1 kHz)		vertailukohte
	1 m	10 m	
etäisyys äänilähteestä, m	1 m	10 m	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Friberg	0.0	0.0	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Thompson	-0.3	1.6	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Embleton	0.0	-0.3	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Kuttruff diffuse	0.0	-0.3	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Kuttruff specular	0.5	0.0	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Sergeyev	0.4	0.6	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Hodgson	0.0	-0.4	47, workroom E4, empty, Fig. 3
Heerema	1.1	0.2	68, long workshop, Fig. 1

Akuri-, dBworks- ja Odeon-mallinnusohjelmista oli käytettävissä "kaupallinen versio", joten niitä ei tässä työssä erikseen enää verifioitu.

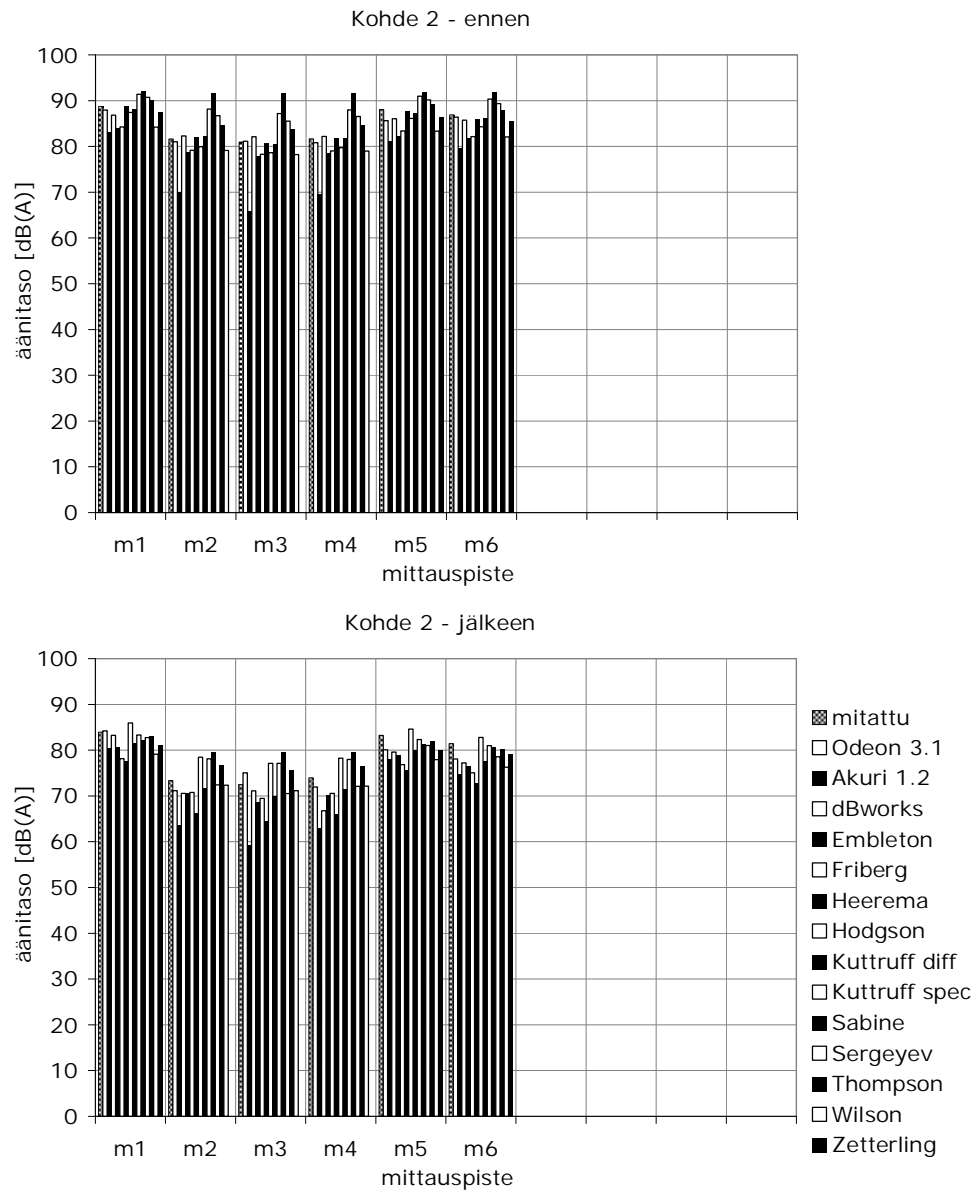
6.2 Mittaus- ja mallinnustulokset

Kuvissa 21-24 esitetään mitatut ja mallinnetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot mittauspisteittäin kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan.

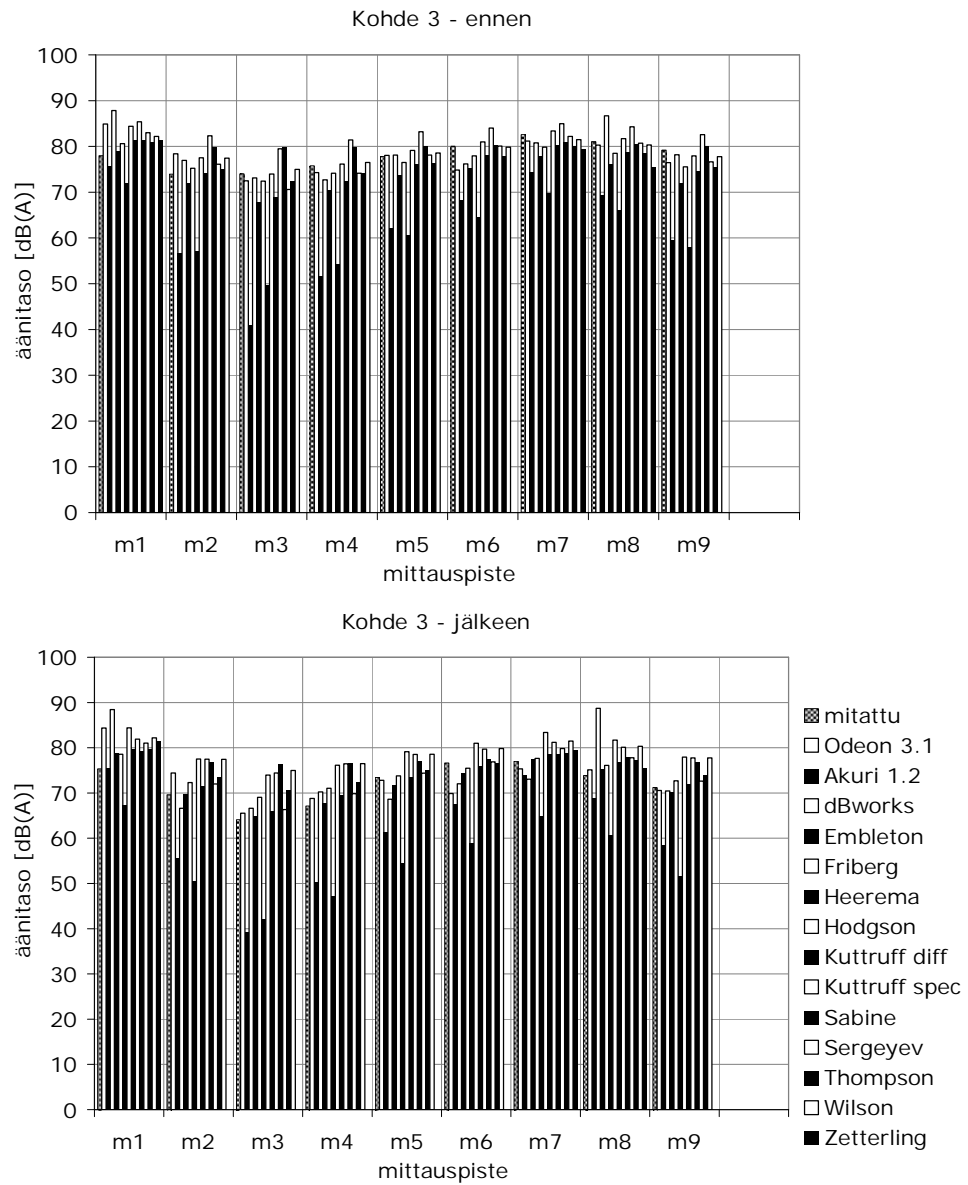
Kuvassa 25-28 esitetään mitatut ja mallinnetut jälkikaiunta-ajat oktaavikaistoilla 125-4000 Hz kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan.



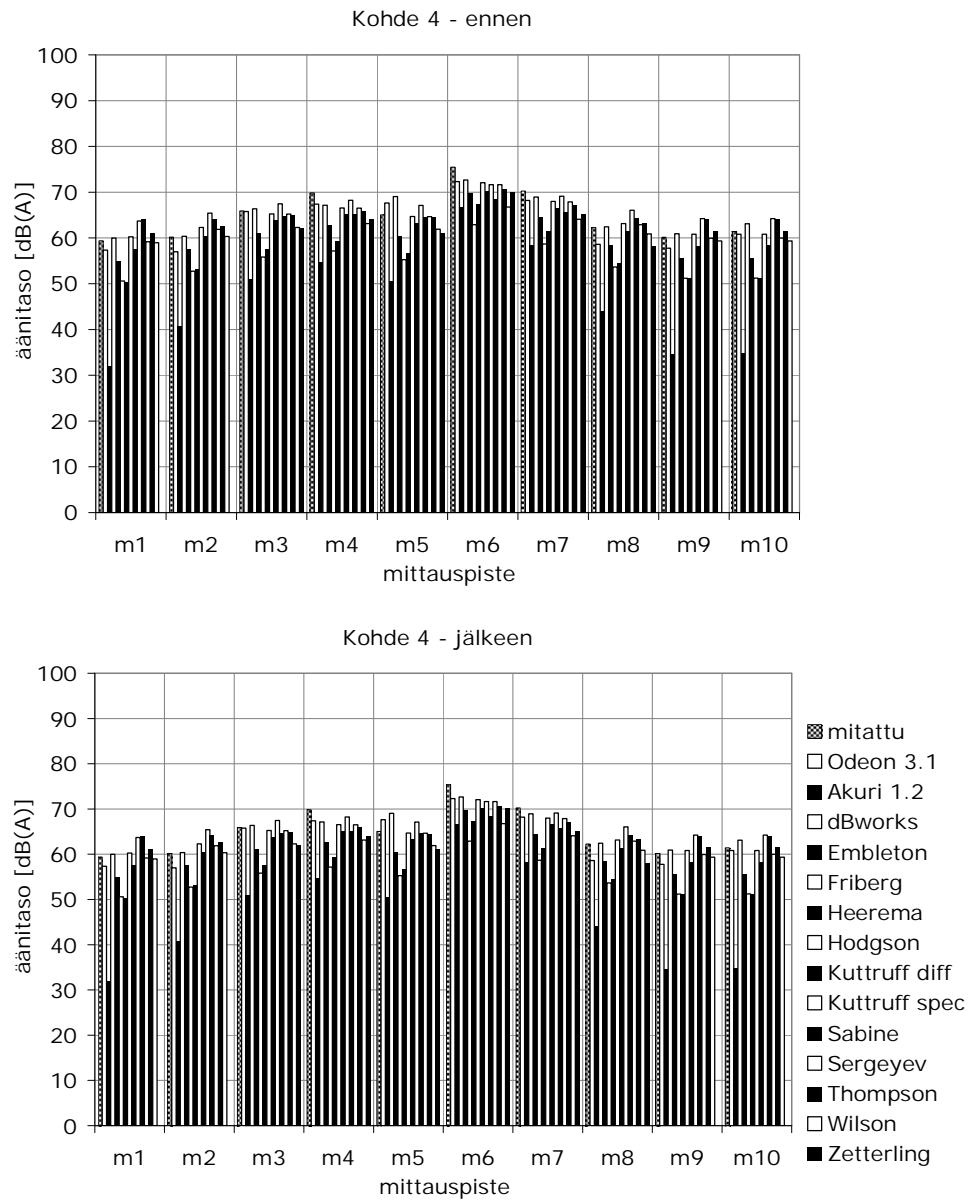
Kuva 21. Mitatut ja mallinnetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot kohteen 1 mittauspisteissä ennen ja jälkeen meluntorjunnan.



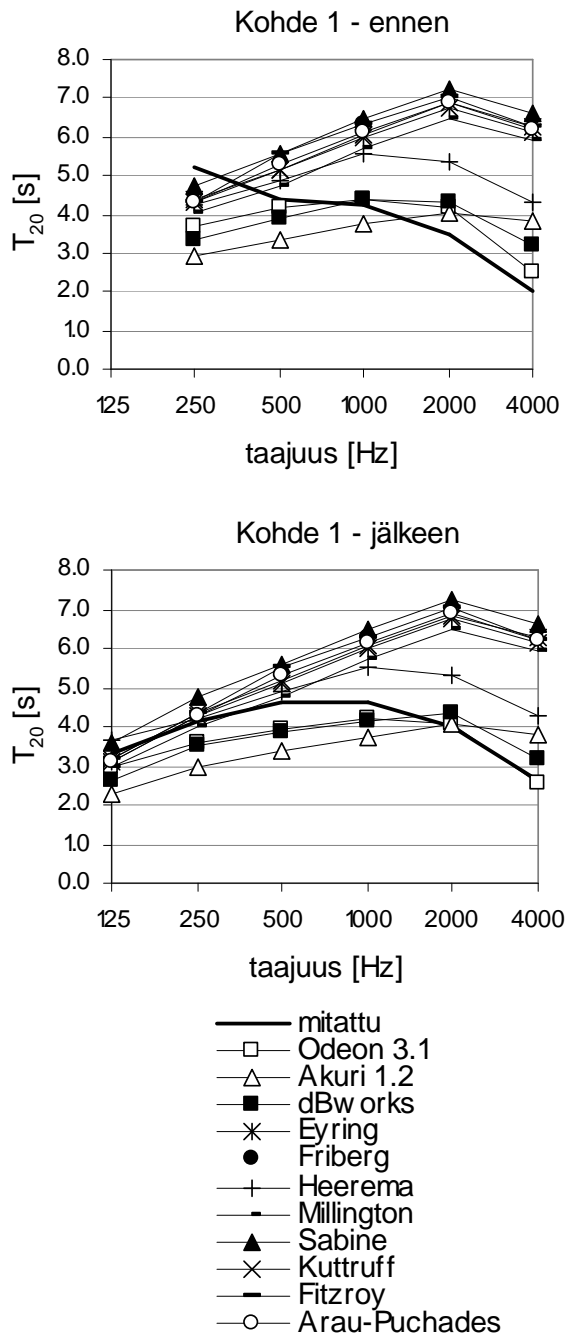
Kuva 22. Mitatut ja mallinnetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot kohteen 2 mittauspisteissä ennen ja jälkeen meluntorjunnan.



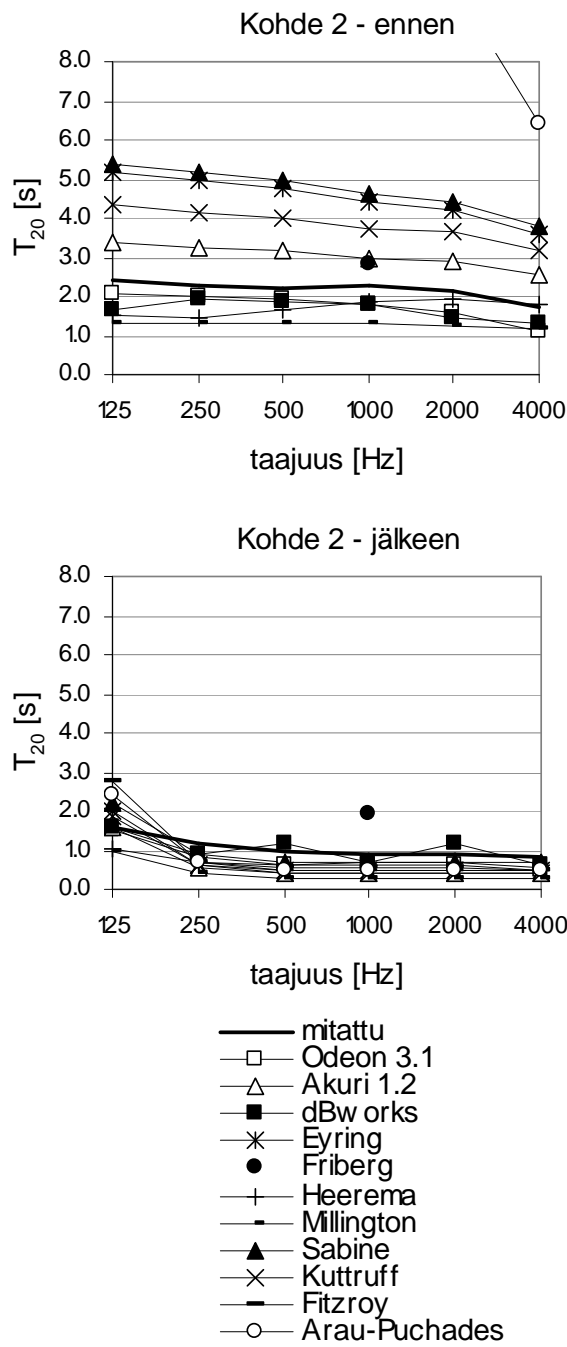
Kuva 23. Mitatut ja mallinnetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot kohteen 3 mittauspisteissä ennen ja jälkeen meluntorjunnan.



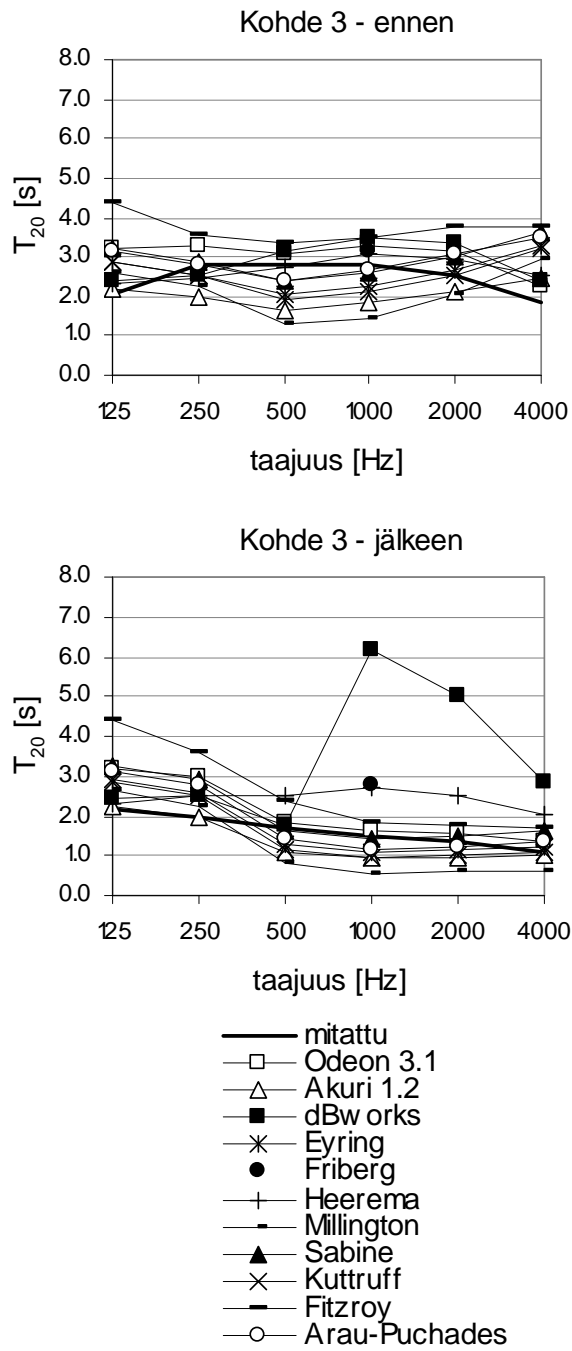
Kuva 24. Mitatut ja mallinnetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot kohteen 4 mittauspisteissä ennen ja jälkeen meluntorjunnan.



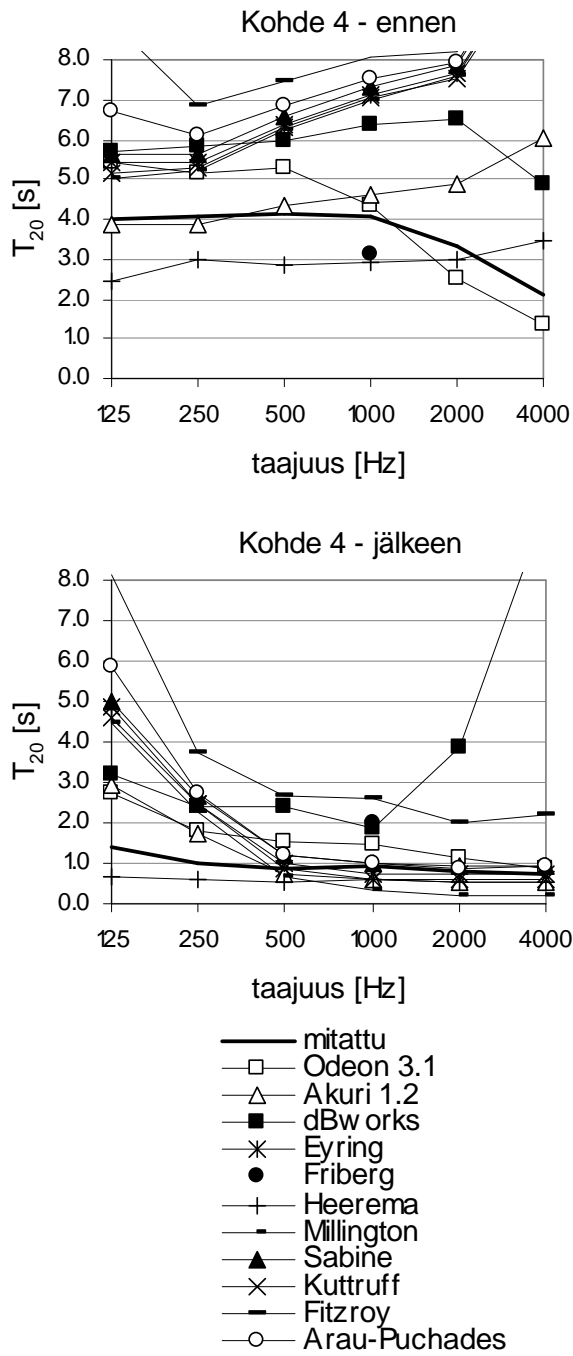
Kuva 25. Mitatut ja mallinnetut jälkikaiunta-ajat, T_{20} , kohteessa 1.



Kuva 26. Mitatut ja mallinnetut jälkikaiunta-ajat, T_{20} , kohteessa 2.



Kuva 27. Mitatut ja mallinnetut jälkikaiunta-ajat, T_{20} , kohteessa 3.



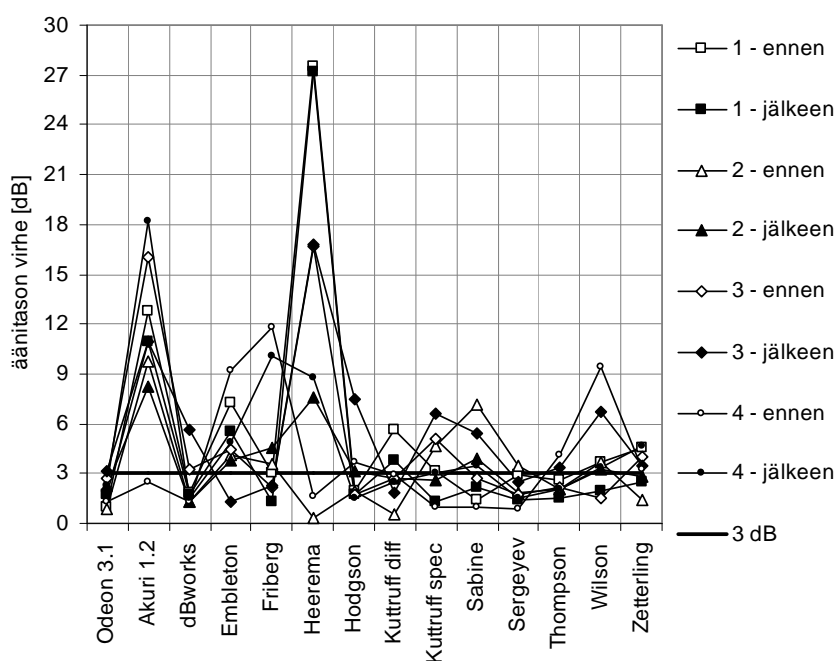
Kuva 28. Mitatut ja mallinnetut jälkikaiunta-ajat, T_{20} , kohteessa 4.

6.3 Virhetarkastelun tulokset

Liitteessä 2 esitetään mallinnettujen A-taajuuspainotettujen äänenpainetasojen virhetarkastelu mittauspisteittäin kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan.

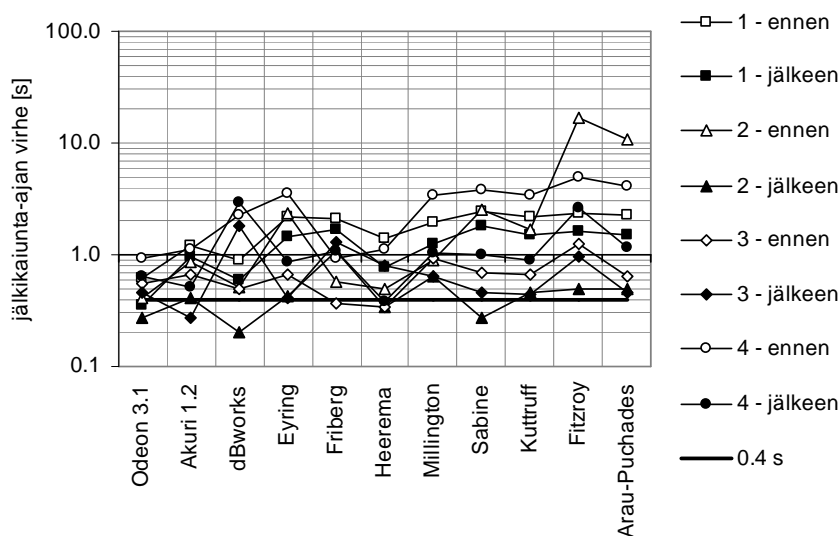
Liitteessä 3 esitetään mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen virhetarkastelu kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan oktaaveittain taajuuksilla 125-4000 Hz.

Kuvassa 29 esitetään mallinnettujen A-taajuuspainotettujen äänenpainetasojen absoluuttisen virheen keskiarvo (keskivirhe) kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan sekä 3 dB raja, jota käytetään seuraavissa luotettavuustarkasteluissa. Vastaava 3 dB muutos melutasossa olisi selvästi kuultavissa.



Kuva 29. Mallinnettujen A-taajuuspainotettujen äänenpainetasojen absoluuttisen virheen keskiarvo tarkastelluilla malleilla kohteissa 1-4 ennen ja jälkeen meluntorjunnan.

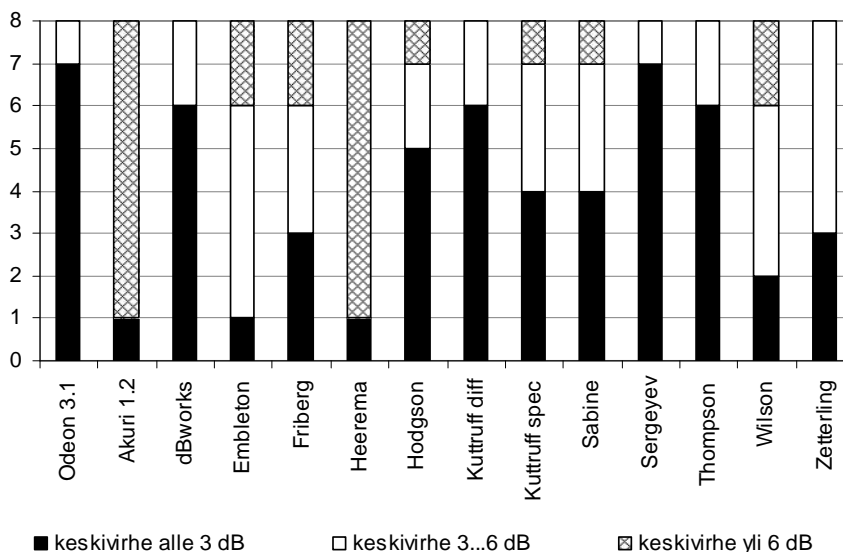
Kuvassa 30 esitetään mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen absoluuttisen virheen keskiarvo (keskivirhe) kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan sekä 0.4 s raja, jota käytetään seuraavissa luotettavuustarkasteluissa. Tämä vastaa noin 10 % virhettä tilanteissa 1 ennen, 1 jälkeen ja 4 ennen. Muissa tilanteissa vastaava virhe on yli 10 %. Tällaisen muutoksen jälkikaiunta-ajassa voisi kuuntelemallakin havaita.



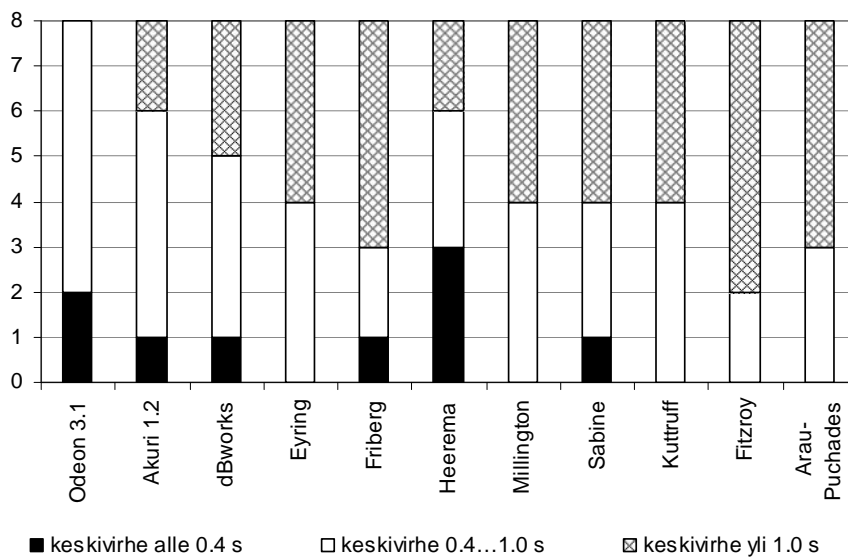
Kuva 30. Mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen absoluuttisen virheen keskiarvo tarkastelluilla malleilla kohteissa 1-4 ennen ja jälkeen meluntorjunnan.

Kuvassa 31 esitetään mallien äänenpainetasoennusteiden luotettavuustarkastelu 8 tilanteessa (4 kohdetta, ennen ja jälkeen meluntorjunnan). Mustalla esitetään lukumäärä tilanteista, joissa mallin keskivirhe oli alle 3 dB, rasterilla tilanteista, joissa keskivirhe oli yli 6 dB, ja valkoisella loput. Jos keskivirhe oli yli 6 dB ei mallinnustuloksiin voinut lainkaan luottaa.

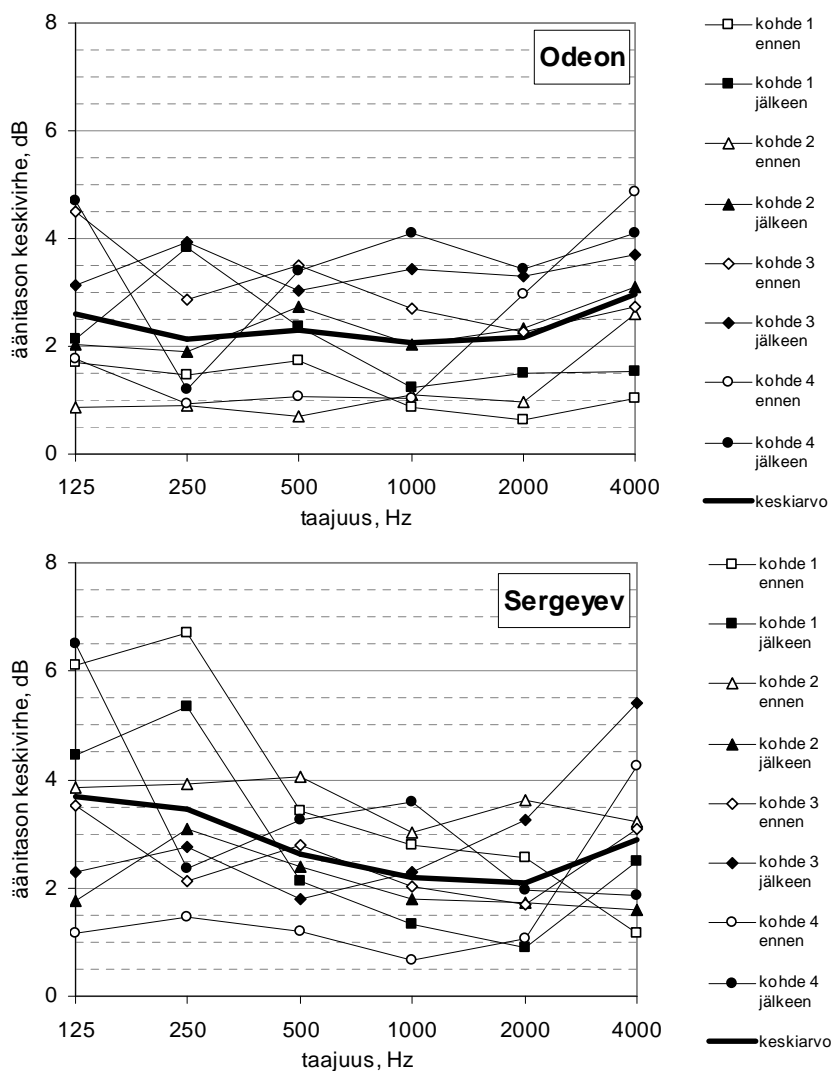
Kuvassa 32 esitetään mallien jälkikaiunta-aikaennusteiden luotettavuustarkastelu 8 tilanteessa (4 kohdetta, ennen ja jälkeen meluntorjunnan). Mustalla esitetään lukumäärä tilanteista, joissa mallinnettun jälkikaiunta-ajan keskivirhe oli alle 0.4 s, rasterilla tilanteista, joissa keskivirhe oli yli 1 s, ja valkoisella loput. Jos keskivirhe oli yli 1 s ei mallinnustuloksiin voinut lainkaan luottaa.



Kuva 31. Tilannekohtainen tarkastelu mallien äänenpainetasoennusteiden luotettavuudesta.



Kuva 32. Tilannekohtainen tarkastelu mallien jälkikaiunta-aikaennusteiden luotettavuudesta.



Kuva 33. Mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe 125 - 4000 Hz oktaavikaistoilla Odeon ja Sergeyev malleilla kohteissa 1-4 ennen ja jälkeen meluntorjunnan.

Kuvassa 33 esitetään Odeon ja Sergeyev -mallien äänenpainetasoennusteiden keskivirhe oktaavikaistoilla 125-4000 Hz kohteissa 1-4 sekä niistä laskettu keskiarvo, joka kuvaa mallien ennustetarkkuutta näissä kohteissa.

7 Pohdinta

Seuraavaksi pohditaan mallinnustulosten tarkkuutta ja niihin vaikuttaneita tekijöitä. Ensin pohditaan yksinkertaisten mallien verifiointia. Tämän jälkeen tarkastellaan tuloksia kohteittain ja lopuksi pohditaan yleisemmin mallinnukseen virheitä aiheuttavia tekijöitä sekä mahdollisia parannuksia mallinnusmenetelmiin.

7.1 Yksinkertaisten mallien verifiointi

Yksittäisessä kohteessa 1 kHz taajuudella 1 m ja 10 m etäisyyksillä tehty vertailu osoitti, että taulukkolaskentapohjatoteutusten tulokset vastasivat alkuperäisten julkaisujen tuloksia hyvin. Suurimmat virheet olivat 1.6 dB Thompson-mallilla 10 m etäisyydellä ja Heerema-mallilla 1.1 dB 1 m etäisyydellä.

7.2 Tulosten tarkastelu kohteittain

Seuraavassa tarkastellaan äänitason ja jälkikaiunta-ajan mallinnustulosten tarkkuutta kohteissa 1-4.

7.2.1. Kohde 1

Kohteessa 1, metalliteollisuuden tuotantotila, mallien tulokset eivät juurikaan muuttuneet. Empiirisillä malleilla lasketut äänenpainetasot olivat lähes täysin samat molemmissa tilanteissa, koska meluntorjuntatoimenpiteet eivät merkittävästi vaikuttaneet tilan kokonaisabsorptioalaan. Heerema-mallilla muutos oli juuri ja juuri havaittavissa, koska kalustekorkeus muuttui. Odeon-mallissa meluntorjuntatoimenpiteen vaikutus ennustettiin hieman suuremmaksi kuin mitattu muutos. Ennen meluntorjuntaa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli alle 3 dB Odeon, dBworks, Hodgson, Sabine, Sergeyev ja Thompson-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen muissa paitsi Akuri, Embleton, Heerema ja Kuttruff diffuse-malleissa. Ennen meluntorjuntaa Akuri, Embleton ja Heerema-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Akuri ja Heerema-malleissa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli yli 6 dB. Heerema-mallin virhe oli yli 27 dB, mikä osoittaa, ettei malli lainkaan soveltunut tähän tilaan (näillä lähtoarvoilla). Molemmissa tilanteissa vain Sabine-malli ennusti suurempia äänenpainetasoja kuin mitatut useimmissa mittauspisteissä.

Jälkikaiunta-ajan mallinnustuloksissa eroa ennen ja jälkeen tilanteiden välillä oli vain säteenseurantamenetelmään perustuvissa Odeon ja dBworks-malleissa. Muiden mallien keskivirhe oli yli 1 s ennen meluntorjuntaa. Meluntorjunnan jälkeen keskivirhe laski alle 1 s Akuri ja Heerema-malleissa. Kaikki mallit ennustivat molemmissa tilanteissa suurempia jälkikaiunta-aikoja kuin mitatut, mikä osoittaa, ettei kalusteiden absorptiota ollut huomioitu oikein.

7.2.2. Kohde 2

Kohteessa 2, kutomo, meluntorjunnan jälkeen äänenpainetasot laskivat keskimäärin 7 dB. Jokaisella tarkastelluista malleista havaittiin oikean suuntainen muutos. Ennen meluntorjuntaa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli alle 3 dB Odeon, dBworks, Heerema, Hodgson, Kuttruff diffuse, Thompson ja Zetterling-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Odeon, dBworks, Kuttruff diffuse, Kuttruff specular, Sergejev, Thompson ja Zetterling-malleissa. Ennen meluntorjuntaa Akuri ja Sabine-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Akuri ja Heerema-malleissa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli yli 6 dB. Ennen meluntorjuntaa Kuttruff specular, Sabine, Sergejev ja Thompson-mallit ja meluntorjunnan jälkeen Hodgson, Kuttruff specular, Sabine ja Thompson-mallit ennustivat suurempia äänenpainetasoja kuin mitatut.

Jälkikaiunta-ajassa kaikilla malleilla havaittiin oikean suuntainen muutos. Jälkikaiunta-aikaennusteen keskivirhe oli kaikissa malleissa pienempi meluntorjunnan jälkeen. Ennen meluntorjuntaa keskivirhe oli alle 1 s Odeon, dBworks, Akuri, Friberg, Heerema ja Millington-malleissa. Meluntorjunnan jälkeen Odeon, dBworks, Heerema ja Sabine-malleilla keskivirhe oli alle 0.4 s ja lopuilla paitsi Friberg-mallilla alle 1 s. Ennen meluntorjuntaa Odeon, dBworks, Heerema ja Millington-mallit ennustivat pienempiä ja muut suurempia jälkikaiunta-aikoja kuin mitatut. Meluntorjunnan jälkeen dBworks ja Friberg-mallit ennustivat suurempia jälkikaiunta-aikoja kuin mitatut, muut pienempiä.

7.2.3. Kohde 3

Kohteessa 3, levytyöhalli, meluntorjunnan jälkeen äänenpainetasot laskivat keskimäärin 6 dB. Tarkastelluista muilla paitsi Hodgson, Wilson ja Zetterling-malleilla havaittiin oikean suuntainen muutos. Ennen meluntorjuntaa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli alle 3 dB Odeon, Friberg, Hodgson, Kuttruff diffuse, Sabine, Sergejev, Thompson ja Wilson-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Embleton, Friberg, Kuttruff diffuse ja Sergejev-malleissa. Ennen meluntorjuntaa Akuri ja Heerema-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Akuri, Heerema, Hodgson, Kuttruff specular ja Wilson-malleissa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli yli 6 dB. Tässäkin kohteessa Heerema-mallin virhe oli hyvin suuri. Ennen meluntorjuntaa Hodgson, Kuttruff specular ja Sabine-mallit ja meluntorjunnan jälkeen kaikki paitsi Akuri ja Heerema-mallit ennustivat suurempia äänenpainetasoja kuin mitatut.

Kaikilla malleilla jälkikaiunta-ajassa havaittiin oikean suuntainen muutos 500 Hz ja sitä suuremmilla taajuuksilla. Jälkikaiunta-aikaennusteen keskivirhe malleissa oli samaa luokkaa ennen ja jälkeen meluntorjunnan paitsi dBworks-mallissa. Ennen meluntorjuntaa keskivirhe oli alle 0.4 s Friberg ja Heerema-malleissa ja keskivirhe oli yli 1 s vain Fitzroy-mallissa. Meluntorjunnan jälkeen keskivirhe oli alle 0.4 s vain Akuri ja yli 1 s dBworks ja Friberg-malleissa. dBworks-mallin huonoon tulokseen oli syynä vastaanottopisteiden 4 ja 6 tulokset, joihin ei kantautunut riittävästi äänisäteitä ja kelvollista vaimenemakäyrää ei siten mallilla saatu.

7.2.4. Kohde 4

Kohteessa 4, elektroniikkakokoonpano ja avotoimisto, meluntorjunnan jälkeen äänenpainetasot laskivat keskimäärin 10 dB. Jokaisella tarkastelluista malleista havaittiin oikean suuntainen muutos. Ennen meluntorjuntaa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli alle 3 dB Odeon, Akuri, dBworks, Heerema, Kuttruff diffuse ja specular, Sabine ja Sergeyev-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Odeon, dBworks, Hodgson, Kuttruff diffuse, Sergeyev ja Thompson-malleissa. Ennen meluntorjuntaa Embleton, Friberg ja Wilson-malleissa ja meluntorjunnan jälkeen Akuri, Friberg ja Heerema-malleissa mallinnettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli yli 6 dB. Ennen meluntorjuntaa Heerema, Kuttruff specular, Sabine ja Sergeyev-mallit ja meluntorjunnan jälkeen Kuttruff specular-malli ennustivat suurempia äänenpainetasoja kuin mitatut.

Kaikilla malleilla havaittiin oikean suuntainen muutos jälkikaiunta-ajassa. Jälkikaiunta-aikaennusteen keskivirhe oli pienempi meluntorjunnan jälkeen, jolloin Heerema-mallissa keskivirhe oli alle 0.4 s ja Odeon, Akuri, Eyring, Sabine ja Kuttruff-malleissa alle 1s. Ennen meluntorjuntaa keskivirhe oli alle 1 s vain Odeon ja Friberg-malleissa. Muissa malleissa keskivirhe oli yli 1s. Meluntorjunnan jälkeen keskivirhe oli alle 0.4 s vain Heerema-mallissa ja alle 1 s Odeon, Akuri, Eyring, Sabine ja Kuttruff-malleissa. dBworks ja Fitzroy-malleissa keskivirhe oli kohtuuttoman suuri, yli 2 s.

7.3 Äänenpainetason ennustettavuus malleilla

Näissä kohteissa parhaiten mittaustilannetta vastasivat Odeon ja Sergeyev-mallit, joilla mallinnettujen A-taajuuspainotettujen äänenpainetasojen keskivirhe oli alle 3 dB 7/8 tilanteista ja yli 6 dB keskivirhettä ei ollut yhdessäkään tilanteessa. Molemmissa malleissa keskivirheet olivat lähes yhtä pieniä kaikissa tilanteissa, vaikka Sergeyev-malli on huomattavasti yksinkertaisempi. Näiden lisäksi mittaustilannetta vastasivat hyvin dBworks, Kuttruff diffuse ja Thompson-mallit, joilla keskivirhe oli alle 3 dB 6/8 tilanteista ja yli 6 dB keskivirhettä ei ollut.

Huonoiden mittaustilannetta vastasivat Akuri, Embleton ja Heerema-mallit, joilla keskivirhe oli alle 3 dB vain 1/8 tilanteista. Akuri ja Heerema-malleissa 7/8 ja Embleton-mallissa 2/8 tilanteista keskivirhe oli yli 6 dB. Heerema-mallin tulokset vastasivat mitattuja erittäin huonosti. Voidaan olettaa, että tarkasteltavat tilanteet eivät vastanneet Heereman mallin kehittämisen pohjana olleita kohteita riittävästi ja tästä syystä tilastollinen malli ei toiminut luotettavasti. Lisäksi kalusteparametrien oikeiden arvojen valinta on kriittinen, koska niiden vaikutus mallinnettuun äänitasoon on hyvin suuri. Myöskään kuvalähdemenetelmään perustuva Akuri-malli ei soveltunut näiden kohteiden mallintamiseen. Vain tyhjässä suhteellisen kaikuisassa tilassa (kohde 4, ennen) mallin keskivirhe oli alle 3 dB. Ilmeisesti Akuri-mallissa kalustettuja tilanteita jouduttiin liikaa yksinkertaistamaan. Kalusteparametrejä muuttamalla tuloksiin olisi voitu vaikuttaa, mutta tässä tarkastelussa haluttiin käyttää mahdollisimman pitkälle samoja lähtöparametrejä. Teoriassa kuvalähdemenetelmällä olisi mahdollista saavuttaa yhtä hyvä tarkkuus kuin säteenseurantamenetelmällä, jos tilan geometria ja absorptiosuhteet voidaan määritellä hyvin tarkasti. Akuri-mallissa se

ei ollut mahdollista.

Yksinkertaisten mallien osalta lopputulos on pääosin vastaava kuin Hodgsonin vertailuissa.[47]

Friberg-mallin tulokset olivat kohtuullisen luotettavia tyhjiissä tai kalustetuissa tiloissa, joissa oli absorptiolevyjä. Vastaavat tulokset saatiin kohteissa 1-3. Kovapintaisissa tyhjiissä tiloissa malli ei antanut luotettavia tuloksia, kuten kohde 4 ennen.

Wilson-malli ei antanut luotettavia tuloksia, koska menetelmä on äärimmilleen yksinkertaistettu.

Hodgsonin vertailussa Embleton-malli on kohtuullisen luotettava kalustetuissa tiloissa, joissa on absorptiolevyjä. Muissa tiloissa tulokset eivät ole luotettavia. Tässä tutkimuksessa malli oli tarkka vain kohteessa 3 jälkeen, missä tila oli kalustettu ja absorptiolevyjä oli paljon.

Kuttruff diffuse-malli, jossa katto ja lattia ovat diffuusisti heijastavia, oli Hodgsonin mukaan luotettava kalustetuissa tiloissa, mutta ei tyhjiissä tiloissa. Kuttruff Specular-malli ei ollut yhtä luotettava. Vastaavat havainnot saatiin tässä tutkimuksessa. Lisäksi voitiin todeta, että kohteissa, joissa Kuttruff diffuse-malli ei ollut tarkka, Kuttruff Specular-malli oli tarkempi.

Zetterling-malli oli Hodgsonin vertailussa luotettava tyhjiissä tiloissa, joissa oli absorptiolevyjä. Muissa tiloissa kohtuullisen luotettava. Tämän tutkimuksen kohteissa Zetterling-mallin etäisyysrajoite häiritsi vertailua, mutta niissä pisteissä, joissa äänitaso oli mallilla määritettävissä, malli oli kohtuullisen tarkka.

Hodgsonin mukaan Sergejev-malli oli luotettava tyhjiissä tiloissa, mutta ei kalustetuissa tiloissa. Tässä tutkimuksessa Sergejevin-malli oli tarkka lähes kaikissa kohteissa. Tarkkuus oli lähes yhtä hyvä kuin Odeon-mallilla.

Hodgson-malli oli kohtuullisen luotettava sekä tyhjiissä että kalustetuissa tiloissa. Mallin kehityksessä on käytetty osittain samoja mittaustuloksia kuin Hodgsonin vertailussakin, joten on ilmeistä, että mallin ennustetarkkuus oli hyvä niissä kohteissa. Mallia ei kuitenkaan voi luotettavasti soveltaa tiloihin, joissa akustiikka poikkeaa merkittävästi mallin perustana käytettyjen tilojen akustiikasta. Tässä tutkimuksessa Hodgson-malli oli yllättäen huono kohteessa 3, missä meluntorjunnan jälkeen oli absorptiolevyjä ja kalusteita. Tässä tilanteessa mallinnetut äänitasot olivat liian suuria.

Dance tarkasteli Hodgson ja Heerema-malleja sekä omaa kuvalähdemenetelmään perustuvaa malliansa simuloidussa tekstiilityöhuoneessa, konepajassa ja pullotustehtaassa.[70] Dance totesi, että Heerema-malli oli hieman tarkempi kuin Hodgson-malli ja kuvalähdemenetelmään perustuva malli oli tarkempi kuin kumpikaan empiirisistä malleista. Tosin erot tarkkuudessa olivat pieniä, kun tarkasteltava tila oli empiiristen mallien perustana käytettyjen tilojen kaltainen. Myöhemmin Hodgson vertaili itse kolmessa eri muotoisessa työpajassa Heerema-mallin tuloksia säteenseurantamenetelmään perustuvan Ondet ja Barbry-mallin tuloksiin.[68] Hodgson totesi, että useimmiten Heerema-mallin ja säteenseurantamallin ennustamat äänenpainetasot vastasivat hyvin toisiaan, mutta ennustetuissa jälkikäiunta-ajoissa oli merkittäviä eroja. Tässä tutkimuksessa

Heerema-mallin äänitasot olivat tarkkoja vain kohteissa, joissa ei ollut absorptiolevyjä.

Kuronen vertaili Akuri-mallin tuloksia mittaustuloksiin.[32] Mallin tarkkuus oli Kurosen mukaan riittävä meluntorjuntasuunnitteluun. Tässä tutkimuksessa Akuri-malli oli luotettava vain tyhjässä tilassa, jossa ei ollut absorptiolevyjä.

dBworks-mallin tuloksia on aikaisemmin verrattu auditoriossa ja kohteessa 2 suoritettujen mittausten tuloksiin.[31] Tässä tutkimuksessa tarkastelluissa kohteissa luotettavuus oli lähes yhtä hyvä kuin Odeon-mallissa. Jos kohteessa 3 pisteisiin 4 ja 6 olisi saapunut riittävästi äänisäteitä, olisi dBworks-mallin luotettavuus vastaava kuin Odeon-mallilla.

7.3.1. Äänenpainetasoennusteen tarkkuus eri taajuuksilla

Kuvassa 33 esitettiin kahden luotettavimman mallin, Odeon ja Sergeyev, ennusteiden keskivirhe oktaavikaistoittain kohteissa 1-4.

Odeon-mallin keskivirheet ennen meluntorjuntaa olivat keskitaajuuksilla alle 3 dB kohteissa 1, 2 ja 4. Kohteessa 3 keskivirhe oli 2-5 dB. Meluntorjunnan jälkeen kohteissa 1 ja 2 keskivirhe oli keskitaajuuksilla alle 3 dB, kun se kohteissa 3 ja 4 oli 3-5 dB. Keskivirhe vaihteli eniten 125 ja 4000 Hz taajuuksilla.

Ennen meluntorjuntaa Sergeyev-mallilla keskivirhe oli alle 3 dB kohteissa 3 ja 4. Kohteissa 1 ja 2 keskivirheet olivat 1-7 dB ja 3-4 dB. Meluntorjunnan jälkeen kohteissa 1-3 keskivirhe oli keskitaajuuksilla alle 3 dB, mutta huonompi 125 ja 4000 Hz taajuuksilla. Kohteessa 4 keskivirhe oli 2-7 dB.

Kohteessa 1 kalusteparametrit Sergeyev-mallissa olivat ilmeisesti liian suuret, jolloin malli antoi liian pieniä äänitasoja. Odeon-mallin tulokset olivat hyvin tarkkoja, mitä suuressa kaiuntaisessa tilassa saattoi ennalta odottaakin. Meluntorjunnan jälkeen keskivirheet kasvoivat Odeon-mallissa ja pieneni Sergeyev-mallissa.

Kohteessa 2 Odeon-mallin keskivirheet kasvoivat meluntorjunnan jälkeen, kun taas Sergeyev-mallin keskivirheet pienenevät. Keskivirheet olivat molemmissa malleissa kohtuullisen pienet sekä ennen että jälkeen meluntorjunnan.

Kohteessa 3 Odeon-mallin keskivirheet olivat kohtuullisen pienet ennen ja jälkeen meluntorjunnan. Sergeyev-mallin keskivirhe kasvoi selvästi 2 ja 4 kHz taajuuksilla, mutta olivat kuitenkin alle 6 dB.

Kohteessa 4 ennen meluntorjuntaa molempien mallien keskivirhe kasvaa selvästi 4 kHz taajuudella, mikä viittaa virheelliseen absorptiosuhteeseen, koska muuten mallien keskivirheet ovat jopa alle 2 dB. Kumpikaan malleista ei ollut kovin tarkka meluntorjunnan jälkeen, mutta Sergeyev-mallin keskivirhe oli yli 1000 Hz taajuuksilla hieman pienempi, mikä osoittaa kalusteparametrien osuneen kohdalleen. Odeon-mallissa kalusteet mallinnettiin yksittäisinä pintoina, mutta mitä ilmeisimmin absorptiosuhteita tai heijastussirontakertoimia ei oltu määritetty oikein.

7.4 Jälkikaiunta-ajan ennustettavuus malleilla

Näissä kohteissa parhaiten mittaustilannetta vastasivat Odeon ja Heerema -mallit. Tilanteissa, joissa lisättiin absorptiota, keskivirhe pieneni myös, koska jälkikaiunta-aikakin pieneni. Mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen keskivirhe oli alle 0.4 s Heerema-mallissa 3/8 ja Odeon-mallissa 2/8 tilanteista. Odeon-malli oli kuitenkin hieman parempi, koska Heerema-mallissa keskivirhe oli yli 1 s 2/8 tilanteista ja Odeon-mallissa ei yhdessäkään tilanteessa. Akuri, dBworks, Friberg ja Sabine-malleissa keskivirhe oli alle 0.4 s 1/8 tilanteista. Friberg-mallissa keskivirhe oli yli 1 s 5/8 tilanteista, joten kaiken kaikkiaan malli vastasi mittaustilanteita huonosti. Vielä huonommin mittaustilannetta vastasivat Fitzroy ja Arau-Puchades-mallit. Keskivirhe oli yli 1 s Fitzroy-mallissa 6/8 ja Arau-Puchades-mallissa 5/8 tilanteista.

Suhteellista virhettä ajatellen yksikään malli ei ennustanut jälkikaiunta-aikaa riittävän tarkasti. Lisäabsorption vaikutus oli kuitenkin havaittavissa oikean suuntaisesti kaikilla malleilla.

7.5 Yleistä pohdintaa

Ennen meluntorjuntatoimenpiteitä äänenpainetasojen erot mittauspisteiden välillä olivat pieniä kaikissa kohteissa. Meluntorjuntatoimenpiteiden toteuttamisen jälkeen äänenpainetasoissa pisteiden välillä oli enemmän vaihtelua.

Kaikissa malleissa äänilähteet oletettiin pistemäisiksi. Tässä tutkimuksessa se ei ollut ongelma, koska äänilähteenä käytettiin ympärisäteilevää pallokaiutinta, jonka suuntakuviota vastaa hyvin pistemäistä äänilähdettä.

Vaikka äänenpainetaso ennusteet parhaimmillaan olivatkin tarkkoja, eivät tulokset vielääkään olleet täysin luotettavia ja jälkikaiunta-ajan ennusteet olivat vielä selvästi huonompia. Tästä syystä akustinen malli tulisi aina ensin tarkistaa vertaamalla tuloksia todellisessa tilassa tehtyjen mittausten tuloksiin. Uuden tilan suunnittelutilanteessa se ei kuitenkaan ole mahdollista, joten mallin luonnissa ja tulosten tarkastelussa vaaditaan kokemusta vastaavista tiloista.

Mittaukset eivät itsessään ole absoluuttisen tarkkoja vaan sisältävät melko suuren epävarmuuden. Esimerkiksi äänilähteen äänitehotason määrityksen epävarmuus on ± 1.5 dB laboratoriossa ja ± 3 dB A-taajuuspainotetulle äänitehotasolle kenttämittauksissa. Tässä tutkimuksessa käytetyn melunleviämismittausmenetelmän epävarmuus oli luokkaa ± 1 dB, koska käytössä oli vakioäänilähde, jonka äänitehotaso oli tarkasti määritetty, tilat olivat melko avoimia, taustamelutaso oli riittävän alhainen ja mittaukset tekivät samat henkilöt, jolloin niiden toistettavuus oli hyvä.

Yksinkertaisilla malleilla laskettaessa tilan geometriaa joudutaan pelkistämään huomattavasti. Tila kuvataan yleensä suorakulmaisena ja kaikki kalusteet huomioidaan keskimääräisesti kalusteparametrien avulla, jolloin esimerkiksi suurten esteiden peittovaikutus jää kokonaan huomioimatta. Vaikka kuvalähdemenetelmällä voitaisiin tarkastella geometrialtaan monimuotoisiakin tiloja, Akurissa tarkastelu on rajattu suorakulmaiseen tilaan eikä kalusteita voi mallintaa pintoina. Akuri ei tässä tutkimuksessa osoittautunut luotettavaksi

mallinnustyökaluksi.

Yhdessä näistä malleista ei ole huomioitu diffraktiota esteiden ylitse. Periaatteessa diffraktion vaikutus yksittäisten esteiden osalta voitaisiin laskea erikseen ja lopuksi yhdistää mallien tulokset. Tämän tutkimuksen kohteissa yksittäisten seinäkkeiden vaikutus mallinnustuloksiin on kuitenkin häviävän pieni, koska vastaanotto-pisteet sijaitsivat kaukana äänilähteestä ja tilat olivat melko kaiuntaisia.

Viime aikoina akustisten mallien kehittämisessä on keskitytty pääasiassa diffraktion ja heijastussironnan (scattering) mallintamiseen sekä auralisaation kehittämiseen. Esimerkiksi heijastussironnan mittaussuunnitelma on standardoitu, mikä mahdollistaa tulevaisuudessa tarkempien lähtöarvojen käytön eri materiaaleille.[71]

Tähän astisissa tarkasteluissa mallien tarkkuutta on pyritty arvioimaan erilaisten laskennallisten parametrien avulla. Itse impulssivasteen tarkastelua sen sijaan ei ole tehty, vaikka sen pitäisi olla eksaktin mallin tärkein tarkastelukohde, koska impulssivasteen perusteella määritetään kaikki edellä mainituissa tutkimuksissa tarkastellut akustiset parametrit. Yksittäisissä kohteissa mitattuja ja mallinnettuja impulssivasteita on vertailtu sekä analyyttisesti että subjektiivisten kuuntelutestien avulla.[72, 73] Kuuntelutesteissä koulutettu testiryhmä vertaili mallinnetun impulssivasteen avulla auralisoituja ääninäytteitä todellisessa tilassa äänitettyihin näytteisiin. Työpaikkojen suunnittelun kannalta näillä ei kuitenkaan ole niin suurta painoarvoa, koska suunnittelun lähtökohdaksi yleensä riittävät jälkikaiunta-aika ja melutaso.

8 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa vertailtiin työpaikkojen meluntorjunnassa käytössä olleita mallinnusmenetelmiä. Erityisesti tarkasteltiin mallien tarkkuutta äänenpainetason ja jälkikaiunta-ajan ennustamisessa. Tulosten perusteella voidaan todeta, ettei yksinkertaisilla malleilla voida tarkasti ennustaa esimerkiksi yksittäisen meluntorjuntaratkaisun vaikutusta tilassa vaan tulisi käyttää mallia, joka mahdollistaa esteiden kuvaamisen tilan lähtötiedoissa. Tällaisista mallinnusmenetelmistä tunnetuin on säteenseurantamenetelmä, jota hyödyntävät useat kaupalliset akustiset mallinnusohjelmat, kuten Raynoise, Odeon, CATT ja EASE. Oikean suuntaiset ennusteet esimerkiksi lisääbsorption vaikutuksesta voidaan kuitenkin laskea useimmilla yksinkertaisistakin malleista, joista äänenpainetasolle suositeltavimmat ovat Sergejev, Kuttruff diffuse ja Thompson-mallit sekä jälkikaiunta-ajalle Heerema, Sabine ja Eyring-mallit. Näistä Heerema-mallin käyttöön tulisi suhtautua varauksin, koska se perustuu tilastolliseen analyysiin tietyn tyyppisistä tiloista, joista poikkeavissa tiloissa malli voi antaa hyvinkin virheellisiä tuloksia. Jälkikaiunta-ajan tarkkaan ennustamiseen eivät kaikissa tilanteissa kyettyneet säteenseurantamenetelmään perustuvat dBworks tai Odeon-mallinnusohjelmatkaan.

Tärkein syy virheellisiin tuloksiin on lähtötietojen epävarmuus, johon ei ole helppoa ratkaisua, koska useimmiten kaikkia malliin tarvittavia absorptiosuhteita ja heijastussirontakertoimia ei voida mitata. Jotta

lähtötietoja olisi riittävästi käytettävissä, pitäisi eri materiaaleille mitattuja heijastussirontakertoimia olla vähintään yhtä hyvin saatavilla kuin niiden absorptiosuhteitakin.

Jos mallintamisessa pyritään ottamaan huomioon kulmariippuva absorptio ja myös tulokulmasta riippuva heijastussironta, eivät nykyisin yleisesti käytössä olevat mittausmenetelmät riitä, vaan absorptiosuhteet ja heijastussirontakertoimet pitäisi mitata kulmariippuvina.

Tulevaisuudessa tarkempaan mallintamiseen pystyttäneen hybridimalleilla. Esimerkiksi äänen diffraktio pintojen reunoilla voitaisiin mallintaa erikseen ja yhdistää tulokset säteenseurantamallin tuloksiin. Pienillä taajuuksilla voitaisiin mahdollisesti soveltaa BEM-mallia ja sovittaa tulokset säteenseurantamallin tuloksiin.

-
- 1 Allred J. C, Newhouse A, Applications of the Monte Carlo method to architectural acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.* 30(1), 1958, pp. 1-3
 - 2 Allred J. C, Newhouse A, Applications of the Monte Carlo method to architectural acoustics. II, *J. Acoust. Soc. Am.* 30(10), 1958, pp. 903-904
 - 3 Hongisto V, Airborne sound insulation of wall structures – measurement and prediction methods, PhD thesis, Helsinki University of Technology, 2000, pp. 23-39
 - 4 Uosukainen S, Pesonen K, Ääntäeristävien koteloiden äänitekniinen mitoitus ja valinta, Insinööritoimisto Kari Pesonen Oy, Helsinki, 1984
 - 5 Maekawa Z, Noise reduction by screens, *Appl. Acoust.* 1, 1968, pp. 157-173
 - 6 Dance S. M, Roberts J. P, Shield B. M, Computer prediction of insertion loss due to single barrier in non-diffuse empty enclosed space, *Build. Acoust.* 1 (2), 1994, pp. 125-136
 - 7 Svensson U. P, Fred R. I, Vanderkooy J, An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses, *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (5), 1999, pp. 2331-2344
 - 8 Tsingos N, Funkhouser T, Ngan A, Carlbom I, Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction, *Proc. of SIGGRAPH 2001, ACM Computer Graphics, Los Angeles, California, USA, 2001, pp. 545-552*
 - 9 Farina A, Introducing the surface diffusion and edge scattering in a pyramid-tracing numerical model for room acoustics, *Proc. of 108th Convention of the Audio Engineering Society, Paris, 2000, preprint 5145*
 - 10 Draft international standard ISO/DIS 17624:2001(E) Acoustics - Guidelines for noise control in offices and workrooms by means of acoustical screens, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
 - 11 Hongisto V, Keränen J, Larm P, Simple model for the acoustical design of open-plan offices, *Acustica - acta acustica* 90, 2004, pp. 481-495
 - 12 Ahnert W, Feistel S, Schmitz O, Modern tools in acoustic design of concert halls and theatres - use and limitations of computer simulation and auralisation, *Proc. of XIII Session of the Russian Acoustical Society, Moscow, Russia, 2003, pp. 863-874*
 - 13 Hodgson M, Ray-tracing prediction of noise levels in a nuclear power-generating station, *Appl. Acoust.* 52, 1997, pp. 19-29
 - 14 Hodgson M, Case history: factory noise prediction using ray tracing - experimental validation and the effectiveness of noise control measures, *Noise Con. Eng. J.* 33(3), 1989, pp. 97-104
 - 15 Hodgson M, Lewis D. N, Case history: application of ray tracing to the modeling of noise in a food-production hall, *Noise Con. Eng. J.* 44(5), 1996, pp. 249-255
 - 16 Hongisto V, Olkinuora P, Airo E, Viljanen V, Pekkarinen J, Saine K, Computer aided acoustical modelling as a tool for industrial noise control, *Proc. of Nordic Acoustic Meeting '96, Helsinki, Finland, 1996, pp. 81-86*
 - 17 Sorainen E, Kokkola H, Optimal noise control in a carpentry plant, *Appl. Acoust.* 61, 2000, pp. 37-43
 - 18 Christensen C. L, Foged H. T, A room acoustical computer model for industrial environments – the model and its verification, *Proc. of Euro-Noise '98, Munich, Germany, pp. 671-676*

-
- 19 Howarth M. J, Lam Y. W, An assessment of the accuracy of a hybrid room acoustics model with surface diffusion facility, *Appl. Acoust.* 60, 2000, pp. 237-251
 - 20 Lam Y. W, A comparison of three diffuse reflection modelling methods used in room acoustics computer models, *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 1996, pp. 2181-2192
 - 21 Niironen H, Diffuse reflections in room acoustics modelling, Master's thesis, Helsinki university of technology, 2004
 - 22 Keränen J, Airo E, Olkinuora P, Hongisto V, validity of ray-tracing method for the application of noise control in workplaces, *Acustica - acta acustica* 89, 2003, pp. 863-874
 - 23 Vorländer M., International round robin on room acoustical computer simulations, *Proc. of 15th International Congress on Acoustics '95*, Trondheim, Norway, 1995, pp. 689-692
 - 24 Bork I, A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation, *Acustica - acta acustica* 86, 2000, pp. 943-956
 - 25 Bork I, Simulation and measurement of auditorium acoustics - the round robins on room acoustical simulation, *Proc. of Auditorium Acoustics Conference 2002*, London, UK, 2002, Vol. 24, Pt. 4
 - 26 Bork I, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – part I: measurements, *Acustica - acta acustica* 91, 2005, pp. 740-752
 - 27 Bork I, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – part II: calculations, *Acustica - acta acustica* 91, 2005, pp. 753-763
 - 28 ISO 3382: Acoustics - measurement of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
 - 29 Hodgson M, On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 88(2), 1990, pp. 871-878
 - 30 Ondet A. M, Barbry J. L, Sound propagation in fitted rooms – comparison of different models, *J. of Sound Vib.* 125(1), 1988, pp. 137-149
 - 31 Oliva Elorza D, Room acoustics modeling using the ray-tracing method: implementation and evaluation. Licentiate thesis, University of Turku, 2006
 - 32 Kuronen J, Teollisuushallin melukentän kuvaaminen erityisesti akustiseen kuvatekniikkaan perustuvalla QAkusti-tietokoneohjelmalla, *Lisensiaattitutkimus*, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1998
 - 33 Cremer L, Müller H. A, Schultz T. J, Principles and applications of room acoustics vol. 1, Applied science publishers, London, 1982
 - 34 Orłowski R. J, Scale modelling for predicting noise propagation in factories, *Appl. Acoust.* 31, 1990, pp.147-171
 - 35 Orłowski R. J, The arrangement of sound absorbers for noise reduction – results of model experiments at 1:16 scale, *Noise Control Eng. J.*, March-April, 1984, pp. 54-60
 - 36 Hodgson M, Scale model evaluation of the effectiveness of novel absorber treatments for industrial noise control, *Noise Control Eng. J.* 46(2), 1998, pp. 31-37
 - 37 Eyring C. F, Methods of calculating the average coefficient of sound

-
- absorption, *J. Acoust. Soc. Am.* 4, 1933, pp. 178-192
- 38 Millington G, A modified formula for reverberation, *J. Acoust. Soc. Am.* 4, 1932, pp. 69-82
- 39 Dance S, Shield B, Technical Note: Absorption coefficients of Common Construction Materials for Use in Computer Modelling of Enclosed Spaces, *Build. Acoust.* 7, 2000, pp. 217-224
- 40 Kuttruff H, *Room acoustics*, Elsevier Applied Science, London, 1991
- 41 Fitzroy D, Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption, *J. Acoust. Soc. Am.* 31, 1959, pp. 893-897
- 42 Arau-Puchades H, An improved reverberation formula, *Acustica* 65, 1988, pp. 163-180
- 43 Beranek L. L, Ver I. L, *Noise and vibration control engineering: principles and applications*, John Wiley & Sons, New York, 1992, pp. 175-183
- 44 Bies D. A, Hansen C. A, *Engineering Noise Control: Theory and Practice* 2nd Edition, E & FN SPON, London, 1998, pp. 233-237
- 45 ISO 354:2003(E) *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- 46 ISO 9613-1:1993(E) *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1 calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- 47 Hodgson M, Experimental evaluation of simplified models for predicting noise levels in industrial workrooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 103(4), 1998, pp. 1933-1939
- 48 Friberg R, Noise reduction in industrial halls obtained by acoustical treatment of ceiling and walls, *Noise Control Vib. Reduct.* 6, 1975, pp. 75-79
- 49 Thompson J. K, Mitchell L. D, Hurst C. J, A modified room acoustics approach to determine sound-pressure levels in irregularly-proportioned workroom spaces, *Proc. of Inter-Noise '76*, Washington, DC, USA, 1976, pp. 465-468
- 50 Wilson P. M, A pragmatic look at sound propagation in real workroom spaces, *Proc. of IOA Conference on Noise Control in Workroom Buildings*, 1982, pp. 24-27
- 51 Canadian Standard Z107.52-M1983, Recommended practice for the prediction of sound-pressure levels in large rooms containing sound sources, 1983
- 52 Kuttruff H, Sound propagation in working environments, *Proc. of 5th FASE Symposium*, Thessaloniki, Greece, 1985, pp. 17-32
- 53 Zetterling T, Simplified calculation model for noise propagation in large workrooms, *Proc. of Inter-Noise '86*, Cambridge, USA, 1986, pp. 767-770
- 54 Osipov G. L, Sergeyev M. V, Shubin I. L, Optimum location of sound absorbing material and estimation of its noise-reduction efficiency in industrial spaces, *Proc. of Inter-Noise '87*, Beijing, China, 1987, pp. 683-686
- 55 Hodgson M, Sound propagation curves in industrial workrooms: statistical trends and empirical prediction models, *J. Building Acoust.* 3(1), 1996, pp. 25-32

-
- 56 Heerema N, Hodgson M, Empirical models for predicting noise levels, reverberation times and fitting densities in industrial workrooms, *Appl. Acoust.* 57, 1999, pp. 51-60
 - 57 Heerema N, Hodgson M, Prediction, visualization and auralization of noise in industrial workrooms during computer "walk-through", *Noise Control Eng. J.* 47 (2), 1999, pp. 65-70
 - 58 Gilles R Lemire and Jean Nicolas, *Noise Control Eng. J.*, 24(2), March April 1985, pp. 58-66
 - 59 Hammad R. N. S, Simulation of noise distribution in rectangular rooms by means of computer modelling techniques, *Appl. Acoust.* 24, 1988, pp. 211-228
 - 60 Lindqvist E. A, Sound attenuation in large factory spaces, *Acustica* 50, 1982, pp. 313-328
 - 61 Lindqvist E. A, Noise Attenuation in Factories, *Appl. Acoust.* 16, 1983, pp 183-214
 - 62 Krokstad A, Strøm S, Sørsdal S, Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique, *J. Sound Vib.* 8(1), 1968, pp. 118-125
 - 63 Foley James D. ym, *Computer graphics principles and practice*, Addison-Wesley system programming series, Massachusetts, 1990
 - 64 Lehnert H, Systematic errors of the ray-tracing algorithm, *Appl. Acoust.* 38, 1993, pp. 207-221
 - 65 Lehnert H, Blauert J, Principles of binaural room simulation, *Appl. Acoust.* 36, 1992, pp. 259-291
 - 66 Xiangyang Z, Ke'an C, Jincai S, On the accuracy of the ray-tracing algorithms based on various sound receiver models, *Appl. Acoust.* 64, 2003, pp. 433-441
 - 67 Ondet A. M, Barbry J. L, Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing, *J. Acoust. Soc. Am.* 85 (2), 1989, pp. 787-796
 - 68 Hodgson M, Ray-tracing evaluation of empirical models for predicting noise in industrial workshops, *Appl. Acoust.* 64, 2003, pp.1033-1048
 - 69 ISO 3741:1999(E) Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - precision methods for reverberation rooms, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
 - 70 Dance S. M, Minimal input models for sound level prediction in fitted enclosed spaces, *Appl. Acoust.* 63, 2002, pp. 359-372
 - 71 ISO 17497-1:2004(E) Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
 - 72 T. Lokki, J. Hiipakka, and L. Savioja, A framework for evaluating virtual acoustic environments, *Proc. of 110th Convention of the Audio Engineering Society*, Amsterdam, the Netherlands, 2001, preprint no. 5317
 - 73 Lokki T, Järveläinen H, Subjective evaluation of auralization of physics-based room acoustics modeling, *Proc. of the 7th International Conference on Auditory Display*, Helsinki University of Technology, Finland 2001, pp. 26-31

LIITE 1. Ilman absorptiovaikutuksen laskenta

$$m = \alpha_{\text{air}}/10\lg(e), \quad (79.)$$

missä

$$\alpha_{\text{air}} = 8,686f^2 \left(\left[1,84 \times 10^{-11} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{-5/2} \times \left\{ \begin{array}{l} 0,01275 \left[\exp\left(\frac{-2239,1}{T_c}\right) \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right)^{-1} \right]^{-1} + \\ 0,1068 \left[\exp\left(\frac{-3352,0}{T_c}\right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right)^{-1} \right]^{-1} \end{array} \right\} \right) \quad (80.)$$

missä p_a on ilmanpaine (kPa), p_r referenssi-ilmanpaine (101,325 kPa), T_c lämpötila (K) ja T_0 referenssilämpötila (293,15 K = 20 °C). Hapen ja typhen relaksaatiotaajuudet f_{rO} ja f_{rN} lasketaan seuraavasti:

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4,04 \times 10^4 h_m \frac{0,02 + h_m}{0,391 + h_m} \right) \quad (81.)$$

ja

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \times \left(9 + 280h_m \exp\left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right) \quad (82.)$$

Yhtälöissä h_m on veden moolinen tiheys-%, joka saadaan ilman suhteellisesta kosteudesta RH laskettua seuraavasti:

$$h_m = RH(p_{\text{sat}}/p_r)/(p_a/p_r), \quad (83.)$$

$$\text{missä } (p_{\text{sat}}/p_r) = 10^C \quad (84.)$$

$$\text{ja } C = -6,8346(T_{01}/T)^{1,261} + 4,6151, \quad (85.)$$

jossa T_{01} on veden kolmoispistelämpötila (273,16 K).

LIITE 2. Mallinnettujen A-taajuuspainotettujen äänenpainetasojen, $L_{p,A}$ [dB], virhetarkastelu, absoluuttinen virhe A_L .

1 - ennen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff sp	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	1.6	15.3	3.6	10.0	4.7	36.0	4.0	7.4	4.7	0.7	4.8	4.6	5.4	
m2	1.4	10.6	3.6	6.8	3.5	18.6	1.8	6.0	4.0	0.9	3.6	2.9	4.1	5.0
m3	1.1	8.2	0.7	5.0	2.3	13.0	0.3	4.7	2.9	0.0	2.3	1.6	2.8	3.2
m4	1.3	10.6	1.0	7.3	3.6	22.1	2.1	6.1	4.0	0.7	3.7	3.1	4.2	6.7
m5	1.1	4.8	1.1	3.5	3.2	6.9	0.1	4.8	3.8	1.9	2.3	1.7	3.6	3.3
m6	0.1	5.5	0.5	3.5	2.1	1.3	0.6	4.2	2.8	0.5	1.7	1.0	2.6	3.2
m7	0.8	12.0	0.7	7.0	2.5	27.3	1.4	5.1	2.7	0.9	2.6	2.2	3.2	6.0
m8	1.2	17.5	4.0	9.0	2.6	43.8	2.4	5.4	2.1	2.4	2.5	2.6	3.3	
m9	0.8	19.2	2.8	9.9	2.9	48.1	3.0	5.8	2.3	2.4	2.8	3.1	3.7	
m10	0.3	24.0	0.3	11.0	3.2	58.3	3.9	6.3	2.1	3.2	3.0	3.5	4.0	
k.a.	1.0	12.8	1.8	7.3	3.1	27.5	2.0	5.6	3.1	1.4	2.9	2.6	3.7	4.6
k.haj.	0.5	6.2	1.5	2.7	0.8	18.7	1.4	0.9	0.9	1.0	0.9	1.1	0.8	1.5

1 - jälkeen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff sp	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	0.8	12.9	2.5	7.6	2.4	34.6	1.6	5.0	2.3	1.6	2.4	2.2	3.1	
m2	1.9	8.6	2.8	4.9	1.6	17.5	0.1	4.1	2.1	1.0	1.7	1.0	2.2	3.1
m3	1.1	6.1	0.2	2.9	0.1	11.6	1.8	2.5	0.7	2.2	0.1	0.6	0.7	1.1
m4	2.9	8.6	0.8	5.4	1.7	21.0	0.2	4.2	2.0	1.2	1.8	1.2	2.3	4.8
m5	3.7	1.4	4.3	0.0	0.2	9.8	3.5	1.4	0.4	1.5	1.2	1.7	0.2	0.1
m6	2.6	3.3	1.6	1.3	0.1	0.2	2.8	2.0	0.6	1.7	0.5	1.2	0.4	1.0
m7	1.9	10.8	1.1	5.7	1.3	26.9	0.1	3.9	1.4	2.2	1.4	1.0	1.9	4.7
m8	1.4	16.5	1.1	8.0	1.5	43.8	1.4	4.3	1.0	3.4	1.4	1.6	2.3	
m9	0.8	18.2	0.8	8.9	1.9	48.2	2.0	4.8	1.2	3.4	1.8	2.1	2.7	
m10	0.2	23.3	1.5	10.3	2.5	58.7	3.2	5.6	1.4	3.9	2.3	2.8	3.3	
k.a.	1.7	11.0	1.7	5.5	1.3	27.2	1.7	3.8	1.3	2.2	1.4	1.5	1.9	2.5
k.haj.	1.1	6.9	1.2	3.3	0.9	18.8	1.3	1.4	0.6	1.0	0.7	0.7	1.1	2.0

2 - ennen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff sp	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	0.8	5.6	1.9	4.7	4.5	0.1	1.3	0.6	2.6	3.2	2.0	1.5	4.5	1.3
m2	0.6	11.7	0.7	2.8	2.4	0.4	1.7	0.5	6.5	10.1	5.1	3.1	2.5	
m3	0.2	15.0	1.2	3.0	2.7	0.1	2.3	0.5	6.2	10.7	4.6	2.9	2.7	
m4	0.8	12.0	0.5	3.2	2.6	0.1	1.9	0.2	6.3	10.0	4.9	2.9	2.7	
m5	2.4	7.0	2.0	5.8	4.7	0.4	2.0	0.7	2.9	3.8	2.1	1.2	4.7	1.6
m6	0.5	7.2	1.2	5.1	4.8	0.9	2.6	0.7	3.4	4.9	2.5	1.0	4.8	1.4
k.a.	0.9	9.8	1.2	4.1	3.6	0.3	2.0	0.5	4.7	7.1	3.5	2.1	3.7	1.4
k.haj.	0.8	3.7	0.6	1.3	1.1	0.3	0.4	0.2	1.9	3.5	1.5	1.0	1.1	0.2

2 - jälkeen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff sp	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	0.3	3.5	0.7	3.2	5.8	6.3	2.0	2.4	0.6	1.8	1.2	0.8	4.8	2.9
m2	2.2	9.8	2.8	2.8	2.6	7.1	5.1	1.5	4.8	6.3	0.9	3.4	1.0	
m3	2.6	13.2	1.3	3.7	3.0	8.0	4.7	2.5	4.7	7.1	1.9	3.3	1.3	
m4	2.0	11.0	7.2	3.7	3.4	8.0	4.3	2.4	4.0	5.6	1.8	2.6	1.8	
m5	3.2	5.1	3.6	4.3	6.4	7.7	1.4	3.3	0.9	1.9	2.2	1.3	5.3	3.1
m6	3.3	6.5	4.2	4.9	6.3	8.6	1.4	3.7	0.4	0.8	2.8	1.1	5.1	2.3
k.a.	2.3	8.2	3.3	3.8	4.6	7.6	3.1	2.7	2.6	3.9	1.8	2.1	3.2	2.8
k.haj.	1.1	3.7	2.3	0.8	1.8	0.8	1.7	0.8	2.1	2.7	0.7	1.2	2.0	0.4

3 - ennen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff spt	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	6.9	2.4	9.9	0.9	2.6	6.0	6.4	3.3	7.4	3.3	5.0	3.0	4.2	3.5
m2	4.5	17.3	3.0	2.0	1.3	16.7	3.6	0.3	8.4	6.0	2.2	1.2	3.5	
m3	1.5	33.1	0.9	6.1	1.6	24.2	0.0	5.1	5.5	5.8	3.4	1.6	1.0	
m4	1.5	24.0	3.1	5.3	1.6	21.4	0.4	3.5	5.7	4.1	1.6	1.7	0.7	
m5	0.2	15.7	0.3	4.2	1.4	17.2	1.3	1.7	5.4	2.2	0.3	1.4	0.7	
m6	5.2	11.8	3.8	4.8	2.1	15.5	0.9	1.9	4.0	0.3	0.0	2.1	0.2	
m7	1.4	8.3	1.8	4.8	2.8	12.8	0.8	2.2	2.4	1.6	0.4	2.6	1.1	3.1
m8	0.7	11.8	5.7	4.8	2.5	14.9	0.7	2.2	3.3	0.5	0.3	2.5	0.7	5.5
m9	2.7	19.7	1.0	7.2	3.7	21.1	1.3	4.5	3.4	0.8	2.6	3.7	1.5	
k.a.	2.7	16.0	3.3	4.5	2.2	16.7	1.7	2.7	5.0	2.7	1.8	2.2	1.5	4.0
k.haj.	2.3	9.0	3.0	1.9	0.8	5.4	2.0	1.5	2.0	2.2	1.7	0.8	1.4	1.3

3 - jälkeen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff spt	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	9.1	0.1	13.1	3.6	3.2	8.0	9.1	4.5	6.6	4.0	5.7	4.4	6.9	6.2
m2	4.8	14.1	3.0	0.0	2.7	19.0	7.9	1.9	7.9	7.2	2.4	4.0	7.9	
m3	1.4	24.9	2.5	0.7	4.9	22.0	9.9	2.0	10.3	12.4	2.2	6.6	10.9	
m4	1.7	16.7	3.1	0.7	3.9	19.8	9.1	2.4	9.4	9.5	2.8	5.4	9.4	
m5	0.6	12.1	4.8	1.6	0.4	19.0	5.7	0.2	5.1	3.6	1.0	1.5	5.2	
m6	6.7	9.1	4.6	2.3	1.2	17.7	4.4	0.7	3.1	0.9	0.3	0.0	3.2	
m7	1.7	3.2	4.0	0.5	0.6	12.2	6.4	1.7	4.2	1.6	2.8	1.8	4.5	2.5
m8	1.3	5.1	14.9	1.4	2.2	13.3	7.8	2.9	6.3	3.9	3.9	3.3	6.5	1.6
m9	0.6	12.8	0.8	1.1	1.5	19.7	6.7	0.8	6.6	5.6	1.4	2.7	6.5	
k.a.	3.1	10.9	5.6	1.3	2.3	16.7	7.4	1.9	6.6	5.4	2.5	3.3	6.8	3.4
k.haj.	3.0	7.6	4.9	1.1	1.6	4.5	1.8	1.3	2.3	3.7	1.6	2.0	2.4	2.4

4 - ennen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff spt	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	2.8	2.5	1.7	10.9	13.7	2.0	5.4	5.7	1.5	1.1	0.1	5.6	10.8	
m2	0.9	2.3	1.3	9.3	12.2	2.3	4.0	3.1	0.3	1.0	1.2	4.4	9.6	
m3	0.1	2.2	0.6	8.2	10.7	2.2	2.6	1.1	1.5	0.2	1.9	3.1	8.5	2.1
m4	0.7	2.6	1.7	8.5	10.8	1.4	2.7	1.2	1.0	0.8	1.4	3.3	8.7	3.2
m5	1.6	2.6	0.6	9.7	12.0	1.2	3.8	2.3	0.3	0.6	0.8	4.4	9.7	3.9
m6	1.5	2.9	2.9	6.4	9.7	0.3	1.8	1.7	0.2	3.2	0.5	2.5	8.4	4.4
m7	0.0	2.3	1.4	7.8	9.9	1.6	1.8	0.6	1.5	0.9	1.8	2.5	8.0	3.4
m8	0.5	2.4	1.5	9.6	12.0	2.1	3.8	2.6	0.5	0.6	1.2	4.2	9.5	2.6
m9	2.1	2.7	1.6	10.6	13.6	1.7	5.4	5.3	1.3	0.7	0.1	5.7	10.8	
m10	2.4	2.5	0.2	10.5	13.6	1.8	5.3	5.2	1.3	0.7	0.0	5.6	10.8	
k.a.	1.3	2.5	1.4	9.2	11.8	1.7	3.6	2.9	0.9	1.0	0.9	4.1	9.5	3.3
k.haj.	1.0	0.2	0.8	1.4	1.5	0.6	1.4	1.9	0.6	0.8	0.7	1.3	1.1	0.8

4 - jälkeen

mittaus- piste	Äänenpainetaso absoluuttinen virhe													
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Embleton	Friberg	Heerema	Hodgson	Kuttruff diff	Kuttruff spt	Sabine	Sergeyev	Thompson	Wilson	Zetterling
m1	2.0	27.5	0.6	4.5	8.8	9.0	0.9	1.9	4.3	4.7	0.2	1.7	0.4	
m2	3.2	19.4	0.2	2.7	7.4	7.0	2.1	0.2	5.2	4.0	1.7	2.4	0.1	
m3	0.1	14.9	0.5	4.8	10.1	8.4	0.7	2.1	1.5	1.2	0.7	1.0	3.6	3.8
m4	2.4	15.1	2.7	7.1	12.7	10.5	3.3	4.7	1.6	4.7	3.3	3.9	6.7	5.7
m5	2.6	14.6	4.0	4.6	9.8	8.4	0.3	1.8	2.1	0.4	0.4	0.6	3.1	3.9
m6	3.1	8.7	2.8	5.6	12.6	8.0	3.4	5.2	3.8	7.0	3.8	4.9	8.7	5.4
m7	2.0	11.9	1.3	5.7	11.5	8.8	2.2	3.6	1.1	4.5	2.3	3.1	6.1	5.1
m8	3.6	18.2	0.2	3.8	8.6	7.8	0.9	0.8	3.8	2.1	0.6	1.0	1.4	4.2
m9	2.4	25.5	0.8	4.5	9.0	9.0	0.7	1.8	4.1	3.9	0.2	1.4	0.8	
m10	0.6	26.6	1.7	5.8	10.2	10.3	0.6	3.0	2.8	2.6	1.4	0.1	2.1	
k.a.	2.2	18.2	1.5	4.9	10.1	8.7	1.5	2.5	3.0	3.5	1.5	2.0	3.3	4.7
k.haj.	1.1	6.5	1.3	1.2	1.7	1.1	1.2	1.6	1.4	1.9	1.3	1.5	3.0	0.8

LIITE 3. Mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen, T [s] virhetarkastelu, absoluuttinen virhe A_{T60} .

1 - ennen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125											
250	1.5	2.3	1.8	0.9		1.0	1.2	0.5	0.8	0.9	0.9
500	0.2	1.0	0.5	0.8		0.5	0.4	1.2	0.8	1.2	1.0
1000	0.2	0.5	0.2	1.8	2.1	1.3	1.5	2.2	1.9	2.1	1.9
2000	0.6	0.6	0.8	3.3		1.8	3.0	3.7	3.4	3.6	3.4
4000	0.5	1.8	1.2	4.1		2.2	3.9	4.6	4.2	4.2	4.1
k.a.	0.6	1.2	0.9	2.2	2.1	1.4	2.0	2.4	2.2	2.4	2.3

1 - jälkeen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	0.4	1.1	0.8	0.2		0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
250	0.5	1.2	0.6	0.2		0.1	0.1	0.6	0.2	0.2	0.2
500	0.7	1.3	0.8	0.5		0.2	0.1	0.9	0.5	0.9	0.7
1000	0.4	0.9	0.5	1.4	1.7	0.9	1.1	1.8	1.5	1.7	1.5
2000	0.1	0.1	0.3	2.8		1.3	2.5	3.2	2.9	3.1	2.9
4000	0.1	1.2	0.6	3.6		1.7	3.3	4.0	3.7	3.6	3.6
k.a.	0.4	1.0	0.6	1.4	1.7	0.8	1.2	1.8	1.5	1.6	1.5

2 - ennen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	0.4	0.9	0.8	2.8		0.9	1.1	3.0	1.9	27.5	17.2
250	0.3	1.0	0.4	2.7		0.8	1.0	2.9	1.8	25.9	15.4
500	0.3	1.0	0.4	2.6		0.6	0.9	2.8	1.8	17.7	11.5
1000	0.5	0.7	0.5	2.1	0.6	0.4	1.0	2.3	1.5	12.6	8.3
2000	0.5	0.8	0.7	2.1		0.2	0.9	2.3	1.5	12.3	7.9
4000	0.6	0.8	0.4	1.9		0.1	0.5	2.1	1.4	6.7	4.7
k.a.	0.4	0.9	0.5	2.3	0.6	0.5	0.9	2.5	1.7	17.1	10.8

2 - jälkeen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	0.1	0.0	0.0	0.4		0.6	0.7	0.6	0.3	1.2	0.8
250	0.4	0.6	0.3	0.5		0.5	0.7	0.3	0.5	0.4	0.5
500	0.3	0.5	0.2	0.5		0.3	0.7	0.2	0.5	0.4	0.5
1000	0.3	0.5	0.2	0.4	1.1	0.2	0.6	0.2	0.5	0.4	0.4
2000	0.3	0.5	0.3	0.4		0.2	0.6	0.2	0.5	0.4	0.4
4000	0.3	0.4	0.2	0.3		0.2	0.5	0.1	0.4	0.3	0.3
k.a.	0.3	0.4	0.2	0.4	1.1	0.3	0.6	0.3	0.5	0.5	0.5

3 - ennen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	1.1	0.1	0.3	0.8		0.2	0.5	1.2	0.8	2.3	1.1
250	0.5	0.8	0.3	0.3		0.3	0.6	0.1	0.3	0.8	0.0
500	0.3	1.1	0.4	0.7		0.1	1.5	0.4	0.9	0.6	0.4
1000	0.5	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	1.4	0.2	0.7	0.7	0.1
2000	0.6	0.4	0.8	0.2		0.5	0.5	0.5	0.0	1.2	0.6
4000	0.4	0.6	0.5	1.4		0.7	1.1	1.8	1.3	1.9	1.6
k.a.	0.6	0.7	0.5	0.7	0.4	0.3	0.9	0.7	0.7	1.2	0.6

3 - jälkeen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	1.1	0.0	0.3	0.7		0.2	0.5	1.1	0.7	2.2	1.0
250	1.0	0.0	0.5	0.6		0.5	0.2	0.9	0.5	1.6	0.8
500	0.1	0.6	0.0	0.4		0.8	0.9	0.1	0.5	0.7	0.3
1000	0.1	0.6	4.6	0.4	1.3	1.2	1.0	0.1	0.6	0.4	0.3
2000	0.2	0.4	3.7	0.2		1.2	0.7	0.1	0.3	0.4	0.1
4000	0.3	0.0	1.7	0.2		0.9	0.5	0.5	0.0	0.6	0.3
k.a.	0.5	0.3	1.8	0.4	1.3	0.8	0.6	0.5	0.4	1.0	0.5

4 - ennen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	1.5	0.1	1.7	1.5		1.5	1.0	1.7	1.2	5.0	2.8
250	1.1	0.2	1.7	1.4		1.1	1.1	1.6	1.2	2.8	2.0
500	1.2	0.2	1.9	2.3		1.3	2.1	2.5	2.2	3.3	2.7
1000	0.3	0.6	2.3	3.1	0.9	1.1	2.9	3.2	3.0	4.0	3.5
2000	0.8	1.5	3.1	4.3		0.3	4.2	4.5	4.2	4.9	4.6
4000	0.7	4.0	2.8	9.0		1.4	9.0	9.2	8.7	9.7	9.4
k.a.	0.9	1.1	2.3	3.6	0.9	1.1	3.4	3.8	3.4	4.9	4.2

4 - jälkeen

oktaavi- kaista, Hz	Jälkikaiunta-ajan absoluuttinen virhe										
	Odeon 3.1	Akuri 1.2	dBworks	Eyring	Friberg	Heerema	Millington	Sabine	Kuttruff	Fitzroy	Arau-Puchades
125	1.3	1.5	1.8	3.4		0.8	3.1	3.6	3.2	6.7	4.5
250	0.8	0.7	1.4	1.4		0.4	1.3	1.6	1.4	2.7	1.7
500	0.7	0.2	1.5	0.1		0.4	0.3	0.3	0.0	1.8	0.3
1000	0.5	0.3	0.9	0.2	1.1	0.4	0.6	0.0	0.3	1.7	0.1
2000	0.4	0.2	3.1	0.1		0.2	0.6	0.1	0.2	1.2	0.1
4000	0.1	0.2	9.1	0.0		0.2	0.5	0.2	0.1	1.5	0.2
k.a.	0.6	0.5	3.0	0.9	1.1	0.4	1.0	1.0	0.9	2.6	1.1

LIITE 4. Puheensirtoindeksin mallintaminen

Puheen erotettavuutta voidaan kuvata puheensirtoindeksillä STI, joka voi saada arvoja väliltä 0-1. Puheensirtoindeksin arvo 1 vastaa täydellistä puheen erotettavuutta ja 0 tilannetta, jossa yhdestäkään puheen tavusta ei saa selvää. Puheensirtoindeksin määrittämisessä hyödynnetään modulaatiosirtofunktiota, jonka modulaatioiden vaimentumista tilassa tarkastellaan. Modulaatiotaajuudet on valittu siten, että ne vastaavat tavallisessa puheessa esiintyviä vaihteluita.^{1,2}

Modulaation vaimentumiskerroin määritellään seuraavasti:

$$M = m_{\text{received}}/m_{\text{transmitted}} \quad (86.)$$

missä $m_{\text{transmitted}}$ on lähetetyn signaalin ja m_{received} vastaanotetun signaalin modulaatiokerroin. Modulaation vaimentumiskerroin riippuu tarkasteltavasta modulaatiotaajuudesta ja taajuuskaistasta. Modulaation vaimentumiskertoimia voidaan tarkastella oktaavikaistoittain. Puheäänien kannalta tärkeimmät oktaavikaistat ovat 125 - 8000 Hz, joten tarkastelu voidaan rajata tälle alueelle. Jokaisella oktaavikaistalla tarkastellaan tersseittäin 14 modulaatiotaajuutta 0.63 - 12.5 Hz (taulukko L1).

Taulukko L1: Modulaatiotaajuudet puheensirtoindeksin määrittämiseen STI menetelmässä.

Modulaatio- taajuus (STI)	STI Hz
F ₁	0.63
F ₂	0.80
F ₃	1.00
F ₄	1.25
F ₅	1.60
F ₆	2.00
F ₇	2.50
F ₈	3.15
F ₉	4.00
F ₁₀	5.00
F ₁₁	6.30
F ₁₂	8.00
F ₁₃	10.00
F ₁₄	12.50

Kun oletetaan, että modulaatiosirtofunktioon aiheuttaa häiriötä ainoastaan taustamelu, voidaan modulaation vaimentumiskerroin määrittää puheen tason ja taustamelutason erotuksen eli puhekohinasuhteen perusteella

$$M_{S/N} = \frac{1}{1 + 10^{-(S/N)/10}}, \quad (87.)$$

missä S/N puhetaso L_S ja taustamelutason L_N puhekohinasuhde ($L_S - L_N$). Taustamelutaso (kohina) ja puhetaso (signaali) määritellään oktaavikaistoittain.

Kun puhetaso on selvästi taustamelutasoa suurempi, voidaan olettaa, että modulaatiosirtofunktioon aiheuttaa häiriötä vain tilan kaiuntaisuus. Tällöin vaimentumiskertoimelle voidaan johtaa

1Steeneken H. J. M, Houtgast T, A physical method for measuring speech-transmission quality, J. Acoust. Soc. Am. 67, 1980, pp. 318-326.

2Houtgast T, Steeneken H. J. M, A multi-language evaluation of the RASTI-method for estimating speech intelligibility in auditoria, Acustica 54, 1984, pp. 185-199

$$M_{RT}(F) = \left[1 + (2\pi FT / 13.8)^2 \right]^{-1/2} \quad (88.)$$

missä F on modulaatiotaajuus ja T (varhainen) jälkikaiunta-aika oktaavikaistoittain diffuusissa kentässä. Lisäksi puhujan (signaalilähde) ja kuuntelijan (vastaanotin) välinen etäisyys oletetaan paljon suuremmaksi kuin tilan kaiuntasäde, jolloin kaiuntainen ääni on suoraa ääntä voimakkaampaa. Yksinkertaisissa tilanteissa voidaan varhaisen jälkikaiunta-ajan tilalla käyttää esimerkiksi kappaleessa 2.2 esitettyjen yhtälöiden avulla laskettua jälkikaiunta-aikaa.³

Taustamelun ja tilan kaiuntaisuuden yhteisvaikutus voidaan laskea modulaatiovaimentumiskerrointen tulona

$$M_i = M_{S/N} M_{RT} \quad (89.)$$

Modulaatiovaimennuskertoimista M_i lasketaan näennäinen signaalikohinasuhde

$$(S/N)_{app,i} = 10 \log[M_i/(1-M_i)] \quad (90.)$$

missä M_i on kullakin modulaatiotaajuudella laskettu vaimentumiskerroin. Näennäiselle signaalikohinasuhteelle sallitaan arvot välillä -15...+15 dB. Jos arvo on yli 15 dB tai alle -15 dB, asetetaan arvoksi vastaavasti +15 dB tai -15 dB.

Näennäisistä signaalikohinasuhteista $(S/N)_{app,i}$ lasketaan keskiarvot oktaaveittain

$$(S/N)_{app,k} = [\sum_i (S/N)_{app,i}]/14 \quad (91.)$$

missä k on oktaavikaista 125,..., 8000 Hz. Oktaaveittain lasketuista näennäisistä signaalikohinasuhteista lasketaan painotettuna keskiarvona lopullinen näennäinen signaalikohinasuhde

$$(S/N)_{app} = \sum_k w_k (S/N)_{app,k} \quad (92.)$$

missä w_k on taulukon L2 mukainen painotuskerroin oktaavikaistalla k .

Taulukko L2: Painotuskertoimet w_k oktaavikaistoille 125-4000 Hz puheensirtoindeksin määrittämisessä.

taajuus, Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
w_k	0.13	0.14	0.11	0.12	0.19	0.17	0.14

Puheensirtoindeksi lasketaan näennäisestä signaalikohinasuhteesta $(S/N)_{app}$ seuraavasti

$$STI = [(S/N)_{app} + 15]/30 \quad (93.)$$

3 Keränen J, Larm P, Hongisto V, Simple application of STI-method in predicting speech transmission in classrooms, BNAM 2004