

ALKULAUSE

Tämän diplomityön mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta toteuttaa kuuntelu-huone myös konkreettisesti haluan kiittää työn valvojaa professori Matti Karjalaista, joka antoi minulle vapaat kädet huoneen suunnitteluun ja toteuttamiseen. Työn ohjaajaa DI Henrik Mölleriä haluan kiittää kannustuksesta ja tuesta, jota tarvittiin vaikeiden päätösten teossa huoneen suunnittelun ja rakentamisen kuluessa. Kuunteluhuoneen toteutuksen onnistumisen kannalta tärkeintä henkilöä, edesmennyttä Kauko Vesteristä en voi valitettavasti enää kiittää, ja siksi haluankin omistaa tämän työn hänen muistolle.

Huoneen suunnitteluun ja toteutukseen osallistuneiden yritysten henkilökunnista haluan kohdistaa kiitokset sisustussuunnittelusta vastanneelle arkkitehti Anssi Ruusuvuorelle Insinööritoimisto Akukon Oy:stä, Erkki Rannikolle Noretron Oy:stä sekä Markku Taskiselle Hevac-konsultit Oy:stä. Huoneen mittauksissa käytettyjen mittalaitteiden lainaamisesta haluan kiittää Insinööritoimisto Akukon Oy:tä, VTT Rakennustekniikkan Akustiikka-ryhmää, Noretron Oy:tä ja Suomen Akustiikkakeskus Oy:tä

TkL Lauri Saviojaa kiitän hyvästä työtoveruudesta , sekä hänen avustaan mittausten suorittamisessa, Matlab-kuvien virittämisessä ja tämän työn oikolukemisesta. Haluan kiittää myös hankkeen tiimoilta tehtyihin konferenssijulkaisuihin osallistuneita TkL Kaarina Melkasta, DI Kari Saarista ja tekn. yo Veijo Ikosta heidän työpanoksestaan.

DI Mats Backholmia Suomen Akustiikkakeskus Oy:stä haluan kiittää huoneen lattian ja kattokiinnikkeiden resonanssitaajuuksien mittaamisesta. Neuvoista ja ohjeista työn aihepiirin käsittelyn osalta kiitän DI Juha Backmania, TkT Tapio Lahtea ja TkL Seppo Uosukaista.

Akustiikan laboratorion henkilökuntaa kiitän kärsivällisyydestä, jota tarvittiin rakennustyömaan keskellä työskentelyssä.

Lopuksi haluan lausua lämpimät kiitokset vaimolleni Tiinalle, jonka apu ja tuki on ollut korvaamatonta myös muissa kuin rakennustekniikkaan liittyvissä asioissa. Poikaani Oskaria kiitän akustiseen kirjallisuuteen kohdistuvasta kiinnostuksesta.

Tapiolassa 20.5. 1999

Antti Järvinen

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	i
SISÄLLYSLUETTELO	ii
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	iv
1. Johdanto	1
1.1. Työn tavoitteet ja sisältö	1
2. Kuunteluhuoneet	4
2.1. Kuuntelukokeet	5
2.2. Äänikenttä kuunteluhuoneessa	7
2.3. Referenssi-kuunteluhuoneelle asetettavat akustiset vaatimukset	10
2.3.1. Huoneen geometria	10
2.3.2. Jälkikaiunta-aika	12
2.3.3. Kaiuttimien ja kuulijoiden paikat	13
2.3.4. Taustamelu	13
2.4. Kuunteluhuonestandardit	14
2.4.1. Standardi IEC 268-13	15
2.4.2. Suositus ITU-R BS.1116	16
2.4.3. Pohjoismaisten radioyhtiöiden suositus N 12-A	20
3. Huoneakustiikka	22
3.1. Äänikentän perusyhtälöt huoneakustiikassa	22
3.1.1. Tasoaalto, akustiset suureet ja yksiköt	25
3.1.2. Heijastus- ja absorptiokertoimet	26
3.2. Äänikenttä huoneessa	28
3.2.1. Jäykkäseinäinen suorakaiteen muotoinen huone	28
3.2.2. Ominaismuototiheys	31
3.3. Geometrinen akustiikka	33
3.4. Tilastollinen huoneakustiikka	33
3.4.1. Sabine'n kaava	33
3.4.2. Eyringin kaava	34
3.4.3. Diffuusin äänikentän ominaisuudet	34
4. Äänikentän numeeriset ratkaisumenetelmät	36
4.1. Aaltoyhtälön numeeriseen ratkaisuun perustuvat menetelmät	37
4.1.1. Elementtimenetelmä	38
4.1.2. Pintaelementtimenetelmä	38

4.1.3. Aika-alueendifferenssimenetelmä.....	39
4.2. Geometrisen akustiikan mallit	40
4.2.1. Sädemenetelmä	40
4.2.2. Kuvalähdemenetelmä.....	41
4.3. Hybridimallit.....	41
5. Kuunteluhuoneen mallinnus	43
5.1. Pientaajuusmallinnus	43
5.1.1. Huoneen alustava mallinnus	43
5.1.2. Toteutetun suunnitelman mallinnus.....	47
5.2. Suurtaajuusmallinnus.....	50
6. Toteutettu huone	52
6.1. Alkutilanne.....	52
6.2. Huoneohjelman suunnittelu	53
6.3. Rakennusakustinen suunnittelu.....	56
6.4. Huoneakustiikan suunnittelu.....	58
6.4.1. Akustiikkapanelit	58
6.4.2. Alaslaskettu katto.....	59
7. Soladiffusorit.....	60
7.1. Soladiffusoreiden pientaajuusabsorptio	61
7.2. Kehitetty soladiffusorirakenne.....	62
8. Kuunteluhuoneen mittaukset	64
8.1. Taustamelumittaukset	64
8.2. Jälkikaiunta-ajan mittaukset.....	66
9. Johtopäätökset.....	68
10. Viitteet.....	70

LIITE A

Huoneen rakenteet

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

B	stereokannan leveys
B_r	puolen tehon kaistanleveys
c	äänen nopeus
D	kuunteluetäisyys
f	taajuus
f_c	Schroeder-taajuus
H	huoneen korkeus
I	ääni-intensiteetti
k	aaltoluku
L	huoneen pituus
N	tarkasteltavien ominaistajuuksien lukumäärä
N_q	ominaismuotojen lukumäärä taajuuskaistalla
n_x, n_y, n_z	positiivisia kokonaislukuja
p	äänipaine
Q_w	huoneen laatuindeksi
q	tilavuusnopeus
R	heijastuskerroin
S	huoneen/seinien pinta-ala
T_o	jälkikaiunta-ajan referenssiarvo
T_{60}	jälkikaiunta-aika
T_m	optimaalinen jälkikaiunta-aika
t	aika
u	hiukkasnopeus
V	huoneen tilavuus
W	huoneen leveys
Z	akustinen impedanssi

Z_s	seinän akustinen impedanssi
α	absorptiokerroin
β	akustinen admittanssi
χ	vaihekulma
$\delta(x)$	Diracin delta-funktio
γ	adiabaattivakio
λ	aallonpituus
Θ	lämpötila
ρ	tiheys
ω	kulmataajuus
AES	Audio Engineering Society
BEM	pintaelementtimenetelmä (engl. boundary element method)
EBU	European Broadcasting Union
FDTD	aika-alueen differenssimenetelmä (engl. finite difference time domain)
FEM	elementtimenetelmä (engl. finite element method)
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Standardization Organization
ITU	International Telecommunications Union
MLS	maksimipituussekvenssi
PR	primitiivijuuri (engl. primitive root)
QR	neliöllinen jakojäännös (engl. quadratic residue)
TKK	Teknillinen korkeakoulu

1. Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kuunteluhuoneiden suunnittelussa tarvittavien akustiikan osa-alueiden perusteita ja käytössä olevien numeeristen mallinnusmenetelmien soveltuvuutta kuunteluhuoneiden suunnitteluun. Työn toteutusosassa esitetään käytännön toteutusmerkkinä Teknillisen korkeakoulun akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion kuunteluhuoneen suunnittelu ja akustiikan mallinnus.

Kuunteluhuone voi olla periaatteessa mikä tahansa tila, jossa kuunnellaan joko tallennettua tai muutoin tuotettua signaalia. Kuunteluhuoneen akustiset vaatimukset vaihtelevat merkittävästi käyttötarkoituksen asettamien vaatimusten mukaisesti. Tässä työssä on keskitytty erääseen kuunteluhuoneiden erikoistapaukseen, standardoituun ja kansainvälisten suositusten mukaiseen referenssikuunteluhuoneeseen. Tyypillisesti tällaisia tiloja tarvitaan kuuntelukokeissa, joita suoritetaan tuotekehityksessä ja laaduntarkkailussa. Pääasiallisia käyttäjiä referenssikuunteluhuoneille ovat kansalliset radio-, televisio- ja teleyhtiöt, tutkimuslaitokset ja kulutuselektroniikkateollisuus.

Työssä verrataan myös eri mallinnusmenetelmiä toteutetussa huoneessa mitattuihin arvoihin. Osa tuloksista on aiemmin esitetty huonetta ja sen suunnittelua käsittelevissä kansainvälisissä konferenssiesitelmissä, joita projektin aikana on julkaistu kolme, Savioja *et al.* (1996), Järvinen *et al.* (1997) ja Järvinen *et al.* (1998). Lisäksi huoneessa käytetystä soladiffusorirakenteesta on tehty patenttihakemus.

1.1. Työn tavoitteet ja sisältö

Opinnäytetyö, jonka yhteydessä toteutetaan käytännössä myös jokin toimiva laite, on kirjallisen osuutensa osalta aina kompromissi käytännön ja teorian välillä. Kuunteluhuonehankkeen aikana ehdottomasti suurin työmäärä käytettiin huoneen toteutuksen valvontaan ja rakennusvaiheen käytännön ongelmien ratkaisemiseen. Monasti tarkkaan suunniteltu yksityiskohta joudutaan toteutusvaiheessa muuttamaan käytännön syistä ja lopullinen yksityiskohtien toteutus on usein kaukana suunnitellusta, siksi toteutuksen tarkka kuvaaminen on käytännössä mahdotonta tai ainakin tarpeetonta.

Työn kirjallisen osan aluksi luvussa kaksi esitetään hankkeen motiivit ja selvitetään kuunteluhuoneiden akustiikkaa ja äänikentän ominaisuuksia kuunteluhuoneessa. Samoin esitellään referenssikuunteluhuoneilta edellytettäviä akustisia ominaisuuksia, jotka määräytyvät lähinnä huoneen geometrian ja mitattavien akustisten tunnuslukujen

perusteella. Näistä tärkeimmät ovat jälkikäytäntö-aika ja taustamelutaso. Referenssi-kuunteluhuoneen akustisen suunnittelun reunaehdot on määritelty varsin tarkoin kansainvälisissä kuunteluhuonesuosituksissa ja –standardeissa. Kuunteluhuoneen tulevan käytön kannalta oli oleellista valita suunnittelutavoitteet siten, että toteutettava huone olisi käyttökelpoinen erilaisiin kokeisiin myös tulevaisuudessa ilman merkittäviä muutostarpeita. Työssä esitellään tärkeimmät kuunteluhuoneita koskevat standardit ja suositukset. Referenssi-kuunteluhuonestandardia on vertailtu ja valintaa toteutetun huoneen osalta perustellaan.

Luvun kolme aluksi johdetaan aaltoyhtälö sekä tärkeimmät akustiset suureet. Samoin esitetään aaltoyhtälön ratkaisu suorakaiteen muotoisessa huoneessa ja äänen heijastuminen rajapinnoista. Kuunteluhuoneen akustiikan käsittelyssä on tärkeää ymmärtää äänikentän luonteen muuttuminen taajuuden funktiona deterministisestä tilastolliseksi. Tämän muutosprosessin havainnollistamiseksi esitetään ominaistajuustiheyden käsite ja sen avulla suoritetaan jako aaltoteoreettisesti ja diffuusisti käyttäytyvän äänikentän välillä.

Kuunteluhuonehankkeen eräänä tarkoituksena oli selvittää erilaisten numeeristen äänikentän ratkaisumenetelmien soveltuvuutta kuunteluhuoneiden akustiikan mallintamiseen. Huoneakustiikan tärkeimmät numeeriset pieni- ja suurtaajuusmallinnuksen menetelmät on esitelty luvussa neljä.

Merkittävän osan raportoidusta työstä muodostaa huoneen mallinnus, jota on tehty useilla eri menetelmillä ja ohjelmistoilla. Työn uutuusarvosta merkittävä osa muodostuu tehdystä pientaajuusmallinnuksesta. Huoneen käytännön suunnittelun kannalta merkittävämpi osuus on liittynyt suurtaajuusmallintamiseen. Huoneen mallinnusta on esitelty luvussa viisi.

Luvussa kuusi on kuvattu huoneen suunnitteluprosessi. Samalla esitetään ne rakennustekniset ja akustiset ratkaisut, joilla kaksi varastohuonetta muutettiin kuunteluhuoneeksi ja tarkkaamotilaksi. Luvussa pyritään myös muodostamaan synteesi käytännöllisten ja akustisten vaatimuksien toteuttamisesta ja esittämään aiemmin käsitellyn teorian pohjalta syyt valittuihin ratkaisuihin. Osa käytännössä paljon työtä vaatineista ja osin ulkoisina palveluina hankituista suunnittelutehtävistä kuten sähkö- ja ilmastointisuunnittelu on jätetty tarkoituksellisesti pois.

Huoneessa toteutetuista akustisista ratkaisuista ehdottomasti mielenkiintoisin on huoneen soladiffusorit. Toteutetulla rakenteella on arvioitu olevan niin suuri uutuusarvo, että sille on haettu patenttisuojaa. Rakenteen edistyksellisyyden esittäminen edellyttää kohtuullisen määrän soladiffusoreiden teoriaa ja siksi päädyttiin käsittelemään toteutettua rakennetta ja sen käyttöä kuunteluhuoneessa erillisessä luvussa seitsemän.

Huoneen mallinnus, suunnittelu sekä suunnitelman verifiointi edellyttivät suurehkoa määrää erilaisia mittauksia. Mittauksia suoritettiin jo paljon ennen kuin huoneen varsinaisen suunnittelu oli edes alkanut. Viimeiset mittaukset, jotka liittyivät huoneen akustisten ominaisuuksien verifiointiin, suoritettiin hankkeen lopuksi. Käytetyt mittausmenetelmät ja järjestelmät sekä tulokset on esitelty luvussa kahdeksan.

Työn lopuksi yhteenvedossa pyritään kriittisesti arvioimaan huoneen onnistumista käyttökokemusten perusteella. Samalla pyritään esittämään suosituksia kuunteluhuoneiden ja muiden pienten tilojen mallintamiseksi.

2. Kuunteluhuoneet

Tarve erityisen kuunteluhuoneen käyttöön syntyy tehtäessä kuuntelukokeita tai suori-
tettaessa muutoin kriittistä kuuntelua. Huoneelle asetettavat vaatimukset muotoutuvat
sen mukaisesti, mitä huoneessa pääsääntöisesti tehdään. Esimerkiksi kuulokekuunteluna
tehtäviin kuuntelukokeisiin ei tarvita periaatteessa muuta kuin taustamelutasoltaan
riittävän hiljainen tila.

Suunniteltaessa tilaa, jota tullaan käyttämään kriittiseen kuunteluun ja kuuntelukokei-
siin, on ensimmäisenä selvitettävä kokeiden luonne ja käyttötarkoitus. On tärkeätä
huomata, ettei yhtä ideaalista kuunteluhuonetta ole olemassa. Se, kuinka kriittinen
tutkittava ilmiö on kuunteluhuoneen vaikutukselle, riippuu monista toisistaan riippu-
vista ja riippumattomista muuttujista, joita ovat muun muassa kuunteluvoimakkuus,
testisignaalien laatu, yhtäaikaisten kuuntelijoiden määrä sekä äänilähteiden tyyppi ja
määrä.

Kuunteluhuoneina käytetään paljon tiloja, joiden ensisijainen käyttö ei ole kuuntelu.
Tyypillisin esimerkki akustiikaltaan kuuntelukäyttöön suunnitellusta tilasta on äänitys-
studion tarkkaamo. Niiden ensisijainen käyttötarkoitus ei kuitenkaan ole kuuntelukäyttö
vaan äänitystilanteen monitorointi ja miksaus, joiden suorittaminen edellyttää korkeata-
soisen kuuntelutilan käyttöä. Monet tarkkaamoiden suunnittelukriteerit ovat sinällään
käytössä kuunteluhuoneissa, mutta niiden erityisongelmat ja -ratkaisut kuten äänipöy-
dän aiheuttama heijastus ja seinään upotetut kaiuttimet ovat harvoin käytössä muissa
tiloissa. Tarkkaamoiden akustiikkasuunnittelussa tavoitteena ei myöskään ole pyrkiä
mihinkään tyypilliseen tulokseen vaan suunnittelun tavoitteen asettelu on melko vapaa.

Kuunteluhuoneeksi voidaankin määritellä tila, jonka pääasiallinen käyttötarkoitus on
kuuntelu. Toinen vaihtoehtoinen määrittely on, että kuunteluhuone on tila, jonka ratkai-
sut on tehty kuuntelun asettamien vaatimusten mukaisesti. Ensimmäinen määrittely ei
sinällään edellytä kuunteluhuoneen akustiikalta mitään erityisiä vaatimuksia. Jälkim-
mäinen määritelmä taas esittää, että kuunteluhuone on tila, joka on toteutettu akustisten
vaatimusten ehdoilla. Useimmat kuunteluhuoneet ovat jotain näiden kahden määritel-
män väliltä.

Erityisen luokan kuunteluhuoneiden joukossa muodostavat kansainvälisten standardien
ja suositusten määrittelemät referenssikuunteluhuoneet. Näissä suosituksissa tavoitteena
on riittävällä tarkkuudella määritellä kuunteluhuoneen akustiikka siten, että eri huoneis-

sa tehtyjen kuuntelukokeiden tulokset ovat vertailukelpoisia. Tällaisia tiloja tarvitaan lähinnä kaiutinkuunteluna tehtävissä kuuntelukokeissa. Näiden kokeiden määrä on kasvanut merkittävästi viime vuosina kehittyneiden audiokoodausmenetelmien ja tilaäänentoiston laadunarvioinnin tarpeiden vuoksi.

Kuunteluhuoneen rakentamisen motiivien ymmärtämiseksi on syytä käsitellä lyhyesti kuuntelukokeita ja sitä, mitä vaatimuksia kokeet asettavat niissä käytettävälle tilalle.

2.1. Kuuntelukokeet

Kuuntelukokeet voidaan luokitella joko aistinvaraiseksi tutkimukseksi tai kokeellisen psykologian osaksi riippuen siitä, mitä ollaan tutkimassa. Se kummasta on kysymys, riippuu koeasetelmasta. Aistinvarainen tutkimus tuntuu luontevammalta viitekehykseltä silloin, kun tutkitaan jonkin tuotteen ominaisuuksia kuuntelemalla, ja kokeellinen psykologia silloin, kun tutkitaan ihmisen kuuloaistin toimintaa.

Oleellista kummassakin lähestymistavassa on se, että mittalaitteena tai havainnoitsijana käytetään ihmistä. Syynä tähän valintaan on joko se, että ihmisen kuulo on ylivoimainen mittalaite tai se, että halutaan tietää miten ihminen kuulee. Ihminen ei ole kuitenkaan perinteisessä mielessä erityisen hyvä mittalaite, koska kokeiden toistettavuus koehenkilöiden välillä on kuuloaistin absoluuttisten erojen ja mieltymysten vuoksi huono ja samankin henkilön tulokset saattavat vaihdella päivästä toiseen. Usein ihmetelläänkin, onko nykyään enää mitään tarvetta suorittaa aikaa vieviä ja kalliita kuuntelukokeita, joiden tulosten hajonta ja toistettavuus ovat objektiivisiin mittauksiin verrattuna huono.

Todellisuudessa tänä päivänä kuuntelukokeita tehdään ja hyödynnytetään enemmän kuin koskaan ennen. Tähän on kaksi merkittävää syytä, joista toinen on äänen ja puheen perkeptuaalisten pakkausmenetelmien kehitystyö ja käyttöönotto. Näiden menetelmien toiminta perustuu kuulon kannalta redundantin informaation poistamiseen. Se, onko jokin informaatio kuulon kannalta redundanttia, voidaan arvioida ainoastaan kuuntelemalla. Tässä kehitystyössä tarvittavien kuuntelukokeiden määrä on niin suuri, että viime vuosina on kehitetty useita malleja, joiden käytöllä pyritään korvaamaan kuuntelukokeet. On kuitenkin muistettava, ettei tällainen malli ole koskaan tarkempi kuin ne kuuntelukokeet, joiden avulla malli on kehitetty.

Toinen merkittävä syy kuuntelukokeiden määrän merkittävään kasvuun on kuluttajatuotteiden äänenlaadun kehittämistyö. Erityisesti autoteollisuuden parissa kulutetaan

valtavasti voimavaroja tuotteiden äänenlaadun optimoimiseen, koska auton tuottaman äänen ja melun on havaittu vaikuttavan merkittävästi kuluttajien ostokäyttäytymiseen.

Oman merkittävän osan kuuntelukokeista muodostavat kuulotutkimuksen kokeet eli audiologia, josta tyypillisin esimerkki on ihmisen kuulokynnyksen määrittäminen.

Onnistuneen kuuntelukokeen avulla saadaan selville haluttujen muuttujien vaikutus tutkittavaan asiaan. Ellei kyseessä ole usein toistuva standardoitu kuuntelukoe, ongelmana on usein kyetä kehittämään yksinkertainen koeasetelma, jolla selvitetään ainoastaan tutkittavien muuttujien vaikutus ilman, että tuntemattomat ei toivotut muuttujat vaikuttavat tuloksiin. Tästä seuraa, että tärkein osa työstä tehdään ennen varsinaista koetta koesuunnitelmaa laadittaessa. Tutkittavia muuttujia voi olla yksi tai useampi, mutta koehenkilöt ja tutkimusympäristön olosuhteet lisäävät muuttujien määrää aina merkittävästi. Näiden ei toivottujen muuttujien vaikutusta voidaan vähentää keskiarvoistamalla tai tuntemalla olosuhteet ja niiden vaikutus riittävän hyvin.

Keskiarvoistusta käytetään tyypillisesti koehenkilöiden välisten erojen kompensointiin ja hyvin tunnettuja olosuhteita koeympäristön vaikutuksen minimointiin. Olosuhteiden osalta voidaan valita periaatteessa kahden eri vaihtoehdon välillä: optimaalisten tai tyypillisten. Optimaalisiin olosuhteisiin on mielekästä pyrkiä tilanteessa, jossa halutaan tietää, onko jokin ero tutkittavassa muuttujassa yleensä mahdollista kuulla. Tämän tyypistä tilannetta kannattaa tavoitella, kun halutaan tietää, kuinka suurella todennäköisyydellä jokin tekijä on tilastollisesti merkittävä.

Pelkistettyjenkin kuuntelukokeiden osalta on muistettava, että aistien toiminta on yhtäaikaista, eikä ihminen pysty keskittymään yhdellä aistilla tehtäviin kokeisiin, jos muut aistit välittävät mielenkiintoista informaatioita yhtäaikaisesti. Tästä syystä kuunteluhuoneiden suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota myös huoneen visuaaliseen ilmeeseen ja lämpötilan tasaisuuteen siinä missä akustiikkaankin.

Tyypillisesti kuuntelukokeet yhdistetään äänentoistolaitteiden laadunarviointiin. Syynä tähän on se, että kuuntelukokeiden tärkeys audiolaitteiden laadun arvioinnissa on tiedetty jo pitkään (Fletcher, 1941). Lisäksi alan lehdistö on suorittanut kuuntelukokeita rutiininomaisesti arvioidessaan erityisesti kaiuttimien laatua. Siksi onkin hämmästyttävää, että kokeiden standardointityö alkoi International Electrotechnical Commissionin (IEC, 1981) piirissä kuitenkin vasta 1970-luvulla. Esimerkiksi puhelintekniikassa kuuntelukokeet ja niiden standardit ovat olleet käytössä jo huomattavasti aiemmin.

Viime vuosina juuri audio- ja puheenkoodausmenetelmien kehittymisen mukana vaatimukset kuuntelukokeiden toistettavuuden ja luotettavuuden osalta ovat tulleet erittäin tärkeiksi. Tämä on hyvin ymmärrettävää, koska koodausstandardien patentti- ja lisenssimaksut ovat huomattavia ja päätökset valittavista menetelmistä tehdään kuuntelukokeiden tulosten perusteella.

Alunperin kuunteluhuonehankkeen motiivina oli juuri tarve luotettaviin ja toistettaviin kuuntelukokeisiin Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion tutkimushankkeissa. Eräs tärkeimmistä tekijöistä kokeiden luotettavuuden parantamisessa oli laadukkaan ja hyvin tunnetun kuuntelu ympäristön rakentaminen laboratorioon.

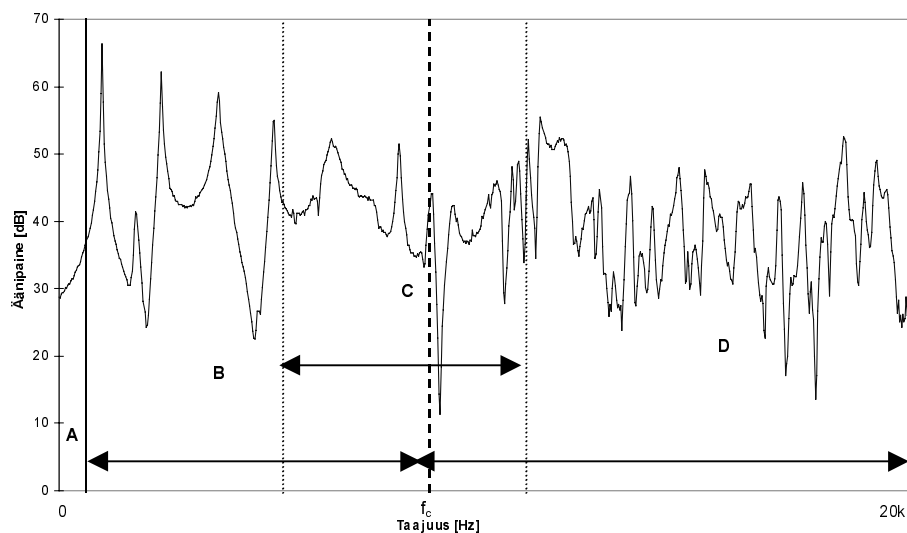
2.2. Äänikenttä kuunteluhuoneessa

Äänikentän käyttäytyminen tilavuudeltaan pienehkössä tilassa kuten kuunteluhuoneessa tai automatkustamossa voidaan jakaa taajuusalueessa luonteeltaan neljään erilaiseen osaan kuvan 2.1 mukaisesti (Geddes, 1998).

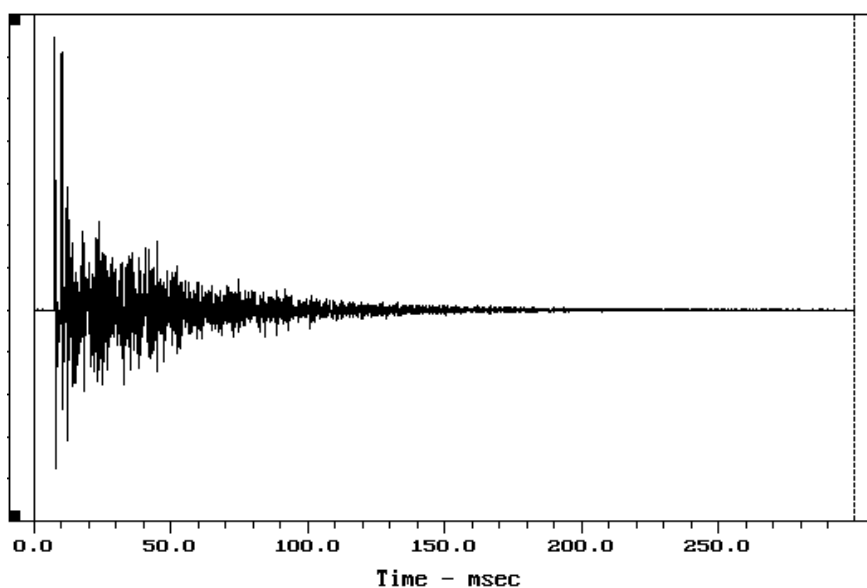
Alimman ominaistajuuden alapuolella (alue A) äänipaine on tilan kaikissa pisteissä lähes vakio. Alueella B äänikentän ominaisuudet määräytyvät tilan ominaismuotojen perusteella, jotka voidaan ratkaista analyttisin (kappale 3.2.) tai numeerisin menetelmin (kappale 4.1.) Kappaleessa 3.2.2. määritellään kriittinen Schroeder-taajuus f_c , jota suuremmilla taajuuksilla äänikentän ominaisuudet voidaan käsitellä tekemällä oletus diffuusista äänikentästä. Sen teoriaa esitellään kappaleessa 3.4.. Diffuusialuetta merkitään kuvassa D:llä. Todellisuudessa äänikentän luonne ei muutu yhtäkkisesti vaan liukuvasti siirtymäkaistalla, jota kuvassa merkitään C:llä. Äänikentän mallinnuksen kannalta suurimman ongelman muodostaa juuri siirtymäkaista, koska tällä taajuusalueella äänikentällä on selkeästi sekä deterministisiä että stokastisia ominaisuuksia. Siirtymäkaistalle ei ole myöskään pystytty kehittämään toimivia numeerisia mallinnusmenetelmiä tai työkaluja, joilla siirtymäkaistan käyttäytymistä voitaisiin approksimoida riittävällä tarkkuudella.

Eräs mahdollisuus äänikentän tarkasteluun on äänilähteen ja vastaanottopisteen välisen yksikköimpulssivastefunktion tarkastelu, joka sisältää kaiken informaation pisteiden välisestä järjestelmästä, mikäli sitä voidaan pitää lineaarisena ja aikainvarianttina. Huoneakustiikassa tutkittavaa tilaa voidaan yleensä pitää lineaarisena ja aikainvarianttina, merkittävän poikkeuksen muodostavat äänentoistojärjestelmät, joissa käytetään epälineaarisia komponentteja kuten dynamiikan kompressointia. Impulssi-

vaste yhden lähde- ja vastaanottopisteen välillä ei kuitenkaan kuvaa huoneen akustiikkaa erityisen hyvin, koska äänikenttä muuttuu merkittävästi paikan funktiona erityisesti pienillä taajuuksilla. Lisäksi yksittäinen impulssivaste ei sisällä mitään tietoa äänen tulosuunnasta tai äänilähteen suuntaavuudesta. Kuunteluhuoneen mitattu impulssivaste on esitetty kuvassa 2.2.

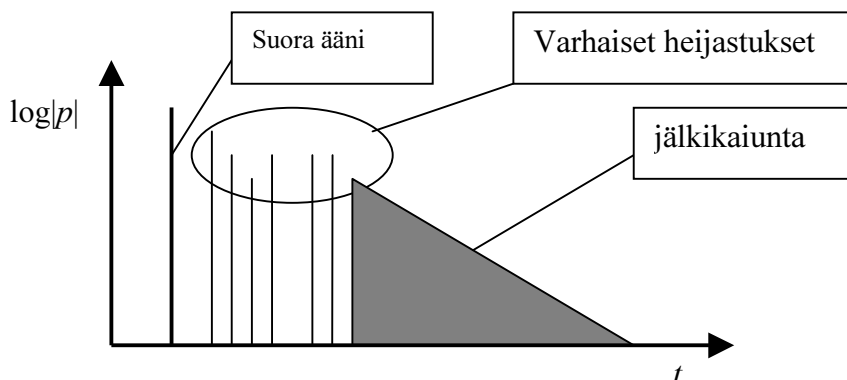


Kuva 2.1 Äänikenttä pienessä huoneessa, symbolit A, B, C ja D kuvaavat äänikentän jakautumista taajuusalueessa eri osiin.



Kuva 2.2 Kuunteluhuoneen impulssivaste.

Yleensä impulssivasteen sijasta tarkastellaan neliöityä impulssivastetta eli energia-aikavastetta, koska vaiheen käyttäytymistä diffuusissa äänikentässä voidaan pitää satunnaisena (Kuttruff, 1995).



Kuva 2.3. Huoneen energia-aikavaste.

Tarkasteltaessa äänikentän ajallista rakennetta energia-aikavasteen avulla voidaan äänikenttä jakaa ajallisesti kolmeen osaan. Kuvassa 2.3. on esitetty yksinkertaistettu energia-aikavaste, josta voidaan erottaa suora ääni, varhaiset heijastukset ja jälkikaiunta.

Myöskin aikatarkastelussa äänikentän käsittely voidaan jakaa kahteen osaan. Tässä tapauksessa jako voidaan tehdä heijastustiheyden mukaan. Suora ääni ja varhaiset heijastukset voidaan mallintaa esimerkiksi geometrisen akustiikan menetelmillä Schroeder-taajuuden yläpuolella ja jälkikaiunta voidaan mallintaa äänikentän tilastolisten ominaisuuksien avulla.

Äänikentän ajallisen vaimenemisen osalta huoneakustiikan teoria perustuu konserttisalien akustiikan tutkimukseen, jossa on kehitetty suuri joukko kuuntelukokeisiin perustuvia tunnuslukuja. Näitä on esitelty esimerkiksi Barronin (1993) ja Beranekin (1996) teoksissa. Useimmat näistä tunnusluvuista perustuvat energian ajallisen vaimenemisen tarkasteluun. Lisäksi salien tarkastelussa tulee huomioida heijastusten tulosuunta (Barron 1973).

Äänikenttä konserttisaleissa on kuitenkin täysin erilainen kuin kuunteluhuoneessa, eikä salien arvioimiseen kehitettyjä tunnuslukuja ja niiden optimiarvoja voida soveltaa kuunteluhuoneiden akustiikan tarkasteluun. Viime vuosina on yritetty löytää sekä kuunteluhuoneisiin sopivia uusia tunnuslukuja (Arato-Borsi ja Fures, 1999) että löytää optimiarvoja salien tunnusluvuille kuunteluhuoneissa (Chesnokov ja SooHoo, 1997). Yritykset ovat alustavia, eikä tuloksia ole varmennettu riippumattomilla kuuntelukokeilla.

2.3. Referenssi kuunteluhuoneelle asetettavat akustiset vaatimukset

Erityisesti kuuntelukokeisiin suunniteltujen referenssi kuunteluhuoneiden akustiikalle asetetaan normaaleja kuunteluhuoneita huomattavasti tiukemmat vaatimukset. Näiden vaatimusten tarkoituksena on varmistaa, että saman suosituksen tai standardin mukaan tehtyjen huoneiden akustisilla ominaisuuksilla ei ole sellaisia eroja, joiden voidaan arvioida vaikuttavan kuuntelukokeiden tuloksiin.

Referenssi kuunteluhuoneen tulisi edustaa akustiikaltaan suosituksen tai standardin kohteena olevien huoneiden keskiarvoa, sillä erotuksella, että sen akustiikassa ei saa esiintyä anomaliaita kuten tärykaikua tai voimakasta taustamelua. Jälkimmäinen vaatimus perustuu siihen, että huoneen akustiikka ei saa estää erojen kuulemista kuuntelukokeessa.

Kuinka keskimääräinen akustiikka tulisi määrittellä ?

On itsestään selvää, ettei yksi tila voi edustaa sekä keskimääräistä olohuonetta että studiotarkkaamoaa. Asian monimutkaistamiseksi on muistettava, etteivät olohuoneetkaan ole samanlaisia. Pelkästään sillä, miten rakennuksen runkorakenne on toteutettu, on merkittävä vaikutus huoneen pienten taajuuksien akustiikkaan. Myös eri maiden sisustustyyli poikkeavat merkittävästi toisistaan myös akustisilta ominaisuuksiltaan. Siinä, missä kokolattiamatto on yleinen Englannissa, sitä on parketti Suomessa.

2.3.1. *Huoneen geometria*

Tyypillisimmät pienten huoneiden akustiikan ongelmat liittyvät pienten taajuuksien käyttäytymiseen. Pienessä tilassa ominaistajuustiheys on niin pieni, että yksittäiset ominaistajuudet aiheuttavat korostumia taajuusvasteeseen. Toinen ongelma on vähäinen absorptio pienillä taajuuksilla, jonka seurauksena ominaistajuudet eivät vaimene riittävästi ja täten värjyvät toistoa.

Ominaistajuudet määräytyvät huoneen mitoista. Suorakaiteen muotoisen huoneen ominaistajuudet voidaan määrittää kaavalla (3.2.10). Kaavaa käytettäessä tehdään oletus äärettömän jäykistä seinistä. Oletusta voidaan pitää validina, mikäli seinät ovat rakenteeltaan massiiviset. Käytännössä todellisen huoneen seinillä on aina jokin kompleksinen vaimennus. Vaimennuksen reaali-osa vaikuttaa ominaismuotojen leveyteen ja imaginääriosa ominaismuotojen taajuuteen (Jacobsen 1979a).

Vuosien saatossa on yritetty useita kertoja määrittää optimaalisia suhteita huoneen mittoille. Näistä tutkimuksista on useita esimerkkejä (Bolt, 1947), (Louden, 1971), (Bonnello, 1981), (Walker, 1996). Lisäksi muita vuosien mittaan esitettyjä kriteereitä on koottu seuraaviin julkaisuihin: Backman (1999), Everest (1993) sekä Davis ja Davis (1987). Näissä tutkimuksissa on pyritty määrittämään suhteet, joilla saavutetaan mahdollisimman tasainen vaste pienillä taajuuksilla. Yleinen periaate on löytää huoneen pituuden, leveyden ja korkeuden välille suhteet, joiden seurauksena alimpien ominaistaajuuksien jakauma on tasainen. Tutkimuksissa huoneiden geometria on oletettu suorakulmaiseksi, koska tälle geometrialle äänikenttä on mahdollista ratkaista analyttisesti varsin yksinkertaisesti. Muille geometrioille ei optimaalisia mittoja ole yritetty määrittää. Syynä tähän on se, ettei muille käyttökelpoisille geometrioille ole olemassa analyttistä ratkaisua.

Kappaleessa neljä esitettävillä aaltoyhtälön ratkaisuun perustuvilla numeerisilla ratkaisumenetelmillä on mahdollista määrittää optimaaliset mittasuhteet mielivaltaisille geometrioille. Tällaista tutkimusta ei ole kuitenkaan tehty tähän mennessä.

Toinen mielenkiintoinen puute tähän mennessä tehdyssä tutkimuksessa on se, ettei huoneiden optimaalisia geometrioita määritettäessä ole käytetty kuuntelukokeita vaan ainoastaan taajuusvastetarkasteluja. Nykyiset mallinnustyökalut mahdollistaisivat tehokkaan pientaajuusmallinnuksen myös muille geometrioille. Lisäksi hybridimalleja ja auralisaatiota (Kleiner *et al.*, 1993) käyttäen olisi mahdollista suorittaa geometrioiden kuuntelukokeisiin perustuva vertailu.

Kuunteluhuonestandardeissa on annettu määräyksiä huoneiden dimensioiden suhteista. Useissa myöhemmin esiteltävissä standardeissa on huoneen optimaalinen geometria määritelty Walkerin (1992) esittämän ominaistaajuuksien erotusten neliöiden keskiarvokriteerillä. Huoneen geometrian laatu voidaan laskea kriteerin mukaisesti seuraavalla kaavalla,

$$Q_w = 10 * \sum_1^N \frac{(f_{n+1} - f_n)^2}{N-1}, 1 \leq n \leq N \quad (2.3.1)$$

jossa N on tarkasteltavien ominaistaajuuksien lukumäärä ja n on ominaistaajuuden järjestysnumero. Laatuindeksin Q_w pienempi arvo merkitsee parempaa huonetta. Walkerin esittämä kriteeri pätee kaikille huonegeometrioille, joiden ominaistaajuudet pystytään määrittämään. Kriteerin huono puoli on se, ettei sitä ole arvioitu kuuntelukokeilla.

Pientaajuusongelmat pahenevat huoneen koon pienentyessä, koska mooditiheys pienee tilavuuden suhteessa. Huoneen mittojen kasvattaminen yhdessä dimensiossa ei auta ongelmiin. Huoneen on myös oltava riittävän korkea, koska muutoin kuulija voi joutua korkeussuunnassa huoneen keskelle, jossa on ominaistaajuuksien napa- ja nollakohtia. Lisäksi liian matalassa huoneessa kattoheijastukset ovat usein hyvin voimakkaita. Yleisesti ottaen kuunteluhuoneen tulisi siis olla mahdollisimman suuri, toisaalta viidenkymmenen neliön kuunteluhuone ei edusta tyypillistä olohuonetta ainakaan Suomessa.

Eräs usein esitetty näkemys, jonka mukaan alimpiin ominaismuotoihin liittyviä ongelmia esiintyy vain suorakaiteen muotoisissa huoneissa, on väärä, sillä ominaismuotoja esiintyy kaikissa suljetuissa tilavuuksissa. Ainoa seikka, joka erottaa suorakaiteen muotoisen geometrian muista mahdollisista geometrioista on ominaistaajuuksien ja niiden painejakauman yksikertainen ennustaminen analyyttisten kaavojen avulla.

Huoneen rakenteilla voidaan vaikuttaa merkittävästi pientaajuusominaisuuksiin. Kevyt-rakenteisessa huoneessa on usein rakenteista aiheutuvaa pientaajuusabsorptioita, eikä erillisiä resonaattoreita tarvitse käyttää. Toisaalta, jos huoneen kaikki rakenteet ovat samanlaisia, on olemassa vaara liian suuresta absorptiosta rakenteen resonanssitaajuudella.

Eräs äskettäin esitetty mahdollisuus ominaismuotojen päällekkäisyyden lisäämiseksi pienillä taajuuksilla on diffusorien käyttö (Angus, 1995). Ongelmana on vain tarvittavien rakenteiden suuri koko .

2.3.2. *Jälkikaiunta-aika*

Jälkikaiunta-ajalla on merkittävä vaikutus koettuun äänenlaatuun, lisäksi muuttuminen taajuuden funktiona on huomioitava. Kuunteluhuoneen jälkikaiunnan tulisi vastata tyypillisen käyttöympäristön tilannetta. Toisaalta tiedetään, että jälkikaiunta-ajan ollessa huomattavan pitkä ei kunnollista tilantuntua ja stereokuvaa voida saavuttaa.

Jälkikaiuntaan voi vaikuttaa merkittävästi huoneen sisustuksella tai käyttämällä erilaisia absorptiomateriaaleja. Tutkimuksissa, joissa on mitattu kymmenien olohuoneiden akustiikkaa Englannissa ja Yhdysvalloissa, on todettu jälkikaiunta-ajan arvon olevan 0,30-0,45 sekunnin välillä keskitaajuuksilla (Bradley, 1986), (Burgess, 1985) ja (Jackson, 1972). Toisaalta tiedetään, että esimerkiksi trooppisen vyöhykkeen maissa tyypillinen jälkikaiunta-aika on monesti lähellä sekuntia. Studiotarkkaamoiden jälkikaiunta-

aika on huomattavasti lyhyempi kuin olohuoneissa, siksi ammattikäyttöön tarkoitettujen laitteiden testit tulisi tehdä vaimennetummassa tilassa kuin kotilaitteiden.

Jälkikäiunta-ajan lisäksi on otettava huomioon myös absorption sijoittelu tilassa, sillä eri suunnista tulevien heijastusten kuuluvuus on erilainen myös pienissä huoneissa (Bech, 1994). Absorption sijoittelu poikkeaa myös merkittävästi erilaisissa tiloissa. Yleensä katoissa katto on täysin heijastava, sen sijaan tarkkaamoissa käytetään yleensä alas laskettua kattoa mm. ilmastointilaitteiden sijoittamiseen. Niinpä kuluttajalaitteiden testaamiseen tarkoitetuissa standardeissa katon edellytetään olevan pääasiassa ääntä heijastava.

2.3.3. *Kaiuttimien ja kuulijoiden paikat*

Kaiuttimien ja kuuntelupaikan valinnalla on merkittävä vaikutus äänenlaatuun. Mikäli kaiutin tai kuulija sijoitetaan lähelle huoneen rajapintoja, ei voida välttyä pienten taajuuksien korostukselta. Samoin optimitilanteessa huoneen tulisi olla täysin symmetrinen ja kuulijan keskiakselilla. Tämä on erityisen tärkeää, mikäli kaiuttimien tilantoistokykyä halutaan mitata. Tästä seuraa, että huoneessa voi olla vain yksi optimaalinen kuuntelu-paikka. Erityisen tarkkoissa kuuntelukokeissa voi tästä syystä olla vain yksi kuulija kerrallaan.

Kuunteluhuoneissa kuuntelijat ja kaiuttimet joudutaan sijoittamaan varsin lähelle huoneen rajapintoja. Ne taajuudet, joiden aallonpituuden neljännes on suurempi kuin lähde- tai vastaanottopisteiden etäisyys seinistä, voimistuvat interferenssin seurauksena. Tätä ilmiötä kutsutaan Waterhouse-ilmiöksi sitä koskevan teorian kehittäjän mukaan (Waterhouse, 1955). Niinpä kaiutinkuuntelua koskevissa standardeissa ja suosituksissa on määräyksiä kuuntelupisteiden ja kaiutinten sijoittelusta.

Laajoissa tutkimuksissa on todettu, että kaiuttimien paikka on merkittävämpi muuttuja kuuntelukokeessa kuin kaiutin sinänsä, mikäli kaiuttimet ovat laadultaan suurin piirtein samanlaisia (Olive, 1989). Onkin ehdotettu, että kuuntelukokeissa tulisi käyttää useita kaiutin- ja kuuntelijapaikkakombinaatioita (Bech, 1989).

2.3.4. *Taustamelu*

On selvää, että kuuntelukokeiden onnistumisen kannalta on tärkeää taata mahdollisimman häiriötön ympäristö. Standardien vaatimukset taustamelun osalta vaihtelevat mer-

kittävästi. Eräs syy tähän on se, että etenkin digitaalitekniikan käyttöönoton seurauksena toistolaitteiden signaali-kohinasuhde on parantunut merkittävästi. Tämän seurauksena käytettävissä oleva dynamiikka on kasvanut merkittävästi. Niinpä uusimmissa standardeissa taustameluvaatimus A-äänitasolla mitattuna on noin 20 desibeliä tiukempi kuin ennen digitaalitalennuksen yleistymistä laadituissa standardeissa. Hiljainenkin melu koetaan häiritsevänä, jos melussa on havaittavissa jaksollisuutta tai äänesmäisiä komponentteja. Myöskin impulssimainen melu on energiasisältönsä verrattuna häiritsevää. Taustamelun osalta standardeissa edellytetäänkin, ettei melussa saa olla em. ominaisuuksia.

Taustamelutasolla on merkittävä vaikutus huoneen rakennuskustannuksiin. Mikäli huoneesta halutaan tehdä tiukimpien vaatimusten mukainen, on se rakennettava huone-huoneessa-periaatetta käyttäen. Huone-huoneessa-periaatella tarkoitetaan, että varsinainen huone rakennetaan toisen huoneen sisälle siten, että rakenteet erotetaan toisistaan tärinäeristimin. Myöskin kaikki huoneeseen tulevat ilmastointi- yms. asennukset on toteutettava joustavilla liitoksilla äänisiltoja estämiseksi.

Toinen merkittävästi kustannuksia lisäävä tekijä melutasoa alennettaessa on ilmastointin rakentaminen riittävän hiljaiseksi. Tämä johtuu siitä, että hiljainen ilmastointi on mahdollinen vain pienillä ilman virtausnopeuksilla. Niinpä puhaltimet, kanavat ja pääte-laitteet on mitoitettava huomattavasti suuremmiksi kuin normaalisti edellyttäisiin.

2.4. Kuunteluhuonestandardit

Ensimmäinen vakava yritys audiolaitteiden kuuntelukokeiden standardoinniksi alkoi International Electrotechnical Commissionin piirissä 1970-luvulla. Tämän työn lopputuloksena syntyi IEC:n standardi 268-13 ”kaiuttimien kuuntelukokeet” (IEC, 1981). Kokeiden standardointityö jakautui kahteen osaan: koeolosuhteiden määrittelyyn ja tulosten tilastolliseen analysointiin. Standardoinnissa keskityttiin aluksi kuluttajakaiuttimien testaamiseen.

Koeolosuhteiden määrittelytyössä merkittävin osa oli standardikuunteluhuoneen määrittely. Ensimmäinen prototyyppi standardikuunteluhuoneesta rakennettiin Kanadaan National Research Councilin tiloihin (Toole, 1982). Tämän prototyyppihuoneen ominaisuudet määriteltiin myöhemmin IEC 268-13-standardin optimaalisen huoneen mitoiksi.

Toinen merkittävä osa standardointityöstä tehtiin Ruotsissa Karolinska Institutetissa, jossa kehitettiin menetelmät koetulosten analysointiin (Gabrielsson, 1979). Myös tämän tutkimusryhmän työn tulokset päätyivät osaksi IEC-standardia.

Eräs merkittävä kuuntelukokeita pitkään hyödyntänyt taho on radioyhtiöt, joissa kuuntelukokeita on perinteisesti tehty kahdessa tarkoituksessa: ohjelmien ja siirtoketjun äänenlaadun arvioinnissa sekä tuotannossa käytettävien laitteiden valintatyössä. Vanhimmat kansainväliset radioyhtiöiden kuunteluhuonestandardit ovat 1960-luvulta (OIRT 1963).

Alla olevassa esityksessä esitellään toteutetun huoneen suunnittelun apuna käytettyjä standardeja. Tekijän tiedossa on myös joukko muita standardeja ja suosituksia, jotka eivät olleet toteuttamiskelpoisia esimerkiksi huoneen pinta-alaan liittyvien vaatimusten vuoksi (EBU 1994) tai siksi, että ne olivat liian ylimalkaisia (AES 1996) tai vanhentuneita (OIRT 1963). Näistä standardeista EBU:n suositus perustuu pitkälti ITU:n standardiin ja AES-standardi on kuunteluhuoneen akustiikkaa koskevilta vaatimuksiltaan lievennetty versio IEC:n standardista.

2.4.1. Standardi IEC 268-13

IEC:n standardi oli ensimmäinen yritys kuluttajalaitteiden kuuntelukokeiden standardoimiseksi. Siinä on käsitelty kaikki kuuntelukokeen suunnitteluun, toteuttamiseen ja tulostulosten analyysiin liittyvät seikat. Hyväksymisvuoden 1985 jälkeen audiotekniikka on kuitenkin muuttunut merkittävästi. Digitaaliset tallennusformaatit ja monikanavatoisto ovat muuttaneet myös kuunteluhuoneelle asetettavia vaatimuksia merkittävästi. Standardi onkin parhaillaan revisioinnin kohteena. Tämän hetkiseen standardiluonnokseen on lisätty eräitä piirteitä ITU:n suosituksesta.

Alla on esitetty lyhyesti IEC-standardin kuunteluhuoneelle asettamat vaatimukset. Sulussa on esitetty optimimitat.

Pituus: > 600 cm (670)

Leveys: > 400 cm stereokuuntelussa (420)

Korkeus: 250-300 cm (280)

Tilavuus: 60-110 m³ (80)

Jälkikaiunta-ajan tulee olla 0,3-0,6 sekunnin välillä (250-4000 Hz). Mikäli huoneessa tehdään kansainvälisen tason testejä, T_{60} tulisi olla $0,4 \pm 0,05$ s. T_{60} saa poiketa tersseitäin em. välillä enintään 25% keskiarvosta. Yli 4 kHz ja alle 250 Hz kaistoilla T_{60} saa poiketa yli 25% keskiarvosta, mutta se ei saa ylittää 0,8 sekuntia alle 250 Hz terssi-kaistoilla.

Taustamelutasolle esitetty vaatimus on nykymittapuun mukaan varsin lievä. A-painotettu äänitaso slow-aikavakiolla mitattuna ei saa ylittää 35 desibeliä. Melu ei saa myöskään sisältää jaksollisia, impulssimaisia tai tonaalisia komponentteja.

Huoneen pintoja koskevat seuraavat määräykset. Katon tulee olla pääosin ääntä heijastava ja lattian pääosin ääntä absorboiva. Kaiuttimien takana ja sivuilla olevien seinien tulee olla ääntä heijastavia. Kuuntelijoiden takana olevan seinän tulee olla vaimennettu siten, että voimakkaat koherentit heijastukset vaimentuvat. Tärykaiut tulee vaimentaa absorbenteilla tai ääntä hajottavilla rakenteilla.

Kaiuttimien tulee sijaita vähintään metrin etäisyydellä sivuseinistä ja 0,7 metrin päässä takaseinästä. Kuuntelijoiden tulee olla vähintään metrin päässä takaseinästä ja neljänkymmenen sentin etäisyydellä sivuseinistä. Lisäksi kuuntelijoiden tulee olla vähintään kuudenkymmenen senttimetrin päässä toisistaan. Kuunteluetäisyyden tulee olla vähintään kaksi metriä.

2.4.2. Suositus ITU-R BS.1116

International Telecommunications Unionin (ITU) suosituksen BS.1116 (ITU 1996) otsikko on vapaasti suomennettuna ”menetelmiä audiojärjestelmien pienten erojen subjektiiviseen laadunarviointiin monikanavatoisto mukaan luettuna”. Standardin mukaisia kuuntelukokeita tehdään jatkuvasti suuria määriä audiokoodauksen laadunar-

vioinnissa mm. MPEG-standardointiin liittyen. Standardissa on mukana vaatimukset mono-, stereo- ja 5.1- kuuntelulle, myös kuvan käytöstä kokeissa on annettu ohjeita.

Huoneelle on asetettu melko väljät pinta-alavaatimukset. Mono- ja stereokuunteluun sopivan huoneen tulee olla kooltaan 20-60 m², monikanavakuunteluun käytettävän huoneen tulee olla pinta-alaltaan hiukan suurempi, 30-70 m².

Huoneen muotoon kohdistuvat määräykset on esitetty kaavalla,

$$1,1 \times \frac{W}{H} \leq \frac{L}{H} \leq 4,5 \times \frac{W}{H} - 4 \quad (2.4.1)$$

jossa W on huoneen leveys, H korkeus ja L pituus. Lisäksi on huoneen dimensioille on annettu seuraava lisäehto

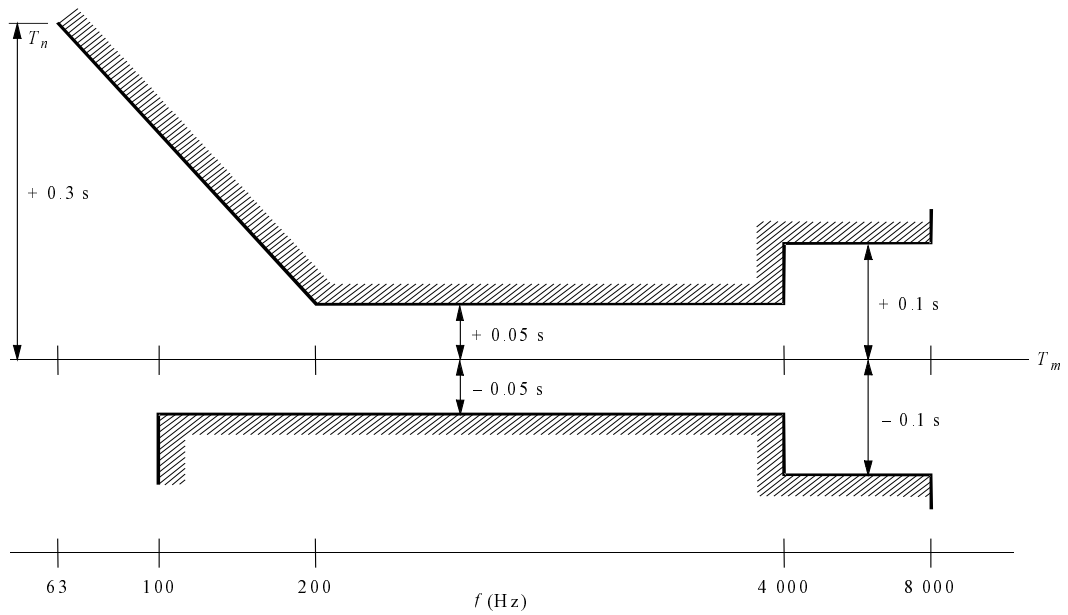
$$\frac{L}{H} < 3 \text{ ja } \frac{W}{H} < 3 \quad (2.4.2)$$

Jälkikaiunta-ajan optimikeskiarvo välillä 200 - 4000 Hz määritetään seuraavasti:

$$T_m = 0,25 \times \sqrt[3]{V/V_0} \quad (2.4.3)$$

Kaavassa T_m on huoneen tilavuudesta riippuva optimaalinen jälkikaiunta-aika ja V on huoneen tilavuus ja V_0 vertailutilavuus, jonka arvo on 100 m³. Suosituksen ensimmäisessä versiossa vuodelta 1992 vakion 0,25 sijasta käytettiin arvoa 0,30, mutta monikanavatoistolla suoritetuissa kuuntelutesteissä on havaittu lyhyemmän jälkikaiunta-ajan antavan paremman erottelun pienille eroille ääninäytteissä (Bech, 1997).

Jälkikaiunta-ajan poikkeamalle asetetut vaatimukset esitetään kuvassa 2.3.. Sallittu poikkeama 200 - 4000 Hz välillä on $\pm 0,05$ s. Pienillä taajuuksilla maksimiarvo voi olla 0,3 s suurempi kuin T_m . Suurilla taajuuksilla (8000 Hz) poikkeama saa olla $\pm 0,1$ s.

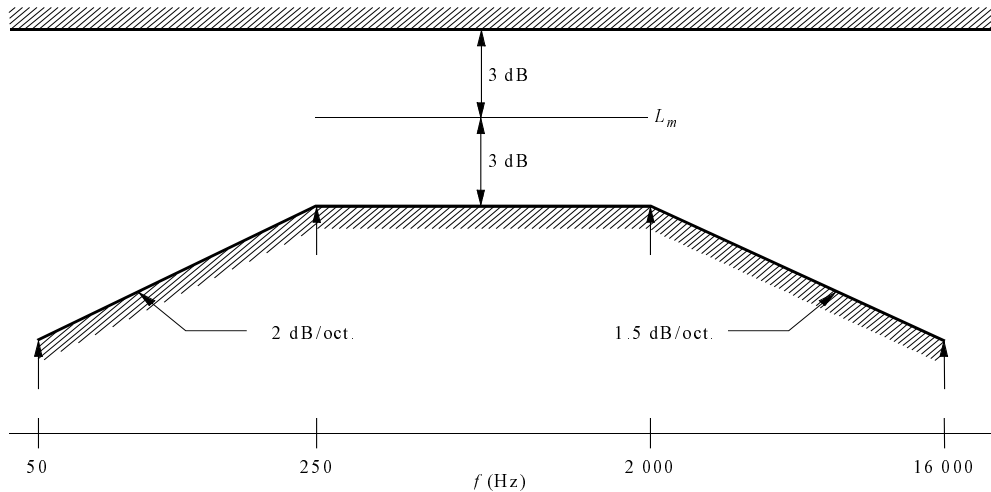


Kuva 2.3. Jälkikaiunta-ajan sallittu poikkeama ITU-R BS.1116-suosituksen mukaan (ITU 1996).

Aikaisten heijastusten 15 ms:in saakka on oltava vaimentuneet vähintään 10 desibeliä suoraan ääneen verrattuna.

Taustamelutason tulee olla keskinäärin enintään NR10-käyrän tasolla, ja millään mittaustaistalla NR15:n mukainen arvo ei saa ylittyä. Taustamelu ei saa olla impulsiivista, jaksollista eikä se saa sisältää ääneksiä.

Suosituksen mukainen viisikanavainen kuuntelujärjestely on kuvan 2.4 mukainen. Käytettävä kuunteluetäisyys D on vähintään kaksi metriä. Suositeltava stereokannan leveys B on 2-3 metriä. Maksimi kuunteluetäisyys on 1,7-2 kertaa stereokannan leveys. 5.1-kuuntelussa surround-kaiuttimien sijaitsevat 110 asteen kulmassa keskikaiuttimesta katsottuna. Kuunteluasetelman kaikki kaiuttimet sijoitetaan samalle etäisyydellä referenssikuuntelupisteestä. Vapaasti sijoitettujen kaiuttimen akustisen keskipisteen on sijaittava vähintään metrin etäisyydellä seinistä.



Kuva 2.5. Suosituksen ITU-R BS.1116 vaatimus optimaalisessa kuuntelupisteessä mitattavalle taajuusvasteelle.

2.4.3. Pohjoismaisten radioyhtiöiden suositus N 12-A

Pohjoismaiset radioyhtiöt ovat määritelleet oman standardinsa kuunteluhuoneille. Standardissa on annettu ohjeita erilaisten tarkkaamotilojen ja kuunteluhuoneiden suunnitteluun. Huoneet on jaettu neljään eri ryhmään pinta-alan toimiessa erottavana tekijänä.

1. Referenssikuunteluhuoneet kuuntelukokeita varten (6-10 kuuntelijaa) pinta-ala $60 \pm 10 \text{ m}^2$
2. Äänitarkkaamot musiikki- ja kuunnelmatuotantoon, pinta-ala $40 \pm 10 \text{ m}^2$
3. Muut äänitarkkaamot, pinta-ala $30 \pm 10 \text{ m}^2$
4. Editointihuoneet tuotantoyksiköissä, pinta-ala $20 \pm 10 \text{ m}^2$

Jälkikaiuntavaatimukset huoneille ovat taajuusalueella 200 - 2500 Hz seuraavat:

$$T_m = T_0 (S / S_0) \pm 0,05 \text{ s} \quad (2.4.4)$$

missä S on huoneen pinta-ala. T_0 on jälkikaiunta-ajan referenssiarvo 0,35 s ja S_0 pinta-alan vertailuarvo 60 m^2 . Jälkikaiunta-ajan perusteella voidaan määritellä pintojen keskinmääräiseksi absorptiokertoimeksi 0,35. Matalien taajuuksien jälkikaiunta-ajan poikkeamalle on asetettu rajat, jotka on ilmoitettu taulukossa 1.

Aikaisten heijastusten (< 15 ms) tulee olla vaimentuneita 400 Hz suuremmilla taajuuksilla 15 desibeliä.

Huoneen geometriaa säätelevät seuraavat määräykset:

$$L / W = 1,25 - 1,45 \quad (2.4.5)$$

$$W / H = 1,10 - 1,90 \quad (2.4.6)$$

$$L / H \leq 1,90 \text{ tai } \geq 2,10 \quad (2.4.7)$$

Taustamelutasolle on annettu rajat, jotka riippuvat huoneen käyttötarkoituksesta. Alla olevan listan numerot vastaavat huoneiden aiemmin esitettyä luokittelua. Taustamelu voidaan määrittää myös yksinkertaisesti A-äänitasoa käyttäen.

1. NR 10 15 dB (A-painotettu, slow-aikavakio)
2. NR 15 20 dB
3. NR 20 25 dB
4. NR 25 30 dB

Taulukko 1. Jälkikaiunta-ajan sallitut poikkeamat N-12 A suosituksen mukaan.

Taajuus [Hz]	T_{60} max [s]	T_{60} min [s]
63	$T_m + 0,3$	$T_m - 0,1$
80	$T_m + 0,25$	$T_m - 0,1$
100	$T_m + 0,2$	$T_m - 0,1$
125	$T_m + 0,1$	$T_m - 0,1$
160	$T_m + 0,1$	$T_m - 0,1$
200-4000	$T_m + 0,05$	$T_m - 0,05$
5000-8000	$T_m + 0,1$	$T_m - 0,1$

3. Huoneakustiikka

Kuunteluhuoneiden akustisen suunnittelun ongelman muodostaa äänikentän fysikaalisten ja subjektiivisten ominaisuuksien hallinta pienessä huoneessa. Tätä akustiikan osaluetta kutsutaan huoneakustiikaksi (englanniksi room acoustics), suurempien tilojen kuten konserttisalien akustiikan tutkimusta kutsutaan saliakustiikaksi (englanniksi architectural acoustics).

Huone- ja saliakustiikassa mielenkiinnon kohteena on äänikenttä ihmisen kuuloalueella, joka ulottuu noin 20 hertsistä 20 kilohertsiin. Aallonpituus on kääntäen verrannollinen taajuuteen, niinpä aallonpituus vaihtelee tutkittavalla taajuusalueella välillä 2cm - 20m..

Äänikentän fysikaalinen käyttäytyminen riippuu tutkittavan tilan dimensioiden ja äänen aallonpituuden suhteesta. Aallonpituuden suuren vaihtelun vuoksi myös äänikentän fysikaalinen käyttäytyminen muuttuu taajuuden funktiona. Niinpä huone- ja saliakustiikassa joudutaan käsittelemään ilmiöitä, joiden luonne ja merkitys vaihtelee tarkastelualueella, äänikentän ollessa suljetussa tilassa pienillä taajuuksilla deterministinen ja suurilla stokastinen.

Aluksi käsitellään eräät tärkeimmät äänikentän perussuureet ja -yhtälöt sekä huoneakustiikassa yleisesti tehtävät oletukset ja yksinkertaistukset. Seuraavaksi käydään läpi äänikentän ominaisuuksia suljetussa suorakaiteen muotoisessa tilassa pienillä taajuuksilla ja esitetään aaltoyhtälön ratkaisu karteesisessa koordinaatistossa. Tämän jälkeen esitetään lyhyesti geometrisen akustiikan perusteet, minkä jälkeen siirrytään huoneakustiikan tilastolliseen esitykseen.

3.1. Äänikentän perusyhtälöt huoneakustiikassa

Huoneakustiikan ilmiöt voidaan yleensä käsitellä yksittäisten taso- ja palloaaltojen yhdistelmänä superpositionperiaatetta käyttäen. Niinpä aluksi on hyödyllistä tutustua yksittäisten tasoaaltojen käyttäytymiseen käyttäen huoneakustiikan perusoletuksia. Huoneakustiikkaa käsiteltäessä voidaan tehdä tiettyjä yleistyksiä ja yksinkertaistuksia. Näistä tärkein on väliaineen olettaminen ilmaksi, joka voidaan käsitellä ideaalifluidina.

Aluksi käydään läpi eräät perusyhtälöt ja -suureet, joita tarvitaan aaltoyhtälön johtamiseen sekä äänikentän käyttäytymisen kuvaamiseen. Yhtälöt esitetään yksinkertaisessa muodossa, jossa väliaine oletetaan homogeeniseksi ja paikallaan pysyväksi ideaaliflu-

diksi. Yhtälöistä esitetään homogeeninen muoto eli herätetekijä jätetään huomiotta. Aluksi käsitellään tilannetta äärettömässä vapaassa kentässä, jossa reunaehtojen käsittely voidaan jättää huomiotta.

Ääni käsitetään yleensä pitkittäisenä aaltoliikkeenä fluidissa, jossa ilmamolekyylit liikkuvat edestakaisin tasapainotilansa ympärillä. Aaltoliike voidaankin kuvata kunkin molekyylin liikepoikkeaman avulla, mutta vakiintunut tapa on käsitteellä niiden hiukkasnopeutta.

Ääniaallon edetessä hiukkasten värähtelyn vaihe muuttuu ja ilmassa voidaan havaita hetkellisiä paineen tihentymiä ja harventumia. Tätä ajan ja paikan funktiona muuttuvaa hetkellisen ja staattisen paineen eroa kutsutaan äänipaineeksi.

Äänen etenemisnopeus ilmassa lämpötilan funktiona voidaan kirjoittaa seuraavasti (Kuttruff,1991):

$$c \approx (331.4 + 0.6\theta) \text{ m/s} \quad (3.1.1)$$

Yhtälössä c on äänen etenemisnopeus ja θ lämpötila Celsius-asteina.

Akustiikan riippuvuuksien johtamisessa lähdetään liikkeelle mekaniikan peruslaeista: energian, liikemäärän ja massan säilymisestä. Näiden lakien perusteella voidaan päätyä termodynaamisen prosessin tilanyhtälöön, fludielementin liike- ja jatkuvuusyhtälöön, joiden avulla voidaan kirjoittaa aaltoyhtälö pitkittäisille aalloille fluideissa.

Huone- ja saliakustiikassa äänipaine on staattiseen ilmanpaineeseen verrattuna niin pieni, että yhtälöille voidaan suorittaa linearisointioperaatio, jossa kokonaispaine tai tiheys korvataan vakiolla. Seuraavassa esitetään akustiikan kenttäsuureet toisiinsa kytkevien yhtälöiden linearisoidut muodot.

Massan säilymistä kuvaa jatkuvuusyhtälö,

$$\nabla \cdot u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.1.2)$$

jossa ρ_0 on tiheys, t aika ja u hiukkasnopeus. Momentin säilymis- eli Eulerin yhtälö on määritelty seuraavasti,

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.1.3)$$

jossa p on äänipaine, jonka yksikkö on paineen yksikkö Pascal (Pa). Ihmiskorva kykenee havaitsemaan kuultavana äänenä 20 μPa paineen vaihtelun. Yleensä äänipaine ilmoitetaan akustiikassa äänipainetasona desibeleinä, joka ilmaistaan seuraavasti:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (3.1.4)$$

Kaavassa 3.1.5 p on havaittu äänipaine ja p_0 vertailuäänipaine, joka on edellä mainittu 20 μPa . Ääniaaltojen synnyttämä painevaihtelu tapahtuu yleensä niin nopeasti, että värähtelyn seurauksena lämpötila ei muutu paikan funktiona ja siksi prosessia voidaan pitää adiabaattisena. Adiabaattinen tilanyhtälö on muotoa,

$$p'V^\gamma = \text{vakio} \quad (3.1.5)$$

jossa p' on kokonaispaine, V tilavuus ja γ adiabaattivakio (ilmalle arvo 1,4). Aiemmin tehtyjen oletusten perusteella voidaan kirjoittaa äänipaineen, tiheyden ja lämpötilan muutoksen ($\delta\Theta$) välille seuraava yhtälö.

$$\frac{p}{p_0} = \gamma \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\delta\Theta}{\Theta + 273} \quad (3.1.6)$$

Yhtälöiden 3.1.3 ja 3.1.5 perusteella voidaan kirjoittaa,

$$c^2 \Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1.7)$$

jossa c^2 on

$$c^2 = \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \quad (3.1.8)$$

Yhtälöä 3.1.8 kutsutaan aaltoyhtälöksi. Se määrittelee äänen etenemisen missä tahansa häviöttömässä ja virtauksettomassa fluidissa. Yhtälö ei kuvaa ainoastaan äänipaineen käyttäytymistä, vaan ottaa huomioon myös tiheyden ja lämpötilan vaihtelun.

3.1.1. Tasoalto, akustiset suureet ja yksiköt

Tehdään yksinkertainen oletus, jonka mukaan akustiset suureet riippuvat ainoastaan yhdestä suunnasta ja ajasta, valitaan tutkittavaksi suunnaksi x-akseli. Nyt yhtälö 3.1.7 voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1.9)$$

Tämän differentiaaliyhtälön yleinen ratkaisu on muotoa:

$$p(x,t) = F(ct - x) + G(ct + x) \quad (3.1.10)$$

Tällöin F ja G ovat yleisiä funktioita, joilla on toinen derivaatta. Yhtälössä 3.1.10 ensimmäinen termi kuvaa positiiviseen x -suuntaan nopeudella c etenevää aaltoa ja toinen termi taas kuvaa negatiiviseen x -suuntaan etenevää aaltoa.

Erityisen tärkeä ratkaisuiden luokka saadaan määrittelemällä F ja G sellaisiksi eksponentiaalifunktioiksi, joiden argumentit ovat imaginäärisiä. Nyt positiiviseen suuntaan etenevä komponentti voidaan kirjoittaa

$$p(x,t) = \hat{p}e^{ik(ct-x)} = \hat{p}e^{i(\omega t - kx)} \quad (3.1.11)$$

jossa \hat{p} ja k ovat reaalisia vakioita. Näistä aaltoluku k määritellään seuraavasti,

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (3.1.12)$$

jossa kulmataajuus $\omega = 2\pi f$. Yhtälö 3.1.10 kuvaa siis äänipaineen \hat{p} muuttumista paikan ja ajan funktiona. Äänipaine on jaksollinen ajan suhteen kulmataajuudella ja paikan suhteen aallonpituuden λ välein, joka voidaan määritellä seuraavasti

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{f} \quad (3.1.13)$$

Yhtälössä 3.1.12 f on värähtelyn taajuus, jonka yksikkö on Hertsi (Hz).

Yhtälö 3.1.10 kuvaa tasoallon, jossa missä tahansa x -akselin kanssa yhdensuuntaisessa tasossa eksponentti ja siten värähtelyn vaihe on vakio. Eulerin-yhtälön 3.1.3 mukaan hiukkasnopeudella on vain yksi x -akselin suuntainen komponentti

$$u = u_x = \frac{1}{i\omega} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{\rho_0 \omega} p = \frac{p}{\rho_0 c} \quad (3.1.14)$$

Tästä seuraa, että ääniaallot ovat pitkittäistä aaltoliikettä. Äänipaineen ja hiukkasnopeuden suhde tasoallossa on taajuusriippumaton reaalinen tai imaginäärinen vakio. Tätä väliaineen tiheydestä ja äänen etenemisnopeudesta riippuvaa vakiota kutsutaan materiaalin karakteristiseksi impedanssiksi, jonka arvo ilmalle on $414 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Reaalisuuden tai imaginäärisyyden voidaan osoittaa johtuvan siitä, ettei hiukkasnopeuden ja äänipaineen välillä ole vaihe-eroa. Seuraavaksi määritellään ääni-intensiteetti, joka kuvaa äänienergian virtausta pinnan läpi ajan funktiona. Hetkellinen ääni-intensiteetti on määritelty hiukkasnopeuden ja äänipaineen tulona

$$\vec{I}(t) = p(t)\vec{u}(t) \quad (3.1.15)$$

Yleisessä tapauksessa hetkellinen intensiteetti on kompleksinen vektorisuure hiukkasnopeuden tapaan. Tasoaaltokentässä hetkellinen ääni-intensiteetti voidaan kirjoittaa kaavan 3.1.14 perusteella seuraavaan muotoon

$$\vec{I}(t) = I_x(t) = p(t)u_x(t) = \frac{p^2(t)}{\rho_0 c} \quad (3.1.16)$$

Myös ääni-intensiteetti ilmoitetaan yleensä tasosuureena,

$$L_I = 10 \log \frac{|\vec{I}|}{I_0} \quad (3.1.17)$$

jossa $|\vec{I}|$ on mitattu ääni-intensiteetin itseisarvo ja I_0 on intensiteetin vertailuarvo 1 pW/m^2 .

3.1.2. Heijastus- ja absorptiokertoimet

Yksinkertaisin tapaus äänen heijastumisesta on kohtisuoran tasoallon heijastuminen äärettömästä tasosta. Heijastuneen äänen vaiheen ja amplitudin muutosta kuvaa kompleksinen heijastuskerroin R , joka on heijastavan tason ominaisuus.

$$R = |R|e^{i\alpha} \quad (3.1.9)$$

Yleisessä tilanteessa heijastuskertoimen absoluuttinen arvo ja vaihekulma riippuvat taajuudesta ja aaltorintaman normaalin ja seinän normaalin välisestä kulmasta.

Yhtälön 3.1.16 mukaan taso-aallon ääni-intensiteetti riippuu äänipaineen neliön amplitudista. Niinpä heijastuneen aallon intensiteetti on $|R|^2$ pienempi kuin tulevan aallon. Tästä seuraa, että tulevan aallon energiasta lämmöksi muuttuu osuus $1-|R|^2$. Tätä heijastavan pinnan ominaisuutta kutsutaan absorptiokertoimeksi α , joka määritellään seuraavasti

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.1.11)$$

Seinän heijastaessa kaiken energian takaisin $R=1$ ja $\chi=0$ niin, että heijastuvan signaalin vaihe säilyy. Tällöin absorptiokerroin saavuttaa arvon 0 ja seinää voidaan pitää täysin jäykkänä. Seinä on täysin absorboiva, jos absorptiokerroin saavuttaa arvon 1. Tällöin heijastuskertoimen arvo on 0. Kolmas vain rajoitetulla kaistalla havaittava ilmiö on tilanne, jossa heijastuskertoimen arvo on -1 ja heijastuneen signaalin vaihe kääntyy 180 astetta ($\chi=\pi$). Myöskin tässä tapauksessa absorptiokertoimen arvo on 0. Myöhemmin soladiffusoreita käsiteltäessä tutustutaan käytännön sovellukseen, jossa hyödynnetään vaihetta kääntävää heijastusta.

Seinän akustiset ominaisuudet kuvautuvat täysin kulmariippuvan kompleksisen heijastuskertoimen avulla. Toinen suure, jota käytetään usein kuvaamaan seinän akustisia ominaisuuksia on seinän impedanssi, joka määritellään äänipaineen ja seinän normaalin suuntaisen hiukkasnopeuden osamääränä seinän pinnassa.

$$Z_s = \frac{p_s}{u_n} \quad (3.1.12)$$

Myös seinän impedanssi on yleisessä tapauksessa kompleksinen kulmariippuva suure. Impedanssin käänteisarvoa kutsutaan akustiseksi admittanssiksi β .

Taso-aallon tapauksessa seinän ominaisimpedanssin ja heijastuskertoimen välille materiaalin pinnan tasolla voidaan johtaa seuraava yhteys (Lahti, 1997):

$$Z_s = \rho_0 c \frac{1+R}{1-R} \quad (3.1.13)$$

Akustisen admittanssin ollessa pieni ($\beta \ll 1$) on sen ja absorptiokertoimen välille johdettu seuraava yhteys (Morse, 1968):

$$\alpha = 8 \operatorname{Re}(\beta) \quad (3.1.14)$$

Mielenkiintoinen erikoistapaus impedanssista on tilanne, jossa impedanssi ei muutu tulokulman funktiona. Tämä oletus voidaan tehdä, jos hiukkasnopeuden normaalikomponentti riippuu ainoastaan äänipaineesta tarkasteltavan seinän osan edessä. Seiniä tai materiaaleja, joille tämä oletus voidaan tehdä, kutsutaan paikallisesti reagoiviksi. Oletus paikallisesta reagoinnista tehdään usein akustiikan mallintamisessa, vaikka siihen ei olisi hyviä perusteita, koska kulmariippuvan impedanssin määrittäminen mittauksin on erittäin työlästä.

3.2. Äänikenttä huoneessa

3.2.1. Jäykkäseinäinen suorakaiteen muotoinen huone

Alla esitettävä aaltoyhtälön johto perustuu Kuttruffin (1991) ja Backmanin (1998) esityksiin.

Homogeeninen linearisoitu aaltoyhtälö on muotoa,

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (3.2.1)$$

jossa k on kulmataajuus. Tarkastellaan aluksi suorakaiteen muotoista tilaa, jolloin aaltoyhtälö voidaan kirjoittaa karteesissa koordinaatistossa.

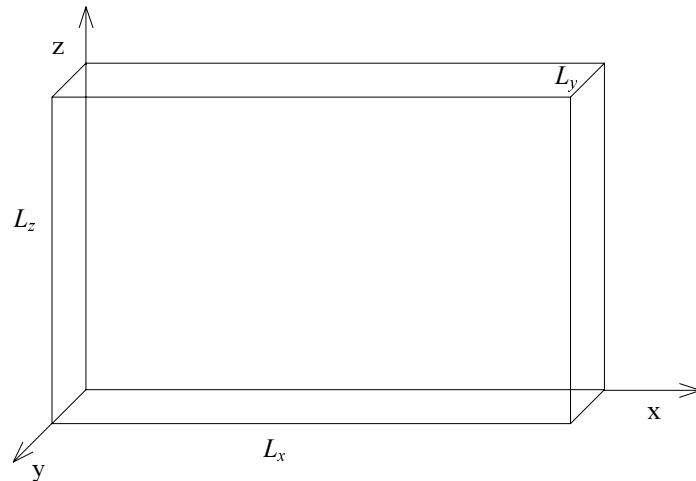
$$\frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 z} + k^2 p = 0 \quad (3.2.2)$$

Yhtälön ratkaisujen voidaan osoittaa separoituvan eli ratkaisu voidaan jakaa kolmeen osaan,

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \quad (3.2.3)$$

joista kukin riippuu vain yhdestä koordinaatista. Sijoitettaessa kaava (3.2.3) aaltoyhtälöön voidaan se jakaa kolmeksi osittaisdifferentiaaliyhtälöksi, joista kunkin täytyy toteuttaa seuraava ehto.

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + k_x^2 p_1 = 0 \quad (3.2.4)$$



Kuva 3.1. Suorakaiteen muotoinen huone, jonka dimensioit ovat L_x , L_y ja L_z .

Tarkastellaan aluksi tilannetta kuvan 3.1 mukaisessa suorakaiteen muotoisessa kovaseinäisessä huoneessa, jonka mitat ovat L_x , L_y ja L_z . Kovaseinäisen huoneen reunaehtona on hiukkasnopeuden normaalikomponentin häviäminen rajapinnoilla.

$$\left. \frac{\partial p_1}{\partial x} \right|_{x=0, x=L_x} = \left. \frac{\partial p_2}{\partial y} \right|_{y=0, y=L_y} = \left. \frac{\partial p_3}{\partial z} \right|_{z=0, z=L_z} \quad (3.2.5)$$

Yhtälön (3.2.2) perusteella voidaan kirjoittaa seuraava ehto aaltoluvun neliölle

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (3.2.6)$$

Yhtälön (3.2.4) yleinen ratkaisu on muotoa

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \quad (3.2.7)$$

Vakioita A_1 ja B_1 tarvitaan, jotta ratkaisu täyttäisi yhtälön (3.2.4) asettamat reunaehdot. Välittömästi voidaan todeta, että vakion B_1 arvon on oltava nolla, koska sinifunktion arvo ei saavuta arvoa nolla kun $x = 0$. Yhtälön (3.2.5) mukaisesti todetaan, että kun $x = L_x$, on $\cos(K_x L_x)$ tekijän saavutettava arvo ± 1 , niinpä $K_x L_x$ arvon on oltava π :n moninkertainen. Tekijöiden k_x , k_y ja k_z on toteutettava seuraava ehto, jossa $n_{x,y,z}$ on positiivinen kokonaisluku:

$$\begin{aligned}
k_x &= \frac{n_x \pi}{L_x} \\
k_y &= \frac{n_y \pi}{L_y} \\
k_z &= \frac{n_z \pi}{L_z}
\end{aligned}
\tag{3.2.8}$$

Sijoitettaessa yhtälön (3.2.8) mukaiset arvot yhtälöön (3.2.6) voidaan aaltoluvun ominaisarvoille kirjoittaa seuraava yhtälö.

$$k_{n_x, n_y, n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}
\tag{3.2.9}$$

Käytettäessä aaltoluvun ja taajuuden välistä yhteyttä $k = 2\pi f / c$, voidaan kaava (3.2.9) saattaa muotoon, josta voidaan ratkaista tilan ominaistajuudet:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}
\tag{3.2.10}$$

Kaava tunnetaan Rayleighin kaavana (Rayleigh, 1896). Homogenisoidulla aaltoyhtälöllä on ratkaisut vain kaavalla (3.2.10) saatavilla taajuuksilla. Ominaisajuudet voidaan jakaa eri tilan eri ominaismuotoihin sen mukaan mitä arvoja n_x , n_y ja n_z saavat kullakin taajuudella. Yksinkertaisin ominaismuoto on yksiulotteinen ominaismuoto, joka muodostuu kahden seinän väliin. Tässä tapauksessa ainoastaan yksi muuttujista n_x , n_y , n_z on arvoltaan nolasta poikkeava. Yksiulotteista ominaismuotoa kutsutaan myös aksiaaliseksi muodoksi tai seisovaksi aalloksi. Tapausta, jossa kahden muuttujan arvo on nolasta poikkeava, kutsutaan kaksiulotteiseksi ominaismuodoksi, joka muodostuu neljän seinän välille. Jos kaikkien muuttujien arvo poikkeaa nolasta, ominaismuoto muodostuu huoneen kaikkien kuuden pinnan välille ja ominaismuoto on kolmiulotteinen.

Rayleighin kaavaa tarkastelemalla voidaan tehdä seuraavat havainnot. Alimmat ominaisajuudet ovat yksiulotteisia ja taajuuden kasvaessa kolmiulotteisten muotojen määrä kasvaa huomattavasti nopeammin kuin muiden muototyyppien.

Äänipaine voidaan ratkaista sijoittamalla kaavan (3.2.8) mukaiset arvot yhtälöön (3.2.7) ja ottamalla huomioon separoituvuus kaavan (3.2.3) mukaisesti.

$$p_{n_x n_y n_z} = C \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad (3.2.11)$$

Käsiteltäessä tilannetta, jossa huoneeseen sijoitetaan pistemäinen monopoli, joka värähtelee kulmataajuudella ω ja vakio tilavuusnopeudella Q_0 , on epähomogeeninen aaltoyhtälö paineelle $p(\vec{r})$ muotoa (Morse, 1968),

$$(\nabla^2 + k^2)p(\vec{r}) = -j\rho c k Q_0 \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) e^{j\omega t} \quad (3.2.12)$$

missä $\vec{r} = (x, y, z)$ kuvaa tarkastelupistettä, $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ lähdepistettä ja $\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$ on lyhenne merkinnälle $\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)$, jossa $\delta(x)$ on Diracin delta-funktio.

Rajoitukset analyyttiselle ratkaisulle on esittänyt esimerkiksi Jacobsen (1979a):

Huone on suorakulmainen ja jäykkäseinäinen, lisäksi ilman absorptio voidaan olettaa pieneksi.

Seinät ovat paikallisesti reagoivat ja niiden admittanssi on pieni, tasaisesti jakautunut ja reaalin.

Lähde on pistemäinen monopoli, jonka impedanssi on ääretön.

Näiden ehtojen voidaan olettaa toteutuvan kohtuullisesti huoneessa, jonka seinät ovat massiiviset ja kun äänilähteenä käytetään koteloitua sähködynaamista kaiutinta. Analyyttistä mallintamista on tehty erityisesti kaiuntahuoneiden osalta. Laaja viitekokoelma löytyy Jacobsenin väitöskirjasta (1979a).

3.2.2. Ominaismuototiheys

Tutkittaessa kaavaa 3.2.10 voidaan todeta, että pienillä taajuuksilla ominaismuodot ovat yksiulotteisia. Taajuuden kasvaessa ominaismuotojen määrää kasvaa nopeasti ja useimmat muodot ovat kolmiulotteisia. Ominaismuotojen määrälle suorakaiteen muotoisessa huoneessa on esitetty seuraava kaava (Morse, 1944),

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \frac{f}{c} \quad (3.2.13)$$

jossa N_f on ominaismuotojen lukumäärä taajuuskaistalla $0 - f$, V on huoneen tilavuus, S seinien pinta-ala ja $L=4(L_x+L_y+L_z)$ huoneen nurkkien pituuksien summa. Kaavan 3.2.13

ensimmäinen termi kuvaa kolmiulotteisten, toinen termi kaksiulotteisten ja kolmas termi yksiulotteisten muotojen määrää. Taajuuden kasvaessa riittävästi voidaan ominaismuotojen määrää approksimoida pelkällä ensimmäisellä termillä:

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c} \right)^3 \quad (3.2.14)$$

Voidaan myös osoittaa, että taajuuden lähestyessä ääretöntä kaava 3.2.14 pätee myös muillekin huoneen geometrioille.

Haluttaessa laskea ominaismuotojen määrä terssikaistoittain voidaan käyttää seuraavaa yksinkertaista kaavaa (Kihlman, 1993),

$$\Delta N \approx \frac{4\pi V \cdot 0,23}{c^3} f_m^3 \quad (3.2.15)$$

jossa f_m on terssikaistan keskitaajuus. Tämän kaavan avulla on helppo todeta, että esimerkiksi tilavuudeltaan sadan kuutiometrin huoneessa on keskitaajuuksilla tuhansia ominaismuotoja terssikaistaa kohti. Onkin selvää, että yksittäisiä ominaismuotoja tarkastelemalla ei pystytä analysoimaan äänikenttää suurilla taajuuksilla.

Rajataajuus, jonka yläpuolella ominaismuotoja on niin tiheässä, että tarkastelussa voidaan siirtyä käsittelemään yksittäisten ominaismuotojen sijasta diffuusua äänikenttää, on määritelty seuraavasti (Schroeder, 1954):

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (3.2.16)$$

Yhtälössä T_{60} on jälkikaiunta-aika, jolla tarkoitetaan sitä aikaa, jona äkillisesti sammutetun äänilähteen energia vaimenee 60 desibeliä eli yhteen miljoonasosaan alkuperäisestä. Yhtälö 3.2.16 on johdettu ominaismuotojen puolen tehon kaistanleveyden B_r avulla:

$$B_r = \frac{\ln 10^6}{2\pi T_{60}} = \frac{2,2}{T_{60}} \quad (3.2.17)$$

Vakio 2000 on määritelty ottaen lähtökohdaksi se, että kunkin ominaismuodon puolen tehon kaistan sisällä on vähintään kolme ominaismuotoa. Tämä on riittävä tae sille, että äänikenttää jatkuvassa tilassa voidaan käsitellä tilastollisena prosessina.

3.3. Geometrinen akustiikka

Aaltoyhtälön ratkaisuun perustuvien menetelmien käyttö merkittävästi tutkittavan tilan Schroeder-taajuuden yläpuolella johtaa laskentamäärään nopeaan kasvuun. Lisäksi huoneen ominaismuotoja on niin tiheässä, että yksittäisten muotojen erottaminen toisistaan on mahdotonta. Eräs usein käytetty menetelmä äänikentän mallintamiseen Schroeder-taajuutta suuremmilla taajuuksilla on geometrinen akustiikka, jossa äänen oletetaan etenevän sädemäisesti. Tällöin äänen heijastumista voidaan mallintaa optiikasta tutun Snellin lain avulla, jonka mukaan tulevan ja heijastuvan aallon etenemissuunnat muodostavat heijastavan pinnan normaalin kanssa yhtä suuret kulmat (Toivonen, 1990).

3.4. Tilastollinen huoneakustiikka

Suurilla taajuuksilla äänikenttä huoneessa oletetaan yleensä diffuusiksi. Oletus tehdään, koska näin äänikenttää voidaan jatkuvassa tilassa käsitellä diffuusin kentän tilastollisten ominaisuuksien perusteella. Ennen näiden ominaisuuksien esittelemistä on määriteltävä diffuusi äänikenttä. Kaksi yleisesti käytettyä diffuusin äänikentän määritelmää ovat seuraavat (Jacobsen 1979b):

Diffuusissa äänikentässä energiavirtauksen todennäköisyys kaikkiin suuntiin on yhtä suuri.

Diffuusi äänikenttä muodostuu äärettömästä määrästä tasoaaltoja, joiden vaihe on satunnainen ja tulokulmien jakauma tasainen.

Lisäksi huoneen kaiuntakenttä oletetaan samanlaiseksi huoneen kaikissa pisteissä (Hodgson, 1996).

Käytännössä määritelmän mukaista ideaalista diffuusia äänikenttää ei voida realisoida. Parhaiten oletus diffuusista äänikentästä toteutuu Jacobsenin (1979b) mukaan kaiunta-huoneessa.

3.4.1. *Sabinen kaava*

Diffuusin äänikentän konseptin akustiikassa esitteli amerikkalainen Wallace Clement Sabine (1922) viime vuosisadalla. Hän määritteli jälkikaiunta-ajan ja huoneen absorptiokertoimen välisen yhteyden kokeellisesti seuraavaksi:

$$T_{60} = 0.163 \frac{V}{\bar{\alpha}A} \quad (3.4.1)$$

Kaavassa V on huoneen tilavuus, A huoneen seinien pinta-ala ja $\bar{\alpha}$ huoneen pintojen absorptiokertoimien pinta-alapainotettu keskiarvo.

Suurissa tiloissa kuten konserttisaleissa tulee myös ilman aiheuttaman vaimentuman vaikutus jälkikaiunta-aikaan huomioida. Tällöin yhtälö 3.4.1 kirjoitetaan muotoon,

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{8\alpha_a V + A} \quad (3.4.2)$$

jossa α_a on ilman absorptiokerroin taajuuden funktiona.

Sabinen kaavasta voidaan nähdä, että vaikka huoneen absorptiokerroin saavuttaa arvon 1, on huoneella äärellinen jälkikaiunta-aika. Voimakkaasti vaimennetuissa tiloissa on tämä virhe otettava huomioon.

3.4.2. Eyringin kaava

Korjauksen Sabinen kaavaan esitti saksalainen Eyring (1930). Hän johti kuvalähdeperiaatteen avulla kaavan, jossa jälkikaiunta-aika saavuttaa arvon nolla täysin absorboivien seinien tapauksessa. Eyringin kaava kirjoitetaan seuraavasti:

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (3.4.4)$$

Sabinen ja Eyringin kaavojen oletuksena on pinnoille tasaisesti jakautunut absorptio ja vaatimus siitä, että huoneen dimensiot ovat keskenään samaa suuruusluokkaa. Pidemmälle kehitettyjä kaavoja, joissa em. rajoituksia ei tarvitse ottaa huomioon, on esittänyt mm. Kuttruff (1991).

3.4.3. Diffuusin äänikentän ominaisuudet

Diffuusin äänikentän tilastollisia ominaisuuksia on käsitelty kattavasti Kuttruffin (1991) teoksessa. Tässä pyritäänkin vain toteamaan tärkeimmät tulokset.

Schroeder-taajuuden yläpuolella huoneen kahden toisistaan kaukana olevan pisteen välistä siirtofunktiota voidaan pitää kompleksisena Gaussin-prosessina, mistä seuraa mm. seuraavia asioita:

Äänipaineen itseisarvon magnitudi missä tahansa suuressa tilavuudessa noudattaa Rayleighin jakaumaa

Maksimien keskimääräistä etäisyyttä siirtofunktiossa voidaan approksimoida yksinkertaisesti $\frac{4}{T_{60}}$.

Siirtofunktion minimien ja maksimien vaihtelu on keskimäärin 10 desibeliä.

Nämä diffuusin kentän siirtofunktioiden ominaisuudet ovat voimassa, kun tarkastelupisteet sijaitsevat kaiuntakentässä. Kriteerinä kaiuntakentässä olemiselle pidetään tarkastelupisteen sijaitsemista vähintään kaiuntasäteen etäisyydellä lähteestä. Kaiuntasäde on määritelty etäisyydeksi, jossa suoran äänen ja kaiuntakentän energiatiheddet ovat yhtä suuria. Huoneen kaiuntasäde voidaan laskea seuraavan kaavan avulla.

$$r_r = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\bar{\alpha}A}{\pi}} \approx 0,0057 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \quad (3.4.5)$$

4. Äänikentän numeeriset ratkaisumenetelmät

Edeltävässä kappaleessa esiteltiin perinteiset huoneakustiikan mallintamisessa käytettävät matemaattiset mallit, joiden avulla on mahdollista mallintaa äänikentän käyttäytymistä suljetussa tilassa. Näissä malleissa on kuitenkin merkittäviä rajoituksia, eikä pelkästään niiden avulla ole mahdollista suunnitella akustisilta ominaisuuksiltaan kriittistä tilaa kuten konserttisalia. Syyt tähän ovat seuraavia: aaltoyhtälön analyttinen ratkaiseminen on mahdollista vain yksinkertaisille perusgeometrioille, absorption epätasainen jakauma estää diffuusiooletuksen tekemisen ja diffraktion mallintaminen tarkasti ei ole mahdollista geometrisen akustiikan menetelmin.

Ennen tietokoneiden yleistymistä tilojen mallintaminen tehtiin pääasiassa akustisten pienoismallien avulla. Erilaisia pienoismallitekniikoita on esitelty Backmanin opetusmonisteessa (Backman, 1999) ja Cremerin kirjassa (Cremer ja Müller, 1982). Tällä hetkellä pienoismallien käyttö on väistymässä tekniikkaa kalleutensa ja työläytensä vuoksi, mutta edelleenkin pienoismalleja käytetään aktiivisesti konserttisalien suunnittelussa.

Tietokoneiden laskentakapasiteetin nopea kasvu on johtanut erilaisten numeeristen laskentamallien käytön nopeaan yleistymiseen. Erityisesti luvussa 4.2. esiteltävät geometrisen akustiikan malleihin perustuvat kaupalliset ohjelmat ovat olleet saliakustiikkasuunnittelussa arkipäivää jo 90-luvun alusta lähtien. Konserttisalien suunnittelussa geometrisen akustiikan mallit ovat käyttökelpoisia saliakustiikassa tarkasteltavalla taajuusalueella 125-4000 Hz, koska konserttisalien Schroeder-taajuus on tyypillisesti alle 100 Hertsiä.

Pienten huoneiden mallintaminen on huomattavasti monimutkaisempi ongelma kuin tilavuudeltaan suuret konserttisalit, koska äänikenttä on jakautunut kuvan 2.1 mukaisesti taajuusalueessa deterministisesti ja stokastisesti käyttäytyviin osiin. Erityisen vaikeaa on näiden osien väliin jäävän siirtymäkaistan mallintaminen, koska äänikenttää tällä alueella ei voida kuvata yksikäsitteisesti aaltoyhtälön tai geometrisen akustiikan menetelmin. Muita pienten huoneiden mallinnuksen perusongelmia ovat kuuntelijoiden ja äänilähteiden sijainti lähellä seinää. Seinän aiheuttaman interferenssin takia äänikentän kuvaaminen edellyttää äänen aaltokäyttäytymisen huomioon ottamista (Pietrzyk, 1998).

Eräs merkittävä syy pienten huoneiden mallintamisen kehittymättömyydelle on puhtaasti taloudellinen. Konserttisalien akustiikkasuunnittelun onnistumisesta ollaan valmiita maksamaan riittävästi, pienten huoneiden ei. Tulevaisuuden näkymät ovat kuitenkin

kin valoisat myös huonemallintamisen osalta, koska autoteollisuuden piirissä on havaittavissa merkittävää kiinnostusta ohjaamoakustiikan mallintamiseen, jossa mallin-
nusongelmat ovat verrattavissa huoneisiin.

4.1. Aaltoyhtälön numeeriseen ratkaisuun perustuvat menetelmät

Aaltoyhtälön numeeriseen ratkaisuun on olemassa useita menetelmiä, joista äänikentän mallintamiseen suljetussa tilassa on käytetty ainakin pintaelementti- (Boundary Element Method, BEM), elementtimenetelmää (Finite Element Method, FEM) sekä aika-alueen differenssimenetelmää (Finite Difference Time Domain, FDTD) (Savioja 1996). Yhteistä näille menetelmille on se, että mallinnettava tilavuus ja sitä rajoittavat pinnat diskretisoidaan paikan suhteen ja tämän jälkeen aaltoyhtälö ratkaistaan hilapisteissä.

Yksinkertaisten geometrioiden tapauksessa aaltoyhtälön ratkaisuun voidaan käyttää myös ominaismuotokehitelmiä (Walker, 1992).

Yhteistä kaikille paikan suhteen diskretisoiduille malleille on se, että niillä on yläraja-
taajuus, joka riippuu elementtien koon ja mallinnettavan aallonpituuden suhteesta. Optimaalisessa tapauksessa aallonpituutta kohti tarvitaan vähintään neljä elementtiä. Tästä seuraa, että näitä menetelmiä käytettäessä mallien koko kasvaa aallonpituuden lyhentyessä suurilla taajuuksilla, tämän seurauksena näiden menetelmien käyttö huone-
mallintamisessa on rajoittunut varsin pienille taajuuksilla.

Näiden mallinnusmenetelmien käyttö tilastollisesti käyttäytyvän äänikentän mallintami-
seen ei ole myöskään mielekästä, koska tilastollisuuden toteuttaminen deterministiseen malliin edellyttää sekä reunaehtojen ja herätteen satunnaistamista että laskentatulosten keskiarvoistusta. Näiden tekijöiden lisääminen malliin lisää mallinnuksen kompleksii-
suutta ja laskennallista kuormaa merkittävästi.

Suurin elementtimenetelmien käytön este akustiikan mallinnuksessa on reunaehtojen
määrittelyn vaikeus. Reunaehtona voidaan käyttää paikallisesti reagoivien reunojen tapauksessa paikallista akustista impedanssia tai admittanssia, jotka ovat taajuuden
funktiona kompleksia suureita. Usein todellisessa tapauksessa impedanssi riippuu myös
äänen tulosuunnasta. Varsinkin pienillä taajuuksilla levyrakenteiden värähtely tulisi
ottaa huomioon, koska oletus paikallisesta reagoinnista ei ole enää validi.

Käytännössä materiaaleille ei ole saatavissa mitattuja kompleksisia impedanssiarvoja
edes kohtisuoralla tasoallolla mitattuna, joten reunaehdot joudutaan useimmiten

mittaamaan itse. Erityisesti pienillä taajuuksilla kompleksisen impedanssin mittaaminen tarkasti on erittäin vaikeaa.

4.1.1. *Elementtimenetelmä*

Elementtimenetelmä (Finite Element Method, FEM) otettiin alunperin käyttöön lujuuslaskennassa jo 1960-luvulla. Ensimmäiset julkaisut FEM:in käytöstä akustiikan mallintamiseen julkaistiin myös 1960-luvulla (Gladwell, 1966). Menetelmä on tänä päivänä laajalle levinnyt ja sitä käytetään yleisesti mm. lujuuslaskennassa ja rakenteiden dynaamisten ominaisuuksien mallintamisessa. Menetelmään voi tutustua mm. Zienkiewiczin (1991) kirjasta.

Menetelmässä osittaisdifferentiaaliyhtälö muunnetaan ensin integraaliyhtälöksi. Tämän ratkaisualue jaetaan elementteihin, jotka kuvaavat ratkaisua solmupisteiden välissä. Yhtälön ratkaisua haetaan siten solmupisteissä. Yleisesti ottaen menetelmä tuottaa luotettavia tuloksia, jos aallonpituutta kohti on vähintään kuusi solmupistettä. Akustikassa ratkaistava yhtälö on siis Helmholtzin-yhtälö.

FEM:iä käytettäessä diskretisoidaan koko ratkaisualue eli koko tutkittava tilavuus. FEM sopii käytettäväksi tilanteisiin, joissa ratkaisualue on rajattu riittävän pieneksi. Käytännössä tämä merkitsee sitä, että akustikassa FEM:in käyttö rajoittuu tapauksiin, jossa tilavuus on riittävän pieni tai ylin tarkasteltava taajuus niin matala, että mallin koko pysyy riittävän pienenä.

Tavallinen FEM soveltuu hyvin akustiikan simulointiin pienessä tilassa. Äänensäteilyongelmien ratkaisuun se ei kuitenkaan sovellu, koska tällöin mallin hilan tulisi olla tilavuudeltaan ääretön.

FEM:in hyviä puolia on sen levinneisyys ja mahdollisuus kytkeä rakenne- ja akustikkamallit toisiinsa helposti. FEM:in käytön ongelmana on tilavuuselementtiverkon luonti, jota ei ole pystytty automatisoimaan. FEM-ohjelmia on saatavissa kymmeniä erilaisia. Joihinkin niistä on kehitetty erillinen akustiikkaratkaisija (Sysnoise, IDEAS-VA).

4.1.2. *Pintaelementtimenetelmä*

Akustikassa halutaan tyypillisesti mallittaa äänensäteilyä ilman, että säteilijän ympäristön vaikutusta tarvitsee huomioida. Äänensäteilyn laskentaan soveltuu hyvin reuna-

elementtimenetelmä (Boundary Element Method, BEM) (Ciscowski, 1991). BEM:issä diskretisoitava alue on ratkaisualan reuna eli mallinnuksessa käytetään kaksiulotteisia pinta-elementtejä. Mallien koko on siis huomattavasti pienempi kuin FEM:issä. BEM:in matemaattisesta formuloinnista seuraa, että käytännössä samaa ongelmaa ratkaistaessa BEM-malli on huomattavasti raskaampi laskettava kuin vastaava FEM-malli. BEM:illä ei myöskään voida ratkaista tilan ominaisuuksia, mikä tekee FEM:istä huomattavasti houkuttelevamman menetelmän huonemallintamiseen.

BEM:in vahvuus tulee esille juuri säteilyongelmien ratkaisussa. BEM:iä on käytetty menestyksellisesti avaruus-, lentokone- ja autoteollisuudessa meluongelmien mallintamiseen. Kaupallisia BEM-mallinnusohjelmia on saatavissa (Sysnoise), (IDEAS-VA), valitettavasti ohjelmat ovat hyvin kalliita ja monimutkaisia.

BEM- ja FEM-menetelmät ovat kumpikin laskennallisesti hyvin raskaita. Niiden käyttö reaaliaikaiseen tai lähes reaaliaikaiseen mallintamiseen ei ole mahdollista. Kuitenkin tarve nopeampaan pienten taajuuksien käyttäytymisen mallintamiseen on ilmeinen esimerkiksi virtuaaliympäristöissä.

4.1.3. Aika-alueendifferenssimenetelmä

TKK:lla akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan ja tietojenkäsittelytekniikan laboratorioiden PATS-projektissa on kehitetty myös digitaalisten aaltojohtojen käyttöön perustuvaa mallinnusta (Savioja, 1995). Kolmiulotteisen aaltojohtohilan (engl. Waweguide Mesh, WGM) käyttö on hyvin lähellä aika-alueen differenssimenetelmää (engl. Finite Difference Time Domain, FDTD) (Botteldooren, 1995). Differenssimenetelmän käyttö akustiikan mallinnuksessa on vielä tutkimusasteella, eikä kaupallisia akustiikkasovelluksia ole saatavilla.

Differenssimenetelmän paras puoli on sen yksinkertaisuus. Sen laskennan kompleksisuus on huomattavasti FEM:iä ja BEM:iä pienempi. Menetelmän selvä heikkous on se, että akustista mallia ei voida kytkeä yksinkertaisesti rakennemalliin. Elementtihilaan ei voida myöskään toteuttaa paikallisia tihentymiä samaan tapaan kuin elementtimenetelmissä.

Eräs FDTD-menetelmän parhaita puolia on laskenta aika-alueessa, koska tällä tavoin voidaan helposti visualisoida esim. äänen etenemistä ja diffraktiota.

4.2. Geometrisen akustiikan mallit

Saliakustiikan mallintamiseen on käytetty jo pitkään geometrisen akustiikan oletukseen perustuvia ohjelmia. Geometrisessa akustiikassa jätetään huomiotta äänen aaltoliikeluonne ja äänen oletetaan kulkevan suoraviivaisesti. Niinpä näillä menetelmillä ei voida mallintaa interferenssi- ja diffraktioilmiöitä.

Schroeder-taajuuden yläpuolella geometrisen akustiikan oletus voidaan tehdä ja mallinnus on parhaimmillaan hyvinkin tarkkaa. Pienen tilan mallinnukseen nämä ohjelmat soveltuvat huonommin, koska vaimennetunkin pienen tilan Schroeder-taajuus on huomattavasti suurempi kuin konserttisalin.

Tarkempi katsaus geometrisen akustiikan menetelmiin on esitetty Saviojan (1995) lisensointityössä.

4.2.1. Sädemenetelmä

Suosituin laskennallinen menetelmä huone- ja saliakustiikan mallintamiseen on sädemenetelmä, jota käyttivät huoneakustiikan simulointiin Allred ja Newman (1958) simulointiin jo 1950-luvulla. Ensimmäisenä huoneen energia-aika-vasteita mallitti Krokstad (1968). Perusoletuksena menetelmässä äänen aallonpituus oletetaan niin lyhyeksi, että äänen heijastumista voidaan mallintaa optiikasta tunnetulla Snellin lailla.

Akustiikassa käytettävä algoritmi voidaan kuvata seuraavasti. Aluksi lähetetään äänisäteitä satunnaisesti tai äänilähteen suuntaavuuden mukaan painotettuihin suuntiin. Kunkin säteen etenemistä seurataan ja säteen kohdatessa huoneen rajapinnan sen energiaa vähennetään heijastus säännön mukaisesti pinnan absorptiokertoimeen verrattuna mukaisesti. Säde rekisteröidään vastaanotetuksi sen osuessa etukäteen valitulle vastaanottoalueelle. Sädemenetelmään on esitetty laajennuksia, joilla mallinnuksessa voidaan ottaa huomioon diffuusiheijastus (Nakano, 1993)..

Sädemenetelmä soveltuu hyvin mielivaltaisen muotoisten tilavuuksien mallintamiseen ja sillä on mahdollista huomioida pintojen diffuusi heijastus. Huonoja puolia ovat heijastusten tarkan mallintamisen vaikeus sekä laskennallinen raskaus, mikäli tavoitteena on jälkikäivän realistinen mallintaminen niin, että heijastustiheyden arvo on samaa suuruusluokkaa tilastollisilla malleilla laskettujen kanssa.

4.2.2. Kuvälähdemenetelmä

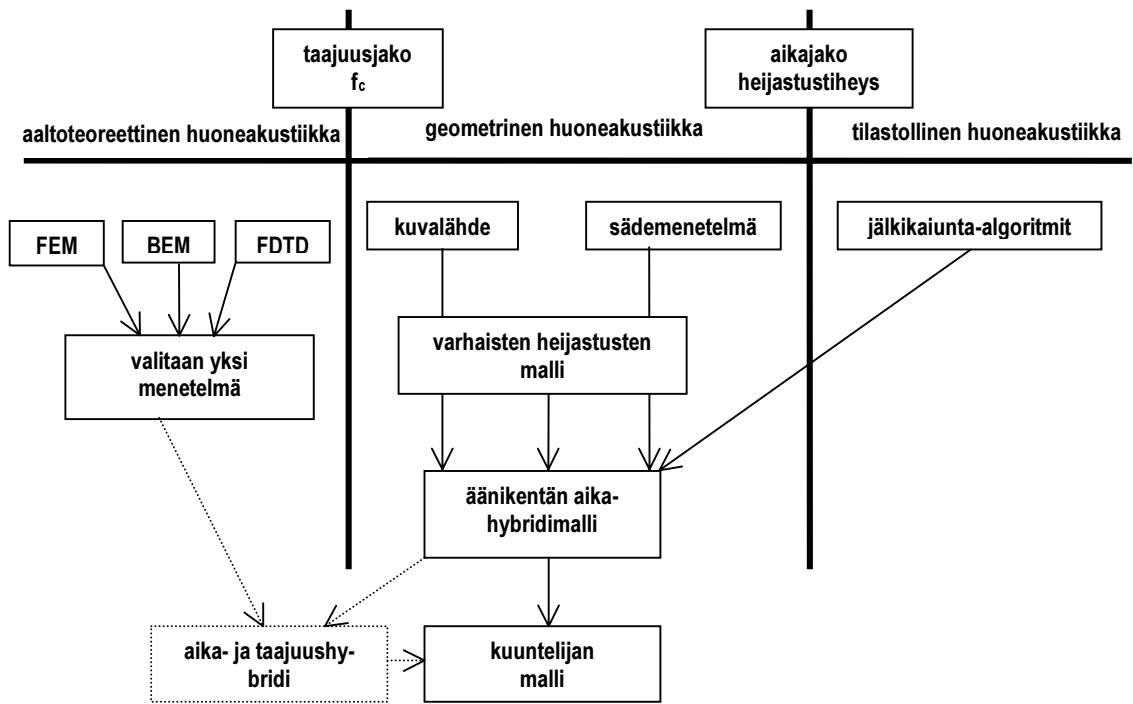
Kuvälähdeperiaatetta käytetään yleisesti esimerkiksi sähkömagnetiikassa heijastuksen mallintamiseen. Myös akustiikassa menetelmä on tehokas heijastusilmiöiden mallintamisessa silloin, kun heijastuksen voidaan olettaa noudattavan Snellin lakia. Eräs ensimmäisiä periaatteen soveltajia oli Eyring (1930), joka käytti kuvälähdeperiaatetta jälkikäiuntaprosessin mallintamiseen. Myöhemmin Allen ja Berkley (1979) osoittivat, että kuvälähdemenetelmällä voidaan löytää aaltoyhtälön eksakti ratkaisu jäykkäseinäisessä suorakaiteen muotoisessa huoneessa.

Kuvälähdemenetelmä toimii parhaiten aallonpituuteen nähden suurten tasomaisten kappaleiden heijastuksen mallintamisessa. Mikäli heijastavat pinnat ovat kaarevia tai epätasaisia tai mallinnettava tila on geometrialtaan monimutkainen mallinnuksessa on huomattavia vaikeuksia, koska kuvälähteiden paikkojen määrääminen on huomattavasti monimutkaisempaa. Menetelmää on esitelty tarkemmin Lokin (1997) diplomityössä.

4.3. Hybridimallit

Aiemmin esitetyn valossa on selvää, ettei äänikentän käyttäytymistä kuunteluhuoneessa voida mallintaa käyttäen ainoastaan yhtä mallinnusmenetelmää. Kuvaan 4.1 on kerätty tärkeimmät huoneakustiikan simuloinnissa käytettävät menetelmät ja pyritty erottamaan ne tarkastelutapansa ja rajoitustensa mukaisesti. Lisäksi kuvaan on koottu kuunneltavaan virtuaaliakustiseen malliin tarvittavat komponentit. Käytännössä tämän hetken hybridimalleissa ei ole toteutettu aaltoteoreettista simulointia (Takala *et al.* 1996). Tällaista mallinnusta on kyllä esitelty Kleinerin ja Garnierin (1995) toimesta, mutta ainakaan mallinnuksesta tehdyt kuunteludemonstraatiot eivät ole olleet rohkaisevia.

Ongelmaksi simuloinnissa muodostuu kahden erilaisen mallinnusmenetelmän tuottamisen luonteeltaan erilaisten siirtofunktioiden yhdistäminen siten, ettei amplitudi- tai vaihevasteessa tapahdu äkillisiä muutoksia. Yleensä geometrisen akustiikan mallien auralisaatioissa käytetään siirtofunktiolle minimivaiheoletusta, koska kuuntelukokeissa vaiheinformaatiolla ei ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta (Kuttruff, 1991b). Aaltoteoreettiset mallit taas sisältävät väistämättä aina tiedon myös mallinnettavan järjestelmän todellisesta vaiheesta. Mallien yhdistämiseen tulisikin kehittää algoritmi, jolla mallien vaiheet pystyttäisiin sovittamaan ilman kuultavia artefakteja ennen kuin taajuushybridienmallien käytön voidaan olettaa yleistyvän.



Kuva 4.1. Huoneakustiikan mallinnusmenetelmien jaottelu tarkastelutapojen mukaan ja menetelmien soveltaminen. Yhtenäisellä viivalla piirretyt laatikot ja nuolet kuvaavat vakiintuneita menetelmiä, pilkkuviivalla piirretyt ovat mahdollisia tulevaisuuden kehityssuuntia.

5. Kuunteluhuoneen mallinnus

5.1. Pientaajuusmallinnus

Teknillisen korkeakoulun akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriollla ja Tampereen teknillisen korkeakoulun matematiikanlaitoksella on ollut vuosina 1996-1998 Tekesin rahoittama tavoitetutkimusprojekti ”Pienten akustisten tilojen simulointi” (PATS). Hankkeessa on tutkittu eri menetelmiä mallintaa äänikentän käyttäytymistä tiloissa, jotka ovat mallinnettavaan aallonpituuteen nähden pieniä. Hankkeen mallinuskohteita ovat olleet TKK:n kuunteluhuone ja kaiutinkotelo. Alla esitetään hankkeen kuluessa saavutetut tulokset kuunteluhuoneen mallinnuksen osalta.

5.1.1. *Huoneen alustava mallinnus*

Tässä osuudessa käsitellään ennen varsinaista kuunteluhuoneen suunnittelua tehty mallinnusmenetelmiä vertaileva tutkimus (Savioja, 1996). Vertailussa tutkittiin eri mallinnsuohjelmien käyttöä sekä reunaehtojen määrittämiseen käytettävissä olevia mittausmetodeja. Tutkittu tila oli betoni- ja tiiliseinäinen huone, jota voidaan luonnehtia jäykäkäseinäiseksi.

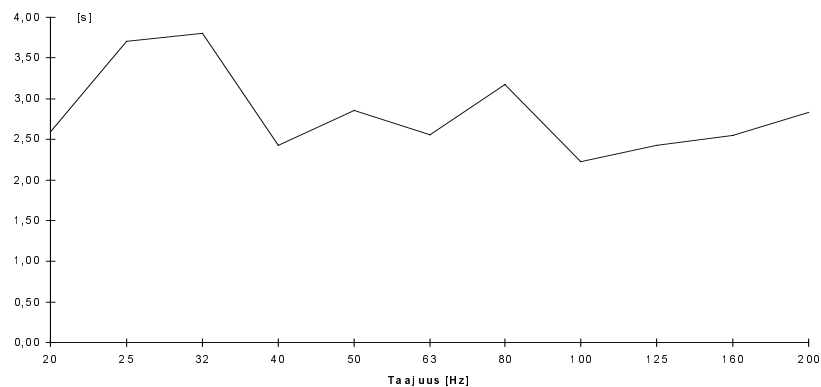
Kuunteluhuoneen mallintamiseen tarvitaan huoneen seinien määräämät reunaehdot. Kirjallisuudessa ei esiinny pienten taajuuksien absorptio- tai impedanssiarvoja, joten ne oli määritettävä mittaamalla. Akustiikan laboratorion mittalaitteilla ei voida mitata betoni- tai tiiliseinän impedanssia. Näin päädyttiin absorptiokertoimen mittaukseen, joka suoritettiin kahdella tavalla: suoraan mitatusta jälkikaiunta-ajasta laskemalla sekä kolmen alimman ominaistaajuuden kaistanleveydestä määritellyn jälkikaiunta-ajan avulla.

Ensimmäinen, jälkikaiunta-ajan suoraan mittaamiseen perustuva absorptiokertoimen määrittäminen suoritettiin ISO 354 standardia (ISO 354) mukaillen. Suoritettujen mittauksien tulokset ovat kuvassa 5.1. On huomioitava, että tyhjän kuunteluhuoneen Schroeder-taajuus on yli 300 Hertsiä, eikä äänikenttä ole siten diffuusi 20-200 Hertsin mittaustaikavälillä.

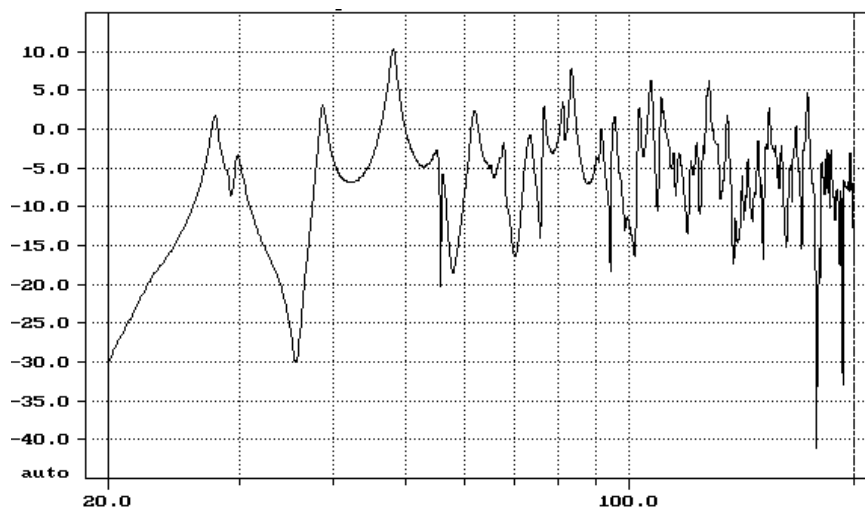
Jälkikaiunta-aikamittausten perusteella laskettu keskimääräinen absorptiokerroin oli 0,44, joka on huomattavasti liian suuri käytännössä absorboimattomalle huoneelle. Todettiin, ettei suoralla jälkikaiunta-ajan mittauksella voida määrittää järkeviä reunaehtoja huonemallille. Päädyttiin käyttämään kaavan 3.2.17 mukaista ominaistaajuuden

kaistanleveyden ja jälkikaiunta-ajan välistä yhteyttä. Huoneen kulmasta kulmaan tehdyllä mittauksella (kuva 5.2) määritettiin huoneen ominaistajuuudet. Kolmen alimman moodin kolmen desibelin kaistanleveyden avulla määritettiin keskimääräiseksi absorptio-kertoimeksi 0,05, jonka voidaan olettaa olevan kohtuullisen lähellä oikeaa arvoa.

Absorptiokertoimista määritettiin mallinnusohjelmissa käytettävät reunaehdot: heijastuskerroin (FDTD), admittanssin itseisarvo (FEM, Ansys) ja impedanssin itseisarvo (BEM, Sysnoise). Sysnoise-ohjelmassa käytetään kompleksisia reunaehtoja, jotka voivat olla taajuusriippuvia. Mittauksella voitiin määrittää vain impedanssin itseisarvo, kompleksiosa täytyi "arvata". Lopuksi mitattu reunaehto sijoitettiin huoneesta tehtyihin malleihin. Kutakin ohjelmaa varten mallinnustiedostot jouduttiin tekemään erikseen geometrian ja reunaehtojen esitystavan erilaisuuden vuoksi.



Kuva 5.1. Tyhjän huoneen jälkikaiunta-aika tersseittäin.



Kuva 5.2. Tyhjän kuunteluhuoneen ominaistajuuudet 20-200 Hz

Ensiksi kullakin mallinnusmenetelmällä laskettiin huoneen ominaistajuudet. Laskennan tuloksia on verrattu taulukossa 2. Kuten aiemmin todettiin BEM:illä ei voida laskea ominaistajuuksia. Analyytisesti kuunteluhuoneen ominaistajuudet määritettiin kaavalla (3.2.10).

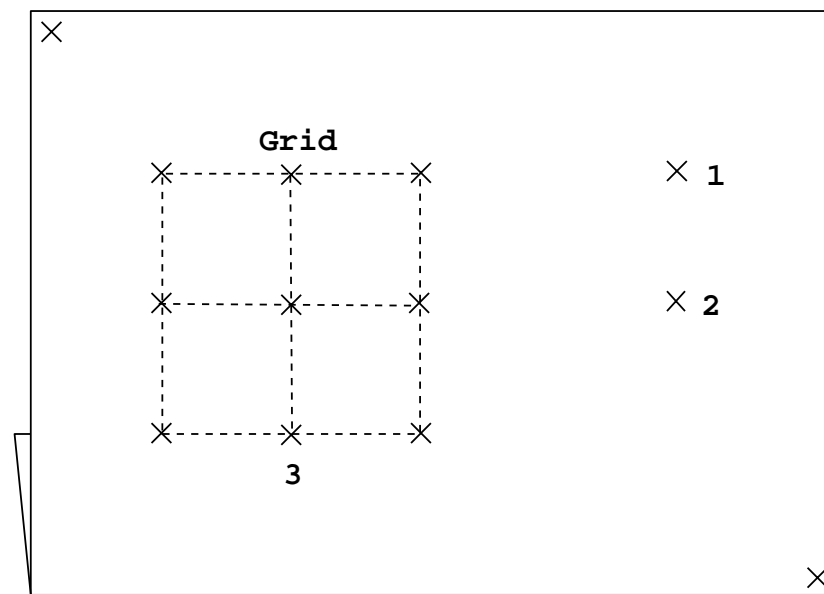
Tuloksista nähdään, että ominaistajuudet voidaan löytää varsin tarkasti. Toisaalta ero analyytisesti laskettuihin ominaistajuuksiin ei ole kovin suuri. Suorakulmaisen, jäykkärakenteisen ja lievästi epäsymmetrisen huoneen ominaistajuuksien laskentaan analyytinen Rayleighin kaava on täysin riittävä.

Taulukko 2. Kuunteluhuoneen ominaistajuudet eri menetelmillä määritettynä. (--) merkisee, ettei kyseistä ominaistajuutta voitu löytää puutteellisen taajuusresoluution tai mallin yksinkertaisuuden vuoksi.

Analyytinen	Mittaus	FEM	FDTD
27,42	27,77	27,76	27,32
--	29,79	--	--
37,78	38,70	38,25	38,10
46,68	48,10	47,29	46,73
47,22	--	47,91	48,17
54,61	55,00	55,33	54,64
54,84	56,10	55,72	--
--	57,86	--	--
60,47	61,83	61,37	61,11
66,40	65,19	67,23	66,14
66,59	67,10	68,01	--
--	67,75	--	--
72,37	73,55	73,51	72,61
75,56	76,72	76,74	76,21
80,38	81,36	81,53	80,52
81,64	83,50	83,10	--
82,26	90,52	83,88	--
89,10	91,68	90,42	89,15
90,52	--	92,08	90,59
93,22	95,52	94,58	93,46
93,36	--	94,76	94,90
94,44	--	96,21	97,06
94,85	--	96,94	99,22
98,34	99,30	100,37	102,09

Mallinnuksen onnistumista arvioitiin myös suorittamalla taajuusvasteen laskenta kahdesta kaiutinpisteestä yhdeksään kuuntelualueella sijaitsevaan mittauspisteeseen. Huoneen mitat ovat: pituus 6,2 m, leveys 4,5 m ja korkeus 3,6 m. Mittauskorkeus oli 1,2 metriä.

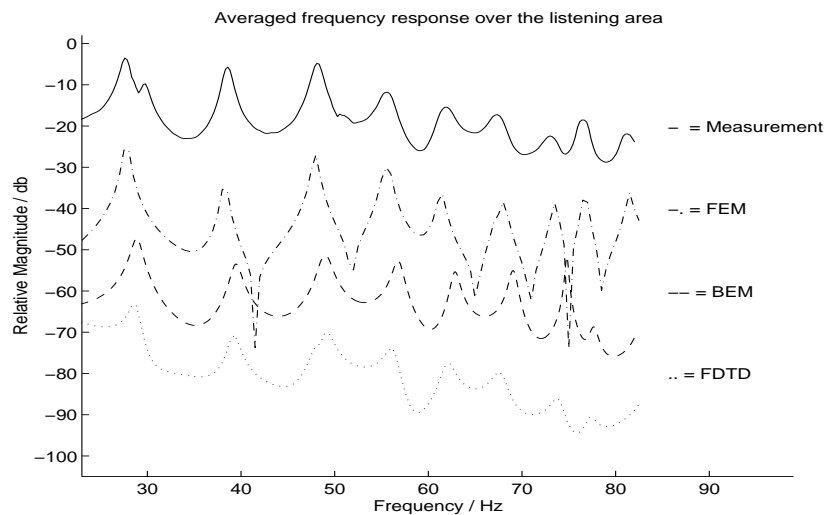
Äänilähteenä käytettiin 12-tuumaista bassoelementtiä suljetussa noin 45 litran kotelossa. Elementti osoitti kohti lattiaa noin viiden senttimetrin korkeudella. Mittaukset suoritettiin maksimipituussekvenssimenetelmällä (MLS). Mittauskaista oli sama kuin ominaistaajuuksien mittauksessa eli 20 -200 Hertsia. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 5.3.



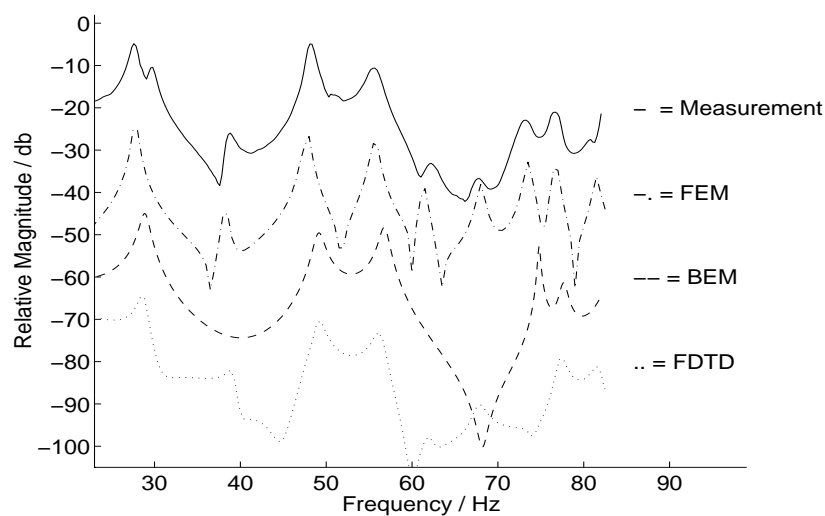
Kuva 5.3. Kaiutin- ja mittauspisteiden sijainti huoneessa (äänilähde pisteissä 1 ja 2).

Paikkakeskiarvotetut taajuusvasteet ovat varsin samanlaisia (kuva 5.4). Suurimmat poikkeamat ovat BEM-menetelmän ja muiden tulosten välillä. Syynä tähän on todennäköisesti se, ettei käytetty kompleksisen impedanssin imaginääriosa perustunut mittaus-tuloksiin. Toinen huomattava ero mittaus- ja mallinnustulosten välillä on noin 30 Hertsin taajuudella esiintyvä ominaismuoto mittauksissa. Taajuuskomponentti ei ole huoneen, vaan sen rakenteiden ominaisuus, eikä sen alkuperää ole voitu selvittää.

Yksittäisessä kuuntelupisteessä mitattu vaste eroaa huomattavasti enemmän mallinnetuista (kuva 5.5). Tästä voidaan päätellä mallien tarkkuuden olevan tasolla, jolla niitä voidaan käyttää keskimääräisten taajuusvasteiden laskentaan. Yksittäisen lähde - vastaanottopiste välisen vasteen laskemiseen tarvitaan ainakin tarkemmin määritellyt reunaehdot.



Kuva 5.4. Paikkakeskiarvostetut taajuusvasteet.



Kuva 5.5. Taajuusvaste lähdepisteestä 2 mittauspisteeseen 6

5.1.2. Toteutetun suunnitelman mallinnus

Huoneen rakennusteknisten töiden valmistuttua päätettiin suorittaa uusi pientaajuusmallinnus, jonka avulla voitaisiin arvioida mitä vaikeuksia mallinnuksessa esiintyy, kun mallinnettava tila on vaimennusominaisuuksiltaan ja rakenteeltaan täysin erilainen kuin aiemmin mallinnettu kova ja suhteellisen jäykkäseinäinen huone.

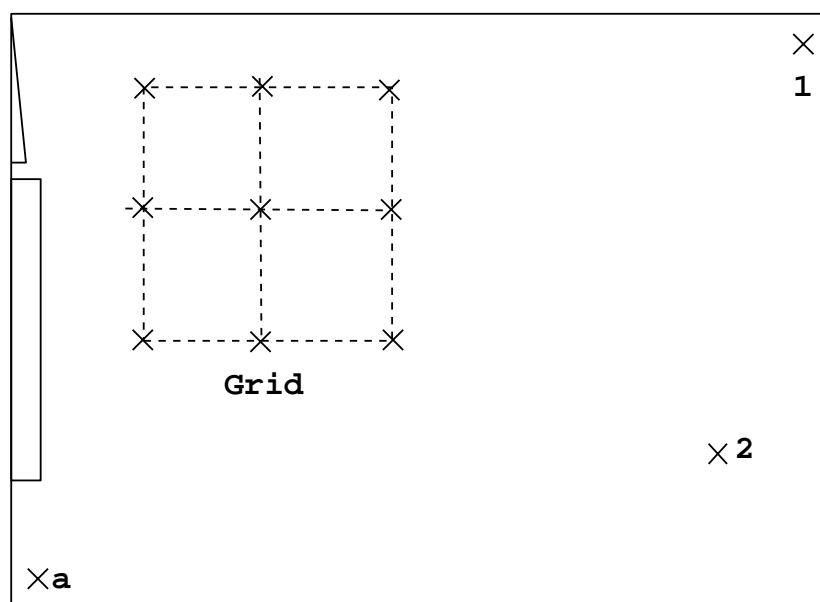
Ongelmia voitiin arvioida syntyvän mm. seuraavista tekijöistä: huoneen soladiffusorit (luku 7), levyrakenteisten seinien vaimennus (kappale 6.3.) ja reikälevyresonaattorina toimiva alaslaskettu katto. Lisäksi on syytä epäillä, onko kaavan 3.1.14 edellyttämä oletus pienestä admittanssista voimassa kaikilla taajuuksilla.

Mittauksissa ongelmia oli ominaistaajuuksien kaistanleveyden määrittämisessä, koska vaimentuneiden ominaisuusmuotojen puolentehon kaistanleveys oli niin suuri, että muodot olivat päällekkäisiä. Kaistanleveyden mittauksissa mikrofonin sijoitettiin aina kunkin

ominaismuodon napakohtaan ja näin saatiin vaimennettua muita muotoja riittävästi kaistanleveyden määrittämistä varten. Seinien akustista impedanssia yritettiin määrittää myös suoraan pintaintensiteettimenetelmällä (Lahti, 1997), mutta järjestelmän vaihekalibrointia ei ollut mahdollista suorittaa riittävällä tarkkuudella luotettavien tulosten saamiseksi.

Tällä kertaa mallinnukseen käytettiin Sysnoise-ohjelmaa sekä FEM- että BEM-mallinnuksessa. Lisäksi mallinnus suoritettiin myös aiemmin käytetyllä FDTD-ohjelmalla. FEM- ja BEM-verkon hilapisteiden väli oli 40 cm, josta voidaan päätellä mallin ylärajataajuuden olevan noin 200 Hz. FDTD-simuloinnissa hilapisteiden välimatka oli 6 cm ja hilan koko noin 500 000 pistettä. FDTD-simuloinnin ylärajataajuus oli noin 500 HZ.

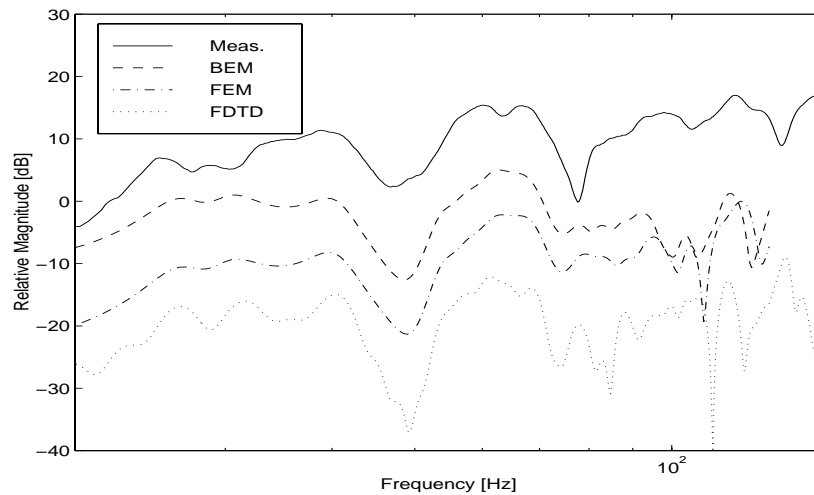
Mittaus- ja mallinnuspisteet on esitetty kuvassa 5.6. Äänilähteen sijoituspaikat ovat piste 1, joka on niin lähellä huoneen nurkkaa kuin mahdollista, ja piste 2, joka sijaitsee etäisyydellä 1,6 m huoneen sivuseinästä, 1,2 m:n etäisyydellä etuseinästä ja korkeudella 0,8 m. Mikrofonipiste a sijaitsee huoneen toisessa nurkassa. Mittaushilassa oli 9 pistettä 0,8 metrin etäisyydellä toisistaan korkeudella 1,2 metriä. Huoneen keskiakselilla oleva mittaushilan nurkkapiste sijaitsi huoneen geometrisessä keskipisteessä.



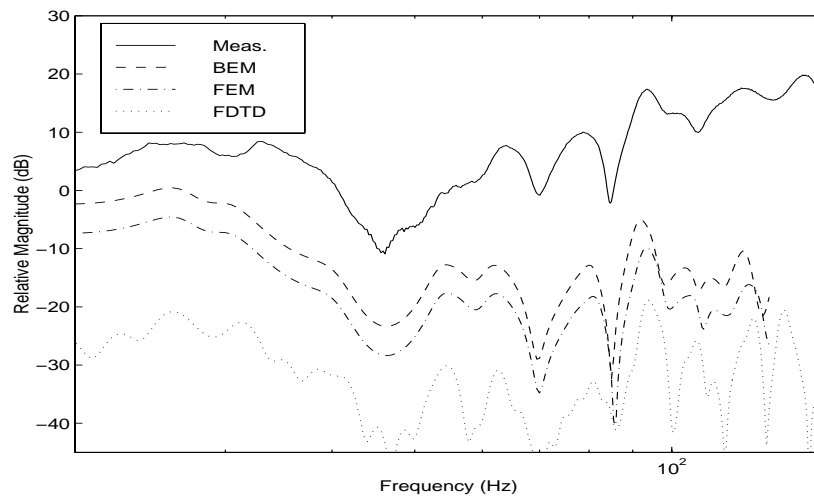
Kuva 5.6. Toteutetun huoneen mallinnuksessa käytetty mittaushila.

Mallinnus- ja mittaustulokset on esitetty kuvissa 5.7-5.9. Tuloksista voidaan nähdä, että luotettavan mallinnuksen käytännön ylärajataajuus on noin 100 Hz. Myös pienimmillä taajuuksilla mitatuissa ja mallinnetuissa vasteissa on eroja, jotka johtuvat osin äänilähteen taajuusvasteen kompensoinnin epävarmuustekijöistä. FEM- ja BEM-malleissa

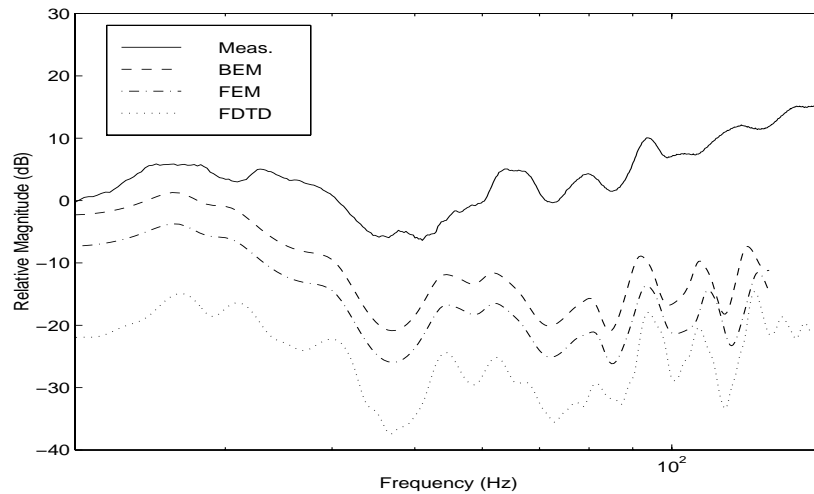
reunaehtona on käytetty kompleksista impedanssia, jonka seurauksena vasteiden muutokset ovat luonteeltaan pehmeämpiä kuin FDTD:llä lasketut ja mitatut vasteet. Mallinnetuilla vasteilla on yleensä taipumus liioitella yksittäisten terävien ominaisuutojen vaikutusta.



Kuva 5.7. Magnitudivaste lähdepisteen 1 ja mittauspisteen a välillä.



Kuva 5.8. Magnitudivaste herätepisteen 2 ja huoneen geometrisen keskipisteen välillä.



Kuva 5.9. Mittaushilan pisteiden keskiarvoistettu magnitudivaste, herätepiste 2.

5.2. Suurtaajuusmallinnus

Elementtimallien lisäksi huoneen suunnittelun apuna on käytetty ODEON-mallinnusohjelmaa (Naylor, 1993). ODEON on suunniteltu varsinaisesti konserttisalien mallintamiseen, mutta sitä voidaan hyödyntää myös pienten tilojen mallinnuksessa. Tuloksiin pienillä taajuuksilla on suhtauduttava tiettyä varovaisuutta noudattaen, koska ODEON perustuu geometrisen akustiikan malleihin.

ODEON on myös näppärä työkalu, koska siinä on varsin suuri materiaalitietokanta ja se laskee automaattisesti jälkikaiunta-ajan Sabinen- ja Eyringin-kaavoilla. Lisäksi nopea jälkikaiunnan arviointi säteenseurannalla on mahdollista. Tarkemman analyysin laskeamiseen useaan pisteeseen hybridimenetelmällä kuluu helposti nopeallakin PC:llä useita tunteja. Taulukossa 3 on esitetty ODEON-ohjelmalla laskettuja tuloksia totetetusta kuunteluhuoneesta. Tuloksia voi verrata kuvassa 8.2 esitettyihin mittaustuloksiin.

Taulukko 3. ODEON:illa laskettuja jälkikaiunta-aikoja.

Taajuus [Hz]	Sabine	Eyring	Raytracing	Hybridimalli (6 pistettä)
125	0,4	0,3	0,44	0,52
250	0,3	0,2	0,45	0,50
500	0,3	0,2	0,37	0,42
1000	0,3	0,3	0,35	0,39
2000	0,4	0,3	0,35	0,37
4000	0,4	0,3	0,33	0,35

Mittaustulosten perusteella voidaan arvioida ODEON-ohjelman hienostuneempien algoritmien tulosten olevan systemaattisesti hiukan liian suuria. Toisaalta ohjelmassa on mahdollista toteuttaa esimerkiksi ympärisäteilevä äänilähde huomattavasti ideaalisemmin kuin käytännön mittauksissa. Tulosten valossa voidaan todeta, että pelkkää jälkikaiunta-aikaa tutkittaessa Sabinen ja Eyringin kaavalla lasketut tulokset ovat vähintään yhtä tarkkoja kuin säde- tai hybridimenetelmää käyttämällä saadut.

Ohjelman käytön suurin hyöty pienten huoneiden suunnittelussa on mahdollisuus visualisoida heijastusten kulkureittejä ja arvioida tällä tavoin esimerkiksi tärykaiun todennäköisyyttä.

6. Toteutettu huone

Kuunteluhuoneen suunnittelussa on aina tehtävä kompromisseja, koska onnistuneen huoneen kannalta tärkeintä on löytää sopiva tasapaino osin ristiriitaisten ominaisuuksien välillä. Yleensä ensimmäinen vastaan tuleva reunaehto on taloudelliset realiteetit. Muita mahdollisia rajoitteita ovat käytettävissä oleva tila, rakenteiden kantavuus, arkkitehtoniset syyt yms. Hyvä akustinen suunnittelu on siis onnistuneiden kompromissien summa.

Suunnittelussa on oleellista huolehtia siitä, että akustiikkaan eniten vaikuttavat ratkaisut ovat järkeviä ja valvoa, että ne myös toteutetaan suunnitelman mukaan. Erityisesti ääneneristysrakenteiden osalta toteutuksen valvonta on hoidettava tarkasti, koska väärin tehtyjen rakenteiden muuttaminen jälkikäteen saattaa olla mahdotonta.

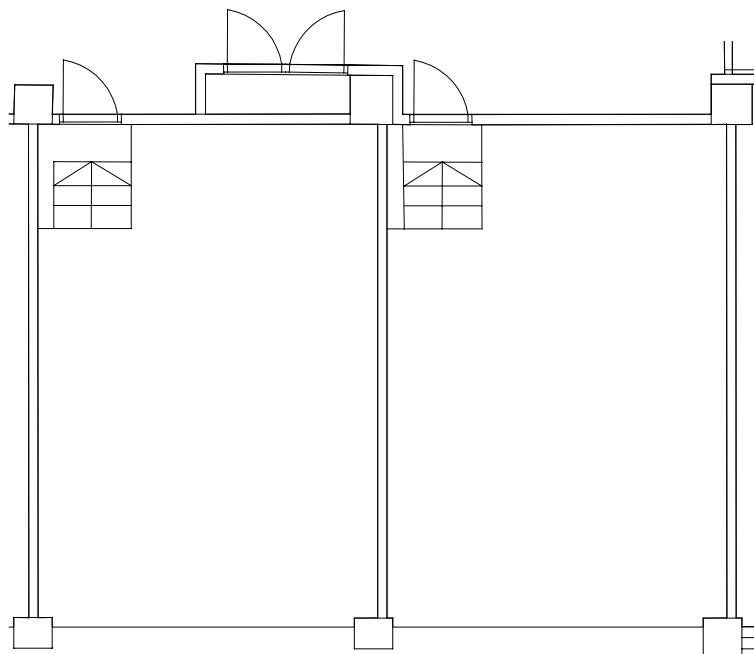
Huoneen suunnittelussa päädyttiin toteuttamaan geometria siten, että se täyttää standardien vaatimukset olematta kuitenkaan optimaalinen muodoltaan. Tämä päätös tehtiin, koska huoneen haluttiin soveltuvan myös monikanavakuunteluun. Standardien optimisuhteiden mukaan toteutettuna huoneesta olisi tullut huomattavasti kapeampi. Tämä estäisi surround-kanavien kaiuttimien sijoittamisen riittävän etäälle seinistä, mikä puolestaan häiritsisi monikanavakuuntelua.

6.1. Alkutilanne

Eräs suunnittelua vaikeuttava tekijä oli se, että kuunteluhuone oli sijoitettava olemassa olevaan rakennukseen. Tämän seurauksena huonetta ei voitu sijoittaa taustamelun kannalta rakennuksen parhaaseen paikkaan. Niinpä kuunteluhuoneen rakenteet jouduttiin toteuttamaan massiivisempina kuin tapauksessa, jossa huone olisi voitu sijoittaa rakennuksen suunnitteluvaiheessa tilaohjelman kannalta sopivimpaan paikkaan. Toinen vanhojen rakennusten ongelmallinen ominaisuus on niiden liian pieni kerroskorkeus, joka aiheuttaa ongelmia mikäli huoneeseen joudutaan rakentamaan alaslaskettu katto ja kelluva lattia riittävän ääneneristyksen takaamiseksi. Tässä hankkeessa kerroskorkeus ei kuitenkaan muodostunut ongelmaksi. Niinpä huoneeseen oli mahdollista toteuttaa sekä riittävät ääneneristysrakenteet että taustamelutasoltaan hiljainen ilmasto.

Lähtötilanteena oli kaksi toisistaan tiiliseinällä erotettua huonetta (kuva 6.1), joiden mitat olivat pituus 623 cm ja leveydet 448 cm ja 421 cm. Huoneiden lattia oli 80 cm sisäänkäyntiä alempana. Huoneiden verhourakenteet olivat betonia ja tiiltä, ja kantavat

rakenteet oli toteutettu pilari-palkki-ratkaisulla. Huoneen lattia oli maavarainen betoni-laatta. Huoneiden lämmitys oli toteutettu vesipattereilla ja huoneiden läpi kulki mm. paineilmaputkisto. Huonekorkeus oli poikkeuksellisen suuri, 360 senttimetriä, mikä antoi runsaasti vaihtoehtoja lattia- ja kattorakenteiden suunnitteluun.



Kuva 6.1. Käytössä olleen tilan pohjakuva hankkeen alussa.

6.2. Huoneohjelman suunnittelu

Suunnitteluvaiheessa tavoitteeksi asetettiin moderni monikanavakuunteluun soveltuva kuunteluhuone. Tärkeinä tekijöinä olivat myös mahdollisuus kuvantoistoon ja erilaisten multimediasovellusten käyttöön.

Ensimmäiseksi tutkittiin tilannetta, jossa olemassa oleva väliseinä olisi jätetty paikalleen. Tällä ratkaisulla olisi ollut mahdollista toteuttaa IEC 268-13 standardin mukainen kuunteluhuone. Kuunteluhuoneeksi suunnitellun tilan lattiapinta-alaksi olisi jäänyt äänneneristysratkaisujen jälkeen 24 neliömetriä. Toteutettu huone olisi tässä tapauksessa ollut mitoiltaan IEC 268-13 standardin alarajalla ja erityisesti monikanavakuuntelussa takakanavien kaiuttimet olisivat jääneet alle puolen metrin etäisyydelle sivuseinistä.

Tässä vaiheessa todettiin, ettei kyseinen suunnitelma ollut toteuttamiskelpoinen, koska monikanavatoisto ja sen subjektiivinen arviointi tulisivat todennäköisesti olemaan eräs

huoneen tärkeimmistä käyttötarkoituksista. Niinpä huoneet toisistaan erottava tiiliseinä päätettiin purkaa.

Tämän jälkeen käytössä oli yksi mitoiltaan 882*623 cm oleva huone (kuva 6.2), johon oli kaksi sisäänkäyntiä. Huoneet aiemmin jakaneen väliseinän kohdalle jäi 55 cm korkea ja 40 cm leveä betonipalkki huoneen kattoon.

Pohdittaessa lopullista toteutusta todettiin seuraavat huoneen käyttöön liittyvät seikat, jotka tulisi huomioida lopullisessa suunnitelmassa. Kaapeloinnin siistin toteutuksen kannalta olisi edullista jos huoneen keskiosaan voitaisiin sijoittaa liitinpaneeli lähelle optimaalista kuuntelupaikkaa. Tämä vuoksi katsottiin tarpeelliseksi toteuttaa lattia olemassa olevan betonilaatan päälle. Tämä oli perusteltua myös siksi, että huoneeseen pyrittiin toteuttamaan erittäin hyvä ääneneristys. Lisäksi edellytettiin, että kuunteluhuoneeseen pitää pystyä kulkemaan ilman läpikulkua tarkkaamon kautta, koska koehenkilöiden halutaan tyypillisesti tietävän mahdollisimman vähän kokeissa käytettävistä laitteista.

Käytännössä merkittävin suunnitteluongelma aiheutui siitä, että käytävän ja huoneen lattioiden korkeusero oli 80 senttimetriä, jonka vuoksi huoneeseen täytyy laskeutua portaita. Tämä ongelma oli suunnitteluvaiheessa kiusallinen kahdesta syystä. Laitteiden siirtäminen huoneeseen ja sieltä pois tulisi olemaan hankalaa erityisesti suurten ja painavien kaiuttimien tapauksessa. Lisäksi portaiden jyrkkyydelle on olemassa rakennusmääräyksissä rajat, jonka seurauksena määräysten mukaiset portaavat vievät paljon tilaa.

Väliseinän purkamisen seurauksena erilaisten ratkaisujen määrä monikertaistui. Tässä vaiheessa tehtiin päätös, että kuunteluhuone pyritään toteuttamaan mahdollisimman hyvin ja tarkkaamotila tehdään niin pieneksi kuin käytännössä on mahdollista. Lisäksi päätettiin, että huoneen tulee täyttää ITU-R BS.1116-suosituksen vaatimukset mikäli mahdollista. Tähän valintaan päädyttiin, koska suositus on laadittu kuuntelukokeisiin, joissa tavoitteena on pienien erojen havaitseminen. Tällaisia kokeita ovat muun muassa äänikoodekkien algoritmikehitys, joka on eräs Akustiikan laboratorion tutkimusaiheista. Lisäksi BS.1116-suosituksessa on huomioitu nykyisistä standardeista ja suosituksista monikanavaäänentoisto parhaiten. Samoin koejärjestely, jossa kuva esitetään yhtäaikaaisesti äänen kanssa, on sisällytetty suositukseen. Tämän tyyppisten kokeiden arvioitiin muodostavan osan tulevista kuuntelukokeista.

Huoneen sisämitat ovat suunnitelman mukaan seuraavat:

Pituus: 625 cm

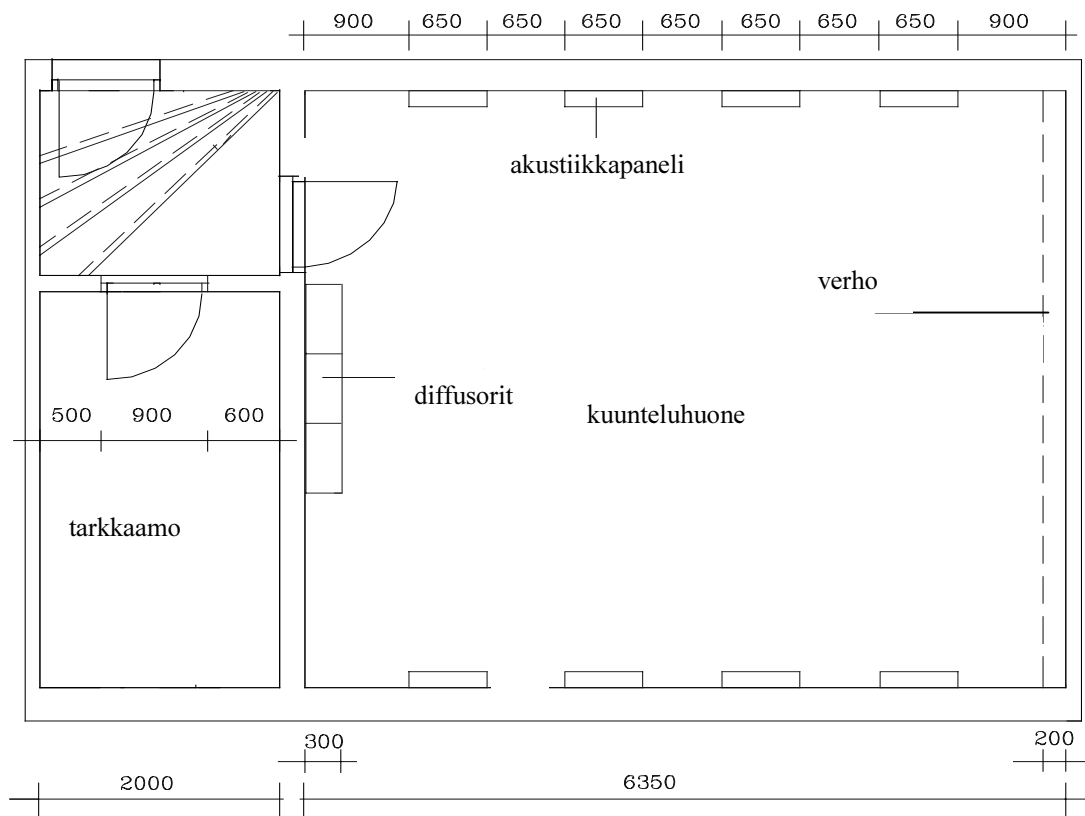
Leveys: 560 cm

Korkeus: 295 cm

Tilavuus: 103 m³

Pinta-ala: 35 m²

Huoneen pohjapiirros on esitetty kuvassa 6.2.



Kuva 6.2. Kuunteluhuoneen pohjapiirros.

Kaavan 2.4.1 mukaisesti laskettuna mitat suhtautuvat toisiinsa seuraavasti: $2,08 \leq 2,11 \leq 4,54$ eli huone täyttää ITU:n vaatimuksen asettamat ehdot huoneen geometrialle.

Huoneen geometriaa verrattiin myös N-12 A-suositukseen, jonka mukaisia vaatimuksia huone ei täytä.

$$L / W = 1,12 \quad (1,25 - 1,45)$$

$$W / H = 1,90 \quad (1,10 - 1,90)$$

$$L / H = 2,12 \quad (\leq 1,90 \text{ tai } \geq 2,10)$$

Tuloksen perusteella nähdään kuitenkin se, että huone on huomattavan leveä. Tähän on syynä se, ettei huoneesta voitu tehdä pidempää, koska tarkkaamo ja kuunteluhuone täytyi sijoittaa tilanpuutteen vuoksi samaan tilaan. Samalla kun tehtiin päätös huoneen geometriasta, todettiin, että mahdollisten pientaajuuksien ongelmien välttämiseksi huoneen rakenteet tulisi tehdä pienillä taajuuksilla mahdollisimman absorboiviksi.

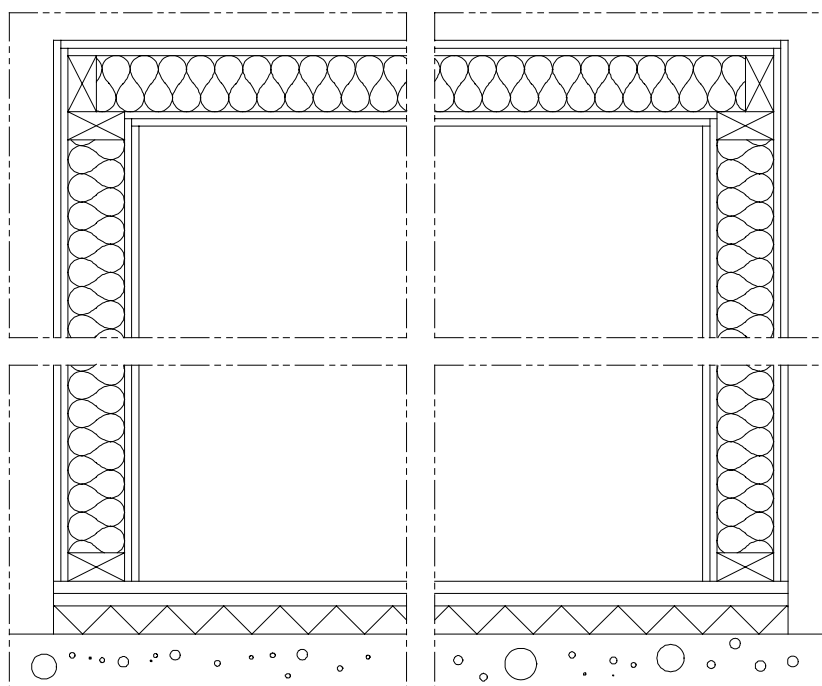
6.3. Rakennusakustinen suunnittelu

Toteutettaessa ITU-R BS.1116-suosituksen mukaista kuunteluhuonetta rakennukseen, jossa tilojen käyttötarkoitus saattaa muuttua, on ääneneristysratkaisut suunniteltava korkealuokkaisiksi. Lisäksi rakenteiden toteutuksessa on oltava erittäin huolellinen.

Ennen huoneen suunnittelun aloittamista suoritettiin rakennusakustiset mittaukset. Suoritettujen mittausten perusteella voitiin arvioida käytössä olevan tilan merkittävimmäksi taustameluongelmaksi huoneen yläpuolelta kantautuva askelääni, joka oli huomattavan voimakas rakennuksessa käytetyn pilari-laatta rakenteen vuoksi.

Suoritettujen mittausten tulosten perusteella oli selvää, että pyrittäessä ITU-R BS.1116-suosituksen mukaisiin taustamelutasoihin olisi huoneessa rakennettava huone- huoneessa periaatetta käyttäen (kuva 6.3).

Tällä periaatteella tarkoitetaan rakennustapaa, jossa olemassa olevan huoneen sisälle rakennetaan toinen huone, joka ei ole periaatteessa kiinnitetty lainkaan ulompaan rakenteeseen. Käytännössä sisempi huone on yleensä kiinnitetty tärinäeristimin siten, ettei sisemmän rakenteen tarvitse olla kantava rakenne. Myös kaikkiin huoneeseen



Kuva 6.3. Huone-huoneessa periaate.

vietäviin ilmastointi- ja vesiputkiin tehdään joustava liitos, jolla estetään äänen kulkeutuminen sisempään huoneeseen.

Huoneen rakenteiden suunnittelu oli melko suoraviivaista, koska varsinaiset kantavat seinät olivat jo olemassa. Suunnittelussa ei siis tarvinnut suunnitella kantavia rakenteita, eikä myöskään huolehtia ympäröivien rakenteiden kantavuudesta. Tehdyn tanskalaisten kuunteluhuoneiden kartoituksen perusteella voitiin päätellä, että sisemmän rakenteen toteuttaminen esimerkiksi tiilestä johtaa väistämättä ongelmiin pienillä taajuuksilla. Lisäksi tiilirakenne on huomattavasti kalliimpi kuin levyrakenteiset seinät. Levyrakenteisissa seinissä päätettiin käyttää kipsiä, koska se on melko edullista ja paloturvallista ja sen akustiset ominaisuudet sopivat tähän käyttötarkoitukseen.

Huone-huoneessa-periaatteen soveltaminen edellyttää myös kelluvan lattian käyttämistä. Kelluva lattia voidaan tehdä kahdella tavalla, joko betonista valamalla tai kevyenä lattiana käyttämällä levyrakenteita. Valamalla toteutettu lattia on huomattavasti kalliimpi ja siksi päätettiin yrittää lattian rakentamista levyrakenteisena. Saatujen materiaali- mittaustulosten perusteella oli syytä epäillä levyrakenteisen lattian resonanssitaajuuden nousevan liian korkeaksi. Asian varmistamiseksi tehtiin koelattia. Mittausten perusteella lattian resonanssitaajuus oli 28 Hz, jonka todettiin olevan riittävän alhainen tässä tapauksessa.

6.4. Huoneakustiikan suunnittelu

Kuunteluhuoneen huoneakustisen suunnittelun osalta tärkeä ratkaisu tehtiin valitsemalla huoneen seinien toteuttamistavaksi levyrakenteiset kipsiseinät. Vaikka kaksinkertaisesta kipsilevystä tehdyt seinät ovat kohtuullisen jäykät, toimivat seinät myös levyresonaattoreina. Resonaattoriominaisuudet olisivat korostuneet, mikäli levykerrosten määrä olisi ollut vain yksi, mutta seinien ollessa noin 350 cm korkeat olisi niiden rakenteellinen jäykkyys ollut liian pieni yhtä 13 mm:n kipsilevyä käytettäessä. Huoneakustiikkasuunnittelun kannalta ongelmaksi muodostuu se, ettei seinien resonaattoriominaisuuksien aiheuttamaa pientaajuusabsorptiota voida ennustaa luotettavasti. Käytännössä rakenne joudutaan ensin toteuttamaan ja toteamaan saavutettu tilanne mittauksin, joiden jälkeen voidaan tehdä päätökset mahdollisesti tarvittavista pientaajuus absorbenteista.

Kuunteluhuoneen akustisessa suunnittelussa tulee hyvän stereokuvan saavuttamiseksi pyrkiä täydelliseen symmetriaan niin kaikkien rakenteiden kuin muidenkin huoneakustiikkaan vaikuttavien tekijöiden osalta. Eräissä referenssikuunteluhuoneissa on symmetriavaatimusten vuoksi rakennettu jopa ylimääräisiä ovia, joilla on pyritty huoneen rakenteiden ominaismuotojen symmetriaan. Kuunteluhuoneen symmetria toteutettiin näkyviltä osin täydellisesti, mutta ylimääräisiä ovia ei kustannus- ja ääneneristysyistä rakennettu.

6.4.1. Akustiikkapanelit

ITU-R BS.1116-suosituksen vaatimukset kuunteluhuoneen jälkikaiunta-ajan tasaisuudelle ovat niin tiukat, että huoneen suunnitelmassa tulee varautua mahdollisuuteen muuttaa absorptiomateriaalien määrää. Tässä projektissa huoneen sivuseiniin kiinnitettiin kahdeksan paneelia, joihin voidaan sijoittaa mitoiltaan 600*600 mm olevia absorptiomateriaalipaloja. Ennen huoneen lopullisia jälkikaiunta-ajan verifiontimittauksia kokeiltiin kahta erilaista materiaalikombinaatioita. Ensimmäisessä versiossa käytetty absorptiomateriaali oli pinnoitettua lasivillaa. Tällä kombinaatiolla ongelmaksi muodostui liian suuri absorptio korkeilla taajuuksilla. Huoneen lopullisessa muodossa osa lasivillasta korvattiin alakatoissa selluloosapohjaisilla absorbenteilla, joiden absorptiokerroin on tasaisempi taajuuden funktiona.

6.4.2. *Alaslaskettu katto*

Ääneneristyskaton alapuolelle rakennettiin alaslaskettu katto lähinnä kahdesta syystä. Ensinnäkin tällä tavoin pystytään katosta tekemään riittävän absorboiva kattoheijastuksen vaimentamiseksi. Toiseksi katon rakenteisiin pystyttiin sijoittamaan huoneen ilmastoinnin pääte-elimet sekä ilman jäähdyttämisestä huolehtivat jäähdytyspalkit. Katto rakennettiin Gyprocin pyöreäreikäistä pointlevystä, jonka reikien pinta-ala on 10% levyn pinta-alasta. Levyssä on reikien takana vaimennushuopa, jolla parannetaan rakenteen absorptio-ominaisuuksia. Osasta levyjä huopa poistettiin, koska ilmastoinnin poisto- ja tuloilma kulkevat katon läpi ilman näkyviä pääte-elimä.

7. Soladiffusorit

Erilaisia diffuusoreja käytetään akustisessa suunnittelussa tilanteissa, joissa halutaan poistaa yksittäinen voimakas heijastus niin, että heijastuksen energia säilyy. Monet rakenteet toimivat diffuusoreina, vaikka niitä ei alunperin sellaisiksi olisi suunniteltu. Diffuusoreja käytetään yleisesti kaikuissa tiloissa, joissa ei saa esiintyä yhden-suuntaisten seinien väliin muodostuvaa tärykaikua. Esimerkkeinä tällaisista tiloista käyvät kaiunta-huoneet ja konserttisalit. Perinteiset diffusorirakenteet ovat kaarevia, kiilamaisia tai kartiomaisia kappaleita ja niiden tulee olla aallonpituuteen verrattuna kookkaita. Diffusorirakenteiden huonona puolena on se, että niiden toiminta on voimakkaasti taajuudesta riippuvaa. Lisäksi kaarevien ja pallomaisten kappaleiden sironnan laskeminen on analyttisin menetelmin hankalaa. Cox (1996) on esittänyt menetelmän kaarevien rakenteiden sironnan optimoimiseen.

"Millainen tasomainen seinän muoto aiheuttaa mahdollisimman diffuusin heijastuksen, että mistä tahansa suunnasta tuleva aalto heijastuu kaikkiin suuntiin yhtä voimakkaana?"

Tällä kysymyksellä alkaa Manfred Schroederin ensimmäinen diffuusoreita käsittelevä artikkeli (Schroeder, 1975), jossa esitetään Fraunhoferin diffraktioteoriaan perustuva keino löytää pinnanmuoto, joka synnyttää mahdollisimman diffuusin heijastuksen.

Schroeder esitti, että toteuttamalla näennäissatunnaisen maksipituussekvenssin (MLS) mukaan vaihteleva pinnanmuoto, jossa heijastuserroin saa arvoja $+1$ ja -1 MLS-sekvenssin mukaisessa järjestyksessä, toimii tällainen pinta optimaalisena diffusorina lukuunottamatta peiliheijastusta, jonka arvo on nolla. Tätä toimintaa voidaan perustella MLS-sekvenssin Fourier-muunnoksen kautta, jonka arvo on vakio lukuunottamatta taajuutta 0, jolla muunnoksen arvo on nolla. Heijastuserroin -1 voidaan toteuttaa helposti aallonpituuden neljänneksen syvyisellä solalla, joka aiheuttaa tulevan äänen vaiheeseen piin suuruisen muutoksen.

Fraunhoferin diffraktioteorian avulla kaukokenttätarkastelussa voidaan johtaa yhteys pinnan muodon Fourier-muunnoksen ja diffraktoituneen energian äänen suuntakuvion välille. Optiikassa vastaavia rakenteita kutsutaan diffraktiohiloiksi, joita on käytetty optisissa sovelluksissa jo sadan vuoden ajan.

Käytännön huoneakustiikan sovellutuksia ajatellen diffusori, jonka kaistanleveys on ainoastaan oktaavi, on käyttökelvoton. Myöhemmin Schroeder (1978) julkaisi ehdotuksen käyttää GF2-kuntaan kuuluvia sekvenssejä (neliölliset jakojäännökset ja primitiivijuuret) diffusorin pinnan muotona. Näiden sekvenssien mukaisten diffusorien solien leveys on vakio syvyyden vaihdellessa sekvenssien mukaisesti. Näin konstruoitujen diffusorien kaistanleveys on useita oktaaveja.

Myöhemmin on käytännössä osoittautunut, että perinteisiä soladiffusoreita tehtäessä on käytännöllisintä käyttää QR-sekvenssiä pienehköllä alkuluvulla N ($N:n$ arvon tulee olla vähintään seitsemän). Syynä tähän on QR-sekvenssin peilisymmetria, josta seuraa yksinkertaisempi rakenne. Kuitenkin myös QR-sekvenssinkin mukaisessa rakenteessa on merkittävästi hukkatilaa ja tarvittava rakennesyvyys pientaajuusdiffusorin kostruoinemiseksi on erittäin suuri. Diffusoreiden mitoittaminen on periaatteessa hyvin yksinkertaista. Tarvittavat mitoitusäännöt on esitetty D'Antonion ja Konnertin julkaisussa sekä Backmannin (1999) opetusmonisteessa. Mitoitusäännöiltään QR- ja PR-diffusorit eivät eroa toisistaan muutoin kuin solien syvyysjärjestyksen osalta.

7.1. Soladiffusoreiden pientaajuusabsorptio

Fujiwara (1992) havaitsi soladiffusoreilla merkittävää absorptiota myös suunnittelutajuuden alapuolella. Ilmiötä ei voida selittää perinteisen soladiffusoreiden teorian avulla, koska oletamus äänipaineen itseisarvon tasaisesta jakautumisesta diffusorin pinnalla ei pidä paikkaansa, vaan solien välisten vaihe-erojen vuoksi rakenteessa ilmenee virtausta vierekkäisten solien välillä.

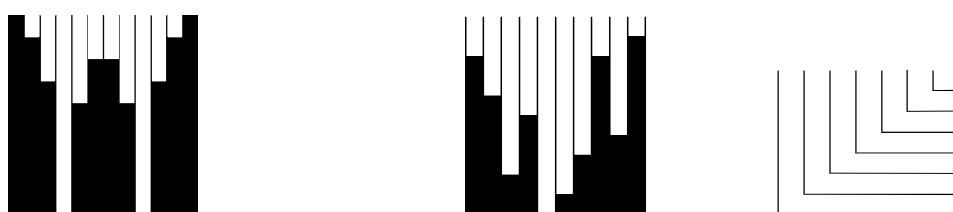
Kuttruffin (1994) esittämän mallin avulla absorptiota voidaan mallintaa melko yksinkertaisesti. Mallin mukaan absorptio voidaan selittää diffusorin solien välisten hiukkanopeuserojen tasoittumispyrkimyksellä, josta aiheutuvan virtauksen vuoksi yksittäisten kanavien hiukkanopeus on suurempi kuin tulevan äänipaineen ja solan suuaukon impedanssin perusteella voitaisiin olettaa.

Kuttruffin mallin antamat tulokset absorptiosta ovat huomattavasti pienempiä kuin mitatut arvot. Tämä johtuu siitä, että solien sisäisiä häviöitä ei ole otettu mallissa huomioon. Mallia ovat myöhemmin täydentäneet Fujiwara (1995) ja Mechel (1995).

Mechel esittää, että soladiffusorit tulisi käsitellä ennemminkin resonaattoriryhmänä kuin numeroteoriaan perustuvana rakenteena. Näin rakenteen absorption ymmärtämien on

helpompaa, koska resonaattoreissa havaittavat hiukkasnopeuden arvot ovat niin suuria, että pienikin häviö aiheuttaa merkittävän absorptio. Tätä vaikutusta voidaan tehostaa merkittävästi sijoittamalla virtausvastus hiukkasnopeuden maksimin kohdalle solan suuaukkoihin.

Mechel esittää myös, että pyrittäessä maksimoimaan diffusorin absorptio voidaan rakenteessa luopua jakojäännössekvenssien käytöstä ja käyttää optimointikriteerinä solien resonanssitaajuuksien jakaumaa. Tällä kriteerillä arvioituna PR-diffusori on perinteisiä diffusoreita parempi absorbentti. Mechel osoittaa, että voimakas absorptio voidaan saavuttaa rakenteella, jossa solat on järjestetty syvyytensä mukaiseen järjestykseen. Samalla Mechel toteaa, että solat voidaan taivuttaa ilman merkittävää vaikutusta rakenteen toimintaan.

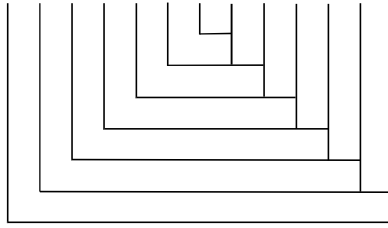


Kuva 7.1. Erilaisia soladiffusorirakenteita, vasemmalta oikealle QR, PR ja Mechelin ehdottama taivutettu rakenne.

Mechelin (1998) näkemys on, että mikäli soladiffusoreja halutaan käyttää alkuperäiseen tarkoitukseensa ne tulee valmistaa metallista tai muusta täysin sileästä materiaalista. Lisäksi rakenteen liitokset tulee tehdä erittäin tarkasti häviöiden minimoimiseksi.

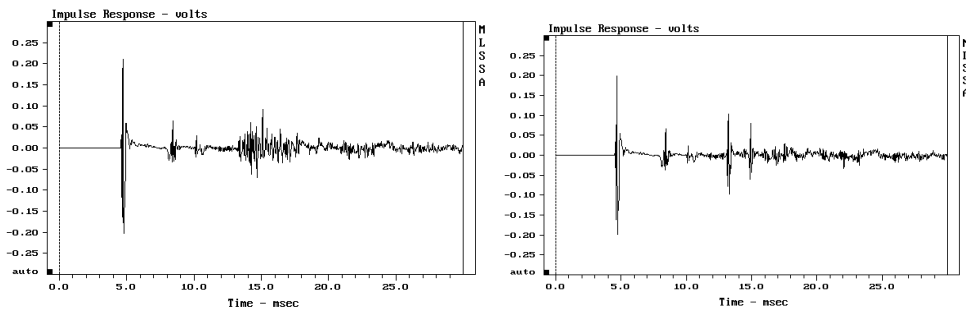
7.2. Kehitetty soladiffusorirakenne

Kuunteluhuoneeseen tarvittiin rakenne, jolla olisi mahdollista vaimentaa huoneen takaseinän heijastus. Mikäli käytettävä ratkaisu toimisi samalla myös tehokkaana pienten taajuuksien absorbenttina, olisi rakenteen käyttö entistä houkuttelevampaa. Mechelin julkaisun perusteella päätettiin selvittää taivutetun diffusorin käyttöä kuunteluhuoneessa. Mechelin ratkaisun analysoinnin jälkeen todettiin, että on mahdollista konstruoida yksinkertaisempi rakenne, jonka alarajataajuus on Mechelin ehdottamaa ratkaisua alempi. Kehitetty rakenne on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.2. Kuunteluhuoneeseen kehitetty soladiffusorirakenne.

Kuunteluhuoneeseen on sijoitettu kaikkiaan yhdeksän suuaukoltaan 600*600 mm:n kokoista diffusoria, joiden syvyys on 300 mm. Diffusorien vaikutus on esitetty kuvassa 7.3, josta voidaan nähdä terävien heijastusten leviäminen ajallisesti.



Kuva 7.3. Diffusorin impussivaste kahden metrin etäisyydellä mitattuna. Vasemmanpuoleinen kuva: normaali tilanne, oikeanpuoleinen kuva: diffusori peitettynä.

8. Kuunteluhuoneen mittaukset

Tärkeän osan standardoidun kuunteluhuoneen käyttöönotossa muodostavat standardin edellyttämät mittaukset. Valitussa ITU-R BS.1116-suosituksessa esitetään vaatimukset kuunteluolosuhteille osa näistä vaatimuksista liittyy suoraan huoneen akustiikkaan osa käytetyn kaiutinjärjestelmän ja vahvistimien suorituskykyyn. Akustiikan laboratorion kuunteluhuoneeseen ei ole hankittu vakioitua kuuntelujärjestelmää standardikokeisiin, niinpä varsinaisia kuunteluolosuhde mittauksia ei ole suoritettu. Tässä osassa esitettävät mittaukset liittyvät osin huoneen BS.1116-suosituksen mukaisten akustisten ominaisuuksien toteamiseen. Suoritetuista mittauksista näitä ovat taustamelu (8.1) ja jälkikaiunta-ajan (8.2) mittaukset

Osa mittauksista tehtiin mallinnuksessa ja suunnittelussa tarvittujen lähtöparametrien määrittämiseen, nämä mittaukset kuvattiin lyhyesti huoneen pientaajuusmallinnusta käsittelevässä kappaleessa 5.1.

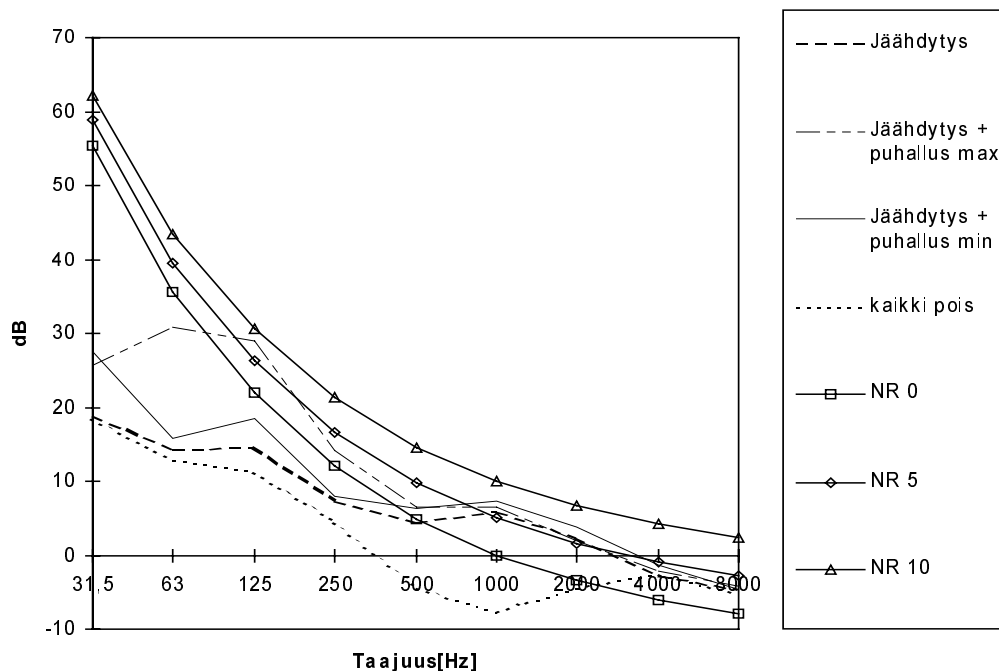
8.1. Taustamelumittaukset

Vaatimukset kuunteluhuoneen melutasolle on määritetty ITU-R BS.1116 suosituksessa erittäin tiukoiksi. Vaatimuksena on NR 10-käyrän alittava melutaso. Lisäksi vaaditaan, että äänitaso ei saa ylittää NR 15-käyrää millään taajuuskaistalla. Se miksi standardissa on päädytty vaatimaan käytöstä poistuneen NR-käyrästä käyttöä on perusteltu sillä, että A-painotussuodin vaimentaa pieniä taajuuksia enemmän kuin on subjektiivisten kokemusten perusteella syytä (Bech, 1997).

Taustameluvaatimusten ollessa alle L_{pA} 25 desibeliä edellyttää mittaus käytettävältä kalustolta erikoisominaisuuksia lähinnä mikrofoniensa osalta. Normaalin yhden tuuman mittausmikrofoniensa taustakohinan taso rajoittaa alimman mitattavan äänitason noin 10 desibeliin A-painotettuna. Mitattavan huoneen melutason arvioitiin olevan lähellä 10 desibeliä niinpä taustamelumittauksissa käytettiin Brüel&Kjærin 4179 mikrofoniensa ja 2660 esivahvistinta, joiden A-painotettu pohjakohinataso on noin -2 dB. Muut käytetyt mittalaitteet olivat B&K 2636 mittausvahvistin ja HP 3561A spektrianalysaattori. Mittaukset suoritettiin illalla ja keskiarvostus aikana käytettiin kahta minuuttia.

Mittaukset suoritettiin neljällä eri asetuksella. Alimmat taustameluarvot saavutettiin kun huoneen jäähdytysjärjestelmä oli kytketty pois käytöstä, ilmastointi kanavat olivat kuitenkin avoinna. Seuraava mittaus toteutettiin kytkemällä jäähdytysjärjestelmä toi-

mimaan. Kolmannessa tilanteessa pyrittiin mittaamaan taustamelutasoa tilanteessa, jossa vahvistin tilan puhallin oli kytketty päälle miniminopeudella. Neljänneksi mitattiin suurin



Kuva 8.1. Kuunteluhuoneen taustamelutaso eri käyttötilanteissa

mahdollinen taustamelutaso käyttötilanteessa. Tällöin vahvistin tilan puhallin kytkettiin päälle suurimmalla mahdollisella nopeudella. Tämä tilanne voi esiintyä ainoastaan silloin kun vahvistin tilassa on erittäin suuri lämpökuorma, joka käytännössä merkitsee vahvistimien toimintaa erittäin suurella teholla pitkiä ajanjaksoja. Tällaisessa tilanteessa on oletettavaa, että myös kaiuttimien tuottama äänikenttä huoneessa on niin voimakas, ettei puhaltimen aiheuttama melu ole kuultavissa peittoilmiön vuoksi.

Suoritettujen mittausten perusteella voidaan todeta, että huoneen taustamelutaso on kaikissa olosuhteissa alle ITU-R BS.1116 suosituksen vaatimusten.

Myöhempien käyttökokemusten valossa on havaittu, että tietyissä himmentimien asetustiloissa valaisimet aiheuttavat pienen kuultavissa olevan sirinän. Samoin huoneen jäähdytyspalkit vaativat ilmaamista varsin tiheästi, koska muutoin jäähdytysjärjestelmä voi tuottaa epäsäännöllisin väliajoin lorinamaista melua. Palkeista aiheutuu epäsäännöllisin väliajoin myös lämpölaajenemisesta aiheutuvaa melua.

8.2. Jälkikaiunta-ajan mittaukset

Kuunteluhuonestandardeissa esitetään tiukat vaatimukset huoneen jälkikaiunta-ajalle. Mittaukset tulee suorittaa laajalle kaistalle alle sadasta hertsistä aina kahdeksaan kilohertsiin saakka. Tämä edellyttää käytännössä vähintään kahden eri tyyppisen äänilähteen käyttöä mikäli äänilähteen ympärisäteily vaatimuksesta ei haluta tinkiä.

Kuunteluhuoneen jälkikaiunta-ajan verifiointimittauksissa käytettiin kahta äänilähdettä, joista toinen oli Gradient Oy:n valmistama ympärisäteilevä äänilähde, joka on toteutettu sijoittamalla pallonmuotoiseen halkaisijaltaan 400 mm muovikoteloon kymmenen 4 tuumaista kaiutinelementtiä (SEAS P 11 VC). Äänilähdettä käytettiin taajuuskaistalla 150-8000 Hz. Alle 150 Hertsin taajuuksilla äänilähteenä käytettiin 60 litran suljettuun koteloon sijoitettua Philips AD 12252 kaiutinelementtiä.

Mittausmikrofoneina käytettiin B&K:n malleja 4145 (alle 150 Hz) ja 4134 (150-8000Hz). Esivahvistimet olivat tyypiltään B&K 2660 ja 2619 ja mittausvahvistimena kaikissa mittauksissa toimi B&K 2636.

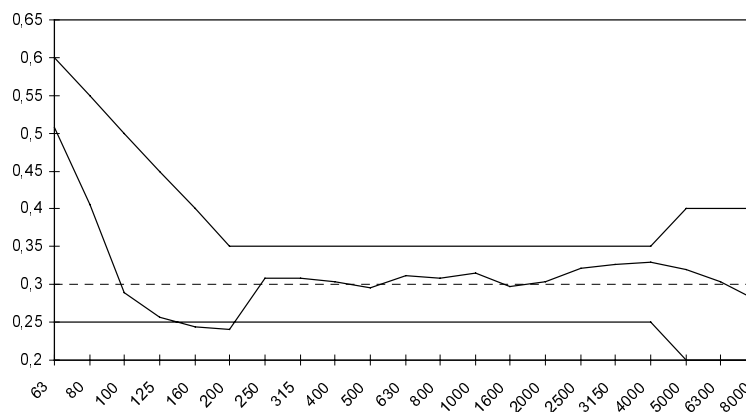
Jälkikaiuntamittauksissa analysaattorina käytettiin DRA Laboratoriesin MLSSA mittauskorttia (Rife ja Venderkoy, 1989), jossa herätteenä käytetään maksimipituussekvenssiä (MLS). Maksimipituussekvenssin käytöllä herätteenä saavutetaan useita etuja, joista tärkein on impulssivasteen yksinkertainen ja tehokas määrittäminen (Lahti, 1997) Jälkikaiunta-aika määritetään MLSSA-järjestelmällä mitatusta impulssivasteesta käyttämällä Schroederin esittämää menetelmää integroitua impulssivaste menetelmää (Schroeder, 1965), jossa äänikentän vaimenemista kuvaava verhokäyrä määritetään impulssivasteesta takaperin integroimalla. Jälkikaiunta-aika saadaan sovittamalla verhokäyrään suora kahden käyrän pisteen välillä (ISO, 1975). Vakiintuneita pisteitä ovat -5 desibeliä äänilähteen sammuttamishetkestä vaimentunut piste ja -25 dB ja -35 dB pisteet

Kuunteluhuoneen verifiointimittauksissa jälkikaiunta-aika määritettiin sekä 20 desibelin vaimenemisen (-5-25dB) että 30 desibelin vaimennus ajan perusteella (-5-35dB). Jälkikaiunta-aika saadaan kertomalla mittaustulos kahdella tai kolmella. Varsinkin pienillä taajuuksilla jälkikaiuntamittauksissa ongelmaksi muodostuu signaalikohinasuhde. Tätä ongelmaa voidaan helpottaa keskiarvostuksella, sillä mittauksen signaalikohinasuhde paranee kaavan 8.2.1. mukaisesti.

$$sn = \sqrt{ndB} \quad 8.2.1$$

Alle 150 Hertsin taajuuksilla keskiarvostuksessa käytettiin 64 mittausta ja yli 150 Hertsin taajuuksilla 16 keskiarvoa. Näihin arvoihin päädyttiin, koska näillä asetuksilla mittausten signaalikohina suhde oli riittävä 30 desibelin vaimennusaikojen määrittämiseen 20 Hertsin terssikaistalla.

Mittaukset suoritettiin kuudessa lähde-/vastaanottopiste-parissa BS.1116-suosituksen mukaisesti. Keskiarvostetut tulokset on esitetty kuvassa 8.2. .



Kuva 8.2. Kuunteluhuoneen mitattu jälkikaiunta-aika

Mitattujen tulosten perusteella huoneen jälkikaiunta-aika täyttää lähes BS.1116 suosituksen esittämät vaatimukset. Tässä vertailukäyränä käytetään suosituksen ensimmäisen version jälkikaiunta kriteeriä. Uuden kriteerin mukaan huone on hiukan liian kaikuisa suurilla taajuuksilla asia on helposti korjattavissa lisäämällä hiukan huokoista absorbenttia huoneeseen. Samalla vanhan kriteerin mukaan suositusta lyhyempi jälkikaiunta-aika 200 Hz taajuudella, asettuu suosituksen raameihin.

9. Johtopäätökset

Tämän hankkeen on tehnyt mielenkiintoiseksi akustiikan eri osa-alueiden teorian soveltaminen käytännössä toteutettavaan hankkeeseen. Projektin jälkeen on helppo ymmärtää miksi teoria ja käytäntö eivät kulje käsi kädessä akustiikka konsultoinnissa, sillä käytetyllä työmäärällä tulisi pystyä suunnittelemaan mielumminkin kymmenen kuunteluhuonetta kuin yksi.

Pelkästään pientaajuusmallinnuksessa tarvittavien materiaaliparametrien määrittämien edellyttää suurempaa työpanosta kuin kuunteluhuoneen suunnitteluun voidaan yleensä varata. Myös kokemukset kaupallisista mallinnustyökaluista osoittivat, miksi kuunteluhuoneiden suunnittelussa ei yleensä käytetä numeerisia mallinnustyökaluja. Usein mallin laatimiseen ja virheiden metsästykseseen kuluu aikaa uskomattoman paljon. Kun tähän yhdistetään käynnissä oleva rakennusprojekti voi usein havaita, että mallinnettava rakenne on valmis ennen mallia. Toisaalta mallit antavat paljon uutta tietoa ja ne helpottavat usein huomattavasti ongelmien todellisten syiden löytämistä.

Toivottavaa olisikin, että tulevaisuudessa pientaajuusmallintamiseen kehitettäisiin työkaluja, joilla esimerkiksi geometrialtaan monimutkaisten huoneiden ominaistuuksien laskenta muuttuisi lähes yhtä yksinkertaiseksi kuin analyyttisten kaavojen käyttö suorakaiteen muotoisten tilojen tapauksessa. Toisaalta on selvää, että monet käytännössä päivittäin vastaantulevat ongelmat kuten alaslasketun katon käyttäytyminen pienillä taajuuksilla, tulee säilymään vaikeana ongelmana vielä pitkään.

Opinnäytetyöstä rajattiin pois suurin osa käytännön suunnittelusta lähinnä kahdesta syystä, työ paisui jo nytkin liiaksi ja vaikka huoneen sähkösuunnittelulla on suuri vaikutus huoneen käytettävyyteen ei sen merkitys akustiikkasuunnittelun kannalta ole merkittävä. On kuitenkin syytä muistaa, että esimerkiksi huoneen valaistusjärjestelmän himmentimet voivat aiheuttaa huomattavia akustisia ongelmia taustamelun muodossa.

Huonetta on tätä kirjoitettaessa ehditty käyttää jo toista vuotta ja muutamia kuuntelukokeitakin on ehditty järjestää. Huoneen akustisiin ominaisuuksiin ollaan oltu pääasiassa tyytyväisiä. Ainoat varsinaiset ongelmat ovat liittyneet huoneen ilmastoinnissa käytettävien jäähdytyspalkkien ajoittaiseen lämpölaajenemisesta aiheutuvaan meluun. Uskaliaat kuuntelijat ovat myös onnistuneet herättämään resonansseja alaslasketussa katossa suurilla kuunteluvoimakkuuksilla.

Vaikka hankkeen aikana on tullut opittua paljon mielenkiintoisia asioita akustiikasta ovat suurimmat yllätykset kohdistuneet rakennusprojektin ohjaamiseen, aikatauluttamiseen ja urakoista sopimiseen. Näitä kysymyksiä ei onneksi tarvitse selvittää enää, vaan keskittyä voi vaikkapa musiikkiin kuunteluhuoneessa.

10. Viitteet

- AES20-1996, 1996. AES recommended practise for professional audio - Subjective evaluation of loudspeakers. Audio Engineering Society, New York, 19 s.
- Allen, J. and Berkley, D., 1979. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 65 (4), s. 943–950.
- Allred, J., Newhouse, A., 1958. Applications of the Monte Carlo method to architectural acoustic. *J. Acoust. Soc. Am.*, 30 (1), s. 1-3, s. 903-904..
- Angus, J. A. S. et al, 1995. The Effect of Acoustic Diffusers on Room Mode Decay. AES 99th Convention, New York, preprint 4116.
- Arato-Borsi E., Furjes A. 1999. Investigation of Listening Conditions for Multichannel Sound Systems, The Proceedings of the AES 16th International Conference, Rovaniemi, Suomi.
- Backman, J. 1998. Akustiikan perusteet II opetusmoniste, TKK, Otaniemi
- Backman, J., 1999. Huone ja Melu akustiikka, opetusmoniste, TKK, Otaniemi
- Barron, M., 1993. Auditorium Acoustics and Architectural Design. London, E&FN Spon, 443 s.
- Bech, S., 1989. Perception of Timbre of Reproduced Sound in Small Rooms: Influence of Room and Loudspeaker Position. *J. Audio Eng. Soc.*, 42 (12), s. 999-1007.
- Bech, S., 1994. Perception of Reproduced Sound: Audibility of Individual Reflections in a complete sound field. AES 96th Convention, Amsterdam, preprint 3849.
- Bech S., 1994. Perception of Timbre of Reproduced Sound in Small Rooms: Influence of Room and Loudspeaker Position. *J. Audio Eng. Soc.*, 42 (12), s. 999-1007.
- Bech, S., 1997. Keskustelu Audio Engineering Society 103:ssa konventtiossa, New York, USA.
- Beranek, L.,1996.Cocert and Opera Halls – How They Sound. New York. Acoustical Society of America. 653 s.
- Bonello, O. J., 1981. A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes. *J. Audio Eng. Soc.*, 29, s. 597-604.
- Borish, J., 1984. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *J. Acoust. Soc. Am.*, 75 (6), s. 1827-1836.
- Botteldooren, D., 1995, Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 98(6), s. 3302- 3308.
- Bradley, J. S., 1986. Acoustical Measurements in Some Canadian Homes. *Can. Acoust.*, 14, s. 19-25.
- Burgess, M. A., Utley, W. A., 1985. Reverberation Times in British Living Rooms. *Applied Acoustics*, 18, s. 369.

- Chesnokov, A., SooHoo, L., 1997. Subjective and objective evaluation of listening rooms acoustics. AES 102nd Convention, Munich, preprint 4507.
- Ciskowski, C. S., Brebbia, C. A., editors, 1991. *Boundary Element Methods in Acoustics*, Computational Mechanics Publications co-published with Elsevier Applied Science.
- Cox, T., 1998. Diffusion parameters for baffled diffusers. AES 99th Convention, New York, preprint 4115.
- Cremer, L., Mueller, H.A., 1982. Principles and applications of room acoustics. Vol. 2. London. Applied Science Publishers. 434 s.
- D' Antonio, P., Konnert, J., 1984. The Reflection Phase Granting Diffusor: Design Theory and Application, J. Audio Eng. Soc. **32** (4), s. 228-238.
- Davis D., Davis C., 1987 Sound System Engineering. 2nd Edition, Howard W. Sams & co, Indianapolis 665 s.
- EBU, 1994. EBU Tech. 3276: Listening conditions for the assessment of sound programme material, European Broadcast Union.
- Everest, F. A., 1993. *The Master Handbook of Acoustics*, 3rd edition, McGraw-Hill, New York.
- Eyring, C. F., 1930. Reverberation Time in "Dead" Rooms. J. Acoust. Soc. Am., 1(2), s. 217-241.
- Fletcher, H., 1941. Hearing the Determining Factor for High-Fidelity Transmission. Bell System Telephonon Tech. Monograph B-1351.
- Fujiwara, K & Miyajima, T., 1992. Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic residue type. *Appl. Acoust.*, 35, s. 149-152.
- Gabrielsson, A. 1979. Statistical Treatment of Treatment of Data from Listening Tests on Sound-reproducing Systems, Raportti 92 Teknillinen Audiologia, Karolinska Institutet, Tukholma, Ruotsi.
- Geddes, Ę. 1998 Small Room Acoustics in the Statistical Region, Proceedings of the AES 15th International Conference, Kööpenhamina, Tanska, s. 51-59.
- Gladwell, G. 1966. A variational formulations of damped acusto-structural vibration problems, J. Sound. Vib, 4, s. 172-186.
- Hodgson, M., 1996. When is Diffuse-Field Theory Applicable? *Appl. Acoust.*, 49(3), s. 197-207.
- IDEAS-VA <URL:<http://www.sdrc.com>>
- IEC Publication 268-13, 1985. Sound System Equipment, part 13. Listening tests on loudspeakers, 71 s.
- ISO 3382, 1975. Acoustics - Measurement of reverberation time in auditoria. Geneva, Switzerland: International Standardization Organization.
- ISO 354, 1985. Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room.

- ITU-R BS.1116, second edition, 1996. Methods for the subjective assessments of small impairments in audio systems including multichannel sound systems, International Telecommunications Union, Geneva.
- Jacobsen, F., 1979a. Sound power determination in reverberation rooms, a normal mode analysis. Technical University of Denmark, the Acoustics Laboratory, Rep. 26.
- Jacobsen, F., 1979b. The diffuse sound field. Technical University of Denmark, the Acoustics Laboratory, Rep. 27.
- Jackson, G. M., Leventhall, H. G., 1972. Acoustics of Domestic Rooms. *Applied Acoustics*, 5, s. 265.
- Järvinen, A., Savioja, L., Möller, Henrik., Itkonen, V., and Ruusuvuori, A., 1997. Design of a reference listening room – a case study. AES 103rd Convention, New York, preprint 4559.
- Järvinen A., Savioja L., Melkas K., 1998. Numerical simulation of the modified Schroeder diffuse structure, Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics, Seattle, USA.
- Kihlman, T., 1993. Byggningsakustik Vkvh. Göteborg.
- Kleiner, M., Dalenbäck, B.-I., Svensson, P., 1993. Auralization-An overview. *J. Audio Eng. Soc.* 41(11), s. 861-875.
- Kleiner, M., Garnier, E., 1995. Experimental auralization of car audio installations. AES 98th Convention, Paris, preprint 3952.
- Krokstad, A., Strom, S., and Sorsdal, S., 1968. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *J. Sound Vib.*, 8 (1), s. 118-125.
- Kuttruff, H. 1991. Room Acoustic. 3.painos. England. Elsevier Science Publishers Ltd. 329 s.
- Kuttruff H. 1991b. On the Aduibility of Phase Distortion in Rooms and its Significance for Sound Reproduction and Digital Simulation in Room Acoustics, *Acustica*, 74, s. 3-7.
- Kuttruff, H., 1994. Sound Absorption by Pseudostochastic Diffusers (Schroeder Diffusers), *Appl. Acoust.*, 42, s. 215-231.
- Lahti, T., 1997. Akustinen mittaustekniikka. Raportti 38. 2. korjattu painos. Teknillinen korkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi, 152 s.
- Lokki, T., 1997, Virtuaaliääniympäristön luominen konserttisalin laskennalliseen malliin. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi. 76 s.
- Louden, M. M., 1971. Dimension ratios of rectangular rooms with good distribution of eigentones. *Acustica*, 24, s. 101-104.
- Martin, J., Van Maerke, D., Vian, J-P., 1993. Biaural simulation of concert halls: A new approach for the biaural reverberation process. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(6), s. 3255-3264. eri nimi ensimmäisenä.

- Mechel, F. P., 1995. The Wide-angle Diffuser - a Wide-angle Absorber ?, *Acustica*, 81, s. 379-401.
- Mechel F. P., 1998, Keskustelu F. P. Mechelin kanssa ICA-Kongressissa, Seattle, USA.
- Morse, P. M., Ingard, K. U., 1968. *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, New York, 927 s.
- N-12 A, 1992. Draft Technical Recommendation: Sound Control Rooms and Listening Rooms. Second edition, The Nordic Public Broadcasting Corporations.
- Nakagawa K, Miyajima T. & Tahara Y. 1993. An improved Geometrical Sound Filed Analysis in Rooms Using Scattered Sound an Audible Room Acoustic Simulation, *Applied Acoustics*, 38, s. 115-130.
- Naylor, G. 1993. ODEON - Another Hybrid Room Acoustical Model, *Applied Acoustics*, 38, s. 131-143.
- OIRT, 1963. Technical parameters of Listening Rooms. Recommendation No 22 from Technical Committee OIRT, Moskova.
- Olive, S. et al, 1989. The Effects of Loudspeaker Placement on Listener Preference Ratings. *J. Audio Eng. Soc.*, 42 (9), s. 651-669.
- Olive, S., et al., 1994. The Effects of Loudspeaker Placement on Listener Preference Ratings. *J. Audio Eng. Soc.*, 42 (9), s. 651-669.
- Pietrzyk P. 1998 Computer Modling of the the Sound Field in Small Rooms, Proceedings of the AES 15th International Conference, Kööpenhamina, Tanska, s. 24-31.
- Rayleigh, J., 1896. *The Theory of Sound*. Vol. 2, s. 70-71, Macmillan Company, Reprinted by Dover, New York, 1945.
- Rife, D. D. and Vanderkooy, J., 1989. Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences, *J. Audio Eng. Soc.*, 37, s. 419-444.
- Sabine, W. C., 1922. *Collected Papers on Acoustics*. Harvard University Press, Cambridge.
- Savioja, L., 1995. Huoneakustiikan laskennallinen mallintaminen. Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu. Tietotekniikan osasto. Tietojenkäsittelytekniikan laitos. Otaniemi, 93 s.
- Savioja, L., Backman, J., Järvinen A., and Takala T., 1995. Waveguide Mesh Method for Low-Frequency Simulation of Room Acoustics. Proc. 15th Int. Congress on Acoustics (ICA'95), Trondheim, Norway, June 26-30, vol. 2., s. 637-640.
- Savioja, L., Järvinen, A., Melkas K., Saarinen K., 1996. Determination of the low frequency behaviour of an IEC listening room. Proceedings of NAM 96, Helsinki, Finland, June 12-14, s. 55-58.
- Schröder, M. R., 1954. Die Statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen, *Acoustica*, 4, s. 594-600.
- Schroeder, M. R., 1965. New method of measuring reverberation time, *J. Acoust. Soc. Am.*, 37, s. 409-412.

- Schroeder, M. R. 1975. Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences, J. Acoust. Soc. Am., 57 , 958-963.
- Schoeder, M. 1979. Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion, J. Acoust. Soc. Am. 65, s. 958-963.
- Sysnoise, <URL:<http://www.lmsint.com/>>
- Takala, T., Hänninen, R., Välimäki, V., Savioja, L., Huopaniemi, J., Huutilainen, T., Karjalainen, M., 1996. An integrated system for virtual audio reality. AES 100th Convention, Copenhagen, preprint 4229.
- Toivanen J. 1990 Teknillinen akustiikka, neljäs painos, Otapaino, Espoo.
- Toole, F. E., 1982. Listening Tests - Turning Opinion into Fact. J. Audio Eng. Soc., 30, s. 431-445.
- Walker, R., 1992. Low-frequency room responses: Part 1-Background and qualitative considerations. The British Broadcasting Corporation. Research Department, Engineering Division. 13 s.
- Walker, R., 1996. Optimum Dimension Ratios for Small Rooms, 100th AES Convention, Preprint no. 4191 (Copenhagen, Denmark).
- Waterhouse, R. 1955. Interference patterns in reverberation rooms, J. Acoust. Soc. Am. 27, s 247.
- Zienkiewicz, O. C., 1991. *The Finite Element Method*, fourth edition, McGraw-Hill.

LIITE A HUONEEN RAKENTEET

VS 1

2*13mm	hipsilevy
70 mm	metalli
100 mm	ilmaväli, jossa 70 mm mineraalivilla
150 mm	betoni (vanha rakenne)
600 mm	rankaväli

VS 2

2*13 mm	hipsilevy
70 mm	rankamineraalivilla
170 mm	ilmaväli, jossa 2* 70 mm mineraalivilla
70 mm	metalliranka
2*13 mm	hipsilevy
600 mm	rankaväli

VS 3

2*13 mm	hipsilevy
	hipsirappaus
300 mm	ilmaväli, jossa 100 mm villa
95mm	metalliranka
130 mm	Tiiliseinä (alkuperäinen rakenne)
600mm	koolausväli

VS 4

2*13 mm	hipsilevy
130 mm	ilmaväli, jossa mineraalivilla
70 mm	metalliranka
50 mm	ilmaväli (mineraalivilla)
	hipsirappaus
130 mm	Tiili

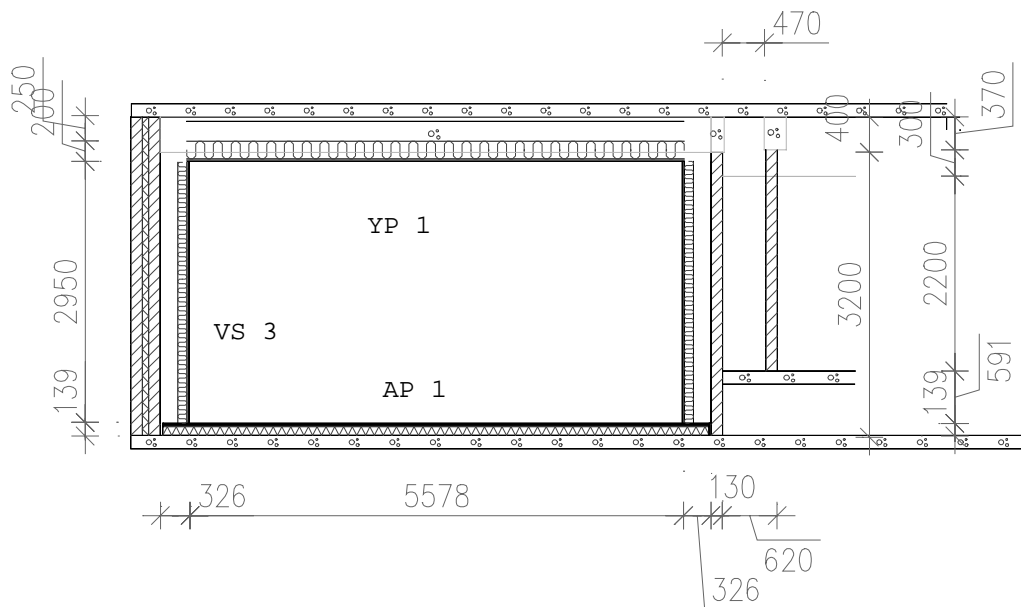
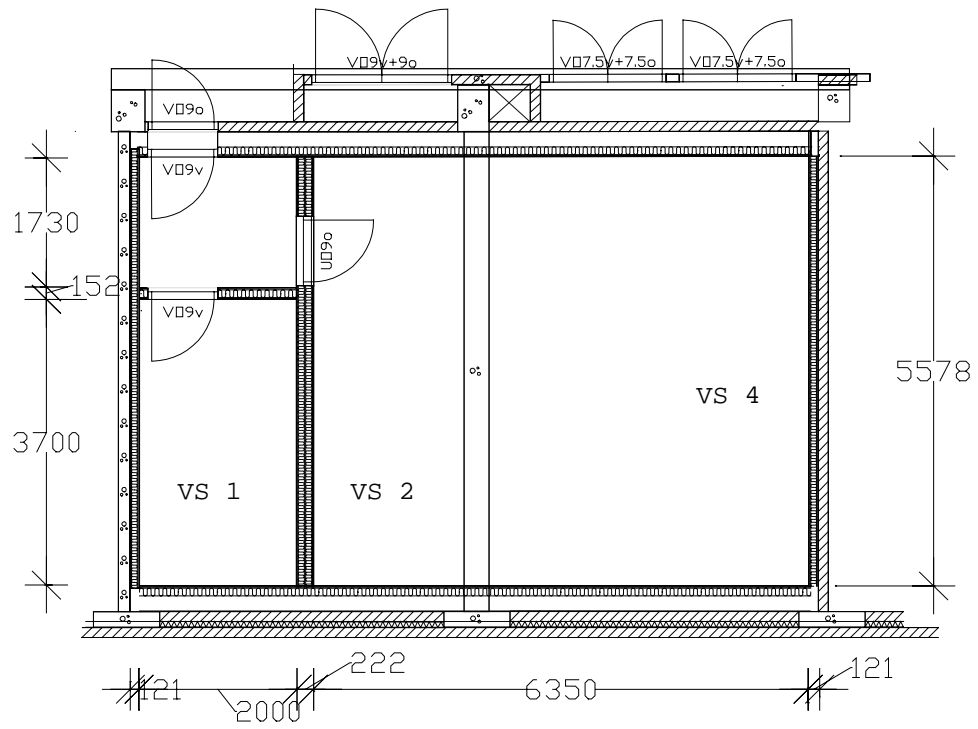
YP 1

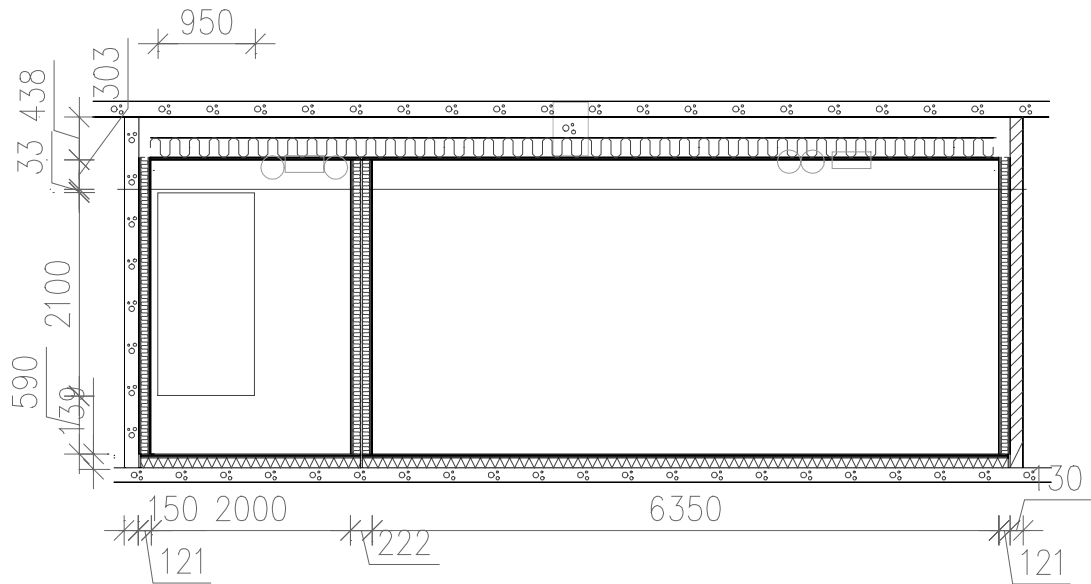
2*13 mm kipsilevy
GK-ranka, kiinnitys tärinäeristimin
450 mm ilmaväli, jossa 200 mm mineraalivilla
150 mm betoni

AP 1

20 mm parketti, Tarkett, lakattu vaahtera
1*13 mm EK kipsilevy
2*13 mm kipsilevy
50 mm *mineraalivilla elementtilevy
150 mm betoni (vanha rakenne)
*seinien alla valulevy

LIITE A HUONEEN RAKENNETEET





VS 1

2*13mm	kipsilevy
70 mm	metalli
100 mm	ilmaväli, jossa 70 mm mineraalivilla
150 mm	betoni (vanha rakenne)
600 mm	rankaväli

VS 2

2*13 mm	kipsilevy
70 mm	rankamineraalivilla
170 mm	ilmaväli, jossa 2* 70 mm mineraalivilla
70 mm	metalliranka
2*13 mm	kipsilevy
600 mm	rankaväli

VS 3

2*13 mm	kipsilevy
	kipsirappaus
300 mm	ilmaväli, jossa 100 mm villa
95mm	metalliranka
130 mm	Tiiliseinä (alkuperäinen rakenne)
600mm	koolausväli

VS 4

2*13 mm	kipsilevy
130 mm	ilmaväli, jossa mineraalivilla
70 mm	metalliranka
50 mm	ilmaväli (mineraalivilla)
	kipsirappaus
130 mm	Tiili

YP 1

2*13 mm kipsilevy
GK-ranka, kiinnitys tärinäeristimin
450 mm ilmapäli, jossa 200 mm mineraalivilla
150 mm betoni

AP 1

20 mm parketti, Tarkett, lakattu vaahtera
1*13 mm EK kipsilevy
2*13 mm kipsilevy
50 mm *mineraalivilla elementtilevy
150 mm betoni (vanha rakenne)
*seinien alla valulevy