

Tuukka Ojansivu

# Realistinen ääniympäristö kuulontutkimukseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma

Insinööriytyö

28.4.2017

Tekijä Otsikko	Tuukka Ojansivu Realistinen ääniympäristö kuulontutkimuksiin
Sivumäärä Aika	50 sivua + 2 liitettä 28.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Hyvinvointiteknologia
Suuntautumisvaihtoehto	Hyvinvointiteknologia
Ohjaajat	Lehtori Sakari Lukkarinen, Metropolia Ammattikorkeakoulu Fysiologiainsinööri, TkT Ville Sivonen
<p>Insinööriyön tavoitteena oli toteuttaa realistisen tilaäänen kuunteluympäristö Helsingin yliopistollisen keskussairaalan (HYKS) korva-, nenä- ja kurkkutautien klinikalle puheaudiometrian käyttöön kuulolaitteiden käyttäjien kuntoutustoimenpiteiden tueksi. Tilaajan intressinä oli tilaäänitekniikan käytännön sovellus, jolla uudenlaisia puheaudiometrian menetelmiä voitaisiin kokeilla ja havainnollistaa.</p> <p>Kuunteluympäristön toiminnalliset vaatimukset ja työn rajaus määriteltiin yhteistyössä HYKS Kuulokeskuksen teknisen asiantuntijan kanssa. Lisäksi käytettäviä tilaäänitekniikan ja ääni- sekä puhemateriaalien mahdollisuuksia kartoitettiin yhdessä tilaajan kanssa. Yhteistyötahoina toimivat Aalto-yliopiston akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion tilaäänen tutkimusryhmä sekä kuulolaittevalmistajan edustaja.</p> <p>Insinööriyössä tilaajalle toteutettiin kuunteluympäristön graafinen käyttöliittymä, joka hyödynsi ehdotettuja DirAC- sekä SIRR-tilaäänitekniikoita ja vastasi tilaajan toiminnallisia vaatimuksia. Käyttöliittymän ohjelmointi toteutettiin visuaalista ohjelmointia hyödyntävällä Max 7 -ohjelmistolla.</p> <p>DirAC-prosessoitujen ääni- ja puhemateriaalien sekä käyttöliittymän avulla aiemmin äänitetyt ääniympäristöt saatiin toistettua realistisina HYKS Kuulokeskuksen tutkimuslaboratoriossa. Projektin lopputulos osoitti ehdotetun tilaäänitekniikan soveltuvuuden kliiniseen ympäristöön.</p>	
Avainsanat	Äänikenttäaudiometria, realistiset kuunteluympäristöt, tilaääni

Author Title	Tuukka Ojansivu A realistic listening environment for audiometry
Number of Pages Date	50 pages + 2 appendices 28 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Health Informatics
Specialisation option	Health Informatics
Instructors	Sakari Lukkarinen, Senior Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences Ville Sivonen, Clinical Engineer (Audiology)
<p>The aim of this thesis was to implement a realistic listening environment to the HUS surgical hospital's hearing center for rehabilitation of hearing aid users. The motivation behind the thesis was to offer a usable application of a proposed spatial audio reproduction technique to demonstrate and experiment with new speech audiometry procedures.</p> <p>The functional requirements for the application and confines of the thesis were defined in collaboration with a technical specialist from the hearing center. In addition, options for spatial audio techniques and sound materials were discussed with the client. The application was done in collaboration with Aalto university's laboratory of acoustics and audio signal processing, and a representative of a hearing aid manufacturer.</p> <p>In this thesis, a graphical user interface was designed and implemented for the realistic listening environment that utilizes the proposed DirAC and SIRR spatial audio techniques to create a lifelike representation of previously recorded sound environments. The user interface was built using the virtual Max 7 patching environment.</p> <p>The sound environments were realistically reproduced in the hearing center's examination laboratory via the user interface that utilized the DirAC processed speech and sound materials. The project showed that the proposed spatial audio technique is suited to a clinical environment.</p>	
Keywords	Sound-field audiometry, realistic audiometric environments, spatial audio

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kuuloaisti ja kuulon ongelmat	4
2.1	Kuuloaistin toiminta	4
2.1.1	Kuulon anatomia ja fysiologia	4
2.1.2	Kuuloaistin toiminta arkielämässä	7
2.1.3	Tiläänen havainnointi	8
2.2	Kuulovauriot	10
2.3	Kuulokojeet ja sisäkorvaistute	11
2.3.1	Kuulokojeen toimintaperiaate	11
2.3.2	Kuulokojeiden tyypit	11
2.3.3	Sisäkorvaistute	12
2.4	Audiometria	14
2.4.1	Puheaudiometria	14
2.4.2	Äänikenttäaudiometria	15
3	Toteutuksen taustaa	16
3.1	Vaatimusmäärittely	16
3.2	Kuunteluhuone	17
3.2.1	Äänierö	17
3.2.2	Kaiutinkonfiguraatio	18
3.3	Taustahälymateriaali	21
3.3.1	Viikin normaalikoulu	22
3.3.2	Päiväkoti	23
3.3.3	Helsingin rautatieaseman lippuhalli	24
3.3.4	DirAC-tiläänteekniikka	24
3.4	Tilaimpulssivasteet	27
3.4.1	Vasteiden mittaus	27
3.4.2	Vasteiden käsittely SIRR-menetelmällä	28
3.5	Puhemateriaali	30
4	Kuunteluympäristön hallintaohjelma	32

4.1	Hallintaohjelman ja käyttöliittymän suunnittelusta	32
4.2	Toteutukseen käytettävät ohjelmistot	32
4.2.1	Max/MSP-ohjelmointiympäristön lukuohje	33
4.3	Äänympäristön hallintaohjelman ominaisuudet	35
4.3.1	Ohjelman 1. version kytkentätila ja toiminnollisuudet	35
4.3.2	Ohjelman 2. version kytkentätila ja tehdyt muutokset	40
4.3.3	Käyttöliittymän valmis esitystila	44
4.3.4	Malliohjelma ja valmiin ohjelman kääntäminen	45
5	Yhteenveto	45
5.1	Koesoittotilaisuudet	45
5.2	Pohdintaa	47
	Lähteet	48
	Liitteet	

## Lyhenteet

BTE	Behind The Ear. Korvan takana käytettävä kuulokoje.
CIC	Completely-in-the-Canal. Korvakäytävässä käytettävä kuulokoje, joka on kokonaan korvakäytävän sisällä.
dB	Desibeli. Äänenvoimakkuuden logaritminen suhdeyksikkö, jolla ilmaistaan akustisen signaalin tasoa verrattuna sovittuun vertailutasoon. Hiljaisin normaalilla kuuloaistilla havaittava ääni vastaa 0 dB:n tasoa, mikä tarkoittaa $10^{-12}$ W/m <sup>2</sup> :n intensiteettiä taajuudella 1 kHz.
DirAC	Directional Audio Coding. Aalto-yliopistossa kehitetty tilääänen analyysiin käytetty tekniikka.
HYKS	Helsingin yliopistollinen keskussairaala.
Hz	Hertsi. Aaltoliikkeen värähtelytaajuuden mittayksikkö. 1 hertsi vastaa yhtä värähdystä sekunnissa.
ITC	In The Canal. Korvakäytävässä käytettävä kuulokoje. Pienempi kuin ITE, mutta näkyvä osa on yhdenmuotoinen korvakäytävän aukon kanssa.
ITE	In The Ear. Korvakäytävässä käytettävä kuulokoje.
kHz	Kilohertsi. Aaltoliikkeen värähtelytaajuuden mittayksikkö. 1 kilohertsi vastaa 1 000 värähdystä sekunnissa.
MSP	Max Signal Processing. Kokoelma Max-ohjelmistoon kehitettyjä äänitiedostojen muokkaamiseen tarkoitettuja ominaisuuksia.
RAM	Random Access Memory. Tietokoneohjelmien käyttämä välimuisti.
RITE	Receiver-in-the-Canal. Korvan takana pidettävä kuulokojeen tyyppi, jonka kuuloke on korvakäytävässä.

SIRR	Spatial Impulse Response Rendering. Huoneakustiikan toistamiseen käytetty tekniikka.
SNR	Signal-to-Noise Ratio. Hyötysignaalin ja taustakohinan suhde.
SPL	Sound Pressure Level. Kuvaa äänen fysikaalista voimakkuutta ilmassa desibeleinä
SRT	Speech Reception Threshold. Kuunteluvoimakkuus, jolla kuuntelija toisti 50 prosenttia sanoista oikein hiljaisessa kuunteluympäristössä
TRS	Tip-Ring-Sleeve. Tyypillinen äänilaitteiden liitintyyppi, jolla stereoäänen vasen ja oikea kanava sekä maa liitetään laitteesta toiseen. Myös yhden kanavan balansoitu siirto on mahdollinen.
VBAP	Vector Base Amplitude Panning. Osa DirAC-menetelmän prosessointia.
WAV	Waveform Audio File Format. Yleinen äänitiedostoformaatti.

## 1 Johdanto

Normaalin kuulon merkitys modernissa rakennetussa ympäristössä ja sen tuomissa vuorovaikutustilanteissa on merkittävä mielekkään ja kokonaisvaltaisen elämäkokemuksen taustatekijänä. Ihmisen pitkälle kehittynyt binauraalinen kuulo mahdollistaa hyvän ympäristön havainnointikyvyn ja kommunikaation, mutta on myös altis melulle ja erilaisille kuulovaurioille, jotka vaikeuttavat kuulemista eri tavoin. Kuulon häiriöt eivät ainoastaan vaikeuta kuulemista, vaan tutkitusti huonontavat elämänlaatua ja terveyttä aiheuttaen masennusta, ahdistuneisuutta, sosiaalista eristäytyneisyyttä sekä muita psykososiaalisia ongelmia [Kochkin & Rogin 2000]. Ongelma koskee myös useita suomalaisia: Kuuloliiton arvion mukaan noin 750 000 suomalaisella on jonkinasteinen kuulonalenema [Huonokuuloisuus yleistyy]. Kuulovaurioiden ikävä erityispiirre on se, että ne ovat pysyviä. Siitä huolimatta kuulon apuvälineillä, kuten kuulokojeilla ja sisäkorvaistutteilla, on onnistuttu saavuttamaan huomattavia parannuksia alentuneen kuulon haittavaikutusten minimoimiseksi.

Kuulon tutkimiselle on oma erityisalansa, audiologia: ”Audiologia on lääketieteen ala, joka tutkii kuulon ja tasapainoaistin fysiologiaa, sairauksia ja niiden kuntoutusta.” Kuulontutkimuksen asiantuntija, eli audiologi, voi olla joko korva-, nenä- ja kurkkutautien erikoislääkäri tai puhe- ja äänihäiriöiden erikoislääkäri eli foniatrit, joka on erikoistunut audiologiaan. Varsinaisesta käytännön kuntoutuksesta vastaa pääosin tehtävään vaadittavan lisäkoulutuksen suorittanut audiologin rinnalla toimiva audionomi, joka on terveyden- tai sosiaalialan ammattilainen. [Audiologia.]

Yksi audionomin ydinosaamisalueista on kuulontutkimuksien suorittaminen, joiden tarkoituksena on todentaa kuulovaurio, määrittää sen laatu ja vaikeusaste ja mahdollisesti myös sijainti [Jauhiainen 2008: 95]. Yleisiä kuulontutkimuksia ovat äänesaudiometria ja puheaudiometria. Äänesaudiometria on monelle tuttu tutkimus, jossa käytetään yksittäisiä ääniä eli ääneksiä tietyillä taajuuksilla ja äänenpainetasoilla kuulokynnyksen selvittämiseksi. Kuulokynnyks on heikoin äänitaso tietyntaajuisella ääneksellä, joka on juuri kuultavissa [Jauhiainen 2008: 34]. Voidaan puhua siis kuuloherkkyydestä. Puheaudiometria on kuulon varsinaista toimintaa kuvaavampi menetelmä, jossa käytetään testisignaalina ääneksien sijaan tallennettua puhetta. Puheaudiometriian avulla saadaan realistisempi



kuva henkilön kuulon erottelukyvystä, jota tarvitaan juuri puheen kuulemisessa. Jauhaisen [2008: 126] mukaan erityisesti hälyssä suoritettu puheaudiometria tarjoaa tärkeää tietoa kuntoutettavan pärjäämisestä kuulonsa kanssa.

Insinööriyön tavoitteena on luoda realistinen kuunteluympäristö Helsingin yliopistollisen keskussairaalan (HYKS) korva-, nenä- ja kurkkutautien klinikalle puheaudiometrian käyttöön kuulolaitteiden käyttäjien kuntoutustoimenpiteiden avuksi. Realismin saavuttamiseksi työssä tullaan hyödyntämään Aalto-yliopiston akustiikan laboratorion tilaääniprojektien [Koski 2012; Koski ym. 2013] yhteydessä tallennettua taustahälymateriaalia sekä tilaääni-impulsseja, jotka sisältävät alkuperäisten tilojen akustisen informaation, eli miten tila vaikuttaa ääneen, kuten puheeseen. Näin toteutettuna haluttu ääniympäristö saadaan toistettua hallituissa olosuhteissa. Kuunteluympäristön hallinnoimiseksi tulee luoda graafinen käyttöliittymä, joka kohdennetaan audionomin käyttöön.

Teoriaosassa käsitellään lyhyesti kuulon anatomiaa ja fysiologiaa, kuuloaistin toimintaa arkielämässä sekä tilaäänen havainnointia. Lisäksi esitellään yleisimpiä kuulon ongelmia sekä kuulolaitteita, joiden avulla ongelmia voidaan ratkoa. Lisäksi tärkeimmät audiometriset kuulokokeet työn kannalta on esitelty pääpiirteittäin. Kuunteluympäristön toteutusta käsittelevässä osiossa avataan käytettäviä äänitiedostoja ja tekniikoita, joilla ympäristö on toteutettu. Lisäksi käyttöliittymän osat ja niiden toiminnot on dokumentoitu yksityiskohtaisesti.

Tilaaajan intressinä on realistisen kuunteluympäristön toimivuuden selvittäminen testiympäristönä kuulolaitteen saamisen ja säädön jälkeen. Käyttömukavuuden ja kuulolaitteen potentiaalisen hyödyn saamiseksi on tärkeää, että laitteet toimivat oikein mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Kuulolaitteiden tekniikka ja säätömahdollisuudet ovat kuitenkin rajalliset, ja käyttäjien ongelmat tulevat esiin usein vasta meluisassa ympäristössä. Siksi on edullista mallintaa meluisaa ympäristöä hallituissa olosuhteissa, jolloin päästään optimoimaan laitteen säätöjä jo ennen oikean elämän tilannetta. Vaikka Suomi on tilaäänen tutkimuksen kärkimaita, ei tämän kaltaista kuunteluympäristöä kliiniseen käyttöön kuulolaitteiden käyttäjille ole toistaiseksi vielä toteutettu. Aiemmat äänikenttäaudiometrian toteutukset ovat olleet joko yksi- tai kaksikaiuttimisia järjestelmiä, joissa puheentunnistusta on hankaloitettu kohinalla, jonka taajuussisältö vastaa puheen spektriä. Monitahoisempia toteutuksia äänikenttäaudiometriaan on ehdotettu, mutta kliinistä sovellusta näistä ei toistaiseksi ole toteutettu [Koski ym. 2013].

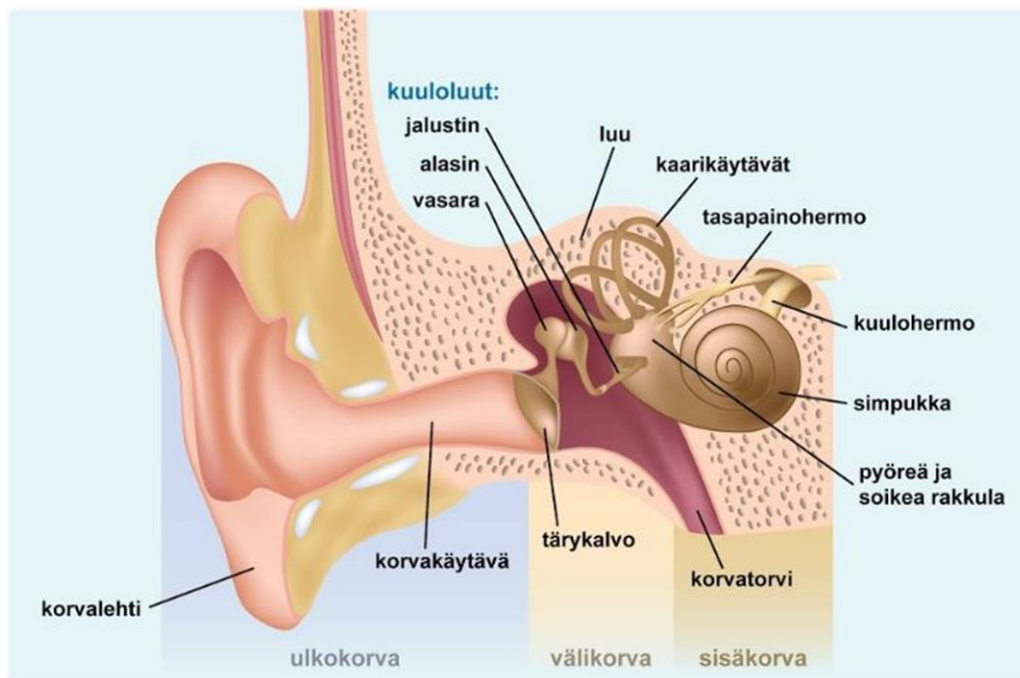
Tämä insinööriyö pyrkii tuomaan käytännön työkalun puheaudiometrisen sovelluksen kuulonkuntoutuksen tueksi auttamaan kuulolaitteiden säätötoimenpiteissä. Kirjassaan *Audiologia* Tapani Jauhiainen [2008: 126] painottaa, että puheaudiometrialla on todettu olevan keskeinen rooli huonokuuloisen henkilön kuntoutussuunnitelman sekä kuulolaittevalintojen- ja kokeilujen kannalta. Erityisesti hälyssä suoritettu puheaudiometria antaa tärkeää tietoa siitä, kuinka kuntoutettava parhaiten hyötyisi laitteen antamasta vahvistuksesta, ja kuinka kuntoutettava kuulolaitteensa kanssa pärjää. Tästä syystä myös HYKS on toivonut käyttöönsä realistista tilaääntä hyödyntävää äänikenttäaudiometriä.

## 2 Kuuloaisti ja kuulon ongelmat

### 2.1 Kuuloaistin toiminta

#### 2.1.1 Kuulon anatomia ja fysiologia

Ihmisen kuulojärjestelmä koostuu kahdesta osasta: korvasta eli ns. perifeerisestä kuulojärjestelmästä sekä kuuloaistin käyttämistä keskushermoston radoista ja keskuksista aivoissa. Korvan rakenne jaetaan edelleen ulko-, väli- ja sisäkorvaan, joista viimeksi mainittu sisältää lisäksi tasapainojärjestelmään kuuluvia osia, joita kollektiivisesti kutsutaan vestibulaarielimeksi. [Jauhiainen 2008: 67.]

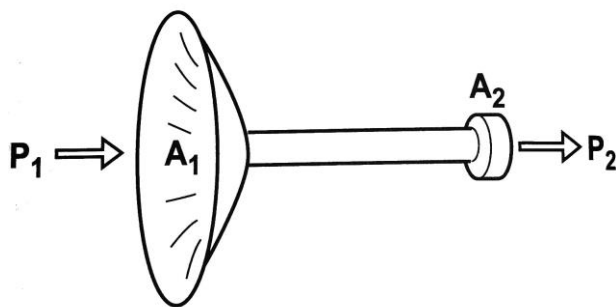


Kuva 1. Havainnekuva korvan rakenteesta [Korvan rakenne].

Kuten ihmisen muut aistit, on kuuloaisti pitkälle kehittynyt ja tarkasti virittynyt vastaamaan elinympäristöämme. Kuulon tehtävänä on aistia ympäristöstä tulevia akustisia värähtelyjä ja muuttaa signaali aivojen ymmärtämään muotoon tarkempaa analyysiä varten [Pulkki & Karjalainen 2015: 111]. Aivoissa tapahtuvan kuuloaistimuksen ensimmäinen vaihe on värähtelyn saapuminen korvalehdelle, jonka uloin osa, *pinna*, auttaa suurien taajuuksien kulkeutumista korvaan suuntakuulon parantamiseksi. Korvalehden sisempi osa *konka* johtaa värähtelyn korvakäytävään, jonka päässä sijaitsee *täräkalvo*, jonka tehtävänä on muuttaa akustinen värähtely mekaaniseksi liikkeeksi välikorvan kuuloluille.

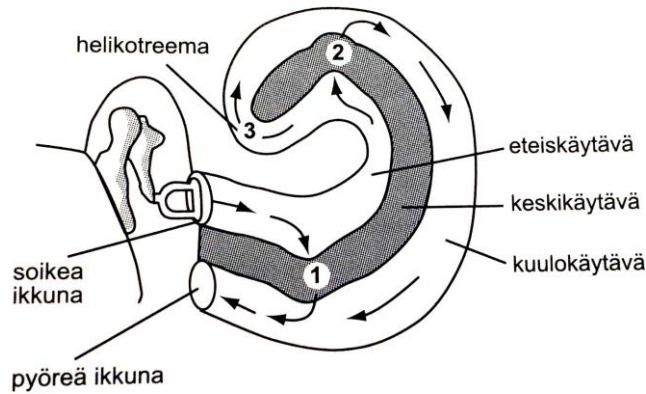
Akustisissa tarkasteluissa koko pää käsitetään osana ulkokorvaa, sillä korvien etäisyys toisistaan ja sijainti pään eri puolilla sekä kallon muoto aiheuttavat eroja äänen kulke-  
massa etäisyydessä ja reitissä värähtelyn lähteeseen nähden. [Pulkki & Karjalainen  
2015: 113.]

Välikorva on pieni ilmatäytteinen ontelo tärykalvon ja sisäkorvan välissä, jossa sijaitsevat  
pienet, toisiinsa kosketuksissa olevat kuuloluut (ks. kuva 1). Kuuloluut siirtävät tärykal-  
von mekaanisen värähtelyn väli- ja sisäkorvan rajapinnalle, *soikealle ikkunalle*, josta väräh-  
tely siirtyy sisäkorvassa sijaitsevan *simpukan* nestemäiseen väliaineeseen. Välikorvan  
monimutkaisen rakenteen taustalla on tarve muuntaa ilman pieni *akustinen impedanssi*  
eli ääniaaltovastus sopivaksi sisäkorvan nesteelle, jolla on suuri akustinen impedanssi.  
Välikorva toimii siis impedanssisovittajana eri väliaineiden välillä. [Pulkki & Karjalainen  
2015: 113–114.] Kuva 2 esittää tärykalvon  $A_1$  ja soikean ikkunan  $A_2$  pinta-alojen suh-  
detta, jonka ansiosta äänenpaine  $P_1$  tärykalvolla saadaan muunnettua paineeksi  $P_2$  si-  
säkorvalle riittävän kuuloherkkyyden aikaansaamiseksi [Jauhiainen 2008: 72–73].



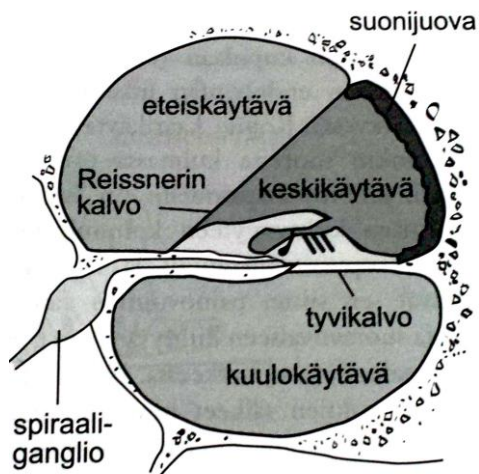
Kuva 2. Kaavakuva välikorvan impedanssisovituksesta [Jauhiainen 2008: 72].

Sisäkorvan kuuloaistia palvelevassa nesteen täyttämässä osassa *kokleassa*, eli simpu-  
kassa, äänen värähtely siirtyy soikealta ikkunalta nesteen kautta *aistinsoluille*. Aistinsolut  
ovat mekanoreseptoreita, eli ne reagoivat herkästi mekaaniselle liikkeelle kuten äänivä-  
räh-telyille. Aistinsoluja kutsutaan usein karvasoluiksi, sillä niiden pinnalla on herkkiä kar-  
vamaisia säikeitä, *sukakarvoja*. Aistinsolut sijaitsevat *kuuloelimessä* eli *Cortin* elimessä,  
joka sijaitsee simpukan keskikäytävässä; aistinsoluja ympäröi luisen ontelon neste *peri-*  
*lymfa*, mutta niiden säikeet ovat keskikäytävän *endolymfatilassa*. [Jauhiainen 2008: 75–  
76.]



Kuva 3. Pitkittäisleikkaus sisäkorvan simpukasta [Jauhiainen 2008: 75].

Kuva 3 esittää äänen paineaallon kulkua simpukassa. Sukakarvat ja keskikäytävän läpi kulkeva *tyvikalvo*, joka erottaa eteis- ja kuulokäytävän toisistaan, ovat simpukan tyvestä (1) jäykempiä. Kuva 4 havainnollistaa simpukan käytävän rakennetta ja käytävien suhteellista kokoa. Kuuloalueen taajuuksilla (20–20 000 Hz) paineentasaus välittyy tyvikalvolta eteis- ja kuulokäytävän välillä taajuuden määrittämässä kohdassa: tyven karvasolut reagoivat suuriin äänentaajuuksiin, kun kärjen (2) solut reagoivat pienempiin. Simpukan päässä oleva *helikotreema* (3) yhdistää eteis- ja kuulokäytävät toisiinsa ja vastaa korvan paineentasauksesta. Hyvin pienillä äänentaajuuksilla paineaalto kulkee helikotreeman kautta aina pyöreään ikkunaan asti. [Jauhiainen 2008: 75–78.]



Kuva 4. Simpukan käytävän poikkileikkaus [Jauhiainen 2008: 75].

Karvasolut tietyssä kohtaa tyvikalvoa reagoivat tiettyyn äänentaajuuteen ja äänentaajuutta vastaavien sukakarvojen liike muuttuu sähköisiksi impulsseiksi. Tätä äänentaaju-

den jakautumista paikan perusteella kutsutaan paikkaperiaatteeksi eli *tonotopiaksi*. Sisäkorvan kolmen käytävän keskiakselin *spiraaligangliossa* sijaitsevan *Rosenthalin kanavan* noin 30 000 hermosäiettä eli *dendriittiä* lähettävät signaalin eteenpäin. Sähköisiä signaaleja kuljettavat hermosäikeet kulkevat kuulohermon kautta aivorungon simpukkamakkeisiin. [Jauhiainen 2008: 75–76, 79.]

Jokainen simpukan keskikäytävän aistinsoluista on herkin yhdelle tietylle taajuudelle, mutta ne reagoivat herkästi myös tätä taajuutta lähellä oleviin muihin taajuuksiin. Tätä taajuusaluetta kutsutaan *kriittiseksi kaistaksi* tai kuulojärjestelmän *suodattimeksi*. Kriittinen kaista kuvaa siis kuuloaistin taajuuserottelukykä. Koko kuulon taajuusalueella on 24 kriittistä kaistaa, joista kapeimmat 100 Hz:n kaistat vastaavat pieniä alle 500 Hz:n taajuuksia. Kaistan leveys kasvaa suuremmille taajuuksille mentäessä ja on 1 kHz:n alueella jo 160 Hz ja 4 kHz:n alueella 700 Hz. Kriittisen kaistan leveys on kiinnostava tarkastelukohde muun muassa sisäkorvaistutteissa, joita esitellään luvussa 2.3.3. [Pulkki & Karjalainen 2015: 164; Jauhiainen 2008: 41.]

### 2.1.2 Kuuloaistin toiminta arkielämässä

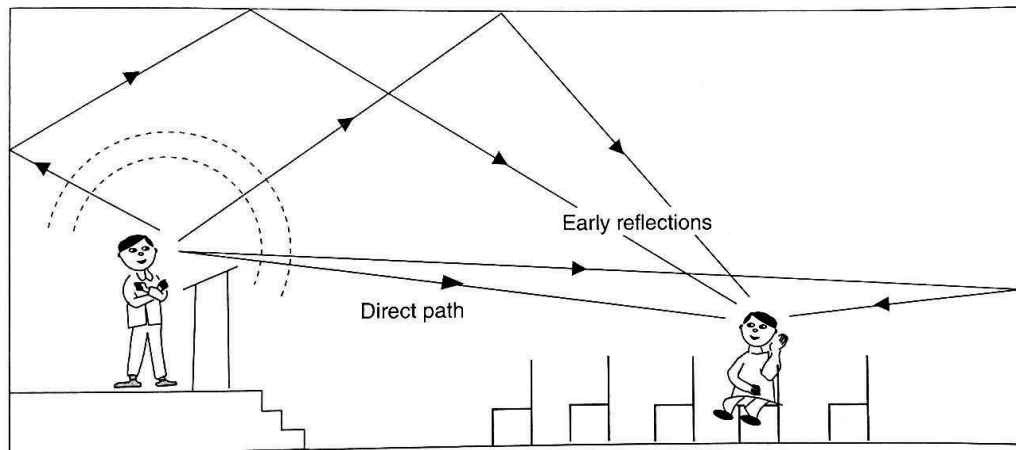
Ääni fysikaalisena ilmiönä on painemuutosten aikaansaamaa aaltomaista värähtelyliikettä väliaineessa: kuulojärjestelmän avulla voimme muodostaa subjektiivisen, havaitun ääniaistimuksen. Ääniaistimuksesta puhuttaessa olennaisia käsitteitä ovat *äänenpainetaso*, *taajuus* ja *äänen spektri*. [Jauhiainen 2008: 12.]

Äänenpainetaso (Sound Pressure Level; SPL) kuvaa äänen fysikaalista voimakkuutta ilmassa, ja sen yksikkönä käytetään desibeliä (dB), joka on belin kymmenesosa. Äänenpainetaso on logaritminen tapa ilmaista laajat äänenpaineen vaihtelut, joita voimme kuulla. Kuuloalueen äänenpainetaso vaihtelee noin 0 dB:n ja 130 dB:n välillä, ja voimme havaita pienimmillään noin 1 dB:n äänenpainetason muutoksen. Äänen taajuus puolestaan kuvaa paineaaltojen lukumäärää sekunnissa, ja sen yksikkö on hertsi (Hz). Normaalkuuloinen pystyy havaitsemaan taajuuksia 20 Hz:stä 20 kHz:iin asti. Äänen spektri on useiden yksittäisten *äänesten* muodostaman *seosäänen* (puhe, musiikki, häly ym.) hetkellisen äänenpainetason kuvaus eri taajuuksilla. Puheen spektri rajoittuu taajuuksille 100 Hz–8 kHz, suurimman äänenpaineen ollessa noin 500 Hz:n taajuudella. [Jauhiainen 2008: 12–14.]

Ihminen havainnoijana voi näistä äänen ominaisuuksista pitkälle kehittyneen *binauraalisen* eli kaksikorvaisen kuulon avulla muodostaa tarkan kuvan ympäristöstään. Tämän mahdollistaa korvien symmetrinen sijainti eri puolilla päätä ja molempien korvien erikseen vastaanottamien äänisignaalien yhdenaikainen käsittely ja vertailu [Mason 2011: 14]. Binauraalisesti vastaanotettu ääni mielletään siis yleensä yhtenä äänenä, eli tapahtuu *binauraalinen summaatio*, jonka ansiosta kuuloherkkyys on noin 3 dB parempi ja kuuluvuus 5–10 dB voimakkaampi, sekä äänipiirteiden erotuskyky parempi [Jauhiainen 2008: 43]. *Suuntakuulo* perustuu havaitun äänen aika- ja voimakkuuseroihin korvien välillä ja mahdollistaa äänilähteen paikantamisen meluisassakin ympäristössä: suuntakuulolla on suuri merkitys kommunikaatiossa ja liikenteessä [Jauhiainen 2008: 43; Tietoa kuulosta]. Binauraalinen kuulo myös suosii hälyssä sitä korvaa, jonka *signaali-kohinasuhde* (Signal-to-Noise Ratio; SNR) on parempi, siis joka havaitsee enemmän haluttua hyötysignaalia. Tätä ilmiötä kutsutaan *pään peittoilmiöksi*, sillä pää ”peittää” toiseen korvaan kulkeutuvaa ääntä. [Mason 2011: 16.]

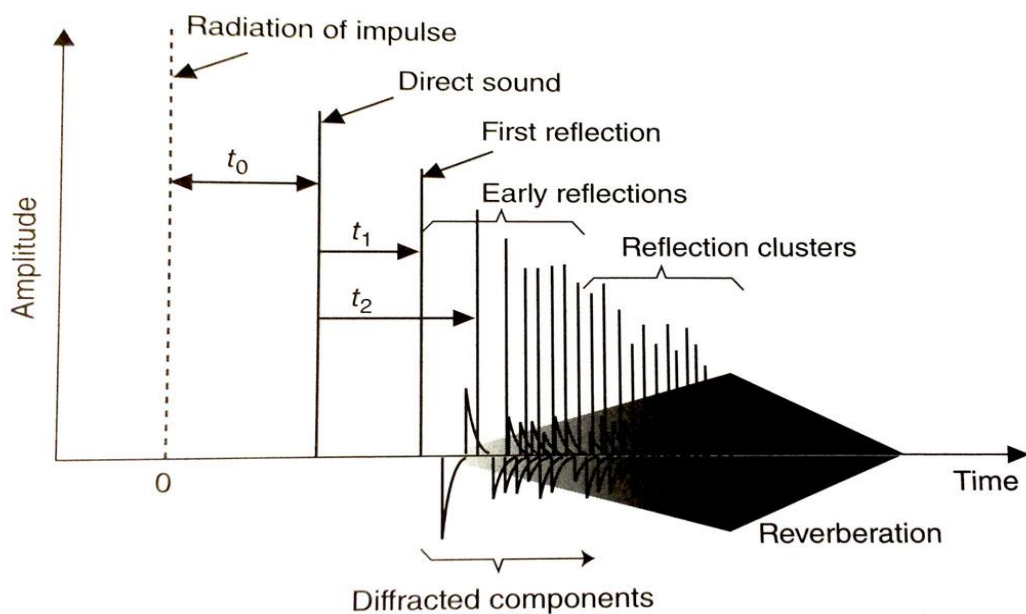
### 2.1.3 Tiläänen havainnointi

Useimmissa tilanteissa kuulemaamme ääneen vaikuttaa tila, jossa olemme, oli kyseessä sitten rakennettu tila kuten luokkahuone, kahvio, asuinhuone tai luonnollinen tila kuten metsä. Pelkän äänilähteen tuottaman äänen lisäksi havaitsemme erilaisten pintojen aiheuttamat *heijasteet*: suurin osa rakennusmateriaaleista heijastaa ääntä tehokkaasti. Niin sanotussa *vapaassa kentässä* (free field) äänilähde yksin määrittää äänikentän eli ääni leviää esteettä. Tällainen tilanne on saavutettavissa kaiuttomassa huoneessa, jonka pintojen materiaali *absorboi* lähes kaiken äänen [Jauhiainen 2008: 23]. Muissa tilanteissa havaitsemme varsinaisen suoran äänen lisäksi *aikaiset heijasteet* (kuva 5), ääniaallon *diffraktoituneet* eli törmäyksen johdosta taipuneet komponentit (ks. kuva 6) sekä *jälkikaiunnan* (reverberation, kuva 6). Jälkikaiunta-aika on huoneakustiikan tärkein yksittäinen parametri, joka ilmaisee ajanjaksoa  $T_{60}$ , jonka aikana äänenpainetaso laskee 60 dB. [Pulkki & Karjalainen 2015: 35.]



Kuva 5. Havainnekuva äänen kulkeutumisesta suljetussa tilassa [Pulkki & Karjalainen 2015: 34].

Aikaiset heijasteet vahvistavat äänen *aistimusvoimakkuutta* (loudness) ja vaikuttavat voimakkaasti kykyyn hahmottaa tilaa ja äänilähteen etäisyyttä. Liian voimakas jälkikaiunta sitä vastoin huonontaa äänenerottelukykyä ja haittaa tästä syystä myös puheentunnistusta. [Pulkki & Karjalainen 2015: 35.]



Kuva 6. Ääni-impulssin eri komponentit äänilähteestä vastaanottimelle [Pulkki & Karjalainen 2015: 35].



## 2.2 Kuulovauriot

Kuulovauriolla voidaan tarkoittaa kokonaista tai osittaista kuulokyvyn menetystä, jolloin henkilö ei kuule joitakin ääniä ollenkaan, kuten puheääntä tai tiettyjä puheen *foneemeja* eli merkitystä erottavia ääniteitä [Dillon 2012: 2]. Kuulovaurio voi ilmetä monin tavoin; käsite ei siis ole yksiselitteinen. Kuulovaurio käsitetään usein kuuloherkkyuden huonontumisena eli *hypakusiana*, jolloin äänenpainetasoltaan heikkoja ääniä ei kuulla ja jota voidaan mitata kuulokynnyksen muutoksena useimmille tutun äänesaudiometrian avulla. Kuulovaurio voi ilmetä myös ääniyliherkkyytenä eli *hyperakusiana*, äänien erotuskyvyn heikentymisenä, peittovaikutuksen lisääntymisenä, paikantamisvaikeuksina (binauraalisen kuulon heikkeneminen), äänien vääristymisenä tai *tinnituksena* eli akustisena äänenä elimistössä korvan lähellä tai korvan itseistoimintana. [Jauhiainen 2008: 170-174.]

Kuulon heikkenemiseen johtavat erilaiset kuulovauriot ovat jaettavissa kahteen pääryhmään niiden syntyttävän mukaan, synnynnäisiin ja hankittuihin. Etiologinen ryhmittely jakaa vauriot *eksogeenisiin* ja *endogeenisiin* syihin, eli ulko- ja sisäsyntyisiin vaurioihin. Melu on tyypillinen eksogeeninen vaurioiden aiheuttaja ja myös bakteerit ja virukset luokitellaan eksogeenisiksi aiheuttajiksi. Endogeenisiä aiheuttajia ovat geneettiset tekijät ja myös ikähuonokuuloisuus on pääosin endogeenista. [Jauhiainen 2008: 166.]

Tyypillisesti korvasairaudet jaetaan vaurion luonteen perusteella johtotyyppisiin eli *konduktiivisiin* ja *sensorineuraalisiin* kuulonalenemiin. Näiden lisäksi voi ilmetä *sekatyypistä kuulovikaa*, joka on edellä mainittujen yhdistelmä tai *sentraalista kuulovikaa*, jolla tarkoitetaan keskushermostosta, aivorungosta tai aivokuoresta johtuvaa kuulonalenemaa. Konduktiivinen kuulonalenema on seurausta äänen heikentyneestä kulkeutumisesta sisäkorvaan ulkokorvan, korvakäytävän, tärykalvon ja välikorvan kuuloluiden kautta. Syynä voi olla esimerkiksi vahatulppa, aukko tärykalvossa, kuuloluiden luutumisen eli *otoskleroosi*, välikorvan tulehdus tai tapaturma. Johtotyyppistä alenemaa huomattavasti yleisempi sensorineuraalinen kuulonalenema puolestaan viittaa sisäkorvan toiminnan ongelmiin, eli joko koklea tai kuulohermo on vaurioitunut. Vaurion taustalla voi olla meluvamma, ikähuonokuuloisuus, sisäkorvan verenkiertohäiriö tai Meniérén tauti. [Kuulovauriot ja niiden synty.]

Yleisin sensorineuraalinen vaurio aikuisilla on simpukan karvasolujen vaurioituminen lähellä simpukan tyveä, jonka seurauksena suuria taajuuksia, kuten puheen konsonantteja ei kuulla enää lainkaan. Tämä vaikeuttaa erityisesti sanojen erottamista toisistaan, mutta

myös osa paikantamiseen tarvittavista suurilla taajuuksilla välittyvistä vihjeistä jää saamatta. Erityisesti hälyisessä ympäristössä hälyn peittovaikutus on huonokuuloisella henkilöllä voimakkaampi, jolloin äänilähteen paikantaminen vaikeutuu entisestään. [Waltzman & Roland Jr., 2014: 19; Jauhiainen, 2008: 173.]

## 2.3 Kuulokojeet ja sisäkorvaistute

### 2.3.1 Kuulokojeen toimintaperiaate

Yksinkertaisimmillaan kuulokoje on laite, joka kerää ääntä ympäristöstä ja muuntaa sen mikrofonin avulla sähköiseksi signaaliksi ja vahvistaa sekä toistaa äänen korvakäytävään. Tämän kaltainen yksinkertainen ratkaisu saattaa auttaa johtotyypisissä kuulovaurioissa, mutta usein vauriot ovat monitahoisempia. Tällöin kojeeseen liittyy monipuolisempaa signaalin prosessointia, kuten yksilöllistä taajuusriippuvaista vahvistuksen muokkausta. [Pulkki & Karjalainen 2015: 409.]

Taajuusriippuvaisen vahvistuksen muokkaamiseksi käytetään usein *rajoittimia*, *kompressointia* sekä erilaisia *suodattimia*. Kompressoinnilla eli voimakkuusvaihtelujen supistamisella saadaan hiljaisia ääniä vahvistettua voimakkaita ääniä enemmän. Suodattimilla, kuten yli- ja alipäästö- sekä kaistasuodattimilla voidaan vahvistaa tai vaimentaa haluttuja taajuusalueita tai säätää kojeen käyttäjän kokemaa äänensävyä. Rajoittimella sekä *kohinasuodattimella* voidaan säätää sekä suurin että pienin haluttu vahvistettava äänenpainetaso. Yksi kohinasuodattimen ohella käytetty tekniikka signaali-kohinasuhteen parantamiseksi on suunnatun mikrofonin käyttäminen joko yksittäisenä tai mikrofoniparina osana kuulokojetta. Myös kahden kojeen välillä tapahtuva *binauraalinen prosessointi* voi tuoda helpotusta erityisesti tiläänänen havainnointiin, jota käsiteltiin kappaleessa 2.1.3. [Pulkki & Karjalainen 2015: 411, 413; Dillon 2012: 20.]

### 2.3.2 Kuulokojeiden tyypit

Kuulokojeella (hearing aid) tarkoitetaan laitetta, joka asetetaan sen koosta riippuen useimmiten jonnekin korvan alueelle joko korvan taakse tai korvakäytävään laitteen ollessa pienempi. Nykyaikaiset kuulokojeet ovat pääasiassa *korvantauskojeita* (Behind The Ear; BTE) tai *korvakäytäväkojeita* (In The Ear; ITE) ja näiden muunnelmia. Korvan-

tauskojeessa kojeen elektroniikka on koteloituna kourun varassa käyttäjän korvan takana, ja ääni johdetaan korvakäytävään erillisen muotin avulla. Korvantauskojeen RITE eli *receiver-in-the-canal* variaatiossa ääni johdetaan korvakäytävässä sijaitsevalle kuulokkeelle sähköisenä signaalina akustisen signaalin sijaan. [Dillon 2012: 11–12.]

Korvakäytäväkoje eli ITE asetetaan suoraan käyttäjän korvakäytävään niin, että suuri osa kojeesta jää kuitenkin käytävän ulkopuoliseen korvakuoppaan. Kojeen nimitys voi vaihdella käytävän ulkopuolisen osan koosta riippuen. Jos vain pieni osa kojeesta jää näkyviin ja se on korvakäytävän kanssa yhdensuuntainen, käytetään nimitystä ITC eli *in-the-canal*. Korvakäytävään kokonaan mahtuvaa korvakäytäväkojetta kutsutaan CIC:ksi, eli *completely-in-the-canal*. Korvakäytäväkojeet ovat muokattavissa täysin käyttäjän korvan mittojen mukaan. [Dillon 2012: 12, 51.]

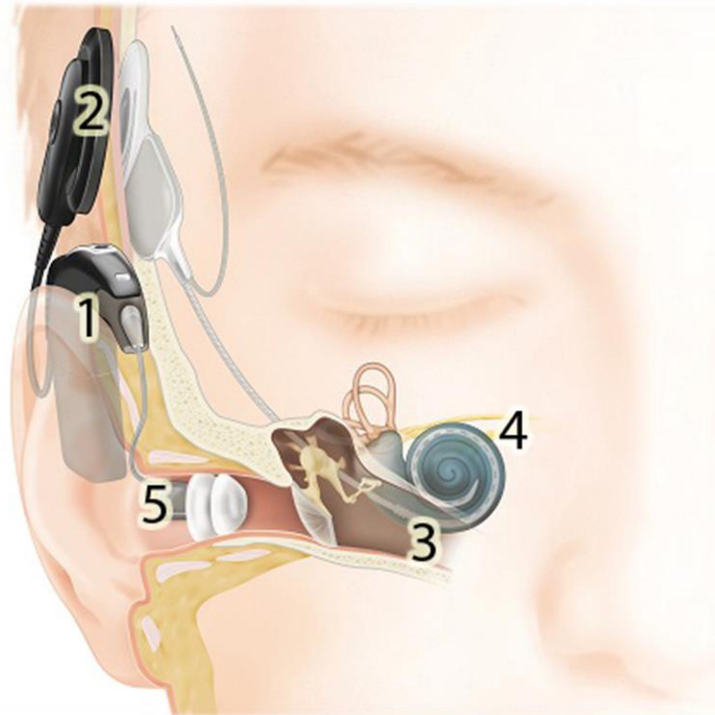


Kuva 7. Erilaisia kuulokojeita: taustalla muotillisia sekä RITE -korvantauskojeita (BTE), etualalla korvakäytäväkojeita (ITE) [Muut kuulokojeet].

### 2.3.3 Sisäkorvaistute

Mikäli kuulovaurio on vaikea-asteinen, eikä kuulokojeella saavuteta huomattavaa paranusta, voidaan ääni johtaa koklean kuulohermopäätteille asti sisäkorvaistutteen avulla. Sisäkorvaistute eli *kokleaimplantti* (Cochlear Implant; CI) ohittaa korvan ääntä johtavat osat sekä koklean. Käytännössä tällöin on aina kyseessä sensorineuraalinen kuu-

lonalenema, mutta syyt ja vaurion ilmeneminen voivat olla moninaiset, kuten myös tulokset sisäkorvaistutteen käytössä [Pulkki & Karjalainen 2015: 414; Waltzman & Roland Jr. 2014: 10].



Kuva 8. Havainnekuva sisäkorvaistutteesta, jonka toimintaan liittyvät puheprosessori (1), lähetin- ja vastaanotinkela (2), elektrodiketju (3), kuulohermon säikeet (4) ja valinnainen akustinen komponentti, jolla pieniä taajuuksia stimuloidaan akustisesti (5) [Implantoitavat kuuloratkaisut].

Kuten BTE kuulokojeiden kohdalla, kuvassa 8 kohdassa 1 esitetyt sisäkorvaistuttejärjestelmän ulkoiset osat eli mikrofonit ja puheprosessori sijaitsevat tyypillisesti korvan takana. Akustinen ääni jaetaan taajuuskaistoihin, ja pulssitettu sähköinen signaali kulkee eteenpäin lähetinkelalle, joka sijaitsee henkilön korvan takana. Vastaanotinkela on kirurgisesti implantoitu ihonalainen lähetinkelan vastakappale, josta indusoitu sähköinen pulssi eli *stimulus* etenee elektrodiketjua pitkin sisäkorvan simpukkaan. Simpukassa elektrodit stimuloivat keinotekoisesti kuulohermon säikeitä, tavoitteena hyödyntää simpukan paikka-taajuusriippuvuutta eli tonotopiaa. Eri taajuuskanavia vastaavat elektrodit pyritään ohjaamaan tiettyyn kohtaan tyvikalvoa, joilla stimuloidaan vastaavasti tyvikalvon taajuusherkkiä alueita. Sisäkorvaistutteen mikrofonien riittävän luotettava kytkeminen istutteen toimintaa arvioivissa kuulontutkimuksissa käytettäviin kuulokkeisiin on yksi osatekijä siinä, miksi äänikenttäaudiometria soveltuu paremmin sisäkorvaistutteen käyttäjille. [Pulkki & Karjalainen 2015: 414.]

## 2.4 Audiometria

### 2.4.1 Puheaudiometria

Yleisin audiometrinen tutkimus on ääneksillä suoritettu kuulokynnysmittaus, jonka tulos esitetään audiogrammina. *Äänesaudiometria* antaa tietoa henkilön kuulon herkkyydestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä, mutta käytännön tilanteissa kuulon erottelukyky on huomattavasti tärkeämpi. Tätä varten on pyritty kehittämään erikoistunutta diagnostiikkaa puheaudiometriassa muodossa. Puheaudiometriamenetelmiä käytetään esimerkiksi kuulovaurion sijainnin määrittämiseen eli *topodiagnostiikkaan*, puhekuulon toiminnanvajausten diagnostiikkaan tai kuntoutustoimenpiteitä sekä kuntoutuksen seuranta ja laadunvalvontaa varten. [Jauhiainen 2008: 116.]

Puheaudiometriassa kuulijalle toistetaan yksittäisiä sanoja tai sanoista muodostettuja lauseita joko kuulokkeiden tai kaiuttimien avulla. Kaiuttimilla suoritettavaa audiometriaa kutsutaan *äänikenttäaudiometriaksi*. Kuulija toistaa kuulemansa sanat parhaan kykynsä mukaan. Testimenetelmästä ja -aineistosta riippuen vastaukset annetaan joko suullisesti tai kirjallisesti. Yksittäiset, merkityksettömät sanat eli *logatomit* ovat vaikeimpia ymmärtää, kun lauseet ja jatkuva puhe ovat helpommin kuultavissa niiden sisältämän *redundantin informaation* eli vähimmän tarvittavan määrän ylittävän tiedon ansiosta. Sanoilla pyritään kattamaan puhujan äidinkielen yleisimmät äänneet, eli sanalistalla tulisi olla *foneeminen tasapaino*. Yksittäisillä sanoilla tehtävässä puheaudiometriassa tuloksena on sanojen *puhetunnistusprosentti* eli kuinka monta sanaa tutkittava toisti oikein, tai *puhekynnys* (Speech Reception Threshold; SRT) eli kuunteluvoimakkuus, jolla kuuntelija toisti 50 prosenttia sanoista oikein hiljaisessa kuunteluympäristössä. [Jauhiainen 2008: 116–121; Sivonen 2015.]

Sanalistoja käytettäessä täytyy ottaa huomioon testihenkilön taipumus muistaa käytettyjen sanojen järjestys niiden toistuessa usein. Yksi ratkaisu tähän ongelmaan on valikoida foneemisesti tasapainotetun sanalistan sisältämät sanat satunnaisessa järjestyksessä ja muodostaa näistä uusia listoja, joissa sanat ovat eri järjestyksessä. Toinen ratkaisu on käyttää niin sanottua matriisimuotoista testiä, jossa viidestä lauseenjäsenestä (nimi, verbi, numeraali, adjektiivi, subjekti) muodostetaan satunnainen lause. Lauseita ei voi muodostaa yksittäisistä äänitetyistä sanoista, vaan lauseet täytyy muodostaa ja äänittää kokonaisina, jotta *koartikulaatio* eli äänneiden toisiinsa mukautuminen toteutuu. HYKS Kuulokeskuksen nykyisessä hälypuhetestissä käytetään *Oldenburgin* matriisimuotoista

tapaa, jonka sanasto on kuvattu taulukossa 1. Sanasto muodostuu kymmenestä sanasta jokaista lauseenjäsentä kohden, eli erilaisia vaihtoehtoisia testilauseita voidaan muodostaa  $10 * 10 * 10 * 10 * 10 = 10^5 = 100\ 000$  kappaletta. [Sivonen 2017a.]

Taulukko 1. Oldenburgin matriisimuotoisen testin suomenkielinen sanasto. Tummennetut sanat muodostavat esimerkin testilauseesta: ”Sofia pyysi kolme punaista sukkaa”. [Dietz ym. 2014: 730.]

Name	Verb	Numeral	Adjective	Noun
Elina	etsii (searches)	pari (a pair of)	halpaa (cheap)	autoa (cars)
Harri	huomasi (notices)	kaksi (two)	kallista (expensive)	bussia (buses)
Johanna	järjesti (arranged)	<b>kolme</b> (three)	keltaista (yellow)	kelloa (watches)
Kerttu	lainasi (borrowed)	neljä (four)	pientä (small)	kenkää (shoes)
Mikko	näkee (sees)	viisi (five)	<b>punaista</b> (red)	kirjaa (books)
Juhani	ostaa (buys)	kuusi (six)	sinistä (blue)	kuppia (cups)
Olga	<b>pyysi</b> (asked)	seitsemän (seven)	suurta (big)	mattoa (carpets)
Petteri	tahtoo (wants)	kahdeksan (eight)	tuttua (familiar)	pöytää (tables)
<b>Sofia</b>	tarvitsi (needed)	yhdeksän (nine)	uutta (new)	rengasta (wheels)
Ville	valitsee (chooses)	kymmenen (ten)	vanhaa (old)	<b>sukkaa</b> (socks)

#### 2.4.2 Äänikenttäaudiometria

Äänikenttäaudiometriassa käytetään kuulokkeiden sijaan kaiuttimia koeäänten toistamiseksi. Vaikka äänikenttäaudiometria vaatii toimiakseen akustisilta ominaisuuksiltaan vaativampia tutkimustiloja ja enemmän laitteistoa, voidaan sen avulla ratkaista monta kuulokkeiden ongelmaa. Yksi äänikentän eduista on mahdollisuus realistisemmän ääniympäristön luomiseen. Toisaalta kuulokkeilla tuotettua testiääntä ei saada kytkettyä kuulolaitteiden mikrofoneihin kuulontutkimuksissa vaaditun kalibraation vaatimalla tarkkuudella. Äänikenttäaudiometriassa tulee ottaa huomioon myös pään, ulkokorvan ja kuulolaitteiden suuntaavuusominaisuudet, joten tutkittavan tulisi olla kääntämättä päätään kokeen aikana. Puhelähde on luonnollista sijoittaa eteen, sillä huonokuuloinen hyödyntää usein huulion lukua sanojen ja lauseiden ymmärtämiseksi, ja tästä syystä myös kuulolaitteiden mikrofoniin herkkyys vastaanottaa ääntä on suurin etusuunnassa. [Sivonen 2017b.]

Äänikenttäaudiometria hyödyntää testiäänänenä usein puhetta, mutta myös kapeakaistaisia äänisignaaleja voidaan käyttää äänesaudiometrian tapaan. Puheaudiometriaan voidaan yhdistää myös hälyääntä, jolloin kyseessä on *hälypuheaudiometria*. Taustahälyn ja käytettävän puheen pitkäaikaisspektrin tulisi olla samanlainen, jotta kokeesta tuloksena saatu *häiriötäisyys* eli signaali-kohinasuhde eri taajuuksilla olisi yhtäläinen. Niin

sanotussa *adaptiivisessa testissä* signaali-kohinasuhdetta muutetaan asteittain lähestyt-  
täessä 50 %:n tunnistuskykyä, jolloin tulokseksi saadaan signaali-kohinasuhde desibe-  
leinä, toisinkuin perinteisessä puheaudiometriassa, jossa käytetään sanojen tunnistus-  
prosenttia. Testiin on myös mahdollista valita tavallista hälyä muistuttava kohina, kuten  
puhehäly. Tällöin on otettava huomioon hälyn tasonvaihtelut, jotka voivat huonontaa tes-  
tin toistettavuutta, koska signaali-kohinasuhde vaihtelee. [Pulkki & Karjalainen 2015:  
407; Jauhiainen 2008: 122.]

### 3 Toteutuksen taustaa

#### 3.1 Vaatimusmäärittely

Opinnäytetyön pääasiallisena tavoitteena on oikean ääniympäristön realistinen toistami-  
nen hallituissa olosuhteissa tilan ja käytettävissä olevien kalustoresurssien puitteissa,  
jotka määrittelee HYKS:n tekninen asiantuntija. Tässä työssä esiteltävä projektin osa-  
alue käsittelee kuuntelu ympäristön hallintaohjelman teknistä toteutusta, jonka osa-alu-  
eita ovat

- taustahälyn monikanavainen toisto
- puhemateriaalin monikanavainen toisto
- käyttöliittymä kuuntelu ympäristön hallinnoimiseen.

Hallintaohjelman käyttöliittymän tulee sisältää tarvittavat toiminnot ja tiedot, joilla ääni-  
materiaali yhdistetään äänentoistolaitteisiin ja joiden avulla audionomi voi suorittaa kuu-  
lontutkimusta. Näitä toimintoja ovat

- taustahälyn toistaminen määrättyllä kaiutinkonfiguraatiolla
- taustahälyn toiston keskeytys ja jatkuva toisto
- kaiuttoman tai kaiutetun puhemateriaalin toistaminen yhtäaikaaisesti hälyn kanssa määrättyllä kaiutinkonfiguraatiolla
- puhe-etäisyyden vaihtaminen
- taustahälyn ja/tai puhemateriaalin vaihtaminen
- kaiuttoman sekä kaiutetun puhemateriaalin kalibrointi

- äänimateriaalin äänenvoimakkuuden säätö suhteessa kalibrointiin
- äänenvoimakkuuden ilmaisin.

Toteutuksessa kiinnitetään huomiota tiedon keskittämiseen yhteen paikkaan. Hallintaohjelman käytön tulee olla riippumaton ulkopuolisesta ohjelmistosta, pois lukien Max-ohjelmointiympäristö ja tietokoneen käyttöjärjestelmä. Tarvittavat äänitiedostot ja muut ulkopuoliset tiedostot tulee liittää osaksi ohjelmaa. Lisäksi tulee ottaa huomioon ohjelman skaalautuvuus, kun uusia ääniympäristöjä tai puhemateriaaleja halutaan ottaa myöhemmin käyttöön. Ohjelmasta tulee olla muodostettavissa itsenäinen sovellus, joka ei ole riippuvainen Max-ohjelmointiympäristöstä.

## 3.2 Kuunteluhuone

### 3.2.1 Äänierio

HYKS Kuulokeskuksen tilat siirtyivät Meilahdesta Kasarmikadun Kirurgiseen sairaalaan vuoden 2016 aikana, ja tässä yhteydessä pystytettiin myös uusi äänikenttäaudiometriahuone, joka mahdollisti kaiuttimien sijoittelun opinnäytetyöprojektin vaatimalla tavalla. Kuvassa 9 nähtävä tutkimustila tarvikkeineen valmistui joulukuun aikana, ja tarkemmat mitat kaiuttimien asettelusta selkenivät tammikuussa.



Kuva 9. Kuva HYKS Kuulokeskuksen kuulontutkimustilasta: kuvassa vasemmalla pienempi erio kuulokkeilla suoritettavaa audiometriaa varten ja taustalla insinööriyössä hyödynnetty äänikenttäaudiometriahuone.



Tutkimustilan rakenteellinen osa on sisämitoiltaan 2540 x 2640 x 2100 mm (p x l x k) kokoinen äänieriö, joka on tavallista huonetta paremmin äänieristetty. Rakenne koostuu sisäpuolella ohuesta rei'itetyistä teräspaneelista ja ulkopuolella sileästä teräspaneelista, joiden väliin on asennettu 48 kg/m<sup>3</sup> tiheysistä villaeristettä absorboimaan ääniaaltoja. Lisäksi tilassa on ikkuna kuulontutkimuksen suorittajan ja tutkittavan välistä näköyhteyttä varten. Helmholtzin periaatteen mukaan Helmholtz-resonaattorin (esimerkiksi pullo) absorptio on suuri kapealla taajuuskaistalla sen pakottaessa äänen nopeaan liikkeeseen resonanssitaajuudella. Sisäpuolen teräspaneeli, jonka pinta-alasta 23 % on rei'itetty, käyttää tätä periaatetta hyväkseen vaimentaakseen pieniä taajuuksia. Mineraalivillaeriste vaimentaa pieniä taajuuksia edelleen. [Sivonen 2017b; Jauhiainen 2008: 20–21.]

Villaeristeen paksuus on kuitenkin kompromissi seinän paksuuden ja jälkikaiunta-ajan välillä. Ohut kerros huokoista mineraalivillaa absorboi osan ääniaalloista, kun osa heijastuu takaisin tilaan. Tätä suhdetta kuvataan *absorptiokertoimella* (Noise Reduction Coefficient; NRC), joka tässä tilassa käytettävillä seinäelementeillä on 0,95, kun arvo 1 vastaa täysin kaiutonta tilaa. Suuritaajuiset ääniaallot on helppo absorboida ohuellakin kerroksella huokoista materiaalia, kun aallonpituudeltaan pitkät pienitaajuiset ääniaallot heijastuvat ja lisäävät tilan jälkikaiunta-aikaa ja voivat aiheuttaa huoneeseen *seisovia aaltoja*, kun heijastuvat aallot vahvistavat toisiaan. Jälkikaiuntaa on käsitelty kappaleessa 2.1.3. Jälkikaiunta-ajan sallittuja rajoja ei ole määritelty standardissa, vaikka muita vapaan-, diffuusin- ja näennäisesti vapaan kentän vaatimuksia sekä muita testiäänneksiin ja ääniin liittyviä seikkoja on määritelty ISO 8253-2:2009 -standardissa. [Sivonen 2017a; ISO 8253-2 2009]

### 3.2.2 Kaiutinkonfiguraatio

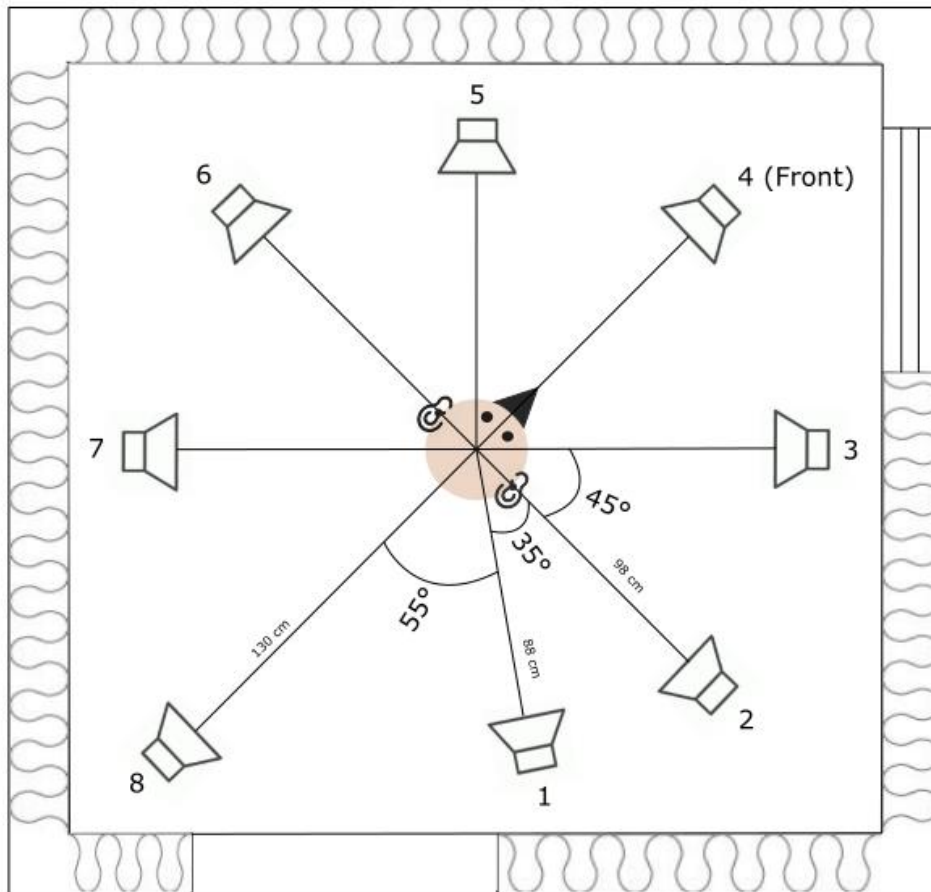
Oikeassa ääniympäristössä kuulija havainnoi ääntä joka suunnasta. Ihanteellista olisi siis saada toistettua ääntä joka suunnasta kuulijan ympärillä pallomaisessa äänikentässä. Yksi ratkaisu on valita pallomaisesta kentästä vain yksi vaakasuuntainen taso, ja toistaa ääntä tällä tasolla joka suunnasta kuulijan ympärillä; osa kaiuttimista voidaan myös asettaa eri tasoille. Toinen ratkaiseva tekijä on käytettävien kaiuttimien määrä, joita HYKS:n aiemmassa kuunteluhuoneessa oli viisi. Puhekyynnyksen virhemarginaali kaiuttomaan referenssiympäristöön verrattuna pienenee, mitä enemmän kaiuttimia jonkin verran kaiuntaa sisältävässä kuuntelutilassa on käytettävissä. Normaalikuuloisilla testihenkilöillä jo seitsemän kaiuttimen kuunteluympäristössä päästään alle 1 dB:n virhemarginaaliin verrattuna kaiuttomaan referenssiympäristöön. [Koski ym. 2013.]



Kuva 10. Laajakuva valmiista kuunteluhuoneesta ja sen kaiutinkonfiguraatiosta.

Kuunteluhuoneessa käytetään kahdeksan Genelec 8050A -kaiuttimen konfiguraatiota, jotka on asetettu keskenään samaan korkeusasemaan (*elevation*) noin kuulijan korvan korkeudelle kuvan 10 osoittamalla tavalla. Kaiuttimien asettelu suhteessa toisiinsa on tärkeää äänikentän oikean toistuvuuden kannalta. Kahdeksan kaiuttimen ääniympäristö vaatii myös toistettavien äänitiedostojen prosessoimista kahdeksankanavaisiksi, jotta täysi hyöty ympäristöstä saavutetaan.

Äänitiedostojen prosessointia varten tulee tietää kaiuttimien keskinäiset kulmat ja etäisyydet kuuntelupaikasta sekä korkeusasema. Ideaalissa kuunteluympäristössä kaiuttimet on jaettu yhtä etäälle samalla kulmajaolla tasaisesti kuuntelukohdan ympärille. Tällöin kahdeksalla kaiuttimella kulmajako olisi 360 astetta jaettuna kahdeksalla eli 45 astetta. Tässä tapauksessa äänierion ovi hankaloitti kaiuttimien sijoittamista, joten kuulijan takana oleva kaiutin on siirretty etäämmälle kohti huoneen nurkkaa, ja oven oikealla puolella oleva kaiutin suurempaan (55°) kulmaan edelliseen nähden. Etusuunnaksi valittiin kaiutin neljä jonka asteluku on nolla, ja josta muiden kaiuttimien järjestysnumero ja kulma etusuuntaan nähden kasvavat vastapäivään mentäessä kuvan 11 osoittamalla tavalla. [Sivonen 2017a.]



Kuva 11. Kuuntelutilan pohjapiirros mittoineen. Kaiuttimien kulmat etummaisesta kaiuttimesta vastapäivään ovat 0, 45, 90, 135, 180, 235, 270 ja 315.

Äänen ohjaamiseksi tietokoneelta kahdeksalle kaiuttimelle tarvitaan väliin monikanavainen äänikortti, sillä jokaisella kaiuttimella tulee olla oma kanavansa, jonka kautta haluttu ääni voidaan ohjata halutulle kaiuttimelle. Tässä toteutuksessa ääni ohjataan tietokoneelta ulkoisen RME Fireface 802 (ks. kuva 12) -äänikortin kahdeksaan analogiseen ulostulokanavaan, joiden balansoituihin TRS (Tip-Ring-Sleeve) -liittimiin kaiuttimet kytketään. Äänikortissa on kaikkiaan kaksitoista analogista sisään- ja ulostulokanavaa, kortin analogi-digitaalimuunnoksen resoluutio eli bittisyvyys on 24 bittiä, näytteenottotaajuus korkeimmillaan 192 kHz sekä dynaaminen alue ulottuu jopa 118 desibeliin asti. Ohjelmistoa ja äänikorttia ohjataan kannettavalla PC-tietokoneella (ks. kuva 12), jonka käyttöjärjestelmänä on 32-bittinen Windows XP.



Kuva 12. Kuva kuunteluhuoneen ohjauspöydästä, jossa ohjaava tietokone (1), RME Fireface 802 äänikortti (2) sekä perinteinen audiometrialaitte (3).

### 3.3 Taustahälymateriaali

Oikean ääniympäristön realistisen toiston kannalta on olennaista, kuinka ääniympäristö on äänitetty. Äänen tallentamiseksi eri suunnista kuulijan ympärillä täytyy hyödyntää siihen erikoistunutta tekniikkaa, eli niin sanottua *surround sound* (tilääni) -tekniikkaa. *Ambisonics* on tiläänen erityissovellus, joka huomioi ääntä pallomaisessa kentässä kuulijan ympärillä. Pallomaisen kentän toistamiseksi otetaan huomioon äänet kuulijan ylä- ja alapuolella vaakasuunnan lisäksi. *Äänikenttämikrofonilla* (kuva 13) tallennetun kolmiulotteisen ääni-informaation toistamiseksi Ambisonics hyödyntää neljää toistokanavaa niin sanotussa B-formaatissa: kanava W:n pallokuviomikrofonilla äänitetty signaali sisältää joka suunnasta tulevaa informaatiota, kun X-, Y- ja Z-kanavien signaalit sisältävät suorassa kulmassa kolmesta eri suunnasta tallennettua informaatiota. Mikrofonitallentaa tilan suuntainformaation A-formaatin äänitiedostoon, joka on myöhemmin siirrettävissä halutulle kaiutinkonfiguraatiolle. [Pihlajamäki 2013.]

Tässä toteutuksessa käytettävät äänitiedostot on äänitetty Soundfield SPS200 -äänikenttämikrofonilla Aalto-yliopiston akustiikan laboratorion tilääniprojektien yhteydessä [Koski 2012; Koski ym. 2013]. Mikrofonit koostuu neljästä kondensaattorimikrofonista, jotka äänittävät tilaa yhtäaikaaisesti.



Kuva 13. Kuva Soundfield SPS200 -äänikenttämikrofonista [Soundfield SPS200].

Tilääntä äänitettiin kolmessa paikassa vuoden 2012 aikana: Viikin normaalikoulussa, päiväkodissa Pukinmäessä sekä Helsingin rautatieaseman lippuhallissa. Tallennetut äänitiedostot ovat nelikanavaisia A-formaatin tiedostoja, joiden ajallinen pituus vaihtelee noin minuutista muutamaan minuuttiin sekä tiedostokoko muutamista kymmenistä megatavuista reiluun sataan megatavuun. Alkuperäinen äänite on hyvä lähtökohta tilan mallintamiseksi kuunteluympäristössä, jonka lisäksi äänitteistä on tarjolla vaihtoehtoisia versioita, jotka on kuvattu alla tarkemmin. Äänikenttämikrofonin lisäksi tiläänen tallennuksessa käytettiin kannettavaa Macbook -tietokonetta sekä MOTU Traveler mk3 -äänikorttia. Alkuperäisiltä äänitteiltä on jälkikäsitelty pois muun muassa äänen leikkautumisen (clipping) aiheuttamat artefaktit eli hetkelliset virheet toistossa käyttämällä ristiin häivyttämistä (crossfade). Alkuperäiseltä äänitteeltä on valittu sopivat kohdat valmiille äänitteelle leikkaamalla sopimattomia osia pois, johon ”crop”-jälkiliite viittaa. ”Combo”-jälkiliite viittaa eri äänitteiden yhdistelyyn. [Koski 2016.]

### 3.3.1 Viikin normaalikoulu

Viikin normaalikoulussa oli järjestetty kolme erillistä äänitystilannetta. Ensimmäinen tila oli tyypillinen neliön muotoinen pienikokoinen luokkahuone, jonka takaseinällä ja katossa oli ääntä absorboivaa materiaalia sekä kirjahyllyjä sivuseinillä. Huoneessa on siis melko hyvin hallittu akustiikka, jonka ansiosta jälkikaiunta-aika pysyy lyhyenä. Äänitteellä kuullaan kuuttatoista toisen luokan oppilasta sekä opettajan ohjeistusta, kun luokkaa siivotaan. Alkuperäisellä äänitteellä (luokka\_crop1) mikrofoni sijaitsi keskellä luokkaa, ja äänitteestä on tehty kolme muokattua versiota erilaisen ääniympäristön luomiseksi:

- Luokka\_combo1, jossa alkuperäinen äänite on leikattu neljään 35 sekuntia pitkään osaan, jotka on käännetty 0, 90, 180 ja 270 astetta ja summattu yhteen.
- Luokka\_combo2, jossa alkuperäinen äänite on leikattu kahteen yhtä pitkään osaan, joista jälkimmäinen on käännetty 180 astetta ja osat on summattu yhteen.
- Luokka\_combo3, jossa alkuperäinen äänite on leikattu viiteen osaan ja summattu yhteen. [Koski 2016.]

Alkuperäinen äänite ja sen eri versiot ovat luonteeltaan kokeellisempia, sillä niillä voidaan kuulla runsaasti tunnistettavaa puhetta eri suunnista, sekä erityyppisiä häiritseviä ääniä, kuten kolinaa ja kahinaa. Muokatuissa versioissa puheen tunnistettavuus vähennee, kun muiden äänien häiritsevyys kasvaa.

Toinen tila oli muodoltaan noin 11 x 6 x 3 m (p x l x k), jossa oli tallennushetkellä käynnissä kahdeksasluokkalaisten ruotsin oppitunti. Huoneen katossa oli ääntä absorboivia akustiikkalevyjä, ja tila oli kaikuisampi kuin ensimmäisessä äänitystilanteessa. Alkuperäisellä äänitteellä (kasiluokka\_crop1) oppilaat lukivat tekstiä yhtäaikaaisesti. Muokatussa versiossa (kasiluokka\_combo1) alkuperäinen äänite on leikattu kahteen yhtä pitkään osaan, joista jälkimmäinen on käännetty 180 astetta ja osat on summattu yhteen. Ääniympäristö on ensimmäistä tilaa huomattavasti kaikuisampi ja sisältää tasaista puheensorinaa, josta yksittäisiä puhujia ei voi tunnistaa. [Koski 2016.]

Kolmas äänite oli äänitetty suuressa, kolme kerrosta korkeassa ruokalassa, jota rajoittivat lasiset ja normaalit pinnat; tila on akustisesti hyvin haastava. Alkuperäisellä äänitteellä (ruokala\_crop1) mikrofoni asetettiin keskelle tilaa, ja äänitys tehtiin peruskoulun oppilaiden ruokatunnin aikana, jolloin ruokala oli täynnä. Vaihtoehtoisella äänitteellä (ruokala\_combo1) alkuperäinen äänite on asetettu kolme kertaa limittäin. Tuloksena on hyvin diffuusia ruokalamelua, jossa puhehälyä sekä muita ääniä tulee joka suunnasta. Äänikentässä suoritettavaa puheaudiometriaa ajatellen ruokalassa tehty äänitys on paras lähtökohta Viikin normaalikoulun kolmesta tilasta, sillä se tarjoaa haastavan ja monipuolisen ääniympäristön ilman suoraan häiritsevää tunnistettavaa puhetta. [Koski 2016.]

### 3.3.2 Päiväkoti

Päiväkodin ääniympäristön tallennus tehtiin leikkipuiston sisätilassa, joka on kooltaan noin 8 x 4 x 4 m (p x l x k). Tilaa rajoittivat kova lattia, jota peitti 7 x 3 m:n kokoinen matto,

kovat pinnat kolmella seinämällä sekä yksi lasinen seinämä, josta noin 80 prosenttia oli verhojen peittämänä. Lisäksi tilassa oli huonekaluja sekä liikuteltava pehmeä seinäelementti. Tilasta on käytettävissä alkuperäisen äänitteen kaksi muunnelmaa:

- Paivakoti\_combo1, jossa kaksi erillistä äänitettä on yhdistetty, joista toinen on käännetty 90 astetta ja summattu yhteen ensimmäisen kanssa.
- Paivakoti\_combo2, jossa yksittäinen äänite on jaettu kahteen osaan ja osat on summattu sekä toistettu kahteen kertaa niin, että jälkimmäinen toisto on käännetty 180 astetta. [Koski 2016.]

Viikin normaalikoulun ensimmäisen äänityksen tapaan päiväkodin äänite on kokeellisempi, ja se sisältää paljon tunnistettavaa puhetta ja pienten lasten äännähtelyä sekä muun muassa pianonsoittoa. Edellä mainituista syistä äänite on hyvä ottaa mukaan toteutukseen, jotta voidaan vertailla erilaisia ääniympäristöjä toisiinsa.

### 3.3.3 Helsingin rautatieaseman lippuhalli

Kolmas ääniympäristö tallennettiin Helsingin rautatieaseman lippuhallissa, joka sijaitsee pääovista katsottuna aulan vasemmalla puolella. Kyseessä on isohko tila, jossa on kovat kivipinnat ja korkea katto, joiden lisäksi tilassa on jonkin verran kalusteita. Mikrofonit oli asetettu penkkien väliin 160 senttimetrin korkeudelle kassan numero neljä kohdalla. Tilasta on käytettävissä alkuperäisen äänitteen (lippuhalli\_crop) lisäksi yksi muunnos (lippuhalli\_combo), jossa toinen puolisko on käännetty 180 astetta ja summattu ensimmäisen puoliskon kanssa. Viikin normaalikoulun ruokalassa tehdyn äänitteen tapaan kyseessä on hyvin diffuusi tila, joka tarjoaa haastavan ääniympäristön kuulijalle, mutta jossa ei ole puheentunnistusta häiritsevää tunnistettavaa puhetta erillisen puhemateriaalin lisäksi. [Koski 2016.]

### 3.3.4 DirAC-tiläänitekniikka

Äänitettyjen ääniympäristöjen realistisen toiston saavuttamiseksi halutussa tilassa täytyy A-formaatin äänitiedostot prosessoida käytetyn kaiutinkonfiguraation mukaan: kuinka montaa kaiutinta käytetään, kuinka pitkä etäisyys kuuntelukohtaan kustakin kaiuttimesta on sekä mitkä ovat kaiuttimien väliset kulmat ja korkeusasema. Tämän toteutuksen kaiutinkonfiguraation tarkemmat tiedot on esitetty luvussa 3.2.

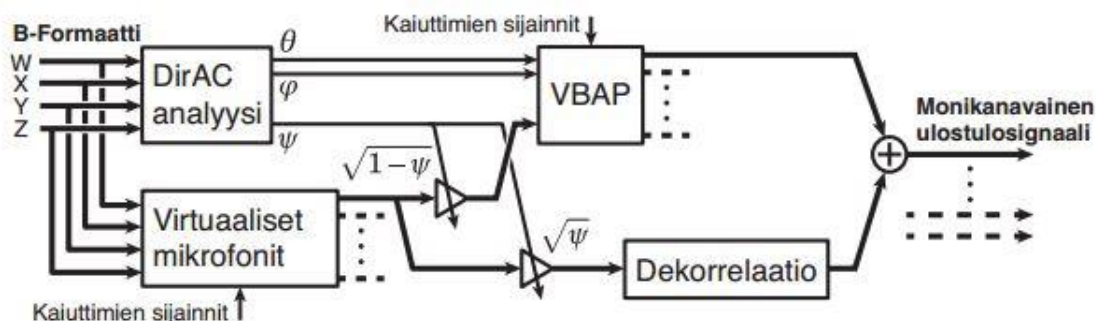
Luvussa 3.3 esitettyjen taustahälymateriaalien prosessoimiseksi työssä hyödynnetään Aalto-yliopistossa kehitettyä, patentoitua *Directional Audio Coding* eli DirAC-tilaääniteknikkaa. Olennaisin ero DirAC:n ja aiempien tilaääniteknikoiden välillä on DirAC:n lähestymistapa alkuperäisen tallennetun tilaäänen käsittelemisessä: tilan suoran mallintamisen sijaan DirAC pyrkii säilyttämään alkuperäisen tilan aistimiseen vaikuttavat ominaisuudet. DirAC-analyysi tekee tämän jakamalla tallennetun tilaäänen sen hajaantuneisiin (diffuse) ja suoriin (non-diffuse) äänen osatekijöihin, jotka perustuvat pääasiassa kuulojärjestelmän oletettuun kykyyn havaita vain yksi suunnallinen ja binauraalinen koherenssihje jokaista kuulon kriittistä kaistaa kohden. Toisin sanoen DirAC-analyysi huomioi äänen saapumissuunnan ja diffuusiuden suhteessa kuulojärjestelmän aika-taajuus-erottelukykyyn. DirAC-menetelmän hajaantuneet osat toistetaan kaikkiin käytettävissä oleviin kaiuttimiin, kun sen suorat osat toistetaan pistemäisinä virtuaalisina äänilähteinä tiettyihin kaiuttimiin perustuen VBAP, eli *Vector Base Amplitude Panning* -käsittelyyn. Hajaantuneet osat luovat tilan tuntua, kun suorien osien tulosuunnan voimme havaita. [Koski 2012; Koski ym. 2013; Pihlajamäki 2013; Pulkki 1997]

Tekniikkaa on ehdotettu sovellettavaksi klinisiin sovelluksiin Teemu Kosken [ym., 2013] toimesta, sillä verrattuna aiempiin matriisipohjaisiin ratkaisuihin DirAC on joustava tekniikka, joka ratkaisee useita tilaäänen toiston ongelmia, jotka ovat olennaisia klinisiä ympäristöjä ajatellen. DirAC:n avulla tilaäänen toistoa voidaan soveltaa erilaisiin kaiutinkonfiguraatioihin, eikä alkuperäisen ääniympäristön realistinen toisto ole riippuvainen tietystä kaiuttimien asetelusta. DirAC:n avulla toistettu äänikenttä myös vastaa paremmin alkuperäistä ääniympäristöä kuin muilla menetelmillä. Lisäksi DirAC:lla toistetun äänikentän oikea toisto ei ole yhtä riippuvainen kuulijan paikasta tai pään asennosta äänikentässä, jonka ansiosta DirAC-kuunteluympäristöä voidaan hyödyntää esimerkiksi lasten kuulokokeissa.

A-formaatin äänitiedostojen käsittely DirAC-menetelmällä tehdään Aalto-yliopiston akustiikan laboratoriossa Ville Pulkin tutkimusryhmän toimesta Leo McCormackin avustuksella. Nykyinen DirAC-menetelmä toimii N:nneen asteen Ambisonicsin pohjalta, eli kaikki äänen tulosuunnat otetaan huomioon. Tässä toteutuksessa kaikki kaiuttimet on asetettu samaan korkeusasemaan, joten pallomaisesta äänikentästä hyödynnetään vain yksi ohut siivu, toisin sanoen yksi äänikentän poikkileikkaus, jolla ääntä toistetaan. Tämän aikaansaamiseksi täytyi kahdeksannessa kanavassa olevan kaiuttimen, joka sijaitsee



kuulijan takana, korkeusasema merkitä prosessoinnissa hieman erilleen muista, jotta käsiteltäisiin kaksiulotteisen ympyrän sijaan kolmiulotteista pallomaista äänikenttää. [McCormack 2017.]



Kuva 14. DirAC-menetelmän lohkokkaavio [Pihlajamäki 2013].

Äänitiedostojen käsittelemiseksi DirAC:lla täytyy A-formaatin tiedostot ensin kääntää DirAC:n ymmärtämään B-formaattiin (ks. kuva 14). Käännöksessä täytyy ottaa huomioon äänikenttämikrofonin tallentaman alkuperäisen ääni-informaation tulosuunnat, jotta äänikenttä ei ”käänny” väärinpäin, jolloin realistinen toisto häiriytyy. Prosessoinnissa äänitteen hajaantuneet osat ohjataan kaiutinkonfiguraation kaikkiin kaiuttimiin, kun äänet, joilla on tulosuunta, ohjataan VBAP-moduuliin, joka muodostaa äänistä pistemäisiä virtuaalisia äänilähteitä. DirAC-prosessoinnin tuloksena on kahdeksankanavaisia WAV (Waveform Audio File Format) –tiedostoja, joita voidaan toistaa kahdeksankanavaisessa toistojärjestelmässä. [Pihlajamäki 2013; McCormack 2017.]

DirAC ei ole täysin mutkaton menetelmä. VBAP:lla luodut virtuaaliset äänilähteet kauempana valitusta keskitasosta korostuvat keskitason suuntaan, eivätkä virtuaaliset äänilähteet aina vastaa pistemäisiä oikeita äänilähteitä. Rajoittuneemmilla kaiutinkonfiguraatioilla esiintyy virtuaalisten lähteiden *kampasuodinilmiötä*, jossa alkuperäisen signaalin viivästynyt kopio itsestään aiheuttaa vuoroin voimistavaa ja vaimentavaa interferenssiä. Lisäksi DirAC:n psykoakustisten oletusten oikeellisuutta ei ole todennettu henkilöillä, joilla on kuulovaurio tai kuulolaite. Tämän työn kuvaaman toteutuksen avulla oletuksia voitaisiin tutkia. [Koski 2012.]

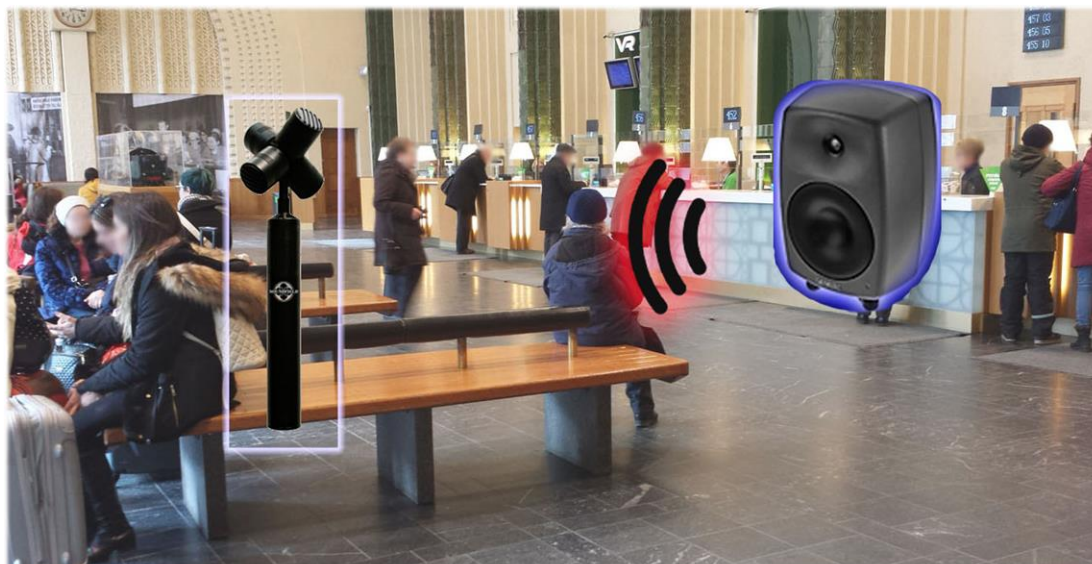
### 3.4 Tilaimpulssivasteet

#### 3.4.1 Vasteiden mittaus

Tiläänen lisäksi ympäristöistä oli mitattu tilan impulssivaste Genelec 8020A -kaiuttimen sekä myös taustahälymateriaalien äänitykseen käytetyn Soundfield SPS200 tiläänimikrofonin avulla. Impulssivasteen mittaus suoritettiin erillään ääniympäristön tallentamisesta, sillä tilan tuli olla muuten hiljainen mittausta tehdessä. Kaiuttimesta soitettiin muutamana sekunnin pituinen *logaritminen pyyhkäisy* (log sweep) 20–20 000 Hz:n taajuuskaistalla, ja tilan taajuusvaste mitattiin tiläänimikrofonin avulla eri etäisyyksiltä. Kussakin ääniympäristössä kaiutin pidettiin samalla kohdalla, kun mikrofonia siirrettiin kauemmas kaiuttimesta mittausten välissä erilaisten impulssivasteiden saamiseksi. Näin tehtäessä kaiuttimen paikka vastaa puheen lähdettä, ja mikrofonin paikka kuulijan sijoittamista äänikentässä. [Koski 2016.]

Viikin normaalikoulun toisen luokan luokkatilasta (tila 1) impulssivasteita mitattiin oppilaiden penkkirivejä vastaavilta 2, 3, 5 ja 7 metrin etäisyyksiltä opettajan paikkaan nähden. Kahdeksaluokkalaisten luokkatilassa (tila 2) mittaukset tehtiin vastaavasti vaihtelevilla etäisyyksillä ensimmäisestä, toisesta, kolmannesta, neljännestä sekä viidennestä penkkirivistä. Ruokalan (tila 3) impulssivasteet taltioitiin 1, 2, 3, 4 ja 6 metrin etäisyyksillä kaiuttimesta. Kaiutin oli asetettu seisoma-asennossa olevan aikuisen suun korkeudelle kaikissa mittauksissa. Mikrofonin oli asetettu istuvan kuulijan korvan korkeudelle vaihtelevasti tuolin korkeuden mukaan: tilassa 1 100 cm korkeudelle, tilassa 2 sekä 3 120 cm korkeudelle. [Koski 2016.]

Päiväkodissa leikkipuiston sisätilan impulssivasteita mitattiin 2, 3, ja 4 metrin etäisyyksiltä äänilähteenä käytetystä kaiuttimesta. Kaiutin oli asetettu noin 160 senttimetrin korkeudelle, kun impulssivastetta mitannut mikrofonin oli 104 senttimetrin korkeudella. Helsingin rautatieaseman lippuhallissa impulssivasteita mitattiin ½, 1, 2, 3, 4, 6, ja 8 metrin etäisyyksiltä kaiuttimesta, joka oli sijoitettu vastaanottotiskin neljälle kohdalle kuvan 15 osoittamalla tavalla. Impulssivaste mitattiin myös 18 metrin etäisyydeltä poiketen edellisestä mikrofonin asettelusta eri kaiuttimen avulla. [Koski 2016.]

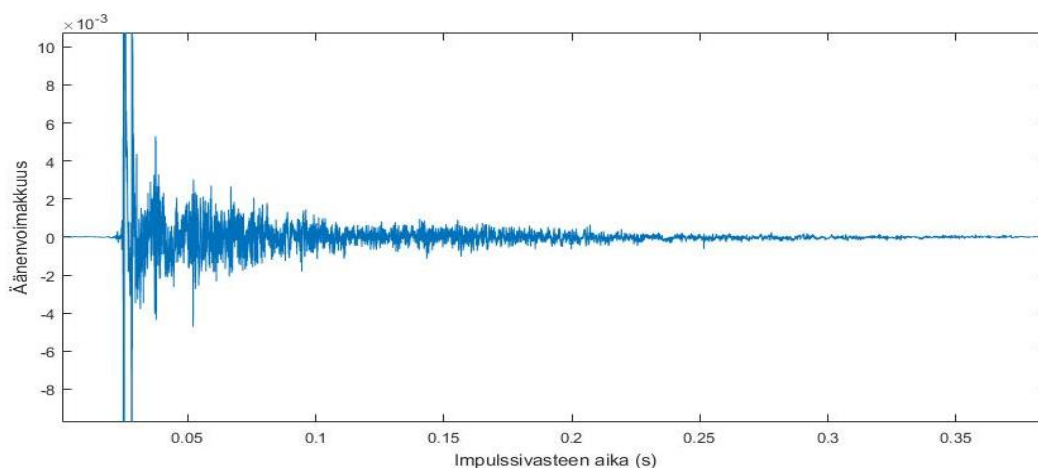


Kuva 15. Havainnekuva lippuhallin impulssivasteiden mittausasetelmasta.

### 3.4.2 Vasteiden käsittely SIRR-menetelmällä

Impulssivasteiden kaikuisuutta kuvaa tärkein yksittäinen huoneakustiikan parametri jälkikaiunta-aika, joka on esitelty kappaleessa 2.1.3. Jälkikaiunta-aika on impulssiäänien loppumisesta laskettava aika, joka pitenee huoneen tilavuuden ja ääntä heijastavien pintojen määrän kasvaessa. [Pulkki & Karjalainen 2015: 36.]

Impulssivasteiden tapauksessa mitä kauemmas äänilähteestä impulssia mittaava mikrofoni on viety, sitä ”kauempaa” puhujan puhe havainnoidaan tulevan kuunteluympäristössä. Myös äänen suora osa on suhteessa vaimeampi kaiuntaan nähden, kun kaiunnan määrä kasvaa puhujan ja kuulijan välisen etäisyyden kasvaessa. Kuvassa 16 esitetään yksi impulssivasteen aikatazon esitys, joka edustaa tilan kaiunnan määrää.



Kuva 16. Esimerkki impulssivasteesta: Viikin normaalikoulun ruokalan impulssivaste 2 metrin etäisyydeltä mitattuna. Impulssivasteen alkuosan suoran äänen todellinen taso on kuvan rajojen ulkopuolella.

Tilaimpulssivasteiden hyödyntämiseksi tiedostot käsitellään huoneakustiikan toistamiseen käytetyllä SIRR- eli *Spatial Impulse Response Rendering* tekniikalla, johon myös DirAC perustuu. SIRR:n toimintaperiaate on pääpiirteissään sama kuin DirAC:n: äänen tulosuunta ja hajaantuneisuus analysoidaan perustuen kriittisiin kaistoihin. [Pulkki & Merimaa 2006.]

Puheen lähde, eli impulssin suora ääni, tulee suunnata kuuntelutilanteessa suoralle linjalle etumaisen kaiuttimen kohdalle, joka on tässä toteutuksessa kanavaan 4 kytketty kaiutin. Näin varmistetaan, ettei DirAC:n VBAP-prosessointi, jota käsiteltiin kappaleessa 3.3.4, aiheuta ongelmia kuulolaitteen käyttäjälle laitteen eteenpäin suunnattujen mikrofonien toiminnan johdosta [Koski 2012]. Kuten taustahälymateriaalien kohdalla, täytyy mitatut A-formaatin impulssivasteet ensin kääntää B-formaattiin ja käsitellä kaiutinkonfiguraation mukaisesti. Lopputuloksena saadaan kahdeksankanavaisia impulssivasteita, joita voidaan hyödyntää puhemateriaalin kaiuttamiseen.

Impulssivaste itsessään ei ole suoraan käyttökelpoinen, vaan se täytyy yhdistää halutun äänimateriaalin kanssa kaiunnan liittämiseksi materiaaliin. Tässä toteutuksessa äänimateriaali on äänitettyä puhetta, jota on kuvattu tarkemmin kappaleessa 3.5. Yhdistäminen voidaan tehdä *konvoluomalla* impulssivaste ja puhemateriaali joko erillisellä prosessoinnilla, tai reaaliaikaisesti kuuntelun yhteydessä. Tässä toteutuksessa päädyttiin käyttämään reaaliaikaista konvoluutiota, joka on kuvattu kappaleessa 3.6.3. Konvoluutio on monimutkainen ja laskennallisesti raskas prosessi, jossa järjestelmän tulosaali (puhe)

ja impulssivaste muodostavat uuden lähtösignaalin (kaiutettu puhe). Nykyaikaisissa tietoteknisissä ratkaisuissa prosessorit ovat riittävän tehokkaita ja ohjelmien laskenta optimoitua, joten reaaliaikainen konvoluutio on mahdollista, ainakin kun impulssivasteet ovat lyhyitä. [Pulkki & Karjalainen 2015: 47–48.]

### 3.5 Puhemateriaali

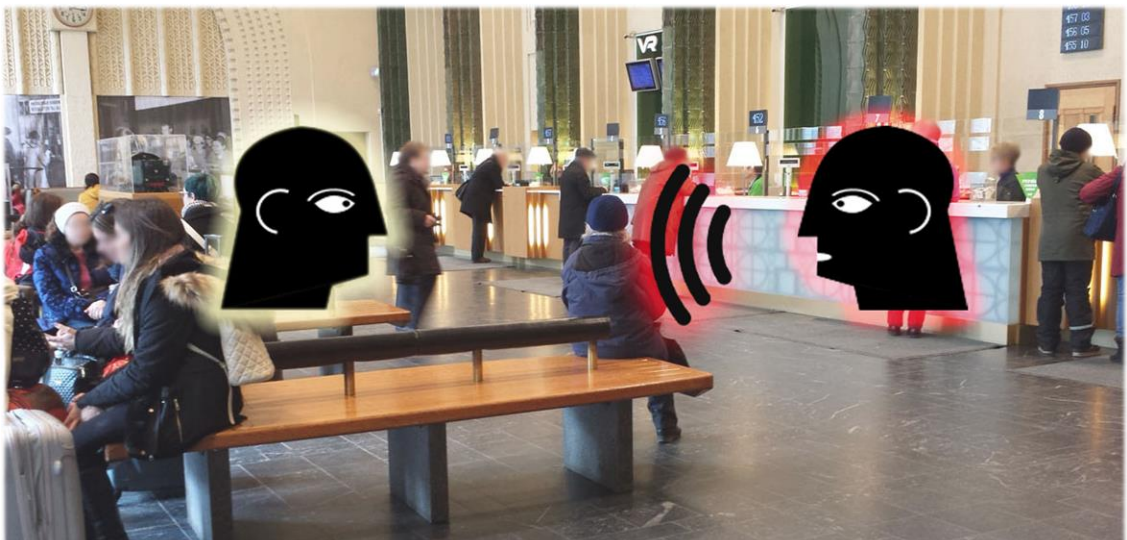
Puhemateriaalina toteutuksessa käytetään niin sanottuja Jauhiaisen sanalistoja, joista kukin koostuu 25 sanasta, jotka toistetaan peräkkäin noin viiden sekunnin välein; viiden sekunnin tauko on testattavan henkilön vastauksen antoon varattu aika. Jauhiaisen sanalistat ovat yleisesti käytetty puhemateriaali puheaudiometriassa, joten ne toimivat hyvänä lähtökohtana uudenlaisten hälypuheratkaisujen kokeiluissa. Aineisto on ollut käytössä vuodesta 1974 asti, jolloin aineisto koostui kuudesta 25 sanan listasta, jotka olivat yhtä vaikeita luvussa 2.4.1 esitettyjen kielellisten muuttujien suhteen [Jauhainen 2008: 119].

Nykyinen käytössä oleva aineisto on äänitetty uudestaan digitaaliseen muotoon alkupepäristen listojen pohjalta ja validoitu. Äänityksen kalibraatioääni on voimakkuudeltaan 25 dB SPL, joka vastaa 0 dB kuulokynnystä normaalikuuloisella henkilöllä. Kalibraatioääni on jatkuva taajuusmoduloinut sinimuotoinen signaali, joka toistetaan käytettävän äänentoistolaitteiston läpi ja mitataan äänenvoimakkuus *äänepainetasomittarilla*, josta yksi esimerkki on esitetty kuvassa 17. Kalibraatioääni vastaa puhemateriaalin nollassa (vastauksenantokohdat) poikkeavien osien keskimääräistä tehollista tasoa, jonka avulla puhemateriaalin keskimääräinen voimakkuus saadaan tietoon. Kalibraatioäänen mittauksen avulla käytettävän testilaitteiston vahvistus asetetaan tasoon 0 dB, jolloin toistettu puhemateriaali on tasolla 65 dB SPL metrin päässä kaiuttimesta. Tämä vastaa puheäänen voimakkuutta kaiuttomassa tilassa, kun puhuja on noin metrin päässä kuulijasta. [Jauhainen 2008: 119; Sivonen 2017a.]



Kuva 17. Kuva kalibrointiin käytettävästä Norsonic Nor140 -äänenpainemittarista.

Puhemateriaalin ja impulssivasteiden konvoluution ansiosta tallennettu tilääni ja tilan havaitut ääniominaisuudet voidaan toistaa hallituissa olosuhteissa. Konvoluutio on mahdollista suorittaa tarvittaessa aina uudelleen, joten myös esimerkiksi luvussa 2.4.1 esitellyä Oldenburgin matriisimuotoista lausemateriaalia voidaan käyttää tallennettujen tilojen ja impulssivasteiden kanssa. Lopputuloksena on realistisen kuuloinen tila joko taustahälyllä tai hiljaisuudessa, jossa puhe havaitaan sijaitsevan mallinnetussa tilassa kuvan 18 osoittamalla tavalla.



Kuva 18. Havainnekuva tilanteesta impulssivasteen SIRR-käsittelyn ja konvoluution jälkeen.

## 4 Kuunteluympäristön hallintaohjelma

### 4.1 Hallintaohjelman ja käyttöliittymän suunnittelusta

Toteutuksessa pyritään täyttämään tilaajan toiminnolliset vaatimukset, jotka on kuvattu vaatimusmäärittelyssä luvussa 3.1. Hallintaohjelman ja käyttöliittymän suunnittelussa kiinnitetään erityistä huomiota helppokäyttöisyyteen ja virhetilanteiden minimoimiseen. Tilaajan intressinä on myös ohjelman laajennettavuus uusiin ääniympäristöihin ja toiminnollisuuksiin. Ohjelman ymmärtämiseksi tulee ohjeistuksen olla riittävää sekä käyttäjälle että kehittäjälle; ohjelman kommentointiin ja vihjeisiin tulee kiinnittää huomiota. Luvussa 4.3 esitetyt tekniset valinnat perustellaan suhteessa ohjelman toiminnollisuuteen sekä käytön helppouteen.

### 4.2 Toteutukseen käytettävät ohjelmistot

Kuunteluympäristön hallintaan suunnattu käyttöliittymä toteutetaan visuaalista ohjelmointia hyödyntävällä Max 7 -ohjelmistolla. Max on modulaarinen ohjelmisto, jonka kehitys ja suosio perustuu pitkälti kolmansien osapuolien mahdollisuuteen kehittää ohjelmistoon uusia toiminnollisuuksia, joita kutsutaan *ulkoisiksi objekteiksi* (external objects) [Max (software)]. Ohjelmointi Max-ohjelmointiympäristössä tehdään graafista käyttöliittymää hyödyntämällä, jossa käyttäjä voi muodostaa ohjelman erilaisia objekteja, viestejä, painikkeita, kytkimiä, mittareita ja ulkoisia objekteja toisiinsa kytkemällä. Ohjelman eri toiminnoilla ja komennoilla voidaan manipuloida ja luoda erilaisia syötteitä kuten numeroarvoja, ääntä, kuvaa tai videota. Valmiista Max-kytkentätiedostosta (patch) voidaan lopuksi muodostaa itsenäinen sovelluksen ajotiedosto (executable), jonka ajamiseksi käyttäjällä ei tarvitse olla Max-ohjelmistoa tai sen lisenssiä asennettuina.

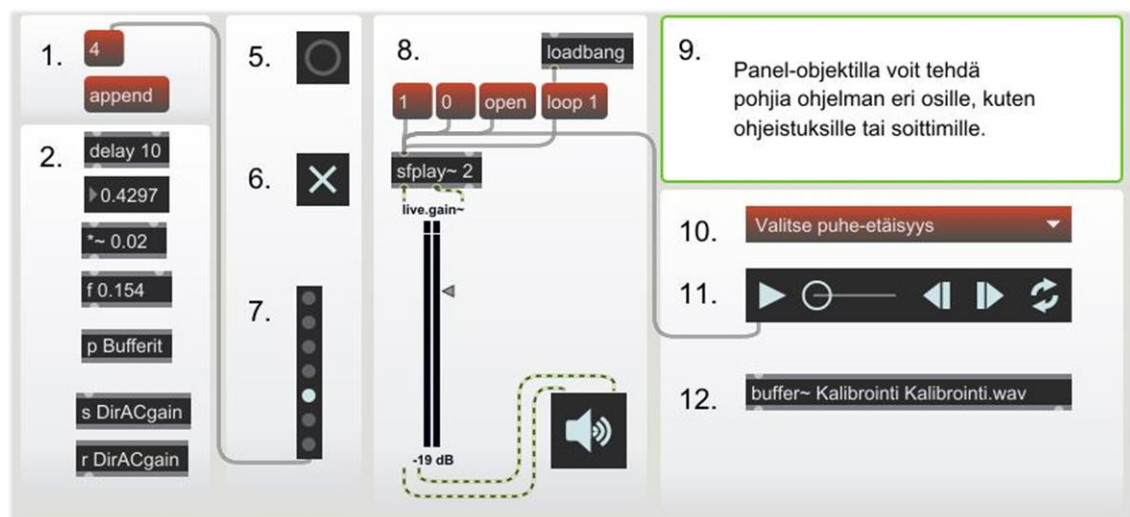
Max-ohjelmiston yhteydessä työssä käytetään äänen käsittelyyn tarkoitettua *MSP*-laajennusta (Max Signal Processing), joka on kokoelma ohjelmistoon myöhemmin liitettyjä työkaluja äänen reaaliaikaista käsittelyä varten. Näiden kahden osan yhdistelmään viitataan usein yhtenä kokonaisuutena Max/MSP. Puhemateriaalin ja impulssivasteiden reaaliaikainen konvoluutio toteutetaan Huddersfieldin yliopistossa *MSP*-laajennukseen kehitetyllä *HISSTools Impulse Response Toolbox* (lyh. HIRT) -laajennuksella [Harker & Tremblay 2012]. HIRT:iä varten *SIRR*-menetelmällä prosessoidut kahdeksankanavaiset impulssivasteet eritellään uusiksi kanavakohtaisiksi impulssivasteiksi Matlab-ohjelmalla.



#### 4.2.1 Max/MSP-ohjelmointiympäristön lukuohje

Max-ohjelman luomista ja esittämistä varten ohjelmassa on kaksi tilaa, kytkentä- sekä esitystila (Patching Mode ja Presentation Mode) sekä molemmissa lukittu ja avoin tila. Lukittu tila estää ohjelman muokkaamisen ja on oletusasetus valmiissa ohjelmassa. Vaikka molemmissa tiloissa luotua ohjelmaa voidaan käyttää, esitystila mahdollistaa ohjelman komponenttien itsenäisen ja vapaan asettelun sekä piilottaa kytkentäjohtot, joilla ohjelman komponentit liitetään toisiinsa. Esitystilaan voidaan valita, mitä komponentteja jätetään käyttäjän nähtäville.

Kuvassa 19 esitellään yleisimmät Max-ohjelman muodostavista komponenteista. Ohjelma voidaan asettaa aukeamaan oletusarvoisesti esitystilassa, jolloin ohjelmasta voidaan tehdä selkeä ja vain valitut toiminnollisuudet jättää käyttäjän hyödynnettäviksi. Max-ohjelmisto aukeaa aina käynnistyksen yhteydessä Max-konsoliin, jossa käyttäjän tekemät tulosteet ja ohjelman virheilmoitukset näytetään. Konsoli tarjoaa tärkeää palautetta varsinkin, kun jokin ohjelmassa ei toimi oikein tai jotakin puuttuu. Konsolin lisäksi tärkeä apuväline on *va/voja*-ikkuna (Inspector Window), joka tarjoaa tietoa ja asetuksia valitulle komponentille. Jokaiselle komponentille on myös saatavilla apu- sekä referenssisivu, jotka antavat tietoa komponentin toiminnasta, sen hyväksymistä syötteistä sekä malleja komponentin käyttöön. Lisäksi ohjelman aktiivinen käyttäjäkunta ja keskustelufoorumi tarjoavat lisätietoa erikoisimpiin ratkaisuihin ja ongelmatilanteisiin liittyen.

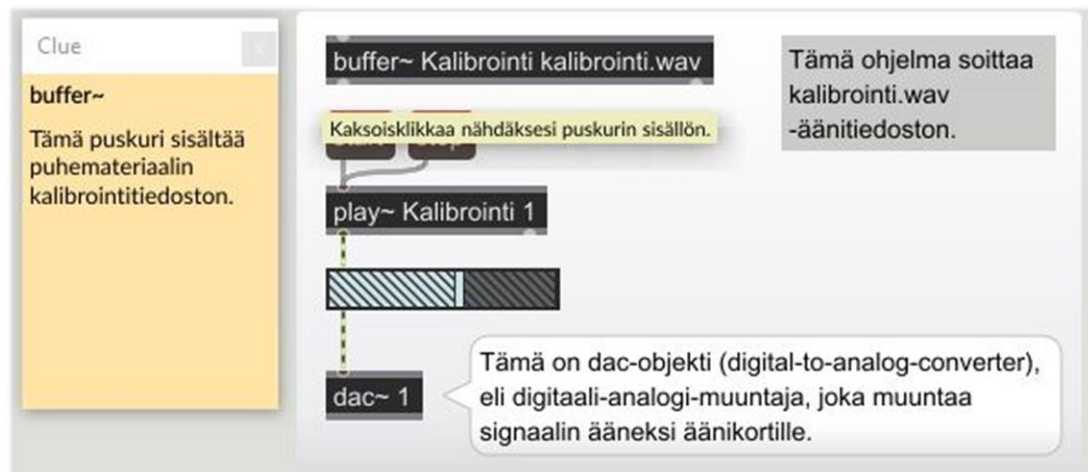


Kuva 19. Kuva yleisimmistä Max-ohjelman komponenteista lukitussa kytkentätilassa.



Kuvan 19 vasemmassa yläkulmassa näytetään kaksi *viesti*-painiketta (message), joilla voidaan antaa muille komponenteille syötteitä ja komentoja numeroilla ja kirjaimilla. Viesti-painike toimii apukomponenttina muille komponenteille, kuten *objekteille* (object), joita esitellään kuvan 19 kohdassa 2. Objektit jakavat ulkoasun, mutta niiden tarjoamien toimintojen ja hyväksyttävien syötteiden kirjo on laaja. Kuvan 19 kohdan 2 objekteilla voidaan luoda 10 millisekunnin viive, esittää liukuluku (floating point number), kertoa signaalia 0,02:lla, tallettaa liukuluku 0,154, luoda aliohjelma nimeltä "Bufferit" sekä lähettää ja vastaanottaa "DirACgain"-niminen muuttuja ilman johtoja. Kohdat 5, 6 ja 7 esittävät kertatoimista painiketta (button), jatkuvatoimista kytkintä (toggle) sekä painikeryhmää (radio group). Kohdassa 8 on esitetty tyypillinen äänisoitin, jota ohjataan viestikäskyillä ja jonka avulla äänenvoimakkuutta voidaan säätää ja esittää logaritmisella desibeli-asteikolla. Kohdassa 8 voidaan nähdä myös MSP:n tapa ilmaista objektilta toiselle kulkevan datan tyyppi. Kokonaislukuina (integer) lähetetyt viestit kulkevat harmaata johtoa pitkin ja liukulukuina käsitellyt MSP-äänisignaalit kulkevat raidoitettua johtoa pitkin. Max/MSP käyttää aina vain objektiin sopivaa johtotyyppiä.

Kuvan 19 kohdat 10 ja 11 esittävät kaksi vaihtoehtoista, käyttäjäystävällistä tapaa tiedon esittämiseen ja toistamiseen. Pudotusvalikko tarjoaa helpon tavan äänitiedostojen ohjelmaan tuomiseen ja esittämiseen, kun soittopalkki tarjoaa yleisimmät äänentoistotoiminnot yleisesti käytettyjä symboleja hyödyntäen. Kohta 12 havainnollistaa kohdan 10 ohella toista tapaa tuoda tiedostoja ohjelman käyttöön. Buffer~-objekti mahdollistaa ohjelman tarvitsemien tietojen tallettamisen tietokoneen väliaikaiseen RAM-muistiin (Random Access Memory), joka nopeuttaa ohjelman käyttöä. Puskuriin tallettaminen ja sieltä toistaminen ei kuitenkaan sovellu pitkille äänitiedostoille, sillä ohjelman RAM-muistin käyttö kasvaa nopeasti kohtuuttoman suureksi. Kohdan 8 soittimeen avatut tiedostot sfplay~-objekti lukee suoraan tietokoneen kovalevyiltä, joka on toiston ja prosessoinnin kannalta hitaampi vaihtoehto vaativissa ohjelmissa. Aalto-merkki (~) objektin perässä ilmentää ääniaaltojen käsittelyyn tarkoitettuja objekteja, jotka kuuluvat MSP-laajennukseen.



Kuva 20. Kuva yksinkertaisesta äänisoittimesta lukitussa kyt kentät ilassa kommentteineen

Viestien ja objektien lisäksi ohjelmaa voidaan kommentoida kommenttikentillä ja puhekuplilla hyvän ohjelmoinnin käytäntöjen mukaisesti. Valvontaikkunassa objekteille voidaan asettaa sekä *vihje* (clue) että *annotaatio*, jotka antavat lisätietoa objektin toiminnasta. Vihjeet näytetään erillisessä vihjeikkunassa, kun annotaatio näytetään hiiren alla olevaan objektiin. Lisäksi useimpien komponenttien kokoa, väriä ja fonttia voidaan vaihtaa ja luoda uusia tyyplejä määrittämään kaikkia vastaavia komponentteja.

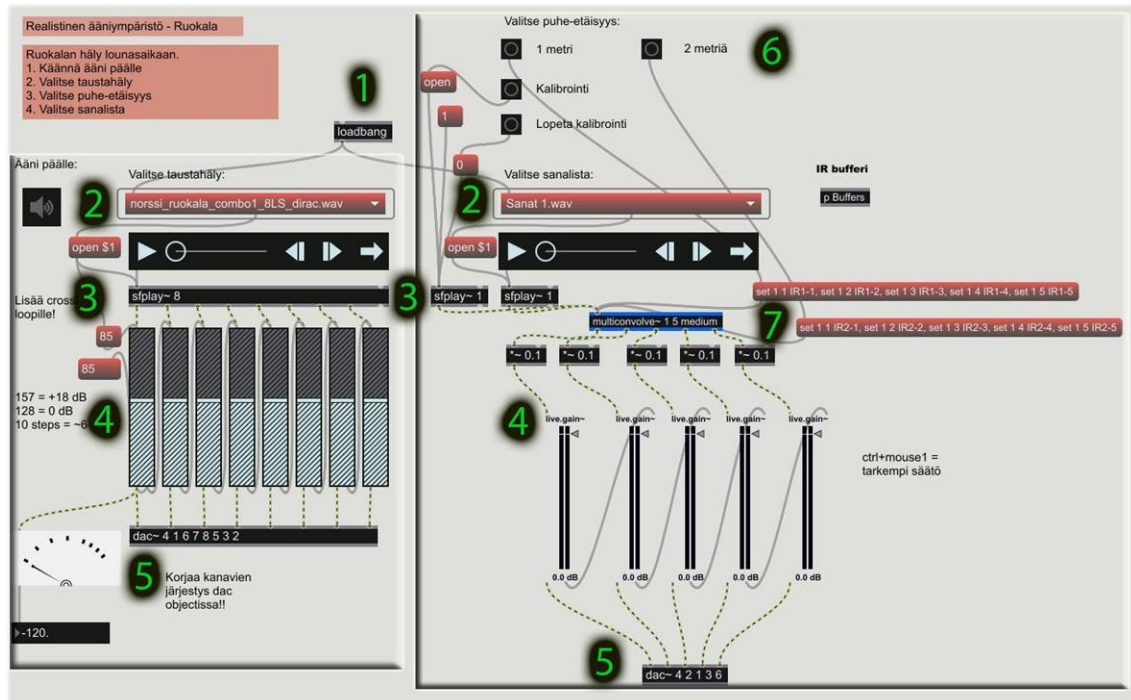
Tässä toteutuksessa ohjelman ohjeistuksessa hyödynnetään yksinomaan kommenttikenttiä, sillä esitystilaan lisätyt kommentit ovat aina käyttäjän nähtävillä, kun annotaatiot ja vihjeikkuna voivat jäädä käyttäjältä huomaamatta. Käyttöliittymä suunnitellaan mahdollisimman yksinkertaiseksi ja intuitiiviseksi, jolloin annotaatiot voivat olla turhia ja lisätä ylimääräistä tietoa. Malliohjelmaan jätetään enemmän kommentteja HYKS Kuulokeskuksen teknisen asiantuntijan avuksi.

### 4.3 Ääniympäristön hallintaohjelman ominaisuudet

#### 4.3.1 Ohjelman 1. version kyt kentät ila ja toiminnallisuudet

Tässä luvussa dokumentoidaan kaikki ohjelman 1. version kyt kentät ilassa näytettävät komponentit ja niiden toiminnot sekä perustellaan suunnitteluvalintoja, kun luku 4.3.3 käsittelee valmista käyttöliittymää ohjelman esitystilassa. Suunnittelun lähtökohtana on rakentaa ohjelman toiminnolliset raamit kahden erillään kehitettävän äänisoittimen ym-

pärille, joista toinen ohjaa taustahälymateriaalia ja toinen puhemateriaalia. Loppukäyttäjän näkökulmasta äänisoitinten ohjaamat päällekkäiset erikseen ohjattavat äänivirrat muodostavat yhden yhtenäisen äänivirran. Kolmas erillinen ohjelman osa on puhemateriaalin kalibrointimoduuli, joka näytetään aina kytkentätilassa.



Kuva 21. Kuvakaappaus ohjelman ensimmäisestä versiosta. Numerointi kasvaa signaalin kulku-suuntaa vastaavassa järjestyksessä.

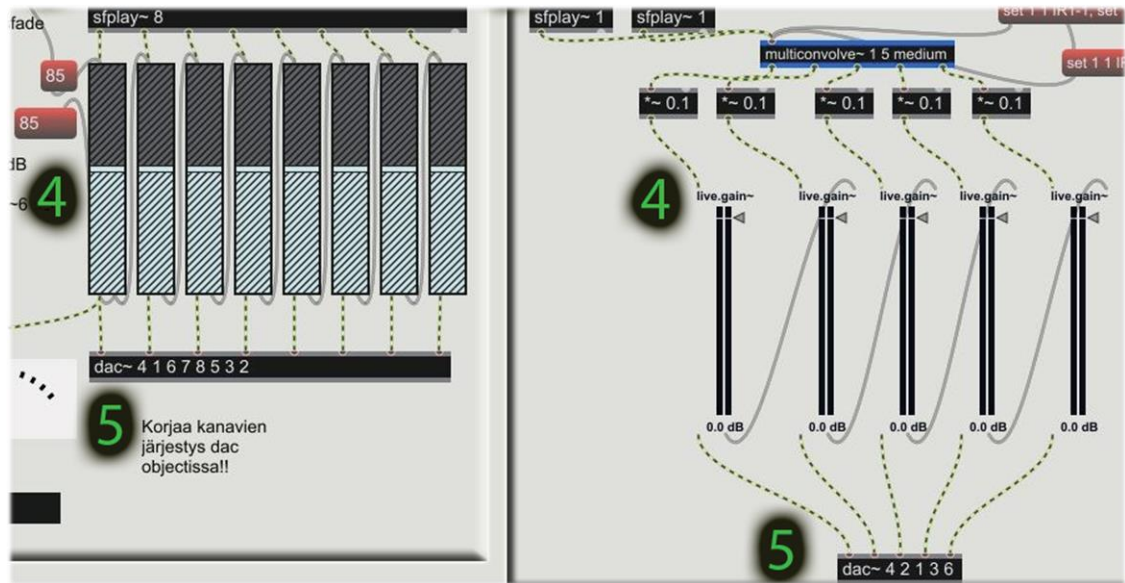
Ensimmäisessä ohjelmaversiossa on tarkoituksena kokeilla sekä äänitiedostojen että suunnitteluvaihtojen toimivuutta ja esitellä erilaisia vaihtoehtoja jatkokehittelyn suunaksi. Kuvassa 21 nähdään kaksi erikokoista vierekkäistä palstaa, joissa äänisoittimet sijaitsevat. Ohjelman ajaminen alkaa kuvan 21 kohdan 1 painike-objektia vastaavalla "loadbang"-objektilla, joka lähettää ohjelman käynnistyessä yksittäisen impulssin muille siihen liitetyille objekteille. Objektia voidaan myös kaksoisklikata ohjelman uudelleen- alustamiseksi. Tässä ohjelmassa loadbangin impulssi kulkee "umenu"-pudotusvalikko- objektille kohdassa 2, jolloin valikossa näytetty alkio lähetetään eteenpäin. Umenu-objektin alkio muodostetaan tässä tapauksessa automaattisesti vetämällä ja tiputtamalla hälypuhemateriaalikansio ja puhemateriaalikansio niitä vastaaviin valikkoihin ohjelman käytön ja laajentamisen helpottamiseksi. Maxissa tähän toimintoon viitataan "(drag)"-viestinä, jonka toiminta on määritelty jokaiselle sitä hyödyntävälle objektille erikseen. Valikosta impulssi etenee "open"-viestille joka avaa äänitiedoston "sfplay~"-objektin käytet-

täväksi. Open-viestin argumentti "\$1" on väliaikainen muuttuja, jolla viitataan valikon ensimmäiseen alkioon. Ilman argumenttia käyttäjän täytyisi osoittaa ohjelmalle valintaikkunan kautta missä valittu äänitiedosto sijaitsee kovalevyllä. Open-viestillä voidaan viitata myös useampaan alkioon kerralla.



Kuva 22. Suurennettu kuva sfplay--objektin kytkennöistä.

Kuvan 22 kohdan 3 sfplay--objekti lukee äänitiedostot tietokoneen kovalevyllä, kun vaihtoehtoiset "play~"- ja "groove~"-objektit lukevat tiedostot tietokoneen välimuistista. Sfplay--objektin etuna ovat intuitiivisemmat ohjaustyökalut kuten objektin päällä nähtävä "playbar"-objekti, johon tavallisimmat toistopainikkeet valmiiksi sisältyvät. Sfplay--objekti hyväksyy kuitenkin myös yksinkertaisia viestikomentoja, kuten "1" ja "0" toiston käynnistämiseksi ja pysäyttämiseksi. Lisäksi äänitiedostot voidaan yksinkertaisesti tiputtaa kuvan 22 kohdan 2 umenu-objektiin, kun umenu-objektin hyödyntäminen play-- ja groove--soittimilla johtaa huomattavasti monimutkaisempaan toteutukseen. Kohdassa 3 voidaan nähdä myös loadbang-objektista lähteneen käskytysimpulssin muuntuminen äänisignaaliiksi. Toistettavat äänitiedostot sisältävät kahdeksan kanavaa, joten sfplay--objektille täytyy antaa argumenttina numero "8" ulostulojen määrän määrittämiseksi. Tästä eteenpäin jokaista äänikanavaa käsitellään yksittäisen äänivirtana. Oikeanpuoleisessa soittimessa kohdassa 3 ladattava äänimateriaali käsitellään alusta asti yhtenä äänivirtana, sillä soitettavat äänitiedostot sisältävät yksikanavaista ääntä eli sama signaali on tiedoston molemmissa kanavissa.

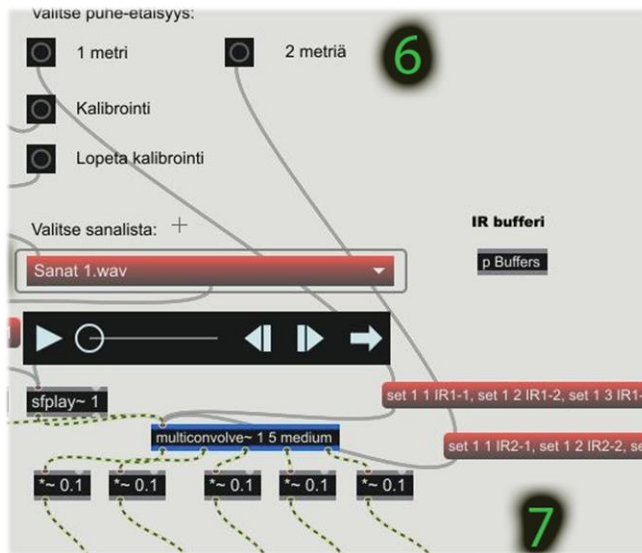


Kuva 23. Kuvakaappaus signaalin voimakkuutta ohjaavista objekteista ja kytkennöistä.

Äänivirta kulkee sfplay~-objektilta kuvan 23 kohdassa 4 esitetyille "gain~-objekteille, joilla kunkin sisään tulevan signaalin voimakkuus voidaan skaalata yksitellen logaritmisesti. Tässä ohjelmassa edellinen gain~-objekti kytkeytyy aina seuraavaan, jotta vahvistuksen taso olisi sama jokaisessa kanavassa. Myös kanavakohtainen vahvistus on mahdollista esimerkiksi kaiuttimen etäisyyden kompensoimiseksi. Tätä varten yksittäiseen gain~-objektiin voidaan liittää sisään tulevan arvon kerroin ja käsitellä tätä erillään seuraavista objekteista. Ylempi viesti "85" saa impulssin loadbang-objektilta joten vahvistuksen taso asetetaan ohjelman alussa arvoon 85 asteikolla 0-157, jossa 157 vastaa +18 dB vahvistusta alkuperäiseen signaaliin nähden ja 10 askelta vastaa noin 6 dB:n muutosta. Alempi viesti näyttää ensimmäisen gain~-objektin lähettämän arvon. Äänenvoimakkuuden logaritminen "live.gain~-säädin on esitetty oikeanpuoleisen soittimen yhteydessä kohdassa 4. Live.gain~-objekti skaalaa sisääntulevan signaalin suoraan desibeleissä ja antaa visuaalisen palautteen senhetkisestä äänenvoimakkuudesta. Myös tässä vaihtoehdossa edellinen live.gain~-objekti ohjaa seuraavan vahvistusta.

Lopulta kanavakohtainen skaalattu signaali ohjataan kuvan 23 kohdassa 5 esitettyyn "dac~-objektiin joka muuntaa digitaalisen signaalin analogiseen muotoon. Kyseessä on siis *digital-to-analog-conversion* eli digitaali-analogi-muunnos. Argumenttina objektille annetaan uloslähtevät kanavat. Tässä versiossa vasemmanpuoleisen dac~-objektin kanavajärjestys seuraa kuunteluhuoneen äänikortin kytkentäjärjestystä niin, että etusuunnassa oleva signaali ohjataan kaiuttimelle 4 ja seuraavat signaalit muihin kaiuttimiin ede-

ten vastapäivään. Järjestys vastaa DirAC- ja SIRR-prosessoinnissa käytettyjä kaiuttimien sijaintitietoja. Oikeanpuoleisen dac~-objektin kanavajärjestys vastaa 1. kuuntelukokeessa käytettävien viisikanavaisten SIRR-impulssivasteiden kanavajärjestystä; siksi myös uloslähteviä kanavia objektissa on vain viisi.



Kuva 24. Suurennettu kuva kohdista 6 ja 7.

Kuvan 24 kohdissa 6 ja 7 nähdään puheen kaiuttamiseen ja kalibrointiin liittyvät komponentit. Kohdassa 6 puhe-etäisyys voidaan valita kahden eri vaihtoehdon väliltä. Painikkeena käytetään "bang"-objektia, joka lähettää yksittäisen impulssin sitä painettaessa. Impulssi etenee painikkeesta kohdassa 7 nähtäville "set"-viesteille, joilla käytettävä SIRR-impulssivaste asetetaan. Set-viestin argumentteina ovat sisääntulokanava, ulostulokanava sekä impulssivasteen nimi, joka ulostulokanavaan halutaan ladata. Tätä tietoa hyödyntää puhemateriaalin ja SIRR-impulssivasteen konvolointiin käytettävä "multiconvolve"-objekti, joka lähettää kanavakohtaisesti kaiutetun signaalin eteenpäin. Konvoloitu signaali skaalataan tämän jälkeen kertomalla alkuperäinen signaali 0,1:llä "\*~"-objektissa. Lisäämällä \*~-objektin toiseen sisääntuloon kerroin voidaan signaali asettaa sopivalle tasolle ennen sen skaalaamista edelleen live.gain~-objekteilla.

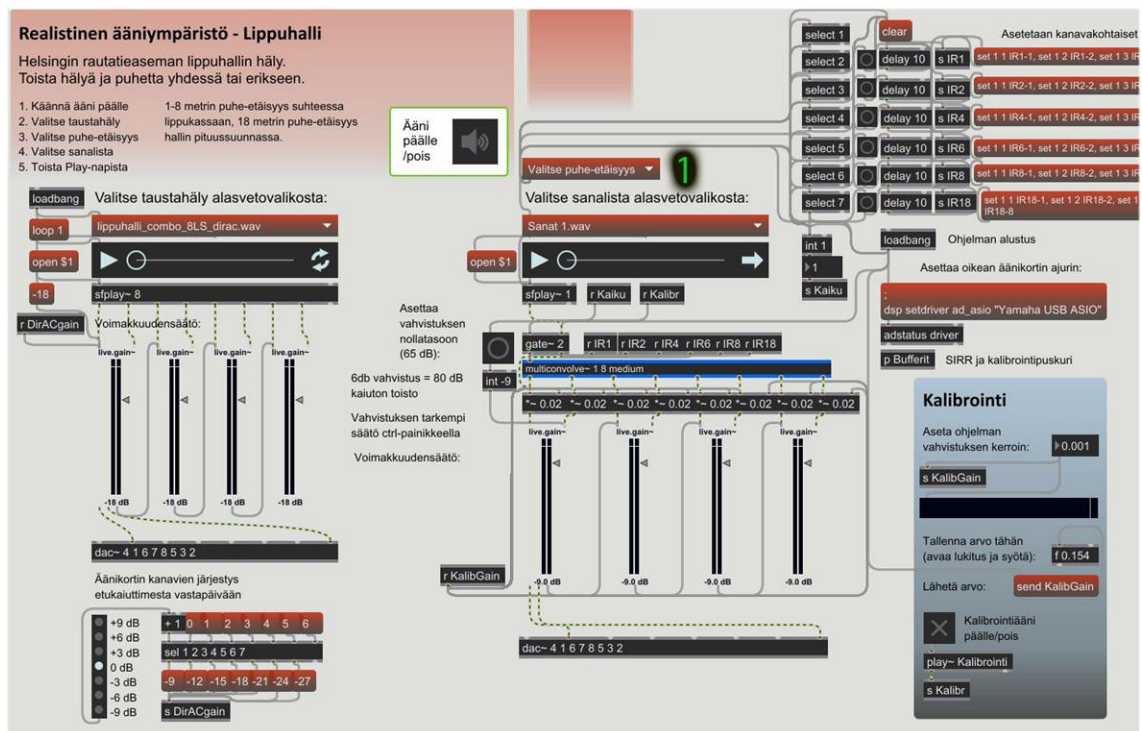
Vaikka ohjelma sisältää vaaditut perustoiminnot ja monikanavaisen äänen toisto toimii hyvin reaaliajassa, on siinä tiettyjä rajoitteita. Tässä versiossa kalibrointiä ei voida suorittaa kaiuttomana, sillä signaali ohjataan erillisen sfplay~-objektin kautta suoraan multiconvolve-objektille, jolloin kaiunta sisältyy aina kalibraatiosignaaliin. Multiconvolve-objektin käyttö ilman impulssivastetta ei ole mahdollista. Kalibroinnista saatavaa tietoa pu-



hemateriaalin vahvistustason asettamisesta ei myöskään voida hyödyntää, sillä kalibroitimoduulissa on ainoastaan toisto- ja seis-painikkeet. Ohjelmaa on käytettävä järjestyksessä ylhäältä alas, jotta toisto toimisi oikein, eli käytössä voi ilmetä ongelmia jopa käyttäjän tietämättä. Ongelmana ilmeni myös SIRR-impulssivasteiden päällekkäisyys, jolloin puhe kaiutettiin kahdella eri impulssivasteella yhtäaikaaisesti ja tuloksena oli kolmas, ei-haluttu kaiunta. Lisäksi käyttöliittymä vaikuttaa hajanaiselta ja on ohjeistuksesta riippuvainen.

#### 4.3.2 Ohjelman 2. version kytkentätila ja tehdyt muutokset

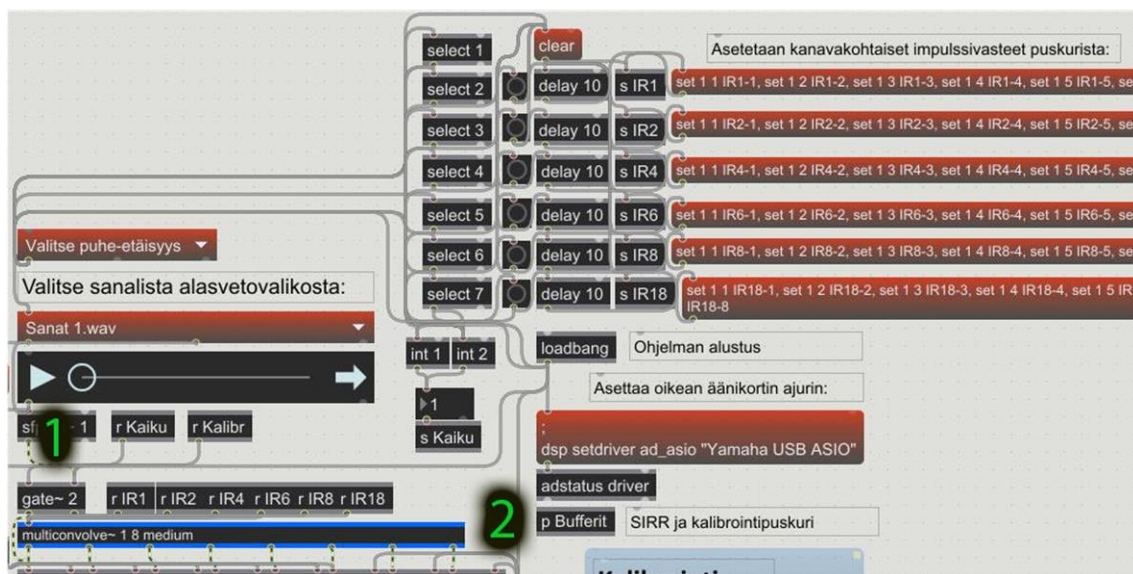
Ensimmäisen ohjelmaversioiden kehityksen ohella suoritetussa käyttötötestauksessa tehtyjä havaintoja ja suunnittelun ohjauksesta saatua palautetta hyödynnetään ohjelman toisen version kehittämisessä valmista kuunteluympäristöä varten. Tarkoituksena on muodostaa vaatimusmäärittelyä paremmin vastaava, toimintavarma lopputuote. Tätä varten tutkitaan ja kokeillaan eri vaihtoehtoja vaaditun toiminnollisuuden saavuttamiseksi.



Kuva 25. Kuvakaappaus ohjelman toisesta versiosta jossa toiminnollisuuksia on paranneltu ja lisätty, sekä ulkoasua kehitetty.

Olellainen toiminnollinen muutos 1. versiosta toiseen on lisätty valintalogiikka yksikannavaisen puhemateriaalin sekä kalibroitinsignaalin kaiutettoman ja kaiutetun toiston välillä.

Tähän liittyy käyttäjälle suunnatun valinnan siirtäminen painikkeiden sijaan umenu-objektiin, joka nähdään kuvan 25 kohdassa 1. Toiminnollisuuden parantamisen lisäksi suunnitteluvalinnalla yhtenäistetään käyttöliittymää, kun kaikki äänimateriaalien valinnat tehdään samanlaisen graafisen objektin avulla. Umenu-objektin alkioiksi määriteltiin tiedostojen sijaan tekstirivejä, joista jokaiselle annetaan oma järjestysnumero välillä 0-n, jossa n on valintavaihtoehtojen määrä. Alkio 0 vastaa valikon otsikkoa ”Valitse puhe-ettäisyys”.

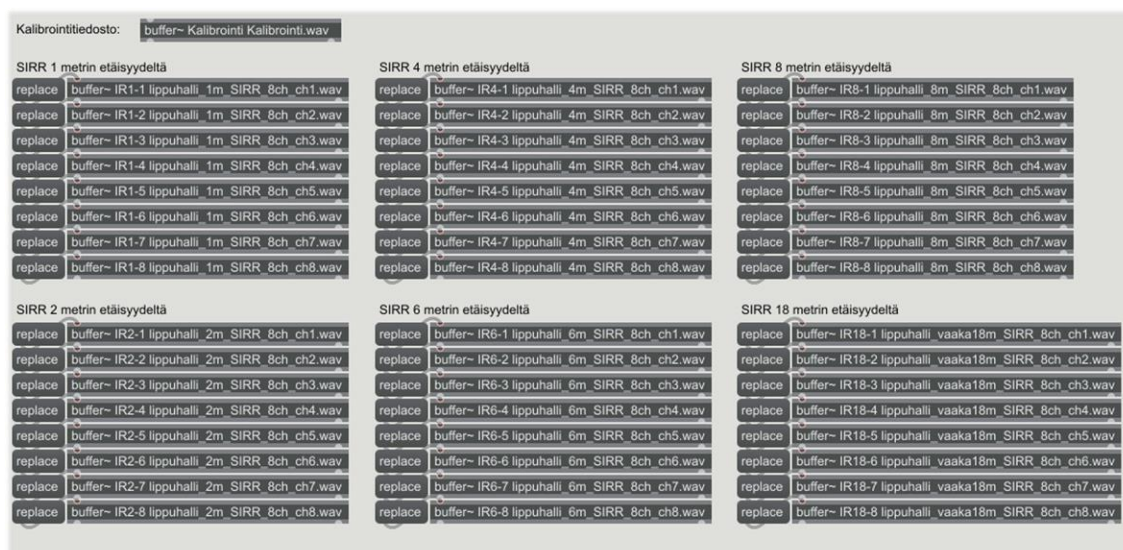


Kuva 26. Suurennettu kuva kaiun valintalogiikasta.

Kun käyttäjä tekee valinnan, sitä vastaava järjestysnumero lähetetään ”select”-objektille, joka lähettää impulssin, mikäli vastaanotettu numero vastaa argumenttina annettua numeroa. ”Select 1”-objektin impulssi lähtee eteenpäin ”int”-objektille, johon tallennettu arvo ”1” lähetetään objektin ”s Kaiku” kautta langattomasti ”gate”-objektille, joka on kuvattu kuvan 26 kohdassa 1. Puhemateriaali ja kalibrointiäni ohjataan gate-objektin oikeaan sisääntuloon, kun objektin vasempaan sisääntuloon tuleva ”Kaiku”-muuttujan numeroarvo määrittää kumpaa gate-objektin kahdesta ulostulosta käytetään: numero 1 vastaa vasenta ja 2 oikeaa ulostuloa. Gate-objektin vasen ulostulo ohjataan suoraan ensimmäisen live.gain~-objektin vahvistuskertoimen sisääntuloon, jolloin konvolointia ei suoriteta, eikä äänimateriaaliin lisätä kaiuntaa, vaan äänimateriaali toistetaan yksikanavaisena etummaiseen kaiuttimeen. ”Kaiku”-muuttuja siis toimii kytkimenä, joka sisältää tiedon, konvoloidaanko äänimateriaalia vai ei.

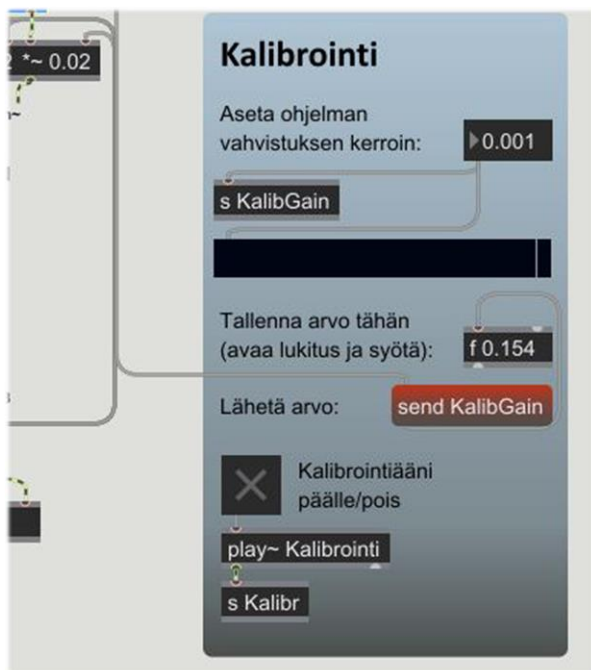


Valintalogiikan muut select-objektit ohjaavat SIRR-impulssivasteiden oikeaa lataamista ja tyhjentämistä, jolla vältetään impulssivasteiden päällekkäinen lataaminen. Puhe-etäisyyden valintavalikosta lähteivistä arvoista 2-7 kukin ohjaa käskyimpulssin ensin "clear"-viestille, joka tyhjentää kaikki multiconvolve-objektiin ladatut impulssivasteet. Sama impulssi kulkee 10 millisekunnin viiveen kautta set-viestille, jossa oikea impulssivaste asetetaan ja lähetetään vastaavalle s-objektille. "IR1", "IR2" jne. muuttujiin tallennetut impulssivasteet vastaanotetaan vastaavassa "r" eli return-objektissa, josta ne lähetetään multiconvolve-objektiin konvolointia varten. Valintalogiikka on mahdollista toteuttaa myös esimerkiksi matriisipohjaisen valitsimen avulla, joka on hyödyllinen, kun valintoja on paljon. Tässä toteutuksessa valintoja on rajattu määrä, jolloin intuitiivisempi ratkaisu on helpompi omaksua.



Kuva 27. Kuvakaappaus aliohjelmasta "Bufferit".

Kanavakohtaiset impulssivastetiedostot sekä kalibrointisignaali ladataan ohjelman aliohjelmassa puskuriin "buffer~" objektin avulla. Kuvan 26 kohdassa 2 nähtävä "p Bufferit"-objekti avaa kuvassa 27 esitetyn aliohjelman, jota voidaan ohjelmoida kuten pääohjelmaakin. Jokainen buffer~-objekti sisältää argumenttina puskurin nimen, johon pääohjelmassa viitataan sekä ladattavan tiedoston täyden nimen. "Replace"-viesti puskurin edessä lataa tiedoston käytettäväksi. Ohjelman passiivisten osien siirtäminen aliohjelmiin selkeyttää pääohjelman esitystä.



Kuva 28. Kuvakaappaus ohjelman kalibrointimoduulista.

Eri ääniympäristöjen ohjelmien kaiutetun puheen äänenvoimakkuuden eroja voidaan tasoittaa ohjelmakohtaisella kalibroinnilla. Kalibrointimoduulissa määritetään puhemateriaalin vahvistuskertoimen kaikille kahdeksalle kanavalle, joka lähetetään "s KalibGain"-objektin avulla jokaiselle \*~-objektille. Kalibrointi-ikkunasta kalibrointiäni voidaan asettaa päälle ja lähettää gate~-objektille, jonka valintalogiikan mukaisesti kalibrointisignaali voidaan toistaa joko kaiuttomana tai kaiuttomana kuvan 25 kohdan 1 umenu-objektissa tehtävän valinnan mukaisesti. Tämä on mielekästä, sillä kaiunta lisää puheen äänenvoimakkuutta, joten pelkästään kaiuttoman puheen kalibrointi ei takaa tasaista äänenvoimakkuutta ääniympäristöstä toiseen siirryttäessä. Tätä varten kalibrointi-ikkunassa on f-objekti, johon vahvistuksen kerroin voidaan tallettaa liukulukuna. Ohjelman alustava loadbang-objekti on kytkettynä kalibrointi-ikkunan "send KalibGain"-viestiin, joka lähettää kertoimen liukulukuarvon puhemateriaalien kanavien vahvistuksen asettamiseksi samaan tasoon joka kerta, kun ohjelma käynnistetään tai ohjelma alustetaan kaksoisklikkaamalla loadbang-objektia.

Ohjelman versio 2 hyödyntää live.gain~-objektien molempia sisään- ja ulostulokanavia, joten ohjelman esitysasu on siistimpi. Samaa desibeliasteikolla toimivaa live.gain~-objektia siirryttiin käyttämään myös taustahälymateriaalin yhteydessä ohjelman yhtenäistämiseksi. Lineaarista arvoa täytyisi aina tulkita ohjeen kautta, sillä lineaarinen arvo ei tarjoa suoraa tietoa äänenvoimakkuudesta. Taustahälyn soittimelle lisättiin vahvistuksen

säätämiseksi pika-asetuksia sisältävä radio button-objekti, joka valitsee live.gain~-objektin vahvistuksen määrän "sel"-objektin argumenttien mukaisesti, ja lähettää sen "s DirACgain"-objektin kautta ensimmäiselle live.gain~-objektille. Ohjelman alustava loadbang-objekti lataa taustahäly- ja puhemateriaalin valmiiksi, valitsee kaiuttoman toiston sekä asettaa äänimateriaalin vahvistuksen. Lisäksi ohjelmalle määritellään haluttu äänikortin ajuri "; dsp setdriver"-viestin avulla. Puhemateriaalia kaiuttimille lähettävä dac~-objekti on laajennettu ja muokattu vastaamaan kuunteluhuoneen kanavakonfiguraatiota.

#### 4.3.3 Käyttöliittymän valmis esitystilä

Ohjelman toisen version esitystilassa huomiota on kiinnitetty käytön yksinkertaisuuteen ja käyttäjälle turhien toimintojen piilottamiseen. Kalibroitimoduuli on jätetty näkyviin, jotta ääniympäristöjen puhemateriaalin vahvistus voidaan asettaa halutulle tasolle käyttöönoton yhteydessä. Tämän jälkeen kalibroitimoduuli voidaan piilottaa esitystilasta valitsemalla kaikki ikkunan sisältämät objektit ei-lukitussa tilassa ja valitsemalla "Remove from Presentation" toisen hiiren painikkeen avaamasta valikosta. Tämän jälkeen kalibroitimoduuli on käytettävissä ainoastaan kytkentätilassa.



Kuva 29. Kuvakaappaus ohjelman 2. versiosta esitystilassa.

Ohjelman auettua esitystilaan käyttäjä voi heti painaa hälyn ja/tai puhemateriaalin päälle ja vaihtaa puhe-etäisyyttä vapaasti kesken toiston. Myös äänimateriaalia voi vaihtaa kesken toiston, mutta tällöin toisto on aloitettava uudestaan play-painikkeesta. Taustahäly on valmiiksi asetettu jatkuvaan toistoon (loop) ja asetukset on mahdollinen myös puhemateriaalille. Voimakkuudensäätö voidaan tehdä vierittämällä live.gain--objektin nuolta hiiren painikkeella tai yhdessä ctrl-painikkeen kanssa, jolloin säätö vastaa hitaammin hiiren liikkeeseen. Kaikissa toistotilanteissa signaaleja äänikortille lähettävä dac--objektien ulostulot saadaan välittömästi kiinni painamalla kaiuttimen kuvaketta kohdassa "Ääni päälle/pois".

#### 4.3.4 Malliohjelma ja valmiin ohjelman kääntäminen

Hallintaohjelman kääntämiseksi itsenäiseksi sovellukseksi tulee ohjelman ensiasetus tehdä ensin ääniympäristön hallintaan käytetyllä tietokoneella. Tällöin äänimateriaalien hakemistopolut vastaavat tietokoneen hakemistorakennetta ja ohjelma kääntyy joko 32- tai 64-bittiseksi käyttöjärjestelmään sopivan Max-ohjelmiston bittisyyden mukaisesti. Ohjeet itsenäisen ohjelman kääntämiseksi on esitetty liitteessä 1.

Viiden valmiin ääniympäristön hallintaohjelman lisäksi ohjelmasta tehtiin HYKS Kuulokeskukselle valmis pohja johon uusia ääniympäristöjä voidaan tuoda. Pohjan kytkentä- ja esitystila ovat samat kuin valmiissa hallintaohjelmissa lukuun ottamatta lisättyä kommentointia uuden ääniympäristön luomisen avuksi sekä pää- että aliohjelmassa. Nämä kommentit on muodostettu myös ohjeeksi, joka on nähtävissä työn liitteessä 2.

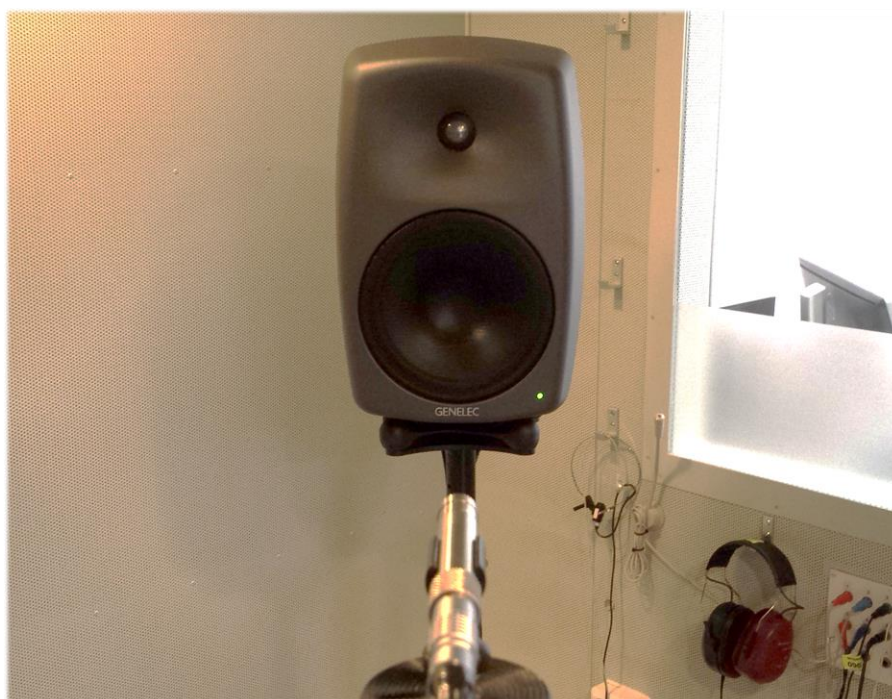
## 5 Yhteenveto

### 5.1 Koesoittotilaisuudet

Kuunteluhuoneessa järjestettiin kaksi koesoittotilaisuutta, joissa hallintaohjelman toimivuutta ja realistista toistoa testattiin. Ensimmäinen tilaisuus pidettiin 24. maaliskuuta käyttöliittymän prototyypin, DirAC:lla käsiteltyjen kahdeksankanaavaisten ääniympäristöjen sekä viisikanavaisten impulssivasteiden avulla, jotka oli käsitelty vastaamaan HYKS Kuulokeskuksen aiempaa viisikanavaista kuunteluhuonetta. Kaiuttimista soitettiin lippuhallin ja ruokalan taustahälymateriaalia, sekä vastaavia impulssivasteita konvoloiitiin reaaliaikaisesti Jauhaisen sanalistojen kanssa. Äänimateriaalien realistinen toisto onnistui

hyvin, vaikka impulssivasteet oli käsitelty HYKS Kuulokeskuksen edelliseen kuuntelu-huoneen viisikanavaisen kaiutinkonfiguraation mukaisesti. Tilaisuuden perusteella käyttöliittymän graafista ilmettä kehitettiin edelleen ja ohjelmaan lisättiin toimintoja ennen seuraavaa koesoittotilaisuutta.

Opinnäytetyön toisessa koesoittotilaisuudessa käytettävissä oli Max/MSP:llä toteutetun käyttöliittymän 2. ohjelmaversio, kahdeksankanavaiset DirAC-käsitellyt ääniympäristöt sekä kahdeksankanavaiset SIRR-käsitellyt impulssivasteet. Tilassa suoritettiin alustava kalibrointi Norsonic Nor140 -äänenpainemittarilla, jonka avulla hallintaohjelman kaiutto-man puhemateriaalin vahvistus asetettiin 65 dB SPL tasoon ääniympäristöjen nopean vertailun tekemiseksi. Hallintaohjelmaan lisättiin viittaukset toteutuksessa käytettyyn Fireface 802 -äänikortin haluttuun ajuriin sekä äänimateriaalien hakemistopolkuihin ohjaavalla tietokoneella. Hallintaohjelmat toimivat odotusten mukaisesti, kun kaikki kahdeksan kanavaa oli kytketty ohjelman digitaali-analogi-muunnoksessa oikeisiin äänikortin kana-viin. Toisen kuuntelukokeen yhteydessä tehdyn ensiasetuksen jälkeen hallintaohjelmat ovat HYKS Kuulokeskuksen käytettävissä.



Kuva 30. Kuva toisen kuuntelukokeen puhemateriaalin kalibraatiotilanteesta.

## 5.2 Pohdintaa

Insinööriyössä HYKS Kuulokeskuksen uuteen kuuntelutilaan kehitettiin realistisen tila-äänien toiston mahdollistava hallintaohjelma. Kuunteluympäristön hallintaohjelma ja sen käyttöliittymä mahdollistavat kuulokojeiden- ja sisäkorvaistutteen hienosäädöt hallituissa olosuhteissa todellista ääniympäristöä vastaavalla tavalla. Käyttöliittymää voidaan hyödyntää myös puheaudiometriassa, johon käytännön hälyisiä ja kaikuisia tilanteita mallintavia menetelmiä on toivottu, sillä äänikentässä tehtävä testaus ottaa paremmin huomioon tila-äänien havainnoinnissa tarvittavia ominaisuuksia ja vastaa paremmin oikean elämän tilanteita [Jauhiainen 2008: 117; Pulkki & Karjalainen 2015: 407].

Jatkossa realistista kliinistä kuunteluympäristöä voidaan hyödyntää muun muassa DirAC-tilaäänimenetelmän psykoakustisten oletusten oikeellisuuden tutkimiseen ja todentamiseen henkilöillä, joilla on kuulovaurio tai kuulolaite. Kalibroidun kuunteluympäristön avulla olisi myös edullista päästä mallintamaan kuulolaitteen vahvistusominaisuuksia oikean vahvistustason löytämiseksi laitteen käyttäjälle. [Jauhiainen 2008: 126; Koski ym. 2013.]

Kuulontutkimuksen lisäksi realistisella kuunteluympäristöllä voidaan tarjota kuulolaitteen valmistajille tutkimusympäristö kuulolaitteen ominaisuuksien ja säätöjen testaamista varten. Tässä työssä esitetty, yksinkertaista ja ymmärrettävää käyttöliittymää hyödyntävä ohjelma voidaan antaa myös kuulolaitteen käyttäjän itsensä käytettäväksi. Langaton tiedonsiirron tekniikka mahdollistaisi äänikentän ja puhemateriaalin äänenvoimakkuuksien ja kaiuntaominaisuuksien sekä äänikentän vaihtamisen toiseen kuunteluympäristön sisältä.

Puheaudiometriaa ajatellen kehityksen seuraava askel olisi kehittää ja validoida audiovisuaalisia kuunteluympäristöjä, sillä puheviestintä tapahtuu usein kuulon sekä näön varassa [Jauhiainen 2008: 117]. Jatkuvasti kehittyvä virtuaalitodellisuustekniikka voisi soveltua tältä osin siis myös puheaudiometriin tutkimuksiin.

## Lähteet

Audiologia. Verkkodokumentti. HUS. <<http://www.hus.fi/sairaanhoito/sairaanhoitopalvelut/audiologia/Sivut/default.aspx>>. Luettu 3.11.2016.

Dietz, A., Buschermöhle, M., Aarnisalo, A., Vanhanen, A., Hyyrynen, T., Aaltonen, O., Löppönen, H., Zokoll, M., Kollmeier, B. 2014. The development and evaluation of the Finnish Matrix Sentence Test for speech intelligibility assessment. *Acta Oto-Laryngologica*. Vol. 134, s 728-737.

Dillon, Harvey. 2012. *Hearing aids*. Turrumurra: Boomerang Press.

Harker, A., Tremblay, P. 2012. The HISSTools Impulse Response Toolbox: Convolution for the Masses. *ICMC 2012: Non-cochlear Sound*, s 148-155. The International Computer Music Association.

Hollerweger, Florian. 2008. *An Introduction to Higher Order Ambisonics*. Verkkodokumentti. <<http://flo.mur.at/writings/HOA-intro.pdf>>. Luettu 27.3.2017

Huonokuuloisuus yleistyy. Verkkodokumentti. Kuuloliitto ry. <<http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/huonokuuloisuus/>>. Luettu 12.1.2017.

Implantoitavat kuuloratkaisut. Tuotekatalogi. Cochlear Nordic AB.

ISO 8253-2. 2009. *Acoustics – Audiometric Test Methods – Part 2: Sound field audiometry with pure-tone and narrow-band test*. International Organization for Standardization, Geneve, Sveitsi.

Jauhiainen, Tapani (toim.). 2008. *Audiologia*. Helsinki: Duodecim.

Kochkin, Sergei; Rogin, Carole M. 2000. *Quantifying the Obvious: The Impact of Hearing Instruments on Quality of Life*. Verkkodokumentti. *The Hearing Review*. <[http://www.betterhearing.org/sites/default/files/hearingpedia/Hearing\\_aids\\_and\\_quality\\_of\\_life\\_NCOA.pdf](http://www.betterhearing.org/sites/default/files/hearingpedia/Hearing_aids_and_quality_of_life_NCOA.pdf)>. Luettu 3.11.2016

Korvan rakenne. 2016. Verkkodokumentti. Kuulonhuoltoliitto. <<http://kuulonhuoltoliitto.fi/uutiset/korvan-rakenne/>>. Luettu 5.1.2017.

Koski, T. 2012. *Audiometry Using Realistic Sound Scenes Reproduced with Parametric Spatial Audio*. Verkkodokumentti. Aalto University School of Electrical Engineering. <<http://lib.tkk.fi/Dipl/2012/urn100613.pdf>>. Luettu 26.3.2017

Koski, T. 2016. *Julkaisematon äänityspäiväkirja*.



Koski, T., Sivonen, V., Pulkki, V. 2013. Measuring Speech Intelligibility in Noisy Environments Reproduced with Parametric Spatial Audio. Audio Engineering Society. Convention Paper 8952.

Kuulovauriot ja niiden synty. Verkkodokumentti. Kuulohansa. <<http://www.kuulohansa.fi/kuulovauriot.htm>>. Luettu 15.2.2017

Mason, Theodore. The Importance of Binaural Hearing. 2011. Verkkodokumentti. International Hearing Society. <[https://www.ihsinfo.org/lhsV2/Convention2011/Seminars\\_PDF/The%20Importance%20of%20Binaural%20Hearing.pdf](https://www.ihsinfo.org/lhsV2/Convention2011/Seminars_PDF/The%20Importance%20of%20Binaural%20Hearing.pdf)>. Luettu 10.1.2017.

Max (software). 2017. Wikipedia-artikkeli. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Max\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Max_(software))>. Luettu 29.3.2017.

McCormack, Leo. 2017. Tutkimusassistentti, akustiikan laboratorio, Aalto-yliopisto, Espoo. Haastattelu 23.2.2017.

Muut kuulokojeet. Verkkosivu. Widex Akustik Oy. <<https://www.widex.fi/fi-fi/hearing-aids/other-hearing-aids>>. Luettu 25.3.2017.

Pihlajamäki, Tapani. 2013. Parametrisoitu tiläänentoisto ja – synteesi virtuaalimaailmoissa. Verkkodokumentti. Aalto-yliopiston sähkötekniikan ja elektroniikan korkeakoulu. <[http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/ap2013\\_submission\\_29.pdf](http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/ap2013_submission_29.pdf)>. Luettu 27.3.2017.

Pulkki, Ville. 1997. Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 45, No. 6.

Pulkki, V., Karjalainen, M. 2015. Communication Acoustics – An Introduction to Speech, Audio and Psychoacoustics. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.

Pulkki, V., Merimaa, J. 2006. Spatial impulse response rendering: a tool for reproducing room acoustics for multi-channel listening. Verkkodokumentti. Helsinki University of Technology. <<http://legacy.spa.aalto.fi/research/cat/sirr/papers/SIRRwhitepaper.pdf>>. Luettu 29.3.2017.

Sivonen, Ville. 2015. Puheaudiometrian perusteita. XXXVI Valtakunnalliset audiologian päivät. Helsinki: Suomen audiologian yhdistys ry.

Sivonen, Ville. 2017a. Fysiologiainsinööri, HYKS Kuulokeskus. Ohjauskeskustelu 20.2.2017.

Sivonen, Ville. 2017b. Fysiologiainsinööri, HYKS Kuulokeskus. Ohjauskeskustelu 7.4.2017.

Soundfield SPS200 Software Controlled Microphone. Verkkodokumentti. Soundfield. <<http://www.soundfield.com/products/sps200>>. Luettu 5.4.2017.



Tietoa kuulosta. Verkkodokumentti. Kuulotekniikka. <<http://kuulotekniikka.com/tietoa-kuulosta/>>. Luettu 10.1.2017.

Waltzman, S., Roland Jr., J. 2014. Cochlear Implants. New York: Thieme Medical Publishers, Inc.

## Hallintaohjelman alkuasetus ja itsenäisen ohjelman muodostamisohje

Kun ohjelman alkuasetuksessa tehdyt toimenpiteet on suoritettu hallintaohjelmaa ajavalla tietokoneella, on ohjelman kääntäminen nopea prosessi. Ohjelmakansion siirtämisen yhteydessä tehtäviä alkuasetuksia ovat:

- Kopioi ohjelmat ja äänitiedostot sisältävä kansio [HYKS Realistiset ääniympäristöt] haluttuun paikkaan.
- Avaa Max-ohjelmisto ja lisää ääniympäristön kansion hakemistopolku (YourDrive:/YourFolder/[HYKS Realistiset ääniympäristöt]/) Max:n hakupolkuun kohdasta Options – File Preferences – Add Path (+-merkki sivun alalaidassa).
- Muuta taustahälyn ja puhemateriaalin pudotusvalikoiden hakemistoviitteet ohjelman kytkentätilassa: Patching Mode – Avaa lukitus – Valitse pudotusvalikko ja avaa tarkistusikkunan (ctrl+i) välilehti All – Valitse hakemistopolku kohtaan ”Prefix or Folder”.
- Tarvittaessa vaihda viite äänikortin ajuriin kytkentätilassa: Patching Mode – Avaa lukitus – dsp setdriver ad\_asio ”Laitteen yksilöllinen nimi”.

Tämän jälkeen voidaan luoda itsenäinen standalone-sovellus seuraavasti:

- Avaa Max-ohjelmisto ja haluttu ääniympäristö ja valitse File – Build Collective / Application.
- Lisää ohjelmaan kalibrointitiedosto sekä impulssivastekansio valitsemalla Include File... sekä Include Folder... - Paina Build ja valitse tallennustyyppi Application (\*.exe).

## Uuden ääniympäristön luominen hallintaohjelman pohjan perusteella

Tässä ohjeessa kuvataan toimenpiteet uuden ääniympäristön hallintaohjelman luomiseksi "8ch SIRR\_Template.maxpat" Max-kytkentätiedoston avulla. Kytkentätiedosto on avattava Max-ohjelmointialustaan, jonka jälkeen tehdään seuraavat toimenpiteet:

1. Avaa ohjelman lukitus ja siirry kytkentätilaan (Patching Mode).
2. Vedä taustahälymateriaalin sisältävä kansio vastaavan pudotusvalikon päälle ja vapauta. Voit tehdä tämän joko käyttöjärjestelmän resurssienhallinnasta tai Max:n tiedostoselaimesta (ctrl+b).
3. Vedä puhemateriaalin sisältävä kansio vastaavan pudotusvalikon päälle ja vapauta.
4. Muokkaa puhe-etäisyyden pudotusvalikon vaihtoehtoja vastaamaan käytettyjen impulssivasteiden määrää avaamalla tarkistusikkunan (ctrl+i) All-välilehti, ja muokkaamalla "Menu Items" kohtaa; poista ylimääräiset rivit valikosta.
5. Lataa kanavakohtaiset impulssivasteet "Bufferit"-aliohjelmaan kaksoisklikkaamalla "p Bufferit"-objektia, jonka jälkeen:
  - 1) Vaihda kanavakohtaisen impulssivastetiedoston uusi nimi kuhunkin puskuriin IRx-y, jossa x on etäisyyden tunnus ja y kanavan tunnus.
  - 2) Poista ylimääräiset puskurit.
  - 3) Ohjelma täytyy sulkea ja avata uudelleen jotta vanha impulssivastetiedosto korvataan replace-objektin toimesta uudella tiedostolla.
6. Käyttämättä jäävät impulssivasteiden valintalogiikan asetusrivit (select, bang, delay, send, set) ja niiden kytkennät voidaan joko jättää ohjelmaan tai poistaa.