



# **Binauralisoidun kuulokemontoroinnin ja henkilökohtaisen HRTF:n käyttö monikanavaisessa elokuvaäänien jälkituotannossa**

Henri Takala

OPINNÄYTETYÖ  
Maaliskuu 2024

Medianomi  
Ääni

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Medianomi  
Ääni

TAKALA, HENRI:

Binauralisoidun kuulokemonitoroinnin ja henkilökohtaisen HRTF:n käyttö monikanavaisessa elokuvaäänen jälkituotannossa

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 0 sivua  
Maaliskuu 2024

---

Kuulokemonitorointia pidetään elokuvaäänen jälkituotannossa hyvin pienessä arvossa, vaikka kuulokkeilla on monia etuja kaiuttimiin verrattuna. Kuulokkeiden ongelmaksi elokuvaäänen kannalta muodostuu kuunnellun signaalin kaksikanavaisuus ja käyttäjän suuntakuulon ohitus, jonka takia äänet lokalisoituvat käyttäjän pään sisälle. Elokuvääntä ei tavanomaisesti tehdä stereoformaatti edellä, ja sen kerronnan apuna hyödynnetään äänen suuntia sekä liikkeitä. Opinnäytetyö tutki binauralisoidun kuulokemonitoroinnin ja HRTF-renderöinnin nykytilannetta osana elokuvaäänen jälkituotantoa. Opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää binauralisoidun kuulokemonitoroinnin etuja, ongelmia ja kehityskohteita verrattessa perinteiseen kaiutinpohjaiseen monitorointiin. Opinnäytteen kenttätutkimuksena tehtiin Saarna-lyhytelokuvaan monikanavainen Dolby Atmos 7.1.2 -äänijälkituotanto käyttäen monitorointiin ainoastaan henkilökohtaista HRTF-renderöintiä ja binauralisoitua kuulokemonitorointia.

Opinnäytetyön yhteistyötaho on Genelec Oy, kotimainen äänentoistoon erikoistunut yritys. Opinnäytteen tutkimusmenetelmiin sisältyi laadullisen tutkimuksen menetelmiä, kuten puolistrukturoitu teemahaastattelu, strukturoimattomia haastatteluita ja kirjallisia lähteitä. Tutkittavan aiheen vuoksi osa opinnäytteen materiaalista pohjautui henkilökohtaiseen kokemukseen ja tulkintaan alalla vallitsevista standardeista.

Opinnäytetyön tulokset osoittivat, että elokuvaäänen jälkituotanto hyötyy binauralisoidun kuulokemonitoroinnin lisäämisestä monitorointiketjuun. Perinteisellä kaiutinpohjaisella monitoroinnilla on elokuvaäänen jälkituotannossa selviä etuja kuulokemonitorointiin verrattuna, mutta suurimman osan elokuvaäänen jälkituotannosta voi tehdä binauralisoidulla kuulokemonitoroinnilla vaarantamatta elokuvan lopullista ääniraitaa. Työ myös osoitti, että osa työvaiheista sai lisähyötyä binauralisoidusta kuulokemonitoroinnista. Opinnäytteen tulosten valossa on oletettavaa, että binauralisoitu kuulokemonitorointi tekisi äänisuunnittelijan työstä joustavampaa, taloudellisempaa ja tehokkaampaa. Elokuvan tuotanto voi myös tehostua taloudellisesti ja elokuvan kokonaisuuden valossa, kun binauralisoitu kuulokemonitorointi on käytössä.

---

Asiasanat: kuulokkeet, binauraali, HRTF, äänen jälkituotanto

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Bachelor of Media  
Sound

TAKALA, HENRI:  
Using Binauralized Headphone Monitoring and Personal HRTF in Multichannel  
Soundtrack Post-production

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 0 pages  
March 2024

---

In the thesis a multichannel audio post-production was created using personal HRTF data with binauralized headphone monitoring during the entire creative workflow. The complete sound design in Dolby Atmos 7.1.2 loudspeaker monitoring format was created for the cinema soundtrack of a short film 'Saarna'. The objective of this study was to define the current state, the benefits and the problems of binauralized headphone monitoring from the stand of both the sound designer and the production.

This study was carried out as a project, and it was issued by Genelec Oy. The main research methods for the thesis included a semi-structured interview of an expert, unstructured interviews of peers and written sources such as research papers and literature.

The results of the thesis suggest that audio post-production would greatly benefit from binauralized headphone monitoring as a part of the audio post-production monitoring chain. Using headphones improves the precision of working but in the case of finalizing the mix, mastering the cinema soundtrack and reliably monitoring low frequencies binauralized headphone monitoring in its current state encountered problems. The findings indicate that traditional loudspeaker-based monitoring would not be dismissed but many of the stages of audio post-production would benefit from binauralized headphone monitoring.

---

Key words: headphones, binaural, HRTF, audio post-production

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	9
	2.1 Opinnäytetyön toteutus.....	9
	2.1.1 Kenttätutkimuksen toteutus.....	10
	2.1.2 Kenttätutkimuksen arvioinnin luotettavuus ja eettisyys.....	11
	2.2 Haastattelut .....	11
	2.3 Aiheeseen liittyvät tutkimukset .....	12
3	OPINNÄYTETYÖN TAUSTA .....	13
	3.1 Suuntakuulo.....	13
	3.1.1 Äänen aika-, vaihe-, ja voimakkuuserot.....	14
	3.1.2 Pään siirtofunktio .....	15
	3.2 Kuulokemonitoroinnin isoin ongelma.....	16
	3.2.1 Suunnan lisääminen kuulokekuunteluun .....	16
	3.2.2 Binauralisoinnin prosessointi .....	17
	3.3 Kuunteluformaatin valinta .....	19
	3.3.1 Kaiutinkonfiguraatiot .....	20
	3.3.2 Työskentelyyn käytettävät kuulokkeet .....	21
	3.3.3 Monitorointiketjujen vertailu .....	23
	3.4 Virtuaalitudion rakentaminen .....	24
	3.4.1 Mallinnettu studio.....	24
	3.4.2 Ohjeet virtuaalitudion rakentamiseen.....	26
	3.4.3 Kuuntelun kalibrointi.....	27
	3.4.4 Konvoluution tuominen binauralisoituun kuunteluun .....	28
4	TUTKIMUSTULOKSET .....	30
	4.1 Kuulokemonitoroinnin tarkkuus ja immersivisyys .....	30
	4.2 Binauralisoidun kuulokemonitoroinnin mahdollistama työnkulku..	31
	4.3 Dialogin editointi ja miksaaminen .....	33
	4.4 Miksaus ja masterointi .....	35
5	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET .....	42



## TERMIT JA LYHENTEET

ambienssi	elokuvan äänessä taustaääni
ambisonics	kolmiulotteinen tilaäänimuoto, joka kattaa horisontaali- ja elevaatiotason
aux input -raitia	lisäraita, joka vastaanottaa äänisignaalia ja lähettää sen edelleen
bass management	käytetään matalien taajuuksien ajamiseen subwooferiin
binauraali	kaksikorvaisuus; ihmiskuulon mallinnus
bus	signaalin reitti, joka yhdistää yksittäisiä äänisignaaleja yhteen
CTF	HRTF:n mallinnus korvakäytävän lisäävistä impulseista suhteessa äänilähteen sijaintiin.
dialogi	näyttelijöiden puhe tai muu suusta kuuluva ääni elokuvassa
downmix	monikanavaisen ääniraidan prosessointi formaattiin, jossa on vähemmän raitoja
dramaturgia	miten esityksen tai tapahtuman eri elementit järjestyvät ja ryhmittyvät
ensiheijastus	alkuperäisen äänisignaalin heijastus, joka saapuu kuulijalle ensimmäisenä
exit sign effect	äänielementit lopullisella ääniraidalla, joista ei osaa sanoa kuuluvatko ne oikeaan ääniympäristöön vai ääniraitaan
foley	näyttelijöiden tai kuvassa näkyvien elementtien liikkeitä tukevaksi jälkituotannossa kuvan kanssa synkronissa äänitetty ääni
frame	videon yksittäinen kuva
HRTF	pään siirtofunktio; äänispektrin muutos, jonka vartalon, pään ja korvanlehtien muodot saavat aikaan äänisignaalin kulkiessa äänilähteestä korviin
immersiivinen	syventyminen keinotekoisesti rakennettuun todellisuuden

impedanssi	vaihtovirtavastus; vastus tai kuorma, jonka esimerkiksi kaiutin muodostaa vahvistimelle
impulssi	voiman vaikutus sen vaikutuksen yli; ääniaallon saama lisäominaisuus matkalla äänilähteestä korviin
impulssivaste	tilan reagointi alkuperäisen signaalin muutokseen ajan funktiona
insert-plugin	plugin, joka lisää toimintansa mukaisen ominaisuuden raitaan
ITU-R BS.1116	kriteeristandardi kuuntelutilan melulle, heijastuksille, tilavuudelle ja jälkikaiulle
konvoluutio	äänisignaali kerrattuna impulssivasteella
kuvamittaus	valokuvasta tai videosta kohteen kolmiulotteinen mitaus
LCeq	pitkällä aikavälillä mitattu C- eli matalien ja ihmiskuulolle herkkien taajuuksien painotus
lokalisatio	paikallistuminen
masterointi	äänen viimeistelyprosessointi esitysformaattia varten
master-raita	ääniraita, jolle kaikki lopullisessa ääniraidassa soivat signaalit ajetaan
monikanavainen	kun kanavia on enemmän kuin kaksi
näennäinen äänilähde	phantom image; kahden tai useamman kaiuttimen välille muodostuva vaikutelma äänilähteen sijainnista
objektipohjainen	kaiutinpohjaisuuden sijaan metatietoa sisältävä äänisignaali kolmiulotteisessa äänikentässä
pallokoordinaatisto	pallomuotoinen kolmiulotteinen koordinaatisto
pan	mihin näennäiset äänisignaalit sijoitetaan äänikentässä
plugin	liitännäinen vuorovaikutuksessa isäntäohjelmistoon
renderöinti	ohjelmistolla tehty hahmonnus, joka esittää lopullisen reaalisen äänen tai kuvan
room tone	äänitystilassa ja sen taustalta kuuluva ääni, jolla peitetään esimerkiksi dialogiraidan leikkauskohtia
siniaaltopyyhkäisy	äänisignaali, jossa on jokainen taajuus peräjälkeen
SPL	äänenpainetaso
stereokuva	kahden tai useamman kaiuttimen rakentama äänikenttä suhteessa kuuntelijaan

subframe	frame-yksikön jakava aikayksikkö
tiläääni	äänen kokonaisvaikutelma suhteessa tilaan, jossa äänilähde sijaitsee kuuntelijaan nähden
transientti	äkillinen muutos äänisignaalissa, jonka alku on terävä
vaimenemisaika	aikaväli, jolloin ääni on vaiennut 60dB
virtuaalistudio	objektipohjainen mallinnus studiosta
äänispektri	äänen taajuusrakenne

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tutkii HRTF:n ja binauralisoidun kuulokemonitoroinnin nykytilannetta osana elokuvaäänen jälkituotantoa, kun elokuvaääntä tehdään monikanavaista esitysformaattia varten. Työn tavoite on määrittää binauralisoidun kuulokemonitoroinnin etuja, haittoja ja kehityskohteita verrattaessa perinteiseen kaiutinpohjaiseen monitorointiin. Binauralisoitu kuulokemonitorointi voi tulevaisuudessa merkittävästi muuttaa totuttuja työtapoja ja työnkulkua elokuvaäänen jälkituotannossa. Opinnäytetyö tutkii binauralisoidun kuulokemonitorointiketjun rakentamista osaksi ammattiaudiotyöskentelyä, ja perehtyy binauralisoinnin teoriaan. Työ myös pohtii binauralisoidun kuulokemonitoroinnin tarkkuutta, joustavuutta ja kustannustehokkuutta elokuvaäänen jälkituotannossa niin tekijän kuin tuotannon näkökulmasta.

Opinnäytetyö ei vertaile elokuvaäänen jälkituotannon yksittäisten elementtien miksaus- ja editointipäätöksiä kuuloke- ja kaiutinmonitoroinnin välillä, koska lopulliset päätökset näiden suhteen ovat elokuvalla ja tekijälle subjektiivisia. Sen sijaan työ käsittelee jälkiäänituotannon työvaiheita, työnkulkua sekä valmiin elokuvakokonaisuuden loppuvaikutelmaa äänen näkökulmasta, ja pohtii binauralisoidun kuulokemonitoroinnin vaikutusta tehtyihin päätöksiin. Työ ei käsittele binauralisoidun kuulokemonitoroinnin merkitystä sävellysprosessiin tai ylipäättään musiikin tekoon, mutta ottaa huomioon musiikin osana elokuvan lopullisen ääniraidan miksausta.

Opinnäytetyö on tarkoitettu ammatikseen audion parissa työskenteleville sekä äänestä ja sen työtavoista kiinnostuneille. Työ ottaa myös kantaa elokuvan tuotantotehokkuuteen jälkituotannon kannalta, kun binauralisoitu kuulokemonitorointi on osana monitorointiketjua. Luvussa 3.4 esitetään myös ohjeet binauralisoidun kuulokemonitoroinnin toteuttamiseksi. Opinnäytetyö pyrkii määrittämään haasteita ja kehityskohtia niin elokuvaäänen jälkituotannossa kuin binauralisoidussa kuulokemonitorointiketjussa. Pyrkimyksenä on löytää tehokkaampia tapoja työskentelyyn elokuvaäänen jälkituotannossa vaarantamatta elokuvan lopputulosta kokonaisuutena.

## 2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Opinnäytetyön aihe käsittelee uutta teknologiaa, joten relevanttia käyttäjäkokemusaineistoa on vaikea löytää. Työn yhteistyötaho Genelec Oy ei myöskään tietosuojalakien puitteissa voi jakaa palvelunsa käyttäjien yhteystietoja, joten vertaisarvioitua aineistoa palvelun pitkäaikaisesta käyttökokemuksesta ei opinnäytetyön puitteissa ollut mahdollista hankkia.

On huomioitava, että osa referoiduista lähteistä on Genelec Oy:n – opinnäytetyössä käytettävän palvelun kehittäjän – tuottamaa asiasisältöä. Työ on puolueeton, mutta ilman Genelec Oy:n avustusta niin haastatteluiden, osan lähdemateriaalin sekä palvelun ilmaiskäyttöön osalta, olisi opinnäytetyötä ollut huomattavasti vaikeampi toteuttaa.

Binauraalin teknologian käyttö yleistyy jatkuvasti, mutta monitorointiketjussa se ei nykyisin kuulu elokuvaäänien jälkituotannossa totuttuun työnkulun standardiin. Opinnäytetyössä käytetyn binauraalia teknologiaa hyödyntävän työkalun kehittäjä Genelec Oy on vakiinnuttanut asemansa ammattiaudiotyöskentelyn edelläkävijänä. Tämän takia tutkitun aiheen standardisointi osana ammattimaisen audiotyöskentelyn työnkulkua voi nähdä olevan tulevaisuudessa mahdollista.

### 2.1 Opinnäytetyön toteutus

Opinnäytetyöhön sisältyy taiteellisesti toteuttava osio (myöhemmin käytetään termiä kenttätutkimus), jonka prosessi kulkee teoriaan perehtyvän kirjallisen työn rinnalla. Kenttätutkimuksella viitataan empiirisen tutkimuksen metodeihin. Moni käsitellyistä aiheista vaatii yhtäaikaisen teoreettisen ja käytäntöön pohjautuvan tutkimuksen, jotta saatujen tulosten konteksti selviää. Osa opinnäytetyön materiaalista pohjautuu henkilökohtaiseen kokemukseen niin elokuva-, kuin musiikkialan ammattiaudiotyöskentelystä; toimintatavat ja työnkulku ovat tekijän omia tottumuksia ja saattavat erota paljonkin toisistaan. Työn lähestymistapojen erilaisuus saattaa johtaa jopa todella eriäviin lopputuloksiin. Henkilökohtainen kokemus tutkimusmenetelmänä on myös oikeutettua, koska opinnäytetyön aikana käytössä oli henkilökohtainen HRTF; käytettävän palvelun tarkka kalibrointi on

tärkeää työskentelyn tarkkuuden takaamiseksi. Kukaan muu käyttäjä ei kuule ääniä monitorointiketjun läpi samalla tavalla kuin se, kenelle kalibrointi on tehty. Henkilökohtainen kokemus osana tutkimusmenetelmiä viittaa myös äänisuunnittelijan binauralisoidulla kuulokemonitoroinnilla tekemiin päätöksiin suhteessa elokuvan lopullisen esitysformaatin representaatioon. Tarkoitettuja äänisuunnittelun elementtejä ei tarkasti osaa analysoida kukaan muu kuin äänisuunnittelija, ja niitä arvioidaan opinnäytteessä suhteessa lopullisen ääniraidan kokonaisvaikutelmaan elokuvan esitysformaattissa.

Vaikka ammattiaudiotyöskentelyyn on muodostunut laaja yhtenäinen erityissanasto eri medioista riippumatta, opinnäytetyölle olennainen erityissanasto merkitsee usein käsiteltävän median mukaan eri asioita. Työ keskittyy elokuva-alan äänijälkituotantoon; moni peli- ja musiikkialaan liittyvä tutkimus ei ole relevanttia tähän työhön, vaikka tutkitut aiheet vastaavat sitä termistöltään. Opinnäytetyön aihetta käsittelevään elokuva-alan tutkimukseen ei vielä löydy montaa luotettavaa lähdettä.

### **2.1.1 Kenttätutkimuksen toteutus**

Opinnäytteen kenttätutkimuksena tehtiin Saarna-lyhytelokuvan äänen jälkituotanto Dolby Atmos 7.1.2-kaiutinkonfiguraatiossa käyttäen ainoastaan kuulokemonitorointia; henkilökohtainen HRTF ja binauralisointi olivat monitorointiketjussa käytössä aina, kun se oli relevanttia. Editointia ja miksausta vertaisarvioitiin useissa työvaiheissa kaiutinpohjaisella monitoroinnilla, mutta kaikki päätökset elokuvan lopullisen ääniraidan suhteen tehtiin käyttäen binauralisoitua kuulokemonitorointiketjua.

Kuulokemonitoroinnin binauralisointi tehtiin käyttäen Genelec Oy:n Aural ID -pluginin 1.0.0- sekä 1.0.1RC2-versioita. Kaksi eri versiota pluginista olivat tarpeen kenttätutkimuksen aikana käytettyjen kahden tietokoneen ja niiden välisen käyttöliittymän versioeroavuuden takia, mutta plugin-versioiden ominaisuudet olivat muuten kenttätutkimuksen kontekstissa identtiset. Kenttätutkimuksesta noin kolmannes ajasta työskenneltiin studiossa iMac Pro -pöytäkonella (late 2018, macOS Monterey 12.1) ja loput ajasta erilaisissa hiljaisissa tiloissa MacBook Pro -

kannettavalla tietokoneella (2019, 15-inch, macOS Ventura 13.1). Kenttätutkimuksessa käytetty audiotyöasema oli Pro Tools Ultimate.

### **2.1.2 Kenttätutkimuksen arvioinnin luotettavuus ja eettisyys**

Elokuvaa tehdessä työvaiheita on useita, ja niiden kaikkien tulee tukea yhteistä päämäärää. Elokuvan tekoon ei ole väärää lähestymistapaa tai metodeja, ja työn onnistumista voidaan arvioida suhteessa lopputuloksen kokonaisuuteen ja yleisinä pidettyjen käytäntöjen tulkintaan. Kulttuurialalla työskennellessä lopputuloksen arvioinnissa on usein kyse subjektiivisten näkökulmien esittämisestä. Kenttätutkimusta vertaisarvioitiin sen dramaturgisten keinojen, vaikuttavuuden ja teknisen toteutuksen perusteella suhteessa elokuvan kokonaisuuteen.

Kenttätutkimusta vertaisarvioi Tampereen ammattikorkeakoulun lehtorit, ääneen suuntautuneet opiskelijat eri vuosikursseilta sekä muutama muu alan opiskelija ja ammattilainen. Vertaisarviointi ei tapahtunut usein organisoidusti eikä samaan aikaan, mutta kokonaisuutta arvioitiin niin eri työvaiheissa kuin valmiin elokuvan kanssa. Työvaiheissa arviointi tapahtui studiossa elokuvan esitysformaatin mukaisessa kaiutinkonfiguraatiossa, ja valmista elokuvaa näytettiin yleisölle elokuvateatteritasoisesta äänentoistosta.

## **2.2 Haastattelut**

Opinnäytetyötä varten haastateltiin Aki Mäkivirtaa (Genelec Oy, Aural ID:n tuotekehitysjohtaja). Yhteydenpito aloitettiin Mäkivirran kanssa aiheeseen liittyen huhtikuussa 2022. Edestakaisen sähköpostittelun ja järjestetyn puolistrukturoidun teemahaastattelun lisäksi palavereita pidettiin kuukausittain työn etenemisestä. Jokaisella kerralla aiheesta keskusteltiin lisää uusien kysymysten herätessä niin opinnäytetyön kuin palvelun kehittämisen valossa.

Opinnäytetyötä varten hankittiin Genelec Oy:ltä käytettäväksi yhteensä kuusi lisenssiä työssä käytettävän palvelun – Aural ID:n – käyttöön. Lisenssit tulivat käyttöön kolmelle opiskelijalle sekä kolmelle äänen lehtorille. Kokemuksia vertailtiin palvelun käyttöönotosta, palvelun käytöstä sekä sen hienosäädöstä.

Lisäksi opinnäytteeseen järjestettiin strukturoimattomia haastatteluita kenttätutkimuksen eri vaiheissa. Haastatteluiden yhteydessä elokuvan ääniraitaa arvioitiin kaiuttimista kuunnellen. Vertaisarviointina toteutetut haastattelut järjestettiin suurimmaksi osaksi elokuvan valmistumisen jälkeen. Aikataulutuksen tavoitteena oli, etteivät vertaisarvioinnissa ilmenneet seikat vaikuttaneet elokuvan ääniraitaan ja täten opinnäytetyön tutkimustuloksiin.

### **2.3 Aiheeseen liittyvät tutkimukset**

Opinnäytetyössä referoidaan materiaalia tieteellisistä tutkimuksista. Tähän sisältyy mm. lääketieteellistä ja aiheeseen liittyvää teknillisiä osa-alueita selittävää materiaalia. Tutkittavan aiheen vuoksi osa referoiduista tutkimuksista ovat poikkitieteellisiä. Aiheeseen liittyvät tutkimukset ovat opinnäytteitä, tieteellisiä tutkimuksia, nettijulkaisuja, tutkivaa journalismia sekä kirjoja.

Ennen palvelun käyttöönottoa aiheeseen tutustuttiin erilaisin materiaalein, joita löytyy netistä. Moni palvelua käsittelevä kolmannen osapuolen sivusto käyttää pohjamateriaalinaan Genelec Oy:n omaa materiaalia ilman sivuston omaa pohdintaa, eikä uutta relevanttia tietoa löydy kyseisiltä sivustoilta. Tästä syystä opinnäytetyössä on luotettavinta käyttää lähteenä Genelec Oy:n julkaisemaa materiaalia.

Kenttätutkimuksen aikana erilaiset ohjevideot autoivat varsinkin Aural ID -pluginin käyttöönoton yhteydessä. Videoista on kuitenkin löytynyt paljon keskenään ristiriidassa olevaa tietoa; luotettavimmat ohjeet olivat Genelec Oy:n julkaisemia.



### 3 OPINNÄYTETYÖN TAUSTA

Ammatikseen audion parissa työskennelläkseen tarvitsee tehdä paljon hankintoja; ammattikäyttöön tarvittavat ohjelmistot, liitännäiset ja laitteistot maksavat yhteensä tuhansia, ellei peräti kymmeniä tuhansia euroja. Lähes aina kallein kuluera on itse studio. Tilan hankkiminen, muokkaaminen käyttötarkoitukseen sopivaksi sekä sen ylläpito vaativat paljon rahaa ja monia työtunteja. Jos ei puhuta erikseen akustoinnista, ohjelmistoista ja muista laitehankinnoista, musiikin parissa työskentelyyn lähtökohtaisesti riittää kaksi hyvää kaiutinta. Myös suhteellisen pienellä tilalla pääsee pitkälle. Sen sijaan elokuva-alalla äänen jälkituotannossa työskentely nykystandardeilla vaatii helposti 6–12 studiotasoista kaiutinta ja tarpeeksi ison tilan. Työroolin mukaan on mahdollista pärjätä pienemmälläkin kalustolla, mutta nämä hankinnat ovat tarpeen halutakseen valmiudet työskennellä elokuvaäänen jälkituotannon jokaisessa vaiheessa.

Kaiuttimilla tehtävään työskentelyyn verrattuna kuuloketyöskentelyllä on monia etuja. Laadukkaiden kuulokkeiden hankinta muuhun laitteistoon verrattuna on halpaa. Kuulokkeilla kuunneltuna audiosignaalin suhde kohinaan on erittäin hyvä, ja hiljaisten äänten monitorointi sekä niiden erottaminen toisistaan on huomattavasti helpompaa kuin kaiuttimilla työskennellessä. (Mäkivirta, 2022.) Mahdollisesti isoin hyöty on kuitenkin se, että kuulokkeita on helppo kuljettaa mukanaan. Jos omistaa tarpeeksi tehokkaan kannettavan tietokoneen, työpistettä voi kuljettaa mukana. Kuulokkeilla työskentelyyn liittyy kuitenkin ongelma, joka johtuu aivojen toiminnasta.

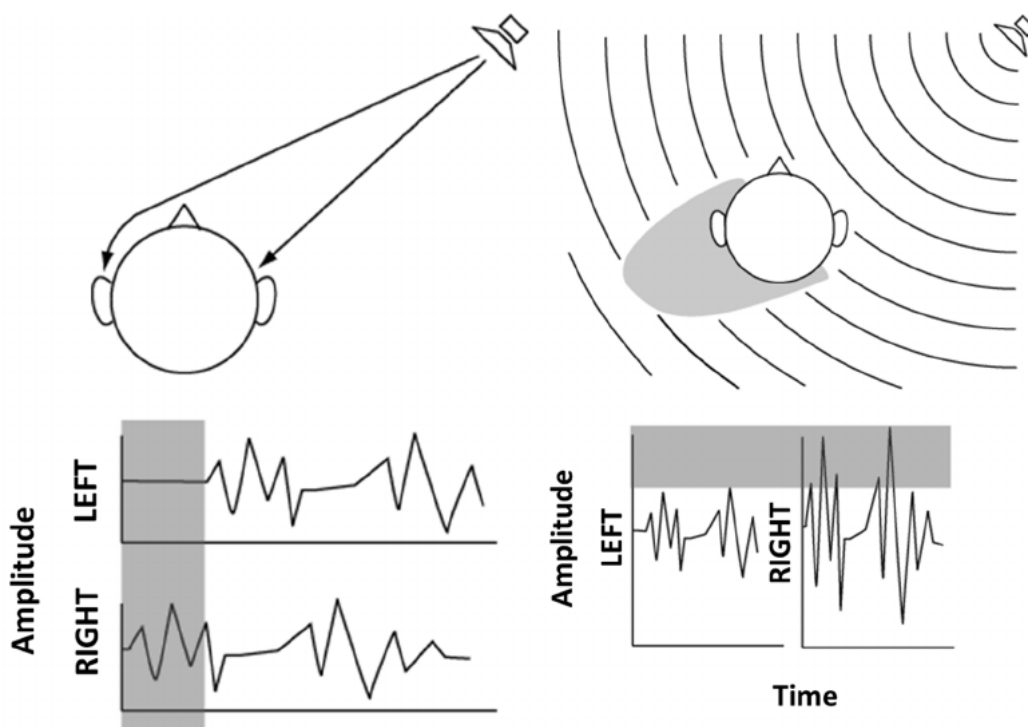
#### 3.1 Suuntakuulo

Ihminen havaitsee äänet ympäriltään 360 asteen säteellä, ja äänilähteen lokalisointiin vaikuttaa moni äänen ominaisuus. Äänisignaali voi muuttua matkalla, ja se tuottaa useita erilaisia impulsseja kuuloelimissä ja myöhemmin aivoissa. Kuuloaistimus syntyy vasta, kun aivot tulkitsevat korviin saapuvan äänisignaalin kuuloimpulssien käsittelystä vastaavalla alueella (Elacin 2022). Äänisignaalin suunnan lisäksi aivot tulkitsevat tilan koon, kuinka pinnat heijastavat ääntä sekä mahdolliset esteet kuulumiseen äänilähteen edessä.

Aron (2006) mukaan korvien välille syntyy kolmenlaisia fysikaalisia eroja, joita ovat aika-, vaihe- ja voimakkuuserot. Kaksikorvaisuuden takia aivot pystyvät tulkitsemaan näitä eroja keskenään vihjeinä suunnasta. (Aro 2006, 30.) Tämän lisäksi ylävartalon, pään ja korvien muoto aiheuttaa äänisignaalille suunnan mukaan ominaisen impulssin.

### 3.1.1 Äänen aika-, vaihe-, ja voimakkuuserot

Ääni on fysikaalinen tapahtuma. Jos äänisignaalin lähde ei ole suoraan kuulijan edessä tai takana, saapuu se ensin lähempään ja – joitain millisekunteja – myöhemmin kauempaan korvaan. Tämä korvien välinen aikaero (ITD, sanoista Interaural Time Difference) on Aron (2006) mukaan paikallistamiskriteerinä tärkein havaitsemaan äänisignaalin tulosuunta. Jos äänilähde ei ole suoraan kuulijan edessä tai takana, kuuluu se myös äänilähdettä lähempään korvaan voimakkaammin kuin kauempaan. Aron mukaan korvien välinen voimakkuusero (ILD, sanoista Interaural Level Difference) vaikuttaa eniten, kun äänen aallonpituus on lyhyempi – korkeudeltaan yli noin 1200–1400 hertsiä – kuin korvien välinen etäisyys. Aron mukaan myös vaihe-erot (IPD, sanoista Interaural Phase Difference) vaikuttavat äänilähteen lokalisointiin, koska aaltomuotoinen äänisignaali saa korvien tärykalvot värähtelemään eriaikaisesti. (Aro 2006, 30–31.)



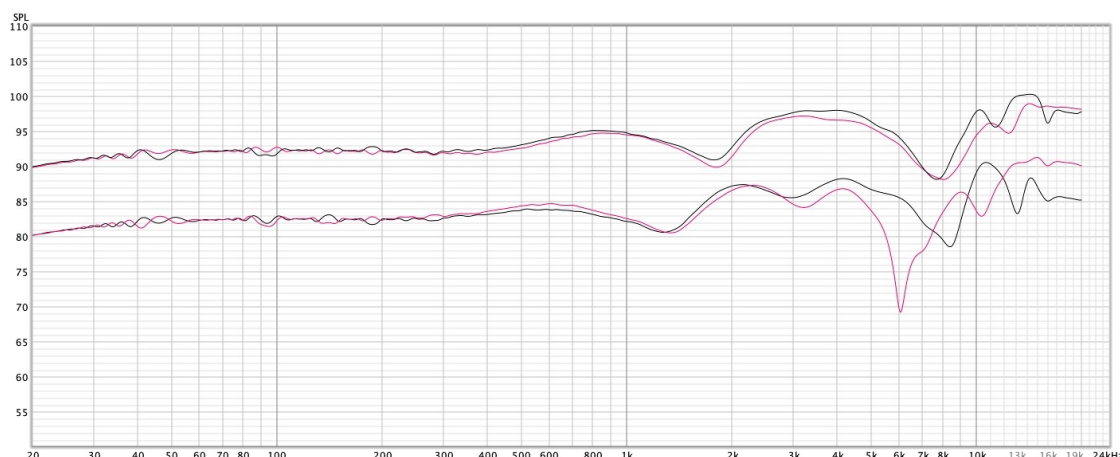
KUVIO 1. ITD:n ja ILD:n ero korvien välillä (Liang, Yost, Xuan 2015).

Äänen tulosuunnan mukaan täysin identtinen ääni kuulostaa erilaiselta eri suunnasta tullessaan. Aivot ymmärtävät intuitiivisesti, kuinka äänisignaalien ITD, ILD ja IPD sekä ylävartalon, pään ja korvien muoto vaikuttavat oleellisesti äänilähteiden lokalisointiin. Aron (2006) mukaan päällä tekemämme liikkeet aiheuttavat äänessä sävymuutoksia ylävartalon, pään ja korvien muodon vuoksi. Tällaiset suuntavihjeet auttavat erityisesti muualta kuin vaakatasosta saapuvien äänien lokalisointiin. (Aro 2006, 30.) Tätä teoriaa voi soveltaa myös elokuvan äänijälkituotannossa: näennäisen äänilähteen liike voi auttaa lokalisoinnissa, koska katsojan oletetaan pitävän katsettaan paikallaan eteenpäin.

### 3.1.2 Pään siirtofunktio

Pään siirtofunktio (HRTF, sanoista Head Related Transfer Function) on äänispektrin muutos, jonka vartalon, pään ja korvanlehtien muodot saavat aikaan äänisignaalin kulkiessa äänilähteestä korviin. Binauralisoinnissa HRTF:ää käytetään laskukaavana, joka määrittää äänisignaaliin lisättävät ominaisuudet, jotta ne vastaavat korvaan saapuvaa signaalia suhteessa näennäisen äänilähteen sijaintiin. Yleisesti HRTF:iä on kolmenlaisia: yleis-HRTF, joka on tehty head-and-torso-simulaatiosta tai laskettu keskiarvoisesti eri henkilökohtaisista HRTF:stä, personalisoitu HRTF, joka on valittu olemassa olevasta HRTF-datavalikoimasta vastaamaan mahdollisimman hyvin käyttäjän omaa kuuloa, sekä käyttäjän oma henkilökohtainen HRTF.

Koska yksilökohtaiset erot anatomiassa – varsinkin pienetkin erot korvanlehtien muodossa – vaikuttavat merkittävästi suuntakuulon tarkkuuteen, täysin henkilökohtaisella HRTF:llä on paras potentiaali päästä parhaimpaan tarkkuuteen suuntakuulon mallinnuksessa (Zotkin, Hwang, Duraiswami & Davis, 2003). Henkilökohtainen HRTF voidaan saada aikaan laittamalla pienet mikrofonit korvakäytäviin kaiuttomassa huoneessa, syöttämällä äänisignaalia eri suunnista ja vertailemalla alkuperäisen ja äänitetyn signaalin ominaisuuksia. Äänen heijastukset poistetaan aikaikkunointia hyödyntäen. Toinen laskutapa henkilökohtaiselle HRTF:lle on mallintaa kolmiulotteisesti käyttäjän ylävartalon, pään ja korvanlehtien muodot, joista kuvamittauksen avulla saadaan laskukaavan arvot. Kenttätutkimuksessa käytössä oli henkilökohtainen HRTF, joka saatiin kuvamittauksen avulla.



KUVIO 2. Henkilökohtainen HRTF (alhaalla) verrattuna yleis-HRTF:ään (KEMAR +10 dB, ylhäällä) vasemman (musta) ja oikean (punainen) korvan välillä näennäisen äänilähteen sijaitessa suoraan edessä.

### 3.2 Kuulokemonitoroinnin isoin ongelma

Ammattiaudiotyöskentelyssä kuulokemonitoroinnissa on yksi perustavanlaatuisen ongelma: kuulokkeiden käyttäjän aivot eivät ymmärrä äänen tulosuuntaa. Äänisignaalin kulkiessa kuulokkeista suoraan korviin aivot ymmärtävät, kuuluuko äänisignaali vasemmalta vai oikealta puolelta ja missä suhteessa toisiinsa. Jos äänisignaali kuuluu pelkästään vasemmalta, ei signaali koskaan saavu oikeaan korvaan. Lisäksi äänisignaali kulkee kuulokkeen kaiutinelementistä suoraan korvakäytävään, ohittaen täysin vartalon, pään ja korvalehtien muodon; näiden impulssien puuttuessa aivot lokalisoivat äänilähteen pään sisälle.

Jos teoksen ainoa kuunteluformaatti on kuulokemonitorointi, työskentelyvaiheessa suuntakuulon mallintaminen monitorointiketjuun ei ole välttämättä tarpeellista. Opinnäytteen kenttätutkimuksen julkaisuformaatti on kuitenkin monikanavainen kaiutinpohjainen monitorointi. Kuulokemonitoroinnin binauralisointi on tällöin jo monikanavaisen julkaisuformaatin takia pakollista. Ilman binauralisointia myös monitoroinnin tarkkuus on kyseenalaistettava.

#### 3.2.1 Suunnan lisääminen kuulokekuunteluun

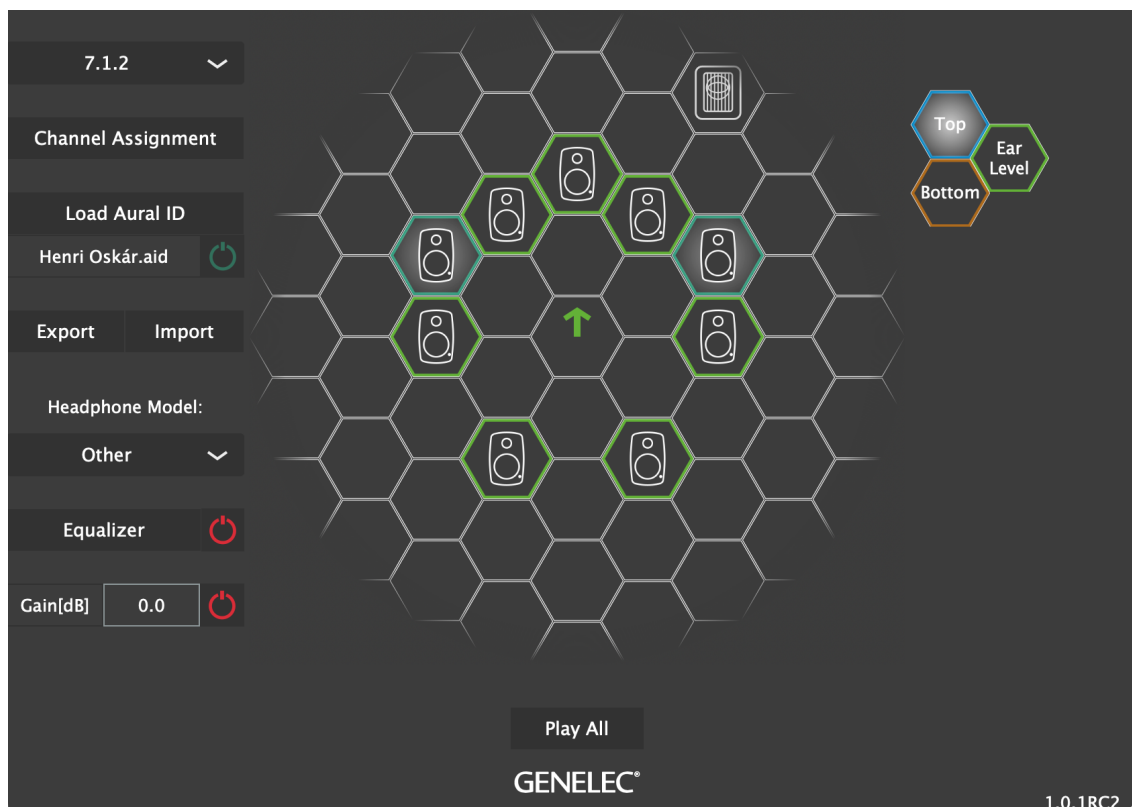
Tiläänen lisääminen kuulokekuunteluun on suhteellisen yksinkertaista ilmaamalla (ilmaaminen käsitellään tarkemmin luvussa 3.4.3.) kuuntelu konvoluutiota käyttäen. Jos prosessointiin lisää ainoastaan informaation tilasta, ääni kuulostaa lähinnä värityneeltä tai jopa vääristyneeltä. Tämän takia prosessointiin tulee lisätä mallinnus ihmiskuulosta.

Aki Mäkiwirran mukaan Aural ID:n idea on pienentää kaiutin- ja kuulokekuuntelun keskinäistä eroa. Kuulokekuuntelussa on teoriassa mahdollista päästä samaan kaiutinkuuntelun kanssa, mutta käytännössä se on todella vaikeaa. (Mäkivirta 2022.) Kuulokkeiden ja kaiuttimien ero monitorointiin on jo itsessään valtava. Äänen paine-erojen ja aaltomuodon fysikaalisten ilmiöiden lisäksi kaiutinpohjaisessa monitoroinnissa kuuntelee myös tilaa, johon kaiuttimet on asetettu. Mäkiwirran mukaan – jos on tieto, mistä äänen tulisi kuulua – on se mahdollista palauttaa kuunteluun. Varsinkin huonemallintaminen on haasteellista, koska missä tahansa tilassa ääntä kuuluu joka suunnasta; huoneesta täytyy tehdä kolmiulotteinen mallinnus. (Mäkivirta 2022.)

### **3.2.2 Binauralisoinnin prosessointi**

HRTF-dataa ja sitä reaaliajassa lukevaa ohjelmistorenderöintiä hyödyntäen on mahdollista rakentaa binauralisoitu monikanavainen monitorointi kuulokekuunteluun. Tällöin ohjelmisto muuttaa kuuntelun äänilähteiden sijainnit objektipohjaisiksi, joissa objektit vastaavat halutun kaiutinkonfiguraation yksittäisiä kaiuttimia. Opinnäytetyössä käytetty ohjelmisto HRTF-datan purkamiseen oli Aural ID.

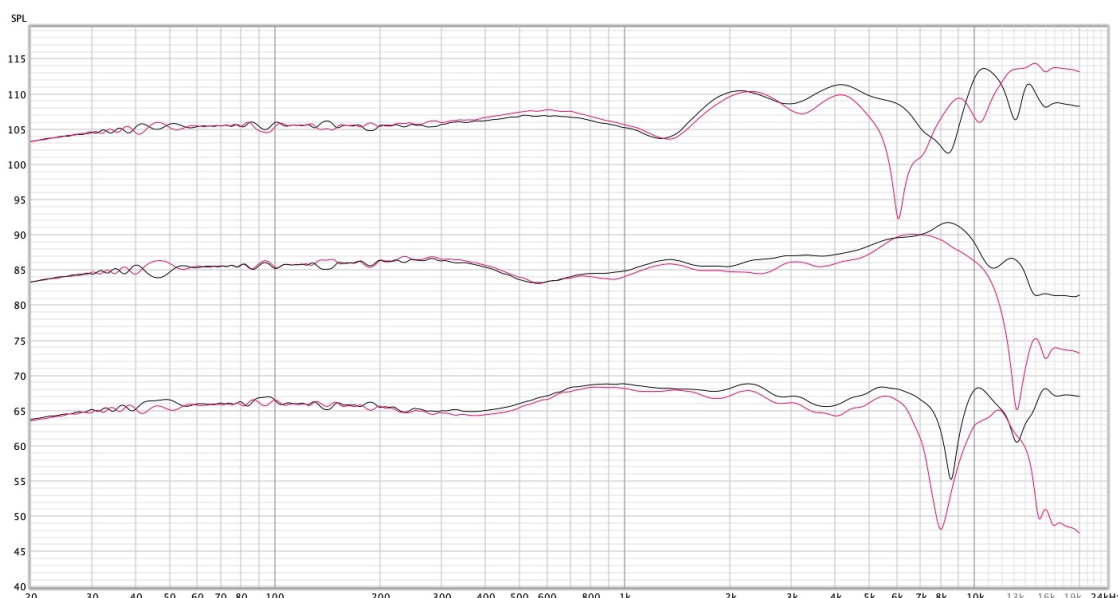
Aural ID -plugin takaisinmallintaa HRTF:n laskukaavaa. Plugin mallintaa kuunteluun virtuaalikaiuttimiston, jonka voi asettaa haluttuun kaiutinkonfiguraatiostandardiin. Virtuaalikaiuttimet ovat aseteltu pallokoordinaatistoon, jossa kuuntelupiste on keskellä koordinaatistoa. Jokainen virtuaalikaiuttimista on yhtä kaukana kuuntelupisteestä, ja ne osoittavat aina suoraan kohti kuuntelupistettä. Virtuaalikaiuttimet ja kuuntelupiste toimivat niin sanotusti kaiuttomassa tilassa. Tämä tarkoittaa, että plugin ei itsessään tuo tilan kokoa, heijastuksia tai muita mahdollisia tilasta johtuvia äänivääristymiä kuunteluun.



KUVA 1. Aural ID:n käyttöliittymä (kuva: Henri Takala).

Aural ID:ssä mahdollisia virtuaalikaiutinkonfiguraatioita ovat mono, stereo sekä erilaiset monikanavaiset standardit aina Dolby Atmos 9.1.6-formaattiin asti. Kuuntelussa pystyy hienosäätämään kaiutinkonfiguraation lisäksi kuuntelun kokonaisvoimakkuutta, mallinnetun tilan kokonaistaajuusvastetta, kuulokkeiden mahdollista taajuusvastevääritystä, kuuntelupisteen atsimuuttikulmaa ja elevaatiota sekä jokaisen virtuaalikaiuttimen kokonaisvoimakkuutta, atsimuuttikulmaa ja elevaatiota.

On hyvä ymmärtää, että säätämällä esimerkiksi yhden virtuaalikaiuttimen sijaintia pallokoordinaatistossa, ei sen sijainti kuulokekuuntelussa välttämättä liiku. Äänilähteen sijaintia on mahdollista muuttaa paikasta toiseen tiettyyn pisteeseen asti, mutta esimerkiksi äänilähteen sijoittaminen kuuntelupisteen taakse tai yläpuolelle on kuulokekuuntelussa mahdotonta. Äänilähteen saa kuitenkin kuulostamaan siltä, kuin se olisi perinteisen kuulokemonitoroinnin ulottumattomissa; Aural ID tekee sen lisäämällä signaaliin impulssin HRTF-dataa hyödyntäen, jonka käyttäjän aivot tulkitsevat informaationa äänilähteen sijainnista.



KUVIO 3. Vasemman (musta) ja oikean (punainen) korvan ero binauralisoinnin jälkeen suhteessa äänilähteen sijaintiin: suoraan edestä (+20dB), suoraan takaa ja suoraan yläpuolelta (-20dB).

Hieman opinnäytetyön toteuttamisen jälkeen Aural ID -pluginiin tuli myös mahdollisuus säätää tilan heijastuksia, joka käytännössä tarkoittaa virtuaalitalan lattian aiheuttamia heijastuksia. Lisäksi pluginiin tuli Head Tracking -ominaisuus, joka mahdollistaa reaaliaikaiset liikkeet kuuntelupisteen atsimuuttikulmassa käyttäjän pään liikkeiden mukaan. Työn aikana käytetyssä versiossa pluginista kuuntelupisteen kääntely tapahtui manuaalisesti.

### 3.3 Kuunteluformaatin valinta

On hyvä tehdä tietoisia valintoja kuuntelun vaihtoehtoista niin taiteellisista kuin teknisistä näkökulmista. Valinnat voivat johtua esimerkiksi elokuvan loppuesitysformaattista, työskentelyyn käytettävissä olevasta laitteistosta tai vaikka kuvallisen ilmaisun tukemisesta äänen keinoin. Taiteellisesta näkökulmasta katsottuna elokuvaäänen tarkoitus on edistää ja syventää kerrontaa.

Valintojen täytyy olla perusteltuja – mutta vielä tärkeämpänä – niiden täytyy olla teknisesti toteutettavissa. Studion rakentaminen vastaamaan elokuvateatterin kuuntelun koko potentiaalia on todella kallista; kuulokekuuntelun binauralisoinnin avulla se on kuitenkin teoriassa huomattavasti helpommin ja halvemmin saavutettavissa.

### 3.3.1 Kaiutinkonfiguraatiot

Erilaisia kaiutinkonfiguraatioita voi teoriassa kehittää loputtomiin; tästä syystä opinnäytetyö keskittyy elokuva-alan keskeisiin konfiguraatioihin. Yleisin näistä on stereo, joka koostuu kahdesta kaiuttimesta: vasen (L) ja oikea (R). Stereokonfiguraatio on kuin katsoisi edessään näyttämöä; äänen lähde on edessäsi ja se voi kulkea vasemmalle ja oikealle, mutta pysyy edessäsi. Holmanin mukaan L ja R sijaitsevat  $\pm 30$  asteen kulmassa suhteessa kuuntelun keskipisteeseen, muodostaen  $60$  asteen vastakkaisen kulman (Holman 2008, 36). Nykyään elokuvien pääjulkaisuformaatti ei lähtökohtaisesti ole stereo kuin erityistapauksissa, mutta esimerkiksi TV-, dvd- tai suoratoistopalvelulevitystä varten elokuvasta on lähes pakollista tehdä miksaus stereoformaattiin.

Surround-formaateista elokuva-alan kannalta yleisimmät ovat 5.1 ja 7.1. Molemmissa on edessä kolme kaiutinta, jotka ovat keskikaiutin (C), L ja R. Näitä kolmea kaiutinta kutsutaan yleisesti etuseinäksi. Useimmiten eteen on myös asetettu ".1":stä merkitsevä alataajuuskaiutin, jota puhekielessä kutsutaan subwooferiksi tai subbariksi. Tähän käyttöön tarkoitettu kaiutin, joka toistaa LFE-kanavan (sanoista Low Frequency Effects) signaalia, on huomattavasti isompi niin kooltaan kuin teholtaan muihin kaiuttimiin verrattuna. Alataajuuskaiuttimen tarkka asettelu ei ole tärkeää; matalien taajuuksien aaltojen harjanhuippujen väliset etäisyydet ovat niin suuria, että niiden tulosuuntaa on vaikeaa havaita (Holman 2008, 45). Mitä matalampi taajuus, sen kauemmas se myös kulkee lähteestään, ja sitä paremmin se lävistää eri materiaaleja. LFE-kanava myös eroaa muihin kanaviin verrattuna sen aistikokemuksen takia; LFE-kanavan tärkein rooli ei ole kuulua, vaan tuntua värähtelynä kuuntelijassa. Surround-kaiutinkonfiguraatiossa löytyy lisäksi kaksi kaiutinta kuuntelijan sivuilta: sivuvasen (Lss; sanoista Left side surround) ja sivuoikea (Rss). L ja R sijaitsevat  $\pm 30$  asteen ja Lss ja Rss n.  $\pm 110$  asteen kulmassa suhteessa C:hen (Holman 2008, 37). 7.1-formaatissa on lisäksi takana kaksi kaiutinta: takavasen (Lrs; sanoista Left rear surround) ja takaoikea (Rrs) n.  $\pm 135$  asteen kulmassa suhteessa C:hen.



Surround-kaiutinkonfiguraatiossa kaiuttimet ympäröivät kuuntelupisteen luoden immersiota; tavoitteena on saada katsoja tuntemaan olevansa keskellä maailmaa, jota hän katsoo edessään ja kuuntelee ympärillään. Elokuvaäänien surround-formaateissa pääpaino on kuitenkin edessä, koska katsojan oletetaan katsovan edessään olevaa valkokangasta tai näyttöä.

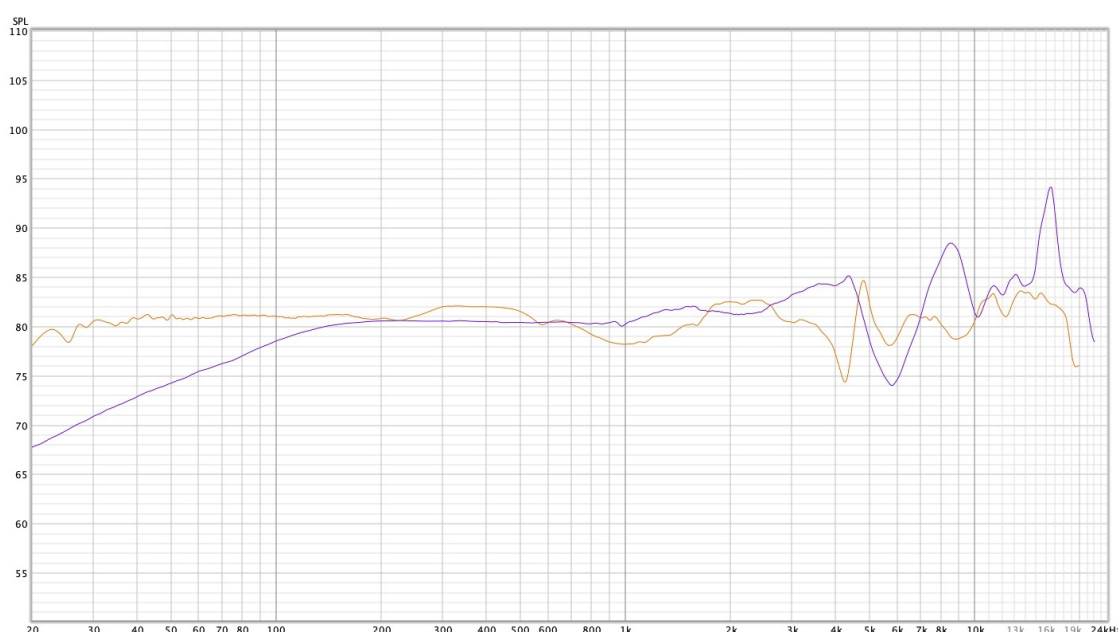
Vaikka teoriassa surround-formaatit ovat stereoon verrattuna mullistava kokemus katsojalle, sen puutteeksi jää sen horisontaalisuus. Dolby Atmos -kaiutinkonfiguraatiot tuovat mukanaan vertikaalisen ulottuvuuden kaiuttimilla, jotka ovat aseteltu kattoon (Lts, sanoista Left top surround, ja Rts). Näin ollen oikealla miksauksella kuuntelukokemus on katsojalle immersioivampi kuin surround. Äänisignaalilla syötetään useammasta suunnasta; pyrkimys on saada katsoja tuntemaan olevansa osa kuuntelemaansa maailmaa. Yleisimpiä atmos-formaatteja nykyään ovat 7.1.2, 7.1.4 ja 9.1.6 lopullisen kaiutinkonfiguraation mukaan.

### **3.3.2 Työskentelyyn käytettävät kuulokkeet**

Kuulokkeita on ammattiaudiotyöskentelyn kannalta relevantteja käytännössä kolmenlaisia: suljetut, puoliavoimet ja avoimet kuulokkeet. Voisi argumentoida, että vastamelukuulokkeet olisivat neljäs relevantti vaihtoehto, mutta opinnäytetyön kannalta suljetut ja vastamelukuulokkeet toimivat käytännössä samalla periaatteella; vastamelukuulokkeissa on vain lisäominaisuus, jolla voi sulkea kuulokkeiden ulkopuolisia ääniä pois enemmän.

HRTF:n ja binauralisoidun kuulokemonitoroinnin kanssa työskennellessä kuulokkeiden tulisi olla kuunteluprofiililtaan mahdollisimman neutraalit. Oliven mukaan useimmat kuulokevalmistajat ottavat todistetusti vaikutteita kuulokkeiden kehittämiseen Harman target curvesta, joka on ohjenuora kuulokkeiden kokonaistajuusvastekäyrään. Tutkimusten mukaan suurin osa kuuntelijoista eri ikäluokista ja erilaisista taustoista suhteessa audioon suosii Harman target curven mukaista kuunteluprofiilia. (Olive 2022). Binauralisoidussa kuulokemonitoroinnissa Harman target curveen – tai muuhun taajuusprofiilistandardiin – säädetty kuunteluprofiili tuo kuunteluun epähaluttua väritystä, joka vaikuttaa kokonaiskuunteluun vääristäen HRTF-prosessointia. Aural ID -pluginista löytyy sisäänrakennettuna

lista eri valmistajien kuulokemalleista. Valitessa listasta käyttäjän kuulokkeet, korjaa plugin niiden tuomaa vääristymää automaattisesti. Opinnäytetyön valossa on hyvä pitää kolme seuraavaa asiaa mielessä: kuulokkeiden kaiutinelementit kuluvat käytön yhteydessä – mikä vaikuttaa kuulokkeiden kuunteluprofiiliin –, erillisen kuulokevahvistimen käyttö tietokoneen ja kuulokkeiden välissä parantaa kuulokkeiden impedanssia – muuttaen kuulokevahvistimen ja kuulokkeiden yhteensopivuuden mukaan hieman myös taajuusvastetta – ja CTF (sanoista Common Transfer Function) ei ole käytössä valitessa Aural ID -pluginista kuulokemalliksi ”other”. Näiden seikkojen aiheuttamat muutokset saattavat johtaa virtuaalitudion lisäkalibrointiin.



KUVIO 4. Kokonaistaajuusvastekäyrät kahdesta opinnäytetyön aikana käytetyistä kuulokkeista: MojoPhones #012 (keltainen) ja Sennheiser HD 600 (violetti) -kuulokkeiden välillä.

Opinnäytetyön aikana käytössä oli neljät eri ammattitason kuulokkeet. Kuulokkeista kahdet olivat puoliavoimia, yhdet avoimet ja yhdet suljetut. Pitkiä aikoja työskennellessä suljetut kuulokkeet tuntuivat raskailta käyttää vähentäen työn tehokkuutta, joten kenttätutkimusta tehdessä suurimman osan ajasta käytössä olivat puoliavoimet ja avoimet kuulokkeet. Suljettujen kuulokkeiden etu on eristää kuulokekuuntelun ulkopuolisia ääniä pois kuuntelusta, tuoden näin lisää tark-

kuutta monitorointiin. Kenttätutkimuksen aikana työskentely tapahtui enimmäkseen todella hiljaisissa tiloissa, joten suljetut kuulokkeet eivät lähtökohtaisesti tuoneet lisähyötyä työskentelyyn.

Kuulokkeissa on usein erilaisia liikkuvia osia, joista johtuvia mekaanisia ääniä oli vaikea erottaa kuunnellusta äänisignaalista. Opinnäytetyön aikana työskentelyyn päädyttiin suurimman osan ajasta kuulokkeilla, jotka olivat käyttömukavuudeltaan parhaat, joissa oli vähiten liikkuvia osia ja näin ollen vähiten mekaanisia ääniä sekä joiden kuunteluprofiiliin oli helpointa luottaa. Kuuntelua verrattiin myös usein kuulokevaihtoehtojen välillä, jotta kokonaisymmärrys elokuvan taajuusprofiilista sekä luotto kuulokkeiden kuunteluprofiiliin parani.

### **3.3.3 Monitorointiketjujen vertailu**

Binauralisoitua kuulokemonitorointia käytettiin läpi elokuvan äänijälkityöprosessin aina kun se oli relevanttia. Kaksi työvaihetta jäi binauralisoidun monitoroinnin ulkopuolelle: dialogieditin ensimmäinen kierros sekä foley-äänitys. Kummassakin työvaiheessa monitorointiformaatti oli kuulokkeet, mutta näissä vaiheissa binauralisoidun monitoroinnin käyttö olisi saattanut tuottaa ongelmia kenttätutkimuksen muihin työvaiheisiin. Opinnäytetyö myös keskittyi monikanavaisen formaatin kanssa työskentelyyn binauralisoidulla kuulokemonitoroinnilla; kummasakaan työvaiheessa perinteisesti ei ole käytössä monikanavainen monitorointiformaatti.

Kenttätutkimuksen aikana elokuvaäänen jälkitöitä tehtiin kokonaisajasta noin kolmannes referenssistudiossa käyttäen kuulokkeita. Loput työskentelystä tapahtui erilaisissa hiljaisissa tiloissa myös kuulokkeita käyttäen. Referenssistudion käyttäminen työskentelyyn oli tärkeää luoton kasvattamiseen binauralisoituun kuulokemonitorointiin, ja se toi myös mahdollisuuden tarkistaa työn jälkeä kaiuttimista tutkimustulosten saamiseksi. Kaikki päätökset äänisuunnittelussa ja miksausessa tehtiin käyttäen kuulokkeita.

Keskimääräinen työskentelypäivä oli n. seitsemän tuntia pitkä. Referenssistudiossa työskenneltäessä päivä alkoi ja loppui koko elokuvan miksauskuun-

telemisellä kaiuttimista. Mahdollisten kiinnostavien tutkimusaineistojen ilmentyessä miksausta kuunneltiin ajoittain kaiuttimista työskentelyn lomassa. Tätä tapahtui referenssistudiossa työskenneltäessä keskimäärin tunnin välein.

Mahdollisuus tarkistaa miksausta kaiuttimista auttoi varsinkin äänijälkityöprosessin alkuvaiheessa, hiljalleen kehittäen luottoa binauralisoituun kuulokekuunteeluun. Mitä monimutkaisempi kohtauksen äänellisen kokonaisuuden rakenne oli, sen helpompaa oli kadottaa näennäisen äänilähteen sijainti. Äänisuunnitellusti vaikeat kohtaukset – varsinkin samankaltaisten äänten soidessa yhtäaikaisesti monesta eri suunnasta – yksittäisten äänten näennäinen sijainti oli helppoa menettää hetkellisesti. Näissä tapauksissa oli useita tapoja saada käsitys stereokuvan kokonaisrakenteesta takaisin, kuten yksittäisten äänten kuuntelu erikseen, stereokuvallisesti valmiiksi rakennetun referenssikohdan kuuntelu tai sijainnin suunnan varmistaminen kaiutinkuuntelusta.

### **3.4 Virtuaalitudion rakentaminen**

Aural ID binauralisoi kuulokemonitoroinnin rakentaen virtuaalikaiutinkonfiguraation kuuntelupisteen ympärille ennalta määrättyyn muodostelmaan. Jokaisesta virtuaalikaiuttimesta saapuva signaali saa sijaintinsa mukaisen impulssin, ja kuuntelupisteestä signaali ajetaan kuulokkeiden vasempaan ja oikeaan kaiuttimeen.

Tärkeintä on, että binauralisointi tapahtuu vasta juuri ennen kuulokeulostuloa ja mittausmonitorointi tapahtuu ennen kuuntelun binauralisointia. Jos jotain prosessointia tapahtuu käyttäjän monitorointiketjun jälkeen, ei käyttäjä kuule lopullisen signaalin todellista representaatiota. Sen sijaan mittausmonitorointiin käyttäjä ei halua kuuntelun binauralisointia, jos tehtävän työn esitysformaatti on mikä tahansa muu kuin binauralisoitu kuuntelu. Binauralisointi muuttaa äänisignaalin ominaisuuksia, mitä mittausmonitorointiin ei haluta.

#### **3.4.1 Mallinnettu studio**

Kun halutaan mallintaa virtuaalikaiutinpohjainen studio, on helpointa käyttää referenssinä oikeaa studiota. Opinnäytetyöhön mallinnettu studio on Tampereen

Mediapoliiksen Sputnik 1. Mallinnettu huone on leveydeltään 4,25 ja 5,18 metriä, pituudeltaan 6,37 metriä ja korkeudeltaan 2,65 metriä. Huoneen kokonaistilavuus on 77m<sup>3</sup>. Huoneen vaimenemisaika T60 on melko vakaa keski- ja korkeilta taajuuksilta; T60 0,21 sekuntia, kasvaen 0,32 sekuntiin alle 200Hz. Alle 100Hz taajuuksilta T60 kasvaa 0,4 sekuntiin. Voimakkain ensiheijastus ihanteelliselta miksauspisteeltä on 13dB alkuperäistä signaalia hiljaisempi.



KUVAT 2 ja 3. Mediapoliiksen Sputnik 1 -studio (kuvat: Henri Takala).

Referenssikaiutinkuuntelussa on bass management 85 hertsissä, ja LFE-kanavalle tarkoitettu subwoofer-kaiutin toistaa matalia taajuuksia korkeimmillaan aina

120Hz asti. Etäisyydet kaiuttimiin ihanteelliselta miksaus pisteeltä ovat 2,2m (L, R, Lss, Rss; Lts-etukaiutin sekä Rts-etukaiutin), 2m (C ja LFE), 3,0m (Lts- sekä Rts-takakaiutin) ja 3,5m (Lrs ja Rrs). LFE-kaiutin sijaitsee lattialla L- ja C-kaiuttimien välissä. Kaikki äänenvoimakkuudet ja lentoajat ovat elektronisesti kohdistettu ihanteelliselle kuuntelupisteelle. Tilan heijastuksien taajuusvasteen käyrä (ITU-R BS.1116) pysyy  $\pm 3\text{dB}$  sisällä.

### 3.4.2 Ohjeet virtuaalitudion rakentamiseen

Opinnäytetyötä varten rakennettiin kaksi erillistä virtuaalitudiota. Työn aikana oli käytössä kaksi tietokonetta, joissa oli käytössä toisistaan eroavat käyttöliittymäversiot. Tämä johti yhteensopivuusongelmien takia kahden eri version käyttöön Aural ID -pluginista. Virtuaalitudion rakennuksen, kalibroinnin ja hienosäädön asetukset kopioitiin pluginilta toiselle. Sputnik 1 -studiossa oli käytössä erillinen kuuloke vahvistin, ja kannettavalta tietokoneelta äänisignaalia syötettiin sisäänrakennetusta kuuloke vahvistimesta kuulokkeisiin. Tämä johti työn aikana hiljalleen pieniin hienosäätöasetuksien eroavaisuuksiin pluginien välillä, jotta virtuaalitudiot vastasivat toisiaan paremmin. Äänijälkituotannon projekti- ja äänitiedostot kulkivat mukana ulkoisella kovalevyllä.

- Pro Tools -ohjelmaan tehdään ulostulo, joka on formaatiltaan stereo. Tämä syöttää signaalin kuulokkeisiin.
- Tehdään halutun loppuformaatin – kenttätutkimuksen tapauksessa 7.1.2 – aux input -raita sekä bus, johon jokainen projektitiedoston ääniraidoista syötetään. Jokainen raita voidaan syöttää busiin joko erikseen, tai raidat voidaan reitittää busiin master-raidan kautta.
- Bus ajetaan aux input -raidalle, jonka insert-pluginina on Aural ID. Plugin muuttaa busin sekä oman aux input -raitansa stereoksi, mutta kumpikin näistä ottaa edelleen vastaan 7.1.2-signaalia. Plugin muuttaa syötetyn signaalin objekteiksi, jotka syötetään busin määrittämiin virtuaalikaiuttimiin.
- Syötetty signaali saa syöttösuuntaansa mukaisen impulssin HRTF-dataa hyödyntäen.
- Plugin syöttää muokatun signaalin aux input -raidan ulostuloon, josta se ajetaan kuulokkeisiin.

### 3.4.3 Kuuntelun kalibrointi

Kuuntelun kalibrointi hienosäädettiin istuessa studion ihanteellisella kuuntelupisteellä vertaillen vuorotellen kaiutin- ja kuulokekuuntelun välillä. Järjestys kaiutin-kohtaiselle hienosäädölle oli aloittaa C:stä, josta jatkettiin L:ään ja R:ään. Tämän jälkeen hienosäädettiin Lss, Rss, Lrs ja Rrs. Lopuksi hienosäädettiin Lts ja Rts. Mitä kauemmaksi hienosäädössä siirtyi C:stä, sitä vaikeampaa hienosäädölle oikeat asetukset olivat löytää.

LFE-kanavan hienosäätö tehtiin erikseen oman monitorointiketjun kautta. Kuulokkeet eivät pysty toisintamaan mataliin taajuuksiin tarvittavaa äänenpainetta. Aural ID -pluginissa ei ole mahdollista tehdä virtuaalikaiutin-kohtaista taajuuskorjausta, joten erillisen monitorointiketjun tekeminen LFE-kanavalle nähtiin järkeväksi. Referenssistudion subwoofer-kaiutin ei toista 120Hz korkeampia taajuuksia, joten matalien taajuuksien kalibroinnin hienosäätö säädettiin vastaamaan kaiutinkuuntelua taajuuskorjaimella siihen pisteeseen, kuin se oli mahdollista. Kenttätutkimuksen työskentelyn aikana kumpikin monitorointiketjuista soivat samanaikaisesti, joten opinnäytteessä niihin viitataan yhtenä samana monitorointiketjuna.

Hienosäädön jälkeen pinkistä kohinasta tehtiin panorointiautomaatio, jota syötettiin vuorotellen referenssistudion kaiutin- ja binauralisoidun kuulokemonitoroinnin välillä. Automaation tarkoitus oli liukua kaiuttimesta toiseen – käyden ajoittain jokaisessa kaiuttimessa – tunnistettavalla tavalla. Kaiutin- ja kuulokemonitorointia vertailemalla kalibrointia hienosäädettiin vastaamaan tarkemmin toisiaan. Monitorointeja verrattiin edelleen kuunnellen puhetta, askelia, erilaisia ambiensseja ja transientteja. Kalibroinnin lisähienosäädön tarkoitus oli päästä kuulokemonitoroinnin kanssa lähes huomaamattoman lähelle kaiutinmonitoroinnin representatiota, ja erittäin matalia taajuuksia ottamatta lukuun siinä onnistuttiin hyvin. Kenttätutkimuksen aikana kalibrointiin myös palattiin ajoittain, kun pieniäkin eroja monitorointiketjujen välillä ilmeni. Tämä auttoi myös esimerkiksi referenssistudion kaiutinmonitoroinnin kalibroinnin hienosäätöön ja epähaluttujen heijastuksien ehkäisemiseen.



Kuulokemonitoroinnin binauralisoinnin kalibrointi tehtiin kahdelle eri käyttäjälle, jotta hienosäätöjen väliset erot olisivat nähtävillä. Vaikka kummallakin käyttäjällä oli käytössä oma henkilökohtainen HRTF ja referenssinä oli sama studio, oli hienosäätöjen välillä isoja eroja niin virtuaalikaiuttimien sijaintien, taajuusvastekorjauksen kuin kuuntelun kokonaisvoimakkuuden suhteen. On mahdotonta sanoa, mistä kalibrointien erot johtuivat tarkalleen. On kuitenkin arveltavaa, että erot johtuvat käytettyjen kuulokkeiden taajuusvasteprofiilin vaikutuksesta henkilökohtaisen HRTF-datan prosessointiin.

#### **3.4.4 Konvoluution tuominen binauralisoituun kuunteluun**

Kun virtuaalikaiuttimien sijainnit ovat mallinnettu ja kalibroitu vastaamaan referenssistudion kaiutinkuuntelua, huomattiin näiden kahden monitoroinnin olevan edelleen hieman erilaiset toisistaan. Binauralisoidusta virtuaalitudiosta puuttuvat tilasta johtuvat heijastukset, eri pintamateriaalit, äänilähteiden esteet sekä itse referenssistudion omat äänet kuten studion ja elektronisten laitteiden HVAC-taustamelu (sanoista Heating, Ventilation and Air Conditioning). Monitorointiketjujen välisen eron korjaukseen otettiin käyttöön binauralisoidun monitoroinnin ilmaaminen.

On monta eri vaihtoehtoa lisätä ilmattu representaatio binauralisoituun kuunteluun. Usein eri vaihtoehdot johtavat kuitenkin hieman erilaiseen lopputulokseen. Yksinkertaisinta käyttäjän kannalta olisi syöttää referenssistudion jokaiseen kaiuttimeen samanaikainen identtinen siniaaltopyyhkäisy, joka äänitetään ihan-teelliselta kuuntelupisteeltä 2nd tai 3rd order ambisonics -mikrofonilla. Äänitetyistä signaaleista tehdään impulssivaste, joka syötetään haluttua loppuesitysformaattia tukevaan konvoluutiopluginiin. Kuuntelun ilmaaminen asetetaan monitorointiketjussa juuri ennen kuuntelun binauralisointia. Tämä vaihtoehto ei kuitenkaan ollut toteutettavissa opinnäytetyön taloudellisissa puitteissa. Ambisonics-mikrofonit sekä konvoluutiopluginit, jotka tukevat vähintään 7.1.2-formaattia, ovat todella kalliita. Ilmaamistapaa kokeiltiin yksinkertaistetusti käyttämällä monomikrofonia impulssivasteen äänitykseen ja Logic Pro X:n sisäänrakennettua Space Designer -konvoluutiopluginia. Impulssivasteen yksiulotteisuus, konvoluutioplugini-



nin impulssivasteen tekeminen transientista sekä ylipäättään ilmaamisvaihtoehdon pakottama Logic Pro X -ohjelman käyttö kenttätutkimukseen olivat kaikki syitä olla käyttämättä kyseistä ilmaamistapaa.

Varmistamalla mahdollisimman tarkka ilmaaminen mallinnetusta tilasta käyttäen opinnäytetyön puitteissa saatavilla olevia työkaluja, tulisi jokaisen virtuaalikaiuttimen mallintaa sijaintinsa mukaista impulssia erikseen. Referenssistudion ihan-teelliselle kuuntelupisteelle asetetaan pallokuviainen SPL-mittamikrofoni. Jokaiseen kaiuttimeen ajetaan yksitellen ensin 15 sekuntia kestävä siniaaltopyyhkäisy, jota seuraa 10 sekunnin hiljaisuus. Signaali äänitetään mittamikrofonilla. SPL-mitattuna yhdestä kaiuttimeesta ajettuna äänenpaine vastaa 78dB SPL LCeq. Äänitetystä siniaaltopyyhkäisystä tehdään impulssivaste. Jokainen äänitetty impulssivaste ajetaan oikeaa vastaavaan virtuaalikaiuttimeen. Tämä tarkoittaa monitorointiketjun jakamista virtuaalikaiutinkohtaisille raidoilleen. Jokainen virtuaalitudion kaiutinta vastaava raita ajetaan aux input -raidalle, jonka insert-pluginina on konvoluutiopugin. Syötetty signaali saa impulssin, joka ajetaan monitoroinnin binauralisointiin ja edelleen kuulokkeisiin. Ilmattu binauralisoitu kuuntelu tulee kalibroida uudestaan vastaamaan referenssistudiota.

Tämä ilmaamistapa toi kenttätutkimuksen aikana ongelmia elokuvan äänitöiden työkulkuun ja projektinhallintaan. Tapa toi lisäksi ongelmia projektin raitojen panorointiasetuksiin ja -automaatioihin. Nämä ongelmat olisi voinut ratkaista kahdella eri tavalla; joko siirtää konvoluutiopugin kuunteluketjussa binauralisoinnin jälkeen – joka olisi tuonut ongelmaksi binauralisoinnin epätarkkuuden – tai lisätä uusi raita ennen kuunteluketjun hajottamista omille konvoluutoraidoilleen. Testatessa tätä menetelmää kuitenkin ilmeni, että vaikka binauralisoitu kuulokemonitorointi oli lähempänä referenssistudion kaiutinmonitorointia, toi se kuulokemonitorointiin kaiutinmonitoroinnille ominaisia ongelmia vieden pois kuulokemonitoroinnille ominaisia etuja. Tämän takia binauralisoidun kuulokemonitoroinnin ilmaamista ei opinnäytetyön aikana ollut käytössä. Päätös liittyi niin työstetyn elokuvan lopullisen ääniraidan kuin työn tutkimustulosten laatuun. Binauralisoidun kuulokemonitoroinnin tarkkaa ilmaamista voidaan pitää omana tutkimuskokonaisuutenaan, ja se vaatii lisää tutkimuksia.

## 4 TUTKIMUSTULOKSET

Ääntä on helpompi analysoida kuulokkeilla ja kokea kaiuttimista. Ääni on fyysinen tapahtuma ja se vaikuttaa kahteen aistiin: kuuloon ja tuntoon. Varsinkin matalat taajuudet tuntuvat värähtelyinä kehossa. Kuulokkeiden kaiutinelementit ovat todella pieniä, joten tuntoaistillinen kokemus jää uupumaan kuulokkeita käyttäessä. Voimaa ilmaisevat äänielementit ja matalat taajuudet saavat kuuntelijan tuntemaan sisäistä vahvuutta (Hsu, Li, Nordgren, Rucker & Galinsky 2014).

Elokuvan pääjulkaisuformaatti on lähtökohtaisesti elokuvateatteriesitys, jonka etuja muihin katseluformaatteihin ovat iso valkokangas, yhteisöllisyys sekä – ehkä merkityksellisimpänä – äänentoiston laadukkuus ja kaiutinkonfiguraatio. Vaikka yleisen näkemyksen mukaan elokuva olisi hyvä miksata pääjulkaisuformaatin tapaisella äänentoistolla, käyttäessä ainoastaan yhtä monitorointiformaattia tekijä tottuu kuulemaansa. Tällöin työstettävän elokuvan ääniraidan analysointi vaikeutuu, ja sen aiheuttaman tunnekokemuksen merkitys vähenee. Elokuvan äänijälkituotantoa tehdessä äänisuunnittelija kuulee elokuvan useita kymmeniä, ellei satoja, kertoja. Kun työskentelee enimmäkseen kuulokemonitoroinnilla, tarjolla on odottamaton etu: tekijän on helpompi samaistua elokuvan aiheuttamaan tunnekokemukseen, kun miksauksen kuulee välillä kaiuttimista.

### 4.1 Kuulokemonitoroinnin tarkkuus ja immersiiivisyys

Äkillisten, odottamattomien ja hätkähdyttävien äänten kokeminen voimistuu binauralisoitua kuulokemonitorointia käyttäessä. Oli kyseessä sitten odottamaton kova ääni, stereokuvassa yllättävästä suunnasta tuleva ääni, tekijän virhe tai äänisuunnitelmallinen keino yrittää yllättää katsoja, kuulokkeilla työskennellessä yllätyksen kokemus vahvistuu. Tämä todennäköisesti johtuu niin kuulokkeiden tarjoamasta dynamiikasta sekä tekijän tottumattomuudesta binauralisoituun kuunteluun. Tästä syystä voi joutua helpommin kokemaan exit sign effectin. Opinnäytetyöhön liittyvän äänisuunnitteluprosessin aikana joutui useasti katsomaan taakse, kun ei ollut varmuutta kuuluiko jokin ääni projektin audioraitaan vaiko oikeaan maailmaan.

Kuulokemonitorointi paransi työskentelyn tarkkuutta. Jokainen taajuus on tärkeä, ja halutut äänenvoimakkuudet, tarkat automaatiot, stereokuvan immersiiivisyys jne. rakentavat yhdessä elokuvan ymmärrettävyyttä katsojalle. Elokuvaääni on parhaimmillaan silloin, kun se on katsojalle immersiiivinen. Tätä auttavat juuri kaikki pienimmätkin yksityiskohdat, jotka ovat helppoja huomata kuulokkeilla monitoroidessa.

Kuulokkeista itsestään kuuluvat mekaaniset äänet ovat helposti sekoitettavissa kuunneltuun sisältöön. Elokuvaa työstäessä – ja jopa pelkästään katsellessa – tekijän pää ei pysy paikallaan koko aikaa. Pään asennon vaihtuessa kuulokkeet ja sen johto liikkuvat, joiden seurauksena kuulokkeista kuuluu esimerkiksi pehmeitä narahduksia. Tämä johti kohtausten tarpeettomaan tarkisteluun virheiden eliminoinnin varalta. Jos kohtausta kuunneltaessa virheeltä vaikuttanut ääni toistui uudestaan eri ajoituksella, joutui kohtausta tarkistamaan useita kertoja. Äänisuunnitteluprosessin loppuvaiheessa kuulokkeiden mekaaniset äänet olivat helpommin erotettavissa kuunneltavasta sisällöstä, mutta poikkeavuuksia tarkoitusta äänisignaalista ei voinut jättää tarkistamatta välttääkseen lopullisen ääniraidan virheet. Tämä prosessi hidasti työskentelyä.

#### **4.2 Binauralisoidun kuulokemonitoroinnin mahdollistama työnkulku**

Tekijälle uusi monitorointiformaatti tuo haasteita projektin työnkulkuun. Ongelma ei liity ainoastaan binauralisoituun kuulokemonitorointiin, sillä totutusta vaihtaminen poikkeavaan työtapaan tarkoittaa aina erityishuomiota valmistautumiseen. Monitorointiketjun muodostaminen, työtapaan tottuminen ja uuteen monitorointiformaattiin luottaminen vievät aikaa, jota usein projektien suunnitelluissa toteutusaikatauluissa ei ylimääräistä ole. Työskennellessä oppii parhaiten, mutta lopullisen työn laadun varmistuksen saa vasta valmista elokuvaa kuunnellessa esitystarkoitukseen käytettävästä monitorointiformaatista. Tällöin ei usein ole enää mahdollisuutta virheiden korjauksiin, joten muutos työtavassa on riski. On kuitenkin huomioitava, että opinnäytteen aikana kaikki päätökset elokuvan lopullisen ääniraidan suhteen tehtiin binauralisoitua kuulokemonitorointia käyttäen tutkimustulosten integriteetin varmistukseksi; ammattityöskentelyolosuhteissa näin ei tarvitse toimia.

Binauralisoitu kuulokemonitorointi mahdollistaa työpisteen joustavan liikuttelun, jota voi luovasti soveltaa myös tuotannon eri vaiheisiin. Elokuvan leikkaus ja äänen jälkituotanto tapahtuvat nykystandardin mukaan toisista erillään, vaikka työvaiheiden synergiaa lopputuloksen parantamiseksi voisi hyödyntää. Äänen jälkituotanto nykypäivän standardeilla alkaa useimmiten vasta, kun leikkaus on koko elokuvan pituudelta valmis. Äänisuunnittelijalle tulee usein vastaan oman työnsä kannalta haasteita, jotka voisivat olla ratkaistavissa lisäkuvaleikkauksella. Usein kuvaleikkauksen muutoksille ei ole aikaa, ja – jos aikaa on – niistä kommunikointi tehdään usein esimerkiksi sähköposteilla, viesteillä tai puhelinsoitoilla. Jos äänisuunnittelija työskentelee leikkaajan kanssa samassa tai lähellä olevassa tilassa, voi haasteiden noustessa esiin kohtauksista keskustella kasvotusten. Tällöin leikkaaja ja äänisuunnittelija voivat vapaammin esittää mielipiteitään ja lähettää versioita helpommin edestakaisin lopullisen elokuvakokonaisuuden parantamiseksi.

Yksi ehdotettu työnkulku leikkauksen ja äänen jälkituotannon yhtäaikaiseen työskentelyyn voisi olla, että äänen jälkituotanto alkaa heti ensimmäisen kohtauksen valmistuttua leikkauksesta. Leikkaajan tottumusten mukaan yksittäisten kohtauksien työstöön usein palataan, kun elokuvan kokonaisuus alkaa hahmottua. Tästä syystä tiettyjen leikkaajien kanssa tämä ehdotettu työnkulku saattaa aiheuttaa ongelmia, mutta ei estä sitä. Työnkulkua voisi kuitenkin soveltaa esim. animaatioiden suhteen, joissa yleinen käytäntö on olla animoimatta mitään turhaa. Tällöin äänisuunnittelijan mielipiteet saattavat nousta merkittävään rooliin elokuvan rytmin ja kokonaisrakenteen muodostuksessa.

Toinen ehdotettu työtapa on, että äänen jälkituotanto aloitetaan elokuvan ensimmäisen leikkausversion valmistuessa. Tällöin leikkaaja on jo tietoinen kuvatun materiaalin laajuudesta koko elokuvan pituudelta. Työvaiheet tekisivät yhteistyötä keskenään elokuvan dramaturgillisten keinojen löytämiseksi; leikkaaja käytettävissä olevan kuvamateriaalin ja äänisuunnittelija äänellisten keinojen kannalta. Teoriassa ehdotettu työnkulku tehostaisi kumpaakin tuotannon vaihetta niin ajallisesti kuin lopputuloksen kannalta.

Monesti leikkaaja halutaan kuvauksiin mukaan valvomaan kuvatun materiaalin katetta leikkauksen näkökulmasta; myös kuvattu materiaali tulee leikkaajalle tutuksi jo ennen leikkausprosessin alkua. Tällaista työnkulkua voisi soveltaa myös

äänisuunnittelijalle. Äänitetyn materiaalin laatu on helppo tarkistaa binauralisoidulla kuulokemonitoroinnilla jo kuvausten yhteydessä, ja mahdollisiin epäkohtiin voi puuttua jo aikaisessa vaiheessa. Äänisuunnittelija pystyy avustamaan äänitysosastoa kuvauksissa mahdollisten ongelmien syntyessä. Kuvausten sujuessa ongelmitta ääniosaston kannalta, äänisuunnittelija voi itse äänittää äänijälkituotantoa helpottavia elementtejä. Myös itse kuvauslokaatiot voivat inspiroida äänisuunnittelua; tällaista inspiraatiota voi toisinaan olla vaikea löytää studiossa istuessa.

Näitä kolmea ehdotettua binauralisoidun kuulokemonitoroinnin mahdollistamia työnkulun tehostamistapoja kokeiltiin kenttätutkimuksen aikana. Aikataulullisten haasteiden takia työnkulkuehdotelmien koko potentiaalia ei ollut mahdollista selvittää. Työtavat nähtiin auttavan tuotannon aikataulua ja lopputulosta, mutta niiden kokonaisvaikutuksen laajuutta on vaikea arvioida. Opinnäytteen kenttätutkimuksen pääpaino on äänen jälkituotannossa, joten työnkulun tehostaminen binauralisoidulla kuulokemonitoroinnilla muissa tuotannon vaiheissa vaatii lisätutkimuksia. Ehdotettuja työnkulkuja on mahdollista käyttää tietyissä määrin myös ilman binauralisoitua kuulokemonitorointia, mutta tällöin niiden koko potentiaalia ei saa hyödynnettyä.

### **4.3 Dialogin editointi ja miksaaminen**

Dialogin editointi sekä myöhemmin miksaus kuulokkeilla johti dialogin vähätransienttiseen lopputulokseen, jossa dialogin äänenvoimakkuus oli suhteellisen hiljainen kaiuttimista kuunneltaessa. Tämä saattaa vaikeuttaa dialogin ymmärtämistä. Syitä tähän lopputulemaan saattoivat olla puheen helpompi ymmärrettävyys kuulokkeilla monitoroituna ja elokuvan tyylillinen ilmaisu. Elokuvan tyyli on taiteellinen, ja dialogia – varsinkin huulisynkattua dialogia – elokuvassa on vähän. Kun puhujan suun liikkeet eivät ole nähtävissä, vaikeuttaa se puheen ymmärtämistä. Elokuvan tyyli ei myöskään ollut dialogivetoinen, minkä takia muut dramaturgian keinot saattoivat osittain nousta hallitsemaan dramaturgiaa myös äänisuunnittelussa.

Äänisuunnitteluprosessin aikana dialogin editoimiseen palattiin kerta toisensa jälkeen. Peruseditoimisen, -korjaamisen ja -putsaamisen jälkeen dialogia oli vaikeaa saada istumaan saumattomasti äänisuunnittelun kokonaiskuvaan. Kaikki pienetkin äänitystilanteesta johtuvat ja editoinnin aikana ilmaantuneet epäpuhtaudet olivat helppoja huomata miksausken kokonaiskuvasta. Näitä virheitä oli joko vaikeaa tai jopa lähes mahdotonta huomata kaiuttimista kuunneltuna. Kuulokkeilla työskenneltäessä tämä johti tavanomaisesta äänisuunnitteluprosessista poikkeavaan lisäeditoimiseen ja -korjailuun. Dialogin saaman lisähuomion ansiosta sen soundi ja on tavanomaista parempi, ja se istuu äänisuunnittelun ja miksausken kokonaiskuvassa erityisen hyvin.

Dialogin tiläänen puuttumista oli äänisuunnitteluprosessin aikana vaikeampi huomata kuulokkeilla, kuin se oli kaiuttimista. Tämä todennäköisesti johtuu kuulokekuuntelun tarkkuudesta. Dialogileikkauksen aikana dialogista poistetaan äänitystilanteessa vallitseva tilääni siihen pisteeseen asti, kuin se on mahdollista. Tämä lisää mahdollisuuksia hallita kohtauksen äänisuunnittelun kokonaisuutta. Kuulokkeilla työskennellessä on vaivatonta kuulla kaikki dialogiraitaan jääneet vihjaukset äänitystilanteen tiläänestä. Itse dialogin kaiuttaminen tapahtui suunnitellusti äänisuunnittelun loppuvaiheilla, eikä se ollut vaarassa unohtua äänisuunnitteluprosessin aikana. Dialogikaiun puuttumisen huomaamattomuus on kuitenkin huomioitava, ettei kuulokkeilla työskenneltäessä tarvittavan voimakas tilääni jää puuttumaan. Tällöin dialogista tulee liian kuivaa, elokuvan immersiiivisyys vähenee ja taideteknilliseltä näkökulmalta lopputuloksen tuotantoarvo on heikompi. Kun dialogiin lisää tilääntä, on sen merkitys helpompaa kuulla kuulokkeilla kuin kaiuttimista; tiläänen voimakkuutta, sävyä, vivahteita ja muita yksityiskohtia on helpompaa analysoida kuulokkeilla.

Kuulokkeilla työskennellessä room tonen kuuluvuus oli kaiutinkuunteluun verrattuna huomattavasti isompi. Kaikki äänisignaalit, joissa oli joko kohinaa tai kohinan tapaista ääntä, kuului miksausesta läpi epänormaalin paljon. Tämä johti miksausessa room tonen niin alhaiseen äänenvoimakkuuteen, ettei se enää palvelut käyttötarkoitustaan. Lopulta room tonea ei käytetty äänisuunnittelussa lainkaan, mikä vuorostaan johti dialogin tarkempaan editoimiseen.

#### 4.4 Miksaus ja masterointi

Kuulokkeiden erinomaisen erotuskyvyn ja laajan dynaamisen arvoalueen vuoksi on helppoa kuulla todella hiljaisetkin äänet. Tämän takia ambienssien rakentaminen onnistuu pienilläkin SPL-voimakkuuksilla. Jo opinnäytetyötä aloittaessa hypoteesina oli, että ambienssit ja muut hiljaiset äänet tulevat jäämään liian hiljaiselle elokuvan kokonaisuudessa kuulokkeilla työskennellessä. Elokuva tehtäessä tavoitteena oli saada kansallisesti ja kansainvälisesti varteenotettava teos niin taiteellisesti, teknisesti kuin taiteellisteknisesti. Ambienssien mahdollista liian hiljaista äänenvoimakkuutta vältellen ongelmaa yritettiin kompensoida etukäteen pitämällä ambienssien äänentaso loppuesitysformaatin kannalta tarpeeksi korkealla, käyttäen apuna esimerkiksi mittarimonitorointia ja aiemman kokemuspohjan tuomaa arviointikykyä ambienssien voimakkuudesta. Mittarimonitorointi ja aiempi kokemus ovat arvokkaita viitteellisiä työkaluja, mutta jokainen äänisuunnittelu on elementeiltään erilainen; tärkeintä tekijälle on luottaa omiin korviinsa. Kompensoinnista huolimatta ambienssit jäivät hieman haluttua matalammalle äänentasolle kokonaisuudesta arvioitaessa kaiuttimista.

Foley-äänien tarkka editointi ja niiden äänenvoimakkuuksien arvioiminen on kuulokkeilla monitoroitaessa vaikeaa. Äänitettyjen foley-äänien tekemisen ja äänittämisen laadun taso on paljon selkeämmin erotettavissa kuunneltaessa kuulokkeilla kuin kaiuttimista. Myös transienttien – kuten askeleiden – tarpeeksi tarkka synkkaaminen kuvaan on erityisen vaikeaa. Kuulokkeilla transienttien saaminen vastaamaan kuvan ajoituksia vaatii subframe-tasosta tarkkuutta, kun taas kaiuttimilla kahden frame-yksikön tarkkuus riittää vastaamaan visuaalista representaatiota. Foley-äänien kerrostaminen muilla äänillä on kuuloketyöskentelyssä erityisen helppoa; tämä johtuu todennäköisesti kuulokkeiden tarjoamasta tarkentuneesta yksityiskohtien erotuskyvystä.

Musiikin yksittäiset elementit ovat helposti erotettavissa muusta kuunnellusta sisällöstä kuulokemonitoroinnilla. Myös musiikin aloitus- ja lopetuspaikkojen merkitys kohtauksissa kasvaa. Elokuvan musiikki miksattiin kenttätutkimuksen aikana yksittäisistä raidoista, ja kaikuraidat toimitettiin elokuvan miksausprojektitiedostoon erikseen. Suurin osa musiikista oli ajoitettu elokuvaan jo sävellysvai-

heessa, mutta toisinaan musiikki rakennettiin äänitetyistä elementeistä vasta elokuvan miksausprojektissa. Tällainen työkulku takasi mahdollisimman ison kontrollin musiikin miksauseseen osana elokuvan ääniraidan kokonaisuutta. Kuulokkeiden tuoma yksittäisten musiikkielementtien erottelukyky saattaa tuoda haasteita toimittaessa musiikkitiedostoja perinteisellä tavalla elokuvan miksausprojektiin; musiikki usein toimitetaan joko soitinryhminä tai kokonaisuutena stereoforfaatissa. Jos musiikki on jo masteroitu ennen kuin se toimitetaan elokuvan miksauseseen, sen muokkaamiseen elokuvan miksausta varten on todella vähän kontrollia. Elokuvaäänen miksaamisen kannalta mahdolliset ongelmat musiikki-raidoissa saattavat kuulostaa merkityksellisimmiltä kuulokkeista kuin kaiuttimista. Tämä saattaa johtaa lisätyöhön, jonka merkitys elokuvan lopullisessa ääniraidassa on vähäinen.

Erittäin matalien taajuuksien arvioiminen kuulokkeilla on vaikeaa ja tietyissä tapauksissa mahdotonta. LFE-kanavan päätarkoitus ei ole kuulua, vaan tuntua värähtelyinä kehossa. Tämän takia erittäin matalien taajuuksien arviointi oli äänisuunnitteluprosessin aikana täysin mittarimonitoroinnin varassa, eikä varmuutta äänenvoimakkuuksien tarkasta kokonaisvaikutelmasta voinut saada ilman kaiuttimia. Päätös LFE-kanavan kokonaisvoimakkuudesta tehtiin mittarimonitorointiin perustuen, ja se onnistui hyvin.

Lopullisen ääniraidan masterointi nousi haasteeksi pelkällä kuulokemonitoroinnilla. Elokuvan loppuesitysformaatti ei ollut kuulokkeisiin pohjautuva kuuntelu, joten masteroinnin onnistuminen riippuu täysin henkilökohtaisen HRTF-tiedoston, sen purkamisen, tekijän luoton kuulokkeiden kuunteluprofiiliin sekä binauralisoidun kuuntelun kalibroinnin ja hienosäädön onnistumisesta. Elokuvan lopullinen ääniraita äänitetään elokuvan läpi ennen kuunteluketjun binauralisointia sekä mahdollista ilmaamista. Masteroidessa binauralisoidulla kuulokemonitoroinnilla tulee luottaa täysin omaan monitorointiketjuunsa. Opinnäytetyön aikana elokuvan masterointi onnistui hyvin. Työvaihe toteutettiin aikaisempaan kokemuspohjaan perustuen, ja se ei vaatinut kaiutinpohjaisesta monitorointiketjusta poikkeavia työskentelymetodeja.



Ennen äänisuunnitteluprosessin alkua oli odotettavissa, että head tracking -mahdollisuuden puuttuminen tuottaisi kenttätutkimuksen aikana ongelmia; äänilähteen lokalisointia auttaa äänen sävy muutokset, jotka johtuvat vartalon, pään ja korvien asennon muutoksista suhteessa näennäisen äänilähteen sijaintiin. Virtuaalikaiutinmonitoroinnin kuuntelupisteen kääntäminen oli mahdollista manuaalisesti, mutta reaaliaikaisesti pään liikkeiden mukaan kuuntelupisteen kääntämismahdollisuuden puuttuminen ei johtanut työskentelyn rajoitukseen. Se toi ajoittain jopa etuja: tarkkaan kuunnellessa tekijä yleisesti tapaa kääntää katseensa alaspäin, jolloin päälaki osoittaa kohti etuseinää. Kaiuttimista kuunnellessa tällaisessa asennossa äänisignaalin ominaisuudet muuttuvat, koska äänisignaali ei kulje samaa reittiä korviin kuin katsojan oletetaan pitävän elokuvaa katsellessaan. Tämä vaikuttaa äänen ominaisuuksiin monella eri tavalla, ja ääntä on vaikeampi analysoida luotettavasti. Binauralisoidussa kuulokemonitoroinnissa äänisignaalin saama impulssi pysyy stabiilina, ja täten ääniraita kuulostaa samalta pään asennosta riippumatta.

Stereokuvan kokonaisuutta arvioitaessa kaiuttimista tekijä tapaa vaihtaa kuuntelupaikkaa studiossa. Näin elokuvaa voi arvioida paremmin suhteessa elokuvateatterin eri istumapaikkojen välillä. Aural ID -pluginissa kuuntelupisteen sijaintia ei voi muuttaa suhteessa koko kaiutinkonfiguraatioon, vaan se pysyy pallokoordinaatiston keskipisteessä. Elokuvan lopullisen ääniraidan suhteen tällaisen ominaisuuden puute ei vaikuttanut oleellisesti, mutta kenttätutkimuksen aikana ominaisuutta kaipasi.

## 5 POHDINTA

Ammatikseen audion kanssa työskentelevät käyttävät jatkuvasti enemmän binauraalia äänitysteknologiaa. Hyvälaatuisten plugin-pohjaisten binauralisointien ja luonnolliselta kuulostavien kuulokerenderöintien kehittyessä täysin kuuloke-monitorointiin pohjautuva työnkulku on jatkuvasti yhä realistisempaa.

Erittäin matalien taajuuksien tarkka analysointi kuulokkeilla on toistaiseksi lähes mahdotonta. Studio-olosuhteissa LFE-kanavan toisto erikseen subwoofer-kaiutimesta on tällä hetkellä monitoroinnin kannalta luotettavin ratkaisu. Esimerkiksi liikkuvan ja kotityöpisteen kohdalla tämä on ongelmallista, koska äänitaajuuksista erittäin matalat aiheuttavat eniten haittaa työpisteen lähiympäristöön. Haptisiin reseptoreihin syötetty signaali, joka ajetaan projektiedoston LFE-kanavalta esimerkiksi tekijän istuimeen tai ylle puettavaan asusteeseen, saattaa olla ratkaisu ongelmaan. Tällaisen työnkulun luotettavuus vaatii lisää tutkimuksia.

Opinnäytetyön aikana käytetyn teknologian valossa äänisuunnittelijalle ideaalissa ja mahdollisimman halvalla toteutetussa kotistudiossa olisi iso näyttö videokuvalle, vähintään kaksi näyttöä projektinäkymälle ja plugineille, henkilökohtaiseen HRTF:ään perustuva binauralisointitekniikka ja ammattityöskentelyyn tarkoitettut kuulokkeet. Jos tila ja sen ympäristö ovat tarpeeksi hiljaisia, on työ mahdollista tehdä suurimmaksi osaksi kriteerien täyttämässä tilassa.

Opinnäytetyön toteutuksesta saadun kokemuksen mukaan kaiutinpohjaista työskentelyä ei ihanteellisessa tapauksessa jätettäisi kokonaan pois elokuvan äänijälkityötä tehdessä. Vaikka ääntä on helpompi analysoida kuulokkeista, on sen kokeminen vaikuttavampaa kaiuttimista. Tästä syystä vaikuttavin elokuvan katsomis- ja kuulemiskokemus katsojalle tarjoutuu elokuvateatterimaisessa toistoympäristössä, ja järkevin tapa viimeistellä elokuvan ääniraita on samankaltaista äänentoistoa hyödyntäen. Työn tulokset ehdottavat, että taloudellisin tapa äänisuunnitteluun niin tekijän kuin tuotannon kannalta on käyttää binauralisoitua kuuloke-monitorointia 80–90 % elokuvaäänen jälkituotannon kestosta.

Nykyisellään elokuvaäänen jälkituotantoon – varsinkin miksaukseen – tarvittavien studio-olosuhteiden rakentaminen on kallista. Jokainen tekijä tarvitsee työvaiheelleen sopivan tilan. Studioon liittyvät kulut kattaakseen ja elantonsa ansaitakseen tekijä oletettavasti työskentelee kokoaikaisesti studiossa. Binauralisoitu monitorointitekniikka mahdollistaa resurssien yhdistämisen useamman tekijän kesken yhteisten työtilojen rakentamiseksi. Tällainen studiokompleksi voisi ihan-teellisessa tilanteessa koostua elokuvamiksaamosta, foleyn ja muiden jälkiääni-tettävien elementtien äänitystilasta sekä hiljaisista työskentelytiloista. Itse stu-dioita tarvitsisi ainoastaan tarpeen vaatiessa, ja suurin osa työskentelystä tapah-tuisi hiljaisilla työpisteillä binauralisoitua kuulokemonitorointia käyttäen. Sen li-säksi, että tiloissa voisi työstää monia eri tuotantoja samanaikaisesti, se työllis-täisi enemmän tekijöitä, helpottaisi vertaisarvioinnin mahdollisuutta ja laskisi kyn-nystä päätyä työskentelemään elokuvaäänen jälkituotantoon. Koska tiedostojen lähettäminen ja vastaanottaminen on jo nykyään vaivatonta netin välityksellä, olisi tämän tapaisesta studiokompleksista mahdollista työskennellä taloudellisesti kilpailukykyisellä tavalla jopa kansainvälisesti.

Työpisteen liikuteltavuus on ehdottomasti isoimpia etuja, kun käyttää henkilökoh-taista HRTF:ää ja binauralisoitua kuulokemonitorointia. Tyypillisesti äänisuunnit-telijan työnkuva on aikamääreiden suhteen kiireinen, ja mahdollisuus työsken-nellä joustavasti etänä studioilta avaa uusia mahdollisuuksia. Äänisuunnittelija voi esimerkiksi työskennellä elokuvan leikkaajan kanssa samassa tilassa yhtäaikai-sesti palloellen versioita kohtauksista edestakaisin. Tämä nopeuttaa elokuvan valmistumista, ja vaikuttaa positiivisesti elokuvan lopputulokseen.

Äänisuunnittelu ja muut elokuvaäänen jälkituotannon vaiheet ovat tyypillisesti ti-lapuitteellisten tarpeiden ja työn tuotannollisen ajankohdan takia työnkuvaltaan eristäytyneitä. Binauralisoitu monitorointi mahdollistaa työskentelyn joustavasti tuotannon eri vaiheissa – aina esituotannosta tuotantoon ja jälkituotannon mui-den vaiheiden kanssa. Tekijän syrjäytymisen riski pienenee, ja vertaisarviointia mahdollistamat työvaiheet lisääntyvät.

Jatkuvasti yleistyvien kevyiden tuotantojen äänijälkituotanto hyötyisi binauralisoi-dusta työnkulusta. Niin reality-, mainos- kuin sometuohtantojen resurssien käyttö

tehostuisi joustavan kuuloketyöskentelyn ansiosta vaarantamatta lopullisen tuotoksen jälkeä.

Kuulokemonitoroinnilla työskentely mahdollistaa tarkan työskentelyn jopa alhaisilla äänenvoimakkuuksilla, jonka ansiosta audion kanssa työskentelevän kuulo on paremmin suojattu. Alkuun työskentely kuulokkeisiin pohjautuvalla monitorointiketjulla ei välttämättä tunnu intuitiiviselta, mutta jatkuvalla käytöllä luotto binauralisoinnin tarkkuuteen kasvaa vähentäen tarvetta tarkistaa työn lopputulosta kaiuttimista. Pitkäaikaisesti kuulokkeilla työskentelyn mahdolliset haitat vaativat lisätutkimuksia.

Binauralisoitu kuulokemonitorointi mahdollistaa nopean toimituksen välivaiheiden edistymisen tarkistukseen. Yleisesti on kaksi vaihtoehtoa, miten esimerkiksi ohjaaja saa kuullakseen elokuvan äänijälkitöiden nykyisen vaiheen: ohjaajalle lähetetään versio tai hän tulee studiolle kuuntelemaan sen. Jos ohjaaja tulee studiolle kuuntelemaan version, ei se usein ole tehokasta ajankäyttöä niin ohjaajalle kuin äänisuunnittelijallekaan. Äänisuunnittelijan lähettäessä version hän joutuu tekemään stereo downmix -version ohjaajalle. Tällöin ohjaaja ei kuule versiota tarkoitettussa formaatissa, ja äänisuunnittelija menettää aikaa ylimääräisen downmix-version tekemiseen. Binauralisoidulla monitorointiketjulla version voi ottaa ulos binauralisoinnin jälkeen, jolloin ohjaaja voi kuulokkeilla kuunnella version halutussa formaatissa säästäen aikaa ja parantaen toimitetun version integriteettiä. Jos äänisuunnittelijan päämonitorointiformaatti on binauralisoitu kuulokemonitorointi, ei versiolle tarvitse tehdä ylimääräisiä toimenpiteitä ottaessa sitä ulos. Version prosessointiin voi helposti vaihtaa jopa ohjaajan henkilökohtaisen HRTF:n, jos sellainen löytyy.

Monikanavaisten formaattien yleistyessä myös sisällön loppukäyttäjien keskuudessa, binauraalin esitysformaatin käyttö voisi yleistyä. Nykysisillään kuulokkeiden käyttö pelkän audion tuotannoissa on jo yleisin loppukäyttäjien kuunteluformaatti. Varsinkin puhelimesta sisältöä kuunnellaan paljon kuulokkeilla. Mahdollisuus kuluttaa audiovisuaalista sisältöä monikanavaisessa formaatissa kustannustehokkaasti on varmasti kiinnostava mahdollisuus monelle. Jokaiselle loppukäyttäjälle ei ole toistaiseksi realistista saada käyttöön henkilökohtaista HRTF-renderöintiä. Kulutuskäyttöön voi kuitenkin toimittaa version, johon on jo itsessään renderöity

yleis-HRTF:ään pohjautuva binauralisointi. Puhelimiin olisi myös mahdollista sisällyttää ohjelmisto, jonka kautta kuunneltaessa sisältö binauralisoidaan kuulokemonitorointia varten. Tämä yksinkertaistaa mahdollisuutta kuulla kulutettava sisältö monikanavaisessa julkaisuformaattissa.

Binauralisoitua kuulokemonitorointia voi hyödyntää itse studion heijastusten ja kokonaistaajuusvasteen kalibrointiin. Kun virtuaalstudio on kalibroitu ja hienosäädetty vastaamaan referenssistudiota mahdollisimman tarkasti, voi studiota kuunnella ilman heijastuksia ja HVAC-taustamelua. Binauralisoidun kuulokemonitoroinnin ja studion kaiutinmonitoroinnin välillä voi vuorotellen soittaa identtisiä äänisignaaleja ja liikeautomaatioita. Kuunneltuja signaaleja analysoidessa studion kaiutinkuuntelussa voi huomata pieniäkin väritymiä, joita eristämällä ja eliminoimalla studion kaiutinkuuntelua voi muokata luotettavammaksi.

## LÄHTEET

Mäkivirta, A. Aural ID -tuotekehitysjohtaja, Genelec. 2022. Haastattelu 13.10.2022. Iisalmi. Ei litteroitu.

Kuulon toiminta. Elacin. Luettu 12.12.2023.  
<https://elacin.fi/valintaopas/kuulon-toiminta/>

Aro, E. 2006. Tilaääni. Helsinki: Idemco Oy.

Liang, S., Xuan, X. & Yost, W. A. 2015. Dynamic binaural sound source localization with interaural time difference cues: Artificial listeners. ResearchGate huhtikuu 2015. Viitattu 16.1.2024. [https://www.researchgate.net/publication/276473132\\_Dynamic\\_binaural\\_sound\\_source\\_localization\\_with\\_interaural\\_time\\_difference\\_cues\\_Artificial\\_listeners](https://www.researchgate.net/publication/276473132_Dynamic_binaural_sound_source_localization_with_interaural_time_difference_cues_Artificial_listeners)

Zotkin, D. N., Hwang, J., Duraiswami, R & Davis, L. S. 2003. HRTF personalization using anthropometric measurements. Perceptual Interfaces and Reality Laboratory, Institute for Advanced Computer Studies (UMIACS), University of Maryland marraskuu 2003. Viitattu 1.2.2024.  
[https://users.umiacs.umd.edu/~dz/pbpslist/waspaa03\\_dz\\_final\\_v2.pdf](https://users.umiacs.umd.edu/~dz/pbpslist/waspaa03_dz_final_v2.pdf)

Holman, T. 2008. Surround Sound. Up and Running. 2. uud. PAINOS. Burlington: Elsevier, Inc.

Olive, S. E. 2022. The Perception and Measurement of Headphone Sound Quality: What Do Listeners Prefer?. Acoustics Today 2.3.2022. Viitattu 21.12.2023. <https://acousticstoday.org/wp-content/uploads/2022/03/The-Perception-and-Measurement-of-Headphone-Sound-Quality-What-Do-Listeners-Prefer-Sean-E.-Olive.pdf>

Hsu, D. Y., Li, H., Nordgren, L. F. & Rucker, D. D. 2014. ResearchGate joulukuu 2014. Viitattu 3.2.2024. [https://www.researchgate.net/publication/274494682\\_The\\_Music\\_of\\_Power](https://www.researchgate.net/publication/274494682_The_Music_of_Power)