

Timo Kaleva

Äänekkyys Yleisradion televisiotoiminnassa

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.4.2011.

Työn valvoja:

Prof. Paavo Alku

Työn ohjaaja:

DI Jorma Laiho



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Timo Kaleva

Työn nimi: Äänekkyys Yleisradion televisiotoinnassa

Päivämäärä: 4.4.2011

Kieli: Suomi

Sivumäärä:13+73

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Professuuri: Akustiikka ja äänenkäsittely

Koodi: S-89

Valvoja: Prof. Paavo Alku

Ohjaaja: DI Jorma Laiho

Ohjelmien välisistä äänekkyystasovaihteluista on tullut merkittävä ongelma televisiotoinnassa. Yhtenä syynä tähän on signaalin huipputasoihin perustuva mittarointi, joka tulisi olla ainoastaan estämässä yliohtautumista ja säröytymistä. Huipputasonormalisointi on tehnyt mahdolliseksi myös äänekkyyskilpailun, jossa kaupalliset televisioimijat kompressoivat materiaalinsa äärimmäisyyksiin. Tämä on johtanut äänen laadulliseen heikkenemiseen ja dynamiikan kaventumiseen. Toinen syy on nykyiset tuotanto- ja jakeluprosessit, jotka on automatisoitu mahdollisimman pitkälle. Tästä syystä korvakuuloinen havainnointi on jäänyt harvinaiseksi ja näin ohjelmien välille on saattanut muodostua äänekkyystasoe-roja.

Ratkaisuksi audioalan ammattilaiset ympäri maailmaa kehittivät uuden mittarointitekniikan, joka mallintaa karkeasti ihmisen äänekkyysaistimusta. Mittari mahdollistaa helpon tavan yhtenäistää ohjelmien äänekkyystasot. Samalla huipputasonormalisoinnin väärinkäyttö tulee olemaan mahdotonta.

Tässä diplomityössä perehdytään äänekkyysnormalisointiin sekä mitataan ja analysoidaan Yleisradion televisio-ohjelmien äänekkyystasovaihteluja. Tulokset osoittavat ehdotonta uusien äänekkyysnormalisointitapojen tarvetta. Tässä työssä annetaan myös käytännön ratkaisukeinoja, miten eri järjestelmissä uudet menetelmät voitaisiin ottaa käyttöön. Kantaa otetaan niin teknisiin kuin taloudellisiin seikkoihin.

Avainsanat: Yleisradio, televisiotointa, äänekkyys, ITU-R BS.1770, EBU R 128, ratkaisukeinot

Author: Timo Kaleva

Title: Loudness in the broadcasting of YLE

Date: 4.4.2011

Language: Finnish

Number of pages:13+73

Department of Signal Processing and Acoustics

Professorship: Acoustics and Audio Signal Processing

Code: S-89

Supervisor: Prof. Paavo Alku

Instructor: M.Sc. (Tech.) Jorma Laiho

The overall inconsistency of programme loudness has become a notable problem in broadcasting. One reason for this is the signal peak value based monitoring, which should only be used for preventing overload and distortion. The peak normalisation has also made possible the loudness war, where commercial broadcasters are compressing their material to the extreme, leading to loss of sound quality and dynamics. Another reason is that current production and distribution processes have been automated as far as possible. That is why mixing by ear has become rare and programme loudness inconsistent.

As a solution, experts on audio around the world developed a new metering technique, which roughly models the human loudness perception. With the new meter it is easy to achieve uniform programme loudness level and the abuse of peak normalisation will become impossible.

In this thesis the concept of loudness normalisation has been acquainted and the TV programme loudness variations of YLE has been measured and analysed. The results show a definite need for adoption of the new loudness normalisation habits. In this thesis the practical solution proposals has also been given, which include how the new methods could be implemented in different parts of the broadcast system. Technical and also financial matters have being covered.

Keywords: YLE, broadcasting, loudness, ITU-R BS.1770, EBU R 128, proposed solutions

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Yleisradiossa, jossa ohjaajana toimi teknologiajohtaja Jorma Laiho. Työssä valvojana toimi Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitoksen professori Paavo Alku.

Haluan kiittää Yleisradiota ja erityisesti Jorma Laihoa mahdollisuudesta paneutua tähän erittäin mielenkiintoiseen diplomityöaiheeseen. Valtava kiitos Mikko Hahkiolle ja Raimo Sinkolle korvaamattomasta tuesta. Kiitokset kuuluu ehdottomasti myös Ossi Laineelle, Vesa Vaaralalle, Olli Sipilälle, Jimi Juolalle, Eero Arolle, Mikael Hartzellille, Erkki Keräselle, Pasi Paleniukselle, Hannu Halmeelle ja kaikille muille, jotka omalta osaltaan tukivat työn kehittymistä. Haluan kiittää myös Paavo Alkua työn kommentoinnista ja tarkastamisesta.

Suurkiitokset Kari Helmiselle ja Raimo Pykäläiselle, jotka ovat olleet avainasemassa mahdollisuuteeni tutustua Yleisradion tekniikkaan ja tätä kautta moniin mahtaviin ihmisiin. Olen ollut kesätöissä ja harjoittelijana Yleisradiossa korkeakouluopintojeni ajan, jolloin olen pystynyt tutustumaan televisio- ja radiotoimintaan lähes laidasta laitaan. Tämä on ollut erittäin merkittävässä roolissa diplomityön laajojen kokonaisuuksien hahmottamisessa.

Kiitokset myös vanhemmilleni niin henkisestä kuin taloudellisesta tuesta. Lopuksi haluan kiittää vielä rakasta vaimoani työn oikolukemisesta.

Helsinki, 24.3.2011

Timo Stephan Kaleva

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Lyhenteet ja terminologia	vii
1 Johdanto	1
2 Kuuloaistimus ja äänekkyys	4
2.1 Korvan rakenne ja ominaisuudet	4
2.1.1 Kriittinen kaista	5
2.1.2 Peittoilmiö	6
2.2 Äänekkyys	6
3 Aikaisempia tutkimuksia ja julkaisuja	10
4 Ääni Yleisradion televisiotoiminnassa	18
4.1 Äänen reitti tuotannosta loppukäyttäjälle	18
4.2 Äänimateriaalin siirtoformaatit	19
5 Suositukset ja työryhmät	21
5.1 ITU-R BS.1770-1	21
5.2 ITU-R BS.1771	25
5.3 EBU R 128	25
5.3.1 EBU Tech 3341	26
5.3.2 EBU Tech 3342	29
5.3.3 EBU Tech 3343	30
5.3.4 EBU Tech 3344	32
6 Äänekkyystutkimus Yleisradion televisiotoiminnassa	35
6.1 Mittausmenetelmien valinta	35
6.2 Mittausympäristön kehitys ja toteutus	36
6.3 Mittaustulosten analysointi	39
6.4 Mittausluotettavuus	46
6.5 Johtopäätökset	48
7 Ratkaisukeinot järjestelmätasolla	49
7.1 Automaattiset äänekkyysprosessorit lähetyshetjussa	49
7.1.1 Reaaliaikainen prosessointi	49
7.1.2 EBU:n suosittelema prosessointi	52
7.2 Tarkkailu ja tuotanto	53

7.2.1	Osto-ohjelmat	53
7.2.2	Suorat lähetykset	54
7.2.3	Tallenteet ja editointi	54
7.3	Medianhallintajärjestelmän ja D-keskuksen validointiautomaatiot . .	55
7.4	Lähetysautomaatioon liitettävä ohjelmakohtainen normalisointijärjestelmä	57
7.5	Äänekkyteen liittyvien metatietojen valinta ja lähetys	58
7.5.1	Dialnorm	58
7.5.2	Alasmiksauskeruimet	59
7.5.3	Dynamiikka-alueen hallinta	60
7.6	Äänekkyystasojen pitkäaikainen seuranta ja tilastointi	61
8	Yhteenveto	62
	Viitteet	64
	Liitteet	68
A	Mittaustuloksia	68
A.1	Kuvaaja äänekkyysmittauksesta	68
A.2	Kanavakohtaiset histogrammit	69

Lyhenteet ja terminologia

Lyhenteet

AAC	Advanced Audio Coding
AC-3	vrt. Dolby Digital (DD)
CCIR	Consultative Committee on International Radio
CSV	Comma-separated values
DAB	Digital Audio Broadcasting
dBFS	dB, reference to digital Full Scale
dBm	dB (1 mW)
dBTP	dB True Peak
dBu	dB (0,775 V)
DD	Dolby Digital
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRC	Dynamic Range Control
DRT	Dynamic Range Tolerance
DTS	Digital Theatre Systems
DVB	Digital Video Broadcasting
E-EDID	Enhanced Extended Display Identification Data
EBU	European Broadcasting Union
ECA	Expert Community on Audio
FLAC	Free Lossless Audio Codec
HD	High Definition
HE-AAC	High Efficiency Advanced Audio Coding
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
L_{eq}	Equivalent Sound Level
L_K	Loudness level, K-weighting
LFE	Low-frequency Effect
LRA	Loudness Range
LU	Loudness Unit
LUFS	Loudness, reference to digital Full Scale
MPEG	Moving Picture Expert Group
MSC	Music/Speech Control
MXF	Media Exchange Format
OIRT	Organisation Internationale de Radiodiffusion et Télévision
PCM	Pulse Code Modulation
PID	Packet Identification
PML	Permitted Maximum Level
PPM	Peak Programme Meter
RLB	Revised low-frequency B-weighting

SD	Standard Definition
SDI	Serial Digital Interface
S/PDIF	Sony/Philips Digital Interconnect Format
TP	True Peak
TS	Transport Stream
WAV (WAVE)	Waveform Audio File Format
VU	Volume Unit

Terminologia

dBFS

Digitaalisen äänisignaalin mittayksikkönä käytetään desibeliä suhteessa täyteen skaalaan, jolloin 0 dBFS tarkoittaa suurinta näytearvoa. [1] Kyseinen mittayksikkö ei kuitenkaan kerro äänisignaalin todellista huippua, vaan ainoastaan näytteiden suurimman arvon suhteessa täyteen skaalaan. Tästä syystä on mahdollista, että DA-muunnoksen (digitaali-analogi muunnos) jälkeen signaalin todellinen huippuarvo on korkeampi kuin suurin digitaalinen näyte. Tästä problematiikasta lisää luvussa 5.1.

dBm

Logaritminen mitta, jossa referenssitaso on 1 mW 600 Ω :n kuormalla. 0 dBm vastaa 0,775 V_{rms}. Yksikkö sekoitetaan monesti dBu:hun. [2]

dBu

Logaritminen mitta, jossa referenssitaso on 0,775 V_{rms} millä tahansa kuormalla. Eurooppalaisen yleisradiostandardin mukainen nimellistaso, jota myös Yleisradiossa käytetään, on +6 dBu:ta (1,55 V), mikä on tarpeellista tietää äänilaitteiden yhteensopivuuden kannalta. [2]

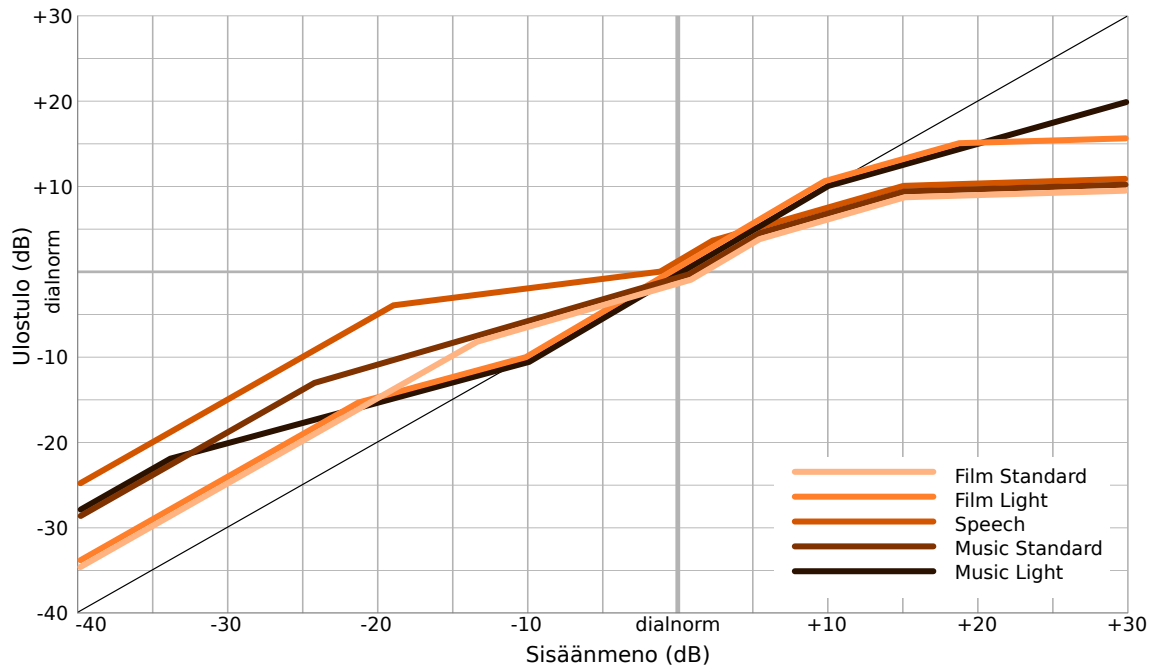
Dialnorm

Keskimääräinen puheen taso, dialnorm (engl. Dialogue normalisation), on yksi metatietoihin perustuvan normalisoinnin parametreista. Muun muassa Dolby Laboratories on liittänyt kyseisen parametrin omiin pakkausformaatteihinsa. Normalisoinnilla tarkoitetaan tässä tapauksessa tilannetta, jossa ohjelmien välisten puheosuuksien A-painotetut ekvivalenttitasot ($L_{eq}(A)$) ovat samoja. $L_{eq}(A)$ mitataan siis koko ohjelman pituudelta pelkästään puheosuuksista. Standardisoidun A-painotuksen taajuusvaste on esitetty kuvassa 6 sivulla 8. Mittauksessa ei mitata perinteiseen tapaan äänenpainetta suhteessa 20 μ Pa:iin, vaan elektronista signaalitasoa suhteessa digitaalisen täyden skaalan tasoon. Dialnorm-parametri esitetään desibelimuodossa suhteessa digitaaliseen täyteen skaalaan (dBFS). Lukuarvo on kokonaislukumuodossa -1:stä -31:een. Dialnorm-arvo -31 pitää vahvistuksen nollana ja arvo -1 vaimentaa ohjelmaa 30 dB:llä. Normalisointi suoritetaan joko dekooderin sisällä digitaalista signaalia kertomalla tai sitten dialnorm-arvolla ohjataan äänentoistolaitteiston toistovoimakkuutta erillisessä kontrollerissa. Normalisointi on mahdollista kytkeä myös pois päältä. [3] [4] [5] [6] [7]

Dynamiikka-alueen hallinta

Dynamiikka-alueen hallinta (DRC) on monissa metatiedot mahdollistavassa ääniformaatissa käytettävä parametri, jonka avulla pystytään välittämään dekooderille tietoa siitä, minkä tyyppistä materiaalia ohjelma sisältää. Tämän tiedon pohjalta

dekooderi valitsee oikean kompressiokäyrän, jolla dynamiikka kavennetaan kuunte-luolosuhteiltaan vaativampiin tiloihin sopivaksi, ja prosessoi äänen. Kompressiokäy-rävaihtoehtoja on viisi erilaista, mutta kyseisen parametrin voi asettaa myös arvoon "None", jolloin prosessointia ei suoriteta. Käyrät on esitetty kuvassa 1. Asteikossa keskimmäisenä on puhetaso (ks. dialnorm), jonka mukaan kompressiokäyrät mää-räytyvät. Muut asteikon arvot ovat desibelejä suhteessa dialnorm-arvoon. [6] [7]



Kuva 1: Dynamiikka-alueen hallinta parametreja vastaavat kompressiokäyrät.

En- ja dekooderi

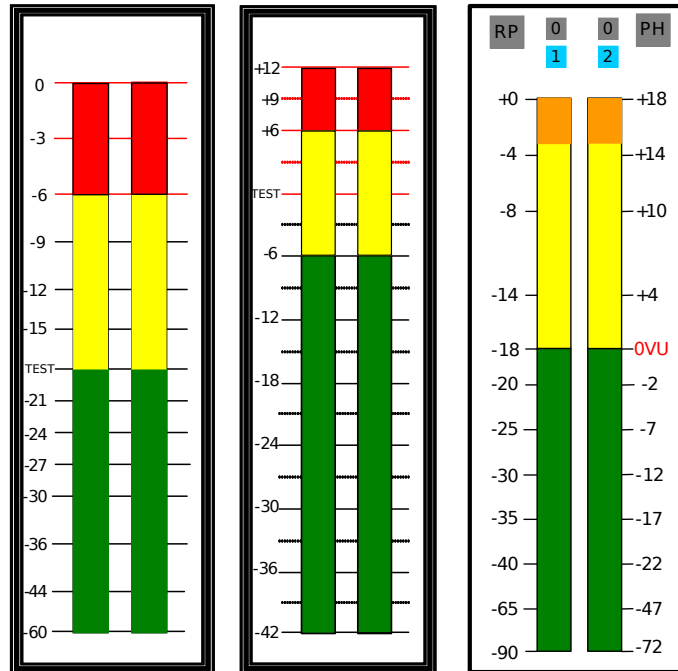
Enkooderilla tarkoitetaan laitetta, joka muuntaa informaation toiseen muotoon. Si-tä käytetään usein informaation tiivistämiseen tai muuttamiseen jonkin standardin kanssa yhteensopivaan muotoon. Dekooderi on laite, jolla voidaan muuttaa enkoo-dattu informaation takaisin alkuperäiseen muotoon. Poikkeuksen tekee enkoodaus, jossa käytetään häviöllistä tiivistystä. Näin osa informaatiosta menetetään, jolloin dekodattu informaatio vastaa vain osaksi alkuperäistä tiivistämätöntä informaatiota.

Näytehuippumittari

Näytehuippumittari (engl. Sample Peak Meter) näyttää digitaalisen signaalin näyt-teiden huippuarvoja, jotka esitetään yleensä digitaalisen täyden skaalan näytöllä desibeleissä (dBFS). Mittaria on havainnollistettu kuvassa 2. Skaala alkaa nolasta, joka tarkoittaa suurinta näytteen arvoa. Nykyaikaisissa editointiohjelmissä näyte-huippumittarit ovat erittäin suosittuja niiden suoraviivaisuuden johdosta. Kyseinen mittarityyppi löytyy myös Yleisradiossa paljon käytetystä Avidin editointityökalusta

(kuvan 2 oikea laita). Kyseisessä mittarissa on lisäksi myös VU-skaala, mutta mittari toimii täysin näytehuippujen mukaan. Joissain mittareissa skaala on voitu tehdä epäkäytännöllisesti 5-10 dB:n välein, jolloin esimerkiksi -6 tai -18 dBFS:n lukemia ei ole mahdollista järkevästi tarkkailla.

Näytehuippumittarien tarkkuus ei ole riittävä, koska näytteet eivät välttämättä osu äänisignaalin todellisen huipun kohdalle. Mittari näyttää siis todellista huippua matalampaa tasoa näytteiden perusteella, mikä on otettava huomioon riittävällä ylioheisuusvaralla.



Kuva 2: Erityyppisiä tasomittareita. Vasemmalla näytehuippu-, keskellä PPM- ja oikealla Avid-työasemista löytyvä huipputasomittari.

PPM-mittari

PPM-mittari (engl. Peak Programme Meter) ilmaisee määritelmän mukaan äänisignaalin hetkellisen huipputasoon. Perusominaisuuksiltaan PPM-mittarissa on nopea nousuaika ja hidas laskuaika. Nousu- eli integrointiaika on 5 tai 10 millisekuntia. Hidas laskuaika taas estää mittarilukeman nopean vaihtelun skaalan päästä päähän. Äänimateriaalin todellinen huippu (engl. true peak) ei yleensä ylitä PPM-mittarilukemaa 3 dB:iä enempää.

PPM-mittareita löytyy useilla eri skaaloilla, joita ovat muun muassa IEC 268-10 tyyppi 1 (Pohjoismaat), IEC 268-10 tyyppi 2a (BBC), IEC 268-10 tyyppi 2b (EBU), DIN - Pflichtenheft 3/6 sekä laitevalmistajien omat standardit. Tyypillisesti skaala on laaja; 40 dB - 60 dB. Eri mittareiden integrointiajat ja laskuajat vaihtelevat vain vähän. [1] [2] Pohjoismaista tuttua "Nordic Scale" mittaria on havainnollistettu kuvassa 2.

PPM-mittaria pitäisi paremminkin kutsua QPPM-mittariksi (engl. Quasi Peak Programme Meter), koska se ei mittaa äänimateriaalin todellista huippua. Kyseisessä mittarissa on äärellinen reaktioaika, joten se antaa ainoastaan näennäisarvoja. Alle 5 tai 10 millisekunnin signaalihiiput eivät näy näissä mittareissa oikein tai ollenkaan. [8]

Signaalin todellinen huipputaso

Signaalin todellisella huipputasolla tarkoitetaan aaltomuodon saavuttamaa suurinta positiivista tai negatiivista arvoa jatkuvassa aika-alueessa. Käytännössä kaikki huipputasomittarit ovat joko digitaalisia näytehuippumittareita tai PPM-mittareita. Näytehuippumittareissa mitattava signaali koostuu ainoastaan jatkuvan aika-alueen näytteistä, joten todellista huippua ei niistä saada. Näin ollen mittareiden näyttämää huipputasoa ja todellista huipputasoa ei saa sekoittaa.

Tässä työssä esitellään uusi mittarityyppi, joka laskee digitaalisesta signaalista näytehuippumittaria tarkemman approksimaation todellisesta huipputasosta. Kyseisestä mittarista puhutaan kirjallisuudessa todellisen huipun mittarina (engl. True Peak meter), mikä on harhaanjohtava käytäntö. Tästä syystä käytän kyseisen uuden mittarin ja sen antamien arvojen yhteydessä aina lainausmerkkejä, jotta välttään sekaannukselta todellisen huipun ja "todellisen huipun" välillä.

Stereo

Sanan stereofonia synonyymi, joka tarkoittaa useamman kuin yhden äänikanavan hyödyntämistä äänen toistossa, tallennuksessa tai siirrosta. Näin yksikanavaisesta tilanteesta poiketen syntyy vaikutelma äänen vapaasta tulosuunnasta. Sana stereofonia juontaa juurensa kreikan kieleen, jossa stereós (kreik. στερεός) tarkoittaa kiinteää ja foní (kreik. φωνή) tarkoittaa ääntä. Sanaa stereo käytetään kuitenkin yleisesti, kun viitataan kaksikanavaisen ääneen, joka on siis pienin mahdollinen kanavamäärä suuntavaikutelman synnyttämiseen. [5] [9]

Tilääni

Tiläänessä hyödynnetään useampaa kanavaa, jolloin äänimaailma vastaa paremmin todellista tilannetta ja näin ääni voi paikallistua lateraalitasossa mihin tahansa. Yleisin monikanavajärjestelmä sisältää viisi pääkanavaa (L,R,C,Ls,Rs) ja yhden matalille taajuuksille tarkoitettun tehostekanavan (LFE). Tämän tyyppistä kanavaryhmää kutsutaan 5.1-järjestelmäksi. Toinen yleinen monikanavajärjestelmä on 7.1-järjestelmä, jossa pääkanavia on seitsemän.

VU-mittari

VU-mittari (engl. Volume Unit) ilmaisee äänisignaalin keskimääräisen tason. Mittari keksittiin alun perin Bellin laboratorion ja amerikkalaisten lähetystoimijoiden yhteistyön tuloksena. Standardi siitä tuli vuonna 1939. Käytännön mekanismin ja ballististen ominaisuuksien johdosta mittari on suhteellisen hidas ja toimii tästä

syystä keskiarvostavasti, jolloin pienet impulssimaiset muutokset eivät näy. Mittari sopii tästä syystä melko hyvin äänekkyystason suurpiirteiseen visuaaliseen havainnointiin [10]. Mittari vaatii ääntä täyteen poikkeamaan päästäkseen yli 300 millisekuntia, joka on lähellä ihmiskorvan äänekkyyshavainnon integrointiaikaa. Normaalisti äänimateriaalin todelliset huippuarvot ovat 6-12 dB:iä korkeammalla kuin VU-mittarin osoittama lukema. [1]

Ylös- ja alasmiksaus (engl. up-/downmix)

Ylösmiksaamisella tarkoitetaan äänikanavien määrän lisäämistä esimerkiksi kaksikanavaisesta stereoäänestä monikanavaiseksi tilääneksi. Alasmiksaamisella tarkoitetaan äänikanavien määrän vähentämistä. Ylös- ja alasmiksaus voidaan tehdä kuluttajapäässä signaalianalyysiin, erilaisiin algoritmeihin tai metatietojen mukana välitettäviin kertoimiin perustuen. AC-3-formaatin metatiedoissa on mahdollista lähettää "upmix"- tai "downmix"-kertoimet, joiden avulla kanavien yhdistäminen tai erottaminen tapahtuu tuottajan tai jakelijan haluamalla tavalla dekooderissa mahdollisesti tehtävän kompression jälkeen. [7] [11]

1 Johdanto

Äänekkyystasoeroihin liittyviä palautteita tulee Yleisradioon katsojilta ja kuuntelijoilta tasaisena virtana. Yksi tyypillinen palaute liittyy varsinaisten ohjelmien välissä olevien välikkeiden äänekkyystasoeroihin. Äänekkyystasoeropalautteet liittyvät niin ohjelmien sisäisiin kuin ohjelmien välisiin vaihteluihin. Myös puheen ja musiikin väliseen balanssiin kiinnitetään huomiota. Alle on poimittu näistä palautteista muutama tyypillinen esimerkki.

“Voi saamari näitä tv-äänen tasoeroja. Tässä vain yksi esimerkki: Tiistai-iltana Ajankohtaisen kakkosen jälkeen tuli taas joku ylen tulevan ohjelman mainos. JA MILLÄ VOLYYMILLÄ! Ihan törkeällä! Varmaan naapurit hyppäs kattoon.”

“Tänä päivänä on istuttava säätökapula kädessä, sillä teillä ei ole minkäänlaista äänitarkkailua. Kaikki välimerkit, musiikit ja mainokset tulevat niin kovalla äänenvoimakkuudella, että tukka nousee pystyyn. Kun hiljennät toosan ääntä, et kuule puhetta. Toivoisin vielä kerran kuulevani tai näkeväni ohjelman, jonka aikana ei tarvitse äänen säätökapula käyttää kesken ohjelman.”

“Hei! Tänä huipputekniikan aikana ihmettelemme miksi ohjelmien äänet eivät voisi tulla samalla "voimalla" ulos, jotta katsojan ei tarvitse istua kaukosäädin kädessä. Esim. tänään klo 17 uutiset tarvitsi lisävoimaa, mutta seuraava kuulutus oli rikkoa tärykalvot.”

Äänekkyysongelmaa on tutkittu jo 30-luvulta lähtien, joten uudesta asiasta ei ole kyse. Myös Yleisradiossa tehtiin tutkimusta muiden muassa Kari Ilmosen toimesta 60-luvun loppupuolella. Laajoista tutkimuksista huolimatta yhtenäistä toimivaa käytäntöä äänekkyuden hallintaan ei pystytty kehittämään ennen vuotta 2010. Tutkimukset lähtivät alun perin liikkeelle radion puolelta, kun kuuntelijat valittivat puheen ja musiikin välisistä tasoeroista. Lukuisten ratkaisuehdotusten jälkeen käytännöksi lopulta jäi äänen tarkkailu huipputasomittareilla erinäisten sääntöjen pohjalta. Eri ohjelmille määrättiin erityyppiset tarkkailutasot materiaalin sisällöstä riippuen, jolloin esimerkiksi puhe asetettiin yleensä musiikkia korkeammalle tasolle.

Merkittävä äänekkyystasoeroja aiheuttava seikka on se, että tuotannosta löytyy laaja kirjo erilaisia ihmisiä, joilla on erilaiset koulutustaustat, tottumukset ja mieltymykset. Kirjoa värittää vielä se, että kaikki materiaali ei tule Yleisradion sisältä, vaan ympäri maailmaa ulkopuolisilta toimijoilta. Näin ollen lopputuloksena on laaja skaala materiaalia, joissa kussakin on eri äänekkyystaso. Ongelmaa ei myöskään auta se tosiasia, että äänekkyysaistimus on yksilöllinen kokemus, joka sekin riippuu muun muassa ihmisen iästä, sukupuolesta, mieltymyksistä ja mielentilasta. Myös tuotantotilanteessa ja varsinkin loppukäyttäjällä kuunteluolosuhteet ja -tilanteet vaikuttavat äänekkyysaistimukseen.

Vuosikymmeniä äänen kanssa työskennelleet ovat hyödyntäneet erilaisia huipputasomittareita, joilla saadaan vihjeitä äänisignaalin hetkellisestä huipputasosta ja energiasisällöstä. Tämän tyyppinen käytäntö on alun perin tarkoitettu tukemaan korvakuuloista havainnointia ja ehkäisemään signaalin säröytymistä laiteketjussa. Nykyään toimintatavat ovat muuttuneet siten, että kuulohavainnointi on jäänyt vähemmälle arvolle tai jopa kokonaan pois. Tämä on valitettavaa, koska huipputasomittarit eivät kerro äänisignaalin taajuusinformaatiosta saatikka äänekkyystasosta. Monesti äänimateriaali asetetaan vain referenssitason ja huippuarvorajoitusten perusteella tietylle määrätulle tasolle. Tuotannossa materiaali pahimmassa tapauksessa normalisoidaan automaattisesti huipputasojen avulla. Tämän tyyppisten mittariperusteisten toimintatapojen heikkona puoleena on juuri se, että signaalin huippuarvoilla ei pystytä kontrolloimaan kovinkaan tarkasti ohjelmien äänekkyystasovaihtelua.

Ongelmia on synnyttänyt myös äänekkyyskilpailu, jossa tarkoituksena on saada materiaali tietoisesti niin äänekkääksi kuin mahdollista. Tässä hyödynnetään nykyteknikkaa, joka on mahdollistanut toinen toistaan tehokkaampia kompressio-menetelmiä. Kyseinen ilmiö on suosittu erityisesti mainostajien keskuudessa, jotka pyrkivät saamaan oman tuotteensa mahdollisimman tehokkaasti esille. Äänen keskimääräinen taso on noussut melkein 20 dB:tä 20 vuodessa. Nykyiset masterointi- ja tuotantoprosessit perustavat lopputuloksensa pitkälti huipputasomittareiden arvoihin, jolloin huolta pidetään ainoastaan siitä, että vaadittu signaalin yliohjausvara (engl. "headroom") toteutuu. Lopputuloksena syntyy dynamiikaltaan hyvin latteaa materiaalia, joiden sovittaminen laajadynaamisten materiaalien kanssa samalle äänekkyystasolle on erittäin vaikeaa.

Ongelmia tuottaa lisäksi se, että tuotantotilanteen jälkeen äänitarkkailijaa ei käytännössä enää ole, koska lähetysketju televisio- ja radiotoiminnassa on pitkälti automatisoitu. Yleisradiossa suurimpia ongelmia aiheuttaa ulkopuolelta ostettu materiaali, joka nykyisessä järjestelmässä voi kulkeutua lähetykseen ilman, että sitä olisi kukaan erikseen tarkastanut.

Koska lähetysketjun automatisoitumisen johdosta äänitarkkailijoita ei enää ole säätämässä ja sovittamassa ohjelmien keskinäisiä äänekkyystasoja korvakuulolla yhteen, syntyi tarve mittaroinnille, jonka avulla ohjelmien subjektiivisesti havaittua äänekkyystasoa pystyttäisiin tarkkailemaan objektiivisin menetelmin. Laajojen tutkimusten ja tiiviin yhteistyön tuloksena kansainvälisen telekommunikaatiojärjestön radiokommunikaatiosektori (ITU-R) julkaisi kesäkuussa 2006 uuden suosituksen, "ITU-R Rec. BS.1770-1 - Algorithms to Measure Audio Programme Loudness and True-Peak Audio Level", joka määrittelee algoritmin, jolla äänisignaalin äänekkyystaso voidaan matemaattisesti ratkaista. Euroopan yleisradiounionin (EBU) PLOUD-niminen työryhmä jatkokehitteli kyseistä laskenta-algoritmia ja tuloksena syntyi EBU:n oma suositus R 128 "Loudness normalisation and permitted maximum level of audio signals", jossa määritellään tarkemmin mittarien toimintaperiaatteet, laskentamenetelmät yksikanavaisesta äänestä tilääneen sekä käytännön ohjeet äänekkyysmittauksen toteuttamiseen tuotannossa ja jakeluketjussa. Myös Yleisradio on ollut PLOUD:in toiminnassa aktiivisesti mukana.

Edellä mainittujen suositusten perimmäisenä tavoitteena on luoda yhteiset käytännöt, joiden avulla ohjelmien ja kanavien väliset äänekkyystasovaihtelut saataisiin

hallintaan. Toisena merkittävänä etuna olisi vallitsevan äänekkyyskilpailun loppuminen. Muutokset ovat perustavaa laatua ja koskettavat läheisesti niin televisio- ja radiotoimintaa kuin tulevaisuudessa myös musiikkiteollisuutta. Suositusten julkaisemisen jälkeen markkinoille on tullut runsaasti työkaluja, joilla tavoitteet olisi mahdollista saavuttaa. Ainoana ongelmana enää on, miten nämä uudet käytännöt saadaan sovitettua nykyisiin toimintatapoihin.

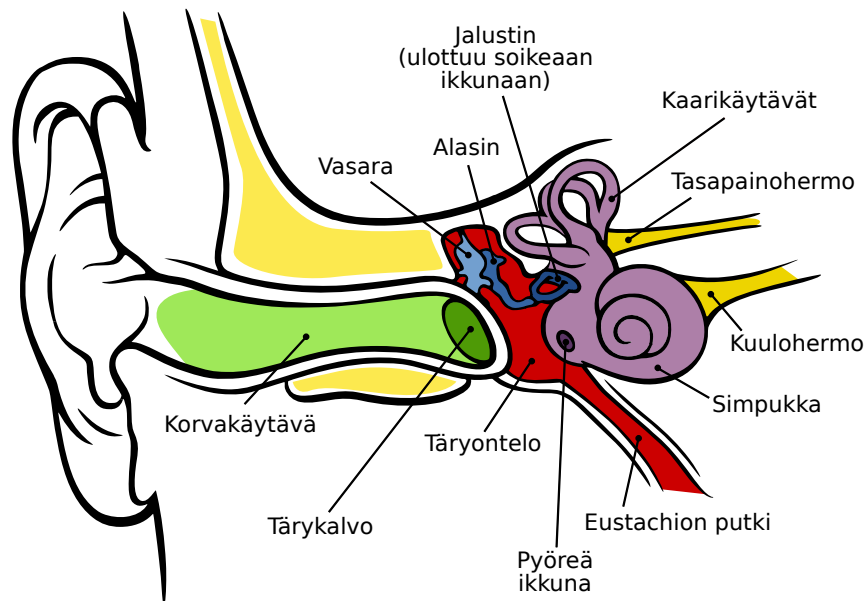
Tämän diplomityön tarkoituksena on löytää niin teknologisia kuin toimintatapoihin kantaa ottavia vaihtoehtoja eri rajapintoihin ratkaisuehdotuksina Yleisradion televisiotoiminnan päivittämiseen uusien suositusten mukaiseksi. Aihetta lähestytään ensin teoriaosuudella, joka käsittää äänekkyteen ja koko tutkimuskenttään keskeisesti liittyvät perusteet. Näin alaa vähemmän tuntevilla on helpompi ymmärtää myöhemmässä vaiheessa käsiteltävät asiat. Teoriaosuuden jälkeen työssä käsitellään aiempia tutkimuksia, Yleisradion televisiotoiminnan järjestelmää sekä syvemmin edellä mainittuja ITU:n ja EBU:n suosituksia. Työ sisältää myös mittauksia, joilla kartoitetaan nykyistä tilannetta sekä osoitetaan mahdollisten muutosten tarpeellisuus. Radiotoiminta on tässä työssä jätetty toissijalle, jotta aihe ei leviäisi liian laajaksi.

2 Kuuloaistimus ja äänekkyys

Tässä luvussa tutustutaan kevyesti äänekkyysaistimuksen syntymekanismeihin. Ensin tutustutaan kuulojärjestelmän fysiologiseen osaan. Tämän jälkeen paneudutaan kuulon psykoakustiseen puoleen, jossa äänekkyys on keskeisessä osassa. Tarkoituksena on perehdyttää akustiikkaa ja äänenkäsittelyä vähemmän tunteva ihminen pintapuolisesti alan perusteisiin. Tarkempaa ja syvällisempää tietoa voi etsiä tekstin mukana esitetyistä viitteistä.

2.1 Korvan rakenne ja ominaisuudet

Kuulojärjestelmä voidaan jakaa kahteen osaan. Ensimmäinen osa on perifeerinen kuulojärjestelmä, joka sisältää ulko-, väli- ja sisäkorvan. Nämä on esitetty kuvassa 3 selityksineen. Kuulon fysiologialla tarkoitetaan juuri perifeerisen kuulojärjestelmän tutkimista. Toinen osa on aivot, jotka ovat olennaisessa roolissa psykoakustiikassa. Psykoakustiikka tutkii akustisten herätteiden ja niiden tuottamien kuuloaistimuksen välisiä suhteita. [9]

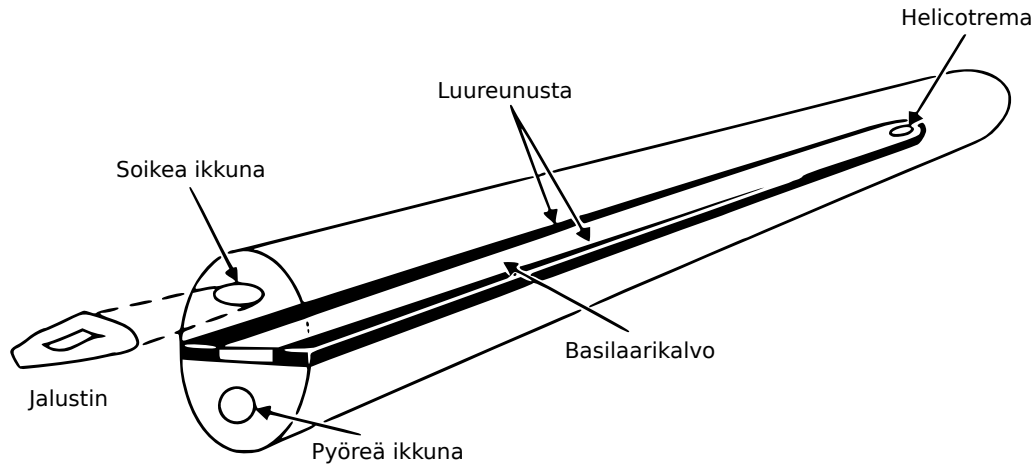


Kuva 3: Korvan rakenne. [12] (Kuvan tekijä: Chittka L. Brockmann, käytetty ja muokattu Creative Commons -lisenssin luvalla.)

Perifeerisen kuulojärjestelmän ulkokorva käsittää korvalehden, korvakäytävän sekä tärykalvon, joka rajaa väli- ja ulkokorvan. Tärykalvo muuttaa painevaihtelun mekaaniseksi liikkeeksi. Välikorvassa ovat kuuloluut, eli vasara, alasin ja jalustin, jotka toimivat impedanssisovituksena ja parantavat näin äänen siirtymistä [13]. Jalustin ulottuu soikeaan ikkunaan ja lepää sen päällä. Kun äänenpaine ylittää noin 80 dB:n rajan, aktivoituu ns. stapediusrefleksi, joka kiristää tärykalvoa ja siirtää jalustimen pois soikealta ikkunalta. Sisäkorva käsittää simpukan ja kaarikäytävät. Simpukka on

nestettä täynnä oleva monimutkainen elin, joka muuntaa painenvaihtelut hermoimpulsseiksi. [9]

Simpukan nesteessä hydrauliset paineaallot liikuttavat simpukan sisällä olevaa basilaarikalvoa (kuva 4), joka taivuttaa aistinsoluja, jotka edelleen generoivat hermoimpulsseja. Basilaarikalvon värähtelyn suurimman amplitudin fyysinen sijainti riippuu taajuudesta. Lähellä soikeaa ikkunaa tapahtuva värähtely aistitaan korkeina taajuuksina ja simpukan loppupäässä tapahtuva värähtely aistitaan matalina taajuuksina. [9]



Kuva 4: Karkea havainnekuva avatun simpukan ja basilaarikalvon rakenteesta. [9]

Ihmisen kuulojärjestelmä on dynamiikaltaan laaja ja sen taajuusalue rajoittuu yleisen määritelmän mukaan välille n. 20 Hz - 20 kHz. Todellisuudessa taajuusalue on kapeampi ja vaihtelee yksilöiden välillä suuresti. Iäkkäillä ihmisillä kuulon herkkyys laskee lähes poikkeuksetta korkeilla taajuuksilla. Laajalla dynamiikalla tarkoitetaan sitä, että ihminen pystyy kuulemaan niin kovia kuin hiljaisia ääniä. Äänenpaineissa kovimman ja hiljaisimman äänen suhde on $1 : 10^6$. Kuulojärjestelmä toimii lisäksi suurin piirtein logaritmisesti, jolloin pieni muutos heikoissa äänenpainetasoissa vastaa suurta muutosta voimakkaissa äänenpainetasoissa. Näiden ominaisuuksien lisäksi kuulo on selektiivinen, eli kuuliija pystyy erottelemaan tiettyjä ääniä hälyn seasta tai olla noteeraamatta esimerkiksi taustahälyä nukkuessa. [9]

2.1.1 Kriittinen kaista

Kriittiset kaistat ovat tärkeä osa äänekkyuden ymmärtämisessä. Kun basilaarikalvolla värähtelee useampi kuin yksi siniäänes ja äänekset lähenevät taajuuden suhteen lähemmäs toisiaan, resonanssikohdat basilaarikalvolla menevät päällekkäin. Näin äänekset ärsyttävät keskenään samoja aistinsoluja ja ovat näin saman kriittisen kaistan sisällä. Tällöin korvalla on vaikea enää erottaa siniääneksiä toisistaan. Kriittisiä kaistoja kuuloalueella on noin 24 kappaletta (Bark-asteikko), jolloin yksi kaista vastaa noin 1,3 mm matkaa basilaarikalvolla. Kyseiselle matkalle mahtuu noin 1300 aistinsolua. [14]

Kriittisten kaistojen suuruus riippuu keskitajuudesta, jonka ollessa alle 500 Hz kriittinen kaista on noin 100 Hz suuruinen. Tätä korkeammille taajuuksille mentäessä kriittisen kaistan suuruus kasvaa suhteessa keskitajuuteen. Ylimmillä taajuuksilla kriittinen kaista on usean kilohertsin levyinen. [9]

2.1.2 Peittoilmiö

Peittoilmiö ("maskaus") on tilanne, jossa hiljaisempi, mutta selvästi kuultavissa oleva, ääni lakkaa kuulumasta äänekkäämmän signaalin vaikutuksesta. Tämän tyyppistä peittoilmiötä kutsutaan taajuuspeitoksi. Taajuustasossa tapahtuvan peittoilmiön ominaisuuksiin lukeutuu muun muassa se, että lähellä toisiaan olevat äänekset peittävät toisiaan enemmän kuin laajakaistaiset äänet. Voimakkaammat äänet synnyttävät myös laajemman peittoalueen kuin hiljaisemmat äänet. Peittoilmiö voi tapahtua myös aikapeittona, jolloin peräkkäiset äänet peittävät toisiaan. Peittovaiikutus ulottuu noin 5-10 millisekuntia peittoääntä edelle (esipeitto) ja noin 150-200 millisekuntia peittoäänen jälkeen (jälkipeitto). [9] [14]

2.2 Äänekkyys

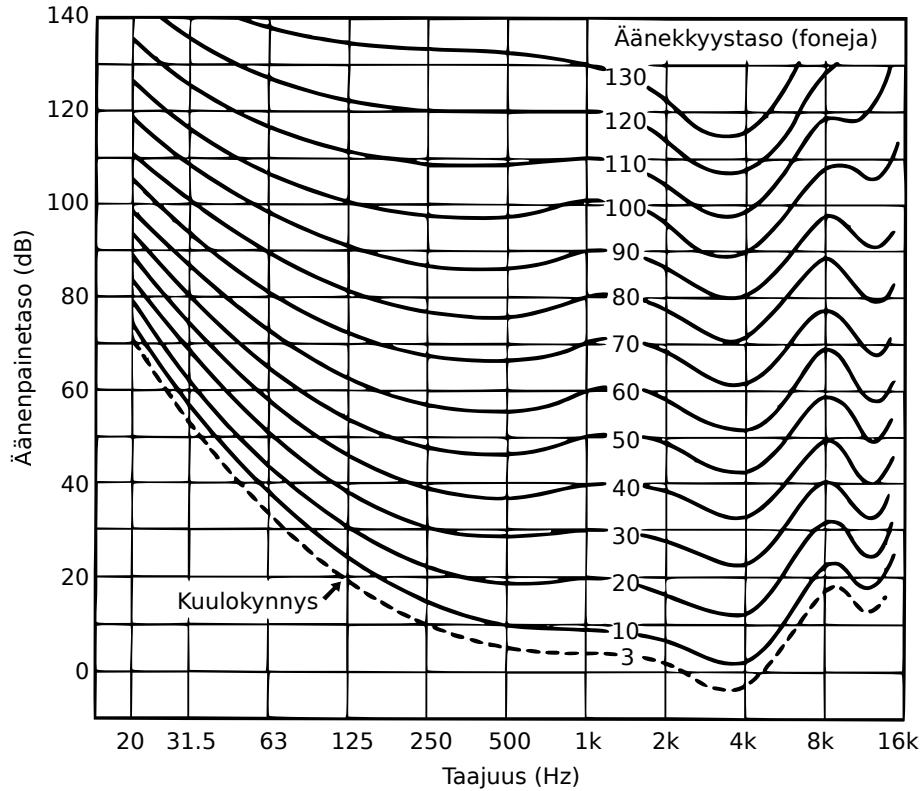
Äänekkyys on subjektiivinen suure, joka kuvaa kuuloaistimuksen voimakkuutta. Äänekkyysaistimuksen voimakkuuteen vaikuttaa pääosin äänenpaine, mutta myös äänen taajuusominaisuuksilla, spektrillä ja kestolla on omat vaikutuksensa [14]. Kuuloa ei voida myöskään erottaa täysin muista aisteista, koska esimerkiksi näköaistilla on dominoiva rooli suhteessa kuuloon [5]. Muita äänekkyysaistimuksen voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kuuntelijan ikä, sukupuoli, mieliala, korvien rasiustaso, kuunteluympäristö, äänentoistolaitteiden laatu, vuorokaudenaika, materiaalin kieli ja jopa se, asuuko kuuntelija kaupungissa vai maaseudulla [15]. Koska äänekkyteen vaikuttaa niin moni tekijä, ei sille voida koskaan laskea eksaktia lukuarvoa. Kaikki äänekkyiden laskentamallit approksimoivat todellista tilannetta. Tässä luvussa perehdytäänkin äänekkyteen pitkälti pelkästään kuuloilmiönä.

Äänekkyteen liittyy keskeisesti käsite kriittinen kaista (luku 2.1.1), koska kuulo analysoi ääntä niiden mukaan. Jokaisella kaistalla oleva ääni lisää äänekkyttä. Tämän takia laajakaistainen ääni kuulostaa yleensä äänekkäämmältä kuin kapeakaistainen, vaikka molemmissa tapauksissa käytettäisiin samaa äänenpainetta. Kapeakaistaisen äänen, esimerkiksi kohinan, ollessa kriittisen kaistan sisällä, ei kohinan kaistan muutos vaikuta kovinkaan merkittävästi äänekkyysaistimukseen. Aistimus voimistuu vasta kohinan kaistaa kasvatettaessa kriittistä kaistaa suuremmaksi. [14]

Äänekkyteen liittyy myös keskeisesti aika, koska kuulo integroi äänen energiaa. Integrointiaikaa vaaditaan noin 200 millisekunnin verran, jotta saavutetaan taso, josta aikaa lisäämällä äänekkyysaistimus ei enää voimistu. [9]

Koska äänekkyys on subjektiivinen suure, voidaan äänekkyystaso mitata esimerkiksi kuuntelukokeilla, joissa koehenkilöt säätävät joitain ääniä kaksi kertaa äänekkäämmiksi tai hiljaisemmiksi kuin annettu referenssiäni. Kuuntelukokeiden avulla on tehty myös vakioäänekkyyskäyrästöt, joiden avulla yksittäisten ääneksien äänekkyystasoja voidaan havainnollistaa. Fletcher-Munson -vakioäänekkyyskäyrien (ku-

va 5) avulla voidaan tarkastella siis siniääneksien äänekkyyyden äänenpainetaso- ja taajuusriippuvuutta. Vakioäänekkyyskäyrä vastaa muodoltaan herkkyysskäyrää pienillä äänenpainetasoilla, mutta suurilla äänenpainetasoilla käyrän muoto muuttuu. Yksikkönä vakioäänekkyyskäyrästössä käytetään fonia (engl. phon), joka vastaavaa desibelilukuarvoltaan siniääneksen äänenpainetasoa 1 kHz:n kohdalla. [2] [9] [13]



Kuva 5: Fletcher-Munson -vakioäänekkyyskäyrästöt. [9]

Yksittäisten äänekkyysien laskemiseen voidaan hyödyntää kuvan 5 äänekkyystasoja. Äänekkyys yksikkönä yksittäisille ääneksille käytetään sonia (engl. sone). Äänekkyystason L_L ja äänekkyys S välillä on yhteys, joka voidaan esittää kaavalla

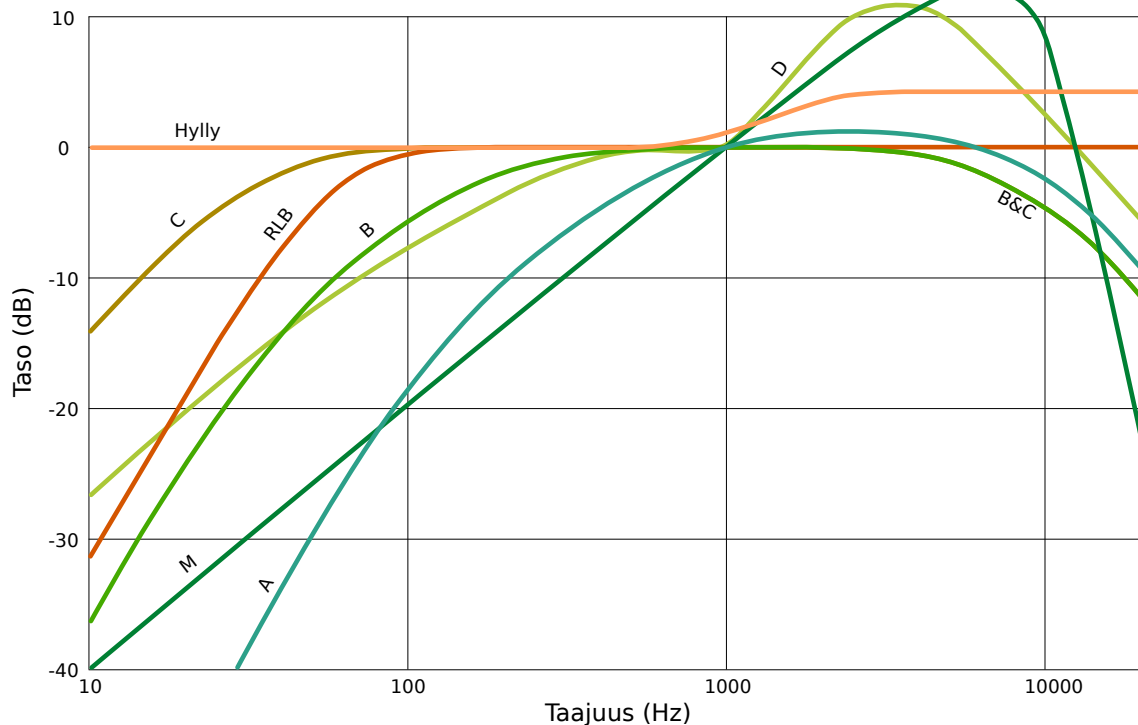
$$S = 2^{(L_L - 40)/10}. \quad (1)$$

Kun kaksi tai useampi äänes sekoittuu, niiden keskinäinen yhteisäänekkyys riippuu siitä, kuinka lähellä ne ovat toisiaan taajuustasossa. Äänekkyys tässä tapauksessa voidaan laskea kolmella tavalla. Jos äänekset ovat samalla kriittisellä kaistalla, voidaan niiden kokonaisäänekkyys laskea summaamalla äänekkyysintensiteetit ($I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$). Jos äänekkyys on suurempi kuin yksinkertaisen intensiteettisumman antama tulos. Näin ollen kokonaisäänekkyys lasketaan summaamalla jokaisen ääneksen yksilöllinen äänekkyys ($S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$). Jos äänekkyysväli on erittäin suuri, summaamisesta tulee monimutkaista, koska kuuntelija pyrkii keskittymään ensisijaisesti yhteen

komponenttiin ja kokonaisäänekkyys näin ollen määräytyy tämän komponentin äänekkyuden mukaan. [14]

Koska kuulojärjestelmä ei toimi taajuuden funktiona lineaarisesti, ei äänitasomittauksissa saadut arvot vastaa kovinkaan tarkasti tuntemusta, haitallisuutta tai häiritsevyyttä. Tästä syystä on päädytty käyttämään tiettyjä painotussuotimia approksimoimaan kuvan 5 mukaista taajuusriippuvaista käyttäytymistä. Painotettua äänenpainetasoa kutsutaan äänitasoksi. Standardoituja painotussuodinkäyriä ovat A, B, C ja D, jotka on esitetty kuvassa 6. Painotussuodinkäyrät jäljittelevät kuulon herkkyyttä tietyissä tilanteissa. Yleisimmissä mittauksissa käytetään A-painotusta, mutta muilla käyrillä voidaan saada parempia tuloksia tietyissä tilanteissa. [9]

Muitakin painotuskäyriä on olemassa, kuten M-, RLB-, R2LB-painotus. RLB (engl. Revised Low frequency B-weighting) on yksinkertainen ylipäästösuodin. Sitä jatkokehiteltiin vielä siten, että ylimpiä taajuuksia korotettiin pään akustisten ominaisuuksien takia, jolloin syntyi R2LB-painotus, joka on tämän työn kannalta painotuskäyristä olennaisin (ks. luku 5.1 sivulla 21). [16] Kyseistä painotusta kutsutaan myös K-painotukseksi [17]. K-painotuksen taajuusvaste esitellään myöhemmin luvussa 5.1. M-painotusta käytetään pääosin elokuvateollisuudessa.



Kuva 6: Painotussuotimien taajuusvasteita. [18]

Epälineaarisen taajuuskäyttäytymisen lisäksi kuulojärjestelmässä äänekkyysaistimuksen voimakkuus riippuu myös muista tekijöistä, kuten äänen tulosuunnasta suhteessa päähän. Puhtaasti fysikaalisesta näkökulmasta äänekkyysaistimukseen vaikuttaa päästä riippuva siirtofunktio (engl. head-related transfer function, HRTF). Ihmisen pään, yläkropan ja korvalehtien muotojen vaikutuksesta korvakäytävään

saapuva ääni on suodattunut tietyllä tavalla tulokulmasta riippuen. Jokaisella ihmisellä on yksilöllinen HRTF, joka vaikuttaa suuresti äänilähteen paikantamiseen. HRTF mitataan pienellä korvakäytävään asennettavalla mikrofonilla. [19]

Psykoakustisesta näkökulmasta äänekkyytteen vaikuttavia tekijöitä ovat binauraalinen (kahdella korvalla kuultava) äänekkyyssummautuminen (engl. binaural loudness summation) sekä suuntaava äänekkyysherkkyys (engl. directional loudness sensitivity). Binauraalisella äänekkyyssummautumisella tarkoitetaan vasemman ja oikean korvan välittämien herätteiden integroitumista yhdeksi äänekkyyshavainnoksi. Tutkimusten mukaan binauraalinen havainto antaa voimakkaamman äänekkyysaistimuksen kuin monauraalinen (yhdellä korvalla kuultava) havainto samalla äänenpainetasolla. Voimistumisen suuruus on kuitenkin yksilöllinen. Binauraalisen summautumisen aiheuttama äänekkyysaistimuksen voimistuminen voi olla 3 dB:stä 10 dB:iin tutkimuslähteestä riippuen. [19] [20] [21]

Suuntaavalla äänekkyysherkkyydellä tarkoitetaan äänekkyysaistimuksen voimakkuuden muutosta äänen tulokulman funktiona, mikä saadaan selville subjektiivisin kuuntelukokein. Tutkimuksissa tulokset ovat osoittaneet, että äänen tulokulmalla on vaikutusta äänekkyysaistimukseen, mutta vaikutukset ovat erittäin yksilöllisiä. Koehenkilöiden välillä voi olla jopa 8 dB:n eroja. Suuntaava äänekkyysherkkyys pienenee huoneen kaikuisuutta lisäämällä [22], jolloin äänikenttä on diffuusi. Keskimääräisesti pään sivuilta tulevat äänet koetaan edestä ja takaa tulevia ääniä äänekäämpinä. [19] [20] [21]

3 Aikaisempia tutkimuksia ja julkaisuja

Äänekkyystaserojen tutkimisen juuret ulottuvat 1900-luvun alkupuolelle. Jo vuonna 1933 tohtori H. J. von Braunmühl kirjoitti äänenvoimakkuuden tasapaino-ongelmista ja osoitti, että äänenvoimakkuusvaihteluita ei saada välitetyksi todellista tilannetta vastaavana dynamiikan rajallisuuden takia. Koska ohjelmat tuli lähettää mahdollisimman hyvin alkuperäistä tilannetta vastaavana, luonteeltaan erilaisten ohjelmien välille saattoi syntyä äänekkyyspäätasapaino. Braunmühl totesi kirjoituksessaan, että vain kuuntelija voi tasata epätasapainon muuttamalla vastaanottimen toiston voimakkuutta. [15]

Tähän ongelmaan liittyvää tutkimustyötä tehtiin ympäri maailmaa muun muassa OIRT:ssä (Organisation Internationale de Radiodiffusion et Télévision), EBU:ssa, IEEE:ssä, BBC:ssä, ITU:ssa ja CCIR:ssä (Consultative Committee on International Radio, nykyään ITU-R). Myös Yleisradiossa Kari Ilmonen ja Kaarle Nordenstreng aloittivat järjestelmälliset tieteelliset tutkimukset 1960-luvulla. Tällöin kuuntelukokeilla pyrittiin selvittämään erityisesti optimaalista musiikin ja puheen välistä tasorobalanssia sekä melun vaikutusta kuuntelutasoihin. Myös äänimateriaalin dynamiikkaan ja puheen ymmärrettävyyteen kiinnitettiin huomiota. Äänekkyystasero- ja tutkimuksiin tehtiin myös erityinen testiohjelma, johon yleisöä pyydettiin vastaamaan. [15] [23]

Ilmonen lähestyi ongelmaa sähköakustiikan ja tekniikan suunnalta ja Nordenstreng vastaavasti fonetiikan ja psykologian suunnalta. Kummallakin lähestymistavalla selvisi, että äänekkyysaistimukseen vaikuttavat monet tekijät. Nordenstreng tuli lisäksi siihen tulokseen, että kuuntelijoilta tulleet valitukset saattoivat johtua enemmän ohjelmamateriaalin häiritsevyydestä, kiusallisuudesta tai epämiellyttävyydestä kuin liiallisesta voimakkuudesta. [15]

Ongelman kiteyttää hyvin Kari Ilmonen väitöskirjassa [23] esitetty EBU:n vuonna 1968 julkaisema mainoslehtinen, jonka tarkoituksena on ollut selittää kuuntelijoille äänekkyystasero-ongelman monimutkaisuutta.

Leaflet 10

Loudness of speech and music

Listeners sometimes complain that some types of broadcast programme are too loud in comparison with other types. Many tests have been made in different countries, with the co-operation of the public, to find out what listeners' preferences are.

There is no conclusive answer to the problem because listeners differ so much in their tastes and in the conditions in which they listen to programmes. Generally speaking, music lovers who listen to music in quiet surroundings like the music to be louder than speech. Those, however, who have the receiver switched on as an accompaniment to other activities, prefer speech to be louder than music. Listeners preferences also vary with their age and sex. Some prefer speech to be quieter when it follows music than when it precedes it.

The volume of the programme is measured continuously at the studio and adjusted to suit the preferences of the majority of listeners, but it is not possible to satisfy all the listeners all the time.

A related question is the way in which the loudness varies during a single item in the programme. During the performance of a symphony concert by a large orchestra the loudness of sound in the auditorium varies over a very wide range from the quietest to the loudest passages. It is not possible to reproduce this wide range of variation over the radio. If this were done the volume would have to be adjusted so that the loudest passages could be reproduced by the receiver without distortion : the weakest passages will then be disturbed by noise and other forms of interference. The volume range is therefore compressed, either by the operation of a manual control or by automatic means, at the studio or at the transmitting stations. ...

Lehtisessä kerrotaan, kuinka kuuntelijat valittavat eri ohjelmatyyppien välisistä tasoeroista ja kuinka kyseiseen ongelmaan ei ole yksiselitteistä vastausta. Kuuntelukokemus riippuu kuuntelijan musiikkimausta, iästä, sukupuolesta sekä kuuntelulosuhteista ja -tilanteesta. Kuuntelijoille selvitetään myös, kuinka ongelmallista on toistaa laajan dynamiikan omaava ohjelma sellaisenaan radion välityksellä ilman, että voimakkaimmat äänet eivät säröytyisi ja samalla hiljaisimmat äänet eivät hukkuisi kohinan sekaan. Mielenkiintoisen EBU:n lehtisestä tekee se, että sitä voisi käyttää edelleen tietopakettina katselijoille ja kuuntelijoille.

Äänekkyysongelmaa on yritetty ratkaista pitkään ja ratkaisuehdotuksia on esitetty vuosien varrella useita. 1960-luvun puolivälissä merkittävän Yhdysvaltalaisen televisiotoimijan, CBS:n, tutkimuskeskus kehitti ensimmäisen automaattisen äänekkyysdenhallinta teknologian [24]. Edellä mainitussa Ilmosen vuonna 1971 julkaisemassa väitöskirjassa esitetty ratkaisu perustuu varsinaisen radiolähetyksen rinnalla lähetettävään lisäkanavaan. Näin vastaanottimille välitettäisiin ohjaustieto, joka kontrolloisi automaattisesti vastaanottimen äänitasoa. Ilmosen mukaan ylimääräinen VHF-FM radiokanava olisi ollut Suomessa jopa valmiina käytettäväksi. [23] 1990-luvulla hieman samankaltaista ideaa on sovellettu digitaalisessa radiossa (DAB:issa), johon EBU on esittänyt ratkaisuksi dynamiikka- sekä musiikki/puhe-kontrollia (DRC ja MSC). Näiden avulla vastaanotin pystyisi kontrolloimaan vahvistusta ohjelmamateriaalin dynamiikan tai sisällön mukaan vastaanottajan vaatimukset huomioiden. [25]

Dynamiikka-alueen hallinta, DRC (engl. Dynamic Range Control), on yksi metatietoihin perustuvan ääniprosessoinnin parametreista. Muun muassa Dolby Laboratories on liittänyt kyseisen parametrin omiin pakkausformaatteihinsa. Kyseinen parametri mahdollistaa kapeamman dynamiikan kotikuuntelussa sallien kuitenkin täyden tarjolla olevan dynamiikan sitä haluaville. Ohjelman äänen saa siis kompressoitua muutamilla tarjolla olevilla tavoilla vaikkapa yökuunteluun sopivaksi. Näin hiljaisimmatkin ohjelman kohdat saa paremmin kuuluviin, vaikka äänenvoimakkuus on säädetty voimakkaimpien kohtien mukaan tasolle, joka ei häiritse esimerkiksi

naapureita. [3] [4]

Ohjaustietoihin perustuvat ratkaisut ovat varsinkin analogitekniikalla käytännön tasolla monimutkaisia. On otettava huomioon, että osa materiaalista on suoraa lähetystä sekä osalla materiaalista ei välttämättä ole genremääritelmää tai valmista ohjaustietoa. Maailmalla tukeuduttiin osin tästä syystä sääntöihin perustuvaan äänekkyyshallintaan, jossa huipputasomittareita käytettiin tiettyjen ohjeistusten pohjalta. [26] Myös Yleisradiossa siirryttiin tähän käytäntöön.

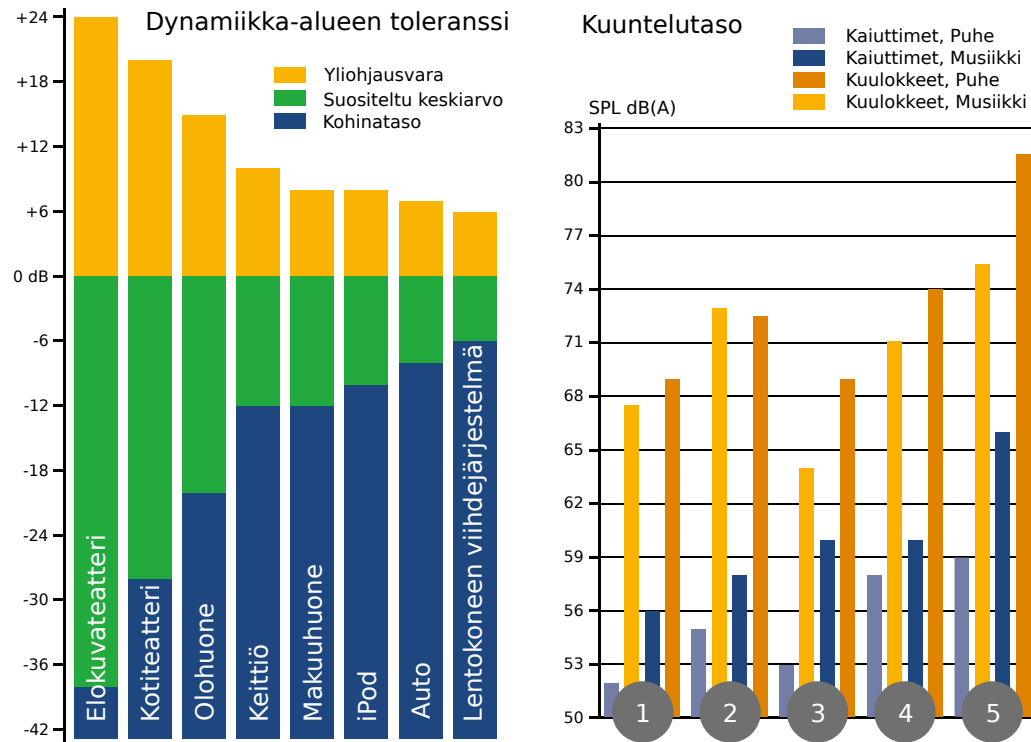
Yleisradiossa julkaistussa vuoden 1989 radion äänentason tarkkailuohjeissa annetaan suuntaa antavat ohjearvot erityyppisille ohjelmille niin lähetyksiin kuin tuotantoon. Lähetyksissä ohjelmien yleiseksi tasoksi on määrätty 6 dBu, jota ohjeistettiin käytettäväksi myös puhe- ja musiikkiohjelmien puheosuuksille. Poikkeuksia olivat klassisen musiikin kuulutukset ja puheosuudet, kamarimusiikki sekä puhe- ja musiikkiohjelmien musiikkiosuudet, joiden tasoksi määrättiin 0 dBu. Tuotantoa ohjeistettiin välttämään liian suuria voimakkaiden ja heikkojen äänten eroja. Voimakaimmat ohjelman kohdat ohjeistettiin tarkkailtavaksi tasolle 6 dBu. Jos ohjelman taso poikkesi normaalista, ohjeissa kehoitettiin lisäämään ohjelman alkuun alkuvinkua tasolla 0 dBu. [27]

Myöhemmin digitaalitekniikan yleistyessä Yleisradiossa sidottiin näytehuippumittarin skaala analogiseen huipputasomittariin siten, että referenssitaso oli -12 dBFS. Tarkkailuohjeissa materiaalin yliohjausvara oli 3-6 dB. Yleisen materiaalin suurin sallittu dynamiikka oli 45 dB ja puheosuudet tuli rajoittaa 15 dB:n dynamiikkaan. Ohjeessa kehoitettiin huomioimaan erityisesti puheosuuksien selkeys muuhun äänimateriaaliin nähden. [28]

11.6.2009 Yleisradion tv-tuotannossa tehtiin muutoksia tarkkailutasoihin ja näin uusi tarkkailuohje julkaistiin. Näytehuippumittareilla uudeksi referenssitasoksi tuli -18 dBFS ja uudeksi yliohjausvaraksi 6 dB:tä, joita EBU suosittelee. Digitaalisissa PPM mittareissa äärellisen reaktioajan takia yliohjausvaraksi määrättiin 9 dB. Analogisissa PPM mittareissa testitaso pidettiin edelleen 0 dBu:ssa, mutta huipputaso nostettiin +9 dBu:hun. Dynamiikkaa tuli ohjeiden mukaan rajoittaa 18-20 dB:hen. Ohjeessa mainitaan ohjelmamateriaalien keskinäisten tasojen säätämisestä, joka tulisi tehdä korvakuulolla eikä pelkästään tasomittareilla. [29]

Sääntöjen lisäksi koulutus oli tärkeässä roolissa. Yleisradion omalta tarkkailijakurssilta valmistui ensimmäiset tarkkailijat ennen 1960-lukua, jotka saivat hyvän pätevyyden niin teoreettisella kuin käytännön tasolla. [15] Koulutus ei rajoittunut pelkästään tarkkailijapuoleen, vaan myös ilmaisupuoleen pyrittiin vaikuttamaan. Puhetyyliä harjoitettiin selkeämmäksi ja vähemmän musiikin sekaan hukkuvaksi. [23]

Äänekkyteen liittyvää tutkimustyötä on tehty erityisen kuumeisesti 2000-luvulla. Vaikka pätevä ammattilainen pääsisikin sääntöpohjaisen huipputasomittaroinnin avulla kelpo tuloksiin, ei kyseinen menetelmä taivu suoraan samoilla säännöillä monikanavaympäristöön. Menetelmä ei myöskään ota huomioon jakelukanava- tai kuunteluympäristökirjoa. [26] Muun muassa masterointiin ja äänekkyteen erikoistunut audioalan asiantuntija Thomas Lund on tutkinut jakelukanavan ja kuunteluympäristön vaikutusta dynamiikka-alueeseen. Kyseistä riippuvuutta kuvaa termi dynamiikka-alueen toleranssi, DRT (engl. Dynamic Range Tolerance), joka määrittelee suositellun keskiarvoikkunan tietyllä huippuarvon yliohjausvaralla [31]. Dyna-



Kuva 7: Dynamiikka-alueen toleransseja eri kuuntelu-ympäristöissä sekä Tanskan radio- ja televisiotoiminnan henkilökunnan suosittelemia kuunteluvoimakkuuksia ryhmiin jaoteltuina; 1) hallinto, 2) toimittajat, 3) klassisen musiikin insinöörit, 4) pop/rock musiikin insinöörit, 5) meluinsinöörit. [30]

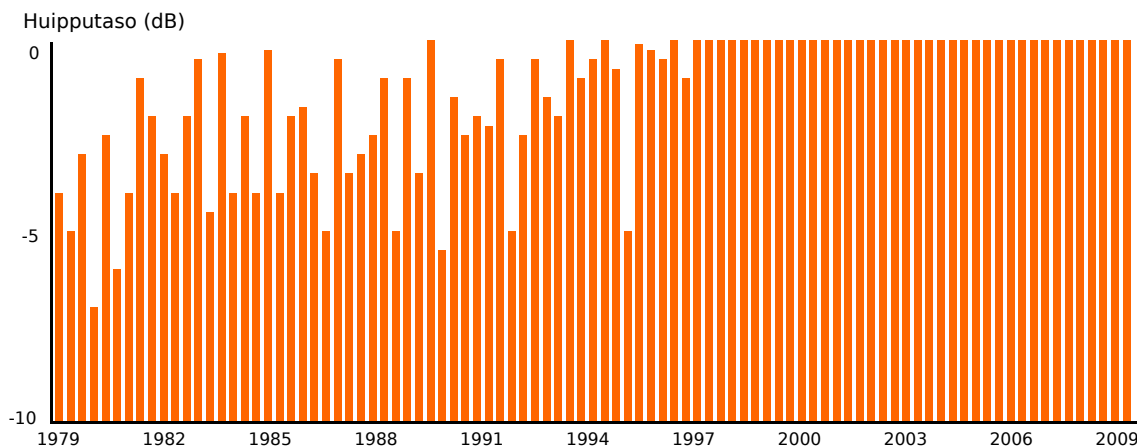
miikka-alueen toleranssin keskiarvotaso pyritään pitämään tiettyjen rajojen sisällä siten, että puheen ymmärrettävyys säilyy musiikin tai äänitehosteiden silti pysyessä miellyttävällä tasolla. Kuvan 7 vasemmalla puolella on esitetty eri dynamiikka-alueen toleransseja eri kuuntelu-ympäristöissä. Kuvasta nähdään havainnollisesti, kuinka dynamiikka-alueet voivat olla tavallisissa kuuntelu-ympäristöissä hyvinkin vaihtelevat. Esimerkiksi elokuvateatteriin suunniteltu materiaali ei sovellu sellaiseen olohuoneeseen. [30]

Kuvassa 7 on esitetty myös Tanskan radiossa ja TV:ssä tehdyissä kuuntelukokeissa saadut tulokset. Testin ideana on havainnollistaa ihmisten välisiä kuuntelutottumuseroja eri materiaaleilla niin kuulokkeilla kuin kaiuttimilla kuunneltaessa. Kuvaajasta nähdään, että äänentoistotaso asetetaan puheen tapauksessa poikkeuksetta musiikkia kovemmalle. Myös kuulokekuuntelussa keskimääräinen äänenpaine-taso asetetaan yleensä noin 5-10 dB:iä kaiutinkuuntelua suuremmalle. [30]

Äänekkyystutkimuksia ympäri maailmaa on motivoinut omalta osaltaan myös äänekkyyskilpailu (tai äänekkyyssota, engl. loudness war), jonka takia monen nykyisen äänitteen dynamiikkaa on kavennettu erittäin radikaalisti. Keskimääräinen signaalitaso on noussut melkein 20 dB:iä 20 vuodessa [32]. Ilmiö näkyy erityisesti populaarimusiikissa, jossa äänekkyyttä pyritään lisäämään häpeilemättä toinen tois-taan tehokkaammilla kompressiomenetelmillä, joilla signaalitasot pyritään purista-

maan mahdollisimman lähelle korkeinta sallittua tasoa. Kyseistä ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 8, jossa kuvataan merkittävimpien populaarimusiikkiäänitteiden signaalihiippujen kehitys kullakin ajanjaksolla vuodesta 1979 vuoteen 2009. Äänekkyyskilpailu käynnistyi kaupallisten radio- ja televisiotoimijoiden halutessa omien kanavien olevan muita kanavia voimakkaammalla. Tämän saavuttamiseksi käytettiin monia keinoja, kuten muuttamalla QPPM-mittarin suurimman sallitun tason (engl. Permitted Maximum Level) suhdetta FM-signaalin suurimpaan sallittuun deviaatioon. Tämä poisti signaalin yliohjausvaran modulaatiosta, jolloin ääneen saattoi syntyä häiriöitä. [8]

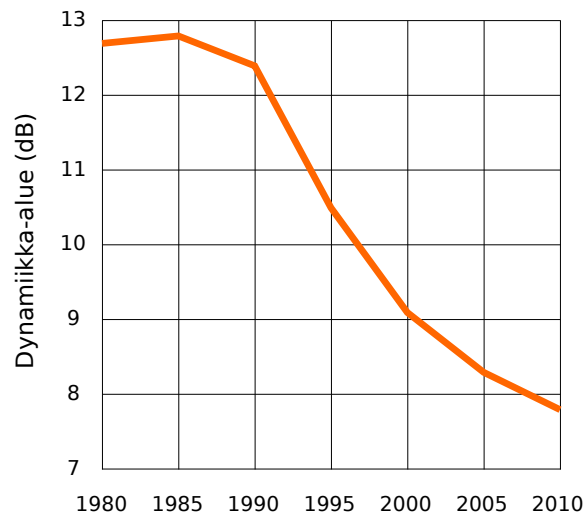
Äänekkyyskilpailun käynnistymistä edesauttoi myös siirtyminen analogisesta äänenkäsittelystä digitaaliseen, jolloin muun muassa tehokkaammat prosessointialgoritmit tulivat kaikkien saataville. Digitaalitekniikka ei itsessään ollut huono asia, vaan sen väärinkäyttö, joka toi mukanaan huomattavan määrän säröä ja laadun heikkenemistä. Äänenkäsittelyohjelmistot yksinkertaistuivat ja halpenivat ja niitä saattoivat käyttää muutkin kuin ammattilaiset. Heikon koulutuksen saanut henkilö ei välttämättä ymmärrä esimerkiksi näytteistämiseen liittyvää teoriaa ja tästä syystä ei ymmärrä yliohjausvaran merkitystä. Analogiaikana laitteet olivat teknisesti sen verran monimutkaisia, että niiden käyttäjät olivat lähes poikkeuksetta ammattilaisia, jolloin äänekkyystasojenkaan kanssa ei ollut niin suuria ongelmia. CD-levyn tuleminen myötä huiput pystytään asettamaan 0 dBFS:ään (ks. kuva 8), mikä aiheuttaa lähes poikkeuksetta yliohjautumista kuluttajatasoisten CD-soittimien DA-muuntimissa. Digitaalimaailmassa äänitarkkailu tapahtuu yhä useammin näytehuippujen perusteella, mikä mahdollistaa korkeammilla taajuuksilla jopa 3 dB:iä näytehuippuja korkeamman signaalitason. Myös datareduktioon perustuvat tallennusformaatit, suodattimet ja näytetaajuuden muutokset aiheuttavat säröä. [31] [33] [34]



Kuva 8: Eräiden aikansa merkittävimpien populaarimusiikkiäänitteiden absoluuttisten huipputasojen kehitys vuosina 1979-2009. Huomioituja genrejä ovat pop, rock, R&B, kantri, ballaadi ja hiphop. [35]

Äänekkyyskilpailun syntymiselle ei loppupeleissä ole löydetty järkipäistä syytä. Materiaalin äänekkyysmaksimointia on perusteltu muun muassa sillä, että ää-

nekkäämpi materiaali kuulostaisi paremmalta kuin hiljainen johtuen ihmisen vakio-äänekkyyskäyrästä (ks. kuva 5 sivulla 7) luonteesta. Perusteluna äänekkyyskilpailulle pidetään myös äänekkäämmän materiaalin parempaa myyntiä. Näillä väitteillä näyttäisi olevan erittäin heikko pohja ja koko äänekkyyskilpailu näyttäisi syntyneen virheellisten johtopäätösten tuloksena. Tuorein aiheeseen liittyvä Earl Vickersin tekemä tutkimus osoittaa, että äänekkyyskilpailu aiheuttaa esteettisiä huolia, psyykkistä ja fyysistä kuunteluväsymystä sekä kuulovaurioita. Vickers esittää myös mahdollisen yhteyden äänekkyyskilpailun ja musiikkiteollisuuden rappeutumisen välillä. Äänitteiden dynamiikka on kaventunut käsittämättömällä tavalla, vaikka digitaalinen tekniikka mahdollistaisi hyvinkin laajan dynamiikka-alueen hyödyntämisen. Äänitteiden dynamiikka-alueen kehitystä havainnollistaa hyvin kuva 9. Tutkimuksen mukaan liiallinen kompressoiminen on litistänyt, hajottanut ja sekoittanut äänitteitä, vähentänyt niiden syvyyttä ja rakennetta, hävittänyt tunteen sekä kaventanut stereokuvaa. Vickers korostaa tutkimuksessa muusikoiden, tuottajien, tutkijoiden, laitevalmistajien, musiikkipomojen sekä kuluttajien roolien tärkeyttä äänen laadun palauttamisessa. [36]



Kuva 9: Keskimääräisen dynamiikka-alueen kehitys vuosina 1980-2010. [36]

Ääneen ja sen laatuun kiinnitettiin ennen enemmän huomiota. Vaikka Yleisradiossa suurin osa tuotannosta tehdään nykyäänkin vankalla ammattitaidolla, on osa tuotannosta kompastunut digitaalitekniikan tuomiin ongelmiin. Ennen Yleisradiossa käsiteltiin ääntä muun muassa kellosepän tarkkuudella rakennetuilla laadukkailla nauhalaitteilla, joilla saatiin käyttöön erittäin laaja dynamiikka. Ääntä varjeltiin ja sen eteen tehtiin jatkuvasti töitä. Nykyään analogiset laitteet on pitkälti poistettu ja tilalle on vaihdettu enenevässä määrin kevyitä PC-pohjaisia editointityöasemia, joihin äänimateriaalia syötetään pahimmassa tapauksessa tietokoneen emolevyyn integroidun mikrofoniinlinjan kautta. Editointia ja tuotantoa tehdään myös enenevässä määrin tiloissa, joissa akustiikka on työn luonteeseen nähden sopimaton. [37] Yleisradion tv-toiminnassa editointi on siirtynyt radion tapaan myös kevyisiin työasemiin, joissa esimerkiksi äänen tarkkailu jää erittäin pieneen ikkunaan ahdetun näytehuip-

pumittarin (ks. kuva 2 sivulla xi) varaan. Äänen merkitys on tv-toiminnassa jäänyt kautta aikojen kuvan rinnalla toiselle sijalle. [2] [15]

Digitaalitekniikka on hintansa, joustavuutensa, tehokkuutensa ja monipuolisuutensa ansiosta joka tapauksessa lyönyt itsensä lopullisesti läpi. Digitaalitekniikan mahdollistama tiedostopohjainen ohjelmasiirto on luonut lisäksi uusiakin mahdollisuuksia esimerkiksi juuri äänekkyysongelman ratkaisemiseen. Yksi tällainen on kuvailutiedon (metatieto) liittämisen helppous varsinaiseen materiaaliin. Tämän tyyppinen ratkaisumalli on ollut suosittu ja yleisimmäksi sellaiseksi on muodostunut niin kutsuttu "dialnorm" (ks. Terminologia), joka perustuu metatietoparametripohjaiseen normalisointiin. Dialnormin ideana on säätää ohjelman taso siten, että puhe on kaikissa ohjelmissa samalla voimakkuudella. Normalisointimuutokset suoritetaan kuluttajan vastaanottimessa. Toinen vastaavantyyppinen parametri on dynamiikka-alueen hallinta, jolla pystytään rajoittamaan ohjelmien voimakkaimpien ja hiljaimpien äänien välistä tasoeroa (ks. Terminologia). [3] [4]

Tämän vuosikymmenen yksi suosituimmista tutkimuskohteista äänekkyysosalta on ollut laskenta-algoritmien kehitystyö. Algoritmeja on pyritty optimoimaan siten, että digitaalisesta signaalista pystyisi laskemaan arvon, joka approksimoisi mahdollisimman tarkasti ihmisen keskimäärin kokemaa äänekkyysaistimusta. Tällä saralla on tehty lukuisia tutkimuksia, joissa osassa on pyritty kuuntelukokein löytämään sopivia äänekkyystason laskentamalleja [10] [38] [39] [40]. Osassa on tutkittu äänekkyystasojen vaihtelua ja -hallintaa muun muassa lähetystoiminnassa [30] [41] [42] [43] [44].

Perimmäisenä tavoitteena edellä mainituilla äänekkyystutkimuksilla on ollut löytää oikeasti tehokkaita ja toimivia keinoja äänekkyyskilpailun runteleman audioalan korjaamiseen. Vaikka ratkaisuja oli etsitty jo vuosikymmenet, audioalan ammatillaiset pääsivät lopulta tiiviillä yhteistyöllä yhteisymmärrykseen sopivista äänekkyystason laskenta-algoritmeista sekä uusista dynamiikka-alueen ja signaalihiippujen laskentatavoista. Ensimmäistä kertaa sovittiin yhteiset käytännöt, joiden avulla äänekkyysongelmista olisi mahdollista päästä eroon. Näitä tutkimuksia käsitellään yksityiskohtaisemmin luvussa 5.

Yksi merkittävä motivaation lähde tutkimuksille on ollut kuluttajalähtöinen palaute, jonka mukaan televisio- ja radio-ohjelmissa äänekkyystasot vaihtelevat niin ohjelmien kuin kanavien välillä. Tämä näkyy selvästi myös Yleisradiossa tasaisena negatiivisen palautteen virtana. Kuluttajat haluavat muutosta tilanteeseen ja tästä onkin moni kaupallinen yritys löytänyt markkinaraon. Esimerkiksi Dolby on julkaissut oman äänekkyysnormalisointikonseptin "Dolby Volume":n, joka takaa materiaalista riippumattoman tasaisen äänekkyystason reaaliaikaisesti kuluttajapäässä olevalla prosessorilla [45]. Myös Evertz on kehittänyt oman äänekkyysnormalisointikonseptin "IntelliGain":in, joka toimisi lähetyspäässä keskitettynä normalisointiprosessorina. Näin riippumatta ohjelmamateriaalin sisäisistä tai ohjelmamateriaalien välisistä äänekkyystaseroista, saadaan lähetyksestä ainakin teoriassa äänekkyydeltään tasaista [46]. Tämän tyyppiseen ratkaisuun liittyy monia ongelmia, joita pohditaan lisää luvussa 7.1. Kyseiset laitteet eivät palauta vuosikymmenien takaisista tilannetta, jossa äänenlaatua varjeltiin. Koska lopullisen kuunteluvoimakkuuden määrää joka tapauksessa äänimateriaalin kuuntelija eikä tuottaja, on älytöntä ensin

maksimoida alkuperäisen materiaalin voimakkuus ja sitten vaimentaa se halutulle kuunteluvoimakkuudelle toistolaitteiston äänen voimakkuussäätimellä tai esimerkiksi Dolbyn kehittämällä äänekkyysnormalisointimenetelmällä.

Vaikka äänekkyyshallintaan onkin sovittu yhteiset käytännöt, on käytännön toimintatapoja hankala muuttaa. Kaupalliset toimijat pyrkivät yleensä kaikin keinoin välttämään lisäkustannuksia, jolloin uudet asiat tuomitaan helposti perusteettomiksi. Näin on mahdollista päätyä myös halpoihin ja huonoihin ratkaisuihin pelkästään kustannusseikkojen sanelemana. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on joissain maissa päädytty lakiehdotuksiin, joissa televisiotoimijat pakotetaan yhtenäistämään äänekkyystasot. Esimerkiksi Yhdysvalloissa esiteltiin vuonna 2008 lakiehdotus nimeltä "The Commercial Advertisement Loudness Mitigation Act" (CALM Act), jonka tarkoituksena on saattaa mainosten äänekkyystasot yhteneväiseksi muun ohjelmiston kanssa. Kyseinen lakiehdotus hyväksyttiin syyskuun lopussa 2010. Samantapaisia lakiehdotuksia on tehty tai on tekeillä myös monissa muissa maissa.

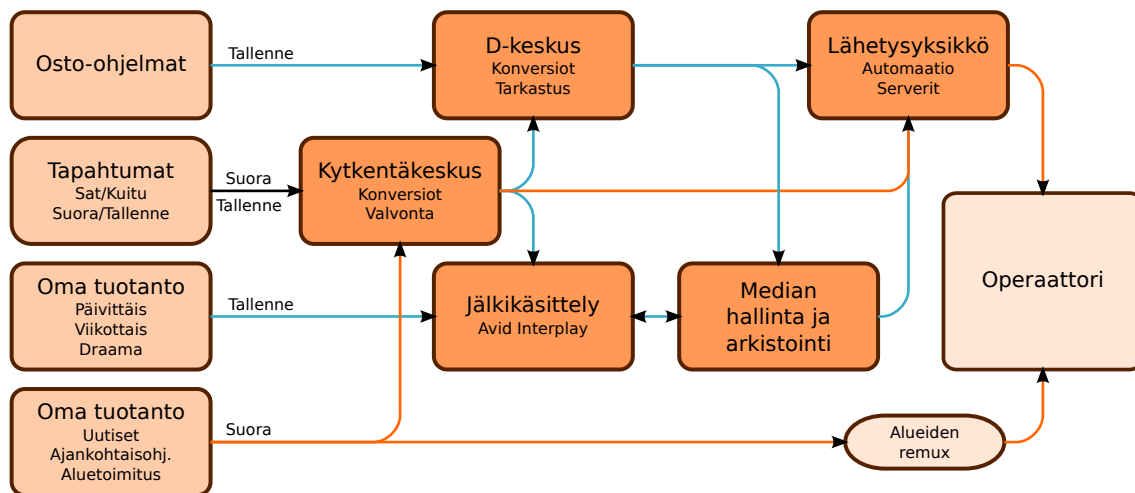
4 Ääni Yleisradion televisiotoiminnassa

Tässä luvussa paneudutaan Yleisradion televisiotoimintaan järjestelmätasolla. Koska painopisteenä tässä diplomityössä on ääni, järjestelmäkuvaus on rajattu sen mukaan. Näin kompleksista systeemiä on voitu yksinkertaistaa, mikä auttaa kokonaiskuvan hahmottamisessa. Yleisradion televisiotoimintaa on kuvattu muilta osin muun muassa viitteissä [47] ja [48].

4.1 Äänen reitti tuotannosta loppukäyttäjälle

Televisiotoiminta on yksinkertaisimmillaan tuotannon, paketoinnin, jakelun ja loppukäyttäjän muodostama ketju. Materiaalin kulkema reitti järjestelmän läpi on käytännössä kuitenkin erittäin monimutkainen. [47] Koska tässä työssä tarkoituksena ei ole luoda ratkaisuja konkreettisella tasolla, ei televisiotoiminnan yksityiskohtaisella kuvaamisella saavuteta lisäarvoa. Ketju tuotannon ja loppukäyttäjän välillä on tästä syystä yksinkertaistettu helposti hahmotettavaan muotoon.

Yleisradion televisiotoiminnan järjestelmässä äänen kulkemat reitit on esitetty lohkokaaavana kuvassa 10. Siinä vasemmalle puolelle on jaoteltu tuotanto neljään eri päälohkoon. Kaaviossa keskellä tummemmalla pohjalla on järjestelmän tärkeimmät osat, joissa materiaalia välitetään, muunnetaan, käsitellään, tallennetaan ja arkistoidaan. Oikeassa laidassa on kuvattu operaattori, joka välittää materiaalin loppukäyttäjälle. Kaaviossa sininen viiva tarkoittaa kulkureittiä, jossa materiaali siirtyy tiedosto muodossa. Oranssi viiva tarkoittaa reittiä, jossa materiaali kulkee suorana sarjamuotoisena digitaalisena signaalina.



Kuva 10: Yleisradion televisiojärjestelmän lohkokaavio yksinkertaistetussa muodossa.

Kytcentäkeskuksen tärkein rooli on välittää signaalia järjestelmän eri osiin. Se pitää myös huolen siitä, että materiaali muunnetaan kunkin järjestelmäosan kanssa yhteensopivaan muotoon. Kytcentäkeskuksessa sijaitsee kytkentämatriisit, joiden

avulla signaalia on mahdollista reitittää halutulla tavalla. Koska suorat lähetykset kulkevat kytkentäkeskuksen kautta, tarvitsee se valvovan elimen.

D-keskuksessa muunnetaan ulkoa ostetut ja Yleisradion arkistoissa olevat ohjelmat lähetyskelpoiseen muotoon. Kyseinen prosessi sisältää myös vanhojen ohjelmien digitoinnin. Muunnoksen yhteydessä tarkistetaan materiaalin eheys, mikä on pitkälti ihmistyövoiman varassa erilaisten mittalaitteiden tukemana.

Jälkikäsitteily vastaa raakamateriaalin työstämisestä lähetyskelpoiseen muotoon. Tässä yhteydessä voidaan tarkistaa muun muassa äänikomponentit ja raakamateriaalin signaalitasot.

Medianhallinta ja arkistointi vastaavat materiaalin varastoimisesta. Yleisradiossa on tavoitteena siirtyä kokonaan nauhattomaan materiaalinkäsittelyyn. Tiedostopohjaisessa järjestelmässä tärkeimpänä etuna pidetään huomattavasti nopeampaa ja suoraviivaisempaa tuotanto- ja jakeluprosessia. [47] Vaikka tuotanto ja siirto perustuvat pitkälti tiedostopohjaiseen malliin, on suurin osa materiaalista varastoitu magneettinauhoille digitaalisessa muodossa. Magneettinauha on edelleen suurten tietomäärien tapauksessa kovalevyyn verrattuna huomattavasti halvempi ja varmempi tallennusmedia.

Lähetyksikkö vastaa Yleisradion ohjelmien siirtämisestä operaattorirajapinnalle. Kyseisen prosessin hoitaa pitkälti automaatiojärjestelmä, joka siirtää materiaalia arkistosta ensin lähetysserverille ja sieltä edelleen lähetykseen ohjelmistosuunnitelman perusteella. Kytkentäkeskusta ja lähetyksikköä ei käytännössä voida täysin erottaa toisistaan, koska osa kytkentäkeskuksen tekniikasta liittyy myös operaattorirajapintaan. Koska lähetyksikkö on järjestelmän yksi kriittisimmistä osista, valvotaan siellä signaalikulkua. Näin varmistetaan, että operaattorille siirretystä signaalista löytyy tarvittavat ohjelmakomponentit.

Tuotanto on jaettu kuvassa 10 neljään eri lohkoon, joita erottaa äänen kulke ma reitti. Ostetut ohjelmat siirretään tallennettuina D-keskukseen, jossa ne mahdollisesti tarkastetaan ja muunnetaan järjestelmän kanssa yhteensopivaan muotoon. Tapahtumat, uutiset ja ajankohtaisohjelmat siirretään suorina lähetyksinä kytkentäkeskuksen kautta lähetykseen. Suorat ohjelmat voidaan myös tallentaa myöhempää tarvetta varten. Tapahtumat voidaan siirtää myös tallennettuina kytkentäkeskuksen ja jälkikäsitteilyn kautta medianhallintajärjestelmiin. Kyseiseen arkistoon tallennetaan myös Yleisradion oma tuotanto, joka käy ensin läpi tarpeellisen jälkikäsitteilyn. Poikkeuksen tekevät alueuutiset, jotka viedään suoraan uudelleenpaketoitaviksi operaattorille.

4.2 Äänimateriaalin siirtoformaatit

Yleisradiossa järjestelmien välillä suorat lähetykset siirretään pääsääntöisesti sarjamuotoisena pakkaamattomana digitaalisena signaalina. Käytössä oleva rajapinta on SDI (engl. Serial Digital Interface). Signaalissa ääni on upotettu (engl. embed) kuvan mukaan, jolloin kuvan ja äänen välinen tahdistus (engl. lip sync) säilyy. Poikkeustapauksissa, kuten joissain urheilukisoissa tai musiikkitapahtumissa, äänimateriaali voi olla enkoodatussa Dolby E -muodossa.

Tallennetut ohjelmat siirretään järjestelmien välillä pääsääntöisesti tiedostomuo-

dossa käyttäen nopeaa sisäistä lähiverkkoa. Materiaali on tallennettu MXF-käreeseen (engl. Media Exchange Format), jossa ääni on tallennettuna yleensä pakkaamattomaan muotoon. Pakkaamattomalla äänellä tarkoitetaan Yleisradion järjestelmissä 48 kHz:n näytetaajuudella lineaarisesti ja vähintään 16 bitin resoluutiolla kvantisoitua pulssikoodimoduloitua (PCM) signaalia. Poikkeustapauksissa ääni on voitu tallentaa myös enkoodattuun muotoon, mikä on mahdollista esimerkiksi osto-ohjelmien tapauksessa. Tällöin enkoodattu materiaali muunnetaan D-keskuksessa ennen arkistointia.

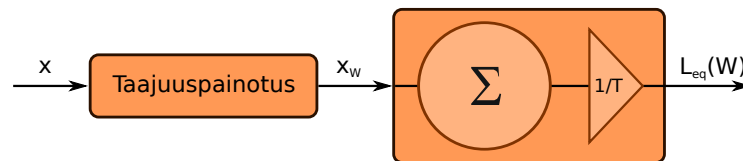
5 Suositukset ja työryhmät

Vuosikymmeniä jatkunut laaja tutkimustyö äänekkyiden osalta kulminoitui vuonna 2006 kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) julkaisemaan suositukseen, jossa esiteltiin uudet laskentamenetelmät äänekkyystason ja signaalin huipputason määrittämiseen. Tästä kehittyi äänekkyyslaskennan uusi kulmakivi, jonka pohjalta suoritettiin useita lisätutkimuksia. Noin pari vuotta ITU:n julkaisun jälkeen Euroopan yleisradiounioni (EBU) perusti PLOUD-nimisen työryhmän, johon liittyi suuri joukko audioalan asiantuntijoita, televisiotoimijoita ja laitevalmistajia. Tiiviin yhteistyön tuloksena syntyi EBU:n oma suositus, joka vei ITU:n julkaisemat laskentamenetelmät astetta pidemmälle. Suosituksessa annetaan käytännön ratkaisukeinoja äänekkyysnormalisointiin niin televisiotoimijoille, laitevalmistajille kuin operaattoreille.

Tässä luvussa perehdytään kyseisiin ITU:n ja EBU:n julkaisemiin suosituksiin. Painopiste pidetään kuitenkin EBU:n suosituksissa, koska ITU:n suosituksiin on tulossa tämän diplomityön valmistumisen jälkeen muutoksia. Tästä huolimatta myös ITU:n suositukset on syytä esitellä pääpiirteissään.

5.1 ITU-R BS.1770-1

Kansainvälinen suositus ITU-R BS.1770-1 "Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level" määrittelee ohjelmien äänekkyystason ja signaalin todellisen huipputason laskentamenetelmät. Standardia on kehitetty vuodesta 2004, jolloin monofonisen ohjelmamateriaalin äänekkyyshavaintoa tutkittiin ensin subjektiivisin menetelmin. Tämän jälkeen arvioitiin kahtatoista eri äänekkyiden havaitsemisen mallia, jotka pyrkivät ennustamaan tai mittaamaan puheen ja musiikin subjektiivista äänekkyyshavaintoa. Arvioinnissa eri malleja vertailtiin absoluuttisen tarkkuuden näkökulmasta sekä kuuntelijoiden arvioiden välisten erojen perusteella. Parhaiten malleista suoriutui tyypillisen monofonisen lähetysmateriaalin tapauksessa RLB-painotettu neliöllinen keskiarvomittaus, $L_{eq}(RLB)$. RLB-painotus esiteltiin kuvassa 6. [17] [40]



Kuva 11: Monofonisen äänekkyysmittauksen lohkokaavio. [17]

Monofonisen materiaalin äänekkyystason mittaamiseen kehitetyn algoritmin lohkokaavio on esitetty kuvassa 11. Siinä systeemiin syötetään signaali x , joka painotetaan taajuustasossa ylipäästösuotimella. Näin saadun signaalin x_w energia summataan ja keskiarvoistetaan määrätyn ajan yli. Monofonisen äänekkyystason neliöllisen keskiarvoistuksen kaava esitetään muodossa

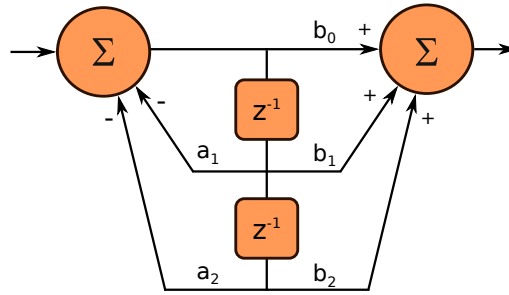
$$L_{eq}(W) = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{x_w^2}{x_{Ref}^2} dt \right] \text{ dB}, \quad (2)$$

jossa x_W on painotettu signaali, x_{Ref} on referenssitaso ja T on ääninäytteen pituus. [17]

Ylipäästösuodin tyyppisellä painotuksella, RLB (engl. Revised Low-frequency B-weighting), pyritään karkeasti mallintamaan ihmiskorvan taajuusriippuvaista vakioäänekkyysskäyrästä [13]. Tarkemmin eri painotuksista on kerrottu luvussa 2 sivulla 8. RLB:n siirtofunktio on määritetty toisen asteen suotimeksi (vuokaavio, kuva 12). Se voidaan esittää yleisesti siirtofunktiomuodossa

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}, \quad (3)$$

jossa kertoimet ovat taulukon 1 mukaiset. Sijoittamalla RLB:n siirtofunktiokaavaan 3 taulukon 1 kertoimet saadaan vaste, joka on esitetty aiemmin kuvassa 6 (sivu 8).



Kuva 12: Toisen asteen suodattimen vuokaavio. [17]

Taulukko 1: RLB painotuskäyrän siirtofunktion kertoimet. [17]

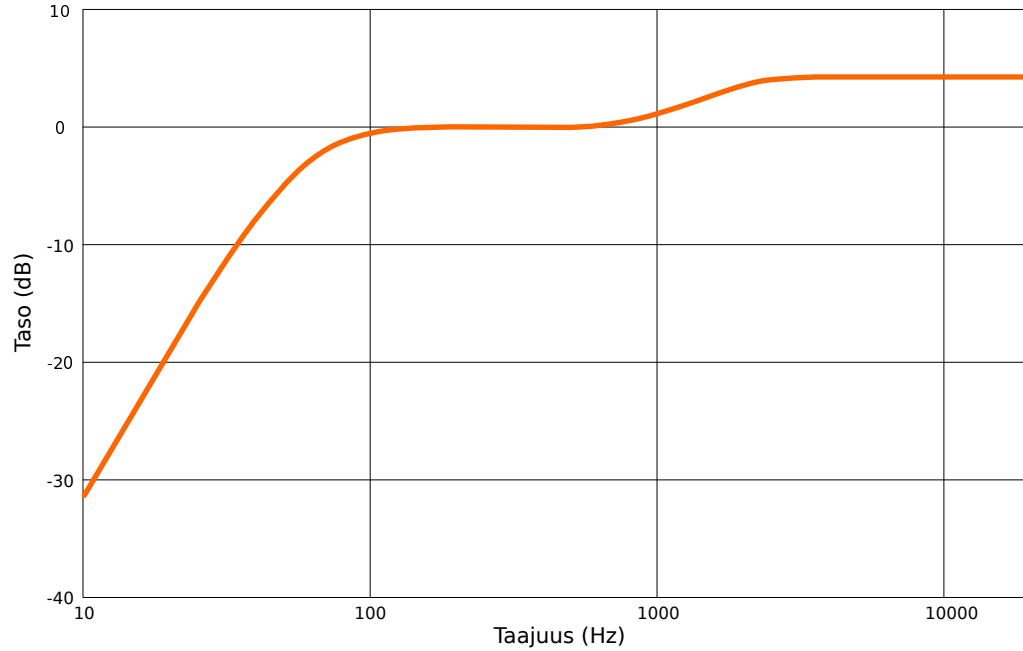
		b_0	1,0
a_1	-1,99004745483398	b_1	-2,0
a_2	0,99007225036621	b_2	1,0

Myöhemmässä vaiheessa edellä mainittua algoritmia jatkokehiteltiin siten, että äänekkyyssmittaukseen lisättiin esisuodin (engl. pre-filter), joka mallintaa pään akustista vaikutusta kuultuun ääneen. Mallinnuksessa on oletettu pään olevan jäykkä pallo. Esisuodin voidaan esittää RLB:n tavoin yleisessä siirtofunktiomuodossa (kaava 3), jossa kertoimet ovat taulukon 2 mukaiset. Kyseisen suotimen vaste on esitetty kuvassa 6 (sivu 8) hyllysuotimena. RLB- ja hyllysuotimen kombinaatiota kutsutaan K-painotussuotimeksi, jonka vaste on esitetty kuvassa 13.

Algoritmia kehiteltiin myös siten, että se sopisi niin kaksi- että monikanavaiseen materiaaliin. Kuvassa 14 on esitetty monikanavaisen äänekkyyssmittauksen lohkokaaavio. Lohkokaaviossa nähdään viisi sisäänmenoa, joista x_L ja x_R tarkoittavat vasenta ja oikeaa etukanavaa, x_C , x_{Ls} ja x_{Rs} tarkoittavat tiläänen keski- sekä vasenta ja oikeaa takakanavaa. Tiläänen matalien taajuuksien tehostekanavaa (LFE) ei oteta mittauksessa huomioon.

Taulukko 2: Esisuotimen siirtofunktion kertoimet. [17]

		b_0	1,53512485958697
a_1	-1,69065929318241	b_1	-2,69169618940638
a_2	0,73248077421585	b_2	1,19839281085285

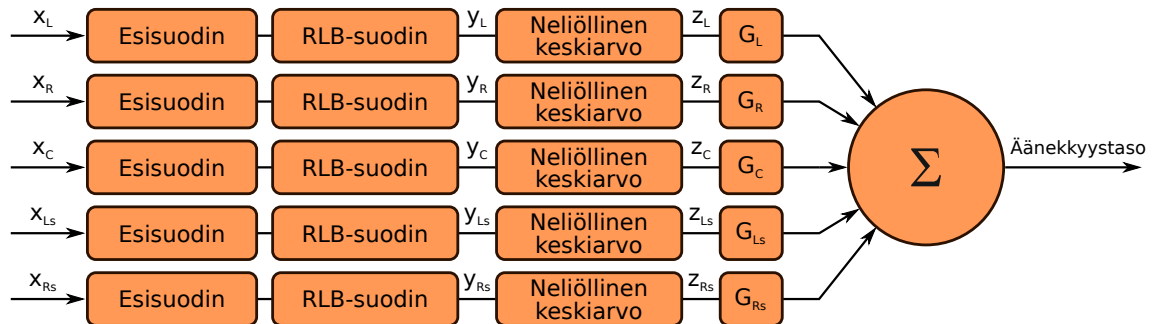


Kuva 13: K-painotussuotimen taajuusvaste. [49]

Monikanavaisessa mittauksessa suodatetut sisäänmenosignaalit lasketaan tässä tapauksessa neliöllisen keskiarvoenergian kaavalla

$$z_i = \frac{1}{T} \int_0^T y_i^2 dt, \quad (4)$$

jossa z_i :n "i" tarkoittaa tiettyä monikanavaisen äänen kanavaa. Lopuksi kanavat



Kuva 14: Monikanavaisen materiaalin äänekkyysmittauksen lohkokaavio. [17]

painotetaan taulukon 3 kertoimien mukaan ja summataan kaavalla

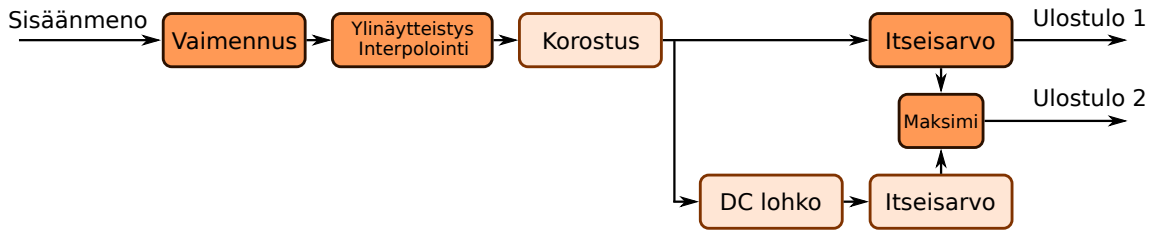
$$\text{Äänekkyystaso} = -0,691 + 10 \lg \sum_i^N G_i z_i \text{ LUFS}, \quad (5)$$

jonka avulla saadaan lopullinen K-painotettu äänekkyystaso suhteessa täyteen skaalaan. [17] Taulukon 3 painokertoimilla pyritään huomioimaan äänen tulosuuntariippuvan äänekkyysherkkyyden vaikutusta [50].

Taulukko 3: Monikanavaisen äänekkyysmittauksen yksilölliset painokertoimet. [17]

Kanava	Painokerroin
G_L (Vasen etukanava)	1,0 (0 dB)
G_R (Oikea etukanava)	1,0 (0 dB)
G_C (Keskikanava)	1,0 (0 dB)
G_{Ls} (Vasen takakanava)	1,41 (+1,5 dB)
G_{Rs} (Oikea takakanava)	1,41 (+1,5 dB)

Samassa ITU-R BS.1770-1 suosituksessa on määritelty myös digitaalisen signaalin "todellisen huipun" ("True Peak") mittaaminen yksittäisestä lineaarisesta PCM signaalista. Todellisella huipputasolla tarkoitetaan suurinta positiivista tai negatiivista signaalin aaltomuodon saavuttamaa arvoa jatkuvassa aika-alueessa. Tämä arvo voi olla joissain tapauksissa suurempi kuin suurin signaalin näytteen arvo, mikä saattaa johtaa siihen, että joissain sovellusketjuissa ääni voi yliohtautua. Tästä syystä on ollut tarpeellista määritellä signaalin todellista huipputasoa mahdollisimman hyvin estimoiva mittausmenetelmä. [17]



Kuva 15: Lohkokaavio "todellisen huipun" mittausprosessista. Vaaleammalla pohjalla olevat laatikot ovat valinnaisia ominaisuuksia. [17]

Suosituksessa määritellyn mittauksen ensimmäisessä vaiheessa signaali vaimennetaan 12,04 dB:iä, joka vastaa kahden bitin muutosta. Tässä tapauksessa vaimennuksella varmistetaan riittävä yliohtausvara (engl. headroom). Signaalinäytteiden väliin lisätään uusia näytteitä siten, että näytteiden määrä nelinkertaistuu. Tämän jälkeen lisättyjen näytteiden arvot lasketaan interpoloimalla. Suosituksessa näytetaajuuden oletetaan olevan oletusarvoisesti 48 kHz, jolloin uudeksi näytetaajuudeksi tulee 192 kHz. Mitattavan materiaalin näytetaajuuden ollessa

esimerkiksi 96 kHz, riittää kaksinkertainen ylinäytteistys. Tämän jälkeen signaalin korkeimpia taajuuksia voidaan valinnaisesti esikorostaa edellä esitetyllä hyllyfunktioilla (ks. kuva 6 sivulla 8). Lopuksi signaalista otetaan itseisarvo, jolloin negatiiviset näytteet muuttuvat yhtä suuriksi positiivisiksi näytteiksi, ja etsitään signaalista suurin näyte. Mittausprosessiin voidaan valinnaisesti lisätä vielä lohko, joka poistaa signaalista mahdollisen DC-poikkeaman.

Mittauksesta saadun suurimman ulostulonäytteen arvoa verrataan signaalin nimelliseen huipputasoon. Näin saadaan todellisen huipputason estimaatti suhteessa digitaaliseen täyteen skaalaan. Kyseessä on siis edelleen vain estimaatti suurimmasta aaltomuodon saavuttamasta arvosta jatkuvassa aika-alueessa, jolloin laskettua "todellista huippuarvoa" kuvattaessa on jatkossakin käytettävä lainausmerkkejä. Näin välttyään sekaannukselta todellisen huipun ja "todellisen huipun" välillä.

Jos mittausprosessin ensimmäisessä vaiheessa on käytetty yliohjausvaraa (kahden bitin siirros), on tämä otettava huomioon vertaamalla löydettyä suurinta ulostulonäytteen arvoa täyden skaalan neljanteen osaan. Mittalaite näyttää tuloksen yksikössä dBTP. [17]

5.2 ITU-R BS.1771

ITU-R BS.1771 "Requirements for loudness and true-peak indicating meters" suositus määrittelee ITU-R:n mukaiset äänekkyytaso- ja huippuarvomittarit. Tässä suosituksessa määritellään perustoimintaperiaatteet ja ominaisuudet, jotka mittareissa tulisi olla. Mittarin rakenteena voidaan käyttää joko mekaanista mallia, joka on tuttu muun muassa VU-mittareista, tai elektronista pylväsmalli, joka on tuttu useista huipputasomittareista. Mittarien yksikkönä käytetään LU:ta, joka tarkoittaa äänekkyytason poikkeamaa referenssitasosta desibeleissä. 0 LU on referenssitaso ja esimerkiksi 3 LU tarkoittaa, että ohjelmaaänen taso on 3 dB:iä sovittua tasoa kovemmalla. Mittarien skaala tulisi kattaa arvot +9 LU:sta -21 LU:hun. Suosituksen mukaisessa mittarissa tulisi olla myös "todellisen huipun" indikaattori. [51] Tarkempi kuvaus mittarien toiminnasta on esitetty EBU:n teknisessä dokumentissa 3341 (luku 5.3.1).

5.3 EBU R 128

Uuden äänekkyytsoon perustuvan mittaroinnin ja ohjelmien normalisoinnin kehittämistyö Euroopassa on tehty pitkälti EBU:n PLOUD-nimisen työryhmän toimesta. PLOUD aloitti toimintansa heinäkuussa 2008 ja se on nykyään osa EBU:n audio-asiantuntijayhteisöä ECA:ta (Expert Community on Audio) [52]. PLOUD on ollut EBU:n yksi aktiivisimmista ryhmistä ja siinä on mukana yli 160 jäsentä. Myös Yleisradio on ollut aktiivisesti mukana PLOUD:in tutkimustyössä. Ryhmän tärkeimpänä työskarkana on ollut löytää yksi yhteinen tavoiteäänekkyytaso, joka toimisi kaikenlaisille ohjelmamateriaaleille. [53]

PLLOUD julkaisi elokuussa 2010 suosituksen R 128, johon on koottu vuosia jatkuneen työn tulokset. Suositus sisältää laajalla yhteistyöllä sovitut laskentatavat, parametrit ja menetelmät, joiden avulla äänekkyysohjelmissa olisi mahdollista päästä

eroon. R 128 sisältää ainoastaan ongelmakohtien, suositusten ja parametrien pinta-puolisen listauksen, mutta siinä viitataan neljään PLOUD:in julkaisemaan yksityiskohtaisempaan tekniseen dokumenttiin (Tech 3341, 3342, 3343, 3344), joista kaksi ensimmäistä julkaistiin suosituksen kanssa samaan aikaan elokuussa. Tech 3343 julkaistiin helmikuussa 2011 ja 3344 pian sen jälkeen.

R 128:ssa suositellaan käytettävän kolmea perussuuretta kuvattaessa äänisignaalia. Nämä ovat

- ohjelmaaänekkyys (engl. Programme Loudness),
- äänekkyuden vaihtelualue (engl. Loudness Range, LRA) ja
- suurin sallittu hetkellinen huipputaso (engl. Maximum True Peak Level).

Suosituksessa käytetään kolmea uutta yksikköä, joilla äänekkyys suureita kuvataan. Nämä ovat

- absoluuttiselle äänekkyystasolle LUFs (engl. Loudness Unit, Full Scale),
- suhteelliselle äänekkyystasolle LU (engl. Loudness Unit) ja
- suurimmalle sallitulle hetkelliselle huipputasolle dBTP (engl. dB, True Peak).

Kyseisille suureille ja yksiköille ei ole virallista suomenkielistä käännöstä. Tässä työssä edellä mainitut käännökset ovat itse tehtyjä ja niillä kuvataan suluissa olevia englanninkielisiä termejä.

Ohjelman tavoiteäänekkyystasoksi on määritelty $-23 \text{ LUFs} \pm 1 \text{ LU:n}$ vaihteluvälillä. Näin ollen -23 LUFs vastaa 0 LU:ta . Vaihteluväli sallitaan suosituksen mukaan ainoastaan sellaisissa tilanteissa, joissa tarkkaa -23 LUFs:n äänekkyystasoa ei käytännön syistä saada toteutettua. Merkittävimmät tämän tyyppiset tilanteet ovat suorat lähetykset. $\pm 1 \text{ LU:n}$ vaihteluväliä suuremmat poikkeamat sallitaan myös ohjelmissa, jotka koostuvat pelkästä taustaaäänestä [50]. Suurimmaksi sallituksi hetkelliseksi huipputasoksi PLOUD suosittelee käytettävän -1 dBTP . [54]

5.3.1 EBU Tech 3341

Ensimmäinen R 128-suosituksessa viitattu tekninen dokumentti "EBU Tech 3341 - Loudness Metering: 'EBU Mode' metering to supplement loudness normalisation in accordance with EBU R 128" määrittelee äänekkyysmittarin ominaisuuksia niin kutsutussa "EBU-tilassa" (engl. EBU Mode). Aiemmat mittarit ovat voineet laskea keskimääräistä äänekkyystasoa ITU BS.1770-1 -suosituksen mukaan, mutta R 128:n julkaisemisen jälkeen mittareissa tulisi olla mukana myös EBU-tila. Tällä tarkoitetaan ITU BS.1770-1:sta jatkokehitettyä menetelmää laskea äänekkyystaso. Suosituksen tavoitteena on erimielisyyksiltä välttyminen terminologian, skaalojen ja mitausmenetelmien suhteen. [49]

EBU-tilan mukaisessa äänekkyyslaskennassa käytetään kolmea eri aikaskaalaa, jotka määräävät laskenta-algoritmin integraaliin käytettävän aikaikkunan (ks. luku 5.1) pituuden [49].

1. Hetkellisessä (engl. momentary) aikaskaalassa, josta käytetään lyhennettä "M", käytetään liukuvaa suorakaiteen muotoista aikaikkunaa, jonka pituus on 400 ms.
2. Lyhytaikaisessa (engl. short-term) aikaskaalassa, josta käytetään lyhennettä "S", aikaikkuna on 3 sekuntia. Mittarin on kuitenkin mitattava kyseinen arvo 10 kertaa sekunnissa.
3. Viimeinen aikaskaala on ohjelma- tai segmenttikohtainen. Tätä kutsutaan myös integroiduksi mittaukseksi (engl. integrated), josta käytetään lyhennettä "I". Nyt aikaikkuna määräytyy joko ohjelman pituuden tai ohjauspainikkeilla määrätyn pituuden mukaan.

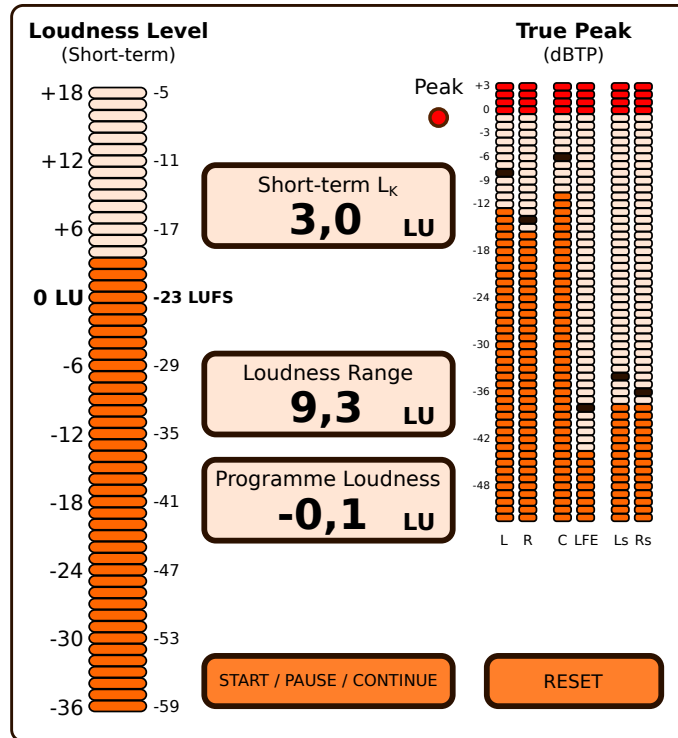
Reaaliaikaisista mittareista pitäisi löytyä kaikki kolme edellä mainittua skaalaa (M, S ja I). Ei-reaaliaikaisissa mittareissa riittää, että jokin näistä kolmesta löytyy, mutta jotka ovat silti toteutettu suosituksen määritelmien mukaan. Mittarin on myös pystyttävä näyttämään mittaustuloksista saatu suurin hetkellinen äänekkyystaso, joka nollaantuu samalla, kun integroitu äänekkyysmittaus nollataan. [49]

Mittarissa on oltava vähintään painikkeet "start", "pause" ja "continue", joilla integroitua äänekkyysmittausta sekä äänekkyiden vaihtelualueen mittausta voidaan hallita samanaikaisesti. Äänekkyiden vaihtelualueella (LRA) kuvataan äänimateriaalin dynamiikan laajuutta. Mittarissa pitäisi olla mahdollisuus kytkeä LRA-mittaus päälle tai pois. Äänekkyiden vaihtelualue käsitellään tarkemmin luvussa 5.3.2. Mittareista pitäisi löytyä myös nollauspainike ("reset"), joka nolaa sekä äänekkyysmittauksen että äänekkyiden vaihtelualueen mittauksen samanaikaisesti. [49]

Yksikkönä mittareissa käytetään L_K , jossa "L" tarkoittaa tasoa [55] ja "K" tarkoittaa K-painotusta (ks. luku 5.1). Mittareissa skaalan näyttäminen ei ole pakollinen. Jos skaala näytetään, on sen oltava muilta osin ITU-R BS.1771:n (luku 5.2) mukainen, mutta skaalan tulee alkaa -18 LU:sta ja päättyä +9 LU:hun. Mittarissa on oltava myös mahdollisuus kaksinkertaiseen skaalaan. Äänekkyystaso skaalassa on esitettävä joko absoluuttisena arvona (LUFS) tai suhteellisenä arvona (LU).

EBU-moodin mukaista mittaria on havainnollistettu kuvassa 16. Siinä vasemmassa laidassa on esitetty kaksinkertaisella skaalalla pylväs, joka näyttää lyhytaikaisen äänekkyystason. Mittarin alareunassa on painikkeet, joilla on mahdollista ohjata ohjelmaa äänekkyiden integroivaa mittausta. Äänekkyiden vaihtelualue on esitetty ohjelmaa äänekkyiden yläpuolella. Mittarin oikeassa laidassa on huipputasomittari, joka mittaa kanavien signaalin "todellista" huippua. Ylälaidassa on lisäksi indikaattori, joka ilmoittaa mahdollisesta -1 dBTP arvon ylityksestä. Mittarissa voi olla lisäksi graafinen näkymä, johon lyhytaikaiset äänekkyystasot piirtyvät.

Äänekkyystason integroivassa mittauksessa on käytettävä lisäksi niin kutsuttu veräjää (engl. gate), joka on yksi PLOUD:in kehittämä lisäys ITU BS.1770-1:een. Veräjä on suomenkielisen tietotekniikkasanaston määritelmän mukaan suotimen rakenneosana, jossa tapahtuvat loogiset valinnat, joten käänös lienee tässä yhteydessä sopivin [56]. Veräjän ideana on karsia mittaustuloksista materiaalin hiljaisimmat kohdat, jotta ne eivät laskisi lopullista äänekkyystasoa liikaa. [49]



Kuva 16: Esimerkki EBU-moodin mukaisesta mittarista.

PLOUD tutki kolmea eri veräjävaihtoehtoa tekemällä lukuisia mittauksia erityyppisillä materiaaleilla musiikista puheeseen. Tarkoituksena oli löytää paras veräjävaihtoehto, joka sopisi niin kapea- kuin laajadynaamiselle materiaalille. Vaihtoehtoina olivat kiinteän kynnyksen veräjä, suhteellisen kynnyksen veräjä sekä rekursiivinen veräjä. [53]

Kiinteän kynnyksen veräjässä mittaustuloksista yksinkertaisesti poistetaan jonkin valitun kiinteän kynnystason alittamat osat. Tämä tapa on yksinkertainen, mutta sillä on eräs merkittävä heikkous. Mittaus antaa lähes aina virheellisen tuloksen, koska valittu kynnystaso on riippumaton ohjelman absoluuttisesta tasosta. Näin ohjelman hiljaisimmissa kohdissa veräjän karsimat kohdat vaihtelevat absoluuttisesta tasosta riippuen. [53]

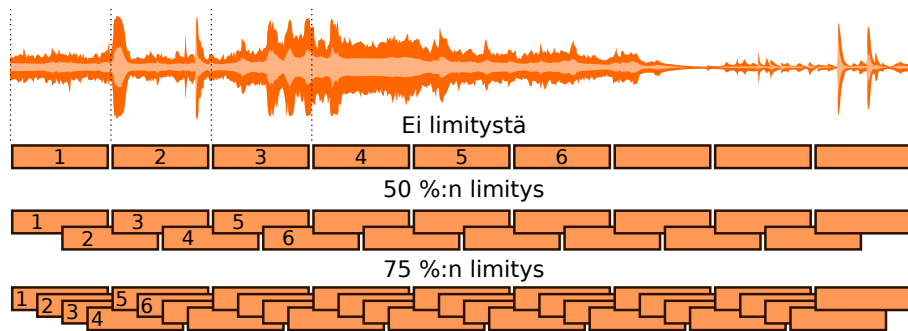
Suhteellisen kynnyksen veräjässä kynnystaso määräytyy BS.1770-1:n mukaisen integroidun äänekkyystason mukaan. Kynnystaso on siis ohjelmariippuvainen, jolloin absoluuttinen taso ei vaikuta lopulliseen äänekkyystasoon. Jos suhteelliseksi kynnysarvoksi asetetaan esimerkiksi -8 LU:ta ja ohjelman BS.1770-1:n mukainen integroitu äänekkyystaso on -23 LUFS, poistetaan kaikki ne hetkellisen aikaskaalan mittaustulokset, joiden äänekkyystaso on alle -31 LUFS. [53]

Rekursiivinen veräjä on vaihtoehtoista monimutkaisin ja prosessointitehoa eniten kuluttava. Tässä kynnystaso määräytyy iteratiivisesti suhteellisen kynnyksen veräjällä lasketuista mittaustuloksista. Ensin lasketaan siis BS.1770-1:n mukainen integroitu äänekkyystaso, joka määrää ensimmäisen iterointivaiheen suhteellisen veräjän kynnysarvon. Ensimmäisestä iterointivaiheesta saatu tulos määrää seuraavan iterointivaiheen veräjän kynnysarvon ja tätä prosessia jatketaan niin kauan kuin

äänekkyytaso ei enää merkittävästi muutu. Rekursiivinen veräjä on suhteellisen kynnyksen veräjän tapaan riippumaton ohjelman absoluuttisesta tasosta. [53]

Näistä kolmesta veräjävaihtoehdoista PLOUD päätyi suosittelemaan -8 LU:n suhteellisen kynnyksen veräjää. Päätös perustui kuuntelukokeisiin, joissa testattiin kutakin veräjävaihtoehtoa eri kynnysarvoilla. Tutkimuksissa parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui suhteellisen kynnyksen veräjä. Kynnysarvoista -6 ja -10 LU:n veräjät tuottivat parhaat tulokset, joten -8 LU:n veräjä on valittu kompromissina tästä välisestä. Myöhemmin suosituksiin lisättiin vielä vaatimus, että mittauksissa tulisi käyttää -8 LU:n suhteellisen kynnyksen veräjän lisäksi myös täysin hiljaisia osioita poistavaa -70 LUFS:n kiinteän kynnyksen veräjää. [49] [53]

Toinen PLOUD:in lisäämä ominaisuus äänekkyytlaskentaan on limitys, joka parantaa mittaustarkkuutta. ITU:n BS.1770-1:ssä 400 ms:n aikaskaalan hetkellinen äänekkyytaso mitataan 400 ms:n välein. PLOUD suosittelee varsinkin lyhyissä ohjelmissa vähintään 50 % limitystä, jolloin hetkellinen äänekkyytaso mitattaisiin 200 ms:n välein. [49] 50 %:n limityksellä saavutetaan huomattava parannus verrattuna limittymättömään mittaukseen. 75 %:n limityksellä mittausta saadaan edelleen tarkemmaksi, mutta huomattavaa parannusta suhteessa 50 %:n limitykseen ei enää saavuteta. [57] Eri limityksiä on havainnollistettu kuvassa 17.



Kuva 17: Havainnekuva äänekkyyksmittauksessa käytettävästä limityksestä.

5.3.2 EBU Tech 3342

Toinen dokumentti "EBU Tech 3342 - Loudness Range: A descriptor to supplement loudness normalisation in accordance with EBU R 128" esittelee äänekkyyden vaihtelualueen laskenta-algoritmin, joka on kehitetty TC Electronicin toimesta. Dokumentti sisältää määritelmän lisäksi myös valmiin Matlab-toteutuksen. [58]

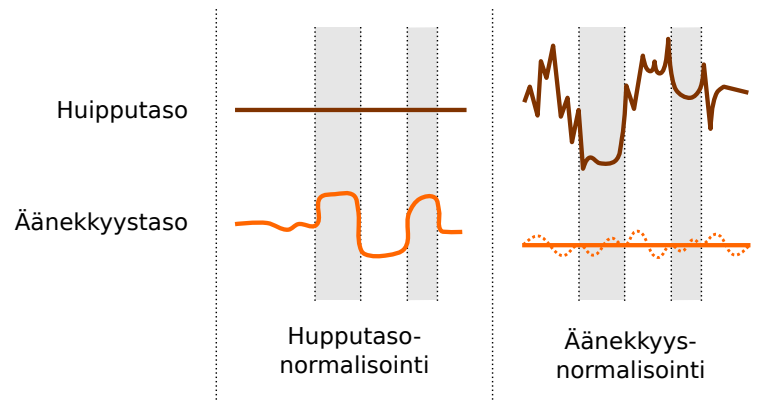
Äänekkyyden vaihtelualueen laskenta-algoritmi perustuu lyhytaikaisen äänekkyyksmittaustulosten tilastolliseen analyysiin. Mittauksessa on käytettävä 66 %:n limitystä, jotta mittaustarkkuus lyhyissä ohjelmissa olisi parempi. Toisin sanoen 3 sekunnin aikaskaalan lyhytaikainen äänekkyytaso lasketaan sekunnin välein. Tuloksia karsitaan ensin -70 LUFS:in kiinteän kynnyksen veräjällä ja lopuksi -20 LU:n suhteellisen kynnyksen veräjällä. Tämän tyyppinen karsiminen jättää mittauksesta pois ohjelman taka-alan äänet, taustakohinan sekä äänettömät kohdat. Jäljelle jääneistä tuloksista muodostetaan äänekkyytasetulosten mukaan kasvava lista, josta poimi-

taan kokonaispituuden suhteen kymmenennen prosentin kohdalta ensimmäinen äänekkyystasotulos ja 95. prosentin kohdalta toinen äänekkyystasotulos. Äänekkyysvaihtelualue määräytyy poimittujen äänekkyystasotulosten erotuksen mukaan. Yksikkönä käytetään LU:ta. [58]

5.3.3 EBU Tech 3343

Kolmas dokumentti "EBU Tech 3343 - Practical guidelines for Production and Implementation in accordance with EBU R 128" sisältää käytännön ohjeita äänekkyysmittausten ja -normalisoinnin toteuttamiseen sekä strategioita uusiin menetelmiin siirtymisestä. Dokumentti sisältää myös yhteenvedon EBU:n mukaisesta äänekkyyslaskennasta, uusista parametreista ja sovituiista raja-arvoista. [50]

Äänekkyysnormalisointi tarkoittaa ohjelmien äänekkyystasojen yhdenmukaistamista kokonaisuuksina. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjelman sisäiset äänekkyystasomuutokset sallitaan. Nykyään suositussa huipputasonormalisoinnissa ohjelman sisäiset huipputasovaihtelut menetetään. Äänekkyysnormalisoinnin ja huipputasonormalisoinnin välistä eroa on havainnollistettu kuvassa 18, johon on hahmoteltu ohjelmavaihdon yhteydessä ilmeneviä äänekkyystasomuutoksia. Huipputasonormalisoinnin tapauksessa äänisignaalin huiput pysyvät tasaisina, mutta ohjelmavaihdon yhteydessä voi esiintyä äänekkyystasomuutoksia. Kuvan oikealla puolella äänekkyysnormalisointitapauksessa ohjelmakohtaiset äänekkyystasot pysyvät vakioina ja huippuarvot saattavat vaihdella huomattavastikin. Toisin sanoen ohjelmassa voidaan hyödyntää dynamiikkaa. Kuvassa oranssi katkoviiva esittää ohjelman sisäistä äänekkyystasovaihtelua. Tässä korostetaan sitä, että ohjelman sisäiset äänekkyystasovaihtelut ovat sallittuja. [50]



Kuva 18: Huipputaso- ja äänekkyysnormalisoinnin ero. [50]

Normalisointivaihtoehtoina kyseinen tekninen dokumentti esittää kahta tapaa; materiaalin suora normalisointi ennen lähetystä tai normalisointi metatiedon avulla kuluttajapäässä. Näistä vaihtoehtoista ensimmäinen on PLOUD:in suosittelema tapa, koska se on yksinkertaisin ja laadun kannalta suotuisampi. Toista tapaa ei tästä huolimatta suljeta kokonaan pois, koska molemmat tavat voivat toimia myös rinnakkain. [50]

Äänekkyiden kannalta kiinnostavimpia metatietoparametreja ovat ohjelmaaänekkyys, dynamiikka-alueen hallinta ja downmix-kertoimet (ks. Terminologia). AC-3:n metatiedoissa vastaavia parametreja kutsutaan termeillä "dialnorm" (ks. Terminologia), "dynrng" ja "Center/Surround Downmix Level". Ohjelmaaänekkyysmetatieto tulisi olla suurimmassa osassa materiaalista kiinteästi -23 LUFS, mutta poikkeustapauksissa arvo saa olla jokin muu. Kaikissa tapauksissa kyseisen metatiedon on kuitenkin oltava materiaalia vastaava. Dynamiikka-alueen hallinta -metatieto suositellaan AC-3:n tapauksessa asetettavaksi oletusarvoisesti arvoon "None". Alasmiksaus-kertoimet on asetettava siten, että tilääni ja siitä metatietojen perusteella tuotettu stereosignaali ovat yhtä äänekäitä. [50]

Äänekkyysnormalisointiin siirtymiseen esitetään muutamia eri strategioita. Tuotannossa ja jälkikäsittelyssä voidaan siirtyä joko suoraan käyttämään uusia äänekkyysnormalisointimenetelmiä tai sitten vanhat tavat säilytetään ja äänekkyystaso normalisoidaan jälkikäteen. Jälkimmäinen strategia sopii hyvin siirtymävaiheeseen, koska uusi mittarointitapa vaatii totuttelua. Ensin mainittu strategia on kuitenkin PLOUD:in suosittelema, koska uudella mittaroinnilla saavutetaan hallitummat ohjelman sisäiset äänekkyystasot. Välitöntä siirtymistä suositellaan erityisesti jälkikäsittelyssä ja tiedostopohjaisissa järjestelmissä. [50]

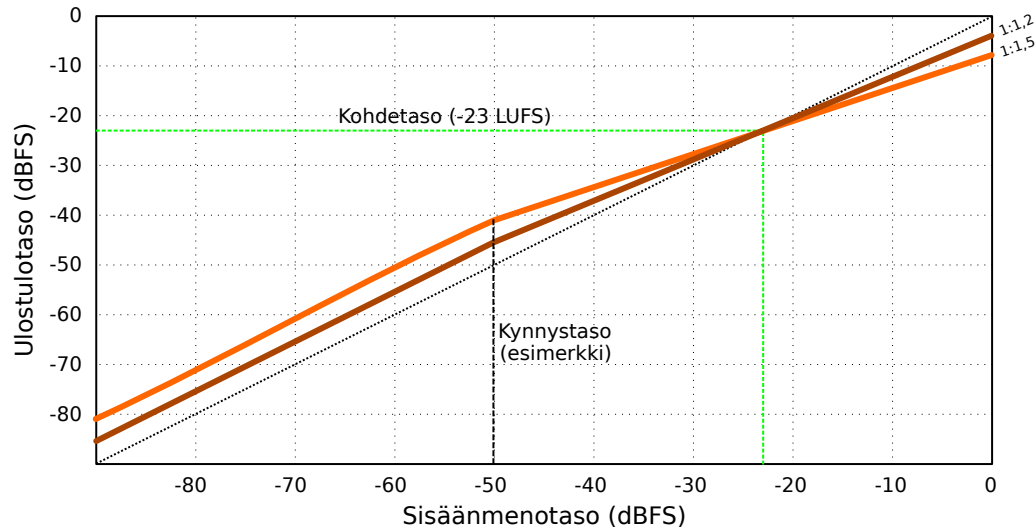
Vaikka ohjelmaaänekkyys onkin mahdollista tasata uusilla mittareilla, PLOUD muistuttaa korvakuuloisen havainnoinnin tärkeydestä. Mittareilla ei saa koskaan selaista informaatiota, jota korvilla on mahdollista havaita. Äänekkyysmittarit ovat oiva apuväline korvakuuloiselle äänitarkkailulle. Suorien lähetysten alussa äänitarkkailijat voivat helposti tarkistuttaa subjektiivisen äänekkyysaistimuksen voimakkuuden mittareiden avulla, jolloin ohjelma voidaan miksata kokonaisuudessaan korvakuulolla. Varhaisten kokemusten perusteella tavoiteäänekkyystaso on tällä tavalla mahdollista saavuttaa ± 1 LU:n tarkkuudella, jota pidetään suosituksen mukaan sallittuna äänekkyiden vaihteluvälinä. Jos tarkkaa -23 LUFS:n tasoa ei saavuteta, on tässäkin tapauksessa ohjelma normalisoitava jälkikäteen mahdollista uusintalahetystä varten. [50]

Kuulohavaintoon perustuvan miksaamisen tueksi on syytä tasata tuotantopaikkojen äänentoistotaso yhteneväksi. Tekniset vaatimukset tulevat EBU:n teknisestä dokumentista 3276-E, jossa on määritelty kuunteluolosuhteet ääniohjelmamateriaalin arviointiin. Kaksikanavaisen äänentoistojärjestelmän yhdestä kaiuttimesta saatu A-painotettu äänenpainetaso (SPL) kuuntelupisteessä tulisi olla tasaisella -18 dBFS:n tasoisella kohinalla (taajuuskaista 500 Hz:stä 2,5 kHz:iin) mitattuna 78 dB(A). Monoäänentoistossa kaiuttimesta saatu äänitaso kuuntelukohdassa tulisi olla 85 dB(A). Kyseisen dokumentin täydennyksessä on määritelty, että viisikanavaisessa äänentoistojärjestelmässä samanlaisella kohinalla mitattu yhden kaiuttimen C-painotettu äänenpainetaso (SPL) tulisi olla 78 dB(C). [50] [59] [60]

Välitön siirtyminen äänekkyysmittarien käyttöön mahdollistaa myös äänekkyiden vaihtelun alueen (LRA) tarkkailun. Näin dynamiikkaan on mahdollista kiinnittää huomiota jo tuotannossa, jolloin lopullinen materiaali saadaan paremmin puitteisiin sopivaksi. Tämä on tärkeä seikka, koska jotkin kuunteluolosuhteet sallivat ainoastaan rajoitetun suuruisen dynamiikka-alueen (kuva 7 sivulla 13). [50]

Jos äänekkyiden vaihtelualue on niin suuri, että tarvittavaa äänekkyystason nor-

malisointia ei voida toteuttaa ylittämättä suurinta sallittua hetkellistä huipputasoa (-1 dBTP), suositellaan materiaalia prosessoitavan PLOUD:in määrittelymätason kynnystason (alle -40 dBFS) omaavan kevyen (1:1,2-1:1,5) kompressorin avulla. Kuvassa 19 on havainnollistettu kompressiokäyrien ääripäät -50 dBFS:n kynnystasolla. [50]



Kuva 19: Äänekkyuden vaihtelualueen kaventamiseen suositeltu kompressointi. [50]

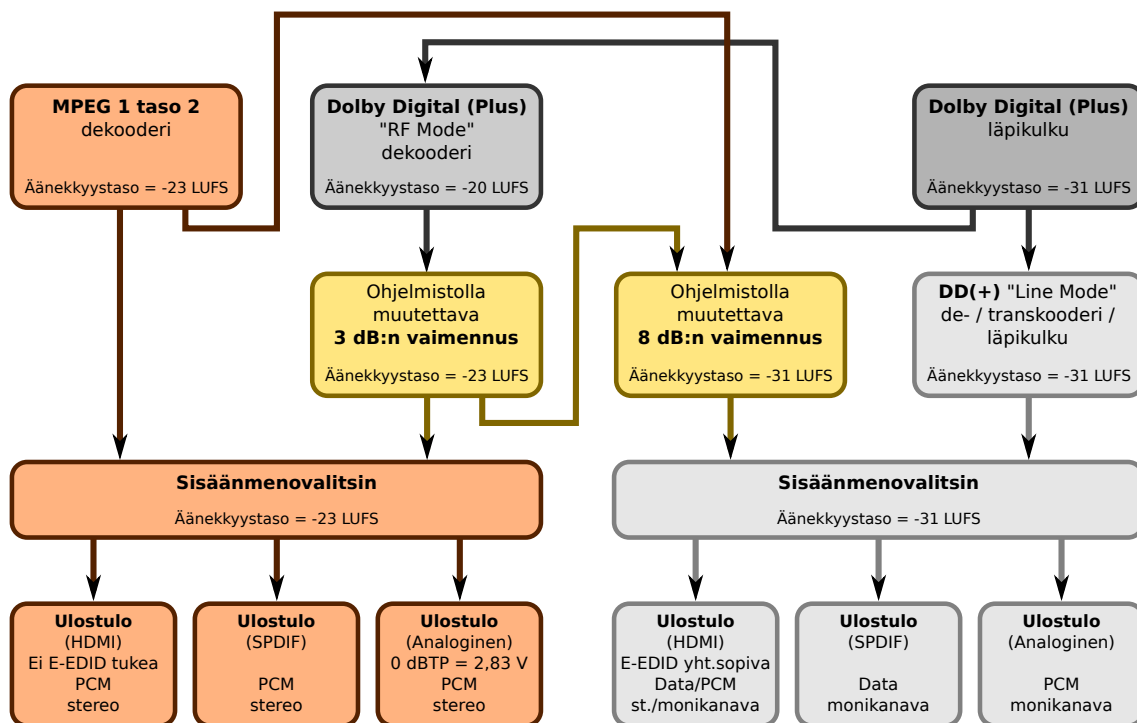
5.3.4 EBU Tech 3344

Neljäs dokumentti "EBU Tech 3344 - Practical guidelines for distribution systems in accordance with EBU R 128" sisältää suositukset ohjelmansiirtoketjun osalta tuotannosta kuluttajalle. Dokumentissa käsitellään niin analogiset kuin digitaaliset jakelukanavat radion ja television osalta. Myös vastaanottimien toimintaan otetaan kantaa. [61] EBU ei ehtinyt julkaista kyseistä dokumenttia tämän diplomityön aikana, joten jotkin yksityiskohdat ovat saattaneet muuttua. Tässä luvussa esitetyt asiat perustuvat EBU:n PLOUD-ryhmän julkaisemiin luonnoksiin.

Kanavien välisten äänekkyystaserojen minimoimiseksi PLOUD suosittelee automaattista päivän pituisten kanavakohtaisten mittausten perusteella tehtävää normalisointia. Jokaisella kanavalla suositellaan olevan EBU R 128:n mukainen äänekkyysmittari, joka ohjaa kanavakohtaista säädintä. Mittausten aloitusajankohdaksi voidaan valita esimerkiksi kello kolme aamuyöstä, jolloin myös säätö suoritetaan. 24 tunnin pituisten mittausten perusteella tiedetään, kuinka paljon kanavakohtaiset keskimääräiset äänekkyystasot poikkeavat -23 LUFS:n tavoitetasosta. Tämän tiedon perusteella voidaan ohjata kanavakohtaista säädintä, joka muuttaa seuraavan päivän ohjelmien keskimääräistä äänekkyystasoa mitatun poikkeaman verran tietyllä tarkkuudella. Tällä tavalla kanavan pitkäaikainen keskimääräinen äänekkyystaso pysyy tilastollisesti kohdetason läheisyydessä, mikä on kanavien välisten äänekkyystaserojen minimoimisen kannalta varsin toimiva ratkaisu. [61]

PLOUD pitää erityisen tärkeänä, että kanavakohtaisessa äänekkyysnormalisoinnissa dynamiikka-alueen ominaisuuksia ei muuteta, ellei tekniikka ehdottomasti sitä vaadi. Esimerkkinä teknisestä vaatimuksesta on jakelukanavan yliohjautumisen estäminen. [61]

Digitaalisessa televisioverkossa tulee jatkossa olemaan kasvavassa määrin kanavia, joissa ääni on pakattu jollain muulla formaatilla kuin MPEG 1 taso 2:lla. Esimerkiksi Yleisradiossa mahdollisella uudella HD-kanavalla ääni lähetetään AC-3-formaatissa, jossa pitää ottaa huomioon myös metatietoparametrit. Vastaanottavasta päästä löytyy laaja kirjo laitteita, joiden rajapinnoissa ohjelmaaäänekkyys voi väärillä asetuksilla poiketa tavoitetasosta. PLOUD on laatinut yleisimmille vastaanottopään tapauksille toimintamallit ratkaisuehdotuksina kyseisiin ongelmiin. Tässä työssä esitellään ainoastaan tapaukset, jotka ovat relevantteja Yleisradion kannalta. Tapaukset on esitetty kaaviona kuvassa 20. Tarkempi kuvaus eri variaatioista kannattaa tarkistaa viitteestä [61].



Kuva 20: Vastaanottimen toimintamalli äänekkyiden hallinnassa. [61]

Digitaalinen signaalitie mahdollistaa analogista signaalitietä laajemman dynamiikka-alueen. Tästä syystä esimerkiksi AC-3- ja HE-AAC-koodattujen ohjelmien A-painotetun äänekkyiden normalisointitasoksi on valittu -31 dBFS. Analogisiin signaaliteihin tarkoitetun äänen, kuten MPEG 1 taso 2 -formaatin tapauksessa, normalisointitasot ovat -20 dBFS:n luokkaa. Jotta kaikkien koodausmenetelmien välillä äänekkyystasot pysyisivät vakiona, on vastaanottolaitteiden asetusten oltava uusimpien suositusten mukaiset. [61]

Tarkastellaan ensin tilannetta, jossa vastaanotettu ääni välitetään datamuotoisena signaalina esimerkiksi S/PDIF-ulostuloon tai E-EDID yhteensopivaan HDMI-

ulostuloon. E-EDID on tietorakenne, jonka mukana välitetään tiedot video- ja äänimateriaalin sisällöstä. Jos vastaanotin välittää AC-3-äänen edelleen datamuotoisena, pysyy kohdetaso kaikissa tapauksissa muuttumattomana. MPEG-dekooderilta tulevaa signaalia on kuitenkin vaimennettava noin 11 dB:iä, jos se välitetään esimerkiksi HDMI:llä kotiteatterivahvistimelle. Kun ohjelmat ovat jatkossa lähempänä -23 LUFS:ää, tulee MPEG-ääntä vaimentaa tällöin ainoastaan 8 dB:iä. Kyseinen vaimennus on muutettava joko kotiteatterivahvistimessa sisäänmenoporttikohtaisesti tai mahdollisesti vastaanottimen omista ulostuloporttien asetuksista. Kotiteatterivahvistimissa sisäinen digitaalisen äänen referenssitaso tulee pitää tasolla -31 LUFS. [61] [62]

Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, jossa vastaanotettu ääni välitetään PCM-muotoisena signaalina esimerkiksi analogiseen SCART-ulostuloon tai vain PCM-yhteensopivaan HDMI-ulostuloon, jossa E-EDID ei ole tuettu. Nyt MPEG-dekooderilta tuleva signaali välitetään kaikissa tapauksissa ilman vahvistuksia. AC-3-koodatun äänen tapauksessa datamuotoinen signaali puretaan ensin Dolbyn dekooderilla PCM-muotoon. Tämän jälkeen signaalia vahvistetaan 11 dB:iä, mikä nostaa datamuotoisen signaalin äänekkyyden -31 dBFS:tä -20 dBFS:n tasolle. Koska tuleva normalisointitaso on jatkossa -23 LUFS, on myös Dolby muuttamassa vahvistusta 8 dB:iin. Jos kotiteatterivahvistimessa on Dolbyn vanha dekooderi, tulee PCM-muotoisen äänen ulostulotasot muuttaa sisäänmenoporttikohtaisesti vastaamaan -23 LUFS:ää. [45] [61] [62]

6 Äänekkyystutkimus Yleisradion televisiotoinnassa

Yleisradion televisio-ohjelmien äänekkyysongelmat on yleisesti tiedostettu, mikä nähdään muun muassa katsojapalautteista. Ongelman todellisesta laajuudesta ei kuitenkaan ole tarkkaa käsitystä. Pelkällä korvakuulolla voidaan havaita Yleisradion ohjelmien välillä olevan äänekkyystasovaihtelua, mutta tämä ei itsessään riitä päteväksi osoitukseksi uusien investointien ja muutosten tarpeellisuudesta. Tässä diplomityössä tehdään kattava tutkimus, jonka tavoitteena on antaa konkreettista tietoa nykyisestä äänekkyystilanteesta.

6.1 Mittausmenetelmien valinta

Äänekkyystason mittaamiseen tarkoitettuja laitteita tai ohjelmia löytyy markkinoilta kymmeniä. Nämä analysoivat joko tiedostoja tai sisäänmenevää signaalia. Useissa laitteissa äänekkyysalgoritmi on pelkän ITU BS.1770-1:n mukainen, joten lopputulos on poikkeava suhteessa EBU R 128:n mukaisella algoritmilla laskettuun tulokseen. Markkinoille on ilmestynyt tämän työn aikana runsaasti myös uusia EBU R 128:n mukaisia laitteita. Suurin osa niistä mittaa äänekkyystasoja reaaliajassa luvussa 5.3.1 esitetyllä tavalla, mutta osa mittaa äänekkyystasoja myös tiedosto kerrallaan. Nämä mittaustavat on tarkoitettu lähinnä tuotantotilanteeseen tai ohjelman jälkikäsittelyyn. Laajempaan äänekkyysanalyysiin tarvittaisiin ohjelma, joka lukisi automaattisesti tiedostoja, mittaisi niiden äänekkyysparametrit ja tallentaisi tulokset muistiin. Tämän tyyppisiä ohjelmia on tullut markkinoille vasta muutamia, mutta niidenkään ominaisuudet eivät täysin kata tutkimuksen vaatimuksia. Tästä syystä oli kehitettävä jokin muu keino äänekkyysmittauksille.

Laajan äänekkyysmittauksen voi tehdä kahdella tavalla, joista ensimmäinen perustuu tiedostojen läpikäyntiin ja toinen lähetysvirran mittaamiseen. Ensimmäinen tapa on yksinkertaisin ja tämän tyyppinen mittaus on käytössä useilla laitevalmistajilla. Tässä mittauksessa on mahdollista käydä läpi suuri joukko tiedostoja ja mahdollisesti jopa korjata niiden äänekkyystaso. Puutteena tässä tavassa on, että todellisista ohjelmien välisistä äänekkyystasovaihteluista ei saada tietoa. Tietokannassa on ainoastaan tallenteet, joita toistetaan mahdollisesti useaan kertaan lähetyksessä ja useassa eri järjestyksessä. Lisäksi Yleisradiossa ei ole sen tyyppistä tietokantaa, josta ohjelmien äänitiedostot olisi mahdollista yksinkertaisesti hakea. Ohjelmamateriaalin luku vaatii erityistä rajapintojen hallintaa, jota kaupalliset sovellukset ei pysty tekemään.

Toinenkin mittaustapa, lähetysvirran mittaus, on mahdollinen muutamilla markkinoilla olevilla laitteilla tai ohjelmilla. Lähetysvirran mittauksessa hyvänä puolena on se, että siinä mitataan todellisuudessa vallinnutta tilannetta. Näin nähdään, kuinka suuria äänekkyystasovaihteluja katsoja on kokenut. Ongelmaksi muodostuu ainoastaan mittauksen saumakohtien huomioiminen. Ilman sitä mittari laskisi ainoastaan hetkellisiä äänekkyystasoja ja näin ei saataisi ohjelmakohtaisia integroituja äänekkyystasoja.

Kaupalliset mittarit toimivat lähes poikkeuksetta ilman ohjelman alku- ja loppuaikoja, jolloin koko päivän ohjelmavirta tulkitaan yhdeksi ohjelmaksi. Näin saadaan ainoastaan yksi integroitu äänekkyystaso tai vaihtoehtoisesti integroitua äänekkyystasoja saadaan esimerkiksi sekunnin välein. Tähän mennessä yhteen kaupalliseen ohjelmaan on mahdollista liittää kuvailutietoa, jossa on ohjelman sauma-kohtien ajat. Sen ostaminen ei tullut kuitenkaan ajankohtaiseksi, koska tähän tutkimukseen ehdittiin kehittää jo oma mittausympäristö.

6.2 Mittausympäristön kehitys ja toteutus

Tämän diplomityön alkuvaiheissa olin tutkinut EBU:n ja ITU:n julkaisemia algoritmeja Octave-nimisellä numeeriseen laskentaan tarkoitettulla ohjelmistolla. Kyseinen ohjelmisto muistuttaa suurpiirteisesti yleisemmin tunnettua Matlab-nimistä vastinetta. Octave-funktioiden ohjelmointi todettiin erittäin hyväksi ja tehokkaaksi keinoksi hahmottaa äänekkyysalgoritmit pieniä yksityiskohtia myöten. Vaikka matematiikka algoritmeissa ei kovin monimutkaista olekaan, ei teknisten dokumenttien pohjalta välttämättä pysty suoraan ymmärtämään kaikkia laskennassa vaadittuja vaiheita. Työn alkuvaiheissa ohjelmoin oman R 128:n mukaisen äänekkyyslaskentafunktion Octaveen. Tästä kehittyi idea ohjelmoida oma analysointiohjelma, josta jalostui lopulta täysin ilmaisiin työkaluihin perustuva ja tutkimusvaatimuksiin sopiva ohjelmisto. Näin ei tarvinnut investoida tuhansia euroja mittalaitteisiin tai -ohjelmiin, joiden ominaisuudet eivät olisi täysin kattaneet kaikkia tarpeita. Markkinoilla myynnissä olevat laitteet olisivat olleet muutenkin kankeita taipumaan mahdollisiin muutoksiin, joita tämän tutkimuksen aikana ilmeni.

Työn aikana kehitetyssä laskentaohjelmistossa lähestymistapana on lähetysvirran mittaaminen. Ohjelmistoon on toteutettu ominaisuus, jonka avulla ohjelmien nimet sekä alku- ja loppuajat saadaan liitettyä mittausprosessiin. Näin saadaan poimittua jatkuvasta lähetysvirrasta kunkin ohjelman ääni erikseen, mikä mahdollistaa äänekkyysparametrien laskennan ohjelmakohtaisesti.

Tutkimusaineistona käytetään siis Yleisradion TV1, TV2, FST ja Teema-kanavien MPEG-lähetysvirtaa (MPEG-TS, engl. MPEG transport stream), josta on poimittu MPEG 1 taso 2 -koodatut pää-äänikomponentit aikavälillä 6-24. Aikaväli mittauksissa on rajoitettu, koska yöaikaan ei tv-lähetyksissä ole tutkimuksen kannalta kovinkaan kiinnostavaa aineistoa. Näin saadaan säästettyä kovalevytilaa ja laskenta-aikaa, mikä on suotavaa mittalaitteiston rajallisten ominaisuuksien takia. Lähetysvirta haetaan serveriltä, joka tallentaa jatkuvasti Uudenmaan alueen maanpäällisen digitaalisen televisioverkon A-kanavanippua 10 minuutin pätkissä. Lähetystiedot haetaan ohjelmistosuunnittelujärjestelmästä taulukkorakenteisena tekstitiedostona (CSV, engl. comma-separated values) päivä ja kanava kerrallaan.

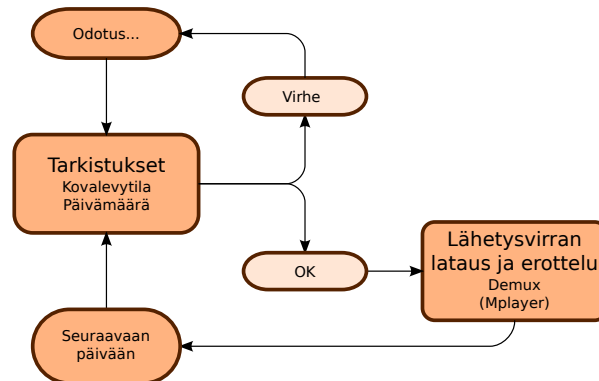
Laskentaohjelmiston alustana toimii käytännön syistä tavallinen toimistotietokone, jossa käyttöjärjestelmänä on Windows XP. Koneessa on Intelin kaksisytiminen 2,66 GHz:n kellotaajuudella toimiva prosessori ja kaksi gigatavua muistia. Mittauksia varten koneeseen lisättiin ylimääräinen yhden teratavun kokoinen kovalevy, joka on liitetty SATA 3.0 -väylään. Koska mittauksissa otettiin käyttöön tavallinen toimistotietokone, ei tämän työn takia tarvinnut ostaa erillistä uutta konetta. Näin

vältyttiin lisäksi mahdollisilta tietoturva- ja verkkoyhteys-ongelmilta.

Ohjelmiston automatiikka on tehty Bash-komentotulkille, jonka avulla ohjataan ohjelmistossa tarvittavia muita työkaluja. Automatiikan kehittämistyön alkuaikoina suurena apuna oli Yle Tekniikassa kesäharjoittelijana ollut Jimi Juola. Hänen avulleen opin itsekin käyttämään komentotulkia, mikä mahdollisti ohjelmiston joustavan jatkokehittelyn myöhemmin ilmenneiden uusien tarpeiden perusteella. Kaikkien ohjelmakokonaisuuksien suunnittelussa käytettiin pelkästään ilmaisia ohjelmia, joiden hankintakustannuksia ei ollut.

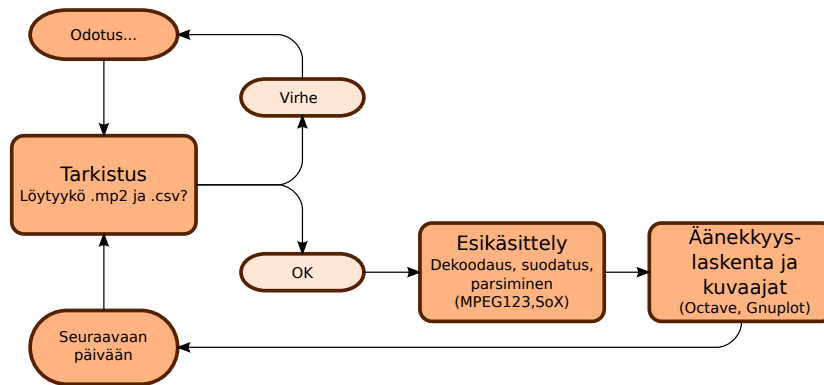
Laskentaohjelmiston automatiikka on jaettu kahteen osaan, jotka ovat lataus ja laskenta. Niiden toimintalogiikkaa on havainnollistettu lohkokaavioilla kuvissa 21 ja 22.

Ensimmäinen automatiikan osa lataa lähetysvirtaa serveriltä ja tekee siitä päiväkohtaisesti ensin kokonaisen 18 tunnin pituisen lähetysvirtatiedoston, josta MPEG 1 taso 2 -koodatut äänikomponentit puretaan Mplayer-nimisellä ohjelmalla pakettitunnisteiden (PID, engl. packet ID) perusteella. Äänikomponentit siirretään lopuksi omaan kansioon, jonka jälkeen ohjelmassa siirrytään seuraavan päivän lähetysvirran lataamiseen. Automatiikka tarkistaa ennen lataamista kovalevytilan ja päivämäärän, jotta ristiriitatilanteita ei pääse syntymään.



Kuva 21: Lohkokaavio laskentaohjelmiston lataus-osasta.

Automatiikan toinen osa hoitaa äänekkyyslaskennan. Ensin se tarkistaa, onko lähetysvirrasta puretut tarvittavat äänikomponentit sekä ohjelmistosuunnittelujärjestelmästä haetut lähetystiedot käytettävissä. Jos tarvittavat tiedostot löytyvät, ohjelma parsii ensin lähetystiedot CSV-muotoisesta tekstitiedostosta Octavella helposti luettavaan taulukkomuotoon. Tämän jälkeen MPEG 1 taso 2 -pakatut äänikomponentit puretaan MPG123-nimisellä ohjelmalla lineaariseen muotoon. Seuraavassa vaiheessa ääni suodatetaan äänekkyysalgoritmin mukaisella K-painotetulla esisuodattimella käyttämällä SoX-nimistä (Sound eXchange) yleishyödyllistä työkalua ja pakataan häviöttömään FLAC-formaattiin (engl. Free Lossless Audio Codec). FLAC tarjoaa laajan otsikkoavaruuden, mikä on välttämätön ominaisuus 18 tunnin pituisille tiedostoille. Lopuksi automatiikka kutsuu Octavea, jolla ajetaan laskentafunktioita, sekä Gnuplot-nimistä piirto-ohjelmaa, jolla tulokset piirretään havainnolliseen muotoon vektorigrafiikkana.



Kuva 22: Lohkokaavio laskentaohjelmiston laskenta-osasta.

Octavella toteutettu laskentaosuus on jaettu erillisiin funktioihin, joita ovat lähetystiedon muokkaus, hetkellisen äänekkyystason laskenta ja integroidun äänekkyystason laskenta. Ensimmäisessä vaiheessa lähetystiedot luetaan Octaveen, jossa ohjelman alkuaikoja muokataan lähetysketjun aiheuttaman viiveen takia. Lähetystiedoissa oleva aika on se, mikä toteutuu ennen operaattorirajapintaa. Tämän jälkeen operaattorilla tapahtuva paketointi aiheuttaa lähetysvirtaan viivettä, joka on otettava huomioon mittauksissa. Lähetystietojen muokkauksen jälkeen siirrytään seuraavaan Octave-funktioon, joka laskee 18 tunnin pituisesta K-painotetusta äänitiedostosta hetkellisen äänekkyystason 400 millisekunnin aikaikkunalla 200 millisekunnin välein. Taulukot, joihin on tallennettu ohjelmatiedot ja hetkelliset äänekkyystasot, syötetään seuraavaan Octave-funktioon, joka laskee lopulta kullekin taulukossa olevalle ohjelmalle ITU:n mukaisen absoluuttisen äänekkyystason sekä EBU R 128:n mukaisen ohjelmaaänekkyiden. Lopuksi tulokset tallennetaan tiedostoihin.

Octave-funktioilla on automatisoitu myös tulosten analyysit, mikä on välttämätön ominaisuus suurten tutkimusaineistomäärien käsittelyssä. Ensin kaikki tallennetut mittaustulokset muunnetaan yhdeksi suureksi taulukoksi. Tämän jälkeen suoritetaan tarvittavat lisälaskutoimitukset, kuten ohjelmavaihdon yhteydessä olevien äänekkyystasomuutosten suuruus. Octaven analyysifunktio hakee kaikki tallennetut tulokset kovalevyiltä ja laskee niiden avulla kullekin äänekkyystasolle kertyneet ohjelmamäärät ja ohjelma-ajat. Tämän jälkeen kaikki tallennetut äänekkyystasotulokset muutetaan vielä muotoon, jota Microsoftin taulukkolaskentaohjelmisto Excel osaa tulkita. Tämä mahdollistaa ohjelmien äänekkyystasojen ja ohjelmien välisten äänekkyystasomuutosten analysoinnin Excelin tarjoamien ominaisuuksien avulla.

Lisätyökaluina automaattista laskentaohjelmistoa täydentämään ohjelmoin erillisen Gnuplottiin perustuvan piirtotyökalun ja Octave-funktioihin perustuvan äänekkyysmittarin. Molempia työkaluja on mahdollista ohjata verkkolevyn kautta. Piirtotyökalu tulostaa annettujen syötetietojen avulla kuvaajia halutuilta kanavilta ja ajankohdilta hyödyntäen äänekkyysmittauksista saatuja tuloksia. Tämä työkalu osoittautui erittäin tarpeelliseksi mittaustulosten analysoinnissa. Äänekkyysmittari laskee verkkolevylle ladattujen WAV-äänitiedostojen äänekkyysparametrit, eli ohjelmaaänekkyiden, äänekkyiden vaihtelualueen ja suurimman hetkellisen huipputasen, ja piirtää lisäksi hetkellisten äänekkyystasojen perusteella kuvaajan.

6.3 Mittaustulosten analysointi

Tässä luvussa esitettyyn analyysiin laskentaohjelmisto ehti mitata äänekkyystasot noin 70000 ohjelmaan. Tämän tyyppinen määrällisesti runsas tutkimusaineisto mahdollistaa erittäin luotettavan ja kattavan tutkimustuloksen. Aikaisempien julkaistujen tutkimusten pohjalta ei yksikään televisiotoimija ole vielä tehnyt vastaavan tyyppistä yhtä laajaa analyysiä omista ohjelmistaan, joten tulokset lienevät kiinnostavia myös muille tahoille.

Ennen analyysiä oli tuloksista etsittävä mahdolliset virheet. Laskennan aikana kävi ilmi, että mahdolliset häiriöt tai päivitykset lähetysjärjestelmässä vaikuttivat mittauksen toimivuuteen. Laskentaohjelmistossa on erityisen kriittistä, että äänimateriaali ja lähetystiedot pysyvät samassa vaiheessa. Jos lähetyksessä ilmeni katkoksia, aiheutui tästä vaihevirhettä mittaukseen. Nämä virheet oli mahdollista kartoittaa puuttuvien lähetysvirtatiedostojen tai epätavallisten tulosten perusteella. Virheet oli mahdollista havaita myös päivä ja kanavakohtaisten äänekkyyskuvaajien avulla.

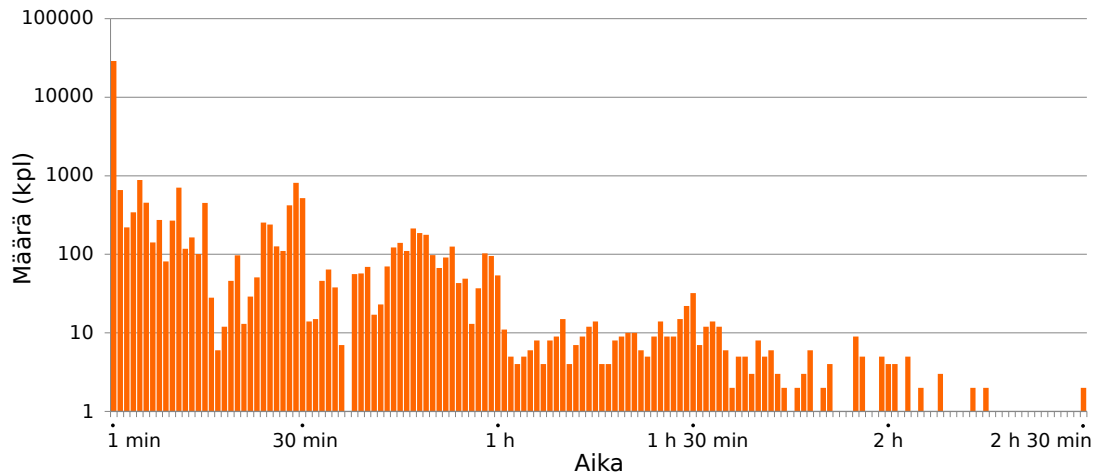
Suurin osa mittausvirheistä oli mahdollista eliminoida ohjelmistoon liitetyn automaattisen tarkastusominaisuuden avulla. Koska mittausaineisto oli erittäin laaja, eivät pienet satunnaiset virheet vaikuta lopulliseen analyysiin kovinkaan merkittävästi. Lisäksi virheiden vaikutus näkyi ainoastaan lyhyissä ohjelmissa. Siksi analyysistä poistettiin alle 6 sekunnin mittaiset ohjelmat, joita oli ohjelmien kokonaismäärästä noin 0,1 %. Kyseiset ohjelmat sisältävät muutenkin ainoastaan mustia ja äänettämiä välikkeitä, joiden mittaamisesta ei tässä tutkimuksessa ollut hyötyä.

Analyysivaiheessa tuloksista karsittiin myös muita tutkimuksen kannalta epäoleellisia ohjelmia. Lukumäärällisesti noin prosentti ohjelmista on uutisikkuna- tai tietovisatyyppisiä, joiden taustalla on radio-ohjelmaa tai tasaista taustamusiikkia. Lisäksi Ylen kanavilla pyörii aamu-tv-ohjelmia, jotka koostuvat useista eri ohjelmapalasista. Lähetystiedoissa näitä ohjelmia ei ole eritelty, jolloin yksi aamu-tv-ohjelma laskettaisiin aina yhdeksi ohjelmaksi. Aamu-tv-ohjelmia oli noin 0,3 % ohjelmien kokonaismäärästä.

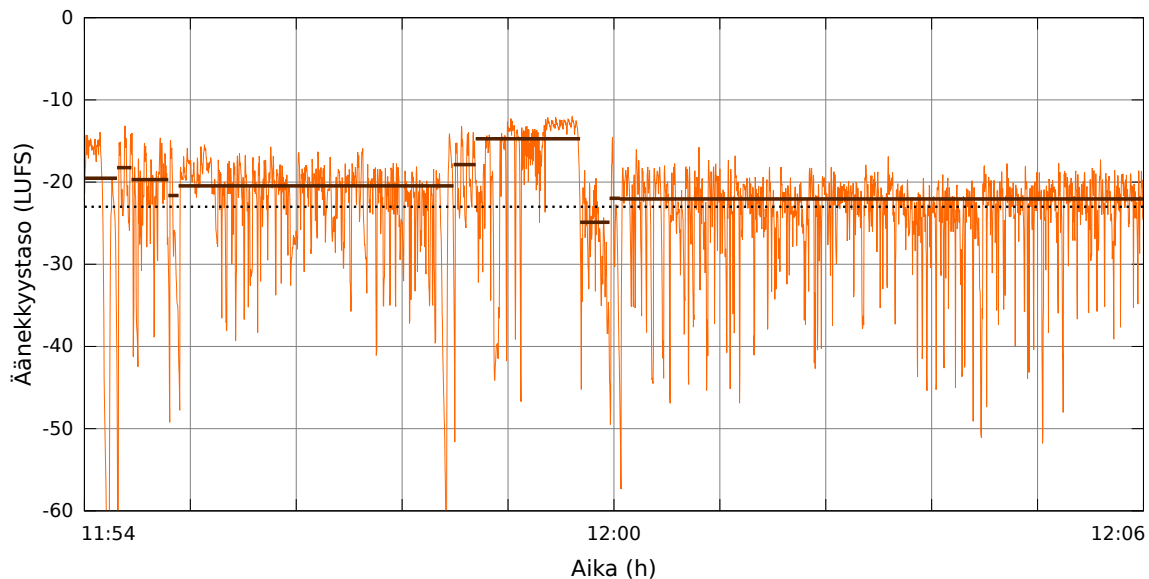
Karsinnoista jäljelle jääneiden ohjelmien kestojen hajonta on esitetty kuvassa 23. Siitä nähdään, että suurin osa ohjelmista on kestollisesti alle minuutin pituisia mainoksia, juontoja tai muita välikkeitä. Niiden osuus kaikista ohjelmista on yli 70 %.

Mittaustuloksia on mahdollista tutkia yksityiskohtaisesti kuvaajien avulla. Tämän mahdollistaa laskentaohjelmiston rinnalle ohjelmoitu piirtotyökalu, jonka avulla päivän äänekkyystasomuutoksia voidaan havainnollistaa graafisesti kuvan 24 tapaan. Siinä nopeasti muuttuva käyrä kuvaa hetkellisiä äänekkyystasoja. Tummemat eripituiset vaakasuorat viivat kuvaavat ohjelmaaänekkyyskäyriä. Viivoista näkee myös ohjelmien alku- ja loppuajankohdat. Yhtenäinen katkoviiva kuvaa äänekkyystasoa -23 LUFS, johon ohjelmat tulisi tulevaisuudessa normalisoida. Kuvan 24 tulokset on mitattu 24. syyskuuta 2010 TV1:ltä kello 11:54-12:06 välisenä aikana.

Aikaväli kuvassa 24 on 12 minuuttia, mikä mahdollistaa hetkellisten äänekkyysmuutosten helpomman tarkkailun. Hetkellinen äänekkyystaso on mitattu 200 millisekunnin välein, joten vieläkin tarkempi tarkastelu olisi mahdollista. Jos aikaväliä pidentää, ei hetkellisestä äänekkyyskäyrästä näe enää kovinkaan tarkasti muutoksia,



Kuva 23: Tutkimusaineiston ohjelmien kestojen jakauma.



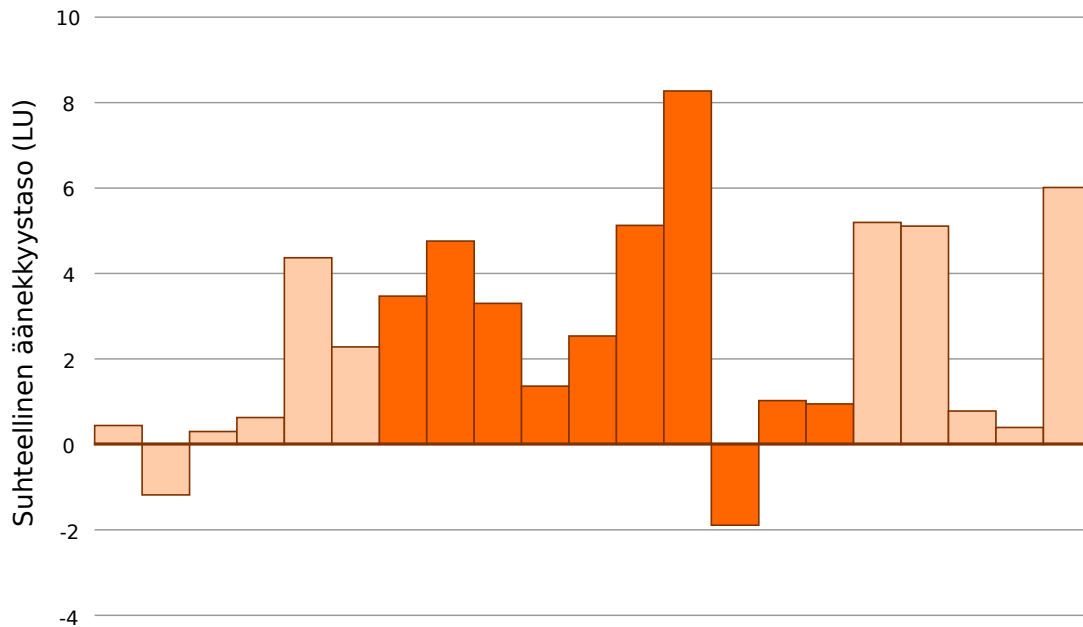
Kuva 24: Piirtotyökalulla tulostettu äänekkyysmittaustulosten graafinen esitysmuoto. (Mitattu 24.9.2010 TV1 klo 11:54-12:06)

mutta siitä näkee melko hyvin äänekkyuden vaihtelualueen suuruuden. Tämän tyyppinen kuvaaja on esitetty liitteen [A](#) kuvassa [A1](#), jossa aikavälinä on 2 tuntia. Siinä ei enää erotu lyhyitä välitteitä, mutta varsinaisten ohjelmien äänekkyystasovaihtelu erottuu selvästi. Kuvaan on jälkikäteen lisätty ohjelmien nimet, jotta ohjelmiin viittaaminen olisi helpompaa.

Kuvasta [A1](#) nähdään, että ohjelmat "Pingu - luokkaretkellä" ja "Lulu ja lehmä" ovat huomattavasti muita ohjelmia äänekäämpiä. Kuvasta nähdään myös, kuinka "Lulu ja lehmä"-ohjelmassa hetkellinen äänekkyystaso vaihtelee huomattavasti kapeammalla alueella kuin esimerkiksi ohjelmassa "Neppajymykerho".

Kun mittaustulokset on muunneltu Excel-yhteensopivaan muotoon, voi tulosten avulla piirtää äänekkyystasoista kuvan [25](#) mukaisia pylväsmuotoisia kuvaajia. Ku-

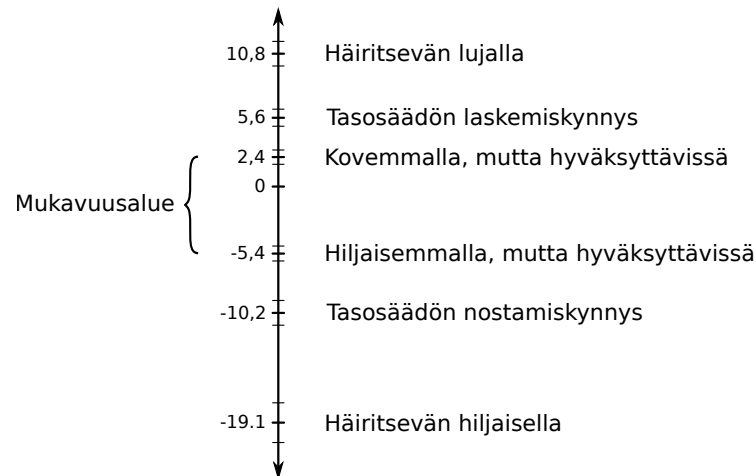
van 25 mittaustulokset on mitattu kuvan 24 tapaan 24. syyskuuta 2010 TV1:ltä, mutta aikaväli on hieman laajempi (kello 11:00-13:00). Kuvassa 25 tummemmat pylväät esittävät aikaväliä, joka vastaa kuvan 24 aikaväliä. Tummemmat pylväät kuvaavat siis samoja ohjelmia, jotka näkyvät kuvassa 24. Pylväsmuotoisesta kuvajasta näkee selkeästi, että äänekäimmän ohjelman loputtua katsoja kokee noin 10 dB:n äänekkyystason pienenemisen.



Kuva 25: Pylväsmuotoinen esitys ohjelmien välisistä äänekkyystasomuutoksista. (Mitattu 24.9.2010 TV1 klo 11:00-13:00)

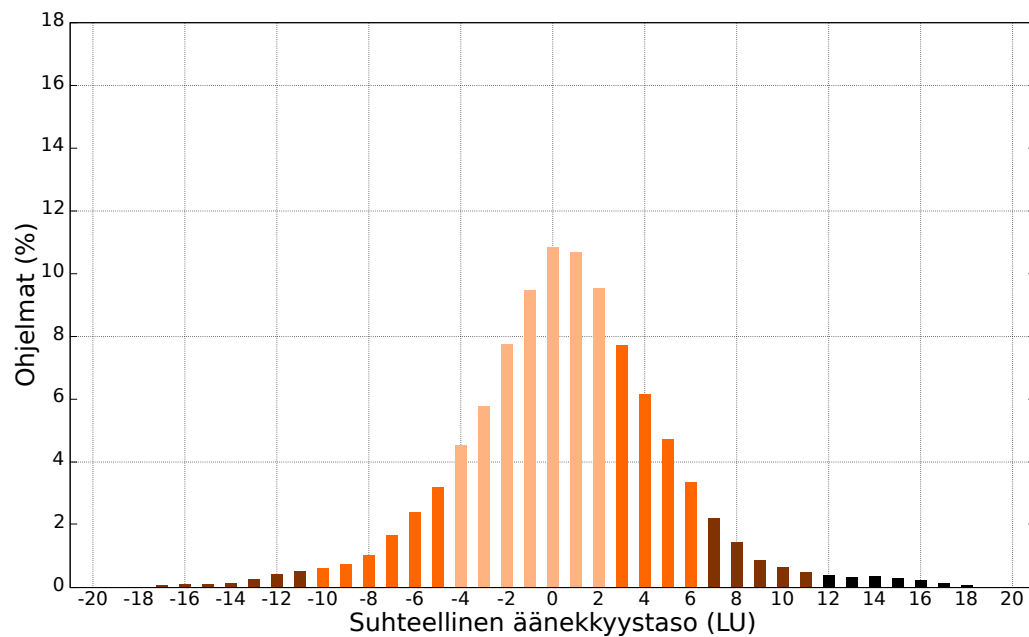
Äänekkyystasomuutoksissa muutaman desibelin poikkeama ei välttämättä ole katsojan kannalta häiritsevä. Äänekkyystasomuutosten suuruuden ja katsojan kokemuksen välisestä yhteydestä on julkaistu vuonna 2003 tutkimus, jossa mitattiin kynnysarvot sille, kuinka suurella äänekkyystasomuutoksella katsoja keskimäärin kokee tarvetta muuttaa äänentoistotasoa. Nämä kynnysarvot on esitetty kuvassa 26. Mielenkiintoisen tutkimuksen tuloksista tekee se, että kynnysarvot eivät ole samoja äänekkyystason kasvaessa ja pienentyessä. Katsojat kokevat äänekkyystason kasvamisen häiritsevämpänä kuin äänekkyystason pienenemisen. Keskimäärin 6 dB:n äänekkyystason kasvulla katsoja korjaa äänentoistotason mielekkääksi. Jos äänekkyystaso laskee, tarvitaan noin 10 dB:n ero ohjelmien välillä, jotta katsojalla syntyisi tarve korjaukselle. Häiritsevyyden rajat poikkeavat vieläkin enemmän. Äänekkyystasomuutos koetaan häiritseväksi noin 10 dB:n äänekkyystason kasvulla tai noin 20 dB:n äänekkyystason pienenemisellä. Tutkimuksen mukaan noin 3 dB:n äänekkyystason kasvulla tai noin 6 dB:n äänekkyystason pienenemisellä ei ollut kovin suurta merkitystä katsojan kokemuksessa. [10] Jos tutkimusta soveltaa edellä esitettyyn pylväsmalliseen kuvajajaan (kuva 25), voidaan todeta katsojalla olleen todennäköisesti tarve muuttaa äänentoistotasoa ainakin kahdessa ohjelmavaihdossa.

Mukavuusalueen ja muiden kynnysarvojen perusteella voidaan vetää johtopäätöksiä katsojan kokemuksesta, kun tiedetään äänekkyystasomuutosten suuruudet



Kuva 26: Äänekkyystasomuutosten mukavuusalueet. [10]

ohjelmien saumakohdissa. Mittaustuloksista voidaan muodostaa kuvan 27 mukainen histogrammi, joka kuvaa äänekkyystasomuutoksen suuruuden jakaumaa. Histogrammiin on liitetty kuvan 26 raja-arvot siten, että vaaleammista pylväistä tummempiin siirryttäessä, kasvaa katsojan tarve muuttaa äänentoistotasoa.



Kuva 27: Histogrammi äänekkyystasomuutosten suuruudesta.

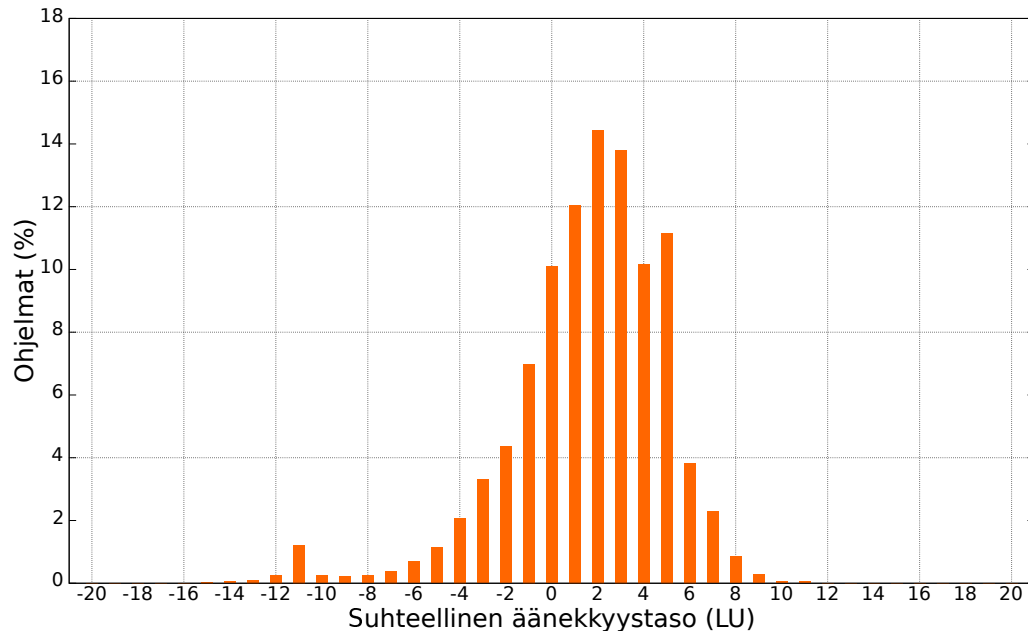
Kuvan 27 jakauma voidaan purkaa vielä numeeriseen esitysmuotoon, joka kertoo prosentuaalisen osuuden ohjelmista, joissa katsojalla on ollut tarve äänentasomuutokselle. Nämä osuudet on esitetty taulukossa 4. Tuloksista nähdään, että suurin osa ohjelmien välisistä äänekkyystasovaihteluista on siedettävällä tasolla.

Seuraavaksi mittaustuloksista poimitaan ohjelmakohtaiset äänekkyystasot. Niiden avulla saadaan tietoa siitä, kuinka laajalle ohjelmamateriaalien äänekkyystasot

Taulukko 4: Ohjelmien saumakohdissa ilmenneiden äänekkyystasomuutosten prosentuaaliset osuudet kuvan 26 mukaisilla kynnyksarvoilla.

Raja-arvot	Osuus
Mukavuusalue	63,5 %
Kovemmalla/Hiljaisemmalla, mutta hyväksyttävissä	25,3 %
Tasosäädön laskemis-/nostamiskynnys	9,1 %
Häiritsevän lujalla/hiljaisella	2,1 %

ovat hajaantuneet. Ohjelmakohtaisten suhteellisten äänekkyystasojen jakauma on esitetty kuvassa 28.



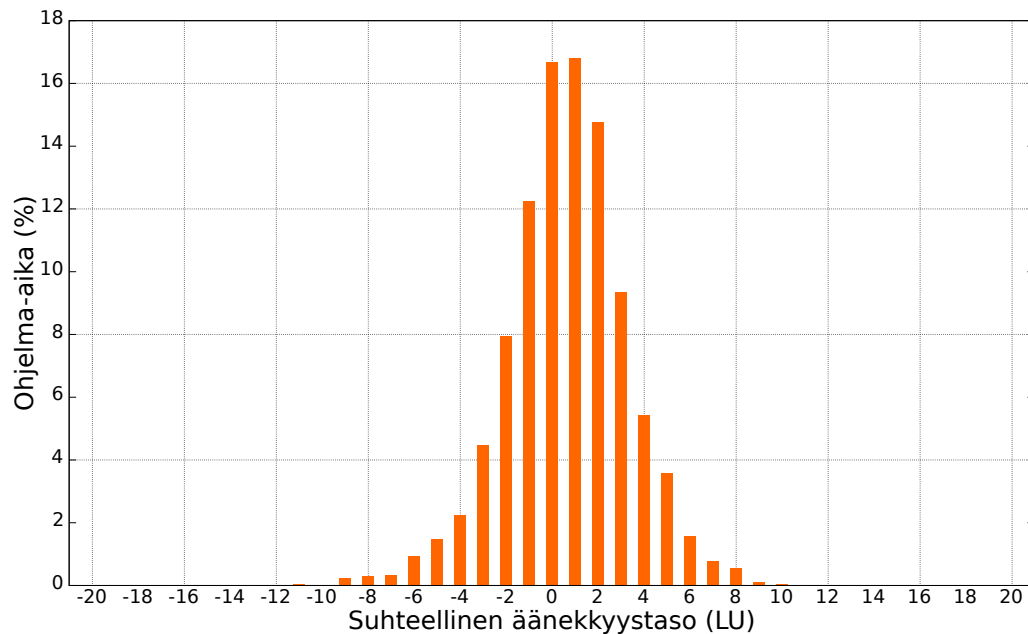
Kuva 28: Histogrammi ohjelmakohtaisista suhteellisista äänekkyystasoista.

EBU:n suosituksen mukainen tavoiteäänekkyystaso on $-23 \text{ LUFS} \pm 1 \text{ LU}$:n vaihteluvälillä. Tätä tietoa hyödyntäen voidaan kuvasta 28 päätellä, kuinka paljon Yleisradion kanavien äänekkyystasot keskimäärin poikkeavat tavoitearvosta. Kuvasta nähdään jakauman painopisteen (moodin) olevan arvossa 2 LU, mikä tarkoittaa kanavien keskimääräisen äänekkyystason olevan noin 2 dB:iä uutta tavoitetasoa kovemmalla. Tämä vastaa aiemmin tehtyjä tutkimuksia televisiotoimijoiden keskimääräisestä äänekkyystasosta [63]. Kuvasta 28 nähdään myös, että jakauma on vino negatiiviselle puolelle. Vinouma johtuu FST-kanavalla esitetystä välikkeestä, joka toistuu aika ajoin. Kyseinen välike on keskimäärin 13 dB:iä muita ohjelmia hiljaisemmalla, mikä varmasti aiheuttaa hämmennystä katsojien keskuudessa. Jakauman laajuudesta voidaan vetää johtopäätös, että äänekkyystaso vaihtelee vinoumasta huolimatta -9 LU:n ja 9 LU:n välillä.

Lyhyiden välikkeiden määrällinen osuus kaikista ohjelmista todettiin olevan yli 70 %:n luokkaa. Välikkeiden ajallinen osuus on kuitenkin noin 4 %:n luokkaa kaikkien ohjelmien yhteenlasketusta ajasta. Välikkeiden merkitys on suuri, koska epäjatkuva äänekkyystaso koetaan juuri välikkeiden aikana selkeämmin ohjelmavaihtoihi-
totiheyden takia. Ohjelmaaänekkyysien määrällinen jakauma ei kuitenkaan kerro koko totuutta, jossa varsinaisilla ohjelmilla on tärkeä rooli. Tästä syystä pitkien ohjelmien painoarvoa voidaan analyysissä lisätä.

Pitkien ohjelmien merkitystä voidaan korostaa karsimalla mittaustuloksista lyhyet ohjelmat kokonaan pois. Tässä ongelmaksi muodostuu rajanveto, mistä lähtien ohjelmat ovat varsinaisia ohjelmia ja mistä lähtien välikkeitä. Paremmaksi ratkaisuksi osoittautui ohjelmien painottaminen niiden kestolla. Jakauma muodostetaan siten, että ohjelmamäärien summaamisen sijaan summataan ohjelmakestoja. Näin jakaumasta saadaan esimerkiksi tieto, kuinka suuria äänekkyystasomuutoksia katsoja todennäköisimmin kokee kanavaa vaihtaessa.

Ohjelmien kestoilla painotettu jakauma on esitetty kuvassa 29. Siitä nähdään painopisteen olevan arvossa 1 LU. Kestopainotettu jakauma on laajuudeltaan samaa luokkaa kuin ohjelmamäärillä koostettu jakauma. Ohjelmaaänekkyys vaihtelee kestopainotettuna ± 9 LU:n välillä.



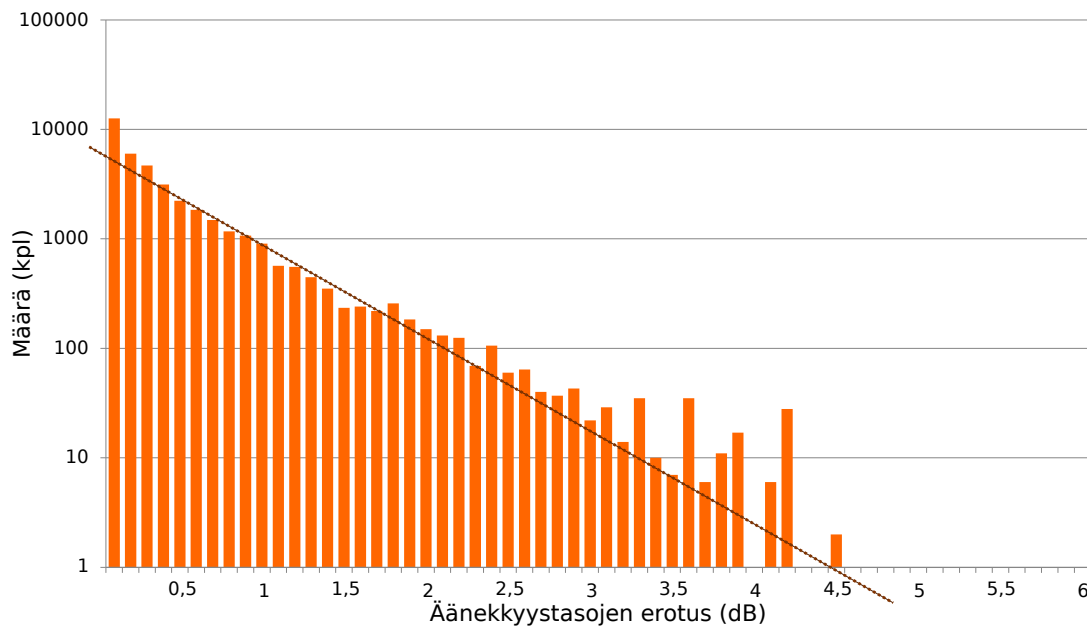
Kuva 29: Histogrammi ohjelmakohtaisista suhteellisista äänekkyystasoista ohjelman kestolla painotettuna.

Äänekkyysjakaumia voidaan tarkastella lisäksi vielä kanavakohtaisesti, jolloin nähdään, kuinka paljon eri kanavien äänekkyystasot eroavat toisistaan. Liitteessä A on esitetty kanavakohtaiset jakaumat niin määrällisesti kuin ajallisesti. Kuvissa A2-A5 äänekkyyshajonta on muodostettu ohjelmamäärien mukaan ja kuvissa A6-A9 hajonta on muodostettu ohjelmien kestolla painotettuna.

Kanavakohtaisista äänekkyysjakaumista nähdään, että lyhyissä ohjelmavälikkeis-

sä on huomattavasti enemmän vaihtelua kuin varsinaisissa pitkissä ohjelmissa. Tämän voi päätellä vertaamalla ohjelmamäärien mukaan koostettujen jakaumien laajuuksia ja painopisteitä aikajakaumiin. Kaikilla kanavilla jakaumien laajuus, vinous sekä painopisteen poikkeama 0 LU:sta ovat suurempia määräjakaumissa kuin aikajakaumissa. Näiden lisäksi TV1:n ja FST:n määräjakaumista löytyy poikkeuksellisen suuret kertymät tietyillä äänekkyystasoilla. Tämä voidaan havaita aikajakaumista. Kuvissa A2 ja A4 on selvästi erilliset normaalista kellokäyrämuodosta poikkeavat huiput, jotka ovat muodostuneet joistain tietyistä ohjelmista, joissa äänekkyystaso on ollut säännöllisesti pielessä. Kuvissa A6 ja A8 huippuja ei ole. Tästä voidaan päätellä, että säännölliset poikkeamat johtuvat lyhyistä ohjelmavälikkeistä.

Ohjelmaaänekkyysien ja äänekkyystasomuutosten lisäksi mittaustuloksista saadaan analysoitua muutakin mielenkiintoista. Runsaalla mittaustulosmäärällä voidaan tutkia esimerkiksi, miten EBU:n R 128-suosituksen tuomat algoritmimuutokset vaikuttavat lopputulokseen. Toisin sanoen, ITU BS.1770-1:n mukaisella algoritmilla saatuja tuloksia voidaan verrata EBU R 128:n mukaisella algoritmilla saatuihin tuloksiin. Yksinkertaisesti jokaisen ohjelman tapauksessa R 128:n mukaisesta ohjelmaaänekkyystä vähennetään BS.1770-1:n mukainen ohjelmaaänekkyys ja koostetaan erotuksista jakauma.



Kuva 30: R 128 ja BS.1770-1 algoritmeilla saaduista ohjelmaaänekkyyksistä lasketujen erotusten jakauma.

R 128:n ja BS.1770-1:n algoritmien erotuksista koostettu jakauma on esitetty kuvassa 30. Kun kertymäakseli muutettiin logaritmiseen muotoon, jakauma osoitautui käyttäytyvän melko tasaisesti. Koska R 128:n ero BS.1770-1:een on se, että R 128:ssa on käytössä veräjä (engl. gate), tiedetään kyseisten algoritmien erotuksen suuruuden riippuvan äänekkyuden vaihtelualueen suuruudesta. Tästä voidaan vetää edelleen johtopäätös, että kuvassa 30 esitetty jakauma kertoo jotain Ylen ohjelmien äänekkyuden vaihtelualueesta. Toisin sanoen suurimmassa osassa ohjelmis-

ta BS.1770-1 antaa saman tuloksen kuin R 128, koska dynamiikka on niissä kapea. Jos äänekkyuden vaihtelualue on suuri, antaa R 128 hyvinkin eri tuloksen kuin BS.1770-1. Jakaumasta nähdään vielä, että suurin ero kyseisten algoritmien välillä on 4,5 dB:iä. Tämän tyyppisestä käyttäytymisestä ei aikaisemmissa julkaistuissa tutkimuksissa ole viitteitä. Kyseistä ominaisuutta olisi voinut hyödyntää äänekkyysalgoritmia kehitettäessä ja veräjän kynnysarvon vaikutusta tutkittaessa.

Äänekkyyslaskentaohjelmistossa kaikki mittaustulokset yhdistettiin yhteen suureen CSV-tiedostoon, jonka pohjalta oli mahdollista luoda Excel-taulukkolaskentaohjelmistossa pivot-taulukko. Näin mittaustuloksia pystyi helposti tutkimaan kanavittain, lähetyspäivittäin tai ohjelmittain. Pivot-taulukossa ohjelmien äänekkyystasot laskettiin kyseisille kanava-, lähetyspäivä- tai ohjelmatasoille aritmeettisin keskiarvoina, jolloin vaikkapa tietyn kanavan ja päivän ohjelmien äänekkyystasoista laskettu keskiarvo oli helposti saatavissa. Tasoja voi muokata joustavasti vaikkapa siten, että ensimmäisellä tasolla on kanava, toisella ohjelmanimi ja kolmannella ohjelman alkuaika. Näin pystyi helposti etsimään tietyn hakusanan, kuten esimerkiksi "uutiset", sisältäviä ohjelmia ja tarkastelemaan niiden äänekkyystasojen keskiarvoja.

6.4 Mittausluotettavuus

Äänekkyysmittauksissa virhelähteitä ovat laskentatarkkuus, käytössä oleva pakkausmuoto sekä lähetystietojen ja äänimateriaalin välinen vaihe-ero. Koska äänekkyysalgoritmi on ainoastaan karkea mallinne subjektiivisesta havainnoinnista, eivät edellä mainitut virhelähteet ole merkityksellisiä. Dominoivana virhelähteenä voidaan pitää siis itse algoritmia. Esimerkiksi laskentatarkkuudesta aiheutunut virhe on mitätön verrattuna subjektiivisen havainnon ja objektiivisen mittaustuloksen väliseen eroon, joka voi olla katsojasta riippuen jopa desibelien luokkaa [17] [53]. Mittausohjelmiston laskentatarkkuus on testattu EBU:n julkaisemien testisignaalien avulla.

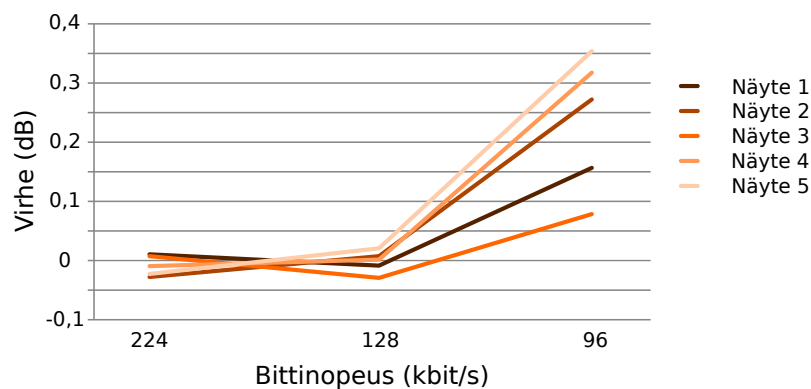
Äänekkyysmittauksissa materiaalina käytettiin maanpäällisen digitaalisen televisioverkon lähetysvirrasta poimittuja MPEG 1 taso 2 -formaattiin pakattuja tiedostoja, joiden bittinopeus on suurimmaksi osaksi 224 kbit/s. Pienimmillään bittinopeus on poikkeustapauksissa 128 kbit/s. Koska pakattu ääni on se, jonka katsoja kuulee, ei pakkauksen aiheuttamaa vaikutusta voida suoraan pitää virhelähteenä. Tämä pätee silloin, jos tutkitaan ainoastaan katsojan kokemia äänekkyystasomuutoksia. Tilanne on toinen, jos pyritään selvittämään pakatun materiaalin avulla, kuinka paljon alkuperäisissä ohjelmissa on keskinäistä äänekkyyshajontaa. Tällöin äänimateriaalin pakkausformaattia voidaan ehdottomasti pitää virhelähteenä.

Pakkausformaatin aiheuttaman virheen määrittämisessä on käytetty viittä pakkaamatonta ääninäytettä. Kahdessa ensimmäisessä näytteessä on laajempi dynamiikka kuin kolmessa viimeisessä. Jokainen näyte pakataan kolmella eri bittinopeudella siten, että näytetaajuus ja resoluutio pidetään samana. Pakatuista näytteistä saatuja äänekkyystasoja on verrattu pakkaamattomaan näytteeseen ja niiden erotus on laskettu taulukkoon 5. Näistä arvoista on piirretty vielä graafinen esitys kuvaan 31.

Taulukon 5 arvoista tai kuvasta 31 nähdään, että bittinopeuksilla 224 kbit/s ja

Taulukko 5: MPEG 1 taso 2 -pakkausformaatin aiheuttaman virheen suuruus äänekkyysmittaustuloksiin eri bittinopeuksilla suhteessa pakkaamattoman materiaaliin.

Näyte	224 kbit/s	128 kbit/s	96 kbit/s
nro	Δ (dB)	Δ (dB)	Δ (dB)
1	0,011	-0,008	0,157
2	-0,028	0,007	0,272
3	0,007	-0,029	0,078
4	-0,009	0,002	0,317
5	-0,023	0,021	0,354



Kuva 31: Graafinen esitys MPEG 1 taso 2 -pakkausformaatin aiheuttamasta virheestä äänekkyysmittauksissa.

128 kbit/s MPEG pakkaus ei juuri vaikuta äänekkyysmittaustuloksiin. Näillä bittinopeuksilla virhemarginaali on noin $\pm 0,03$ dB:n luokkaa. Jos pakkausta tiivistetään 96 kbit/s bittinopeuteen, kasvaa virhemarginaali noin $\pm 0,3$ desibeliin. Pakkauksen aiheuttama virhe ei siis ole merkittävä Ylen kanavilla käytössä olevilla bittinopeuksilla.

Mittauksissa on ainoastaan yksi merkittävä satunnaisvirhelähde, joka syntyy lähetystietojen ja ohjelmamateriaalin välisestä vaihevirheestä. Toisin sanoen, jos lähetyksessä syntyy katkoksia tai muita häiriöitä, voi lähetysvirrasta puuttua jopa useita sekunteja paketteja. Tämä heijastuu mittauksiin siten, että äänimateriaali ei enää välttämättä kuljekaane lähetystietojen kanssa samassa vaiheessa. Kun paketteja puuttuu, ei mitattava äänimateriaali ole välttämättä enää ehyt. Mittausohjelmisto ei ymmärrä lisätä hiljaisuutta kyseiselle katkoskohdalle. Tässä tutkimuksessa yksinkertaisesti eliminoitiin kaikki ne päivät, joissa jonkin kanavan äänitiedosto oli normaalia pienempi. Eliminointi on ohjelmoitu ohjelmakoodiin, joten manuaalista tarkastusta ei tarvitse tehdä.

Mittaustuloksia voi halutessaan tarkkailla myös muilla keinoin. Tehokkain tapa on tutkia päivittäisiä graafisia äänekkyyskuvaajia. Tässä suurena apuna on tämän työn aikana luotu piirtotyökalu, jota on mahdollista käyttää myös automatiikalla.

Näin jokaisen päivän kuvaajia ei tarvitse luoda yksitellen.

Lähetystietojen ja äänimateriaalin välinen vaihe-ero aiheuttaa suurimpia virheitä lyhyissä ohjelmissa. Kun ohjelman kesto kasvaa kymmeniin sekunteihin, ei pieni vaihe-ero enää haittaa. Kyseinen virhe on lisäksi satunnaishuontoinen, jolloin suuri tutkimusaineistomäärä on tässä eduksi. Yksittäisten ohjelmien aiheuttamat virheet histogrammeihin pienenevät tutkimusaineistomäärän kasvaessa.

Edellisistä seikoista voidaan vetää johtopäätös, että itse mittauksen luotettavuus on riittävä. Selvästi suurimmassa osassa ohjelmia vaihe-eroa ei esiinny, jolloin mittaustarkkuuden rajana voidaan pitää näissä tapauksissa pakkausalgoritmin virhettä $\pm 0,03$ dB:iä. Koska algoritmi itsessään on niinkin karkea, että subjektiivisen havainnon ja mittauksen välinen ero voi olla desibelien luokkaa, ovat mittauksissa syntyneet virheet merkityksettömiä.

6.5 Johtopäätökset

Äänekkyysnormalisointi tuo tuotantoon ja lähetystekniikkaan mahdollisesti suuria muutoksia niin laitekantaan kuin toimintatapoihin. Siksi on erittäin tärkeää lähestyä tämän tyyppistä uudistusta todellisen tarpeen kautta. Näin investoinnit on mahdollista keskittää sinne, missä niitä eniten tarvitaan. Tässä työssä tehty tutkimus antaa selviä viitteitä siitä, että kanavien sisäiset sekä kanavien väliset äänekkyystasovaihtelut ovat suuria. Katsojilta tuleva palaute on siis täysin perusteltua.

Mittaustuloksista nähdään, että suurin osa ohjelmavaihdosten äänekkyystasomuutoksista on mukavuusalueen sisällä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että tilanne olisi hyvä, koska ihmiset eivät yleensä huomaa ääntä, jos siinä ei ole mitään vikaa. Vasta virheen sattuessa äänenlaatuun kiinnitetään huomiota ja näin mahdollinen äänekkyystasomuutos voi olla harvasta esiintymistiheydestä huolimatta häiritsevä.

Pahimmat ongelmat esiintyvät useimmin varsinaisten ohjelmien välissä esitettävissä lyhyissä väliskeissä. Tämä voidaan todeta vertailemalla kanavakohtaisia äänekkyysjakaumia ajallisesti ja määrällisesti. Jakaumista voidaan päätellä myös harrastuksen olevan suuri.

Piirtotyökalulla muodostetuista kuvaajista on saatu selville myös aamun lastenohjelmien suuri äänekkyystasovaihtelu. Kuvassa A1 on esitetty eräs tällainen aamu. Kyseiset ohjelmat ovat pääsääntöisesti ostettua materiaalia, joissa äänekkyystasot tyypillisesti vaihtelee omaa tuotantoa enemmän.

7 Ratkaisukeinot järjestelmätasolla

Tässä luvussa annetaan Yleisradion televisiotoiminnan eri järjestelmiin niin teknologisia kuin toimintatapoihin kantaa ottavia ratkaisuehdotusvaihtoehtoja, joiden avulla äänekkyysongelma on mahdollista saada hallintaan. Koska äänekkyysongelma johtuu useista eri tekijöistä, on ratkaisuehdotuksiakin monia. Luvussa 4.1 esitetty yksinkertaistettu äänen kulkema reitti Yleisradion televisiotoiminnan järjestelmässä toimii hyvänä ratkaisuehdotusten jakajana. Jokainen järjestelmän osa on otettu ratkaisuehdotuksissa huomioon.

Vaikka ratkaisut selitetään ainoastaan pintapuolisesti ideatasolla, on tässä työssä katsottu tarpeelliseksi antaa kullekin ehdotukselle suurpiirteinen kustannusarvio. Tämä helpottaa jonkin verran lopullista päätöksentekoprosessia ja budjetointia. Kustannusarvioiden avulla on myös mahdollista punnita eri ratkaisujen kustannustehokkuutta, eli sitä kuinka suuri hyöty saadaan tietyllä rahallisella panostuksella.

7.1 Automaattiset äänekkyysprosessorit lähetysketjussa

Äänekkyysongelmaan on kehitetty vuosikymmenten varrella monia erityyppisiä lähetysketjuun liitettäviä automaattisia säätölaitteita. Niiden avulla ohjelmien äänikomponentteja voidaan laskea ja säätää lähes reaaliajassa.

Automaattisten äänekkyysprosessorien hankinta on valitettavan helppo perustella niiden tarjoaman yksinkertaisen ja halvan ratkaisumallin takia, jossa ei ensinnäkään tarvitse puuttua tuotantotilanteeseen. Esimerkiksi mainoskanavilla tuotantotilanteeseen vaikuttaminen olisi käytännössä jopa mahdotonta, koska itse tuotetun materiaalin osuus on yleensä pieni. Toisekseen investoinnit hoituvat kerralla ja niihin tarvittavat kulut ovat olemattomat verrattuna muihin ratkaisumalleihin. Yhdellä muutaman tuhannen euron laitteella on mahdollista hoitaa useiden kanavien äänekkyysprosessointi.

On kuitenkin seikkoja, jotka tekevät automaattisista lähetysketjuun tarkoitettamista äänekkyysprosessoreista Yleisradion kaltaisessa toimintaympäristössä hyödyttömiä. Koska kyseiset laitteet laskevat ja säätävät hetkellistä äänekkyystasoa reaaliajassa, tasaavat ne ohjelman sisäiset muutokset. Näin tuotantotilanteessa mahdollisesti hyvinkin tarkkaan viilattu äänimaailma vääristyy. Tilannetta pahentaa se, että automatiikka ei ymmärrä ohjelman sisällöstä mitään, jolloin säätötilanne on hallitsematon. Ja vaikka säätötilanne saataisiinkin ihmeen kaupalla hallituksi, tuhoaa se joka tapauksessa taiteilijan luoman teoksen. Jos tuotannossa ammattilainen tarvitsee kokonaisen päivän 10 minuutin pituisen kunnolla tehdyn lopputuloksen työstämiseen, on täysin kestämaton ajatus, että se pilattaisiin lähetysketjussa olevilla automaattisilla prosessoreilla. Kyseiset laitteet ovat vakava laadullinen epäkohta. Niiden tarjoama ratkaisu äänekkyysongelmaan on siis ainoastaan näennäinen.

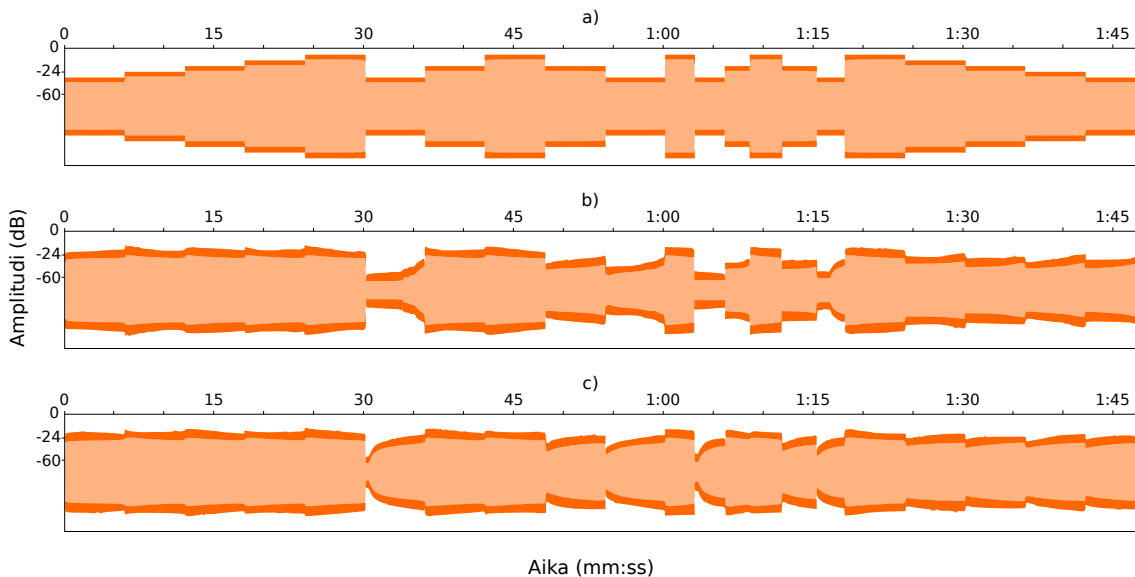
7.1.1 Reaaliaikainen prosessointi

Tämän työn aikana ilmeni mahdollisuus tutustua Evertzin valmistamaan IntelliGain-nimiseen automaattiseen äänekkyysprosessoriin. IntelliGain tarjoaa Evertzin lupaus-ten mukaan tasaisen äänekkyystason niin kanavien kuin ohjelmien sisällä. Se sisältää

äänekkyystasaaajan lisäksi myös dynamiikka-alueen säätäjän, jonka avulla ohjelman dynamiikkaa olisi mahdollista kaventaa ja kasvattaa. Laitteen tarkempi tutkiminen paljasti, että dynamiikka-alueen säätäjä pystyi ainoastaan kompressoimaan ääntä. Luvattua kompandointia, eli kompressoinnin ja ekspandoinnin yhdistelmää, ei ollut mahdollista toteuttaa. Äänekkyystasoja IntelliGain laskee ITU BS.1770-1:n mukaan. [46]

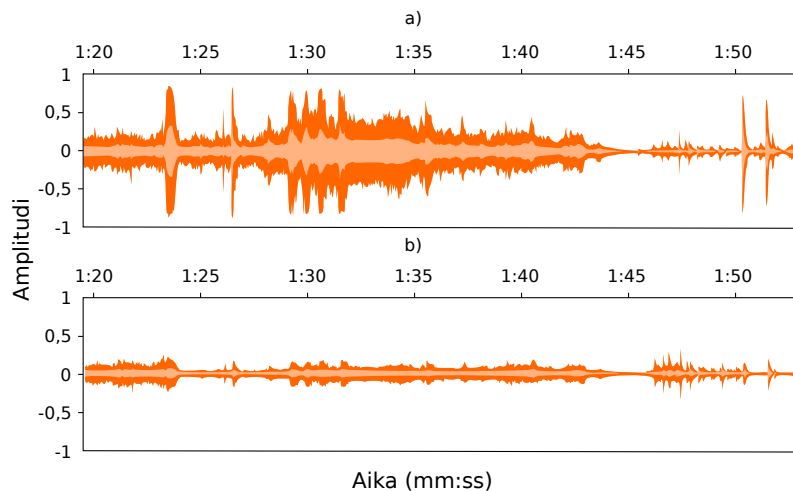
IntelliGain-tutkimuksessa prosessoitiin useita erityyppisiä ohjelmia eri parametreilla. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään IntelliGainin toimintaperiaatetta ja suorituskkyä. IntelliGainin sisäänmenoon syötettiin ääntä, jota lopulta verrattiin ulostulevaan signaaliin. Näin oli mahdollista tutkia eri parametrien vaikutusta lopputulokseen. Materiaalina käytettiin itse generoitua testiääntä sekä monia tyypillisiä televisio-ohjelmia.

Itse generoitu testisignaali koostui vaihtelevanpituista eri huippuarvon omaavista valkoista kohinaa sisältävistä pätkistä. Kyseinen testisignaali on esitetty graafisesti kuvassa 32 a. Samassa kuvassa on esitetty myös IntelliGainin prosessoimat lopputulokset hitailla (kuva 32 b) ja nopeilla (kuva 32 c) reagointiajoilla. Niistä nähdään, että laite ei todellisuudessa pysy kovin hyvin muutosten mukana, vaan säädöissä esiintyy aina viivettä. Hidas toiminta johtaa siihen, että äänekkään kohtauksen aikana IntelliGainin tasosäädin vaimentaa ohjelmaa voimakkaasti, mutta kohtauksen loputtua vaimennuksen vaikutus jatkuu vielä hiljaisienkin kohtauksen aikana. Jos hiljaisessa kohtauksessa olisi puhetta, ei sitä kuulisi ollenkaan. Nopealla reagointiajalla lopputulos on erittäin "pumppaava", jolloin voimakkaat ja hiljaiset kohdat hakeutuvat nopeasti samalle tasolle. Tämä on erittäin ikävä piirre varsinkin laajadynaamisissa ohjelmissa, jossa hiljaisien kohtien on tarkoitus olla hiljaisia.



Kuva 32: Evertzin IntelliGainin testitulokset itse generoidulla testisignaaliilla. Kuvassa ylinnä on testisignaali (a), keskellä IntelliGainin prosessoima lopputulos hitailla reagointiajoilla (b) ja alinna IntelliGainin prosessoima lopputulos nopeilla reagointiajoilla (c).

Eri tv-ohjelmien ääniä testattaessa kävi ilmi, että IntelliGainin aiheuttamat vääristymät olivat pienimpiä, kun materiaalin dynamiikka oli kapea. Laajadynaamisissa ohjelmissa tasosäätimen muutoksista aiheutuneet vääristymät kuuluivat kuitenkin kohinatestin tavoin häiritsevästi. Kuvassa 33 on kuvattu laajadynaamista materiaalia alkuperäisenä ja prosessoituna. Materiaalin alkupuoli sisältää äänekästä toimintaa ammuskelun kera, mutta loppupuolella kuuluu ainoastaan hiljaista kävelyä ja oven kolahduksia. Äänimateriaalin aaltomuodosta näkee selvästi, että prosessoidussa versiossa äänekäät kohtaukset ovat jääneet erittäin vaimeiksi. Alkuperäisessä versiossa toimintakohtauksen aikana äänekkyystaso kasvaa tasaisesti dramaattista vaikutelmaa korostaen, joka prosessoidussa versiossa jää latteaksi. IntelliGainin tasosäätimen hitaus aiheuttaa äänekään kohtausten loputtua lähes äänettömän jakson. Määrätyn reagointiajan jälkeen äänekään kohtausten jälkeiset hiljaiset kävelyäänit nousevat sitä vastoin luonnottomalle tasolle. Jos reagointiaika säädetään nopeammaksi, ammuskelukohtauksessa äänekkyystaso vaimenee jokaisen laukauksen aikana, jolloin taustamusiikin taso rupeaa "pumppaamaan".



Kuva 33: Evertzin IntelliGainin testitulokset laajadynaamisella materiaalilla. Kuvassa ylinnä laajadynaaminen testimateriaali (a) ja alinna IntelliGainin prosessoima lopputulos sopivaksi osoittautuneilla parametreilla.

Tutkimuksessa kävi ilmi myös, että IntelliGain laskee ensin äänekkyystason, tasaa sen ja vasta sitten suorittaa mahdollisen kompressoinnin. Koska IntelliGain toimii huomattavasti paremmin kapeadynaamisen materiaalin kanssa, ei laitteen nykyinen toimintajärjestys ole välttämättä paras mahdollinen. Tässä tutkimuksessa saatiin parempi lopputulos, kun alkuperäinen materiaalin prosessoitiin ensin IntelliGainin pelkän dynamiikkakompressorin läpi ja vasta tämän jälkeen normalisoitiin äänekkyystasot. Näin ei tasosäätäjän muutokset ("pumppaukset") kuuluneet niin voimakkaina.

Edellä mainittujen epäkohtien takia, ei lähetysketjuun liitettävä automaattinen äänekkyysprosessori ole Yleisradion tapauksessa kelvallinen ratkaisu. Vaikka kaikkea materiaalia ei nykyisessä järjestelmässä pystyttäisikään kontrolloimaan, on silti parempi päästää äänekkyydeltään virheelliset ohjelmat sellaisenaan lähetysketjusta

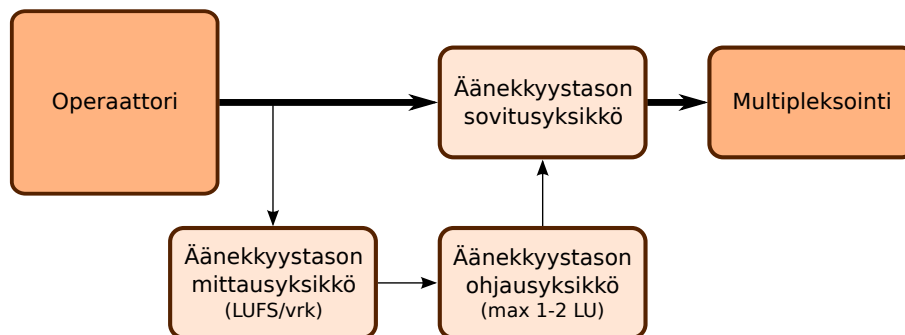
läpi kuin pilata laadukaskin materiaali.

7.1.2 EBU:n suosittelema prosessointi

Lähetysketjuun voisi liittää kevyttä prosessointia, joka toimisi päivän pituisella resoluutiolla. Tämän tyyppistä ratkaisua on ehdotettu EBU:n teknisessä dokumentissa 3344 (ks. sivu 32). Lähetysketjuun liitettäisiin äänekkyysmittari, joka laskee 24 tunnin pituista integroitua äänekkyystasoa kanavittain. Jos päivän äänekkyysmittaus-tulos poikkeaa tavoitteellisesta -23 LUFS:n tasosta, seuraavan päivän ohjelmavirtaan tehdään korjaus saadun poikkeaman poistamiseksi tai pienentämiseksi. Korjaus on korkeintaan yhden tai kahden dB:n suuruinen. Näin kanavien keskimääräinen äänekkyystaso tulee olemaan lähempänä haluttua normalisointitasoa, jolloin äänekkyysmittauksista saatujen jakaumaa kuvaavien histogrammien painopiste (moodi) keskittyisi paremmin 0 LU:hun. Kyseinen säätö ei kuitenkaan vaikuta äänekkyysjakauman laajuuteen, mikä on korjattava muilla keinoin.

Päivän pituiseen integroituun äänekkyysmittaukseen perustuva normalisointi on tehokas keino saada kanavien äänekkyystasot lähemmäs toisiaan. Vielä tehokkaammaksi keinoon tekisi, jos kyseinen säätöjärjestelmä tulisi ministeriön taholta pakolliseksi jakeluoperaattoreille. Näin koko kanavakirjo niin maanpäällisessä kuin kaapeli- ja satelliittiverkossa saataisiin karkeasti samalle äänekkyystasolle. Tämän tyyppinen jakeluoperaattorin hallinnoima säädin voisi sopia lainsäädäntöpohjalta myös radio-kanaviin, jossa äänekkyyskilpailu on ajautunut erityisen suuriin mittoihin. Jos säätötoimenpide tulisi olemaan pakollinen jakeluoperaattoreilla, olisi tätä varten ehdottomasti määriteltävä tiukat ehdot.

Kuvassa 34 on esitetty yksinkertaistettu lohkokaavio kanavakohtaisesta säätimestä lähetysketjussa. Siinä tuleva materiaali mitataan lähdekohtaisesti mittausyksikössä. Ohjausyksikössä lasketaan mitatuista arvoista seuraavalle päivälle tarvittavan mahdollisen muutoksen suuruus, joka lopulta toteutetaan äänekkyystason sovitussyksikössä jonain tiettyinä vuorokauden aikana. Jotta lähetysjärjestelmään ei tulisi lisää epävarmuustekijöitä, on mittaus- ja ohjausyksikkö eriytetty kriittisestä signaalitiestä. Lopulta normalisoidut kanavat voidaan multipleksoida ja lähettää. [61]



Kuva 34: Yksinkertaistettu esimerkki operaattorilla tehtävästä äänekkyysnormalisoinnista. [61]

7.2 Tarkkailu ja tuotanto

Laadullisesta näkökulmasta tuotantotilanne on ehdottomasti optimaalisin paikka normalisoida äänekkyystasot. Merkittäviä etuja ovat dynamiikka-alueen saattaminen todelliseen hyötykäyttöön sekä ohjelmien sisäisten äänekkyystasomuutosten hallinta, jota ei ole mahdollista saavuttaa automatiikalla. Tuotannossa tehtävään äänekkyysnormalisointiin siirtyminen vaatii suuria investointeja, mutta järkevällä lähestymistavalla on mahdollista säästää huomattavia summia. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuotantoon on ostettava uusia mittareita. Säästösyistä kannattaa kuitenkin miettiä, onko kaikkien tuotantopisteiden päivittäminen tarpeellista siirtymäaikana tai edes koskaan.

Tarkkailu- ja tuotantotilanteita on lukuisia erilaisia, mutta tässä luvussa esitetyt ratkaisukeinot on jaoteltu karkeasti osto-ohjelmiin, suoriin ja tallennettuihin tapahtumiin sekä omaan tuotantoon, joka sisältää suoria ja tallennettuja ohjelmia. Samaa jaottelua on käytetty kappaleessa 4.1, jossa esitellään Yleisradion televisiojärjestelmä. Kuhunkin tuotantotilanteeseen sopii omanlaisensa mittarityyppi, joita on markkinoilla niin ohjelmistollisia kuin laitteistollisia.

Kaikille tarkkailu- ja tuotantopaikoille jaottelusta riippumatta on syytä järjestää koulutusta. Se on tärkeässä roolissa äänekkyteen perustuvien toimintatapojen edistämisessä. Lisäksi tarkkailu- ja tuotantopaikoilla tulisi tarkistaa kuuntelumonitorien äänitasot sekä muut kuunteluolosuhteet, jotta korvakuuloinen havainnointi olisi luotettavaa. Kaiuttimien äänitasot tulisi säätää luvussa 5.3.3 esitettyjen arvojen mukaan. Myös akustiikalla on merkitystä. Hyvälaatuisessa tarkkailu- tai tuotantotilassa esimerkiksi jälkikaiunta-aika tulisi olla määrätyn mittainen ja äänen diffuusi leviäminen pitäisi olla hallittu [59].

7.2.1 Osto-ohjelmat

Osto-ohjelmien tapauksessa tuotantotilanteeseen voi vaikuttaa ainoastaan epäsuorasti. Tästä syystä Yleisradiossa on määritellyt tietyt tekniset vaatimukset ostetulle materiaalille. Äänen osalta vaatimuksissa määritellään kanavamäärä ja -järjestys, formaatti, maksimitasot, referenssitaso sekä suurimmat sallitut dynamiikka-alueet puheen ja muun materiaalin osalta. Lisäksi vaatimuksissa on maininta, että musiikki ja puhe tulee tarkkailla äänekkyysiltään tasaiseksi niin, että puhe pysyy muun materiaalin rinnalla ymmärrettävänä. [64] [65]

Uusien äänekkyys-suositusten myötä tulisi Yleisradion ostomateriaalivaatimuksia tarkastaa. Suurimmaksi sallituksi hetkelliseksi huipputasoksi tulisi määrittää -1 dBTP ja ohjelmaaänekkyudeksi -23 LUFS. Tämä olisi tehokas keino ohjata ulkopuolisia toimijoita työskentelemään uusien käytäntöjen puitteissa. Äänekkyuden vaihtelualueelle (LRA) ei välttämättä tarvitse asettaa rajoituksia. Materiaalin dynamiikkarajoitus pitäisi olla ainoastaan lähetysreitistä ja ääniformaatista riippuva seikka, joten alkuperäinen ostettu materiaali olisi syytä olla laadultaan paras mahdollinen.

7.2.2 Suorat lähetykset

Kaikissa suorissa lähetyksissä, niin tapahtumissa kuin Yleisradion omassa tuotannossa (uutiset, ajankohtaisohjelmat, aluetoimitus), äänitarkkailijoilla tulisi olla EBU-suosituksen mukainen reaaliaikainen äänekkyyssmittari. Tämä on välttämätöntä, koska suoraa lähetystä on mahdotonta hallita lähetysketjussa olevilla automaattisilla äänekkyyssproessoreilla laatua pilaamatta. EBU-moodin mukainen reaaliaikainen äänekkyyssmittarointi on jo todettu toimivaksi ratkaisuksi muun muassa Saksassa (NDR), Itävallassa (ORF) ja Belgiassa (RTBF) [50].

Ajatus uusista mittareista on saanut hyvän vastaanoton myös Yleisradion sisällä uutisten äänitarkkailijoilta aihetta esittelevän luennon yhteydessä. Kuulohavaintoon perustuva tarkkailu on pitkien työpäivien takia haastavaa ja puuduttavaa, joten äänekkyyssmittarit toisivat suurta helpotusta. Mittarit antaisivat myös konkreettisen lukeman, joka omalta osaltaan motivoisi tarkkailua. Jos ohjelman jälkeen äänekkyyss-taso on lähellä -23 LUFs:ää, antaa se välittömän palautteen työn onnistumisesta.

Yleisradiossa on tällä hetkellä noin parikymmentä pistettä, joista lähetetään suoraa ohjelmaa. Reaaliaikaisten ohjelmistollisten mittareiden kappalehinta on noin 500-2000 euroa. Laiteperusteiset mittarit ovat kalliimpia, mutta Yleisradion tapauksessa ne ovat ammattikäytössä varmasti toimivampia ja tuotantoyksiköihin yhteen-sopivampia. Ohjelmistollisten mittareiden tapauksessa tulisi tarkkaamoihin asentaa muitakin lisälaitteita, jolloin myös kustannukset kasvaisivat. Lisäksi kyseiset ohjel-mistolliset mittarit veisivät näyttötilaa tarkkaamoissa, mikä on erittäin epäsuotava tilanne. Laitemittareiden kappalehinnat ovat 3000-10000 euron paikkeilla, jolloin ko-konaiskustannukset tulisivat olemaan sadoissa tuhansissa. Kustannuksia on kuiten-kin helppo pienentää miettimällä tarpeet yksiköittäin. Kaikkiin yksiköihin ei tarvitse mittareita, joissa on kaikki mahdolliset ominaisuudet.

7.2.3 Tallenteet ja editointi

Tallennettuja tapahtumia ja muita ohjelmia ei kannata mitata reaaliaikaisesti. Yleis-radiossa on noin pari sataa ohjelmaeditointityöasemaa, joten reaaliaikaiset mittarit tulisivat maksamaan useita satoja tuhansia. Tämän kokoluokan uudistus vaatisi li-säksi huomattavan määrän koulutustilaisuuksia. Siirtymävaiheessa olisi taloudelli-sesti ja ajankäytöllisesti edullisempaa mitata ja säätää editointipisteissä tehdyistä valmiista ohjelmista äänekkyyss-tasot jälkikäteen. Näin työprosessi ja laitekanta py-syisivät lähes alkuperäisinä. Tässä ratkaisuehdotuksessa tarvittaisiin kuitenkin joko keskitettyä laskentaserveriä tai seuraavissa luvuissa esitettyjen validointiratkaisujen toteuttamista.

Laskentaserveri voisi toimia hieman samalla periaatteella kuin tässä työssä toteu-tettu äänekkyyssmittari (ks. luku 6.1). Markkinoilta ei ainakaan vielä löydy keskitet-tyä serveripohjaista laskentajärjestelmää, jolloin tässä tarvittaisiin pientä räätälöintiä. Laitevalmistajilla tuskin on muutenkaan kiinnostusta tämän tyyppiseen ratkaisuun, koska heillä on todennäköisemmin kiinnostusta myydä mahdollisimman monta li-senssiä yhden lisenssin sijaan. Joka tapauksissa kustannukset jäisivät murto-osaan verrattuna täydelliseen mittarikannan uusimiseen. Siksi tämän vaihtoehdon toteut-tamiseen vaadittavat lisäselvitykset ovat suositeltavia. Tässä työssä syntynyt lasken-

tasovellus antaa hyvän viitteen siitä, että kovin monimutkaisesta projektista ei olisi kyse.

Siirtymävaiheen jälkeen uusien mittareiden hankintaa voisi kuitenkin harkita myös editointipisteisiin. Tämä mahdollistaisi leikkausvaiheessa ohjelman sisäisten äänekkyystasomuutosten joustavamman hallinnan. Ohjelma voitaisiin siis suoraan koostaa uusien raja-arvojen puitteissa. Koska kyseessä ei edelleen ole ajallisesti täysin kriittinen toimenpide, voisi mittareita uusia esimerkiksi editointipisteiden uusimisien yhteydessä. Näin kustannukset jakautuisivat tasaisemmin pidemmälle aikavälille. Lisäksi mittareiden hinnat todennäköisesti laskevat, kunhan markkinoille ehtii syntyä riittävästi kilpailua.

Yleisradiossa on edellä mainittujen editointityöasemien lisäksi myös äänen jälkikäsittely-yksiköitä, joissa reaaliaikaiset mittarit olisivat erityisen tarpeellisia [66]. Jälkikäsittelyssä ohjelmamateriaalista tehdään lähetyskelpoista, jolloin myös äänitasot tarkistetaan. Tässä yhteydessä äänekkyysnormalisointi hoituisi ilman suurempia muutoksia ja mahdollisesti jopa työaikaa säästäten. Jälkikäsittelypisteitä on kymmenkunta, jolloin laitteista muodostuneet kustannukset olisivat 30-100 tuhannen euron paikkeilla mittareiden ominaisuuksista riippuen.

7.3 Medianhallintajärjestelmän ja D-keskuksen validointiautomaatiot

Tässä luvussa esitellään erilaisia mahdollisuuksia toteuttaa automaattinen ohjelmamateriaalin validointi niin medianhallintajärjestelmässä kuin D-keskuksessa. Validointiautomaatiolla tarkoitetaan sovellusta, joka tarkistaa ohjelmamateriaalin yhteensopivuuden Yleisradion materiaalivaatimusten osalta. Näin mahdolliset epäkohdat voitaisiin joko korjata tai sitten materiaali lähetettäisiin takaisin tuottajalle. Ohjelmaaäänekkyuden osalta validointiautomaatio laskisi tarvittavat parametrit ja tallentaisi tulokset joko metatietoihin tai normalisoisi ohjelman suoraan.

Tallennetun materiaalin tapauksessa äänekkyysnormalisointi on teoriassa yksinkertainen ja suoraviivainen prosessi. Koska suurin osa kaikesta Yleisradion materiaalista on tallennettuna medianhallintajärjestelmään digitaalisessa muodossa, voisi automaattinen prosessori käydä koko suuren tietokannan läpi ja muuttaa ohjelmien tasot tai vaihtoehtoisesti kirjaa laskentatulokset metatietoihin. Tämän tyyppisiä automaattisia normalisointiprosessoreita löytyy jo markkinoilta, joten tässä voisi kuvitella olevan yksinkertainen ja tehokas ratkaisu. Näin ei käytännössä kuitenkaan ole, koska nykyistä Yleisradion järjestelmää on erittäin vaikea saada taipumaan muutoksiin.

Ensimmäisenä pulmana validointiautomaatiossa on, että halutaanko tallennettu materiaali muuttaa lopullisesti vai pyritäänkö se säästämään alkuperäisessä muodossa. Ensin mainittu keino olisi yksinkertainen, mutta käytännön ongelmat tekevät siitä mahdottoman. Materiaalin muokkaaminen voi vaatia tekijänoikeuksien tarkastamista ja alkuperäiseen versioon kajoamista pitäisi välttää mahdollisimman pitkälle. Jos esimerkiksi ohjelmistollinen virhe muuttaisi jonkin materiaalin äänitasot särölle, on alkuperäistä informaatiota mahdotonta palauttaa. Automaattisissa järjestelmissä pitäisi siksi olla aina varmistus, joka tässä tapauksessa tarkoittaisi alkuperäisen

materiaalin erillistä varmuuskopiointia. Nykyisessä järjestelmässä alkuperäinen materiaali on varmuuskopioitu datanauhoille kahteen paikkaan, joten tässä tapauksessa yhdestä ohjelmasta tulisi varmuuskopioitavaksi alkuperäisen äänekkyystasoltaan virheellisen version lisäksi korjattu versio. Näin arkistotallennuskapasiteetin määrää pitäisi jatkuvasti kasvattaa, joka synnyttäisi merkittäviä kustannuksia.

Jos validointiautomaatio laskee äänekkyystasot ja tallentaa tulokset ainoastaan materiaalien mukana kulkevaan metatietokenttään, ei alkuperäisiin materiaaleihin tarvitse kajota. Kun mittaustulos on tallennettuna metatietokenttään, voisi lähetysketjuun kehittää äänitasoja korjaavan erillisen automaatiojärjestelmän. Sen avulla materiaalia voisi toistaa oikealla äänekkyystasolla käyttäen sopivaa vaimennusta tai vahvistusta. Tässä on kuitenkin merkittävänä ongelmana, miten metatieto saadaan kuljetettua järjestelmien välillä. Rajapinnoissa metatiedon kuljettaminen voi olla hyvinkin haastavaa ja joissain tapauksissa jopa mahdotonta. Tästä syystä tämäkään ratkaisu ei välttämättä ole optimaalisin.

Mikäli lähetysketjuun päätetään kehittää järjestelmä, joka lukee metatietokenstä ohjelmien ennalta laskettuja äänekkyystasoja ja säätää äänitasoja sen mukaan, olisi niin medianhallintajärjestelmän kuin D-keskuksen tapauksessa validointiautomaatiot syytä toteuttaa harkiten. Jos esimerkiksi medianhallintajärjestelmään tulisi validointiautomaatio, ei D-keskukseen ole tarpeellista kehittää toista tarkastuspistettä. Harkituilla ratkaisuilla on mahdollista tässäkin tapauksessa säästää suuria summia.

Koska tämän hetkisen tiedon perusteella ei medianhallintajärjestelmään saa kovinkaan yksinkertaisesti liitettyä minkään näköistä automaattista laskenta- ja metatietomuokkausprosessia, lienee ainut mahdollisuus toteuttaa validointiautomaatio tämän tyyppisessä ratkaisumallissa D-keskukseen. Näin esimerkiksi kaikki ositettu materiaali kulkisi tarkastuksen läpi, minkä jälkeen äänekkyystaso tallennettaisiin metatietoihin. Ongelmaksi muodostuu tässä vaihtoehdossa, miten jo tallennettu materiaali saataisiin laskettua. Medianhallintajärjestelmään tallennetun materiaalin hakeminen tai uudelleen tallentaminen on järjestelmärajoitusten takia hankalaa.

Suuri osa Yleisradion vanhasta materiaalista on lisäksi vielä analogisessa muodossa. Parhaillaan on käynnissä projekti, jossa näitä vanhoja materiaaleja digitoidaan. Koska muuten automaattiseen muunnosprosessiin tarvitaan aika-ajoin myös manuaalista työpanosta, olisi tässä yhteydessä edullista mitata ja mahdollisesti muokata äänekkyystasot saman tien. Tämä on kuitenkin turhaa, jos medianhallintajärjestelmään saadaan rakennettua edellä kuvattu tarkastusmittaus. Tässäkin tapauksessa olisi edullista miettiä tarkkaan koko prosessi läpi ja punnita eri vaihtoehtoja, ennen kuin lopullisia ratkaisuja tehdään.

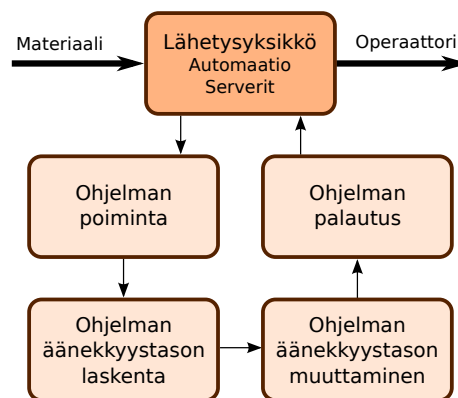
Validointiautomaatiot niin medianhallintajärjestelmään kuin D-keskukseen on hankala toteuttaa, kuten edellä on mainittu. Tästä syystä ratkaisujen kustannuksia on erittäin vaikea arvioida. Järjestelmien rajapinnat vaativat joka tapauksessa ohjelmistojen räätälöintiä, joten valmista kaupallista ratkaisua ei tässä pystytä hyödyntämään kuin joiltain osin. D-keskuksessa jo valmiina olevien mittalaitteiden hyödyntäminen voisi tässä ratkaisussa olla mahdollista.

7.4 Lähetysohjelmaan liitettävä ohjelmakohtainen normalisointijärjestelmä

Edellisessä luvussa pohdittiin mahdollisia validointiautomaatioiden liittämisiä medianhallintajärjestelmään tai D-keskukseen. Näissä ratkaisuehdotuksissa tuli vastaan suuria haasteita, jotka vaativat merkittäviä lisäselvityksiä. Koska materiaalia tulee monista lähteistä ja se kulkee useita reittejä, on erittäin vaikeaa pitää huolta siitä, että kaikki materiaali kulkee aina jonkin laskentaprosessin läpi. Lisäksi laskentaa joutuu tekemään useassa paikassa. Kun äänisignaalin reitit seuraa kuvassa 10, näyttäisi lähetyksikkö olevan ainut paikka, josta kaikki lähetettävä materiaali kulkee läpi. Tästä syystä se lienee paras paikka normalisointiautomaatiolle.

Edellisten lukujen ratkaisuehdotuksia vertailemalla yksinkertaisin ja edullisin vaihtoehto näyttäisi olevan automaattinen äänekkyysprosessori lähetysohjelmissa. Reaaliaikaista prosessoria ei kuitenkaan missään nimessä voida toteuttaa sen aiheuttaman laadullisen epäkohdan takia. Toinen vaihtoehto oli EBU:n suosittelema päivän mittainen äänekkyysnormalisointi. Se olisi hyvä ratkaisu, koska siinä ei kajota ohjelman sisäisiin äänekkyystasovaihteluihin. Heikkona puolena tämän tyyppisessä normalisoinnissa on ainoastaan se, että ohjelmien välisiä äänekkyystasovaihteluja ei pystytä vähentämään. Tarvittavan normalisointiautomaation pitäisi siis olla sellainen, joka ei kajoaisi ohjelman sisäisiin äänekkyystasovaihteluihin, mutta samalla tasaisi ohjelmien keskinäiset äänekkyystasoerot.

Koska materiaali, joka aiotaan lähetetään, ladataan 72 tuntia ennen lähetyspäivää lähetysserverille, voisi normalisointijärjestelmä toimia siellä. Normalisointijärjestelmässä ohjelmat poimittaisiin ensin lähetysserveriltä siten, että alkuperäiseen tiedostoon ei kajota. Näin laskenta voidaan suorittaa ilman, että lähetykseen vaarantuisi. Jos normalisointiprosessissa tapahtuu virheitä tai laskentajärjestelmä kaatuu, on lähetysserverillä edelleen normalisoimaton tiedosto, jolloin ongelma ilmenee lähetyksessä ainoastaan äänekkyystason mahdollisena poikkeamana. Seuraavassa vaiheessa ohjelman äänekkyystaso lasketaan ja muutetaan, jonka jälkeen ohjelma lopulta palautetaan takaisin lähetysserverille. Tämän tyyppinen järjestelmä on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 35.



Kuva 35: Yksinkertaistettu esimerkki lähetysserverillä tehtävästä ohjelmakohtaisesta äänekkyysnormalisoinnista.

Yleisradiolla on myös paljon sellaisia ohjelmia, jotka valmistuvat alle 72 tuntia ennen lähetystä. Tämän tyyppisiä ohjelmia on esimerkiksi aamu-tv:stä tehdyt koosteet, jotka poimitaan suorista lähetyksistä ja editoidaan pikaisesti. Tämän tyyppiset ohjelmat kulkevat kaikki erillisen "mediadesk"-järjestelmän kautta, joka sijaitsee D-keskuksessa. Jos lähetysyksikössä olevaa laskentaprosessia ei saada riittävän nopeaksi, voisi "mediadesk" olla oiva paikka toiselle keskitetylle normalisointipisteelle.

Lähetysautomaatioon sovitetulla normalisointitavalla voisi säästää merkittäviä summia, koska suurin osa tuotanto- ja editointipaikoista, lukuun ottamatta suoria lähetyskiä, voidaan jättää siirtymävaiheessa ilman uusia mittareita. Koska kaikki ohjelmat mitataan joka tapauksessa lähetysserverillä, ei ole välttämätöntä mitata niitä tuotannossa, jossa editointiaika pyritään yleensä pitämään mahdollisimman vähäisenä. Tuotannossa voisi uusien mittareiden sijaan painottaa korvakuuloista havainnointia ja mahdollisesti koulutusta, jos se on tarpeen. Lisäksi välttyttäisiin suurimmalta osalta edellisessä luvussa kartoitetuilta ongelmilta, koska validointitarve poistuisi kokonaan medianhallintajärjestelmästä sekä D-keskuksesta.

Tämän tyyppisiä järjestelmiä ei ole valmiina kaupallisina tuotteina markkinoilla, joten voi hyvin olla, että se pitäisi räätälöidä alusta alkaen. Kuluja tästäkin syntyy, mutta kokonaiskustannukset lienevät muissa vaihtoehtoissa kuitenkin huomattavasti suuremmat. Myös tässä ehdotuksessa lienee mahdollista hyödyntää jo valmiiksi ostettuja mittalaitteita, joihin äänekkyyslaskentaominaisuus olisi mahdollista päivittää.

7.5 Äänekkyteen liittyvien metatietojen valinta ja lähetys

Jotkin pakkausformaatit mahdollistavat metatietojen liittämisen varsinaisen materiaalin rinnalle. Näin vastaanottimelle saadaan välitettyä monia erityyppisiä materiaalia kuvaavia tai dekodeeraa ohjaavia parametreja. Yleisradion kannalta merkityksellisin metatiedot mahdollistava formaatti on AC-3, jossa jotkin parametreista, kuten dialnorm, dynamiikka-alueen hallinta ja alasmiksauskerroimet, ovat pakollisia. Kyseiset parametrit on selitetty luvussa "Terminologia". Jotta äänekkyystasot saadaan pysymään lähetys- ja vastaanottopäässä vakiona, on metatiedot oltava kunnossa. Koska Yleisradiossa tuotanto- ja lähetysketju pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisen, on metatiedot päätetty pitää staattisina. Tähän liittyy kuitenkin monia seikkoja, jotka pitää ottaa huomioon virheiden minimoimiseksi.

7.5.1 Dialnorm

Dialnorm-arvo on asetettava aina materiaalin äänekkyyttä vastaavaksi. Jos dialnorm-arvo pidetään staattisena esimerkiksi arvossa -23, pitää kaikki materiaali normalisoida -23 LUFS:n äänekkyystasolle. Näin kotiteatterivahvistimessa vastaanotettu -23 LUFS:n tasolle normalisoitu materiaali vaimennetaan vahvistimen sisäisen digitaalisen äänen referenssitason vastaavaksi (eli -31 LUFS). Useimmissa elokuvissa, joissa ääni on AC-3-, HE-AAC- tai DTS-koodattua, dialnorm-taso on asetettu joko arvoon -27 tai -31. Jos lähetysketjussa on staattinen dialnorm-arvo ja lähetettävän elokuvan AC-3-ääntä ei normalisoitaisi tyypillisestä -31 dBFS:stä -23 LUFS:n tasol-

le, aiheuttaa vastaanottimessa toteutettu äänitasomuutos noin 8 dB:n äänekkyystasoon suhteessa MPEG-ääneen. Näin ollen metatietojen staattisuus vaatii aina äänekkyysnormalisoinnin.

7.5.2 Alasmiksauskertoimet

AC-3-koodatun äänen tapauksessa alasmiksauskertoimet tulisi asettaa siten, että tila- ja stereoäänet vastaavat äänekkyyksiltään toisiaan. Kyseessä on siis dekodeerin tekemä automaattinen alasmiksaus. Parametrien laskeminen ohjelmakohtaisesti toisi tuotantoon ja lähetystoimintaan lisää työtä ja kustannuksia, joten tässäkin tapauksessa suositetaan staattista vaihtoehtoa. Kun tilääni alasmiksataan kaksikanavaiseksi, keski- ja takakanavat summataan tietyillä painokertoimilla etukanaviin kaavoilla 6 ja 7, joissa G_{CML} tarkoittaa keskikanavan alasmiksauskerrointa (engl. Center Mix Level) ja G_{SML} takakanavien alasmiksauskerrointa (engl. Surround Mix Level). Kertoimet voivat olla taulukon 6 mukaiset. Normaalisti keskikanavan kohdalla on mahdollista käyttää ainoastaan -3, -4,5 ja -6 dB:n ja takakanavien kohdalla -3, -6 ja $-\infty$ dB:n vaimennuksia. Laajennetuilla bittivirtatietoparametreilla (engl. Extended Bitstream Information) on mahdollista käyttää myös muita taulukosta 6 löytyviä kertoimia keski- ja takakanavissa. Dolby on asettanut oletusarvoiksi G_{CML} :lle ja G_{SML} :lle -3 dB:iä. LFE-kanavaa ei koskaan summata mukaan. [6] [7]

$$L_{\text{stereo}} = L + G_{\text{CML}} * C + G_{\text{SML}} * Ls \quad (6)$$

$$R_{\text{stereo}} = R + G_{\text{CML}} * C + G_{\text{SML}} * Rs \quad (7)$$

Taulukko 6: Alasmiksausparametrien kertoimet.

1,4125 (+3,0 dB)
1,1885 (+1,5 dB)
1,0000 (0,0 dB)
0,8414 (-1,5 dB)
0,7080 (-3,0 dB)
0,5957 (-4,5 dB)
0,5012 (-6,0 dB)
0,0000 ($-\infty$ dB)

Jos kertoimet pidetään lähetysketjussa staattisina, saattaa alkuperäisen monikanavamateriaalin ja siitä alasmiksatus stereomateriaalin äänekkyystasot poiketa toisistaan. Kyseisen virheen suuruus määriteltiin tässä työssä yksinkertaisella kokeella, jossa verrattiin koherentista ja epäkoherentista valkoisesta kohinasta muodostettujen monikanavamateriaalien ja niistä alasmiksattujen stereoversioiden äänekkyystasoja. Koherentti monikanavamateriaali sisältää täysin identtiset kanavat

ja epäkoherentissa materiaaalissa kanavien signaalit on generoitu toisistaan riippumatta. Jos kohinan huipputaso molemmissa tapauksissa on -20 dBFS, on niiden äänekkyystaso -14 LUFS. Alasmiksauksessa, jossa keski- ja takakanavat summataan -3 dB:n vaimennuksella etukanaviin, koherentista materiaalista saadun lopputuloksen äänekkyystaso kasvaa 3 dB:iä, kun samalla epäkoherentista materiaalista saadun lopputuloksen äänekkyystaso pienenee 1,6 dB:iä. Työssä tehtiin myös tilastollista tarkastelua alasmiksaamisen vaikutuksesta äänekkyystasoon tyypillisten monikanavaohjelmien tapauksessa. Tutkimuksessa alasmiksatus lopputuloksen äänekkyystason muutos alkuperäiseen nähden oli +1,7 LU:n ja -0,9 LU:n välillä.

Dolbyn asettaman -3 dB:n oletusarvon käyttäminen lähetysketjun staattisena parametrina ei välttämättä ole optimaalisin ratkaisu. Katsojan äänekkyyshavainto todettiin kappaleessa 6.3 olevan epäsymmetrinen siten, että äänekkyystason kasvu havaitaan sen pienentymistä herkemmin (ks. kuva 26 sivulla 42). Keski- ja takakanavien osalta yhteneväisellä -3 dB:n kertoimella tehdyn alasmiksauksen aiheuttama äänekkyystasomuutos painottuu positiivisen puolelle, mikä ei ole optimaalisin tilanne. Jos edellisessä kappaleessa tehty koe toistetaan G_{CML} :n kertoimella -3 dB ja G_{SML} :n kertoimella -4,5 dB, saatiin kohinan tapauksessa virheen raja-arvoiksi 2,6 dB ja -1,9 dB. Jos G_{SML} :n kertoimeksi asetetaan -6 dB:iä, saadaan virheen raja-arvoiksi 2,3 dB ja -2,2 dB. Näin nähdään, että takakanavien vaimennuksen kasvattaminen siirtää virheen painotusta enemmän negatiivisen puolelle, joka olisi katsojan havainnoinnin kannalta suotuisampi tilanne. Sama ilmiö voitiin havaita myös alasmiksaamalla varsinaisia ohjelmamateriaaleja. Koska tilaäänimateriaalin takakanavissa ei yleensä ole muutenkaan oleellista informaatiota, olisi järkevämpää vaimentaa takakanavia keskikanavaa enemmän.

7.5.3 Dynamiikka-alueen hallinta

Dynamiikka-alueen hallinta (DRC) -parametrilla pystytään välittämään dekodeerille tietoa siitä, millä tavalla ohjelma tulisi kompressoida heikompiin kuunteluolosuhteisiin sopivaksi. Kompressio suoritetaan dekodeerissa aina ennen alasmiksausta.

Jos DRC asetetaan lähetyksessä staattiseksi arvoon "None", vaatisi tämä alasmiksauksessa aiheutuvan mahdollisen yliohtautumisen varalta erillistä suojausta. On ehdottoman suositeltavaa käyttää dekodeerien tarjoamaa kevyttä kompressiota, jotta lähetyspäähän ei turhaan tarvitse kehittää ylimääräisiä järjestelmiä yliohtautumisen havainnointiin ja ennaltaehkäisyyn. DRC:n voi monissa dekodeeraavissa vastaanottimissa korvata omalla parametrilla tai kytkeä kokonaan pois, jolloin kompression käyttäminen ei häiritse vaativaakaan katselijaa. [6] [7]

Tyypillisessä olohuoneessa kuunteluolosuhteet vaativat lähes aina kompression käyttämistä, mikäli materiaalin dynamiikka on optimoitu kotiteatteriolosuhteisiin. Toisin sanoen tyypillisen olohuoneen dynamiikka-alueen toleranssi on kotiteatteriolosuhteista kapeampi, kuten kuvassa 7 sivulla 13 on esitetty. Joissain dekodeereissa katsoja pystyy jopa skaalaamaan kompressiokäyrän matalan tason korostusta ja korkean tason vaimennusta haluamillaan arvoilla. [6]

7.6 Äänekkyystasojen pitkäaikainen seuranta ja tilastointi

Yleisradion ohjelmien äänekkyystasoja tulisi seurata ja tarkkailla myös jatkossa. Tässä työssä tehdyt mittaukset toimivat hyvänä esimerkkinä siitä, minkälaisia tuloksia ja analyysijä lähetysvirrasta on mahdollista saada. Tällä tavalla äänekkyysongelman laajuus olisi jatkuvasti tiedossa ja mahdolliset epäkohdat havaittavissa. Pitkäaikainen mittaus mahdollistaisi myös järjestelmiin tehtävien muutosten aiheuttamien vaikutusten seurannan. Myös yksittäisten ohjelmien äänekkyystasoja olisi mahdollista tarkkailla.

Yksi vaihtoehto tämän tyyppisen seurannan ja analyysin toteuttamiseen on tässä työssä rakennetun valmiin mittausohjelmiston ylläpito ja sen mahdollinen jatkokehittäminen täysin automaattiseksi. Kyseinen mittausohjelmisto on todettu toimivaksi ja se on ollut jo hyötykäytössäkin Yleisradion uutisten äänekkyystasojen seurannassa sekä teknisessä neuvonnassa, johon yleisöltä tulevat äänekkyyspalautteet ohjautuvat.

Toisena vaihtoehtona on valita jokin kaupallinen vastine. Niissä etuina ovat ehdottomasti käyttäjäystävällisempi graafinen käyttöliittymä ja ohjelmistotuki ulkopuoliselta yritykseltä. Kokonaiskustannukset ohjelmistolle ja tarvittavalle laitteistolle tulisivat olemaan mahdollisesti 20 tuhannen euron luokkaa. Tämän hetkiset kaupalliset laskentaohjelmistot vaativat tosin myös ylläpitoa ja niiden saaminen täysin automaattiseksi lienee mahdotonta. Niitä ei ole mahdollista myöskään liittää sisäverkkoon samalla tavalla kuin tässä työssä ohjelmoitu mittausympäristö. Vaikka räätälöidyt ohjelmistot olisivat tässä tapauksessa huomattavasti joustavampia ja monipuolisempia, lienee kaupallisiin ohjelmistoihin tutustuminen kannattavaa.

8 Yhteenveto

Äänekkyystaseroihin liittyviin ongelmiin on pyritty löytämään ratkaisuja jo 1930-luvulta lähtien. Tutkimustyötä on tehty runsaasti, mutta vasta 2000-luvulla asiassa on päästy suurin harppauksin eteenpäin. Ihmisen kuuloaistimuksesta tiedetään yhä enemmän, mikä on mahdollistanut kehittyneiden psykoakustisten mallien luomisen. Näiden tietojen pohjalta audioalan asiantuntijat ympäri maailmaa ovat kehittäneet erilaisia menetelmiä laskea äänekkyystaso myös tallennetusta digitaalisesta materiaalista. Näistä menetelmistä yksi valittiin vuonna 2006 julkaistuun ITU:n suositukseen, jota pidetään nykyisten äänekkyyslaskenta-algoritmien perustana. Myöhemmin kyseistä algoritmia jatkokehitettiin EBU:n toimesta, mikä edelleen kasvatti subjektiivisen äänekkyyshavainnon ja lasketun äänekkyystason korrelaatiota. EBU julkaisi vuonna 2010 oman suosituksensa, jota tullaan käyttämään myöhemmin myös ITU-suosituksen päivittämiseen. Näistä suosituksista lähti äänekkyystasoon perustuvan mittaroinnin ja ohjelmien normalisoinnin aikakausi, joka tulee ennen pitkää syrjäyttämään vanhat toimintatavat.

Yleisradiossa äänekkyysongelmaa on tutkittu 1960-luvulta lähtien, mutta normaaliksi käytännöksi ohjelmatarkkailussa ja tuotannossa muodostui sääntöihin perustuva äänekkyysdenhallinta, jossa huipputasomittareita käytetään tiettyjen ohjeistusten pohjalta. Myöhemmin toimintatavat yksinkertaistuivat ja korvakuuloinen havainnointi jäi yhä pienempään arvoon. Näin ohjelmien äänekkyystasoihin saattaa syntyä huomattaviakin eroja, joista katsojat lähettävät Yleisradiolle jatkuvasti palautetta. ITU:n ja EBU:n kehitystyön ohella myös Yleisradiossa alettiin tosissaan pohtia äänekkyysongelmaa. Tässä diplomityössä onkin tarkoituksena tutkia mitä asioita vaaditaan uuteen äänekkyysnormalisointiaikakauteen siirtymisessä. Työssä analysoidaan Yleisradion televisiotoiminnan nykyistä äänekkyystilannetta sekä kehitetään niin teknologisia kuin toimintatapoihin kantaa ottavia vaihtoehtoja eri rajapintoihin ratkaisuehdotuksina uusien suositusten soveltamisessa käytäntöön.

Äänekkyystilanteen analysointia varten kehitettiin tässä diplomityössä erityinen mittaussympäristö, jolla Yleisradion ohjelmien äänekkyystasoja on mahdollista laskea ja analysoida automaattisesti. Tällä tavalla ongelman todellinen laajuus pystyttiin osoittamaan. Mittausohjelmistolla kerätään ohjelmavirtaa referenssitallenteelta, josta ohjelmat poimitaan toteutuneiden lähetystietojen perusteella. Jokaiselta kanavalta mitataan ohjelmat, lasketaan niiden äänekkyystasot ja analysoidaan tulokset. Halutessaan tuloksista voi piirtää kuvaajia määrätyltä aikaväliltä tai tarkastaa jonkin tietyn ohjelman äänekkyystaso. Ohjelmassa erikoisuutena on vielä tieto siitä, kuinka suuren äänekkyystasoon katsoja käytännössä havaitsee. Tämä on mahdollista, koska ohjelma analysoi lähetysvirtaa eikä suurta tallennearkistoa. Kyseisen mittaussympäristön hyödyntäminen on mahdollista myös tulevaisuudessa Yleisradion ohjelmien äänekkyystasojen analysoimisessa.

Mittautulokset antoivat selviä viitteitä siitä, että ohjelmien äänekkyystasot ovat ajautuneet hallitsemattomaan tilaan. Yli 20 desibelin hajonta äänekkyysjakaumissa on huolestuttavan suuri. Tämä on nykyään kuitenkin täysin normaali tilanne lähes kaikkialla. Tästä syystä audioalan asiantuntijat päättivätkin kehittää ratkaisuja, joilla äänekkyystasot saataisiin kuriin. Tehtävänä on enää saattaa uudet suositukset

käytäntöön. Tässä tarvitaan radio- ja televisiotoimijoiden, musiikkiteollisuuden ja laitevalmistajien aktiivisuutta. Myös mahdollisten lainsäädännöllisten toimien käynnistäminen voisi olla tervetullut, koska monilla tahoilla kyseinen uudistus nähdään ainoastaan kulueränä eikä perustavaa laatua olevana erittäin tarpeellisenä muutoksena. Lainsäädännöllisistä seikoista huolimatta Yleisradion tulisi julkisen palvelun laitoksena toimia suunnan näyttäjänä. Äänekyystasoerojen tasaaminen on myös selkeä kilpailullinen tekijä, jolla Yleisradion on mahdollista erottua muista toiminnoista.

Useimmat nykyiset tuotannolliset toimintatavat eivät sovellu kovinkaan hyvin laadukkaan ohjelmamateriaalin tuottamiseen. Laadukasta materiaalia ei ole mahdollista tuottaa ilman ammattimaista korvakuuloista havainnointia. Vaikka uudet mittarit helpottavatkin niin tarkkailua kuin tuotantoa, on korvakuuloisen havainnoinnin merkitystä vielä korostettava. Äänen ja äänenlaadun asemaa pitäisi siis selvästi nostaa, mikä olisi eduksi niin Yleisradiolle kuin katsojille ja kuuntelijoille. Laadukkaalla työllä syntyy katsojilla ja kuuntelijoilla useammin "vau"-elämyksiä, jotka ovat mediankulutuksen nyansseista tärkeimpiä. Lisäksi määrällä ei nykyisessä informaatiohäyryisessä yhteiskunnassa kannata enää kilpailla. Jos resursseista on pulaa, kannattaa karsia määrää ja panostaa laatuun.

Monissa televisioyhtiöissä äänekkyysongelma on ratkaistu hätiköiden reaaliajassa toimivilla lähetysketjuun liitettävillä prosessoreilla, jotka normalisoivat äänekkyystason rutistamalla lähdemateriaalin sisällön yksinkertaisesti kasaan. Näin äänimaailmasta häviää monia olennaisia ominaisuuksia, jotka luovat lopullisen taiteellisen vaikutelman. Äänekkyysnormalisoinnissa ei ole kyse ohjelman sisäisten draamankaarien latistamisesta. Räjähdyksen on toki tarkoitus kuulua voimakkaampana kuin vaimea kenkien kopse. Tarkoitus on normalisoida kokonaisten ohjelmien keskimääräiset äänekkyystasot, jolloin sisäisiin vaihteluihin ei puututa. Näin taiteilijan luomus pysyy sellaisena kuin sen on tarkoitus olla.

EBU:n julkaisemissa suosituksissa annetaan hyviä perustavaa laatua olevia suuntaviivoja sille, miten radio- ja televisiotoiminnassa uuteen äänekkyysnormalisointiin pitäisi siirtyä. Erilaisia järjestelmiä on kuitenkin lukemattomia, joten jokaisen toimijan on itse mietittävä lopullinen ratkaisu. Tässä diplomityössä Yleisradion televisiotoiminta on jaettu eri osiin, joihin kuhunkin on etsitty vähintään yksi ratkaisuehdotus. Pyrkimyksenä on ollut kokonais kuvan hahmottaminen ja hallinta, jotka ovat tämän tyyppiseen uudistukseen siirryttäessä ehdottomia. Yksittäisten järjestelmien erillinen tarkastelu voisi helposti johtaa tarpeettomiin kustannuksiin ja turhiin toimenpiteisiin.

Tässä työssä annetut ratkaisuehdotukset antavat viitteitä, minkälaisia sovelluksia kannattaisi mihinkin järjestelmäosaan hyödyntää. Ratkaisuehdotukset vaativat kuitenkin syvempää tutkimusta, joten äänekkyyshallinnan käytännön toteutukset vaativat vielä runsaasti lisäselvityksiä. Tässä tarvitaan pitkän linjan laaja-alaista suunnittelua, joka sisältää teknisten ratkaisujen valintoja sekä toimintatapojen kehittämistä. Suosittelen lähtemään ensimmäiseksi liikkeelle sanan levittämisestä tiedottein ja infotilaisuuksin. Kun asia on riittävän monen tiedossa, on uudistuksen eteenpäin vieminen helpompaa.

Viitteet

- [1] E. B. Brixen, “Audio Levels and Readings.” [URL] <http://www.dk-technologies.com/downloads/Audio%20Levels.pdf>
- [2] E. Blomberg and A. Lepoluoto. (2005) Audiokirja.
- [3] Dolby Laboratories, “All about Audio Metadata,” Dolby Laboratories, Inc., 2001.
- [4] T. Holman, *5.1 Surround Sound: Up and Running*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [5] E. Aro, *Tilaääni*. Riffi-julkaisut, 2006.
- [6] Dolby Laboratories, Inc., *Dolby Digital Multichannel Audio Encoder User’s Manual (Model DP569)*, 2001.
- [7] *ETSI TS 102 366 - Digital Audio Compression (AC-3, Enhanced AC-3) Standard*, European Telecommunications Standards Institute , 2005.
- [8] F. Camerer, “Loudness - an Audio Levelling Revolution,” EBU-Group P/LOUD, 2010.
- [9] M. Karjalainen, *Kommunikaatioakustiikka*. Teknillinen korkeakoulu, 1999.
- [10] J. C. Riedmiller, S. Lyman, and C. Robinson, “Intelligent Program Loudness Measurement and Control: What Satisfies Listeners?” Audio Engineering Society, 2003.
- [11] M. F. Davis, C. Q. Robinson, and M. S. Vinton, “Signal Models and Upmixing Techniques for Generating multichannel Audio,” in *Audio Engineering Society Conference*, 2010.
- [12] PLoS. (2010) Perception Space - The Final Frontier. [URL] <http://www.plosbiology.org/article/info:doi/10.1371/journal.pbio.0030137>
- [13] B. C. J. Moore, Ed., *An introduction to the psychology of hearing*, 2nd ed. Academic press, 1982.
- [14] T. D. Rossing, F. R. Moore, and P. A. Wheeler, *The Science of Sound*, 3rd ed., A. Black, N. Gee, and J. Marsh, Eds. Addison Wesley, 2002.
- [15] K. Ilmonen, *Yleisradion historia 1926-1996 3. osa*. Yleisradio Oy, 1996.
- [16] M. Zemack, “Implementing Methods for Equal Loudness in Radio Broadcasting,” Diplomityö, KTH, 2007.
- [17] *ITU-R BS.1770-1, Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level*, International Telecommunication Union Recommendation, 2006-2007.

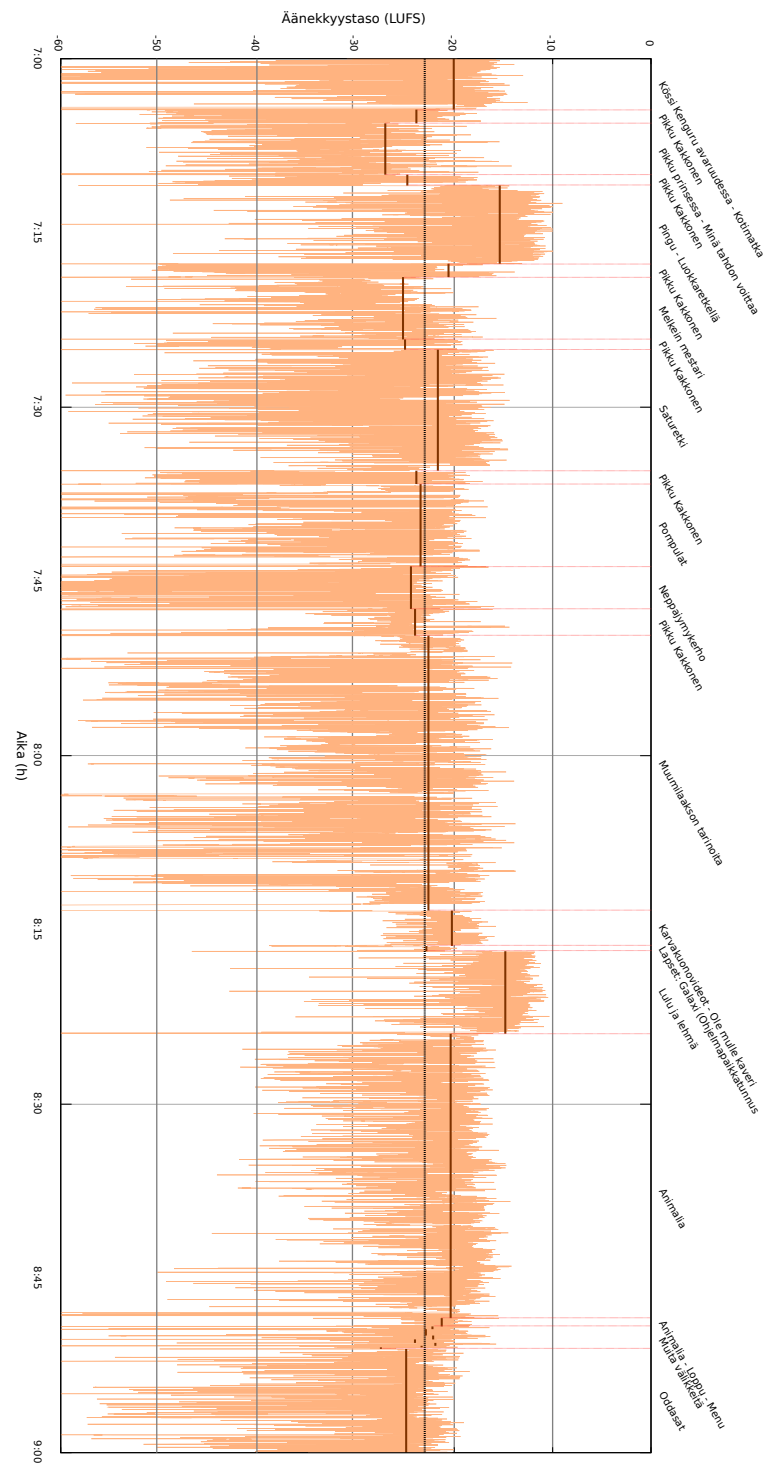
- [18] E. B. Brixen, *Audio Metering*, F. R. Taarup, Ed. Broadcast Publishing and DK Audio, 2001.
- [19] V. P. Sivonen and W. Ellermeier, “Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation,” Aalborg University, Department of Acoustics, Sound Quality Research Unit, 2006.
- [20] V. P. Sivonen, P. Minnaar, and W. Ellermeier, “Effect of direction on loudness in individual binaural synthesis,” Audio Engineering Society Convention 118, 2005.
- [21] V. P. Sivonen and W. Ellermeier, “Effect of direction on loudness for wideband and reverberant sounds,” Audio Engineering Society Convention 120, 2006.
- [22] N. Zacharov, “An Overview of Multichannel Level Alignment,” Nokia Research Center, Speech and Audio System Laboratory, Tampere, Finland, 1998.
- [23] K. Ilmonen, *Listener preferences for loudness balance of broadcasts, with special consideration to listening in noise*. Oy. Yleisradio Ab., PTS-elin, 1971.
- [24] Orban, “Automatic Loudness Control in Television Broadcast: Current Practice.” [URL] <http://www.orban.com/support/orban/techttopics/>
- [25] W. Hoeg, N. Gilchrist, H. Twietmeyer, and H. Jünger, *Dynamic Range Control (DRC) and Music/Speech Control (MSC), Programme-associated data service for DAB*, European Broadcasting Union Technical Review, 1994.
- [26] J. Emmett, “Audio Levels in the New World of Digital Systems,” EBU, Technical Review, 2003.
- [27] M. Salmensaari, “Äänentason tarkkailuohje,” Ylen sisäinen julkaisu, 1989.
- [28] Yleisradio Oy, “Yleisradion ohjelmamateriaali,” Ylen sisäinen julkaisu, 2006.
- [29] Yleisradio Oy, “TV-äänien mittarointiohjeistus,” Ylen sisäinen julkaisu, 2009.
- [30] T. Lund, “Control of Loudness in Digital TV,” TC Electronic A/S, 2006.
- [31] T. Lund, “Level and Distortion in Digital Broadcasting,” EBU Technical review, 2007.
- [32] B. Katz, “Seminar on Loudness @ Denmark Radio,” Youtube-tallenne, 2009.
- [33] S. H. Nilelsen and T. Lund, “0 dBFS+ Levels in Digital Mastering,” Audio Engineering Society, 2000.
- [34] T. Lund, “Stop Counting Samples,” 2006.
- [35] C. Clark. (2009) A Visual History of Loudness. [URL] <http://media.npr.org/assets/music/news/2009/12/poster2.pdf>

- [36] E. Vickers, "The Loudness War: Backbround, Speculation and Recommendations," in *Audio Engineering Society Convention 129*, 2010.
- [37] E. Aro, "Haastattelu 21.10.2010, Radioteatterin äänisuunnittelija ja tuottaja."
- [38] E. Skovenborg and S. H. Nilsen, "Evaluation of Designs for Loudness-Matching Experiments," Int. Conf. "Subjective and Objective Assessment of Sound", 2004.
- [39] E. Skovenborg, R. Quesnel, and S. H. Nilsen, "Loudness Assessment of Music and Speech," Audio Engineering Society, 2004.
- [40] E. Skovenborg and S. H. Nilsen, "Evaluation of Different Loudness Models with Music and Speech Material," Audio Engineering Society Convention 117, 2004.
- [41] T. Lund, "Control of Loudness Across Broadcast Platforms," TC Electronic A/S, 2009.
- [42] T. Lund, "Inter-program Level Jumps in Broadcast," TC Electronic A/S, 2008.
- [43] E. Grimm, R. van Everdingen, and M. Schöpping, "Toward a recommendation for a European standard of peak and LKFS loudness levels," *SMPTE Motion Imaging Journal*, 2010.
- [44] G. Spikofski and S. Klar, "Levelling and Loudness in Radio and Television Broadcasting," EBU Technical review, 2004.
- [45] Dolby Laboratories, Inc., "Dolby kotisivut." [URL] <http://www.dolby.com>
- [46] Evertz Microsystems, Ltd., "Evertz kotisivut." [URL] <http://www.evertz.com>
- [47] J. Brand, "Television lähetysprosessi ja lähetysjärjestelmän rajapinnat," Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2010.
- [48] O. Laine, "Teräväpiirtotelevisio Suomen maanpäällisessä julkisessa televisioverkossa," Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2010.
- [49] *EBU Tech 3341, "EBU Mode" metering to supplement Loudness normalisation according to EBU Technical Document R128*, European Broadcasting Union Recommendation, 2010.
- [50] *EBU Tech 3343, Practical Guidelines*, European Broadcasting Union Recommendation, 2010.
- [51] *ITU-R BS.1771, Requirements for loudness and true-peak indicating meters*, International Telecommunication Union Recommendation, 2006.
- [52] EBU. (2010) Loudness in broadcasting. [URL] <http://tech.ebu.ch/groups/ploud>

- [53] E. Grimm, E. Skovenborg, and G. Spikofski, “Determining an Optimal Gated Loudness Measurement for TV Sound Normalization,” Convention Paper 8154 Audio Engineering Society, 2010.
- [54] PLOUD, “Loudness normalisation and permitted maximum level of audio signals,” EBU, 2010.
- [55] S. H. Nilsen, “Note on measurement units for loudness,” TC Group Research, 2009.
- [56] Tietotekniikan liitto ry. [URL] <http://www.ttlry.fi/>
- [57] H. Irimajiri, “Verification of Overlap Technique in Loudness Algorithm,” Mainichi Broadcasting System Inc., TV Operating Engineering Department, NAB, 2010.
- [58] *EBU Tech 3342, Loudness Range specification*, European Broadcasting Union Recommendation, 2010.
- [59] *EBU Tech 3276-E, Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic*, European Broadcasting Union , 1998.
- [60] *EBU Tech 3276-E, Supplement 1, Listening conditions for the assessment of sound programme material: Multichannel sound*, European Broadcasting Union , 2004.
- [61] *EBU Tech 3344, Distribution Guidelines*, European Broadcasting Union Recommendation, 2010.
- [62] T. Spath, “Technical Bulletin 11: matching audio levels across programmes,” in *HD Forum France*. Dolby Laboratories, 2009.
- [63] E. Skovenborg and T. Lund, “Loudness Descriptors to Characterize Programs and Music Tracks,” Audio Engineering Society, 2008.
- [64] Yleisradio Oy, “Common Specification for Program Exchange,” www.yle.fi/tekniikka, 2010.
- [65] Yleisradio Oy, “Technical Requirements for Exchange of High Definition Programmes in File Format,” www.yle.fi/tekniikka, 2010.
- [66] M. Hartzell, “Haastattelu 30.09.2010, Äänenkäsittelyn järjestelmäasiantuntija.”

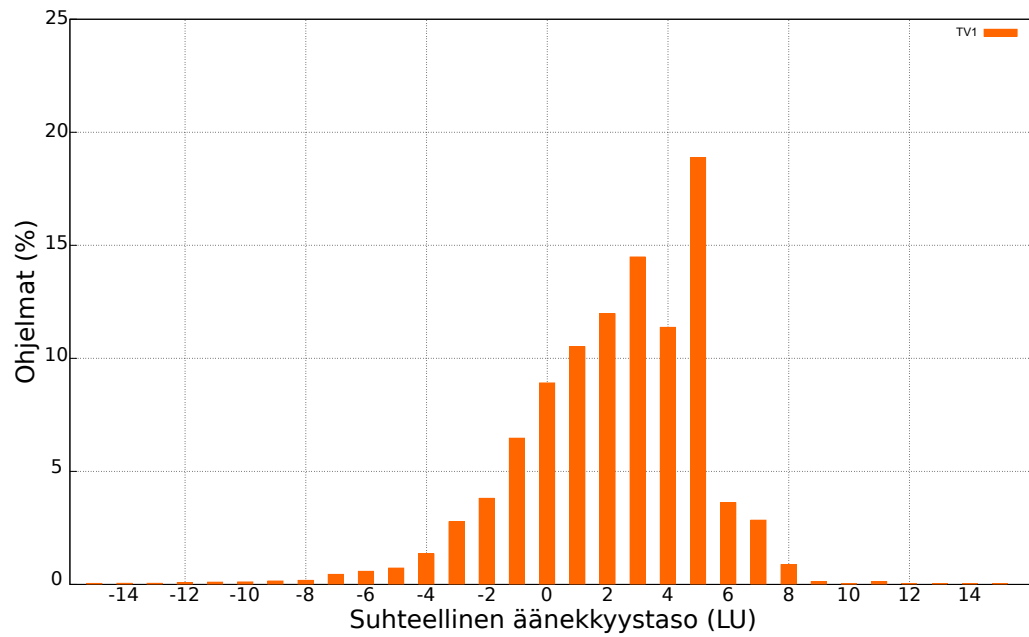
A Mittaustuloksia

A.1 Kuvaaja äänekkyysmittauksesta

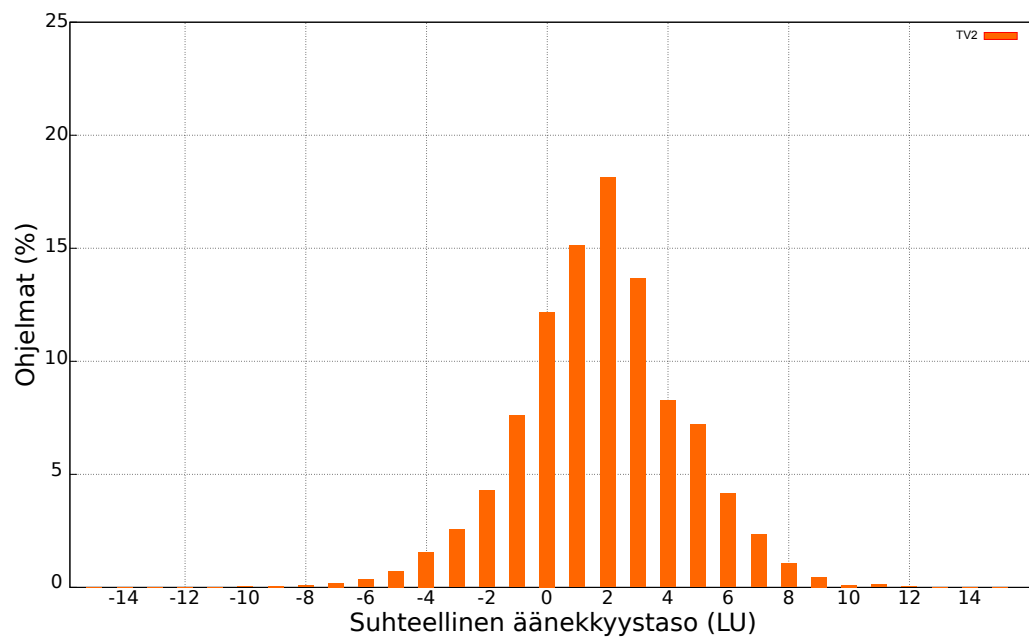


Kuva A1: Äänekkyysmittaus TV2 12.10.2010 kello 7:00-9:00.

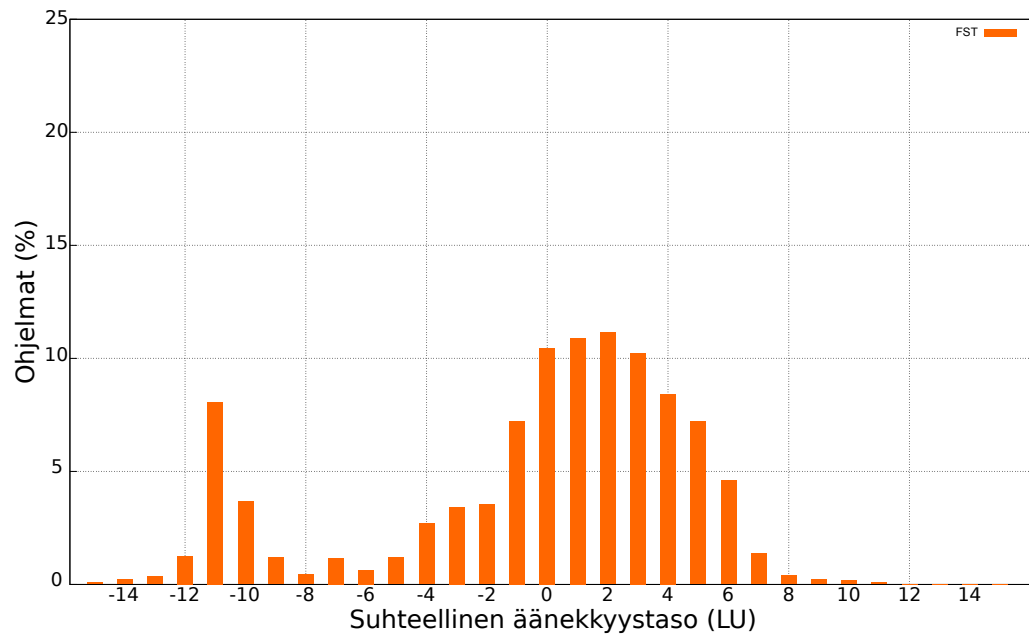
A.2 Kanavakohtaiset histogrammit



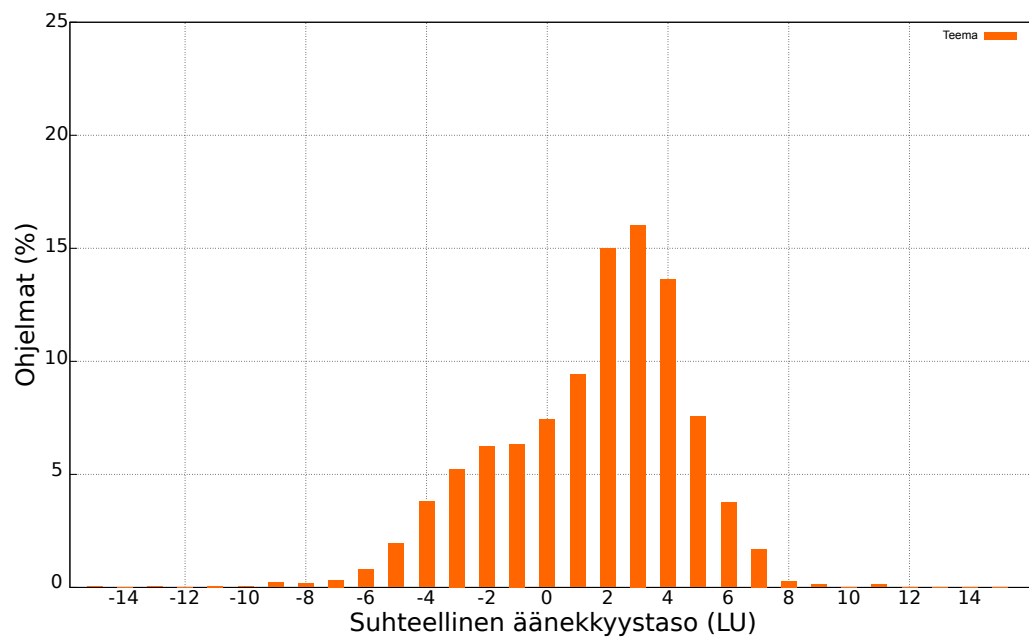
Kuva A2: TV1-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmamäärän mukaan.



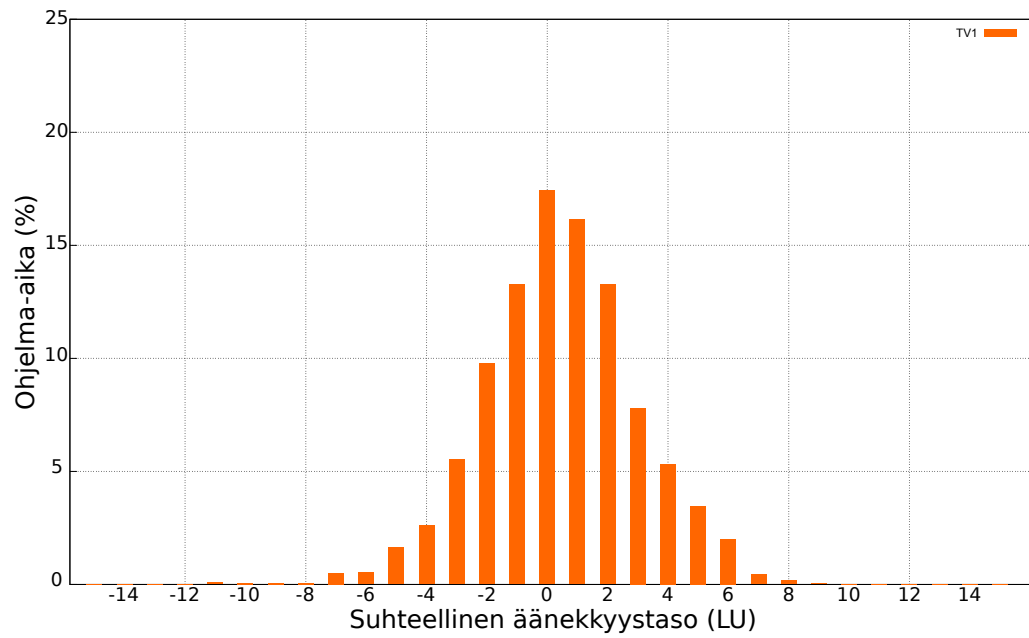
Kuva A3: TV2-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmamäärän mukaan.



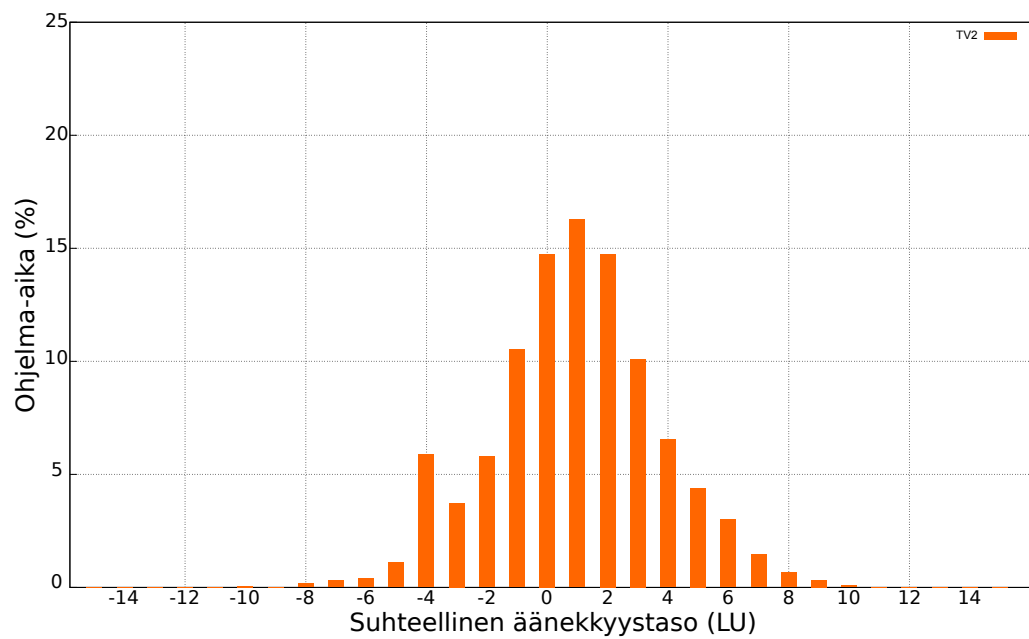
Kuva A4: FST-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmamäärän mukaan.



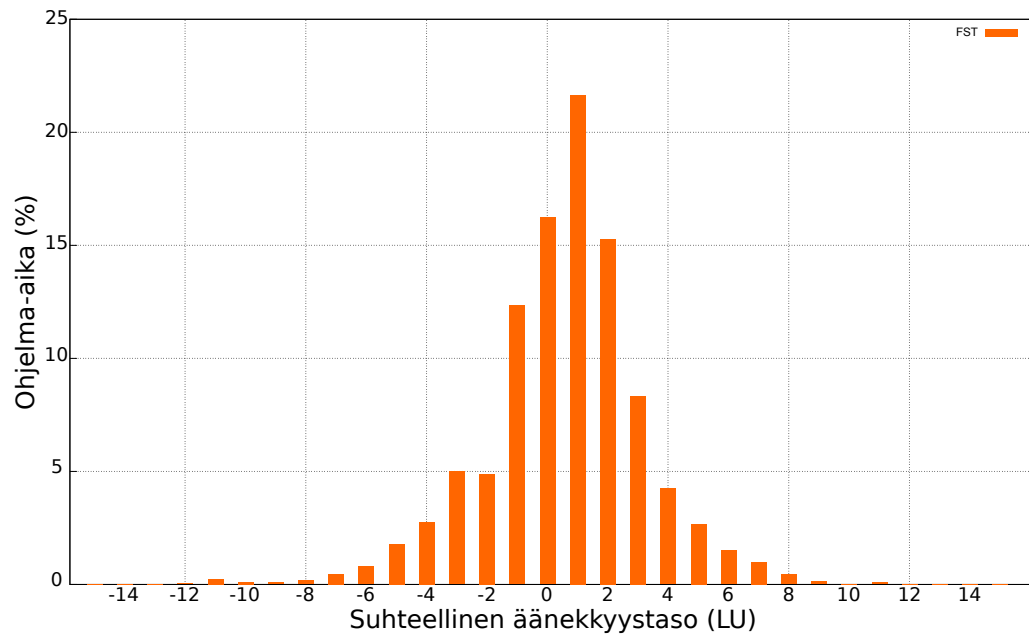
Kuva A5: Teema-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmamäärän mukaan.



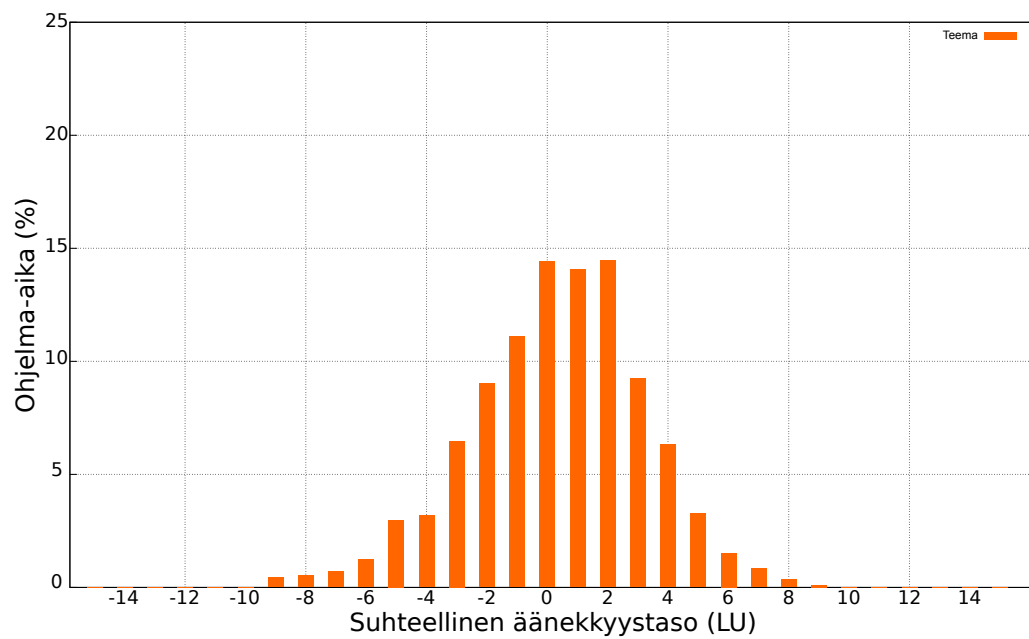
Kuva A6: TV1-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmien kestolla painotettuna.



Kuva A7: TV2-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmien kestolla painotettuna.



Kuva A8: FST-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmien kestolla painotettuna.



Kuva A9: Teema-kanavan äänekkyyshajonta ohjelmien kestolla painotettuna.