



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRY NIEMI

HELSINGIN KADONNEIDEN 1800-LUVUN KONSERTTITILOJEN  
AKUSTIIKAN MALLINNUS JA AURALISOINTI

Diplomityö

Tarkastajat:

Juha Vinha, prof.

Mikko Kylliäinen tekn. lis.

Tarkastajat ja aihe hyväksytty

Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
nan tiedekuntaneuvoston kokouk-  
sessa 8. lokakuuta 2014



## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**NIEMI, HENRY:** Helsingin kadonneiden 1800-luvun konserttitilojen akustiikan mallinnus ja auralisointi

Diplomityö, 90 sivua, 25 liitesivua

Joulukuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: prof. Juha Vinha, tekn. lis. Mikko Kylliäinen

Avainsanat: akustiikka, huoneakustiikka, mallintaminen, auralisointi, musiikin historia

Useat 1800-luvulla rakennetut helsinkiläiset konserttitilat ovat joko tuhoutuneet, tai niitä on merkittävästi muutettu. Näiden tilojen akustiikan tutkimus on aiemmin ollut mahdollista, mutta akustiikan mallinnusmenetelmien kehityksen ansiosta salien akustiikkaa voidaan nykyään tutkia tietokonemallinnuksen avulla. Mallintamisen lisäksi on myös mahdollista luoda saleista kuunneltavia ääninäytteitä, eli auralisointeja.

Tässä tutkimuksessa on mallinnettu Engelin teatteri (1827–1861), Helsingin yliopiston juhlasali (1832–1944), Helsingin Seurahuoneen 1. vaiheen (1833–1862) ja 2. vaiheen (1863–1887) juhlasalit sekä Palokunnantalon juhlasali (1889–1967). Salien akustiikkaa on tutkittu mallinnuksen pohjalta ja salit on auralisoitu käyttäen ääninäytteitä sinfonisesta musiikista.

Salien geometria on mallinnettu alkuperäisten rakennuspiirustusten perusteella. Mallinnuksessa käytetyt absorptio- ja sirontakertoimet on valittu saleissa käytettyjen pintamateriaalien perusteella, jotka perustuvat historiallisista lähteistä kerättyyn tietoon. Näiden tietojen perusteella saleista on mallinnettu standardin ISO 3382-1 mukaisia parametreja. Nämä parametrit ovat: jälkikaiunta-aika  $T_{30}$ , varhainen jälkikaiunta-aika  $EDT$ , selvyys  $C_{80}$ , voimakkuus  $G$  ja sivuttaisenergiasuhde  $LF_{80}$ . Parametrit on laskettu salin yleisön alueelta tilanteessa missä salit ovat tyhjiä ja tilanteessa jossa ne ovat täynnä yleisöä.

Auralisoinnit luotiin käyttämällä sopraano-aariaa Mozartin oopperasta Don Giovanni ja lyhyttä katkelmaa Beethovenin 7. Sinfonian 1. osasta. Auralisoinneissa jokainen orkesterin soitin mallinnettiin erikseen ja soittimista luodut auralisoinnit yhdistettiin yhdeksi äänitiedostoksi. Orkesterien kokoonpanot ja istumajärjestykset mallinnettiin historiallisten tietojen perusteella. Auralisoinnit luotiin jokaisesta salista kahdesta pisteestä yleisön alueelta ja ne ovat kuultavissa tämän diplomityön yhteyteen liitetyllä CD-levyllä.

Mallinnus ja auralisoinnit validoitiin keräämällä sanomalehdistä ja kirjallisuudesta aikalaismielipiteitä salien akustiikasta ja vertaamalla niitä mallinnettuihin huoneakustisiin parametreihin ja auralisointeihin. Mielipiteiden todettiin suurimmalta osalta vastaavan mallinnuksen tuloksia.



## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**NIEMI, HENRY:** The Acoustical Modeling and Auralisation of Vanished Concert Halls in 19<sup>th</sup> Century Helsinki.

Master of Science Thesis, 90 pages, 25 Appendix pages

December 2014

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha, Research Fellow Mikko Kylliäinen.

Keywords: acoustics, room acoustics, modeling, auralisation, history of music

Several concert spaces built in Helsinki during the 19<sup>th</sup> century have either been destroyed or significantly altered. The study of the acoustics of these halls has previously been impossible, but due to developments in acoustical modeling methods, the halls can now be studied using computer modeling. In addition, it is also possible to create audible sound files, or auralisations, from these halls.

In this study, Engel's Theater (1827–1861), the main hall of the University of Helsinki (1832–1944), The 1<sup>st</sup> (1833–1862) and 2<sup>nd</sup> (1863–1887) halls of the Helsinki Society House and the hall of The Fire Brigade House (1889–1967) have been modeled. The acoustics of these halls have been studied based on the modeling results. Auralisations of the halls have been created using sound samples of symphonic music.

The geometry of the halls has been modeled using their original plans. The absorption and scattering coefficients used in the modeling have been chosen based on the surface materials used in the halls, which are based on information gathered from historical sources. Using this information, parameters from the standard ISO 3382-1 have been modeled for each hall. The modeled parameters are: reverberation time  $T_{30}$ , early decay time  $EDT$ , clarity  $C_{80}$ , strength  $G$  and the lateral energy fraction  $LF_{80}$ . The parameters have been calculated in the audience area with empty halls and with a full audience.

The auralisations were made using a soprano aria from Mozart's opera Don Giovanni and an excerpt from the 1<sup>st</sup> movement of Beethoven's 7<sup>th</sup> Symphony. In the auralisations, each instrument was modeled separately and auralisations from the instruments were combined into one sound file. The composition and seating arrangement of each orchestra was modeled using historical information. The created auralisations have been included on a CD in this master thesis.

The modeling and auralisations were validated by collecting contemporary opinions on the acoustics of the halls, and comparing them with the modeled room acoustic parameters and auralisations. For the most part, it was found that the opinions agreed with the modeled results.



## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on toteutettu Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella ja sen on rahoittanut Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiö. Haluan kiittää tukisäätiötä työtä varten myönnetystä apurahasta.

Osoitan kiitokset Jere Jäppiselle ja Mikko Linqvistille Helsingin kaupunginmuusiolta, joiden apu historiallisten lähteiden hankinnassa on mahdollistanut tämän tutkimuksen teon. Kiitän myös kapellimestari Kimmo Tullilaa avusta auralisointien kuuntelussa ja orkesterin balanssin korjaamisessa. Haluan myös kiittää Akustista Seuraa apurahasta, joka mahdollisti tutkimuksen esittelyn Krakovassa kansainvälisessä Forum Acusticum 2014 -konferenssissa.

Osoitan erittäin suuret kiitokset ohjaajalleni yliassistentti Mikko Kylliäiselle, jonka asiantuntemus sekä akustiikassa että historian tutkimuksessa on ollut korvaamatonta tämän tutkimuksen teossa. Haluan myös kiittää tutkijatovereitani Ville Kovalaista, Ahmed Ahmadia ja Pekka Latvannetta, joiden luoma toverillinen työilmapiiri on ollut suurena apuna tutkimuksen teossa. Kiitän myös työn tarkastajia professori Juha Vinhaa ja yliassistentti Mikko Kylliäistä.

Tätä tutkimusta tehdessäni valmistuin toukokuussa 2014 muusikoksi Tampereen konservatorion ammatilliselta 2. asteelta, soittimenani klarinetti. Konservatorion opinnäytetyöni käsitteli sinfoniaorkesterin sointia 1800-luvun Helsingissä. Opinnäytetyö on auttanut pohjustamaan tätä tutkimusta. Tahtoisin siksi myös kiittää Konservatorion opinnäytetyön ohjauksesta Mikko Kylliäistä ja Petri Hoppua Tampereen yliopistolta.

Kiitän myös perhettäni ja ystäviäni, joiden tuki on ollut minulle korvaamatonta työtä tehdessäni.

Tampereella 10.11.2014

Henry Niemi





## SISÄLLYS

Tiivistelmä.....	i
Abstract .....	ii
Alkusanat.....	iii
Käsitteet.....	vii
Merkinnät .....	x
1 Johdanto.....	1
1.1 Konserttipaikat Helsingissä 1800-luvulla.....	1
1.2 Akustiikan mallintamisen kehitys .....	3
1.2.1 Pienoismallit.....	3
1.2.2 Tietokonemallit .....	4
1.2.3 Auralisointi.....	7
1.3 Historiallisten tilojen mallinnusta koskeva tutkimus .....	8
1.4 Diplomityön tavoite.....	10
2 Huoneakustiikan mallintaminen .....	11
2.1 Mallinnuksen perusteet.....	11
2.1.1 Huoneakustiset parametrit standardin ISO 3382-1 mukaan .....	11
2.1.2 Tilamalli .....	14
2.1.3 Huoneakustinen mallinnus .....	15
2.2 Salien rakennushistoria.....	20
2.2.1 Engelin teatteri (1827–1861).....	20
2.2.2 Yliopiston juhlasali (1832–1944) .....	21
2.2.3 Seurahuone (1833–1862 & 1863–1887).....	22
2.2.4 Palokunnantalo (1889–1967) .....	25
2.3 Geometrian mallintaminen.....	26
2.4 Huoneakustiikan mallintaminen.....	31
2.4.1 Absorptiokertoimien valinta.....	31
2.4.2 Sirontakertoimet ja pintojen tyypit .....	37
2.4.3 Lähteiden ja vastaanottopisteiden sijoittelu .....	37
2.4.4 Laskenta-asetusten määrittäminen.....	38
2.5 Rajoitukset .....	38
2.6 Tulokset .....	40
2.6.1 Engelin teatteri .....	41
2.6.2 Yliopiston juhlasali.....	42
2.6.3 Seurahuoneen 1. vaiheen sali .....	43
2.6.4 Seurahuoneen 2. vaiheen sali .....	43
2.6.5 Palokunnantalon juhlasali .....	44
2.7 Tulosten tarkastelu .....	45
3 Salien auralisointi.....	55
3.1 Auralisoinnin perusteet.....	55
3.1.1 Konvoluutio.....	55

3.1.2	Herätesignaali.....	55
3.1.3	Binauraalinen impulssivaste.....	56
3.2	Orkesterin mallintaminen.....	57
3.2.1	Kaiuttomat ääninäytteet .....	57
3.2.2	Orkesterien kokoonpanot .....	58
3.2.3	Lähteiden ominaisuudet .....	64
3.3	Auralisointien luominen.....	64
3.3.1	Binauraalisten impulssivasteiden luominen.....	64
3.3.2	Signaalien konvoluutio ja miksaus .....	65
3.3.3	Orkesterin balanssi.....	66
3.3.4	Auralisointien äänenvoimakkuus .....	66
3.3.5	Solistin kuuluvuus Engelin teatterissa .....	69
3.3.6	Signaalien jälkikäsitteily .....	70
3.4	Rajoitukset .....	71
3.5	Valmiit auralisoinnit .....	73
4	Validointi .....	74
4.1	Validoinnin merkitys .....	74
4.2	Aikalaismielipiteet.....	74
4.3	Mallinnettujen salien ja aikalaismielipiteiden vertailu .....	77
5	Yhteenveto .....	79
	Lähteet.....	81

Liite 1: Mallinnettujen salien geometria

Liite 2: Mallinnettujen salien pintamateriaalit sekä absorptio- ja sirontakertoimet

Liite 3: Vastaanottopisteiden sijainti saleissa

Liite 4: Verkot mallinnetuista huoneakustisista parametreista

Liite 5: Orkestereissa käytettyjen soittimien lyhenteeet

Liite 6: Kuvat auralisointipisteistä

Liite 7: Auralisointien RMS-arvot ja Odeonissa käytetyt äänitustasot

Auralisoinnit sisältävä CD-levy

1. Engelin teatteri, kuuntelija 1, Sennheiser HD 600
2. Engelin teatteri, kuuntelija 6, Sennheiser HD 600
3. Yliopiston juhlasali, kuuntelija 3, Sennheiser HD 600
4. Yliopiston juhlasali, kuuntelija 8, Sennheiser HD 600
5. Seurahuoneen 1. vaiheen sali, kuuntelija 1, Sennheiser HD 600
6. Seurahuoneen 1. vaiheen sali, kuuntelija 3, Sennheiser HD 600
7. Seurahuoneen 2. vaiheen sali, kuuntelija 1, Sennheiser HD 600
8. Seurahuoneen 2. vaiheen sali, kuuntelija 4, Sennheiser HD 600
9. Palokunnantalon juhlasali, kuuntelija 3, Sennheiser HD 600
10. Palokunnantalon juhlasali, kuuntelija 12, Sennheiser HD 600
11. Engelin teatteri, kuuntelija 1, Bayer Dynamic DT 990

12. Engelin teatteri, kuuntelija 6, Bayer Dynamic DT 990
13. Yliopiston juhlasali, kuuntelija 3, Bayer Dynamic DT 990
14. Yliopiston juhlasali, kuuntelija 8, Bayer Dynamic DT 990
15. Seurahuoneen 1. vaiheen sali, kuuntelija 1, Bayer Dynamic DT 990
16. Seurahuoneen 1. vaiheen sali, kuuntelija 3, Bayer Dynamic DT 990
17. Seurahuoneen 2. vaiheen sali, kuuntelija 1, Bayer Dynamic DT 990
18. Seurahuoneen 2. vaiheen sali, kuuntelija 4, Bayer Dynamic DT 990
19. Palokunnantalon juhlasali, kuuntelija 3, Bayer Dynamic DT 990
20. Palokunnantalon juhlasali, kuuntelija 12, Bayer Dynamic DT 990

## KÄSITTEET

Absorptiokerroin	Heijastuksessa pintaan absorboituneen äänienergian määrä jaettuna siihen kohdistuneella energialla. Absorptiokerroin voi saada arvoja väliltä 0...1.
Auralisointi	Tekniikka, jolla tuotetaan kuultavia äänitiedostoja simuloidusta tai mitatusta numeerisesta datasta.
BRIR	Binaural Room Impulse Response, binauraalinen huoneimpulssivaste. Molempien korvien kohdalla tilassa simuloitu tai mitattu impulssivaste.
CLF	Common Loudspeaker Format. Tiedostomuoto, joka sisältää tietoa äänilähteen, yleensä kaiuttimen, säteilemän äänen suuntaavuudesta.
Diffuusi heijastus	Heijastus, jossa pinnasta pois heijastunut äänienergia heijastuu tasaisesti kaikkiin suuntiin.
Geometrisen menetelmä	Mallinnusmenetelmä, jossa äänen aallonpituus oletetaan nolllaksi. Geometrisissä menetelmissä ääni heijastuu pinnoista valon tapaan peilimaisesti.
Herätesignaali	Aika-amplitudisignaali, joka toimii herätteenä akustisessa systeemissä.
HRTF	Head-related transfer function. Pään siirtofunktio, joka saadaan mittaamalla äänenpaineet korvien kohdalta ja jakamalla ne pään keskipisteen kohdalta ilman päätä mitatulla äänenpaineella.
Hybridimalli	Huoneakustinen malli jossa käytetään useita eri laskentamenetelmiä, kuten kuvalähde- ja säteenseurantamenetelmää.
Impulssivaste	Järjestelmän vaste impulssiherätteelle. Huoneakustiikassa impulssivasteella tarkoitetaan mitattua äänenpaineen muutosta ajan suhteen johtuen toisessa pisteessä toistetusta impulssiherätteestä.
Jälkikaunta-aika	Aika, jossa tilaan muodostunut äänenpaine laskee 60 dB äänilähteen sammuttamisen jälkeen. Jälkikaiunta-aika riippuu taajuudesta.

Konvoluutio	Esitystapa, jossa järjestelmän vaste mielivaltaiselle herätesignaaliille kuvataan herätesignaalin ja järjestelmän impulssivasteen yhdistelmänä.
Kuvalähdemenetelmä	Huoneakustinen mallinnusmenetelmä, jossa heijastukset kuvataan virtuaalisina kuvalähteinä, jotka ovat heijastustasolla luotuja peilikuvia alkuperäisestä lähteestä. Peilaaminen voidaan tehdä useamman tason kautta, jolloin muodostuu 2. ja 3. kertaluvun kuvalähteitä.
Lambertin kosinijakauma	Optiikassa käytetty määritelmä, jonka mukaan pinnasta heijastuva energia on suhteessa pinnan normaaliin ja havaitsijan katselusuunnan väliseen kulmaan.
LTI-järjestelmä	Linear time-invariant system. Lineaarinen siirtöinvariantti järjestelmä on järjestelmä, jossa vaste ei riipu herätteen alkamisen absoluuttisesta ajanhetkestä.
Monilähdemenetelmä	Auralisointimenetelmä, jossa luodaan auralisoinnit useasta lähteestä samalle kuulijalle ja yhdistetään ne yhdeksi äänitiedostoksi.
RMS-arvo	Root-mean-square. Aikariippuvaisesta signaalista laskettu arvo, jossa otetaan neliöjuuri signaalin neliön aikakeskiarvosta. RMS-arvo kuvaa hyvin signaalin intensiteettiä kun se saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja.
Säteenseurantamenetelmä	Huoneakustinen mallinnusmenetelmä, jossa lähdepisteestä seurataan useita tilassa peilimäisesti heijastuvia säteitä. Jokainen säde kantaa pienen määrän energiaa, joka vaimenee heijastusten ja etäisyyden mukaan.
Sironta	Ilmiö, jossa pintaan kohdistunut äänienergia heijastuu pois peilimäisestä heijastussuunnasta.
Sirontakerroin	Suure, joka kuvaa peilimäisestä heijastussuunnasta pois päin heijastuneen äänienergian määrää. Sirontakerroin voi saada arvoja väliltä 0...1.
Siirtymäluku	Transition order. Odeon-ohjelmassa käytettävä suure, joka ilmoittaa montako heijastusta mal-

	linnetaan kuvalähdemenetelmällä, ennen siirtymistä säteenseurantamenetelmään
Suuntaavuus	Suure, joka kuvaa lähteen säteilemän äänen intensiteettiä eri suuntiin.
Tilamalli	Kolmiulotteinen malli, joka määrittää tilan geometrian.
Vektoripohjainen sirontamenetelmä	Odeon-ohjelmassa käytetty mallinnusmenetelmä, jossa heijastunut äänisäde jaetaan peilimäisesti heijastuneeseen sironneeseen ja vektoriin. Vektoreiden suuruus määritetään siron-takertoimen avulla ja niiden summa määrittää heijastuneen säteen lopullisen suunnan.
Yksikkönäyte	Yhden muuttujan funktio, jolla kuvataan impulssimaista herätettä. Muuttujan arvolla 0 funktio saa arvon 1. Kaikilla muilla muuttujan arvoilla se taas saa arvon 0.
Äänitystaso	Odeonissa-ohjelmassa käytettävä suure, joka määrittää ohjelmassa luotujen auralisointien äänenvoimakkuuden.

## MERKINNÄT

$\alpha$	Absorptiokerroin
$B$	Balanssi [dB]
$C_{80}$	Selvyys [dB]
$EDT$	Varhainen jälkikaiunta-aika [s]
$G$	Voimakkuus [dB]
$h(t)$	Konvoluutiossa käytetty impulssivaste
$L_A$	A-painotettu keskiäänitaso [dB]
$L_{lin}$	Painottamaton keskiäänitaso [dB]
$L_w$	Äänitehotaso [dB]
$LF_{80}$	Sivuttaisenergiasuhde
$p(t)$	Äänenpaine [Pa]
$p_{10}(t)$	Äänenpaine mitattuna vapaakentässä 10 m päästä äänilähteestä [Pa]
$s$	Sirontakerroin
$s_d$	Äänen taipumisesta johtuva sirontakerroin
$s_s$	Pinnan karheudesta johtuva sirontakerroin
$s_r$	Heijastusten laskennassa käytetty sirontakerroin
$t$	Aika [s]
$T_{20}$	Jälkikaiunta-aika, mitattu 20 dB vaimenemisen perusteella [s]
$T_{30}$	Jälkikaiunta-aika, mitattu 30 dB vaimenemisen perusteella [s]
$x(t)$	Konvoluutiossa käytetty mielivaltainen herätesignaali
$y(t)$	Konvoluutiossa käytetty signaalin vaste
$z(t)$	RMS-arvon laskennassa käytetty mielivaltainen signaali





# 1 JOHDANTO

## 1.1 Konserttipaikat Helsingissä 1800-luvulla

Ennen 1800-lukua Helsingin asukkaiden resurssit ylläpitää musiikkitoimintaa olivat rajalliset, joskin musiikkielämä Helsingissä 1700-luvulla oli vilkkaampaa, kuin oli aikaisemmin ajateltu.<sup>1</sup> 1800-luvun alussa Helsingin seudun merkittävin musiikkikeskus oli läheinen Viaporin linnoitus, jonka sotilaskuvernööri, kreivi Ludvig van Heyden, ylläpiti vuosina 1815–1824 sotilassoittajista koostuvaa yksityisorkesteria. Sen tiedetään esiintyneen Helsingin vanhalla raatihuoneella ja Viaporin linnoituksen aatelisklubilla. Raatihuoneella esiintyi van Heydenin kapellin lisäksi myös amatöörimuusikkoja. Yhtyeet olivat pieniä ja koostuivat usein jousikvartetista, joka soitti musiikkia esimerkiksi päivällisvieraille.<sup>2</sup>

Helsinkiin valmistui vuonna 1827 uusi teatteritalo kaupungin porvarien rakennuttamana.<sup>3</sup> Teatterissa oli vuonna 1830 puhenäytelmien esitysten lisäksi 10 oopperanäytäntöä ja siellä vieraili sen olemassaolon ajan useita ulkomaalaisia oopperaseurueita.<sup>4</sup> Teatterissa kantaesitettiin muun muassa ensimmäinen Suomessa sävelletty ooppera, Fredrik Paciuksen Kaarle-kuninkaan metsästys vuonna 1852. Myös erilaiset konsertoivat taiteilijat suosivat teatteria konserttitilana.<sup>5</sup>

Helsingistä tehtiin virallisesti maamme pääkaupunki vuonna 1812 ja keskushallinto siirrettiin sinne 1819. Kuitenkin vasta vuonna 1827 tapahtunut Turun palo sai yliopiston siirtymään Helsinkiin vuonna 1828. Näiden tapahtumien johdosta Helsinkiin siirtyi myös se yhteiskuntaluokka joka oli pitkälti vastuussa orkesteri- ja laulutoiminnasta. Tämä vaikutti olennaisesti kaupungin musiikkitoimintaan.<sup>6</sup> Vuonna 1832 valmistuneeseen uuteen yliopiston päärakennukseen kuului kuvassa 1 esitetty suuri juhlasali, joka vakiinnutti viimeistään 1800-luvun puolivälissä asemansa Helsingin arvokkaimpana ja tärkeimpänä konserttisalina.<sup>7</sup>

1800-luvulla konserttikäytössä oli myös vuonna 1833 valmistunut Helsingin Seurahuone, eli nykyinen Helsingin kaupungintalo. Seurahuoneella konsertoivat lukuiset kiertä-

---

<sup>1</sup> Jäppinen 2003, s. 147–148.

<sup>2</sup> Dahlström & Salmenhaara 1995, s. 312–318; Vainio 2002, s.72–75.

<sup>3</sup> Wasastjerna 1941, s. 9–10.

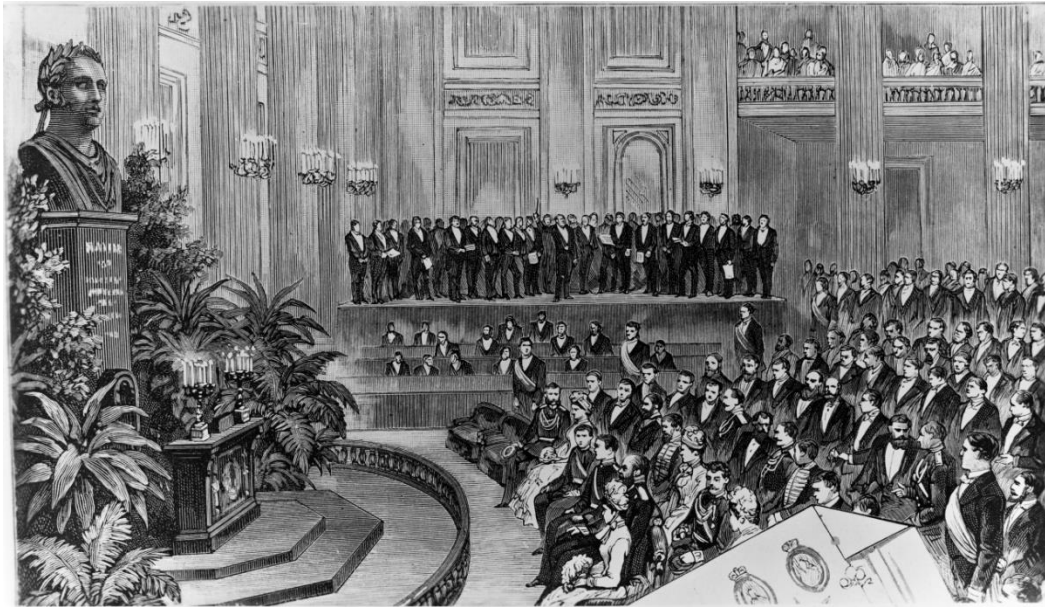
<sup>4</sup> Sola 1936, s.11–12 sekä liitteet 1 ja 2.

<sup>5</sup> Dahlström & Salmenhaara 1995, s. 325.

<sup>6</sup> Dahlström & Salmenhaara 1995, s. 319.

<sup>7</sup> Lappalainen 1994, s.16; Dahlström & Salmenhaara 1995, s. 327.

vät solistit, sekä Fredrik Paciuksen johtama Sinfoniayhdistyksen orkesteri.<sup>8</sup> Seurahuoneella järjestettiin aluksi puhtaasti taiteellisia konsertteja,<sup>9</sup> mutta myöhemmin 1880-luvulla siellä alettiin järjestää viihteellisempiä, niin kutsuttuja populäärikonsertteja. Näissä konserteissa yleisö istui ravintolapöydissä, joihin tarjoiltiin virvokkeita.<sup>10</sup> Yliopiston ja Seurahuoneen lisäksi konsertteja pidettiin myös vuonna 1838 valmistuneella Kaivohuoneella.<sup>11</sup>



**Kuva 1.** Piirros yliopiston juhlasalista vuodelta 1885, kuvalähde: HKM.

Vuonna 1860 Helsinkiin valmistui uusi kivinen teatteritalo Nya Teatern. Vuotta myöhemmin Engelin puinen teatteri purettiin ja siirrettiin uuteen paikkaan. Suuresti muutettuna uudelleenrakennettu teatteri tunnetaan nykyään Arkadia-teatterina. Nya Teatern paloi vain kolme vuotta valmistumisensa jälkeen ja sen tilalle rakennettiin vuonna 1866 uusi teatteri, nykyinen Svenska Teatern.<sup>12</sup> Vuonna 1861 valmistunutta Ritarihuonetta käytettiin myös toisinaan konserttitilana.<sup>13</sup> Vuosisadan puolivälin jälkeen konserttitiloja rakennettiin lisää. Näihin lukeutuvat vuonna 1870 valmistunut Vanha Ylioppilastalo ja vuonna 1889 valmistunut Palokunnantalo.<sup>14</sup>

Mainituista konserttitiloista Engelin teatteri, Yliopiston juhlasali,<sup>15</sup> Seurahuone<sup>16</sup> ja Palokunnantalo<sup>17</sup> ovat joko täysin tuhoutuneet tai niissä sijaitsevat salit ovat merkittävästi muuttuneet. Saleja ei pystytä enää kuuntelemaan tai mittaamaan, mutta niiden huoneakustiikkaa voidaan tutkia mallintamalla.

<sup>8</sup> Lappalainen 1994, s. 16–17, 25–26.

<sup>9</sup> Lappalainen 1994, s. 26 & 36; Niskanen 2008, s. 53.

<sup>10</sup> Wasastjerna 1941, s. 73; Marvia et al. 1993, s. 47.

<sup>11</sup> Lappalainen 1994, s. 16.

<sup>12</sup> Kylliäinen & Takala 2013; Weckström 1966.

<sup>13</sup> Lappalainen 1994, s. 17.

<sup>14</sup> Lappalainen 1994, s. 19.

<sup>15</sup> Lappalainen 1994, s. 196; Helsingin yliopiston päärakennus, 1991; Niskanen 2008, s. 26.

<sup>16</sup> Wasastjerna 1941, s. 60; Ringbom 1988, s. 158–159.

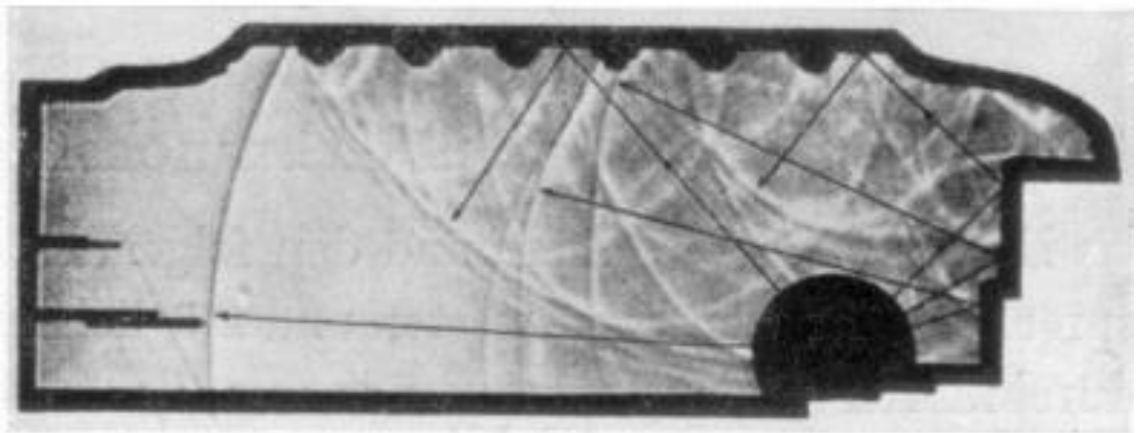
<sup>17</sup> Manninen 2004, s. 31.

## 1.2 Akustiikan mallintamisen kehitys

### 1.2.1 Pienoismallit

Huoneakustiikan tutkimusta on vielä 1700-luvulla tehty geometrisillä menetelmillä, olettamalla että ääni heijastuu pinnoista samalla tavalla kuin valo. Näitä heijastuksia seuraamalla tutkittiin erilaisten musiikkitilojen ominaisuuksia.<sup>18</sup> 1800-luvulla teatterien, konserttisalien ja puhesalien ominaisuuksia selvitettiin tutkimalla suoran ja heijastuneen äänen saapumisajan erotusta kuulijalle.<sup>19</sup> 1900-luvun taitteessa Wallace Clement Sabine (1868–1919) käytti ensimmäisenä kvantitatiivisiä menetelmiä huoneakustiikan suunnittelussa. Hän löysi 1890-luvulla kokeellisesti jälkikäiunta-ajan, tilan pintamateriaalien absorption ja tilavuuden välille yhteyden, joka tunnetaan nykyään Sabinen jälkikäiunta-ajan kaavana.<sup>20</sup>

Huoneakustiikkaa on tutkittu 1900-luvun alusta erilaisten pienoismallien avulla.<sup>21</sup> Sabine on tutkinut konserttisaleja Schlieren-valokuvaukseksi kutsutulla menetelmällä. Menetelmässä pienoismalli täytetään savulla ja sinne herätetään ääni-impulssi sähköisellä kipinällä. Malli valaistetaan, jolloin aaltorintamat tulevat näkyviin.<sup>22</sup> Kuvassa 2 on esitetty esimerkki Schlieren-valokuvasta vuodelta 1939. Vuonna 1921 otettiin käyttöön vesimallit, joissa aallot luotiin mekaanisen herätteen avulla.<sup>23</sup> Näiden mallien avulla voitiin tutkia äänen aaltoilmiöitä tunnetussa geometriassa.



**Kuva 2.** *Schlieren-valokuva Leipzigin Gewandhaussaalin pienoismallista, kovalähde: Rindel 2002.*

Optisissa malleissa äänen etenemistä kuvataan valonsäteillä. Rindelin mukaan ensimmäistä kertaa vuonna 1929 julkaistussa sädemenetelmässä valonlähde asetetaan sylinteriin jossa on useita rakoja, tuottaen kapeita valonsäteitä. Sylinteri laitetaan pienoismal-

<sup>18</sup> Thompson 2002, s. 18–33.

<sup>19</sup> Postma & Katz 2014.

<sup>20</sup> Thompson 2002, s. 33–45.

<sup>21</sup> Rindel 2002.

<sup>22</sup> Sabine 1913.

<sup>23</sup> Davis & Kaye 1927.

liin jonka sisäpinnat ovat heijastavia ja raoista tulevien valonsäteiden heijastuksilla tutkitaan äänen heijastumista. Vermeulen & de Boer taas käyttivät valon jakautumista kuvaavaa menetelmää. Menetelmässä äänilähde kuvataan pienoismallissa valolähteellä ja yleisön alue valmistetaan valkoisesta opaalisista. Lasin kirkkaudesta voidaan päätellä yleisön alueelle kohdistuvan äänen intensiteettiä.<sup>24</sup>

Akustiset pienoismallit tarkoittavat Rindelin mukaan pienoismalleja, joissa toistetaan ja nauhoitetaan ääntä. Salin ääntä voitiin näin arvioida ensimmäistä kertaa subjektiivisesti. Sekä Rindelin että Barronin mukaan tällaista mallia käytti ensimmäisenä Spandöck vuonna 1934. Hän käytti mittakaavaltaan 1:5 mallia, jossa ääni toistettiin suurella nopeudella. Nopeutettu ääni nauhoitettiin mallissa ja sitä kuunneltiin hidastettuna.<sup>25</sup> Rindelin mukaan Reichardt käytti 1950-luvulla pienempiä, mittakaavaltaan 1:10 tai 1:20 malleja, kun taas Fasold käytti 1980-luvulla akustisessa mallissa pieniä keinopäitä, joissa oli kaksi sivuille suuntaavaa mikroфонia, joilla saatiin äänitettyä kuulokkeilla toistettavia kaksikanavaisia signaaleja.<sup>26</sup> Yksi pienoismallien heikkouksia on ilman liiallinen absorptio, joka vääristää tuloksia yli 2 kHz taajuuksilla.<sup>27</sup> Absorptio voidaan minimoida kuivaamalla ilma noin 2 % suhteellista kosteutta, jotta se ei johda virheisiin skaalauksissa. Myös materiaalien absorptio-ominaisuudet on skaalattava pienoismallin mukaan.<sup>28</sup>

## 1.2.2 Tietokonemallit

Tietokoneita on käytetty akustisessa mallinnuksessa 1960-luvulta lähtien. Säteenseurantaan perustuvaa tietokonemallia käytti ensimmäistä kertaa Krokstad vuonna 1968.<sup>29</sup> Mallissa seurattiin äänisäteitä ja niiden peilimäisiä heijastuksia tietokoneen avulla.<sup>30</sup> Vuonna 1973 Schröder julkaisi tutkimuksen jossa laskettiin tilan jälkikaiunta partikkelimallin avulla. Kuvassa 3 esitetyssä mallissa ääntä kuvattiin energiaa kantavina partikkeleina jotka etenevät sädemäisesti äänilähteestä kaksikulotteisessa tilassa.<sup>31</sup> Allen ja Berkley julkaisivat vuonna 1979 tutkimuksen, jossa esiteltiin tietokoneella mallinnettujen kuvalähteiden käyttö heijastusten simuloinnissa.<sup>32</sup> Kuvalähdemenetelmässä luodaan virtuaalisia äänilähteitä jotka simuloivat heijastusta eri pinnoista.

Kuvalähdemenetelmän ongelmana on se, että koska se laskee kaikki mahdolliset peilimäiset heijastukset äänilähteen ja vastaanottopisteen välillä, se tuottaa eksponentiaalisesti kasvavan määrän lähteitä kun heijastusten kertaluokkaa kasvatetaan. Kuvalähde-

---

<sup>24</sup> Rindel 2002.

<sup>25</sup> Rindel 2002; Barron 2010, s. 62.

<sup>26</sup> Rindel 2002.

<sup>27</sup> Barron, 2010, s. 33.

<sup>28</sup> Barron, 2010, s. 62–64.

<sup>29</sup> Rindel, 2002; Barron 2010, s. 64.

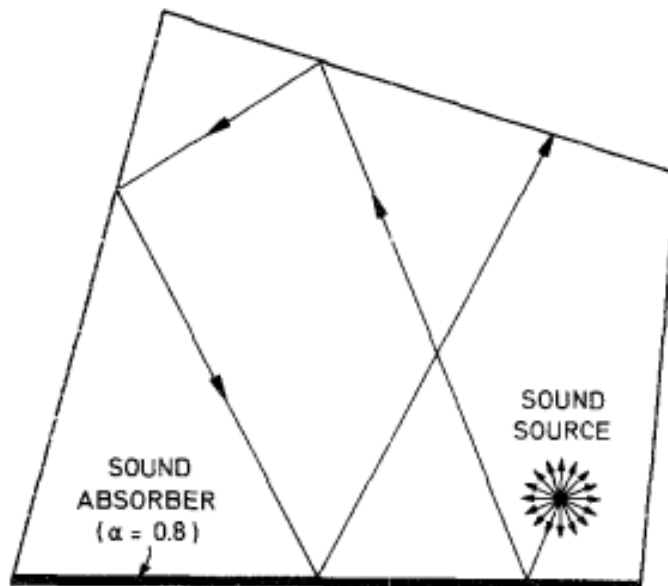
<sup>30</sup> Krokstad et al. 1968.

<sup>31</sup> Schroeder 1973.

<sup>32</sup> Allen & Berkley 1979.

menetelmä soveltuu näin ollen ainoastaan aikaisten heijastusten mallintamiseen.<sup>33</sup> Säteenseurantamenetelmä perustuu heijastuspolkujen näytteenottoon, jossa heijastusten määrä pidetään vakiona, ja näin estetään heijastusten eksponentiaalinen kasvu. Mallinuksen tarkkuus kuitenkin pienenee kun heijastusten kertalukua kasvatetaan, sillä yhä suurempi osa heijastuksista jätetään huomiotta.

Kun äänen aallonpituus on samaa suuruusluokkaa heijastavan pinnan mittojen kanssa, se ei enää heijastu peilimäisesti, vaan aaltoilmiöt, kuten taipuminen ja sironta, alkavat dominoida äänen käyttäytymistä.<sup>34</sup> Kuvälähde- ja säteenseurantamenetelmiä kutsutaan geometrisiksi menetelmiksi, sillä ne olettavat äänen aallonpituuden nolllaksi. Nämä menetelmät eivät mallinna lainkaan äänen aaltoilmiöitä ja ovat siten epätarkkoja pienillä taajuuksilla.



**Kuva 3.** Havainnekuva Schröderin partikkelimallista, kuvalähde: Schroeder 1973.

Huoneakustista tietokonemallinnusta on tehty myös täysin aaltopohjaisilla malleilla. Aaltoyhtälö kuvaa äänenpaineen ja hiukkassopeuden yhteyttä kolmiulotteisessa tilassa. Välimäki et al. mukaan aaltoyhtälö voidaan ratkaista analyttisesti yksinkertaisissa tapauksissa, mutta todellisten salien geometriassa laskenta monimutkaistuu niin paljon, että laskennassa on pakko käyttää numeerisia menetelmiä. Yleisimmät elementtimenetelmään perustuvat mallinnusmenetelmät ovat FEM (finite element method) ja BEM (boundary element method), joita käytetään taajuustasossa sekä FDTD (finite-difference time-domain) -menetelmä, jota käytetään aikatasossa.<sup>35</sup> Rindelin mukaan FEM- ja BEM- menetelmät tuottavat tarkkoja tuloksia yksittäisillä taajuuksilla, mutta ovat tyyppillisesti rajoittuneet pieniin taajuuksiin.<sup>36</sup> Välimäki et al. mukaan FDTD on hyödylli-

<sup>33</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>34</sup> Barron 2010, s. 16.

<sup>35</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>36</sup> Rindel 2002.

sempi menetelmä jälkikäyntä-ajan mallintamisessa ja kolmiulotteisia FDTD-malleja on käytetty 1990-luvulta lähtien.<sup>37</sup> Aaltopohjaiset mallit ovat laskennallisesti raskaampia, mutta ne mallintavat suoraan äänen aaltoilmiöt ja toimivat näin ollen hyvin pienemmillä taajuuksilla, missä geometriset mallit ovat epätarkempia.

Koska eri mallinnustavoilla on omat vahvuutensa, niitä alettiin yhdistellä erilaisiksi hybridimalleiksi. Vorländer kehitti yhden ensimmäisistä hybridimalleista 1980-luvun lopulla. Malli yhdisti säteenseurantamenetelmän ja kuvalähdemenetelmän siten, että aikaiset heijastukset laskettiin kuvalähdemenetelmällä ja myöhäiset heijastukset säteenseurantamenetelmällä.<sup>38</sup> Välimäki et al. mukaan Murphy et al. kehittivät vuonna 2008 FDTD-menetelmän ja säteenseurantamenetelmän yhdistävän hybridimallin.<sup>39</sup> Välimäki et al. mukaan 1990-luvun alussa kehitettiin useita kaupallisia huoneakustiikan mallin-  
nusohjelmia, kuten CATT-Acoustic ja Odeon<sup>40</sup>, jotka käyttävät mallintamiseen geometrisiä hybridimenetelmiä.<sup>41</sup>

Näiden ohjelmistojen tarkkuutta on tutkittu 2000-luvulla niin kutsuttujen monilaboratoriokokeiden (eng. round robin tests) avulla. Kokeissa vertailtiin eri ohjelmistoilla simuloituja huoneita aidossa huoneissa mitattuihin tuloksiin, ja niiden mukaan tulokset ovat tarkkoja suurilla ja keskisuurilla taajuuksilla.<sup>42</sup> Vorländerin mukaan monilaboratoriokokeiden perusteella huoneakustiikan mallin-  
nusohjelmat tuottavat hyviä tuloksia, joiden tarkkuus on samaa suuruusluokkaa kuin kokeellisten mittausten.<sup>43</sup> Myös Hodgson et al. ovat vuonna 2008 julkaisseet erillisen vertailevan tutkimuksen CATT-Acoustics ja Odeon -ohjelmistoista. Hän toteaa, että ohjelmien mallinnustuloksien keskinäiset erot ovat ainakin yksinkertaisissa huoneissa pienempiä, kuin simuloitujen ja mitattujen tulosten erot.<sup>44</sup>

Geometristen menetelmien puutteita aaltoilmiöiden mallintamisessa on yritetty korjata lisäämällä heijastuksiin sironnan ja taipumisen vaikutuksia, joita geometriset ohjelmat eivät mallinna automaattisesti. Säteenseurantamenetelmällä kyettiin mallintamaan diffuuseja heijastuksia jo 1980-luvulla.<sup>45</sup> Diffuusissa heijastuksessa ääni heijastuu pinnasta tasaisesti kaikkiin suuntiin.<sup>46</sup> Torres et al. esittivät vuonna 2001 laskentamenetelmän jolla voitiin mallintaa pintojen reunoilla tapahtuvaa äänen taipumista geometrisissa malleissa.<sup>47</sup> Vuonna 2004 Rindel esitteli vektoripohjaisen sirontamallin, joka jakaa säteen-

---

<sup>37</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>38</sup> Vorländer 1989.

<sup>39</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>40</sup> Naylor 1993.

<sup>41</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>42</sup> Bork 2000; Bork 2005a; Bork 2005b.

<sup>43</sup> Vorländer 2008, s. 215–216.

<sup>44</sup> Hodgson et al. 2008.

<sup>45</sup> Kulowski 1985.

<sup>46</sup> Barron 2010, s. 24.

<sup>47</sup> Torres et al. 2001.

seurantamenetelmällä lasketut heijastukset peilimäiseen ja sironneeseen komponenttiin.<sup>48</sup>

### 1.2.3 Auralisointi

Vorländer määrittelee auralisoinnin tekniikkana, jossa luodaan kuunneltavia äänitiedostoja joko simuloidusta tai mitatusta numeerisesta datasta.<sup>49</sup> Vorländerin mukaan Pösselt et al. kehittivät 1980-luvulla yhden ensimmäisistä sovelluksista auralisoinnista simuloimalla äänikentän kuvalähdemenetelmällä nelikulmaisessa huoneessa. Ensimmäiset auralisointimallit käyttivät ainoastaan peilimäisiä heijastuksia. Mallinnusohjelmien kehittyessä myös äänen taipumisen ja sironnan vaikutukset on huomioitu, mikä on parantanut auralisoinnin laatua.<sup>50</sup>

Ihmisen kuulo on binauraalista, eli äänisignaalia analysoidaan kahdella korvalla. Kuulon binauraalisuus vaikuttaa merkittävästi äänilähteen paikantamiseen,<sup>51</sup> joten sen vaikutusta on pyritty toistamaan myös auralisoinnissa. Välimäki et al. mukaan Shaw on tutkinut vuonna 1982 pään ympäri tapahtuvan äänen taipumisen vaikutusta äänilähteen paikantamiseen kuulon avulla.<sup>52</sup> Hän tutki pään siirtofunktiota, eli HRTF:ää (Head-related transfer function). HRTF määrittää pään ja korvan muodon vaikutuksen korvakäytävään saapuvaan äänisignaaliin. HRTF on riippuvainen äänen tulosuunnasta ja on määritetty erikseen eri tulokulmille. Jotta HRTF:ää voidaan käyttää akustisessa mallinnuksessa, on mallinnuksessa selvitettävä äänen tulosuunta. Välimäki et al. mukaan Kendall ja Martens ovat tutkineet vuonna 1984, kuinka heijastusten tulokulma voidaan määrittää kuulijalle huoneakustisessa mallissa. Jot et al. ovat yhdistäneet HRTF:n äänen tulokulman kanssa huoneakustisessa mallinnuksessa.<sup>53</sup>

Auralisointeja luodaan konvoloimalla kaiuttomia herätesignaaleja simuloidun tai mitatun impulssivasteen kanssa. Prosessi kuvataan yksityiskohtaisemmin kohdassa 3.1.3. Pätyksen mukaan sekä Bang & Olufsen että Denon ovat julkaisseet 1990-luvulla kaiuttomia ääninäytteitä orkesterimusiikista.<sup>54</sup> Näissä äänitteissä koko orkesteri on äänitetty yhtä aikaa. Tällaisilla äänitteillä pystytään tekemään auralisointeja käyttäen huoneakustisessa mallissa vain yhtä äänilähdettä. Vuonna 2005 Rindel & Christensen ovat äänittäneet orkesterimusiikkia siten, että jokainen soitin on äänitetty erikseen kaiuttomassa huoneessa. Esitetyllä menetelmällä jokainen soitin voidaan mallintaa erillisenä lähteenä.<sup>55</sup>

---

<sup>48</sup> Rindel 2004.

<sup>49</sup> Vorländer 2008, s. 3.

<sup>50</sup> Vorländer 2008, s. 222–223.

<sup>51</sup> Vorländer 2008, s. 86.

<sup>52</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>53</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>54</sup> Pätynen et al. 2008.

<sup>55</sup> Rindel & Christensen 2008.

Vigeant et al. on julkaissut vuonna 2008 tutkimuksen auralisoinnista monilähdemenetelmällä, jossa jokainen soitin nauhoitetaan samanaikaisesti eri suunnista ja mallinetaan tämän jälkeen viidellä eri lähteellä, jotka säteilevät ääntä eri suuntaan. Tällä menetelmällä soittimien suuntaavuus ei ole mallissa enää staattinen, vaan riippuvainen myös soitetusta äänestä.<sup>56</sup> Pätynen et al. ovat myös tehneet kaiuttomia äänitteitä sinfonisesta orkesterimusiikista. Soittimet on äänitetty kaiuttomassa huoneessa eri suunnista 24 mikrofonilla suuntaavuuden tallentamiseksi. Tehdyt kaiuttomat äänitteet ovat vapaasti saatavilla akateemiseen käyttöön.<sup>57</sup>

### 1.3 Historiallisten tilojen mallinnusta koskeva tutkimus

Akustista mallinnusta on alettu käyttää 2000-luvulla myös historiallisten tilojen mallintamiseen. Vuonna 2001 Vassilantonopoulos & Mourjopoulos ovat julkaisseet tutkimuksen, jossa antiikin Kreikan julkisia ja sakraalirakennuksia tutkittiin tietokonemallinnuksella. Mallintamisessa käytettiin kuvälähde- ja säteenseurantamenetelmiä.<sup>58</sup> Vassilantonopoulos et al. ovat myös tutkineet antiikin ajan roomalaisten ja kreikkalaisten teatterien akustiikkaa mallintamalla ja tekemällä auralisointeja.<sup>59</sup> Gade et al.<sup>60</sup> ja Lisa et al.<sup>61</sup> ovat tutkineet antiikin Rooman aikaisen Aspendoksen teatterin akustiikkaa vertailemalla rakennuksessa tehtyjä mittauksia Odeon-ohjelmistolla mallinnettuun tilaan. Tutkimuksissa vertailtiin myös yksinkertaistettua ja hyvin tarkasti mallinnettua geometrista mallia ja todettiin että tarkempi malli on lähempänä mitattua todellista tilaa. Myös Farnetani et al.<sup>62</sup> ja Angelakis et al.<sup>63</sup> ovat mallintaneet antiikin ajan kreikkalaisia ja roomalaisia teattereja. 2010-luvulla on tehty muutamia jatkotutkimuksia, joissa on mallintamisella tarkasteltu joitakin antiikin ajan teatterien ominaisuuksia ja niiden vaikutusta akustiikkaan.<sup>64</sup>

Mallintamalla ja auralisoinneilla on myös tutkittu vanhojen kirkkojen akustiikkaa. Weitze et al. mallinsivat vuonna 2002 Hagia Sofian akustiikkaa. Mallin avulla tehtiin auralisointeja ja sitä verrattiin tilassa tehtyihin mittauksiin tarkkuuden varmistamiseksi.<sup>65</sup> Vuonna 2009 julkaistussa tutkimuksessa Galindo et al. mallinsivat useita espanjalaisia kirkkoja ja vertailivat malleja mitattuihin arvoihin.<sup>66</sup> Howard & Moretti ovat tutkineet renessanssin ajan sakraalirakennusten historiaa ja mallintaneet niiden akustiikkaa.<sup>67</sup> Van Mourik et al. mallinsivat Yorkissa sijaitsevan St. Margaretin kirkon akus-

---

<sup>56</sup> Vigeant et al. 2008.

<sup>57</sup> Pätynen et al. 2008.

<sup>58</sup> Vassilantonopoulos & Mourjopoulos 2001.

<sup>59</sup> Vassilantonopoulos & Mourjopoulos 2003; Vassilantonopoulos & Mourjopoulos 2009.

<sup>60</sup> Gade et al. 2004.

<sup>61</sup> Lisa et al. 2004.

<sup>62</sup> Farnetani et al. 2008.

<sup>63</sup> Angelakis et al. 2011.

<sup>64</sup> Iannace et al. 2011a; Iannace et al. 2011b ; Rindel 2011a; Rindel 2011b.

<sup>65</sup> Weitze et al. 2002.

<sup>66</sup> Galindo et al. 2009.

<sup>67</sup> Howard & Moretti 2009.



tiikkaa hybridimallilla, joka mallinsi alle 250 Hz taajuudet aaltopohjaisella menetelmällä ja tätä suuremmat taajuudet geometrisillä menetelmillä. Mallia vertailtiin mittauksiin ja todettiin että pienillä taajuuksilla mallinnustulokset eivät vastaa mittauksia.<sup>68</sup> Segura et al. ovat mallintaneet vuonna 2014 Santa Maria de la Murtan luostaria, joka on raunioitunut. Tutkimuksessa luostari rekonstruoidiin olemassa olevien maalausten perusteella ja materiaalien ominaisuudet valittiin Odeon-ohjelmassa olevan valmiin materiaalikirjaston avulla. Valmiin mallin avulla tehtiin auralisointeja tilasta jota ei enää ole sellaisenaan olemassa.<sup>69</sup>

Weinzierl on vuonna 2002 julkaissut teoksen, jossa on tutkittu mallintamalla niiden konserttisalien akustiikkaa, joissa Beethoven on kantaesittänyt sinfonioitansa.<sup>70</sup> Dolejší et al. ovat tutkineet 2010-luvulla useiden barokkiteattereiden akustiikkaa. Tutkimuksissa teattereita on mallinnettu ja malleja on validoitu paikan päällä tehdyillä mittauksilla.<sup>71</sup> Llinares et al. ovat mallintaneet vuonna 2012 julkaistussa tutkimuksessa Valencian kaupungissa sijaitsevan silkkipörssin (Lonja de la Seda) akustiikkaa. Akustinen malli on validoitu mittausten avulla.<sup>72</sup> Murillo et al<sup>73</sup> ja Cerdá et al<sup>74</sup> ovat myös tutkineet julkisten rakennusten akustiikkaa mallintamalla ja tekemällä niistä auralisointeja. Molemmissa tutkimuksissa tutkittiin olemassa olevia rakennuksia, joissa tehtyjä mittauksia verrattiin mallinnukseen.

Suomessa historiallisten tilojen akustiikkaa ovat tutkineet Takala & Kylliäinen. Vuonna 2013 julkaistussa tutkimuksessa on esitetty Helsinkiin vuonna 1860 rakennetun Nya Teaternin akustista mallinnusta Odeon-ohjelmistolla. Koska kyseinen rakennus paloi vuonna 1863, on malli tehty yksinomaan alkuperäisten piirustusten pohjalta. Akustista mallia on validoitu vertailemalla mallinnustuloksia aikalaismielipiteisiin teatterin akustikasta.<sup>75</sup> Kuvassa 4 on esitetty Nya Teaternin akustinen malli.

---

<sup>68</sup> van Mourik et al. 2014.

<sup>69</sup> Segura et al. 2014.

<sup>70</sup> Weinzierl 2002.

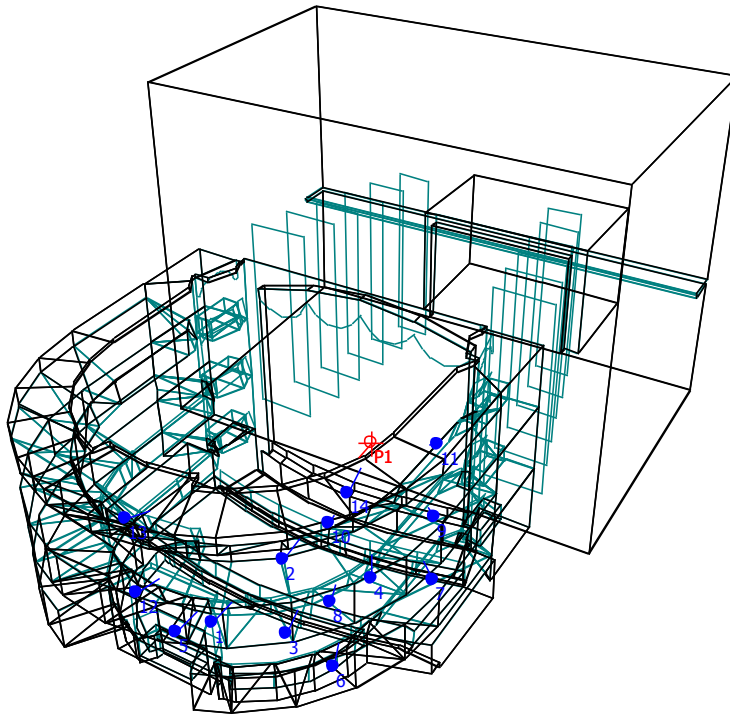
<sup>71</sup> Dolejší et al. 2008; Dolejší et al. 2010; Rychtáriková et al. 2010; Dolejší et al. 2011; Rychtáriková et al. 2012a; Rychtáriková et al. 2012b.

<sup>72</sup> Llinares et al. 2012.

<sup>73</sup> Murillo et al. 2014.

<sup>74</sup> Cerdá et al. 2014.

<sup>75</sup> Kylliäinen & Takala 2013; Takala & Kylliäinen 2013; Takala & Kylliäinen 2014.



**Kuva 4.** Huoneakustinen malli Nya Teaternista (1860–1863).

## 1.4 Diplomityön tavoite

Diplomityössä on tarkoituksena mallintaa Engelin teatterin, Yliopiston juhlasalin, Seurahuoneen ja Palokunnantalon akustiikkaa alkuperäisten rakennuspiirustusten ja historiallisen tiedon avulla. Mallinnuksen perusteella saleista lasketaan objektiivisia akustisia mittalukuja, joiden avulla voidaan analysoida salien akustiikkaa. Saleista luodaan myös auralisointeja, eli kuunneltavia äänitiedostoja orkesterimusiikista, joita kuuntelemalla voidaan subjektiivisesti tutkia salien akustiikkaa.

Tässä tutkimuksessa luodut auralisoinnit esitellään musiikkielämää Helsingissä käsittelevässä näyttelyssä, jonka Helsingin kaupunginmuseo avaa Hakasalmen huvilassa maaliskuussa 2015. Auralisointien tavoitteena on tuottaa mahdollisimman autenttinen vaikutelma salien akustiikasta. Niiden tulee perustua historiallisiin tietoihin saleissa soittaneista orkestereista ja soitetuista kappaleista, joita on tarkasteltu tässä tutkimuksessa.

Auralisoinnit ja objektiiviset mittaluvut on validoitava, jotta niiden luotettavuus voidaan varmistaa. Tavanomaisesti validointi tapahtuisi mittauksin, mutta koska salit ovat kadonneet, se ei ole mahdollista. Mittausten sijaan validointi tehdään keräämällä kirjallisuudesta ja sanomalehdistä aikalaismielipiteitä salien akustiikasta ja vertailemalla niitä salien mallinnuksen tuloksiin.

## 2 HUONEAKUSTIIKAN MALLINTAMINEN

### 2.1 Mallinnuksen perusteet

#### 2.1.1 Huoneakustiset parametrit standardin ISO 3382-1 mukaan

Konserttisalissa kuulijat tiedostavat huoneakustiikan vaikutuksen sointiin vain harvoin ja silloinkin lähinnä konsertin ensimmäisten äänien aikana. Myös näköaistilla tehdyt havainnot sekä aikaisemmat kokemukset ja odotukset salin akustiikasta vaikuttavat siihen kuinka arvioimme sitä.<sup>76</sup> Jotta huoneakustiikkaa voitaisiin tutkia tieteellisesti, tarvitaan objektiivisia, mitattavissa olevia parametrejä, jotka korreloivat subjektiivisten havaintojen kanssa.

Tällaiset huoneakustiset parametrit, niiden mittauskäytännöt ja vaatimukset mittauskalustolle määritetään ISO standardissa 3382-1.<sup>77</sup> Useimmat standardissa esitetyt parametrit määritetään impulssivasteen avulla. Impulssivaste on sananmukaisesti järjestelmän vaste impulssiherätteelle.<sup>78</sup> Impulssiherätteellä tarkoitetaan tässä tapauksessa yksikkönäytettä  $\delta(n)$ , jonka määritetään Huttusen<sup>79</sup> mukaan kaavalla (1):

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & \text{kun } n = 0 \\ 0, & \text{kun } n \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Huoneakustiikassa impulssivasteella tarkoitetaan huoneen jossain pisteessä mitattua äänenpaineen muutosta ajan suhteen johtuen toisessa pisteessä toistetusta impulssiherätteestä. Impulssivaste on aina yksilöllinen jokaiselle lähetys- ja vastaanottopisteparille. Standardi määrittelee myös vaimennuskäyrän, joka on graafinen esitys äänenpainetasosta ajan funktiona. Vaimennuskäyrät ja esitetyt parametrit määritellään erikseen oktaavikaistoittain 125 Hz ja 4000 Hz välisellä taajuusalueella.

#### Jälkikaiunta-aika ( $T_{30}$ )

Jälkikaiunta-aika määritetään ISO 3382-1 standardin mukaan aikana, jolloin pisteessä mitattu äänenpainetaso laskee 60 dB. Tilan jälkikaiunta-aika on keskiarvo eri mittauspisteissä mitatuista arvoista. Jälkikaiunta-aika voidaan arvioida myös pienemmällä äänenpaineen laskulla ja tulos voidaan ekstrapoloida 60 desibeliin. Jos jälkikaiunta-aika

<sup>76</sup> Baumann 2011, s.66–68.

<sup>77</sup> EN-ISO 3382-1, 2009.

<sup>78</sup> Huttunen 2014, s. 20.

<sup>79</sup> Huttunen 2014, s. 12.

johdetaan ajasta, joka alkaa vaimennuskäyrään pudottua 5 dB alkutasosta ja loppuu äänenpainetasoon pudottua 25 dB, siitä käytetään merkitään  $T_{20}$ . Samalla tavalla 5 ja 35 dB väliltä johdetusta jälkikaiunta-ajasta käytetään merkintää  $T_{30}$ .

Baumannin mukaan jälkikaiunta-aika kuvaa aistittua kaiuntaisuutta musiikin lakattua äkillisesti.<sup>80</sup> Beranekin mukaan parhaiksi luokitelluissa konserttisaleissa 500 Hz ja 1000 Hz oktaavikaistoilla yleisön kanssa mitattujen jälkikaiunta-aikojen keskiarvo on 2,0 s.<sup>81</sup> Hidaka & Beranekin mukaan parhaiksi luokitelluissa oopperataloissa yleisön kanssa mitattu jälkikaiunta-aika vaihtelee 1,2–1,6 välillä.<sup>82</sup>

### Varhainen jälkikaiunta-aika (*EDT*)

Varhainen jälkikaiunta-aika määritetään samalla tavalla kuin jälkikaiunta-aika, mutta se ekstrapoloidaan vaimennuskäyrästä ensimmäisen 0 dB ja 10 dB väliltä. Näiden arvojen välinen aika kerrotaan kuudella varhaisen jälkikaiunta-ajan laskemiseksi. Baumannin mukaan varhainen jälkikaiunta-aika mitataan usein lyhyemmäksi kuin varsinainen jälkikaiunta-aika, koska äänikenttä ei ole ehtinyt hajautumaan tasaisesti koko tilaan. Parametri kuvaa paremmin jatkuvan musiikin aistittua kaiuntaisuutta.<sup>83</sup>

### Selvyys ( $C_{80}$ )

Standardi määrittää selvyyden  $C_{80}$  ensimmäisen 80 ms aikana suoran äänen jälkeen saapuvan äänienergian ja tämän hetken jälkeen saapuvan äänienergian suhteena kaavan (2) mukaisesti.

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (2)$$

Kaavassa  $p(t)$  tarkoittaa vastaanottopisteessä mitatun impulssivasteen äänenpainetasoa hetkellä  $t$ .

Selvyys määrittää kuinka hyvin kuulija pystyy erottamaan äänet toisistaan musiikkiesityksen aikana.<sup>84</sup> Saleille ilmoitetut selvyydet ovat yleensä keskiarvoja 500, 1000 ja 2000 Hz oktaavikaistoilta mitatuista arvoista. Salille tavoiteltava selvyys voi vaihdella tilanteen mukaan. Harjoitusten aikana kapellimestarit pitävät saleista joiden selvyys on 1 ja 5 dB välillä. Konsertin aikana sama henkilö saattaa kuitenkin pitää enemmän tilasta

<sup>80</sup> Baumann 2011, s. 102.

<sup>81</sup> Beranek 2003.

<sup>82</sup> Hidaka & Beranek 2000.

<sup>83</sup> Baumann 2011, s. 102.

<sup>84</sup> Beranek 2002, s.24.

jonka selvyys on -1 ja -4 dB välillä.<sup>85</sup> Barronin mukaan selvyys-parametrin optimaalinen alue on -2 ja 2 dB välillä.<sup>86</sup>

### Voimakkuus ( $G$ )

Voimakkuus voidaan standardin mukaan määrittää ympärisäteilevästä lähteestä tilassa mitatun impulssivasteen äänienergian ja saman lähteen vapaakentässä 10 metrin päähän säteilevän äänienergian suhteena kaavan (3) mukaan.

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \text{ dB} \quad (3)$$

Kaavassa  $p(t)$  tarkoittaa tarkasteltavassa pisteessä mitatun impulssivasteen äänenpainetasoa hetkellä  $t$ .  $p_{10}(t)$  tarkoittaa samasta lähteestä 10 metrin etäisyydellä vapaakentässä mitatun impulssivasteen äänenpainetasoa hetkellä  $t$ . Voimakkuus tarkoittaa siis kuinka paljon voimakkaammin ääni kuuluu suhteessa tilanteeseen, jossa lähde sijaitsee vapaakentässä 10 m päässä kuulijasta.

Beranekin mukaan voimakkuuteen vaikuttaa kuulijan etäisyys äänilähteestä, saapuvien heijastusten määrä, salin tilavuus ja absorboivat materiaalit. Voimakkuus mitataan yleensä tyhjille saleille. Parhaaksi luokitelluissa konserttisaleissa voimakkuus on 3 ja 7 dB välillä.<sup>87</sup> Barron antaa voimakkuudelle minimitasoksi 0 dB 500–2000 Hz taajuusalueella.<sup>88</sup>

### Sivuttaisenergiasuhte<sup>89</sup> ( $LF_{80}$ )

Sivuttaisenergiasuhteen mittauksessa käytetään mikrofonia, jonka suuntauskuvio on kahdeksikko. Mikrofonin suuntaavuuden nollakohta asetetaan lähdeä kohti siten, että suuntaavuuden maksimit ovat vaakatasossa. Näin mikrofoni poimii ensisijaisesti molemmilta sivuilta tulevaa äänienergiaa. Sivuttaisenergian suhde lasketaan kaavalla (4).

$$LF_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (4)$$

Kaavassa  $p(t)$  tarkoittaa tarkasteltavassa pisteessä suuntaamattomalla mikrofonilla mitatun impulssivasteen äänenpainetasoa hetkellä  $t$ .  $p_L(t)$  tarkoittaa samasta pisteestä kahdeksikkomikrofonilla mitatun impulssivasteen äänenpainetasoa hetkellä  $t$ . Standardissa

<sup>85</sup> Beranek 2002, s. 526–527.

<sup>86</sup> Barron 2010, s. 67.

<sup>87</sup> Beranek 2003.

<sup>88</sup> Barron 2010, s. 69.

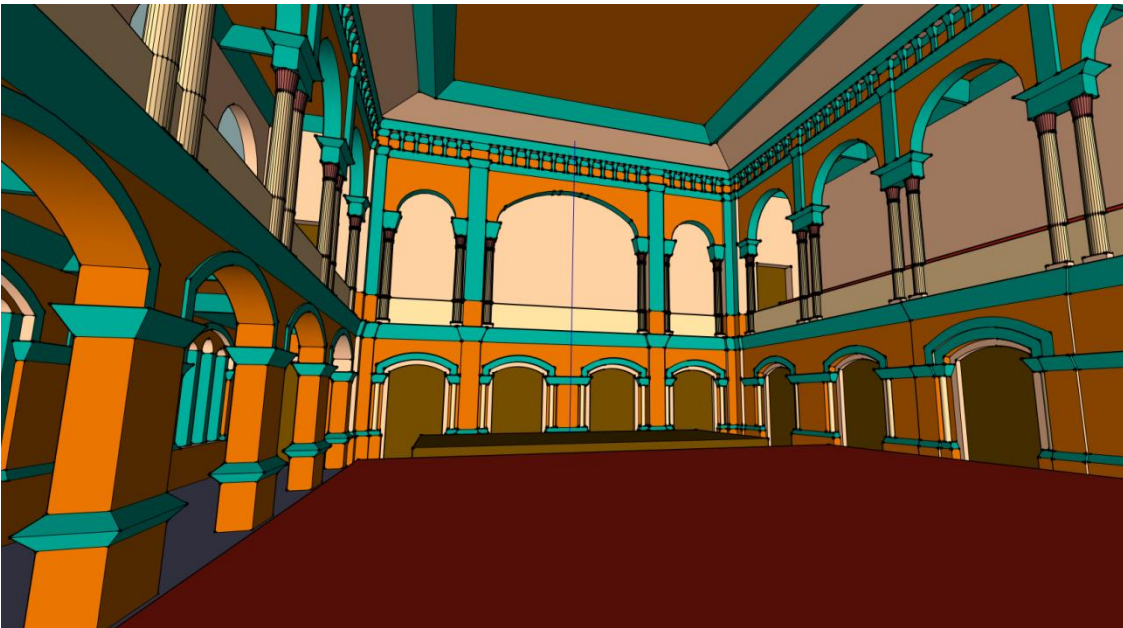
<sup>89</sup> Mittaluvulle ei ole vakiintunutta suomenkielistä nimeä.

sivuttaisenergian suhteesta käytetään merkintää  $J_{LF}$ , mutta tässä diplomityössä käytetään kyseisestä suureesta merkintää  $LF_{80}$ .

Sivuttaisenerbiasuhde korreloi Beranekin mukaan hyvin äänilähteen aistitun leveyden kanssa. Parhaiten luokitelluissa konserttisaleissa sivuttaisenerbiasuhde on 0,16 ja 0,24 välillä.<sup>90</sup> Barron suosittelee sivuttaisenerbiasuhteelle arvoja 0,10 ja 0,35 välillä.<sup>91</sup>

### 2.1.2 Tilamalli

Tilamallilla tarkoitetaan suljetusta tilasta muodostettua mallia, joka sisältää ainoastaan tiedot tilan pintojen geometriasta kolmiulotteisessa tilassa. Tutkimuksessa käytetyt tilamallit luotiin Sketchup 2013 -ilmaisohjelmalla. Kuvassa 5 on esitetty Sketchup-ohjelmalla luotu tilamalli. Tutkimuskirjallisuudessa tilamallin riittävää tarkkuutta on tutkittu tekemällä malleja eri tarkkuudella ja vertailtu simuloituja huoneakustisia parametreja oikeissa tiloissa mitattuihin parametreihin. Tutkimuksissa todettiin, että geometrian kaikkien yksityiskohtien tarkka mallintaminen ei merkittävästi paranna akustisten parametrien laskennan tarkkuutta.<sup>92</sup> Odeon-ohjelmiston käyttäjäoppaassa todetaan, että geometrian tarkka mallintaminen ei paranna tuloksia, mutta kasvattaa laskenta-aikaa.<sup>93</sup>



**Kuva 5.** Sketchup 2013-ohjelmalla luotu tilamalli Palokunnantalon juhlasalista. Eri väriset pinnat kuvaavat erilaisia pintamateriaaleja.

Oppaassa ei suositella mallintamaan erikseen pintoja, joiden sivumitta on pienempi kuin 0,3 m. Yleisön alue kehoitetaan mallintamaan yhtenäisenä laatikkona, jonka korkeus

<sup>90</sup> Beranek 2002, s. 519–520.

<sup>91</sup> Barron 2010, s. 68.

<sup>92</sup> Gade et al. 2004; Bork 2005b; Zeng et al; 2006, Murillo et al. 2014.

<sup>93</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 40–41.

salin lattiasta on 0,8 m. Tilamallin luomisessa mallinnetaan ainoastaan mallinnettavan tilan sisäpinnat. Mallista tehdään myös ilmatiivis eli tilan tulee olla täysin suljettu.<sup>94</sup>

### 2.1.3 Huoneakustinen mallinnus

#### Pintojen absorptio- ja sirontakertoimet

Kun geometrinen tilamalli on luotu, se tuodaan Odeon Auditorium 12 -ohjelmistoon Sketchupiin tätä tarkoitusta varten tehdyllä liitännäisellä. Mallin jokaiselle pinnalle määritetään absorptiokertoimet  $\alpha$ . Absorptiokertoimet kuvaavat sitä kuinka suuri osa äänienergiasta heijastuu pois pinnasta. Jos kerroin on 0, pinta on kokonaan heijastava ja jos se on 1, pinta absorboi kaiken siihen kohdistuvan äänienergian. Koska laskenta tapahtuu erikseen oktaavikaistoittain 63–8000 Hz taajuusalueella, tulee jokaista pintaa kohden 8 eri absorptiokerrointa. Odeonissa on valmis materiaalikirjasto, joka sisältää erilaisten materiaalien absorptiokertoimia. Absorptiokertoimen lisäksi käyttäjä määrittää jokaiselle pinnalle pinnan karheudesta riippuvan sirontakertoimen. Sirontakertoimen merkitys mallintamisessa kuvataan tarkemmin myöhempien heijastusten laskentaa käsittelevässä osassa. Kuvassa 6 on esitetty Odeoniin tuotu luotu huoneakustinen malli.

#### Lähteet ja vastaanottopisteet

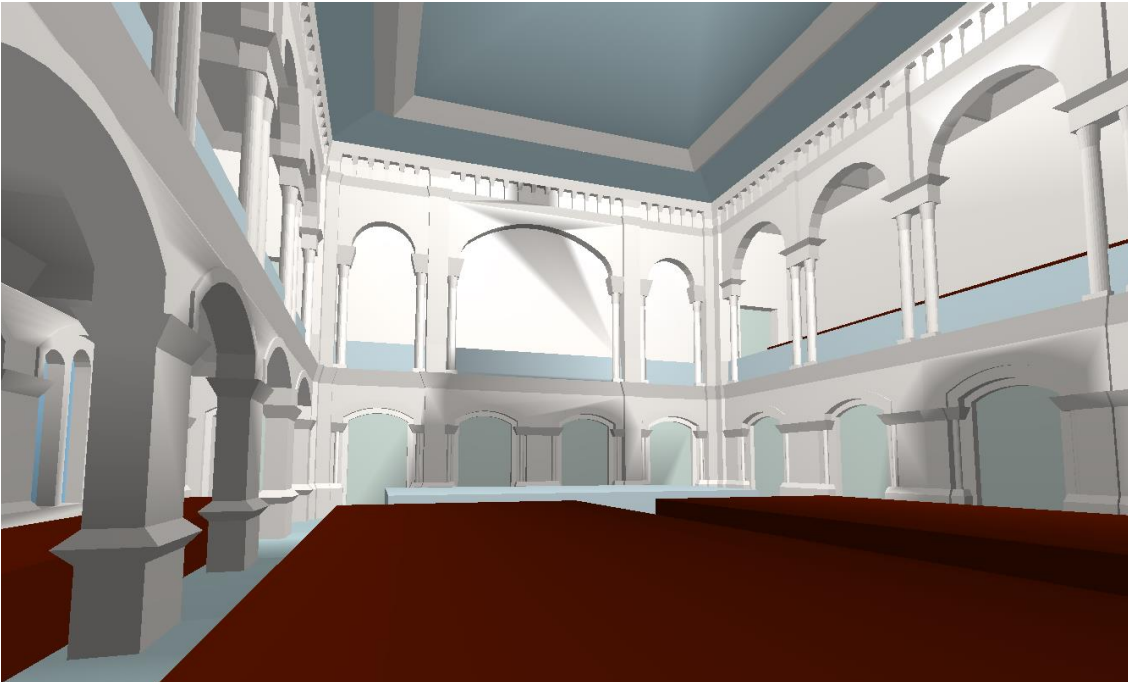
Malliin tulee määrittää ääntä tuottavat lähdepisteet ja vastaanottavat kuuntelupisteet. Lähdepisteelle valitaan sijainti, määritetään orientaatio, suuntaavuus ja ääniteho. Lähteen suuntaavuudella tarkoitetaan sitä, kuinka suurella intensiteetillä se säteilee ääntä eri suuntiin suhteessa sen orientaatioon, eli mihin suuntaan lähde osoittaa. Suuntaavuustiedot voi luoda itse ohjelman omalla muokkaustyökalulla, tai tuoda ulkopuolisia suuntaavuustiedostoja. Suuntaavuus määritetään Odeonissa erikseen jokaiselle oktaavikaistalle. Huoneakustisten parametrien mallinnuksessa käytetään standardin ISO 3382-1 mukaan suuntaamatonta lähdetä, joka on asetettu 1,5 m lattian yläpuolelle sellaiseen pisteeseen, jossa esiintyjä salissa tyypillisesti sijaitsee.<sup>95</sup>

Vastaanottopisteet määritetään saliin yleisön alueelle. Geometrisessä mallissa yleisön alue suositellaan mallintamaan 0,8 m korkeana yhtenäisenä laatikkona. Vastaanottopisteet sijoitetaan Odeonin käyttäjäoppaan suosituksen mukaisesti 0,4 m näiden geometrisien pintojen yläpuolelle, jolloin ne sijaitsevat mallissa 1,2 m lattian yläpuolella.<sup>96</sup> Vastaanottopisteille ei määritetä vakioitua orientaatiota, vaan ne asetetaan laskentavaiheessa suuntaamaan kohti jotain tiettyä lähdetä.

<sup>94</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 40–41.

<sup>95</sup> EN-ISO 3382-1, 2009.

<sup>96</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 41.



**Kuva 6.** *Odeon Auditorium 12 -ohjelmaan tuotu huoneakustinen malli Palokunnantalon juhlasalista. Mallissa tummemmat pinnat esittävät ääntä absorboivia materiaaleja ja vaaleammat pinnat heijastavia materiaaleja.*

### **Aikaiset heijastukset / Kuvälähdemenetelmä**

Odeon käyttää hybridimenetelmää, joka laskee aikaiset ja myöhäiset heijastukset geometrisillä mallinnusmenetelmillä.<sup>97</sup> Aikaiset heijastukset lasketaan kuvälähdemenetelmällä, joka luo huoneen jokaista pintaa kohden virtuaalisen kuvälähteen. Kuvälähde muodostetaan peilaamalla alkuperäinen lähde heijastustason suhteen. Korkeamman kertaluvun heijastuksia luodaan taas peilaamalla luotu kuvälähde uuden heijastuspinnan suhteen.<sup>98</sup> Mallissa olevien pintojen määrän kasvaessa kuvälähteiden määrä kasvaa lineaarisesti, kun taas heijastuksen kertaluvun kasvaessa lähteiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti. Odeonissa voidaan siirtymäluvulla (Transition order, TO) säätää kuinka monta heijastusta lasketaan kuvälähdemenetelmällä. Jos  $TO = 0$ , koko mallinnus tapahtuu säteenseurantamenetelmällä. Tässä tutkimuksessa on säädetty siirtymäluvuksi  $TO = 2$  Odeonin käyttäjäoppaan suosituksen mukaisesti, jolloin ensimmäiset kaksi heijastusta mallinnetaan kuvälähdemenetelmällä ja loput säteenseurantamenetelmällä.<sup>99</sup>

Jos kuvälähteet laskettaisiin kaikille mahdollisille pintojen yhdistelmille, niiden määrä kasvaisi epäkäytännöllisen suureksi. Laskenta-ajan lyhentämiseksi ohjelma lähettää lähdepisteestä säteitä myöhemmin kuvatulla säteenseurantamenetelmällä, jotka heijastuvat huoneen pinnoista peilimäisesti. Kuvälähteet muodostetaan vain sellaisille pinnoille ja pintojen yhdistelmille, joiden kautta säteet heijastuvat. Aikaisten säteiden määrää voidaan säätää laskenta-asetuksista (Number of early rays). Odeon suosittelee sopivaa

<sup>97</sup> Vorländer 2008, s. 218–219.

<sup>98</sup> Vorländer 2008, s. 199–201.

<sup>99</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 93.



säteiden määrää riippuen tilamallissa olevien pintojen lukumäärästä.<sup>100</sup> Tässä tutkimuksessa on käytetty ohjelman suosittamaa aikaisten säteiden määrää.

Diffuusit heijastukset vaikuttavat tilassa kuullun musiikin laatuun, joten ne tulee ottaa huomioon huoneakustisessa mallissa.<sup>101</sup> Klassinen kuvalähdemenetelmä mallintaa ainoastaan peilimäisiä heijastuksia, joten diffuusit aikaiset heijastukset on mallinnettava erikseen.<sup>102</sup> Joka kerta kun Odeon havaitsee uuden kuvalähteen, kuvalähdettä peilaavalle pinnalle simuloidaan pintamainen lähde, joka lähettää tilaan pinnoista sironneita äänisäteitä. Kuvalähteiden ja sironneiden säteiden energia määräytyy pinnalle määrätyn sirontakerroimen  $s$  perusteella. Mitä suurempi sirontakerroin on, sitä suurempi osa äänienergiasta mallinnetaan sironneilla säteillä. Aikaisten sironneiden säteiden määrä pintaa kohden (Number of early scatter rays) voidaan määrittää laskenta-asetuksissa.<sup>103</sup> Tutkimuksessa on käytetty ohjelman suosittamaa määrää.

### **Myöhäiset heijastukset / säteenseurantamenetelmä**

Säteenseurantamenetelmässä äänilähde lähettää säteitä eri suuntiin tilassa yhtäaikaisesti. Jokainen säde kantaa tietyn määrän energiaa ja aina kun säde osuu pintaan, se heijastuu peilimäisesti eteenpäin. Säteen energiaa pienennetään kuljetun etäisyyden, huoneessa olevien pintojen sekä ilman absorption mukaan. Vastaanottajapisteelle kirjataan ylös säteiden tulosuunta, saapumisaika ja säteen kantama äänienergia. Tätä esitystapaa kutsutaan histogrammiksi ja yhdistämällä se kuvalähdemenetelmän mallintamiin aikaisiin heijastuksiin siitä muodostetaan vastaanottopisteen impulssivaste.<sup>104</sup>

Odeon käyttää säteenseurantamenetelmää myöhäisten heijastusten laskemiseen. Laskenta-asetuksissa määritetään myöhäisten säteiden määrä (Number of late rays), joita seurataan kunnes joko impulssivasteen pituus (Impulse response length) tai heijastusten enimmäismäärä (Max. reflection order) ylittyy. Kun säteen heijastusten määrä ylittää määritetyn siirtymäluvun  $TO = 2$ , ohjelma luo jokaiseen heijastuspisteeseen uuden toissijaisen lähteen. Tämä prosessi toistetaan jokaiselle säteelle. Vastaanottopisteen impulssivastetta laskettaessa, toissijaisten lähteiden näkyvyys vastaanottopisteeseen tarkistetaan. Niistä toissijaisista lähteistä, jotka ovat näkyviä vastaanottopisteestä, muodostetaan suora säde vastaanottopisteeseen ja se lasketaan mukaan histogrammiin. Menetelmän ansiosta heijastusten määrä ei kasva eksponentiaalisesti, vaan vastaanottopisteen heijastustiheys ajan suhteen muodostuu vakioksi.<sup>105</sup>

<sup>100</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 74.

<sup>101</sup> Baumann 2011, s. 119.

<sup>102</sup> Vorländer 2008, s. 206.

<sup>103</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 75.

<sup>104</sup> Vorländer 2008, s. 181–186.

<sup>105</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 75–76.

Geometrisissa mallinnusmenetelmissä, kuten säteenseurannassa, heijastukset ovat oletusarvoisesti peilimäisiä.<sup>106</sup> Odeonissa käytetään sironnan ja äänen taipumisen mallintamiseen Christensenin ja Rindelin vuonna 2005 esittelemää vektoripohjaista sirontamenetelmää.<sup>107</sup> Kun lähteestä seurattu säde osuu johonkin huoneen pintaan, heijastunut säde jaetaan kahteen vektoriin, joista toinen kuvaa peilimäisesti heijastunutta energiaa ja toinen sironnutta energiaa. Vektoreiden suuruus lasketaan heijastuspinnan sirontakerroimen  $s_r$  mukaan siten, että peilimäinen heijastusvektori kerrotaan kertoimella  $(1 - s_r)$  ja sironnut heijastusvektori kerrotaan kertoimella  $s_r$ . Heijastunut vektori on näiden kahden osavektorin summa.

Sironneen vektorin suunta valitaan satunnaisesti Lambertin kosinijakauman perusteella. Lambertin kosinijakauma on optiikasta tuttu käsite, jonka mukaan pinnasta heijastuneen sironneen valon intensiteetti on verrannollinen pinnan normaalin ja havaitsijan katselusuunnan väliseen kulmaan  $\theta$ . Alkuperäisen lähteen lisäksi heijastuspisteisiin luodaan toissijaisia lähteitä, joista piirretään suora säde vastaanottopisteeseen. Näiden säteiden intensiteetti määräytyy vinon Lambert-jakauman (Oblique Lambert) perusteella jos pinnan sirontakerroin on alle 0,5. Tällöin Lambert-jakaumaa käännetään siten, että suurin intensiteetti on heijastuspisteestä peilimäisesti pois heijastuneen säteen suuntainen.<sup>108</sup>

Koska äänen taipuminen riippuu pinnan epätasaisuuden lisäksi myös aallonpituudesta, sekä lähteen ja vastaanottajan etäisyydestä pintaan, Odeon määrittää sirontakerroimen erikseen jokaiselle heijastukselle. Sironneen energian laskennassa käytetty sirontakerroin  $s_r$  lasketaan pinnan karheuden sirontakerroimesta  $s_s$  ja äänen taipumiseen liittyvästä sirontakerroimesta  $s_d$  kaavan (5) mukaan.

$$s_r = 1 - (1 - s_d) \cdot (1 - s_s) \quad (5)$$

Ohjelmassa käyttäjä määrittää eri pinnoille pinnan karheuden sirontakerroimen  $s_s$  määrättyllä keskitaajuudella. Tämä taajuus on oletuksena 707 Hz, eikä sitä ole tässä tutkimuksessa muutettu. Tämän jälkeen ohjelma ekstrapoloi sirontakerroimet eri taajuuskais-toille. Nämä sirontakerroimet ovat ominaisia jokaiselle pinnalle koko laskentaprosessin ajan. Taipumiseen liittyvä sirontakerroin  $s_d$  taas lasketaan erikseen jokaista heijastusta kohden. Kerroin lasketaan pinnan dimensioista, saapuvan säteen kulkemasta matkasta ja heijastuspisteen etäisyydestä pinnan reunoista. Tarkat laskentakaavat on esitetty lähteessä<sup>109</sup> ja Odeonin käyttäjäoppaassa.<sup>110</sup> Jos pintoja on yksinkertaistettu mallinnuksessa, käyttäjän määrittämää sirontakerrointa  $s_s$  voidaan suurentaa Odeonin käyttäjäoppaassa esitetyllä tavalla siten, että pinnasta ulkonevien rakenteiden syvyyden perusteella.<sup>111</sup>

<sup>106</sup> Välimäki et al. 2012.

<sup>107</sup> Christensen & Rindel 2005.

<sup>108</sup> Christensen & Rindel 2005.

<sup>109</sup> Christensen & Rindel 2005.

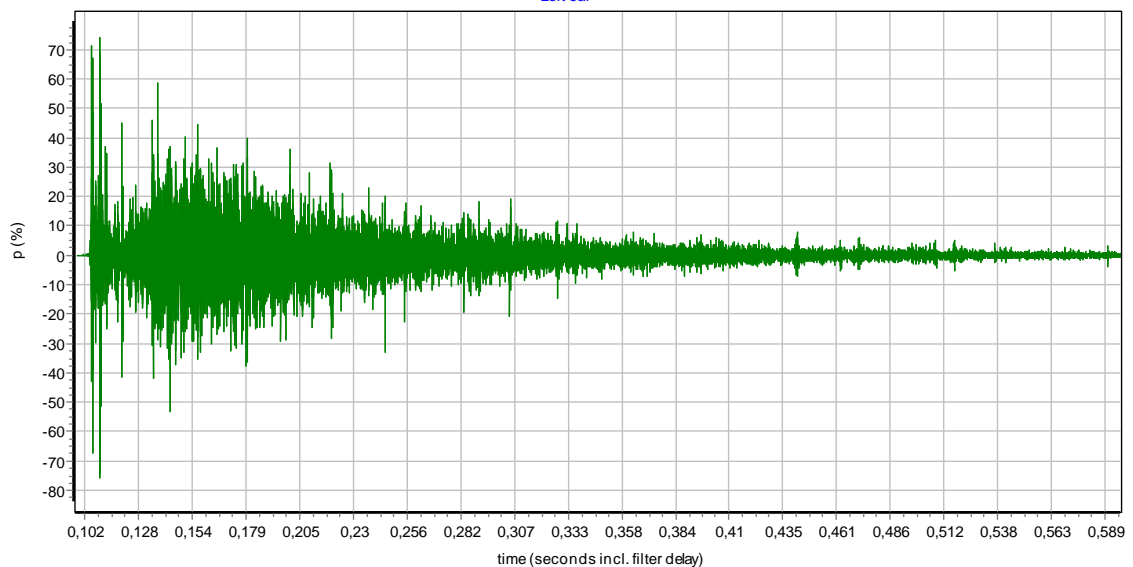
<sup>110</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 79–80.

<sup>111</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 78.

Erikoistapauksissa ohjelman laskema pintojen aiheuttama sironta voi olla merkittävästi suurempi kuin todellisuudessa. Näin tapahtuu esimerkiksi kaarevissa pinnoissa, joissa yksittäinen pinta on kuvattu usealla pienemmällä osapinnalla. Tällöin taipumiseen liittyvään sirontakertoimen  $s_d$  laskemiseen käytetään osapintojen mittoja, jolloin ohjelma laskee sen liian pieneksi.<sup>112</sup> Tämä vaikuttaa erityisesti koveriin pintoihin, jotka keskittävät ääntä. Koverille osapinnoille tulee Odeonissa asettaa tyypiksi ”Fractional”, jolloin kerroin  $s_d$  lasketaan kyseiselle pinnalle käyttämällä koko tilan sivumittoja pinnan sivumittojen sijasta.<sup>113</sup>

### Impulssivasteen muodostaminen

Kuvalähdemenetelmän ja säteenseurantamenetelmän avulla vastaanottopisteeseen saapuneet simuloidut heijastukset kootaan histogrammiin ja niistä muodostetaan kuvassa 7 esitetty impulssivaste. Kuvalähdemenetelmä tuottaa suoraan painesignaalin, mutta säteenseurantamenetelmässä lasketaan energiasignaaleita. Energiasignaalit voidaan muuntaa painesignaaleiksi, mutta tällöin menetetään tietoa signaalin vaiheesta.



**Kuva 7.** *Odeonissa laskettu impulssivaste*

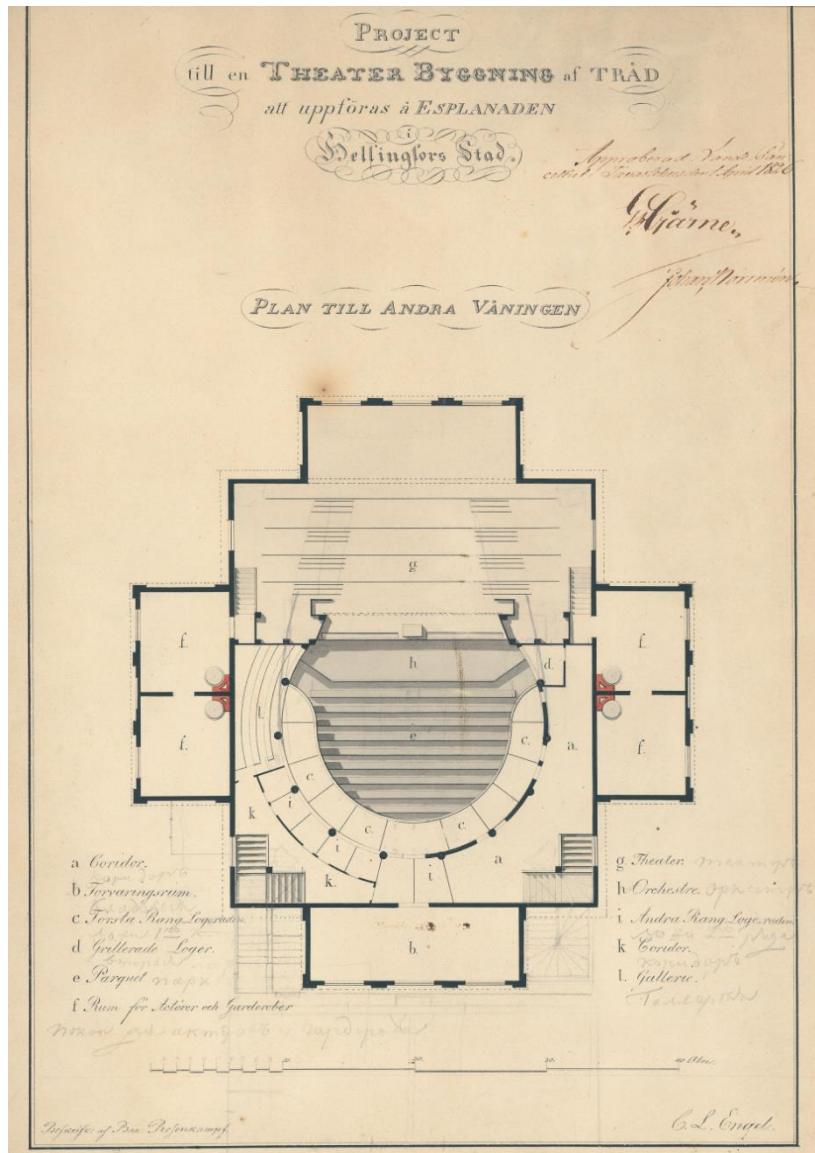
<sup>112</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 80.

<sup>113</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 41.

## 2.2 Salien rakennushistoria

### 2.2.1 Engelin teatteri (1827–1861)

Vuonna 1825 Helsinkiin perustettiin osakeyhtiö, jonka tarkoituksena oli pystyttää pääkaupunkiseudulle puinen teatteritalo. Teatteri valmistui Esplanadin itäpuolelle vuonna 1827. Teatterin suunnittelijana toimi arkkitehti Carl Ludwig Engel (1778–1840).<sup>114</sup> Kuvassa 8 esitetty teatterirakennus oli pohjaltaan suorakulmio jota reunustivat ulkonevat siivet. Päärakennusmassa oli noin 10 metriä korkea ja ulkonevat siivet noin 7 m.<sup>115</sup> Teatterissa oli aluksi noin 400 paikkaa ja Wasastjernan mukaan joitakin kymmeniä seisomapaikkoja.<sup>116</sup>



**Kuva 8.** Pohjapiirros Engelin teatterin 2. kerroksesta, kuvalähde AMA.

<sup>114</sup> Wasastjerna 1941, s. 9–10; Ramsay 1904–1907, s. 21.

<sup>115</sup> Wasastjerna 1941, s. 10–11.

<sup>116</sup> Engelin kirje Herrlichille 16.6.1826, teoksessa: Sundman 1989, s. 210; Wasastjerna 1941, s. 9–10.

Teatteriin ennen 1840-lukua tehdyt korjaukset olivat merkitykseltään pieniä. Vuonna 1847 teatterin permannolle lisättiin yksi rivi tuoleja ja teatterisalin ensimmäiselle parvelle rakennettiin kaksi loosia lisää. Eri lähteistä selvitettyt paikkamäärät ovat ristiriitaisia. Vuodelta 1847 päivätyssä teatterin paikkakartassa nähdään permannolla 136 paikkaa ja molemmilla parvilla yhteensä 187 paikkaa. Paikkakartassa on näkyvillä siis yhteensä 323 paikkaa.<sup>117</sup> Tähän lukuun ei kuulu permannon looseja tai seisomapaikkoja. Vuonna 1849 aikana teatteriin tehtiin suurempi remontti. Wasastjerna kirjoittaa, että vuonna 1850 pidetyssä yhtiökokouksessa ilmoitettiin että teatterin paikkojen määrä oli kyseisessä remontissa kasvanut 435 paikasta 610 paikkaan.<sup>118</sup> Hirnin mukaan istumapaikkojen määrä oli remontin jälkeen kasvanut 433 paikasta 611 paikkaan.<sup>119</sup>

Kun Helsinkiin valmistui uusi kivistä rakennettu teatteri vuonna 1860, vanha rappeutunut puuteatteri haluttiin purkaa. Helmikuussa 1861 vanha teatteri huutokaupattiin ja sen purkaminen alkoi heti seuraavan kuun puolelsvälissä. Teatteri rakennettiin uudelleen nykyisen Mannerheimintien varteen Arkadian huvila-alueelle. Se vihittiin käyttöön vuoden 1861 joulukuussa Arkadia-teatterin nimellä.<sup>120</sup>

## 2.2.2 Yliopiston juhlasali (1832–1944)

Helsingin yliopiston päärakennus valmistui nykyisen Senaatintorin viereen vuonna 1832. Rakennuksen oli suunnitellut Carl Ludwig Engel.<sup>121</sup> Hän oli tehnyt kaksi ehdotusta juhlasalin pohjamuodosta. Toinen oli suorakaiteen muotoinen ja toinen puoliympyrä. Puoliympyrää pidettiin tarkoituksenmukaisempana ja se valittiin juhlasalin muodoksi. Toinen salin parvista oli tarkoitettu kuorolle ja muusikoille.<sup>122</sup> Kuvassa 9 esitettyyn saliin mahtui yleisöä noin 800 henkeä, mutta salin nurkkaan rakennettiin kuitenkin myöhemmin esiintymislava, jonka vuoksi yleisömäärä saattoi olla konsertissa käytännössä noin 700 henkeä.<sup>123</sup>

Vuonna 1928 esitettiin suunnitelmia juhlasalin laajentamiseksi siten, että salin suoraa seinää siirrettäisiin 12 metriä ulospäin.<sup>124</sup> Arkkitehti J.S. Sirén esitti päärakennuksesta laajennusehdotuksen vuonna 1931. Ehdotuksessa salin suoraa seinää oli siirretty ulospäin ja seinän eteen salin keskelle oli suunniteltu orkesterilava.<sup>125</sup> Yliopiston päärakennusta kunnostettiin Sirénin suunnitelmien mukaan vuosina 1938–1940, mutta juhlasalia ei suunnitelmista huolimatta laajennettu. Salin lattia kuitenkin muutettiin betonirakenteiseksi. Vuonna 1944 juhlasali tuhoutui jatkosodan ilmapommituksissa. Päärakennus

<sup>117</sup> Engelin teatterin paikkakartta, 1847, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>118</sup> Wasastjerna 1941, s. 20–22.

<sup>119</sup> Hirn 1949, s. 120–121.

<sup>120</sup> Wasastjerna 1941, s. 30–32.

<sup>121</sup> Lappalainen 1994, s. 16.

<sup>122</sup> Pöykkö 1972, s. 37–38 & 44–45; Niskanen 2008, s. 25.

<sup>123</sup> Lappalainen 1994, s. 18.

<sup>124</sup> Lappalainen 1994, s. 195.

<sup>125</sup> Klinge 1990, s. 599.

rakennettiin uudelleen vuosina 1944–1948, jolloin juhlasalia laajennettiin Sirénin piirustusten mukaan siirtämällä salin suoraa takaseinää 10 metriä ulospäin. Samalla salin parvien puiset välipohjat uusittiin betonirakenteisiksi.<sup>126</sup> Uudistustyössä salin kattoon tehtiin heijastavia ja absorboivia pintoja näkyvän katon yläpuolelle.<sup>127</sup> Juhlasalin akustiikkaa on muutettu 1990-luvulla vaimentamalla salin katto- ja seinäpintoja päärakennuksen peruskorjauksen yhteydessä.<sup>128</sup>



**Kuva 9.** Valokuva yliopiston juhlasalista vuodelta 1921, kuvalähde: HKM.

### 2.2.3 Seurahuone (1833–1862 & 1863–1887)

Carl Ludwig Engelin suunnittelema Helsingin Seurahuone, eli nykyinen Helsingin kaupungintalo, valmistui vuonna 1833 nykyisen Pohjoisesplanadin varteen.<sup>129</sup> Seurahuoneen juhlasali sijaitsi toisessa kerroksessa. Tila oli kahden kerroksen korkuinen kenkälaatikon muotoinen sali, joka sijaitsi eteläisestä julkisivusta katsottuna rakennuksen vasemmalla puolella. Kuvassa 10 esitetyllä salin lyhyellä seinällä oli toisessa päädyssä parvi, joka oli tarkoitettu tanssiorkesterille. Konserteissa orkesteri soitti salin eteen sijoitetulla irtolavalla.<sup>130</sup> Konserteissa tilaan saattoi mahtua jopa 800 henkeä.<sup>131</sup>

<sup>126</sup> Lappalainen 1994, s. 196; Helsingin yliopiston päärakennus, 1991; Niskanen 2008, s. 26.

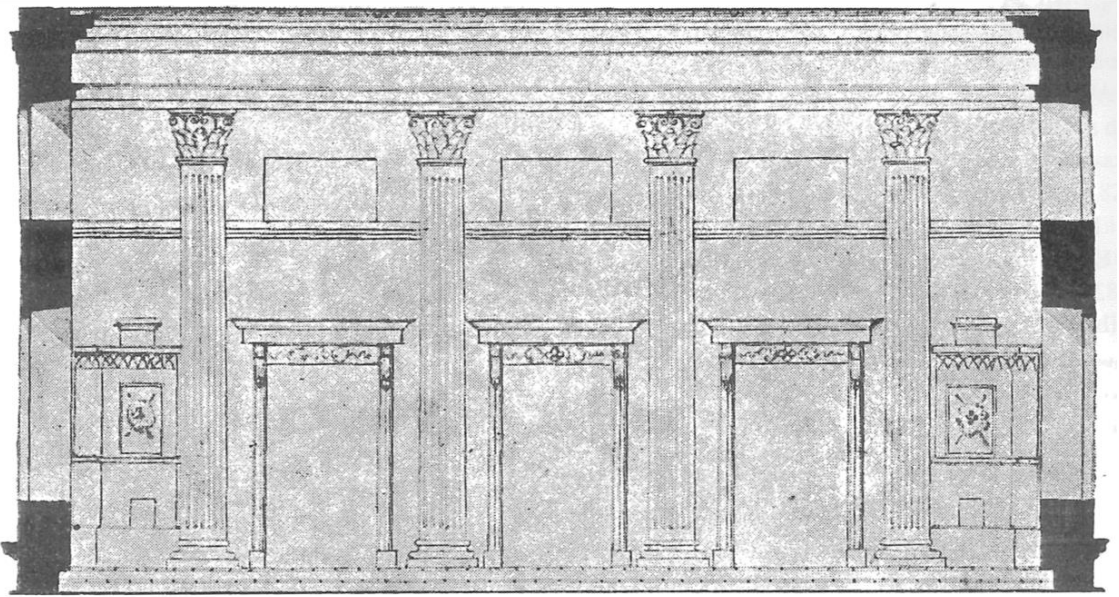
<sup>127</sup> Arni 1949, s. 133; Siren 1950.

<sup>128</sup> Helsingin yliopiston päärakennus, 1991.

<sup>129</sup> Wasastjerna 1941, s. 38; Ringbom 1988, s. 150.

<sup>130</sup> Niskanen 2008, s. 48–50.

<sup>131</sup> Wasastjerna 1941, s. 52.



**Kuva 10.** Seurahuoneen 1. vaiheen juhlasalin päätyseinän projektio, kuvälähde: Ringbom 1988.

Seurahuoneeseen tehtiin laajamittainen remontti vuosina 1861–1863. Juhlasali pysyi koskemattomana vuoden 1862 huhtikuuhun asti, jolloin se jaettiin välipohjalla kahteen kerrokseen ja muutettiin hotellihuoneiksi.<sup>132</sup> Remontoitu Seurahuone avattiin yleisölle lokakuussa, mutta rakennuksesta puuttui kokonaan juhlasali. Rakennuksen sisäpihalle rakennettiin tästä johtuen täysin uusi sali, joka oli edellistä hieman pienempi. Toinen sali valmistui joulukuussa vuonna 1863.<sup>133</sup>

Uuden juhlasalin suunnittelijana toimi arkkitehti Axel Hampus Dahlström (1829–1882). Hän oli voittanut arkkitehtikilpailun ehdotuksellaan ”tuhat kuulijaa”. Suunnitelmissa oleva sali oli pohjaltaan suorakulmainen konserttisali, jossa oli kuvassa 11 esitetty korotettu orkesterilava salin lyhyellä seinällä. Sali oli avoin kahteen salonkiin, jolloin kokonaisuus oli T-muotoinen. Toisella lyhyellä seinällä oli vielä parvi tanssiorkesteria varten.<sup>134</sup> Niskasen mukaan saliin mahtui 1000 kuulijaa,<sup>135</sup> mikä ilmenee myös arkkitehtikilpailun ehdotuksen nimestä. Kuitenkin salin rakennuspiirustuksista<sup>136</sup> määritetyn pinta-alan perusteella pääsaliin saattoi mahtua 600–700 henkeä. Dahlströmin suunnitelmat sisälsivät myös sivusalongit, joten on oletettavaa, että Niskasen luku viittaa sekä pääsaliin että salonkeihin mahtuvaan ihmismäärään.

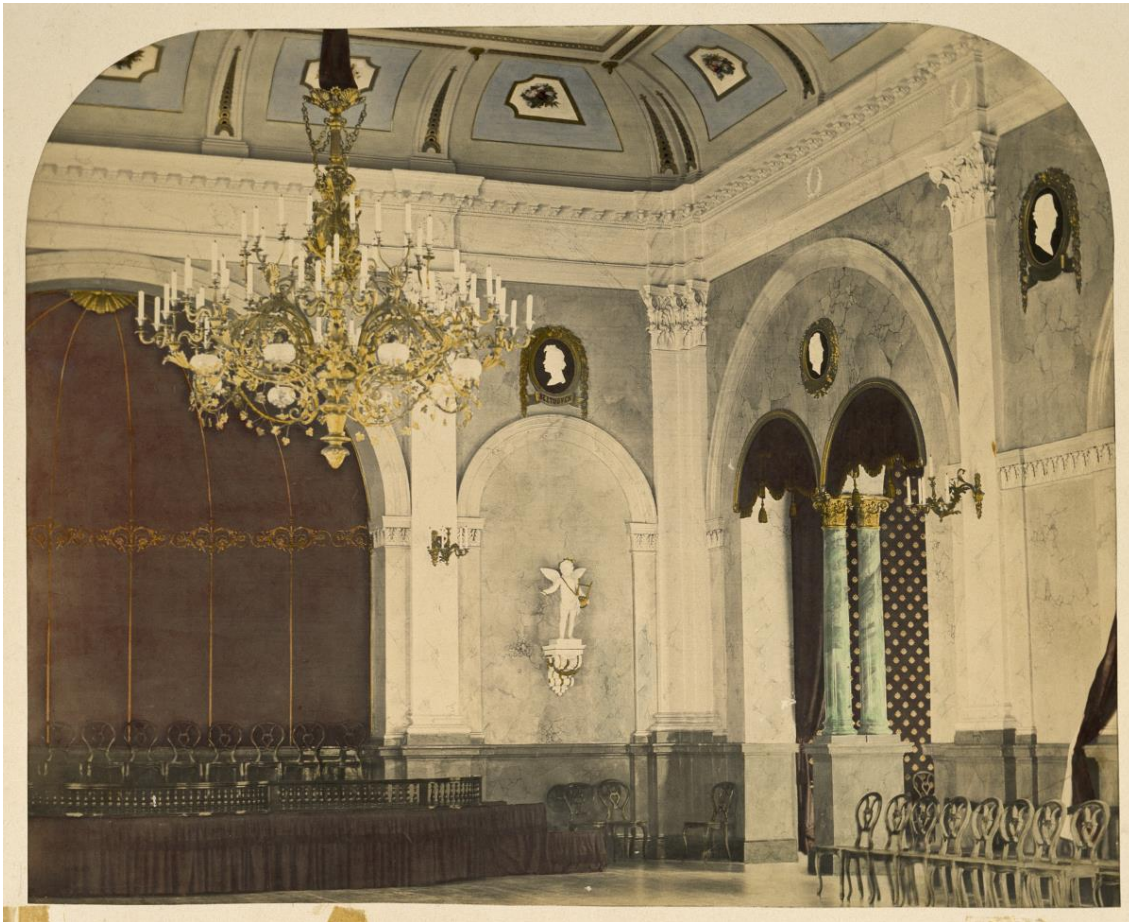
<sup>132</sup> Wasastjerna 1941, s. 60.

<sup>133</sup> Wasastjerna 1941, s. 63–65.

<sup>134</sup> Ringbom 1988, s. 157.

<sup>135</sup> Niskanen 2008, s. 50.

<sup>136</sup> Seurahuoneen juhlasalin pohjapiirustus 1863, Maistraatin arkisto (HKA).



**Kuva 11.** Värjätty valokuva vuosilta 1885–1886 Seurahuoneen 2. vaiheen juhlasalista, kuvalähde: HKM.

Seurahuoneen toista salia pidettiin liian pienenä jo silloin, kun se valmistui vuonna 1863. Hugo E. Saurén laati vuonna 1885 piirustukset uudesta, suuremmasta juhlasalista, mutta suunnitelmia ei kuitenkaan toteutettu. Lopulta päätettiin toteuttaa arkkitehti Bruno F. Granholmin laajennusehdotus, jossa salin reunoja levennettiin kuusi metriä sivusuuntaan. Laajennustyöt alkoivat vuoden 1887 kesällä ja Seurahuoneen kolmannen vaiheen sali valmistui lokakuussa vuonna 1888.<sup>137</sup> Seurahuoneen 2. vaiheesta on jäljellä enää salin katto, joka näkyy Seurahuoneen 3. vaiheen salissa kuvassa 12.

<sup>137</sup> Wasastjerna 1941, s. 77–79, Ringbom 1988, s. 158–159.





**Kuva 12.** *Seurahuoneen 3. vaiheen, eli nykyisen Helsingin kaupungintalon, juhlasali*

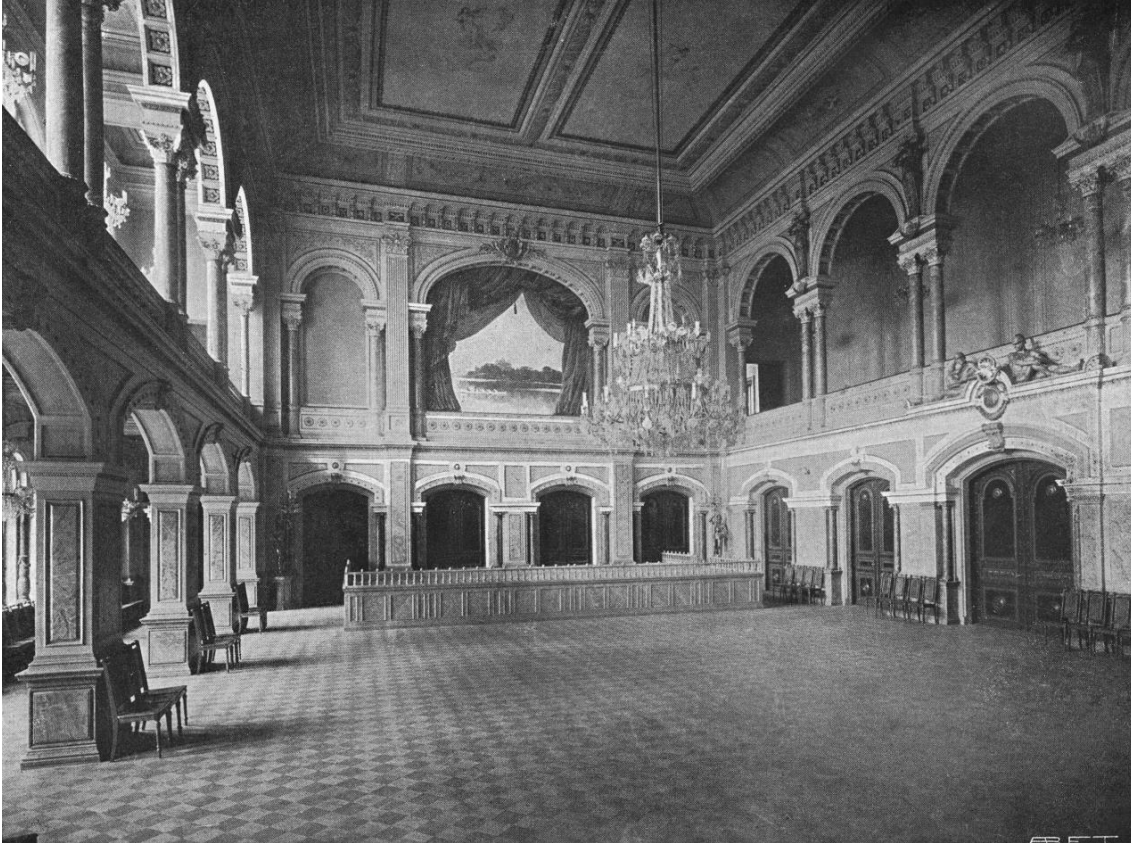
#### **2.2.4 Palokunnantalo (1889–1967)**

Arkkitehti Theodor Höijerin (1843–1910) suunnittelema Helsingin vapaapalokunnan talo valmistui Hakasalmenkadulle (nyk. Keskuskatu 7) vuonna 1889.<sup>138</sup> Kuvassa 13 on esitetty rakennuksen kaksikerroksinen juhlasali, jonka molemmilla sivuilla oli parvet toisessa kerroksessa. Sali oli epäsymmetrinen, sillä toisen parven alapuolinen tila oli avoin saliin päin. Lattialla oli puurakenteinen konserttilava, jossa orkesteri esiintyi konserttitilanteessa.<sup>139</sup> Palokunnantalon juhlasalin rakennuspiirustuksista<sup>140</sup> määritetyn pinta-alan perusteella saliin saattoi mahtua konsertin aikana yli 1000 henkeä.

<sup>138</sup> Ringbom 1988, s. 321, Manninen 2004, s. 31.

<sup>139</sup> Viljo 1985, s. 89–94.

<sup>140</sup> Palokunnantalon rakennuspiirustukset, 1887, Maistraatin arkisto (HKA).



**Kuva 13.** Valokuva Palokunnantalon juhlasalista, kuvalähde: Viljo 1985.

Palokunnantalon juhlasalista tehtiin vuonna 1907 Suomen yksikamarisen eduskunnan ensimmäinen istuntopaikka. Eduskunta toimi salissa vuoteen 1910 asti ja 1920-luvulla talo muutettiin Suomen Liittopankin taloksi. Palokunnantalo purettiin vuonna 1967.<sup>141</sup>

## 2.3 Geometrian mallintaminen

Engelin teatterista oli tutkimusta varten saatavilla alkuperäiset Engelin piirtämät ensimmäisen<sup>142</sup> ja toisen kerroksen pohjapiirustukset,<sup>143</sup> julkisivupiirustukset kahdesta suunnasta<sup>144</sup> ja kuva teatterin paikkakartasta vuodelta 1847.<sup>145</sup> Teatterista ei ole säilynyt leikkauspiirustusta, joten teatterisalin korkeus oli arvioitava julkisivupiirustusten ja näyttämöaukon piirustuksen pohjalta.<sup>146</sup> Salin geometrian mallintamisessa käytettiin apuna myös Tampereen teknillisen korkeakoulun arkkitehtuurin osastolla vuonna 1993 tehtyä tutkielmaa, jossa oli rekonstruoitu Engelin teatterin pohja- ja leikkauspiirustukset.<sup>147</sup> Tutkielmassa ei ollut käytetty lähteenä ensimmäisen kerroksen pohjapiirustusta, joten siinä esitettyä uudelleen piirrettyä leikkauspiirustusta ei seurattu täysin mallinnet-

<sup>141</sup> Manninen 2004, s. 31.

<sup>142</sup> Engelin teatterin ensimmäisen kerroksen pohjapiirustus, 1826, Maistraatin arkisto (HKA).

<sup>143</sup> Engelin teatterin toisen kerroksen pohjapiirustus, 1826, (AMA).

<sup>144</sup> Engelin teatterin julkisivupiirustukset, 1826, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>145</sup> Engelin teatterin paikkakartta, 1847, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>146</sup> Piirros Engelin teatterin näyttämöaukosta, 1847, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>147</sup> Rauma et al. 1992.

taessa ensimmäisen kerroksen looseja. Muita mittoja, esimerkiksi ovista, saatiin vuodelta 1834 säilyneestä palovakuutuskirjasta, jossa on lueteltu teatterin irtaimistoa.<sup>148</sup>

Yliopiston juhlasalista oli käytettävissä Engelin piirtämä kolmannen kerroksen projektio katosta ja kuvassa 14 esitetty leikkauspiirustus vuodelta 1828,<sup>149</sup> uudelleen piirrettyjä pohjapiirustuksia 1920-luvulta<sup>150</sup> sekä leikkaus- ja pohjapiirustus juhlasalin lattiarakenteesta.<sup>151</sup> Tämän lisäksi käytössä oli piirros vuodelta 1885,<sup>152</sup> kaksi valokuvaa vuodelta 1907<sup>153</sup> ja yksi valokuva vuodelta 1921.<sup>154</sup> Kaikki käytetyt lähteet ovat ajalta ennen rakennuksen tuhoutumista vuonna 1944.

Seurahuoneen juhlasalin ensimmäisen vaiheen piirustuksia ei ollut saatavilla mallinnusta varten. Ennen salin purkua arkkitehti Carl Albert Edelfelt teetti rakennuksesta mittapiirustukset, mutta nämä piirustukset sekä Engelin alkuperäiset piirustukset ovat nähtävästi kokonaan kadonneet. Wasastjernan ja Ringbomin teoksista löytyi kuitenkin salista kaksi Edelfeltin tekemää pohjapiirustusta ja salin lyhyen seinän projektio.<sup>155</sup> Salin ikkunoiden paikat pystytään myös päättämään Helsingin kaupungintalon nykyisestä julkisivusta. Salista ei ole olemassa valokuvia, joten mallinnus tehtiin tämän informaation varassa.

Seurahuoneen toisen vaiheen salista oli mallinnusta varten käytettävissä Dahlströmin alkuperäiset rakennuspiirustukset<sup>156</sup> ja tämän lisäksi vielä kaksi valokuvaa.<sup>157</sup> Salin leikkauspiirros on esitetty kuvassa 15. Valokuvien perusteella havaittiin, että leikkauspiirustuksessa esitettyjä pitkien sivuseinien kaariholvia ei toteutettu piirustusten mukaan. Mallinnus tehtiin valokuvien perusteella. Valokuvista havaittiin myös, että salin sivuilla olevat salongit olivat avoimena saliin, joten ne sisällytettiin geometriseen malliin.

<sup>148</sup> Palovakuutus nro 44, 1834, Almännä Brandstodsbolaget i Finland, Tarmon arkisto (KA).

<sup>149</sup> Yliopiston päärakennuksen 3. kerroksen pohjapiirustus ja leikkauspiirustus, 1828, rakennuspiirustukset (HYM).

<sup>150</sup> Yliopiston päärakennuksen pohjapiirustukset, 1920-luku, rakennuspiirustukset (HYM).

<sup>151</sup> Yliopiston juhlasalin lattian leikkaus- ja pohjapiirustus, 1920-luku, rakennuspiirustukset (HYM).

<sup>152</sup> Piirros yliopiston juhlasalista, 1885, kuvakokoelmat (HKM).

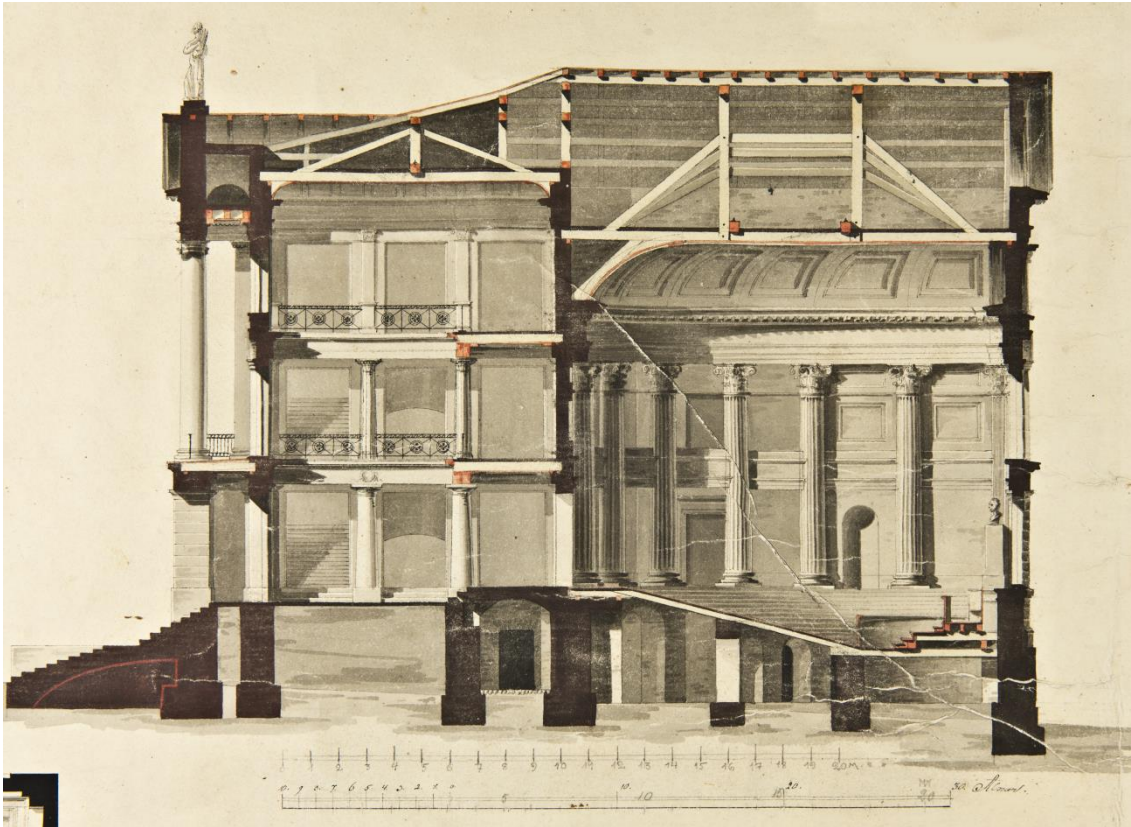
<sup>153</sup> 2 valokuvaa yliopiston juhlasalista, 1907, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>154</sup> Valokuva yliopiston juhlasalista, 1921, kuvakokoelmat (HKM).

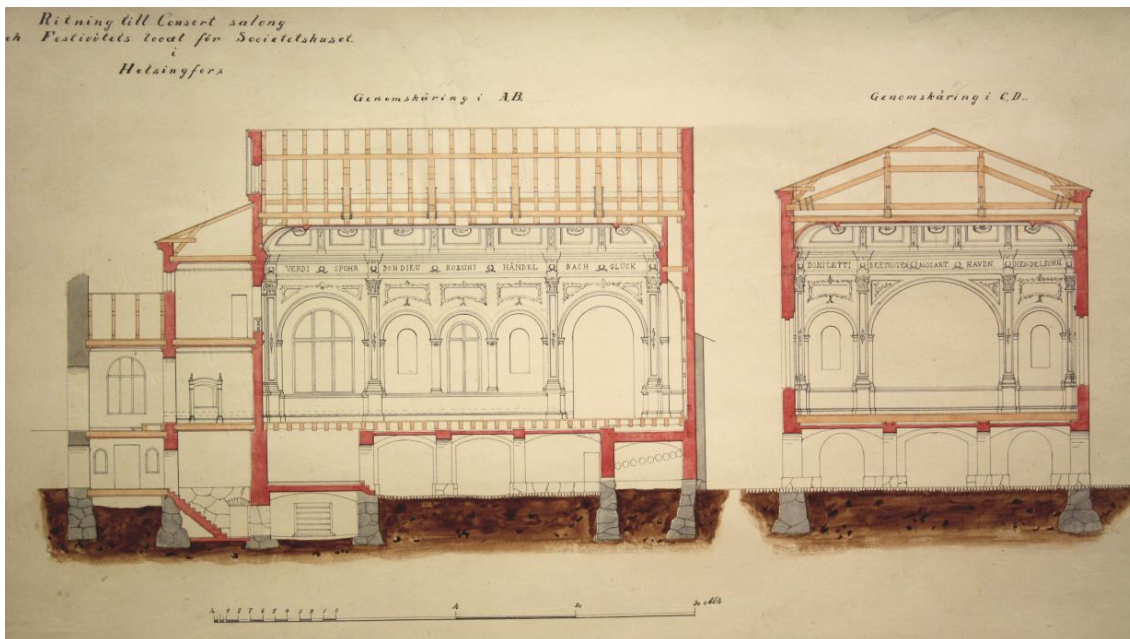
<sup>155</sup> Wasastjerna 1942, s. 42–43, Ringbom 1988, s. 64, 152 & 154.

<sup>156</sup> Seurahuoneen juhlasalin pohja- ja leikkauspiirustus 1863, Maistraatin arkisto (HKA).

<sup>157</sup> 2. valokuvaa Seurahuoneen juhlasalista, 1885–1886, kuvakokoelmat (HKM).



**Kuva 14.** Engelin alkuperäinen leikkauspiirustus yliopiston juhlasalista vuodelta 1828, kuvalähde: HYM.



**Kuva 15.** Dahlströmin piirtämät Seurahuoneen 2. vaiheen leikkauspiirustukset vuodelta 1863, kuvalähde: HKA.

Palokunnantalosta oli saatavilla eniten historiallista lähdemateriaalia. Mallinnusta varten oli käytössä Höijerin alkuperäiset rakennuspiirustukset vuodelta 1887, sekä muutospii-  
rustuksia vuosilta 1898–1920,<sup>158</sup> kun taloa remontoitiin ja lopulta 1920-luvulla muutet-  
tiin Suomen Liittopankin taloksi. Salista oli saatavilla valokuva vuodelta 1900<sup>159</sup> kun se  
oli vielä konserttikäytössä, valokuva eduskunnan kokoontumisesta vuodelta 1907<sup>160</sup> ja  
kolme kuvaa vuodelta 1920, jolloin sali oli remontoitu pankkisaliksi.<sup>161</sup> Yksi 1920-  
luvun valokuvista on esitetty kuvassa 16. Tämän lisäksi salista oli yksi ajoittamaton  
kuva 1900-luvun taitteesta, ennen kuin se otettiin eduskunnan käyttöön.<sup>162</sup>



**Kuva 16.** Valokuva Palokunnantalon juhlasalista 1920-luvulta pankkisalina  
kuvälähde: HKM.

Rakennuspiirustusten mittakaavat on ilmoitettu kyynärissä (ruots. *aln*), jaloissa (ruots.  *fot*) tai metreissä. Ruotsin jalka on nykyisessä mittayksikössä 0,297 m. Kyynärän mitta on kaksi jalkaa eli 0,594 m. Piirustukset skaalattiin samanmittaisiksi AutoCAD 2014 ohjelmassa. Tämän jälkeen saleista valittiin pituus-, leveys- ja korkeusmitat, jotka asetettiin mallinnuksen lähtökohdaksi. Piirustusten mittoja verrattiin myös tutkimuskirjalli-  
suudesta löydettyihin mittoihin. Jos mitat erosivat toisistaan, sisämitta laskettiin eri läh-  
teiden keskiarvosta. Kun sisämitta oli valittu, eri piirustukset ja valokuvat skaalattiin  
näihin mittoihin yksityiskohtia mallinnettaessa. Mallinnettujen salien valitut sisämitta ja  
tilavuudet on esitetty taulukossa 1.

<sup>158</sup> Palokunnantalon rakennuspiirustukset, 1887, Maistraatin arkisto (HKA).

<sup>159</sup> Valokuva palokunnantalon juhlasalista, 1900, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>160</sup> Valokuva palokunnantalon juhlasalista, 1907, kuvakokoelmat (HKM).

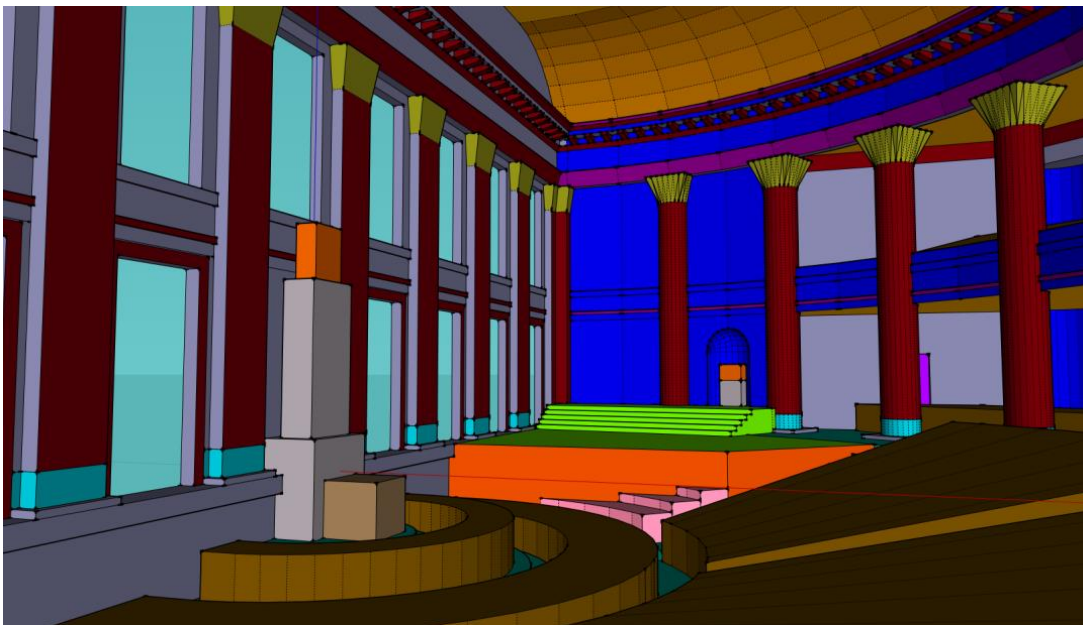
<sup>161</sup> Kolme valokuvaa palokunnantalon juhlasalista, 1920-luku, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>162</sup> Ringbom 1988, s. 94.

**Taulukko 1.** Tilamallien sisämitat, tilavuudet ja tasojen lukumäärät

Salin nimi	Pituus [m]	Leveys [m]	Korkeus [m]	Tilavuus <sup>163</sup> [m <sup>3</sup> ]	Pintojen lukumäärä
Engelin teatteri (näyttämön kanssa)	22,5	16,0	8,9	1930	2616
Yliopiston juhlasali	17,2	30,3	14,4	5260	3751
Seurahuone, 1. vaihe	30,7	15,0	8,0	2940	590
Seurahuone, 2. vaihe (salonkien kanssa)	25,8	40,1	9,5	4080	7078
Palokunnantalon juhlasali	22,8	20,8	12,4	4740	6901

Pintojen materiaalit arvioitiin valokuvien ja kohdassa 2.4 esitettyjen lähteiden perusteella. Eri pinnat jaettiin kuvan 17 mukaisesti eri tasolle, jotka nimettiin pintamateriaalien mukaan. Kohdan 2.1.2 mukaan huoneakustisessa mallintamisessa yksityiskohdat tulisi mallintaa siten, että niiden sivumitat ovat enintään 0,3 m. Tätä ohjetta pyrittiin noudattamaan salien mallinnuksessa, mutta esimerkiksi salien nurkkien mallinnuksessa pintojen koko oli toisinaan pienempi. Kun kuvioituja alueita mallinnettiin sileinä pintoina, ne asetettiin Sketchup-ohjelmassa omille tasolleen. Tasot nimettiin valokuvien perusteella silmämääräisesti termeillä: ”sileä”, ”kuvioitu” ja ”voimakkaasti kuvioitu” riippuen seinän kuvioinnin määrästä. Koska Odeonin käyttämä laskentamenetelmä yliarvioi koverien pintojen sirontaa kohdan 2.1.3 mukaisesti, koverat pinnat asetettiin myös omille tasolleen, jotka merkittiin nimellä ”fractional”. Mallinnetut salit on esitelty liitteessä 1.

**Kuva 17.** Tilamalli yliopiston juhlasalista. Eri väriset pinnat kuvaavat eri tasoja.

<sup>163</sup> Odeon-mallien käyttämä tilavuus, jossa salin tilavuudesta on vähennetty 0,8 korkeana laatikkona mallinnetun yleisön tilavuus.

## 2.4 Huoneakustiikan mallintaminen

### 2.4.1 Absorptiokertoimien valinta

Kun mallit tuotiin Odeoniin, jokaiselle pinnalle asetettiin absorptiokerroin  $\alpha$ . Kertoimet asetettiin Sketchupissa määrättyjen tasojen mukaisesti ja ne valittiin kaikki Odeonin materiaalikirjastosta, lukuun ottamatta tyhjille tuolille valittuja absorptiokertoimia. Eri saleissa käytetyt absorptiokertoimet on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

Salien ovet oletettiin puurakenteisiksi ja ikkunalasien oletettiin olevan ohuita. Ikkunoille valittiin tästä johtuen vähemmän heijastava lasimateriaali. Yleisön absorptiokertoimien valinnassa käytettiin Beranekin & Hidakan vuonna 1998 mittaamia arvoja yleisölle ja tyhjille tuoleille.<sup>164</sup> Valokuvien perusteella tuolit olivat saleissa puisia, hyvin kevyesti päällystettyjä, joten tyhjien tuolien absorptiokertoimet valittiin tutkimuksessa esitetyn ryhmän 4 ”Extra lightly upholstered seats” mukaan. Yleisön absorptiokertoimiksi valittiin myös vähiten absorboiva materiaali, ryhmä 3 ”Lightly upholstered seats”. Saleissa yhteisesti käytettyjen materiaalien absorptiokertoimet on esitetty taulukossa 2.

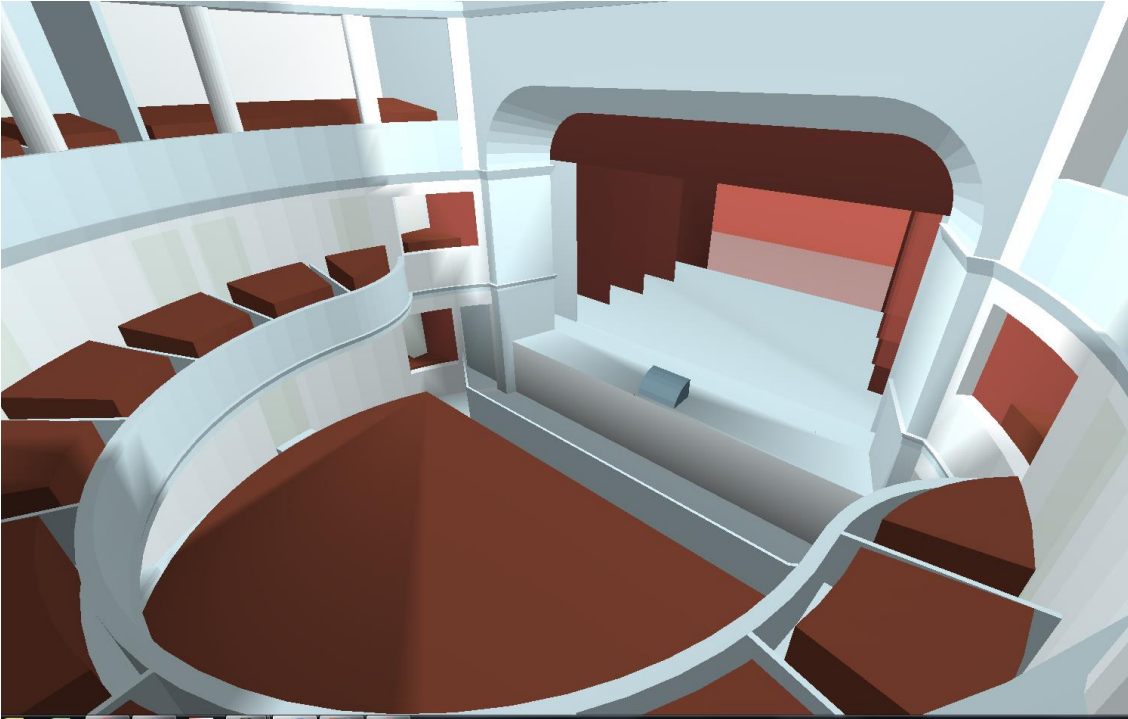
*Taulukko 2. Saleissa yhteisesti käytettyjen materiaalien absorptiokertoimet*

Pinta	Absorptiokertoimet					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Yleisön alue, täynnä	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83
Yleisön alue, tyhjä	0,35	0,4	0,41	0,38	0,33	0,27
Ikkunat	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Ovet	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10

Engelin teatteri oli rakennuspiirustusten ja palovakuutuskirjan mukaan täysin puurakenteinen. Rakennuksen seinäpinnat jaettiin Sketchup-mallissa kantaviin seiniin ja väliseiniin. Teatterin kantavat seinät olivat piirustusten perusteella muita seiniä paksummat ja niille valittiin pienillä taajuuksilla vähemmän absorboiva puumateriaali. Barronin mukaan teatterien jälkikäiunta-aikaa laskettaessa tavallisesti oletetaan, että näyttämötila on täysin vaimennettu.<sup>165</sup> Näyttämön alueella lavasteiden verhojen materiaaliksi valittiin absorboiva verhomateriaali. Verhot mallinnettiin myös 50 % ääntä läpäisevinä. Kuis-kaajan koppi oli puuta ja sille valittiin pienillä taajuuksilla absorboivampi materiaali. Teatterin huoneakustinen malli on esitetty kuvassa 18 ja mallissa käytetyt absorptiokertoimet on lueteltu taulukossa 3.

<sup>164</sup> Beranek & Hidaka 1998.

<sup>165</sup> Barron 2010, s. 274.



**Kuva 18.** Engelin teatterin huoneakustinen malli.

**Taulukko 3.** Engelin teatterin mallissa käytetyt absorptiokertoimet

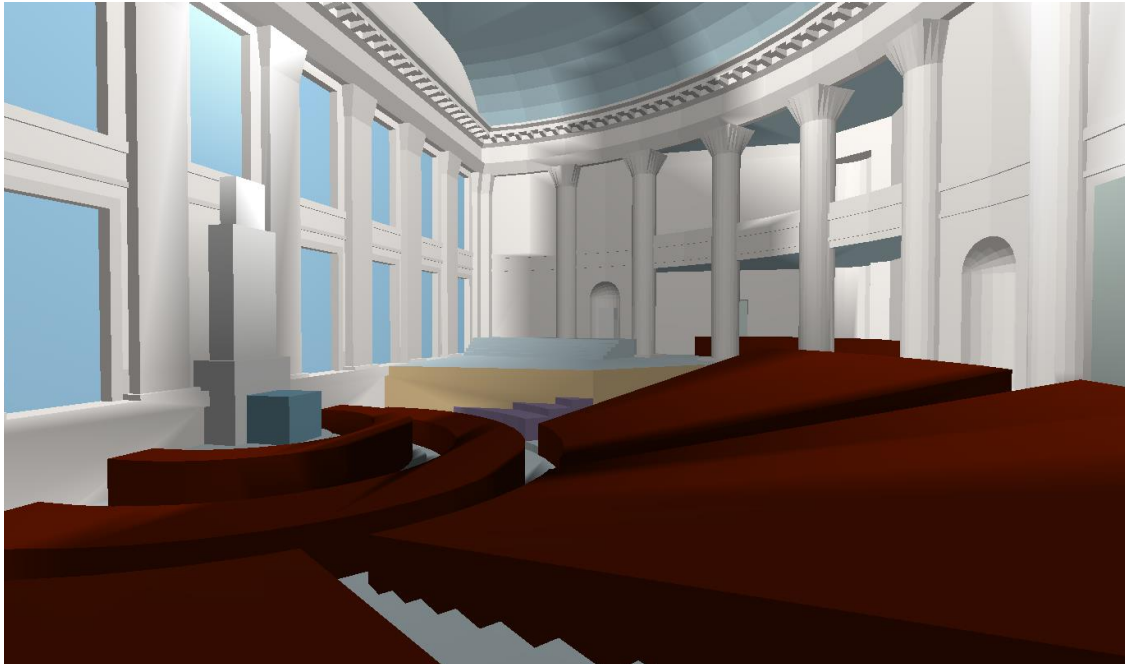
Pinta	Absorptiokertoimet					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Kantavat rakenteet, puuta	0,10	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04
Muut puurakenteet	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Paksu verhokangas	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Kuiskaajan koppi	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10

Yliopiston juhlasalin pääasiallinen rakennusmateriaali oli tiili. Seinien ja holvien lisäksi myös pylväät ja pilasterit olivat muurattuja. Pilarien pohjat oli tehty valuraudasta. Kattorakenteet ja välipohjat taas olivat puisia. Muuratut rakenteet oli peitetty rappauksella.<sup>166</sup> Valurautaisille ja kipsille päällystetyille muuratulle pinnoille päätettiin asettaa samat absorptiokertoimet. Näihin pintoihin sisältyi salin seinät, pilarit, pilasterit ja pilarien kapiteelit. Valokuvien perusteella orkesterilava oli puurakenteinen ja sen reuna oli peitetty kankaalla. Kankaalle valittiin valokuvien perusteella kevyesti absorboiva verhomateriaali. Lattiapinnoille valittiin pienillä taajuuksilla hieman vähemmän absorboiva materiaali kuin kattopinnoille. Salissa olevat patsaille käytettiin marmorin absorptiokertoimia. Salin keskellä olevalle kateederille, eli puhujankorokkeelle, käytettiin samaa

<sup>166</sup> Pöykkö 1972, s. 49–50.



absorboivampaa puumateriaalia kuin Engelin teatterin kuiskaajan kopille. Yliopiston huoneakustinen malli on esitetty kuvassa 19 ja mallissa käytetyt absorptiokertoimet on lueteltu taulukossa 4.



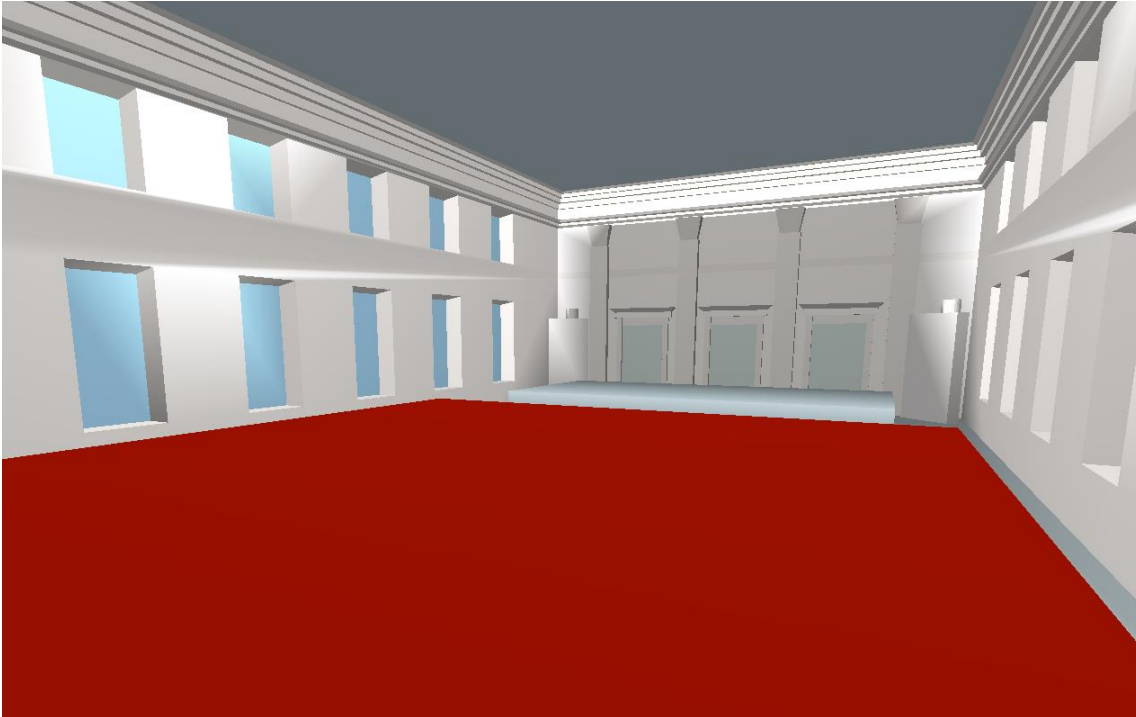
**Kuva 19.** Yliopiston juhlasalin huoneakustinen malli.

**Taulukko 4.** Yliopiston juhlasalin mallissa käytetyt absorptiokertoimet

Pinta	Absorptiokertoimet					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Muuratut seinät, pilasterit, pilarit ja kapiteelit	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Katto ja välipohjat	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Salin ja parvien lattiapinnat	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Orkesterilava	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Ohut verhokangas	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Patsaat	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Kateederi	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10

Helsingin seurahuoneen ensimmäisen vaiheen materiaalit jouduttiin päättelemään muiden samaan aikaan rakennetuissa saleissa käytettyjen materiaalien perusteella. Seinät olivat muurattuja ja rapattuja kuten yliopiston juhlasalissa. Samoin välipohjat oletettiin puurakenteisiksi. Wasastjernan mukaan salissa oli neljä kaakeliuunia, jotka sijaitsivat

salin nurkissa.<sup>167</sup> Seurahuoneen 1. vaiheen huoneakustinen malli on esitetty kuvassa 20 ja mallissa käytetyt absorptiokertoimet on lueteltu taulukossa 5.



**Kuva 20.** Seurahuoneen 1. vaiheen huoneakustinen malli.

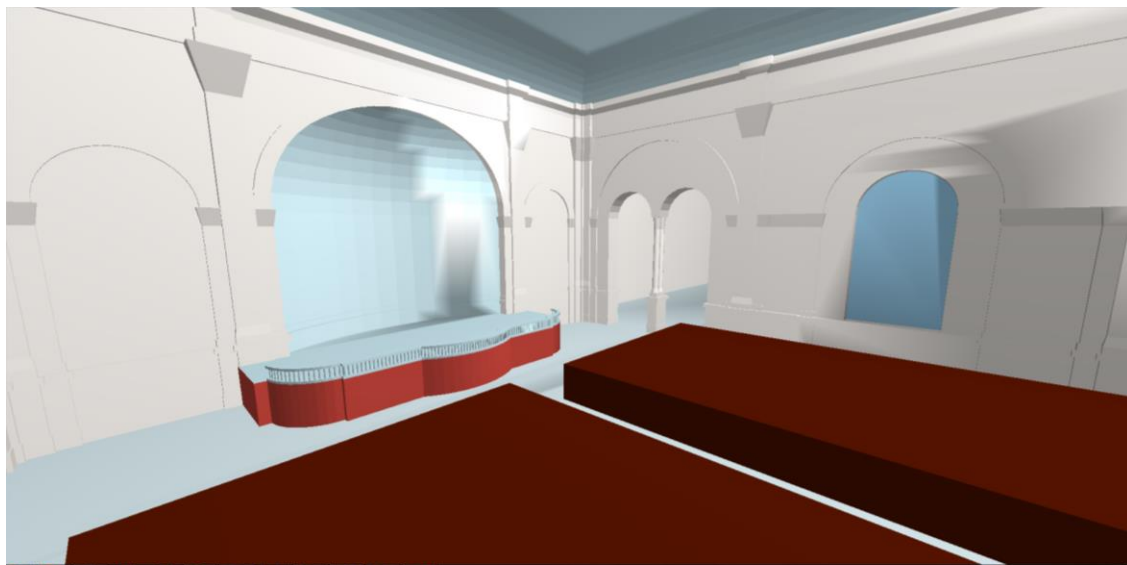
**Taulukko 5.** Seurahuoneen 1. vaiheen salin mallissa käytetyt absorptiokertoimet

Pinta	Absorptiokertoimet					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Muuratut seinät, pilasterit ja kapiteelit	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Lattiat ja välipohjat	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Orkesterilava	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Puiset kaiteet	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Kaakeliuunit	0,01	0,1	0,01	0,02	0,02	0,02

Seurahuoneen 2. vaiheen rakennuspiirustusten ja valokuvien perusteella todettiin että salin seinät olivat muurattuja ja rapattuja. Pilareille, pilastereille ja kapiteeleille valittiin sama heijastava materiaali kuin seinille. Salin katto, lattia ja lyhyelle seinälle rakennettu orkesterilava todettiin piirustusten perusteella puurakenteiseksi. Orkesterilavaa reunusti valokuvien perusteella laskostettu kangas. Kuvissa näkyy myös salin molemmilla puo-

<sup>167</sup> Wasastjerna 1942, s. 44.

lilla olevissa eteishuoneissa sijaitsevat verhot. Molempien verhojen materiaalina käytettiin raskaiden verhojen absorptiokertoimia. Seurahuoneen 2. vaiheen salin huoneakustinen malli on esitetty kuvassa 21 ja mallissa käytetyt absorptiokertoimet on esitetty taulukossa 6.



**Kuva 21.** Seurahuoneen 2. vaiheen huoneakustinen malli

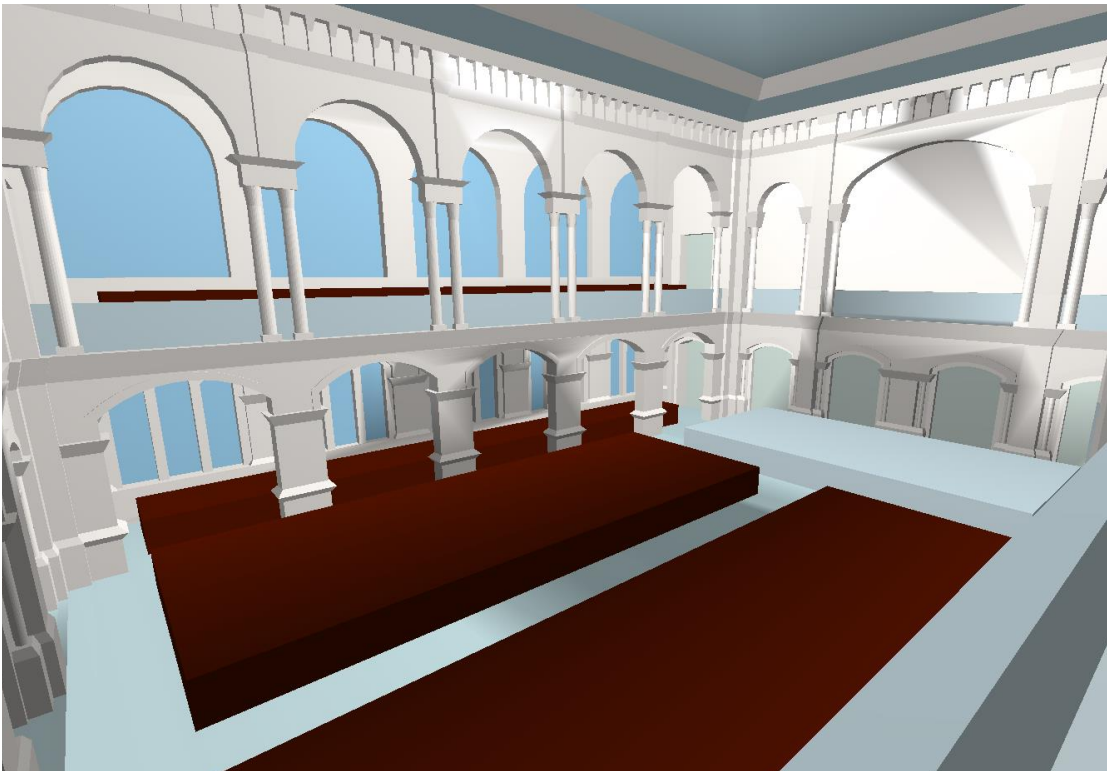
**Taulukko 6.** Seurahuoneen 2. vaiheen salin mallissa käytetyt absorptiokertoimet

Pinta	Absorptiokertoimet					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Muuratut seinät, pilasterit, pilarit ja kapiteelit	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Katto ja orkesterilava	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Salin lattiapinta	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Paksu verhokangas	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65

Palokunnantalon rakennusmateriaalit voidaan päätellä piirustuksista ja valokuvista, mutta myös Viljo kirjoittaa talon rakennusmateriaaleista. Rakennuksen seinät ja ensimmäisen kerroksen pilarit olivat muurattuja. Parvien yläpuolella sijaitsevat pyöreät pylväät tehtiin valuraudasta. Pylväiden kapiteelit oli luultavasti tehty kipsistä ja päällystetty pronssilla. Parven kaiteet oli valmistettu puutavarasta ja niiden pinta oli rapattu. Salin lattia oli tehty tammiparketista.<sup>168</sup> Kipsipäällysteisille muuratuille pinnoille sekä valurautapilareille ja kapiteeleille asetettiin samat absorptiokertoimet. Salin parvien lattiapinnoille asetettiin eri materiaali kuin ensimmäisen kerroksen parkettilattialle. Salin

<sup>168</sup> Viljo 1985, s. 89–94.

lattialla oleva orkesterilava todettiin valokuvien perusteella puurakenteiseksi. Palokunnantalon juhlasalin huoneakustinen malli on esitetty kuvassa 22 ja mallissa käytetyt absorptiokertoimet on esitetty taulukossa 7.



**Kuva 22.** Palokunnantalon juhlasalin huoneakustinen malli.

**Taulukko 7.** Palokunnantalon juhlasalin mallissa käytetyt absorptiokertoimet

Pinta	Absorptiokertoimet					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Muuratut seinät, pilasterit, pilarit ja kapiteelit	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Katto ja välipohjat	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Parvien lattiapinnat	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Parkettilattia	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	1,00
Orkesterilava ja parven kaiteet	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07

## 2.4.2 Sirontakertoimet ja pintojen tyypit

Sirontakerroin määräytyy pinnan epätasaisuuden ja äänen taipumisen perusteella. Odeon mallintaa taipumisen geometrian perusteella kohdassa 2.1.3 selitetyllä menetelmällä. Mikäli pintoja oli yksinkertaistettu ja asetettu vastaaville tasoille, niiden sirontakertoimia kasvatettiin lähteessä<sup>169</sup> esitetyn menetelmän mukaisesti. Sileille pinnoille asetettiin sirontakertoimeksi 0,05. Mikäli kuvioitua pintaa oli mallinnettu yhtenäisenä sileänä pintana, sen sirontakertoimeksi asetettiin 0,2. Palokunnantalon salin valokuvissa oli joissakin pinnoissa nähtävissä erittäin syviä kuvioita. Näiden pintojen sirontakertoimeksi asetettiin 0,3.

Puisten ovien sirontakertoimeksi asetettiin kaikissa saleissa 0,2, koska ovissa oletettiin olevan jonkin verran kuviointia. Verhojen sirontakertoimiksi asetettiin Seurahuoneen 2. vaiheen salissa 0,2. Engelin teatterissa taas verhojen oletettiin sisältävän myös näyttämörakenteita ja niiden sirontakertoimeksi valittiin 0,5. Pylväiden kuvioitujen kapiteelien ja jalustojen sirontakertoimeksi asetettiin 0,3. Tyhjien tuolien sirontakertoimeksi asetettiin kaikissa saleissa 0,5. Sekä yleisön että orkesterilavan vaakapintojen sirontakertoimiksi asetettiin Odeonin käyttäjäoppaan mukaisesti 0,7.<sup>170</sup> Patsaille ja epäsäännöllisen muotoisille esineille, jotka oli mallinnettu laatikoina, sirontakerroin valittiin 0,5-0,7 väliltä tapauskohtaisesti, riippuen esineen dimensioista.

Sirontakertoimien lisäksi jokaiselle pinnalle määritetään pintatyyppi. Lähtökohtaisesti pintojen tyyppiä asetetaan ”Normal”, mutta osapinnoille jotka muodostavat koveria pintoja, pintatyyppiä asetetaan ”Fractional”. Pintatyyppi valitaan, jotta ohjelma ei yliarvioi sironnan vaikutusta näillä osapinnoilla. Pintatyyppin vaikutus on selitetty tarkemmin kohdassa 2.1.3. Eri pintojen sirontakertoimet ja pintatypit on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

## 2.4.3 Lähteiden ja vastaanottopisteiden sijoittelu

Huoneakustisten parametrien mallintamisessa käytettiin ympärisäteilevää lähettä joka asetettiin ISO 3382-1 standardin mukaan 1,5 m esiintymislavan yläpuolelle. Odeonin käyttäjäoppaan mukaan voimakkuusparametrin  $G$  laskentaa varten ympärisäteilevän äänilähteen äänitehoksi  $L_w$  asetettiin 31 dB jokaista oktaavikaistaa kohden. Näin lähde tuottaa 0 dB äänitason 10 m päästä vapaakentässä, jolloin voimakkuus-parametri voidaan lukea suoraan Odeonin laskemasta äänenpainetasosta.<sup>171</sup>

Yksittäisiin saleihin asetettiin 5–14 vastaanottopistettä tasaisesti yleisön alueelle. Engelin teatterissa ja Seurahuoneen molemmissa saleissa vastaanottajia asetettiin ainoastaan salin symmetria-akselin toiselle puolelle. Vastaanottopisteiden lisäksi jokaisen salin

<sup>169</sup> Zeng et al. 2006.

<sup>170</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 41.

<sup>171</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 87.

yleisön alueelle määritettiin vastaanottopisteiden verkko, jossa vastaanottopisteiden väli oli Engelin teatterissa 0,2 m ja muissa saleissa 0,5 m. Yksittäiset vastaanottopisteet ja vastaanottopisteiden verkot asetettiin 0,4 m yleisöä kuvaavan 0,8 m korkean pinnan yläpuolelle. Näin kaikki vastaanottopisteet sijaitsivat 1,2 m salin lattian yläpuolella. Vastaanottopisteet suunnattiin lavalla sijaitsevaa ympärisäteilevää lähdettä kohti. Vastaanottopisteiden sijoittelupaikat on esitetty jokaisessa salissa liitteessä 3.

#### 2.4.4 Laskenta-asetusten määrittäminen

Odeonin käyttämän säteenseurantamenetelmän yleisissä asetuksissa on laskennalle määritettävä impulssivasteen pituus ja myöhäisten säteiden määrä. Salien materiaaliparametrien asettamisen jälkeen Odeonissa on mahdollista laskea tilan arvioitu jälkikaiunta-aika pelkästään huoneen tilavuuden sekä materiaalien pinta-alojen ja absorptiokertoimien perusteella. Salien impulssivasteen pituus määritettiin varsinaista laskentaa varten vähintään yhtä pitkäksi kuin arvioitu jälkikaiunta-aika.

Odeon suosittelee laskenta-asetuksia kolmen tarkkuusluokan ”Survey”, ”Engineering” ja ”Precision” mukaan. Tutkimusta varten valittiin esiasetus ”Precision” ja käytettiin tämän asetuksen mukaisia laskenta-asetuksia. Esiasetukset muokkaavat muun muassa myöhäisten heijastusten laskennassa käytettävien säteiden määrää. Taulukossa 8 on lueteltu eri saleissa käytetyn impulssivasteen pituus ja myöhäisten säteiden lukumäärä.

*Taulukko 8. Malleissa käytetty impulssivasteen pituus ja myöhäisten säteiden määrä*

Parametri	Engelin teatteri	Yliopiston juhlasali	Seura-huoneen 1. vaihe	Seura-huoneen 2. vaihe	Palokunnan-talon juhlasali
Impulssivasteen pituus [ms]	2000	3000	3000	3000	3000
Myöhäisten säteiden määrä	67 568	107 520	23 408	242 000	156 448

## 2.5 Rajoitukset

Kadonneiden rakennusten mallintamisessa pyrittiin mahdollisimman autenttiseen rekonstruktion. Historiallisten lähteiden tulkinnassa tehdyt tulkinnat sekä mallintamisessa tehdyt yksinkertaistukset kuitenkin vähentävät mallintamisen tarkkuutta. Laskennan virhearviointia ei voitu toteuttaa, sillä saleja ei enää ole olemassa entisessä muodossaan, eikä parametreja ole voitu todentaa mittauksilla.

Rakennuspiirustuksia tulkittaessa on oletettu että rakennukset on toteutettu niiden mukaisesti. Tämän oletuksen perusteella piirustuksissa esitettyjen päämittojen tulisi olla

tarkat, mutta yksityiskohdat ovat saattaneet muuttua rakennustyön edetessä. Esimerkkinä on Seurahuoneen 2. vaiheen juhlasali, jossa rakennuspiirustukset ja salista otetut valokuvat todistavat että piirustuksia ei aina noudatettu. Baumannin mukaan huoneen muoto määrittää salin akustiset perusolosuhteet, kun taas pintarakenteiden ja materiaalien vaikutus akustiikkaan on pienempi.<sup>172</sup> Kohdan 2.1.2. mukaan Odeon-mallien geometrinen tarkkuus ei tarvitse olla pienempi kuin 0,3 m. Rakennuspiirustukset antavat tämän perusteella riittävän tarkat mitat akustisten parametrien luotettavaan mallintamiseen.

Salin materiaalien arvioinnissa rakennuspiirustuksien ja valokuvien perusteella on mahdollisesti tehty virheitä. Virhearvioinnissa on tehty oletus, että materiaaliparametrien aiheuttama virhe tuloksiin on verrannollinen pinta-alaan. Seinä- ja kattopintojen materiaaliominaisuudet tuottavat siis suuremman virheen kuin pienten yksityiskohtien materiaalit. Kuitenkin saleissa, joissa lähes kaikki pinnat ovat heijastavia, kuten Yliopiston juhlasali, Seurahuoneen 1. sali ja Palokunnantalon juhlasali, yleisö on merkittävin absorboiva pinta ja sillä oletetaan salin muodon lisäksi olevan suurin vaikutus salin akustiisiin ominaisuuksiin. Borkin mukaan yleisön absorptiokertoimista Beranek & Hidakan mittaamat arvot istuvalle yleisölle ja tyhjille tuolille ovat käyttökelpoisimpia<sup>173</sup>, joten niitä on käytetty tässä tutkimuksessa. Seurahuoneen 2. vaiheen salissa ja erityisesti Engelin teatterissa on yleisön lisäksi paljon absorboivia verhoja, joten näissä saleissa akustisiin ominaisuuksiin eniten vaikuttavien materiaalien tarkkuus ei välttämättä ole yhtä hyvä. Borkin mukaan hyvän huoneakustisen simulaation edellytys on tarkka tieto pintamateriaaleista ja niiden absorptio- ja sirontaominaisuuksista. Materiaalivalintojen tulisi myös perustua salissa tehtyihin mittauksiin.<sup>174</sup> Koska tutkimuksessa tarkasteltiin kadonneita saleja, mittaaminen ei kuitenkaan ollut mahdollista.

Yleisön lukumäärää tarkasteltaessa huomattiin että yleisön istumatiheys on ollut suurempi kuin nykyään. Nykypäivänä Euroopassa istumatiheyden normi on noin 2 henkilöä / m<sup>2</sup>.<sup>175</sup> Mallinnetuissa saleissa on yleisömäärien ja salien pinta-alojen laskettu että istumatiheys on ollut ainakin 2,5 henkilöä / m<sup>2</sup>. Kuitenkin Baumannin mukaan yleisön absorptiota tarkasteltaessa yleisön alueen pinta-ala on merkityksellisempi kuin varsinainen henkilömäärä.<sup>176</sup>

Pintojen sirontaominaisuuksien valinnassa on myös mahdollista tehdä virheitä. Koska sirontakerroin määrittää suoraan heijastuvan ja sironneen energian suhteen, se vaikuttaa lähinnä saapuvan energian ajanhetkeen ja saapumissuuntaan, eikä energian kokonaismäärään. Ohjelma laskee sirontakertoimen erikseen jokaiselle heijastukselle, mikä pa-

<sup>172</sup> Baumann 2011, s. 133.

<sup>173</sup> Bork 2000; Beranek & Hidaka 1998.

<sup>174</sup> Bork 2000.

<sup>175</sup> Baumann 2011, s. 161.

<sup>176</sup> Baumann 2011, s. 163.

rantaa tarkkuutta. Borkin mukaan geometriset mallinnusmenetelmät ovat rajoittuneita pienillä taajuuksilla, joten parametrien virhe voi olla suurempi 125 Hz taajuuskaistalla.<sup>177</sup>

Laskenta-asetukset voivat vaikuttaa huoneakustisiin parametreihin. Jos myöhäisten säteiden määrä on liian pieni, heijastustiheys on monimutkaisissa tiloissa liian pieni ja laskenta muuttuu epätarkaksi. Aikaisten säteiden vähäisyys johtaa ensimmäisten heijastusten epätarkkaan mallintamiseen. Virheet on pyritty minimoimaan käyttämällä Odeonin suositeltuja asetuksia, ja ”Precision” laskenta-asetusta. Rindelin<sup>178</sup> mukaan vastaanottopisteeseen saapuvien heijastusten määrä tulisi olla vähintään 50 heijastusta / ms. Monimutkaisemmissa tiloissa heijastustiheys tulisi olla suurempi. Tutkimuksessa mallinnetuissa tiloissa heijastustiheys on kaikissa vastaanottopisteissä useita tuhansia heijastuksia millisekuntia kohden, joten laskentatarkkuutta voidaan pitää geometristen menetelmien puitteissa riittävänä.

## 2.6 Tulokset

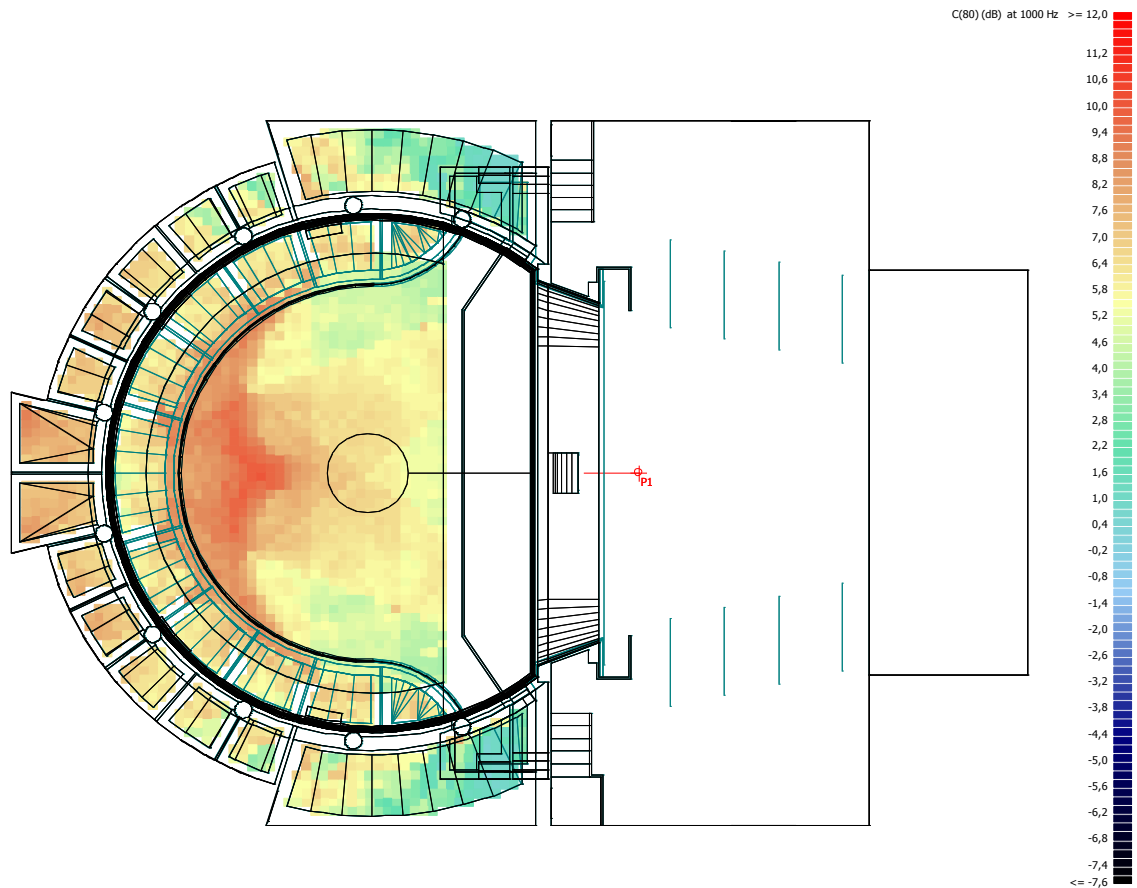
Kaikista saleista mallinnettiin kohdassa 2.1.1. esitetyt huoneakustiset parametrit ISO 3382-1 mukaan, silloin kun sali on tyhjä ja silloin kun sali on täynnä yleisöä. Yleisön alueelta eri pisteistä lasketuista parametreista piirrettiin verkot joista ilmenee, miten parametrit muuttuvat salin eri puolilla. Kuvassa 23 on esitetty laskettu verkko selvyysparametrin Engelintä teatterista. Verkot on piirretty 1000 Hz oktaavikaistalle ja ne on esitetty liitteessä 4. Liitteessä voimakkuus  $G$  on esitetty termillä SPL. Yleisön alueelta laskettujen parametrien keskiarvot on esitetty oktaavikaistoittain taulukoissa eri saleille tilanteissa, jossa salit ovat joko tyhjiä tai täynnä yleisöä.

---

<sup>177</sup> Bork 2005b.

<sup>178</sup> Rindel 2010.





**Kuva 23.** Selvyys  $C_{80}$  laskettuna 1000 Hz oktaavikaistalla Engelin teatterissa

### 2.6.1 Engelin teatteri

Engelin teatterin teatterisalin puoleinen tilavuus oli  $910 \text{ m}^3$ , eli noin  $2,3 \text{ m}^3/\text{hlö}$ . Taulukossa 9 on esitetty mallinnettujen huoneakustisten parametrien keskiarvot yleisön alueelta tilanteessa, missä sali on tyhjä. Taulukossa 10 on esitetty parametrit tilanteessa, missä sali on täynnä yleisöä.

**Taulukko 9.** Engelin teatterin lasketut huoneakustiset parametrit tyhjänä

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
$EDT$ [s]	1,1	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
$C_{80}$ [dB]	4,1	4,6	4,3	3,8	3,5	3,3
$G$ [dB]	10,3	10,4	10,6	10,9	11,1	10,9
$LF_{80}$	0,28	0,29	0,29	0,30	0,31	0,31

**Taulukko 10.** Engelin teatterin lasketut huoneakustiset parametrit yleisön kanssa

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
$EDT$ [s]	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
$C_{80}$ [dB]	4,5	5,5	5,8	6,1	6,2	6,6
$G$ [dB]	9,8	9,5	9,4	9,2	8,9	8,6
$LF_{80}$	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29

### 2.6.2 Yliopiston juhlasali

Yliopiston juhlasalin tilavuus oli noin 5300 m<sup>3</sup>, eli noin 7,6 m<sup>3</sup>/hlö. Taulukossa 11 on esitetty mallinnettujen huoneakustisten parametrien keskiarvot yleisön alueelta tilanteessa, missä sali on tyhjä. Taulukossa 12 on esitetty parametrit tilanteessa, missä sali on täynnä yleisöä.

**Taulukko 11.** Yliopiston juhlasalin lasketut huoneakustiset parametrit tyhjänä

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	2,2	2,4	2,6	2,8	2,7	2,2
$EDT$ [s]	2,2	2,5	2,7	2,8	2,7	2,3
$C_{80}$ [dB]	- 1,3	- 1,9	- 2,3	- 2,9	- 2,7	- 1,8
$G$ [dB]	9,7	10,3	10,4	11,0	10,8	9,9
$LF_{80}$	0,22	0,22	0,22	0,24	0,24	0,24

**Taulukko 12.** Yliopiston juhlasalin lasketut huoneakustiset parametrit yleisön kanssa

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	1,9	2,0	2,0	2,0	1,8	1,5
$EDT$ [s]	1,9	2,0	2,0	2,0	1,8	1,5
$C_{80}$ [dB]	- 0,4	- 0,6	- 0,7	- 0,5	0,0	1,2
$G$ [dB]	8,7	8,6	8,5	8,3	7,8	6,8
$LF_{80}$	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21

### 2.6.3 Seurahuoneen 1. vaiheen sali

Seurahuoneen 1. vaiheen salin tilavuus oli noin 2900 m<sup>3</sup>, eli noin 3,6 m<sup>3</sup>/hlö. Taulukossa 13 on esitetty mallinnettujen huoneakustisten parametrien keskiarvot yleisön alueelta tilanteessa, missä sali on tyhjä. Taulukossa 14 on esitetty parametrit tilanteessa, missä sali on täynnä yleisöä.

*Taulukko 13. Seurahuoneen 1. vaiheen lasketut huoneakustiset parametrit tyhjänä*

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2	1,9
$EDT$ [s]	2,0	2,2	2,2	2,3	2,2	1,9
$C_{80}$ [dB]	-1,4	-1,9	-1,9	-2,3	-2,3	-1,8
$G$ [dB]	12,3	12,7	12,4	12,8	12,6	11,8
$LF_{80}$	0,24	0,25	0,25	0,27	0,28	0,28

*Taulukko 14. Seurahuoneen 1. vaiheen lasketut huoneakustiset parametrit yleisön kanssa*

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	2,2	2,3	1,7	1,5	1,4	1,3
$EDT$ [s]	2,2	2,3	1,7	1,5	1,4	1,3
$C_{80}$ [dB]	-1,9	-2,1	-0,3	0,7	0,9	1,4
$G$ [dB]	12,6	12,6	10,5	9,1	8,9	8,4
$LF_{80}$	0,25	0,25	0,26	0,24	0,24	0,25

### 2.6.4 Seurahuoneen 2. vaiheen sali

Seurahuoneen 2. vaiheen salin tilavuus ilman sivuavia salonkeja on noin 2800 m<sup>3</sup>, eli noin 4,3 m<sup>3</sup>/hlö. Taulukossa 15 on esitetty mallinnettujen huoneakustisten parametrien keskiarvot yleisön alueelta tilanteessa, missä sali on tyhjä. Taulukossa 16 on esitetty parametrit tilanteessa, missä sali on täynnä yleisöä.

**Taulukko 15.** *Seurahuoneen 2. vaiheen lasketut huoneakustiset parametrit tyhjänä*

<b>Mallinnettu parametri</b>	<b>125 Hz</b>	<b>250 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>1000 Hz</b>	<b>2000 Hz</b>	<b>4000 Hz</b>
$T_{30}$ [s]	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	2,0
$EDT$ [s]	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	1,9
$C_{80}$ [dB]	- 0,5	- 0,5	- 0,6	- 1,1	- 0,9	- 0,3
$G$ [dB]	12,9	13,0	13,0	13,5	13,3	12,6
$LF_{80}$	0,18	0,18	0,19	0,22	0,22	0,23

**Taulukko 16.** *Seurahuoneen 2. vaiheen lasketut huoneakustiset parametrit yleisön kanssa*

<b>Mallinnettu parametri</b>	<b>125 Hz</b>	<b>250 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>1000 Hz</b>	<b>2000 Hz</b>	<b>4000 Hz</b>
$T_{30}$ [s]	2,3	2,2	1,9	1,8	1,7	1,4
$EDT$ [s]	1,9	1,8	1,7	1,6	1,4	1,2
$C_{80}$ [dB]	0,4	0,9	1,1	1,5	2,2	3,3
$G$ [dB]	12,0	11,6	11,3	11,1	10,6	9,8
$LF_{80}$	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19

### 2.6.5 Palokunnantalon juhlasali

Palokunnantalon juhlasalin tilavuus on noin 4700 m<sup>3</sup>, eli noin 4,7 m<sup>3</sup>/hlö. Taulukossa 17 on esitetty mallinnettujen huoneakustisten parametrien keskiarvot yleisön alueelta tilanteessa, missä sali on tyhjä. Taulukossa 18 on esitetty parametrit tilanteessa, missä sali on täynnä yleisöä.

**Taulukko 17.** *Palokunnantalon salin lasketut huoneakustiset parametrit tyhjänä*

<b>Mallinnettu parametri</b>	<b>125 Hz</b>	<b>250 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>1000 Hz</b>	<b>2000 Hz</b>	<b>4000 Hz</b>
$T_{30}$ [s]	2,6	2,7	2,8	2,8	2,6	2,2
$EDT$ [s]	2,5	2,7	2,7	2,7	2,6	2,1
$C_{80}$ [dB]	- 2,5	- 2,7	- 2,7	- 2,8	- 2,6	- 1,6
$G$ [dB]	11,2	11,4	11,2	11,3	11,1	10,0
$LF_{80}$	0,25	0,25	0,25	0,27	0,27	0,27

**Taulukko 18.** Palokunnantalon salin lasketut huoneakustiset parametrit yleisön kanssa

Mallinnettu parametri	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$T_{30}$ [s]	2,2	2,2	2,1	1,9	1,8	1,5
$EDT$ [s]	2,2	2,1	2,0	1,9	1,7	1,4
$C_{80}$ [dB]	-1,6	-1,3	-1,0	-0,5	0,0	1,2
$G$ [dB]	10,2	9,9	9,5	8,9	8,4	7,3
$LF_{80}$	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,25

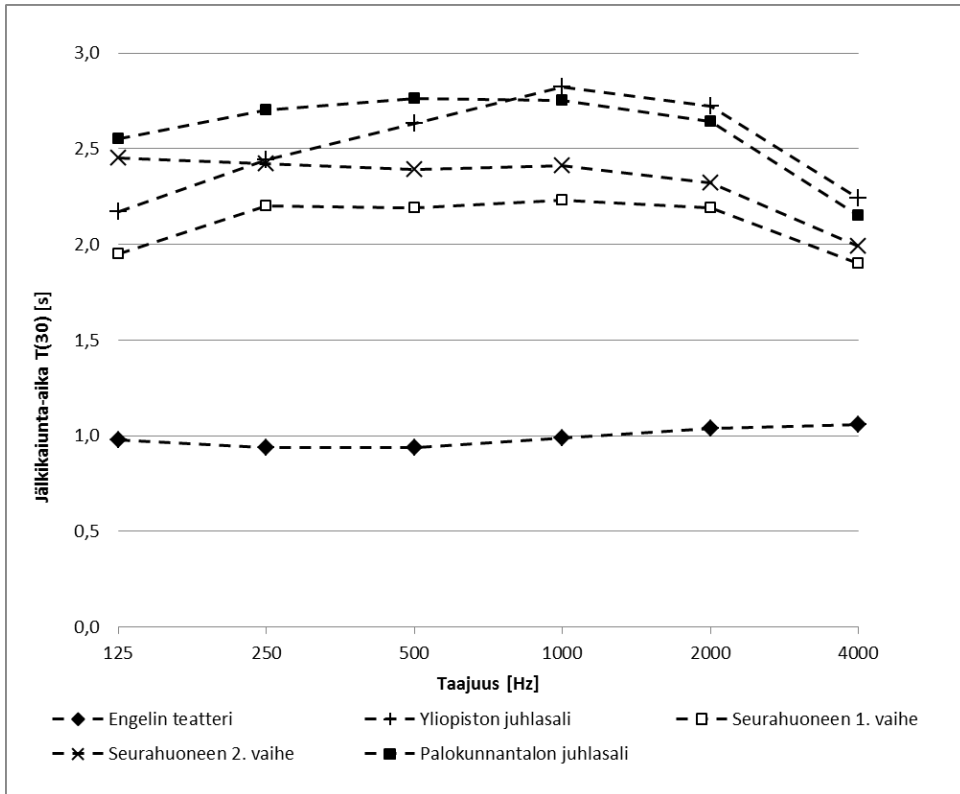
## 2.7 Tulosten tarkastelu

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty oktaavikaistoittain salien yleisön alueella mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen  $T_{30}$  keskiarvot silloin, kun salit ovat tyhjillään ja kun ne ovat täynnä yleisöä. Engelin teatterin mallinnettu jälkikaiunta-aika on huomattavasti lyhyempi kuin konserttisaleissa. Teatterin akustiikassa on huomioitava vaatimukset sekä puheelle että musiikille. Barronin mukaan puheen kannalta 0,7–0,8 sekunnin jälkikaiunta-aika on sovelias teattereille. Puheen ymmärrettävyys on myös paljolti riippuvainen siitä, että aikaisen energian määrä suhteessa kokonaisenergiaan on riittävän suuri. Tässä tapauksessa aikaisella energialla tarkoitetaan ennen 50 ms suoran äänen jälkeen saapuvaa energiaa.<sup>179</sup> Barronin mukaan oopperatalojen jälkikaiunta-aika vaihtelee 0,9–1,8 sekunnin välillä. Esimerkiksi Mozartin oopperoita varten noin 1 sekunnin jälkikaiunta-aika olisi optimaalinen, mutta myöhäisemmät romanttiset oopperat, kuten Wagnerin tuotanto, vaatii pitempiä jälkikaiunta-aikoja.<sup>180</sup> Beranekin mukaan nykyään parhaimmiksi luokitelluissa oopperataloissa jälkikaiunta-aika on 1,4–1,6 sekuntia.<sup>181</sup> Tämän perusteella Engelin teatterin jälkikaiunta-aikaa voidaan pitää hyvänä kompromissina ooppera- ja puhesalin väliltä.

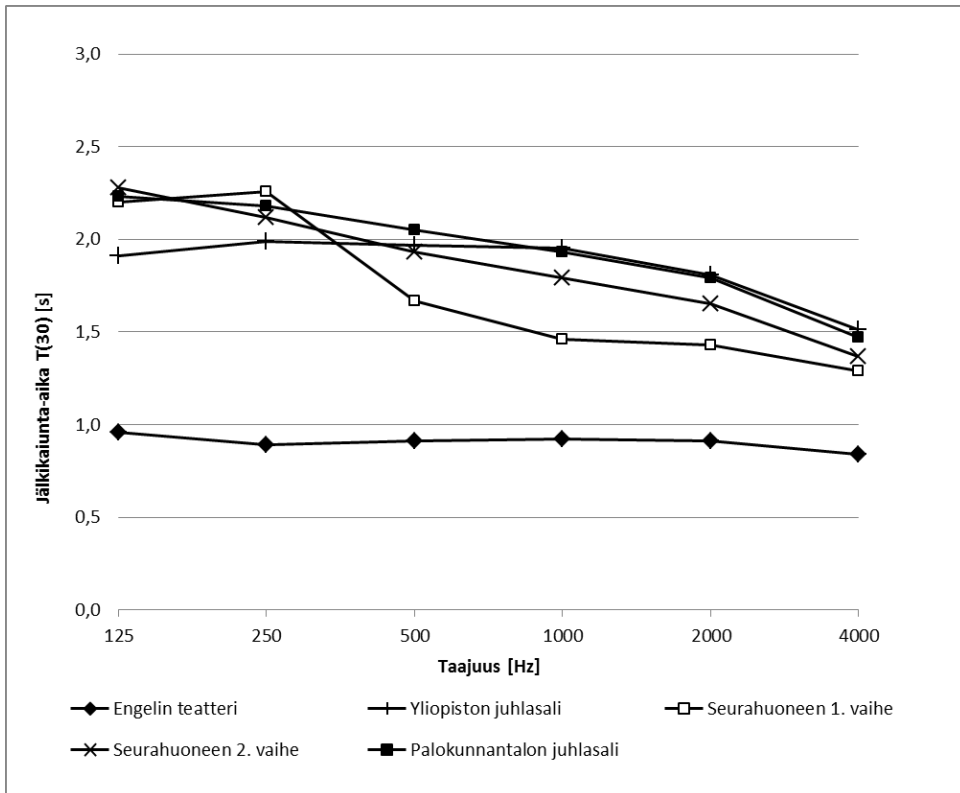
<sup>179</sup> Barron 2010, s. 263 & 267.

<sup>180</sup> Barron 2010, s. 344.

<sup>181</sup> Beranek 2002, s. 562.



**Kuva 24.** Saleissa mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen keskiarvot niiden ollessa tyhjiä



**Kuva 25.** Saleissa mallinnettujen jälkikaiunta-aikojen keskiarvot niiden ollessa täynnä yleisöä

Muissa saleissa jälkikaiunta-aika yleisön kanssa laskettuna on keskitaaajuuksilla noin alle 2 sekuntia, mikä vastaa hyvin kohdassa 2.1.1 suositeltua jälkikaiunta-aikaa konserttisaleille. Poikkeuksena on Seurahuoneen 1. vaiheen sali, jossa jälkikaiunta-aika laskee 1,5 sekuntiin 500 Hz suuremmilla taajuuksilla. Tämä on lähempänä suositeltua jälkikaiunta-aikaa klassismin ajan musiikille, joka on Beranekin mukaan 1,6–1,8 sekuntia.<sup>182</sup>

Kuvissa 26 ja 27 on esitetty oktaavikaistoittain salien yleisön alueella mallinnettujen varhaisten jälkikaiunta-aikojen *EDT* keskiarvot silloin, kun salit ovat tyhjillään ja kun ne ovat täynnä yleisöä. Varhainen jälkikaiunta-aika kuvaa hyvin aistittua kaiuntaisuutta musiikin soidessa.<sup>183</sup> Lukuunottamatta Seurahuoneen 2. vaiheen salia, varhaiset jälkikaiunta-ajat ovat saleissa hyvin samankaltaisia varsinaisten jälkikaiunta-aikojen kanssa. Seurahuoneen 2. vaiheen salissa osa heijastuksista kulkee sivuttaissalonkien kautta, jolloin ne saapuvat yleisön alueelle myöhemmin. Tämä lyhentää varhaista jälkikaiunta-aikaa, tehden salista hieman kuivemman, kuin pelkän jälkikaiunta-ajan perusteella voisi päätellä.

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty oktaavikaistoittain salien yleisön alueella mallinnettujen selvyys-arvojen  $C_{80}$  keskiarvot silloin, kun salit ovat tyhjillään ja kun ne ovat täynnä yleisöä. Kuvista huomataan, että kaikkien salien selvyudet kasvavat voimakkaasti erityisesti suurilla taajuuksilla, kun ne täytetään yleisöllä. Beranekin mukaan selvyysparametri korreloi käänteisesti jälkikaiunta-ajan ja varhaisen jälkikaiunta-ajan kanssa, mikä on hyvin nähtävissä kuvaajista. Engelin teatteri ja Seurahuoneen 2. vaiheen sali erottuvat muista saleista suuremmalla selvyydellään salien ollessa täynnä. Engelin teatterissa tämä johtuu suuremmasta absorptiomäärästä ja Seurahuoneen 2. salissa sivuttaissalongit hidastavat äänen saapumista kuulijalle, jolloin selvyys kasvaa.

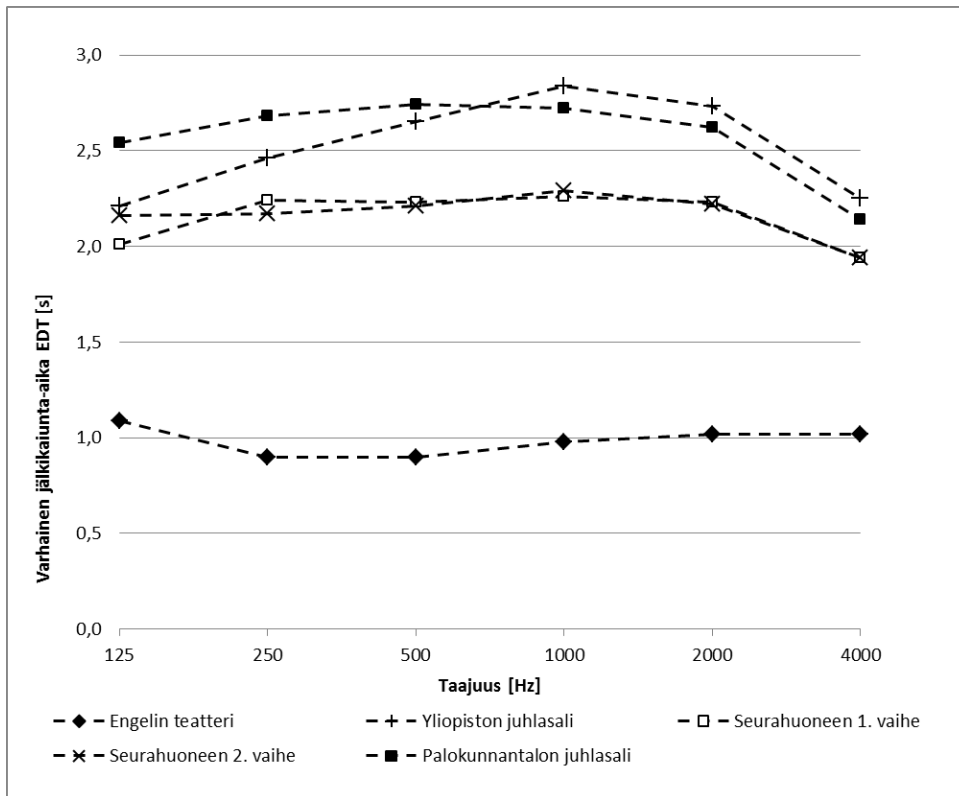
Kuvassa 30 on esitetty yliopiston juhlasalissa selvyys-parametrin piirretty verkko 1000 Hz oktaavikaistalla silloin, kun sali on täynnä yleisöä. Kuvasta nähdään kuinka suuria eroja eri paikkojen välillä on salissa. Kuvasta voidaan todeta, että ensimmäisen 80 ms aikana äänikenttä ei ole vielä tasaisesti jakautunut saliin. Beranekin mukaan kapellimestarien suosimat selvyys-arvot ovat harjoitustilassa 1 ja 5 dB välillä, mutta konsertin aikana -1 ja -4 dB välillä.<sup>184</sup> Tämä viittaa siihen että kuvassa salin oikealla puolella kuulokuva on täyteläisempi, kun taas lähempänä orkesterilavaa ja vasemmalla parvella se on huomattavasti erottelevampi.

---

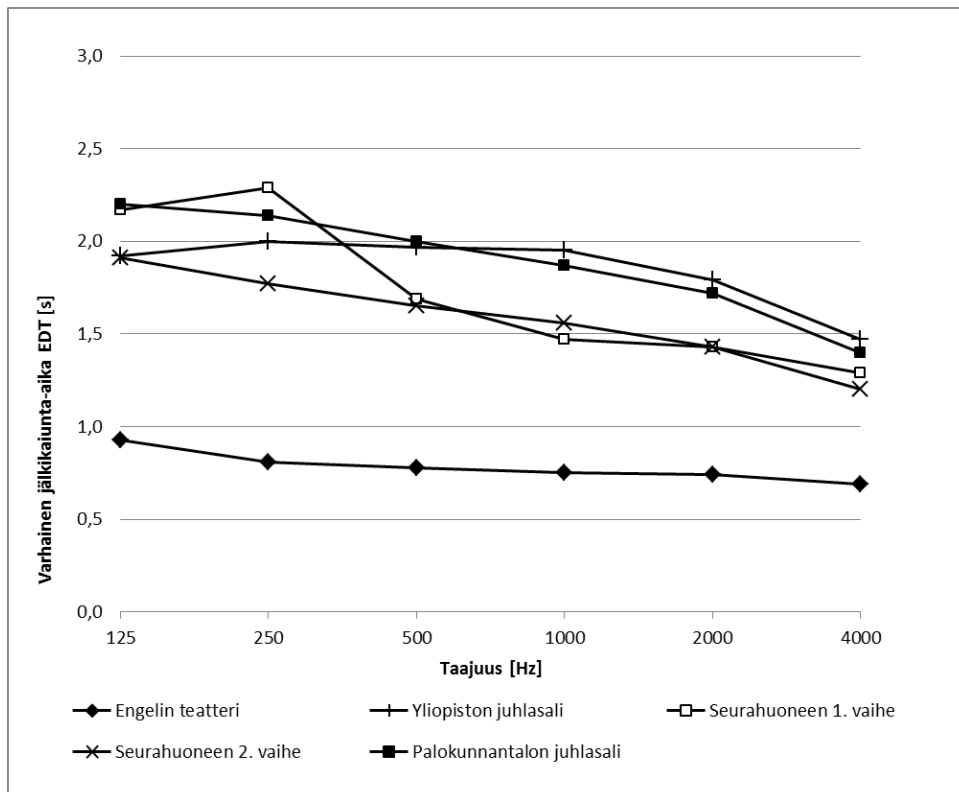
<sup>182</sup> Beranek 2002, s. 11.

<sup>183</sup> Baumann 2011, s. 102.

<sup>184</sup> Beranek 2002, s. 526–527.

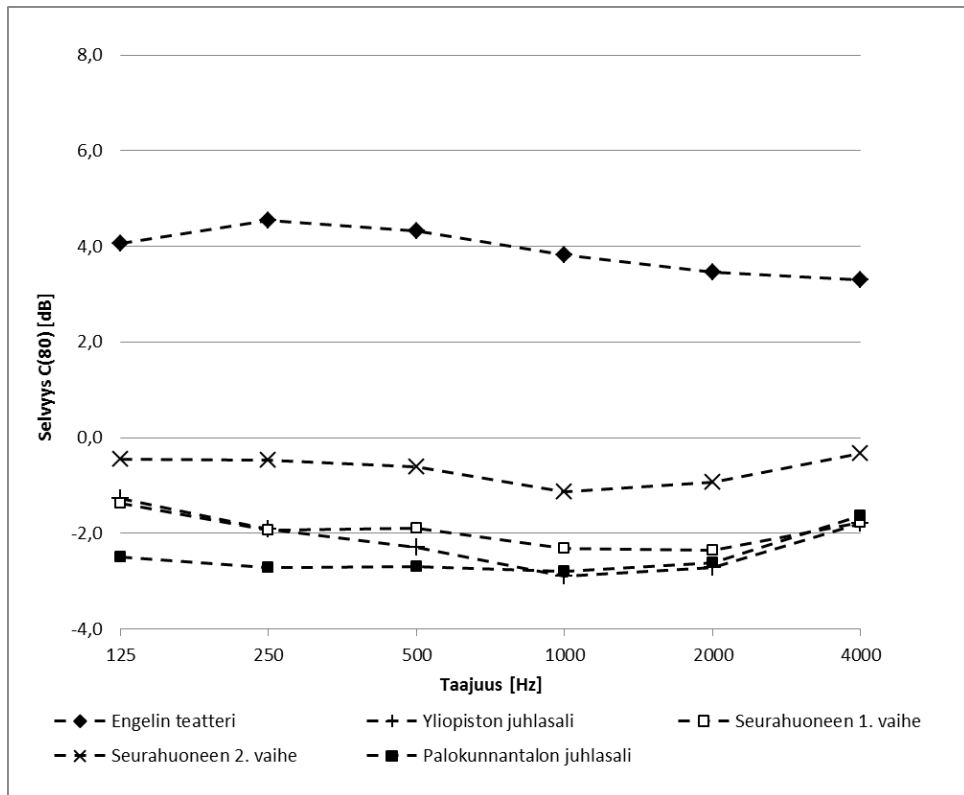


**Kuva 26.** Saleissa mallinnettujen varhaisten jälkikaiunta-aikojen keskiarvot niiden ollessa tyhjiä

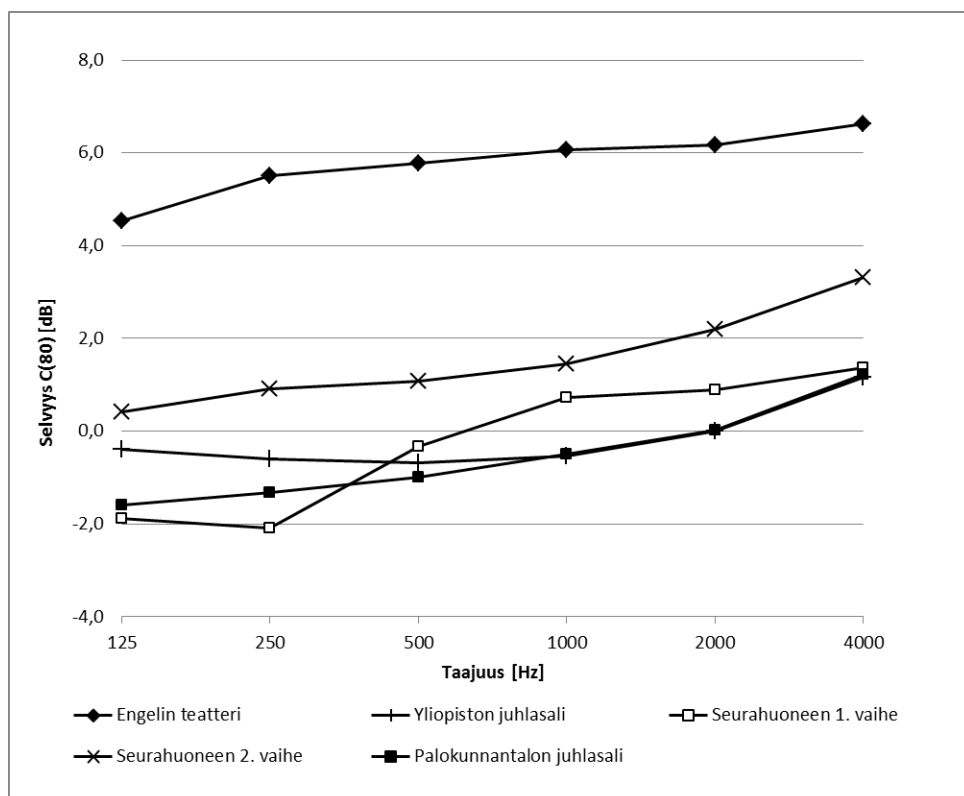


**Kuva 27.** Saleissa mallinnettujen varhaisten jälkikaiunta-aikojen keskiarvot niiden ollessa täynnä yleisöä

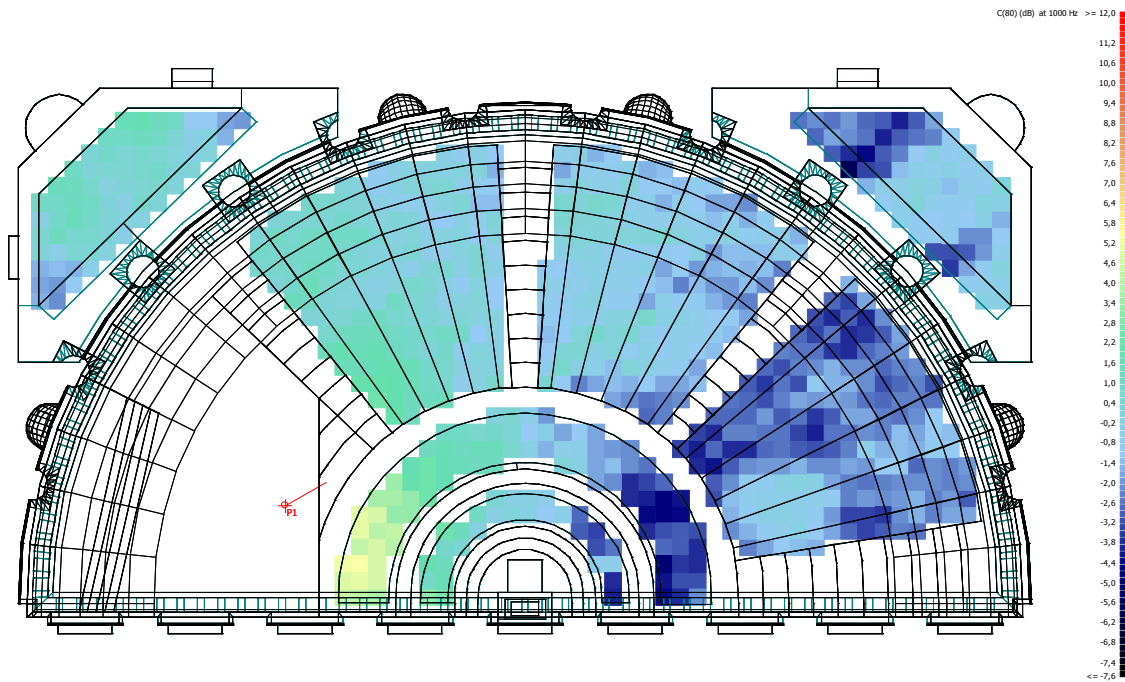




**Kuva 28.** Saleissa mallinnettujen selvyys-arvojen keskiarvot niiden ollessa tyhjiä



**Kuva 29.** Saleissa mallinnettujen selvyys-arvojen keskiarvot niiden ollessa täynnä yleisöä



**Kuva 30.** Selvyys  $C_{80}$  laskettuna 1000 Hz oktaavikaistalla yliopiston juhlasalissa

Kuvissa 31 ja 32 on esitetty oktaavikaistoittain salien yleisön alueella mallinnettujen voimakkuus-arvojen  $G$  keskiarvot silloin, kun salit ovat tyhjillään ja kun ne ovat täynnä yleisöä. Voimakkuuden spektri voi Barronin mukaan määrittää kuulijan vaikutelman salin äänenväristä. Suurempi voimakkuus pienillä taajuuksilla saa salin kuulostamaan lämpimältä, kun taas suurempi voimakkuus suurilla taajuuksilla koetaan äänen kirkkautena.<sup>185</sup> Beranekin mukaan parhaaksi luokitelluissa saleissa voimakkuus on 3 ja 7 dB välillä.<sup>186</sup>

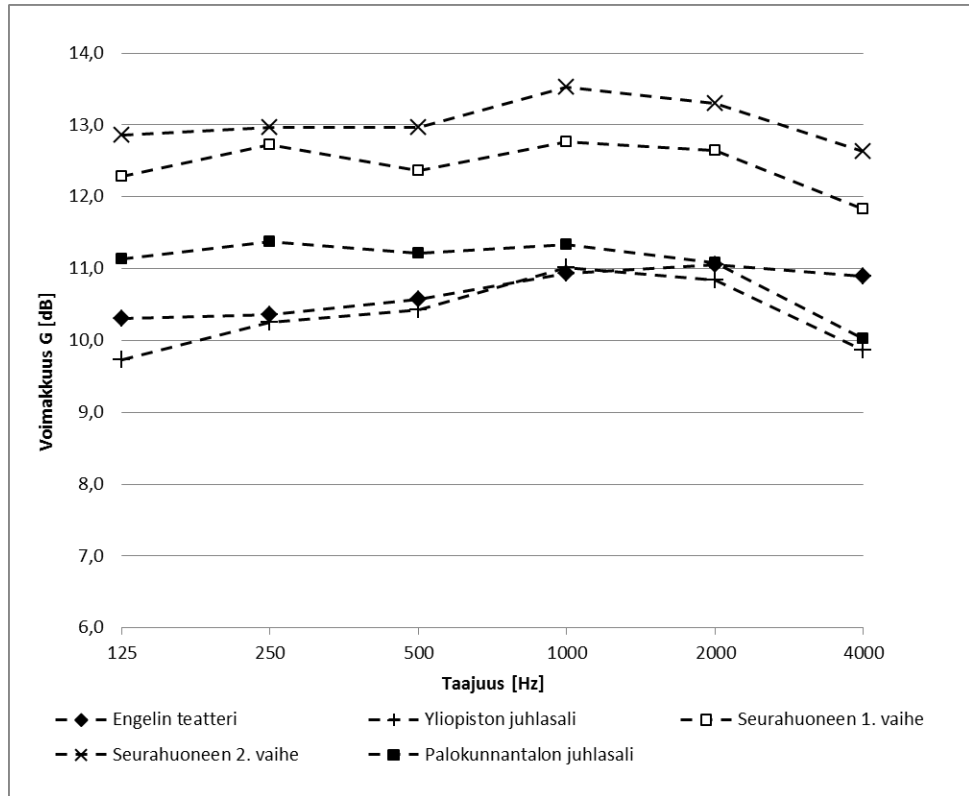
Kuvaajista nähdään, että voimakkuus-arvot ovat hyvin suuria verrattaessa mitattuihin konserttisaleihin, joiden voimakkuus on Beranekin mukaan eurooppalaisten tutkimusryhmien mittaamana keskitaajuuksilla 0–8 dB.<sup>187</sup> Barronin mukaan mitatut voimakkuus-arvot vaihtelevat konserttisaleissa 0–10 dB välillä.<sup>188</sup> Seurahuoneen 1. vaiheen sali on mallinnuksen perusteella ollut äänenväriältään hyvin lämmin, kun se on ollut täynnä yleisöä. Myös muissa saleissa voimakkuus painottuu yleisön kanssa pienille taajuuksille. Yleisön kanssa Seurahuoneen 2. salin voimakkuus on selkeästi muita saleja suurempi. Useimmissa saleissa voimakkuus on keskitaajuuksilla 8–10 dB alueella.

<sup>185</sup> Barron 2010, s. 69.

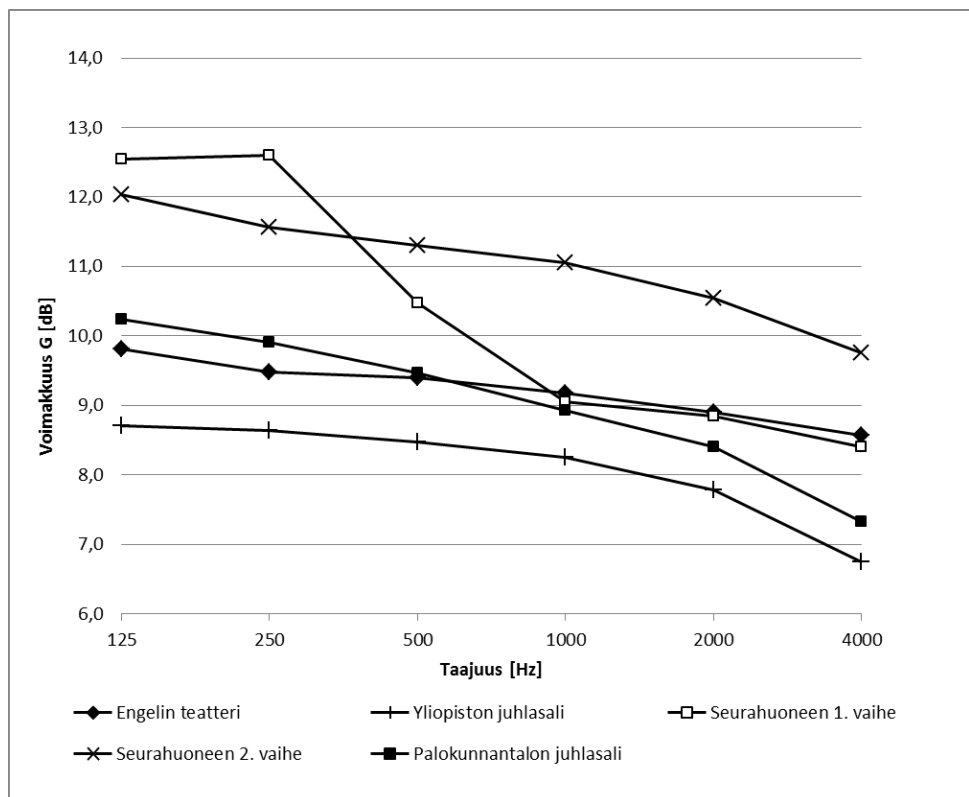
<sup>186</sup> Beranek 2003.

<sup>187</sup> Beranek 2003.

<sup>188</sup> Barron 2010, s. 69.

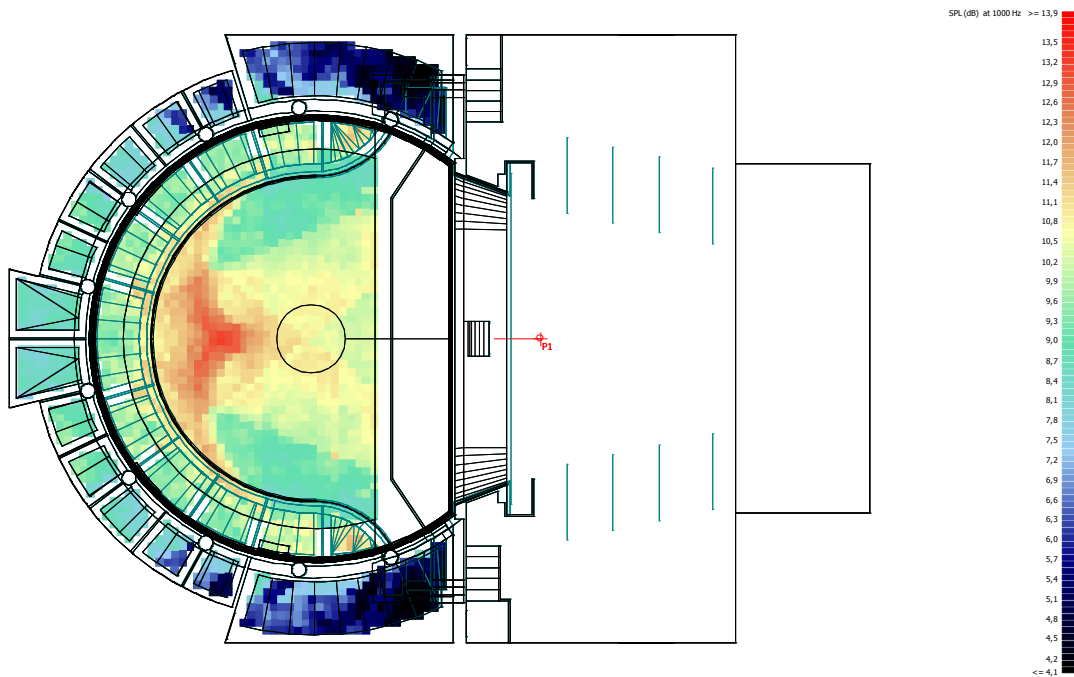


**Kuva 31.** Saleissa mallinnettujen voimakkuus-arvojen keskiarvot niiden ollessa tyhjiä



**Kuva 32.** Saleissa mallinnettujen voimakkuus-arvojen keskiarvot niiden ollessa täynnä yleisöä

Kuvassa 33 on esitetty Engelin teatterin voimakkuus-parametrin piirretty verkko 1000 Hz oktaavikaistalla silloin, kun sali on täynnä yleisöä. Kuvasta nähdään etunäyttämön seinistä ja teatterisalin pyöreistä seinistä tulevat heijastukset ja puoliympyrämuodon aiheuttama äänen fokusointi permannolle. Kaaren polttopisteessä voimakkuus on jopa 6 dB suurempi kuin permannon etuosan sivuilla, minne heijastukset eivät ylety. Salin kolmannen parven sivuilla ja näyttämön molemmilla puolilla sijaitsevilla aitoissa voimakkuus on merkittävästi huonompi.



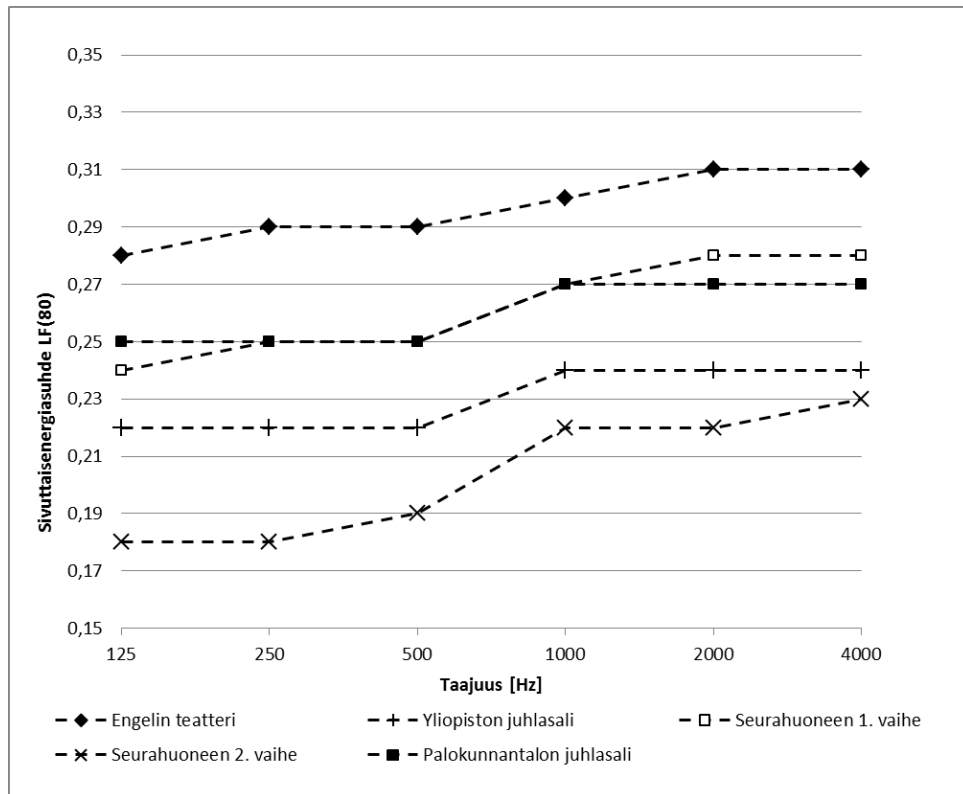
**Kuva 33.** Voimakkuus  $G$  laskettuna 1000 Hz oktaavikaistalla Engelin teatterissa

Kuvissa 34 ja 35 on esitetty oktaavikaistoittain salien yleisön alueella mallinnettujen sivuttaisenergiasuhteen  $LF_{80}$  keskiarvot silloin, kun salit ovat tyhjiä ja kun ne ovat täynnä yleisöä. Sivuttaisenergiasuhteet vaihtelevat 0,17–0,31 välillä. Suositellut sivuttaisenergiasuhteet ovat Beranekin mukaan 0,16–0,24 välillä<sup>189</sup> ja Barronin mukaan 0,10–0,35 välillä.<sup>190</sup> Sivuttaisenergiasuhde kuvaa kahta ilmiötä. Aikaiset sivuttaisheijastukset tuovat vaikutelman äänilähteen levenemisestä, kun taas myöhäiset sivuttaisheijastukset aiheuttavat tunteen, että musiikki ympäröi kuulijaa.<sup>191</sup>

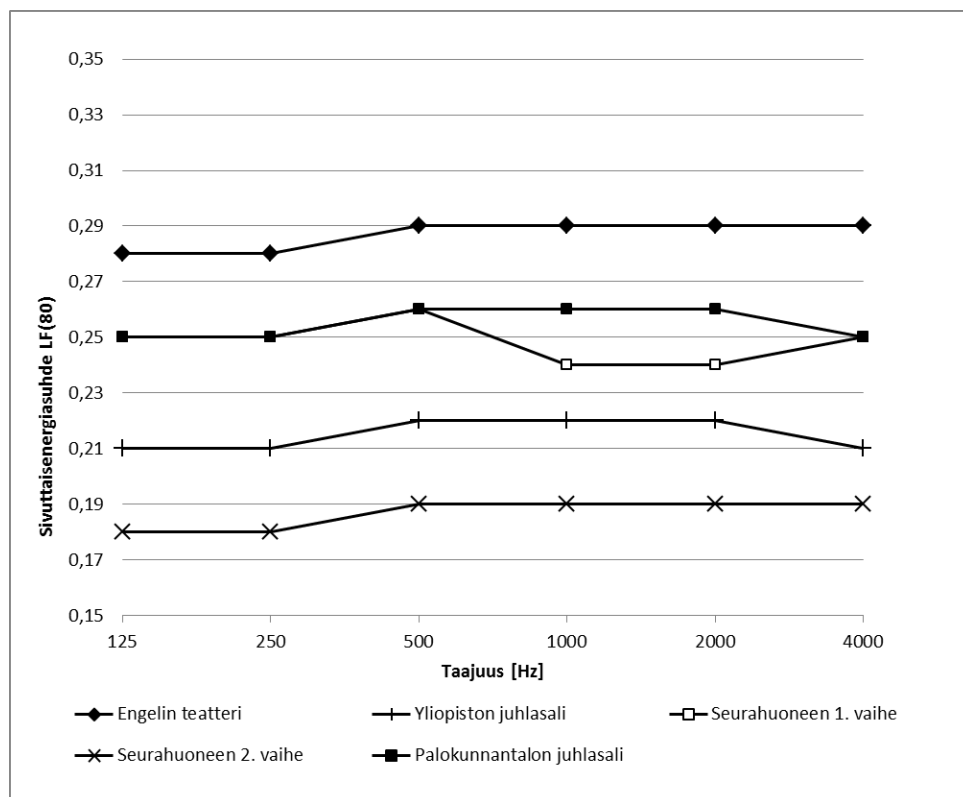
<sup>189</sup> Beranek 2002, s. 519–520.

<sup>190</sup> Barron 2010, s. 68.

<sup>191</sup> Barron 2010, s. 68.

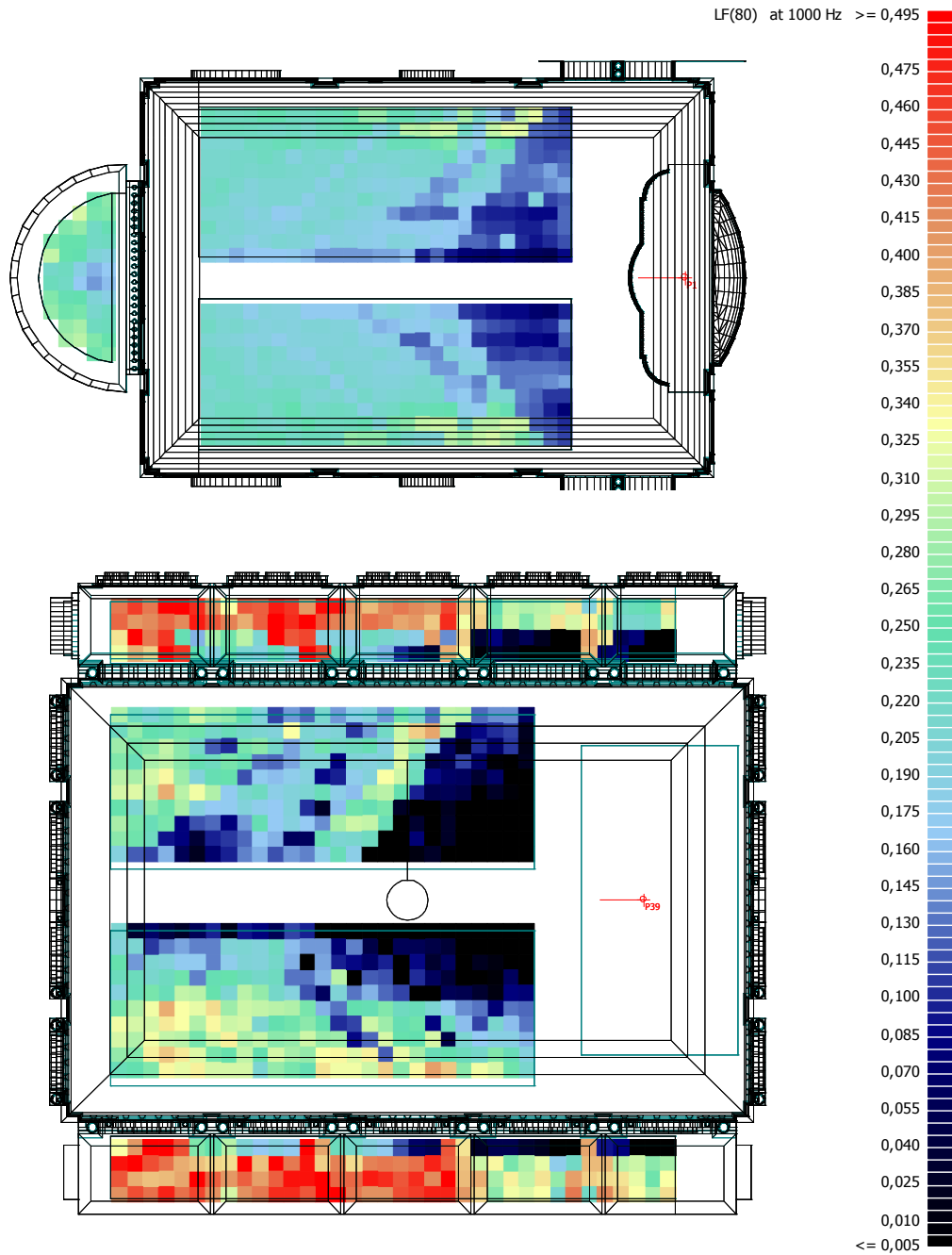


**Kuva 34.** Saleissa mallinnettujen sivuttaisenergiasuhteiden keskiarvot niiden ollessa tyhjiä



**Kuva 35.** Saleissa mallinnettujen sivuttaisenergiasuhteiden keskiarvot niiden ollessa täynnä yleisöä

Kuvassa 36 on esitetty Seurahuoneen 2. vaiheen salin ja Palokunnantalon salin sivuttaisenergiasuhteista piirretyt verkot 1000 Hz oktaavikaistalla silloin, kun salit ovat täynnä yleisöä. Salit eivät ole mittakaavassa. Kuvasta nähdään Seurahuoneen 2. vaiheen salin etuosassa tapahtuva sivuheijastusten väheneminen, koska ääni katoaa sivuttaissaloihin. Palokunnantalon salissa taas nähdään salin vasemmalta seinältä tulevien sivuheijastusten puute, koska heijastukset katoavat salin vasemman parven alla olevaan tilaan. Parvilla sivuheijastusten määrä on selkeästi suurempi, mutta koska kuulijat on aina suunnattu äänilähdettä päin, sivusuunnasta saapuva ääni on parvilla voimakkaasti toispuoleista.



**Kuva 36.** Sivuttaisenergiasuhte  $LF_{80}$  laskettuna 1000 Hz oktaavikaistalla Seurahuoneen 2. salissa (ylempi) ja Palokunnantalon salissa (alempi)

## 3 SALIEN AURALISOINTI

### 3.1 Auralisoinnin perusteet

Auralisointi on tekniikka jossa luodaan kuunneltavia äänitiedostoja simuloidusta tai mitatusta numeerisesta datasta.<sup>192</sup> Vorländer kuvaa auralisoinnin periaatetta kolmessa osassa: äänisignaalin luominen, äänen kulkeutuminen vastaanottajalle ja luodun äänisignaalin toisto kuulijalle.<sup>193</sup> Ensimmäiset kaksi vaihetta voidaan kuvata huoneakustiikassa lähetys- ja vastaanottopisteen välisellä impulssivasteella, jota käsitellään kohdassa 2.1.1. Impulssivaste sisältää kaiken informaation siitä kuinka signaali, joka toistetaan tietyllä suuntaavuuden omaavasta lähteestä, kulkee tilassa vastaanottopisteeseen. Auralisointeja luodaan yhdistämällä herätesignaali ja impulssivaste konvoluutioksi kutsutun prosessin kautta.

#### 3.1.1 Konvoluutio

Huttusen mukaan konvoluutio tarkoittaa signaalinkäsittelyssä esitystapaa lineaariselle siirtainvariantille (linear time-invariant, LTI) järjestelmälle, jossa kaikki järjestelmän ominaisuudet määräytyvät impulssivasteen kautta.<sup>194</sup> Akustiikassa ääntä välittävät järjestelmät voidaan lähes aina kuvata likimääräisesti LTI-järjestelmillä.<sup>195</sup> Jos tunnetaan LTI-järjestelmän impulssivaste  $h(t)$ , järjestelmän vaste  $y(t)$  mielivaltaiselle herätteelle  $x(t)$  voidaan esittää impulssivasteen ja herätteen konvoluutiona kaavan (6) mukaan.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Kaavan (6) konvoluutiosta käytetään merkintää  $y(t) = x(t) * h(t)$ . Konvoluutiossa peilattu impulssivaste  $h(-\tau)$  siirtyy  $\tau$ -akselia pitkin kun  $t$ :n arvoa kasvatetaan. Vaste  $y(t)$  lasketaan integroimalla siirtyvän impulssivasteen tulo herätesignaalin kanssa  $\tau$ :n suhteen jokaisella  $t$ :n arvolla.<sup>196</sup>

#### 3.1.2 Herätesignaali

Huoneakustiikan tutkimuksessa herätesignaalina voidaan käyttää nauhoitettua musiikkia. Koska tilan ominaisuudet sisältyvät impulssivasteeseen, herätesignaalin ei tulisi olla lainkaan tilan tuomaa kaiuntaisuutta. Tämän takia herätesignaalina käytetään tyypil-

<sup>192</sup> Vorländer 2008, s. 3.

<sup>193</sup> Vorländer 2008, s. 103–104.

<sup>194</sup> Huttunen 2014, s. 20.

<sup>195</sup> Vorländer 2008, s. 106.

<sup>196</sup> Huttunen 2014, s. 20–22 & 134; Vorländer 2008, s. 107–110.

lisesti kaiuttomassa huoneessa äänitettyjä musiikinäytteitä.<sup>197</sup> Sinfoniaorkesteri voidaan simuloida käyttämällä vain yhtä impulssivastetta, jolloin koko orkesterin soitto tallennetaan yhdellä signaalilla.

Rindelin esittelemässä yksikanavaisessa monilähdemenetelmässä jokaisesta orkesterin soittimesta tallennetaan erikseen kaiuton ääninäyte. Tämän jälkeen jokainen orkesterin soitin mallinnetaan erillisenä lähteenä ja jokaisesta lähteestä lasketaan impulssivasteet yhteen kuulijaan. Soittimien ääninäytteet konvoloidaan tämän jälkeen vastaavien impulssivasteiden kanssa. Kun eri konvoluutiot yhdistetään, saadaan lopputuloksena auralisointi kokonaisesta sinfoniaorkesterista.<sup>198</sup> Impulssivasteiden simuloinnissa eri lähteille voidaan asettaa suuntaavuuskuvio, joka vastaa lähteen esittämää soitinta.

Todellisuudessa soittimien suuntaavuus on dynaaminen ilmiö, joka muuttuu soitetun äänen mukaan erityisesti puupuhaltimissa.<sup>199</sup> Vigeant et al. esittelemässä monikanava-monilähdemenetelmässä soittimet äänitetään usealla eri suuntiin asetetuilla mikrofonilla, jotka tallentavat kaiuttoman signaalin usealle kanavalle. Tämän jälkeen soitinta esittävä lähde jaetaan tasaisiin osiin, siten että yksi osa lähteestä vastaa tiettyä kanavaa ja säteilee ääntä ainoastaan kanavaa vastaavaan suuntaan. Kuuntelukokeissa monikanavaisuus ei ole tuottanut huomattavaa parannusta auralisoinnin laatuun.<sup>200</sup>

### 3.1.3 Binauraalinen impulssivaste

Ihmisen kuulo on binauraalista, eli se toimii kahdella korvalla. Ihmiset pystyvät paikallistamaan äänilähteen suunnan eri korvakäytäviin saapuvien ääniaaltojen amplitudi- ja aikaeroista. Erot johtuvat korvien välisestä etäisyydestä ja äänen taipumisesta pään ympäri.<sup>201</sup> Jotta äänilähteen paikallistaminen olisi mahdollista auralisoinneissa, ne on toistettava binauraalisesti.

Huoneakustisessa mallinnuksessa muodostettu impulssivaste ei sellaisenaan sovellu binauraaliseen äänentoistoon. Konvoluutiota varten tarvitaan kaksikanavainen binauraalinen huoneimpulssivaste (binaural room impulse response, BRIR). Binauraalinen huoneimpulssivaste muodostetaan histogrammista samalla tavalla kuin impulssivaste, mutta heijastukset suodatetaan pään siirtofunktion (head-related transfer function, HRTF) kautta, jolloin saadaan impulssivasteet molempien korvakäytävien kohdalla.<sup>202</sup>

HRTF muodostetaan mittaamalla äänenpaine tärykalvon tai korvakäytävän suun kohdalta, ja jakamalla se pään keskeltä mitatulla äänenpaineella. Funktio on riippuvainen saa-

<sup>197</sup> Rindel 2004.

<sup>198</sup> Rindel & Christensen 2008.

<sup>199</sup> Pätynen & Lokki 2010a.

<sup>200</sup> Vigeant et al. 2008.

<sup>201</sup> Vorländer 2008, s. 86–87.

<sup>202</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 84.



puvan äänen suunnasta.<sup>203</sup> Odeoniin on asennettu KEMAR -keinopäällä mitattu HRTF, joka on mitattu korvakäytävän suulla ja tärykalvon kohdalla.<sup>204</sup> HRTF riippuu pään anatomia ja on jokaiselle ihmiselle yksilöllinen. Odeonin käyttämässä keinopäällä mitatussa HRTF:ssä paikallistamisominaisuuksia on parannettu ja lähteen paikallistaminen on mahdollista ilman merkittävää äänen värin muutosta.<sup>205</sup> HRTF:n mittaaminen on kuvattu tarkemmin lähteessä<sup>206</sup>

## 3.2 Orkesterin mallintaminen

### 3.2.1 Kaiuttomat ääninäytteet

Tutkimuksessa luodut auralisoinnit luotiin monilähdemenetelmällä, eli jokainen orkesterin soitin mallinnettiin omana lähteenään ja jokaisesta lähteestä laskettiin binauraalinen impulssivaste haluttuun vastaanottopisteeseen. Orkesterin mallintamisessa lähtökohdaksi valittiin sinfoniaorkesteri. Auralisoinnit luotiin ainoastaan saleista joissa on yleisö.

Jotta auralisoinnit olisivat historiallisesti uskottavia, kaiuttomat ääninäytteet valittiin teoksista, jotka olivat olemassa silloin, kun salit olivat konserttikäytössä. Pätynen et al.<sup>207</sup> ovat Aalto-yliopistolla tehneet kaiuttomia ääninäytteitä sinfonisesta musiikista. Äänitettyihin teoksiin kuului Donna Elviran aaria Mozartin (1756–1791) oopperan Don Giovanni 2. näytöksestä sekä katkelma Beethovenin (1770–1827) 7. sinfonian ensimmäisen osan alusta.

Beethovenin 7. sinfonian nuotit on hankittu Suomeen vuonna 1822<sup>208</sup> ja Marvian mukaan sitä on varmasti esitetty Helsingissä ennen vuotta 1863.<sup>209</sup> On myös viitteitä siihen, että sinfoniaa oli esitetty Paciuksen Sinfoniayhdistyksen toimesta jo ennen 1850-lukua.<sup>210</sup> Helsingin kaupunginorkesteri ja sen edeltäjät ovat esittäneet sinfonian yliopiston juhlasalissa 25 kertaa ennen juhlasalin tuhoutumista vuonna 1944.<sup>211</sup> Vuonna 1936 Helsingin yliopistossa tehdyn tutkielman mukaan Mozartin Don Giovanni esitettiin Engelin teatterissa vuosien 1840–1856 välillä ainakin 10 kertaa.<sup>212</sup> Näiden tietojen perusteella Engelin teatteriin valittiin auralisointia varten Mozartin Don Giovanni ja muihin saleihin Beethovenin 7. sinfonia.

---

<sup>203</sup> Vorländer 2008, s. 87.

<sup>204</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 67.

<sup>205</sup> Rindel & Christensen 2009.

<sup>206</sup> Algazi et al. 2001.

<sup>207</sup> Pätynen et al. 2008.

<sup>208</sup> Dahlström & Salmenhaara 1995, s. 294.

<sup>209</sup> Marvia et al. 1993, s. 15–17.

<sup>210</sup> Dahlström & Salmenhaara 1995, s. 340.

<sup>211</sup> Helsingin kaupunginorkesterin konsertit 2013.

<sup>212</sup> Sola 1936, liitteet 1 ja 2.

Koska salien auralisoinnit tehtiin monilähdemenetelmällä, teoksista tarvittiin erilliset kaiuttomat äänitteet jokaisesta soittimesta. Aalto-yliopiston tekemissä ääninäytteissä jokainen teos äänitettiin ensin pianistin kanssa, joka seurasi kapellimestaria ja soitti teoksen partituurista. Kapellimestari videoitiin ja pianistin soitto äänitettiin. Sekä kuva, että ääni toistettiin yksitellen muusikoille kaiuttomassa huoneessa kuulokkeiden avulla, jolloin he pystyivät soittamaan osionsa katsomalla videota kapellimestarista ja kuuntelemalla pianistia. Näytteet äänitettiin 22 mikrofoniolla, jotka asetettiin soittajan ympärille. Alkuperäiset äänitteet ovat 22-kanavaisia ja soveltuvat myös auralisointiin monikanavamenetelmällä.<sup>213</sup> Odeon-ohjelma sisältää tietokannan kaiuttomista ääninäytteistä, joihin on sisällytetty nämä äänitteet.<sup>214</sup> Näytteet on miksattu yksikanavaisiksi wavetiedostoiksi, joten ne soveltuvat ainoastaan yksikanavaisella monilähdemenetelmällä tehtyihin auralisointeihin.

### 3.2.2 Orkesterien kokoonpanot

Orkesterin soittajien määrä perustuu teoksen vaatimaan soittimien määrään sekä orkesterin kokoon. Orkesterimusiikissa puhallin- ja lyömäsoittimet soittavat tyypillisesti jokainen omaa stemmaansa, kun taas eri jousisektiot soittavat omia stemmojaan ryhmässä. Tutkimuksessa on oletettu, että konserttitilanteessa on saatavilla ollut täysi orkesteri, eli jokaista stemmaa varten on soittaja. Samalla on myös oletettu että puhallin- ja lyömäsoittimissa on ainoastaan 1 soittaja stemmaa kohti. Puhallin- ja lyömäsoittimien määrä voidaan siten tarkistaa teoksen partituurista. Beethovenin 7. sinfonian puhallin- ja lyömäsoitinsektioissa on kaikissa saleissa 13 soittajaa. Donna Elviran aariassa on orkesterin lisäksi myös laulusolisti, joten jousisoittimien lisäksi teoksessa on partituurin mukaan 6 soittajaa.

1800-luvun Helsingissä orkesterien koot ovat olleet pienempiä, kuin samaan aikaan Euroopassa.<sup>215</sup> Kuvassa 37 on esitetty sinfoniaorkesterien soittajien lukumäärän kehitys Helsingissä ja Euroopassa. Kuvaajasta nähdään että Helsingissä toimivien orkesterien palkattujen soittajien lukumäärä on 1800-luvun aikana ollut suurimmaksi osaksi alle 40 henkilöä. Sinfoniaorkesterin istumajärjestyksessä on 1800-luvulla ollut yleisesti tapana järjestää I- ja II-viulut eri puolille orkesterilavaa.<sup>216</sup> Alttoviulut sijoitettiin yleensä näiden kahden viuluryhmien väliin.<sup>217</sup> Sellojen ja bassojen sijoittelu vaihteli orkesterikohtaisesti, mutta ne sijoitettiin yleensä muiden jousien taakse, joko keskelle tai orkesterin reunoille.<sup>218</sup> Ooppera-orkesterin istumajärjestykselle ei ollut 1800-luvulla Euroopassa yhtä vakiintunutta asetelmaa, kuten Kouryn kokoamista istumajärjestyksistä ilmenee.<sup>219</sup> Mallinnusta varten orkesteri aseteltiin useissa oopperoissa olevan käytännön mukaan

<sup>213</sup> Pätynen et al. 2008.

<sup>214</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 7.

<sup>215</sup> Niemi 2014.

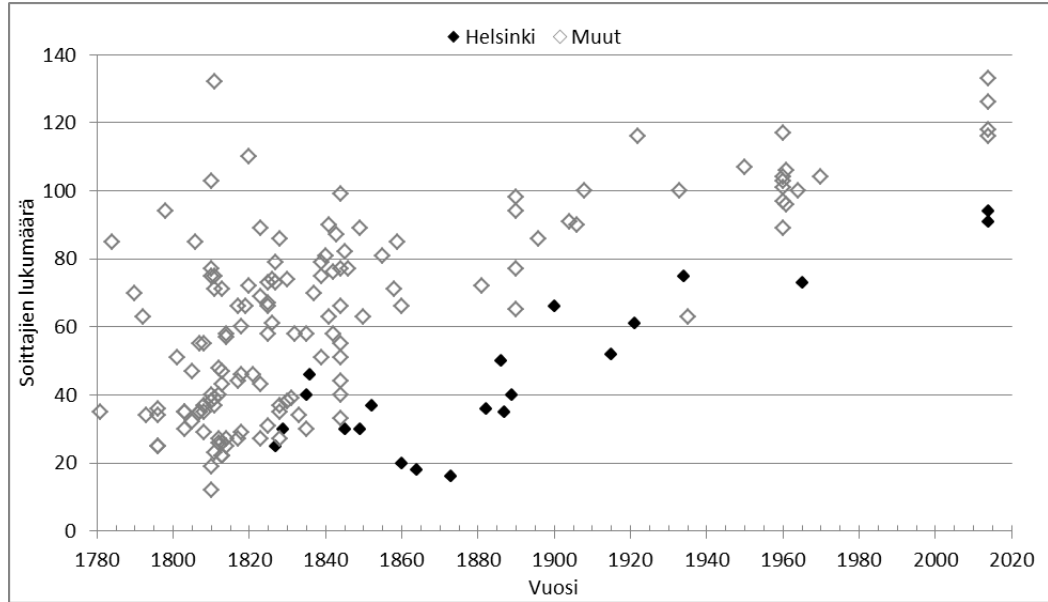
<sup>216</sup> Koury 1981, s. 49 & 182; Meyer 2009, s. 264.

<sup>217</sup> Koury 1981, s. 220.

<sup>218</sup> Koury 1981, s. 189–190 & 193–194.

<sup>219</sup> Koury 1981, kuvat, s. 249–273.

siten, että jouset ja puhaltimet olivat eri puolella, ja myös siten, että kapellimestari on orkesterin ja näyttämön välissä, katse näyttämölle päin. Istumajärjestyksissä esiintyvien soittimien lyhenteet on selitetty liitteessä 5. Eri saleihin mallinnettujen orkesterien soittajien lukumäärä on esitetty taulukossa 19.



**Kuva 37.** Sinfoniaorkesterien soittajien lukumäärän kehitys Euroopassa 1800-luvulla. Tummat pisteet esittävät helsinkiläisiä orkestereita. kovalähde: Niemi 2014.

**Taulukko 19.** Mallinnettujen orkesterien koot eri saleissa

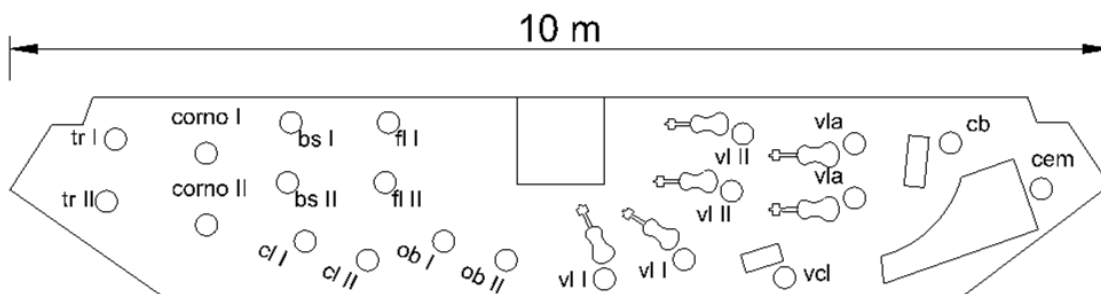
Soitin	Engelin teatteri	Yliopiston juhlasali	Seurahuoneen 1. vaihe	Seurahuoneen 2. vaihe	Palokunnan-talon juhlasali
1. viulu	2	10	4	6	6
2. viulu	2	10	4	4	6
alttoviulu	2	6	4	2	2
sello	1	6	4	2	4
kontrabasso	1	5	2	2	3
huilu	1	2	2	2	2
oboe	-	2	2	2	2
klarineti	1	2	2	2	2
fagotti	1	2	2	2	2
käyrätorvi	2	2	2	2	2
trumpetti	-	2	2	2	2
patarummut	-	1	1	1	1
sopraano	1	-	-	-	-
yht.	14	50	31	29	38

## Engelin teatteri

Fredrik Paciuksen oopperan Kaarle-kuninkaan metsästys ensiesitys pidettiin Engelin teatterissa 24.3.1852. Oopperan orkesterin soittajat tunnetaan soitinkohtaisesti, minkä perusteella on mahdollista muodostaa käsitys käytetyn jousiston koosta. Orkesterissa oli yhteensä 37 henkeä ja se sisälsi 4 I-viulua, 4 II-viulua, 4 alttoviulua, 4 selloa ja 2 bassoa.<sup>220</sup>

Engelin teatterissa on esitetty lukuisia oopperoita ulkomaisten kiertävien seurueiden toimesta.<sup>221</sup> Solan mukaan Don Giovannia ovat esittäneet Engelin teatterissa muun muassa Mohrin (1840), Hornicken (1841), Gehrmanin (1850), Fassin (1853) ja Schramekin (1856) seurueet.<sup>222</sup> Gehrmanin orkesteriin kuului 10–16 soittajaa ja sitä moitittiin sen pienuuden takia.<sup>223</sup> Fass ei itse tuonut orkesteria mukanaan, vaan palkkasi Carl Ganzaugenin johtaman paikallisen kylpyläyhtyeen orkesterin,<sup>224</sup> jonka tiedetään koostuvan 12 muusikosta.<sup>225</sup> Schramekin seurueen orkesteria taas kehitettiin suurempana ja täydellisempänä kuin mitään aikaisempia teatteriorkestereita.<sup>226</sup> Schaumannin mukaan Gehrmanin koko seurue koostui yhteensä 70 henkilöstä.<sup>227</sup> Näiden tietojen perusteella on mallinnettu orkesteri, joka on mahdollisesti voinut soittaa Don Giovannia Engelin teatterissa.

Tunnettujen orkesterien perusteella on teatteriin valittu kokoonpano, joka on esitetty kuvassa 38. Vaikka Donna Elviran aariassa on ainoastaan 1 huilu, 1 klarinetti, 1 fagotti ja 2 käyrätorvea, istumajärjestys on valittu siten, että monttuun mahtuu koko oopperaan tarvittava orkesteri. Odeoniin on kuitenkin mallinnettu ainoastaan Donna Elviran aariassa vaaditut soittimet.



**Kuva 38.** Engelin teatteriin mallinnetun orkesterin istumajärjestys

<sup>220</sup> Koivisto 2006, s. 143.

<sup>221</sup> Sola 1936, s. 2.

<sup>222</sup> Sola 1963, liitteet 1 ja 2.

<sup>223</sup> Sola 1936, s. 43–51.

<sup>224</sup> Morgonbladet 14.7.1853; Sola 1936, s. 55.

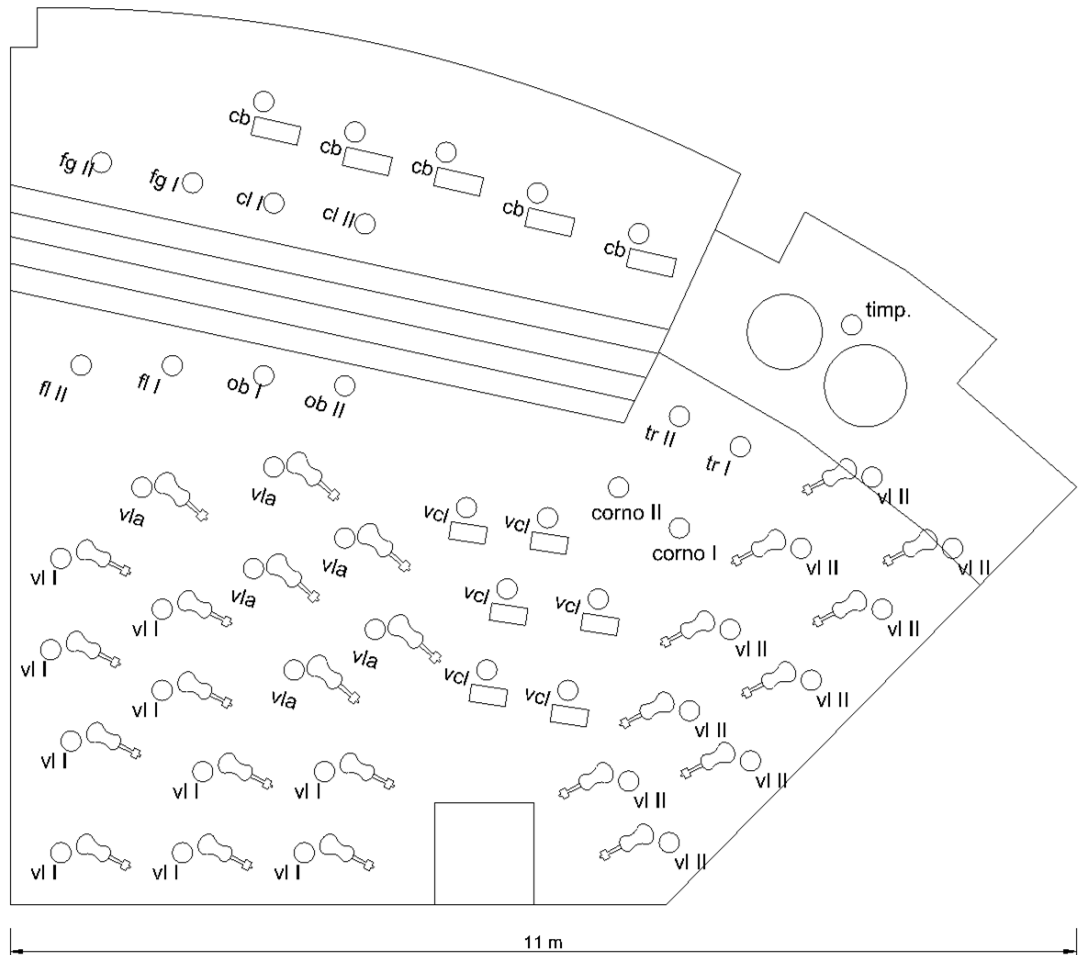
<sup>225</sup> Lappalainen 1994, s. 31.

<sup>226</sup> Helsingfors Tidningar 4.6.1856, teoksessa: Sola 1936, s. 60.

<sup>227</sup> Schaumann 1922, s. 226.

## Yliopiston juhlasali

Yliopiston juhlasalissa vuonna 1921 otetussa valokuvassa<sup>228</sup> näkyy Helsingin kaupunginorkesterin istumajärjestys ja soittajien lukumäärä. Yliopiston juhlasalin orkesteri mallinnettiin tämän valokuvan perusteella. Mallinnettu orkesteri on esitetty kuvassa 39.



**Kuva 39.** Yliopiston juhlasaliin mallinnetun orkesterin istumajärjestys

## Seurahuone

Seurahuoneen 1. ja 2. vaiheen salien orkestereista ei ole valokuvia, joten istumajärjestykset on päätelty yliopiston ja palokunnantalon valokuvien sekä 1800-luvun istumakäytäntöjen perusteella. Seurahuoneen 1. vaiheen salissa järjestettiin sinfoniakonsertteja muun muassa Fredrik Paciuksen, Rudolf Lagin ja Philip von Schantzin toimesta.<sup>229</sup> Paciuksen oopperaorkesterin jousiston koko vuodelta 1852 tunnetaan tarkasti,<sup>230</sup> joten sitä käytettiin Seurahuoneen 1. salin orkesterissa. Istumajärjestys mallinnettiin samalla tavalla kuin yliopiston juhlasalin orkesterissa. Seurahuoneen 1. vaiheen saliin mallinnettu orkesteri on esitetty kuvassa 40.

<sup>228</sup> Marvia et al. 1993 kuvaliite: Helsingin kaupunginorkesteri yliopiston juhlasalissa 1921.

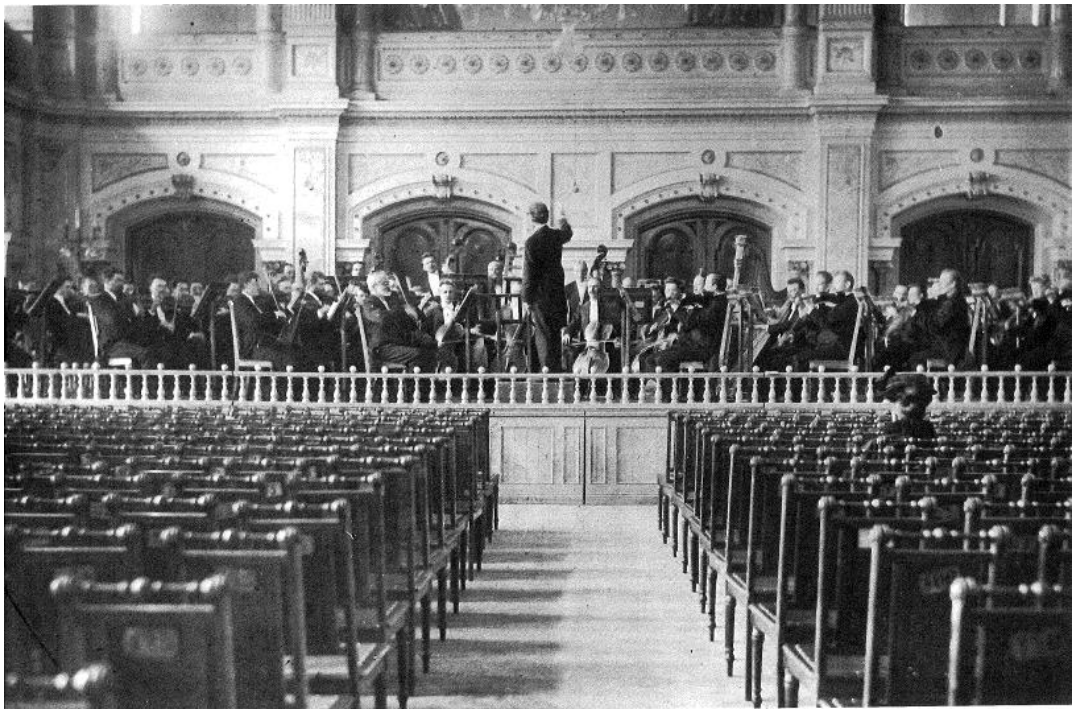
<sup>229</sup> Lappalainen 1994, s. 25–38.

<sup>230</sup> Koivisto 2006, s. 143.



### Palokunnantalo

Palokunnantalon salista on olemassa kuvassa 42 esitetty valokuva Helsingin filharmonisen seuran harjoituksista vuonna 1900 orkesterin Pariisin matkaa varten.<sup>234</sup> Kuvasta nähdään, että viulut sijaitsevat eri puolilla lavaa, sellot keskellä edessä ja bassot takana. Toisesta kuvasta, joka on otettu samasta orkesterista Pariisin maailmannäyttelyssä,<sup>235</sup> nähdään että puupuhaltimet sijaitsevat yleisöstä katsottuna vasemmalla puolella ja vasikipuhaltimet oikealla. Marvia et al. ovat teoksessaan rekonstruoinut kyseisen orkesterin soittajien lukumäärän.<sup>236</sup> Koska orkesteriin oli palkattu matkaa varten ulkopuolisia soittajia,<sup>237</sup> orkesterin jousien lukumäärää pienennettiin hieman mallinnuksessa. Orkesterin istumajärjestys on mallinnettu palokunnantalon salissa kuvan 43 mukaisesti.



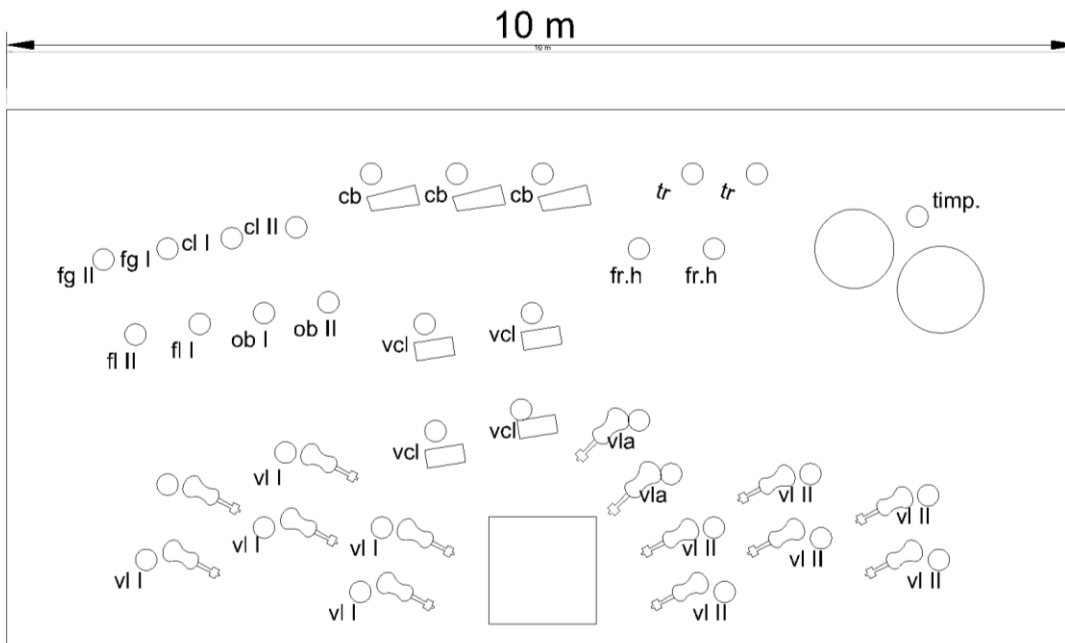
**Kuva 42.** *Palokunnantalo*on mallinnetun orkesterin istumajärjestys, kuvalähde: HKM

<sup>234</sup> Kuva N10657, 1900, kuvakokoelmat (HKM).

<sup>235</sup> Marvia et al. 1993 kuvaliite: Helsingin filharmonisen seuran orkesteri Pariisin maailmannäyttelyssä 1900.

<sup>236</sup> Marvia et al. 1993, s. 260.

<sup>237</sup> Marvia et al. 1993, s. 259.



**Kuva 43.** Palokunnantaloon mallinnetun orkesterin istumajärjestys

### 3.2.3 Lähteiden ominaisuudet

Monilähdemenetelmää käyttäessä lähteet voidaan mallintaa joko ympärisäteilevänä, tai niille voidaan määrittää suuntaavuuskuvio.<sup>238</sup> Aalto-yliopistolla on kaiuttomien ääni-  
näytteiden tekemisen yhteydessä mitattu orkesterisoittimien suuntaavuuksia,<sup>239</sup> joita  
käytettiin tässä tutkimuksessa eri soittimien suuntaavuuksina. Suuntaavuudet on muun-  
nettu Odeonin tukemaan CLF (Common loudspeaker format) -muotoon lähteen<sup>240</sup> mu-  
kaisesti.

Lähteet sijoitettiin 1,2 metriä esiintymislavan yläpuolelle, ja ne suunnattiin kohti kapel-  
limestarin oletettua sijaintia. Yksi pistelähde edusti yhtä soitinta ja lähteet sijoitettiin  
kohdassa 3.2.1. esitettyjen istumajärjestysten mukaan eri saleihin. Engelin teatterissa  
lavalle näyttämöllä solistia kuvaava lähde asetettiin 1,5 m lavan yläpuolelle.

## 3.3 Auralisointien luominen

### 3.3.1 Binauraalisten impulssivasteiden luominen

Lähteiden asettelun jälkeen jokaisessa salissa laskettiin Odeonilla binauraaliset impuls-  
sivasteet jokaisesta lähteestä 2 vastaanottopisteeseen yleisön alueella ja yhteen vastaan-  
ottopisteeseen kapellimestarin kohdalla. Kuvat auralisointipisteistä on esitetty  
liitteessä 6. Binauraalinen impulssivaste luotiin käyttämällä KEMAR-keinopäällä mitat-  
tua HRTF:ää. Impulssivasteet sisälsivät näin lähteen suuntaavuuden. Impulssivasteen

<sup>238</sup> Vigeant et al. 2008.

<sup>239</sup> Pätynen & Lokki 2010a.

<sup>240</sup> Pätynen 2009.



laskenta on kuvattu yksityiskohtaisesti kohdassa 2.1.3. Binauraaliset impulssivasteet saadaan suodattamalla jokainen vastaanottopisteeseen saapunut heijastus HRTF:n kautta, jolloin ne muodostavat impulssivasteet oikean ja vasemman korvan kohdalla. HRTF otettiin ODEONin valmiiden HRTF:ien listasta, jotka on saatu University of Californian CIPIC HRTF Database -tietokannasta. Käytetty HRTF (Subject\_021) on mitattu Kemarkeinopäällä. Samalla päällä on mitattu kaksi HRTF:ää: toinen korvakäytävän aukolla, ja toinen korvakäytävän juuressa, tärykalvon kohdalla.<sup>241</sup> Tässä tutkimuksessa käytettiin korvakäytävän aukon kohdalla (tukituilla korvakäytävällä) mitattuja HRTF:iä. Odeonissa on myös mahdollista määrittää kuulokkeiden valmistaja ja tyyppi, jolloin ohjelma suodattaa impulssivasteen kuulokkeiden käänteisen taajuusvasteen läpi. Näin ohjelma kompensoi kuulokkeiden aiheuttamia muutoksia äänenväriin. Tässä tutkimuksessa auralisoinnit luotiin Sennheiser HD 600 ja Bayer Dynamic DT 990 -kuulokkeille.

Auralisointipisteet valittiin yleisön alueelta sellaisista paikoista, joissa akustiset olosuhteet erosivat toisistaan mahdollisimman paljon. Tarkoituksena oli saada käsitys salin eri paikoilla olevista eroista. Paikat valittiin kohdassa 2.6 esitettyjen grid-tulosten perusteella. Auralisoinnit luotiin myös vastaanottajapisteeseen kapellimestarin kohdalle. Engelin teatterissa valittiin paikat permannolta, ja 2. parvelta. Yliopiston salissa valittiin kaksi paikkaa permannolta alueilta, joissa selvyys ( $C_{80}$ ) ja sivuttaisenergiasuhde ( $LF_{80}$ ) erosivat toisistaan eniten. Seurahuoneen molemmissa saleissa oletettiin että yleisö istui pääasiassa salin lattiatasolla, eikä parvella ollut kuulijoita. Tästä syystä molemmissa saleissa valittiin auralisointeja varten yksi vastaanottopiste salin edestä ja yksi salin takaa. Palokunnantalossa yleisön tiedetään istuneen parvella joten sieltä valittiin yksi paikka parvelta ja yksi permannolta läheltä orkesteria. Liitteessä [6] on esitetty kuvat jokaisesta auralisointipisteestä.

### 3.3.2 Signaalien konvoluutio ja miksaus

Odeonissa vasteiden simulointi, konvoluutio ja miksaus on integroitu yhtenäiseen käyttöjärjestelmään. Ensin jokaisesta lähteestä simuloitu binauraalinen impulssivaste konvoloidaan yksikanavaisen herätesignaalin kanssa. Kaikki yhteen lähdepisteeseen konvoloidut signaalit miksataan tämän jälkeen yhdeksi äänitteeksi. Auralisoinnit luotiin koko orkesterista kahteen yleisön alueella sijaitsevaan pisteeseen, sekä yhteen pisteeseen kapellimestarin kohdalla.

Odeonissa valitaan auralisoinnin asetuksissa yleinen äänitystaso (Overall recording level), joka on ilmaistu desibeileissä. Äänitystaso määrittää kaikkien konvoloitujen auralisointien äänenvoimakkuuden. Äänenvoimakkuutta voidaan tämän lisäksi säätää erikseen jokaisen konvoluution kohdalla, sekä vielä uudestaan miksausvaiheessa jokaista miksettavaa konvoluutiota kohden. Odeon näyttää jokaisen konvoloidun signaalin maksimitason (Max. out) desibeileissä.

<sup>241</sup> Algazi et al. 2001.

### 3.3.3 Orkesterin balanssi

Auralisoinneissa käytetyt kaiuttomat ääninäytteet on luotu kohdassa 3.2.1 esitetyn menetelmän mukaan tavalla, jossa soittajat eivät ole pystyneet kuuntelemaan miten heidän soittonsa sopeutuu orkesterisointiin salin akustiikassa. Tästä johtuen orkesterin balanssia säädettiin Rindelin esittämän menetelmän mukaan. Ensin kapellimestarin kohdalle auralisoitiin ainoastaan puupuhaltimet ja soittimien suhteellisia äänitasoja säädettiin partituuria seuraamalla, kunnes soittimet olivat keskenään balanssissa. Sama prosessi toistettiin vaskisoittimilla ja tämän jälkeen kaikilla puhallinsoittimilla ja patarumuilla. Jousisoittimet balansoitiin keskenään samalla tekniikalla ja lopuksi jousi- ja puhallinsektioiden keskinäinen balanssi tarkistettiin koko orkesterin auralisoinnista.<sup>242</sup> Engelin teatterissa sopraanon äänenvoimakkuutta ei lisätty, vaan balansointi tehtiin hiljentämällä orkesteria. Kaikki korjaukset tehtiin kuuntelemalla auralisointeja kapellimestarin kohdalta. Korjauksissa oli mahdollista säätää ainoastaan soittimen kokonaisäänenvoimakkuutta, joten kappaleen yksittäisiä kohtia ei voinut balansoida erikseen.

Alustavan balansoinnin jälkeen auralisoinnit soitettiin vielä kapellimestari Kimmo Tullililalle. Tullila on johtanut Tampere Filharmoniaa, Tampere Chamber -kamariorkesteria, Vaasan ja Seinäjoen kaupunginorkestereita ja Pori Sinfoniettaa. Hän toimii myös Tampereen Akateemisen Sinfoniaorkesteri TASO:n taiteellisena johtajana. Tullilan kommenttien perusteella jousisoittimien äänenvoimakkuutta pienennettiin kaikissa saleissa ja käyrätorvien äänenvoimakkuutta nostettiin hieman Seurahuoneen 1. vaiheen salissa. Engelin teatterissa koko orkesterin äänenvoimakkuutta pudotettiin suhteessa solistiin.

Soittimien äänitasoja korjattiin pienentämällä äänitasoja puhallinsoittimilla enintään -3 dB ja jousisoittimilla enintään -4 dB. Patarumpujen äänenvoimakkuutta jouduttiin Seurahuoneen 2. vaiheen salissa muuttamaan jopa -7 dB. Patarumpujen voimakkuus johtui todennäköisesti salin lavan takaosan koveran muodon aiheuttamasta äänen keskittymisestä. Meyerin<sup>243</sup> julkaisemista soittimien tuottamien minimi- ja maksimiääniteho-  
tasojen erotuksesta laskettiin soittimien dynaaminen skaala. Skaalan laskennassa käytettiin äänitasoja soitettaessa nopeita asteikoita. Pitkillä äänillä skaala on vielä suurempi. Puhallinsoittimilla käytetty skaala on 12–21 dB, jousisoittimilla 17–22 dB ja patarumuilla peräti 45 dB. Dynaamisten skaalojen perusteella äänenvoimakkuuden säädöt todettiin olevan realistisia.

### 3.3.4 Auralisointien äänenvoimakkuus

Auralisointeja luodessa on erittäin tärkeää, että toistettavan äänen voimakkuus on realistinen. Äänenvoimakkuuteen vaikuttaa Odeonin asetuksien lisäksi myös äänentoistossa käytetty äänikortti, äänentoistojärjestelmän asetettu äänenvoimakkuus ja kuulokkeiden

<sup>242</sup> Rindel & Christensen. 2008.

<sup>243</sup> Meyer 2009.

herkkyys.<sup>244</sup> Lisäksi todellisessa tilanteessa orkesterisoittajat mukauttavat soittoaan esiintymistilan akustiikkaan. Ueno et al.<sup>245</sup> sekä Kalkandjiev & Weinzierl<sup>246</sup> ovat todenneet, että esiintymistilan akustiikka vaikuttaa ammattimuusikoilla muun muassa tempoon, yleiseen äänenvoimakkuuteen, dynamiikan erojen suuruuteen sekä äänenväriin. Realistisen konserttitilanteen rekonstruktiossa ei siis ole mielekäästä olettaa, että soittajat soittaisivat aina samalla äänenvoimakkuudella.

Meyer on tutkinut orkesterisoittimien tuottamaa äänitehoa ja on kirjassaan esittänyt orkesterisoittimille suurimmat ja pienimmät äänitehotasot soittaessa pitkiä ääniä ja nopeita asteikoita. Nopeita asteikkoja soitettaessa mitatut eri soittimien tuottamat äänitehotasot on esitetty taulukossa 20. Taulukossa on myös esitetty Meyerin ilmoittamat soittimien edustavat äänitehotasot niiden soittaessa *forte*-dynamiikalla.<sup>247</sup> Oopperalaulun edustava äänitehotaso on Meyerin mukaan 102 dB *forte*-dynamiikalla lauletaessa.<sup>248</sup> Kobin mukaan naispuolisten ammattilaulajien suun kohdalla mitattu äänenpainetaso on enimmäkseen 90 dB.<sup>249</sup>

**Taulukko 20.** Orkesterisoittimien mallinnuksessa käytetyt painottamattomat äänitehotasot Meyerin mukaan.<sup>250</sup>

Soitin	Äänitehotasot $L_w$		
	Minimi ( <i>pp</i> )	Maksimi ( <i>ff</i> )	Edustava ( <i>f</i> )
viulu	74	94	89
alttoviulu	73	91	87
sello	74	96	90
basso	79	96	92
huilu	82	94	91
oboe	83	95	93
klarineti	77	97	93
fagotti	81	96	93
käyrätorvi	86	107	102
trumpetti	89	104	101
patarummut	70	115	103
sopraano <sup>251</sup>	-	-	102

<sup>244</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 68–69.

<sup>245</sup> Ueno et al. 2010.

<sup>246</sup> Kalkandjiev & Weinzierl 2013a; Kalkandjiev & Weinzierl 2013b.

<sup>247</sup> Meyer 2009.

<sup>248</sup> Meyer 1986, viitattu: Prodi & Velecka 2005.

<sup>249</sup> Kob 2002, s. 6.

<sup>250</sup> Meyer 2009.

<sup>251</sup> Meyer 1986, viitattu: Prodi & Velecka 2005.

Kun soittimien äänitehotasot ovat tiedossa, on mahdollista laskea orkesterin tuottama äänenpainetaso eri salien vastaanottopisteissä. Soittimia edustavien lähteiden äänitehoa kasvatettiin siten, että niiden tuottama äänitehotaso vastasi taulukossa 19 esitettyjä lukuja. Tämän jälkeen Odeonilla laskettiin kaikkien eri lähteiden yhdessä tuottama keskiäänepainetaso jokaisessa salissa kapellimestarin kohdalle. Lasketut äänenpainetasot on esitetty taulukossa 21. Taulukosta nähdään paljastivat, että koko orkesterin soittaessa *forte*-dynamiikalla, sen tuottama äänenpainetaso oli jokaisessa salissa kapellimestarin kohdalla 90–92 dB A-painotettuna.

**Taulukko 21.** Lasketut orkesterien tuottamat keskiäänepainetasot kapellimestarin kohdalla

Sali	A-painotettu keski- äänitaso $L_A$ [dB]	Lineaarinen keski- äänitaso $L_{lin}$ [dB]
Engelin teatteri	90,5	93,1
Yliopiston juhlasali	91,4	94,6
Seurahuone, 1. vaihe	91,9	94,5
Seurahuone, 2. vaihe	91,1	94,1
Palokunnantalon juhlasali	91,3	93,8

Taulukossa 19 esitettyjen minimi- ja maksimiäänitehotasojen sekä orkesterien soittimien lukumäärän perusteella voidaan laskea, että kaikkiin saleihin mallinnetut orkesterit pystyivät muuttamaan äänitehotasoaan vähintään 7 dB. Tästä voidaan päätellä, että orkesterien oli mahdollista muuttaa äänitehoa sen verran, että äänenpainetaso saatiin samaksi kapellimestarin kohdalla jokaisessa salissa. Tämän perusteella auralisointien äänenvoimakkuus päätettiin kalibroida siten, että se olisi yhtä voimakas jokaisessa salissa kapellimestarin kohdalla.

Odeon näyttää lopullisille miksatuille auralisoinneille maksimiarvon desibeleinä, mutta koska eri soittimet soittavat teoksessa eri aikaan ja eri dynamiikoilla, suurin äänitaso ei välttämättä kuvaa orkesterin soittoa *forte*-dynamiikassa. Tämän takia äänitaso määritettiin Audacity-ohjelman avulla laskemalla signaalin RMS-arvo valitusta kohdasta auralisointia. RMS-arvo (root mean square value)  $z_{rms}$  saadaan ottamalla neliöjuuri signaalin  $z(t)$  neliön aikakeskiarvosta kaavan (7) mukaan, missä  $t$  tarkoittaa aikaa ja  $T$  aikamäärää, jonka yli keskiarvo otetaan.<sup>252</sup> Koska äänisignaali sisältää sekä positiivisia ja negatiivisia arvoja, RMS-arvo kuvaa hyvin äänen intensiteettiä.

$$z_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T z(t)^2 dt} \quad (7)$$

<sup>252</sup> Blauert & Xiang 2008, s. 218.

Audacity ilmoittaa RMS-arvot desibeleinä suhteessa signaalin maksimiarvoon yksiköllä dBFS siten, että digitaalisen signaalin suurin mahdollinen arvo on aina 0 dBFS. Audacity ilmoittaa RMS-arvot A-painotettuna ja ilman painotusta. Kalibrointiin päätettiin käyttää A-painotettuja arvoja.

Valittu kohta otettiin paikasta, jossa koko orkesteri soitti yhtä aikaa voimakkaalla dynamiikalla. Sopivat kohdat löytyivät Beethovenin 7. sinfonian 1. osasta tahdeista 34–35 (auralisoinnissa 2 min 3 s – 2 min 10 s) ja Mozartin Don Giovannissa tahdeista 127–129 Donna Elviran aarian alusta laskettuna (auralisoinneissa 3 min 40 s – 3 min 44 s). Kun RMS-arvo oli laskettu, salien äänitystasoa muutettiin, kunnes kaikissa saleissa RMS-arvo oli kapellimestarin kohdalla yhtä suuri. Engelin teatterissa kalibrointia ei voitu suorittaa tarkasti, sillä siinä käytettiin eri ääninäytettä. RMS-arvo kuitenkin asetettiin 1 dB pienemmäksi kuin muissa saleissa, sillä orkesterin tuottama ääniteho kapellimestarin kohdalle oli noin 1 dB hiljaisempi kuin muissa saleissa. Kalibroinnin tarkoitus on simuloida tilannetta, jossa kapellimestari ja muusikot sopeuttavat orkesterin soittoa salin akustiikkaan. Lopulliset RMS-arvot sekä Odeonissa käytetyt äänitystasot on esitetty molemmille kuulokkeille tehdyissä auralisoinneissa liitteessä 7.

Edellä mainitun prosessin avulla varmistettiin, että eri saleissa luodut, samasta teoksesta tehdyt auralisoinnit olivat toistensa kanssa vertailukelpoisia. Absoluuttisen äänitason määrittämiseksi Audacityllä luotiin tasaista kohinaa, jonka RMS-arvo oli sama, kuin kapellimestarin kohdalle kalibroitujen Beethovenin 7. sinfoniasta tehtyjen auralisointien RMS-arvo valitusta kohdasta. Kohinan avulla äänentoistojärjestelmä voidaan kalibroida Odeonin käyttäjäoppaassa esitettyä menetelmää mukailien. Ensin kohina toistetaan kaiuttimista ja A-painotettu äänenpainetaso mitataan kuuntelupisteessä. Äänenvoimakkuutta säädetään, kunnes kohina tuottaa noin 90 dB äänenpainetason A-painotettuna, eli likimäärin äänenpainetason jonka eri orkesterit voivat tuottaa kapellimestarin kohdalle soittaessaan *forte*-dynamiikalla. Tämän jälkeen kohinaa voidaan kuunnella vuorotellen kaiuttimien ja kuulokkeiden kautta ja kuulokkeiden äänenvoimakkuutta säädetään, kunnes kohina kuulostaa yhtä voimakkaalta.<sup>253</sup>

Kohinan avulla auralisointien äänenvoimakkuuden suuruusluokka voidaan edes likimääräisesti yhdistää laskettuihin fysikaalisiin arvoihin. Koska kapellimestari ja muusikot säättävät äänenvoimakkuutta joka tapauksessa kuulon avulla, tulisi tämän jälkeen vielä kuunnella varsinaisia auralisointeja kuulokkeilla ja suorittaa äänenvoimakkuuden hienosäätöä, jos orkesterit kuulostavat liian voimakkaalta tai hiljaisilta.

### 3.3.5 Solistin kuuluvuus Engelin teatterissa

Oopperatalojen akustiikassa balanssilla tarkoitetaan usein laulajan ja orkesterin suhteellista äänenvoimakkuutta. Auralisointien miksausvaiheessa eri äänilähteiden äänenvoi-

<sup>253</sup> ODEON Room Acoustics Software User manual 2013, s. 68–69.

makkuutta voidaan kasvattaa mielivaltaisesti, mutta todellisuudessa laulajat eivät voi kasvattaa äänenvoimakkuutta rajattomasti. Tästä johtuen orkesterin ja laulajan välinen balanssi päätettiin tarkistaa laskennallisesti Prodi & Veleckan käyttämää menetelmää mukailleen. Heidän tutkimuksessaan oopperatalossa mitattiin A-painotettu äänitaso suuntaavasta kaiuttimesta, joka oli asetettu näyttämölle ja verrattiin sitä mitattuun A-painotettuun äänitasoon ympärisäteilevästä kaiuttimesta, joka oli asetettu orkesterimonttuun. Molempien kaiuttimien äänitehotaso oli sama. Näiden kahden äänitason erotusta kuvattiin termillä ”balanssi”  $B$ . Tutkimuksessa todettiin että hyväksyttävä  $B$ :n arvo oli kuuntelukokeiden perusteella  $-2$  ja  $2,3$  dB välillä.<sup>254</sup>

Laulajan ja orkesterin balanssi tarkistettiin mallissa vertaamalla keskenään A-painotettuja äänitasoja kahteen vastaanottopisteeseen sekä näyttämölle että orkesterimonttuun asetetuista ympärisäteilevistä lähteistä, jotka tuottavat 31 dB äänitehotason kaikilla oktaavikaistoilla. Vastaanottopisteet olivat samat, joihin auralisoinnit luotiin. Vastaanottopisteessä lasketut A-painotettujen äänitasojen erotukset näyttämöltä ja orkesterimonttusta on esitetty taulukossa 22.

**Taulukko 22.** A-painotetut keskiäänitasot ympärisäteilevistä lähteistä Engelin teatterissa

Vastaanottopiste	A-painotettu keskiäänitaso $L_A$ [dB]		Äänitasojen erotus $B$ [dB]
	Näyttämöltä	Orkesterimonttusta	
Kuuntelija 1 - permannolla	21,7	20,0	+ 1,7
Kuuntelija 6 - toisella parvella	14,4	16,6	- 2,2

Tulosten tulkinnassa on huomioitava, että Prodi & Veleckan tuloksissa näyttämölle sijoitettu äänilähde oli voimakkaasti eteenpäin suuntaava,<sup>255</sup> kun taas mallinnuksessa molemmat äänilähteet olivat ympärisäteileviä. Meyerin mukaan lauluäänen voimakas suuntaavuus parantaa solistin kuuluvuutta orkesterin yli, joten taulukossa 20 esitetyt lasketut arvot balanssille  $B$  ovat todennäköisesti hieman liian pieniä suhteessa Prodi & Veleckan esittämiin raja-arvoihin. Taulukosta nähdään siis, että Engelin teatterissa tehdyissä auralisoinneissa laulajan kuuluvuus tulisi olla permannolla varsin hyvä ja parvella heikompi.

### 3.3.6 Signaalien jälkikäsitely

Auralisoinneissa herätesignaalina käytetyt kaiuttomat ääninäytteet sisälsivät pieniä määriä äänitysvaiheessa syntynyttä taustakohinaa. Yksittäisissä konvoluutioissa kohina ei ollut havaittavissa, mutta miksatuissa näytteissä kohinan taso kasvaa niin paljon, että se

<sup>254</sup> Prodi & Velecka 2005.

<sup>255</sup> Prodi & Velecka 2005.

on kuultavissa auralisoinneissa. Kohina poistettiin miksatuista auralisoinneista käyttämällä ilmaista Audacity-äänenkäsittelyohjelmaa.

Audacity-ohjelma sisältää Noise Removal -työkalun, jolla valittiin auralisoinnin alusta lyhyt näyte pelkkää taustakohinaa. Tämän jälkeen kohina suodatettiin pois auralisoinneista työkalun avulla. Suodatuksessa auralisointien suurten taajuuksien voimakkuus putosi hieman, jolloin orkesterin äänenväri muuttui kuultavasti. Kohina koettiin kuitenkin niin häiritseväksi, että suodatuksessa päädyttiin kompromissiin, jossa kohinan määrää pienennettiin merkittävästi pienen orkesterisoinnin kirkkauden heikkenemisen kustannuksella.

### 3.4 Rajoitukset

Auralisointien tarkoitus on saada mahdollisimman autenttinen kuulokuva tutkittavista saleista. Auralisointiketju kattaa kaiuttomat ääninäytteet, lähteiden sijoittelun, tilan akustiikan mallintamisen ja äänentoistojärjestelmän. Näistä vaiheista tilan akustiikan, eli impulssivasteen mallintamisen rajoitukset on käsitelty kohdassa 2.5.

Sinfoniaorkesterissa käytetyt soittimet ovat nykyään hyvin erilaisia kuin tyypillisesti käytetyt soittimet Euroopassa 1800-luvulla. Jousisoittimien kielet olivat yleisesti tehty suolesta siten, että kaksi alinta kieltä oli peitetty hopealangalla.<sup>256</sup> Soittimet olivat tästä johtuen hiljaisempia ja äänenväritään pehmeämpiä kuin nykysoittimet.<sup>257</sup> Toinen merkittävin kehitys on se, että puhallinsoittimien äänenvoimakkuus kasvoi huomattavasti 1800-luvun aikana.<sup>258</sup> Kaiuttomat ääninäytteet on tehty vuonna 2008 ja niiden teossa on käytetty Kansallisoopperan, Radion Sinfoniaorkesterin, Helsingin Filharmonian ja Tapiola Sinfonietan muusikkoja.<sup>259</sup> Kaiuttomat ääninäytteet on siis tehty nykyaikaisilla soittimilla, joiden äänenvoimakkuus ja äänenväri eivät välttämättä vastaa aikalaissoittimia, joilla on soitettu mallinnetuissa saleissa 1800-luvulla.

Orkesterin kokoonpano ja soittajien lukumäärä vaikuttaa myös auralisointien realismiin. Orkesterin koko vaikuttaa suoraan sen tuottamaan äänitehoon, ja istumajärjestys taas vaikuttaa äänenväriin, sillä soittimien suuntaavuus on erilainen eri taajuusalueilla. Meyer on kirjoittanut laajalti orkesterin istumajärjestyksen vaikutuksesta soittimien eri taajuusalueiden suuntaavuuteen ja siten kuulokuvaan salissa.<sup>260</sup> Vigeant et al. ovat myös todenneet, että monilähdemenetelmää käytettäessä lähteiden sijainneilla, eli orkesterin istumajärjestyksellä, on kuultavissa oleva vaikutus auralisointeihin.<sup>261</sup> Käytetyt orkesterien istumajärjestykset taas perustuvat kohdan 3.2.2 mukaisesti historiallisiin tietoihin.

<sup>256</sup> Spitzer & Zaslav 2004, s. 309; Koury 1981, s. 108.

<sup>257</sup> Lawson & Stowell 1999, s. 128.

<sup>258</sup> Baines 2012, s. 292, 121–123, 338–339; Koury 1981, s. 96–97; Herbert & Wallace 2002.

<sup>259</sup> Pätynen et al. 2008.

<sup>260</sup> Meyer 2009, s. 273–343.

<sup>261</sup> Vigeant et al. 2008.

Pätynen & Lokki ovat vertailleet salista mitatuilla ja mallinnetuilla impulssivasteilla tehtyjä auralisointeja keskenään. Tämän lisäksi auralisointeja verrattiin myös samassa salissa soittavasta todellisesta orkesterista tehtyyn äänitteeseen. Heidän mukaansa simuloituilla impulssivasteilla tehdyt auralisoinnit eivät vastanneet mitatuilla impulssivasteilla tehtyjä auralisointeja. Soittimien balanssi oli huono, mikä saattoi johtua soittimien suuntaavuuksien epätäydellisestä mallintamisesta.<sup>262</sup> Soittajat muuttavat dynamiikan lisäksi muun muassa myös äänenväriä ja tempoa.<sup>263</sup> Näitä ilmiöitä ei ollut mahdollista sisällyttää auralisointeihin.

Äänentoiston realistisuuden vaikuttaa auralisoinneissa käytetty HRTF ja äänentoistoon käytettävät kuulokkeet. Paras äänilähteen lokalisatio saadaan kuulijalta henkilökohtaisesti mitatulla HRTF:llä. HRTF:n mittaaminen kaikilta kuulijoilta ei kuitenkaan ole käytännöllistä, joten mallintamisessa käytettiin keinopäältä mitattua HRTF:ää, jossa äänilähteen paikantamisominaisuuksia on parannettu. Äänilähteiden paikantaminen ei silti ole yhtä realistista kuin henkilökohtaisella HRTF:llä luoduissa auralisoinneissa.<sup>264</sup> Myös kuulokkeiden epälineaarinen vaste voi aiheuttaa äänenväriin muutosta auralisoinneissa, joten se on huomioitu käyttämällä auralisointien luomisessa kuulokkeille tehtyjä suodattimia.

Auralisointien äänenvoimakkuuden säätö perustui soittimien mitattuihin äänitehotasoihin ja niiden perusteella laskettuihin orkesterin tuottamiin äänenpainetasoon salissa. Auralisointien suhteellinen äänitaso asetettiin samalle tasolle kapellimestarin kohdalla. Auralisointien absoluuttinen äänenpainetaso pystytään asettamaan käyttämällä äänitasomittaria kohdan 3.4.4 mukaan. Tällä tavalla määritetty äänenpainetaso ei välttämättä vastaa todellista tilannetta, mutta antaa viitteellisen arvon, jota voidaan hienosäätää kuulon avulla, kuten kapellimestari ja muusikot tekevät myös todellisuudessa.

Signaalien jälkikäsitellyssä auralisointien äänenväriin tuli lieviä muutoksia. Kohinan poistossa suurten taajuuksien voimakkuus heikkeni hieman, jolloin orkesterisointi ei kuulostanut aivan yhtä kirkkaalta kuin ennen toimenpidettä. Kuitenkin esimerkiksi salien keskinäiset erot olivat kuultavissa paljon selvemmin kuin mainittu pieni kirkkauden heikkeneminen, joten signaalin jälkikäsitely ei koettu merkittävästi heikentävän auralisointien todenmukaisuutta.

---

<sup>262</sup> Pätynen & Lokki 2010b.

<sup>263</sup> Ueno et al. 2010; Kalkandjiev et al. 2013; Jeon & Kim 2011.

<sup>264</sup> Rindel & Christensen 2009.



### 3.5 Valmiit auralisoinnit

Jokaisesta mallinnetusta konserttisalista luotiin kaksi auralisointia yleisön alueelta. Engelin teatterissa auralisointiin käytettiin Donna Elviran aariaa Mozartin oopperan Don Giovanni 2. näytöksestä. Muissa saleissa käytettiin Beethovenin 7. sinfonian ensimmäisen osan alkua. Auralisoinnit ovat kaksikanavaisia signaaleja 32-bittisessä waveformaatissa.

Tiedostot on poltettu CD-levylle, joka on liitetty tämän tutkimuksen yhteyteen. Levy sisältää neljä auralisointia jokaisesta mallinnetusta salista. Jokaisessa salissa tehtiin auralisoinnit kahteen eri paikkaan yleisön alueelle ja auralisoinnit luotiin sekä Sennheiser HD 600 että Bayer Dynamic DT 990 -kuulokkeille. Valmiit auralisoinnit ovat myös saatavilla Tampereen teknillisen yliopiston rakennusakustiikan tutkimusryhmältä.

## 4 VALIDOINTI

### 4.1 Validoinnin merkitys

Akustisessa mallinnuksessa on tiedostettava, että kyse on aina todellisuuden simuloinnista erilaisten mallien avulla. Nämä mallit vastaavat todellisuutta ainoastaan likimääräisesti. Mallintamisessa ei aina välttämättä ole tärkeää päästä absoluuttiseen fysikaaliseen tarkkuuteen, mutta ainoastaan riittävään havainnolliseen tarkkuuteen. Koska likimääräisissä simulaatiomalleissa sekä valituissa parametreissa saattaa olla virheitä, malli tulisi validoida.

Akustisessa suunnittelussa tietokonemallit voidaan validoida mittaamalla salista ISO 3382-1 mukaisia akustisia mittalukuja ja vertaamalla näitä mittalukuihin. Mallissa olevia absorptiokertoimia muokataan, kunnes mallinnetut parametrit vastaavat mittauksia. Sopivia parametreja on muun muassa jälkikaiunta-aika  $T_{30}$ , varhainen jälkikaiunta-aika  $EDT$  ja selvyys  $C_{80}$ . Myös voimakkuutta  $G$  ja sivuttaisenergiasuhdetta  $LF_{80}$  voi käyttää, mutta niiden mittaaminen ei onnistu ilman kalibroitua äänilähdettä tai suuntaavaa mikrofonia.

Tutkimuksessa simuloidut mallit validoitiin etsimällä tutkimuskirjallisuudesta ja sanomalehdistä aikalaismielipiteitä mallinnettujen salien akustiikasta. Näitä mielipiteitä vertailtiin mallinnettuihin parametreihin sekä auralisointeihin. Validoinnin jälkeen valittuja absorptiokertoimia tai laskenta-asetuksia ei kuitenkaan enää muutettu, vaan tarkistettiin ainoastaan vastasivatko aikalaismielipiteet mallinnettuja tuloksia. Tätä menetelmää ovat käyttäneet ensimmäistä kertaa Takala & Kylliäinen Nya Teaternin mallintamisessa.<sup>265</sup>

### 4.2 Aikalaismielipiteet

Engelin teatterista on olemassa melko vähän akustiikkaa kommentoivia aikalaismielipiteitä. Vuonna 1852 kirjoitetussa Morgonbladetin artikkelissa kommentoidaan teatteritalon huonoja akustisia ominaisuuksia, jotka ovat haitallisia erityisesti laulajille. Artikkelissa ehdotetaan konserttien siirtämistä Seurahuoneelle tai Kaivuhuoneelle.<sup>266</sup> Schumannin mukaan teatteritalo oli aivan liian pieni,<sup>267</sup> mikä tarkoittaa todennäköisesti istumapaikkojen määrän vähyyttä. Karl Collan moitti vuonna 1852 teatteria, sanomalla ole-

<sup>265</sup> Kylliäinen & Takala 2013; Takala & Kylliäinen 2014.

<sup>266</sup> Morgonbladet 19.7.1852, ”För theatern i Helsingfors...”

<sup>267</sup> Schumann 1922, s. 216.

vansa hyvin pahoillaan niiden taiteilijoiden puolesta, joiden täytyy esiintyä sellaisessa salissa.<sup>268</sup>

Yliopiston juhlasalin akustiikkaa keuhuttiin vuonna 1858 Helsingfors Tidningar-lehdessä. Artikkelin mukaan musiikki oli miellyttävää ja äänet kuuluivat kirkkaasti, mutta kuulijan paikka vaikutti paljon akustiikkaan.<sup>269</sup> Vuonna 1882 Helsingfors-lehdessä nimimerkki K kirjoittaa Sarasaten konsertista, jossa solisti oli pitänyt yliopiston juhlasalin akustiikkaa epäsuotuisana.<sup>270</sup> Kyseinen henkilö oli säveltäjä ja viuluvirtuosi Pablo de Sarasate, joka piti yhteensä neljä konserttia yliopiston juhlasalissa vuosina 1881 ja 1883.<sup>271</sup> Vuonna 1887 Karl Fredrik Wasenius, nimimerkillään Bis, totesi sinfoniakonsertin arvostelussa, että salilla on melko pienet mahdollisuudet tuottaa hyvää ”akustista symmetriaa”, mille esiintyjä ei itse voi mitään.<sup>272</sup> Vuonna 1889 Bis kirjoittaa Hufvudstadsbladetissa kuorosta, jonka tulisi hänen mielestään esiintyä akustisesti miellyttävässä yliopiston juhlasalissa.<sup>273</sup>

Vuonna 1888 Seurahuoneen laajennuksen valmistuttua sanomalehdissä käytiin väittelyä siitä, tulisiko sinfoniakonsertit järjestää yliopiston juhlasalissa vai uudessa seurahuoneen salissa. Artikkeleissa saaja vertaillaan keskenään, mikä tarjoaa tutkimusta varten hyödyllisiä kuvauksia yliopiston juhlasalin akustiikasta. Hufvudstadsbladetissa Robert Kajanuksen nimiin osoitetussa kirjoituksessa todetaan, että Yliopiston juhlasali on Seurahuonetta paljon parempi sinfoniakonserteille.<sup>274</sup> Muutamaa päivää myöhemmin julkaistiin Hufvudstadsbladetissa hieman sovittelevampi kirjoitus, jonka mukaan yliopiston juhlasali, erityisesti kun se on vain puoliksi täynnä, peittää ”kohtuuttoman vahvan resonanssin” ansiosta puutteita orkesterin suorituksessa.<sup>275</sup> Toisaalta vuonna 1899 Karl Flodin taas kirjoittaa Aftonpostenissa, että yliopiston juhlasalissa musiikin edut ja virheet paljastuvat heti kuulijoille.<sup>276</sup>

Elis Lagus on vuonna 1905 kirjoittanut vertailun Suomen Kansallisteatterin talosta ja yliopiston juhlasalista jossa hän toteaa, että yliopiston juhlasalissa useilta paikoilta esiintyjää on vaikea nähdä ja esiintyjä on salin rakenteen suhteen epäluontevassa paikassa.<sup>277</sup> Samana vuonna ”Musiikkiystävän” kirjoittamassa artikkelissa on todettu, että sali asettaa erityisen suuret vaatimukset vokaaliesityksille ja se paljastaa pienimmänkin

<sup>268</sup> Krohn 1922, viitattu: Hirn 1949, s. 121.

<sup>269</sup> Helsingfors Tidningar 29.9.1856, ”Till konserten i söndags...”

<sup>270</sup> Helsingfors 13.2.1882., ”Toner och stämningar.”

<sup>271</sup> Lappalainen 1994, s. 80. ”M. M:s Bariserkörs avskedskonsert...”

<sup>272</sup> Helsingfors Dagblad 28.10.1887, ”Den första symfonikonserten.”

<sup>273</sup> Hufvudstadsbladet 18.6.1889, ”

<sup>274</sup> Hufvudstadsbladet 24.11.1888, ”Nya Pressen och Societetshusalongen.”

<sup>275</sup> Hufvudstadsbladet 27.11.1888, ”Från allmänheten.”

<sup>276</sup> Aftonposten 7.3.1899, ”Giovanni Cokinis konsert.”

<sup>277</sup> Lagus 1905, s. 293–296, viitattu: Lappalainen 1994, s. 109–110.

intonaation epävarmuuden. Salissa on myös kirjoittajan mukaan raskas laulaa, erityisesti kun yleisöä ei ole kovin paljon.<sup>278</sup>

Seurahuoneen 1. vaiheen salin akustiikasta on hyvin vähän aikalaiskirjoituksia. Helsingfors Dagbladissa vuonna 1888 nimimerkki Tertius interveniens moittii Seurahuoneen 2. salin laajennusta toteamalla, että Helsingin yleisölle on jo vanhastaan tuttua mennä paremmasta huonompaan, viitaten 1860-luvun alussa purettuun Seurahuoneen ensimmäiseen saliin, joka oli hänen mielestään toista salia parempi.<sup>279</sup> Lappalaisen mukaan 1830-luvulla konsertoivat taiteilijat esiintyivät Helsingissä mieluummin Seurahuoneella ja Kaivohuoneella kuin yliopiston juhlasalissa.<sup>280</sup> Tiedetään myös, että Pacius järjesti 1840-luvulla orkesterinsa konsertteja mieluummin Seurahuoneella kuin Yliopiston juhlasalissa.<sup>281</sup>

Kun Seurahuoneen uusi sali valmistui vuonna 1863, sen avajaisista kirjoitettiin Helsingfors Tidningar -lehdessä. Lehdessä todettiin, että akustiikan kannalta sali oli onnistunut. Artikkelissa kuvaillaan kuinka avajaisissa musiikki kuuluu epätavallisen hyvin ja että ”luonnolliset disharmoniat” olivat tavallista selkeämmin kuultavissa.<sup>282</sup> Seurahuoneen 2. vaiheen salista löytyy vuodelta 1885 kaksi artikkelia, joissa mainitaan kaksi tohtori H. Bangin pitämää luentoa. Ensimmäisellä kerralla sali oli täynnä, kun taas toisen artikkelin kuvailemalla neljännellä luennolla oli paljon vähemmän yleisöä. Molemmilla luentokerroilla salin akustiikka vaikeutti huomattavasti puheen ymmärrettävyyttä luennoilla.<sup>283</sup> Nya Pressen kirjoittaa myös Bangin luennoista ja toteaa, että akustisten olosuhteiden parantamiseksi istumapaikat järjestetään estradille,<sup>284</sup> oletettavasti lähemmäs puhujaa.

Palokunnantalon talon valmistumisen jälkeen sen akustiikkaa keuhuttiin sanomalehdissä. Arvostelut olivat kuitenkin ristiriitaisia. Bis kirjoitti vuonna 1889 Palokunnantalon akustiikan olevan erittäin hyvä. Hänen mukaansa sali sopii hyvin konserteille ja juhliille.<sup>285</sup> Finland-lehdessä taas todetaan, että salissa musiikin sointi on epäselvä ja fortissimot kuuluivat liian kovaa, kun taas lehtereillä akustiikka on parempi.<sup>286</sup> Nimimerkki A.U. kehuu vuonna 1897 Hufvudstadsbladetissa Palokunnantalon salia ”akustisesti erinomaiseksi.”<sup>287</sup> Toisaalta sama nimimerkki kuvaa myöhemmin salin akustiikkaa ”epäsuotuisaksi,”<sup>288</sup> mutta pitää kuitenkin salia parempana kuin Seurahuoneen laajen-

<sup>278</sup> Helsingfors-Posten 20.11.1905, ”Allmänhetens spalt.”

<sup>279</sup> Helsingfors Dagblad 10.11.1888, ”Från allmänheten.”

<sup>280</sup> Lappalainen 1994, s. 30.

<sup>281</sup> Lappalainen 1994, s. 31.

<sup>282</sup> Helsingfors Tidningar 14.12.1863, ”Societetshusets nya salong invigdes...”

<sup>283</sup> Finland 10.4.1885, ”D:r H. Bangs första föredrag...” & 17.4.1885, ”D:r H. Bangs fjerde och sista...”

<sup>284</sup> Nya Pressen 11.4.1885, ”Herman Bangs föredrag...”

<sup>285</sup> Hufvudstadsbladet 20.10.1889, ”Fröknarna Ulna och Elin Fohströms konsert...”

<sup>286</sup> Finland 10.1.1890, ”Orkesterföreningens extra populära konsert...”

<sup>287</sup> Hufvudstadsbladet 13.10.1897, ”Populära konserten i går...”

<sup>288</sup> Hufvudstadsbladet 29.12.1902, ”Tavastehus Hornorkesters folk-konsert...”

nettua salia.<sup>289</sup> Vuonna 1897 nimimerkki E.K. kehuu salin akustiikkaa toistuvasti ja pitää sitä myös parempana kuin Seurahuoneen laajennettua salia.<sup>290</sup> E.K. kuvaa kuitenkin salin akustiikkaa ”omituiseksi”<sup>291</sup> Samana vuonna nimimerkki L.R. kirjoittaa Aftonpostenissa, että salissa tulisi pitää enemmän arvostettuja konsertteja, johtuen sen hyvästä akustiikasta.<sup>292</sup> Hufvudstadsbladet kirjoittaa vuonna 1890 saliin viritetyistä villalanka-verkoista, joita oli artikkelin mukaan tapana käyttää ulkomailla saleissa joissa on ”liian vahva resonanssi”.<sup>293</sup> Nya Pressen kirjoittaa myös vuonna 1892 tapauksesta, jossa salin akustiikkaa vaimennettiin kuoroharjoituksissa kutsumalla yleisöksi oppilaita paikallisista kouluista.<sup>294</sup> Nimimerkki K. ottaa kantaa Palokunnantalonsalin akustiikkaan vuosina 1895–1896. Hän kirjoittaa Nya Pressenissä, että Palokunnantalossa musiikki soi parhaiten kun sali ja lehterit ovat täynnä.<sup>295</sup> Hän myös kirjoittaa, että sali on liian voimakas ja pianomusiikki soisi paremmin yliopiston juhlasalissa.

### 4.3 Mallinnettujen salien ja aikalaismielipiteiden vertailu

Engelin teatterin akustiset ominaisuudet vaikuttavat mallinnustulosten perusteella sopivilta sekä puheen että musiikin esittämiseen. Salin voimakkuus oli permannolla ja suurimmalla osalla parvista erittäin hyvä. Kommentit salin akustiikan huonoudesta laulajille on hämmäntävä, sillä ainakin yleisölle laulun ja orkesterin balanssi on mallin perusteella varsin hyvä. Toisaalta näyttämön vieressä olevilla aitoilla ja kolmannen kerroksen sivuilla olevilla paikoilla kuuluvuus oli merkittävästi huonompi, joten on mahdollista, että kritiikki viittaa näihin huonompiin paikkoihin.

Yliopiston juhlasalin akustiikkaa on sekä kehuu että moitittu eri tahoilta. Salin akustiikan huomattavin piirre on sen paikkojen epätasaisuus, joka myös esiintyy toistuvasti aikalaismielipiteissä. Mallinnuksen perusteella orkesterilavan viereiset paikat kärsivät erittäin suuresta voimakkuudesta ja sivuttaisheijastusten puutteesta. Kauempana lavasta ja parvilla tilanne on huomattavasti parempi. Aikalaismielipiteissä esiintyvä paikkojen epätasaisuus voidaan siten todeta myös mallinnuksen avulla. Kommentit siitä, kuinka sali ei peitä lainkaan virheitä saattaa viitata suurempaan selvyyteen. Salin selvyys-arvot eivät kuitenkaan ole kovin suuret, vaan vaihtelevat -3 ja 0 dB välillä keskitaajuuksilla salin ollessa tyhjä ja täynnä yleisöä. Myöskään kommentti, että salissa on raskasta laulaa kun yleisöä on vähän, viittaa todennäköisesti salin pitkään jälkikaiunta-aikaan sen ollessa tyhjä.

<sup>289</sup> Hufvudstadsbladet 26.3.1902, ”Populära konserten i går...”

<sup>290</sup> Uusi Suometar 2.4.1902, ”Carl Fürstenbergin päiväkonsertissa...”; Uusi Suometar 3.10.1902, ”Helppotajuiset konsertit...”; Uusi Suometar 2.10.1903, ”Helppotajuiset konsertit...”

<sup>291</sup> Uusi Suometar 16.1.1900, ”Hra ja rwa Cokinis antoivat konsertin...”

<sup>292</sup> Aftonposten 18.10.1897, ”Fröknarna Lindbergs och Petrinis sista konsert...”

<sup>293</sup> Hufvudstadsbladet 25.10.1890, ”Populära konserten i går...”

<sup>294</sup> Nya Pressen 27.1.1892, ”Arbetets Vänners sångkör...”

<sup>295</sup> Nya Pressen 2.10.1895, ”Populära orkesterkonserten i går...”

Seurahuoneen 1. vaiheen salista tiedetään ainoastaan, että yhden kirjoituksen mukaan se oli 2. vaiheen salia parempi ja että Pacius järjesti siellä mielellään konsertteja. Sali kyllä sopii konserttisaliksi niin jälkikaiunta-ajan kuin voimakkuuden perusteella. Erityisesti korostunut basson voimakkuus salissa saatettiin kokea miellyttäväksi. Seurahuoneen 2. salissa sivuttaisenergiasuhde oli paljon 1. vaiheen salia heikompi, joten uudessa salissa orkesterisointia ei välttämättä ole koettu yhtä ympäröiväksi. Tämän perusteella mallinnuksen tulokset vastaavat hyvin aikalaismielipiteitä.

Kommentit Seurahuoneen 2. vaiheen salin ”luonnollisista disharmonioista” on selitettävissä suuremmalla voimakkuudella suurilla taajuuksilla. Kyseinen artikkeli oli kirjoitettu uuden salin avajaisista, joten sitä vertailtiin epäilemättä 1. vaiheen saliin, missä suurten taajuuksien voimakkuus oli selkeästi pienempi. Suurten taajuuksien korostuminen voimistaa musiikissa kuultavia yläsäveliä, mikä intonaation pienetkin epäpuhtauden helpommin kuultavaksi. Salin epäselvyys puhesalina selittyy sen pitkällä jälkikaiunta-ajalla, varsinkin jos salissa ei ole ollut paljon yleisöä. Puheen selvyuden kannalta jälkikaiunta-ajan tulisi olla alle 1 sekunti.<sup>296</sup>

Palokunnantalon talon salia on myös kehuttu ja moitittu. Selkein moite on salin liiallinen voimakkuus, joka on mallinnuksen perusteella ainakin yliopiston juhlasalia suurempi. Varsinkin permannolla voimakkuus saattoi kohota keskitaajuuksilla arvoon 10–12 dB. Kuten aikalaismielipiteissä todetaan, lehtereillä tilanne oli parempi. Salia yritettiin jopa vaimentaa, mutta tilanne helpottui aikalaismielipiteiden mukaan myös silloin, kun saliin saatiin lisää yleisöä, kuten mallinnuksessakin todetaan. Salin ollessa täynnä yleisöä, sen voimakkuus putoaa keskitaajuuksilla noin 2 dB. Tyhjänä salin jälkikaiunta-aika on yli 2,5 sekuntia, mikä on yli suositellun rajan konserttisalille.<sup>297</sup>

---

<sup>296</sup> Barron 2010, s. 267.

<sup>297</sup> Beranek 2002, s. 504; Barron 2010, s. 66.

## 5 YHTEENVETO

Tutkimuksessa luotiin historiallisen tiedon perusteella huoneakustisia malleja 1800-luvun kadonneista helsinkiläisistä konserttitiloista. Mallinnetut konserttitilat olivat Engelin teatteri (1827-1861), yliopiston juhlasali (1832-1944), Seurahuoneen 1. vaiheen (1833-1862) ja 2. vaiheen (1863-1887) juhlasalit sekä Palokunnantalon juhlasali (1889-1907). Tilojen alkuperäisten rakennuspiirustusten perusteella saleista luotiin kolmiulotteinen tilamalli, joka siirrettiin huoneakustiseen mallinnusohjelmaan. Salien pintamateriaalit selvitettiin historiallisten tietojen perusteella ja näiden avulla arvioitiin pintojen absorptio- ja sirontakertoimet huoneakustisissa malleissa. Kaikista saleista laskettiin objektiivisia huoneakustisia parametreja standardin ISO 3382-1 mukaan, joiden perusteella salien akustisia olosuhteita arvioitiin.

Saleista luotiin myös auralisointeja, joissa käytettiin Aalto-yliopiston tekemiä kaiuttomia ääninäytteitä orkesterimusiikista. Auralisoidut teokset olivat Donna Elviran aaria Mozartin oopperasta Don Giovanni sekä Beethovenin 7. sinfonian 1. osan alku. Molemmista teoksista osoitettiin, että niitä esitettiin Helsingissä kyseisissä saleissa. Auralisointeja varten saleihin simuloitiin orkesterit, jotka ovat mahdollisesti esiintyneet salissa niiden olemassaolon aikana. Valmiiden auralisointien perusteella pystytään arvioimaan salien ominaisuuksia suoraan saleja kuuntelemalla. Auralisointeja voi kuunnella tämän tutkimuksen yhteyteen liitetyle CD-levylle.

Saleista kerättiin aikalaismielipiteitä, joita verrattiin mallinnettuihin parametreihin. Tämän vertailun tarkoituksena oli mallien validointi, jota ei enää pysty suorittamaan mittauksin. Aikalaismielipiteissä kommentoitiin useasti yksittäisiä konsertteja, sitä miten erilaiset kokoonpanot sopivat tiettyihin saleihin ja vertailtiin saleja keskenään. Mielipiteet olivat usein myös ristiriitaisia ja toisinaan jopa sama henkilö esitti eri kirjoituksissa vastakkaisia mielipiteitä samasta salista.

Mallinnuksen perusteella havaittiin eri saleille ominaisia piirteitä. Engelin teatteri oli akustiikaltaan suhteellisen kuiva. Se soveltui sekä puhenäytelmiin että oopperaan. Salin parhaat paikat olivat permannolla ja salin keskellä olevilla parvilla. Yliopiston juhlasali oli jälkikäiunta-ajan perusteella sopiva sinfoniselle musiikille, mutta orkesterin epäsymmetrisen sijoittelun ja salin muodon takia sen paikat olivat erittäin epätasaisia. Sen parhaat paikat sijaitsivat kauempana orkesterista, johon sivuttaisheijastukset kuuluivat paremmin. Seurahuoneen 1. vaiheen salin kenkälaatikkomuoto taas takasi, että salissa kuulijoille tuli riittävästi sivuheijastuksia. Salin sointi oli hyvin lämmin, sillä sen voi-

makkuus oli selkeästi painottunut pienille taajuuksille. Seurahuoneen 2. vaiheen salissa orkesterin sointi oli taas paljon kirkkaampi. Sali oli myös huomattavan paljon muita saleja voimakkaampi ja sivuheijastukset jäivät kuulijoille heikoksi permannon etuosassa. Varhainen jälkikaiunta-aika oli myös lyhyempi kuin yliopiston juhlasalissa, tehden salista hieman erottelevamman. Palokunnantalon salissa jälkikaiunta oli sopiva sinfoniselle musiikille. Sen voimakkuus oli permannolla lähes yhtä suuri kuin Seurahuoneen 2. vaiheen salissa, mutta parvilla pienempi. Palokunnantalon permannon etuosa kärsi myös sivuttaisheijastusten puutteesta.

Osa havainnoista on pystytty validoimaan aikalaismielipiteiden avulla. Yliopiston juhlasalin paikkojen epätasaisuus, Seurahuoneen 2. vaiheen salin korostettu voimakkuus suurilla taajuuksilla ja Palokunnantalon salin parvien ja permannon erot voimakkuudessa esiintyvät aikalaismielipiteissä. Nämä erot ovat myös kuultavissa saleista tehdyissä auralisoinneissa.

Tutkimuksen tavoitteena on ollut rekonstruoida Helsingin 1800-luvulla kadonneiden tai muuttuneiden konserttisalien akustiikka. Rekonstruktion on oltava uskottavaa, joten se on perustunut historialliseen tietoon ja akustiikan mallinnuksen tieteellisiin menetelmiin. Tutkimuksen ansiosta on voitu luoda auralisointeja, joiden avulla voidaan jälleen kuunnella ja arvioida Helsingin konserttitilojen kadonnutta akustiikkaa.



## LÄHTEET

### Arkistolähteet

Kansallisarkisto (KA)

Tarmon arkisto

Helsingin kaupunginarkisto (HKA)

Maistraatin arkisto

Helsingin kaupunginmuseo (HKM)

Kuvakokoelmat

Helsingin yliopistomuseo (HYM)

Rakennuspiirustukset

Arkkitehtuurimuseon arkisto (AMA)

### Sanomalehdet

Aftonposten

Finland

Helsingfors

Helsingfors Dagblad

Helsingfors-Posten

Helsingfors Tidningar

Hufvudstadsbladet

Morgonbladet

Nya Pressen

Uusi Suometar

### Painetut lähteet

Arni, P. (1949). Käytännöllisen akustiikan perusteet. Kustannusosakeyhtiö Otava, Helsinki.

Helsingin yliopiston päärakennus, peruskorjaus. (1991) Arkkitehti, 6/1991, s. 34–41.

Siren, J.S. (1950). Helsingin yliopiston päärakennuksen vanhan osan restaurointi ja juhlasalin laajennus. Arkkitehti, 1/1950, s. 74–82.

Sundman, M. (toim.) (1989). C.L. Engel, Kirjeet 1813–1840. Helsinki-Seura, Helsinki.

Schaumann, A. (1922). Från sex årtionden i Finland, Förra delen. Holger Schildts Förlagsaktiebolag, Helsingfors.

### **Tutkimuskirjallisuus**

Algazi, V.R., Duda, R.O., Thompson, D.M. & Avendano, C. (2001). The CIPIC HRTF Database. Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz, NY, 21-24 October 2001

Allen, J. & Berkley, D. A. (1979). Image method for efficiently simulation small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 65, pp. 943–950.

Angelakis, K., Rindel, J.H. & Gade, A. (2011). Theatre of the Sanctuary of Asklepios at Epidaurus and the Theatre of Ancient Epidaurus: Objective Measurements and Computer Simulations. Proceedings of the Acoustics of Ancient Theaters Conference, Patras, Greece, 18-21 September, 2001.

Baines, A. (2012). *Woodwind Instruments & Their History*. Dover Publications Inc, Mineola.

Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2<sup>nd</sup> edition. Spoon Press, London and New York.

Baumann, D. (2011). *Music and Space, A systematic and historical investigation into the impact of architectural acoustics on performance practice followed by a study of Handel's Messiah*. Peter Lang, Bern.

Beranek, L. & Hidaka, T. (1998). Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 6, pp. 3169–3177.

Beranek, L. (2002). *Concert Halls and Opera Houses. Music, Acoustics, and Architecture*. 2<sup>nd</sup> edition. Springer-Verlag, New York.

Beranek, L. (2003). Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 89, pp. 494–508.

Blauert, J. & Xiang, N. (2008). *Acoustics for Engineers*. Springer-Verlag, Berlin.

Bork, I. (2000). A Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 86, pp. 943–956.

Bork, I. (2005a). Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 91, pp. 740–752.

Bork, I. (2005b). Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part II: Calculations. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 91, pp. 753–763.

Christensen, C.L. & Rindel, J.H. (2005). A new scattering method that combines roughness and diffraction effects. *Proceedings of Forum Acusticum, Budapest, Hungary, 29 August – 2 September 2005*.

Cerdá, S., Querol, L., Planells, A., Montell, R., Giménez, A., Segura, J., Barba, A. & Cibrián, R. (2014). Auralization of a heritage (UNESCO) civil gothic building: the “Lonja de la Seda”. *Proceedings of Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7–12 September 2014*.

Dahlström F. & Salmenhaara, E. (1995). *Suomen musiikin historia 1*. WSOY, Porvoo.

Davis, A.H. & Kaye, G.W.C. (1927). *The Acoustics of Buildings*. G. Bell and Sons, London.

Dolejší, J., Slavko P., Pouzar, L. & Rychtáriková, M. (2008). Acoustics of Unique Baroque Theatre in Český Krumlov. *Akustika*, vol. 9, s. 2–15.

Dolejší, J., Dolejší, F., Rychtáriková, M., Stehlíková J. & Pouzar, L. (2010). Space Acoustics of Baroque Theatre Drottningholm. *Akustika*, vol. 13, s. 2–22.

Dolejší, J., Pouzar, L., Dolejší, J. & Rychtáriková, M. (2011). Room acoustic properties of baroque theatres. *Proceedings of Forum Acusticum, Aalborg, Denmark, 26 June – 1 July 2011*.

EN ISO 3382-1. (2009). *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*.

Farnetani, A., Prodi, N. & Pompoli, R. (2008). On the acoustics of ancient Greek and Roman theaters. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, no. 3, pp. 1557–1567.

Gade, A.C., Lisa, M., Christensen, C.L. & Rindel, J.H. (2004). Roman Theatre Acoustics; Comparison of acoustic measurement and simulation results from the Aspendos Theatre, Turkey. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> Congress of the International Commission for Acoustics (ICA), Kyoto, Japan, 4-9 April 2004*.

Galindo, M., Zamarreño, T. & Girón, S. (2009). Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, no. 3, pp. 1207–1218.

Herbert, T. & Wallace, J. (2002). *The Cambridge Companion to Brass Instruments*. Cambridge University Press, Cambridge.

Hidaka, T. & Beranek, L. (2000). Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 1, pp. 368–383.

Hirn, Y. (1949). *Teatrar och teaterstrider I 1800-talets Finland*. Holger Schildts Förlag, Helsinki.

Hodgson, M., York, N. & Yang, W. (2008). Comparison of Predicted, Measured and Auralized Sound Fields with Respect to Speech Intelligibility in Classrooms Using CATT-Acoustic and ODEON. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 94, pp. 883–890.

Howard, D. & Moretti, L. (2009). *Sound & Space in Renaissance Venice*. Yale University Press, New Haven & London.

Huttunen, H. (2014). Signaalinkäsittelyn perusteet. *Opintomoniste 2014:1*, Signaalinkäsittelyn laitos, Tampereen teknillinen yliopisto.

Iannace, G., Maffei, L. & Aletta, F. (2011a). Computer Simulation of the Effect of the Audience on the Acoustics of the Roman Theatre of Beneventum (Italy). *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theaters Conference*, Patras, Greece, 18-21 September, 2001.

Iannace, G., Maffei, L. & Trematerra, P. (2011b). The Acoustic Evolution of the Large Theatre of Pompeii. *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theaters Conference*, Patras, Greece, 18-21 September, 2001.

Jeon, J.Y. & Kim, Y.H. (2011). Objective and Subjective Evaluations of Musicians' Performances in Relation to Stage Support Parameters. *Proceedings of Forum Acusticum*, Aalborg, Denmark, 26 June – 1 July 2011.

Jäppinen, J. (2003). Harpun helähdys arkistossa, teoksessa: Jäppinen, J. (toim.) *Harpunkielistä shimmykarkkiin*, Helsingin musiikkielämää viidellä vuosisadalla. Helsingin kaupunginmuseo, Helsinki, s. 9–150.

Kalkandjiev, Z.S. & Weinzierl, S. (2013a). The Influence of Room Acoustics on Solo Music Performance: An Empirical Case Study. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 99, pp. 433–441.

Kalkandjiev, Z.S. & Weinzierl, S. (2013b). Room acoustics viewed from the stage: Solo performers' adjustments to the acoustical environment. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA)*, Toronto, Canada, 9-11 June 2013.

Klinge, M., Knapas, R., Leikola, A. & Strömberg J. (1990). *Helsingin yliopisto 1640–1990, kolmas osa*. Otava, Helsinki.

Kob, M. (2002). *Physical Modeling of the Singing Voice*, Dissertation, Aachen Technischen Hochschule.

Koury, D.J. (1981). *Orchestral Performance Practices in the Nineteenth Century*. University of Rochester Press, Rochester, NY.

Krokstad, A., Strøm, S. & Sørsdal, S. (1986). Calculating the acoustical room response by use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 8, pp. 118–125.

Kulowski, A. (1985). Algorithmic representation of the ray tracing technique. *Applied Acoustics*, vol. 16, no. 4, pp. 291–312.

Kylliäinen, M. & Takala, J. (2013). Kadonnutta akustiikkaa etsimässä, Helsingin Nya Teaternin huoneakustiikan ennallistaminen. *Tekniikan Waiheita*, 4/13, s. 5–17.

Lappalainen, S. (1994). Tänä iltana yliopiston juhlasalissa. *Yliopistopaino*, Helsinki.

Lawson, C. & Stowell, R. (1999). *The Historical Performance of Music*. Cambridge University Press, Cambridge.

Lisa, M., Rindel, J.H. & Christensen, C.L. (2004). Predicting the Acoustics of Ancient Open-air Theatres: The Importance of Calculation Methods and Geometrical Details. *Proceedings of the Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting (BNAM)*, Mariehamn, Åland, 8-10 June 2004.

Llinares, J., Bravo, J.M. & Uris, A. (2012). Acoustic computing applied to heritage spaces design. Study about application limits. *Proceedings of Euronoise*, Prague, Czech Republic, 10-13 June 2012.

Manninen, A. (2004). *Puretut talot, 100 tarinaa Helsingistä*. Helsingin Sanomat, Helsinki.

Marvia, E. & Vainio, M. (1993). *Helsingin Kaupunginorkesteri 1882-1982*. WSOY, Juva.

Meyer, J. (2009). *Acoustics and the Performance of Music, Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. 5<sup>th</sup> Edition. Springer Science+Business Media, LLC, New York.

Mourik, van J., Oxnard, S., Foteinou, A. & Murphy, D.T. (2014). Hybrid Acoustic Modelling of Historic Spaces Using Blender. Proceedings of Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7–12 September 2014.

Murillo, D.M., Cooper, C. & Fazi, F.M. (2014). Acoustic Survey of a Late Medieval Building Based on Geometrical Acoustics Methods. Proceedings of Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7–12 September 2014.

Naylor, G. (1993). Computer modeling and auralisation of sound fields in rooms. *Applied Acoustics*, vol. 38, no. 2–4, pp. 89–92.

Niemi, H. (2014). Miltä sinfoniaorkesteri on kuulostanut Helsingissä kaksi vuosisataa sitten? Esimerkkitapauksena: Beethoven, Sinfonia no. 7, A-duuri, op.92, I Poco Sostenuto, Vivace. Opinnäytetyö: Tampereen konservatorio, Ammatillinen II aste, Musiikon koulutusohjelma.

Niskanen, R. (2008). *Missä soitto soi, Musiikkitalat Suomessa*. Multikustannus Oy, Vantaa.

ODEON Room Acoustics Software, Version 12, User manual. (2013). Odeon A/S, Lyngby, Denmark.

Postma, B.N.J. & Katz, B.F.G. (2014). A History of the Use of Reflections Arrival Time in Pre-Sabinian Concert Hall Design. Proceedings of Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7–12 September 2014.

Prodi, N. & Velecka, S. (2005). A scale value for the balance inside a historical opera house. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117, no. 2, pp. 771–779.

Pätynen, J., Pulkki, V. & Lokki, T. (2008). Anechoic Recording System for Symphony Orchestra. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 94, pp. 856–865.

Pätynen, J. (2009) Directivities of Orchestra Instruments for Auralization. Proceedings of the EAA Symposium on Auralization, Espoo, Finland, 15–17 June 2009.

Pätynen, J. & Lokki, T. (2010a). Directivities of Symphony Orchestra Instruments. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 96, pp. 138–167.

Pätynen, J. & Lokki, T. (2010b). Evaluation of concert hall auralization with virtual symphony orchestra. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA)*, Melbourne, Australia, 29–31 August 2010.

Pöykkö, K. (1972). *Das Hauptgebäude der Kaiserlichen Alexander-Universität von Finnland*. Helsinki, Suomen muinaismuistoyhdistyksen aikakauskirja 74.

Rauma, T., Etelämäki, P., Kemppi, M., Kosonen, J., Leppänen, T., Nevalainen, M., Puronen, K. & Virtanen, T. (1992). *Helsingin Esplanadin teatteri 1827–1861 uudelleen piirrettynä vuonna 1992*. Harjoitustyö, Tampereen teknillinen korkeakoulu (TTKK), arkkitehtuurin osasto. Ohjaajana professori Tore Tallqvist.

Rindel, J.H. (2002). *Modelling in Auditorium Acoustics – From Ripple Tank and Scale Models to Computer Simulations*. *Proceedings of Forum Acusticum*, Sevilla, Spain, 16–21 September 2002.

Rindel, J.H. (2004). Evaluation of room acoustic qualities and defects by use of auralization. *Proceedings of the 148<sup>th</sup> Meeting of the Acoustical Society of America*, San Diego, CA, 15–18 November 2004.

Rindel, J.H. & Christensen, C.L. (2008). Auralisation of Concert Halls Using Multi-Source Representation of a Symphony Orchestra. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 30, pt. 3, pp. 333–338.

Rindel, J.H. & Christensen, C.L. (2009). Auralisation of a Symphony Orchestra with Odeon – The Chain from Musical Instruments to the Eardrums. *Proceedings of the EAA Symposium on Auralization*, Espoo, Finland, 15–17 June 2009.

Rindel, J.H. (2010). Room Acoustic Prediction Modeling. *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Meeting of the Brazilian Acoustical Society (SOBRAC)*, Salvador, Brazil, 18–21 May 2010.

Rindel, J.H. (2011a). Echo Problems in Ancient Theatres and a Comment to the ‘Sounding Vessels’ Described by Vitruvius. *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theaters Conference*, Patras, Greece, 18–21 September, 2001.

Rindel, J.H. (2011b). The ERATO Project and its Contribution to Our Understanding of the Acoustics of Ancient Theatres. *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theaters Conference*, Patras, Greece, 18–21 September, 2001.

Ringbom, Å. (1988). *Societetshusen I Storfurstendömet Finland*. Helsinki, Suomen muinaismuistoyhdistyksen aikakausikirja 92.

Rychtáriková, M., Dolejší, J., Vermeir, G., Dolejší, J. & Pouzar, L. (2010). Comparison of Two Baroque Theatres from Acoustical Point of View. *Akustika*, vol. 14, s. 2–8.

Rychtáriková, M., Šturmová, I., Dolejší, J. & Pouzar, L. (2012a). Acoustics of the Baroque Theatre at Gotha Chateau. *Akustika*, vol. 18, s. 28–34

Rychtáriková, M., Dolejší, J., Šturmová, I., Dolejší, F., Dolejší, J. & Pouzar, L. (2012b). Acoustic Properties of Four Baroque Theatres. *Akustika*, vol. 18, s. 35–43.

Sabine, W.C. (1913). Theater Acoustics. *The American Architect* 104, 257. Painettu uudelleen lähteessä: *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press, 1922.

Schroeder, M.R. (1973). Computer Models for Concert Hall Acoustics. *American Journal of Physics*, vol. 41, pp. 461–471.

Segura, J., Barba, A., Planells, A., Cerdá, S., Giménez, A. & Cibrián, R.M. (2014). Acoustical reconstruction of a church in ruins: the monastery of Santa Maria de la Murta. *Proceedings of Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7–12 September 2014*.

Sola, P. (1936). *Oopperanäytäntöjä Helsingissä ennen vuotta 1869*. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, Musiikkitieteen laitos.

Spitzer, J. & Zaslav, N. (2004). *The Birth of the Orchestra*. Oxford University Press, New York.

Takala, J. & Kylliäinen, M. (2013). In search of lost acoustics: Nya Teatern in Helsinki, 1860–1863. *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Internoise, Innsbruck, Austria, 15-18 September, 2013*.

Takala, J. & Kylliäinen, M. (2014). Comparison of modelled performance of a vanished building with historical information on its acoustics. *Proceedings of Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7–12 September 2014*.

Thompson, E. (2002). *The Soundscape of Modernity, Architectural Acoustics and the Culture of Listening in America, 1900–1933*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.



Torres, R., Svensson, U. & Kleiner, M. (2001). Computation of edge diffraction for more accurate room acoustics auralization. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, no. 2, pp. 600–610.

Ueno, K., Kato, K. & Kawai, K. (2010). Effect of Room Acoustics on Musicians' Performance. Part I: Experimental Investigation with a Conceptual Model. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 96, pp. 505–515.

Vassilantonopoulos, S.L. & Mourjopoulos, J.M. (2001). Virtual Acoustic Reconstruction of Ritual and Public Spaces of Ancient Greece. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 87, pp. 604–609.

Vassilantonopoulos, S.L. & Mourjopoulos, J.M. (2003). A Study of Ancient Greek and Roman Theater Acoustics. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 89, pp. 123–136.

Vassilantonopoulos, S.L. & Mourjopoulos, J.M. (2009). The Acoustics of Roofed Ancient Odeia: The Case of Herodes Atticus Odeion. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 95, pp. 291–299.

Vigeant, M.C., Wang, L.M. & Rindel, J. H. (2008). Investigations of Orchestra Auralizations Using the Multi-Channel Multi-Source Auralization Technique. *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 94, pp. 866–882.

Viljo, E.M. (1985). Theodor Höijer, En arkitekt under den moderna storstadsarkitekturens genombrottsid i Finland från 1870 till sekelskiftet. *Suomen muinaismuistoyhdistyksen aikakauskirja* 88.

Vorländer, M. (1989). Simulation of the transient and steady-state sound propagation in room using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, no. 1, pp. 172–178.

Vorländer, M. (2008). *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. 1<sup>st</sup> Edition. Springer-Verlag, Berlin.

Välimäki, V., Parker, J.D., Savioja, L., Smith, J.O. & Abel, J. S. (2012). Fifty Years of Artificial Reverberation. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, no. 5, pp. 1421–1447.

Wasastjerna, N. (1941). *En krönika om Helsingfors*. Söderström & c:o Förlagsaktiebolag, Helsingfors.

Weckström, T. (1966). *Chiewitz teaterhus*. Helsingfors, Svenska Teatern.

Weinzierl, S. (2002). Beethovens Konzerträume, Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen. Vorlag Erwin Bochinsky, Frankfurt am Main.

Weitze, C.A., Rindel, J.H., Christensen, C.L. & Anders, C. (2002). The Acoustical History of Hagia Sophia revived through Computer Simulation. Proceedings of Forum Acusticum, Sevilla, Spain, 16-21 September 2002.

Zeng, X., Christensen, C.L. & Rindel, J.H. (2006). Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. Applied Acoustics, vol. 67, pp. 771–786.

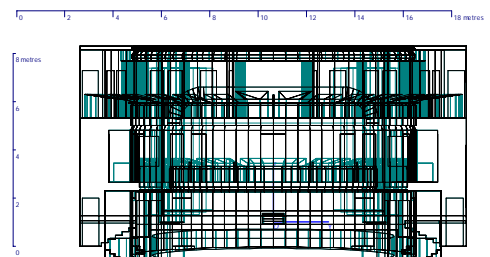
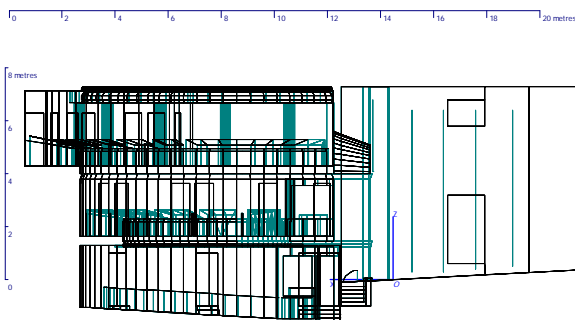
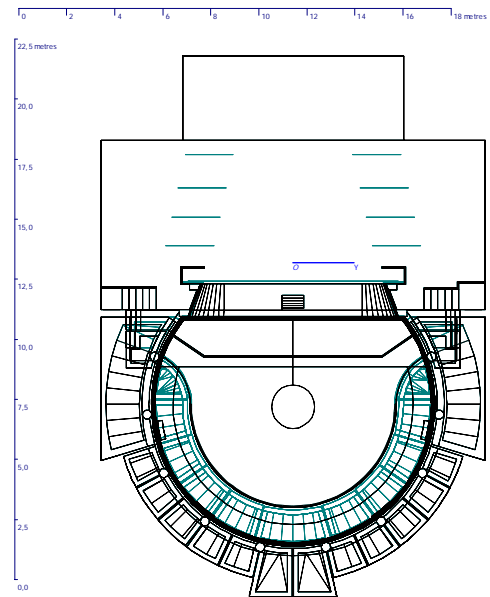
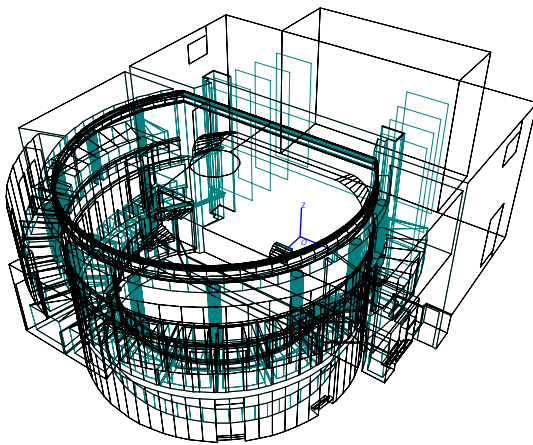
### **Verkkolähteet**

Helsingin kaupunginorkesterin konsertit 1882-. (2013). Aineiston ylläpitäjä on Helsingin kaupunginorkesteri. Aineisto on ladattu Helsinki Region Infoshare -palvelusta 23.10.2014 lisenssillä HRI - tietoaaineistojen lisenssi - nimeä.

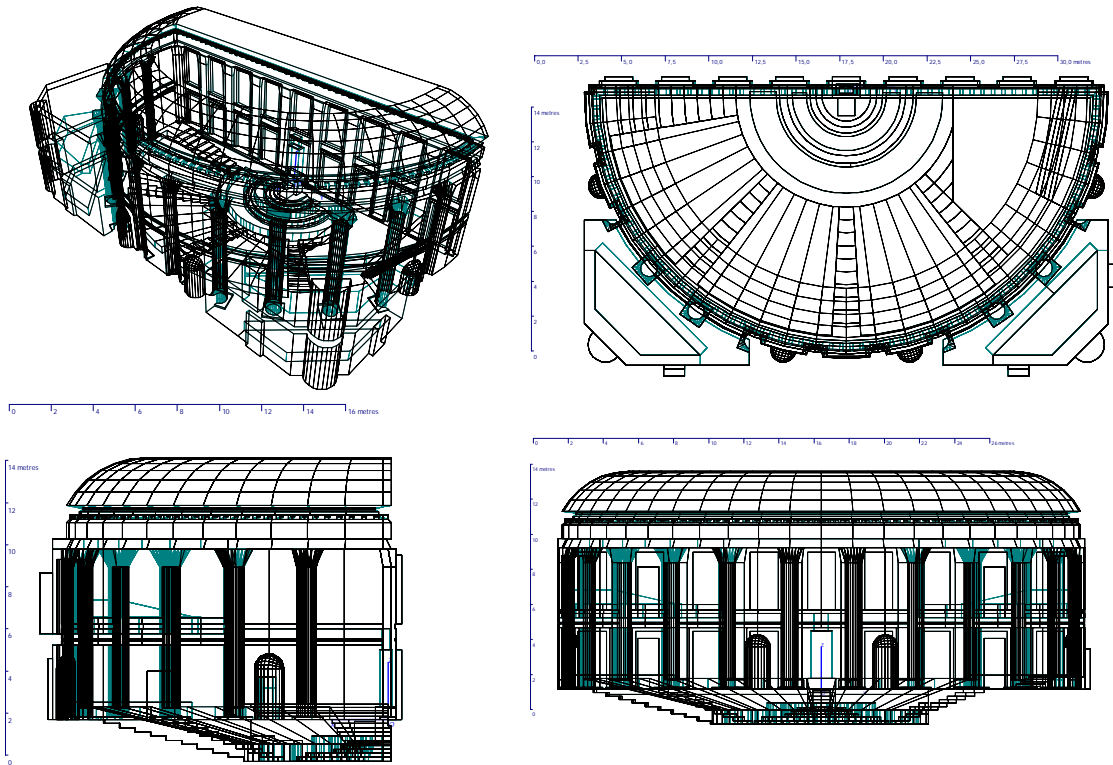
Koivisto, J. (2006). Kansa, ooppera ja Kaarle-kuningas. Kun Suomi loi oopperaa ja ooppera Suomea. Sähköinen julkaisu: Saatavissa (viitattu 19.3.2014): <http://operapm.operafin.fi/files/kansa.%20ooppera%20ja%20kaarle-kuningas.%20kirja.pdf>.

# Liite 1: Mallinnettujen salien geometria

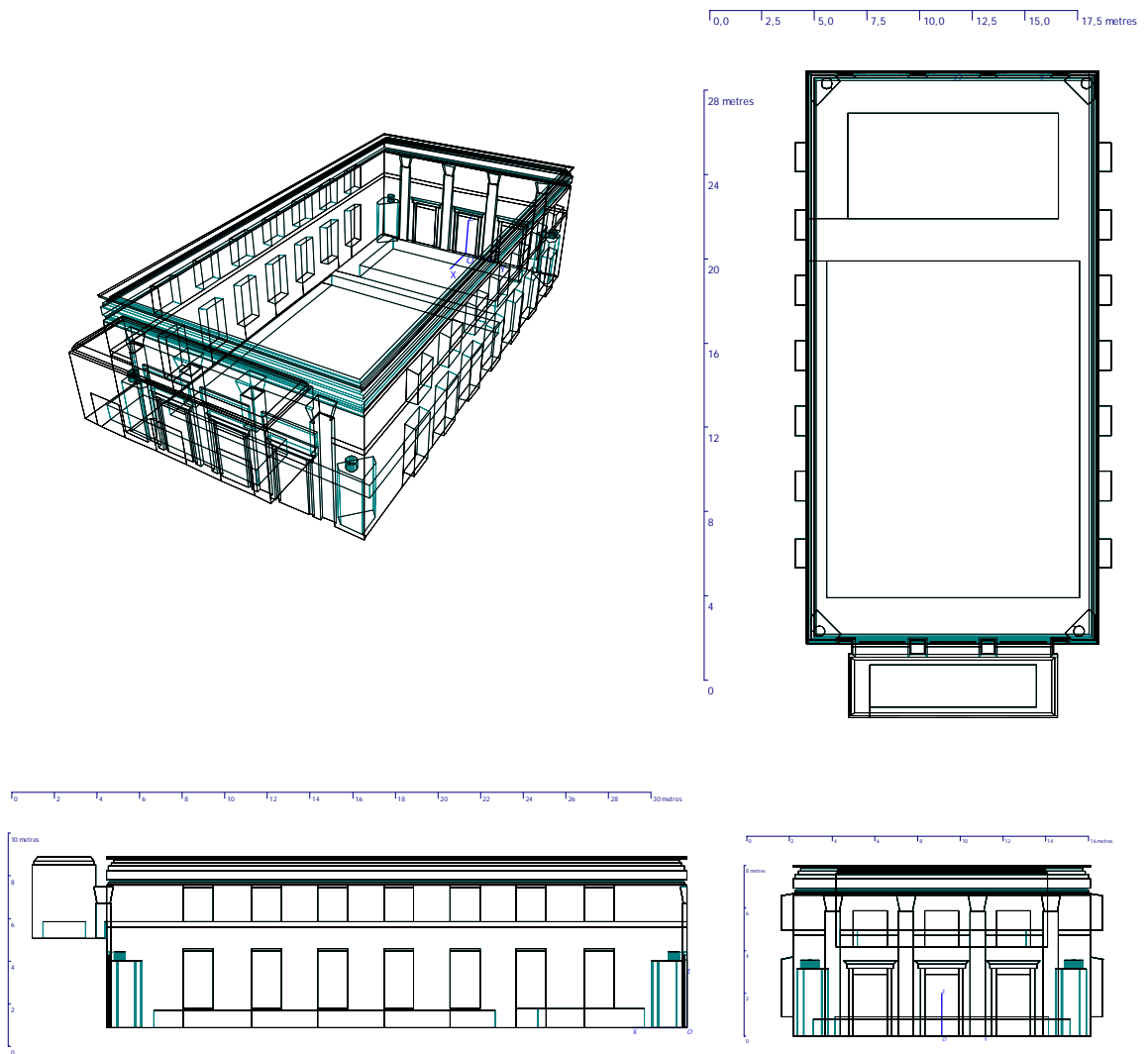
## Engelin teatteri



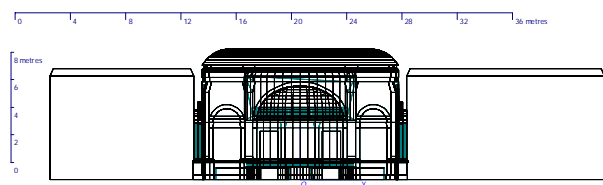
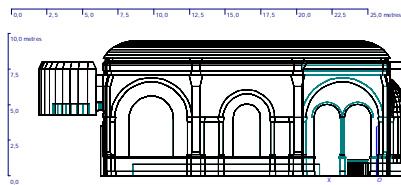
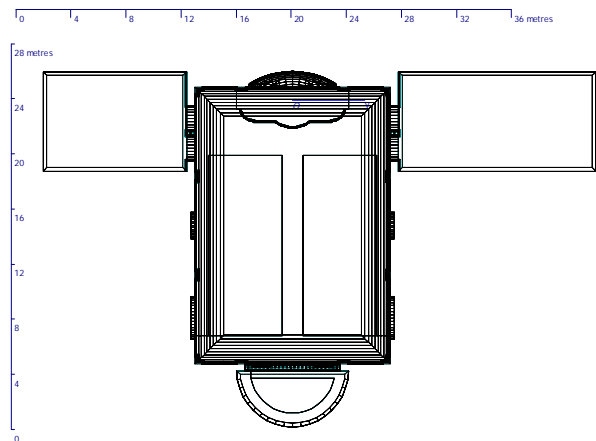
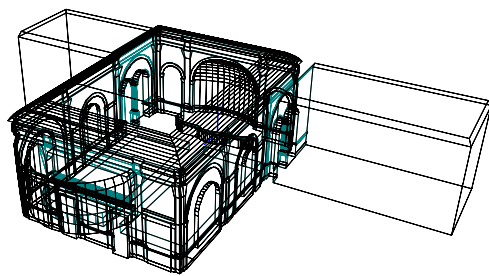
## Yliopiston juhlasali



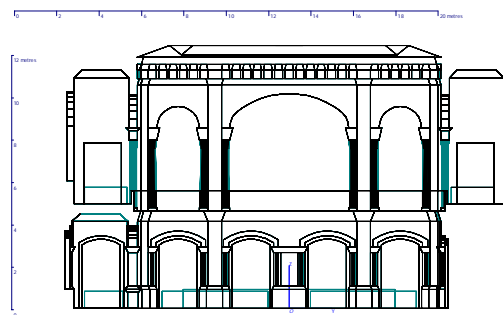
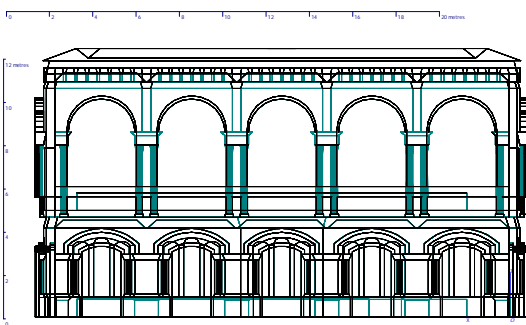
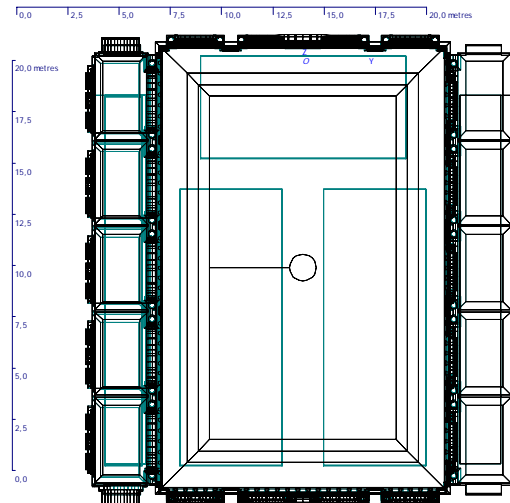
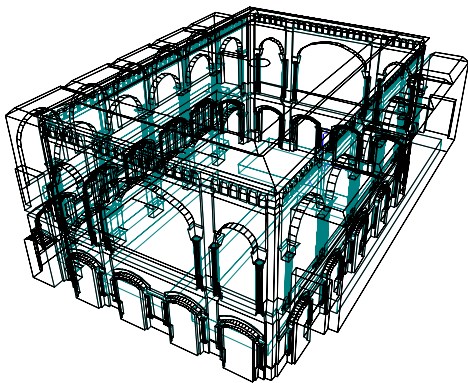
### Seurahuoneen 1. vaiheen sali



## Seurahuoneen 2. vaiheen sali



# Palokunnantalon juhlasali



**Liite 2: Mallinnettujen salien pintamateriaalit, sekä absorptio- ja sirontakertoimet**

	Materiaali	Absorptiokertoimet taajuuksialtoittain [Hz]							Sirontakerroin	Tyyppi
		125	250	500	1000	2000	4000			
Verhot*	Drapes, heavy velour (Harris, 1991)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65	0,5	Normal	
Puu	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	Normal	
Puu_koristeltu	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	Normal	
Puu_fractional	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	Fractional	
Puu_koristeltu_fractional	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	Fractional	
Massiivipuu	Puupaneeli 50 mm suoraan seinää vasten (Halme 1976)	0,1	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	Normal	
Massiivipuu_fractional	Puupaneeli 50 mm suoraan seinää vasten (Halme 1976)	0,1	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	Fractional	
Yleisö, täynnä	Audience, lightly upholstered seats (Beranek_Hidaka, 1998, group 3)	0,51	0,64	0,75	0,8	0,82	0,83	0,7	Normal	
Yleisö, tyhjä	Extra lightly upholstered seats (Beranek & Hidaka 1998)	0,35	0,4	0,41	0,38	0,33	0,27	0,5	Normal	
Ovi	Solid wooden door (Bobran, 1973)	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,2	Normal	
Ikkuna	Glass, ordinary window glass (Harris, 1991)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,05	Normal	
Aukko	100 % absorbent	1	1	1	1	1	1	0,05	Normal	
Kuiskaajan koppi	Hollow wooden podium (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1	0,05	Normal	

\*Pinnat määritetty 50 % läpinäkyviksi

	Materiaali	Absorptiokertoimet taajuuksialtoittain [Hz]							Sirontakerroin	Tyyppi
		125	250	500	1000	2000	4000			
Taso										
Rapattu muuraus, sileä	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	Normal	
Rapattu muuraus, kuvioitu	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,2	Normal	
Rapattu muuraus, sileä, fractional	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	fractional	
Rapattu muuraus, kuvioitu, fractional	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,2	fractional	
Katto	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	Normal	
Katto, fractional	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	Fractional	
Lattia, puuta	Wooden floor on joists (Ingerslev, 1949)	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,05	Normal	
Yleisö, täynnä	Audience, lightly upholstered seats (Beranek_Hidaka, 1998, group 3)	0,51	0,64	0,75	0,8	0,82	0,83	0,7	Normal	
Yleisö, tyhjä	Extra lightly upholstered seats (Beranek & Hidaka 1998)	0,35	0,4	0,41	0,38	0,33	0,27	0,5	Normal	
Pilari, jalusta	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,3	Normal	
Kapiteelit	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,3	Normal	
Patsas, jalusta	Marble or glazed tile (Harris, 1991)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	Normal	
Patsas	Marble or glazed tile (Harris, 1991)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	Normal	
Katederi*	Hollow wooden podium (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1	0,6	Normal	
Ikkunat	Glass, ordinary window glass (Harris, 1991)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,7	Normal	
Lava, peitetty kankaalla	Drapes, light velour, hung straight, in contact with wall (Harris, 1991)	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,2	Normal	
Tuolit, lavan alla	Extra lightly upholstered seats (Beranek & Hidaka 1998)	0,35	0,4	0,41	0,38	0,33	0,27	0,5	Normal	
Ovet, puuta	Solid wooden door (Bobran, 1973)	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,2	Normal	
Lava, puuta	16 mm wood on 40 mm studs (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07	0,05 / 0,7	Normal	

\*Salin keskellä oleva puhujankoroke



Seurahuoneen 1. vaiheen materiaalit

Taso	Materiaali	Absorptiokerroimet taajuuskaistoittain [Hz]						Sirontakerroin	Tyyppi
		125	250	500	1000	2000	4000		
Rapattu muuraus	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	Normal
Ikkunat	Glass, ordinary window glass (Harris, 1991)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,05	Normal
Rapattu muuraus, kuvioitu	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,2	Normal
Puukaide	16 mm wood on 40 mm studs (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07	0,05	Normal
Puukaide_kuvioitu	16 mm wood on 40 mm studs (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07	0,2	Normal
Välipohja_puuta	Wooden floor on joists (Ingerslev, 1949)	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,05	Normal
Ovi	Solid wooden door (Bobran, 1973)	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,2	Normal
Kaakeliuuni	Glaze plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	Normal
Kapiteeli	Glaze plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,2	Normal
Yleisö, täynnä	Audience, lightly upholstered seats (Beranek_Hidaka, 1998, group 3)	0,51	0,64	0,75	0,8	0,82	0,83	0,7	Normal
Yleisö, tyhjä	Extra lightly upholstered seats (Beranek & Hidaka 1998)	0,35	0,4	0,41	0,38	0,33	0,27	0,5	Normal
Orkesterilava	16 mm wood on 40 mm studs (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07	0,05 / 0,7	Normal


Seurahuoneen 2. vaiheen materiaalit

Taso	Materiaali	Absorptiokerroimet taajuuskaistoittain [Hz]						Sirontakerroin	Tyyppi
		125	250	500	1000	2000	4000		
Rapattu muuraus, sileä	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	Normal
Rapattu muuraus, sileä, fractional	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	fractional
Rapattu muuraus, kuvioitu	Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,2	Normal
Katto, rapattu	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05/0,2	Normal
Katto, rapattu, fractional	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	fractional
Yleisö, täynnä	Audience, lightly upholstered seats (Beranek_Hidaka, 1998, group 3)	0,51	0,64	0,75	0,8	0,82	0,83	0,7	Normal
Yleisö, tyhjä	Extra lightly upholstered seats (Beranek & Hidaka 1998)	0,35	0,4	0,41	0,38	0,33	0,27	0,5	Normal
Lava, puuta	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05 / 0,7	Normal
Lava, puuta, fractional	Wood, 25 mm with air space (Ref. Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	fractional
Lava, kangas	Drapes, heavy velour (Harris, 1991)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65	0,2	Normal
Lattia, puuta	Wooden floor on joists (Ingerslev, 1949)	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,05	Normal
Ikkunat	Glass, ordinary window glass (Harris, 1991)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,05	Normal
Verhot	Drapes, heavy velour (Harris, 1991)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65	0,2	Normal
Ovi	Solid wooden door (Bobran, 1973)	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,2	Normal

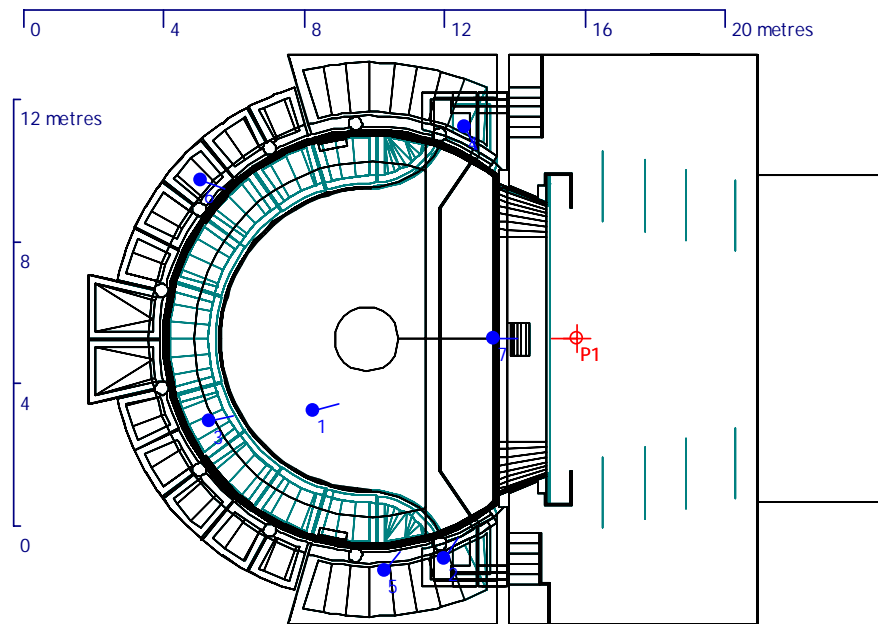


### Liite 3: Vastaanottopisteiden sijainti saleissa

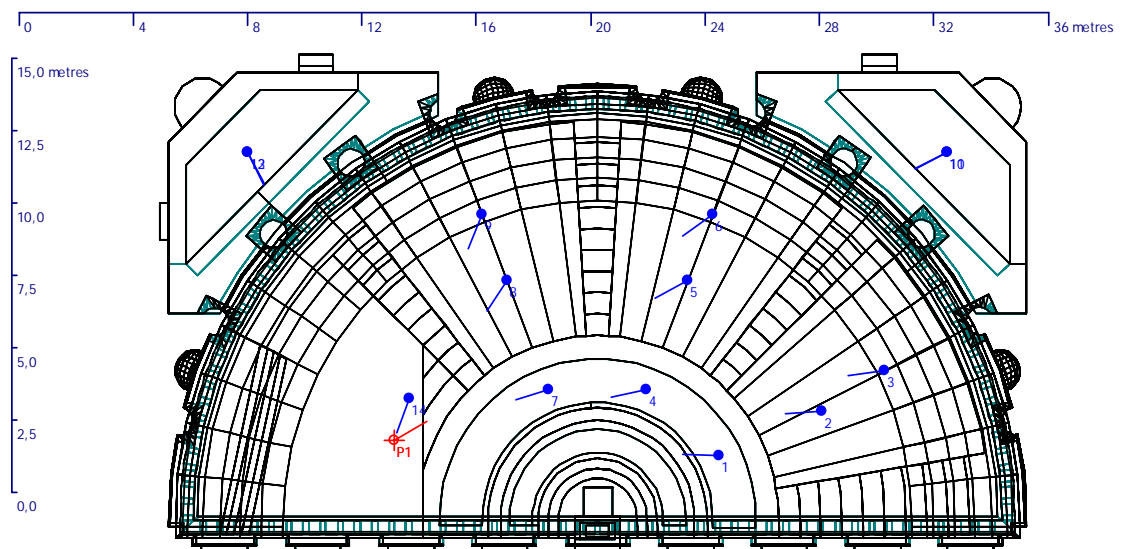
Lähetyspiste: 

Vastaanottopiste: 

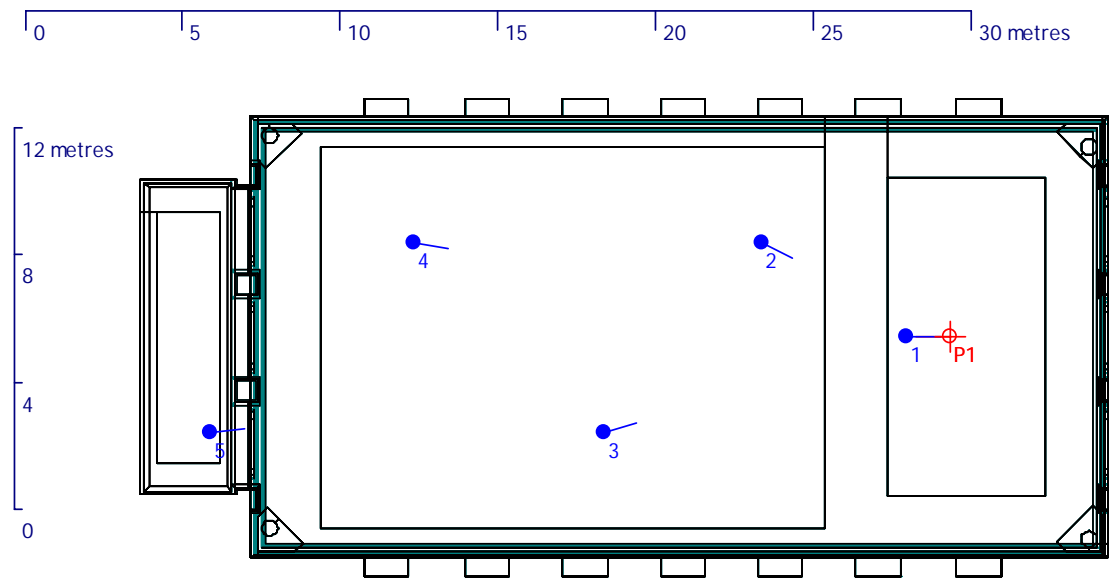
#### Engelin teatteri



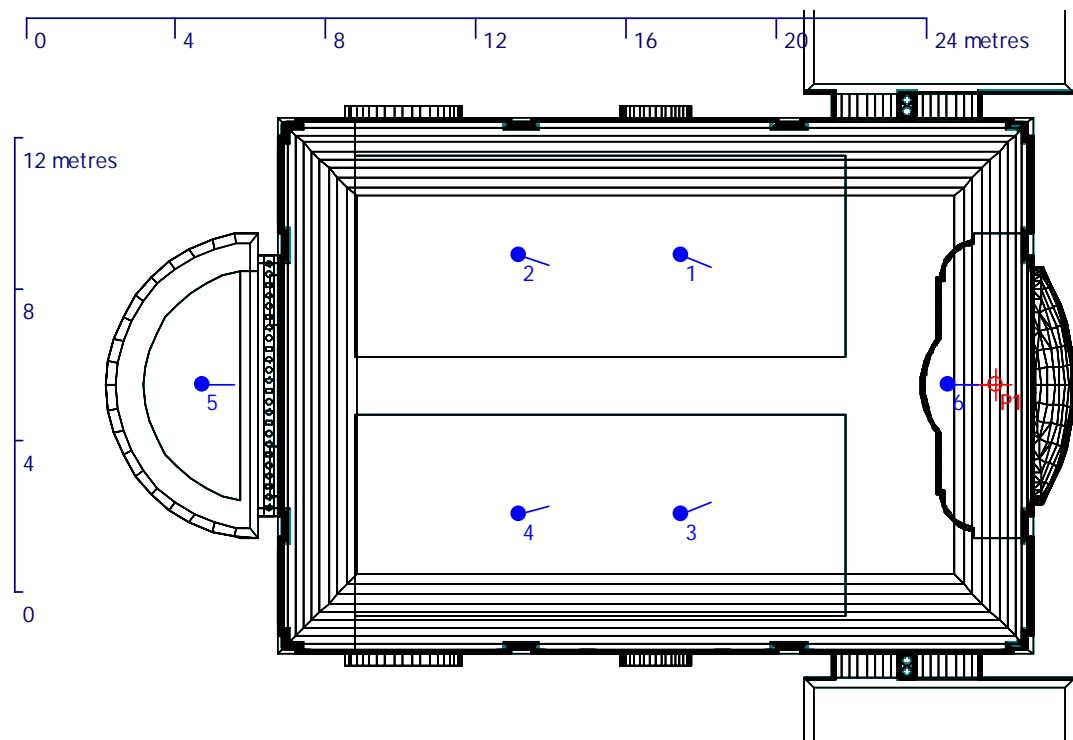
#### Yliopiston juhlasali



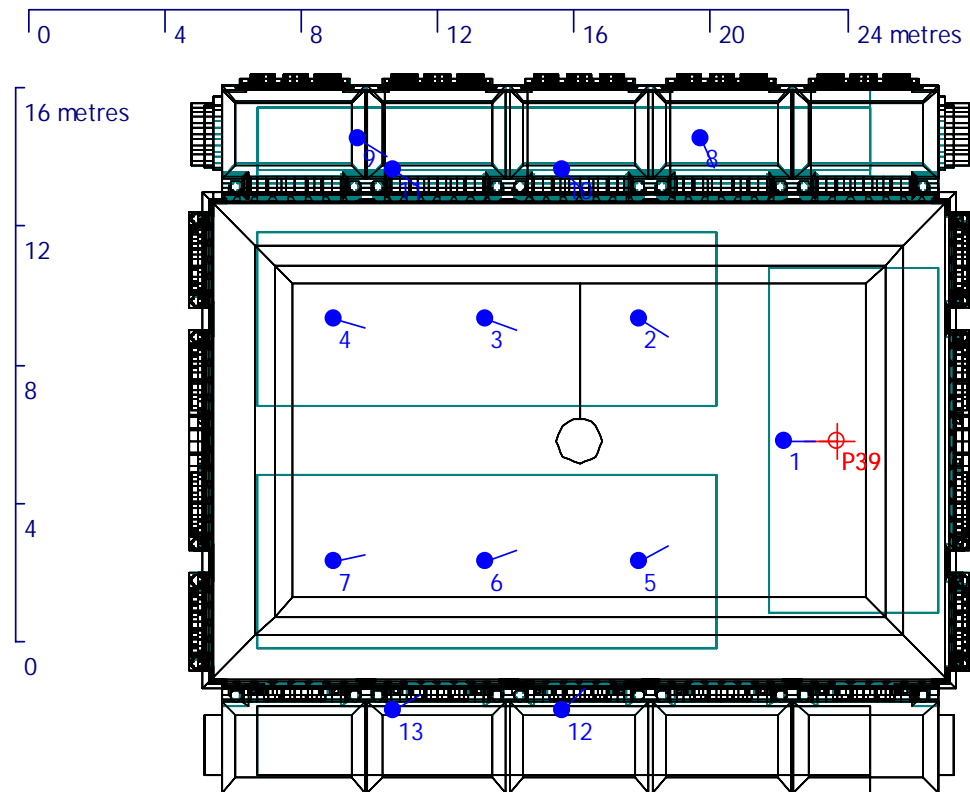
### Seurahuoneen 1. vaihe



### Seurahuoneen 2. vaihe

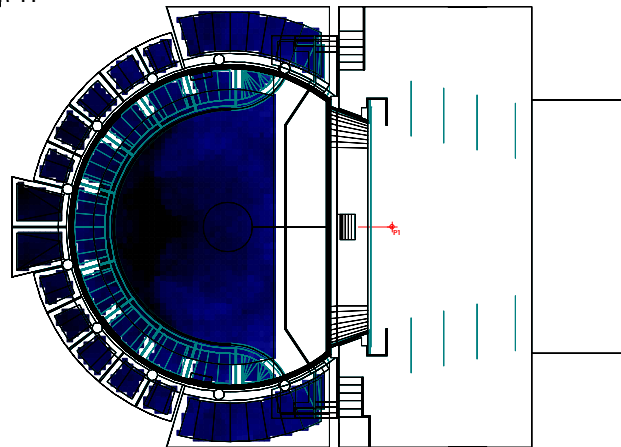


Palokunnantalon juhlasali



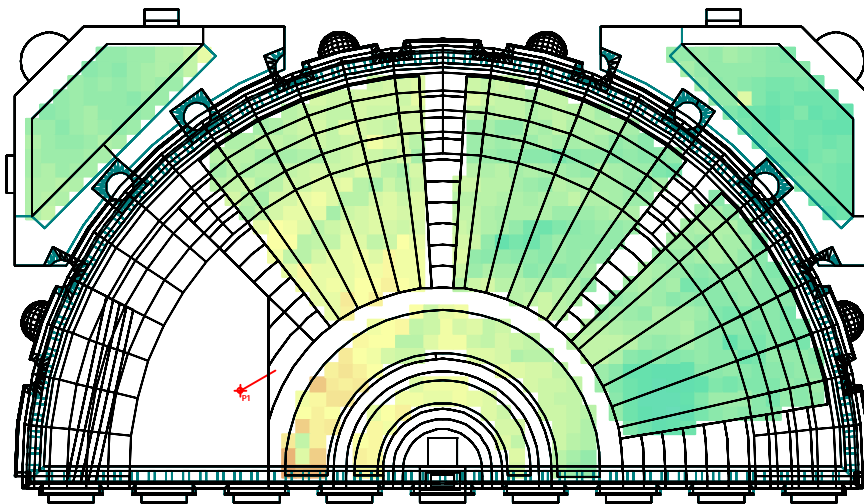
## Liite 4: Verkot mallinnetuista huoneakustisista parametreistä

Engelin teatteri

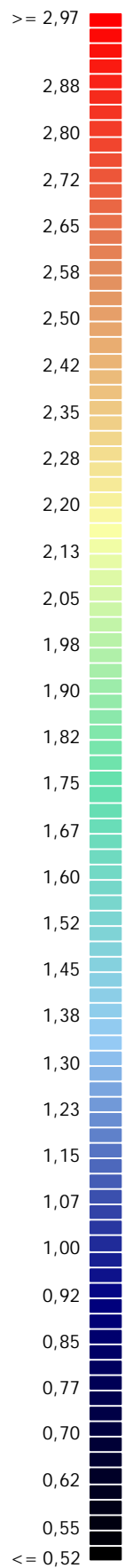
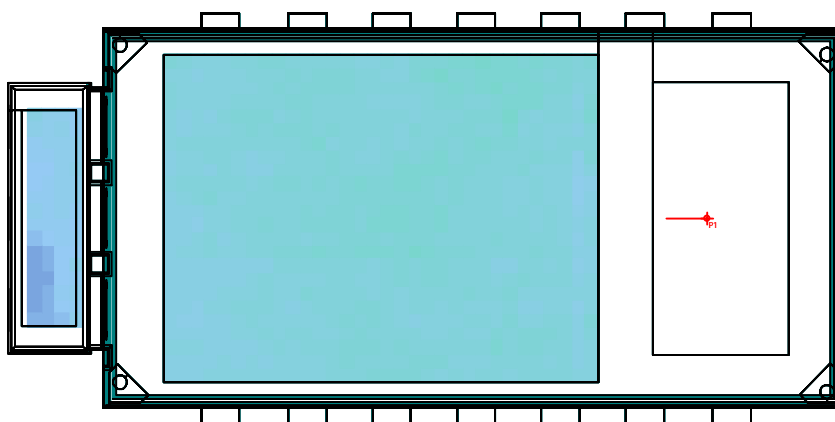


EDT (s) at 1000 Hz  $\geq 2,97$

Yliopiston juhlasali

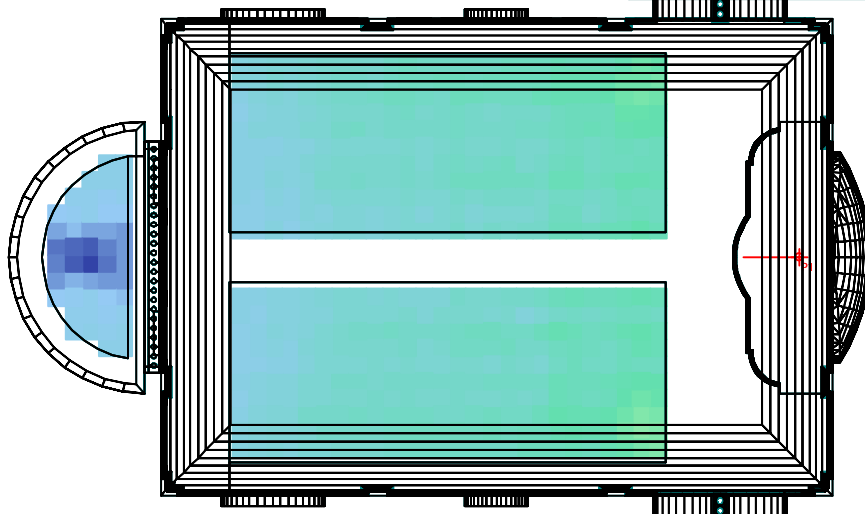


Seurahuoneen 1. vaihe

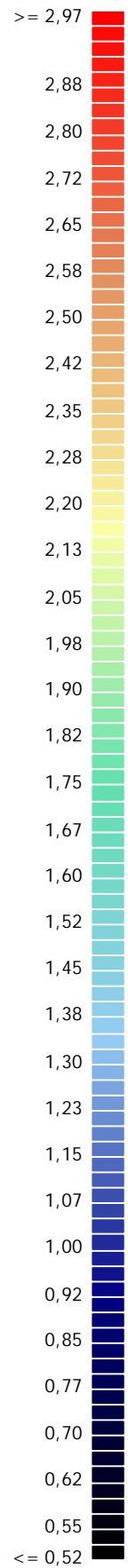
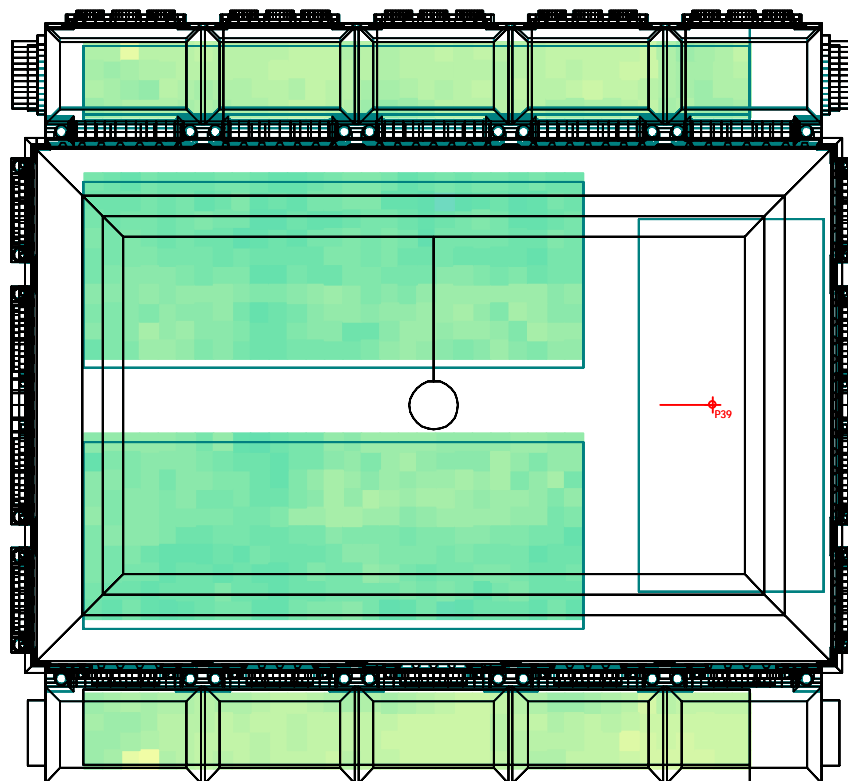


EDT (s) at 1000 Hz  $\geq 2,97$

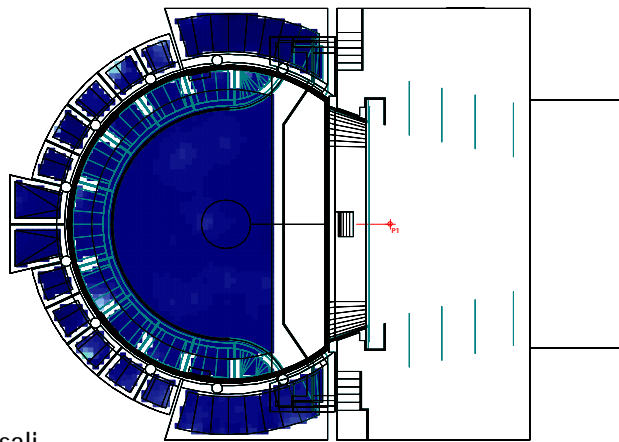
Seurahuoneen 2. vaihe



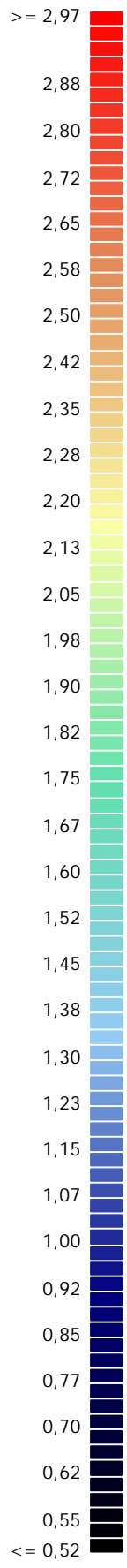
Palokunnantalon juhlasali



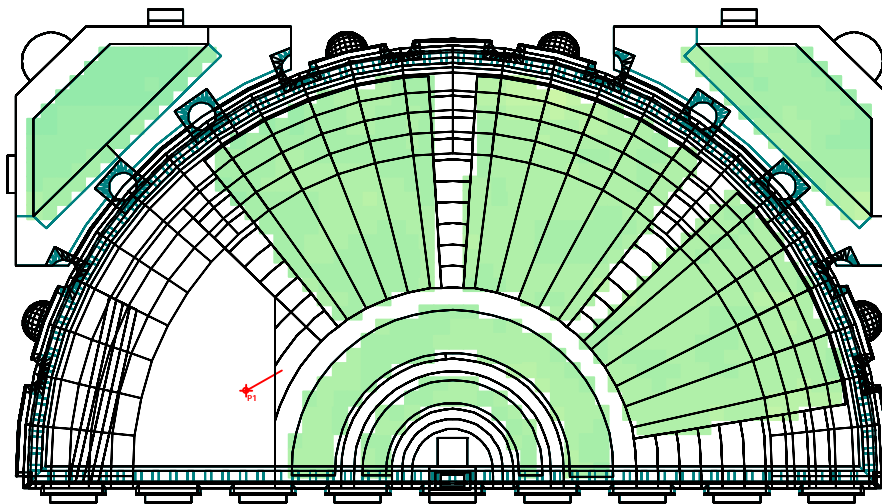
Engelin teatteri



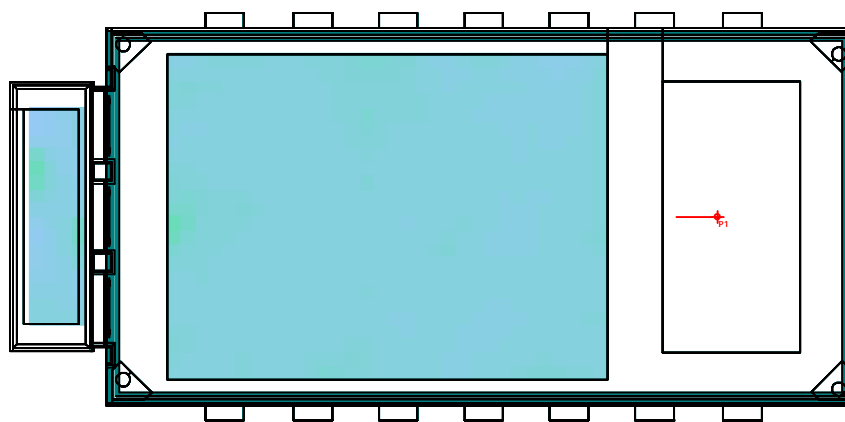
T(30) (s) at 1000 Hz >= 2,97



Yliopiston juhlasali

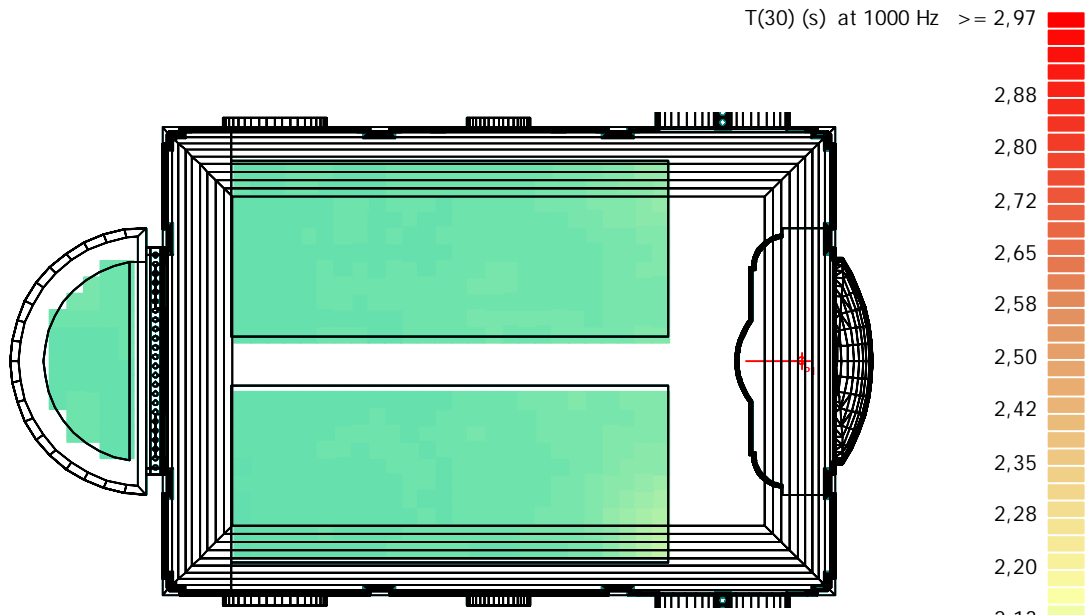


Seurahuoneen 1. vaihe

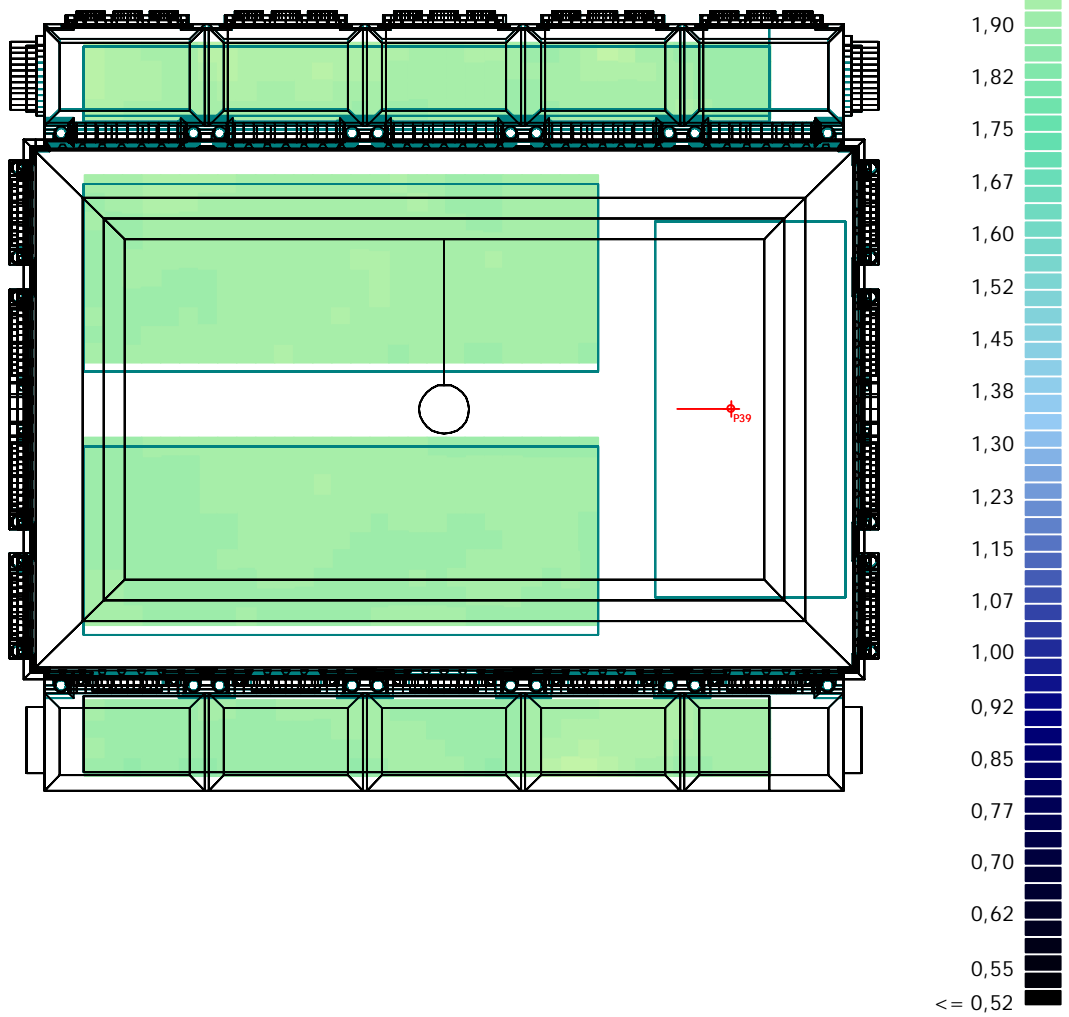




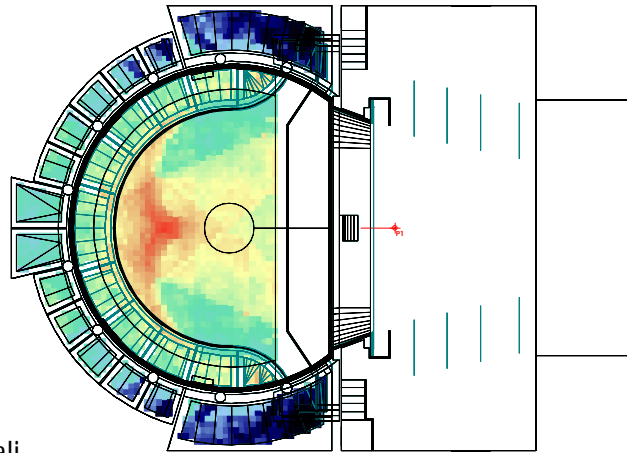
Seurahuoneen 2. vaihe



Palokunnantalon juhlasali

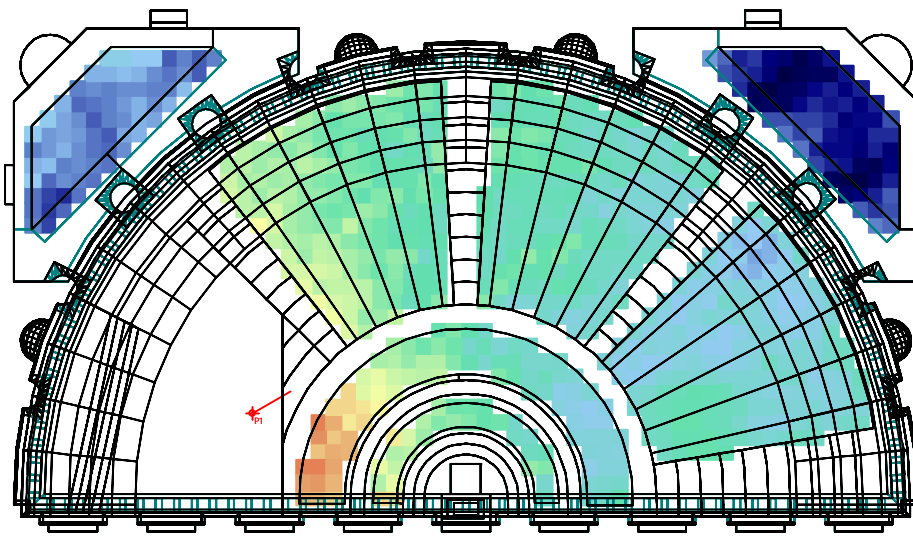


Engelin teatteri

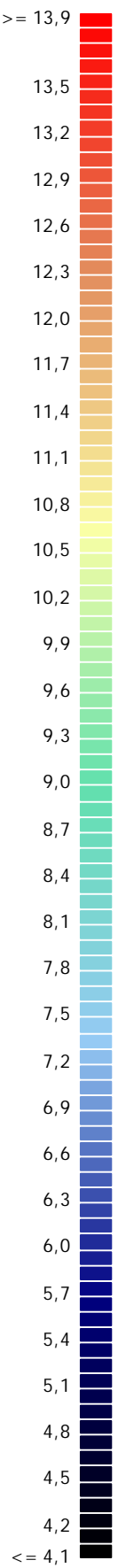
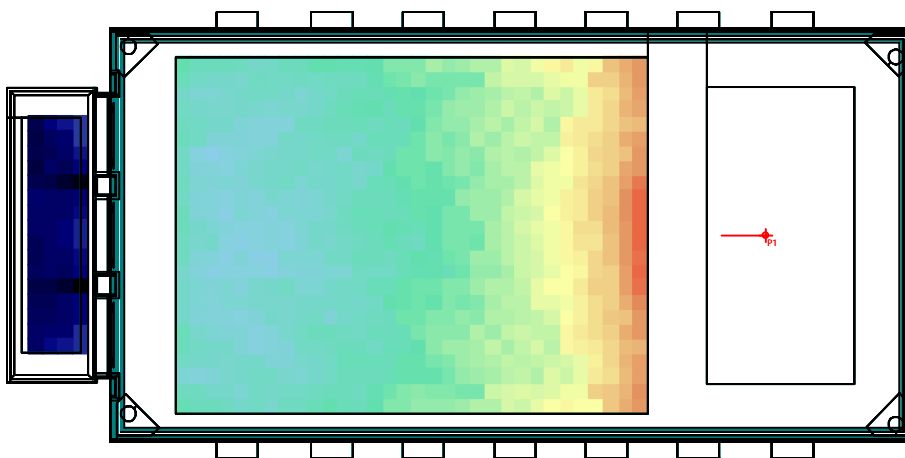


SPL (dB) at 1000 Hz  $\geq 13,9$

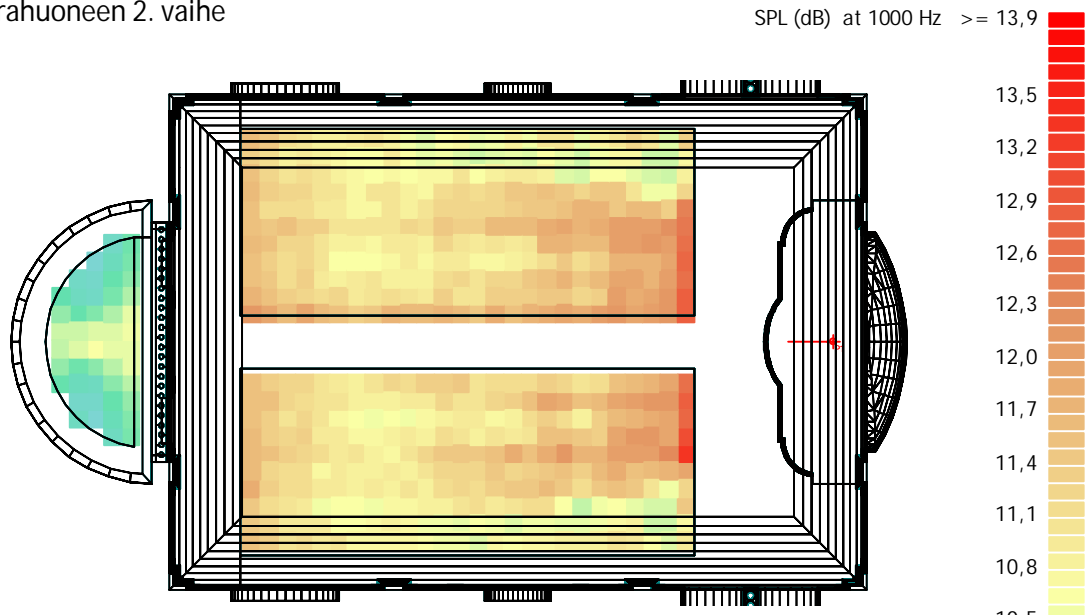
Yliopiston juhlasali



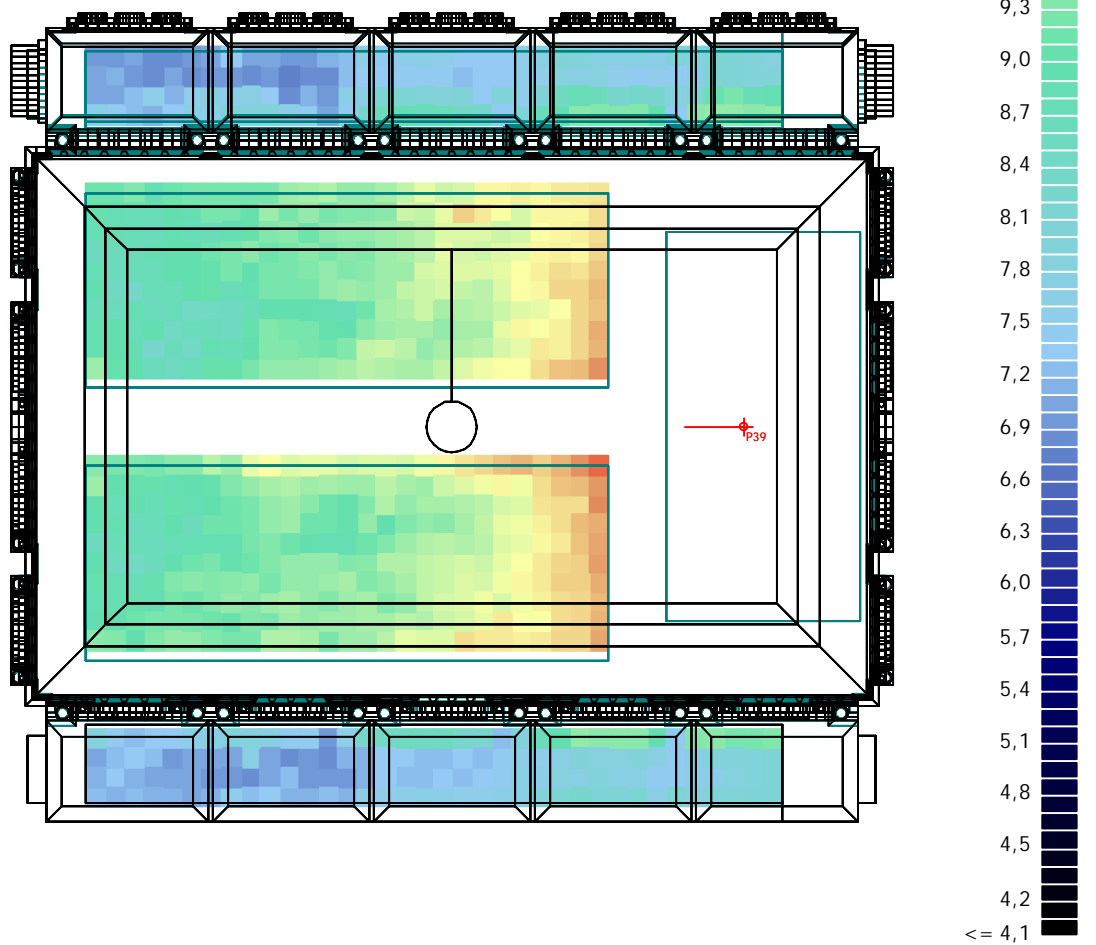
Seurahuoneen 1. vaihe



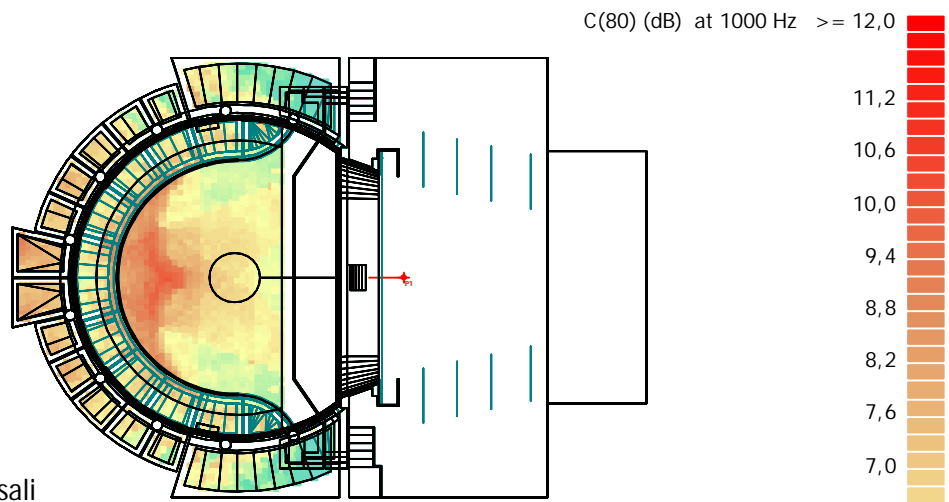
Seurahuoneen 2. vaihe



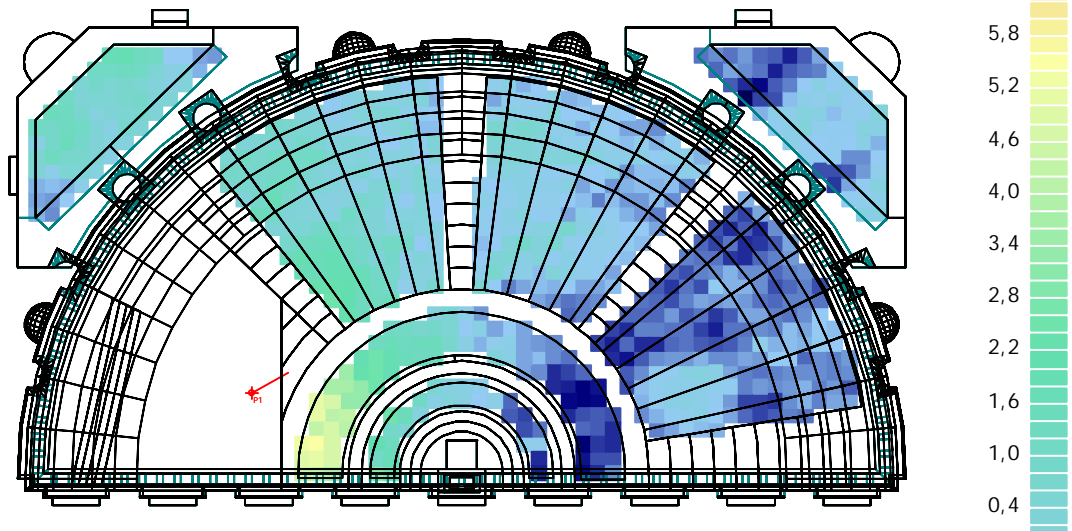
Palokunnantalon juhlasali



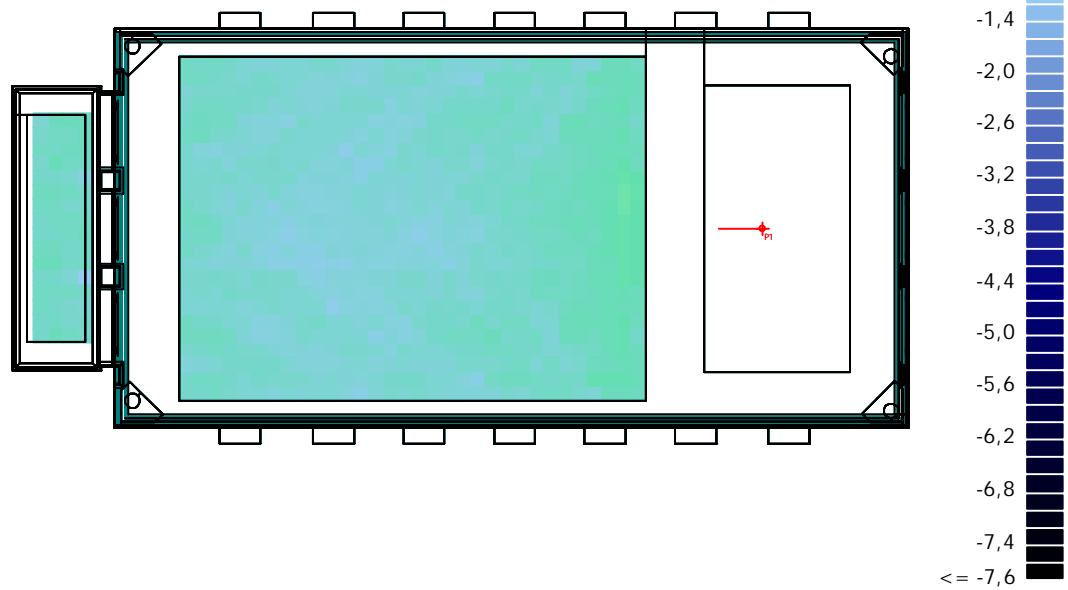
Engelin teatteri



Yliopiston juhlasali

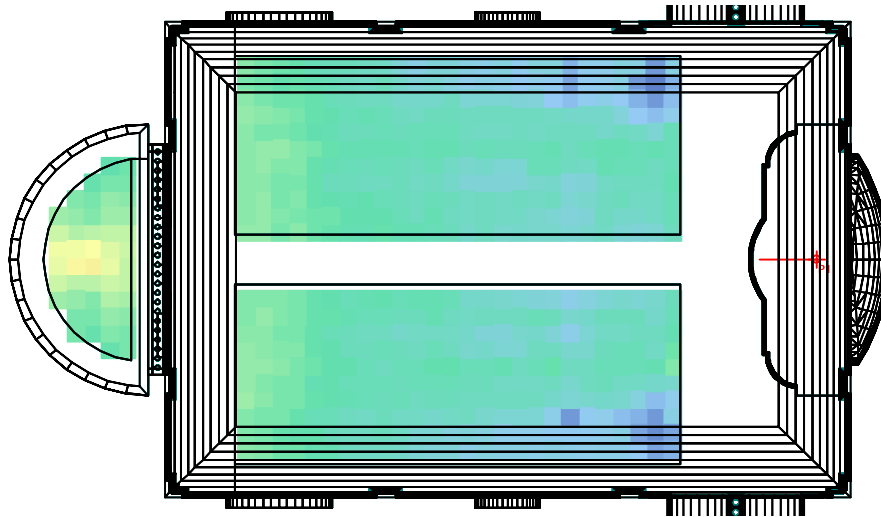


Seurahuoneen 1. vaihe

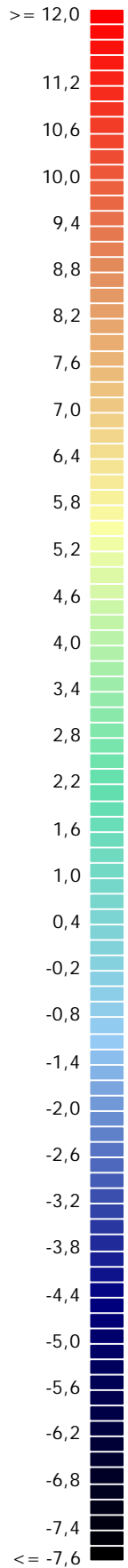
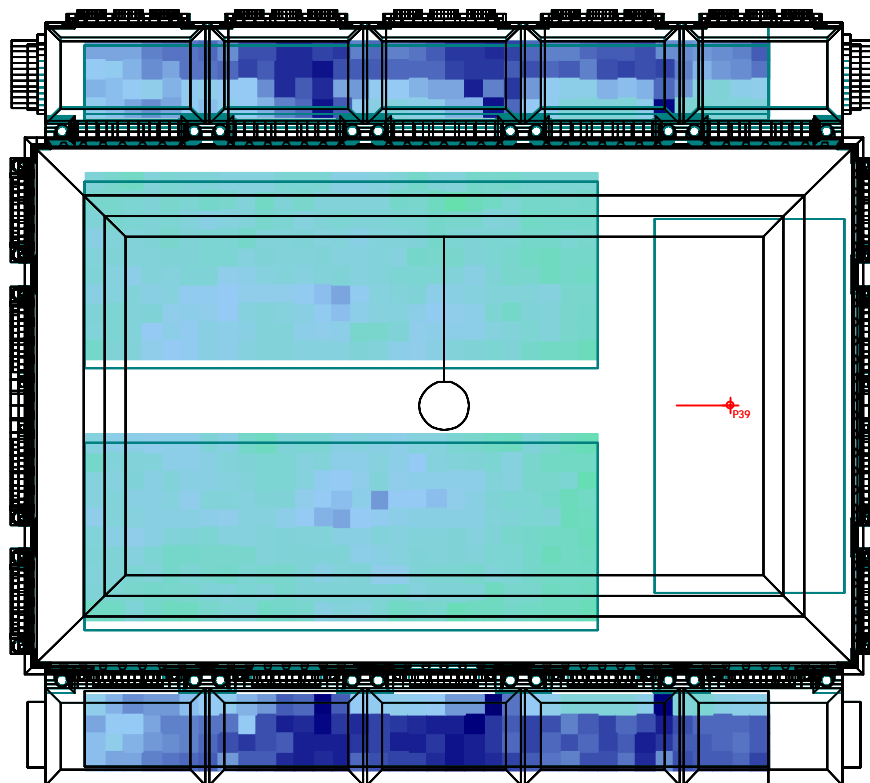


Seurahuoneen 2. vaihe

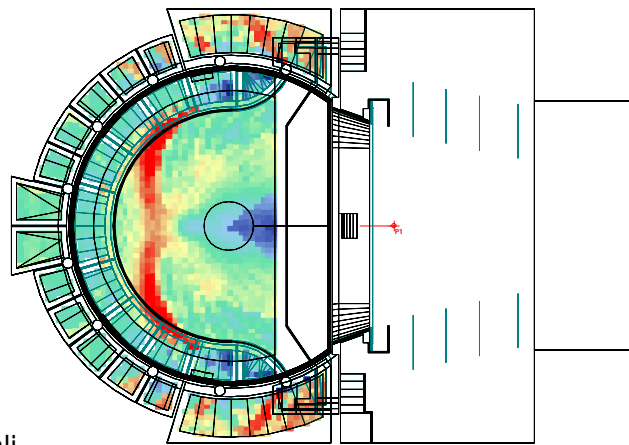
C(80) (dB) at 1000 Hz  $\geq 12,0$



Palokunnantalon juhlasali

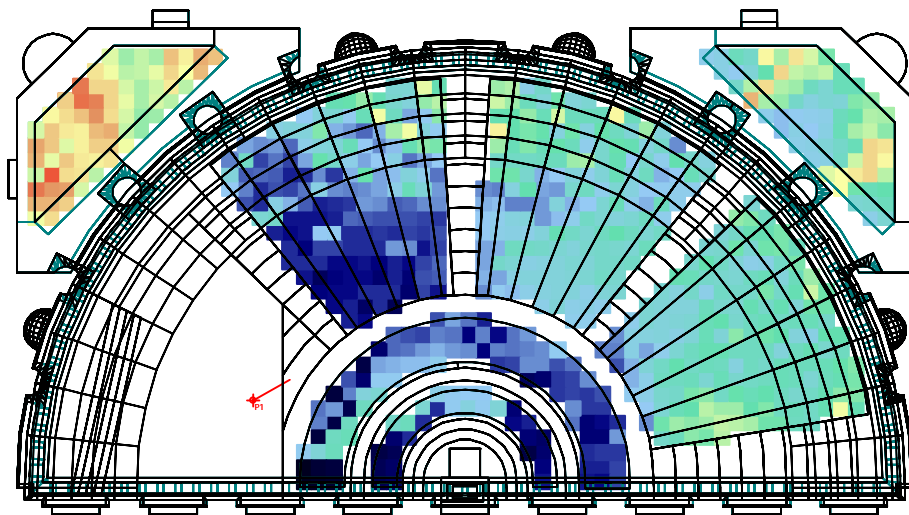


Engelin teatteri

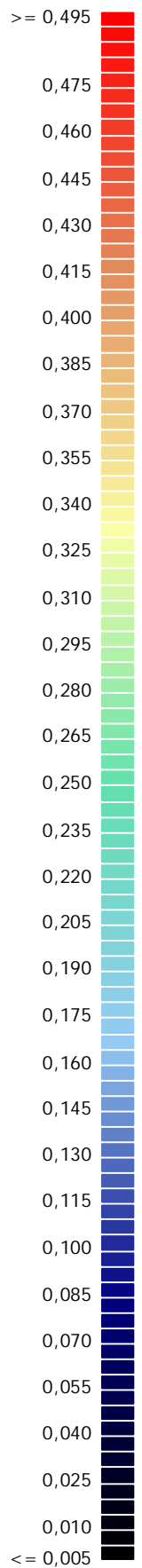
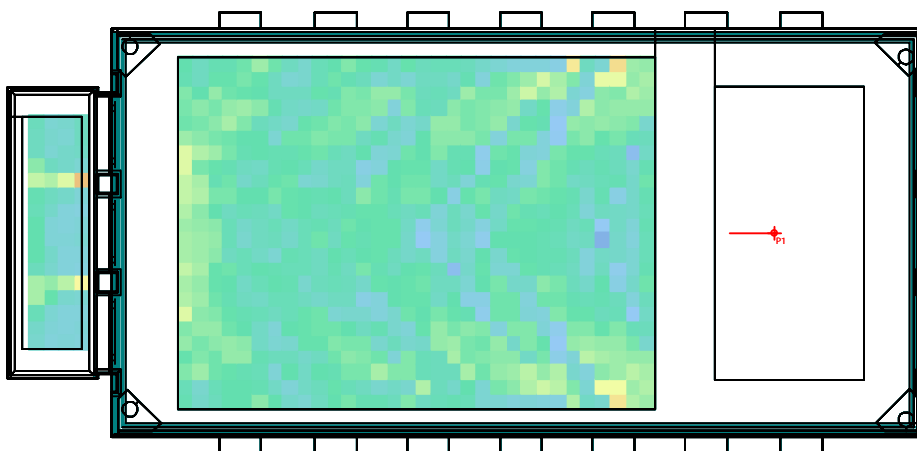


LF(80) at 1000 Hz  $\geq 0,495$

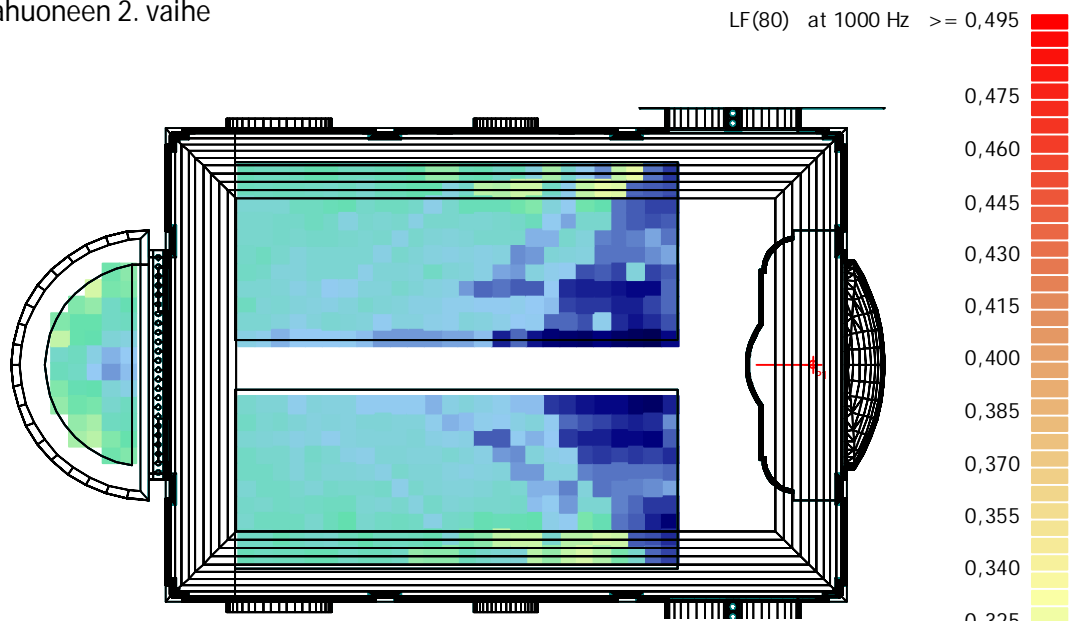
Yliopiston juhlasali



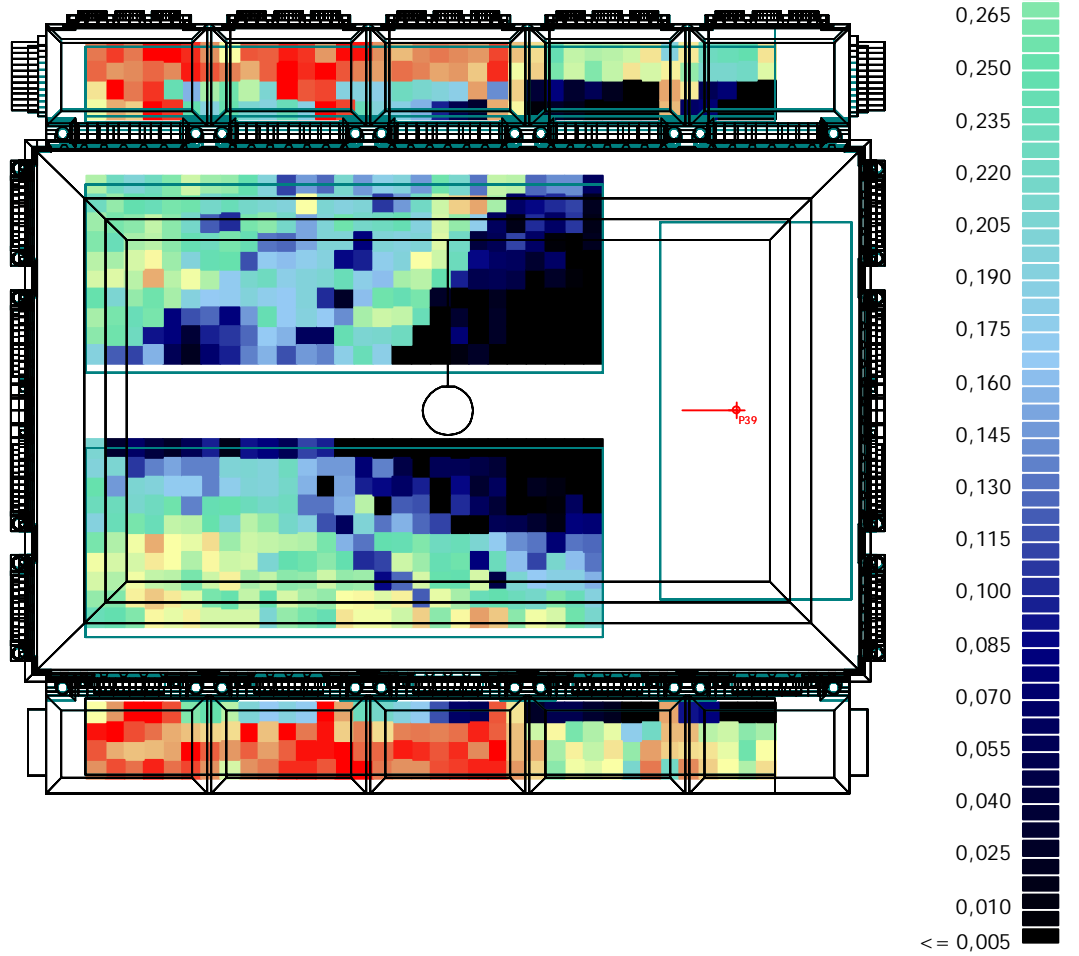
Seurahuoneen 1. vaihe



Seurahuoneen 2. vaihe



Palokunnantalon juhlasali



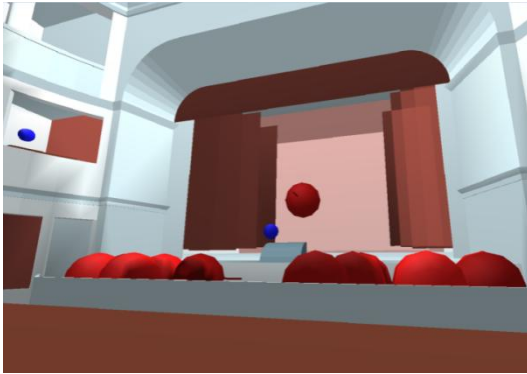
## Liite 5: Orkestereissa käytettyjen soittimien lyhenteet

Lyhenne	Soitin
vl I	<i>1. viulu</i>
vl II	<i>2. viulu</i>
vla	<i>alttoviulu</i>
vlc	<i>sello</i>
cb	<i>kontrabasso</i>
fl I	<i>1. huilu</i>
fl II	<i>2. huilu</i>
ob I	<i>1. oboe</i>
ob II	<i>2. oboe</i>
cl I	<i>1. klarinetti</i>
cl II	<i>2. klarinetti</i>
corno I	<i>1. käyrätorvi</i>
corno II	<i>2. käyrätorvi</i>
tr I	<i>1. trumpetti</i>
tr II	<i>2. trumpetti</i>

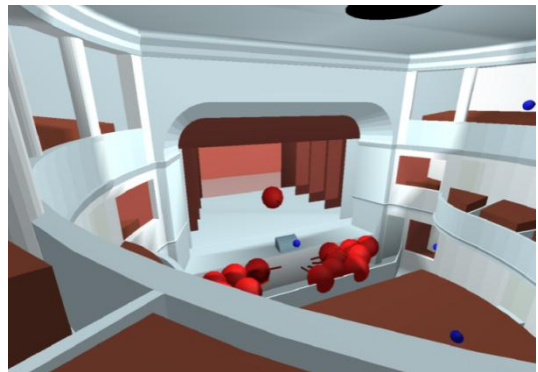


## Liite 6: Kuvat auralisointipisteistä

### Engelin Teatteri

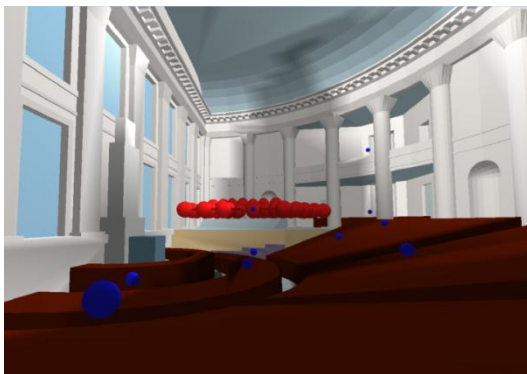


Kuuntelija 1

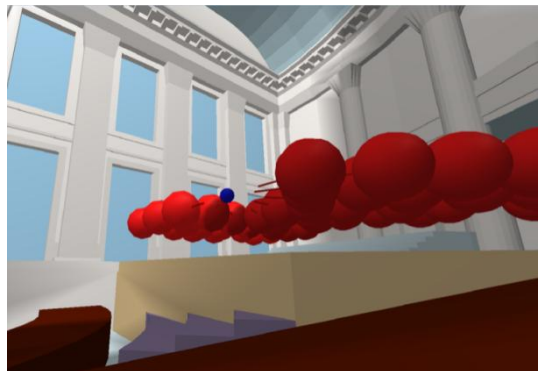


Kuuntelija 6

### Yliopiston juhlasali

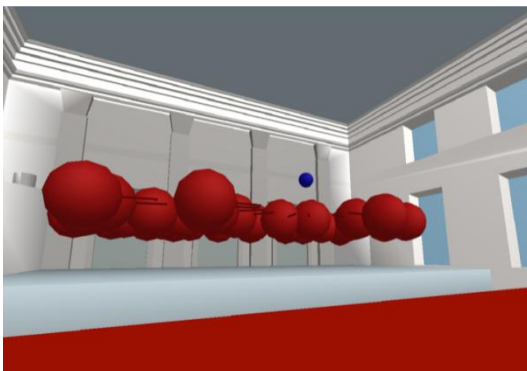


Kuuntelija 3

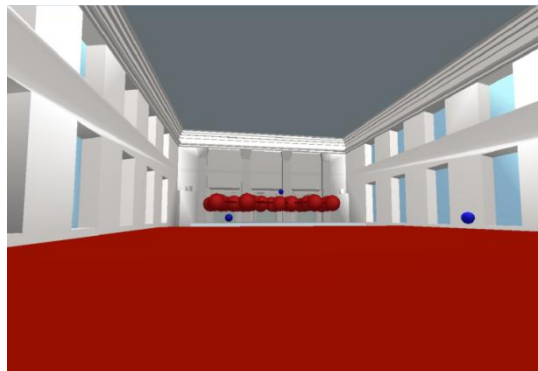


Kuuntelija 8

### Seurahuoneen 1. vaiheen sali

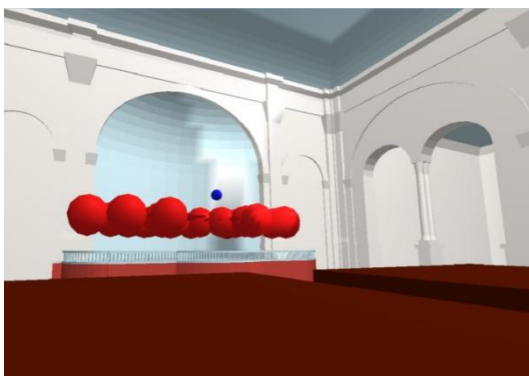


Kuuntelija 1

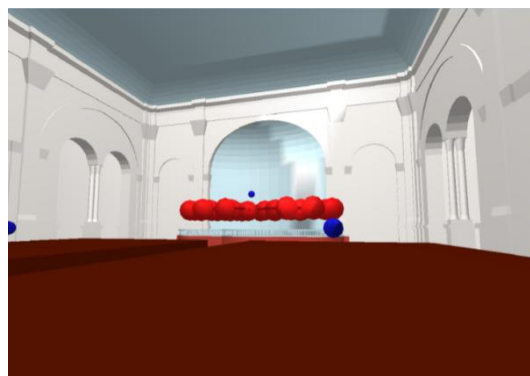


Kuuntelija 3

Seurahuoneen 2. vaiheen sali

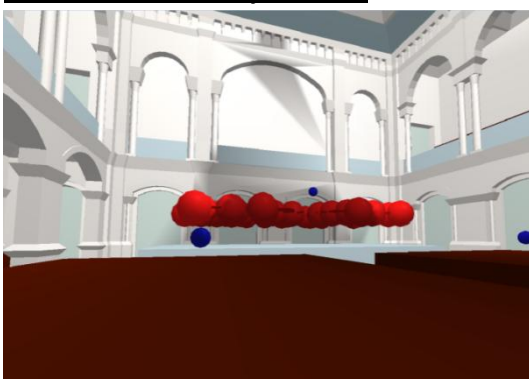


Kuuntelija 1

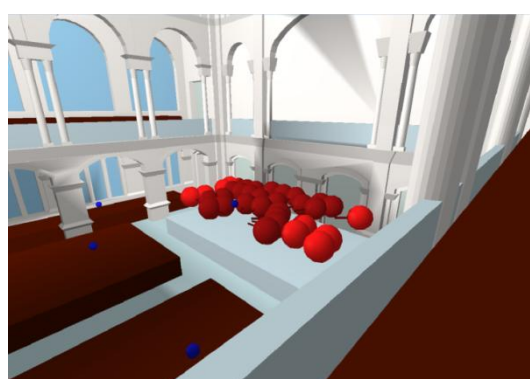


Kuuntelija 4

Palokunnantalon juhlasali



Kuuntelija 3



Kuuntelija 12

## Liite 7: Auralisointien RMS-arvot ja Odeonissa käytetyt äänitystasot

Kuulokkeet: Sennheiser HD 600

<b>Sali</b>	<b>RMS-arvo valitusta kohdasta [dBFS]</b>	<b>Odeonin äänitystaso [dB]</b>	<b>Auralisoinnin enimmäistaso [dBFS]</b>
Engelin Teatteri	-21,0	47,40	-0,41
Yliopisto	-20,0	45,95	-0,82
Seurahuone 1	-20,0	47,10	-1,27
Seurahuone 2	-20,0	43,70	-1,16
Palokunnantalo	-20,0	45,35	-0,64

Kuulokkeet: Bayer Dynamic DT 990

<b>Sali</b>	<b>RMS-arvo valitusta kohdasta [dBFS]</b>	<b>Odeonin äänitystaso [dB]</b>	<b>Auralisoinnin enimmäistaso [dBFS]</b>
Engelin Teatteri	-24,0	38,20	-0,73
Yliopisto	-22,0	37,15	-0,73
Seurahuone 1	-22,1	38,65	-2,98
Seurahuone 2	-22,0	35,35	-0,83
Palokunnantalo	-22,1	36,95	-0,3