

Pyry-Herkko Sadeaho

**OLEMASSA OLEVAN TILAN
HUONEAKUSTIIKAN MALLINTAMINEN**
Esimerkkinä Sastamalan Pyhän Marian kirkko

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja, TkT Mikko Kylliäinen
Tarkastaja, DI Jesse Lietzén
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Pyry-Herkko Sadeaho: Olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallintaminen – Esimerkkinä Sastamalan Pyhän Marian kirkko
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan DI-ohjelma
Toukokuu 2022

Olemassa olevan tilan huoneakustiikkaa on tyypillisesti mallinnettu tilasta olevien rakennepiirustusten tai tietomallien perusteella. Joissakin tapauksissa mallinnettavasta tilasta ei välttämättä ole olemassa riittäviä lähtötietoja geometrian ja huoneakustiikan mallintamiseksi. Tällaisissa tapauksissa mallinnettavan tilan geometria voidaan selvittää rakennusmittausten keinoin. Tilasta voidaan kuvata erilaisilla menetelmillä sen geometriaa kuvaava pistepilvi, jonka perusteella geometrian mallintaminen voidaan tehdä.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli mallintaa olemassa olevan tilan huoneakustiikka hyödyntäen mallinnuksessa itse tuotettuja lähtötietoja. Huoneakustiikan mallintamiseksi olemassa olevasta tilasta kuvattiin pistepilvi sekä kolmiulotteinen malli, ja huoneakustisen mallin validoimiseksi tilassa mitattiin standardien ISO 3382-1 ja IEC 60268-16 mukaisia huoneakustiikan mittalukuja. Tilan geometria mallinnettiin kuvatun pistepilven pohjalta manuaalisesti ja huoneakustisen mallin pintojen ominaisuudet arvioitiin kolmiulotteisen mallin ja tutkimuskirjallisuuden avulla. Huoneakustinen malli sovitettiin paikan päällä tehtyjen huoneakustisten mittausten tuloksiin, jonka jälkeen mallilla voitiin tarkastella tilan huoneakustiikkaa mittaustilanteesta poikkeavissa tilanteissa.

Tutkimuksessa mallinnettu olemassa oleva tila oli myöhäiskeskiaikainen Sastamalan Pyhän Marian kirkko. Akustiikaltaan ylistetty kirkko toimii nykyisin jokavuotisen vanhan musiikin festivaalin Sastamala Gregorianan päänäyttämönä ja sen on kehitetty sopivan erinomaisesti nimenomaan vanhalle musiikille. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli myös tutkia, miksi Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikkaa pidetään niin hyvänä ja kuinka tällainen huoneakustiikka on ajan saatossa muodostunut. Nykyisen huoneakustiikan muodostumisen tutkimiseksi kirkon huoneakustiikka mallinnettiin sen kahdessa aiemmassa rakennusvaiheessa, joina huoneakustiikan arveltiin olleen nykytilanteesta poikkeava. Aiemmiksi rakennusvaiheiksi valittiin vuosien 1777 ja 1870 mukaiset tilanteet. Aiempien rakennusvaiheiden mallintamiseen tarvittavat lähtötiedot selvitettiin kirjallisuus- ja arkistotutkimuksella sekä haastatteluin.

Mallinnustulosten perusteella Sastamalan Pyhän Marian kirkko on vuonna 1777 ollut huomattavasti kaiuntaisempi kuin nykyisin. Tilavuudeltaan nykyistä suuremmissa ja pinnoiltaan heijastavammassa tilassa ääniolosuhteet eivät ole olleet kirkon silloiselle käyttötarkoitukselle suotuisat ja puheenerotettavuus on kirkkosalissa istuneiden kuuntelijoiden kokemana voinut olla vaatimaton. Tilavuudeltaan aiempaa pienempi ja sisustukseltaan erilainen vuoden 1870 mukainen tilanne sopi huoneakustiikaltaan paremmin sekä musiikille että puheelle. Tällöin vielä kirkossa olleen laulattian vuoksi kirkko oli tyhjänä edelleen kaikuisa. Täydessä kirkkosalissa huoneakustiikka oli kuitenkin mallinnettujen mittalukujen perusteella lähes nykytilanteen mukainen ja puheenerotettavuus vaihteli huonon ja kohtalaisen välillä kirkkosalin penkkien alueella.

Kirkon nykyinen huoneakustiikka on muodostunut useiden kirkon olemassaolon aikana tehtyjen korjaus- ja muutostöiden myötä ja ainakin osittain sattumalta. Huoneakustisten mittalukujen mallinnustulosten perusteella kirkon huoneakustiikka soveltuu hyvin vanhalle musiikille ja vokaalimusiikille. Ääniolosuhteet ovat otolliset sekä tilassa esiintyville että tilassa oleville kuuntelijoille, eikä kuunteluolosuhteet riipu merkittävästi kuuntelijan sijainnista kirkkosalissa. Vuonna 1978 kirkkosaliin tehdyn maalattian ansiosta kirkon huoneakustiikka on riippumattomampi tilassa olevasta kuuntelijamäärästä kuin aiemmin sen olemassaolon aikana.

Avainsanat: akustiikka, huoneakustiikka, arkeoakustiikka, huoneakustinen mallintaminen, Sastamalan Pyhän Marian kirkko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Pyry-Herkko Sadeaho: Room acoustic modelling of an existing space – St. Mary's Church of Sastamala as a case of example

Master's thesis

Tampere University

Master's programme in Civil Engineering

May 2022

The room acoustics of an existing space have typically been modelled using available plans and building information models (BIMs). In some cases, there is not enough information for modelling the geometry and room acoustics of the space. In such cases, the geometry of the space can be attained through different measurement techniques. The geometry of an existing space can be modelled using a point cloud, which can be obtained with various methods.

The purpose of this master's thesis is to model the room acoustics of an existing space using self-produced geometrical information of the space. To model the room acoustics, a point cloud and a 3D model of the space were created. Various room acoustics parameters presented in standards ISO 3382-1 and IEC 60268-16 were measured to validate the room acoustic model. The geometry of the space was modelled manually using the point cloud and the material properties of the surfaces in the room acoustic model were estimated from the 3D model and research literature. The room acoustic model was then calibrated using the in-situ measurements. With the calibrated model, the room acoustics of the space could be investigated in situations, which differ from the measured situation.

The existing space modelled in this master's thesis was a late medieval St. Mary's Church of Sastamala. Nowadays the church, which is praised for its acoustics, is used as a main stage of an early music festival Sastamala Gregoriana. The acoustics of the church have been described as especially suitable for early music. The purpose of this study was also to research, why the acoustics of the St. Mary's Church of Sastamala are so well-liked and how the current acoustic conditions have been shaped. To study how the current acoustic conditions have been achieved, the room acoustics of the church were reconstructed in two historical states, in 1870 and 1777, in which the room acoustic conditions were estimated to differ from the current situation. Information necessary for modelling the historical states of the church was acquired from literature, archives, and interviews.

According to the simulations, the church in 1777 was more reverberant than currently. Since the volume of the church was greater and the surfaces were mainly reflective, the room acoustic conditions were not suitable for its purpose. In 1777, the speech intelligibility was modest in the church hall. The room acoustic conditions were better and more appropriate for both speech and music in 1870. The volume of the church was smaller, and the interior design was a little different than in 1777. Because of the wooden floor, the church was still reverberant when empty. When the church was full, the room acoustic conditions were in accord with the current conditions and the speech intelligibility varied between fair and poor.

The current acoustic conditions of the church have been shaped through several renovations made in its history and partly by accident. According to the simulations, the current room acoustic conditions of the church are especially suitable for early music and vocal music. Both the listening and the performing conditions are favourable. Additionally, the listening conditions don't depend on the location of the listener in the church hall. The earth floor, which was made to the church in 1978, is one of the main reasons why the room acoustics is nowadays more independent from the number of listeners in the church.

Keywords: acoustics, room acoustics, archaeoacoustics, room acoustic modelling, St. Mary's Church of Sastamala

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämän tutkimuksen on rahoittanut A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Haluan kiittää A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n akustiikkasuunnitteluyksikön yksikönjohtajaa TkT Mikko Kylliäistä tämän tutkimuksen mahdollistamisesta sekä inspiroivasta ja asiantuntevasta ohjauksesta erityisesti tutkimuksen arkeoakustisessa osuudessa. Lisäksi kiitän DI Jesse Lietzeniä koko tutkimuksen ajan jatkuneesta kannustavasta ja osaavasta ohjauksesta. Erityiskiitokset myös professori Markus Hiekkaselle korvaamattomasta avusta Sastamalan Pyhän Marian kirkon rakennushistorian selvittämisessä.

Suuret kiitokset myös kaikille, jotka ovat minua tämän tutkimuksen aikana tukeneet ja kannustaneet. Kiitos kollegoilleni A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n akustiikkasuunnitteluyksikössä, jotka ovat auttaneet minua tutkimuksen eri vaiheissa. Kiitos erityisesti Laurille, Saanalle ja Hannulle annetusta vertaistuesta sekä jaetuista ajatuksista.

Lisäksi haluan kiittää vielä perhettäni kaikesta tuesta, jota olen tutkimuksen aikana saanut. Kiitos erityisesti avopuolisolleni Silvalle päivittäisestä tsemppauksesta ja tuesta.

Tampereella, 11.5.2022

Pyry-Herkko Sadeaho

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Huoneakustisen mallinnuksen tarve.....	1
1.2 Esimerkkikohde: Sastamalan Pyhän Marian kirkko.....	5
1.3 Tutkimuksen tavoitteet.....	8
2. OLEMASSA OLEVAN TILAN HUONEAKUSTIIKAN MITTAAMINEN.....	10
2.1 Huoneakustiset mittaukset.....	10
2.1.1 Mittauskäytännöt.....	10
2.1.2 Impulssivaste.....	11
2.2 Huoneakustiikan mittaluvut.....	13
2.2.1 Jälkikaiunta-aika.....	13
2.2.2 Sali- ja lava-akustiikan mittaluvut.....	14
2.2.3 Puheensirtoindeksi.....	19
2.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiset mittaukset.....	21
2.3.1 Mittausmenetelmät ja -olosuhteet.....	21
2.3.2 Mittausjärjestelyt.....	22
2.4 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiset ominaisuudet.....	24
3. OLEMASSA OLEVAN TILAN GEOMETRIAN MALLINTAMINEN.....	26
3.1 Tilan mallinnusmenetelmät.....	26
3.2 Sastamalan Pyhän Marian kirkon geometrian mallintaminen.....	29
3.2.1 Pistepilviaineisto.....	29
3.2.2 Tilamallin luominen.....	30
4. OLEMASSA OLEVAN TILAN HUONEAKUSTIIKAN MALLINTAMINEN.....	34
4.1 Huoneakustiikan mallintaminen.....	34
4.1.1 Huoneakustiikan mallinnusmenetelmien kehitys.....	34
4.1.2 Huoneakustiikan mallinnusmenetelmät.....	35
4.2 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikan mallintaminen.....	38
4.2.1 Absorptiokertoimet.....	38
4.2.2 Sirontakertoimet ja pintojen tyypit.....	40
4.2.3 Äänilähteet ja vastaanottopisteet.....	42
4.2.4 Laskenta-asetukset.....	44
4.2.5 Mallin validointi.....	45
4.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustinen malli.....	46
4.3.1 Mallin sovitus mittaustuloksiin.....	46
4.3.2 Huoneakustiikka tyhjällä ja täydellä kirkkosalilla.....	48

5. SASTAMALAN PYHÄN MARIAN KIRKON AKUSTIIKKA	50
5.1 Sastamalan Pyhän Marian kirkon rakennushistoria.....	50
5.1.1 Lautalattian purkaminen vuonna 1978	50
5.1.2 Kirkon peruskorjaus vuosina 1960–1962	51
5.1.3 Muutostyöt vuosina 1866–1870	54
5.1.4 Puisen tynnyriholvin rakentaminen vuonna 1777	58
5.1.5 Kirkossa tehdyt muutokset ennen vuotta 1777.....	59
5.1.6 Eri rakennusvaiheiden mallinnusmahdollisuudet.....	61
5.2 Mallinnettavat rakennusvaiheet.....	62
5.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon akustiikka eri rakennusvaiheissa	67
6. TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT	72
6.1 Olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallinnusprosessi	72
6.2 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikan muutokset.....	73
6.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikka	76
7. YHTEENVETO	80
LÄHTEET	83
Arkistolähteet.....	83
Sanomalehdet	83
Digitaaliset lähteet	83
Haastattelut	83
Tutkimuskirjallisuus.....	84
LIITE 1: Mallinnuksessa käytettyjen materiaalien absorptio-, sironta- ja läpinäkyvyys-	
kertoimet	
LIITE 2: Mittaus- ja mallinnustulosten vertailu	
LIITE 3: Mallinnettujen rakennusvaiheiden geometria sekä äänilähteiden ja vastaan-	
ottopisteiden sijainnit	
LIITE 4: Huoneakustisten mittalukujen verkot	

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkko kuvattuna kaakosta päin keväällä 2022.</i>	6
Kuva 2.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosali takaa sekä alttarilta päin kuvattuna.</i>	7
Kuva 3.	<i>Eräässä myöhäiskeskiaikaisessa kirkossa mitattu impulssivaste.</i>	12
Kuva 4.	<i>Saliakustiikan mittalukujen ja puheensiirtoindeksin STI mittauksissa käytetyt kaiutinpaikat S1–S3 ja mikrofoni- paikat 1–6.</i>	23
Kuva 5.	<i>Lava-akustiikan mittalukujen mittauksissa käytetyt kaiutinpaikat S1–S3 ja kaiutinpaikkakohtaiset mikrofoni- paikat 7–15.</i>	24
Kuva 6.	<i>Kirkkosalin keskellä olleen kuvauspaikan mukainen panoraamakuva.</i>	29
Kuva 7.	<i>SketchUp-ohjelmaan tuotu Sastamalan Pyhän Marian kirkosta kuvattu pistepilvi.</i>	31
Kuva 8.	<i>Pistepilven pohjalta tehty tilamalli Sastamalan Pyhän Marian kirkosta.</i>	32
Kuva 9.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon tilamalli. Eri väriset pinnat kuvaavat eri tasoja.</i>	33
Kuva 10.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustinen malli.</i>	40
Kuva 11.	<i>Erilaisia tilamalliin yksinkertaisina tasoina mallinnettuja pintoja.</i>	41
Kuva 12.	<i>Mittauksissa käytettyjen kaiutin- ja mikrofoni- paikkojen perusteella asetetut äänilähteet 1–3 ja vastaanottopisteet 1–15 huoneakustisessa mallissa.</i>	43
Kuva 13.	<i>Saliakustiikan mittalukujen mittaus- ja mallinnustulosten vertailu oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.</i>	47
Kuva 14.	<i>Lava-akustiikan mittalukujen mittaus- ja mallinnustulosten vertailu oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.</i>	47
Kuva 15.	<i>Tyhjän ja täyden kirkkosalin huoneakustiset mallit. Siniset pallot kuvaavat malliin asetettuja vastaanottopisteitä. Täyden kirkkosalin huoneakustiseen malliin kuuntelijoita kuvaava alue on mallinnettu 0,8 m korkeana laatikkona.</i>	49
Kuva 16.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosali vuonna 1962. Kirkkosali oli kuvan mukainen vuoteen 1978 asti, jolloin lautalattian tilalle tehtiin maalattia. Kuvalähde: E. Lahtinen 1962, Vapriikin kuva-arkisto.</i>	51
Kuva 17.	<i>Rakenteilla oleva uusi kattorakenne. Kuvalähde: P. O. Welin 1960- luvulla, Museoviraston kuvakokoelmat.</i>	52
Kuva 18.	<i>Käynnissä olevat kirkon sisätilojen korjaustyöt vuonna 1962. Kuvalähde: H. Havas 1962, Museoviraston kuvakokoelmat.</i>	53
Kuva 19.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon kattoa madallettiin vuosien 1866–1870 aikana noin 12 m alkuperäiseen kattorakenteeseen nähden. Kuvalähde: S. Lindqvist 1892, Museoviraston kuvakokoelmat.</i>	55
Kuva 20.	<i>Kirkosta piirretty pohjapiirustus vuodelta 1892. Kuvalähde: J. Stolpe 1892, Museoviraston kuvakokoelmat.</i>	56
Kuva 21.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosali kuvattuna ennen vuosien 1960–1962 korjausta. Kuvalähde: Arkkitehtuurin laitoksen opetusdiakokoelma, Aalto-yliopiston arkisto.</i>	57
Kuva 22.	<i>Sastamalan Pyhän Marian kirkon mallinnetut rakennusvaiheet vuosina 2021, 1870 ja 1777.</i>	65
Kuva 23.	<i>Eri rakennusvaiheiden mallinnetut saliakustiikan mittalukujen EDT ja T30 keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.</i>	67

Kuva 24.	<i>Eri rakennusvaiheiden mallinnetut saliakustiikan mittalukujen C80 ja G keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.</i>	<i>68</i>
Kuva 25.	<i>Eri rakennusvaiheiden mallinnetut sivuttaisenergiasuhteen LF80 keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.</i>	<i>69</i>
Kuva 26.	<i>Eri rakennusvaiheiden mallinnetut lava-akustiikan mittalukujen STEarly ja STLate keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.</i>	<i>70</i>
Kuva 27.	<i>Oktaavikaistojen 125–4000 Hz keskiarvoinen sivuttaisenergiasuhde täydessä kirkkosalissa nykytilanteessa.</i>	<i>77</i>
Kuva 28.	<i>Puheensiirtoindeksi täydessä kirkkosalissa nykytilanteessa.</i>	<i>78</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	Absorptiokerroin
c_0	Äänen nopeus ilmassa [m/s]
C_{80}	Selvyys [dB]
EDT	Varhainen jälkikaiunta-aika [s]
G	Voimakkuus [dB]
JND	Juuri havaittavissa oleva muutos (<i>just noticeable difference</i>)
LF_{80}	Sivuttaisenergiasuhde
$L_{p,B}$	Taustääänitaso [dB]
L_{SN}	Puheen signaalikohinasuhde [dB]
$p(t)$	Äänenpaine [Pa]
$p_{10}(t)$	Äänenpaine mitattuna vapaassa äänikentässä 10 m päässä äänilähteestä [Pa]
RH	Ilman suhteellinen kosteus [%]
s	Sirontakerroin
S	Absorptioala [m ²]
ST_{early}	Esiintyjien välisiä ääniolosuhteita kuvaava lava-akustiikan mittaluku [dB]
ST_{late}	Esiintyjän kokema tilan antama vastetta kuvaava lava-akustiikan mittaluku [dB]
STI	Puheensiirtoindeksi
T	Lämpötila [°C]
t	Aika [s]
T_{20}	Jälkikaiunta-aika, määritetty 20 dB vaimenemisen perusteella [s]
T_{30}	Jälkikaiunta-aika, määritetty 30 dB vaimenemisen perusteella [s]
TO	Siirtymäluku (<i>transition order</i>)
V	Tilavuus [m ³]

1. JOHDANTO

1.1 Huoneakustisen mallinnuksen tarve

Huoneakustista tietokonepohjaista mallinnusta on käytetty tilojen huoneakustiikan suunnittelun apuna jo useiden vuosikymmenten ajan. Huoneakustinen mallinnus on tärkeä ja hyödyllinen työkalu tämän päivän suunnittelutoiminnassa ja sen avulla on mahdollista suunnitella akustisesti toimivia ympäristöjä entistä paremmin. Mallintamisen käytännön hyödynnettävyys korostuu erityisesti akustisesti haastavien kohteiden kuten konserttisalien ja esiintymistilojen suunnittelussa¹, joissa äänen leviämisen ja heijastuksien tarkastelulla on suurempi merkitys. Huoneakustisen suunnittelun lisäksi huoneakustista mallintamista voidaan hyödyntää muun muassa kulttuurihistoriallisten kohteiden akustiikan ennallistamisessa², pelien virtuaalisen äänimaailman luomisessa sekä kognitiivisissa tutkimuksissa³. Huoneakustisen mallintamisen avulla on myös mahdollista kuunnella tilan huoneakustiikkaa auralisointien avulla. Auralisointeja voidaan hyödyntää niin tilojen suunnittelussa kuin psykoakustisissa tutkimuksissa.⁴

Uudisrakentamisessa huoneakustista mallintamista käytetään tilojen akustisten ominaisuuksien suunnitteluun käyttötarkoitusta vastaavaksi. Mallinnusta voidaan hyödyntää esimerkiksi esiintymistiloja, monitoimitiloja ja oppimisympäristöjä suunniteltaessa. Uudiskohteiden mallintaminen perustuu lähtökohtaisesti olemassa oleviin ajantasaisiin suunnitelmiin kuten pohja- ja leikkauspiirustuksiin sekä tietomalleihin, joiden avulla tilan geometria sekä tilaan suunniteltujen pintojen ominaisuudet ovat usein tiedossa.

Korjausrakentamisessa huoneakustista mallintamista käytetään puolestaan olemassa olevien tilojen huoneakustiikan suunnittelun apuna esimerkiksi tilanteissa, joissa tilan huoneakustiikkaa halutaan parantaa, tai tilan käyttötarkoitus muuttuu ja huoneakustiikkaa täytyy muuttaa uudelle käyttötarkoitukselle sopivaksi. Käyttötarkoituksen muuttuessa saatetaan myös tehdä huoneakustiikkaan merkittävällä tavalla vaikuttavia rakenteellisia muutoksia kuten jakaa yksi tila useampaan osaan tai yhdistää aiemmin erikseen

¹ Kuttruff 1991.

² Rindel 2011; Weinzierl et al. 2015.

³ Savioja & Svensson 2015.

⁴ Lokki 2002.

olleita tiloja yhdeksi suuremmaksi tilaksi. Tällaisessa tilanteessa huoneakustiikkaakin on perusteltua tarkastella ja suunnitella uudelleen.

Korjauskohteiden huoneakustiikan mallintaminen on usein haastavampaa kuin uudiskohteiden, sillä mallinnettavasta tilasta ei välttämättä ole saatavilla ajantasaisia rakennepiirustuksia, joiden perusteella mallinnus voitaisiin tehdä tilannetta vastaavaksi. Korjauskohteena oleva tila ei esimerkiksi välttämättä vastaa saatavilla olevia alkuperäisiä rakennepiirustuksia tai tilaan on voitu tehdä ajan mittaan muutoksia, joita ei ole dokumentoitu piirustuksien muodossa. Varsinkin vanhojen rakennusten rakennepiirustuksia saattaa olla huonosti tallella tai niitä ei välttämättä ole säilynyt lainkaan. Tyypillisesti suunnitteluaineiston puutteellisuus on yleisempää mitä vanhempi rakennus on kyseessä. Myös pintojen materiaalit ja niiden ominaisuudet saattavat olla korjauskohteissa huonommin tiedossa.

Jos mallinnettavasta tilasta ei ole olemassa tarpeeksi aineistoa mallinnuksen lähtötiedoksi voidaan olemassa olevan tilan ajantasainen geometria selvittää erilaisilla rakennusmittauksilla. Olemassa olevien kohteiden geometrian kuvaamiseen yleisesti käytetyjä menetelmiä ovat muun muassa laserkeilaus, fotogrammetriset menetelmät sekä fotogrammetriaa hyödyntävät syvyyskamerat. Edellä mainituilla menetelmillä pystytään tuottamaan tarkasteltavan kohteen geometriaa kolmiulotteisessa avaruudessa kuvaava pistepilvi, jota voidaan käyttää tilan geometrian mallintamiseen. Pistepilvi voi – kuvaamiseen käytettävästä laitteistosta riippuen – sisältää myös kuvauspintojen väritietoja, jolloin mallinnuksen lähtötiedoksi tarvittavat pintojen materiaaliominaisuudet ovat paremmin arvioitavissa.

Huoneakustista mallintamista ei käytetä ainoastaan huoneakustiikan suunnittelutoiminnan työkaluna vaan sitä voidaan hyödyntää myös historian tutkimuksessa. Huoneakustisen mallintamisen avulla voidaan tutkia kadonneiden tai ajan saatossa muuttuneiden kulttuurihistoriallisten tilojen ja kohteiden akustiikkaa. Tällaista poikkitieteellistä arkeologian ja akustiikan osa-aluetta kutsutaan arkeoakustiikaksi ja tutkimusalan päätarkoituksena on tutkia ihmisen ja äänen välistä suhdetta historiassa. Huoneakustista mallintamista käytetään arkeoakustiikassa muun muassa kadonneiden ja ajan saatossa muuttuneiden tai vaurioituneiden akustisten ympäristöjen tutkimiseen ja ennallistamiseen.⁵ Huoneakustiikan mallintamista voidaan hyödyntää esimerkiksi musiikin historiaa sekä musiikin esityskäytäntöjä tutkittaessa. Arkeoakustiikassa kohteiden mallintaminen pe-

⁵ Suárez et al. 2016.

rustuu uudisrakentamiskohteiden tavoin olemassa oleviin piirustuksiin, sekä arkeologiseen aineistoon ja arkistoaineistoon. Olemassa olevasta aineistosta riippuen kohteen geometria ja edelleen ääniolosuhteet voidaan vaihtelevalla tarkkuudella ennallistaa.

Arkeoakustiikan tutkimusalalla on tehty laajasti erilaisien historiallisten kohteiden huoneakustiikan mallintamista. Vassilantonopoulos & Mourjopoulos⁶ ovat tutkineet antiikin ajan kreikkalaisia ja roomalaisia rakennuksia mallintamalla ja auralisoinneilla. Myös vanhojen kirkkojen akustiikan tutkimisesta ja mallintamisesta löytyy runsaasti tutkimuksia⁷, ja kirkkojen akustiikan tutkimiseksi on tehty lisäksi erilaisia ohjeistuksia.⁸ Suárez et al.⁹ mallinsivat ja auralisoivat Ranskan vallankumouksen aikaan pahoin tuhoutuneen Ranskan Clunyssa sijaitsevan Maior Ecclesian kirkkorakennuksen akustiikan osana hanketta, jonka tarkoituksena oli ennallistaa rakennus kokonaisvaltaisesti. Huoneakustinen mallinnus tehtiin rakennuksesta tehdyn virtuaalisen 3D-mallin pohjalta. Myös säilyneiden kirkkojen aiempia rakennusvaiheita on mallinnettu. Autio et al.¹⁰ mallinsivat ja auralisoivat erään Ruotsissa sijaitsevan luostarikirkon 1470-luvun tilanteen mukaisen akustiikan. Alonso et al.¹¹ ennallistivat Espanja Andalusian Granadassa sijaitsevan katedraalin akustiikan vuosien 1619–1929 sekä vuosien 1929–1992 mukaisissa tilanteissa. Tutkimuksessa vertailtiin mallinnettujen rakennusvaiheiden akustiikkaa kirkossa mitattuihin lukuarvoihin. Boren¹² puolestaan mallinsi Saksan Leipzigissa sijaitsevan Tuomaskirkon vuosien 1539 ja 1723 mukaiset huoneakustiikan olosuhteet. Säveltäjä J. S. Bach toimi kirkossa kanttorina vuosina 1723–1750 ja siksi tutkimuksessa valittiin mallinnettavaksi vuoden 1723 mukainen tilanne, jolloin Bach astui kanttorinvirkaansa. D’Orazio et al.¹³ tutkivat puolestaan Firenzessä sijaitsevan Pyhän Johanneksen kastekappelin akustiikkaa ja mallinsivat sen kolmen aiemman rakennusvaiheen mukaisen huoneakustiikan. Edellä mainituissa tutkimuksissa kirkot on ensin mallinnettu vallinneessa tilanteessa ja mallit on kalibroitu paikan päällä tehtyjen mittausten perusteella. Aiempien vaiheiden ennallistamiset on tehty kalibroidun mallin avulla.

⁶ Vassilantonopoulos & Mourjopoulos 2001; Vassilantonopoulos & Mourjopoulos 2003; Vassilantonopoulos & Mourjopoulos 2009.

⁷ Girón et al. 2017.

⁸ Martellotta et al. 2009; Postma & Katz 2015.

⁹ Suárez et al. 2016.

¹⁰ Autio et al. 2021.

¹¹ Alonso et al. 2016.

¹² Boren 2021.

¹³ D’Orazio et al. 2020.

Suomessa on tutkittu erityisesti 1800-luvulla ja osin 1900-luvullakin rakennettujen ja sittemmin hävinneiden musiikkitalojen akustiikkaa.¹⁴ Takala ja Kylliäinen¹⁵ tutkivat huoneakustisen mallinnuksen avulla Helsinkiin vuonna 1860 rakennetun ja vuonna 1863 palaneen Nya Teaternin huoneakustiikkaa. Tutkimuksessa rakennuksen malli tehtiin alkuperäisten piirustusten perusteella ja validoitiin vertailemalla mallinnustuloksia aikalaismielipiteisiin teatterin akustiikasta. Niemi¹⁶ tutki mallintamalla ja auralisoinneilla Helsingin kadonneiden konserttisalien akustiikkaa. Tutkimuksessa mallinnetut konserttisalit ovat joko tuhoutuneet tai niitä on merkittävästi muutettu. Mallit tehtiin alkuperäisten rakennuspiirustusten perusteella ja validoitiin sanomalehdistä ja kirjallisuudesta kerättyjen aikalaismielipiteiden perusteella menettelyllä, jonka ovat esittäneet Takala ja Kylliäinen.¹⁷

Tämä tutkimus koskee olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallintamista. Olemassa olevan tilan huoneakustinen malli validoidaan paikan päällä tehtyjen mittausten perusteella, jonka jälkeen mallilla tutkitaan tilan aiempien rakennusvaiheiden akustiikkaa. Olemassa olevan tilan geometria mallinnetaan tilasta kuvatun pistepilven avulla.

¹⁴ Kylliäinen & Takala 2013; Niemi 2014; Kylliäinen et al. 2015; Niemi et al. 2015; Saarelainen et al. 2015; Valjakka & Kylliäinen 2016.

¹⁵ Kylliäinen & Takala 2013; Takala & Kylliäinen 2013; Takala & Kylliäinen 2014.

¹⁶ Niemi 2014.

¹⁷ Kylliäinen & Takala 2013; Takala & Kylliäinen 2014.

1.2 Esimerkkikohte: Sastamalan Pyhän Marian kirkko

Tutkimuksen esimerkkikohteeksi valittiin myöhäiskeskiaikainen Sastamalan Pyhän Marian kirkko. Akustiikaltaan ylistetty¹⁸ kirkko toimii jokavuotisen keskiaikaisen musiikin festivaalin Sastamala Gregorianaan päänäyttämönä. Festivaalin taiteellisen johtajan Michael Fieldsin mukaan kirkon akustiikka on erityinen. Hän pitää kirkkoa yhtenä maailman parhaimmista vanhalle musiikille soveltuvista tiloista.¹⁹ Sastamalan Pyhän Marian kirkossa vanhan musiikin on kuvailtu ”hehkuvan soinnillisesti täydellisessä ja musiikillisesti ainutlaatuisen autenttisessa ympäristössä”.²⁰ Kirkon loistavan akustiikan salaisuutena pidetään sen puista kaarevaa tynnyriholvia, paksuja kiviseiniä ja maalattiaa sekä tilan muotoa ja mittasuhteita.²¹ Kivisten seinien ja puisen tynnyriholvin on kerrottu mahdollistavan sen, että kuunteluolosuhteet ovat istumapaikasta riippumatta erinomaiset ja sävelet löytävät jokaisen kirkossa istuvan kuulijan luokse.²² Soitinmusiikin pienimpien nyanssien on kerrottu kuuluvan takariville saakka²³, mutta puhe-esityksille akustiikan ei ole koettu olevan yhtä suotuisa.²⁴ Sastamalan Pyhän Marian kirkon akustiikkaa ei olla aikaisemmin tutkittu ja siksi se on valittu tutkimuksen esimerkkikohteeksi.

Sastamalan Pyhän Marian kirkon arvioitu rakennusajankohta on 1400–1500-luvun vaihteessa²⁵ ja se koostuu suuresta yksilaivaisesta runkokuoneesta sekä runkokuoneen pohjoisseinän itäpuolella sijaitsevasta sakaristosta. Kirkko on rakennettu luonnonkivistä, lukuun ottamatta runkokuoneen länsipäätyä, joka on sivuseinien korkeudesta ylöspäin rakennettu kahdesta toisiinsa sidotusta hirsiseinästä.²⁶ Runkokuoneen sisämitat ovat paikan päällä tehtyjen mittausten perusteella noin 15,5 x 33,5 m ja ulkoseinien

¹⁸ Alueviesti 23.7.2019, ”Palaa vielä avajaiskonsertin tunnelmiin...”; Turun Sanomat 2.3.2020, ”25-vuotias Sastamala Gregoriana vie...”; Tyrvään Sanomat 16.7.2021, ”Sastamala Gregoriana käynnistyi puolella...”

¹⁹ Yle Areena Audio 23.7.2012, ”Kultakuume: Sastamala Gregoriana”. Vanhalla musiikilla tarkoitetaan yleensä barokkimusiikkia tai sitä vanhempaa musiikkia.

²⁰ Aamulehti 23.7.2018, ”Sastamalan soiva ihme toteutuu...”

²¹ Aamulehti 22.7.2016, ”Vuoden festivaali: Sastamalan Pyhän Marian kirkko...”; Aamulehti 23.7.2018, ”Sastamalan soiva ihme toteutuu...”; Kulttuuritoimitus 22.7.2019, ”Kuningas lähti Sastamalaan – Fuoco e Cenere...”; Alueviesti 23.7.2019, ”Palaa vielä avajaiskonsertin tunnelmiin...”; Alueviestin kesäviesti 20.7.2012, ”Upeat puitteet konserteille”

²² Aamulehti 23.7.2018, ”Sastamalan soiva ihme toteutuu...”

²³ Kulttuuritoimitus 22.7.2019, ”Kuningas lähti Sastamalaan – Fuoco e Cenere...”

²⁴ Kulttuuritoimitus 22.7.2019, ”Kuningas lähti Sastamalaan – Fuoco e Cenere...”; Kulttuuritoimitus 19.7.2021, ”Kuolema kesäillassa: Sastamala Gregoriana...”

²⁵ Hiekkanen 2007, s. 258.

²⁶ Selander 1938, s. 10; Hiekkanen 2007, s. 257.

paksuus 1,9–2 m. Kirkolla on useille Suomen keskiaikaisille kivikirkkoille luonteenomainen jyrkkä harjakatto²⁷, jonka laki on vuodesta 1962 lähtien ollut noin 26 m korkeudessa²⁸. Kuvassa 1 on esitetty kirkko kaakosta päin kuvattuna.



Kuva 1. Sastamalan Pyhän Marian kirkko kuvattuna kaakosta päin keväällä 2022.

Kirkon kuori sijaitsee runkokuoneen itäpäädyssä, jossa puisen alttarikorokkeen päällä on vuosien 1866–1870 aikana tehdyn peruskorjauksen yhteydessä uusittu alttarilaite. Myös kirkkosalin muu sisustus on peräisin vuosilta 1866–1870²⁹, jolloin aiempi katoliselle kirkolle ominaisempi sisustus uusittiin luterilaiselle kirkolle tyypillisemmäksi.³⁰ Kirkkosalin keskikäytävä jakaa penkit kahteen osaan ja molemmilla puolilla käytävää on 22 penkkiriviä. Kirkkoon mahtuu kerralla enimmillään noin 450 ihmistä.³¹ Kirkkosalissa on puinen tynnyriholvi sekä maalattia. Maalattia on ollut kirkossa vuodesta 1978 lähtien. Ennen tätä lattia on ollut puurakenteinen.³² Kuvassa 2 on esitetty kirkkosali eri suunnista.

²⁷ Hiekkänen 4.2.2022.

²⁸ 912010026 Sastamalan Pyhän Marian kirkon länsiseinän leikkauspiirustus 1995, Rakennetun ympäristön aineistot (MV); Hiekkänen 2007, s. 257.

²⁹ Palmroth 1963, s. 54; Meurman 1984, s. 115.

³⁰ Aamulehti 16.11.1911, ”Kirje Karkusta.”; Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”; Hiekkänen 2007, s. 259; Hiekkänen 4.2.2022.

³¹ Helsingin Sanomat 25.7.2001, ”Sastamalan kirkko”.

³² Palmroth 1963, s. 50; Meurman 1984, s. 112.



Kuva 2. Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosali takaa sekä alttarilta päin kuvattuna.

Kirkossa on tehty sen 500 vuoden olemassaolon aikana useita muutoksia. Alun perin kirkkosaliin on ollut tarkoitus tehdä muurattu holvi. Holvaussuunnitelma on pääteltävissä runkokuoneen ulkoseinien sisäpinnassa nähtävistä holvikaarista, joiden perusteella alkuperäinen suunnitelma on ollut jakaa kirkkosali kolmella pilarilla kaksilaivaiseksi, jolloin molemmissa laivoissa olisi ollut neljä holvikupua. Myös kuorin kaksi ikkunaa viittaa siihen, että kirkkosali oli alun perin suunniteltu kaksilaivaiseksi.³³ Muurattu holvi on kuitenkin jäänyt tekemättä ja korvattu puurakentein. Kirkossa on ollut myös aiemmin toinen sakaristo, joka on Hiekkasen³⁴ mukaan rakennettu ennen runkokuoneen rakentamista ja aikaisintaan vuonna 1497. Hiekkanen on arvellut, että ensimmäinen sakaristo on rakennettu mahdollisesti mittavirheen takia liian kauas kuorista ja siksi kirkolle on rakennettu uusi sakaristo lähemmäksi kuoria. Ensimmäinen sakaristo purettiin vuonna 1703.³⁵ Hiekkasen mukaan se on keskiajan lopusta eteenpäin ollut todennäköisesti jossakin muussa kuin sakaristokäytössä.³⁶ Sakariston perustukset on nähtävissä kirkon pohjoispuolella ja sakariston eteläinen seinä on osa kirkon runkokuoneen pohjoisseinää.

Kirkossa tehdyistä muutoksista ei ole säilynyt merkittävästi tietoa. Suurimmat tiedossa olevat muutokset ovat vuosien 1866–1870 aikana tehdyt mittavat korjaustyöt, jolloin kirkon vesikattorakenne ja sisätilat uusittiin perusteellisesti sekä vuosina 1960–1962 tehdyt

³³ Hiekkanen 1994, s. 141.

³⁴ Hiekkanen 2007, s. 257.

³⁵ Palmroth 1963, s. 53.

³⁶ Hiekkanen 2007, s. 257.

kirkon entistämistyöt, jolloin vesikattorakenne palautettiin kaltevuudeltaan ja korkeudeltaan vastaamaan suunnilleen alkuperäistä rakennetta. Kirkon on arveltu säilyttäneen pääasiallisesti alkuperäisen ulkomuotonsa vuoteen 1866 asti.³⁷ Ensimmäinen merkintä kirkon sisäkattorakenteesta on vuodelta 1777, jolloin kirkkoon on rakennettu puinen tynnyriholvi.³⁸ Kirkko oli käytössä vuoteen 1913 asti, jolloin seurakunnan uusi kirkko valmistui ja Sastamalan Pyhän Marian kirkko jäi autiokirkoksi.³⁹

Sastamalan Pyhän Marian kirkkoa on kutsuttu aiemmin ”Karkun kirkoksi” ja ”Karkun vanhaksi kirkoksi”. Tässä tutkimuksessa kirkosta käytetään sen nykyistä nimitystä, joka on Sastamalan Pyhän Marian kirkko.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kuvata olemassa olevan tilan huoneakustisen mallinnuksen eri vaiheet tilan geometrian kuvaamisesta valmiiseen huoneakustiseen malliin. Tutkimuksessa tarkasteltava ja mallinnettava olemassa oleva tila on Sastamalan Pyhän Marian kirkko. Tutkimusaineistoksi kirkon sisätiloista kuvataan pistepilvi, jota voidaan käyttää huoneakustisen mallin geometrian mallintamisessa lähtötietona. Huoneakustisen mallin validoimiseksi kirkossa mitataan standardeissa ISO 3382-1, ISO 3382-2 ja ISO 3382-3 esitettyjä huoneakustisia mittalukuja. Hankittujen lähtötietojen perusteella luodaan kirkkosalin huoneakustinen malli, jonka avulla voidaan tutkia kirkon huoneakustiikkaa nykytilanteessa sekä sen aiempina rakennusajankohtina.

Sastamalan Pyhän Marian kirkkoa pidetään akustisesti erinomaisena erityisesti vanhalle musiikille sekä vokaalimusiikille. Tutkimuksen toisena tavoitteena on selvittää objektiivisten esiintymistilojen huoneakustiikan arvioimiseen käytettävien mittalukujen perusteella, miksi kirkon huoneakustiikka koetaan niin hyväksi. Lisäksi tutkimuksen arkeoakustisena osuutena on selvittää, kuinka kirkon huoneakustiikka on muuttunut kirkon olemassaolon aikana tehtyjen merkittävien muutosten myötä. Huoneakustiikkaa tutkitaan paikan päällä tehtyjen mittausten sekä mittaustulosten perusteella tehtävän huoneakustisen mallinnuksen avulla. Kirkon rakennushistoriaa on selvitetty tutkimusta varten kirjallisuus- ja arkistotutkimuksella sekä haastattelemalla Sastamalan Pyhän Marian kirkkoa aiemmin perusteellisesti tutkinutta Markus Hiekkasta.

Tutkimus on jaettu pienemmiksi osatutkimuksiksi, joiden tarkoitus on kuvata historiallisen olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallintaminen sekä aiempien rakennusvaiheiden

³⁷ Selander 1938, s. 12; Palmroth 1963, s. 54.

³⁸ Palmroth 1963, s. 50; Meurman 1984, s. 112.

³⁹ Hiekkänen 2007, s. 258.

ennallistaminen tehdyn mallin perusteella. Ensimmäisessä osatutkimuksessa kuvataan huoneakustisen mallin tekemiseen tarvittavien huoneakustisten mittalukujen mittauksiin liittyvät asiat. Luvussa 2.2 on käsitelty standardien mukaisia huoneakustisia mittalukuja ja niiden mittauskäytäntöjä. Luvuissa 2.3–2.4 on kuvattu Sastamalan Pyhän Marian kirkossa suoritettut huoneakustiset mittaukset sekä esitelty saadut mittaustulokset.

Toinen osatutkimus käsittelee olemassa olevan tilan geometrian mallintamista. Luvussa 3.1 on kerrottu olemassa olevan tilan geometrian selvittämiseen soveltuvia menetelmiä ja luvuissa 3.2 on esitetty Sastamalan Pyhän Marian kirkon geometrian kuvaamiseen käytetty menetelmä sekä kuvauksen lopputuotteena saadun pistepilven perusteella tehty tilamalli huoneakustista mallintamista varten.

Kolmas osatutkimus käsittelee huoneakustista mallintamista. Luvussa 4.1 on kerrottu huoneakustisista mallinnusmenetelmistä yleisesti sekä tässä tutkimuksessa käytettävästä menetelmästä tarkemmin. Luvuissa 4.2–4.3 on esitetty Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustisen mallin luominen, mallin kalibrointi luvussa 2.4 esitettyjen mittaustulosten perusteella sekä kalibroidulla saadut mallinnustulokset.

Neljännessä osatutkimuksessa tarkastellaan Sastamalan Pyhän Marian kirkon rakennushistoriaa sekä valitaan kirkon aiemmista rakennusvaiheista mallinnettavat tilanteet. Luvussa 5.1 on käyty läpi kirkossa sen olemassaolon aikana tehdyt muutokset, jotka lähteiden perusteella on selvitettävissä. Luvussa 5.2 on valittu kirkosta mallinnettavat aiemmat rakennusvaiheet sekä esitetty mallinnettavien rakennusvaiheiden huoneakustisten mallien tekeminen. Luvussa 5.3 on esitetty mallinnettu Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikka sen eri rakennusvaiheissa, mukaan lukien luvussa 4.3 esitetyt mittaustilanteen perusteella mallinnetut tulokset. Luvussa 7 on tarkasteltu eri osatutkimuksien tuloksia.

2. OLEMASSA OLEVAN TILAN HUONEAKUSTIIKAN MITTAAMINEN

2.1 Huoneakustiset mittaukset

2.1.1 Mittauskäytännöt

Standardeissa ISO 3382-1⁴⁰, ISO 3382-2⁴¹ ja ISO 3382-3⁴² on esitetty erilaisten huoneakustisten mittalukujen määritelmät, mittauskäytännöt ja vaatimukset mittauksissa käytettävälle mittauskalustolle. Standardin ensimmäisessä osassa käsitellään esiintymistilojen huoneakustiikan kuvaamiseen käytettäviä mittalukuja. Toinen osa käsittelee jälkikaiunta-ajan mittaamista tavanomaisissa huonetiloissa ja kolmas osa puheenerotettavuuteen liittyviä mittalukuja, joita tarkastellaan nykyään erityisesti avotoimisto- ja oppimisympäristöissä, mutta on alun perin kehitetty auditorioiden ja puhesalien puheakustiikan arvioimiseen.

Esiintymistiloissa huoneakustiikkaa tarkastellaan sekä kuuntelijoiden että esiintyjien näkökulmasta. Mittauksissa käytetään ympärisäteilevää äänilähdettä, joka pystyy tuottamaan tilaan vähintään 45 dB taustäänitasoa suuremman äänenpainetason jokaisella mitattavalla taajuuskaistalla. Kaikkia esiintymistilojen huoneakustisia mittalukuja mitattaessa käytetään suuntaamatonta mikrofonia, joka täyttää standardissa IEC 61260⁴³ esitetyn tyypin 1 mukaiset ominaisuudet. Lisäksi standardissa ISO 3382-1 esitetyn sivuttaisenergiasuhteen määrittämiseksi on käytettävä myös suuntauskuvioltaan kahdeksikon muotoista mikrofonia. Sivuttaisenergiasuhteesta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 2.2.2.

Saliakustiikan mittalukuja mitattaessa äänilähde- ja mikrofonipaikkojen määrä valitaan siten, että mitattavat äänilähde-mikrofoni-yhdistelmät kuvaavat mahdollisimman hyvin koko tilan ääniolosuhteita. Äänilähdepaikkoja tulee olla vähintään kolme ja niiden sijainnit valitaan paikoilta, joille puhuja tai esiintyjä olisi tilassa tavallisesti asettunut. Jos esiintymisalue on laaja ja monimuotoinen, on perusteltua käyttää useampaa kuin kolmea äänilähdepaikkaa. Äänilähteen keskikohdan etäisyydeksi lattiapinnasta suositellaan 1,5 metriä. Mikrofonipaikkojen lukumäärä valitaan mitattavan tilan koon perusteella. Jos

⁴⁰ EN-ISO 3382-1, 2009.

⁴¹ EN-ISO 3382-2, 2008.

⁴² EN-ISO 3382-3, 2012.

⁴³ EN-ISO 3382-1, 2009; EN-ISO 3382-2, 2008; EN-ISO 3382-3, 2012.

tilan istumapaikkamäärä on 500, tulee mikrofonipaikkoja olla vähintään kuusi. Mikrofonipaikat valitaan edustamaan tilassa tavallisesti istuvia kuuntelijoita siten, että ne sijaitsevat vähintään 2 m etäisyydellä toisistaan sekä vähintään 1 m etäisyydellä lähimmästä heijastavasta pinnasta. Mikrofonipaikkojen tulee myös olla tarpeeksi kaukana äänilähteistä, jotta suoran äänen vaikutus mittaustuloksiin ei olisi liian suuri. Symmetrisissä tiloissa riittää, että mikrofonipaikat valitaan toiselta puolelta tilan keskilinjaa.⁴⁴

ISO 3382-1 esittämiä lava-akustiikan mittalukuja mitattaessa äänilähdepaikat valitaan samoin perustein, kuin saliakustiikan mittauksissa. Äänilähteen korkeudeksi asetetaan joko 1 m tai 1,5 m esiintymisalueen lattiapinnasta mitattuna. Jokaista äänilähdepaikkaa kohden mitataan kolmella eri mikrofonipaikalla, jotka asetetaan samalle korkeudelle äänilähteen keskikohdan kanssa ja 1 metrin etäisyydelle äänilähteen keskikohdasta.⁴⁵

Puheenerotettavuutta kuvaavia mittalukuja mitattaessa käytetään ympärisäteilevää äänilähdettä, jonka tuottama signaali noudattaa spektriltään vaaleanpunaista kohinaa (*pink noise*). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös yleisesti sovittuja toisenlaisia signaaleja, jotka omaavat vaaleanpunaisen taajuuskaistaspektrin. Tällaisia signaaleja ovat MLS (*maximum length sequence*) ja sinimuotoinen ”pyyhkäisy” (*sweep*), joilla mitatusta impulssivasteesta puheenerotettavuuden mittaluvut voidaan määrittää laskennallisesti. Mittauksissa käytettävän mikrofonin tulee olla suuntaamaton ja täyttää standardin IEC 61260⁴⁶ asettamat tyypin 1 vaatimukset kuten sali- ja lava-akustiikan mittalukujen mittauksissa. Standardi ISO 3382-3 esittää mittauskäytännöt avotoimistoympäristössä puheenerotettavuuden mittalukujen mittaamiselle. Äänilähde asetetaan sellaiselle paikalle ja korkeudelle, jolla se edustaa tilassa tavallisesti olevaa puhujaa. Mikrofonipaikat valitaan edustamaan tilassa normaalissa käyttötarkoitukseen sopivassa tilanteessa olevia kuulijoita.⁴⁷

2.1.2 Impulssivaste

Useimmat yleisesti käytössä olevista huoneakustiikan mittaluvuista voidaan määrittää tilasta mitatun impulssivasteen avulla. Poikkeuksena on binauraaliset mittaluvut, joiden määrittämiseksi on mitattava impulssivaste kaksikanavaisesti eli vastaamaan erikseen

⁴⁴ EN-ISO 3382-1, 2009.

⁴⁵ EN-ISO 3382-1, 2009.

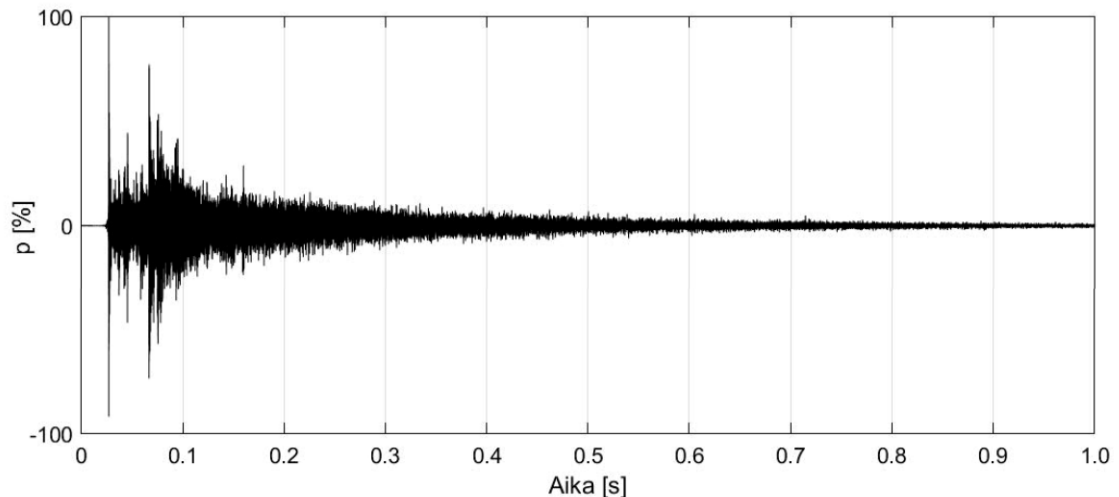
⁴⁶ EN-ISO 3382-1, 2009; EN-ISO 3382-2, 2008; EN-ISO 3382-3, 2012.

⁴⁷ EN-ISO 3382-3, 2012.

ihmisen molempia korvia. Impulssivaste sisältää tiedon tilaan tuotetun äänisignaalin ominaisuuksista ja muutoksista ajan suhteen äänilähteen ja vastaanottopisteen välillä. Impulssiherätettä voidaan kuvata Diracin deltafunktioilla Kuttruff⁴⁸ mukaan kaavalla 1

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{kun } t = 0 \\ 0, & \text{kun } t \neq 0 \end{cases} \text{ ja } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1)$$

missä impulssiheräte δ saa arvon nolla kaikilla muilla ajan hetkillä paitsi kun $t = 0$, jolloin se on teoriassa ääretön. Huoneakustiikassa impulssivaste kuvaa äänenpainetason muutosta ajan funktiona jossakin tarkastelupisteessä, kun heräte on jossakin toisessa pisteessä syntynyt impulssimainen ääni. Kuvassa 3 on esitetty graafinen kuvaus erään tilan impulssivasteesta.



Kuva 3. Eräessä myöhäiskeskiaikaisessa kirkossa mitattu impulssivaste.

Impulssivaste koostuu suorasta äänestä sekä suuresta määrästä suoran äänen jälkeen eri aikoihin mikrofoniin saapuvasta äänestä. Suoraksi ääneksi on määritelty ensimmäisen 5 ms aikana saapuva ääni. Tämän jälkeen mikrofoniin saapuva ääni luokitellaan heijastuneeksi ääneksi, joka voidaan jakaa kahteen osaan: aikaisiin heijastuksiin ja jälkikaiuntaan. Aikaisina heijastuksina pidetään puheen osalta 5–50 ms ja musiikin osalta 5–80 ms aikana mikrofoniin saapuvaa ääntä. Ihminen ei havaitse tällä aikavälillä saapuvaa ääntä erillisenä suorasta äänestä, jos äänenvoimakkuus suhteessa suoraan ääneen pysyy tietyissä rajoissa. Tällöin aikaisten heijastusten vaikutus koetaan suoraa ääntä voimistavana. Aikaisia heijastuksia pidetään usein hyödyllisinä, koska ne tukevat suoran äänen kuulemistä. Puolestaan ääni, joka saapuu mikrofoniin tämän jälkeen, luokitellaan jälkikaiunnaksi.⁴⁹ Puheen kannalta jälkikaiunta on haitallista, koska se muuttaa puheen

⁴⁸ Kuttruff 2009, s. 21.

⁴⁹ Kuttruff 2009, s. 109; Barron 2010, s. 19–20.

aikarakennetta, jolloin vokaalit ja konsonantit menevät päällekkäin ja puheen ymmärrettävyys heikkenee.⁵⁰

Huoneakustiseen tarkasteluun soveltuvampi esitystapa impulssivasteesta on impulssivasteen amplitudi, joka saadaan impulssivasteen neliönä $p(t)^2$. Näin saadusta graafisesta esityksestä voidaan tarkastella muun muassa milloin suora ääni ja ensimmäiset heijastukset saapuvat vastaanottopisteeseen. Impulssivasteesta voidaan myös määrittää taajuuskaistakohtaisen äänenpaineen esitystapa, jota kutsutaan taajuusvasteeksi sekä yleisenä esitystapana käytetty vaimenemiskäyrä impulssivasteen neliöitynä logaritmina.⁵¹

2.2 Huoneakustiikan mittaluvut

2.2.1 Jälkikaiunta-aika

Luultavasti tunnetuin huoneakustiikan arviointiin käytetty mittaluku on äänen vaimenemista tilassa kuvaava jälkikaiunta-aika T [s]. W.C. Sabine yli 100 vuotta sitten kehittämä mittaluku kuvaa sitä, kuinka nopeasti äänilähteen synnyttämä äänenpainetaso laskee tilassa sen jälkeen, kun äänilähde on hiljentynyt. Mitä lyhyempi jälkikaiunta-aika on, sitä nopeammin ääni vaimenee tilassa. Jälkikaiunta-ajan lukuarvo ilmoitetaan sekunteina [s] ja se kertoo, kuinka kauan äänilähteen hiljenemisen jälkeen kestää, että äänenpainetaso laskee 60 dB.

Jälkikaiunta-aika määritellään standardissa ISO 3382-1⁵² aikana, jolloin tarkastelupisteessä mitattu äänenpainetaso laskee 60 dB äänilähteen herätteen loputtua. Se voidaan määrittää katkaistun kohinan menetelmällä mitatusta vaimenemiskäyrästä suoraan tai mitatusta impulssivasteesta laskennallisesti. Jälkikaiunta-aika voidaan määrittää myös pienemmästä äänenpainetason laskuvälistä ja ekstrapoloida vastaamaan 60 desibeliä. Jos jälkikaiunta-aika määritetään ajasta, joka alkaa vaimenemiskäyrän pudottua 5 dB lähtötasosta ja päättyy, kun äänenpainetaso on pudonnut 25 dB, mittalukuna käytetään T_{20} . Puolestaan jos jälkikaiunta-aika määritetään vaimenemiskäyrästä väliltä 5–35 dB äänenpainetason lähtötasosta, mittalukua merkitään suurella T_{30} .

Puheelle tarkoitetuissa tiloissa jälkikaiunta-ajan on yleensä hyvä olla melko lyhyt. Liian kaiuntaisissa tiloissa puheenerotettavuus heikkenee, kun konsonantit ja vokaalit osuvat

⁵⁰ Kuttruff 2009, s. 223.

⁵¹ Vorländer 2008, s. 94–95; Barron 2010, s. 463.

⁵² EN-ISO 3382-1, 2009.

päällekkäin. Puolestaan musiikille tarkoitetuissa tiloissa jälkikaiunta-ajan on suositeltavaa olla pidempi. Beranekin⁵³ mukaan parhaimmiksi luokitelluissa konserttisaleissa mitattujen jälkikaiunta-aikojen keskiarvo on 2,0 s. Gaden⁵⁴ mukaan kamarimusiikille sopiva jälkikaiunta-aika on 1,5 s ja sinfoniaorkesterimusiikille 2,0–2,4 s. Rodriguez et al.⁵⁵ on esittänyt eri taidemusiikkilajeille suositeltuja jälkikaiunta-aikoja, jotka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri taidemusiikkilajeille suositeltuja jälkikaiunta-aikoja. (Rodriguez et al. 2017)

Taidemusiikkilaji	Suosittelun jälkikaiunta-aika [s]
Kuoromusiikki	1,8–2,5
Virsimusiikki	1,8–2,5
Urkumusiikki	2,0–3,5
Orkesterimusiikki	1,8–2,5
Nykymusiikki	0,5–1,0
Teatteri	0,7–1,8

Vaikka jälkikaiunta-ajan avulla voidaan tarkastella tilan äänikenttää vain yhdestä näkökulmasta, voidaan sitä kuitenkin pitää yhtenä tärkeimmistä huoneakustiikkaa kuvaavista mittaluvuista. Tämä johtuu siitä, että jälkikaiunta-aika on yksinkertaisesti mitattavissa oleva suure sekä myös kohtuullisen hyvin subjektiivisesti arvioitavissa. Jälkikaiunta-aika ei myöskään riipu merkittävästi kuuntelijan sijainnista. Lisäksi erilaisten tilojen jälkikaiunta-ajoista on saatavilla huomattava määrä tietoa, jonka perusteella voidaan määrittellä erilaisille tiloille tyypillisiä jälkikaiunta-ajan lukuarvoja. Jos tilan huoneakustiikkaa halutaan tarkastella kokonaisvaltaisesti, tarvitaan kuitenkin jälkikaiunta-ajan ohella muita tilan äänikenttää objektiivisesti kuvaavia mittalukuja.

2.2.2 Sali- ja lava-akustiikan mittaluvut

Varhainen jälkikaiunta-aika *EDT*

Varhainen jälkikaiunta-aika *EDT* [s] on äänen vaimenemista kuvaava mittaluku. Se määritetään vaimenemiskäyrästä samalla tavalla kuin jälkikaiunta-aika *T*, mutta vain ensimmäisen 10 dB:n vaimenemisen ajalta. Varhainen jälkikaiunta-ajan lukuarvo saadaan edelleen kertomalla ensimmäisen 10 dB vaimenemiseen kulunut aika kuudella. Koska

⁵³ Beranek 2003.

⁵⁴ Gade 2007, s. 313.

⁵⁵ Rodrigues et al. 2017.

mittaluku ottaa huomioon ainoastaan ensimmäisen 10 dB aikana tapahtuvan vaimenemisen, on aikaisten heijastusten vaikutus tällöin suurempi jälkikaiunta-aikaan verrattuna. Tästä syystä äänilähteen ja mikrofonin sijainti sekä tilan geometria mikrofonipaikan lähellä vaikuttaa varhaisen jälkikaiunta-ajan lukuarvoon.⁵⁶ Teoreettisesti erittäin diffuussa tilassa, jossa vaimenemiskäyrä on täysin lineaarinen, jälkikaiunta-ajan ja varhaisen jälkikaiunta-ajan tulokset vastaavat toisiaan.⁵⁷

Varhaisen jälkikaiunta-ajan on todettu kuvaavan paremmin subjektiivisesti havaittua jälkikaiuntaa.⁵⁸ Standardi ISO 3382-1 esittää mittaluvun tyypilliseksi vaihteluväliksi 1–3 s. Konserttisaalissa lukuarvo vaihtelee 1,8 s ja 2,2 s välillä.⁵⁹ Kirkoissa varhainen jälkikaiunta-aika on tyypillisesti 2,2–4,2 s.⁶⁰ Mittaluvun yksilukuarvo määritetään ISO 3382-1 mukaan oktaavikaistojen 500–1000 Hz keskiarvona.

Voimakkuus G

Äänen kuuluvuutta voidaan tarkastella voimakkuuden G [dB] avulla. Mittaluku voidaan standardin ISO 3382-1 mukaan määrittää ympärisäteilevän äänilähteen säteilemän äänienergian ja saman äänilähteen diffuussissa äänikentässä 10 metrin päähän säteilemän äänienergian logaritmisena suhteena kaavan 2 mukaisesti.

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

Kaavassa $p(t)$ on tarkastelupisteessä mitattu impulssivasteen äänenpaine hetkellä t ja $p_{10}(t)$ on impulssivasteen aiheuttama äänenpaine 10 m päässä äänilähteestä vapaassa kentässä hetkellä t . Mittaluku kuvaa siis sitä, kuinka paljon voimakkaammin ääni kuuluu suhteessa tilanteeseen, jossa äänilähde on vapaassa kentässä 10 m päässä kuulijasta. Voimakkuuden G mittaamiseksi mittauksissa on käytettävä kalibroituja äänilähdettä.

Voimakkuuden G yksilukuarvo määritetään oktaavikaistojen 500 Hz ja 1000 Hz keskiarvona. Tyypillisesti mittaluvun lukuarvo vaihtelee –2 dB ja 10 dB välillä.⁶¹ Gade⁶² on suositellut kamarimusiikille sopivaksi lukuarvoksi 10 dB ja sinfoniaorkesterille 3 dB.

⁵⁶ Kuttruff 2009, s. 237.

⁵⁷ Barron 2010, s. 46.

⁵⁸ Atal et al. 1965.

⁵⁹ Barron 2005.

⁶⁰ Berardi 2012.

⁶¹ EN-ISO 3382-1, 2009.

⁶² Gade 2007, s. 313.

Selvyys C_{80}

Äänen selkeyttä voidaan objektiivisesti arvioida selvyyden C_{80} [dB] avulla, jonka esittivät ensimmäisen kerran Reichardt et al.⁶³ vuonna 1974. Mittaluku kuvaa sitä, kuinka hyvin kuulija pystyy kuulemaan musiikin yksityiskohdat sekä erottamaan äänet toisistaan.⁶⁴ Standardin ISO 3382-1 mukaan mittaluku määritetään tarkastelupisteeseen saapuvan aikaisen ja myöhäisen äänienergian logaritmisena suhteena. Aikaisen äänen rajana on $t = 80$ ms, jonka jälkeen saapuva äänienergia luokitellaan myöhäiseksi. Selvyys määritetään impulssivasteesta kaavan 3 mukaisesti.

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{0,080} p^2(t) dt}{\int_{0,080}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3)$$

Kaavassa $p(t)$ tarkoittaa vastaanottopisteessä mitatusta impulssivasteesta määritettyä äänenpainetta ajan hetkellä t . Mitä suurempi mittaluvun lukuarvo on, sitä enemmän ääni havaitaan suorana äänenä, jolloin selvyys on parempi.⁶⁵ Mittaluku voidaan myös määrittää käyttämällä aikaisen äänen rajana $t = 50$ ms, jolloin mittalukua merkitään muuttujalla C_{50} . Tätä mittalukua käytetään arvioimaan puhe-esitysten selkeyttä.⁶⁶

Mittaluvun yksilukuarvo määritetään oktaavikaistojen 500 Hz ja 1000 Hz lukuarvojen keskiarvona. Tyypillisesti selvyyden C_{80} lukuarvo vaihtelee -5 dB ja 5 dB välillä.⁶⁷ Barroinin⁶⁸ mukaan konserttisaleissa mittaluvun optimaalinen alue on -2 dB ja 2 dB välillä. Marshallin⁶⁹ mukaan urkumusiikille optimaalinen lukuarvo on yli -6 dB. Kirkoille on ominaisempaa, että selvyys on pienempi kuin konserttisaleissa. Berardin⁷⁰ mukaan kirkoissa mittaluvun lukuarvon tulisi olla yli -3 dB, jotta ääniolosuhteet sopisivat sekä puheelle että musiikille. Erilaisille musiikkityyleille on esitetty taulukossa 2 esitettyjä raja-arvoja.⁷¹

Taulukko 2. Eri tyyliselle musiikille suositeltuja selvyyden arvoja. (Brezina 2013)

Musiikkityyli	Suosittelu selvyys [dB]
Urkumusiikki ja hidas tempoinen musiikki	0 ± 2
Jousimusiikki, nopeatempoisempi musiikki sekä kuorolaulu	2 ± 2
Psalmtarimusiikki, nopeatempoisempi musiikki sekä folk ja pop	4 ± 2
Lyömäsoitinmusiikki ja nykymusiikki	6 ± 2

⁶³ Reichardt et al. 1974.

⁶⁴ Vorländer 2008, s. 96–97; Barron 2010, s. 46.

⁶⁵ Gade 2007, s. 308.

⁶⁶ Vorländer 2008, s. 96–97; Barron 2010, s. 471.

⁶⁷ EN-ISO 3382-1, 2009.

⁶⁸ Barron 2010, s. 360.

⁶⁹ Marshall 1994.

⁷⁰ Berardi 2012.

⁷¹ Brezina 2013.

Sivuttaisenergiasuhde LF_{80}

Standardissa ISO 3382-1 esitetty sivuttaisenergiasuhde LF_{80} kuvaa tilan tuntua ja ympäröivyyttä. Standardin mukaisesti sivuttaisenergiasuhde voidaan mitata mikrofonilla, jonka suuntauskuvio on sekä suuntaamaton että kahdeksikon muotoinen. Suuntaavuudeltaan kahdeksikonmuotoisella mikrofonilla mitattaessa suuntaavuuden nollakohta asetetaan mittauksessa äänilähdettä kohti, jolloin sen maksimit ovat kohtisuorasti äänilähteeseen nähden. Tällöin mikrofoni poimii ensisijaisesti sivusuunnista tulevaa äänienergiaa. Äänilähteen synnyttämä impulssivaste mitataan sekä suuntauskuvioltaan kahdeksikonmuotoisella että suuntaamattomalla mikrofonilla ja sivuttaisenergiasuhde voidaan laskea mitattujen impulssivasteiden avulla kaavan 4 mukaisesti.

$$LF_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_{0,005}^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad (4)$$

Kaavassa $p_L(t)$ tarkoittaa suuntauskuvioltaan kahdeksikonmuotoisella mikrofonilla mitattua impulssivasteesta määritettyä äänenpainetta ja $p(t)$ suuntaamattomalla mikrofonilla mitattua impulssivasteesta määritettyä äänenpainetta ajan hetkellä t . Sivuttaisenergiasuhteen yksilukuarvo määritetään oktaavikaistojen 125–1000 Hz lukuarvojen keskiarvona.

Subjekttiivisten havaintojen perusteella mittalukua voidaan käyttää kuvaamaan sitä, kuinka leveältä äänilähde kuulostaa visuaaliseen havaintoon nähden sekä sitä, kuinka kuulija kokee olevansa tilaan syntyvän äänikentän sisällä ja ympäröimä. Mitä suurempi sivuttaissuunnassa saapuvan aikaisen äänen osuus on, sitä laajempaa äänilähde kuuluu. Puolestaan mitä suurempi sivuilta saapuvan myöhäisen äänen osuus on, sitä paremmin kuulija kokee olevansa äänen ympäröimä.⁷²

Suurissa esiintymistiloissa sivuttaisenergiasuhteen lukuarvo voi vaihdella arvojen 0 ja 0,5 välillä.⁷³ Tavoitearvona mittaluvulle voidaan yleisesti pitää 0,10 ja 0,35 väliä.⁷⁴ Gade⁷⁵ on esittänyt kamarimusiikille sopiviksi raja-arvoiksi 0,15–0,20. Myös kirkoissa mittaluvun optimaaliseksi alueeksi on esitetty 0,15–0,20.⁷⁶

Standardissa ISO 3382-1 mittalukua merkitään muuttujalla J_{LF} . Tässä työssä mittalukua merkitään standardin käyttämästä esitystyylisestä poiketen muuttujalla LF_{80} .

⁷² Gade 2007, s. 310.

⁷³ Kuttruff 2009, s. 240.

⁷⁴ Barron 2010, s. 68.

⁷⁵ Gade 2007, s. 313.

⁷⁶ Martellotta 2008.

Lava-akustiikan mittaluvut ST_{early} ja ST_{late}

Konserttisaleissa ja muissa esiintymistiloissa on olennaista tarkastella huoneakustiikkaa myös esiintyjän näkökulmasta. Esiintymiselle tarkoitetuissa tiloissa on tärkeää, että esiintyjät kuulevat toisensa ja huoneen antama vaste on riittävä. Marshall et al.⁷⁷ mukaan erityisesti varhaiset heijastukset esiintyjien välillä ovat olennaisia esiintymistilan toimivuuden kannalta. Aikaisista heijastuksista varsinkin vaakasuuntaiset suurien taajuuksien heijastukset ovat tärkeitä.

Yleisimmät esiintymisalueen huoneakustiikan kuvaamiseen käytetyt mittaluvut ovat ST_{Early} [dB] ja ST_{Late} [dB]. Mittaluvut perustuvat alun perin Gaden⁷⁸ tekemään tutkimukseen ja mittalukujen määritelmät ja mittauskäytännöt on esitetty standardin ISO 3382-1 liitteessä C. Mittaluvut voidaan määrittää impulssivasteesta, joka on mitattu esiintymisalueella lähellä äänilähdettä. Standardin mukaisesti mitattaessa mikrofoni sijoitetaan 1 m etäisyydelle ympärisäteilevän äänilähteen keskikohdasta ja samalle korkeudelle äänilähteen keskikohdan kanssa kappaleessa 2.1 esitetyllä tavalla.

Mittaluku ST_{Early} [dB] kuvaa sitä, kuinka esiintyjät kuulevat toisensa lavalla ja se voidaan määrittää mitatusta impulssivasteesta kaavan 5 mukaisesti.

$$ST_{Early} = 10 \log_{10} \left[\frac{\int_{0,020}^{0,100} p^2(t) dt}{\int_0^{0,010} p^2(t) dt} \right] \quad (5)$$

Yhtälössä $p(t)$ tarkoittaa vastaanottopisteessä mitatusta impulssivasteesta määritettyä äänenpainetta ajan hetkellä t . Hetki $t = 0$ vastaa tilannetta, jolloin suora ääni saavuttaa mikrofonin. Mittaluvussa verrataan 20–100 ms aikana mitattua äänienergiaa ensimmäisen 10 ms aikana saapuneeseen.

Mittaluku ST_{Late} [dB] on puolestaan objektiivinen vastine esiintyjän tilassa kokemalle kaiunnalle. Mittaluvun avulla voidaan arvioida, miltä tila kuulostaa esiintyjälle esiintymishetkellä ja se voidaan määrittää mitatusta impulssivasteesta kaavan 6 mukaisesti.

$$ST_{Late} = 10 \log_{10} \left[\frac{\int_{0,100}^{1,000} p^2(t) dt}{\int_0^{0,010} p^2(t) dt} \right] \quad (6)$$

Mittaluvussa verrataan 100–1000 ms aikana mikrofonin saapunutta äänienergiaa suoraan ääneen. 100 ms jälkeen saapunut ääni koetaan erillisenä suorasta äänestä, jolloin

⁷⁷ Marshall et al. 1978.

⁷⁸ Gade 1992.

ääni kuullaan kaiuntana. Sekä ST_{Early} että ST_{Late} mitataan oktaavikaistaisesti ja mittalukujen yksilukuarvo määritetään kolmen mittauspisteen 250–2000 Hz oktaavikaista-arvojen keskiarvona.

Mittaluvuille ei ole yksittäisiä vakiintuneita raja-arvoja. Gade on esittänyt mittaluvun ST_{Early} optimaaliseksi alueeksi -13 ja -11 dB väliä. Puolestaan Beranek⁷⁹ on ehdottanut tavoiteltavaksi alueeksi -12 ja -15 dB väliä. Mittaluvulle ST_{Late} Gade on esittänyt raja-arvoiksi konserttisaleissa -12 ja -13 dB⁸⁰ ja Dammerud⁸¹ sen sijaan raja-arvoiksi -15 ja -17 dB. Sekä aikaisten että myöhäisten heijastusten äänenpainetason tärkeys esiintymisalueella on kuitenkin tunnistettu.⁸²

2.2.3 Puheensiirtoindeksi

Puheelle tarkoitetuissa tiloissa on syytä tarkastella puheenerotettavuuden olosuhteita. Standardissa ISO 3382-3⁸³ on esitetty puheenerotettavuuden arvioimiseen käytettävä puheensiirtoindeksi *STI* (*speech transmission index*), joka on määritelty standardissa IEC 60268-16⁸⁴. Puheensiirtoindeksiä käytetään kuvaamaan tilojen puheolosuhteiden laatua erityisesti opetus- ja puhetiloissa sekä avotoimistoissa työpisteiden välillä. Puheensiirtoindeksin lukuarvo voi vaihdella arvojen 0–1 välillä. Puheensiirtoindeksin arvo 1 tarkoittaa täydellistä puheenerotettavuutta. Puolestaan jos arvo on 0, ei puheesta saa lainkaan selvää. Puheensiirtoindeksin subjektiivinen merkitys voidaan jakaa taulukossa esitettyjen arvojen mukaisesti.⁸⁵

Taulukko 3. Puheensiirtoindeksin *STI* subjektiivinen merkitys puheenerotettavuuden kannalta. (Maekawa et al. 2011)

Puheenerotettavuus	<i>STI</i>
Erittäin hyvä	> 0,75
Hyvä	0,60–0,75
Kohtuullinen	0,45–0,60
Huono	0,30–0,45
Kelvoton	< 0,30

⁷⁹ Beranek 2004, s. 30.

⁸⁰ Gade 1989b.

⁸¹ Dammerud 2010.

⁸² Ueno & Tachibana 2011.

⁸³ EN-ISO 3382-3, 2012.

⁸⁴ IEC 60268-16, 2020.

⁸⁵ Maekawa et al. 2011, s. 91.

Standardissa IEC 60268-16 määritetty ja ISO 3382-3 esitetty puheensiirtoindeksi STI perustuu Houtgastin ja Steekenin⁸⁶ vuonna 1985 esittämään menetelmään. Puheensiirtoindeksin määrittämiseksi tarvitaan jälkikaiunta-aika T sekä puheen signaalikohinasuhde L_{SN} oktaavikaistoilla 125–8000 Hz. Puheen signaalikohinasuhde L_{SN} määritetään kaavan 7 mukaisesti

$$L_{SN} = L_S - L_N \quad (7)$$

missä L_S [dB] on puheen äänenpainetaso ja L_N [dB] taustamelun äänenpainetaso. Puheen signaalikohinasuhteen perusteella lasketaan modulaatiosiirotfunktio, joka koostuu modulaation vähennyskerroimesta $m(F, f)$ modulaatiotaajuudella F_i (0,63–12,5 Hz) oktaavikaistoilla f_i (125–8000 Hz). Tällöin modulaatiövähennyskerroimia saadaan yhteensä 98. Modulaation vähennyskerroin määritetään kaavalla 8.

$$m(F_i, f_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi F_i \frac{T(f_i)}{13,8}\right)^2}} \frac{1}{1 + 10^{-L_{SN}(f_i)/10}} \quad (8)$$

Yhtälössä $T(f_i)$ on taajuudesta riippuva jälkikaiunta-aika ja L_{SN} taajuudesta riippuva puheen signaalikohinasuhde. Jokaisen modulaatiövähennyskerroimen perusteella lasketaan näennäinen signaalikohinasuhde kaavalla 9.

$$SN_{app} = 10 \log_{10} \left(\frac{m}{1 - m} \right) \quad (9)$$

Puheensiirtoindeksi STI voidaan laskea näennäisen signaalikohinasuhteen avulla kaavan 10 mukaisesti

$$STI = \frac{1}{30} \left(15 + \sum_{j=1}^7 k_j \left(\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SN_{app}(F_i, f_i) \right) \right) \quad (10)$$

missä k_j on oktaavikaistan perusteella määräytyvä painotuskerroin.

⁸⁶ Houtgast & Steeneken 1985.

2.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiset mittaukset

2.3.1 Mittausmenetelmät ja -olosuhteet

Huoneakustisissa mittauksissa mitattiin ISO 3382-1 -standardin⁸⁷ mukaisesti saliakustii-
kan mittaluvut G , EDT , C_{80} ja LF_{80} sekä lava-akustiikan mittaluvut ST_{Early} ja ST_{Late} . Jäl-
kikaiunta-aika T_{30} mitattiin ISO 3382-2⁸⁸ mukaisesti. Koska tarkasteltava tila toimii myös
puhetilana, on perusteltua tarkastella myös puheen olosuhteita. Puheensiirtoindeksi STI
mitattiin standardin IEC 60268-16⁸⁹ mukaisesti ja mittauksissa käytetyt kaiutin- ja mikro-
fonipaikkojen sijainnit valittiin standardin ISO 3382-1⁹⁰ mukaisesti.

Mittauksissa käytetty mittauskalusto noudatti standardien mukaisia vaatimuksia. Ääni-
lähteenä käytettiin kalibroitua ympärisäteilevää äänilähdettä ja mittaukset suoritettiin
huoneakustisella mittauslaitteistolla. Käytetty laitteisto täyttää Martellotta et al.⁹¹ ohjeis-
tuksen mukaisen keskitasoisien (intermediate) laitteiston ominaisuudet. Mittauksissa
käytettiin suuntauskuvioltaan suuntaamatonta mikrofonia. Ääniherätteenä käytettiin
standardin ISO 18233 mukaisesti pienistä taajuuksista suurempiin taajuuksiin etenevää
sinipyyhkäisyä, jota voidaan käyttää sali- ja lava-akustiikan mittalukuja sekä puheensiir-
toindeksiä mitattaessa, kunhan herätesignaali noudattaa vaaleanpunaisen kohinan taa-
juusjakaumaa. Käytetyn sinipyyhkäisyyn pituus oli 30 sekuntia. Mittaukset tehtiin kolman-
nesoktaavikaistoilla 100–5000 Hz ja näytteenottotaajuus oli mittauksissa 48 kHz. Mit-
tauksia suoritettiin aamulla, jolloin kirkko oli mittaajia lukuun ottamatta tyhjä.

Standardit suosittelevat mittaamaan mittaushetkellä vallitsevat tilan lämpötila- ja kos-
teusolosuhteet, jotka vaikuttavat ilman absorptioon ja näin myös mitattavien huoneakus-
tisten mittalukujen lukuarvoihin. Erityisesti suurissa tiloissa ilman absorption vaikutus
akustiikan mittalukuihin voi olla merkitsevä.⁹² Ilman suhteellinen kosteus RH [%] ja läm-
pötila T [°C] mitattiin mittausten aikana kahdeksassa pisteessä kirkon sisällä. Mittaustu-
lostien perusteella ilman lämpötilan keskiarvo oli 20 °C ja suhteellisen kosteuden kes-
kiarvo 54 %. Yksittäisten mittausten tulokset sekä niistä lasketut keskiarvot on esitetty
taulukossa 4.

⁸⁷ EN-ISO 3382-1, 2009.

⁸⁸ EN-ISO 3382-2, 2008.

⁸⁹ IEC 60268-16, 2020.

⁹⁰ EN-ISO 3382-1, 2009.

⁹¹ Martellotta et al. 2009.

⁹² Harris 1966.

Taulukko 4. Mittaushetkellä kirkon sisällä mitatut ilman lämpötila T ja suhteellinen kosteus RH sekä mittaustuloksista lasketut keskiarvot.

Mittaus	Lämpötila T [°C]	Suhteellinen kosteus RH [%]
Nro. 1	20	54
Nro. 2	20	54
Nro. 3	20	53
Nro. 4	20	56
Nro. 5	20	55
Nro. 6	20	53
Nro. 7	20	53
Nro. 8	19	55
Keskiarvo	20	54

2.3.2 Mittausjärjestelyt

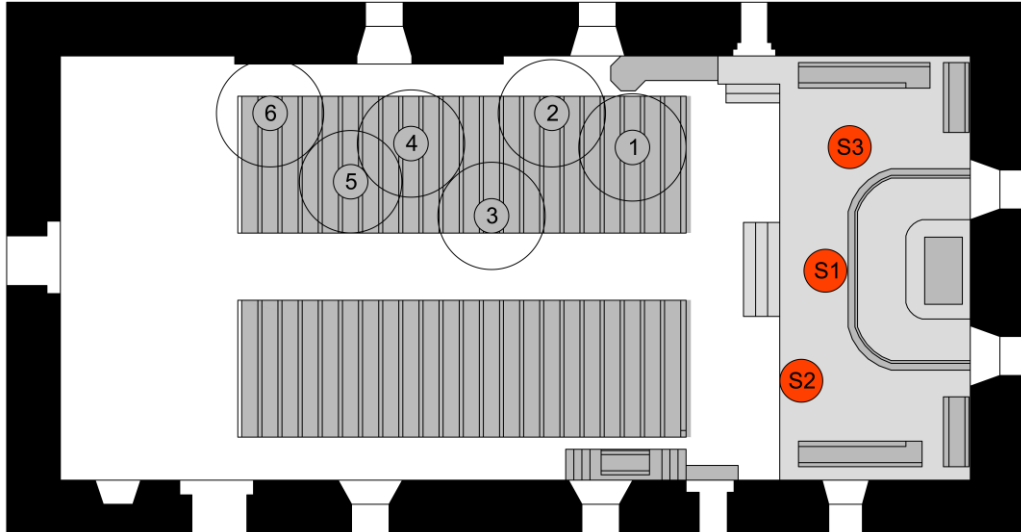
Kaiutin- ja mikrofonipaikat valittiin standardien ISO 3382-1⁹³, ISO 3382-2⁹⁴ sekä Martellotta et al.⁹⁵ suositusten mukaisesti. Standardin ISO 3382-1 mukaan kaiutinpaikoja tulee olla vähintään kolme esiintymisalueella ja paikat valitaan sen perusteella, missä esiintyjät tavanomaisesti tilassa olisivat. Mikrofonipaikkoja tulee olla vähintään 6, kun tilassa on istuinpaikkoja 500 hengelle. Mikrofonipaikat sijoitetaan paikoille, joilla kuuliija tavallisesti olisi siten, että paikat edustavat mahdollisimman monipuolisesti istumapaikkojen eri alueita. Kun kaiutin- ja mikrofonipaikat valitaan edellä mainitulla tavalla, täytyy myös ISO 3382-2 mukaiset jälkikaiunta-ajan täsmällisen mittauksen vaatimukset.

Saliakustiikan mittalukujen G , EDT , C_{80} , LF_{80} ja T_{30} sekä puheensiirtoindeksin STI mittauksissa käytettiin kolmea kaiutinpaikkaa ja kuutta mikrofonipaikkaa. Kaiutinpaikat valittiin alttarikorokkeen alueelta siten, että paikat edustavat alttarikorokkeen eri alueita ja sijaitsevat paikoilla, joille puhuja tai esiintyjä tavallisesti olisi lavalla sijoittunut. Kaiutin asetettiin mittauksissa 1,5 m korkeudelle alttarikorokkeen yläpinnasta. Mikrofonipaikat valittiin edustamaan kirkkosalin penkkirivistön eri alueita. Koska tila on suorakaiteen muotoinen ja suhteellisen symmetrinen, valittiin mikrofonipaikat vain toiselta puolelta kirkkosalia. Saliakustiikan mittalukujen sekä puheensiirtoindeksin mittauksissa käytetyt kaiutin- ja mikrofonipaikat on esitetty kuvassa 4. Näin kaiutin-mikrofoni-yhdistelmiä tuli yhteensä 18.

⁹³ EN-ISO 3382-1, 2009.

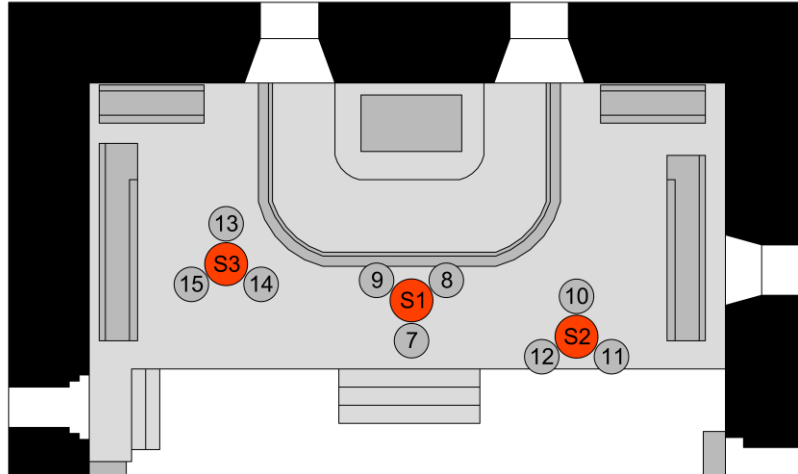
⁹⁴ EN-ISO 3382-2, 2008.

⁹⁵ Martellotta et al. 2009.



Kuva 4. Saliakustiikan mittalukujen ja puheensiirtoindeksin STI mittauksissa käytetyt kaiutinpaikat S1–S3 ja mikrofonipaikat 1–6.

Lava-akustiikan mittaluvut ST_{Early} ja ST_{Late} mitattiin standardin ISO 3382-1 mukaisesti siten, että kaiutinpaikkoja oli kolme esiintymislavana toimivan alttarikorokkeen alueella ja jokaista kaiutinpaikkaa kohden oli kolme mikrofonipaikkaa. Mittauksissa käytettiin samoja kaiutinpaikkoja kuin saliakustiikan mittalukujen mittauksissa. Mikrofonipaikat sijoitettiin jokaista kaiutinpaikkaa kohden 1 m etäisyydelle kaiuttimen keskipisteestä siten, että vierekkäisten mikrofonipaikkojen etäisyys toisistaan oli yhtä suuri. Mikrofonit asetettiin samalle korkeudelle kaiuttimen keskipisteen kanssa eli 1,5 m korkeudelle alttarikorokkeen yläpinnasta. Mikrofonipaikkojen valinnassa huomioitiin myös, että viereisiin heijastaviin pintoihin oli vähintään 2 m etäisyys ISO 3382-1 mukaisesti. Lava-akustiikan mittalukujen mittauksissa käytetyt kaiutin- ja mikrofonipaikat on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Lava-akustiikan mittalukujen mittauksissa käytetyt kaiutinpaikat S1–S3 ja kaiutinpaikkakohtaiset mikrofoniapaikat 7–15.

Puheensiirtoindeksiin määrittämiseksi mitattiin myös tilassa mitaushetkellä ollut taustäänitaso $L_{p,A,B}$. Kirkossa ei ole taloteknisiä järjestelmiä lainkaan eli sen taustäänitaso muodostuu kirkkoa ympäröivän luonnon äänistä sekä ehkä mahdollisesti kaukaa kantautuvasta liikennemelusta. Taustäänitason $L_{p,A,B}$ mitaustulokset on esitetty taulukossa 5. Taustäänitason A-painotettu keskiäänitaso $L_{p,A,B,Eq}$ oli mitaushetkellä 18 dB.

Taulukko 5. Kirkossa mitattu taustäänitaso $L_{p,A,B}$.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Yksiluku- arvo
$L_{p,A,B}$ [dB]	22 dB	14 dB	11 dB	10 dB	9 dB	10 dB	18 dB

2.4 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiset ominaisuudet

Huoneakustisten mittalukujen T_{30} , EDT , C_{80} ja G sekä lava-akustiikan mittalukujen ST_{Early} ja ST_{Late} tarkastelu on rajattu oktaavikaistoille 125–4000 Hz. Puheensiirtoindeksiä STI tarkastellaan yksilukuarvoina. Mittaluvuille on määritetty yksilukuarvot standardin ISO 3382-1 esittämien mittalukukohtaisten ohjeiden mukaisesti.

Mittauksissa käytettyjen mitauspisteiden keskiarvona lasketut tulokset on esitetty taulukossa 6. Taulukossa esitetyt yksilukuarvot on laskettu mittaluvun mittaamiseen käytettyjen kaikkien äänilähde-vastaanottopisteiden tuloksista määritettyjen yksilukuarvojen aritmeettisena keskiarvona.

Taulukko 6. Sastamalan Pyhän Marian kirkossa mitattujen huoneakustiikan mittalukujen mitaustulokset oktaavikaistoilla 125–4000 Hz sekä yksilukuarvoina.

Mittaluku	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Yksiluku- arvo
T_{30} [s]	2,3	2,4	2,6	2,8	2,4	1,9	2,7
EDT [s]	2,2	2,5	2,7	2,8	2,4	1,7	2,7
C_{80} [dB]	-3,4	-4,0	-4,3	-4,2	-2,5	0,6	-4,2
G [dB]	12,3	10,5	10,9	11,7	10,6	8,7	11,3
ST_{Early} [dB]	-11,3	-12,5	-12,6	-12,1	-11,7	-13,0	-12,2
ST_{Late} [dB]	-12,8	-10,5	-10,1	-9,7	-10,2	-13,9	-10,1
STI				-			0,43

3. OLEMASSA OLEVAN TILAN GEOMETRIAN MALLINTAMINEN

3.1 Tilan mallinnusmenetelmät

Huoneakustiikan mallintamiseksi tarvitaan tarkasteltavan tilan geometriaa kuvaava kolmiulotteinen tilamalli. Jos tilasta on olemassa pohja- ja leikkauspiirustuksia tai valmiin geometrian sisältävä 3D-malli, voidaan huoneakustisessa mallinnuksessa käytettävä tilamalli tehdä näiden pohjalta. Joissakin tapauksissa mallinnettavasta tilasta ei kuitenkaan välttämättä ole saatavilla lähtötietoja, joiden perusteella tilamalli voidaan tehdä. Tällaisessa tapauksessa voidaan hyödyntää kolmiulotteista mittausdataa kuvaavia laitteita, joiden avulla mallinnettavan tilan geometria saadaan selvitettyä.

Olemassa olevasta tilasta tai ympäristöstä voidaan kuvata kolmiulotteista mittausdataa monenlaisilla menetelmillä. Viime vuosikymmenen aikana kuvausmenetelmät ja -laitteistot ovat kehittyneet merkittävästi ja markkinoille on tullut myös kuluttajille suunnattuja edullisempia ja käyttäjäystävällisempiä laitteita.⁹⁶ Pääasiassa kaikilla markkinoilla olevilla laitteilla saadaan yhtenä lopputuotteena kuvauskohteen geometriaa kuvaava pisteilvi, jota voidaan hyödyntää geometrian mallintamisessa lähtötietona. Pisteilveksi kutsutaan digitaalista kolmiulotteista kuvausta jostakin fyysisestä esineestä, tilasta tai ympäristöstä. Se koostuu suuresta määrästä yksittäisistä x-, y- ja z-koordinaatin sisältävistä datapisteistä kolmiulotteisessa koordinaatistossa, jotka yhdessä muodostavat pilveä muistuttavan pistejoukon eli kuvauskohteen geometrian. Pisteilven kuvausmenetelmästä ja -laitteistosta riippuen datapisteet voivat koordinaattitietojen lisäksi sisältää tiedon esimerkiksi pisteen pinnan väristä (RGB-koodi) sekä kirkkaudesta. Pisteilven kuvaustiheys riippuu käytetystä laitteistosta ja laitteiston käyttämästä kuvausmenetelmästä sekä mittausetäisyydestä, jonka kasvaessa pisteväli eli kuvattujen pisteiden etäisyys toisistaan kasvaa. Kuvattua pisteilveä voidaan jälkeempään harventaa, jolloin aineiston tiedostokokoa saadaan pienemmäksi ja sen käsiteltävyys helpottuu. Harvennetussa pisteilviaineistossa pisteväli on yleensä vakio.⁹⁷

Yleisiä pisteilven kuvaamiseen käytettyjä menetelmiä ovat laserkeilaus ja fotogrammetria. Laserkeilaus on optinen menetelmä, jossa mitataan laitteen lähettämän valopulssin

⁹⁶ Ordóñez et al. 2010.

⁹⁷ RT 103132, 2019; RT 102275, 2021.

kulkemaan matkaan kuluvaan aikaa. Kun valonnopeus tiedetään, voidaan heijastuspinnan etäisyys laskea valon kulkeman matkan kuluneen ajan avulla. Laserkeilaamalla saatu mittausdata on usein hyvin tarkkaa ja useat nykyisistä keilaimista sisältävät myös RGB-värikameran, jonka avulla keilatulle kolmiulotteiselle datalle saadaan väritiedot. Laserkeilaimet ovat lähtökohtaisesti ammattikäyttöön tarkoitettuja laitteita ja näin myös kalliita.⁹⁸ Niiden käyttö edellyttää myös osaamista sekä mittausasemien sijaintien suunnittelussa että datan käsittelyssä ja prosessoinnissa.⁹⁹

Laserkeilausta epätarkempi pistepilven kuvaamiseen käytetty menetelmä, fotogrammetria, perustuu kuvattavasta kohteesta otettuihin valokuviin, jotka yhdistetään vastinpisteiden avulla toisiinsa. Nykyiset fotogrammetriaan perustuvat järjestelmät ovat pitkälti täysin digitaalisia ja laitekohtaiset ohjelmistot yhdistävät fotogrammetriaa sekä muita kuvantamis- ja mittauslaitteistoa hyödyntäen yhtenäisiä kolmiulotteisia malleja, visualisointeja ja muuta mittautietoa. Rakentamisessa fotogrammetriaa käytetään muun muassa alueiden kartoituksessa, rakennuskohteen lähtötilanteen mallintamisessa ja visualisoinnissa, rakennusvaiheiden dokumentoinnissa ja monimutkaisten kohteiden ja yksityiskohdian mallintamisessa ja dokumentoinnissa. Fotogrammetriaa käytetään myös arkeologisten kohteiden kuvaamiseen ja mallintamiseen.¹⁰⁰

Laserkeilauksen ja fotogrammetristen menetelmien lisäksi kolmiulotteista mittausdataa voidaan kuvata syvyyskameroilla, jotka mittaavat kuvauskohteen geometriaa joko strukturoidun valon tai säteen kulkeman ajan periaatteella. Syvyyskamerat hyödyntävät usein myös fotogrammetriaan perustuvia menetelmiä, joiden avulla kuvauskohteen pisteille saadaan väritiedot. Syvyyskamerat ovat laserkeilaimia edullisempia, mutta niiden kantama on lyhyempi ja geometrinen tarkkuus heikompi.¹⁰¹

Tässä tutkimuksessa olemassa olevan tilan kuvaamiseen päätettiin käyttää fotogrammetriaa hyödyntävää syvyyskameraa. Käytetyn laitteiston valmistaja lupaa laitteen kuvaustarkkuuden virheeksi alle 1 %, kun laitetta käytetään ohjeiden mukaisesti. Jotta laitteiston voidaan todeta soveltuvan tutkimuksen mukaiseen käyttötarkoitukseen, on hyvä tarkastella, millainen vaikutus 1 % etäisyysmittauksen virheellä on huoneakustiikkaan.

⁹⁸ Lercari et al. 2016.

⁹⁹ Lehtola et al. 2017.

¹⁰⁰ RT 103132, 2019; RT 102275, 2021.

¹⁰¹ Altuntas et al. 2016.

Kuvaustarkkuuden virheen vaikutusta huoneakustisiin mittalukuihin haluttiin tarkastella, jotta laitteen soveltuvuus tutkimuksen mukaiselle käyttötarkoitukselle voidaan todentaa. Tarkastelu on tehty kolmen erikokoisen särmiönmuotoisen tilan avulla, joissa tutkittiin jälkikaiunta-ajan muutosta, kun tilan sivumitat muuttuvat 1 %.

Jälkikaiunta on laskettu kaavan 11 mukaisesti

$$T = \frac{0,16V}{\sum S\alpha} \quad (11)$$

missä V on tilan sivumitoista riippuva tilavuus, S absorptioala ja α taajuudesta riippuva absorptiokerroin. Tarkastelussa käytettyjen särmiönmuotoisten tilojen sivumitat ovat $x = 15 \text{ m}/10 \text{ m}/5 \text{ m}$, $y = 30 \text{ m}/20 \text{ m}/10 \text{ m}$ ja $z = 10 \text{ m}/7 \text{ m}/3 \text{ m}$. Tilojen absorptioalan on ajateltu olevan 80 % lattiapinta-alasta ja absorptioalan absorptiosuhteen 1,0. Tarkastelu tehtiin siten, että absorptioala pysyy vakiona virheen tarkastelussa. Sivumittojen 1 % muutoksen vaikutus tilojen jälkikaiunta-aikaan on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. 1 % etäisyysvirheen vaikutus jälkikaiunta-aikaan.

Sivumittojen kerroin	Tila 1			Tila 2			Tila 3		
	0,99	1,00	1,01	0,99	1,00	1,01	0,99	1,00	1,01
Leveys x [m]	14,85	15	15,15	9,9	10	10,1	5,95	5	5,05
Pituus y [m]	29,7	30	30,3	19,8	20	20,2	9,9	10	10,1
Korkeus z [m]	9,9	10	10,1	6,93	7	7,07	2,97	3	3,03
Tilavuus V [m ³]	4366	4500	4636	1358	1400	1442	146	150	155
Absorptio-ala S [m ²]	360	360	360	160	160	160	40	40	40
Jälkikaiunta-aika T [s]	1,94	2,00	2,06	1,36	1,40	1,44	0,58	0,60	0,62

Tulosten perusteella 1 % etäisyysvirheen vaikutus jälkikaiunta-aikaan on noin 0,02–0,06 s. Jos verrataan tätä standardissa ISO 3382-1¹⁰² jälkikaiunta-ajalle ilmoitettuun juuri havaittavissa olevaan muutokseen (*just noticeable difference, JND*), joka on 5 % jälkikaiunta-ajasta, ei 1 % etäisyysvirheen aiheuttama muutos jälkikaiunta-aikaan ole merkittävä. Voidaan siis todeta, että pistepilven kuvaamiseen käytettävä laitteisto on kuvaustarkkuutensa osalta riittävä tutkimuksessa tehtävän huoneakustisen mallinnuksen lähtötietojen tuottamiseen.

¹⁰² EN-ISO 3382-1, 2009.

3.2 Sastamalan Pyhän Marian kirkon geometrian mallintaminen

3.2.1 Pistepilviaineisto

Tutkimuksessa pistepilven kuvaamiseen on käytetty fotogrammetriaa hyödyntävää syvyyskameraa. Laite koostuu useasta eri suuntiin kuvaavista RGB-värikamerasta ja syvyyskamerasta, jotka kuvaavat ympäristöänsä suoraan eteen sekä ylä- ja alaviistoon. Käytetyn laitteen etäisyydenmittaus perustuu strukturoituun infrapunavaloon, jossa etäisyyden mittaaminen tehdään valaisemalla kuvauskohde ennalta määrättyllä säännöllisellä valokuvilla ja analysoimalla sitten kuvion muodonmuutoksia.

Ympäristönsä kuvaamiseksi laite pyörähtää kuvauksen aikana akselinsa ympäri pysähtyen pyörähdyksensä aikana ottamaan kuvan ja mittaamaan syvyydet eri suuntiin. Yhden pyörähdysen aikana otetuista kuvista syntyy lopputuloksena RGB-D-panoraamakuva, joka koostuu otetuista värikuvista sekä skannatuista syvyydetiedoista. Kuvassa 6 on esitetty Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosalin keskellä olleessa kuvauspaikassa yhden pyörähdysen lopputuloksena syntynyt panoraamakuva.



Kuva 6. *Kirkkosalin keskellä olleen kuvauspaikan mukainen panoraamakuva.*

Käytetyn laitteiston järjestelmä yhdistää panoraamakuvat yhdeksi syvyys- ja väritiedot sisältäväksi kolmiulotteiseksi malliksi, jolloin tilojen geometrian kuvaaminen ei vaadi merkittävää aiempaa osaamista tai valmisteluja ennen kuvauksen suorittamista. Jokaisen kuvauksen jälkeen kuvausta hallinnoitavalla laitteella voidaan tarkastella kameran sijoituspaikan mukaista pyörähdyskuvaa sekä useiden kuvauspaikkojen pyörähdyskuvista muodostuvaa raakaversiota pistepilvestä, joka päivittyy kuvauspaikkojen määrän lisäilyessä. Automaattinen ohjelma yhdistää eri kuvauspaikkojen pyörähdyskuvat toisiinsa

samanlaisten koordinaatti- ja väritietojen avulla. Katveeseen jääneitä alueita paikataan toisten kuvauspaikkojen tiedoilla. Pistepilven lisäksi ohjelma muodostaa tilasta myös RGB-väritiedot sisältävän polygoniverkon.

Koska eri kuvauspisteissä kuvattujen pyörähdyskuvien yhdistämiseen ei tarvitse käyttää tähyksiä, on kuvausprosessi vaivattomampaa, kuin esimerkiksi laserkeilaamalla kuvaaminen. Syvyys- ja värikameroihin perustuvissa kuvauslaitteissa on kuitenkin huomiotava, että valaistus voi muuttua, kun kuvaus tapahtuu eri suunnista. Eri aikoina tilan jonkin alueen valaistus voi olla huomattavasti erilainen, mikä voi vaikuttaa kuvattujen pisteiden väritietoon ja näin eri kuvauspaikoilla kuvattujen panoraamakuvien yhdistäminen voi vääristyä.¹⁰³

Sastamalan Pyhän Marian kirkon sisätilojen geometrian kuvaus suoritettiin laitteiston ohjeiden mukaisesti. Kuvaus aloitettiin kirkkosalin länsiseinän sisääntuloaukolta ja kameraa siirrettiin noin 1,5–2,5 metrin välein ympäri tilaa siten, että vierekkäisistä kuvauspisteistä on suora näköyhteys toisiinsa. Kuvauspaikat valittiin siten, että kuvattaviin pintoihin oli vähintään 0,5 m etäisyys, jotta ne pystyttiin kuvaamaan. Kuvauspaikkoja tuli yhteensä 71. Kuvauksen jälkeen laitteiston ohjelma muodostaa kuvatuista pisteistä valmiin 3D-mallin sekä .xyz-muodossa olevan väritiedot sisältävän pistepilvitiedoston.

3.2.2 Tilamallin luominen

Tilamalli tarkoittaa suljetusta tilasta muodostuvaa, ainoastaan tiedot tilan pintojen geometriasta sisältävää kolmiulotteista mallia. Tässä tutkimuksessa tilamalli luotiin SketchUp-3D-mallinnusohjelmalla. Tilamallin luominen aloitettiin tuomalla pistepilvi mallinnusohjelmaan. Tuonnin yhteydessä pistepilveä harvennettiin ja vakioiduksi pisteväliksi asetettiin 2 mm. Kuvassa 7 on esitetty SketchUp-mallinnusohjelmaan tuotu, harvennettu ja väritiedot sisältävä pistepilvi Sastamalan Pyhän Marian kirkon sisätilojen geometriasta.

¹⁰³ Pulcrano et al. 2019.



Kuva 7. SketchUp-ohjelmaan tuotu Sastamalan Pyhän Marian kirkosta kuvattu pistepilvi.

Tilamalli tehtiin pistepilven pohjalta siten, että eri pintatyypit jaettiin omille tasoillensa niiden materiaalin sekä pinnanmuodon perusteella. Tilasta mallinnettiin ainoastaan sen sisäpinnat. Mallin tulee olla myös täysin suljettu.¹⁰⁴ Tilan geometriaa mallinnettaessa oli valittava tarkkuus, jolla eri pinnat mallinnetaan. Riittävää tilamallin tarkkuutta on tutkittu vertailemalla eri tarkkuudella tehdyillä malleilla saatuja tuloksia. Tutkimusten perusteella yksityiskohtien tarkka mallintaminen ei paranna merkittävästi laskennallisesti saatujen huoneakustisten mittalukujen tarkkuutta.¹⁰⁵ Myös Odeonin käyttäjäoppaan mukaan geometrian tarkka mallintaminen ei paranna tulosten tarkkuutta, mutta sen sijaan kasvattaa laskenta-aikaa, eikä se tästä syystä ole suositeltavaa.¹⁰⁶ Sivumitoiltaan alle 0,3 m pintoja ei suositella mallinnettavan.

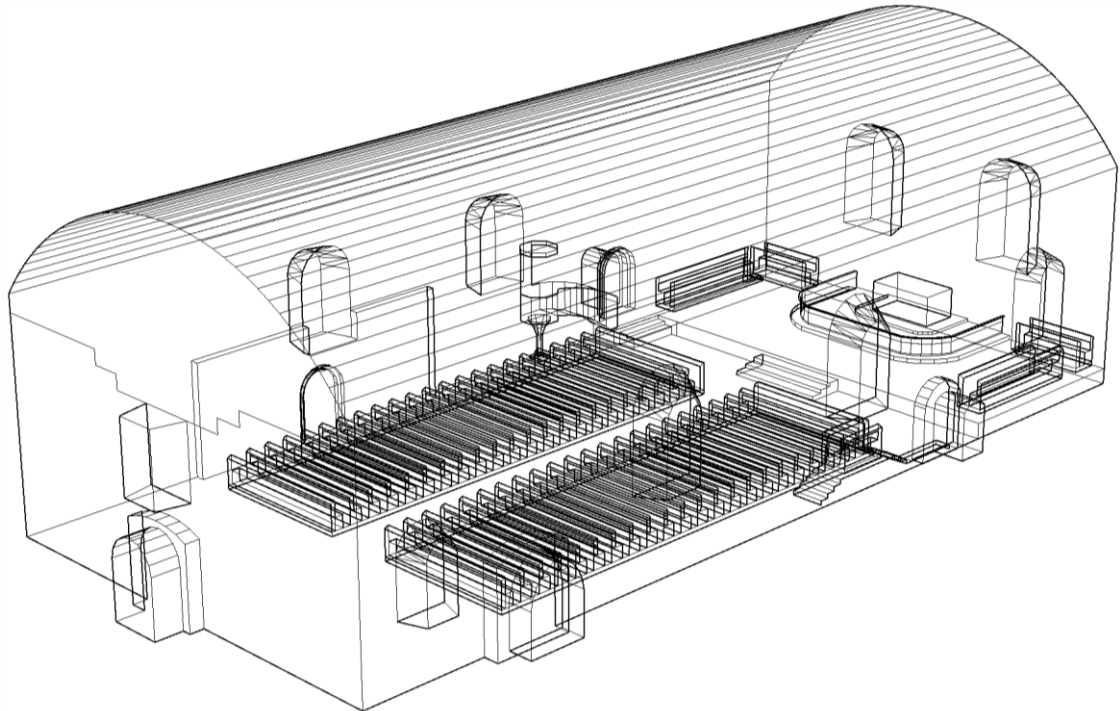
Geometriaa mallinnettaessa tehtiin yksinkertaistuksia joidenkin pintojen kohdalla. Yksinkertaisesti mallinnettujen pintojen pinnanmuotoon liittyvät ominaisuudet huomioidaan huoneakustisessa mallissa pinnoille määritettävillä ominaisuuksilla. Epätasaiset ja vaihtelevan muotoiset kiviseinät mallinnettiin tasaisina laskenta-ajan sekä geometrian mallintamiseen kuluvan ajan säästämiseksi. Jos kiviseinät olisi mallinnettu pinnanmuotojen

¹⁰⁴ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020.

¹⁰⁵ Gade et al. 2004; Bork 2005; Zeng et al. 2006; Murillo et al. 2014.

¹⁰⁶ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020.

perusteella, olisi tilamallissa olevien pintojen lukumäärä moninkertaistunut ja laskenta-aika näin ollen kasvanut. Penkeistä mallinnettiin yksinkertaisina tasoina sivut, selkänoja, istuinosa sekä jalkataso. Ikkunoiden puitteita ei mallinnettu vaan ikkuna tehtiin yhdeksi tasaiseksi pinnaksi. Pistepilven perusteella tehty tilamalli on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Pistepilven pohjalta tehty tilamalli Sastamalan Pyhän Marian kirkosta.

Tilamallissa erilaiset pinnat on jaettu omille tasoilleen pinnan materiaalin ja pinnan epätasaisuuden perusteella. Kuvassa 9 on esitetty tilamalli kirkkosalin sisältä päin katsottuna samasta kohdasta otettujen valokuvien rinnalla. Valokuvia ja mallinnettua geometriaa vertailtaessa on nähtävissä pinnanmuotojen yksinkertaistus tasaisiksi pinnoiksi. Eri väriset pinnat tilamallissa kuvaavat erilaisia tasoja, jolle asetetaan huoneakustiikkaa mallinnettaessa pinnalle sopivat ominaisuudet.



Kuva 9. Sastamalan Pyhän Marian kirkon tilamalli. Eri väriset pinnat kuvaavat eri tasoja.

4. OLEMASSA OLEVAN TILAN HUONEAKUSTIIKAN MALLINTAMINEN

4.1 Huoneakustiikan mallintaminen

4.1.1 Huoneakustiikan mallinnusmenetelmien kehitys

Huoneakustiikkaa on pyritty tutkimaan aikojen saatossa monilla erilaisilla keinoilla. Akustisten ilmiöiden arvioiminen perustui pitkään kokemusperäiseen havainnointiin. Äänen leviämistä ja heijastumista erilaisista pinnoista on havainnoitu tiedettävästi jo antiikin Roomassa, jolloin roomalainen arkkitehti Vitruvius kiinnitti kirjoittamassaan kymmenosaisessa arkkitehtuuria käsittelevässä kirjassa huomiota myös akustiikkaan. Geometrisiä menetelmiä alettiin hyödyntämään huoneakustiikan tutkimisessa 1700-luvulla, kun haluttiin ymmärtää paremmin akustisia ilmiöitä, kuten äänen heijastumista, siroamista ja leviämistä.¹⁰⁷

Huoneakustisen mallintamisen voidaan ajatella saaneen alkunsa vasta 1900-luvun alkupuolella. Tällöin huoneakustiikkaa alettiin tarkastella erilaisia fysikaalisia ilmiöitä hyödyntämällä. Tarkasteluissa käytettiin usein pienoismalleja ja tarkastelu rajoittui aluksi kaksikulotteiseen avaruuteen. Menetelmillä pyrittiin selvittämään ääniaaltojen heijastumista sekä heijastuspinnasta riippuvaa ääniaallon siroamista ja taipumista.¹⁰⁸ Menetelmien käytännön hyödynnettävyys oli kuitenkin varsin vaatimatonta. Sabine tutki äänen heijastumista konserttisaleissa menetelmällä, jota kutsutaan Schlieren-menetelmäksi. Menetelmässä savulla täytettyyn pienoismalliin synnyttiin ultraääniheräte sähköisen kipinän avulla. Kun pienoismalli valaistiin, saatiin ääniaallot näkyviin.¹⁰⁹ Myöhemmin aaltorintaman heijastumista tutkittiin vedessä kulkevan pinta-aallon avulla. Menetelmässä sivusuuntaisista pinnoista koostuva pienoismallin asetettiin lasiseen vesialtaaseen. Veteen synnyttiin pinta-aalto mekaanisen herätteen avulla ja syntyneen aaltorintaman etenemistä voitiin seurata pienoismallin sisällä.¹¹⁰ Myös näkyvää valoa on hyödynnetty tutkimuksessa muun muassa äänen heijastumista¹¹¹ sekä äänen intensiteettiä yleisön alueella¹¹². Äänen heijastumista on tarkasteltu myöhemmin myös lasersäteiden avulla.¹¹³

¹⁰⁷ Addis 2020.

¹⁰⁸ Rindel 2002.

¹⁰⁹ Sabine 1913.

¹¹⁰ Davis & Kaye 1927.

¹¹¹ Kadokura & Satow 1929.

¹¹² Vermeulen & de Boer 1936.

¹¹³ Tateno et al. 1986.

Huoneakustiikan tietokonepohjainen mallintaminen sai alkunsa 1960-luvulla, kun Schroeder esitteli ensimmäisen säteenseurantamenetelmään perustuvan mallinnusmenetelmän.¹¹⁴ Ensimmäinen huoneakustinen tietokonemallinnus tehtiin vuonna 1968, kun Krokstad et al. hyödynsivät Schroederin esittelemää mallinnusmenetelmää ja kehittivät mallin, jossa voitiin seurata äänisäteitä ja niiden peilimäisiä heijastuksia.¹¹⁵ Tämä oli alkua huoneakustisen tietokonemallinnuksen kiihtyvälle kehitykselle seuraavien vuosikymmenten aikana. Merkittävin kehityskausi huoneakustisen tietokonepohjaisen mallinnuksen osalta tapahtui 1990-luvulla, jolloin myös yleisesti käytössä olevat huoneakustiset mallinnusohjelmat ODEON¹¹⁶, CATT-Acoustic¹¹⁷ ja EASE¹¹⁸ on kehitetty. Ennen 1990-lukua ehdittiin kokeilemaan erilaisiin laskentamenetelmiin perustuvia mallinnusmenetelmiä, joista osaa käytetään edelleen joko yksinään tai niin sanotuissa hybridimalleissa, joissa eri mallinnusmenetelmiä yhdistellään.

Nykyisissä mallinnusohjelmissa yleisesti hyödynnettyä kuvalähdemenetelmää käytettiin huoneakustisessa mallintamisessa ensimmäisen kerran vuonna 1979¹¹⁹, jolloin kuvalähteiden avulla simuloitiin kahden pisteen välinen impulssivaste. Ennen tätä huoneakustiikkaa on mallinnettu Rindelin¹²⁰ mukaan myös Markov-ketjuun perustuvalla mallinnusmenetelmällä sekä menetelmällä, jossa ääntä on tarkasteltu energiaa kantavina hiukkasina, jotka pinnan kohdatessaan menettävät heijastuspinnan absorptiosuhteesta riippuen tietyn määrän kantamastaan energiasta.

4.1.2 Huoneakustiikan mallinnusmenetelmät

Nykyisin käytössä olevat huoneakustiset mallinnusmenetelmät perustuvat joko aaltoyhtälön ratkaisemiseen tai äänen tarkasteluun geometrisenä ilmiönä.¹²¹ Aaltoyhtälöpohjaisissa menetelmissä laskenta perustuu aaltoyhtälön ratkaisemiseen numeerisesti ja tällaisilla menetelmillä voidaan saada tarkempia tuloksia kuin geometrisillä menetelmillä. Aaltoyhtälöpohjaisissa menetelmissä laskennassa hyödynnetään usein elementtimenetelmää, jossa mallinnettava tila tai sen rajaavat pinnat jaetaan pieniksi elementeiksi ja näiden elementtien välistä vuorovaikutusta tarkastellaan. Yleisimpiä elementtimenetelmään perustuvia mallinnusmenetelmiä ovat FEM (*finite element method*) ja BEM (*boundary element method*), joita käytetään pääasiassa taajuustasossa, mutta voidaan myös

¹¹⁴ Schroeder 1961.

¹¹⁵ Krokstad et al 1968; Savioja & Svensson 2015.

¹¹⁶ Naylor 1993.

¹¹⁷ Dalenbäck 1995.

¹¹⁸ Ahnert & Feistel 1993.

¹¹⁹ Allen & Berkley 1979.

¹²⁰ Rindel 2002.

¹²¹ Savioja 1999.

käyttää aikatasossa, sekä FDTD (*finite difference time domain*), jota käytetään ainoastaan aikatasossa.¹²² Aaltopohjaisia laskentamalleja hyödynnetään pienten taajuuksien laskennassa. Suurilla taajuuksilla aaltoyhtälöpohjaiset menetelmät vaativat kuitenkin enemmän laskentatehoa. Tästä syystä etenkin suurilla taajuuksilla on yleensä käytännöllisempää käyttää epätarkempia, mutta tehokkaampia laskentamenetelmiä, joissa ääntä tarkastellaan geometrisena ilmiönä. Tällaisissa menetelmissä äänen aallonpituuden oletetaan olevan nolla ja ääntä tarkastellaan säteinä. Etenkin suurilla taajuuksilla geometriset menetelmät toimivat melko luotettavasti, koska äänen aallonpituus on suurilla taajuuksilla yleensä mallinnettavan tilan pintoihin verrattuna pieni. Pienillä taajuuksilla virheen riski kasvaa, koska geometriset mallinnusmenetelmät eivät ota huomioon äänen aaltoilmiötä, jonka vaikutus on pienillä taajuuksilla suurempi.¹²³

Huoneakustisessa mallinnuksessa yleisesti käytettäviä geometrisia mallinnusmenetelmiä on pääasiassa kaksi: säteenseurantamenetelmä ja kuvalähdemenetelmä. Säteenseurantamenetelmässä (*ray tracing method*) ääntä tarkastellaan säteinä. Menetelmässä äänilähde säteilee suuren määrän säteitä eri suuntiin äänilähteen säteilykulman mukaisesti.¹²⁴ Ongelmana säteenseurantamenetelmässä yksinään on se, että sen kuvaamalla ääniaallolla ei ole laajuutta, mikä aiheuttaa sen, että menetelmässä säde ei juuri koskaan kohtaa malliin asetettujen vastaanottopisteiden kanssa. Jotta säteet saataisiin kulkemaan vastaanottopisteiden kautta, tulee mallinnuksessa käytettyä sädemäärää kasvattaa. Tällöin myös laskenta-aika kasvaa.¹²⁵

Kuvalähdemenetelmässä (*image source method*) heijastuksille luodaan virtuaalisia toissijaisia äänilähteitä, joiden paikat peilataan äänen heijastuspinnan suhteen tilan ulkopuolelle.¹²⁶ Näitä virtuaalisia toissijaisia äänilähteitä kutsutaan kuvalähteiksi (*image source*). Ensimmäisen kertaluvun heijastuksille muodostetaan edelleen uudet kuvalähteet jokaisen heijastuspinnan suhteen. Muodostetut kuvalähteet toimivat toissijaisina äänilähteinä, joista jokainen edustaa yhtä heijastusta. Toissijaisten äänilähteiden etäisyys vastaanottopisteeseen on sama kuin heijastuneen äänen kulkeman reitin pituus lähetyspisteestä vastaanottopisteeseen ja sen äänitehotaso määräytyy heijastuspinnan ominaisuuksien perusteella. Ajatuksena on se, että etäisyysvaimennus äänilähteestä tarkastelupisteeseen on sama, kuin virtuaalisen peilikuvaäänilähteen suoran etäisyyden vaimennus.

¹²² Botteldooren 1995.

¹²³ Välimäki et al. 2012.

¹²⁴ Vigran 2008, s. 134; Kuttruff 2009, s. 319.

¹²⁵ Vigran 2008, s. 134.

¹²⁶ Vigran 2008, s. 135.

Kuvalähteen muodostaminen helpottaa merkittävästi ääntä kuvaavien reittien luomista ja sen periaate voidaan selittää matemaattisesti hyvin yksinkertaisesti. Myös toissijaiset äänilähteet on helppo tuottaa. Menetelmän haittapuolena on kuitenkin se, että kun heijastusten määrä kasvaa lineaarisesti niin kuvalähteiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti. Kuvalähteiden määrän kasvaessa laskentaan kuluva aika kasvaa merkittävästi. Lisäksi geometrialtaan monimutkaisemmissa tiloissa vastaanottopiste voi jäädä ikään kuin näkymättömäksi muodostetusta toissijaisesta äänilähteestä katsottuna, jolloin heijastukset eivät ole todellisuudessa mahdollisia. Tämä korostuu erityisesti korkeamman kertaluvun heijastuksien kohdalla.¹²⁷ Jos kuvalähteen ja vastaanottopisteen välinen linja ei kulje heijastuspinnan kautta, ei heijastus ole todellinen eikä pätevä. Jotta säde olisi todellinen, tulee säteen kulkea heijastuspinnan läpi takaisin tilaan.¹²⁸

Useat yleisesti käytetyt huoneakustiset mallinnusohjelmat perustuvat eri mallinnusmenetelmiä yhdistelevään hybridimenetelmään. Hybridimenetelmät yhdistelevät eri mallinnusmenetelmien parhaita ominaisuuksia. Hybridimenetelmien pääasiallisena tarkoituksena on nopeuttaa laskentaan kuluva aikaa heikentämättä laskennan tarkkuutta. Useat kaupallisten huoneakustiikan mallinnusohjelmien käyttämä laskenta perustuu jonkinlaiseen hybridimalliin. Tällaisia ohjelmia ovat esimerkiksi kappaleessa 4.1.1 mainitut Odeon, CATT-Acoustic ja EASE. Hybridimalleilla saatujen tulosten tarkkuutta on tutkittu vertailemalla mallinnettuja ja mitattuja tuloksia. Tutkimusten perusteella malleilla voidaan saada tarkkoja tuloksia suurilla ja keskisuurilla taajuuksilla, mutta pienillä taajuuksilla mallintaminen on epävarmaa.¹²⁹

Tässä tutkimuksessa huoneakustiikan mallintamiseen on käytetty Odeon Auditorium 16 -ohjelmaa, jonka käyttämä laskentamenetelmä on säteenseurantaa ja kuvalähdemenetelmää hyödyntävä hybridimenetelmä. Laskennassa ääntä tarkastellaan säteinä ja laskenta on jaettu kahteen osaan: aikaisiin ja myöhäisiin heijastuksiin. Aikaiset heijastukset muodostetaan kuvalähdemenetelmän avulla, jolloin pinnan heijastus- ja sirontaominaisuudet määräytyvät aikaisen sirontamenetelmän perusteella. Menetelmässä jokaista muodostettua kuvalähdettä vastaavalle heijastuspinnalle luodaan pintamainen lähde, joka lähettää tilaan heijastuspinnasta sironneita äänisäteitä. Kuvalähteiden ja sironneiden äänisäteiden energia määräytyy heijastuspinnan sirontakertoimen s perusteella. Mitä suurempi sirontakertoimen lukuarvo on, sitä suurempi osuus heijastuvasta äänienergiasta mallinnetaan sironneilla äänisäteillä.¹³⁰

¹²⁷ Vigran 2008, s. 135.

¹²⁸ Kuttruff 2009, s. 103.

¹²⁹ Bork 2000; Bork 2005.

¹³⁰ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020, s. 113–119.

Myöhäiset heijastukset muodostetaan säteenseurantamenetelmällä. Jokainen heijastus luokitellaan kertaluvun mukaan, jonka lukuarvo riippuu siitä, kuinka monta heijastuspintaa säteen heijastusreittiin sisältyy. Laskenta-asetuksissa määritettävän siirtymäluvun (*transition order, TO*) avulla määritetään, monenko kertaluvun heijastukset mallinnetaan aikaisten heijastusten periaatteella eli missä vaiheessa laskentamenetelmä vaihtuu kuvälähdemenetelmästä säteenseurantamenetelmään. Kun heijastusten määrä ylittää siirtymäluvun lukuarvon, luo ohjelma jokaiseen heijastuspisteeseen uuden toissijaisen äänilähteen kaikille seurattaville säteille. Jotta vastaanottopisteeseen saapuvien säteiden määrä saataisiin ajan suhteen vakioksi, muodostaa ohjelma vastaanottopisteeseen näkyvistä toissijaisista äänilähteistä suoran äänisäteen vastaanottopisteeseen. Tällöin pisteeseen saapuvien heijastusten määrä ei kasva eksponentiaalisesti.¹³¹

4.2 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikan mallintaminen

4.2.1 Absorptiokertoimet

Huoneakustisen mallin tekeminen aloitettiin tuomalla kappaleessa 3.2.2 esitetty tilamalli Sketchup-ohjelmasta huoneakustiseen mallinnusohjelmaan tälle tarkoitettuun liitännäisohjelmalla. Kun tilamalli on tuotu, asetetaan kaikille tilamallin pinnoille niiden materiaaliominaisuuksista riippuvat absorptiokertoimet α . Absorptiokerroin kuvaa sitä, kuinka suuri osa pintaan kohdistuvasta äänestä heijastuu pois. Jos absorptiokerroin on 0, pinta on täysin heijastava ja jos kerroin on 1, kaikki pintaan kohdistuva äänienergia absorboituu. Absorptiokertoimet määritetään jokaiselle pinnalle oktaavikaistakohtaisesti keskitäajuuksilla 63–8000 Hz.

Mallinnuksessa käytetyt absorptiokertoimet on valittu Odeonin materiaalikirjastosta sekä tutkimuskirjallisuudesta. Poikkeuksena on maalattialle käytetyt absorptiokertoimet, joiden arviointiin on käytetty Odeonin materiaalikirjastosta löytyviä maa-aineksen absorptiokertoimia sekä huokoisten materiaalien materiaaliominaisuuksia. Mallinnuksessa käytetyt absorptiokertoimet on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Tilamallin pinnat on jaettu yhteensä 14 tasoon, jolloin mallissa on yhteensä 14 erilaista pintatyyppiä. Maalatuille ja rapatuille kivipinnoille valittiin Postman & Katzin¹³² samankaltaisessa mallinnuksessa rapatulle seinälle käyttämät arvot. Samassa tutkimuksessa

¹³¹ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020, s. 113–119.

¹³² Postma & Katz 2015.

puulle esitetyjä arvoja käytettiin hirsiseinälle sekä penkkien puupinnoille. Altтарin ja saarnatuolin puupinnoille, alttarikorokkeelle sekä puisille oville valittiin arvot Odeonin materiaalikirjastosta. Samoja absorptiokertoimia on käytetty vastaavanlaisille puupinnoille muun muassa Niemi.¹³³ Maalaamattomalle kiviseinälle käytettiin Borkin¹³⁴ esittämiä arvoja kivipinnoille. Puisen tynnyriholvialakaton arvioitiin vastaavan Halmeen & Seppäsen¹³⁵ esittämiä arvoja ponnaamattomalle lautakatolle. Ikkunoille valittiin Odeonin materiaalikirjastosta ohuen lasin absorptiokertoimet.

Maalattialle käytetyt absorptiokertoimet perustuvat Odeonin materiaalikirjastossa hiekalle ja sepelille esitettyihin absorptiokertoimiin. Absorptiokertoimet on määritetty Odeon Mix a material -toiminnolla siten, että yhdistetyn materiaalin on ajateltu olevan 50 % hiekkaa ja 50 % sepeliä. Lisäksi huokoisten materiaalien absorptio on todettu kasvavan materiaalikerroksen kasvaessa erityisesti pienillä taajuuksilla.¹³⁶ Koska kirkon maalattian materiaalikerros on suurempi kuin hiekalle tai sepelille esitettyjen absorptiokertoimien vastaavissa tilanteissa, on absorptiokertoimia päätetty kasvattaa 125–250 Hz taajuuksialueella. Mallinnuksessa käytetyt absorptiokertoimet on esitetty taulukossa 8. Absorptiokertoimet sisältävä huoneakustinen malli on esitetty kuvassa 10. Pintojen väri määrätty absorptiokertoimen perusteella.

Taulukko 8. Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustisessa mallissa käytetyt absorptiokertoimet.

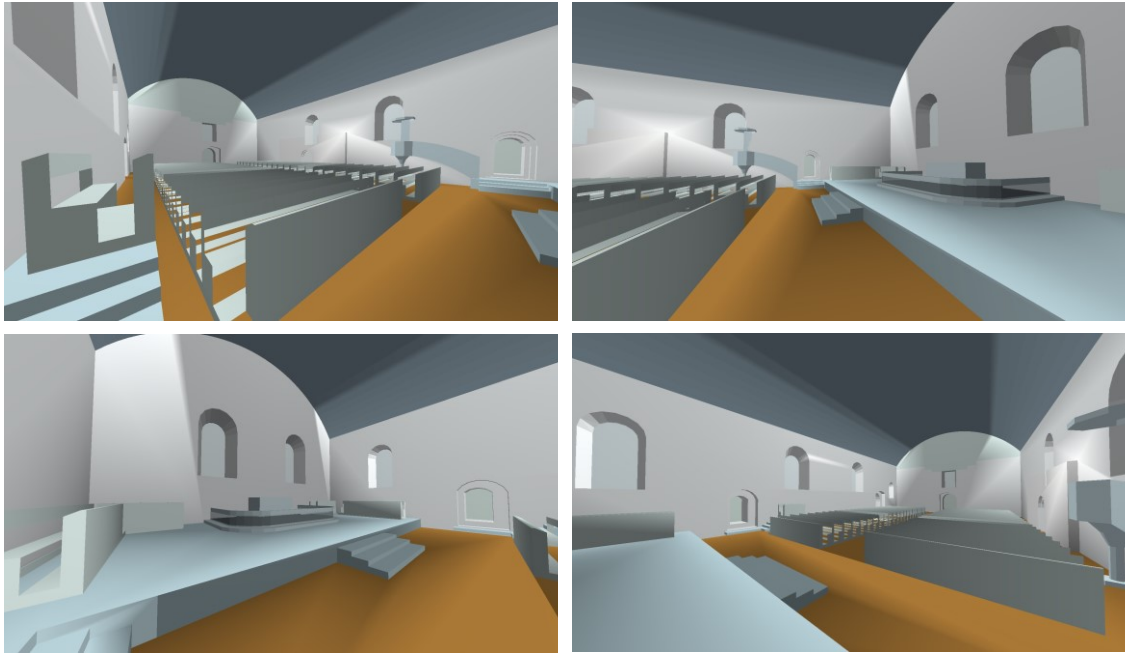
Pinta	Absorptiokertoimet α					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Rapattu ja maalattu kivipinta	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Paljas kivipinta	0,07	0,07	0,05	0,07	0,08	0,08
Hirsiseinä ja puupenkit	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08
Puinen tynnyriholvi	0,27	0,25	0,20	0,15	0,13	0,12
Maalattia	0,27	0,34	0,42	0,44	0,57	0,71
Altari ja saarnatuoli	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Ovet	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Ikkunat	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02

¹³³ Niemi 2014.

¹³⁴ Bork 2005.

¹³⁵ Halme & Seppänen 2002.

¹³⁶ Seddeq 2009; Dunne et al. 2017.



Kuva 10. Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustinen malli.

4.2.2 Sirontakertoimet ja pintojen tyypit

Absorptiokertoimen lisäksi jokaiselle pinnalle asetetaan sirontakerroin, läpinäkyvyyskerroin sekä pintatyyppi. Sirontakerroin riippuu pinnan epätasaisuudesta sekä äänen taipumisesta. Se asetetaan jokaiselle pinnalle yksilukuarvona, joka kuvaa pinnan epätasaisuutta taajuuksien 63 Hz ja 8000 Hz keskitajuudella 707 Hz. Ohjelman sisäänrakennettu algoritmi ekstrapoloi tämän keskitajuudelle asetetun sirontakertoimen laskennassa käytettäville oktaavikaistoille. Sirontakertoimen lukuarvo voi vaihdella välillä 0–1.

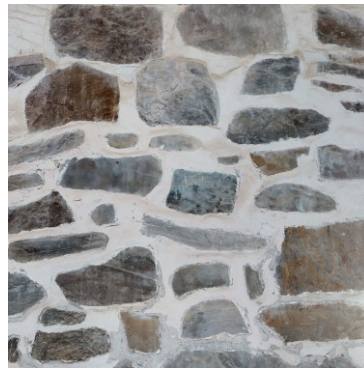
Tässä tutkimuksessa sirontakertoimen arvot määritettiin tilamallissa määritettyjen tasojen mukaisesti. Yksinkertaistettujen pintojen tapauksessa sirontakertoimia kasvatettiin pinnan epätasaisuudesta ja muodon vaihtelusta riippuen Zeng et al.¹³⁷ esittämällä tavalla. Sileille puupinnoille asetettiin sirontakertoimeksi 0,05 ja kuluneille tai epätasaisille puupinnoille 0,1. Saarnatuolin pinnoille asetettiin sirontakertoimeksi 0,2 yksinkertaisesti mallinnettujen muotojen takia. Maalattu ja rapattu kiviseinä mallinnettiin tilamalliin tasaisena pintana, joten pinnanmuotojen suuri vaihtelu ja pinnan epätasaisuus huomioitiin mallinnuksessa käyttämällä sirontakertoimena arvoa 0,3. Maalaamaton kiviseinä on muuta kiviseinää tasaisempi, joten sille asetettiin sirontakertoimeksi 0,25. Seinäpintaa tasaisemmille maalatuille ja rapatuille ikkuna- ja ovisyvennyksille asetettiin sirontakerto-

¹³⁷ Zeng et al. 2006.

meksi 0,1. Maalattian sirontakertoimeksi arvioitiin 0,1. Kuvassa 11 on esitetty edellä mainittuja yksinkertaisia tasoina mallinnettuja pintoja, joiden sirontaominaisuudet on arvioitu pinnan epätasaisuuden perusteella.



a. Maalattu ja rapattu kiviseinä



b. Maalaamaton kiviseinä



c. Maalattu ikkunasyvännys



d. Saarnatuolin puupinta



e. Penkkien puupinta



f. Alttarikorokkeen puupinta

Kuva 11. Erilaisia tilamalliin yksinkertaisia tasoina mallinnettuja pintoja.

Jos yhtenäisenä mallinnetun pinnan tiedetään päästävän osittain ääntä läpi, voidaan pinnalle asettaa äänen läpäisevyyttä määrittävä läpinäkyvyyskerroin. Läpinäkyvyyskerroin kuvaa sitä, kuinka suuri osa pintaan kohdistuvasta äänienergiasta läpäisee pinnan heijastumatta, siroamatta tai absorboitumatta. Läpinäkyvyyskerroin määritetään pintakohdittaisesti ja sen lukuarvo voi vaihdella välillä 0–1. Jos arvo on 1, kaikki pintaan kohdistuvasta äänienergiasta läpäisee sen ja jos arvo on 0, pinta ei päästä yhtään ääntä läpi. Tässä tutkimuksessa osittain läpinäkyväksi asetettiin alttarikaiteen sivupinta, jonka pinta-ala on osittain aukkoa sekä alttarikorokkeen otsapinta, jossa on leveitä rakoja. Alttarikaitteen sivupinnan aukkojen osuuden koko pinnan pinta-alasta arvioitiin olevan 40 %, joten läpinäkyvyyskerroimen arvoksi asetettiin 0,4. Alttarikorokkeen otsapinnassa olevien rakojen osuus koko pinnan pinta-alasta on noin 30 %, joten läpinäkyvyyskerroimeksi asetettiin 0,3. Eri tasolle asetetut sironta- ja läpinäkyvyyskerroimet on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Jokaiselle pinnalle asetetaan myös pintatyyppi, joka määrittää kuinka äänen heijastuksessa tapahtuva sironta lasketaan. Pinnoille asetettiin lähtökohtaisesti pintatyyppiä ”Normal”. Kaareville ja pyöreille pinnoille pintatyyppiä asetettiin ”Fractional”, jotta ohjelma ei yliarvioi sironnan vaikutusta näillä pinnoilla.

4.2.3 Äänilähteet ja vastaanottopisteet

Huoneakustisten mittalukujen mallintamiseksi malliin on määritettävä kaiutinpaikkoja kuvaavat äänilähdepisteet sekä mikrofoni- ja vastaanottopisteet. Äänilähdepisteille valitaan sijainti x-, y- ja z-koordinaattien avulla sekä orientaatio, suuntaavuus ja ääniteho. Äänilähteen orientaatiolla tarkoitetaan suuntaa, johon lähde osoittaa, ja suuntaavuudella sitä, kuinka suurella teholla lähde säteilee ääntä eri suuntiin orientaatioonsa nähden. Standardin ISO 3382-1¹³⁸ mukaisia mittalukuja mallinnettaessa äänilähde asetetaan suuntaamattomaksi. Suuntaavuus voidaan määrittää manuaalisesti ohjelman muokkaustyökalulla tai ohjelmaan voidaan vaihtoehtoisesti tuoda valmiita suuntaavuustietoja. Äänilähteiden ääniteho määritetään ohjelmassa erikseen kaikille 63–8000 Hz oktaavikaistoille.¹³⁹

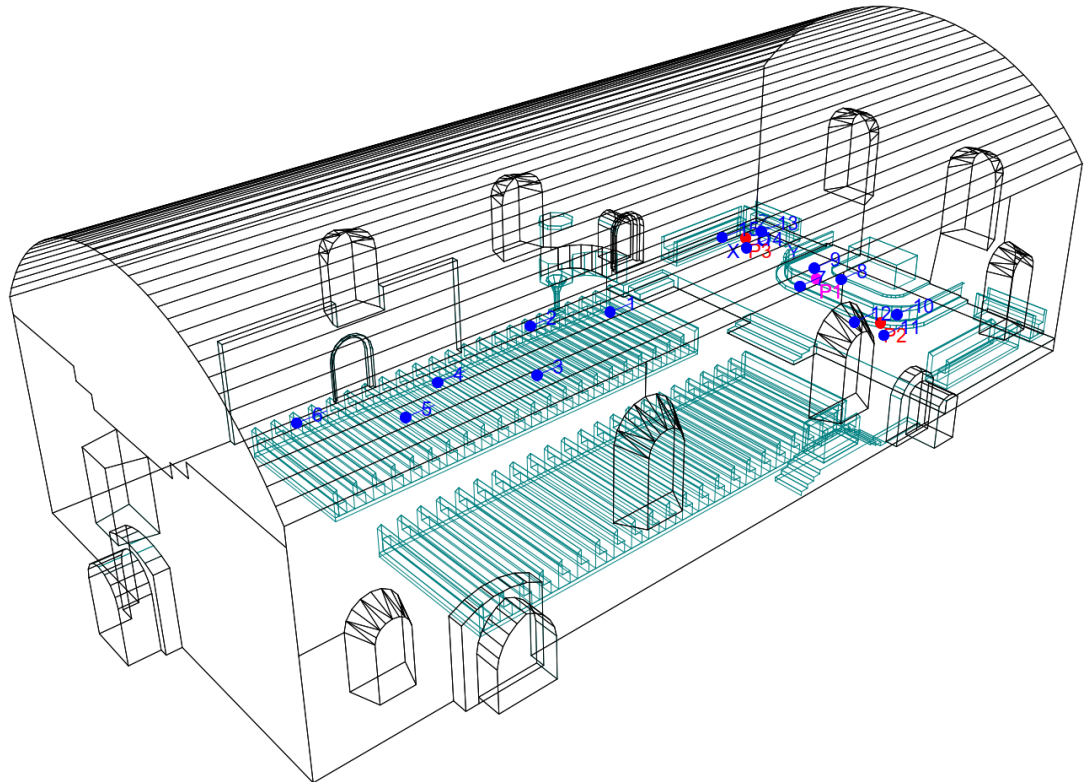
Tässä tutkimuksessa äänilähteet asetettiin mallinnuksessa mittauksissa käytettyjen kaiutinpaikkojen perusteella 1,5 m korkeudelle alttarikorokkeen yläpinnasta kolmelle eri paikalle. Äänilähteet asetettiin suuntaamattomiksi, jotta standardin ISO 3382-1 mukaiset mittaluvut voitiin mallintaa. Voimakkuus G voidaan myös määrittää käyttämällä äänilähteen äänitehotasona kaikilla oktaavikaistoilla arvoa 31 dB, jolloin voimakkuuden lukuarvo luetaan suoraan äänenpainetason (*sound pressure level*, SPL) arvoista. Jos äänilähteen äänitehotasona käytetään edellä mainitusta poikkeavaa äänitehotasoa, kuten tässä tutkimuksessa on käytetty, voimakkuusmittaluvun G laskenta tapahtuu normalisoimalla äänilähteen tuottamaksi äänitehotasoksi 31 dB jokaisella taajuuskaistalla. Puheensirtoindeksin STI määrittämiseksi äänilähteiden äänitehotasoksi asetettiin ISO 3382-3 mukainen puheen ääniteho. Myös vastaanottopisteet asetettiin mittauksissa käytettyjen mikrofoni- ja vastaanottopisteiden perusteella. Saliakustiikan mittalukujen sekä puheensirtoindeksin mallintamiseksi asetettiin kuusi vastaanottopistettä toiselle puolelle kirkkosalia penkkirivistön alueelle mittauksissa käytettyjen mikrofoni- ja vastaanottopisteiden mukaisesti. Näiden vastaanottopisteiden korkeudeksi asetettiin 1,2 m. Lava-akustiikan mittalukujen mallintamiseksi jokai-

¹³⁸ EN-ISO 3382-1, 2009.

¹³⁹ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020, s. 46–53.

sen äänilähteen ympärille asetettiin kolme vastaanottopistettä samalle korkeudelle äänilähteen kanssa ja 1 m etäisyydelle äänilähteestä. Vastaanottopisteille ei valittu kiinteää orientaatiota, jotta ne voidaan laskentavaiheessa asettaa kohti aktiivista äänilähdettä.

Kuvassa 12 on esitetty huoneakustiseen malliin asetetut äänilähteet punaisella ja vastaanottoaikat sinisellä. Äänilähteet ja vastaanottopisteet on asetettu huoneakustisissa mittauksissa käytettyjen paikkojen mukaisesti.



Kuva 12. Mittauksissa käytettyjen kaiutin- ja mikrofoni paikkojen perusteella asetetut äänilähteet 1–3 ja vastaanottopisteet 1–15 huoneakustisessa mallissa.

4.2.4 Laskenta-asetukset

Laskenta-asetukset on jaettu Odeonissa yleisiin asetuksiin ja erikoisasetuksiin. Yleisissä asetuksissa valitaan laskennassa käytettävä impulssivasteen pituus sekä myöhäisten säteiden lukumäärä. Laskennassa käytettävän impulssivasteen pituus voidaan arvioida pisimmän jälkikaiunta-ajan perusteella. Odeonissa on tähän tarkoitettu ominaisuus, jolla voidaan laskea arvioitu jälkikaiunta-aika tilan tilavuuden sekä absorboivien materiaalien pinta-alojen perusteella. Jotta arvioitu jälkikaiunta-aika voidaan laskea, täytyy kaikille tilan pinnoille olla asetettuna absorptiokertoimet. Odeonin käyttäjäoppaassa suositellaan impulssivasteen pituudeksi 2/3-osaa pisimmästä jälkikaiunta-ajasta.¹⁴⁰ Myöhäisten säteiden määrä voidaan määrittää itse tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää jotakin Odeonin ehdottamista esiasetuksista. Valmiita esiasetuksia on kolmea eri tarkkuusluokkaa: "Survey", "Engineering" ja "Precision", joista viimeksi mainittu on tarkin. Tässä osatutkimuksessa valittiin esiasetuksen "Precision" mukaiset laskenta-asetukset ja impulssivasteen pituudeksi valittiin pisimmän jälkikaiunta-ajan perusteella 2000 ms Odeonin käyttäjäoppaan suosittelemalla tavalla.

Erikoisasetuksissa voidaan määrittää tarkemmin mallinnuksessa käytettäviä ominaisuuksia. Kvalähdemenetelmällä laskettavien aikaisten heijastusten lukumäärä voidaan määrittää erikoisasetuksissa siirtymäluvulla (*transition order, TO*). Siirtymäluvun arvo määrittää, kuinka monta heijastusta mallinnetaan kvalähdemenetelmällä. Jos siirtymäluvuksi asetetaan $TO = 0$, ohjelma käyttää laskentaan ainoastaan säteenseurantamenetelmää. Odeonin käyttäjäoppaassa suositellaan käytettävän siirtymälukuna $TO = 2$, jolloin kaksi ensimmäistä heijastusta mallinnetaan aikaisina heijastuksina kvalähdemenetelmällä ja loput myöhäisinä heijastuksina säteenseurantamenetelmällä. Tässä tutkimuksessa siirtymäluvun arvona päätettiin käyttää Odeonin käyttäjäoppaan suosituksen mukaisesti siirtymälukuna $TO = 2$. Kvalähdemenetelmässä muodostettujen aikaisten sironneiden säteiden lukumäärä voidaan haluttaessa valita. Tässä tutkimuksessa on käytetty ohjelman suosittelemaa määrää. Erikoisasetuksissa voidaan myös muokata impulssivasteen ominaisuuksia sekä heijastuksissa tapahtuvan sironnan ominaisuuksia. Tässä tutkimuksessa on käytetty näiden osalta oletusasetuksia.

¹⁴⁰ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020, s. 133.

4.2.5 Mallin validointi

Olemassa olevien tilojen huoneakustiikan mallintamista koskevissa tutkimuksissa huoneakustinen malli validoidaan tyypillisesti paikan päällä tehtyjen mittausten perusteella. Validoinnilla on tarkoitus tutkia, soveltuuko luotu huoneakustinen malli sille aiottuun käyttötarkoitukseen eli voiko mallin avulla tutkia uskottavasti tilan huoneakustiikkaa esimerkiksi mittaustilanteesta poikkeavissa tilanteissa. Huoneakustiikkaa mallinnettaessa on hyvä muistaa, että vaikka malli olisi validoitu, ei mallinnettu tilanne vastaa absoluuttisesti todellista tilannetta vaan ainoastaan likimääräisesti. Tämä on huomioitava mallintamalla saatuja tuloksia tarkasteltaessa.

Tässä tutkimuksessa huoneakustinen malli validoidaan tilassa paikan päällä tehtyjen mittausten mittaustulosten perusteella, jolloin mitattuja ja mallinnettuja eri mittalukujen lukuarvoja verrataan toisiinsa ja tarkastellaan, kuinka hyvin tulokset vastaavat toisiaan. Tuloksia verrataan sekä äänilähde-vastaanottopistekohtaisesti oktaavikaistoilla 125–4000 Hz että kaikkien mittaluvun määrittämiseen käytettyjen äänilähde-vastaanottopisteyhdistelmien laskettujen keskiarvojen perusteella. Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustisen mallin validointi on esitetty luvussa 4.3.1.

Mallin sovittamista mittaustuloksiin voidaan kutsua myös kalibroinniksi. Tässä tutkimuksessa kalibroinnilla ja validoinnilla tarkoitetaan samaa asiaa.

4.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustinen malli

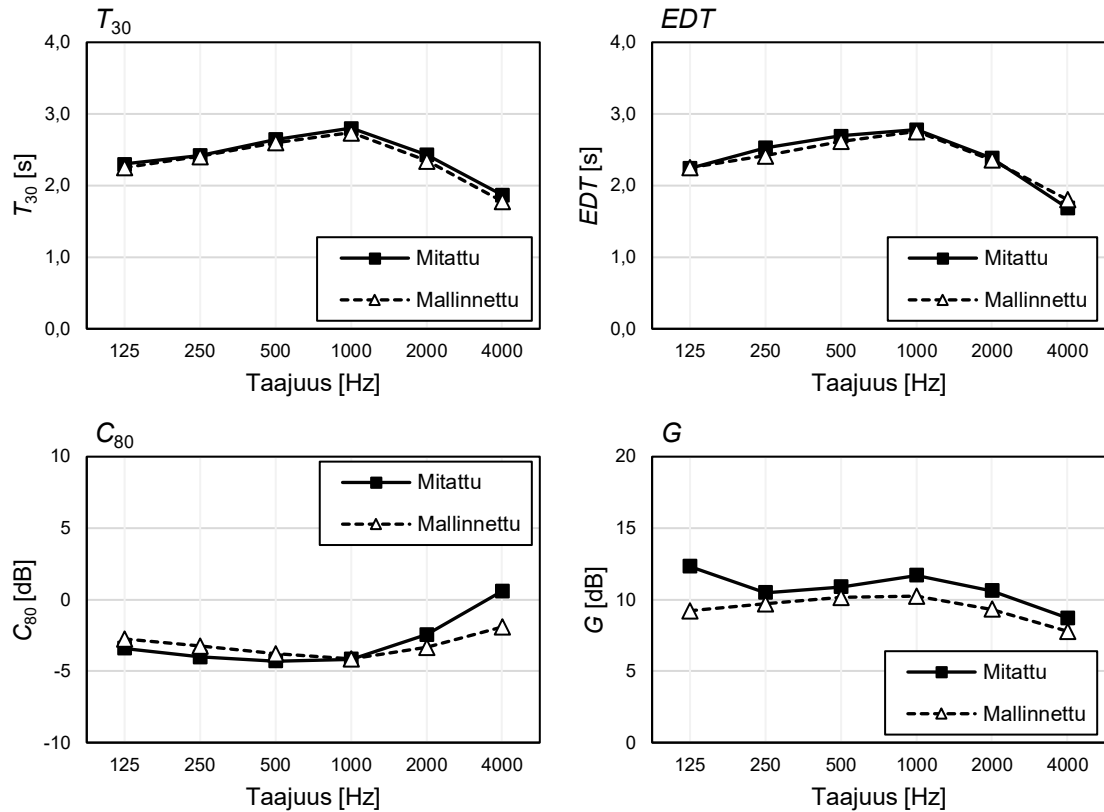
4.3.1 Mallin sovitus mittaustuloksiin

Huoneakustinen malli validoitiin sovittamalla mallintamalla saadut tulokset kappaleessa 2.4 esitettyihin mittaustuloksiin. Validointi tehtiin vertailemalla huoneakustisten mittalukujen T_{30} , EDT , C_{80} , G , ST_{Early} , ST_{Late} ja STI mallinnettuja ja mitattuja lukuarvoja äänilähde-vastaanottopistekohtaisesti sekä keskiarvoisesti oktaavikaistoilla 125–4000 Hz. Vastaanottopistekohtainen mallinnus- ja mittaustulosten vertailu on esitetty liitteessä 2.

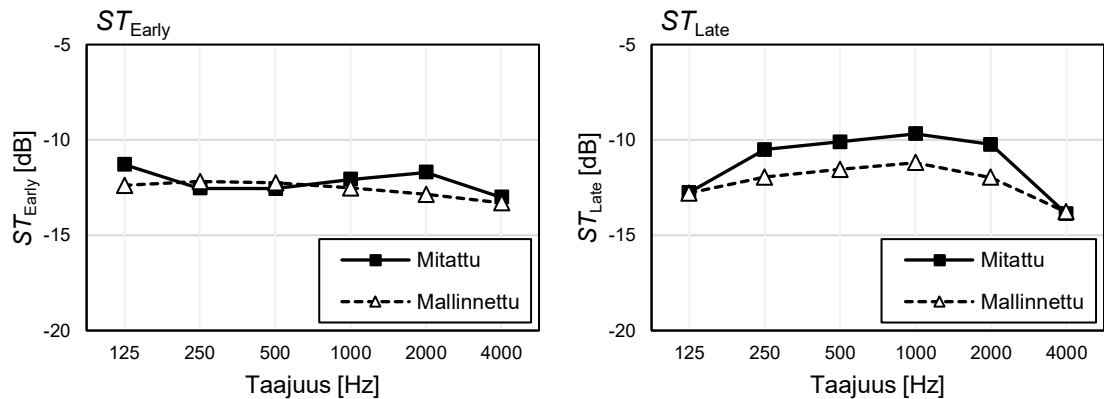
Taulukossa 9 on esitetty sali- ja lava-akustiikan mittalukujen mittaus- ja mallinnustulosten keskiarvot oktaavikaistoilla 125–400 Hz sekä niistä lasketut yksilukuarvot. Taulukon 9 mukaiset oktaavikaistaiset mittaus- ja mallinnustulokset on esitetty kuvissa 13 ja 14. Taulukossa 10 on esitetty puheensiirtoindeksin mittaus- ja mallinnustulokset vastaanottopisteissä 1–6.

Taulukko 9. Sali- ja lava-akustiikan mittalukujen mittaus- ja mallinnustulosten keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz sekä niistä lasketut yksilukuarvot.

Mittaluku	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Yksilukuarvo
T_{30} [s]							
Mitattu	2,3	2,4	2,6	2,8	2,4	1,9	2,7
Mallinnettu	2,3	2,4	2,6	2,7	2,3	1,8	2,7
EDT [s]							
Mitattu	2,2	2,5	2,7	2,8	2,4	1,7	2,7
Mallinnettu	2,3	2,4	2,6	2,8	2,4	1,8	2,7
C_{80} [dB]							
Mitattu	-3,4	-4,0	-4,3	-4,2	-2,5	0,6	-4,2
Mallinnettu	-2,8	-3,2	-3,8	-4,1	-3,4	-1,9	-4,0
G [dB]							
Mitattu	12,3	10,5	10,9	11,7	10,6	8,7	11,3
Mallinnettu	9,2	9,7	10,1	10,2	9,3	7,8	10,2
ST_{Early} [dB]							
Mitattu	-11,3	-12,5	-12,6	-12,1	-11,7	-13,0	-12,2
Mallinnettu	-12,4	-12,2	-12,3	-12,5	-12,9	-13,3	-12,5
ST_{Late} [dB]							
Mitattu	-12,8	-10,5	-10,1	-9,7	-10,2	-13,9	-10,1
Mallinnettu	-12,8	-11,9	-11,6	-11,2	-12,0	-13,8	-11,7



Kuva 13. Saliakustiikan mittalukujen mittaus- ja mallinnustulosten vertailu oktaavi-kaistoilla 125–4000 Hz.



Kuva 14. Lava-akustiikan mittalukujen mittaus- ja mallinnustulosten vertailu oktaavi-kaistoilla 125–4000 Hz.

Puheensiirtoindeksin mittaus- ja mallinnustulosten keskiarvot on esitetty vastaanottopiste-kohtaisesti taulukossa.

Taulukko 10. Puheensiirtoindeksin mittaus- ja mallinnustulokset vastaanottopisteissä 1–6.

Mittaluku	1	2	3	4	5	6	Keskiarvo
<i>STI</i>							
Mitattu	0,45	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,43
Mallinnettu	0,44	0,40	0,40	0,40	0,40	0,39	0,41

Jälkikaiunta-ajan T_{30} ja varhaisen jälkikaiunta-ajan EDT osalta saadaan yhtenevät yksilukuarvojen tulokset. Selvyyden C_{80} mittaus- ja mallinnustulosten yksilukuarvojen poikkeama on 0,2 dB ja voimakkuusmittaluvun G poikkeama on 1,1 dB. Lava-akustiikan mittalukujen ST_{Early} poikkeama on 0,3 ja ST_{Late} poikkeama 1,6. Mallinnetun puheensiirtindeksin STI voidaan todeta olevan kaikissa tarkasteltavissa vastaanottopisteissä hieman mitattuja arvoja pienempiä. Eron voidaan kuitenkin todeta olevan pieni. Mittaus- ja mallinnustulokset vastaavat toisiaan sillä tarkkuudella, että mallilla voidaan uskottavasti tutkia tilan akustiikkaa mittaustilanteesta poikkeavissa tilanteissa.

4.3.2 Huoneakustiikka tyhjällä ja täydellä kirkkosalilla

Kun huoneakustinen malli on validoitu, voidaan mallilla tutkia huoneakustiikkaa mittaustilanteesta poikkeavissa tilanteissa. Näin ollen validoidulla mallilla voidaan tarkastella tilannetta, jossa kirkkosali on täynnä kuuntelijoita. Täysi kirkkosali on mallinnettu Odeonin käyttäjäoppaan mukaisesti, jolloin täynnä kuuntelijoita oleva penkkialue mallinnettiin tilamalliin 0,8 m korkeana laatikkona. Penkkialueelle asetettiin sirontakertoimeksi 0,7 ja absorptiokertoimet valittiin Odeonin materiaalikirjastosta.¹⁴¹ Täyden kirkkosalin istumatiheyden arvioitiin olevan 1 henkilö / 0,5 m², jolloin kuuntelijat istuisivat penkkirivillä noin 0,7 m välein. Täydelle penkkien alueelle käytetyt absorptiokertoimet on esitetty taulukossa 11.

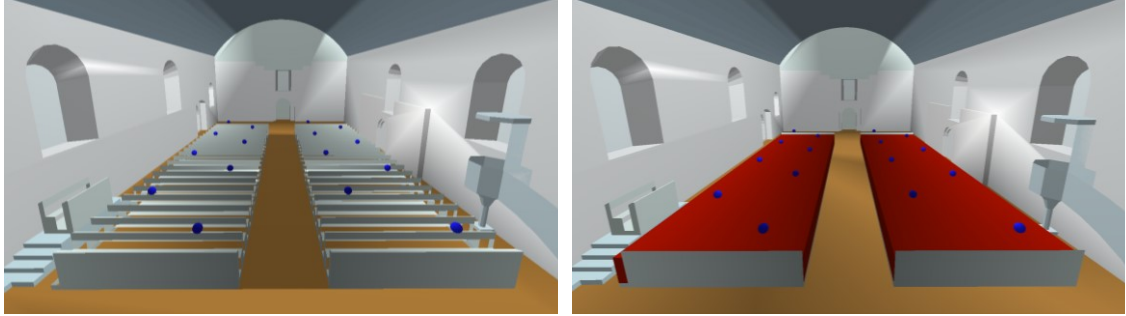
Taulukko 11. Mallinnuksessa täysille penkeille käytetyt absorptiokertoimet.

Pinta	Absorptiokertoimet α					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Penkit, täynnä	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87

Tutkimuksessa on tarkoitus tarkastella kirkon huoneakustiikkaa kuuntelijoiden ja esiintyjien näkökulmasta. Jotta huoneakustiikkaa voidaan tutkia kuuntelijoiden näkökulmasta kokonaisvaltaisesti, päätettiin saliakustiikan mittalukujen määrittämiseen käytettäviä vastaanottopisteitä asettaa tasaisesti koko kirkkosalin penkkien alueelle. Uudet vastaanottopisteet asetettiin sekä tyhjän että täyden kirkkosalin huoneakustisiin malleihin. Vastaanottopisteitä asetettiin yhteensä 16 kirkkosalin penkkien alueelle siten, että molemmilla puolilla kirkkosalia on 8 vastaanottopistettä. Vastaanottopisteet asetettiin 1,2 m korkeudelle penkkien sokkelipuun yläosasta, jolloin niiden etäisyys on täyden kirkkosalin mallissa 0,4 m mallinnetun laatikon yläpinnasta Odeonin käyttäjäoppaan ohjeistuksen

¹⁴¹ ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020, s. 25.

mukaisesti.¹⁴² Äänilähteet sekä esiintyjien olosuhteiden tarkasteluun käytettävät vastaanottopisteet päätettiin pitää samoilla sijainneilla, joita mittauksissa on käytetty. Kuvassa 15 on esitetty tyhjän ja täyden kirkkosalin mukaiset mallit, joissa näkyy saliakustiikan mittalukujen laskentaa varten asetetut uudet 16 vastaanottopistettä. Mallinnuksessa käytetyt äänilähde- ja vastaanottopisteiden sijoittelupaikat on esitetty tarkemmin liitteessä 3.



Kuva 15. Tyhjän ja täyden kirkkosalin huoneakustiset mallit. Siniset pallot kuvaavat malliin asetettuja vastaanottopisteitä. Täyden kirkkosalin huoneakustiseen malliin kuuntelijoita kuvaava alue on mallinnettu 0,8 m korkeana laatikkona.

Yksittäisten vastaanottopisteiden lisäksi kirkkosalin penkkien alueelle määritettiin vastaanottopisteverkko, jotta saliakustiikan mittalukujen muutosta istuma-alueella voidaan tarkastella paremmin. Verkossa vastaanottopisteiden väliksi asetettiin 0,5 m. Verkot asetettiin samalle korkeudelle yksittäisten vastaanottopisteiden kanssa. Mallinnustulokset on esitetty luvussa 5.3.

¹⁴² ODEON Room Acoustics Software User Manual 2020, s. 25.

5. SASTAMALAN PYHÄN MARIAN KIRKON AKUSTIIKKA

5.1 Sastamalan Pyhän Marian kirkon rakennushistoria

5.1.1 Lautalattian purkaminen vuonna 1978

Sastamalan Pyhän Marian kirkko on ollut nykyisessä asussaan vuodesta 1978 lähtien, jolloin sen kirkkosaliin tehtiin kirkolle nykyisin tunnuksenomainen maalattia. Ennen tätä kirkkosalissa on ollut lautalattia, joista viimeisin oli rakennettu 1960-luvun alussa.¹⁴³ Lattia oli todettu olleen pahoin lahonnut jo 1970-luvun alussa. Syynä tälle oli sen alla kasvava lahottajasieni, joka oli vuoteen 1975 mennessä tuhonnut suuren osan siitä.¹⁴⁴ Huonossa kunnossa ollut lattia päätettiin aluksi purkaa ja korvata uudella, mutta päädyttiin lopulta korvaamaan maalattialla. Korjaustyöt tehtiin vuonna 1978, jolloin maalattian alapohja tehtiin kivimurskeella ja lattian pinta sora-multaseoksella. Myös alttarikoroke uusittiin ja penkkien alle tehtiin sokkelit. Seuraavana vuonna sienen havaittiin työntyneen sorakerroksen läpi lattian pinnalle ja lattian pintakerros jouduttiin uusimaan ja korvaamaan ei-eloperäisellä maa-aineksella. Tällöin myös penkit korotettiin tiiliskivien avulla irti maasta.¹⁴⁵ Kuvassa 16 näkyy, millainen kirkkosali oli ennen vuotta 1978. Kuvasta nähdään, että kirkkosalin lautalattia on ollut suurin piirtein samalla korkeudella nykyisen maalattian kanssa ja penkit ovat olleet upotettuna lattiaan.

¹⁴³ Kertomus Pasi Kaarron suorittamasta virkamatkasta Karkun vanhaan kirkkoon 16.7.1975, Rakennushistorian osaston arkisto (MV); Kertomus Pasi Kaarron matkasta Karkkuun 21.4.1980, Rakennushistorian osaston arkisto (MV).

¹⁴⁴ Kertomus Pasi Kaarron suorittamasta virkamatkasta Karkun vanhaan kirkkoon 27.6.1975, Rakennushistorian osaston arkisto (MV).

¹⁴⁵ Kertomus Pasi Kaarron suorittamasta virkamatkasta Karkun vanhaan kirkkoon 27.6.1975, Rakennushistorian osaston arkisto (MV); Kertomus Pasi Kaarron suorittamasta virkamatkasta Karkun vanhaan kirkkoon 16.7.1975, Rakennushistorian osaston arkisto (MV); Kertomus matkasta Karkkuun 19.9.1978. Hannu Puurunen, Rakennushistorian osaston arkisto (MV); Kertomus Pasi Kaarron matkasta Karkkuun 21.4.1980, Rakennushistorian osaston arkisto (MV).



Kuva 16. *Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosali vuonna 1962. Kirkkosali oli kuvan mukainen vuoteen 1978 asti, jolloin lautalattian tilalle tehtiin maalattia. Kuvalähde: E. Lahtinen 1962, Vapriikin kuva-arkisto.*

5.1.2 Kirkon peruskorjaus vuosina 1960–1962

Vuonna 1913 seurakunnan uusi kirkko, Karkun kirkko, valmistui. Tällöin Sastamalan Pyhän Marian kirkko jäi käyttämättömäksi ja siitä tuli autiokirkko. Seuraavina vuosikymmeninä kirkon kunto huononi. 1950-luvun alussa kirkkoon tehtiin useita tarkastuskäyntejä, joiden tuloksena ehdotettiin tehtäväksi erilaisia korjaustoimenpiteitä toistaiseksi ehjien rakenteiden ja sisustuksen pelastamiseksi. Ehdotetut toimenpiteet koskivat muun muassa vesikaton uusimista, kiviseinissä havaittujen halkeamien paikkaamista sekä lahonneiden lattiarakenteiden vaihtamista. Lisäksi ehdotettiin puisessa tynnyriholvissa olevien reikien tukkimista, joita kirkon ullakolla pesineet naakat olivat siihen hakanneet.¹⁴⁶

Vasta vuonna 1959 Pirkanmaan maakuntaliitto toimeenpani kirkon korjaamisen ja entistämisen. Korjaustyöt tehtiin vuosina 1960–1962. Tällöin kirkon harjakattoa korotettiin 12 metrillä, sisäseinät rapattiin ja maalattiin uudelleen sekä penkit ja lattia korjattiin.¹⁴⁷ Lattian korjauksen yhteydessä sen korkoa laskettiin noin 60 cm aiemmasta.¹⁴⁸ Aiemmin rapattuna ja maalattuna ollut ensimmäisen sakariston seinäosuus jätettiin korjauksessa

¹⁴⁶ Rahola 2019, s. 124–125.

¹⁴⁷ Rahola 2019, s. 126.

¹⁴⁸ 912010026 Sastamalan Pyhän Marian kirkon leikkauspiirustus 1952, Rakennetun ympäristön aineistot (MV).

paljaaksi.¹⁴⁹ Uusi vesikattorakenne tehtiin pontattuna lautakattona, jonka päälle asennettiin kattohuopa. Rakenne tehtiin väliaikaiseksi, jotta sen tilalle voitaisiin tulevaisuudessa tehdä paanukatto osana entistämishanketta. Paanukatto tehtiin lopulta kesällä 1966.¹⁵⁰ Kuvassa 17 on nähtävissä 1960-luvun alussa rakenteilla ollut uusi kattorakenne. Osa vanhasta pärekatosta jätettiin uuden katon sisään. Kuvassa 18 on käynnissä kirkon sisällä tehtävät korjaukset vuonna 1962.



Kuva 17. *Rakenteilla oleva uusi kattorakenne. Kuvalähde: P. O. Welin 1960-luvulla, Museoviraston kuvakokoelmat.*

¹⁴⁹ Palmroth 1963, s. 54.

¹⁵⁰ Rahola 2019, s. 126.



Kuva 18. Käynnissä olevat kirkon sisätilojen korjaustyöt vuonna 1962.
Kuvälähde: H. Havas 1962, Museoviraston kuvakokoelmat.

Huoneakustiikan kannalta merkittävin vuosien 1960–1962 aikana tehty muutostyö oli lausalattian koron madaltaminen, jonka myötä kirkkosalin tilavuus kasvoi noin 300 m³. Myös penkkien ja alttarikorokkeen välinen korkeusero muuttui, mikä voi vaikuttaa alttarikorokkeella olevan puhujan tai esiintyjän sekä kirkkosalissa istuvan kuuntelijan välistä tilannetta. Kirkkosali pysyi sellaisenaan vuoteen 1978 asti, jolloin kirkkosalin lausalattia purettiin ja korvattiin maalattialla.

5.1.3 Muutostyöt vuosina 1866–1870

Ennen kuin Sastamalan Pyhän Marian kirkko jäi autiokirkoksi vuonna 1913, sen ylläpitämiseksi oli tehty suuria korjaustoimenpiteitä. Sastamalan Pyhän Marian kirkon on kerrottu toden teolla rapistuneen 1800-luvun kuluessa.¹⁵¹ Perimätiedon mukaan kirkossa 1860-luvulla toiminut kirkkoherra A. J. Gummerrus oli pelästynyt kirkon romahtavan ja hypännyt ikkunasta ulos, kun rippikoulussa olleet pojat olivat kiivenneet kirkon ullakolle ja tömistelleet. Tämän tapahtuman kerrotaan johtaneen siihen, ettei kirkossa enää vuoden 1864 syksyn jälkeen uskallettu pitää jumalanpalveluksia ennen kuin kirkko oli perusteellisesti korjattu.¹⁵² Aluksi ajateltiin rakentaa uusi kirkko ja hyödyntää siinä vanhan kirkon materiaaleja. Itseasiassa jo vuonna 1844 kirkkoon tehdyn tarkastuksen lopputulemana oli, että kirkkoa voidaan käyttää enää korkeintaan 6 vuotta ja vuonna 1847 senaatti päätti kirkon purkamisesta. Uuden kirkon rakentamishankkeessa ei kuitenkaan edetty vuosiin ja lopulta päädyttiin pidentämään olemassa olevan kirkon käyttöikä. Talvella 1865 kirkko päätettiin kunnostaa sellaiseen kuntoon, että jumalanpalvelukset voitaisiin järjestää siellä uuden valmistumiseen saakka. Uuden kirkon piirustukset oli jo tilattu, mutta Sastamalan Pyhän Marian kirkon mittavan korjausurakan takia uuden kirkon rakentamista päätettiin lykätä. Korjaustyöt aloitettiin vuonna 1866 ja ne saatiin päätökseen lopulta vuonna 1970.¹⁵³

Vuosina 1866–1870 tehdyt korjaukset olivat luultavasti perustavanlaatuisimmat muutostyöt, mitä kirkon historian aikana on tehty. Kirkon on arveltu säilyneen tähän asti pitkälti alkuperäisenä, mutta korjauksen myötä se muuttui perusteellisesti sekä ulko- että sisäpuolelta. Kirkon ulkoiseen ilmeeseen merkittävimmin vaikuttanut muutos oli alkuperäisen korkeaharjaisen kattorakenteen purkaminen ja korvaaminen noin 12 metriä matalammalla harjakatolla. Katto uusittiin myös kirkkosalin puolelta, jossa purettiin vuonna 1777 rakennettu puinen tynnyriholvi ja tilalle rakennettiin nykyinen tynnyriholvisäkatto. Korjauksen yhteydessä avattiin runkokuoneen pohjoisseinän itäinen ikkuna sekä uusittiin ikkunoiden puitteet. Myös penkit, saarnatuoli ja alttari tehtiin uudestaan. Kirkossa nykyisin oleva sisustus on peräisin vuosilta 1866–1870.¹⁵⁴ Kuvassa 19 on vuonna 1892 kuvattu matalakattoinen Sastamalan Pyhän Marian kirkko etelästä päin.

¹⁵¹ Jaakkola et al. 2008, s. 145.

¹⁵² Selander 1938, s. 12.

¹⁵³ Kallioniemi 1968, s. 9–10; Jaakkola et al. 2008, s. 147.

¹⁵⁴ Palmroth 1963, s. 50; Meurman 1984, s. 115; Rahola 2019, s. 126; Hiekkänen 2007, s. 257.



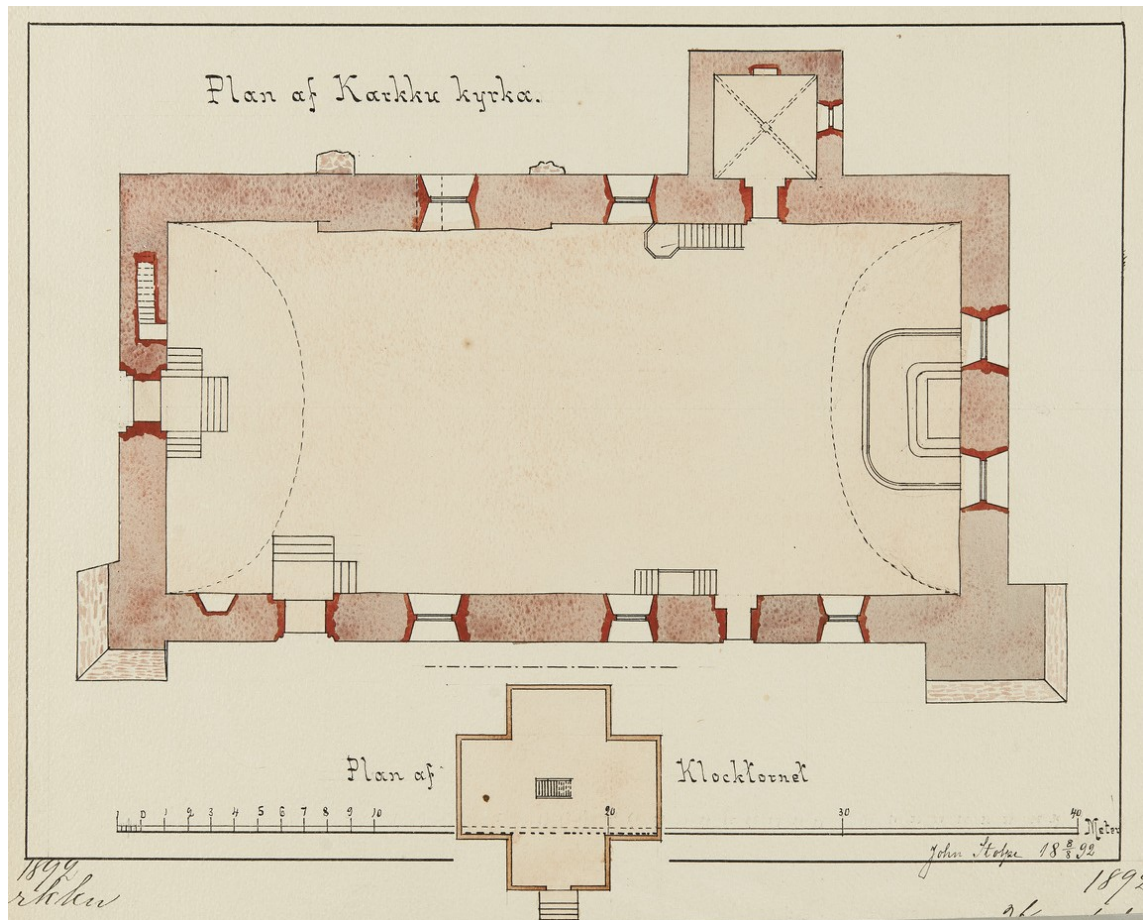
Kuva 19. *Sastamalan Pyhän Marian kirkon kattoa madallettiin vuosien 1866–1870 aikana noin 12 m alkuperäiseen kattorakenteeseen nähden.
Kuvälähde: S. Lindqvist 1892, Museoviraston kuvakokoelmat.*

Lindqvistin vuonna 1952 piirtämän pohjakuvan¹⁵⁵ perusteella penkkirivejä on ollut 32+4 molemmin puolin kirkkosalia ja siten, että pääsisäänkäynniltä tuleva käytävä jakoi rivistön neljä viimeisintä riviä kirkon perälle omaksi alueeksi. Pohjapiirustukseen on mitä todennäköisimmin merkitty penkkien lukumäärä väärin, sillä kirkkosaliin ei mahtuisi niin montaa penkkiriviä pohjapiirustuksessa esitetyllä tavalla. Tällä perusteella voidaan päätellä, että penkkirivejä on oikeasti ollut 23+4 eli yhteensä 27 riviä molemmin puolin kirkkosalia ja lukumäärän kirjaamisessa on vain sattunut virhe. Lindqvistin vuonna 1952 piirtämän leikkauskuvan¹⁵⁶ perusteella lautalattia on ollut noin 0,6 m korkeammalla kuin vuonna 1978 tehty maalattia, joten lautalattiaa ei tämän perusteella ole vuosien 1866–1870 korjauksen jälkeen uusittu tai ainakaan madallettu ja kirkkosalin voidaan sen osalta olettaa säilyneen pitkälti muuttumattomana korjauksen jälkeen.

¹⁵⁵ 912010049 Sastamalan Pyhän Marian kirkon pohjapiirustus 1952, Rakennetun ympäristön aineistot (MV).

¹⁵⁶ 912010026 Sastamalan Pyhän Marian kirkon leikkauspiirustus 1952, Rakennetun ympäristön aineistot (MV).

Kuvassa 20 on vuonna 1892 päivätty J. Stolpen piirtämä pohjapiirustus Sastamalan Pyhän Marian kirkosta eli silloisesta Karkun kirkosta. Pohjapiirustuksesta nähdään, että eteläisen ja läntisen sisääntulon kohdalla on täytynyt nousta portaat kirkkoon tultaessa.



Kuva 20. Kirkosta piirretty pohjapiirustus vuodelta 1892. Kuvalähde: J. Stolpe 1892, Museoviraston kuvakokoelmat.

Kuvassa 21 on kirkkosali kuvattuna ennen vuosina 1960–1962 tehtyä korjausta. Kuvasta nähdään, että lautalattia on ollut paljon nykyistä maalattiaa korkeammalla tuolloin. Tämä näkyy erittäin selvästi siinä, että takaseinän oviaukosta on nähtävissä korkeussuunnassa vain puolet. Myös kirkkosalin perällä olevat penkkirivit ovat nähtävissä.



Kuva 21. Sastamalan Pyhän Marian kirkon kirkkosali kuvattuna ennen vuosien 1960–1962 korjausta. Kuvalähde: Arkkitehtuurin laitoksen opetusdiakokoelma, Aalto-yliopiston arkisto.

5.1.4 Puisen tynnyriholvin rakentaminen vuonna 1777

Monien kirjallisuuslähteiden perusteella kirkon runkokuoneeseen tehtiin tiedettävästi puinen tynnyriholvi vuonna 1777.¹⁵⁷ Hiekkasen mukaan vuonna 1777 rakennettu tynnyriholvi oli vuosina 1866–1870 rakennettua tynnyriholvia korkeampi ja muistuttanut poikkeileikkaukseltaan enemmän puoliympyrää.¹⁵⁸ Tynnyriholvin mahdollista muotoa ja korkeutta voidaan jollakin tasolla arvioida samoihin aikoihin rakennetun Tyrvään Pyhän Olavin kirkon aikaisemman tynnyriholvin perusteella, jonka tiedetään olleen myös korkeampi.¹⁵⁹ Hiekkasen mukaan tynnyriholvin laki on voinut olla joko pyöreä kuten nykyisin tai tasainen kuten Tyrvään Pyhän Olavin kirkon nykyinen tynnyriholvi.

Ennen vuotta 1777 vallinneesta tilanteesta kirkon sisäkaton osalta ei ole säilynyt tietoa. Monissa lähteissä on päätelty vuonna 1777 rakennetun tynnyriholvin olleen kirkon ensimmäinen sisäkatto, jolloin ennen tätä kirkon kattorakenteet olisivat näkyneet kirkkosaliin.¹⁶⁰ Hiekkanen pitää tätä päätelmää kuitenkin epävarmana, sillä sisäkaton puuttuminen olisi tarkoittanut sitä, että kirkkosali olisi mahdollisesti altistunut vesikaton vuotaessa sadevedelle sekä kattorakenteissa pesivien lintujen jätöksille. Olisi erikoista, jos kirkon sisätilat olisi jätetty tällaisille alttiiksi. Lisäksi Suomen keskiaikaisissa kirkkoissa ei ole tavattu tällaista ratkaisua aiemmin, mikä viittaa siihen, ettei sellaisia ole haluttu tehdä. Hiekkanen arvelee, että jos kattorakenteet ovat joskus näkyneet kirkkosaliin, on tällainen tilanne ollut vain väliaikainen. Kirkossa on mahdollisesti ollut ennen vuonna 1777 rakennettua tynnyriholvia jonkinlainen sisäkatto.¹⁶¹

Pian tynnyriholvin rakentamisen jälkeen 1700-luvun lopulla, on kirkon kunto luultavasti alkanut jo heikentyä, sillä vuonna 1797 kirkon lounais- ja kaakkoiskulmiin rakennettiin tukimuurit estämään eteläseinän kallistumista. Samassa yhteydessä runkokuoneen eteläseinän läntisin ikkuna muurattiin umpeen.¹⁶² Ikkunakomero on edelleen nähtävissä kirkkosalin puolelta.

¹⁵⁷ Palmroth 1963, s. 50; Kallioniemi 1968, s. 8; Meurman 1984, s. 114; Hiekkanen 2007, s. 257.

¹⁵⁸ Hiekkanen 6.4.2022.

¹⁵⁹ 912010033 Tyrvään Pyhän Olavin kirkon itäpäätty ullakon puolelta 1960, Rakennetun ympäristön aineistot (MV); Hiekkanen 2007, s. 261.

¹⁶⁰ Palmroth 1963, s. 50; Kallioniemi 1968, s. 8; Meurman 1984, s. 114; Hiekkanen 2007, s. 257.

¹⁶¹ Hiekkanen 4.2.2022.

¹⁶² Palmroth 1963, s. 49–50.

5.1.5 Kirkossa tehdyt muutokset ennen vuotta 1777

Ennen vuotta 1777 tehdyistä muutoksista ei ole säilynyt merkittävästi tietoa. Kirkon pohjoisseinän länsiosaan liittynyt kirkon ensimmäinen sakaristo on tiedettävästi purettu vuonna 1703. Samassa yhteydessä on todennäköisesti avattu myös pohjoisseinän läntinen ikkuna, joka on purettu sakariston seinäosuuden kohdalla.¹⁶³ Hiekkänen on arvioinut, että ensimmäinen sakaristo on rakennettu alun perin mittavirheen takia liian kauaksi kirkon kuorista ja siksi kirkolle on rakennettu uusi sakaristo lähemmäksi kuoria. Vanha sakaristo on ollut ennen purkamistaan luultavasti jossakin muussa kuin sakaristokäytössä.¹⁶⁴ Vuosien 1792–1870 inventaariokirjan perusteella kirkolla on ollut myös puurakenteinen asehuone ja tarvikevaja kirkon eteläseinän läntisen sisäänkäynnin kohdalla.¹⁶⁵ Meurman on arvellut, että asehuone on rakennettu luultavasti 1700-luvun aikana.¹⁶⁶ Tämä lienee toimineen tällöin kirkon katettuna pääsisäänkäyntinä. Hiekkasen mukaan keskiaikaisissa kirkoissa pääsisäänkäynti sijoittui kirkon sivuseinälle kirkon takaosaan.¹⁶⁷

Selanderin mukaan kirkon sisustusta on uusittu vuonna 1735.¹⁶⁸ Ennen tätä olleesta sisustuksesta ei ole säilynyt tietoa. Vuonna 1735 uusitun sisustuksen voidaan olettaa olleen sama tai ainakin lähes tulkoon samankaltainen kuin ennen vuotta 1866, jota on kuvailtu Aamulehdessä 16. marraskuuta 1913 artikkelissa ”Kirje Karkusta” ja Turun Lehdessä 23. joulukuuta 1913 artikkelissa ”Karkun-kirje”.¹⁶⁹ Penkkirivien kerrotaan tällöin olleen neljässä osassa siten, että kirkkosalin keskelle muodostui yksi pääkäytävä ja kaksi sivukäytävää. Reunimmaisten penkkirivien kerrotaan olleen kiinni seinässä. Selanderin mukaan penkit ovat olleet vanhoina aikoina aina ovellisia.¹⁷⁰ Penkkien Vuoden 1735 penkkijärjestyksen perusteella pääkäytävän varrella olevia penkkirivejä on ollut ainakin 22 ja sivukäytävien varrella olevia rivejä ainakin 21.¹⁷¹ Kirkkosalissa on muisteltu olleen ennen korjaustöitä myös kuoriaita, joka ulottui papin ovelta sakariston ovelle. Kuoriaidan on kerrottu olleen 5 kyynärää eli noin 3 metriä korkea ja tehty sorvatuista puikoista.¹⁷² Hiekkasen mukaan kuoriaita on voinut muistuttaa Seilin kirkossa ja Pyhämaan kirkossa

¹⁶³ Palmroth 1963, s. 49–50.

¹⁶⁴ Hiekkänen 2007, s. 257.

¹⁶⁵ Selander 1938, s. 14; Palmroth 1963, s. 53.

¹⁶⁶ Meurman 1984, s. 113–114.

¹⁶⁷ Hiekkänen 4.2.2022.

¹⁶⁸ Selander 1938, s. 12.

¹⁶⁹ Aamulehti 16.11.1911, ”Kirje Karkusta.”; Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”

¹⁷⁰ Selander 1938, s. 17.

¹⁷¹ Aamulehti 16.11.1911, ”Kirje Karkusta.”; Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”;

Selander 1938, s. 23–29.

¹⁷² Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”

olevia kuoriaitoja.¹⁷³ Alkuperäisen saarnatuolin on kerrottu olleen runkokuoneen eteläisellä seinustalla.¹⁷⁴ Alttarilla on myös ollut alttarikaappeja, joissa olleita pyhimyshahmoja on nähtävillä nykyisin kirkon takaosassa sekä alttarin molemmin puolin. Sisustus on luultavasti ollut myös nykyistä koristeellisempi, mikä on näkynyt muun muassa penkkien ja kuoriaidan koristeellisuutena.¹⁷⁵

Kirkossa on vuoden 1641 inventaariokirjan merkinnän perusteella ollut tulipalo toukokuussa 1568.¹⁷⁶ Tulipalon aiheuttamista mahdollisista vaurioista ei kuitenkaan ole tietoa. Hiekkänen epäilee tulipalon olleen vain pieni paikallinen palo, sillä myöskään kirkon rakenteissa ei ole havaittavissa minkäänlaisia suuremman tulipalon jälkiä.¹⁷⁷ Selander on arvellut, että palon myötä lattiaa olisi alun perin korotettu niin korkeaksi kuin se aina vuoteen 1960 asti oli ollut.¹⁷⁸ Lattian korkeutta on kuitenkin todennäköisesti nostettu sen alle suoritettujen hautausten takia, kuten myöhemmissä lähteissä mainitaan. Hautauksia on voitu tehdä vuoteen 1819 asti.¹⁷⁹

Kirkon rakennusajankohdaksi on ajoitettu 1400–1500-luvun vaihde. Hiekkasen mukaan ensimmäinen sakaristo on tehty aikaisintaan vuonna 1497 ja pian sen valmistumisen jälkeen on rakennettu kirkon runkokuone, joka on todennäköisesti valmistunut vuoteen 1505 mennessä. Toinen sakaristo on luultavasti rakennettu hieman runkokuoneen jälkeen 1500-luvun alkukymmeninä. Lähdekirjallisuuden perusteella kirkon ikkuna- ja ovi-aukot ovat olleet pohjoisseinän ikkunoita lukuun ottamatta suurin piirtein samanlaiset kuin nykyisin.¹⁸⁰

Kirkon runkokuoneen sisäkatoista ennen vuotta 1777 ei ole varmaa tietoa, mutta mahdollisesti jonkinlainen sisäkatto on tehty runkokuoneen valmistumisen jälkeen.¹⁸¹ Alkuperäisen suunnitelman mukaan kirkkoon on ollut tarkoitus tehdä muurattu tiiliholvi. Runkokuoneen sisäseinien holvikaarien perusteella runkokuone on suunniteltu jakaa kaksilaivaiseksi kolmella pilarilla, jolloin molemmissa sivulaivoissa olisi ollut neljä holvikupua. Myös kuorin kaksi ikkunaa viittaa siihen, että kirkkosali on ollut tarkoitus tehdä kaksilaivaiseksi.¹⁸² Holvaus on kuitenkin jäänyt tekemättä eikä kirkon sisäkatoista ennen vuotta

¹⁷³ Hiekkänen 4.2.2022.

¹⁷⁴ Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”

¹⁷⁵ Hiekkänen 4.2.2022.

¹⁷⁶ Satakunta: Kotiseutututkimuksia 1.1.1907, ”Läntisen Satakunnan keskiaikaisista kirkoista, Juhani Rinne”, Kansalliskirjaston digitaaliset aineistot.

¹⁷⁷ Hiekkänen 4.2.2022.

¹⁷⁸ Selander 1938, s. 12.

¹⁷⁹ Palmroth 1963, s. 53; Kallioniemi 1968, s. 10.

¹⁸⁰ Hiekkänen 2007, s. 257.

¹⁸¹ Hiekkänen 4.2.2022.

¹⁸² Hiekkänen 1994, s. 141.

1777 ole tietoa.¹⁸³ Hiekkasen mukaan Sastamalan Pyhän Marian kirkko olisi holvattuna muistuttanut suunnilleen samaan aikaan rakennettuja Hollolan ja Inkoon kirkkoja.¹⁸⁴

5.1.6 Eri rakennusvaiheiden mallinnusmahdollisuudet

Tutkimuksessa haluttiin valita mallinnettaviksi rakennusvaiheiksi akustiikaltaan mahdollisimman erilaiset tilanteet. Mallinnettavia aikaisempia rakennusvaiheita valittaessa täytyy kiinnittää huomioita erityisesti siihen, millä tarkkuudella rakennusvaiheen mukainen tilanne on tiedossa ja kuinka uskottavasti se on mallinnettavissa. Mallinnukseen tarvittavien lähtötietojen määrä ja tarkkuus vähenee, mitä kauemmaksi ajassa palataan taaksepäin. Erityisesti ennen 1800-lukua olleet rakennusvaiheet ovat epävarmasti arvioitavissa.

Rakennusvaiheet vuosien 1960–1962 ja 1866–1870 korjauksien jälkeen ovat melko tarkkaan tiedossa ja näin myös mallinnettavissa. Koska mallinnuksessa otetaan huomioon vain kirkon sisätilat ja niiden muutokset, ei näiden kahden edellä mainitun rakennusvaiheen välillä ole muita eroja, kuin penkkien sijainnit ja lukumäärä sekä laualattian korkeus suhteessa nykyiseen maalattiaan. Molempia rakennusvaiheita ei välttämättä ole kannattavaa mallintaa, sillä niiden välillä ei ole merkittäviä eroavaisuuksia. Nykytilanteeseen verrattuna suurempi ero on vuoden 1870 jälkeen olleella tilanteella, sillä tällöin tilan tilavuus on huomattavasti pienempi korkeamman laualattian takia ja penkit ovat olleet nykytilanteesta enemmän poikkeavalla tavalla. Tästä syystä valitaan yhdeksi mallinnettavaksi rakennusvaiheeksi tilanne, joka on ollut vuosien 1866–1870 korjauksen jälkeen.

Vuotta 1866 varhaisempien rakennusvaiheiden mallinnus on epävarmempaa, sillä tältä ajalta säilynyt tieto on rajallista eikä kuvaa kovin yksityiskohtaisesti kirkon sisätiloja. Ennen vuotta 1866 olleesta kirkosta ei myöskään ole olemassa piirustuksia tai valokuvia, joita voitaisiin hyödyntää mallinnuksen lähtötietoina. Varhaisempien vaiheiden mallintaminen täytyy siis arvioida olemassa olevan rajallisen kirjallisen tiedon avulla. Olemassa olevan tiedon perusteella ainoa perusteltavissa oleva ja uskottavasti mallinnettavissa oleva tilanne on vuoden 1777 jälkeen, jolloin runkokuoneessa on ollut korkeampi tynnyriholvi. Tästä syystä toiseksi mallinnettavaksi rakennusvaiheeksi valitaan tilanne vuonna 1777, kun aiempi tynnyriholvi on rakennettu.

¹⁸³ Selander 1938, s. 11; Palmroth 1963, s. 50; Kallioniemi 1968, s. 8; Meurman 1983, s. 111–112.

¹⁸⁴ Hiekkanen 2007, s. 257.

5.2 Mallinnettavat rakennusvaiheet

Sastamalan Pyhän Marian kirkosta mallinnettaviksi aiemmiksi rakennusvaiheiksi valittiin vuosien 1870 ja 1777 mukaiset tilanteet, jolloin vertailtavia rakennusvaiheita ovat tilanteet vuonna 2021, 1870 ja 1777.

Vuoden 1870 rakennusvaihe mallinnettiin mittapiirustusten ja valokuvien perusteella, jotka ovat vuosien 1870–1960 väliseltä ajalta. Lähdekirjallisuudessa ei mainita, että kirkon sisätiloissa olisi tällä välillä tehty muutoksia ja tästä syystä vuoden 1870 tilanne on päätetty mallintaa edellä mainitulta aikaväliltä olevien tietojen perusteella. Lautalattia on mallinnettu kuvassa 20 esitetyn J. Stolpen vuonna 1892 piirtämän pohjakuvan, Lindqvistin vuonna 1952 piirtämien pohja- ja leikkauskuvien¹⁸⁵ sekä tältä väliltä olevien valokuvien perusteella. Runkohuoneen takana olevien eteläisen ja läntisen sisääntulon kohdalla on rappuset, sillä sisääntuloaukot kirkkosalin lautalattiaa alempana. Penkkien sijainti ja lukumäärä perustuvat Lindqvistin vuoden 1952 pohjapiirustukseen sekä kuvaan 21. Muutoin sisustus on mallinnettu nykytilanteen mukaan. Ikkuna- ja oviaukot ovat olleet samanlaiset vuodesta 1870 lähtien¹⁸⁶, joten ne on mallinnettu nykytilanteen mukaisesti. Ensimmäisen sakariston seinäosuus on ollut paljaana kivipintana vuosien 1960–1962 korjauksesta eteenpäin¹⁸⁷, joten vuonna 1870 se on vielä ollut rapattu ja maalattu, kuten muu runkohuoneen seinäpinta. Puinen tynnyriholvi myös mallinnettu nykytilanteen mukaiseksi.

Vuoden 1777 rakennusvaiheen mallintaminen perustuu kirkon sisustuksesta olevaan kuvaukseen sekä lähdekirjallisuuden perusteella tehtyihin päätelmiin. Lautalattia päätettiin mallintaa samanlaisena kuin vuoden 1870 rakennusvaiheessa, sillä lautalattian korkeudesta ja muodosta ei ole säilynyt tietoa. Penkkien sijainti on arvioitu vuonna 1913 Turun Lehdessä olleen kuvailun¹⁸⁸ sekä vuoden 1735 istumajärjestyksen perusteella¹⁸⁹. Selanderin mukaan sisustus on ainakin osittain uusittu vuonna 1735¹⁹⁰, jolta myös istumajärjestys on. Tässä tutkimuksessa on oletettu, että sisustus on pysynyt suurin piirtein muuttumattomana vuoteen 1866 asti ja tällä perusteella vuoden 1777 tilanne on mallinnettu

¹⁸⁵ 912010026 Sastamalan Pyhän Marian kirkon leikkauspiirustus 1952, Rakennetun ympäristön aineistot (MV); 912010049 Sastamalan Pyhän Marian kirkon pohjapiirustus 1952, Rakennetun ympäristön aineistot (MV).

¹⁸⁶ Palmroth 1963, s. 50; Kallioniemi 1968, s. 11; Meurman 1984, s. 115; Hiekkänen 2007, s. 257.

¹⁸⁷ Palmroth 1963, s. 54.

¹⁸⁸ Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”

¹⁸⁹ Selander 1938, s. 23–29.

¹⁹⁰ Selander 1938, s. 12.

1735–1866 väliltä olevien tietojen perusteella. Penkkijonojen sijainnit sekä sivu ja pääkäytävien leveydet on arvioitu Tyrvään Pyhän Olavin kirkon penkkien perusteella.

Kuoriaidan on kerrottu olleen noin 3 metriä korkea ja ulottuneen papin ovelta sakariston ovelle.¹⁹¹ Hiekkasen mukaan kuoriaita on sijainnut hieman papin ovelta länteen.¹⁹² Seilin kirkon kuoriaita vastaa melko tarkasti Sastamalan Pyhän Marian kirkon kuoriaidasta olevaa kuvausta, joten kuoriaita päätettiin mallintaa tämän perusteella.

Puisen tynnyriholvin korkeutta arvioitiin Tyrvään Pyhän Olavin kirkon alkuperäisen tynnyriholvin korkeuden ja muodon perusteella, joka on pääteltävissä vuonna 1996 Hirvosen & Valon piirtämässä leikkauskuvassa olevasta rappausrajasta.¹⁹³ Myös Hiekkasen mukaan Sastamalan Pyhän Marian kirkon vuonna 1777 rakennettu tynnyriholvi on ollut nykyistä korkeampi.¹⁹⁴ Tynnyriholvi on mallinnettu pyöreämmäksi ja 1,8 m korkeammaksi kuin nykyinen.

Ikkuna- ja oviaukot mallinnettiin muutoin samanlaisiksi kuin vuosien 1870 ja 2021 malloissa, mutta pohjoisseinän itäistä ikkunaa ei tällöin vielä ollut ja eteläseinän läntisintä ikkunaa ei ollut vielä muurattu kiinni.¹⁹⁵ Seinäpinnat mallinnettiin, kuten vuoden 1870 tilanteessa. Koska alttarikaappien koosta, muodosta tai sijainnista sekä muusta alttarisustuksesta ei ole säilynyt mallinnuksen kannalta hyödyllistä tietoa, päätettiin alttarin alue jättää samanlaiseksi kuin vuosina 1870 ja 2021 on mallinnettu. Alttarin alueella olevan sisustuksen vaikutus tilan huoneakustiikkaan oletetaan olevan pieni.

¹⁹¹ Turun Lehti 23.12.1913, ”Karkun-kirje.”

¹⁹² Hiekkanen 2007, s. 259.

¹⁹³ 912010033 Tyrvään Pyhän Olavin kirkon itäpääty ullakon puolelta 1960, Rakennetun ympäristön aineistot (MV).

¹⁹⁴ Hiekkanen 4.2.2022; Hiekkanen 6.4.2022.

¹⁹⁵ Palmroth 1963, s. 49–50.

Mallinnettavien ja vertailtavien rakennusvaiheiden keskeiset huoneakustisessa mallinnuksessa huomioon otettavat ero on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Mallinnettavien Sastamalan Pyhän Marian kirkon rakennusvaiheiden pääpiirteet ja eroavaisuudet.

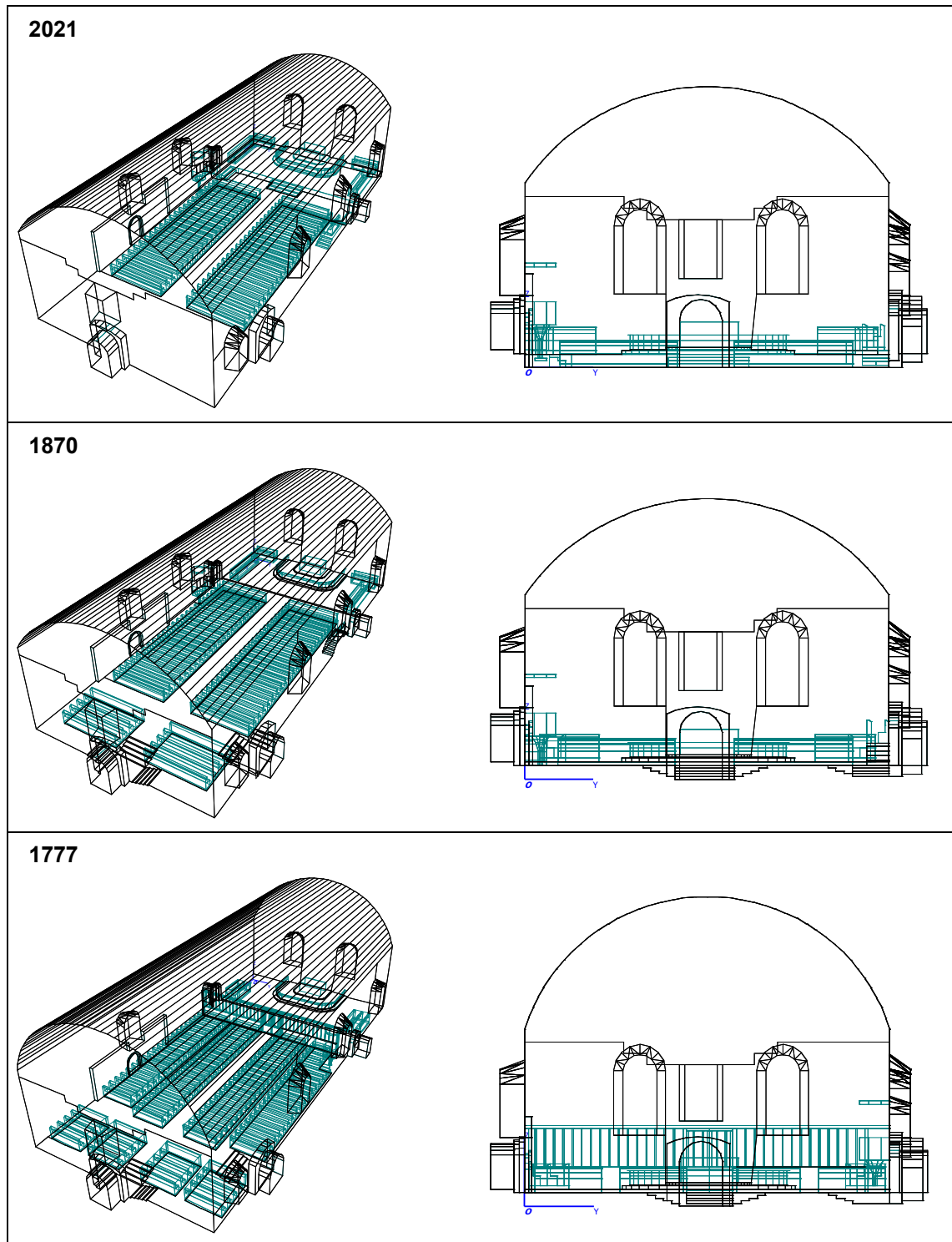
Rakennusvaihe	2021	1870	1777
Tilavuus ¹⁹⁶	5800 m ³	5500 m ³	6300 m ³
Sisäkorkeus ¹⁹⁷	12,0 m	11,4 m	13,2 m
Lattia	Maalattia	Korotettu lautalattia	Korotettu lautalattia
Sisäkatto	1866–1870 tehty puinen tynnyriholvi	1866–1870 tehty puinen tynnyriholvi	1777 tehty korkeampi puinen tynnyriholvi
Ikkuna- ja oviaukot	Kuten nykyään	Kuten nykyään	Ei pohjoisseinän itäistä ikkunaa Eteläseinän läntisin ikkuna auki
Seinät	Maalattu ja rapattu kivipinta, 1. sakariston seinäosuuden kivipinta paljas	Maalattu ja rapattu kivipinta	Maalattu ja rapattu kivipinta
Penkit	2 jonoa 22 riviä	2 jonoa 23+4 riviä	4 jonoa 21/22+4 riviä
Istuma-alueen pinta-ala	170 m ²	210 m ²	225 m ²
Istumakapasiteetti ¹⁹⁸	340 hlö	420 hlö	450 hlö
Saarnatuoli	Pohjoisseinustalla	Pohjoisseinustalla	Eteläseinustalla
Muu sisustus	1866–1870 tehty	1866–1870 tehty	Ennen 1866 ollut -kuoriaita

¹⁹⁶ Tilavuus pyöristetty 50 m³ tarkkuudella.

¹⁹⁷ Kirkkosalin lattiapinnan ja tynnyriholvin korkeimman kohdan välinen etäisyys.

¹⁹⁸ Istumakapasiteetti on laskettu siten, että istumatiheyden on ajateltu olevan 2 hlö/m² kirkkosalissa olevien penkkien alueella. Tällöin yhdellä rivillä istuisi noin 8 henkilöä molemmilla puolilla keskikäytävää.

Taulukon 12 tietojen mukaisesti mallinnetut Sastamalan Pyhän Marian kirkon eri rakennusvaiheet on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Sastamalan Pyhän Marian kirkon mallinnetut rakennusvaiheet vuosina 2021, 1870 ja 1777.

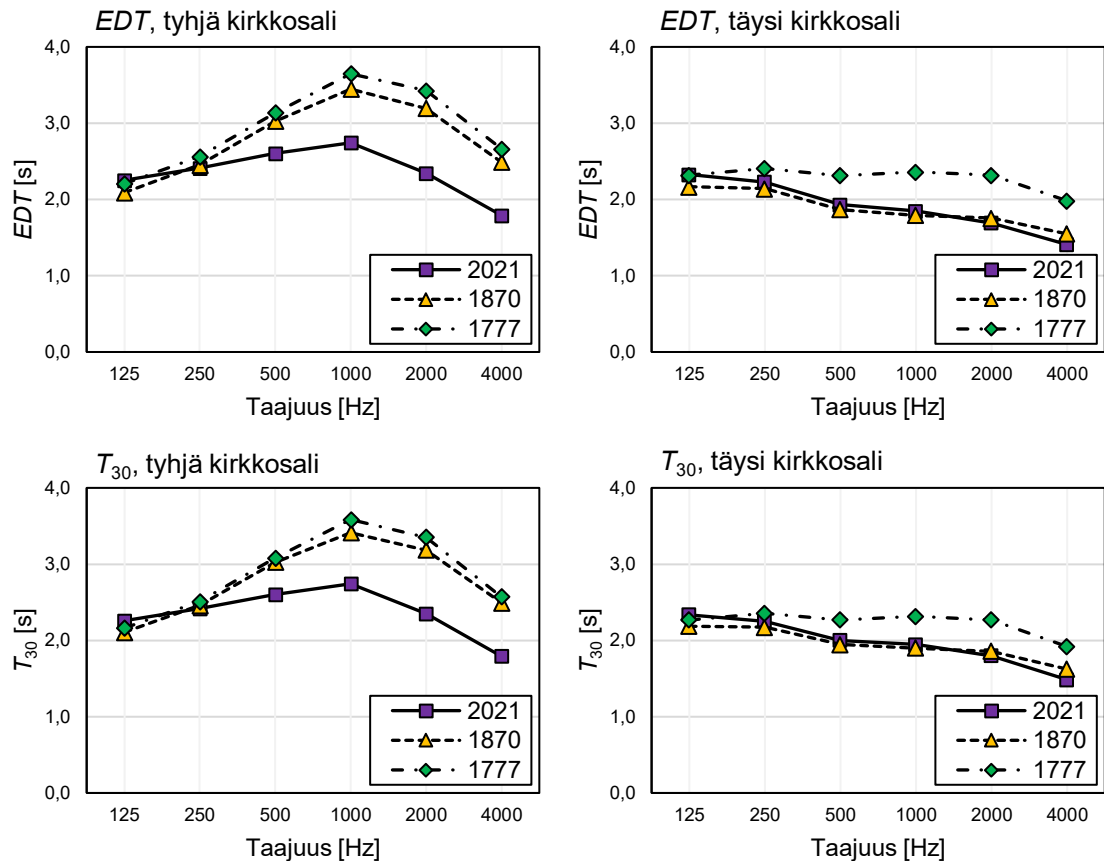
Huoneakustisessa mallinnuksessa pinnoille asetettavat absorptio- ja sirontaominaisuudet on valittu luvussa 4.2 esitetyllä tavalla. Poikkeuksena on lausalattia, jolle on määritetty absorptiokertoimet erikseen. Lattiaa päätettiin tarkastella rakoresonaattorina, sillä se koostuu useista laudoista, joiden välit eivät luultavasti ole olleet täysin tiiviitä. Lisäksi lausalattian alla on ollut maata, jonka absorboiva vaikutus haluttiin myös ottaa huomioon absorptiokertoimia määritettäessä. Lausalattian absorptiokertoimet on määritetty Coxin & D'Antonion esittämällä laskentamenetelmällä.¹⁹⁹ Laskennassa lausalattian lautojen on arvioitu olleen 200 mm leveitä ja 32 mm paksuja. Lautojen väliseksi raoksi arvioitiin 3 mm ja lattian alla olevan absorboivan maa-ainekseksi valittiin Coxin & D'Antonion²⁰⁰ esittämän raekooltaan 0,98 mm ja kosteudeltaan 11 % hiekan ominaisuudet. Mallinnuksessa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty tarkemmin liitteessä 1 taulukoissa 2 ja 3. Mallinnuksessa käytetyt laskenta-asetukset valittiin luvun 4.2.4 mukaisesti. Lähde ja vastaanottopisteet asetettiin luvussa 4.3.2 esitetyllä tavalla. Eri rakennusvaiheiden huoneakustisten mallien geometria sekä mallinnuksessa käytettyjen äänilähde- ja vastaanottopisteiden sijainnit on tarkemmin esitetty liitteessä 3.

¹⁹⁹ Cox & D'Antonio 2009, s. 197–228.

²⁰⁰ Cox & D'Antonio 2009, s. 176.

5.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon akustiikka eri rakennusvaiheissa

Eri rakennusvaiheiden varhaisen jälkikaiunta-ajan EDT ja jälkikaiunta-ajan T_{30} mallinnustulokset on esitetty kuvassa 23. Tulokset on laskettu kaikkien saliakustiikan mittalukujen tarkasteluun käytettyjen vastaanottopisteiden mallinnustulosten keskiarvona oktaavikaistaisesti taajuusalueella 125–4000 Hz. Tulokset on esitetty sekä tyhjän että täyden kirkkosalin tilanteissa.

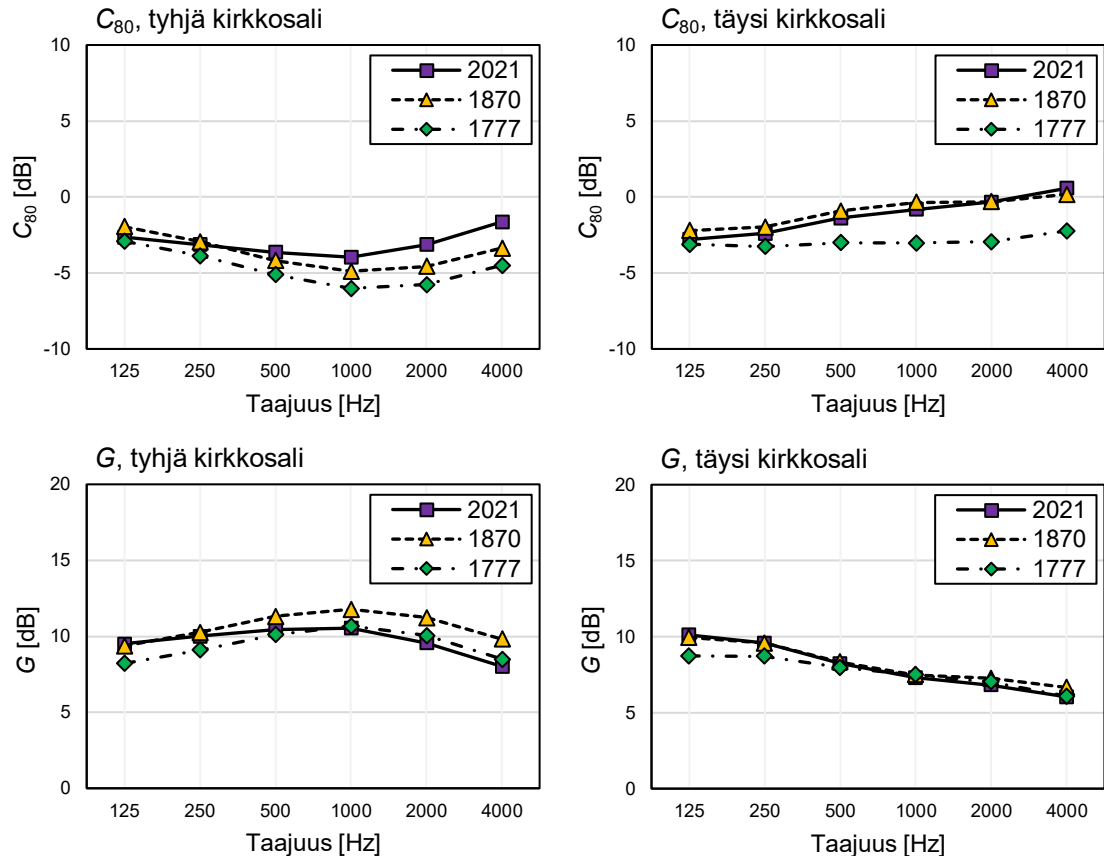


Kuva 23. Eri rakennusvaiheiden mallinnetut saliakustiikan mittalukujen EDT ja T_{30} keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.

Kuvasta 23 on havaittavissa maalattian ja lautalattian vaikutus jälkikaiuntaan. Varhainen jälkikaiunta-aika EDT ja jälkikaiunta-aika T_{30} ovat tyhjässä kirkkosalissa vuosien 1870 ja 1777 tilanteissa pidempiä kuin nykytilanteessa erityisesti suurilla taajuuksilla. Myös tilavuuden vaikutus on havaittavissa, kun verrataan vuosien 1870 ja 1777 tuloksia sekä tyhjän että täyden kirkkosalin tilanteissa, joissa molemmissa vuoden 1777 tilavuudeltaan suuremmassa kirkkosalissa EDT ja T_{30} ovat lähes kaikilla oktaavikaistoilla pidempiä. Nykytilanteessa, jossa kirkkosalissa on maalattia, muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin muokautuneiden tilanteiden välillä on pienempi kuin aiempien rakennusvaiheiden mukaisissa tilanteissa. Jälkikaiunnan suhteen nykyinen kirkkosali on siis riippumattomampi tilassa

olevasta ihmismäärästä kuin aiemmin historian aikana olleissa tilanteissa, jolloin kirkkosalissa on ollut lautalattia.

Mallinnustulokset selvyyden C_{80} ja voimakkuuden G osalta on esitetty kuvassa 24. Tulokset on laskettu, kuten EDT ja T_{30} tapauksessa, kaikkien saliakustiikan mittalukujen tarkasteluun käytettyjen vastaanottopisteiden mallinnustulosten keskiarvona oktaavikaistaisesti taajuusalueella 125–4000 Hz ja esitetty sekä tyhjän että täyden kirkkosalin tilanteissa.

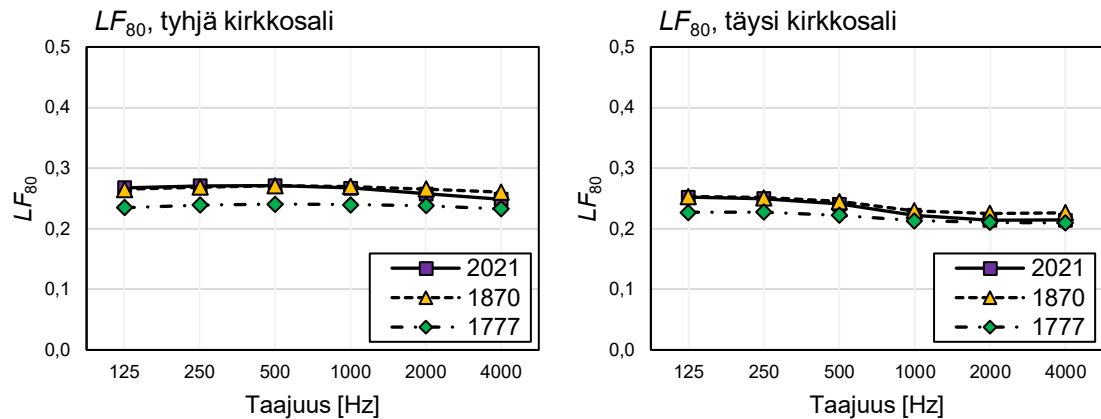


Kuva 24. Eri rakennusvaiheiden mallinnetut saliakustiikan mittalukujen C_{80} ja G keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.

Kuvasta 24 nähdään, että voimakkuuden G osalta eri rakennusvaiheiden tilanteiden välillä ei ole merkittäviä eroja. Täydessä kirkkosalissa voimakkuus on pienemmällä taajuuksilla suurempi ja suuremmilla taajuuksilla pienempi kuin tyhjässä kirkkosalissa kaikkien rakennusvaiheiden tilanteissa. Sekä selvyyden C_{80} että voimakkuuden G osalta suurin muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin välillä on vuoden 1870 mukaisessa tilanteessa. Vuoden 1777 rakennusvaiheessa selvyys C_{80} poikkeaa erityisesti täyden kirkkosalin tilanteesta vuoden 1870 tilanteesta ja nykytilanteesta. Kaikkien rakennusvaiheiden kohdalla on havaittavissa, että 125 ja 250 Hz taajuuksilla ei tapahdu merkittävää muutosta tyhjän

ja täyden kirkkosalin mukaisten tilanteiden välillä selvyiden ja voimakkuuden osalta, ja muutos nähdään yli 250 Hz taajuuksilla.

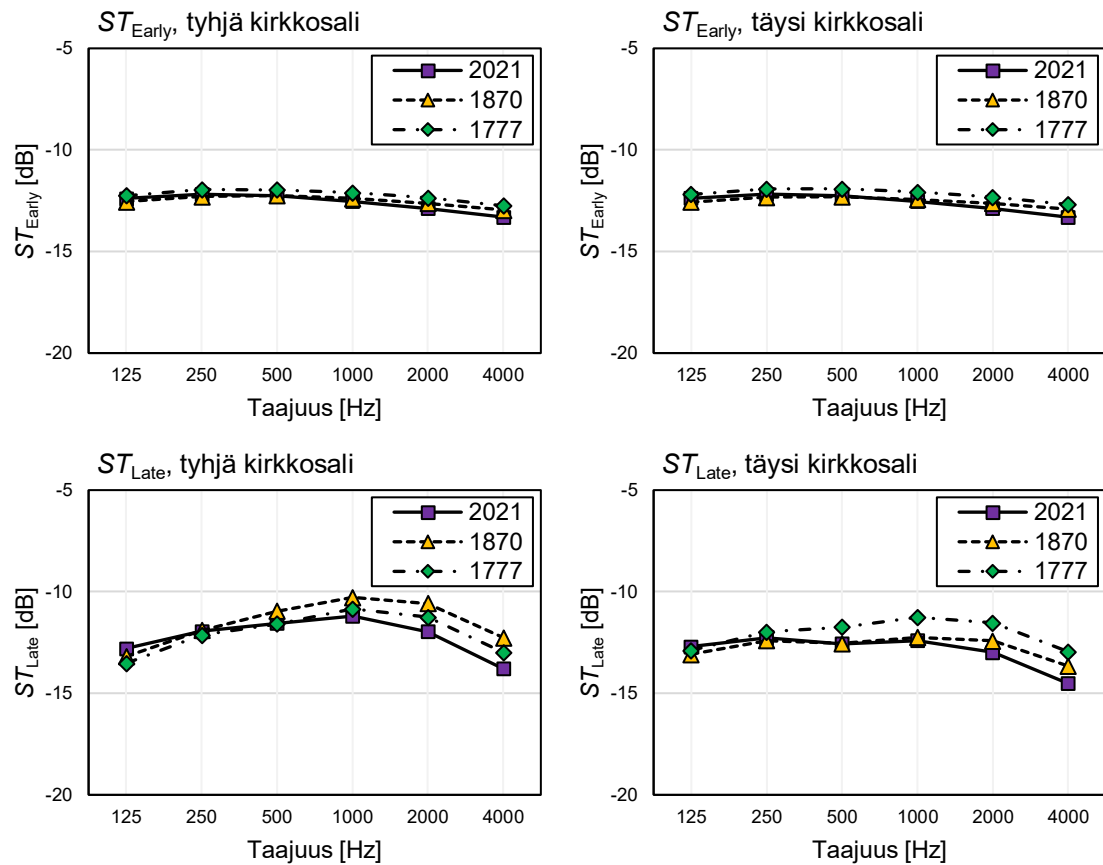
Sivuttaisenergiasuhteen LF_{80} keskiarvoiset mallinnustulokset tyhjässä ja täydessä kirkkosalissa eri rakennusvaiheissa on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Eri rakennusvaiheiden mallinnetut sivuttaisenergiasuhteen LF_{80} keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.

Kuvan 25 tulosten perusteella voidaan todeta, että sivuttaisenergiasuhteessa LF_{80} ei nykytilanteen ja vuoden 1870 mukaisen tilanteen välillä ole havaittavissa merkittävää eroa. Näissä tilanteissa täydellä kirkkosalilla lukuarvo on 500–4000 Hz taajuusalueella hieman pienempi kuin tyhjällä kirkkosalilla. Vuoden 1777 mukaisessa tilanteessa sivuttaisenergiasuhde LF_{80} on pienempi kuin nykytilanteessa ja vuoden 1870 tilanteessa. Myös muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin välillä on pienempi vuoden 1777 rakennusvaiheen mukaisessa tilanteessa.

Lava-akustiikan mittalukujen ST_{Early} ja ST_{Late} mallinnustulokset on esitetty kuvassa 26. Tulokset on laskettu kaikkien lava-akustiikan mittalukujen tarkasteluun käytettyjen vastaanottopisteiden mallinnustulosten keskiarvona oktaavikaistaisesti taajuusalueella 125–4000 Hz ja esitetty sekä tyhjän että täyden kirkkosalin tilanteissa.



Kuva 26. Eri rakennusvaiheiden mallinnetut lava-akustiikan mittalukujen ST_{Early} ja ST_{Late} keskiarvot oktaavikaistoilla 125–4000 Hz.

Kuvan 26 tuloksista voidaan havaita, ettei varsinkaan mittaluvun ST_{Early} tapauksessa tapahdu juurikaan muutosta eri rakennusvaiheiden sekä tyhjän ja täyden kirkkosalin mu-
kaisten tilanteiden välillä. Mittaluvun ST_{Late} kohdalla muutos on hieman suurempi tyhjän ja täyden kirkkosalin tilanteita vertailtaessa ja suurin muutos tapahtuu vuoden 1870 mukaisessa tilanteessa. Vuoden 1777 rakennusvaiheessa tyhjän ja täyden kirkkosalin vä-
lillä ei tapahdu muutosta.

Kuvissa 23, 24, 25 ja 26 esitetyistä oktaavikaistaisista lukuarvoista standardin ISO 3382-1 mukaisesti määritetyt mittalukujen yksilukuarvot on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Mallinnustuloksista lasketut huoneakustisten mittalukujen yksilukuarvot eri rakennusvaiheissa sekä tyhjällä että täydellä kirkkosalilla.

Mittaluku	Tyhjä kirkkosali			Täysi kirkkosali		
	2021	1870	1777	2021	1870	1777
EDT [s]	2,6	3,2	3,4	1,8	1,8	2,3
T_{30} [s]	2,6	3,2	3,3	1,9	1,9	2,3
C_{80} [dB]	-3,6	-4,6	-5,6	-0,9	-0,5	-3,0
G [dB]	10,2	11,4	10,3	7,5	7,7	7,5
LF_{80}	0,27	0,27	0,24	0,24	0,24	0,22
ST_{Early} [dB]	-12,5	-12,4	-12,1	-12,5	-12,4	-12,1
ST_{Late} [dB]	-11,7	-10,9	-11,5	-12,6	-12,4	-11,6
STI	0,41	0,39	0,35	0,45	0,46	0,39

Taulukosta 13 nähdään, että varhainen jälkikaiunta-aika EDT ja jälkikaiunta-aika T_{30} ovat vuoden 1777 tilanteessa pisimmät ja nykytilanteessa lyhyimmät. Selvyyden C_{80} osalta pienin muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin tilanteiden välillä on vuoden 1777 rakennusvaiheessa ja suurin muutos on vuoden 1870 rakennusvaiheessa. Eri rakennusvaiheiden välillä ei ole voimakkuuden G osalta merkittäviä eroja varsinkaan täyden kirkkosalin tilanteessa. Sivuttaisenergiasuhteessa ei myöskään ole merkittäviä eroja eri vaiheiden välillä. Sivuttaisenergiasuhteen LF_{80} perusteella nykytilanteessa tila koetaan huoneakustiikan osalta avarimpana. Lava-akustiikan mittaluvuissa ST_{Early} ja ST_{Late} ei tapahdu merkittäviä muutoksia eri rakennusvaiheiden välillä. Myös ero tyhjän ja täyden kirkkosalin välillä on mittaluvun ST_{Early} osalta merkityksetön ja mittaluvun ST_{Late} osalta pieni. Puheensiirtoindeksi STI on kaikissa rakennusvaiheissa subjektiivisesti havaittuna ”huono” tyhjässä kirkkosalissa. Täydessä kirkkosalissa puheenerotettavuus on kaikissa rakennusvaiheissa parempi. Huonoin puheenerotettavuus on vuoden 1777 tilanteessa, jossa puheensiirtoindeksi on täydelläkin kirkkosalilla alle 0,40.

Saliakustiikan mittaluvut ja puheensiirtoindeksi mallinnettiin myös penkkialueelle määritetyillä vastaanottopisteverkoilla, jotta mittalukujen muutosta istuma-alueella voitaisiin tarkastella. Aluekohtainen tarkastelu on olennaista erityisesti sivuttaisenergiasuhteen LF_{80} kohdalla, sillä sen lukuarvo riippuu enemmän kuuntelijan sijainnista. Saliakustiikan mittalukujen sekä puheensiirtoindeksin verkot kirkkosalin penkkialueilla tyhjän ja täyden kirkkosalin tilanteissa kaikissa rakennusvaiheissa on esitetty liitteessä 4.

6. TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT

6.1 Olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallinnusprosessi

Olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallintamiseksi tulee tietää tarkasteltavan tilan geometria sekä tilassa olevien pintojen materiaaliominaisuudet. Tilan geometria voidaan mallintaa rakennepiirustusten tai tietomallien perusteella, mutta sen voi myös selvittää tilannekohtaisesti erilaisilla rakennusmittauksen keinoilla. Tässä tutkimuksessa olemassa oleva tilan geometria selvitettiin kuvaamalla mallinnettavasta tilasta pistepilvi. Pistepilven perusteella tilasta tehtiin geometrinen malli sekä edelleen huoneakustinen malli. Huoneakustisen mallin luotettavuutta arvioitiin vertailemalla tilassa tehtyjen huoneakustisten mittausten tuloksia mallintamalla saatuihin tuloksiin. Huoneakustisen mallin ominaisuuksia muokattiin, kunnes mittaus- ja mallinnustulokset vastasivat mahdollisimman hyvin toisiaan kuitenkin mallinnuksessa käytettävien materiaali- ja pintaominaisuuksien uskottavuutta heikentämättä.

Tutkimuksen perusteella olemassa olevan tilan huoneakustinen malli voidaan luoda mallinnettavasta kohteesta kuvatun pistepilven perusteella. Pistepilven avulla tila voidaan mallintaa juuri sellaisena kuin se tarkasteluhetkellä on ollut. Jos huoneakustisen mallin validointiin käytettävät mittaukset suoritetaan kuvaushetken mukaisessa tilanteessa, on mallin validointikin tällöin uskottavampaa toisin kuin esimerkiksi rakennepiirustusten perusteella mallinnettaessa, jolloin mallinnettava tila ei välttämättä vastaa täysin tilannetta, jolloin validointiin käytettävät huoneakustiset mittaukset on suoritettu. Tässä tutkimuksessa pistepilven kuvaamiseen käytetty laitteisto loi kuvauskohteesta myös kolmiulotteisen mallin, jonka avulla tilaa pystyttiin tarkastelemaan jälkeen päin. Kolmiulotteisen mallin havaittiin olevan hyödyllinen erityisesti mallinnettavan tilan pinnanmuotojen ja materiaalien arvioimisessa ja määrittämisessä.

Kun huoneakustiikkaa tarkastellaan mallintamalla, on tiedostettava, että mallinnusketjussa on useita epävarmuustekijöitä, jotka vaikuttavat tulosten luotettavuuteen. Tutkimuksessa tunnistettuja epävarmuustekijöitä ovat huoneakustisen mallin validoinnissa käytetyt paikan päällä tehdyt mittaukset, paikan päällä kuvattu pistepilvi ja sen perusteella mallinnettu tilamalli, tilamallissa tehdyt pintojen yksinkertaistukset sekä huoneakustisessa mallissa pinnoille asetetut ominaisuudet. Validointitulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että vaikka mittauksissa ja geometrian mallinnuksessa on epävarmuutta, on näiden pohjalta tehty huoneakustinen malli ja sen avulla saadut tulokset likiarvoisesti uskottavia ja mahdollisia. Näin voidaan todeta, että olemassa olevan tilan

huoneakustiikan mallintamiseen voidaan hyödyntää tilasta kuvattua kolmiulotteista mittausdataa ilman että mallinnustarkkuus ja mallinnustulosten luotettavuus muuttuu merkittävästi. Huoneakustisessa mallinnuksessa kolmiulotteista mittausdataa kuvaavien laitteistojen, kuten laserkeilaimien ja automatisoitujen syvyyskameroiden, kuvaustarkkuuden todettiin olevan riittävä hyödynnettäväksi huoneakustisen mallin geometrian mallinnuksen lähtötiedoksi.

Tässä tutkimuksessa geometrinen malli tehtiin pistepilven pohjalta manuaalisesti. Jos olemassa olevan tilan huoneakustiikan mallintamisketjusta halutaan saada vaivattomampi ja tehokkaampi, voitaisiin pistepilven pohjalta luotavan geometrisen mallin muodostaminen joltakin osin automatisoida. Huoneakustisissa malleissa ei kuitenkaan ole usein järkevää mallintaa yksityiskohtaisesti tilan geometriaa, joten yksinkertaisen muotoisten tilojen kohdalla geometrian mallintamisen automatisointi ei välttämättä ole tarpeen. Sen sijaan suurten ja geometrialtaan monimuotoisten tilojen kohdalla geometrisen mallin automatisoitu luominen pistepilven pohjalta voisi olla käytännöllisempää kuin geometrian mallintaminen manuaalisesti, vaikka automaattisesti muodostettua mallia jouduttaisiinkin jälkepäin korjaamaan, muokkaamaan tai yksinkertaistamaan.

6.2 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikan muutokset

Tulosten perusteella Sastamalan Pyhän Marian kirkko on ollut vuoden 1777 mukaisessa tilanteessa hyvin kaiuntainen. Varhainen jälkikaiunta-aika EDT ja jälkikaiunta-aika T_{30} ovat molemmat lähes 3,5 s tyhjässä kirkkosalissa ja täydessä kirkkosalissa noin 2,3 s. Oktaavikaistaisesti tarkasteltaessa huomataan, että erityisesti 500–2000 Hz taajuuksilla korostuu tyhjän kirkkosalin kaiuntaisuus. Näillä taajuuksilla nähdään myös suurin muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin välillä. Sama ilmiö voidaan havaita vuoden 1870 mukaisen tilanteen sekä nykytilanteen kohdalla. Täydellä kirkkosalilla varhainen jälkikaiunta-aika EDT ja jälkikaiunta-aika T_{30} ovat vuoden 1870 tilanteessa ja nykytilanteessa lähestulkoon samat. Tuloksia tarkasteltaessa huomataan kuitenkin, että kuuntelijamäärän vaikutus tilan jälkikaiunta-aikaan on vuoden 1870 mukaisessa tilanteessa suurin ja nykytilanteessa pienin. Nykytilanteessa jälkikaiunnan osalta ääniolosuhteet ovat vähemmän riippuvaisia siitä, kuinka paljon tilassa on kuuntelijoita verrattuna vuosien 1777 ja 1870 mukaisiin tilanteisiin.

Varhaista jälkikaiunta-aikaa EDT ja jälkikaiunta-aikaa T_{30} tyhjässä kirkkosalissa eri rakennusvaiheiden välillä vertailtaessa voidaan huomata, että vuoden 1777 ja 1870 tilanteissa taajuusjakauma noudattaa samanlaista taajuusjakautumaa. Vuoden 1777 tilan-

teessa lukuarvot ovat kuitenkin hieman suuremmat, mikä johtuu luultavasti tilan suuremmasta tilavuudesta. Kun vuoden 1777 ja 1870 tilanteita verrataan nykytilanteeseen, on lattiatyypin vaikutus havaittavissa selkeästi oktaavikaistoilla 500–4000 Hz. Täydessä kirkkosalissa suurin muutos tapahtuu vuoden 1870 tilanteessa, sillä tämä on vertailtavista tilanteista tilavuudeltaan pienin, jolloin täyden kirkkosalin vaikutus jälkikaiuntaan on suurempi. Siksi muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin välillä ei vuoden 1777 tilanteessa ole yhtä suuri kuin vuoden 1870 tilanteessa, sillä se on tilavuudeltaan suurempi. Muutos jälkikaiunnassa johtuu siis vuoden 1777 ja 1870 mukaisten tilanteiden välillä pääasiassa tilavuudesta, joka vuosien 1866–1870 aikana rakennetun tynnyriholvin myötä pieneni. Vuoden 1870 mukaisen tilanteen ja nykytilanteen välillä muutos johtuu kirkkosalin lattiasta, joka vaihtui vuonna 1978 ääntä heijastavammasta lautalattiasta absorboivampaan maalattiaan. Kuitenkin täydessä kirkkosalissa olosuhteet ovat jälkikaiunnan osalta lähes samanlaiset nykytilanteessa ja vuoden 1870 mukaisen tilanteessa, mikä johtuu kirkkosalin suuremmasta istumakapasiteetista. Erot tyhjässä kirkkosalissa näiden kahden rakennusvaiheen välillä ovat kuitenkin selkeät.

Selvyiden C_{80} osalta parhaimmat olosuhteet tyhjässä kirkkosalissa ovat nykytilanteessa, jossa myös muutos tyhjän ja täyden kirkkosalin välillä on pienin. Kaikissa rakennusvaiheissa selvyys on parempi täydessä kirkkosalissa ja vuoden 1870 tilanteessa sekä nykytilanteessa tulokset ovat lähes samat. Vuoden 1777 tilanne on sekä tyhjällä että täydellä kirkkosalilla selvästi huonoimmat. Tämä johtuu luultavasti kuorin ja kirkkosalin välillä olevasta kuoriaidasta sekä runkokuoneen suuremmasta tilavuudesta. Kuoriaita todennäköisesti estää aikaisten sivusuuntaisten heijastusten sekä suoran äänen reittejä penkkien alueelle, jolloin selvyys on selvästi huonompi kuin vuoden 1870 tilanteessa ja nykytilanteessa, joissa kuoriaita ei ole. Kaikissa rakennusvaiheissa lukuarvot ovat kuitenkin mittaluvulle tyypillisten raja-arvojen sisällä ja kirkoille luonteenomaisia. Vuoden 1870 mukainen tilanne ja nykytilanne soveltuvat selvyiden osalta paremmin erilaiselle musiikille.

Voimakkuuden G osalta eri rakennusvaiheiden mukaiset tilanteet eivät juuri poikkea toisistaan. Tyhjässä kirkkosalissa voimakkuus on suurin vuoden 1870 tilanteessa, mikä johtuu todennäköisesti siitä, että kirkkosalin penkkirivit ja näin myös mallinnuksessa käytetyt vastaanottopisteet ovat hieman lähempänä alttarikoroketta kuin vuoden 1777 mukaisessa tilanteessa ja nykytilanteessa. Myös lautalattian kautta tulevat heijastukset voivat vaikuttaa voimakkuuden suurempaan lukuarvoon. vuoden 1777 tilanteessa ollut kuoriaita on saattanut vaikuttaa siihen, kuinka heijastuksia syntyy penkkien alueelle, jolla voi olla vaikutusta voimakkuuden lukuarvoon. Vuosien 1870 ja 1777 voimakkuuden lukuarvot noudattavat lähes samanmuotoista taajuusjakamaa. Kaikissa rakennusvaiheissa

voimakkuus on mittaluvulle tyypillisten raja-arvojen sisällä. Tilavuudella ja lattiatyypillä ei ole merkittäviä havaittavissa olevia vaikutuksia eri rakennusvaiheiden välillä. Liitteen 4 verkkoja tarkasteltaessa voidaan huomata, että kaikissa tilanteissa voimakkuuden luku-arvo pienenee samalla tavalla etäisyyden suhteen. Vuoden 1777 tilanteessa kirkon perällä voimakkuus on pienempi kuin muissa rakennusvaiheissa.

Sivuttaisenergiasuhde LF_{80} on nykytilanteessa ja vuoden 1870 tilanteessa yhtä suuri. Verkkoja tarkasteltaessa tilanteet ovat myös samankaltaiset. Suurimmillaan luku-arvo on näissä tilanteissa penkkirivien keskellä noin 4 metrin etäisyydellä sivuseinästä. Vuoden 1777 tilanteessa reunimmaisat penkkijonot ovat kiinni sivuseinissä, jolloin istuma-alueen reunalla sivuttaisenergiasuhde on pienempi. Kaikissa tilanteissa sivuttaisenergiasuhde on yksilukuarvonsa perusteella mittaluvulle tavoitteellisten raja-arvojen sisällä. Luku-arvon vaihtelu on kuitenkin suurta ja joillakin alueilla raja-arvojen ulkopuolella. Lähellä alttarikoroketta luku-arvo on joillakin alueilla alle 0,10 ja kirkkosalin perällä yli 0,30. Kuoriaidan vaikutus vuoden 1777 mukaisessa tilanteessa on havaittavissa sivuttaisenergiasuhteen suurempana vaihteluna kirkkosalin istuma-alueella. Kaikissa rakennusvaiheissa sivuttaisenergiasuhteen luku-arvo on pääasiassa pienempi täydessä kirkkosalissa, kun tarkastellaan liitteessä 4 esitettyjä verkkoja.

Lava-akustiikan mittalukujen ST_{Early} ja ST_{Late} osalta ei ole havaittavissa merkittäviä eroja eri rakennusvaiheiden välillä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, ettei alttarikorokkeen alueella ole merkittäviä eroavaisuuksia mallinnettujen eri rakennusvaiheiden välillä.

Puheenerotettavuus on nykytilanteessa ja vuoden 1870 tilanteessa käytännössä yhtä hyvä. Näissä tilanteissa puheensiirtoindeksi STI on lähellä alttarikoroketta yli 0,5. Vuoden 1777 tilanteessa puheenerotettavuus on huonoin ja puheensiirtoindeksi on yli 0,45 ainoastaan aivan kuoriaidan takana. Ero vuosien 1777 ja 1870 tilanteiden välillä johtuu todennäköisesti tilavuudesta, joka vaikuttaa jälkikaiunta-ajan pituuteen sekä kuoriaidasta, joka heijastaa osan alttarikorokkeen alueelta tulevasta äänestä takaisin kuoriin päin.

Tulosten perusteella vuoden 1777 mukaisessa tilanteessa tila on huoneakustiikaltaan ollut kaikista epäsopivin käyttötarkoitukselleen. Tilanne muuttui vuosien 1866–1870 aikana, kun kirkon tilavuus pieneni uuden tynnyriholvin rakentamisen myötä sekä kun kirkkosalin ja kuorin välillä ollut kuoriaita poistettiin. Tämä muutoksen myötä kirkon jälkikaiunta-aika lyheni ja alttarikorokkeella olevan puhujan tai esiintyjän sekä kirkkosalissa istuvan kuuntelijan väliltä poistui ääntä pois päin kuuntelijoiden alueelta heijastava kuoriaita. Lisäksi penkkien irrottaminen sivuseinistä paransi reunassa istuvien kuuntelijoiden

olosuhteita. Vuonna 1978 tehty maalattia puolestaan teki kirkon huoneakustiikasta vakaamman ja vähemmän kuuntelijamäärästä riippuvan. Täydessä kirkkosalissa huoneakustiikka on nykytilanteessa ja vuoden 1870 mukaisessa tilanteessa hyvin samankaltainen. Kuitenkin vuoden 1870 tilanteessa huoneakustiikka muuttuu enemmän tilassa olevien kuuntelijoiden lukumäärän suhteen kuin nykytilanteessa. Kuunteluolosuhteet vaihtelevat myös enemmän penkkien alueella vuoden 1870 tilanteessa kuin nykytilanteessa. Nykytilanteen vakaampaan huoneakustiikkaan voi vaikuttaa myös se, että alttarikoroke on penkkeihin nähden korkeammalla kuin vuoden 1870 ja 1777 tilanteissa, joissa koroke on lähes samalla tasolla penkkien kanssa.

6.3 Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikka

Mallinnustulosten perusteella Sastamalan Pyhän Marian kirkko on jälkikaiunnan osalta erilaisille taidemusiikkilajeille optimaalinen. Sastamala Gregorianan päänäyttämöllä esitettävä musiikki on pääasiassa vanhaa musiikkia sekä vokaalimusiikkia. Tällaiselle taidemusiikille tila soveltuu jälkikaiunnan osalta hyvin sekä täytenä että luultavasti myös puolitäytenä. Sekä varhainen jälkikaiunta-aika EDT että jälkikaiunta-aika T_{30} ovat konserttisaleille sopivien raja-arvojen sisällä lähes koko istuma-alueella, kun kirkkosali on täynnä. Eri taidemusiikkilajeille esitettyjen raja-arvojen perusteella jälkikaiunta-aika on sopiva myös kuoro- ja virsilaulannalle riippumatta siitä, kuinka paljon kirkkosalissa on väkeä.

Selvyys C_{80} on täydessä kirkossa konserttisaleille sopiviksi esitetyissä raja-arvoissa. Berardin²⁰¹ mukaan kirkoissa mittaluvun tulisi olla yli -3 dB, jotta ääniolosuhteet sopisivat sekä puheelle että musiikille. Tyhjässä kirkossa selvyys on alle -3 dB, mutta täytenä ja luultavasti myös puolitäytenä selvyys on tätä suurempi ja suurimmalla osalla istuma-alueesta tavoitteellisten arvojen sisällä. Tämä tarkoittaa sitä, että selvyyteen vaikuttavat suora ääni ja aikaiset heijastukset jakautuvat hyvin koko kirkkosalin alueelle ja tila on objektiivisesti tarkasteltuna ainakin sopiva juuri sellaiselle musiikille, jota kirkossa pääasiassa on esitetty.

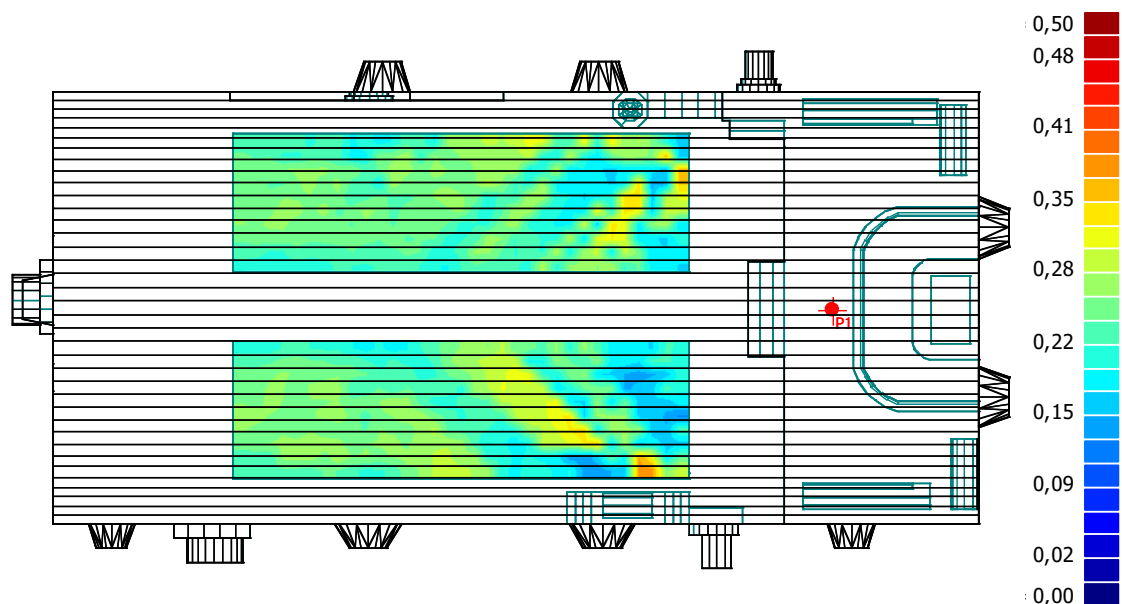
Voimakkuus G on tyhjässä kirkossa keskimäärin 10 dB ja täydessä 7 dB. Lukuarvo pienenee etäisyyden äänilähteeseen kasvaessa. Voimakkuuden lukuarvo vaihtelee sekä tyhjässä että täydessä kirkkosalissa mittaluvulle tyypillisten raja-arvojen välillä. Gade²⁰² on suositellut kamarimusiikille sopivaksi lukuarvoksi 10 dB ja sinfoniaorkesterille 3 dB.

²⁰¹ Berardi 2012.

²⁰² Gade 2007, s. 313.

Sastamalan Pyhän Marian kirkko asettuu voimakkuuden osalta näiden kahden lukuarvon välille ja lähemmäksi kamarimusiikille optimaalisia olosuhteita. Mitä tyhjempi kirkkosali on, sen paremmin tila soveltuu voimakkuuden osalta kamarimusiikille. Sinfoniaorkesterille voimakkuuden lukuarvo on puolestaan liian suuri.

Kuvassa 27 on esitetty sivuttaisenergian LF_{80} oktaavikaistojen 125–4000 Hz keskiarvo kirkkosalin istuma-alueella täydessä kirkkosalissa. Sivuttaisenergiasuhde vaihtelee alueella 0,15–0,35 välillä. Keskimäärin istuma-alueella sivuttaisenergiasuhteen lukuarvo on 0,20 ja 0,30 välillä, mikä asettuu mittaluvulle yleisesti esitettyjen tavoitearvojen sisälle.²⁰³ Gade²⁰⁴ on esittänyt kamarimusiikille sopiviksi raja-arvoiksi 0,15–0,20. Tällaiset lukuarvot saavutetaan kuvan 27 perusteella vaihtelevasti eri alueilla. Taaempänä kirkkosalissa sivuttaisenergiasuhteen lukuarvo ei vaihtele yhtä merkittävästi eri alueiden välillä kuin lähempänä alttarikoroketta.



Kuva 27. Oktaavikaistojen 125–4000 Hz keskiarvoinen sivuttaisenergiasuhde täydessä kirkkosalissa nykytilanteessa.

Esiintyjien ääniolosuhteet pysyvät lähes muuttumattomina riippumatta siitä, kuinka paljon kirkkosalissa on kuuntelijoita. Gaden mukaan esiintyjien välisiä olosuhteita kuvaavan mittaluvun ST_{Early} optimaalinen alue on -13 ja -11 dB välillä ja Beranekin²⁰⁵ mukaan puolestaan -12 ja -15 dB välillä. Sastamalan Pyhän Marian kirkossa mittaluvun lukuarvo asettuu näiden molempien raja-arvojen sisälle kirkkosalissa olevasta kuuntelijamäärästä riippumatta. Tilan antamaa vastetta esiintyjän näkökulmasta kuvaava mittaluku ST_{Late} on

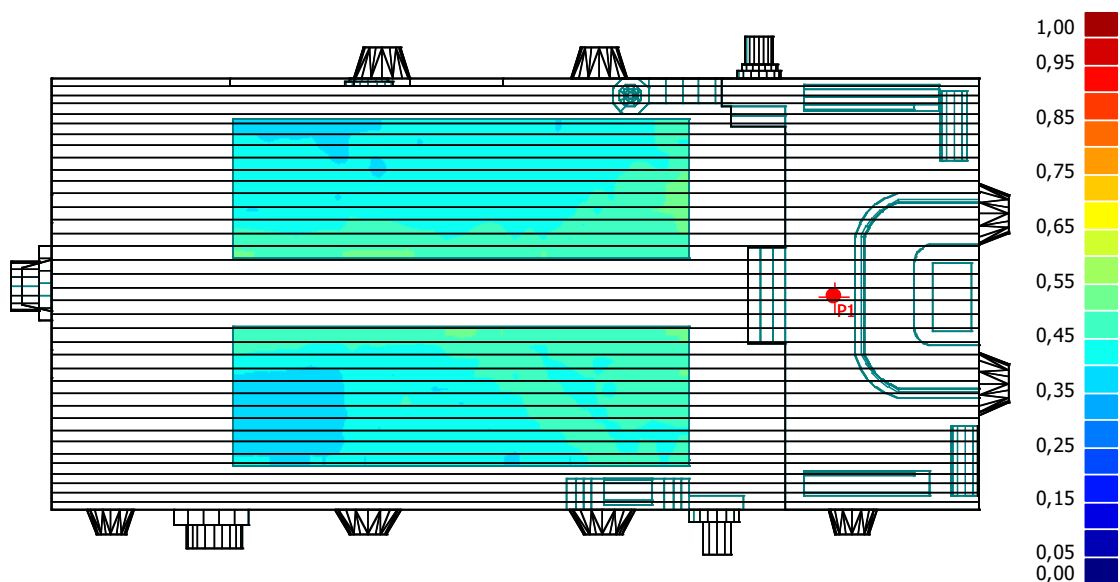
²⁰³ Barron 2010, s. 68.

²⁰⁴ Gade 2007, s. 313.

²⁰⁵ Beranek 2004, s. 30.

tyhjällä kirkkosalilla -11,7 dB ja täydellä -12,6 dB. Gade on esittänyt mittaluvun optimaaliseksi alueeksi -12 ja -13 dB välin, joten Sastamalan Pyhän Marian kirkon voidaan todeta olevan mittaluvun osalta optimaalisissa raja-arvoissa varsinkin täydellä kirkkosalilla.

Puheenerotettavuuden osalta kirkon huoneakustiikka ei ole ihanteellinen. Tyhjässä kirkkosalissa puheensirtoindeksi *STI* on keskimäärin 0,41 ja täydessä hieman parempi 0,45. Subjektiiivisesti arvioituna puheenerotettavuus on keskimäärin ”huono”. Kirkon puhetilalle hieman liian pitkä jälkikaiunta-aika voi vaikuttaa siihen, että puheen aikarakenne muuttuu ja puheenerotettavuus on huono. Kuvasta 28 nähdään, että parhaimmat puheenerotettavuuden olosuhteet ovat lähellä alttarikoroketta sekä kirkkosalin keskikäytävän varressa olevilla alueilla. Näillä alueilla suoran äänen vaikutus on suurempi ja puheenerotettavuus myös luultavasti siksi parempi. Puolestaan kirkon perällä ja lähempänä sivuseiniä puheenerotettavuus huononee todennäköisesti siksi, että suoran äänen ja aikaisten heijastusten vaihe-ero on seinien lähellä suurempi ja puheen aikarakenne muuttuu enemmän. Tulosten perusteella tila ei siis välttämättä sovi niin hyvin puhetta sisältäville teatteriesityksille, joille optimaalisessa tilassa jälkikaiunta-ajankin tulisi olla lyhyempi kuin mitä se Sastamalan Pyhän Marian kirkossa on. Tämä on myös pääteltävissä Kulttuuritoimituksen 19.7.2021 julkaistusta artikkelista²⁰⁶, jossa mainitaan puhuttujen repliikkien olleen osittain huonosti kuultavissa.



Kuva 28. Puheensirtoindeksi täydessä kirkkosalissa nykytilanteessa.

²⁰⁶ Kulttuuritoimitus 19.7.2021, "Kuolema kesäillassa: Sastamala Gregorianan..."

Tuloksia tarkasteltaessa on syytä kiinnittää huomiota myös tilan taustäänitasoon, jonka A-painotetuksi keskiäänitasoksi mitattiin 18 dB. Tilan taustäänitaso on pienempi kuin äänitysstudioissa. Näin hiljainen taustäänitaso ei millään tavalla peitä tai sotke esiintyjien tai laulajien ääntä, mikä voi mahdollisesti vaikuttaa äänen koettuun kirkkauteen. Hiljainen taustäänitaso vaikuttaa myös äänen dynamiikkaan, kun hiljaiset äänet ovat hyvin kuultavissa. Lisäksi hiljainen taustäänitaso voi tuoda tunteen täydellisestä hiljaisuudesta.

Sastamalan Pyhän Marian kirkon voidaan objektiivisten mittalukujen perusteella todeta soveltuvat hyvin vanhalle musiikille sekä vokaalimusiikille. Aikaisia heijastuksia syntyy kirkkosalin istuma-alueelle heijastavien ja ääntä sirottavien sivuseinien ansiosta. Ääntä absorboiva maalattia tekee tilan huoneakustiikasta kuuntelijamäärästä riippumattomamman ja mahdollistaa sen, että istuma-alueelle saapuva ääni koostuu pääasiassa suorasta äänestä sekä sivuseinien ja katon kautta heijastuvasta äänestä. Tynnyriholvin laakean muodon ansiosta katon kautta heijastuva ääni heijastuu tasaisemmin kirkkosalin alueelle. Tynnyriholvin muodon perusteella äänen polttopiste on suurin piirtein keskikäytävän kohdalla, jolloin istuma-alueella erityisesti penkkirivien keskialueilla ääniolosuhteet ovat melko vakaat.

Sastamalan Pyhän Marian kirkon sisätila on muodoltaan suorakaide, jonka pituuden ja leveyden suhde on noin 2:1. Suorakaiteen muotoisia saleja eli ns. ”kenkälaatikoita” on pidetty yleisesti erinomaisina konserttitiloina. Tämän muotoisessa tilassa suora ääni ja aikaiset heijastukset saavuttavat kuuntelijan yleensä sellaisen aikaikkunan sisällä, että ääni kuullaan yhtenä ja aikaiset heijastukset voimistavat suorana kuultua ääntä.²⁰⁷ Kun katto on tarpeeksi korkea, koostuu aikaiset heijastukset suurimmaksi osaksi sivusuunnaisista heijastuksista. Sastamalan Pyhän Marian kirkossa epätasaiset, mutta heijastavat seinät levittävät ääntä kirkkosalin alueelle eikä tällöin suoraa pelimäisiä heijastuksia mitä todennäköisimmin pääse syntymään.

²⁰⁷ Pätynen et al. 2014; Lokki et al. 2015.

7. YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli esittää olemassa olevan tilan huoneakustisen mallin luomisen vaiheet ja tutkia mallintamisessa esimerkkikohteena käytetyn Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikkaa nykytilanteessa sekä sen aiemmissa rakennusvaiheissa. Sastamalan Pyhän Marian kirkon geometrinen malli luotiin kirkon sisätiloista kuvatun pistepilven perusteella. Kirkon huoneakustinen malli tehtiin tilasta kuvatun pistepilven sekä kolmiulotteisen mallin avulla, ja mallin luotettavuutta arvioitiin vertailemalla mallintamalla saatuja tuloksia kirkossa paikan päällä tehtyjen huoneakustisten mittaus-ten mittaustuloksiin. Mallin validointiin käytettiin standardin ISO 3382-1 mukaisia sali- ja lava-akustiikan mittalukuja sekä standardissa IEC 60268-16 esitettyä puheenerotettavuuden olosuhteita kuvaavaa puheensiirtoindeksiä. Kun kirkon nykytilanteen mukainen huoneakustinen malli oli validoitu, mallinnettiin huoneakustiikka kirkon kahdessa aiemmassa rakennusvaiheessa – mallinnettavat rakennusvaiheet olivat vuoden 2021 lisäksi vuosien 1870 ja 1777 mukaiset tilanteet. Aiempien rakennusvaiheiden mallintamiseksi kirkon historiaa selvitettiin kirjallisuus- ja arkistotutkimuksella. Lopulliset huoneakustiset mallit tehtiin kirjallisuus- ja arkistotutkimuksen myötä löytyneiden tietojen sekä asiantuntija-arvioiden perusteella.

Sastamalan Pyhän Marian kirkon nykytilanteen mukainen huoneakustiikka mallinnettiin täysin tilasta kuvatun pistepilven sekä kolmiulotteisen mallin perusteella. Pistepilven avulla tila oli mahdollista mallintaa validointiin käytettyjen huoneakustisten mittalukujen mittaushetken mukaiseksi, ja kolmiulotteisen mallin avulla mallinnettavan tilan pintoja ja materiaaleja pystyttiin tarkastelemaan materiaaliominaisuuksia huoneakustiseen malliin määritettäessä. Tässä tutkimuksessa esitetyllä menetelmällä olemassa olevan tilan tilamallin mallintamiseen ei tarvita erikseen lähtötietoja vaan mallintamiseen tarvittavat tiedot voidaan itse tuottaa ja selvittää sillä tarkkuudella, että huoneakustiikan mallintaminen on uskottavaa. Pistepilven avulla on mahdollista mallintaa geometrisesti yksinkertaisia tiloja melko vaivattomasti, mutta geometrialtaan monimutkaisempien tilojen mallintamisessa voisi olla tehokkaampaa automatisoida pistepilven pohjalta geometrian mallintaminen, vaikka mallia jouduttaisiinkin jälkeinpäin muokkaamaan tai mahdollisesti yksinkertaistamaan huoneakustiikan mallintamista varten.

Huoneakustisen mallintamisen avulla tutkittiin, kuinka Sastamalan Pyhän Marian kirkon huoneakustiikka on muuttunut kirkossa aiemmin tehtyjen korjaustöiden – joiden on arveltu vaikuttaneen huoneakustiikkaan – myötä. Mallinnettaviksi rakennusvaiheiksi vali-

koitui tilanne vuonna 1777, jolloin rakennettiin nykyistä tynnyriholvikattoa edeltävä ja korkeampi tynnyriholvi, sekä tilanne vuonna 1870, jolloin kirkon oli juuri uusittu perusteellisesti ja nykyinen tynnyriholvi oli rakennettu. Nykytilanteen ja aiempien rakennusvaiheiden huoneakustisten mittalukujen mallinnustuloksia vertailtaessa havaittiin, että kirkon huoneakustiikka on joiltakin osin muuttunut merkittävästi sen olemassaolon aikana tehtyjen muutosten myötä. Vuonna 1777 jälkikaiunta-aika on ollut pidempi kuin vuonna 1870 ja nykyään. Tällöin kirkon sisätilojen tilavuus on vertailtavien rakennusvaiheiden kesken ollut suurimmillaan. Suuren tilavuuden lisäksi sisätilojen pinnat ovat olleet pääasiassa ääntä heijastavia, jolloin jälkikaiunta-aika on ollut tilan käyttötarkoitusta ajatellen liian pitkä. Lisäksi kuorin ja kirkkosalin välillä ollut kuoriaita on luultavasti heikentänyt puheenerotettavuutta alttarikorokkeella olleen puhujan ja kirkkosalissa istuneen kuulijan välillä. Vuonna 1870 kirkon huoneakustiikka on riippunut paljon siitä, kuinka paljon kirkkosalissa on ihmisiä. Täydellä kirkkosalilla huoneakustiikka on ollut lähestulkoon samanlainen kuin se nykyisin on kirkkosalin penkkien ollessa täynnä ihmisiä. Tyhjempänä kirkko on kuitenkin ollut käyttötarkoitukseensa nähden liian kaikuisa, mikä johtuu kirkkosalin ääntä heijastavasta lautalattiasta. Vuonna 1978 tehdyn maalattian myötä kirkosta on tullut huoneakustiikaltaan riippumattomampi tilassa olevasta ihmismäärästä ja se on ehkä yksi merkittävimmistä syistä sille, miksi kirkon huoneakustiikkaa pidetään nykyisin niin hyvänä.

Nykyään Sastamalan Pyhän Marian kirkko toimii kesäisin tiekirkkona ja vanhan musiikin festivaalin Sastamala Gregorianan päänäyttämönä vuosittain. Sastamalan Pyhän Marian kirkkoa on keuhuttu akustiikaltaan moneen otteeseen ja sitä pidetään erinomaisena tilana erityisesti vanhalle musiikille ja vokaalimusiikille. Tämän tutkimuksen yhtenä pää-tarkoituksena oli selvittää, miksi kirkon akustiikkaa pidetään niin hyvänä, että se ihastuttaa vuosi toisensa jälkeen Sastamala Gregorianaan osallistuvia, niin kuuntelijoita kuin esiintyjä. Kirkon huoneakustiikkaa tarkasteltiin sekä esiintyjien että kuuntelijoiden ääniolosuhteita kuvaavien objektiivisten mittalukujen avulla. Saliakustiikkaa arvioivien objektiivisten mittalukujen perusteella kirkon huoneakustiikka sopii hyvin erilaisille taidemusiikkilajeille etenkin silloin, kun kirkkosalin penkit ovat täynnä kuuntelijoita. Tällöin musiikki kuuluu selkeästi ja tarpeeksi voimakkaasti sekä tuntuu ympäröivän kuuntelijan. Tulosten perusteella huoneakustiikka on myös esiintyjien kannalta lähes ihanteellinen, jolloin esiintyjät kuulevat toisensa riittävän hyvin ja tilan antaman vaste esiintyjän kokemana on myös riittävä. Sen sijaan puhe-esityksille kirkko ei sovellu niinkään hyvin, sillä puheenerotettavuus vaihtelee kirkkosalin alueella ”kohtalaisen” ja ”huonon” välillä.

Nykyinen kirkon huoneakustiikka on syntynyt useiden sen historian aikana tehtyjen muutosten myötä sattumalta. Epätasaisista kiviseinistä koostuva suorakaiteen muotoinen

runkohuone mahdollistaa sen, että ääni heijastuu ja leviää kirkkosalin alueelle tasaisesti eikä suoraa peilimäisiä heijastuksia pääse syntymään. Ääntä heijastava puinen tynnyriholvi levittää kaarevan laakean muotonsa ansiosta siitä heijastuvaa ääntä tasaisesti kirkkosalin alueelle. Tynnyriholvi on myös tarpeeksi korkealla, jotta kirkkosalissa istuvan kuuntelijan saavuttavat ensimmäiset heijastukset tulevat pääasiassa sivuseinien kautta. Ääntä absorboiva maalattia tekee kirkon huoneakustiikasta vakaamman ja kirkkosalissa olevasta kuuntelijamäärästä riippumattomamman. Kirkon syrjäisen sijainnin sekä paksujen kiviseinien ansiosta kirkossa on todella hiljaista ja taustäänitaso muodostuu ainoastaan luonnon äänistä sekä mahdollisesti kaukaa kantautuvasta liikennemelusta. Näin hiljainen taustäänitaso voi tuoda tunteen lähes täydellisestä hiljaisuudesta eikä se myöskään peitä millään tavalla kirkossa esiintyvien ääntä. Tällainen kokonaisuus luo otolliset olosuhteet vanhan musiikin esittämiselle ja kuuntelulle sekä ääniolosuhteidensa että autenttisuutensa ansiosta.

LÄHTEET

Arkistolähteet

Museovirasto

 Kuvakokoelmat

 Rakennetun ympäristön aineistot

 Rakennushistorian osaston arkisto

Kansalliskirjasto

 Kansalliskirjaston digitaaliset aineistot

Vapriikin kuva-arkisto

Aalto-yliopiston arkisto

 Arkkitehtuurin laitoksen opetusdiakokoelma

Sanomalehdet

Aamulehti

Alueviesti

Alueviestin kesäviesti

Helsingin Sanomat

Kulttuuritoimitus

Turun Lehti

Turun Sanomat

Tyrvään Sanomat

Digitaaliset lähteet

Yle Areena Audio

 Kultakuume: Sastamala Gregoriana

Haastattelut

Prof. Markus Hiekkanen 4.2.2022, Microsoft Teams.

Prof. Markus Hiekkanen 23.3.2022–6.4.2022, sähköposti.

Tutkimuskirjallisuus

- Addis, B., Kurrer, K.-E. & Lorenz, W. (2020). *Physical Models: Their Historical and Current Use in Civil and Building Engineering Design*. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische.
- Ahnert, W. & Feistel, R. (1993). EARS auralization software. *Journal of the Audio Engineering Society*. 41(11), 894–904.
- Allen, J. B. & Berkley, D. A. (1979). Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 65(4), 943–950.
- Alonso, A., Suárez, R. & Sendra, J. J. M. (2016). Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: The case of the Cathedral of Granada. *Building simulation*. 10(4), 431–446.
- Altuntas, C., Ferruh, Y. & Scaioni, M. (2016). Laser scanning and data integration for three-dimensional digital recording of complex historical structures: The case of Mevlana museum. *ISPRS international journal of geo-information*. 5(2), 18.
- Atal, B. S., Schroeder, M. R., Sessler, G. M., & West, J. E. (1965). Reverberation Times and Early Energies in Philharmonic Hall (New York). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 37(6), 1188–1188.
- Autio, H., Barbagallo, M., Ask, C., Bard Hagberg, D., Lindqvist Sandgren, E., & Strinholm Lagergren, K. (2021). Historically based room acoustic analysis and auralization of a church in the 1470s. *Applied Sciences*. 11(4), 1–25.
- Barron, M. (2005). Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoustical Science and Technology*. 26(2), 162–169.
- Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Second Edition. Independence: Spon Press.
- Beranek, L. L. (2003). Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls. *Acta Acustica united with Acustica*. 89(3), 494–508.
- Beranek, L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Second Edition. New York, NY: Springer New York.
- Berardi, U. (2012). A Double Synthetic Index to Evaluate the Acoustics of Churches. *Archives of acoustics*. 37(4), 521–528.
- Boren, B. B. (2021) Acoustic simulation of J.S. Bach's Thomaskirche in 1723 and 1539. *Acta Acustica*. 5(1), 14.
- Bork, I. (2000). A Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Acta Acustica United with Acustica*, 86, 943–956.
- Bork, I. (2005). Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*. 91(4), 753–763.

- Botteldooren, D. (1995). Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 98(6), 3302–3308.
- Brezina, P. (2013). Acoustics of historic spaces as a form of intangible cultural heritage. *Antiquity*. 87(336), 574–580.
- Cox, T. J. & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, Design and Application*. Second edition. Oxon: Taylor & Francis Group.
- Dalenbäck, B.-I. (1995). A new model for room acoustic prediction and auralization, Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Dammerud, J. (2010). Stage acoustics for symphony orchestras in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 128(1), 506–506.
- Davis, A. H. & Kaye, G. W. C. (1927). *The Acoustics of Buildings*. G. Bell and Sons, London.
- D'Orazio, D., Fratoni, G., Rossi, E., & Garai, M. (2020). Understanding the acoustics of St. John's Baptistery in Pisa through a virtual approach. *Journal of building performance simulation*. 13(3), 320–333.
- Gade, A. C. (1992). Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms. *Proceedings of 14th ICA, Beijing*.
- Gade, A. (1989). Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II. Field experiments and synthesis of results. *Acustica*. 69(6), 249–262.
- 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 18th Congress of the International Commission for Acoustics (ICA), Kyoto, Japan, 4-9 April 2004*.
- Gade, A. (2007). 'Acoustics in Halls for Speech and Music', in *Springer Handbook of Acoustics*. New York, NY: Springer New York. 301–350.
- Girón, S., Álvarez-Morales, L., & Zamarreño, T. (2017). Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research. *Journal of sound and vibration*. 411, 378–408.
- Harris, C. M. (1966). Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 40(1), 148–159.
- Hiekkanen, M. (1994). The stone churches of the medieval diocese of Turku: A systematic classification and chronology. *Suomen Muinaismuseoyhdistyksen aikakauskirja* 101.
- Hiekkanen, M. (2007). *Suomen keskiajan kivikirkot*. Helsinki: Suomalaisen Kirjallisuuden Seura.
- Houtgast, T. & Steeneken, H. J. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 77(3), 1069-1077.

- IEC 60268-16 (2020). Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International electrotechnical commission.
- Jaakkola, Kankkonen, S., & Koskinen, U. (2008). Suoniemen historia: Kuloveden rantojen asuttamisesta 2000-luvulle. Nokian kaupunki.
- Kadokura, N. & Satow, T. (1929). The Measurement of Sound Intensities by Using Photo-Electric Cell. *Shomei Gakkai shi*. 13(4), 193–200.
- Kallioniemi, O. (1968). Sastamalan kirkko. Sastamalan Seitsemän kirkkoa. Vammala.
- Krokstad, A. Strom, S., & Sørdsdal, S. (1968). Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of sound and vibration*. 8(1), 118–125.
- Kuttruff, H. (1991). Digital simulation of concert hall acoustics and its applications. *Acoustics Bulletin*. 16(5), 5–8.
- Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics*. Fifth Edition. Independence: CRC Press LLC.
- Kylliäinen, M. & Takala, J. (2013). Kadonnutta akustiikkaa etsimässä, Helsingin Nya Teaternin huoneakustiikan ennallistaminen. *Tekniikan Waiheita*. 4(13), 5–17.
- Kylliäinen, M., Niemi, H., Jäppinen, J. & Lindqvist, M. (2015). Helsingin keskeisten 1800-luvun konserttilojen huoneakustiikan mallintaminen. *Musiikki*. 45(2), 28–52.
- Lehtola, Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M. T., Virtanen, J.-P., Kurkela, M., El Issaoui, A., Zhu, L., Jaakkola, A., & Hyyppä, J. (2017) Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods. *Remote sensing (Basel, Switzerland)*. 9 (8), 796.
- Lercari, N. (2016). ‘Terrestrial Laser Scanning in the Age of Sensing’, in *Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology*. Cham: Springer International Publishing. 3–33.
- Lokki, T. (2002). *Physically-based auralization: Design, implementation, and evaluation*. PhD Thesis, Helsinki University of Technology. Helsinki.
- Lokki, T, Pätynen, J, Tervo, S, Kuusinen, A, Tahvanainen, H & Haapaniemi, A. (2015). The secret of the Musikverein and other shoebox concert halls. in *Ninth International Conference On Auditorium Acoustics*, Paris, France, October 29-31. Institute of Acoustics.
- Maekawa, Z., Rindel, J. & Lord, P. (2011). *Environmental and architectural acoustics*. Second Edition. Abingdon, Oxon: Spon Press.
- Marshall, A., Gottlob, D., & Alrutz, H. (1978). Acoustical conditions preferred for ensemble. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 64(5), 1437–1442.
- Martellotta, F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *Journal of Sound and Vibration*. 317(1), 378–399.

- Martellotta, F., Cirillo, E., Carbonari, A., & Ricciardi, P. (2009) Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics*. 70(2), 378–388.
- Meurman, O. (1984). Sastamalan kirkko. Suomen Museo, s. 111–115. Toim. Martti Lincola. Vammala 1984.
- 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). ODEON – Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*. 38(2), 131–143.
- Niemi, H. (2014). Helsingin kadonneiden 1800-luvun konserttitilojen mallinnus ja auralisointi. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- Niemi, H., Kylliäinen, M., Jäppinen, J. & Lindqvist, M. (2015). Engelin teatterin huoneakustiikan mallintaminen. *Akustiikkapäivät 2015*. Kuopio, 1.–2.9., Akustinen Seura ry. s. 145–150.
- ODEON Room Acoustics Software, Version 16, User Manual. (2020). Odeon A/S, Lyngby, Denmark.
- Ordóñez, C. et al. (2010). Measuring building façades with a low-cost close-range photogrammetry system. *Automation in Construction*. 19(6), 742–749.
- Palmroth, R. (1963). Karkun vanhan kirkon rakennusvaiheet. Suomen Museo, s. 43–54. Toim. Ella Kivikoski. Helsinki 1963.
- Postma, B. N. J. & Katz, B. F. G. (2015). Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations. *Virtual reality: the journal of the Virtual Reality Society*. 19(3-4), 161–180.
- Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G., & Di Luggo, A. (2019). 3D cameras acquisitions for the documentation of cultural heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42(2), 639–646.
- Pätynen, J., Tervo, S., Robinson, P. W., & Lokki, T. (2014). Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, 111(12), 4409–4414.
- Rahola, U. (2019). Hylkäämisestä huolenpitoon: suomalaisten autiokirkkojen antikvaariset korjaukset. Väitöskirja. Aalto Yliopisto, Arkkitehtuurin laitos.
- Reichardt, W., Alim, O. A., & Schmidt, W. (1974). Abhängigkeit der grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer durchsichtigkeit von der art des musikmotives, der nachhallzeit und der nachhalleinsatzzeit. *Applied Acoustics*. 7(4), 243–264.
- 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. (2011, September). The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient theatres. In *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theatres Conference*, Patras, Greece.

- Rodrigues, F. G., Lanzinha, J. C. G., & Martins, A. M. T. (2017). Portuguese Cistercian Churches - An acoustic legacy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 245(5), 52013.
- RT 103132 (2019). Fotogrammetrian käyttö rakennushankkeessa. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- RT 103375 (2021). Pistepilviaineisto suunnittelun lähtötietona ja inventointimallintaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Saarelainen, J., Kylliäinen, M. & Hupaniittu, O. (2015). Mykkäelokuvakauden elokuva-teatterien huoneakustiikka. *Akustiikkapäivät 2015*. Kuopio, 1.–2.9., Akustinen Seura ry, 83–88.
- Sabine, W. C. (1913). Theater Acoustics. *The American Architect*. 104, 257. Painettu uudelleen lähteessä: *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press, 1922.
- Savioja, L. (1999). Modeling techniques for virtual acoustics. *Publications of Telecommunications Software and Multimedia*. Helsinki University of Technology.
- Savioja, L. & Svensson, U. P. (2015). Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 138(2), 708–730.
- Schroeder, M. R. (1961). Novel Uses of Digital Computers in Room Acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 33(11), 1669–1669.
- Selander, W. (1938). Sastamalan vanha kirkko. Tyrvää: Tyrvään seudun museo- ja kotiseutuyhdistys.
- SFS-EN ISO 3382-1 (2009). Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki, 25 s.
- SFS-EN ISO 3382-2 (2008). Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki, 17 s.
- SFS-EN ISO 3382-3 (2012). Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki, 15 s.
- Suárez, R., Alonso, A., & Sendra, J. J. (2016). Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny. *Journal of cultural heritage*. 19, 567–572.
- Takala, J. & Kylliäinen, M. (2013). In search of lost acoustics: Nya Teatern in Helsinki, 1860–1863. *Proceedings of the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. *Internoise*. Innsbruck, Austria. 15-18 September.
- Takala, J. & Kylliäinen, M. (2014). Comparison of modelled performance of a vanished building with historical information on its acoustics. *Proceedings of Forum Acusticum*. Krakow, September 7–12, paper SS12-6.
- Tateno, H., Ono, T., Nagata, J., & Fukai, A. (1986). The Improvement and Application of Ion-Beam Excited Acoustic Microscopy. *Japan. Journal of Applied Physics*. 1(26), 242–244.

- Ueno, K. & Tachibana, H. (2011). A Consideration on Acoustic Properties on Concert-Hall Stages. *Building Acoustics*. 18(3–4), 221–235.
- Valjakka, S. & Kylliäinen, M. (2016). Hämeen Pohjan konserttisali – akustiikkansa puolesta paras Tampereella. *Tammerkoski*. 5, 24–27.
- Vigran, T. E. (2008). *Building Acoustics*. First Edition. London: Taylor & Francis Group.
- Vassilantonopoulos, S. L. & Mourjopoulos, J. M. (2001). Virtual acoustic reconstruction of ritual and public spaces of ancient Greece. *Acta Acustica united with Acustica*. 87(5), 604–609.
- Vassilantonopoulos, S. L. & Mourjopoulos, J. N. (2003). A Study of Ancient Greek and Roman Theater Acoustics. *Acta Acustica united with Acustica*. 89(1), 123–136.
- Vassilantonopoulos, S. L. & Mourjopoulos, J. N. (2009). The Acoustics of Roofed Ancient Odeia: The Case of Herodes Atticus Odeion. *Acta Acustica united with Acustica*. 95(2), 291–299.
- Vermeulen R. & de Boer J. (1936). *Philips Technical Review*. 1(46).
- Vorländer, M. (2008). *Auralization Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. First Edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 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*. 20(5), 1421–1447.
- Weinzierl, S., Sanvito, P., Schultz, F., & Büttner, C. (2015). The acoustics of renaissance theatres in Italy. *Acta Acustica United with Acustica*, 101(3), 632-641.
- Zeng, X., Christensen, C. L., & Rindel, J. H. (2006). Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. *Applied Acoustics*. 67(8), 771–786.

Mallinnuksessa käytettyjen materiaalien absorptio- ja sironta- ja läpinäkyvyyskertoimet.

Taulukko 1. Sastamalan Pyhän Marian kirkko vuonna 2021.

Taso	Materiaali	Absorptiokertoimet								Sironta	Läpinäkyvyys
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	α			
Kiviseinä, rapattu ja maalattu	Plaster wall (Postma & Katz 2015)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,30	0,00	
Kiviseinä	Stone (Bork 2005)	0,067	0,065	0,05	0,065	0,084	0,084	0,084	0,25	0,00	
Ikkuna- ja ovisyvennykset	Plaster wall (Postma & Katz 2015)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,10	0,00	
Puinen tynnyriholvi	22 mm lautakatto 50 mm koolauksella, ei pontattu (Halme & Seppänen 2002)	0,27	0,25	0,20	0,15	0,13	0,12	0,12	0,10	0,00	
Hirsiseinä	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,10	0,00	
Alttarikoroke ja portaat	Wood, 25 mm with air space (Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	0,10	0,00	
Alttarikorokkeen otsapinta	Wood, 25 mm with air space (Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	0,10	0,30	
Alttarin puupinnat	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,00	
Alttarikaiteen otsapinta	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,10	0,40	
Saarnatuoli	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,20	0,00	
Penkkien puupinnat	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,05	0,00	
Ovet	Solid wooden door (Bobran 1973)	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	
Ikkunat	Single pane of glass, 3 mm (Fasold & Winkler 1976)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,10	0,00	
Maalattia		0,27	0,34	0,415	0,435	0,565	0,71	0,71	0,10	0,00	
	50 % Sand, 100 mm (Dalenbäck, CATT)	0,15	0,35	0,40	0,50	0,55	0,80	0,80			
	50 % Screened ballast 152 mm (Dalenbäck, CATT)	0,19	0,23	0,43	0,37	0,58	0,62	0,62			
	+ Arvioitu suurempi absorptio taajuuksilla 125–250 Hz	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Täydetyt penkit	Audience on wooden chairs, 2 per sq. m (Meyer, Kunstmann & Kuttriff 1964)	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,87	0,70	0,00	

Mallinnuksessa käytettyjen materiaalien absorptio- ja sironta- ja läpinäkyvyyskertoimet.

Taulukko 2. Sastamalan Pyhän Marian kirkko vuonna 1870.

Taso	Materiaali	Absorptiokertoimet										Sironta	Läpinäkyvyys
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	α					
Kiviseinä, rapattu ja maalattu	Plaster wall (Postma & Katz 2015)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,25–0,30	0,00			
Ikkuna- ja oviviennykset	Plaster wall (Postma & Katz 2015)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,10	0,00			
Puinen tynnyriholvi	22 mm lautakatto 50 mm koolauksella, ei pontattu (Halme & Seppänen 2002)	0,27	0,25	0,20	0,15	0,13	0,12	0,12	0,10	0,00			
Hirsiseinä	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,10	0,00			
Alttarikoroke ja portaat	Wood, 25 mm with air space (Dalenbäck, CATT)	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	0,10	0,00			
Alttarikorokkeen otsapinta	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,00			
Alttarin puupinnat	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,10	0,40			
Alttarikaiteen otsapinta	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,20	0,00			
Saarnatuoli	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,05	0,00			
Penkkien puupinnat	Solid wooden door (Bobran 1973)	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00			
Ovet	Single pane of glass, 3 mm (Fasold & Winkler 1976)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,10	0,00			
Lautalattia	Wood, 25 mm with air space (Dalenbäck, CATT)	0,24	0,19	0,14	0,10	0,08	0,06	0,06	0,10	0,00			
Täydetyt penkit	+ Slot resonator, 3 mm slot width (Cox & D'Antonio 2004)	0,05	0,05	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01					
	Audience on wooden chairs, 2 per sq. m (Meyer, Kunstmann & Kuttriff 1964)	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,87	0,70	0,00			

Mallinnuksessa käytettyjen materiaalien absorptio- ja sironta- ja läpäisykerroimet.

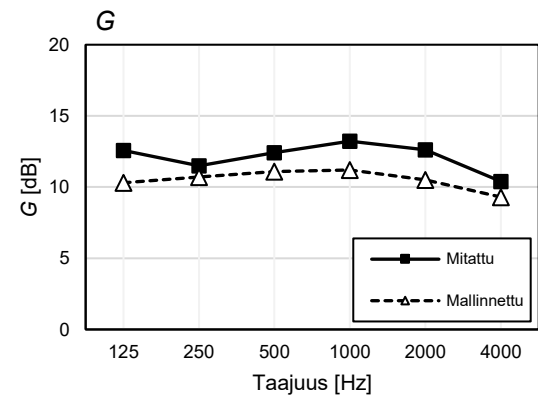
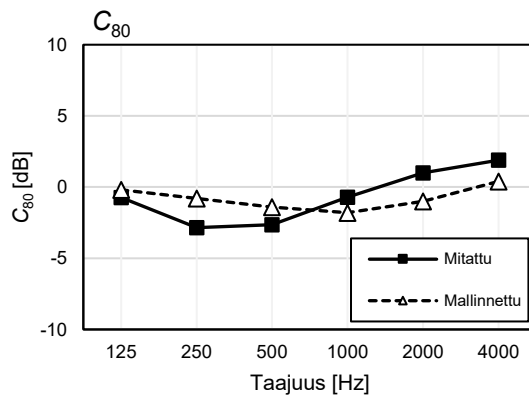
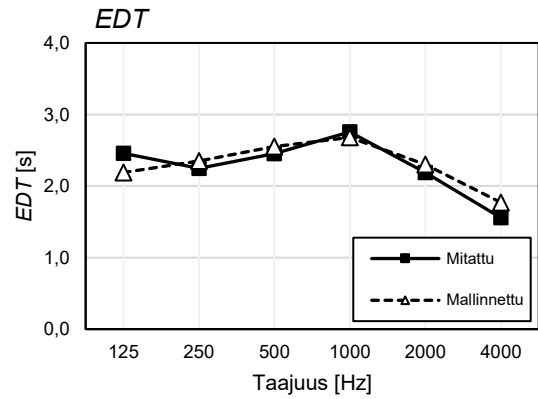
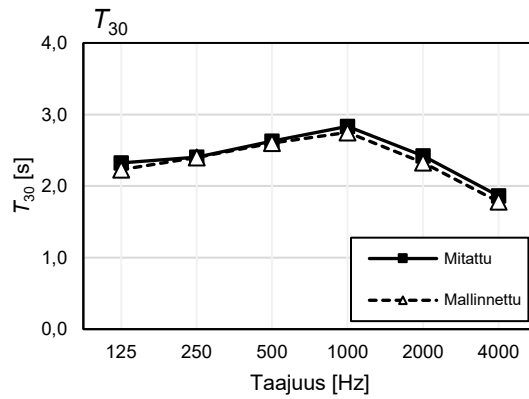
Taulukko 3. Sastamalan Pyhän Marian kirkko vuonna 1777.

Taso	Materiaali	Absorptiokerroimet α								Sironta	Läpäisyvyvyys
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz				
Kiviseinä, rapattu ja maalattu	Plaster wall (Postma & Katz 2015)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,25–0,30	0,00	
Ikkuna- ja oviviennykset	Plaster wall (Postma & Katz 2015)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,10	0,00	
Puinen tynnyriholvi	22 mm lautakatto 50 mm koolauksella, ei pontattu (Halme & Seppänen 2002)	0,27	0,25	0,20	0,15	0,13	0,12	0,12	0,10	0,00	
Hirsiseinä	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,10	0,00	
Alttarin puupinnat	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,00	
Alttarikaiteen otsapinta	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,10	0,40	
Saarnatuoli	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,25	0,00	
Kuoriaita	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,10	0,00	
Kuoriaita, koristeltu	16 mm wood on 40 mm studs (Dalenbäck, CATT)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,20	0,00	
Kuoriaidan puolet	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,20	0,00	
Penkkien puupinnat	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,05	0,00	
Penkkien ovet	Wood (Postma & Katz 2015)	0,14	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,20	0,00	
Ovet	Solid wooden door (Bobran 1973)	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	
Ikkunat	Single pane of glass, 3 mm (Fasold & Winkler 1976)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,10	0,00	
Lautalattia	Wood, 25 mm with air space (Dalenbäck, CATT)	0,24	0,19	0,14	0,10	0,08	0,06	0,06	0,10	0,00	
	+ Slot resonator, 3 mm slot width (Cox & D'Antonio 2004)	0,05	0,05	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01			
Täydetyt penkit	Audience on wooden chairs, 2 per sq. m (Meyer, Kunstmann & Kuttriff 1964)	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,87	0,70	0,00	

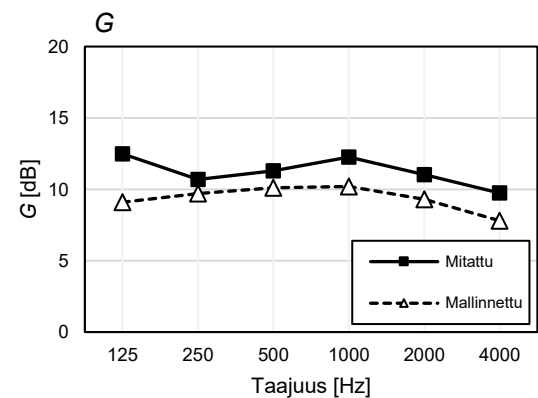
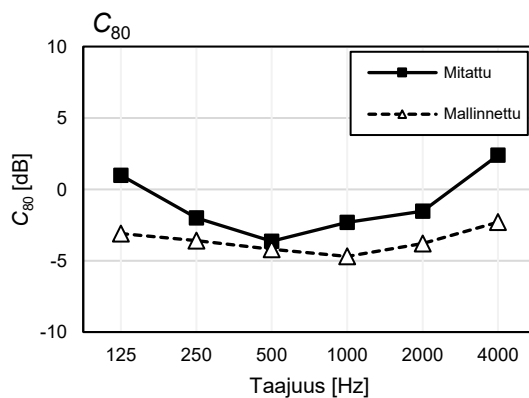
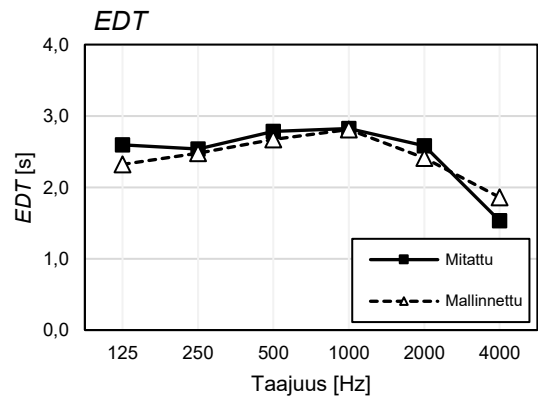
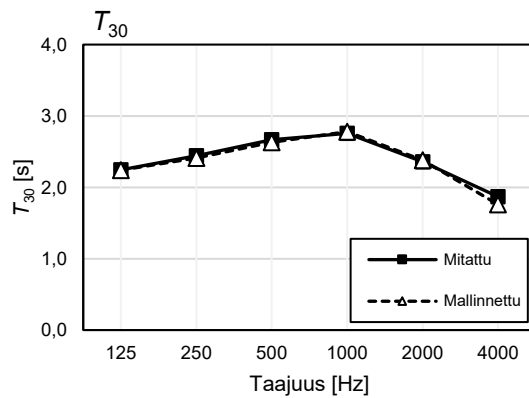
Liite 2: Mittaus- ja mallinnustulosten vertailu

Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP1.

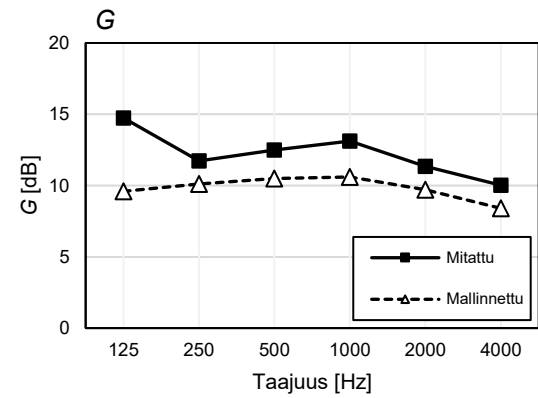
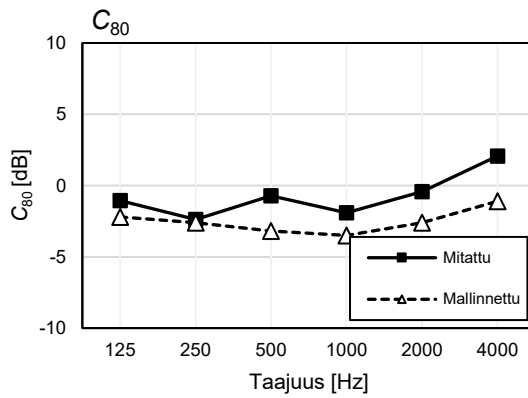
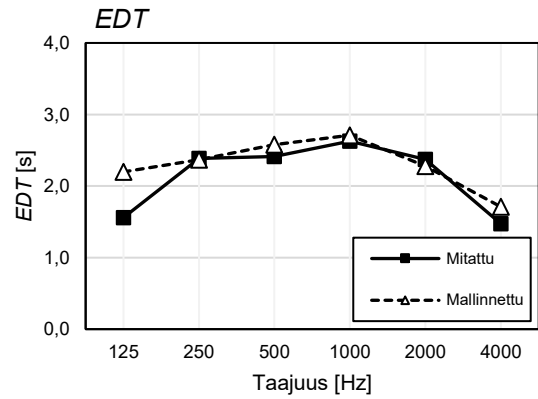
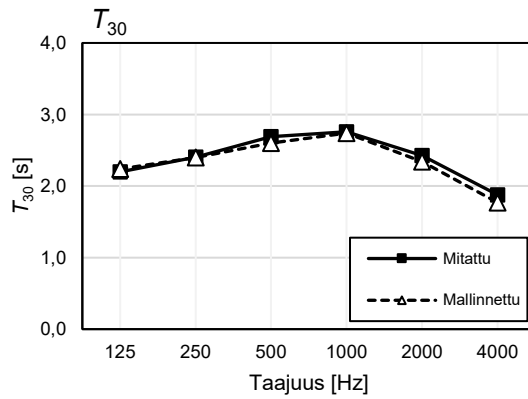


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP2.

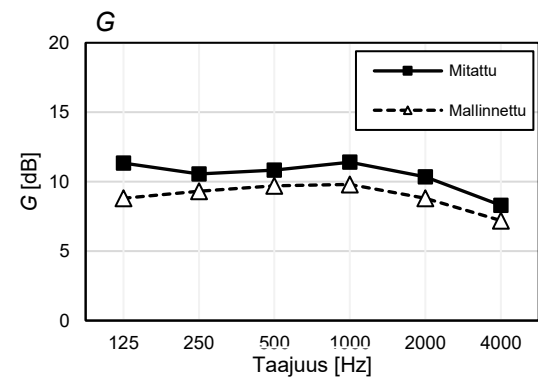
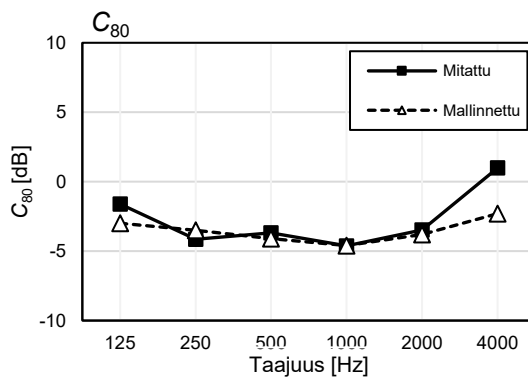
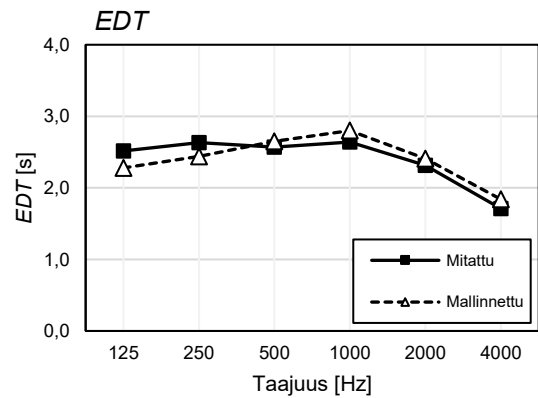
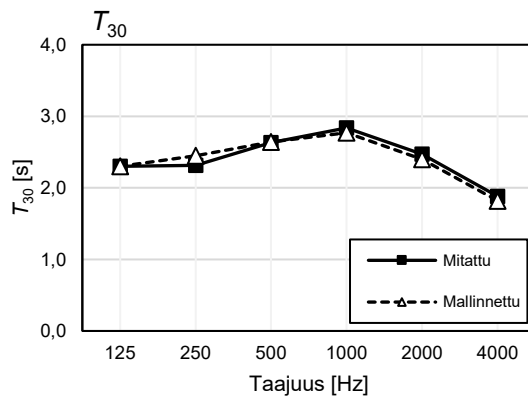


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP3.

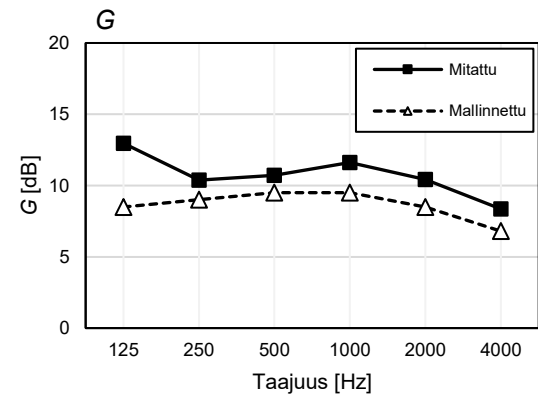
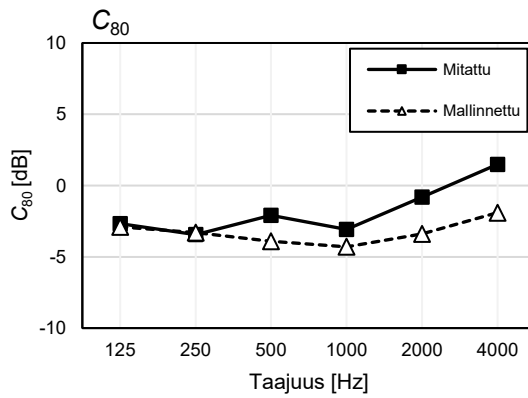
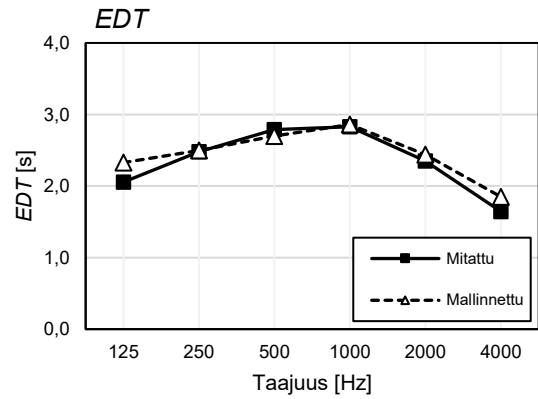
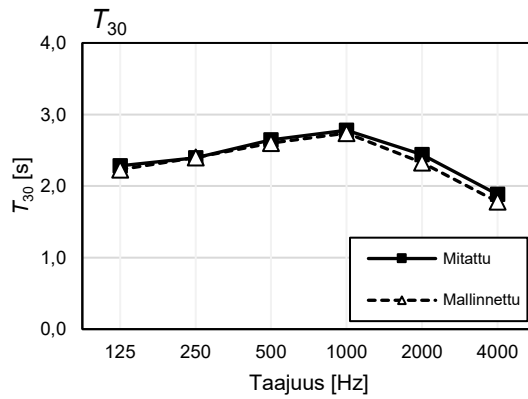


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP4.

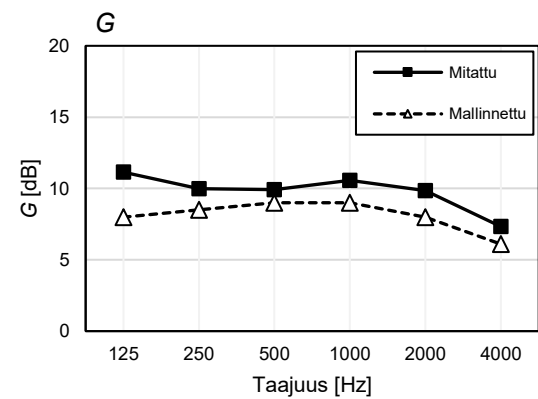
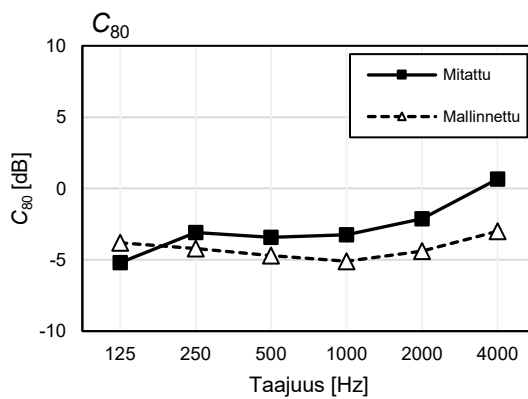
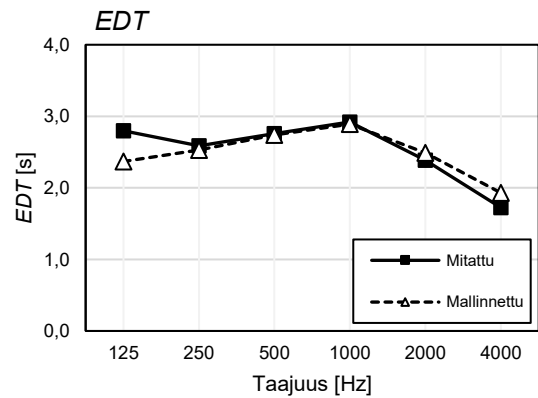
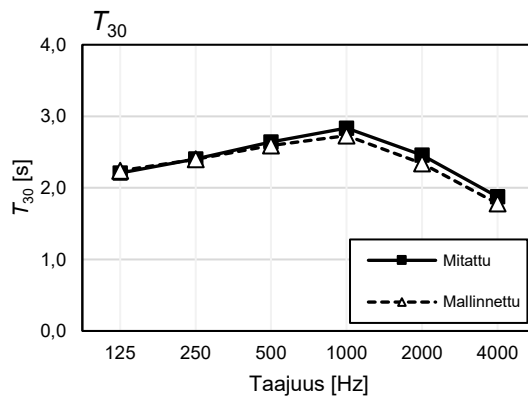


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP5.

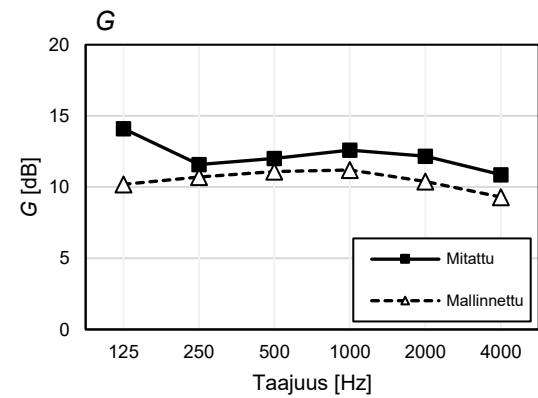
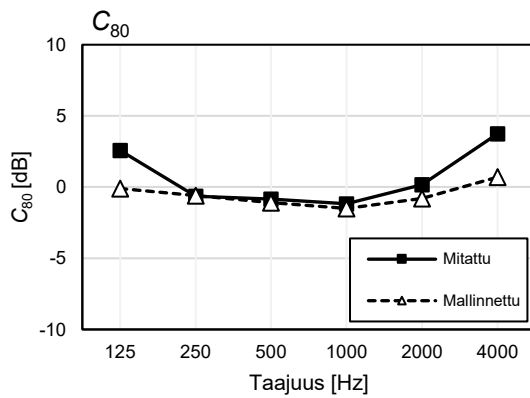
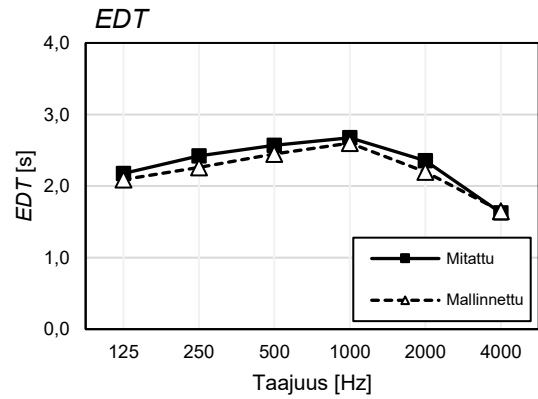
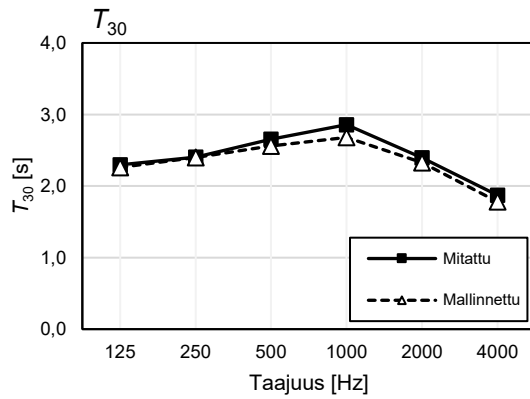


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP6.

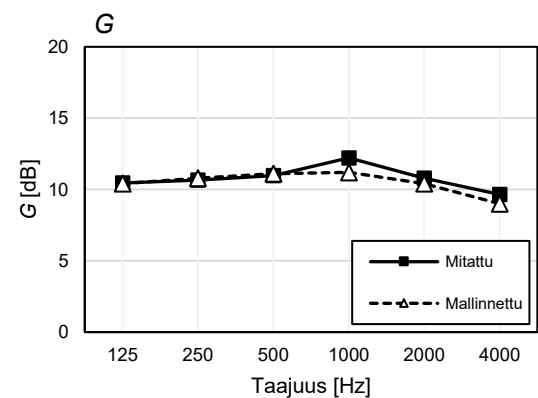
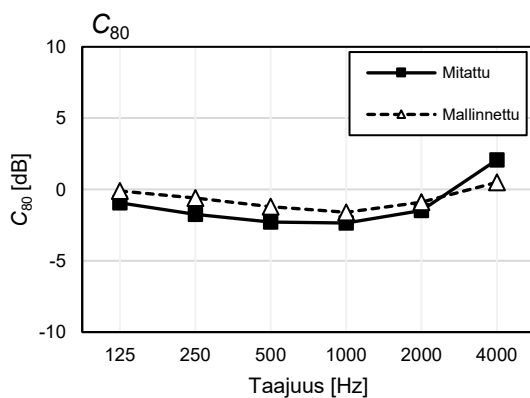
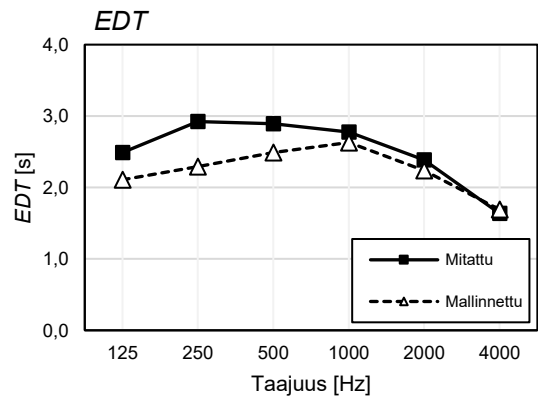
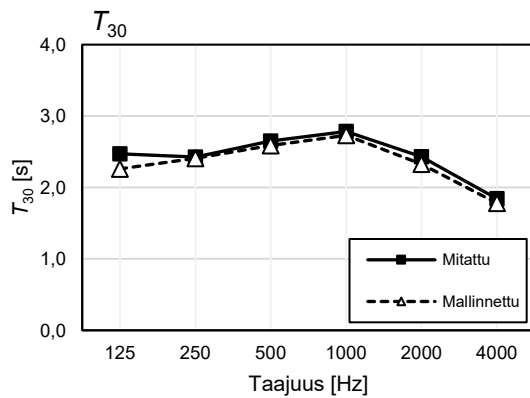


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP1.

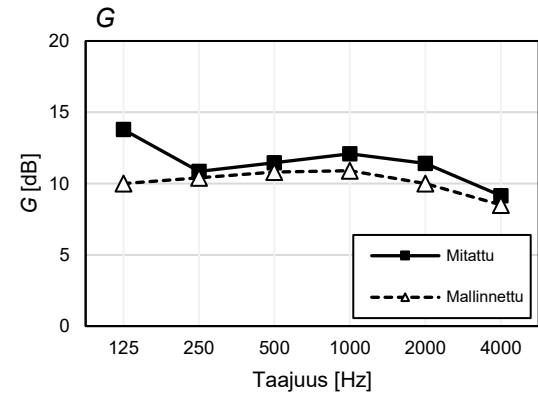
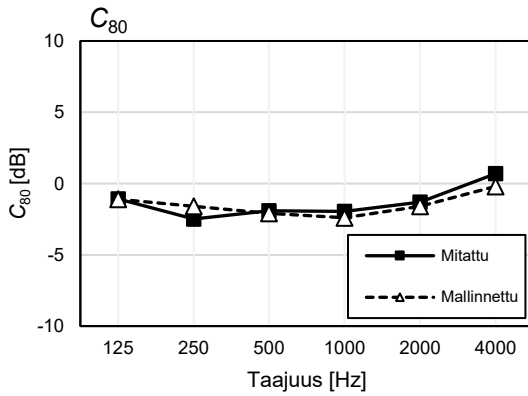
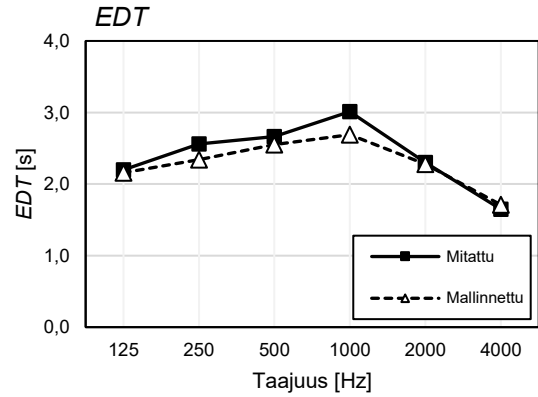
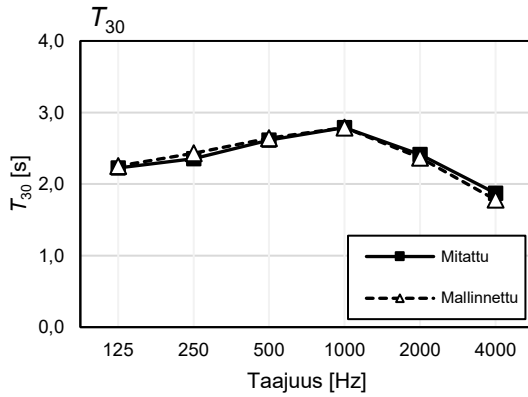


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP2.

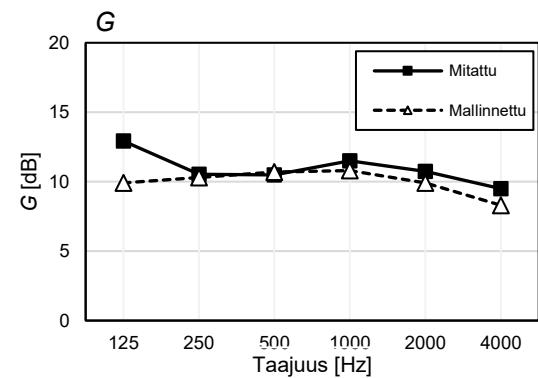
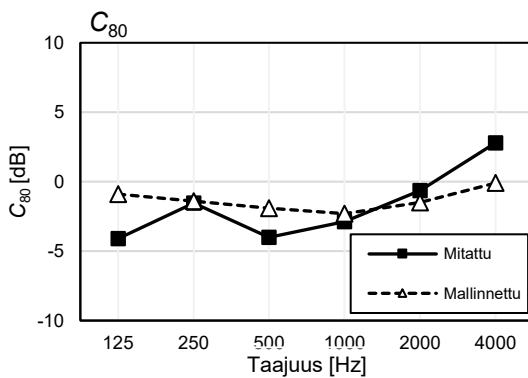
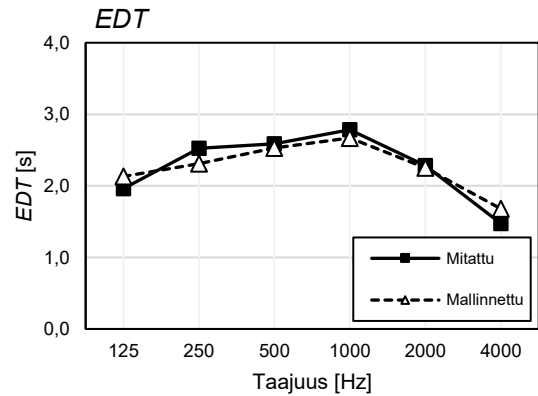
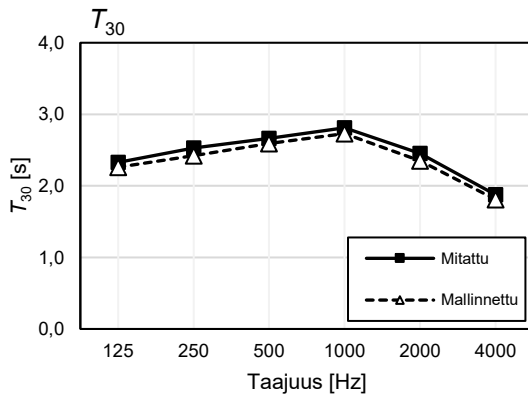


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP3.

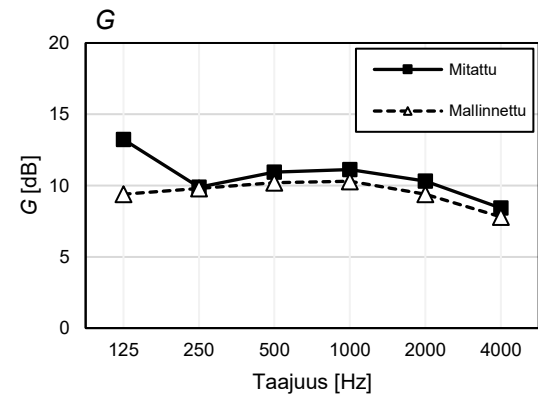
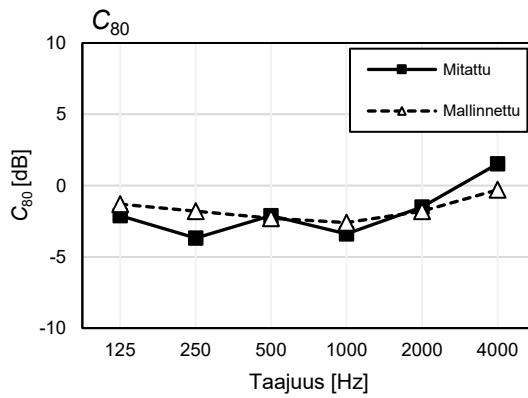
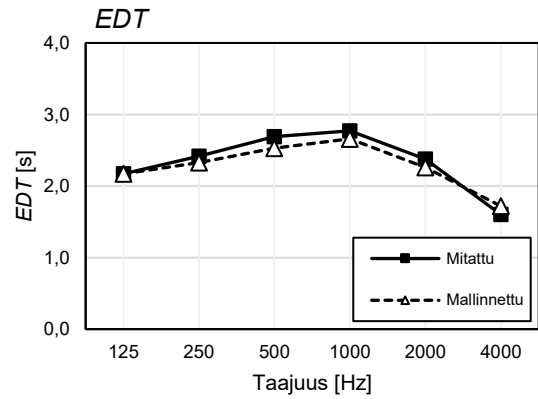
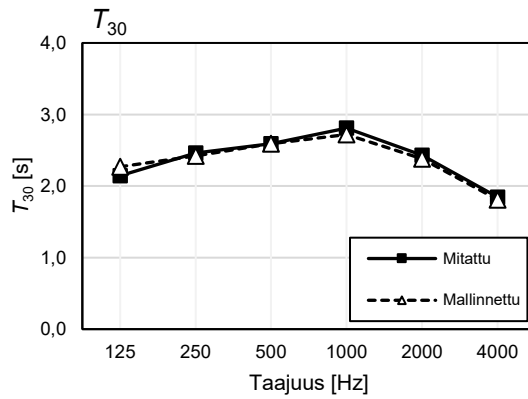


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP4.

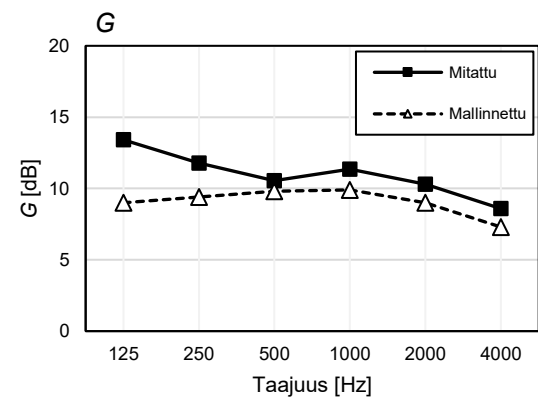
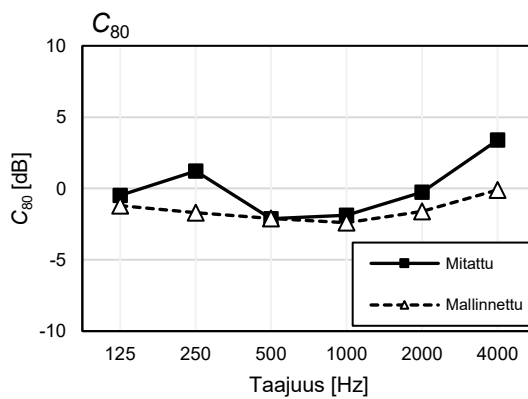
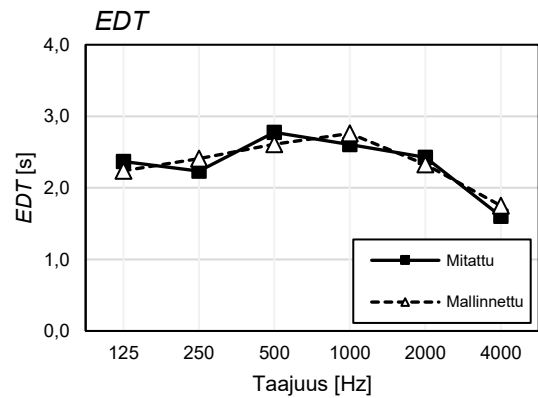
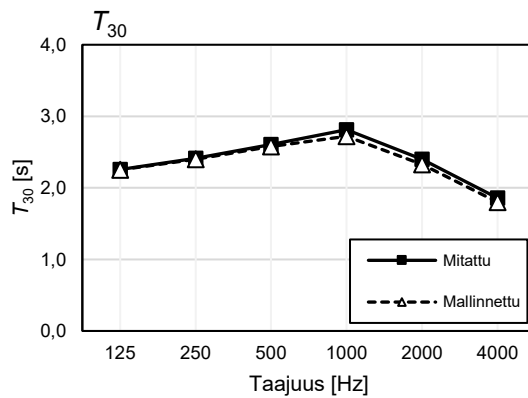


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP5.

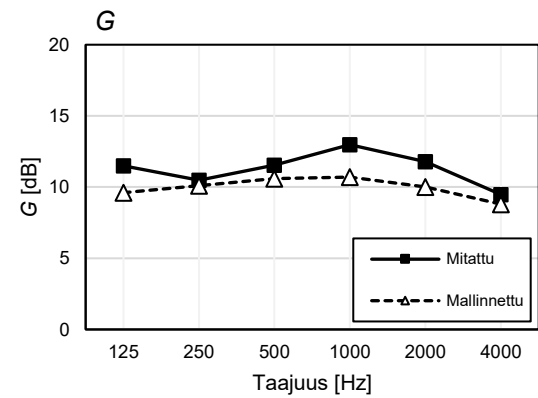
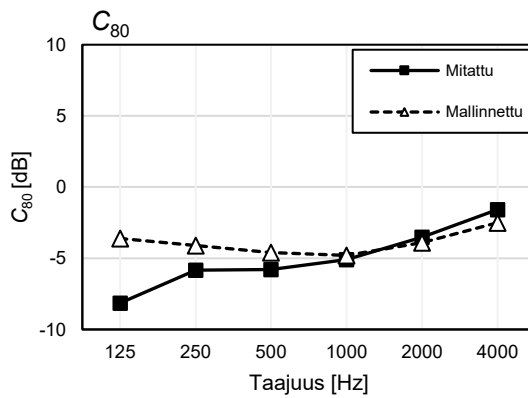
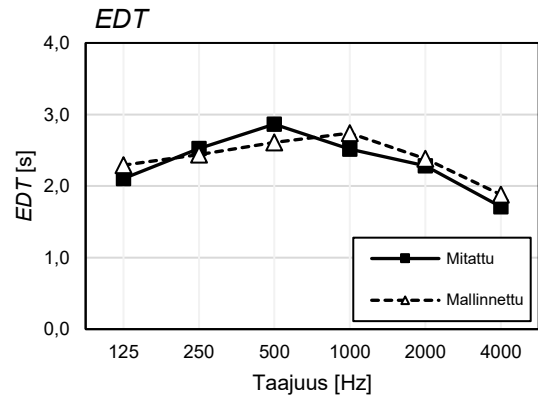
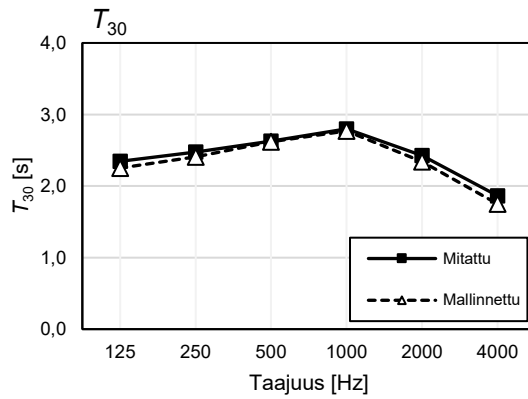


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP6.

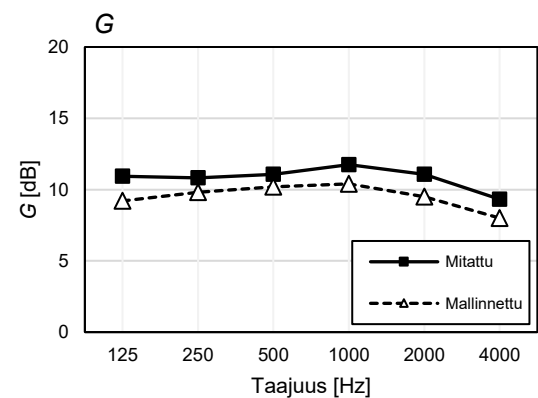
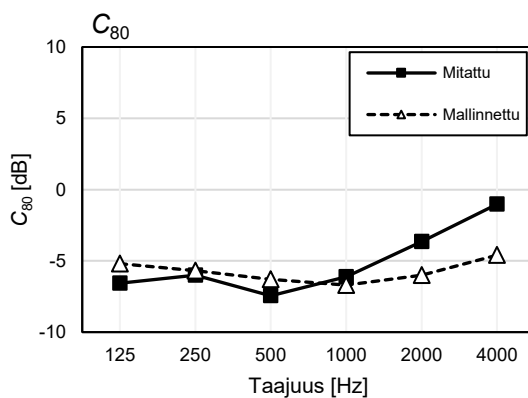
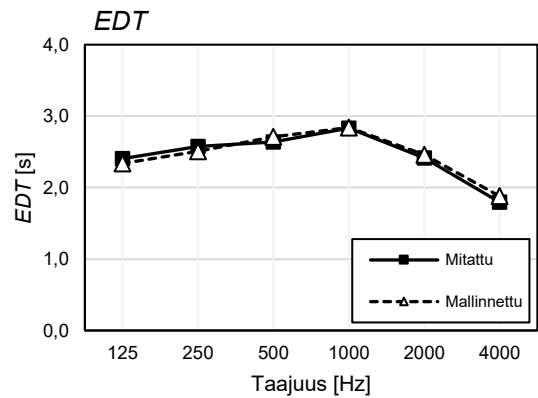
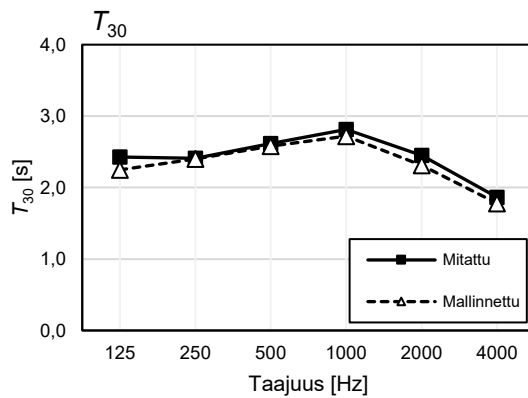


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP1.

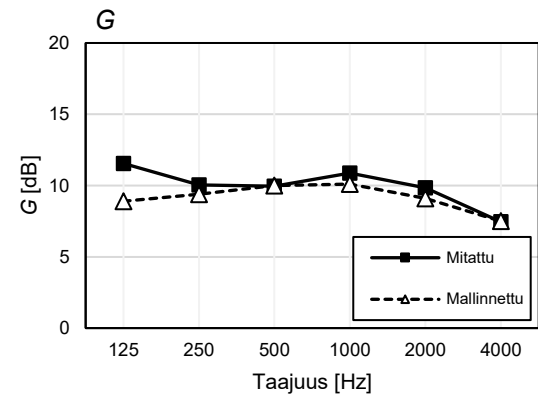
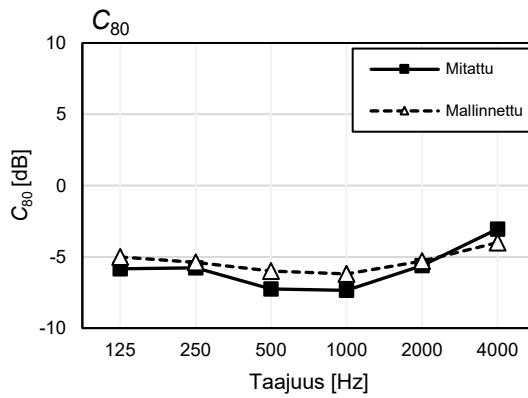
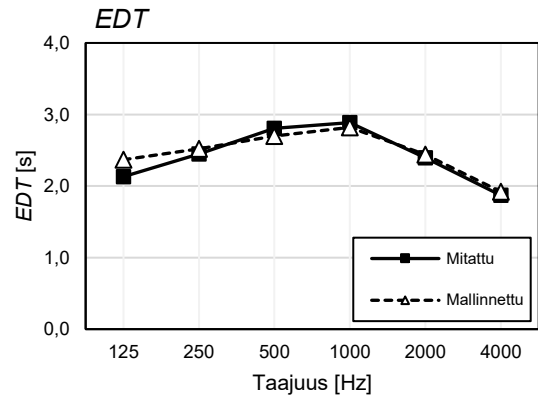
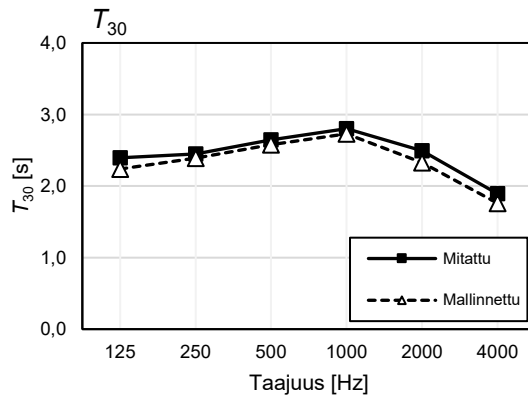


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP2.

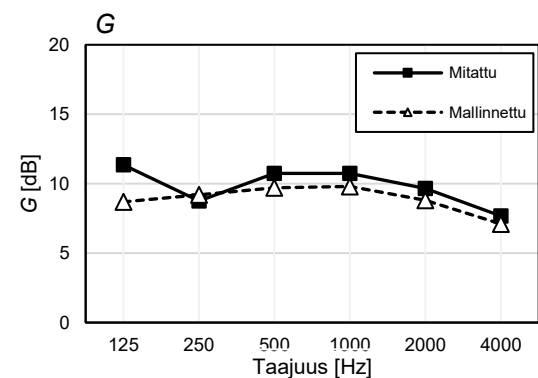
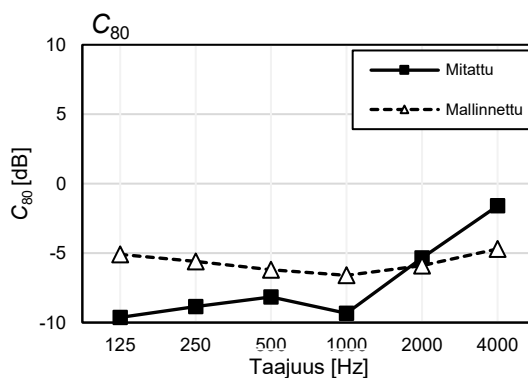
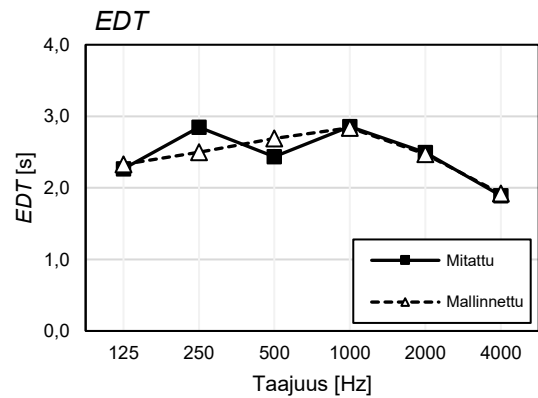
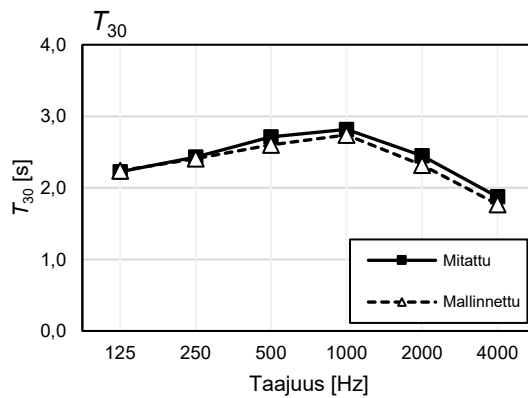


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP3.

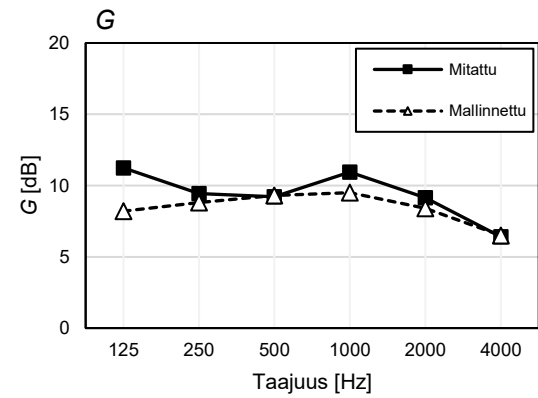
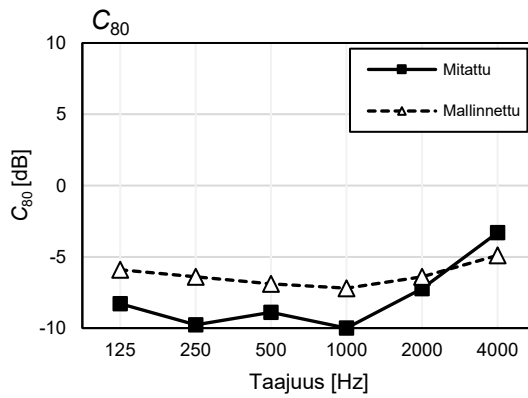
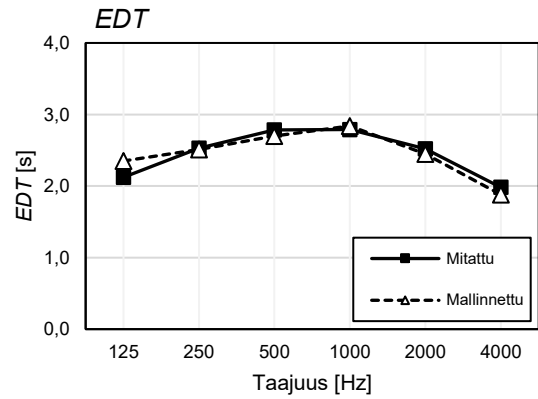
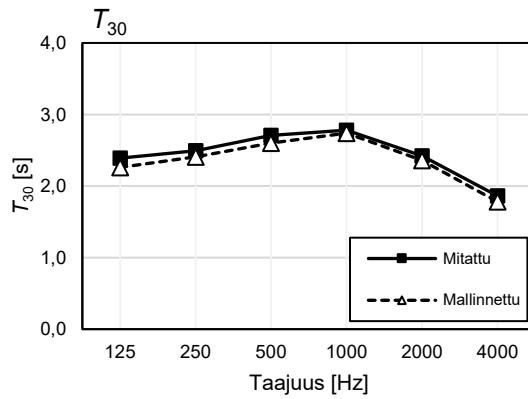


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP4.

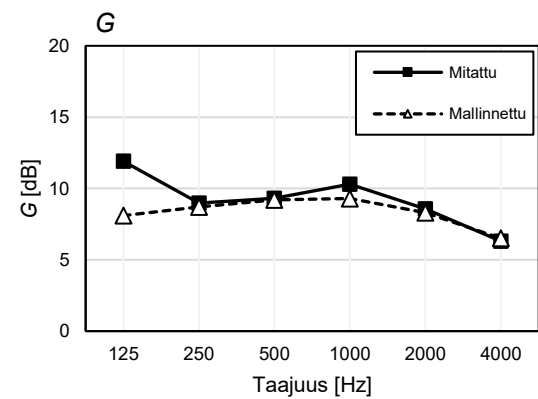
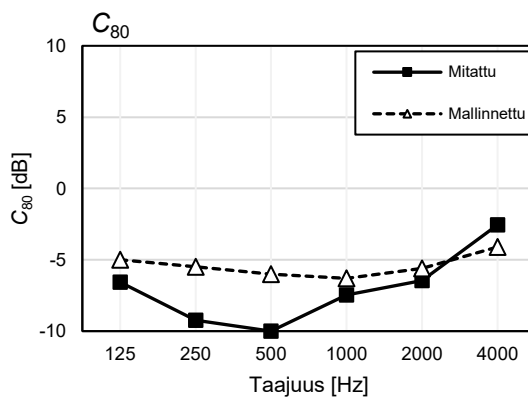
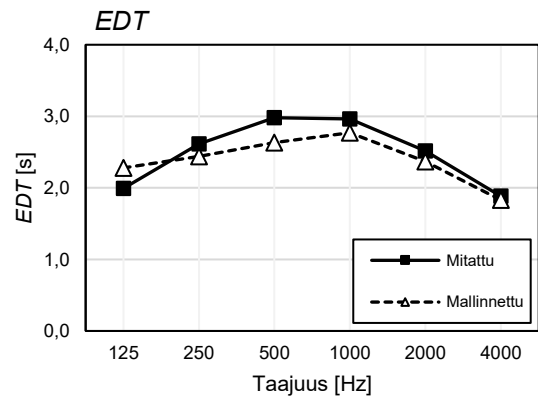
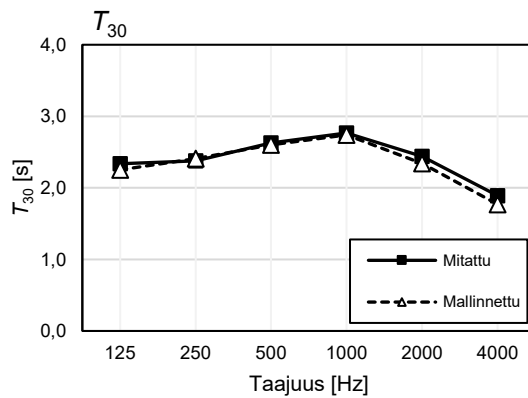


Saliakustiikan mittaluvut

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP5.

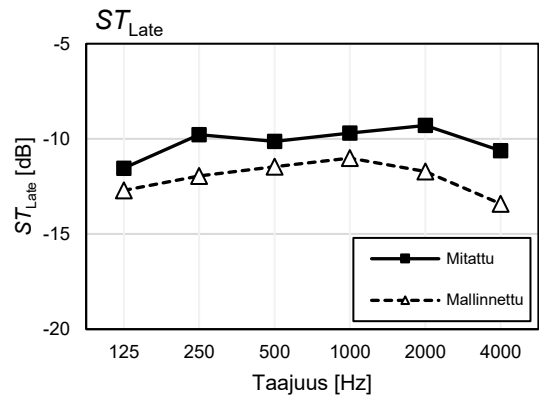
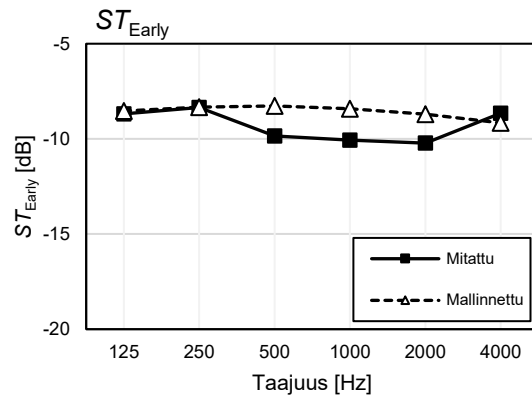


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP6.

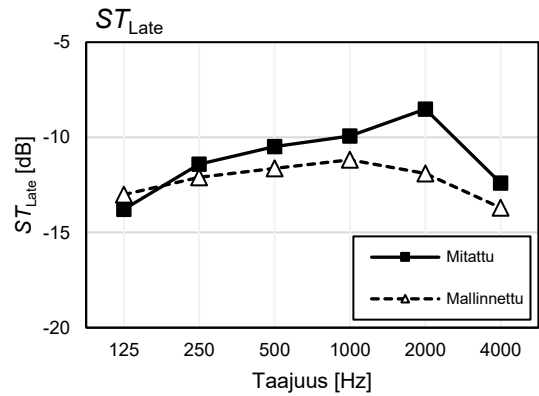
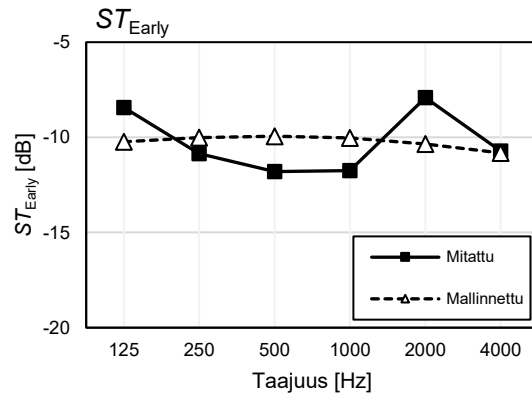


Lava-akustiikan mittaluvut

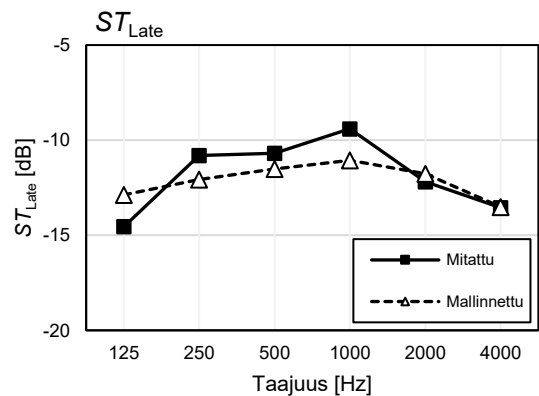
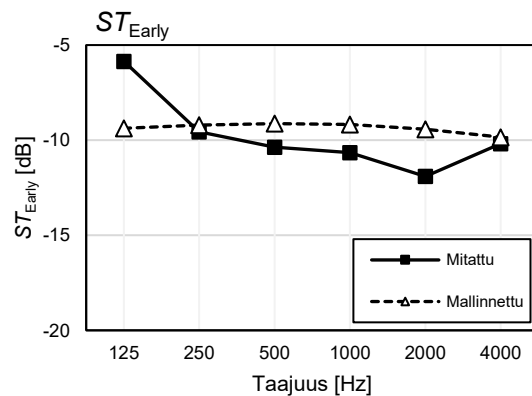
Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP7.



Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP8.

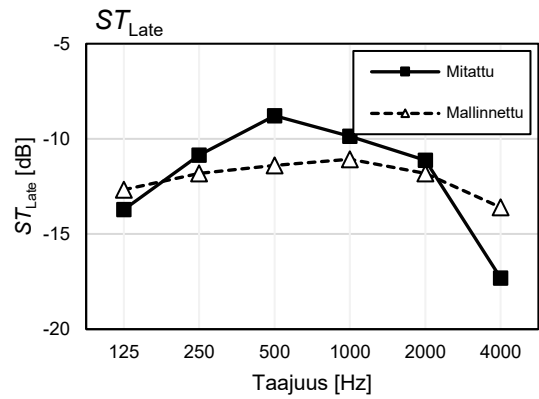
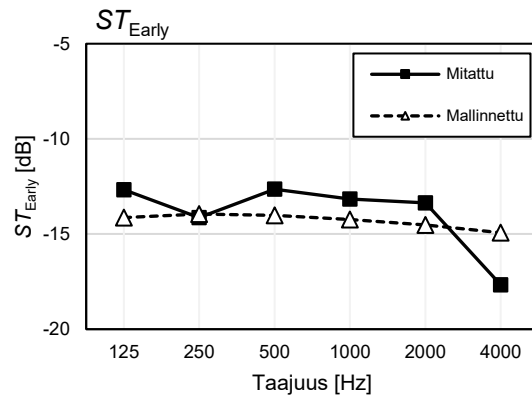


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteessä MP9.

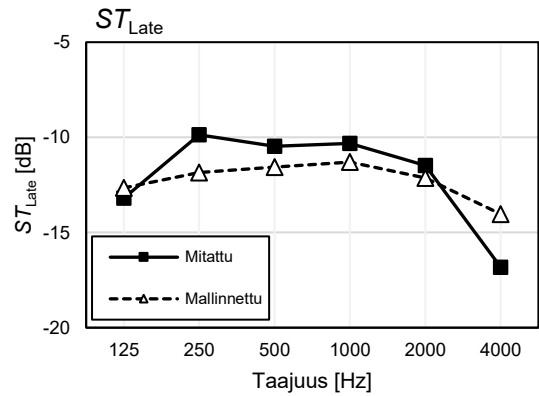
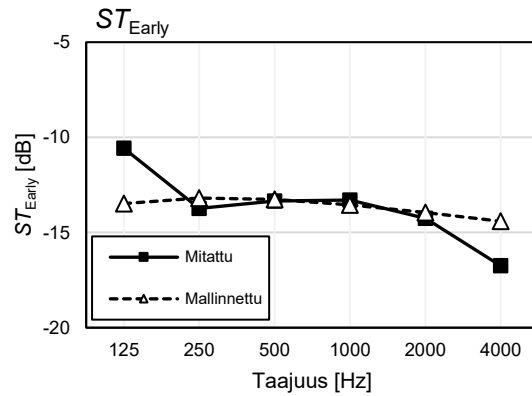


Lava-akustiikan mittaluvut

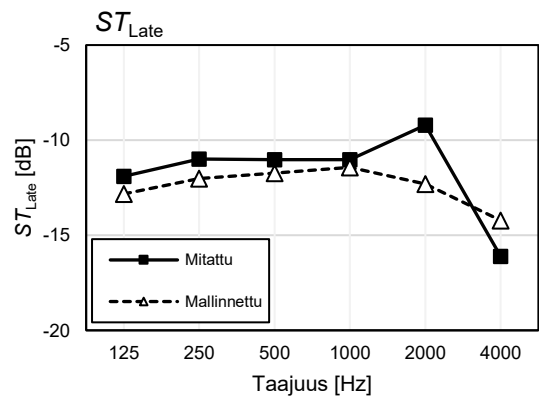
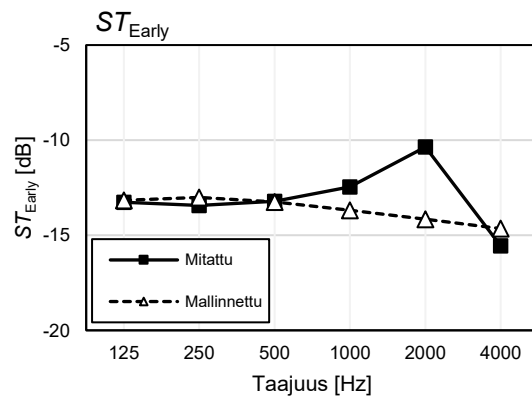
Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP10.



Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP11.

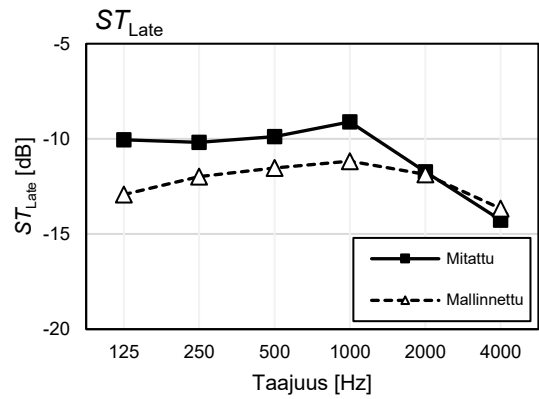
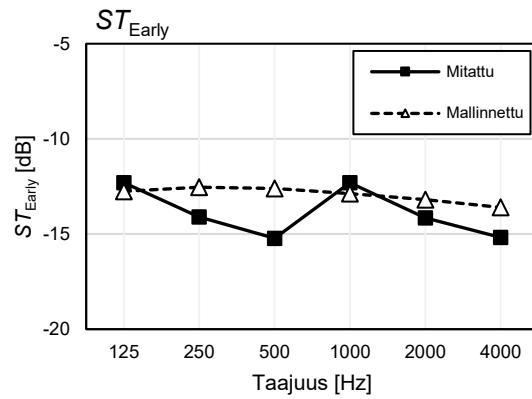


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteessä MP12.

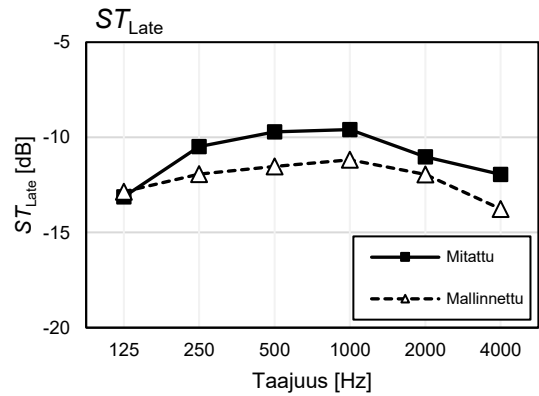
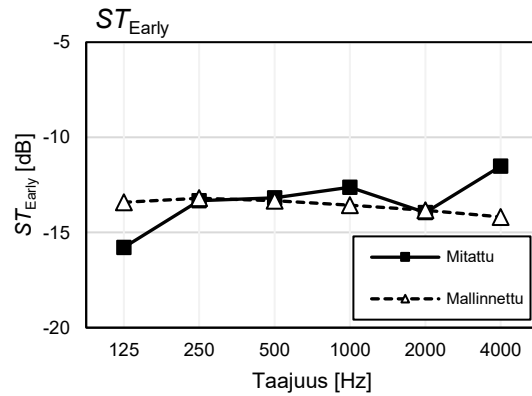


Lava-akustiikan mittaluvut

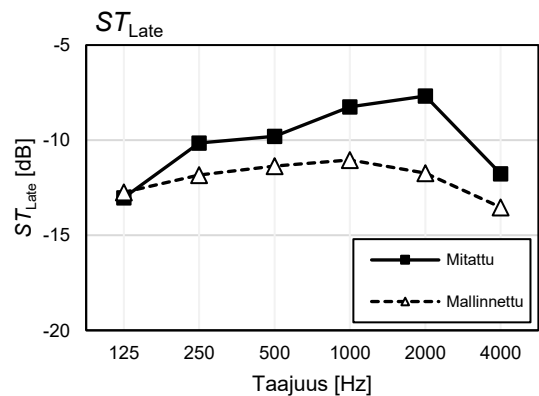
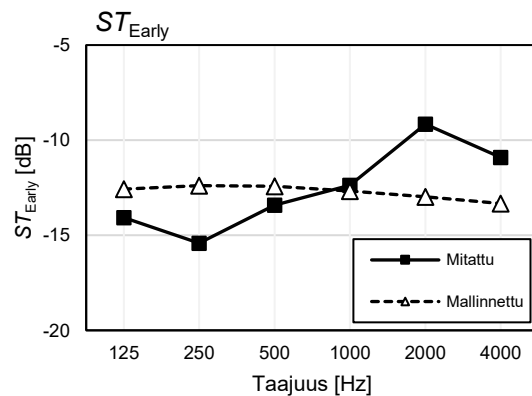
Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP13.



Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP14.

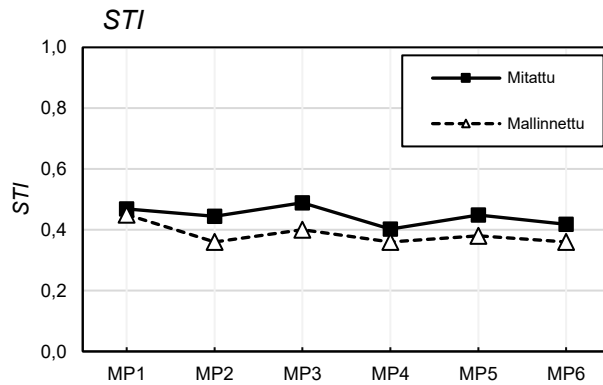


Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteessä MP15.



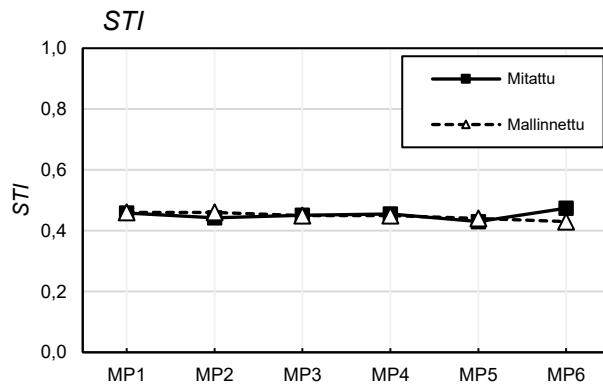
Puheensiirtoindeksi

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP1 tarkastelupisteissa MP1-MP6.



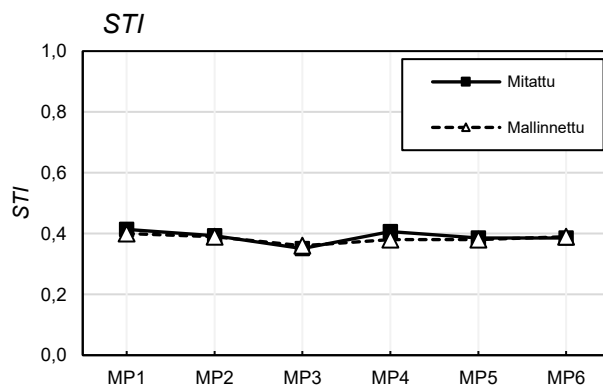
	Mitattu	Mallinnettu
MP1	0,47	0,45
MP2	0,44	0,36
MP3	0,49	0,40
MP4	0,40	0,36
MP5	0,45	0,38
MP6	0,42	0,36

Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP2 tarkastelupisteissa MP1-MP6.



	Mitattu	Mallinnettu
MP1	0,46	0,46
MP2	0,44	0,46
MP3	0,45	0,45
MP4	0,46	0,45
MP5	0,43	0,44
MP6	0,47	0,43

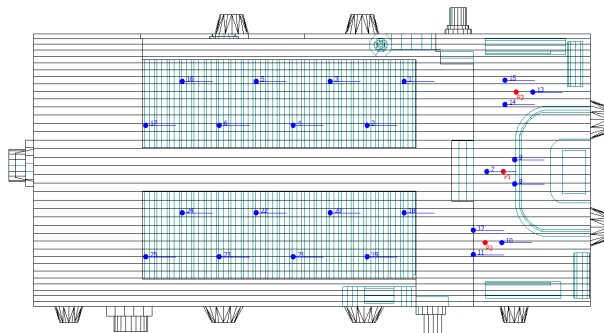
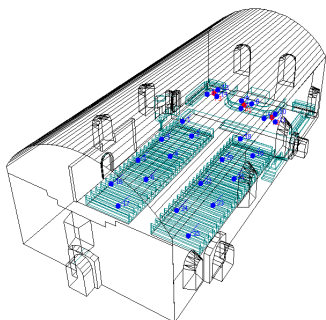
Mittaus- ja mallinnustulokset kaiutinpaikalla KP3 tarkastelupisteissa MP1-MP6.



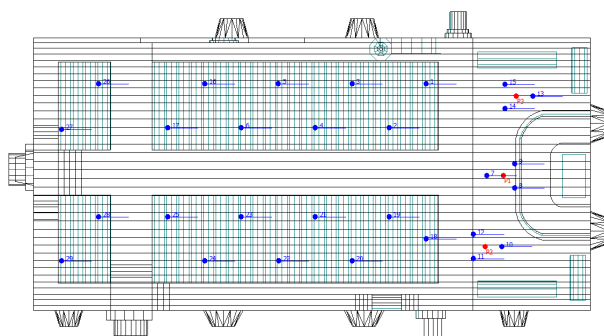
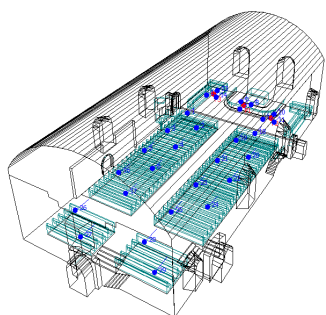
	Mitattu	Mallinnettu
MP1	0,41	0,40
MP2	0,39	0,39
MP3	0,35	0,36
MP4	0,41	0,38
MP5	0,39	0,38
MP6	0,39	0,39

Liite 3: Mallinnettujen rakennusvaiheiden geometria sekä äänilähteiden ja vastaanottopisteiden sijainnit

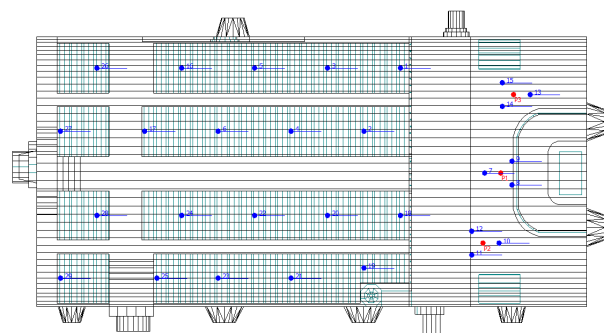
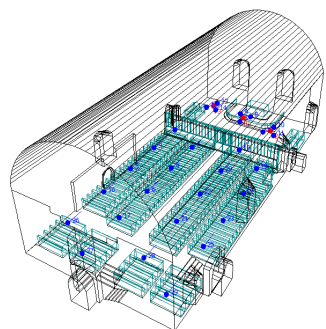
2021



1870



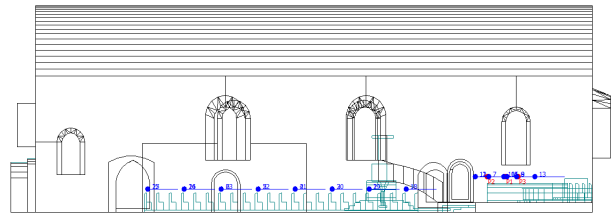
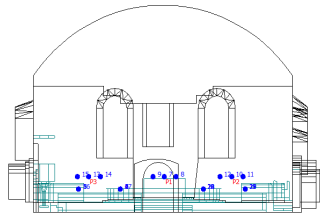
1777



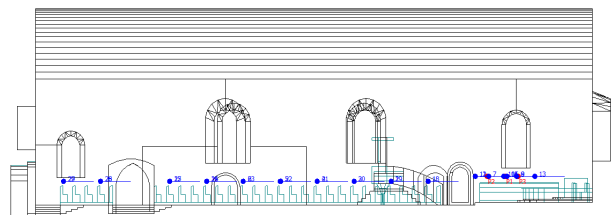
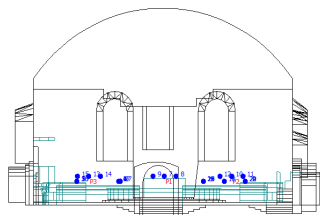
Äänilähde: ● P1

Vastaanottopiste: ● 1

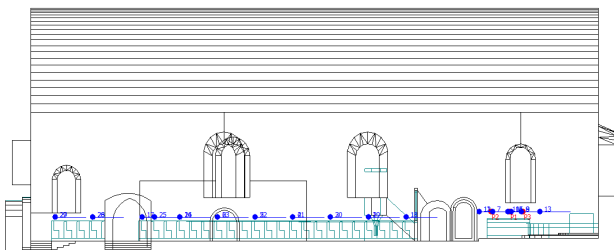
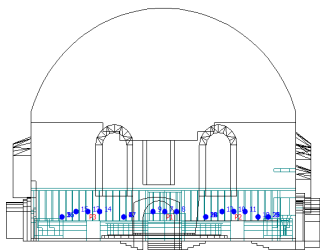
2021



1870



1777

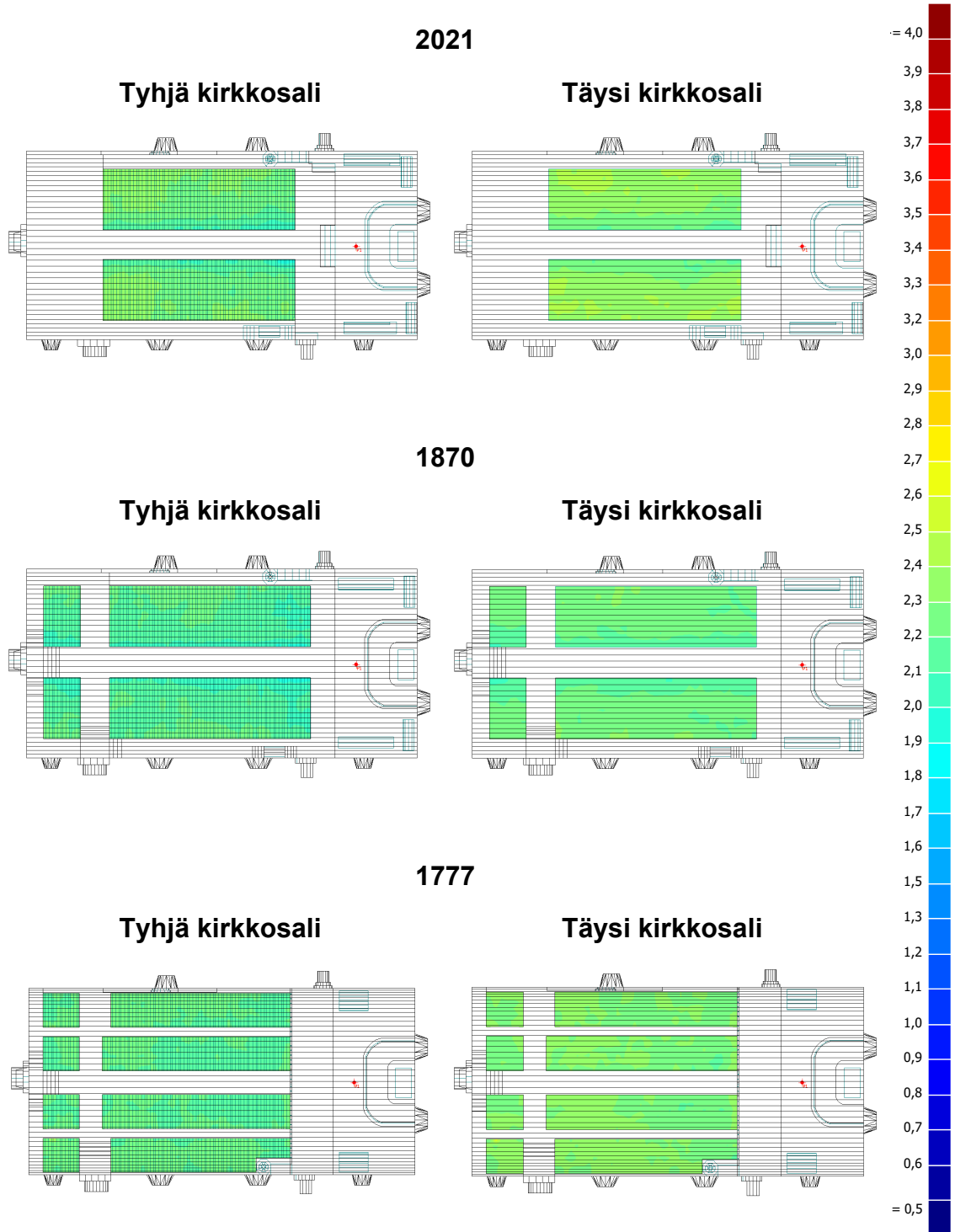


Äänilähde: ● P1

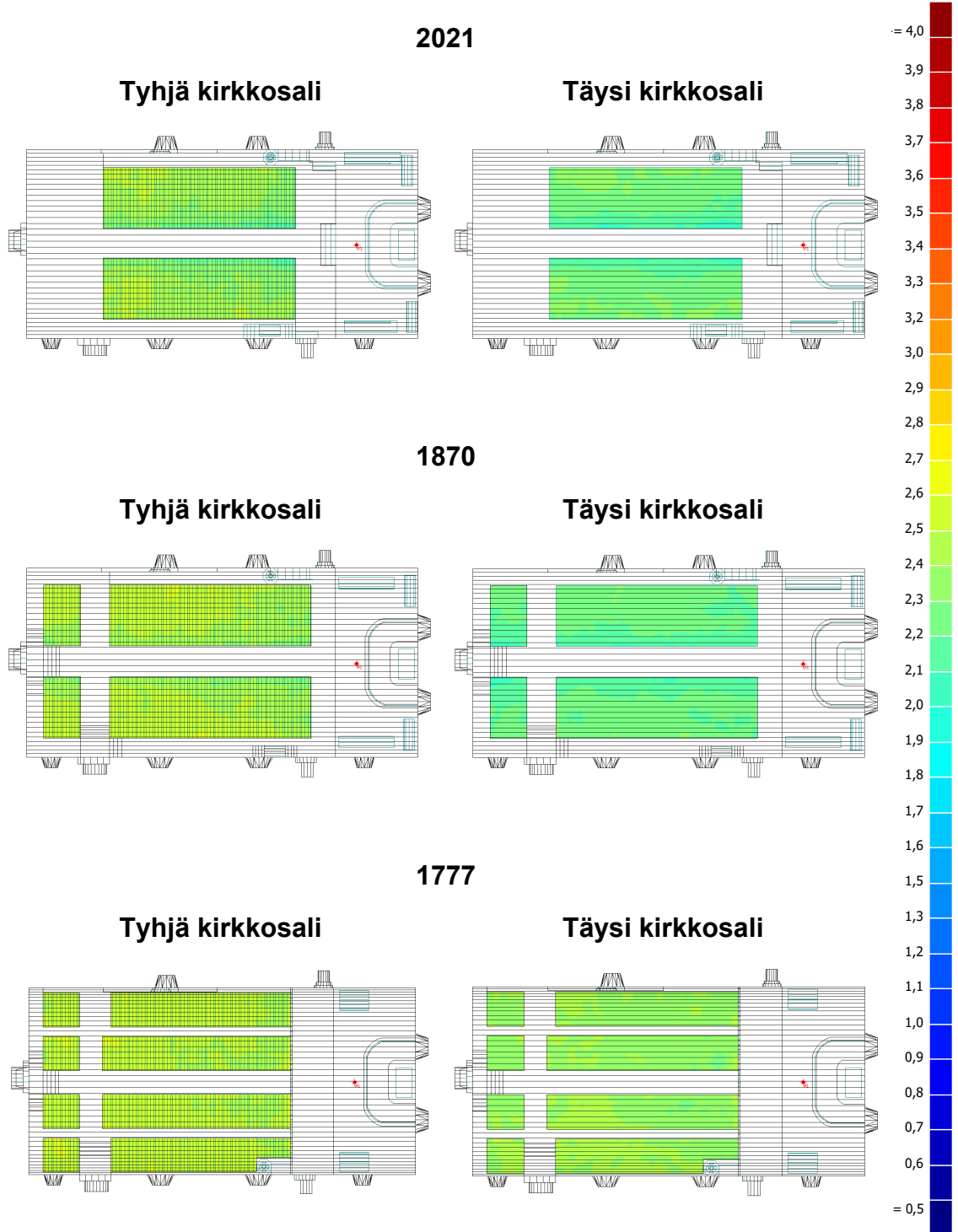
Vastaanottopiste: ● 1

Liite 4: Huoneakustisten mittalukujen verkot

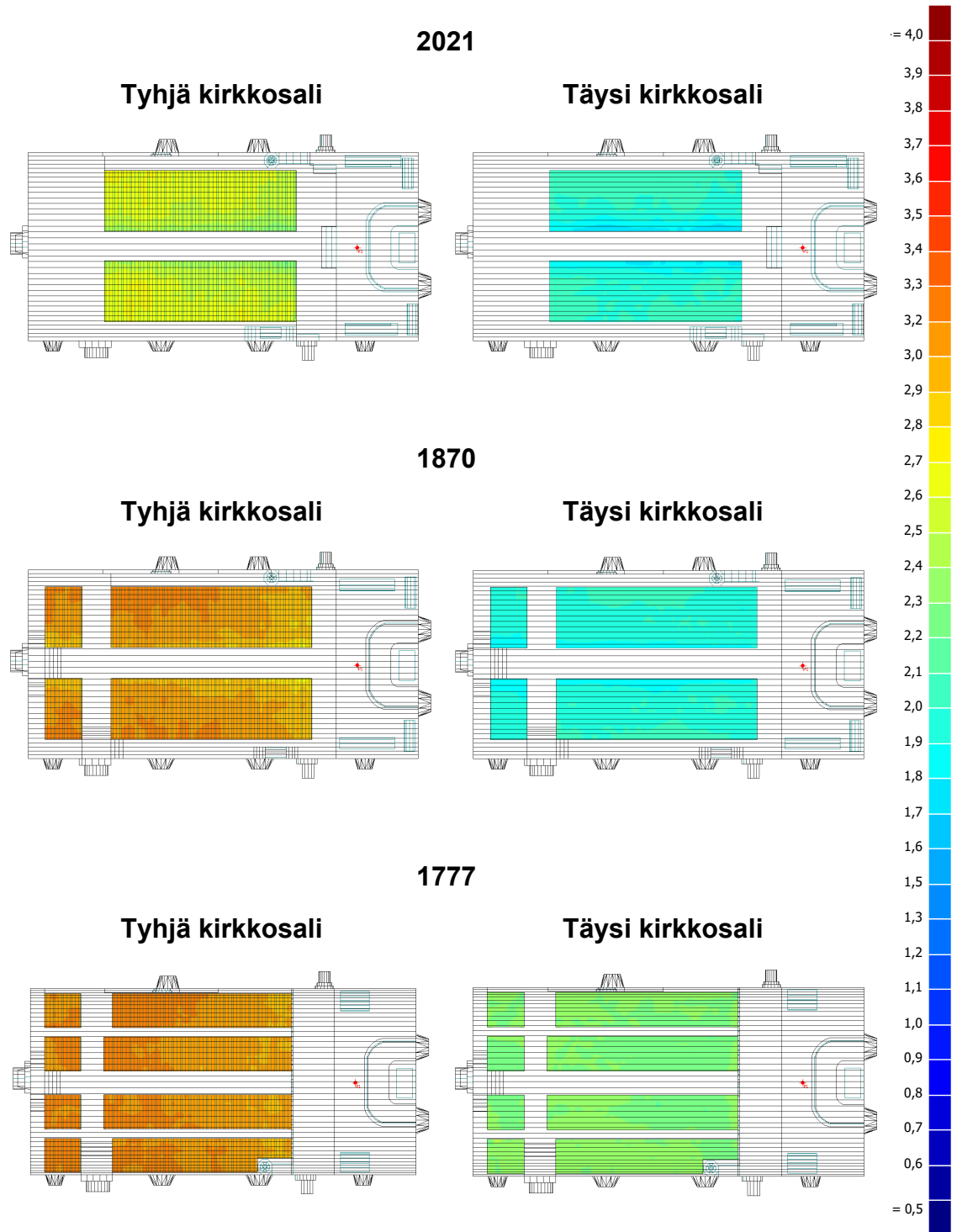
EDT 125 Hz



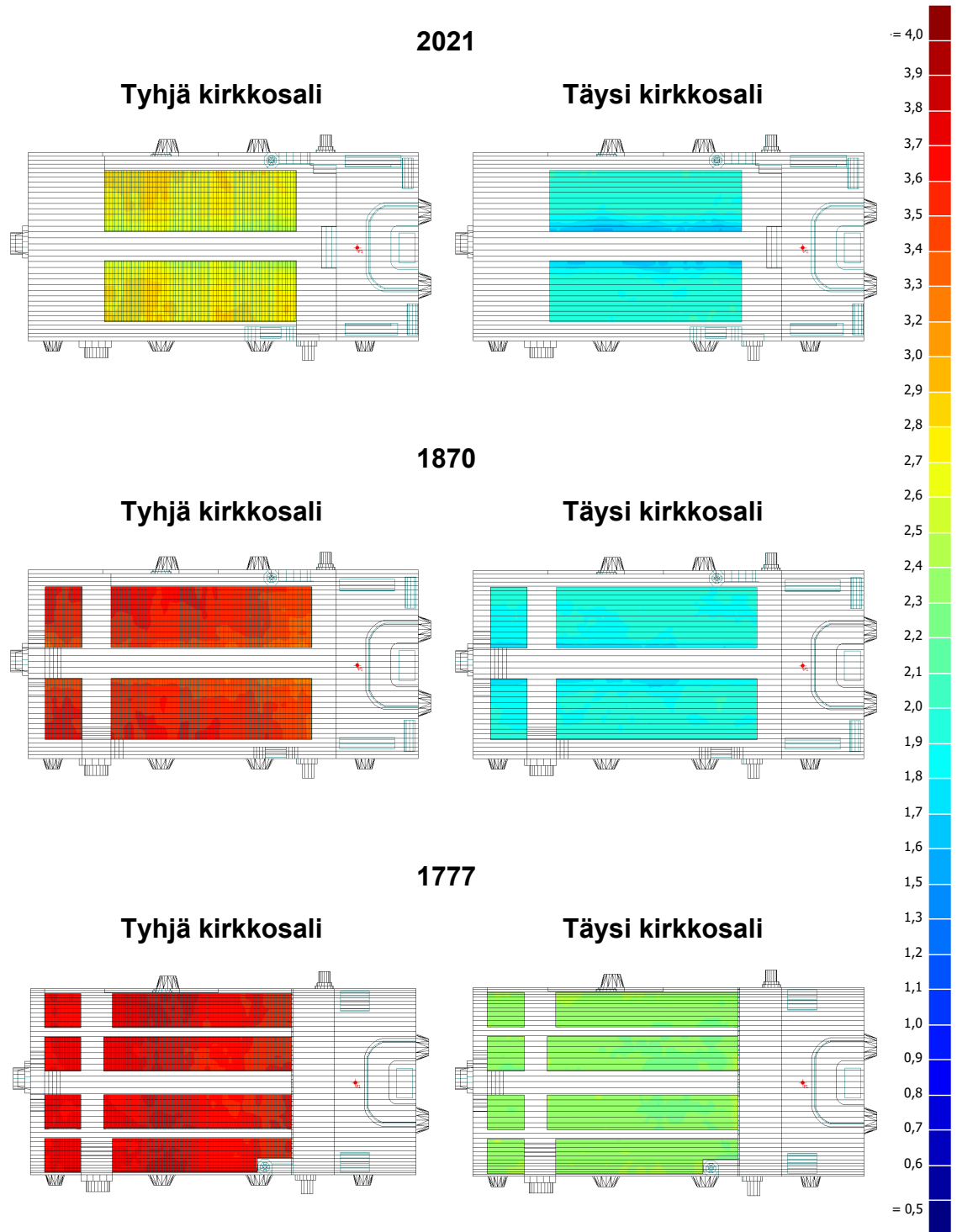
EDT 250 Hz



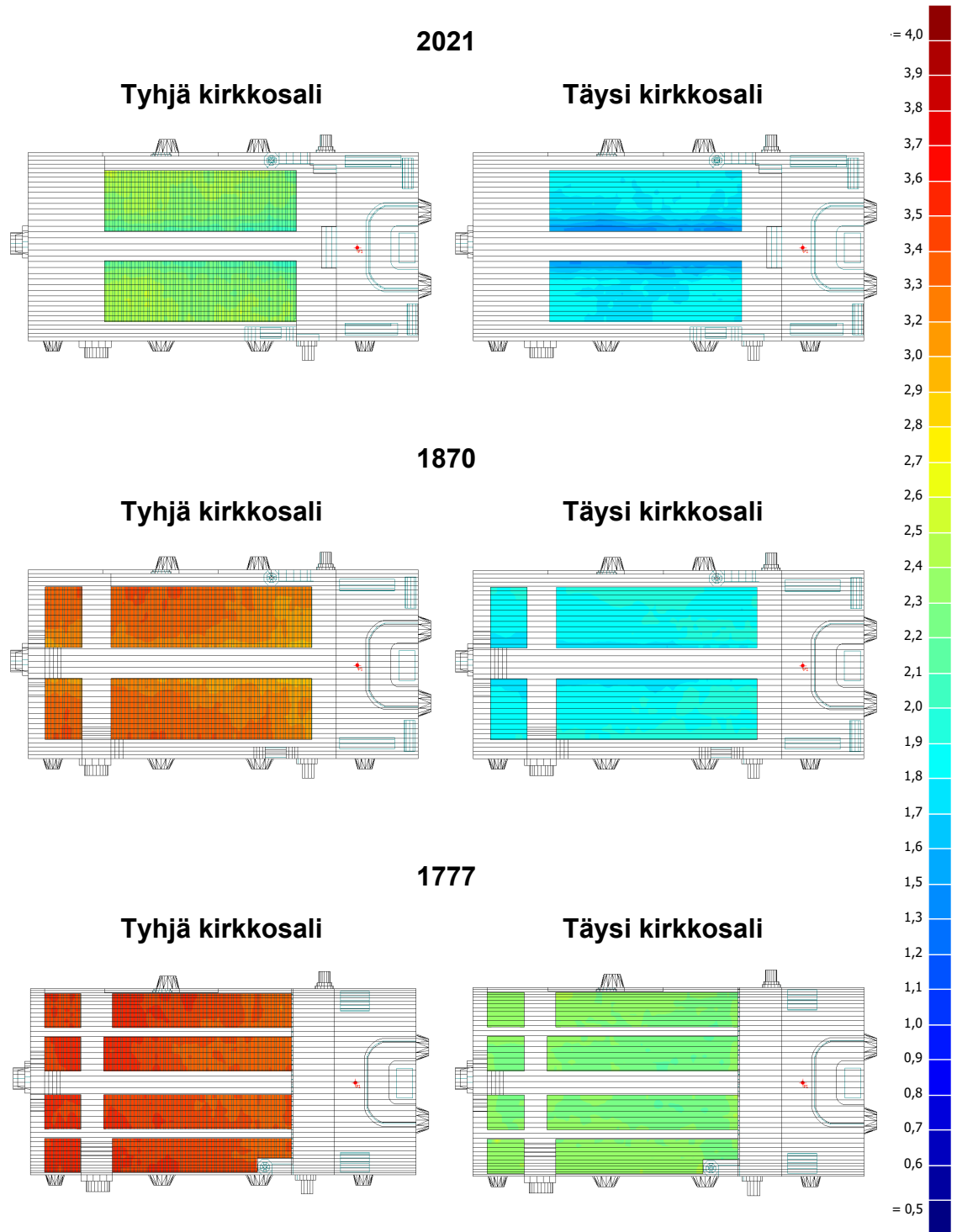
EDT 500 Hz



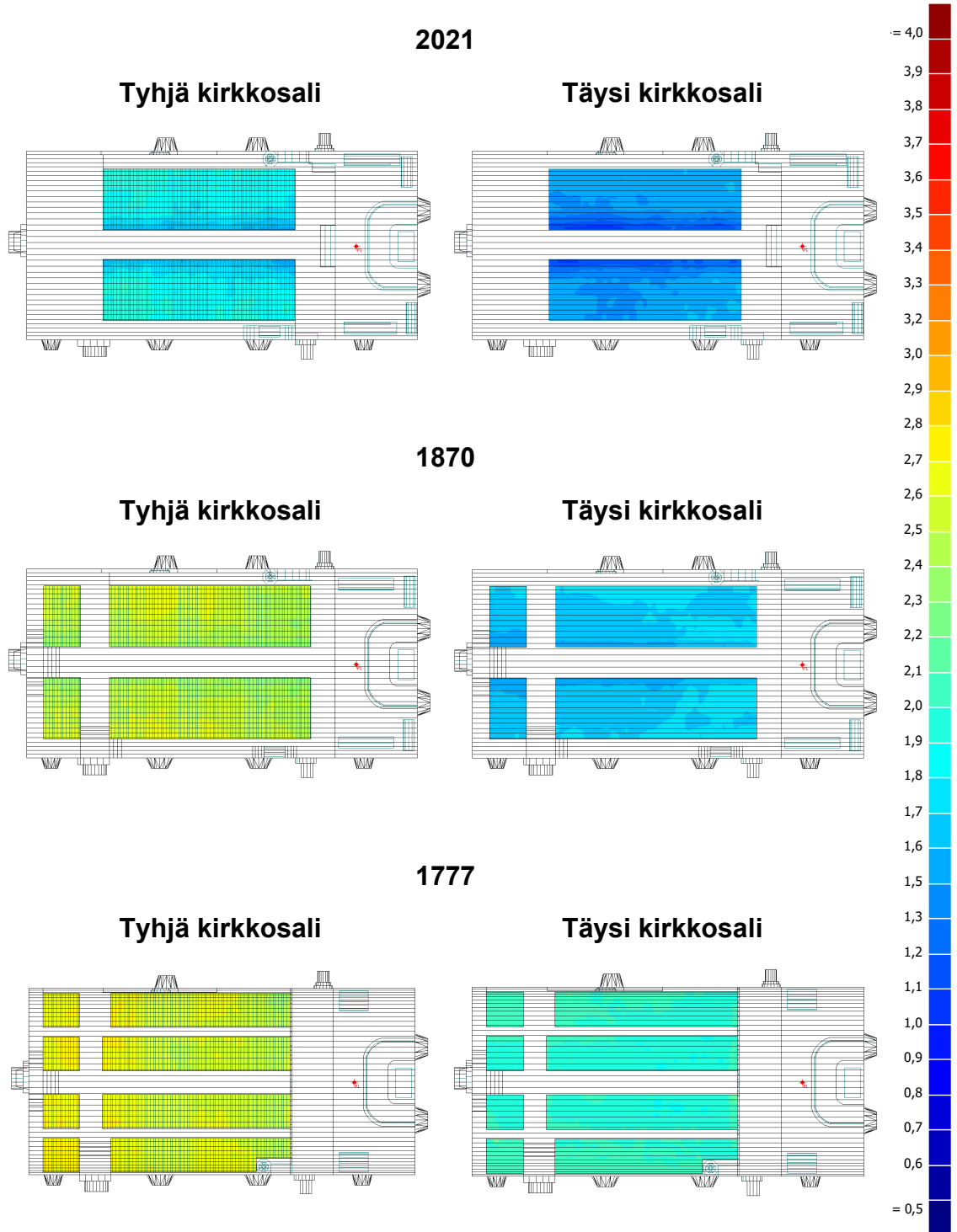
EDT 1000 Hz



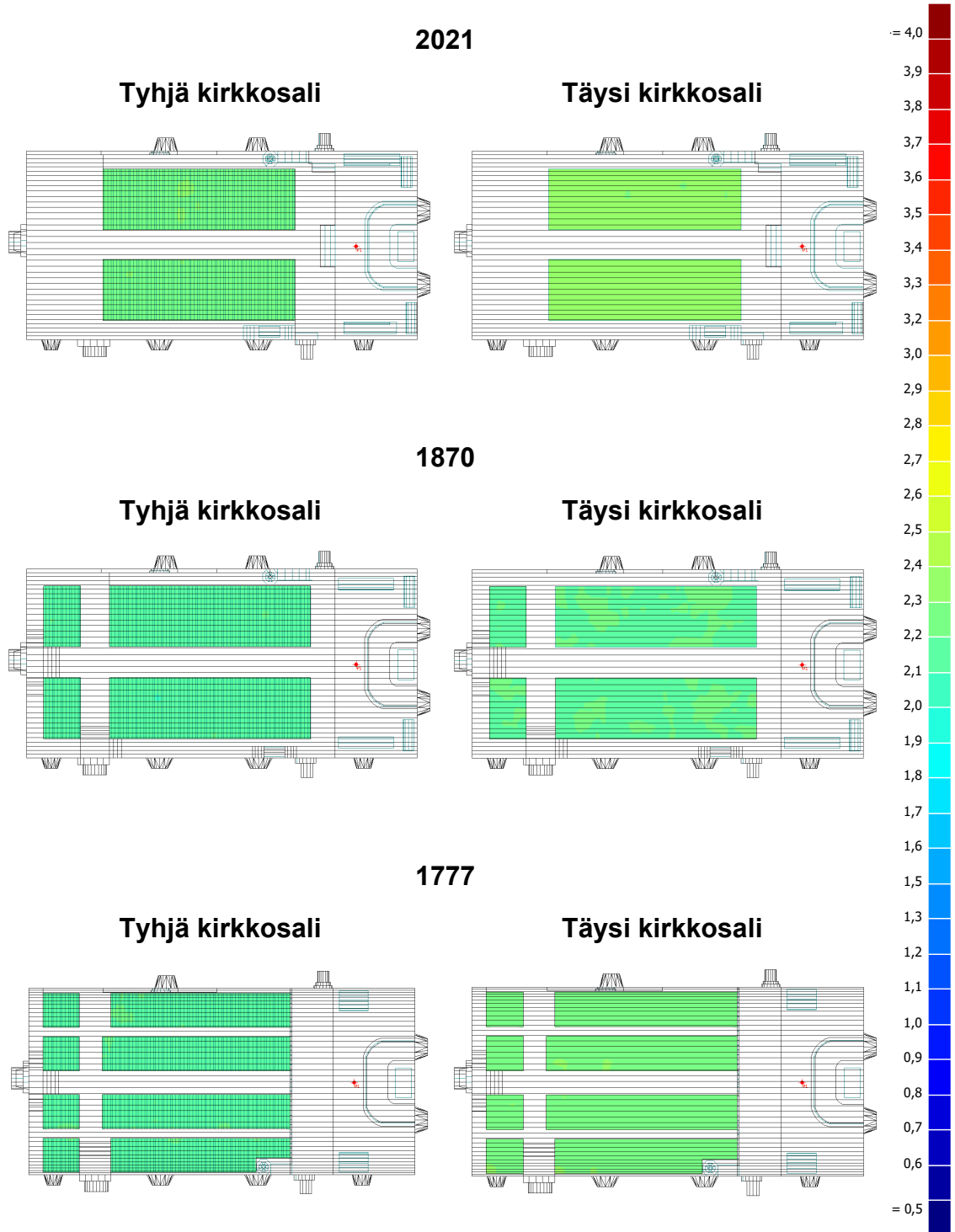
EDT 2000 Hz



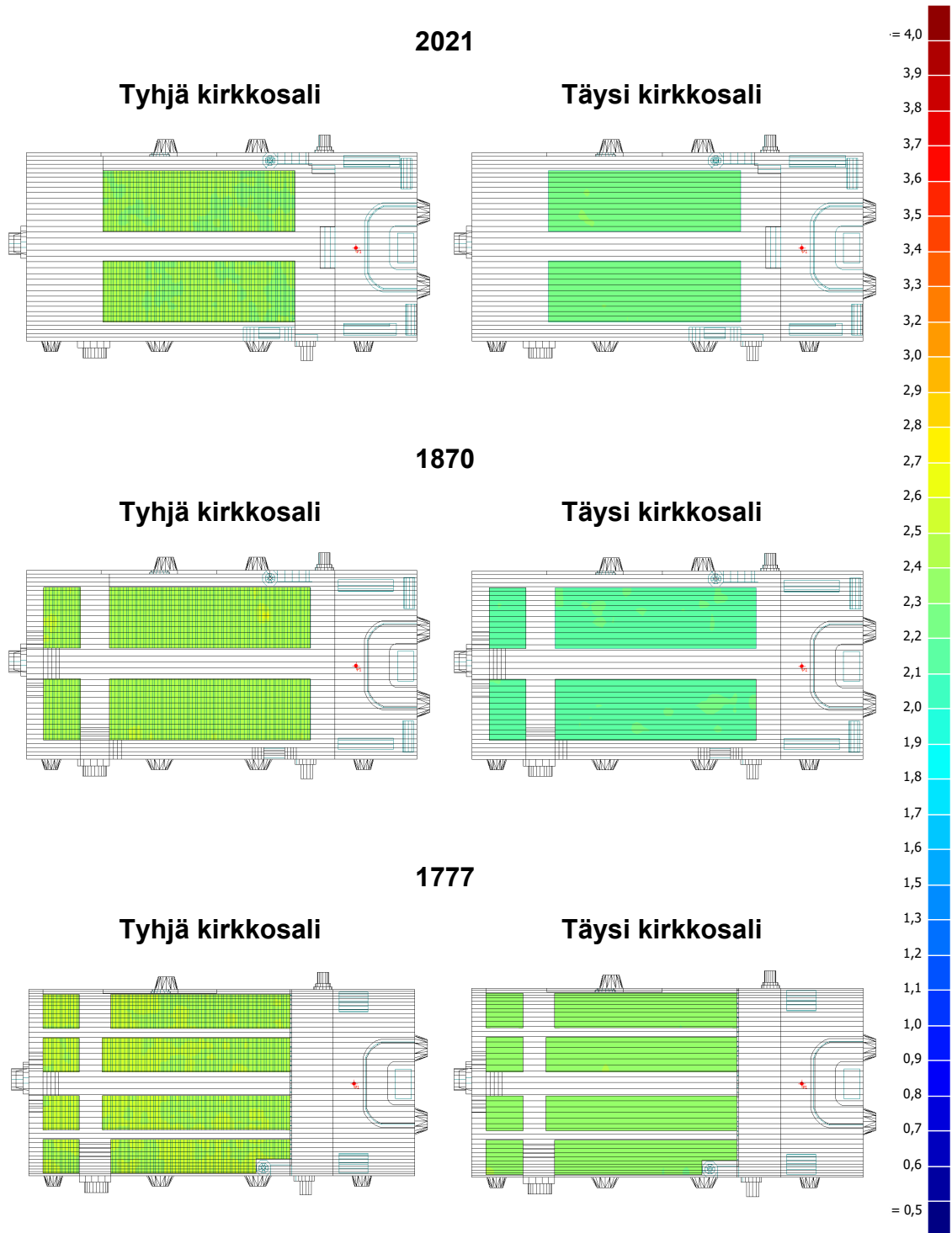
EDT 4000 Hz



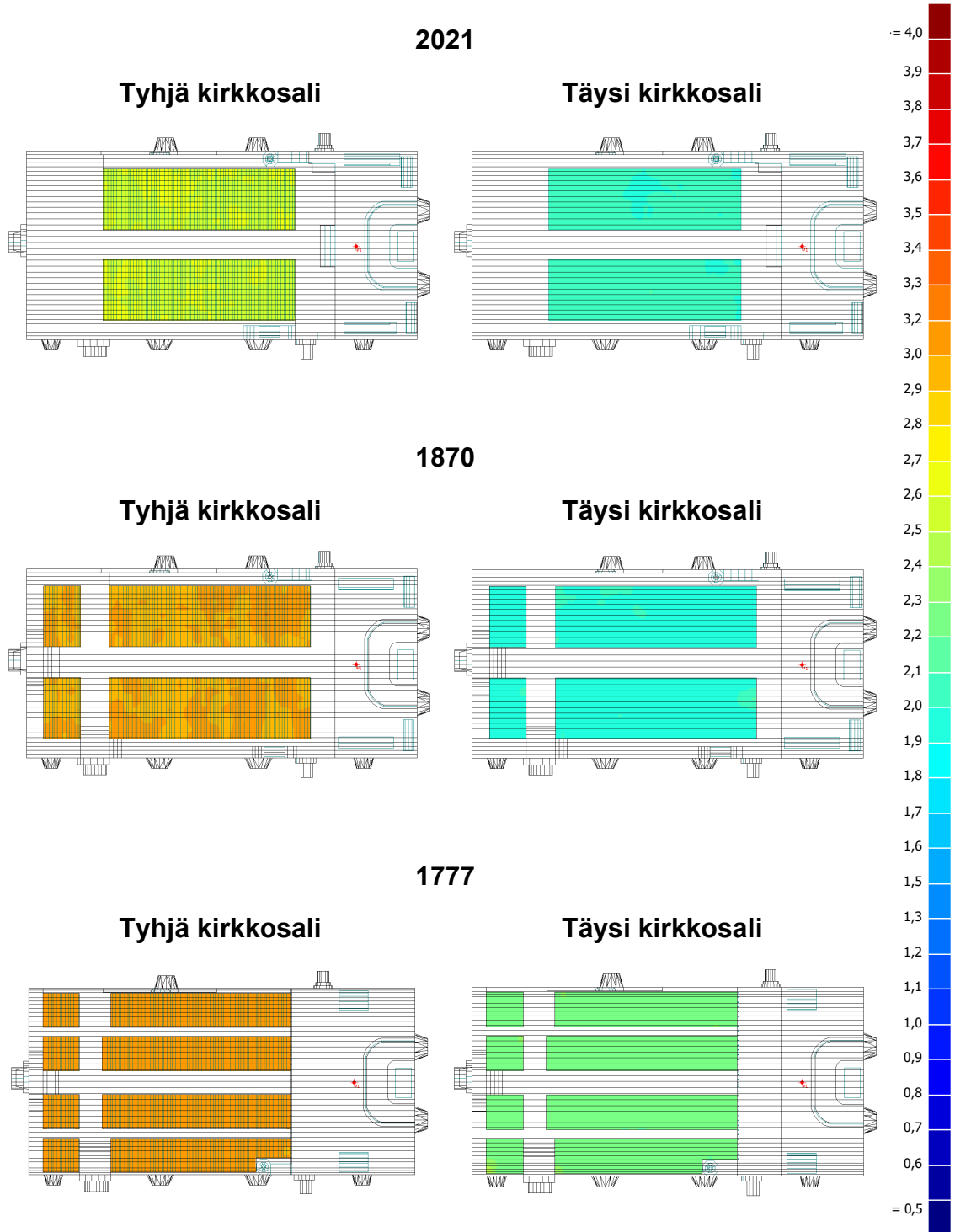
T_{30} 125 Hz



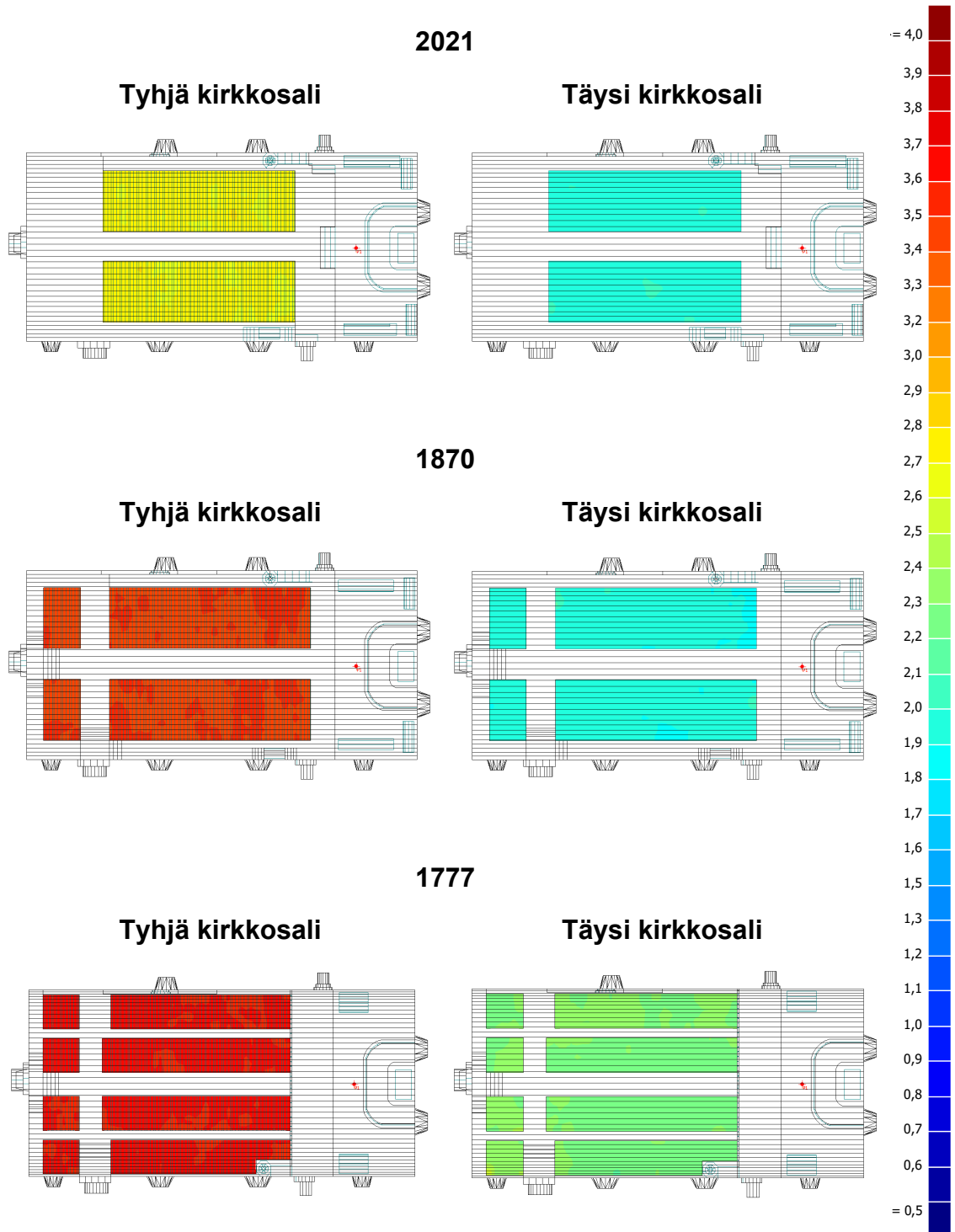
T_{30} 250 Hz



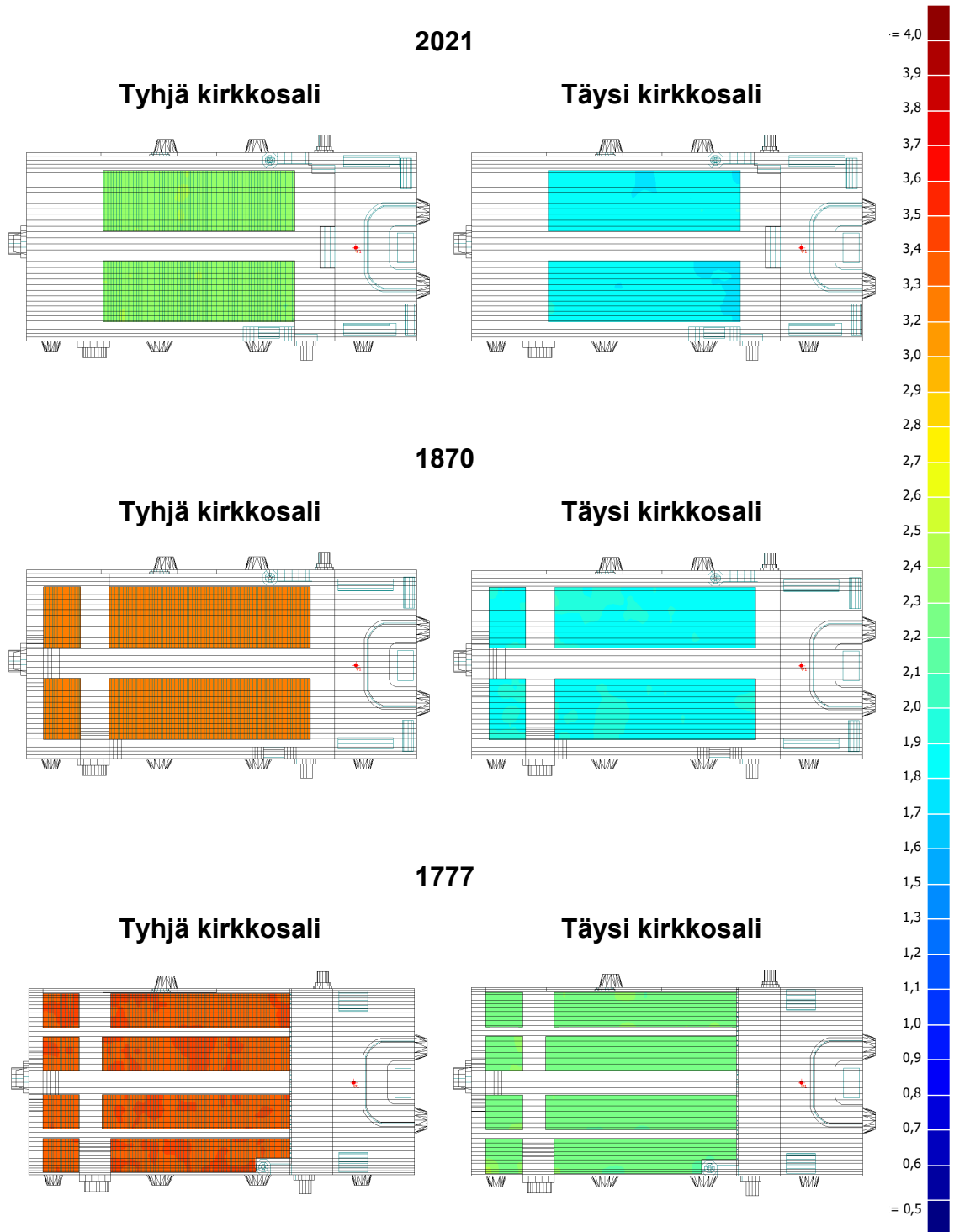
T_{30} 500 Hz



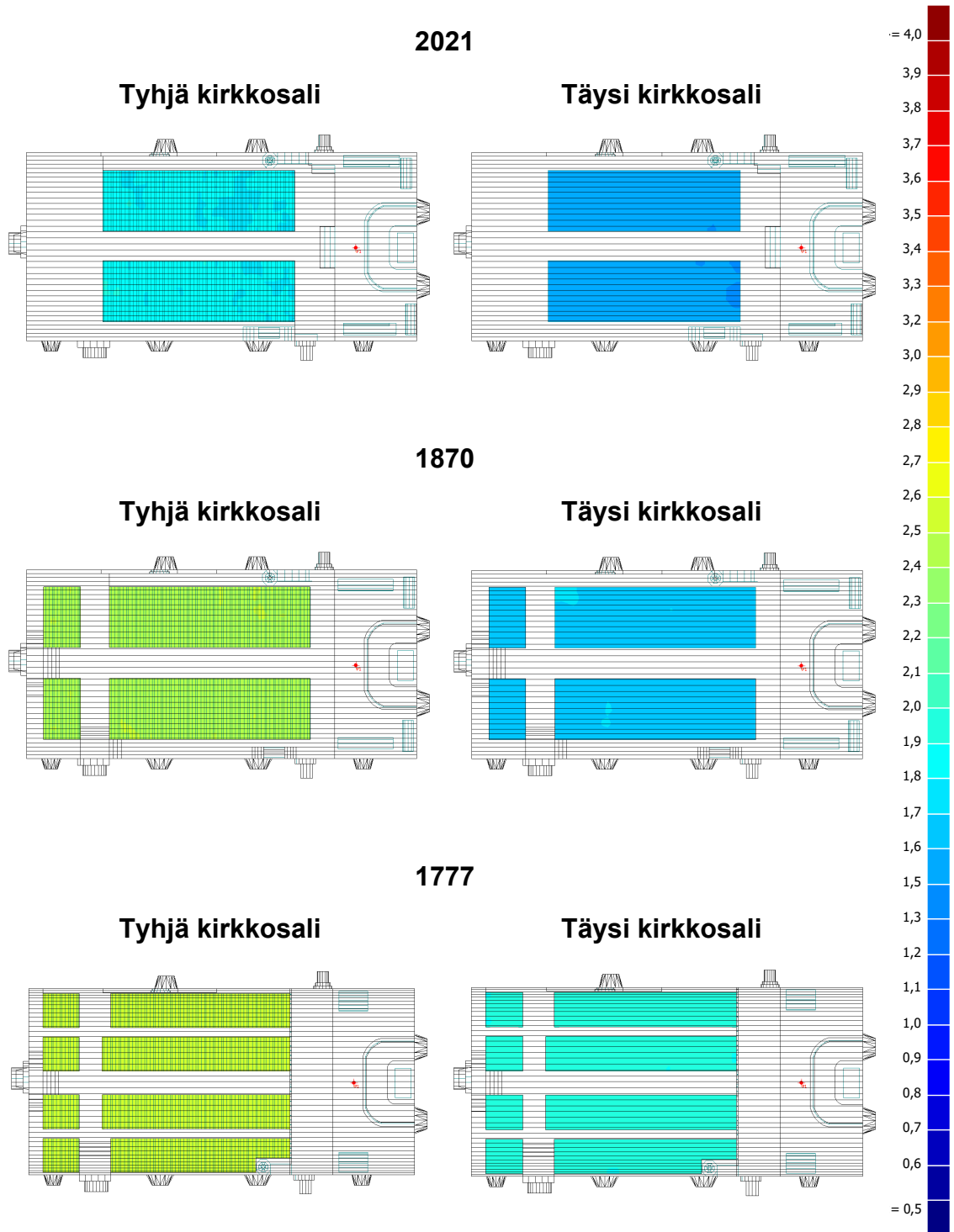
T_{30} 1000 Hz



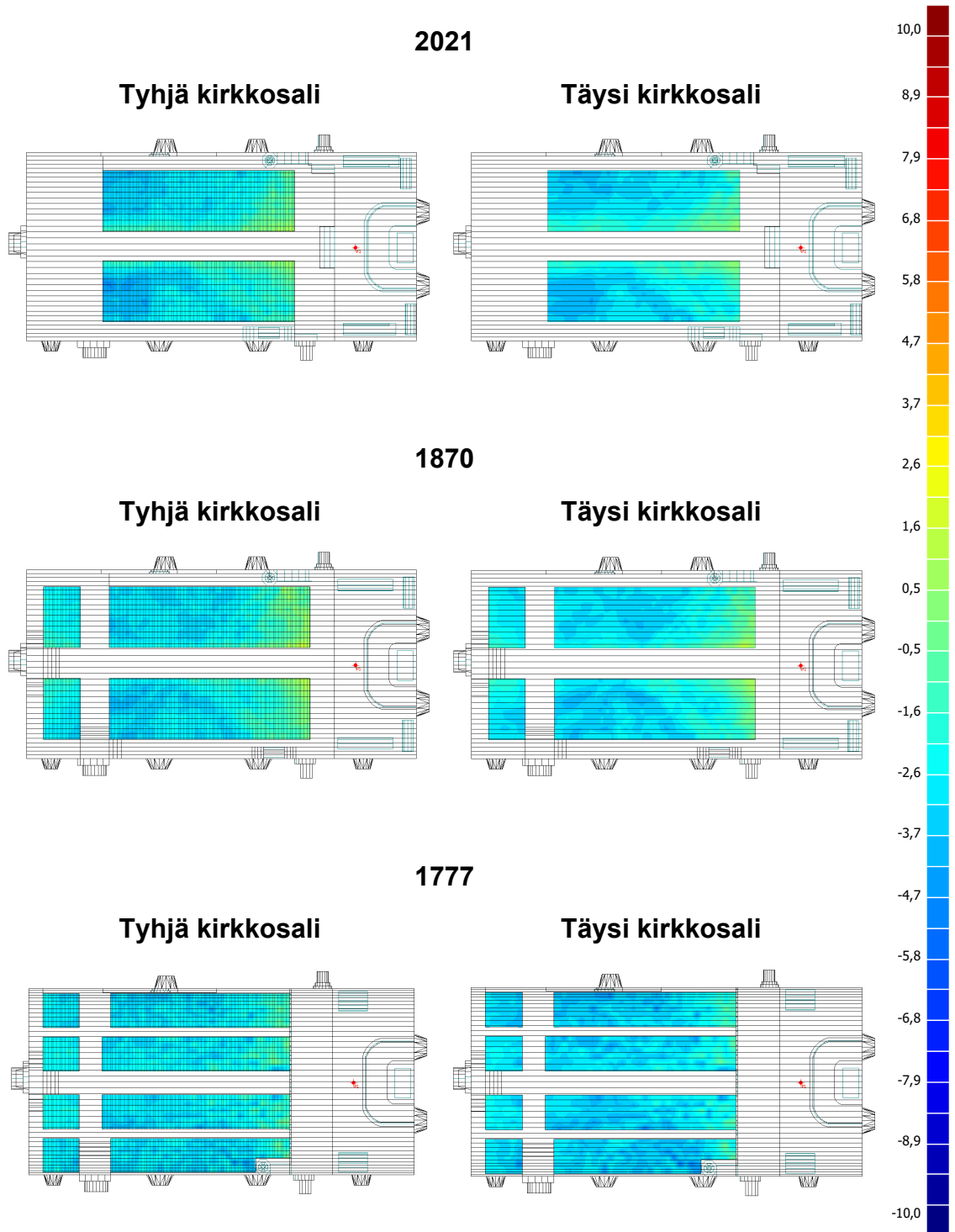
T_{30} 2000 Hz



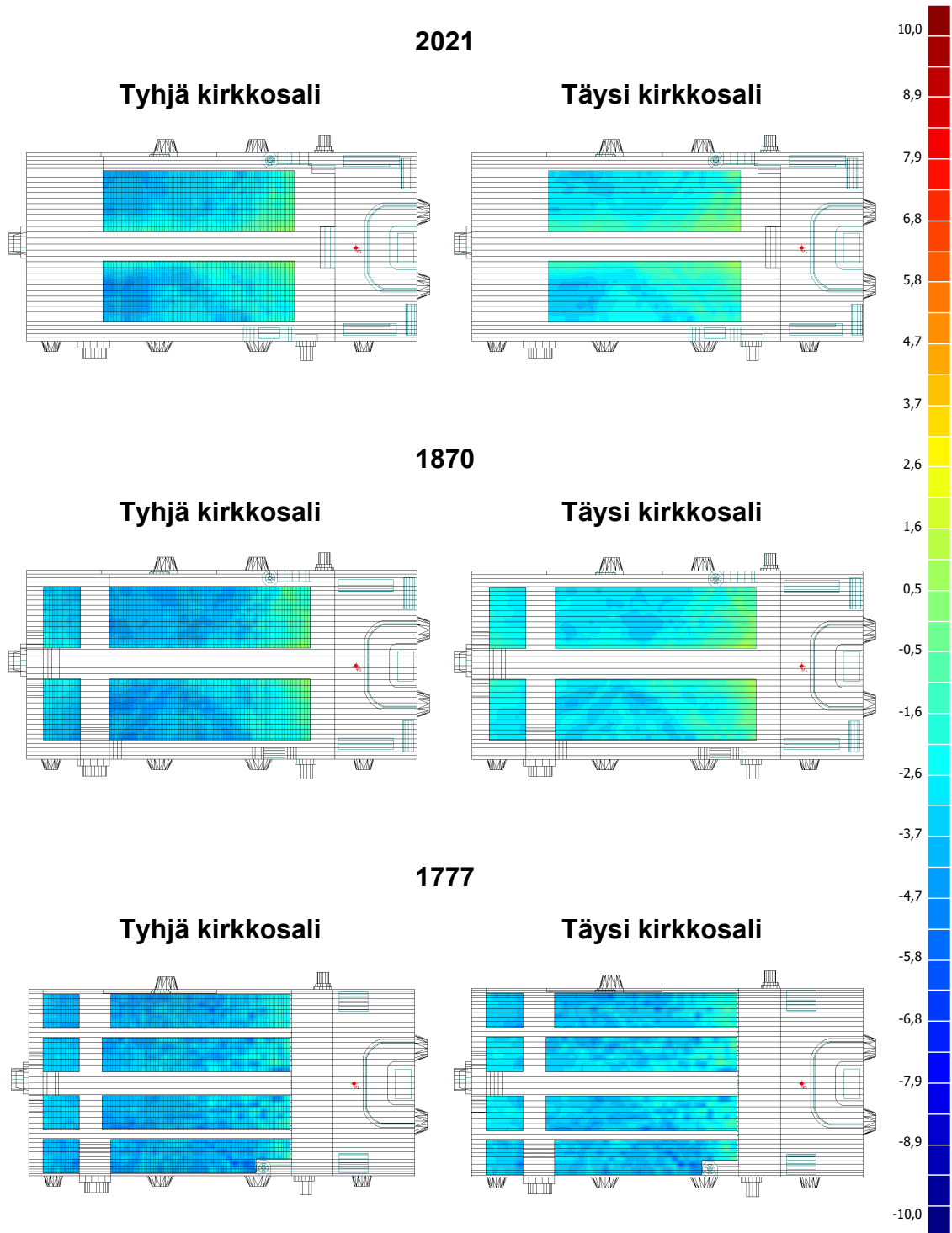
T_{30} 4000 Hz



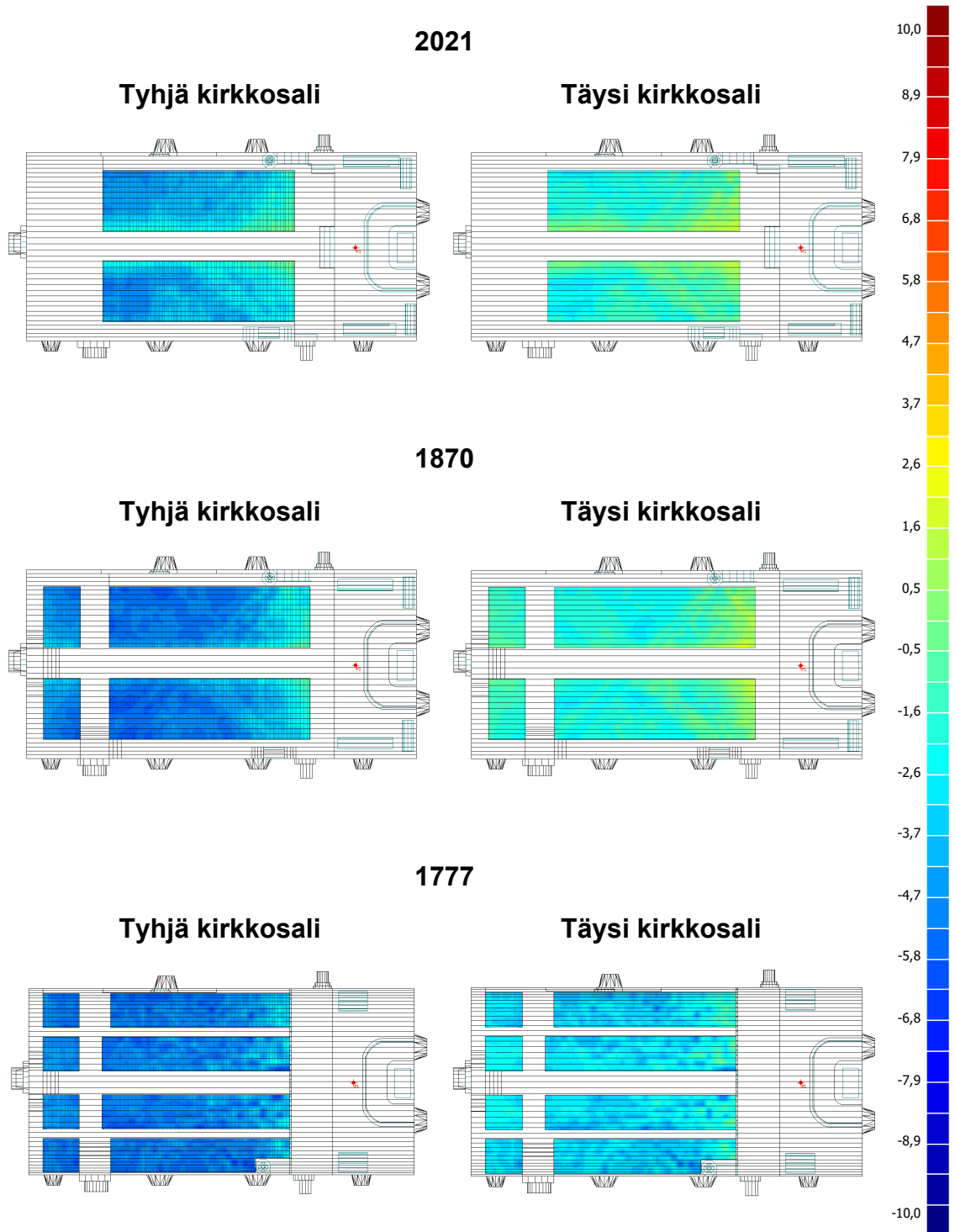
C₈₀ 125 Hz



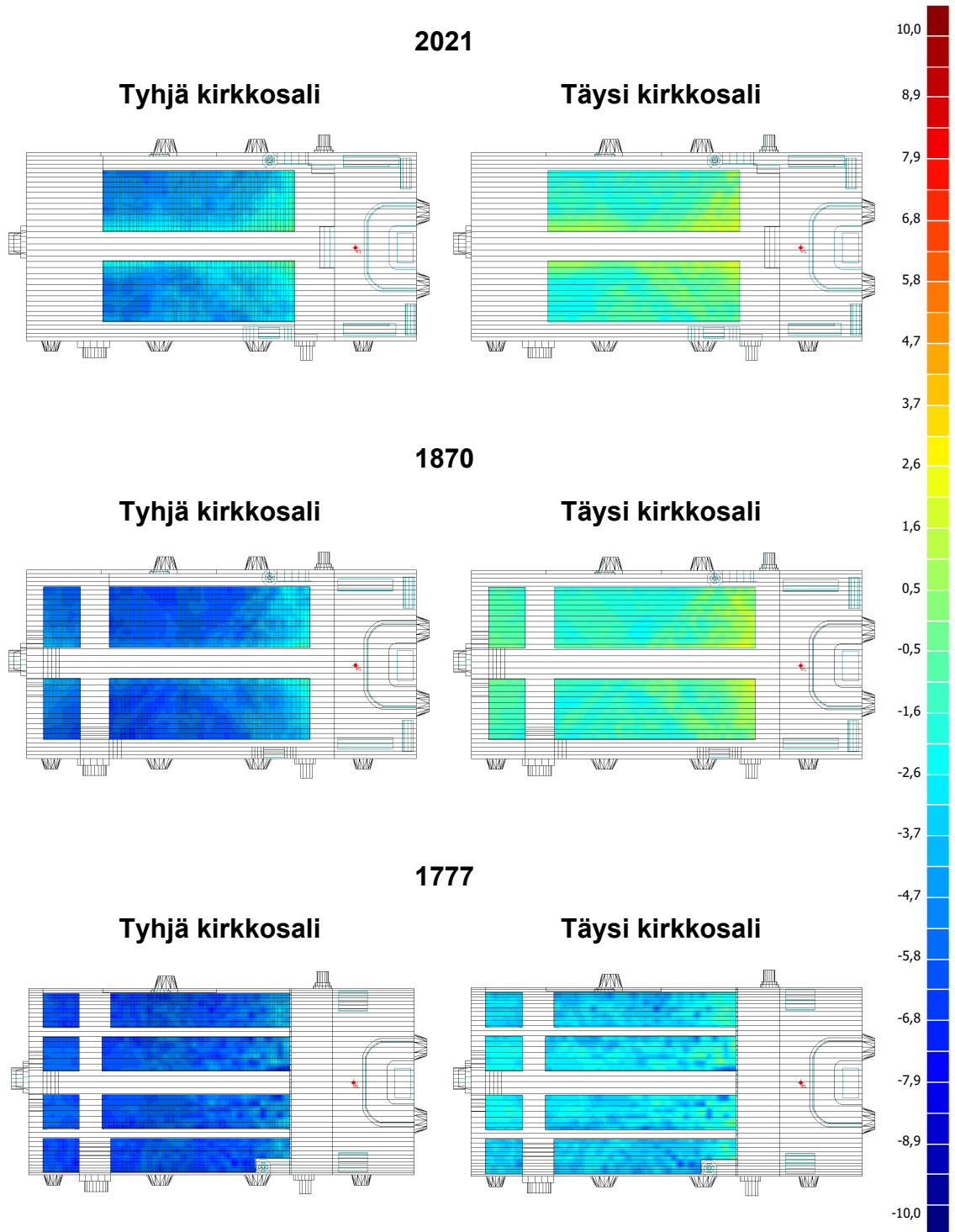
C₈₀ 250 Hz



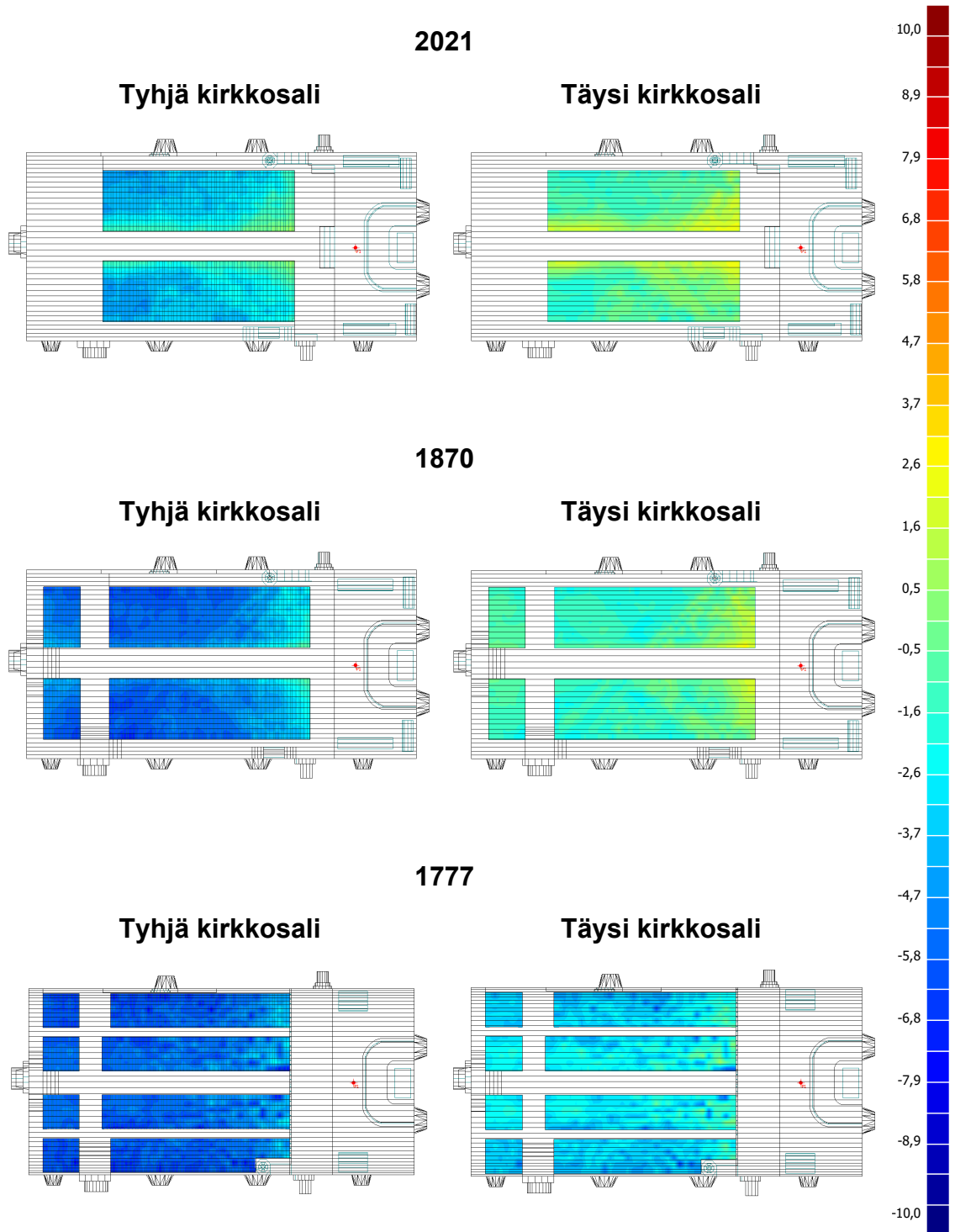
C₈₀ 500 Hz



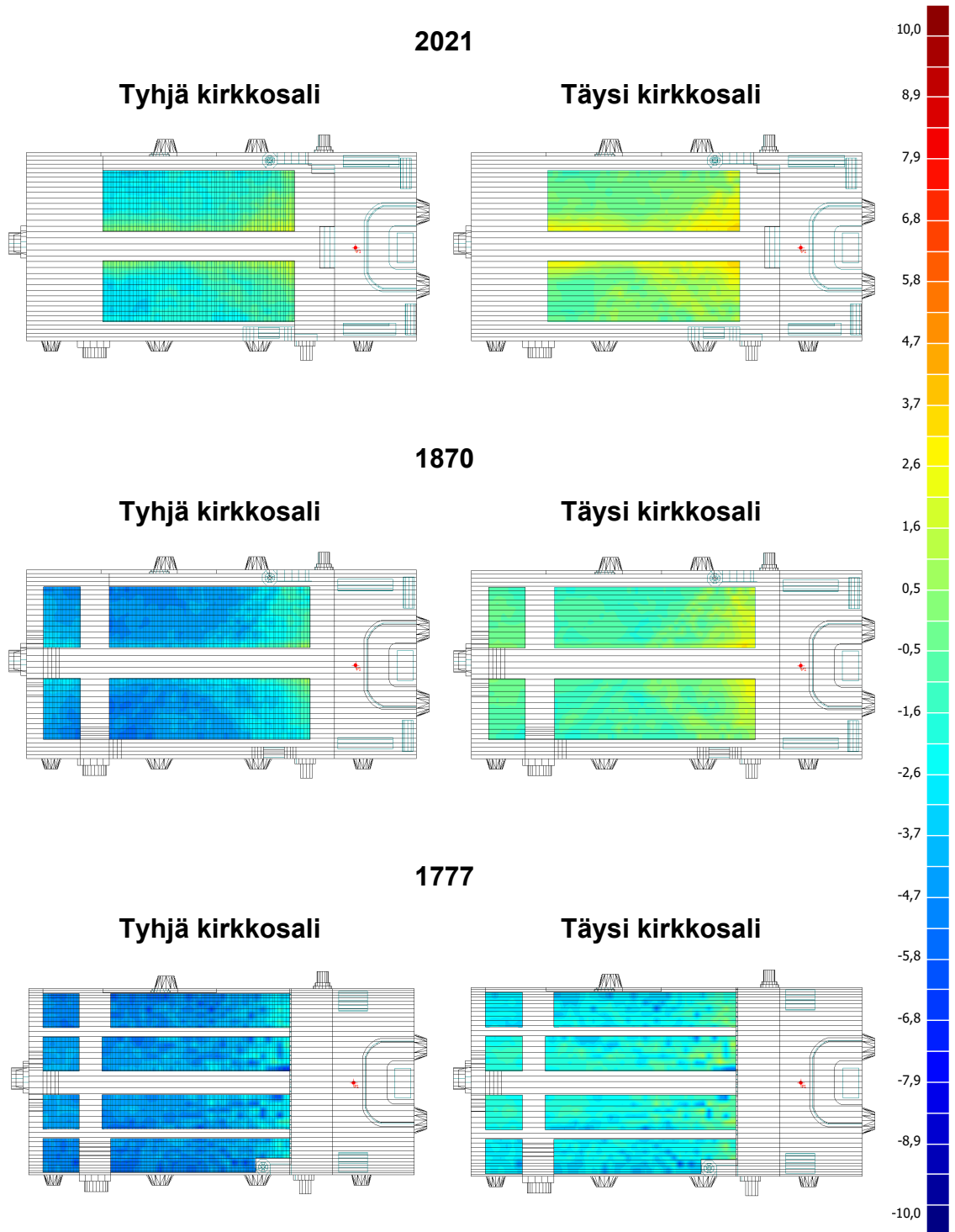
C₈₀ 1000 Hz



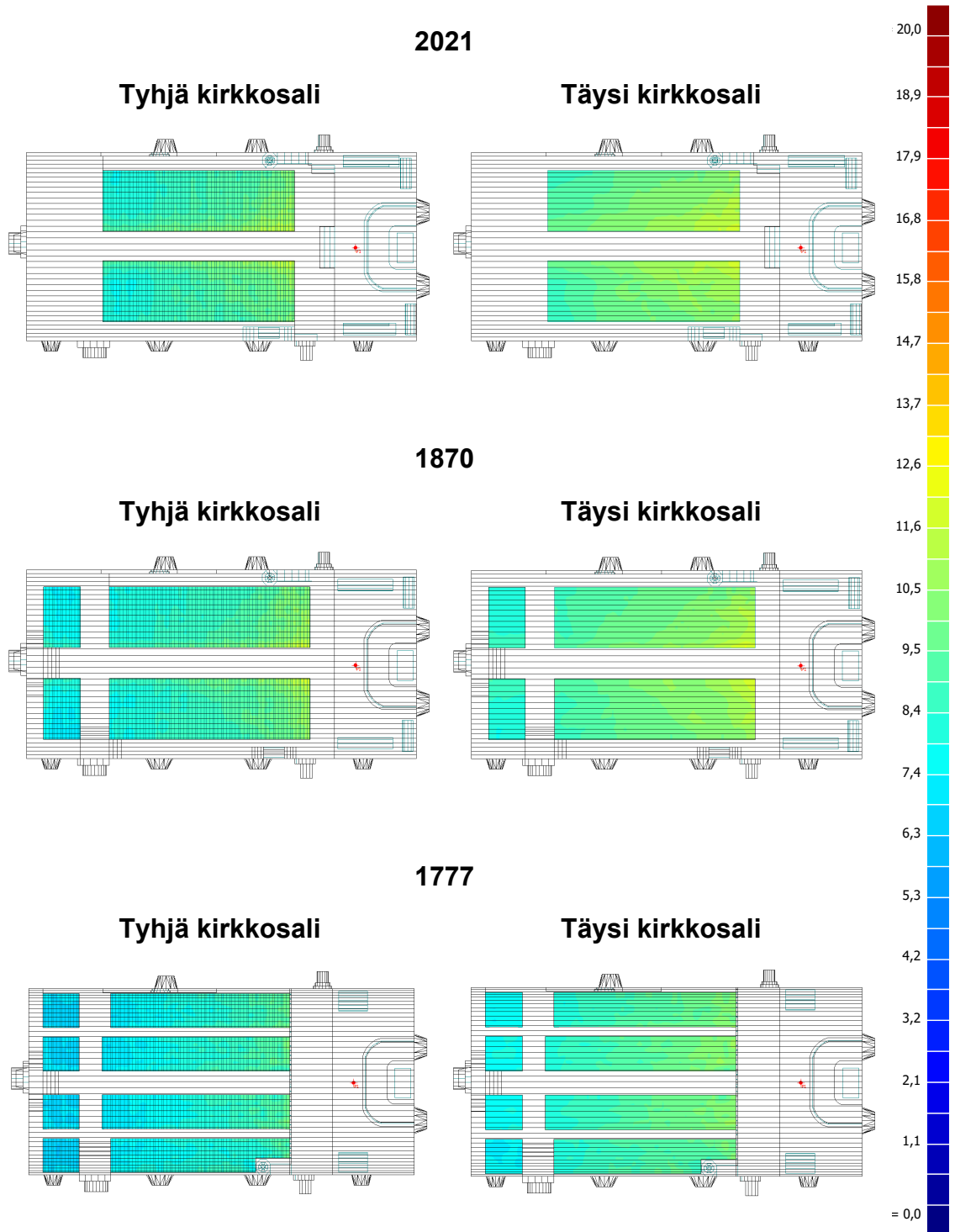
C₈₀ 2000 Hz



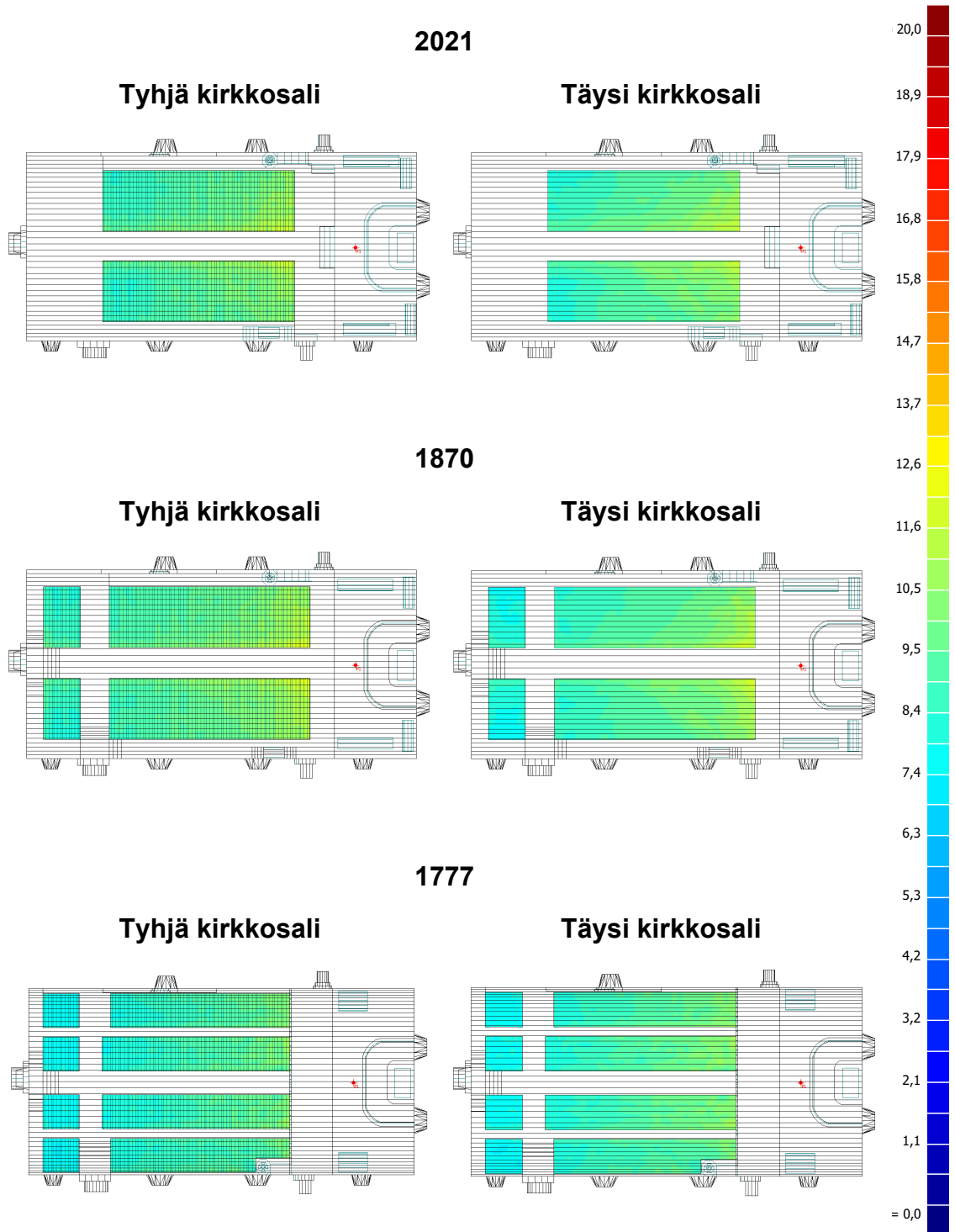
C₈₀ 4000 Hz



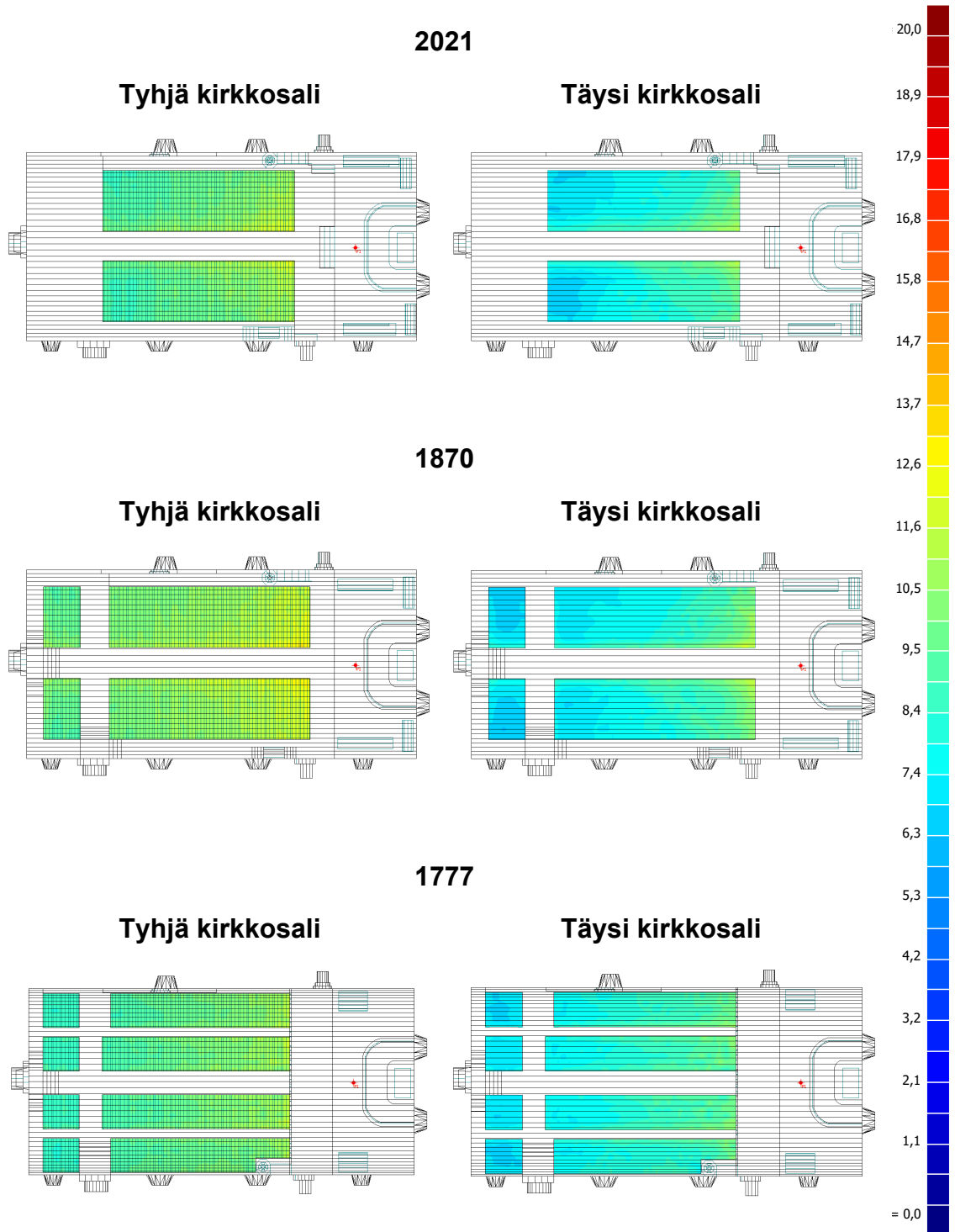
G 125 Hz



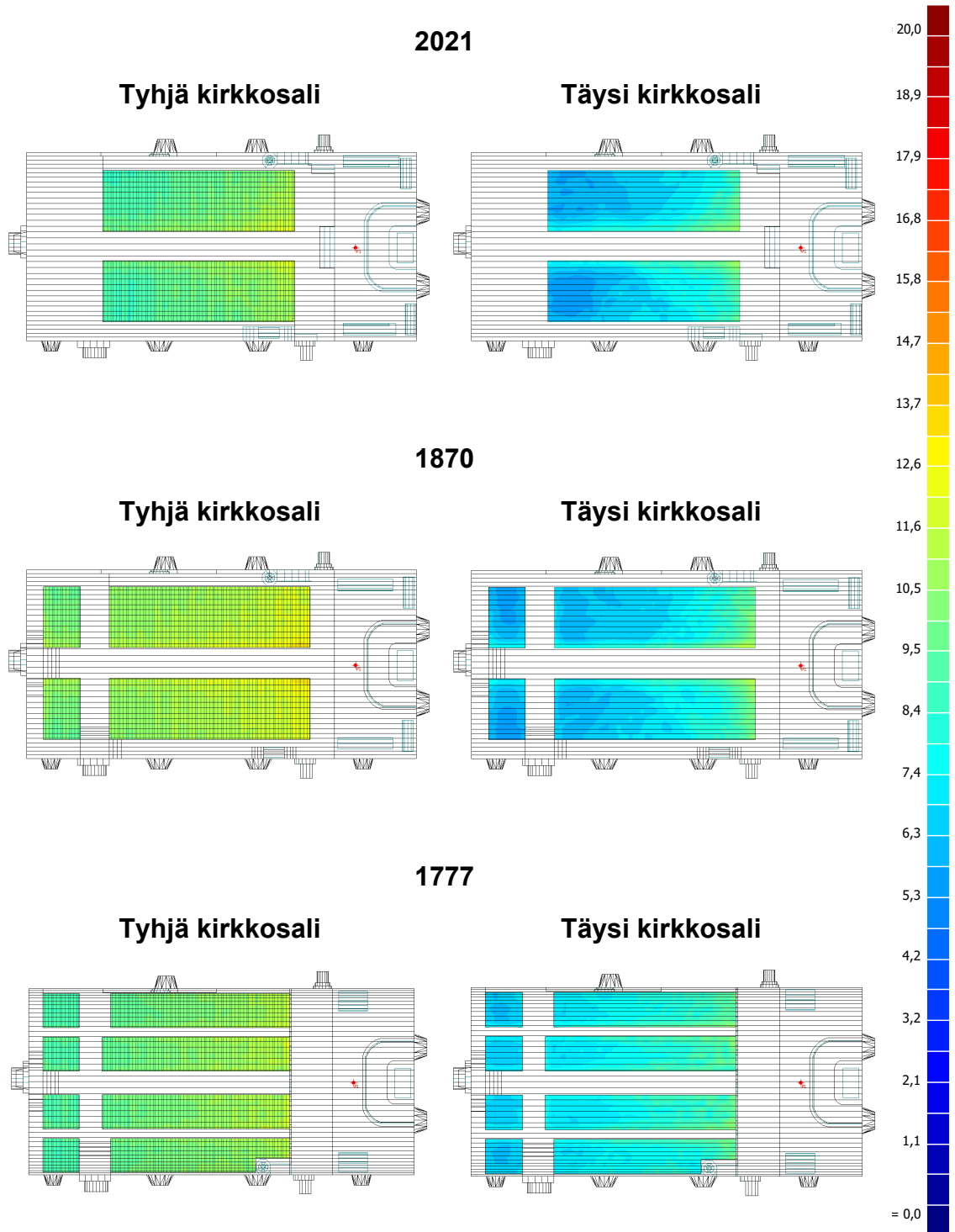
G 250 Hz



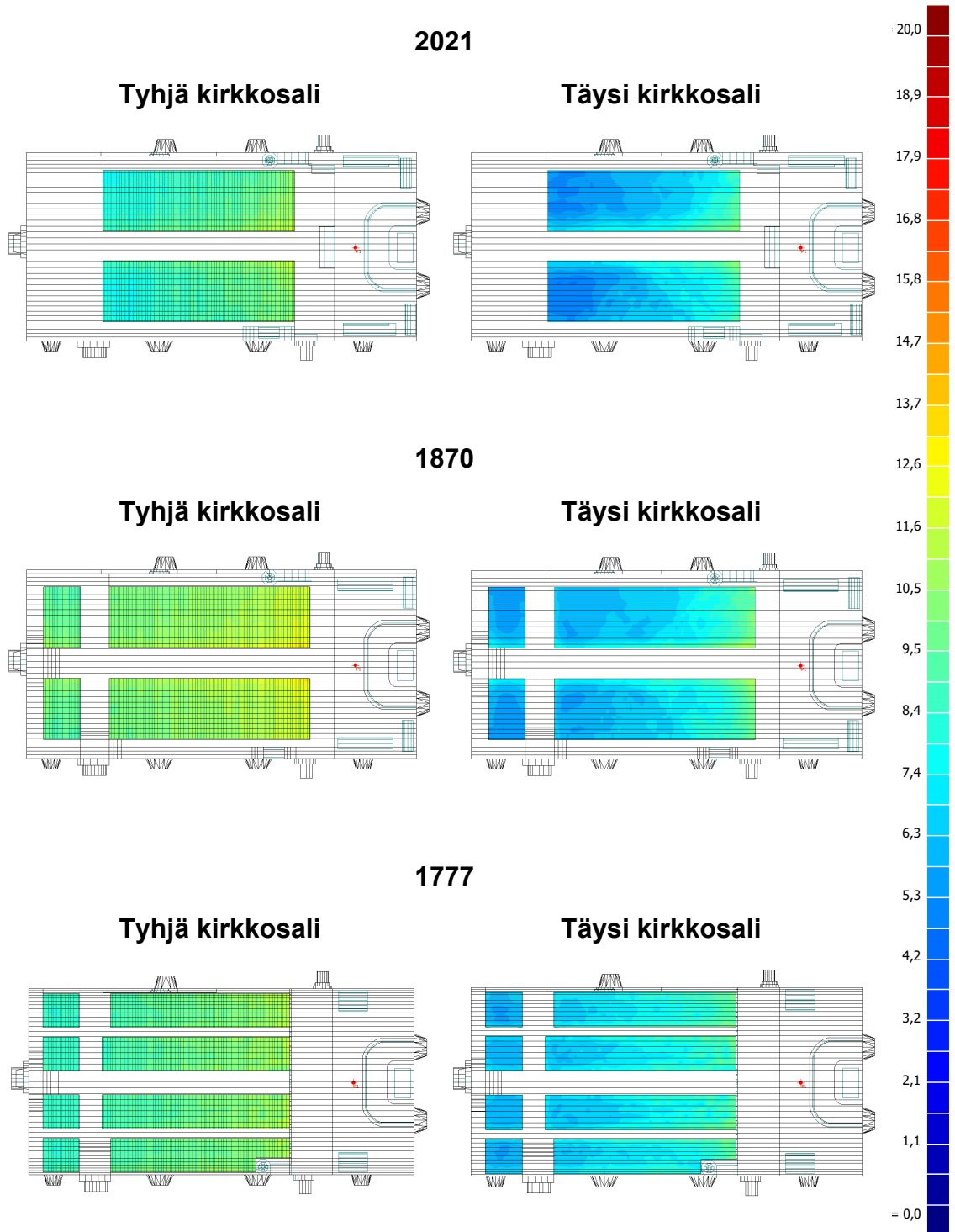
G 500 Hz



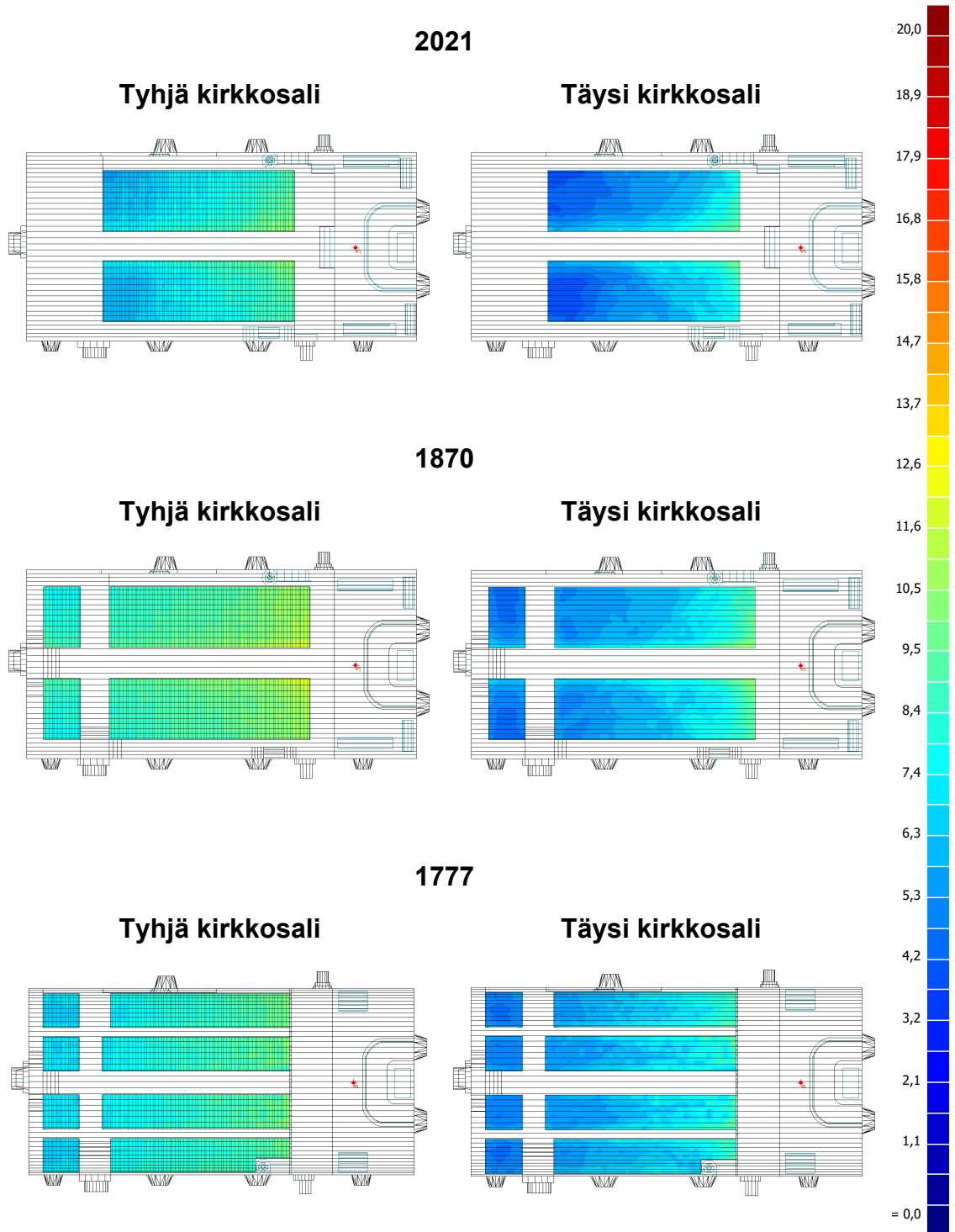
G 1000 Hz



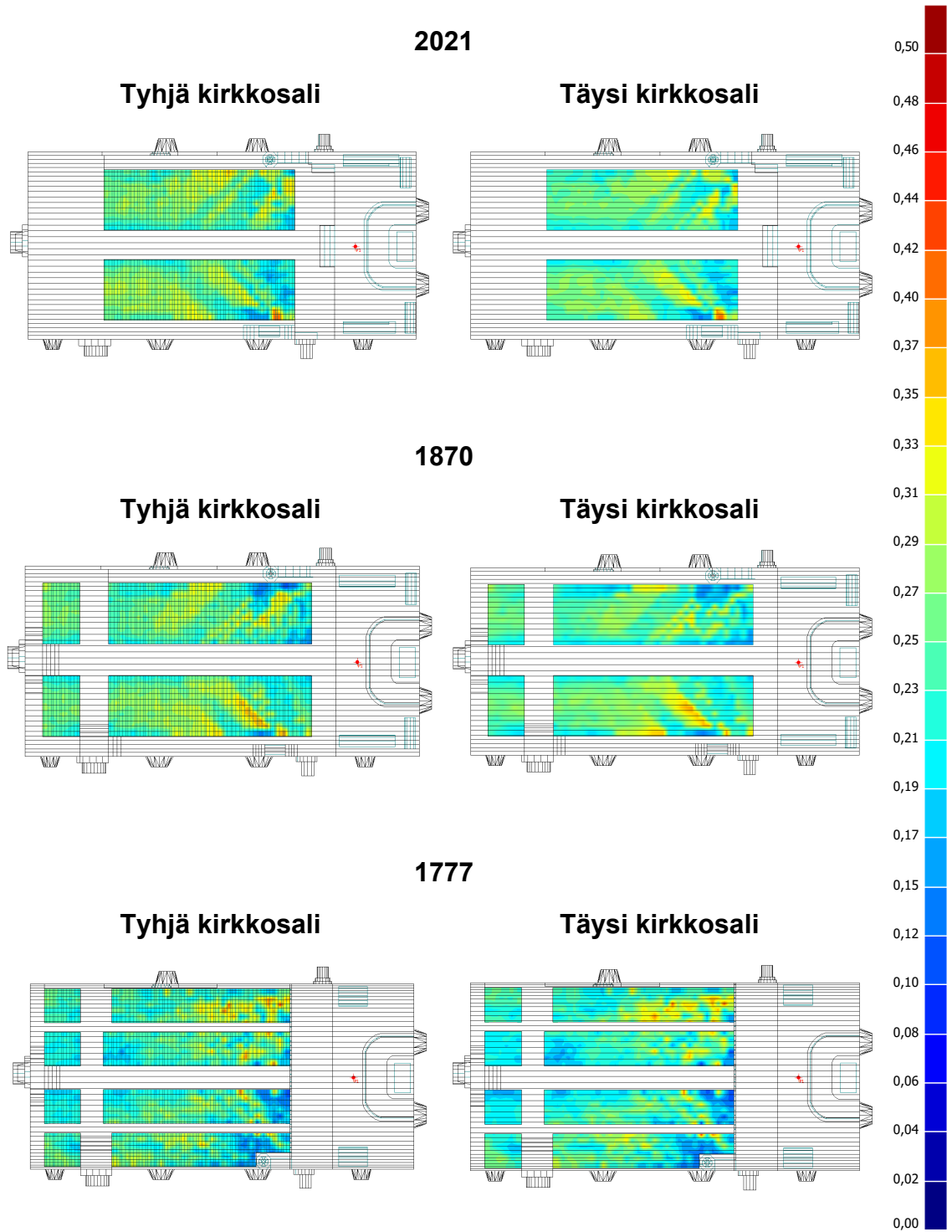
G 2000 Hz



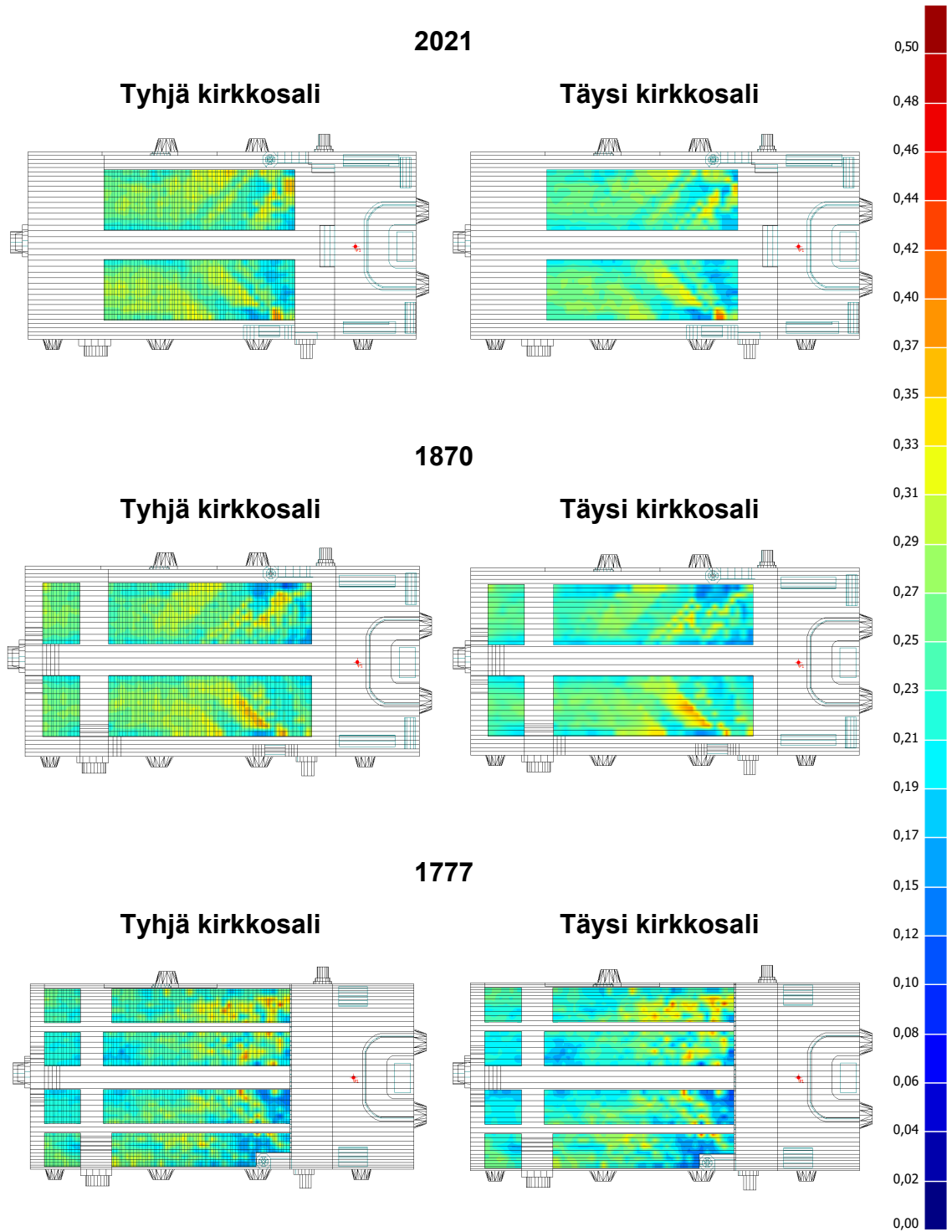
G 4000 Hz



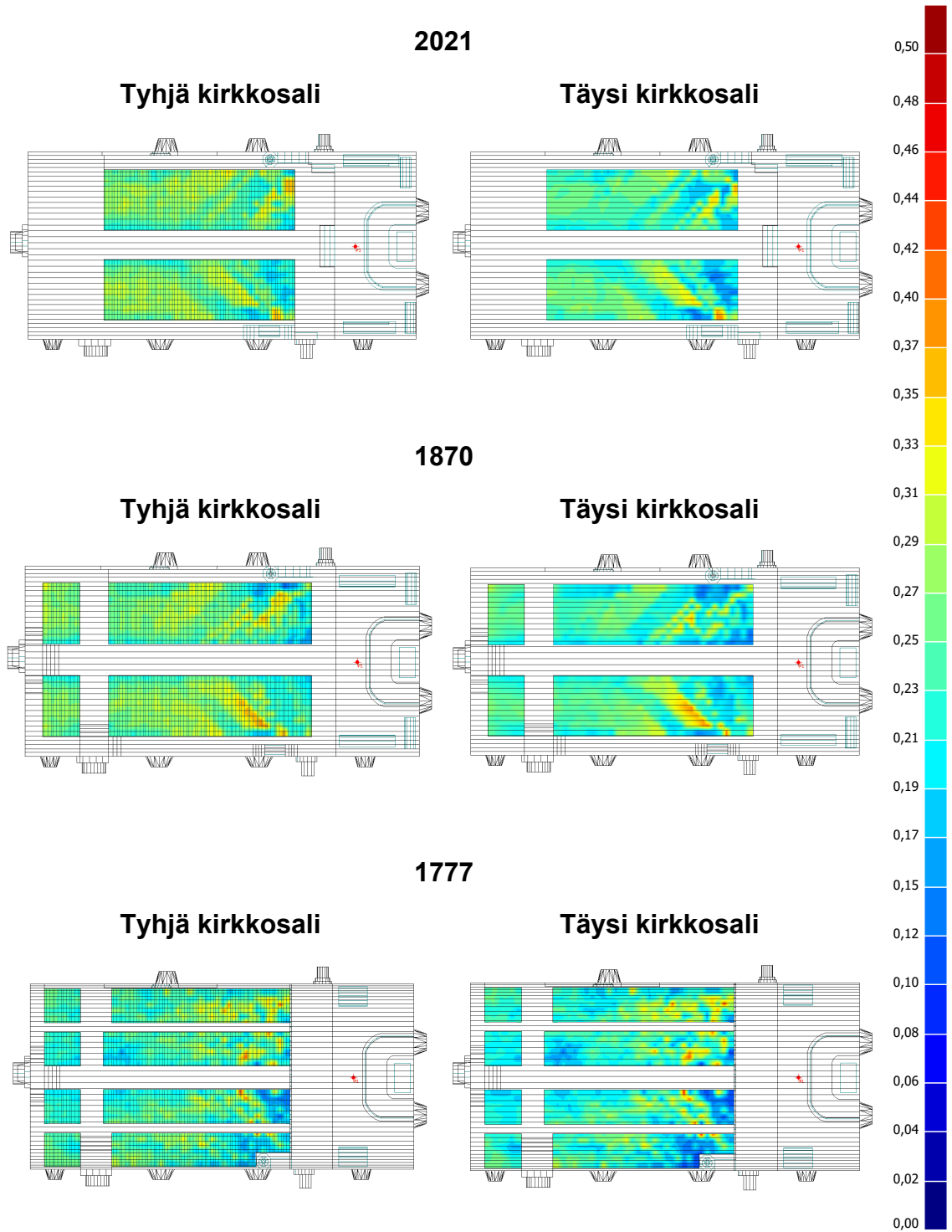
LF_{80} 125 Hz



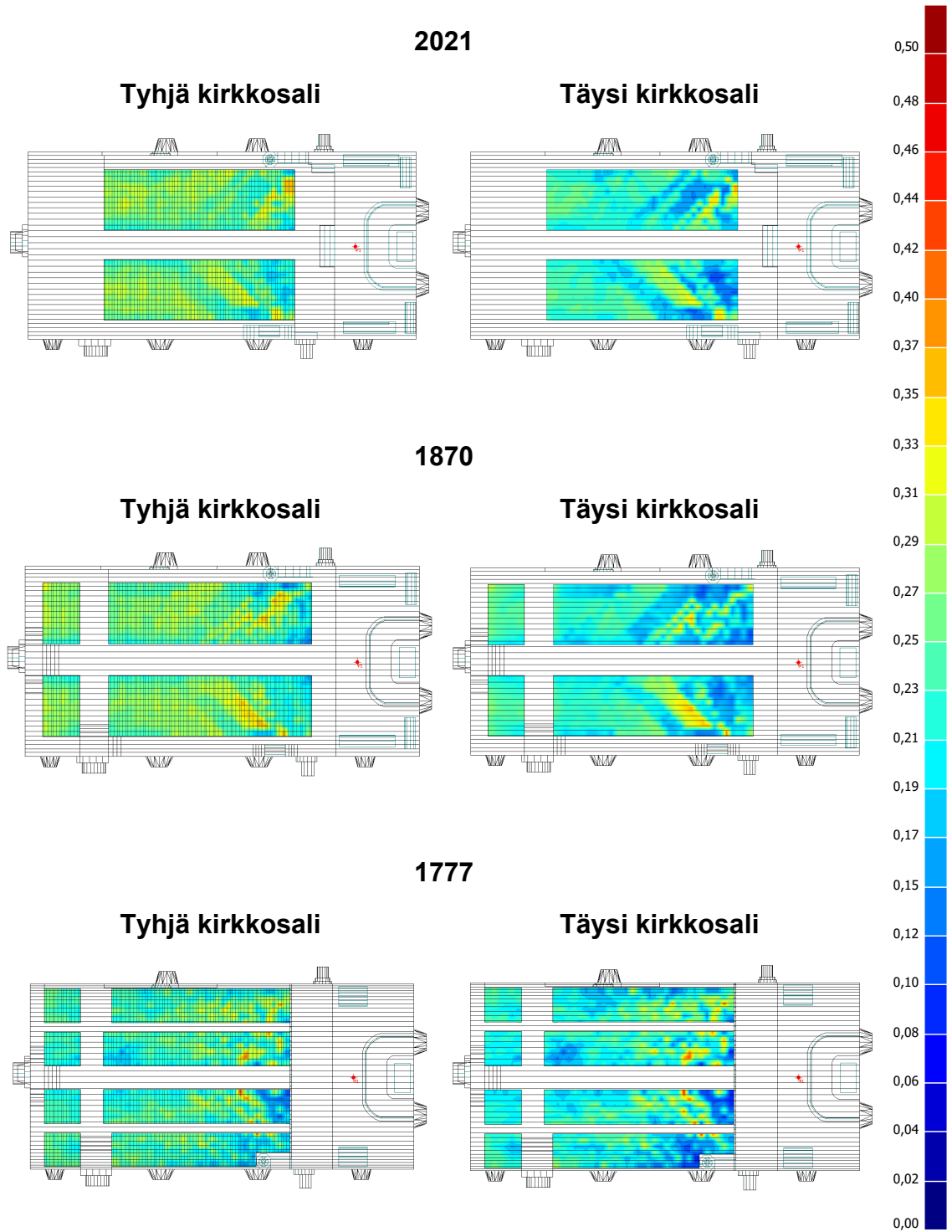
LF_{80} 250 Hz



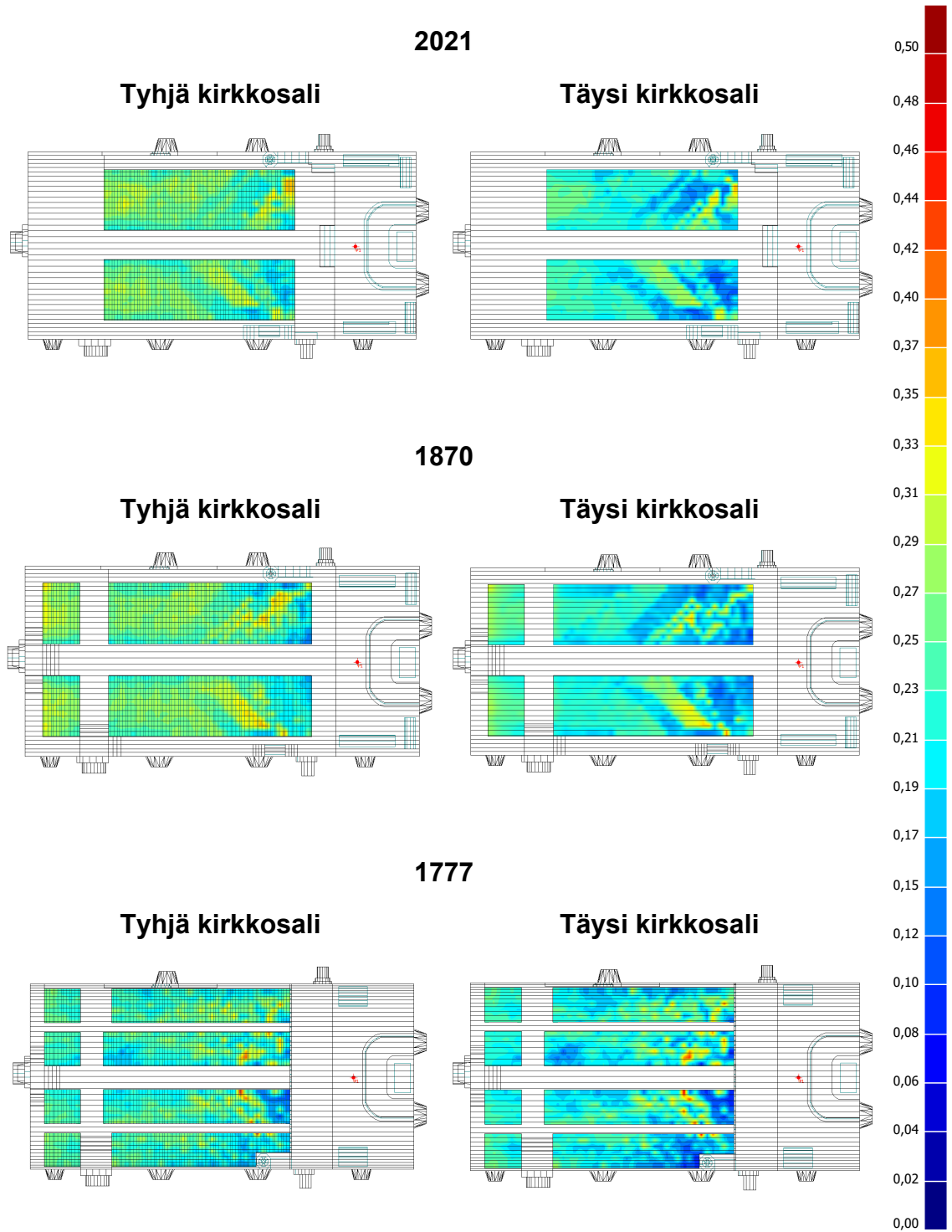
LF_{80} 500 Hz



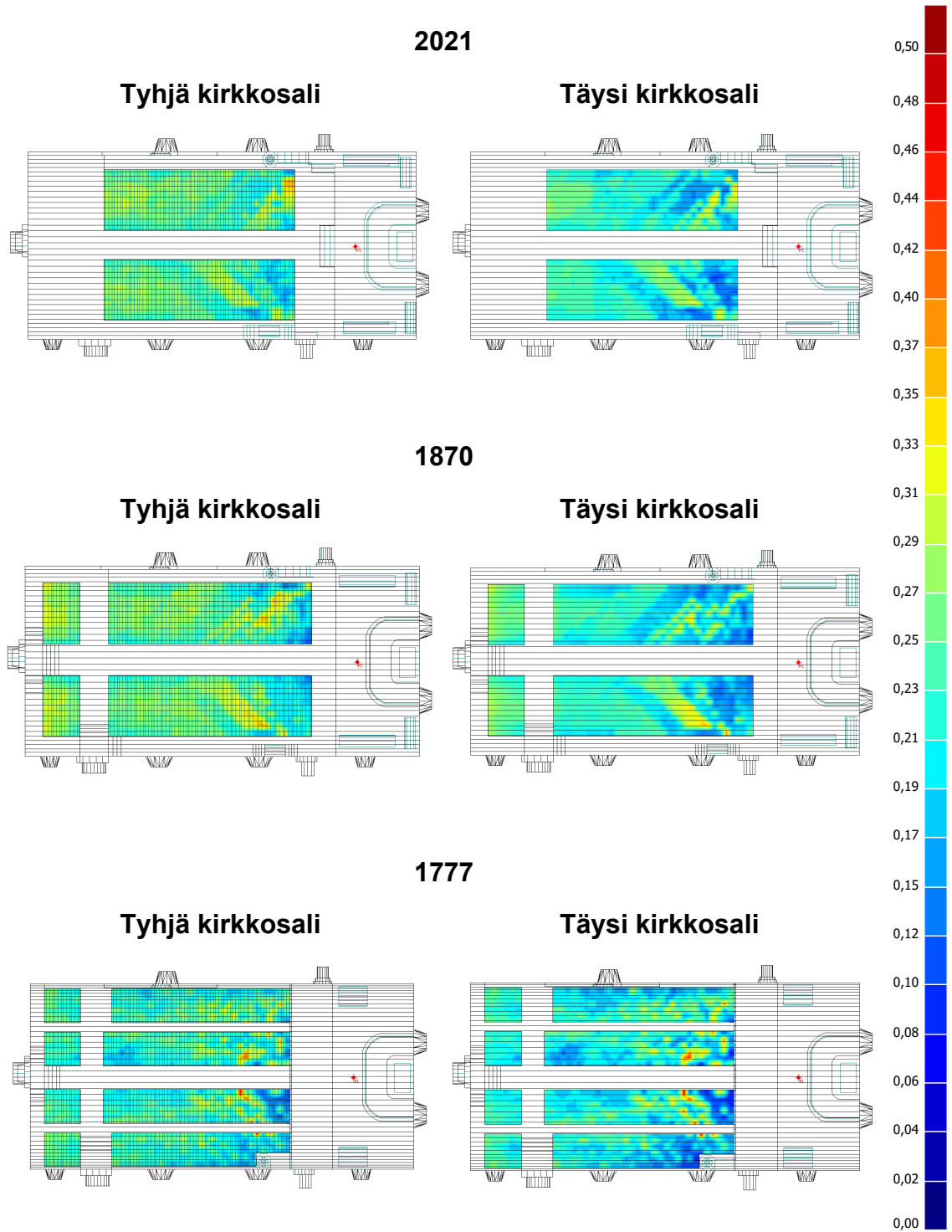
LF_{80} 1000 Hz



LF_{80} 2000 Hz



LF_{80} 4000 Hz



STI

