

1800-LUVUN HELSINGIN KONSERTTITILOJEN AKUSTIIKAN MALLINTAMINEN

Henry Niemi¹, Mikko Kylliäinen², Jere Jäppinen³, Mikko Lindqvist³

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Satakunnankatu 23 A
33210 TAMPERE
henry.niemi@ains.fi

² Tampereen teknillinen yliopisto
Rakennustekniikan laitos
PL 600
33101 TAMPERE
mikko.kylliainen@tut.fi

³ Helsingin kaupunginmuseo
PL 4300
00099 HELSINGIN KAUPUNKI
etunimi.sukunimi@hel.fi

Tiivistelmä

Tietokonemallinnuksella tutkittiin neljän Helsingissä 1800-luvulla käytössä olleen konserttitilan huoneakustiikkaa. Näillä neljällä salilla eli Yliopiston juhlasalilla, Seurahuoneen ensimmäisellä ja toisella juhlasalilla sekä Palokunnantalon juhlasalilla oli joitakin yhteisiä piirteitä: ne eivät varsinaisesti olleet pelkästään konserttisaleja, vaan niissä oli muutakin toimintaa; lisäksi ne olivat pienekköjä verrattuna Keski-Euroopassa samalla aikakaudella rakennettuihin konserttisaleihin, joista suurimmissa oli enemmän kuin 2000 paikkaa, mutta siitä huolimatta niiden kaiunta vastasi suurempia konserttisaleja; kolmas yhteinen seikka oli se, että huoneakustiikka oli harjoitus- ja konserttitilanteessa erilainen. Kaikki salit sopivat oman aikansa sinfonisen orkesterimusiikin esittämiseen, mutta jokaisella salilla oli tilaratkaisusta johtuvia erityispiirteitä, jotka olivat niin suuria, että aikalaisyleisö todennäköisesti on havainnut salien keskinäiset erot.

1 JOHDANTO

Pääkaupungin aseman vuonna 1812 saanut Helsinki kehittyi Suomen musiikkielämän keskuksiksi yliopiston muutettua sinne vuonna 1828. Tärkeimpiä orkesterimusiikin esityspaikkoja olivat Yliopiston juhlasali, Seurahuoneen ensimmäinen ja toinen juhlasali sekä Vapaaehtoisen palokunnan talon juhlasali. Yliopiston juhlasalissa järjestettiin sinfonikonsertteja, ja muissa tiloissa oli populäärikonsertteja, joiden ohjelmaan ei sisällynyt sinfonioita [1]. Näitä tiloja on myöhemmin huomattavasti muutettu tai ne on purettu.

Viime aikoina tutkijat ovat käyttäneet tietokonemalleja kadonneiden tai muuttuneiden rakennusten akustiikan tutkimiseen. Näin on tutkittu antiikin Kreikan ja Rooman teattereita [esim. 2–3] ja renessanssin [4] ja barokkiajan teattereita [5]. Historiallisten raken-

nusten akustiikan ennallistamisella on pyritty tuottamaan tietoa myös musiikin esityskäytännöistä [6–7]. Ensimmäiset artikkelit suomalaisten historiallisten rakennusten akustiikan mallintamisesta on julkaistu viime vuosina [8–9]. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa tietoa Helsingissä 1800-luvulla käytössä olleiden keskeisten konserttitilojen huoneakustiikasta. Tilamallien luomiseksi etsittiin rakennushistoriallista tietoa, erityisesti alkuperäisiä rakennuspiirustuksia ja valokuvia, arkistoista sekä kirjallisuudesta.

2 RAKENNUSHISTORIA JA GEOMETRINEN MALLINNUS

Yliopiston siirtämisestä Turusta Helsinkiin päätettiin 1827 Turun palon jälkeen [10]. Arkkitehti C. L. Engelin (1778–1840) juhlasalin luonnoksista toteutettiin puoliympyrän muotoinen sali [11], joka otettiin käyttöön vuonna 1832. Esiintymislava rakennettiin myöhemmin 1800-luvulla puoliympyrän toiseen pätyyn [12]. Helmikuussa 1944 yliopiston päärakennus vaurioitui jatkosodan ilmapommituksissa. Juhlasali rakennettiin professori J. S. Sirénin suunnitelmien mukaisesti uudelleen vuosina 1944–1948, jolloin sitä pidennettiin yhdeksän metriä [13] ja samalla tehtiin akustiikkaa koskeneita muutostöitä [14–15]. 1990-luvulla juhlasalin akustiikkaa on muutettu edelleen [16].

Samaan aikaan yliopiston uuden päärakennuksen kanssa Engel suunnitteli Helsingin Seurahuonetta (nyk. Helsingin kaupungintalo), joka valmistui 1833 [17]. Seurahuoneen toiseen kerrokseen tehtiin kaksi kerrosta korkea kenkälaatikon muotoinen juhlasali. Vuonna 1862 juhlasali jaettiin välipohjalla kahteen kerrokseen ja muutettiin hotellihuoneiksi. Uusi juhlasali sijoittui Seurahuoneen sisäpihalle. Arkkitehti Axel Hampus Dahlströmin (1829–1882) suunnittelema uusi juhlasali otettiin käyttöön vuonna 1863 [18–19]. Sekin oli pohjamuodoltaan suorakulmainen [17]. Toista juhlasalia levennettiin vuonna 1888 arkkitehti Bruno F. Granholmin (1857–1930) ehdotuksen mukaan 12 m [17–18].

Arkkitehti Theodor Höijerin (1843–1910) suunnittelema Helsingin Vapaaehtoisen palokunnan talo valmistui vuonna 1889 [17]. Rakennuksen keskellä sijaitsi kaksikerroksinen juhlasali, jonka toisessa kerroksessa molemmilla sivuilla oli parvi. Toinen parvista rajautui ulkoseinään, joten sen alla oli yleisön istumapaikkoja, mutta vastakkaisen parven alla ei [20]. Juhlasali toimi vuosina 1907–1910 yksikamarisen eduskunnan istuntosalina. Rakennus purettiin vuonna 1967 [21].

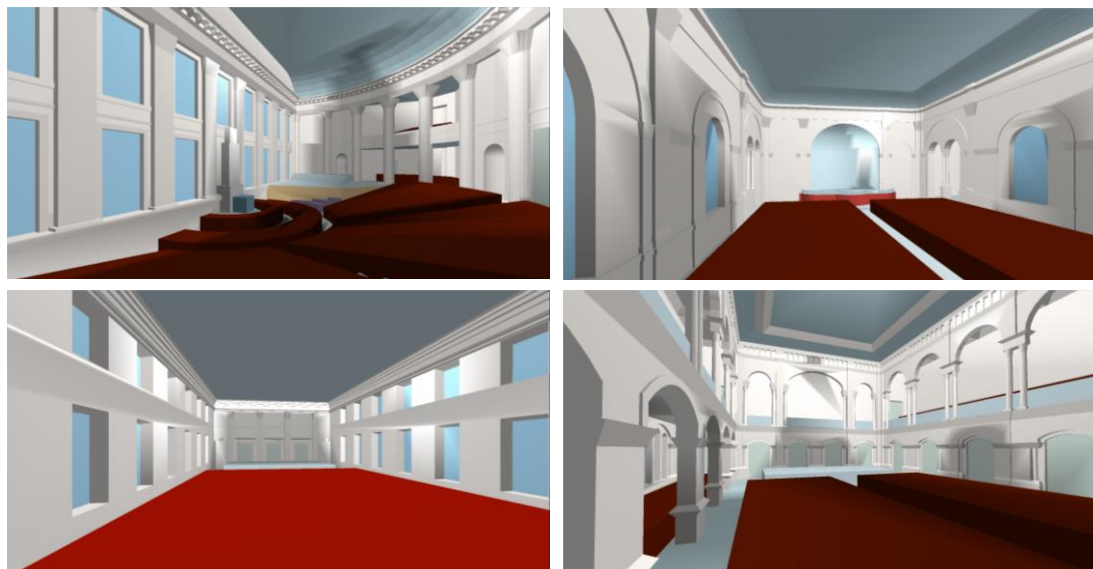
Kadonneiden tilojen huoneakustista mallinnusta varten on oltava riittävästi aineistoa tilojen geometrian mallintamiseksi. Yliopiston juhlasalin alkuperäiset suunnitelmat vuodelta 1828 sisältyvät Helsingin yliopistomuseon kokoelmiin. Juhlasalista on myös runsaasti valokuvia 1800-luvun lopulta lähtien. Sitä vastoin Seurahuoneen 1. rakennusvaiheen piirustukset ovat hävinneet jo ennen 1860-lukua, jolloin lääninarkkitehti C. A. Edelfelt (1818–1869) teetti juhlasalista mittapiirustukset, jotka nekin ovat sittemmin kadonneet. Piirustuksista on kuitenkin valokuvia Wasastjernan [18] ja Ringbomin teoksissa [17]. Seurahuoneen toisesta juhlasalista ovat Dahlströmin alkuperäiset rakennuspiirustukset säilyneet Helsingin kaupunginarkistoon tallennetussa Helsingin maistraatin arkistossa. Lisäksi salista on olemassa kaksi valokuvaa, ja geometrinen mallinnus tehtiin siten osittain valokuvien perusteella. Maistraatin arkistoon sisältyvät myös Höijerin laatimat Palokunnantalon suunnitelmat. Lisäksi Viljon [20] teoksessa on yksi valokuva ajalta, jolloin juhlasali oli vielä konserttikäytössä.

Konserttitilojen geometrinen mallintaminen tehtiin SketchUp 2013 -ohjelmalla. Yleisö ja tyhjä yleisön alue mallinnettiin laatikkona, jonka korkeus lattiasta ylöspäin oli 0,8 m. Tilojen geometriset mallit on esitetty kuvassa 1. Salien tilavuudet V sekä pituudet L , levey-

det B ja korkeudet H on esitetty taulukossa 1. Yleisön aluetta ja paikkalukuja tarkastelemalla voitiin todeta, että 1800-luvun Helsingissä yleisö on istunut tiivisti niin, että neliömetrin alalla on ollut keskimäärin ainakin 2,5 istuinpaikkaa. Tilavuuden ja yleisöpaikkojen määrän suhde ei ole vertailukelpoinen nykysaleihin nähden. Siksi taulukossa 1 on esitetty tilavuuden ja yleisön alueen pinta-alan suhde $V/S_{\text{yleisö}}$ [22–23].

Taulukko 1. *Tutkittujen konserttitilojen päämitat ja paikkaluvut.*

Tila	L [m]	B [m]	H [m]	V [m ³]	Paikkaluku	$V/S_{\text{yleisö}}$ [m]
Yliopiston juhlasali	30,3	17,2	14,4	5260	n. 700	24,8
Seurahuoneen 1. juhlasali	30,7	15,0	8,0	3680	n. 800	17,7
Seurahuoneen 2. juhlasali	25,8	14,2	9,5	3480	n. 600–700	22,9
Palokunnantalon juhlasali	22,8	17,4	12,4	4740	n. 1000	19,8



Kuva 1. Näkymiä mallinnettujen konserttitilojen huoneakustisista malleista.

3 HUONEAKUSTIIKAN MALLINTAMINEN JA TULOKSET

Salit mallinnettiin ohjelmalla Odeon 12. Standardin ISO 3382-1:2009 [24] mukaisesti käytettiin ympärisäteilevää lähdettä, joka sijoitettiin 1,5 m korkeudelle orkesterikorokkeen keskelle. Vastaanottpisteet asetettiin 0,5 m välein ruudukkoon 0,4 m yleisöä kuvaavan laatikon yläpuolelle. Katsomon absorptiosuhteet valittiin Beranekin ja Hidakan [25] mittaamista arvoista (taulukko 2). Sirontakerrointen valinnassa noudatettiin Zengin *et al* [26] esittämiä periaatteita. Laskentapisteverkosta mittaluvuille saatiin jakauma, jonka keskiarvot sekä 10 % ja 90 % fraktiileja vastaavat arvot on esitetty taulukoissa 3 ja 4. Mittaluvut T_{30} , EDT, C_{80} ja G on esitetty keskiarvoina standardin [24] mukaisesti.

Taulukko 2. *Huoneakustiikan mallinnuksessa käytetyt absorptiosuhteet.*

Pinta	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Katsomo täynnä	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83
Katsomo tyhjänä	0,35	0,40	0,41	0,35	0,33	0,27
Ikkunat	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Ovet	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Kiviseinät, pilarit, pilasterit	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Katot ja välipohjat	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Lattiapinnat	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Orkesterilava	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07

Taulukko 3. *Huoneakustiset mittaluvut, kun katsomo on täynnä yleisöä. Lihavoitu arvo osoittaa keskiarvon, vasen luku 10 % fraktiilin ja oikea 90 % fraktiilin.*

Tila	T ₃₀ [s]	EDT [s]	C ₈₀ [dB]	G [dB]	LF ₈₀
Yliopiston juhlasali	1,9... 2,0 ...2,0	1,8... 2,0 ...2,1	-2,7... -0,6 ...-1,7	6,2... 8,4 ...9,8	0,10... 0,22 ...0,33
Seurahuoneen 1. juhlasali	1,6... 1,6 ...1,6	1,5... 1,6 ...1,6	-0,6... 0,2 ...1,0	8,7... 9,8 ...11,7	0,21... 0,25 ...0,27
Seurahuoneen 2. juhlasali	1,8... 1,9 ...1,9	1,5... 1,6 ...1,7	-0,6... 1,3 ...2,8	10,5... 11,2 ...11,9	0,11... 0,18 ...0,23
Palokunnantalon juhlasali	2,0... 2,0 ...2,1	1,8... 2,0 ...2,0	-3,0... -0,7 ...0,8	7,3... 9,0 ...10,6	0,17... 0,25 ...0,33

Taulukko 4. *Huoneakustiset mittaluvut, kun tilassa ei ole yleisöä. Lihavoitu arvo osoittaa keskiarvon, vasen luku 10 % fraktiilin ja oikea 90 % fraktiilin.*

Tila	T ₃₀ [s]	EDT [s]	C ₈₀ [dB]	G [dB]	LF ₈₀
Yliopiston juhlasali	2,7... 2,7 ...2,7	2,6... 2,7 ...2,9	-4,6... -2,6 ...-0,5	8,8... 10,6 ...11,8	0,11... 0,22 ...0,33
Seurahuoneen 1. juhlasali	2,2... 2,2 ...2,2	2,2... 2,2 ...2,3	-2,8... -2,1 ...-1,1	11,9... 12,6 ...13,8	0,22... 0,25 ...0,28
Seurahuoneen 2. juhlasali	2,4... 2,4 ...2,4	2,1... 2,3 ...2,4	-2,3... -1,0 ...0,7	12,6... 13,2 ...13,8	0,12... 0,18 ...0,24
Palokunnantalon juhlasali	2,8... 2,8 ...2,9	2,7... 2,8 ...2,9	-5,1... -2,9 ...-1,0	9,8... 11,3 ...12,5	0,18... 0,26 ...0,33

4 TULOSTEN TULKINTA JA PÄÄTELMÄT

Kaikki tutkitut tilat olivat pieniä verrattuna Keski-Euroopassa samalla aikakaudella rakennettuihin konserttisaleihin, joista suurimmissa oli enemmän kuin 2000 paikkaa [22, 27]. Niiden akustiset ominaisuudet vastasivat kuitenkin isoja konserttisaleja: esimerkiksi jälkikaiunta-aika ja varhainen jälkikaiunta-aika olivat samalla tasolla kuin paljon suuremmissa tiloissa. Yhteinen piirre tutkituille tiloille on ollut se, että niiden ominaisuudet ovat muuttuneet varsin paljon riippuen siitä, oliko tila tyhjä vai oliko se täynnä yleisöä. Selvyyden C₈₀ arvot ovat mallinnuksen perusteella kaikissa tiloissa olleet harjoitustilanteessa selvästi pienemmät kuin konserttitilanteessa, mikä on tarkoittanut sitä, että orkesterin harjoittaminen on ollut tyhjässä tilassa jossain määrin vaikeaa. Beranekin [27] mukaan kapellimestarit yleensä nykyisin toivovat harjoitustilanteessa suurempaa selvyttä kuin konserttitilanteessa. 1800-luvun Helsingissä tilanne on ollut päinvastainen.

Yhteisten piirteiden lisäksi tutkituilla konserttitiloilla on ollut keskenään eroja ja kullakin tilalla omat ominaispiirteensä. Taulukossa 4 esitetyt arvot ovat salien välillä poikenneet toisistaan niin paljon, että yleisö on todennäköisesti havainnut salien erot. Standardin ISO 3382-1 [24] mukaan esimerkiksi selvytydessä C₈₀ havaittavissa oleva ero on 1 dB. Mallinnettujen tilojen selvyysarvon 10 % ja 90 % fraktiilien suurimman ja pienimmän arvon ero on 5,8 dB. Sivuttaisenergiasuhteen havaittavissa oleva ero on 0,05 [24], mutta kolmessa salissa neljästä paikkojen vaihteluväli salin sisällä on moninkertainen tähän nähden ja salien kesken vaihteluväli on 0,10...0,33.

Yliopiston juhlasalin tilaratkaisu oli konserttitilaksi poikkeuksellinen: puoliympyrän muotoinen auditorio, jonka toisessa päässä oli orkesterilava. Konserttitilanteessa kuulo kuva on ollut yleisön kannalta epäsymmetrinen. Orkesteriin nähden salin vastakkaisessa nurkassa istunut yleisö on nähnyt orkesterin kääntämättä päätään, mutta sivuheijastukset se on havainnut voimakkaana vasemmalta juhlasalin etuseinästä, mutta oikealta tulleet heijastukset ovat olleet vaimeita, koska nousevissa penkkiriveissä istunut yleisö on vaimentanut ne. Lähempänä orkesteria yleisön on orkesterin nähdäkseen pitänyt kääntää päätään oikealle, jolloin tilanne on ollut sama kuin orkesteriin nähden vastakkaisessa nurkassa: vasemmalta etuseinästä on havaittu voimakkaita heijastuksia. Suoraan eteensä katsoessaan kuulija on havainnut paljon suoraa ääntä orkesterikorokkeelta oikealta. Parvien paikat olivat voimakkuudeltaan heikompiä kuin muut paikat, joiden välillä yleensäkin erot olivat suuria.

Seurahuoneen ensimmäinen juhlasali oli tutkituista tiloista selvimmin perinteinen kenkälaatikon muotoinen tila, mistä johtuu se, että tutkituista neljästä tilasta siinä paikkojen väliset erot olivat pienimmät. Esimerkiksi sivuttaisenergiasuhteen vaihteluväli on Seurahuoneen ensimmäisessä juhlasalissa vain 0,06. Muihin tiloihin nähden Seurahuoneen ensimmäinen juhlasali oli melko matala, mistä seurasi pienehkö tilavuus ja muita tutkittuja tiloja lyhyempi jälkikaiunta-aika. Korkeus on kuitenkin ollut riittävä siihen, että ensimmäiset heijastuneet äänet on yleisön alueella havaittu pääosin sivulta katon sijaan. Tällöin on syntynyt leveä kuulokuva koko tilassa. Jälkikaiunta-ajan perusteella Seurahuoneen ensimmäinen juhlasali oli tutkituista saleista lähimpänä kamarimusiikkisalialia [22, 27] ja orkesterimusiikkia soittaessa se on todennäköisesti vaikuttanut kuivemmalta kuin muut salit.

Tavallisesti selvyuden C_{80} arvot korreloivat varsin vahvasti jälkikaiunta-ajan kanssa: mitä pidempi jälkikaiunta-aika, sitä pienempi on selvyuden arvo. Seurahuoneen toisessa juhlasalissa selvyuden arvo oli kuitenkin mallinnuksen perusteella selvästi suurempi kuin Yliopiston ja Palokunnantalon juhlasaleissa, vaikka jälkikaiunta-aika oli samaa luokkaa. Sitä vastoin varhainen jälkikaiunta-aika EDT poikkesi eniten jälkikaiunta-ajasta T_{30} . Samoin sivuttaisenergiasuhteen arvoissa oli paljon hajontaa paikkojen välillä. Selittävä tekijä näille arvoille ovat salin etuosan avoimet kulkuaukot daamien ja herrojen salonkeihin. Osa orkesterin tuottamasta äänestä on edennyt aukkojen kautta salonkeihin ja vaimentunut siellä. Näin ollen osa äänestä on jäänyt heijastumatta seinistä yleisölle. Varsinkin tilan etuosassa sivuheijastusten puute on johtanut kapeaan kuulokuvaan ja heikkoon tilantuntuun: ääni on havaittu suoraan edestä. Sivuheijastusten puuttuessa myös varhainen jälkikaiunta-aika on jäänyt varsinkin tilan etuosassa lyhyeksi, jolloin tila on luultavasti koettu kuivemmaksi kuin jälkikaiunta-ajan perusteella voisi päätellä.

Palokunnantalon juhlasalin ominaispiirre oli se, että sali oli leveyssuunnassa epäsymmetrinen: molemmilla puolilla oli parvi, mutta vasemmalla puolella istuinpaikkoja oli parven alla, oikealla ei. Subjektiivisena havaintona tämä on konserttitilanteessa tarkoittanut sitä, että orkesteri on kuulokuvassa paikallistunut oikealla lähemmäksi, koska sivuheijastukset on havaittu tästä suunnasta voimakkaampina. Siten tilantunnon ja ympäröivyyden kannalta parhaat paikat lienevät sijainneet salin takaosasta katsottuna katsomon vasemmassa lohossa, ei keskellä niin kuin tavallisesti. Osittain vasen lohko on kuitenkin jäänyt sivuheijastusten kannalta katveeseen, koska ulkoseinän puoleista parvea kannattavat pilarit ovat estäneet ulkoseinän kautta heijastunutta ääntä etenemästä permannon keskialueelle. Parvilla ja parven alla tilantuntu ja selvyys ovat olleet heikkomat kuin permannolla.

VIITTEET

- [1] Kurkela V, Affektien pitkä varjo – Musiikin kokeminen 1800-luvun Helsingissä. Teoksessa: Jäppinen J & Vallisaari H, Musiikkia! Harrastajia ja musiikinystäviä Helsingissä. Helsinki: Helsingin kaupungin museo, 2015, 78–85.
- [2] Vassilantonopoulos S L, Mourjopoulos J, A study of Ancient Greek and Roman theater acoustics, *Acta Acustica united with Acustica* 89(2003), 123–136.
- [3] Rindel J H, The ERATO project and its contributions to our understanding of the acoustics of ancient theatres, *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theatres Conference*, Patras, 18.–21.9., 2011.
- [4] Weinzierl S, Sanvito P, Schultz F & Büttner C, The acoustics of Renaissance theatres in Italy, *Acta Acustica united with Acustica* 101(2015), 632–641.
- [5] Rychtáriková M, Dolejší J, Šturmová I, Dolejší F, Dolejší J & Pouzar L, Acoustic properties of four baroque theatres, *Akustika* 18(2012), 35–43.

- [6] Weinzierl S, Beethovens Konzerträume – Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen, Frankfurt am Main: Verlag Erwin Bochinsky, 2002.
- [7] Howard D & Moretti L, Sound and space in Renaissance Venice, New Haven: Yale University Press, 2009.
- [8] Kylliäinen M & Takala J, Kadonnutta akustiikkaa etsimässä – Helsingin Nya Teaternin huoneakustiikan ennallistaminen, Tekniikan Waiheita 31(2013), 5–17.
- [9] Takala J & Kylliäinen M, Comparison of modelled performance of a vanished building with historical information on its acoustics, Proceedings of Forum Acusticum, Krakova, 7.–12.9.2014, SS12-6.
- [10] Klinge M, Keisarillinen yliopisto. Teoksessa: Klinge M, Knapas R, Leikola A & Strömberg J, Keisarillinen Aleksanterin Yliopisto 1808–1917, Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava, 1989, 9–139.
- [11] Pöykkö K, Das Hauptgebäude der Kaiserlichen Alexander-Universität von Finnland, Helsinki: Suomen Muinaismuistoyhdistyksen Aikakauskirja 74, 1972.
- [12] Lappalainen S, Tänä iltana Yliopiston juhlasalissa, Helsinki: Yliopistopaino, 1994.
- [13] Knapas R, Rakennettu ja rakentamaton yliopisto. Teoksessa: Klinge M, Knapas R, Leikola A & Strömberg, J, Helsingin yliopisto 1917–1990, Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava, 1990, 587–647.
- [14] Arni P, Käytännöllisen akustiikan perusteet, Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava, 1949.
- [15] Sirén J S, Helsingin Yliopiston päärakennuksen vanhan osan restaurointi ja juhlasalin laajennus, Arkkitehti 1(1950), 74–82.
- [16] S.n., Helsingin Yliopiston päärakennus, peruskorjaus, Arkkitehti 6(1991), 34–41.
- [17] Ringbom Å, Societetshusen i Storfurstendömet Finland, Helsinki: Suomen Muinaismuistoyhdistyksen Aikakauskirja 92, 1988.
- [18] Wasastjerna N, En krönika om Helsingfors, Helsinki: Förlagsaktiebolag Söderström & c:o, 1941.
- [19] Niskanen R, Missä soitto soi? Musiikkitalat Suomessa, Vantaa: Multikustannus Oy, 2008.
- [20] Viljo E M, Theodor Höijer, en arkitekt under den moderna storstadsarkitekturens genombrottstid i Finland från 1870 till sekelskiftet, Helsinki: Suomen Muinaismuistoyhdistyksen Aikakauskirja 88, 1985.
- [21] Manninen A, Puretut talot – 100 tarinaa Helsingistä, Helsinki: Helsingin Sanomat, 2004.
- [22] Barron M, Auditorium acoustics and architectural design (2. p.), Lontoo: Spon Press, 2010.
- [23] Baumann D, Music and space – A systematic and historical investigation into the impact of architectural acoustics on performance practice followed by a study of Handel’s Messiah, Bern: Peter Lang AG, 2011.
- [24] ISO 3382-1:2009. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces.
- [25] Beranek L & Hidaka T, Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall’s interior surfaces, Journal of the Acoustical Society of America, 101(1998), 3169–3177.
- [26] Zeng X, Christensen C L & Rindel J H, Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model, Applied Acoustics 67(2006), 771–786.
- [27] Beranek L, Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture, New York: Springer-Verlag, 2004.