

KONTRABASSOJEN SOINTI KONSERTTISALISSA

Iikka Järvi^{1,2}, Tapio Lokki²

¹ YLE Radion sinfoniaorkesteri

² Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu

Akustiikan laboratorio, Informaatio ja tietoliikennetekniikan laitos

Otakaari 5

02150 Espoo

iikka.jarvi@aalto.fi

tapio.lokki@aalto.fi

Tiivistelmä

Kontrabasso on sinfoniaorkesterin matalaäänisin jousisoitin, jonka sointi riippuu pitkälti soittimen ja konserttisalin akustiikan vuorovaikutuksesta. Pitkien aallonpituuksien vuoksi basson ääni on matalilla taajuuksilla ympärisäteilevää, ja sen sointikuvaan vaikuttavat voimakkaasti salin heijastukset ja rakenteet. Salin arkkitehtuurilla ja materiaalivalinnoilla voidaan joko tukea tai heikentää basson kuuluvuutta, artikulaatiota sekä soittotuntumaa. Kontrabasso luo usein soinnillisen ja rytmisen pohjan koko orkesterille, joten sen havainnointi vaikuttaa merkittävästi orkesterin yhteissoittoon ja yleisön konserttikokemukseen.

Tässä työssä tarkastellaan, millaisia tarpeita kontrabasson soinnille on soittajan, orkesterin ja yleisön näkökulmista, ja miten niitä voi salin akustiikalla tukea.



© 2025 Iikka Järvi, Tapio Lokki. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

1 JOHDANTO

Kontrabasson äänten pitkistä aallonpituuksista ja suuntaavuuksista johtuen sen sointi ja kuulokuva riippuvat suuresti tilan. Epäsoveltuvassa tilassa hienompikin arvosoitin voi olla kuulokuvaltaan tai soittotuntumaltaan huono [1]. Sinfoniaorkesterissa kontrabasson yläsävelet peittyvät helposti korkeaäänisempien soitinten sointiin, joten basson havainnoinnin takia on tärkeää, että salin akustiikka tukisi matalimpia taajuuksia.

Muusikot pitävät konserttisalia soittimen jatkeena, ja optimaalisesti sali tukisikin soittotuntumaa, kuulokuvaa ja yhteissoittoa. Kun konserttisaleja arvioidaan yleisessä keskustelussa, usein esiin nousevat salin äänekkyyttä, kaikuisuus, äänen ympäröivyyttä ja leveys. Kaikki nämä ominaisuudet vaativat, että kontrabasso soi vahvasti [2].

Tässä työssä tarkastellaan, millaisia vaatimuksia kontrabasson kuulemiseen konserttisalissa on eri käyttäjien näkökulmasta: itse soittajalla, muilla orkesterin muusikoilla sekä yleisöllä, ja mitkä tekijät konserttisalin arkkitehtuurissa vaikuttavat kontrabasson sointiin.

2 KONSERTTISALIN VAIKUTUKSET KONTRABASISTILLE

Kokonsa vuoksi kontrabasso on mekaanisesti kytketty lattiaan stakkelin kautta, ja se toimii pistevoimana siirtäen soiton värähtelyä lavan rakenteisiin. Stakkelin impedanssi on suurimmillaan noin 100 Hz:ssä, ja sitä matalammilla taajuuksilla kontrabasso toimii värähtelyä siirtävänä massana. Lattian oma impedanssi vaikuttaa soittotuntumaan tallaimpedanssin kautta, ja joustava lava helpottaa energian siirtoa soittajalta lattiaan ja ilmaan. Paras soittotuntuma saadaan, kun lattian ja stakkelin impedanssien vaihe-ero on 180° , mikä toteutuu helpoimmin lavan taipuisimmissa kohdissa palkkien välillä [3]. Tallaimpedanssi on keskimäärin vahvimmillaan 63 Hz oktaavikaistalla, jolloin lavan ominaisvärähtely tällä alueella parantaa soittimen reagoitua herätteeseen sekä säteilytehokkuutta salissa [4].

Liian kiinteä lattia heikentää soittimen reagoitua, tallaimpedanssi vastustaa kielten mekaanista herätystä, jolloin värähtelyn siirto kaikukoppaan heikkenee. Kun soitin on jäykästi kytketty lattiaan, sen ominaismoodit eivät pääse värähtelemään vapaasti, toisin kuin ilma- tai pöytäpidettynä. Optimaalisesti lava tukee värähtelyn siirtymistä ilmaan lavarakenteiden kautta, mikä helpottaa soittajan äänen projisointia.

Kontrabasso ei säteile tehokkaasti Helmholtz-taajuuttaan, noin 60 Hz, matalampia ääniä, jolloin niiden värähtelyenergia jää soittimen sisään [5]. Lattia tai koroke eli raiseri voi kuitenkin vahvistaa näitä taajuuksia, kun värähtely siirtyy rakenteisiin ilman tai stakkelin kautta. Useissa moderneissa konserttisaleissa kontrabassot sijoitetaan kiinteille tai säädettävillä raisereille, joilla voidaan saavuttaa jopa 5 dB vahvistus 40–60 Hz ja vielä suurempi 30–40 Hz välillä, koska raiserit värähtelevät helpommin kuin jäykkä lattia [6]. Stakkeli-impedanssin sovittaminen lattiaan mahdollistaa matalien taajuuksien säteilyn 31 ja 63 Hz:n oktaavikaistoilla [7]. Koska stakkelin kautta kulkevien värähtelyjen amplitudi on pieni, paras tulos saavutetaan, kun suuri alue lattiaa saadaan värähtelemään [8].

Toisaalta raiserit voivat olla epätasaisia basson soinnille, ja vierekkäisten puolissävelaskelten voimakkuuserot voivat olla jopa ± 4 dB [9]. Lavan pinnan värähtely vahvistaa taajuuksia vain lattian kannen ja raiserin ontelon resonanssitaajuuksien ympäristössä. Stakkelin aiheuttama mekaaninen pistevoima suurentaa äänenpainetasojen huippuja kannen resonanssitaajuuden ympäristössä, mutta suurentaa myös vaimennuksia näillä taajuuksilla, joten laajakaistaista akustista vahvistusta ei synny. Vahvistus tai heikennys riippuu siitä,

kuinka hyvin soittimesta lähtevä ilmaääni on synkronissa lavan värähtelyn vaiheen kanssa, mikä taas riippuu yksittäisen soittimen säteilyominaisuuksista. Myös raiserin etukulmat heijastavat raiserin reunasta diffraktoituneita ääniaaltoja eteenpäin, joka voi vahvistaa matalien taajuuksien äänenpainetasoa kaukokentässä, mikäli raiserin etukulma on tarpeeksi suuri näitä taajuuksia heijastaakseen [10]. Parhaan tuloksen saavuttamiseksi raisereissa tulisi olla mahdollisimman vähän sektioita ja niiden koon mahdollisimman suuri sekä värähtelyalueen että etuheijastusten tukemiseksi [11].

Toisaalta hyvin tärkeää on myös lattian rakenne. Koska suurempi osa basson värähtelyenergiasta siirtyy kaikukopan kautta ilmaan kuin stakkelin kautta, lava on tärkeä heijastava pinta ilmasta saapuvalla äänelle. Kontrabasson sointi on matalilla taajuuksilla voimakainta eteenpäin alaviistoon [12]. Kontrabassolle ja sen soittajalle tärkeimmät ilmaääntä heijastavat pinnat ovatkin lattia ja lavan takaseinä [5].

Resonoiva lattiatuki saadaan kovan lattiapinnan heijastuksen ja elastisen rakenteen värähtelyyn ajavan pistevoiman aiheuttaman ääniaallon välisestä intereferenssistä [13]. Optimaalinen lattia kontrabassolle olisikin kovasta puusta tehty tarpeeksi kiikkerä rakenteinen lava. Liian pehmeä ja harva puumateriaali lattiassa taas absorboi ilmasta tulevia matalia taajuuksia [11].

Täysikokoisissa sinfoniaorkestereissa on tyypillisesti kahdeksan kontrabasistia, jotka sijoitetaan lavan sivuille takaosiin kahteen riviin. Koska kontrabasso on matalilla taajuuksilla ympärisäteilevä, bassoryhmän takana oleva seinä on tärkeä heijastustuki. Kovat heijastavat seinät bassojen takana lisäävät matalan värähtelyn energiaa [14]. Resonoivat seinärakenteet vaimentavat matalien soitinten perustaajuuksia ja ohut puupanelointi absorboi basson energiaa [15]. Basson sointia tukeakseen salin kaikki pinnat paitsi lavan lattia tulisivatkin olla jäykkää, tiivistä materiaalia ja seinien tulisi olla tarpeeksi suuria ja jäykkiä bassotaajuuksien heijastamiseksi [16, 17].

Kovat seinät bassojen takana tekevät soinnista selkeämpää ja parempisointista [18]. Matalilla taajuuksilla heijastus seinän pinnasta on vaiheessa suoran äänen kanssa ja yksittäinen kova takaseinä voi lisätä kontrabasson äänekkyyttä jopa 6 dB [19]. Kontrabasson soittaja tarvitsee vahvan seinätuen, sillä isossa salissa ääni katoaa soittajan lähikentästä nopeasti. Takaseinästä ja lattiasta tulevat heijastukset auttavat soittajaa kuulemaan itsensä sekä muut soitinryhmän soittajat, jolloin intonaatio, kuulokuva omasta soitostaan, sekä äänenlaatu paranevat. Ilman vastetta omasta soitosta, soitto muuttuu helposti puristamiseksi, jolloin soinnista tulee karkeaa ja raakaa.

Muilla mataläänisillä orkesterisoittimilla, kuten tuuballa, fagotilla tai patarummuilla, ei ole kontrabasson kaltaisia fysiikasta johtuvaa ongelmaa tuottaa matalimpia ääniä [19]. Kahle on ehdottanut, että lavan takaseinä, jonka läheisyydessä nämä soittimet sijaitsevat, voisi olla absorboiva [20]. Sivuseinä- ja kattoheijastukset tukevat orkesterin yleistä sointia, mutta takaseinä voisi ohjata energiaa sivuseinille, ja näin vahvistaa basson sointia yleisölle poikittaisilla heijastuksilla [16]. Kahlen tutkimus perustui perinteiseen kenkälaatikkomaliseen konserttisaliin. Keskusteluissa RSO:n ja HKO:n muusikoiden kanssa ilmenee, että takaseinän absorptio viinitarhamallissa ei välttämättä ole tarpeellista, sillä takaseinä on yleensä niissä matala. Absorboivaa takaseinää vasten olevat vaski- ja lyömäsoittajat ovat raportoineet Musiikkitalossa oman sointinsa tarkkuuden ja voimakkuuden puutteesta.

3 KONSERTTISALIN VAIKUTUKSET MUILLE SOITTAJILLE

Jokaisella sinfoniaorkesterin soittajalla on erilaisia kuulemistarpeita, mutta tärkeimpiä ovat oman soitinryhmän ja sooloa soittavien instrumenttien kuuleminen. Lisäksi kontrabassojen selkeä kuuleminen on hyvin tärkeää, sillä bassoon tukeudutaan rytmin, tempovihjeiden ja intonaation takia. Kontrabasson rooli orkesterissa on usein rytmisen ja kontrabasso soittaa pitkälti sointujen perussäveliä, joiden päälle muut soittajat virittävät harmonian. On siis tarpeellista, että basso kuuluu riittävän selkeästi orkesterin sisällä. RSO:n ja HKO:n muusikoiden mukaan kontrabasson soinnin tulisi olla napakka ja nopeasti syttyvä, sillä monet kapellimestarit painottavat, ettei muiden soitinten tule soittaa ennen kuin basson ääni kuuluu. He myös korostivat, että fortissimo-kohdissa kontrabasson tulisi olla vahvasti läsnä ja soinnin ympäröivää.

Matalilla taajuuksilla, 125 Hz oktaavikaistaan asti, ilmaääni liikkuu lavalla täysin vapaasti soittajien välissä. Lattiaheijastukset ovat tällöin isossa roolissa bassoäänien heijastuksessa, sillä ne voivat nostaa matalien taajuuksien äänenpainetasoa. Tasaisella lavalla suora ääni ja lattiaheijastukset interferoivat käytännössä aina konstruktiivisesti, mutta jos orkesteri on raisereilla, lattiaheijastuksen vaikutus heikkenee verrattuna tasaiseen lattiaan, varsinkin 250 Hz oktaavikaistalla [21]. Toisaalta raiserit auttavat soittajia näkövihjeiden saamisessa toisilta soittajilta, ja kuten aiemmin todettiin, oikein suunniteltuina ne voivat parantaa myös muiden muusikoiden havaitsemaa bassovastetta.

Kuten kontrabasson soittajille, bassojen takana olevan kovan pystyseinän on todettu olevan tärkeä myös muille soittajille sekä yleisölle. Halmrastin kokeiluissa Oslon konserttisalissa todettiin, että pystysuorat heijastavat pinnat bassojen takana paransivat sointia ja tekivät kontrabassot helpommin kuultaviksi. Tämä vaikutus oli erityisen selvä leveissä saleissa, kuten useimmissa sinfoniakonserttisaleissa. Yleisölle bassot soivat täyteläisemmin, ja muille soittajille ne kuuluivat napakammin, mikä helpotti muun muassa tempovihjeiden seuraamista [22]. Samankaltaisia tuloksia on saatu myös Kahlen tutkimuksissa [18].

4 KONSERTTISALIN VAIKUTUKSET YLEISÖLLE

Sinfoniakonsertin yleisöllä on erilaisia mieltymyksiä kuuntelukokemuksen suhteen. Lokin tekemässä tutkimuksessa 17 hengen kuunteluryhmä arvioi yhdeksän eri konserttisalin akustiikkoja. Tulosten mukaan suosituimpia olivat salit, joissa oli riittävästi äänekkyyttä, ympäröivyyttä, erottelukykyä sekä läheisyyteen vaikuttavaa vahvaa bassosointia [23]. Vaikka kuuntelijat jakautuivat kahteen ryhmään eri mieltymysten mukaan, molemmat pitivät basson selkeyttä ja voimaa tärkeänä soinnin laadun kannalta.

Yksi merkittävimmistä yleisön bassoäänien kuulemiseen vaikuttavista tekijöistä on nk. seat-dip-ilmiö. Se syntyy, kun ääni saapuu yleisön istuinriveille viistäen pienessä kulmassa, jolloin soinnin matalat taajuudet vaimenevat merkittävästi [24, 25]. Tuolirivit levittävät matalien taajuuksien energiaa ajassa, ja viivästynyt sointi interferoi destruktiivisesti suoran äänen kanssa [26]. Ilmiö riippuu pääasiassa tuolin korkeudesta, eikä niinkään pehmusteen absorptiosta, ja lopullinen seat-dip-taajuus vaihtelee kuulijan pituuden mukaan [27]. Sen vaimennusalue useimmissa konserttisaleissa löytyy 80–300 Hz:n taajuusalueelta. Mikäli ääni pääsee liikkumaan tuolien alta, niin silloin seat-dip-taajuus on korkeampi [24, 25]. Seat-dip voi aiheuttaa bassoille jopa 6 dB:n vaimennuksen [28], joten luonnollisesti saleissa, joissa seat-dip-taajuus on korkeampi, basso havainnoidaan paremmin [29]. Basson puute huomataan silloin, kun seat-dipin vaimentama taajuuskaista puuttuu myös salin jälkikaiunnasta [24].

Seat-dipin kompensointi edellyttää tasaisesti jakautuneita heijastuksia 30–80 ms:n sisällä suorasta äänestä [27]. Riittävän varhaisen bassoenergian tuottamiseksi konserttitalissa tulisi olla useita suuria heijastavia pintoja, kuten seiniä, parvitasoja tai kattoheijastimia, jotka suuntaavat ääntä yleisöön ei-viistävässä kulmissa [30]. Diffusioivat pinnat eivät ole tehokkaita seat-dipin korjaamiseen, vaan tärkeimpiä ovat poikittaiset heijastukset tasaisilta pinnoilta, jotka sisältävät seat-dipin vaimentamia taajuuksia [31, 32]. Lisäksi Jurkiewicz et al. havaitsivat, että matalakulmaiset poikittaiset heijastukset vaimenevat myös seat-dipin vaikutuksesta, minkä vuoksi varhaisen heijastusten tulisi saapua yleisölle vähintään 18° korkeuskulmasta, jotta niiden energia ja tilavaikutelma säilyisivät [33].

Sivuheijastusten määrä vaikuttaa myös dynamiikan havaitsemiseen, mitä enemmän poikittaisia heijastuksia, sitä paremmin kuulijat erottavat orkesterin voimakkuuden vaihtelut. Tämä lisää musiikin vaikuttavuutta, erityisesti crescendoissa [34]. Parempi lateraalienergia tukee myös basson vastetta [31], minkä vuoksi poikittaisten heijastusten lisääminen on ollut yleinen keino parantaa konserttitalien bassosointia [35, 36].

Basson kuuluvuuden kannalta heijastavien pintojen on oltava selvästi suurempia kuin matalimpien taajuuksien aallonpituudet, jotta heijastimet eivät diffraktoisi bassotaajuuksia heikentäen niitä [37]. Erityisen merkittäviä ovat sivu- ja parviheijastukset, jotka tuottavat varhaisia heijastuksia loivista, mutta ei-viistävästä tulokulmista. Näiden heijastusten tulee syntyä aallonpituuksien koon takia tarpeeksi suurissa avaruuskulmissa äänilähteestä katsottuna [38], ja olla alle 15 metrin päässä äänilähteestä sellaisessa orientaatioissa, että niistä tulisi ensimmäisen tai korkeamman kertaluvun heijastuksia joko yleisölle tai takaisin muusikoille [39].

Suoraa ääntä seuraavat useat peräkkäiset varhaiset heijastukset 30 millisekunnin sisällä yhdistyvät kuulohavainnossa, eikä niitä koeta kaikkuna [40]. Mikäli yksikään heijastus ei ole huomattavasti äänekkäämpi kuin muut, ne voivat yhdistyä musiikissa vielä pidemmän ajan kuluessa, jolloin musiikki koetaan vaikuttavampana ja leveämpänä [41]. Resonoivat seinärakenteet kuitenkin vaimentavat heijastusten ääntä bassojen perustaajuuksien läheisyydessä, jolloin eri heijastukset eivät yhdisty kuulijan korvassa, jolloin kuulokuva heikkenee [15]. Tämän vuoksi heijastavien seinien tulisikin olla raskasta ja tiheää materiaalia, kuten riittävän paksua betonia, jotta ne tukisivat basson sointia [17].

Pätyksen ja Lokin tutkimuksessa havaittiin, että kuulijat kokivat musiikin avoimempana ja ympäröivämpänä sekä basson soinnin laadukkaampana, kun vahvat varhaiset heijastukset ympäröivät kuulijaa. Saleissa, joissa bassosointi arvioitiin parhaaksi, heijastuksia saatiin erityisesti lavan sivu- ja takaseinistä, jotka tukevat myös orkesterin soittajia [15].

Sekä aikaiset että myöhään saapuvat äänet vaikuttavat basson koettuun vahvuuteen [42]. Ihmiskorva ei ole herkkä matalien taajuuksien saapumisajalle, joten myöhäinenkin basson sointi voi kompensoida salista puuttuvaa suoraa ääntä [37]. Basson lämmön kannalta on ratkaisevaa salin jälkikaiunta, ei varhainen äänikenttä [43]. Myöhäisetkin heijastukset voivat kompensoida matalien taajuuksien suoran äänen vaimennusta [32].

5 YHTEENVETO

Edellisissä luvuissa käytiin läpi salin erilaisia vaatimuksia kontrabasson soinnille kontrabasistin, muiden soittajien sekä yleisön näkökulmista. Tästä huomasimme, että monet salin akustiset tekijät tukevat basson soinnin havainnointia usealle osapuolelle. Lavan lattia- ja seinäheijastukset vaikuttivat kontrabasson havainnointiin basson soittajalle, muille

muusikoille sekä yleisölle. Myös salin yleisöosan poikittaiset heijastukset tuovat bassovastetta takaisin orkesterille, ja saavat basson kuulostamaan leveältä ja lämpimältä yleisölle. Tutkimuksissa esitetyt konserttisalin tekijät ovat linjassa kontrabasson soittajien omien soittotuntumaan ja kuulokuvaan liittyvien havaintojen kanssa.

VIITTEET

- [1] Brown, A. W. *Acoustical studies on the flat-backed and round-backed double bass*. Väitöskirja. Universität für Music und darstellende Kunst Wien. Wien, Itävalta. 2004.
- [2] Lokki T, Pätynen J, Kuusinen A, Tervo S, Concert hall acoustics: Repertoire, listening position, and individual taste of the listeners influence the qualitative attributes and preferences, *J. Acoust. Soc. Am.*, 140(2016), 551–562.
- [3] Guettler K, Buen A, Askenfelt A, An in-depth analysis of the double bass–stage floor contact, *Proc. Inst. Acoust.*, 30(2008), 37–44.
- [4] Askenfelt A, Guettler K, Stage floor vibrations and bass sound in concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(2013), 3256.
- [5] Askenfelt A, Stage floor risers – supporting resonant bodies or sound traps?, in: Ternström S, *Acoustics for Choir and Orchestra*, Royal Swedish Academy of Music, Stockholm, 52(1986), 43–61.
- [6] Guettler K, Askenfelt A, Buen A, Double basses on the stage floor: Tuning fork–tabletop effect, or not?, *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(2012), 795–806.
- [7] Guettler K, Buen A, Askenfelt A, The Lindeman Hall of Oslo – Evidence of low-frequency radiation from the stage floor, *Proc. 20th Int. Congr. Acoust.*, Sydney, Australia, 2010, 2329–2334.
- [8] Askenfelt A, Eigenmodes and tone quality of the double bass, *Quarterly Progress and Status Report of KTH Computer Science and Communication*, 23(1982), 149–174.
- [9] Beranek L L, Johnson F R, Shultz T J, Watters B G, Acoustics of Philharmonic Hall, New York, during its first season, *J. Acoust. Soc. Am.*, 36(1964), 1247–1262.
- [10] Yasuda Y, Ushiyama A, Sakamoto S, Sakuma T, Numerical and experimental studies on the effects of stage risers, *Appl. Acoust.*, 70(2009), 588–594.
- [11] Wulfrank T, Lyon-Caen I, Jurkiewicz Y, Brulez J, Kahle E, Recent experiences with vibration of stage and audience floors in concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(2013), 3256.
- [12] Pätynen J, Lokki T, Directivities of symphony orchestra instruments, *Acta Acustica united with Acustica*, 96(2010), 138–167.
- [13] Nakanishi S, Sakagami K, Daido M, Morimoto M, Acoustic properties of a cavity backed stage floor: A theoretical model, *Appl. Acoust.*, 57(1999), 17–27.

-
- [14] Lee J B, Note on the interaction of bass viols and stage enclosures, *J. Acoust. Soc. Am.*, 71(1982), 1610–1611.
- [15] Lokki T, Pätynen J, Tervo S, Siltanen S, Savioja L, Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections, *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(2011), EL223–EL228.
- [16] Lokki T, Pätynen J, Architectural features that make music bloom in concert halls, *Acoustics*, 1(2019), 439–449.
- [17] Beranek L L, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, 2nd ed., Springer, New York, 2004.
- [18] Kahle E, Room acoustical quality of concert halls: Perceptual factors and acoustic criteria – return from experience, *Building Acoustics*, 20(2013), 265–282.
- [19] Dammerud J J, *Stage Acoustics for Symphony Orchestras in Concert Halls*, University of Bath, Bath, UK, 2009.
- [20] Kahle E, Acoustic feedback for performers on stage – return from experience, *Proc. Int. Symp. Musical and Room Acoustics*, La Plata, Argentina, 2016.
- [21] Dammerud J J, Barron M, Attenuation of direct sound and the contributions of early reflections within symphony orchestras, *J. Acoust. Soc. Am.*, 128(2010), 1755–1765.
- [22] Halmrast T, Orchestral timbre: Comb-filter coloration from reflections, *J. Sound Vib.*, 232(2000), 53–69.
- [23] Lokki T, Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls, *Physics Today*, 67(2014), 27–32.
- [24] Schultz T, Watters B, Propagation of sound across audience seating, *J. Acoust. Soc. Am.*, 36(1964), 885–896.
- [25] Sessler G, West J, Sound transmission over theatre seats, *J. Acoust. Soc. Am.*, 36(1964), 1725–1732.
- [26] Lokki T, Southern A, Savioja L, Studies on seat dip effect with 3D FDTD modeling, *Proc. Forum Acusticum*, Aalborg, Denmark, 2011, 1517–1522.
- [27] Tahvanainen H, Pätynen J, Lokki T, Analysis of the seat-dip effect in twelve European concert halls, *Acta Acustica united with Acustica*, 101(2015), 731–742.
- [28] Bradley J S, Some further investigations of the seat dip effect, *J. Acoust. Soc. Am.*, 90(1991), 324–333
- [29] Tahvanainen H, Pätynen J, Lokki T, Studies on the perception of bass in four concert halls, *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25(2015), 294–305.
- [30] Green E, Colella-Gomes O, Kriz J, Berrier V, Wulfrank T, Kahle E, The influence of reflection surface size in concert halls, *Proc. Inst. Acoust.*, 45(2023), 111–119.

-
- [31] Pätynen J, Tervo S, Lokki T, Analysis of concert hall acoustics via visualisations of time-frequency and spatiotemporal responses, *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(2013), 842–857.
- [32] Tahvanainen H, Lokki T, Bass in concert halls – recent studies on the seat-dip effect, *Proc. IOA Auditorium Acoustics*, Paris, France, 2015, 544–550.
- [33] Jurkiewicz Y, Rummler N, Green E, Wulfrank T, Kahle E, Impact of grazing incidence attenuation on early reflection design, *Proc. Inst. Acoust.*, 47(2025), Pt. 1.
- [34] Green E, Kahle E, Dynamic spatial responsiveness in concert halls, *Acoustics*, 1(2019), 549–560.
- [35] Scarbrough P H, David Geffen Hall and the Evolution of Acoustics at Lincoln Center, *Acoustics Today*, 19(2023), 41–49.
- [36] Basso G, Correction of a strong seat-dip in the Teatro Argentino of la Plata in Argentina, *Applied Acoustics*, 228(2025), 110284.
- [37] Barron M, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2nd ed., Spon Press, London, 2010.
- [38] Jurkiewicz Y, Wulfrank T, Kahle E, Architectural shape and early acoustic efficiency in concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 132(2012), 1253–1256.
- [39] Jurkiewicz Y, Kahle E, Early reflection surfaces in concert halls – a new quantitative criterion, *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(2008), 3908.
- [40] Wallach H, Newman E, Rosenzweig M, The precedence effect in sound localization, *Am. J. Psychol.*, 62(1949), 315–336.
- [41] Blauert J, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, 2nd ed., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [42] Bradley J S, Soulodre G A, Norcross S, Factors influencing the perception of bass, *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(1997), 3135.
- [43] Beranek L L, Concert Hall Design: Some Considerations, *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25(2015), 181–186.