

# KANDIDAATINTYÖ 2025

likka Järvi



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan korkeakoulu  
Informaatioteknologia

**Ilkka Järvi**

**Kontrabassojen sointi konserttisalissa**

Kandidaatintyö

27.08.2025

Työn ohjaaja:

Professori Tapio Lokki



Tekijä: Iikka Järvi

Työn nimi: Kontrabassojen sointi konserttisalissa

Tutkinto-ohjelma: Informaatioteknologia

Päiväys: 27.08.2025

Sivumäärä: [29]

Vastuuopettaja: Yliopistonlehtori Pasi Lassila

Ohjaaja: Professori Tapio Lokki

Kieli: Suomi

## Tiivistelmä

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan kontrabasson sointia ja sitä, mitkä konserttisalien akustiset ominaisuudet siihen vaikuttavat. Lisäksi pohditaan miten sitä voisi parantaa jo olemassa olevissa saleissa, joissa bassojen sointi ei kuulu riittävästi. Kontrabasso on sinfoniaorkesterin matalaäänisimpiä soittimia, ja sen kuuleminen selkeästi on tärkeää koko orkesterin soinnille. Tämän kandidaatintyön kirjoittaja toimii Radion sinfoniaorkesterissa (RSO) kontrabassoryhmän varaäänienjohtajana. RSO soittaa kausikonserttinsa Helsingin Musiikkitalossa, ja tekee konserttavierailuita muissa konserttisaleissa ympäri maailmaa, joten kirjoittajalla on henkilökohtaista kokemusta useasta erilaisesta konserttisalista ja kontrabasson sointiin vaikuttavista tekijöistä.

Työssä tarkastellaan ensin kontrabassoa, sen rakennetta, taajuusaluetta sekä sointia. Tämän jälkeen käydään läpi sen sointiin konserttisalissa vaikuttavia tekijöitä soittajien sekä yleisön näkökulmasta. Lopuksi pohditaan, miten akustisilla ratkaisuilla voitaisiin parantaa kontrabasson kuuluvuutta ja sointia. Tämä kandidaatintyö on toteutettu kirjallisuustutkimuksena ja sitä varten on haastateltu Radion sinfoniaorkesterin ja Helsingin kaupunginorkesterin kontrabasisteja sekä muiden soitinten soittajia.

Avainsanat: Kontrabasso, konserttisali, akustiikka

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	ii
Sisällysluettelo .....	iii
Lyhenteet .....	iv
1. Johdanto .....	1
2. Kontrabasso .....	2
2.1 Kontrabasson rakenne .....	2
2.2 Kontrabasson taajuusalue.....	5
2.3 Kontrabasson soittaminen .....	7
2.4 Kontrabasson sointi .....	9
3. Kontrabasso konserttitalissa .....	10
3.1 Salin tekijät kontrabasson soittajalle.....	11
3.2 Salin tekijät muille soittajille.....	14
3.3 Salin tekijät yleisölle .....	15
4. Pohdinta .....	18
5. Yhteenveto .....	21
Viitteet .....	22

## Lyhenteet

RSO	Radion sinfoniaorkesteri
HKO	Helsingin kaupunginorkesteri
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö
dB	Desibeli, äänenvoimakkuuden yksikkö
BR	Bass Ratio, bassosuhte, matalien ja korkeiden taajuuksien jälkikaiunta-aikojen suhde
G <sub>125</sub>	125 Hz oktaavikaistan äänenvoimakkuuden mitta

## 1. Johdanto

Kontrabasso on sinfoniaorkesterin matalaäänisin jousisoitin. Konserttisalissa kontrabasson soittajalle tärkeintä on oman soittimen, soitinryhmän sekä sooloa soittavien soitinten kuuleminen. Muulle orkesterille kontrabassojen kuuleminen on erityisen tärkeää soiton ajoituksen ja intonaation eli soinnin puhtauden takia. Onkin siis hyvin kriittistä, että kontrabassot kuuluvat riittävän vahvasti sinfoniaorkesterin sisällä [1]. Myös yleisölle orkesterin soinnissa selkeä ja vahva basson sointi ovat tärkeimpiä ominaisuuksia [2].

Useassa konserttisalissa kontrabasson soitettavuus ja sointi ovat kuitenkin alarvoisia. Vaikka yleisesti konserttisalien akustiikassa voimakasta bassoa on pidetty tärkeänä vahvan pohjan luomisessa koko orkesterin soinnille [3], standardissa ISO 3382-1:2009 määritellyt esiintymistilojen akustisten parametrien tarkkuusmittauksien alaraja on 125 Hz:n oktaavikaista [4]. Tämä tarkoittaa, että suurin osa kontrabasson soitossa käytetyistä perustaajuuksista jää tämän rajan alapuolelle. 125 Hz oktaavikaistan alaraja 88 Hz on alle kokosävelaskeleen verran kontrabasson korkeimman avoimen  $G_2$ -kielen perustaajuuden alapuolella, eli standardi sivuuttaa käytännössä merkittävän osan kontrabasson tärkeimmästä sointialueesta. Monessa salissa on kontrabassojen soinnin parantamiseksi tehtykin jälkikäteen korjaavia muutoksia, kuten esimerkiksi New Yorkin David Geffen Hallissa (ent. Philharmonic Hall tai Avery Fisher Hall) Yhdysvalloissa [5] ja La Platan Sala Alberto Ginasterassa Argentiinassa [6].

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan konserttisalin arkkitehtonisia ratkaisuja, jotka vaikuttavat kontrabassojen sointiin ja soitettavuuteen. Tavoitteena on selvittää, miten kontrabassojen sointia ja soittotuntumaa voidaan parantaa soittajalle, sekä miten sen kuuluvuutta ja äänenlaatua voisi parantaa sekä orkesterille että yleisölle.

Työ on toteutettu kirjallisuustutkimuksena. Luvussa 2 esitellään kontrabasso, sen rakenne, taajuuskaistat sekä sen soittamista ja sointia. Luvussa 3 kootaan yhteen kontrabasson sointiin konserttisalissa vaikuttavia tekijöitä soittajan, muun orkesterin sekä yleisön näkökulmasta. Tämän jälkeen luvussa 4 pohditaan subjektiivisten huomioiden perusteella, millaisia muutoksia kontrabasson tukemiseksi voisi tehdä Musiikkitalon konserttisalissa.

## 2. Kontrabasso

Kontrabasso kehitettiin 1500-luvun lopussa viuluperheen jatkeeksi. Sen alkuperäinen tarkoitusperä oli tuoda voimaa ja syvyyttä sointiin sekä antaa musiikille pulssia. Kontrabasso on pohjimmiltaan puhdas orkesterisoitin, mutta myöhemmin siitä on kehittynyt myös monipuolinen soolosoitin [7]. Tässä tutkielmassa kuitenkin keskitytään sen ominaisuuksiin orkesteriympäristössä eli konserttisaleissa. Ensin käydään läpi kontrabasson fyysisiä ominaisuuksia.

### 2.1 Kontrabasson rakenne



Kuva 1. Kontrabasson osat (kuva: likka Järvi)

Viulujen akustisia ominaisuuksia on tutkittu laajasti, ja kontrabasso jakaa monia rakenteellisia piirteitä niiden kanssa. Ulkomuodostaan kontrabasso on helposti tunnistettavissa viuluperheen jäseneksi. Siinä on samalla tavalla kaula kiinnitettynä kaikukoppaan, jonka etupuolta kutsutaan kanneksi, ja takapuolta pohjaksi. Eroja muihin perheenjäseniin toki löytyy, sillä kontrabasson rakentamisessa pitää ottaa huomioon soittamisen ergonomia. Tämä näkyy kontrabassoissa esimerkiksi loivina hartioina. Orkestereissa bassoissa on 5 kieltä tai neljättä kieltä pidentävä C-jatke. Suurin ero on kuitenkin kontrabasson takakannen, eli pohjan rakenteessa.

Kontrabassot voidaan jakaa kahteen kategoriaan: kuperapohjaisiin ja tasapohjaisiin. Kuten kuvasta 2 huomataan, tasapohjaisessa soittimessa pohja on suora, ja sen yläosassa on kevennys, eli kulmikas syvyyttä pienentävä leikkaus soittomukavuuden takia. Kuperapohjaisessa soittimessa takakansi taas on muiden jousisoitinten tapaan pyöreä, minkä takia tässä mallissa selän sisäpuolella on yleensä kielten suuntaan kohtisuoria tukipalkkeja. Kontrabasson standardisoimattomuuden vuoksi soittimista löytyy kuitenkin paljon muitakin erilaisia pohja- ja tukipalkkivariaatioita. Kupera- ja tasapohjaisten kontrabassojen sointieroja on tutkittu, ja lopputulos on, että kuperapohjaiset bassot tuottavat yleensä pyöreämmän, ja tasapohjaiset suuremman soinnin [8]. Kummankin pohjavaihtoehdon äänen suuntaavusominaisuudet ovat kuitenkin tarpeeksi lähellä toisiaan, joten konserttialin ominaisuuksia, joita tässä raportissa käsitellään, voidaan pitää kummallekin pohjatyyppille soveltuvina.



Kuva 2. Kontrabasson erilaisia pohjia (kuva: likka Järvi)

Kontrabassot tehdään useimmiten vaahterasta tai poppelista. Pohjalla ja kannella on kullekin soittimelle ominaiset värähtelymoodit (engl. *eigenmodes*). Kannen ja pohjan välissä ovat kyljet, eli sarjat. Sarjat ovat ohutta taivutettua puuta, joka kiertävät koko soittimen rungon ympäri. Niiden funktio on luoda kaikukoppa pitämällä kantta ja pohjaa paikallaan, mutta ne myös siirtävät värähtelyä kansion välillä. Kannen keskiosassa on vyötärö, joka on jousen kulkua helpottava ohennus. Vyötärön terävät kulmat ovat kosmeettisia. Kulmien kohdalla kannen ja pohjan välillä on tukipaloja, eli klosseja. Klosseja on myös kaikukopan yläosassa kaulakiinnityksen kohdalla, sekä alaosassa alatasulan kohdalla. Kaikukoppa on siis sisältä tiimalasin muotoinen ja pyöreäkulmainen. Soittamisen helpotuksena kannen yläosa on kapeampi kuin alaosa. Kontrabasson kaikukoppaan kohdistuu suuri staattinen voima, kun kielet painavat tallaa (engl. *bridge*) kanteen yli 500 Newtonin voimalla. Pohjankin tulisi kestää yli 350 Newtonin voima [8]. Tallan kautta kielten värähtely siirtyy kaikukoppaan.

Kontrabasson yläosassa on virityskoneisto, jonka yläosaa kutsutaan kierukaksi, tai snekaksi (saks. *schnecke*, etana). Sen funktio on täysin koristeellinen. Kielet ovat kiinni virityskoneiston virittimissä, joita löysäämällä tai kiristämällä voi muuttaa kielten taajuuksia. Virityskoneiston alapuolella on yläsatula, joka nostaa kielet otelaudan yläpuolelle antaakseen tilaa niiden värähtelylle. Soittaja painaa sormillaan kieliä otelautaa vasten muuttaakseen soivaa taajuutta. Otelauta kulkee kaulaa pitkin, kunnes hieman ennen kielen pituuden puoliväliä, siitä tulee kaulasta irrallinen, kelluva rakenne. Kielet kulkevat otelaudan yli tallalle, jonka kautta ne taipuvat alaspäin ja kiinnittyvät kielenpitimeen. Kielenpitimen paino ja muoto vaikuttavat hyvän soittimen sointiin, sillä se vaikuttaa kielten värähtelyyn. Kielenpidin on kiinni kontrabasson lattiapiikissä, eli stakkelissa (engl. *endpin*), jonne se kiinnittyy alatasulan kautta kulkevalla takajänteellä, joka on yleensä tehty metallista. Kontrabasso on kokonsa ja painonsa takia helpompi soittaa, kun se on lattiakontaktissa, ja se kytketäänkin lattiaan stakkelin kautta.

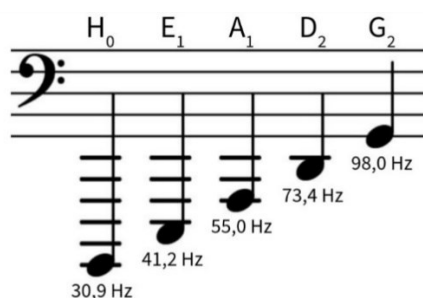
Kontrabasson kaikukopan sisäpuolella ovat äänipinna, bassopalkki, sekä kaikukopan kulmia tukevia klosseja. Pinna on vapaasti kiinnitettynä kannen ja pohjan väliin, ja kannen puolella se sijaitsee tallan toisen jalan lähellä korkeiden kielten puolella. Yhdessä soittimen sarjojen ja sisällä olevan ilman kanssa se siirtää värähtelyä takakanteen, ja värähtelyn siirto pohjalle riippuu tallan ja pinnan sijaintien suhteesta. Se myös rajoittaa korkeimpien kielten aiheuttamaa värähtelyä kannessa. Talla on vapaampi alakielten puolella, ja siten se siirtää matalaa värähtelyä vapaammin kanteen. Tallan matalien kielten puolella olevan jalan kohdalla sisäkannessa on kielten suuntaisesti liimattu bassopalkki, joka tukee kannen rakennetta kestävästi kielten ja tallan luomaa painetta. Se myös jakaa vaiheessa olevaa värähtelyä mahdollisimman suurelle osaa kantta [9].

Kontrabasson kannessa on tallan molemmilla puolilla reiät, nk. f-aukot, joista soittimen sisällä värähtelevä ilma pääsee ulos. F-aukot vääristävät kannen ominaisvärähtelymoodeja, ja optimaalinen bassopalkki auttaa vääristyksen normalisoinnissa [10]. Bassopalkin koolla ja jännityksellä voi siis muokata kannen ominaismooditaajuuksia [11]. Kontrabasson kaikukoppa toimii Helmholtz-resonaattorina. Soittimen Helmholtz-taajuus riippuu f-aukkojen koosta sekä kaikukopan tilavuudesta. Niiden pääfunktiona ei kuitenkaan ole olla äänilähde, vaan ne helpottavat kannen ja pohjan värähtelyjä, sekä ne myös parantavat äänen laatua ja kohdistusta. Suurin osa kontrabasson soinnista muodostuu, kun pohja ja kansi värähtelevät ja saavat läheisen ilman värähtelemään. Pohja ja kansi toimivat siis kuin kaiutinelementti [12].

Kontrabassojen mittoja ei ole standardisoitu samalla tavalla kuin viulujen tai sellojen, joten soittimissa on paljon kokoeroja. RSO:n käyttämien kontrabassojen korkeudet ovat välillä 180–200 cm. Kannen ja pohjan korkeudet vaihtelevat välillä 110–128 cm, kannen yläosien leveydet 48–56 cm ja alaosan leveydet 69–78 cm. Sarjojen syvyydet ovat 21–25 cm ja f-aukkojen kohdalla vyötärön leveys on välillä 36–41 cm. Avointen kielten pituus on soolokokoisissa bassoissa keskimäärin 98–105 cm, ja orkesterisoittimissa 105–118 cm.

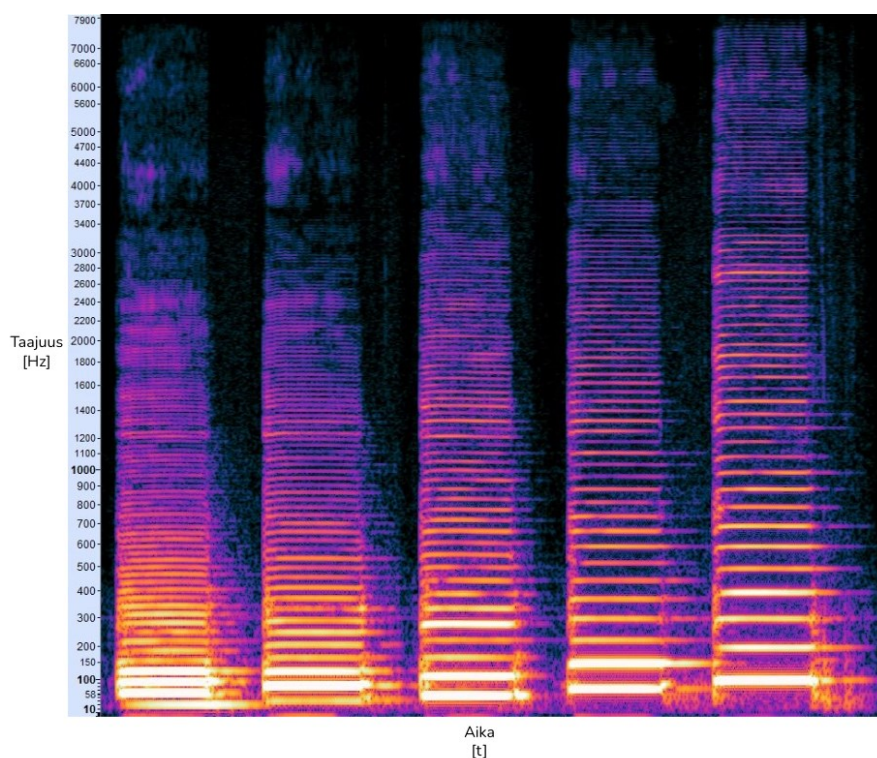
## 2.2 Kontrabasson taajuusalue

Kontrabasso viritetään puhtaisiin kvartteihin. Sen avoimet kielet ovat korkeimmasta matalimpaan  $G_2$ - $D_2$ - $A_1$ - $E_1$ . Viisikielisessä kontrabassossa matalin kieli on  $H_0$  ja C-jatkeellisessa  $C_1$ . Yleisesti käytetty orkesterin viritysääni on  $A_4 = 440$  Hz, jolloin basson avoimet kielet ovat perustaajuuksiltaan  $G_2 = 98,0$  Hz,  $D_2 = 73,4$  Hz,  $A_1 = 55,0$  Hz,  $E_1 = 41,2$  Hz,  $C_1 = 32,7$  Hz ja  $H_0 = 30,9$  Hz. Kuvassa 3 näkyy 5-kielisen kontrabasson vapaat kielet nuottiviivastolla.



Kuva 3: 5-kielisen kontrabasson avoimet kielet (kuva: likka Järvi)

Modernissa orkesterirepertuaarissa kontrabassot joutuvat välillä virittämään viidettä  $H_0$ -kieltä alaspäin jopa  $A_0=27,5$  Hz:iin tai  $G_0=24,5$  Hz:iin asti, mutta se ei ole kovin yleistä. Otelaudan korkein painettu ääni on  $D_5=587,3$  Hz, jonka jälkeen kontrabassolla voi vielä soittaa huiluääniä, jotka syntyvät painamalla kevyesti yläsävelten värähtelyaaltojen solmukohdista. Useimmiten perinteisessä orkesterirepertuaarissa kontrabasso soittaa selloa tuplaten oktaavia matalammalla,  $C_1(32,7\text{ Hz}) - G_3(196,0\text{ Hz})$  perustaajuusalueella. Kontrabasso soi oktaavia matalammalla, kuin nuotissa on kirjoitettu, toisin kuin sello, joka soi kirjoitetussa oktaavissa.



Kuva 4: 5-kielisen kontrabasson avointen kielten harmoniset sarjat järjestyksessä  $H_0-E_1-A_1-D_2-G_2$ .

Kontrabasson, kuten muidenkin jousisoitinten sointi, sisältää perustaajuuden lisäksi harmonisia kerrannaistaajuuksia, joita kutsutaan yläsävelsarjoiksi. Kuvassa 4 näkyy kontrabasson vapaiden kielten yläsävelsarjat soitettuna Musiikkitalon tyhjässä konserttisalissa. Kuten kuvasta nähdään,  $H_0$ - ja  $E_1$ -kielillä perustaajuus on heikompaa kuin ensimmäinen ja toinen yläsävel. Näin on myös  $D_2$ -kielillä, mutta  $A_1$ -

kielen perustaajuus soi vahvasti, johtuen todennäköisesti soittimen Helmholtz-taajuudesta. Matalien  $H_0$ - ja  $E_1$ -kielten yläsävelet soivat huomattavasti noin 2 500 Hz:iin asti, mutta suurin sointienergia jää 700 Hz:n alapuolelle. Keski-kielillä  $A_1$  ja  $D_2$  huomattavia yläsäveliä on nähtävissä vielä 3 500 Hz:n läheisyydessä.  $G_2$ -kielellä perustaajuus soi vahvimmin, ja yläsävelsarja ulottuu aina 7 000 Hz:iin asti. Tämän kielen perustaajuuden soivuus johtuneen kaikukopan kannen ja pohjan ominaismooditaajuuksista [13].

Sinfoniaorkestereissa käytetään yleisesti joko viisikielisiä tai C-jatkeellisia kontrabassoja. Jo 1700-luvulla säveltäjät sävelsivät kontrabassoille  $C_1$ :hen asti, ja oli soittajan vastuulla joko virittää instrumentti niin, että sillä pystyi soittamaan matalimmat äänet tai vaihtoehtoisesti soittaa ääni eri oktaavista [14]. Richard Wagner (1813–1883) oli ensimmäinen säveltäjä, joka vaati, että kontrabassot täytyy virittää alas kirjoitettuun ääneen [15]. Tämä johti siihen, että Leipzigin Gewandhaus-orkesterin kontrabasisti Carl Otho kehitti ja patentoi viidennen kielen vuonna 1880. Viidennen kielen käyttö kuitenkin vaati siihen aikaan perinteistä suurempikokoisemman kontrabasson, ja samana vuonna kehitettiin jo olemassa oleviin soittimiin lisättävä C-jatke, jatkopalamekanismi, joka pidentää neljättä kieltä  $E_1$ :stä  $C_1$ :hen [7]. Vasta 1900-luvulla 5-kielisten tai C-jatkeellisten soitinten käyttö alkoi yleistymään orkestereissa. Orkesterikirjallisuudessa näkyy tätä vanhempien teoksien uusissakin painoksissa oletuksia siitä, että kontrabassoilla olisi käytössään vain neljä kieltä, ja soittaessaan samaa sellojen kanssa kontrabassoille on kirjoitettu nuottiin hyppy oktaavilla ylöspäin äänien mennessä  $E_1$ :tä matalammaksi. Kapellimestarit ja kontrabasistit oman harkintansa mukaan lisäävät näiden äänien tilalle viidennellä kielellä tai C-jatkeella soitettujen selloille kirjoitettua vastaavan äänen, joten  $H_0$ - ja  $C_1$ -kielten käyttö orkestereissa on yleisempää, kuin orkesterikirjallisuudessa näkyy [16].

## 2.3 Kontrabasson soittaminen

Kontrabassoa soitetaan joko seisten tai korkealla tuolilla istuen. Äänenkorkeutta muutetaan painamalla kieltä otelautaa vasten, jolloin soivan kielen pituus lyhenee. Ääntä voi elävöittää soittajan painetun sormen edestakaisella liikkeellä, nk. vibratolla, jolloin äänen taajuus vaihtelee muutamalla hertsillä. Vibraton laajuutta ja nopeutta vaihdellaan soittajan näkemyksen mukaan. Kokonsa vuoksi kontrabasson alapuolella oleva piikki, eli stakkeli, on lattiassa kiinni. Kontrabasso herätetään äänilähteeksi yleensä oikealla kädellä soittamalla joko jousella (*arco*) tai sormilla näppäilemällä (*pizzicato*). Kontrabasson pizzicatoissa on vahva transientti, eli nopea korkea-amplitudinen aluke, jota seuraa vaimenemisaika, joka on pidempi

kuin muilla jousisoittimilla. Kielten massasta johtuen matalat kielet resonoivat pidempään kuin korkeat. Pizzicatossa tallaan kohdistuva voima on kanttipulssi, jonka leveys riippuu näppäyskohdasta. Näin pizzicatossa yläsävelistä puuttuu kaikki  $n$ -kerrannaiset taajuudet, jos soivan kielen pituuden ja näppäyskohdan suhde on  $1/n$  [17].

Jouseen lisätään kitkaa pihkasta valmistetulla hartsilla, ja vedettäessä jousella kieli tarraa ja irtoaa siitä toistavalla kaavalla. Tätä kutsutaan slip-stick- tai Helmholtz-liikkeeksi. Kieli liikkuu jousen mukana kahtena suorana, jotka ovat kulmassa toisiinsa nähden. Kulma kulkee avointa kieltä pitkin molempiin suuntiin, eli kaksi kertaa kielenpituuden yhdessä jaksonajassa [18]. Kun tämä Helmholtz-kulma liikkuu ylös kieltä virituskoneistoa päin, kieli on jousessa kiinni, eli on stick-vaiheessa. Kun kulma kulkee kieltä alas, ja siirtyy jousen ja tallan väliin, kieli luiskahtaa nopeasti takaisinpäin jousen vetosuuntaan nähden, jota kutsutaan slip-vaiheeksi. Slip- ja stick-vaiheiden pituuksien suhteet riippuvat jousen paineesta, jota varioimalla voi saada aikaan erilaisia efektejä. Ideaalilla Helmholtz-liikkeellä tallaan kohdistuva voimasignaali on aina saha-aalto riippumatta jousen etäisyydestä tallasta. Kontrabasson orkesterisoitossa käytetään usein jousenkäytöllisiä efektejä, kuten ”*sul tasto*” (otelaudan päällä), josta tulee pehmeämpi ja ilmava sointi, tai ”*sul ponticello*” (lähellä tallaa), joka kuulostaa karheammalta ja metalliselta. Erot eivät niinkään johdu jousen sijainnista, vaan siitä, että näissä jousen asennoissa jousen nopeutta ja painetta voi käyttää eri tavalla. Tallan lähellä on pakko soittaa suuremmalla jousen paineella Helmholtz-liikkeen ylläpitämiseksi, ja otelaudan päällä painetta tarvitaan vain vähän, tai soitin ei välttämättä reagoi herätteeseen juuri ollenkaan. Tällöin Helmholtz-kulma pyöristyy ja ylemmät yläsävelet vaimenevat sen seurauksena. Suurella paineella jouta pitää käyttää hitaammin, ja hidas jousenkäyttö herättääkin korkeita yläsäveliä vahvemmin kuin nopea. Itse spektrin muoto ei muutu pelkän jousen sijainnin takia [19].

Usein orkesterimusiikissa kontrabassot toistavat jousella nopeasti yhtä ääntä, eli soittavat nk. tremoloa. Tremololla saadaan aikaan soinnille tutiseva pohja. Kontrabasson sointia voi myös muokata sordiinolla (engl. *mute*), eli puisella tai muovisella kappaleella, joka kiinnitetään tallaan. Se vaimentaa tallan värähtelyä ja signaalin siirtymistä kaikukoppaan. Muita usein käytettyjä soittotekniikoita ovat mm. huiluäännet, jotka syntyvät painamalla kevyesti yläsävelten värähtelyaaltojen solmukohdista. Siitä tuleva heleä ääni syntyy, kun sormi estää kielen liikettä täysin vaimentamatta sitä.

## 2.4 Kontrabasson sointi

Värähtelevä kieli tuottaa voimaa, joka sisältää perustaajuuden lisäksi suuren määrän harmonisia yläsäveliä. Kielistä värähtely siirtyy tallan kautta kaikukoppaan. Kaikukoppa toimii Helmholtz-resonaattorina, jonka taajuus riippuu instrumentin koosta. Kontrabassojen Helmholtz-ominaistaajuus A0 on yleensä välillä 58–68 Hz [20]. Isommilla soittimilla, kuten orkestereissa käytetyillä 5-kielisillä, se voi olla tätäkin matalampi. Helmholtz-taajuuden alapuolella kontrabasso säteilee heikosti, ja alimmilla kielillä perustaajuus voi olla jopa 20 dB heikempi kuin ensimmäinen harmoninen kerrannaistaajuus [21]. Kontrabasso säteilee ääntä ilmaan kaikukopan kautta, mutta myös epäsuorasti stakkelin läpi lavan kautta.

Soittimen värähtelyominaisuuksia voi kuvata sen ominaismoodeilla. Kullakin soittimella on kontrabasson muodosta johtuvat omat mooditaajuutensa. Kaikukopan kannen ja pohjan resonanssien perustaajuus T1 on taajuudeltaan keskimäärin välillä 82–114 Hz. Muita moodeja ovat kaikukopan moodit C1, C2, C3 ja C4 (C tulee latinan sanasta ”*corpus*”, kroppa) sekä kaulan moodi N ja edellä mainittu Helmholtz-taajuus A0. Näistä C1, C2, N ovat yksiulotteisia värähtelijöitä, ja näin ollen eivät säteile ääntä [13]. Kontrabasson kaikukopan rungon soivat värähtelymoodit T1, C3 ja C4 ovat hyvin lähellä toisiaan, noin 100 Hz:n taajuudella. Mikäli jokin herätetyn kielen yläsävelistä on jonkin mooditaajuuden lähistöllä, se säteilee soittimesta voimakkaammin [20].

Kontrabasso on kokonsa puolesta liian pieni säteilemään matalimpia taajuuksia suorana äänilähteenä.  $H_0$  on aallonpituudeltaan yli 11 metriä pitkä, joten kontrabasson äänen suuntaavuus on ympärisäteilevää. On havaittu, että kontrabasson soinnissa jokaisella yläsävelellä on oma, muista osasävelistä riippumaton säteilysuuntaavuutensa [22]. Meyer mittasi, että 100 Hz:n taajuudella äänensäteily on vahvimmin monisuuntaista [23], varmaankin johtuen soittimen ominaismoodeista. Pätyksen ja Lokin mukaan kontrabasson säteily on kohtalaisen tasaista poikittaisessa pystytasossa, ja 63 Hz oktaavikaistalla kontrabasso soi vahvimmin eteenpäin alaviistoon [24]. Kuitenkin matalilla taajuuksilla kontrabasson suuntaavuus on enemmän ympärisäteilevää kuin korkeilla [25]. Säteilyominaisuuksista johtuen konserttisaleissa voi akustiikasta riippuen havaita kontrabassojen sointia hyvin epätasaisesti.

Soittimista säteilevien perustaajuuden ja yläsävelien yhdistelmää kutsutaan sointiväriksi tai äänensävyksi. Kontrabasson soinnilta haluttuja sävyominaisuuksia ovat muun muassa lämpö, leveys, pehmeys, tummuus, intimiteetti ja ympäröivyyttä

[2]. Sointiväri riippuu soittimen laadusta, mutta se on myös vahvasti riippuvainen konserttisalin akustiikasta. Sinfoniaorkesterin soinnissa on lämpöä, mikäli kontrabassot kuuluvat riittävästi orkesterin läpi yleisöön [3]. Kuulijat kokevat lämpöä myös, jos soinnissa on jopa 20 Hz:iin asti matalia taajuuksia riittoisan pitkällä vaimenemisajalla [26]. Intimiteettiä, leveyttä ja ympäröivyyttä saadaan aikaiseksi riittäväällä määrällä aikaisia heijastuksia konserttisalin eri pinnoista [27].

### 3. Kontrabasso konserttisalissa

Täysikokoisissa sinfoniaorkestereissa on 8 kontrabasistia. Konserttisaleissa kontrabassoryhmä sijoitetaan kahteen riviin (4+4) lavan takareunaan, useimmiten kapellimestarista ja etupermannosta katsottuna oikealle. Joissakin tapauksissa kontrabassot voivat myös olla vasemmalla puolella. Wienin Musikvereinissa, jossa kontrabasson sointia pidetään erityisen hyvänä, kontrabassoryhmä istuu puupuhaltimien takana yhdessä rivissä lavan takaseinää vasten.

Kontrabasson äänten pitkistä aallonpituuksista ja suuntaavuuksista johtuen sen sointi ja kuulokuva riippuvat suuresti tilan akustiikasta. Heijastuksilla on suuri vaikutus äänen laatuun. Epäsoveltuvassa tilassa hienompikin arvosoitin voi olla kuulokuvaltaan tai soittotuntumaltaan huono [8]. Sinfoniaorkesterissa kontrabasson kompleksiset yläsävelet voivat peittyä korkeaäänisempien soitinten soinnin alle, joten basson havainnoinnin takia on tärkeää, että matalat taajuudet soivat salissa vahvasti. Kontrabassojen soinnin kuulemisen vuoksi konserttisalien akustiikassa tulisi keskittyä juuri matalien taajuuksien tukemiseen.

Muusikot pitävät konserttisalia soittimen jatkeena, ja optimaalisesti sali tukisikin soittotuntumaa, kuulokuvaa ja yhteissoittoa. Yleisölle salin tulisi tukea orkesterin ilmaisua ja dynamiikkojen vaihtelua, jotta kuulokokemus olisi nautinnollista. Tärkeä ominaisuus niin soittajille, kuin yleisölle on tilavaikutelma (engl. *spatial impression*), joka liittyy vahvasti musiikin kokemiseen ja tuntemiseen, eli siihen kuinka ääni ympäröi kuulijan salissa. Se saadaan aikaan lateraaleilla heijastuksilla ensimmäisen 80 millisekunnin sisällä suoran äänen saapumisesta [28]. Kun konserttisaleja arvioidaan yleisessä keskustelussa, usein esiin nousevat salin äänekkyyys, kaikuisuus, äänen ympäröivyyys (engl. *envelopment*) ja leveys. Musiikin äänekkyyys, kaikuisuus ja leveys vaativatkin vahvan basson soinnin [29].

Tahvanainen, Pätynen ja Lokki ovat tutkineet, mikä kontrabasson havainnoinnissa orkesterimusiikissa on tärkeää yleisölle. Tremoloissa, eli yksittäisen äänen soittamisessa tiheällä ja nopealla jousen käytöllä, yleisö toivoo voimakasta basson sointia, kun taas selkeissä melodioissa ja fraaseissa, eli musikaalisissa linjoissa, artikulaatio on merkitsevä tekijä. Mikäli basso on säestävässä roolissa, niin silloin basson soinnin määrä on tärkeää, ja tällöin salin artikulaatiokyky parantaa basson soinnin laatua [30]. Sormilla näppäillessä, eli pizzicatoissa, soinnin lämpö on toivottava ominaisuus [29]. Soittajille pizzicatoissa tärkeitä ominaisuuksia ovat napakka impulssi ja soinnin pyöreys. Tähän vaaditaan salin tuki vahvalle transientille ja pitkä vaimenemisaika.

Seuraavaksi tarkastelemme, millaisia vaatimuksia kontrabasson kuulemiseen konserttisalissa on eri käyttäjien näkökulmasta: itse soittajalla, muilla orkesterin muusikoilla sekä yleisöllä, ja mitkä tekijät konserttisalin arkkitehtuurissa vaikuttavat siihen, miten kontrabasso soi tilassa.

### 3.1 Salin tekijät kontrabasson soittajalle

Kontrabasistin soittokokemus ei perustu vain soittimen ominaisuuksiin, vaan myös siihen millä tavalla soitin on tilan kanssa vuorovaikutuksessa. Kontrabasso on mekaanisesti kytketty lattiaan stakkelin kautta. Stakkeli toimii mekaanisena pistevoimana, jonka kautta soiton värähtelyä siirtyy lavan rakenteisiin. Stakkelilla on impedanssi, joka on suurimmillaan noin 100 Hz taajuudella, ja sitä matalammilla taajuuksilla kontrabasso toimii värähtelyä siirtävänä massana. Lavan lattian oma impedanssi vaikuttaa kontrabasson soitettavuuteen, eli soittotuntumaan vuorovaikutuksella tallaimpedanssin kanssa. Tallaimpedanssi ja tallan liikkuvuus riippuvat lavan rakenteesta, ja joustava lava helpottaa energian siirtoa soittajalta lattiaan sekä myös ilmaan. Soittotuntuma on parhaimmillaan, kun lattian impedanssin ja stakkelin impedanssin välinen vaihe-ero on  $180^\circ$ . Tämä impedanssisovitus tapahtuu helpoiten lavan taipuisimmissa osissa palkkien välillä [31]. Tallaimpedanssi on keskimäärin vahvimmillaan 63 Hz oktaavikaistalla, eli jos lavan ominaisvärähtely on tällä alueella, soittajan näkökulmasta soitin reagoi herkemmin ja soittimen säteilytehokkuus salissa on parempi [32].

Sekä paras matalien taajuuksien siirto että soittotuntuma varmistetaan sillä, että lava on joustava alle 100 Hz:n taajuudella. Jos tilassa on liian kiinteä lattia, kontrabasso ei tunnu reagoivan soittoon. Kielet vastustavat mekaanista herätystä, joka johtuu lattian vaikutuksesta tallan impedanssiin, eli värähtelyn siirto tallan

kautta kaikukoppaan heikkenee. Kontrabasson ominaismoodit pyrkivät mekaanisesti saamaan soittimen kroppaa värähtelemään, ja kun se on lattiaan kytketty, soitin ei pääse värähtelemään yhtä hyvin kuin jos sitä pidettäisiin ilmassa. Optimaalinen lattia tukee sitä, että kontrabasso siirtäisi sen kautta värähtelyä ilmaan, jolloin soittajan äänen projisointi on helpompaa.

Kontrabasso ei säteile Helmholtz-taajuuttaan matalampia perustaajuuksia tai harmonisia yläsäveliä tehokkaasti, ja soittaessa näiden äänien värähtelyenergia jää seisomaan soittimen sisään. Lattia tai koroke, eli raiseri, voi hyvissä olosuhteissa vahvistaa näitä taajuuksia värähtelyn siirtyessä lattiaan ilman tai stakkelin kautta. Useassa modernissa konserttisalissa kontrabassot sijaitsevatkin kiinteillä tai moottorilla nostettavilla raisereilla. Oikeanlaisilla raisereilla voi potentiaalisesti saada jopa 5 dB:n vahvistuksen 40–60 Hz välillä, ja jopa vielä suuremman 30–40 Hz välillä. Tämä johtuu siitä, että raiserit on helpompi saada värähtelemään kuin täysin jäykkä lattia. Tarpeeksi joustava lattia parantaa soittimen soitettavuutta, kun jousi–kieli-vuorovaikutuksessa on enemmän kontrollia [33, 21]. Soitosta saa näin napakampaa, kun soitin reagoi herätteeseen nopeasti.

Jotta lava saataisiin stakkelin läpi kulkevan energian avulla värähtelemään ja näin siirtämään värähtelyä ilmaan, lavan pitäisi olla tarpeeksi kiikkerä [21]. On havaittu, että stakkeli-impedanssin voi sovittaa lattiaan, ja matalien taajuuksien säteily lattiasta 31 Hz ja 63 Hz oktaavikaistoilla on mahdollista saada aikaiseksi [34]. Stakkelin läpi kulkevat värähtelyt ovat kuitenkin huomattavasti heikompia kuin tallan värähtelyt. Koska niiden amplitudi on pieni, parhaimman tuloksen saamiseksi suuri alue lattiaa pitäisi saada värähtelemään [13].

Toisaalta raiserit voivat myös olla epätasaisia basson soinnille, ja vierekkäisten puolisävelaskelten voimakkuuserot voivat olla  $\pm 4$  dB [35]. Lavan pinnan värähtely vahvistaa taajuuksia vain lattian kannen ja raiserin ontelon resonanssitaajuuksien ympäristössä. Mekaaninen pistevoima, tässä tapauksessa stakkeli, suurentaa äänenpainetasojen huippuja kannen resonanssitaajuuden ympäristössä, mutta suurentaa myös vaimennuksia näillä taajuuksilla. Näin ollen siitä ei saa suurta akustista vahvistusta laajalla taajuusalueella. Vahvistus tai heikennys riippuu siitä, kuinka hyvin soittimesta lähtevä ilmaääni on synkronissa lavan värähtelyn vaiheen kanssa, mikä taas riippuu yksittäisen soittimen säteilyominaisuuksista. Myös raiserin rakenne vaikuttaa äänikenttään laajalla taajuusalueella, ja raiserin etukulmat voivat myös lisätä äänenpainetasoa, koska ne heijastavat raiserin reunassa diffraktoituneita ääniaaltoja eteenpäin. Matalilla taajuuksilla äänenpainetaso voi näin vahvistua kaukokentässä, eli yleisössä, mikäli raiserin etukulma on tarpeeksi suuri näitä taajuuksia heijastaakseen [36]. Raisereissa kannattaisikin olla mahdollisimman vähän sektioita, ja yhden nosturin kannattaisi olla kooltaan mahdollisimman suuri. Myös raisereiden alle jäävän tyhjän tilan

sisällä ei saisi tapahtua minkäänlaista absorptiota, muuten soinnista voi kadota taajuuksia laajalla kaistalla [37].

Toisaalta hyvin tärkeää on myös lattian rakenne. Koska suurempi osa basson värähtelyenergiasta siirtyy kaikukopan kautta ilmaan kuin stakkelin kautta, niin lava onkin tärkeä heijastava pinta ilmasta saapuvalla basson soinnille. Kontrabasson sointi on matalilla taajuuksilla vahvimmillaan eteenpäin alaviistoon [24], ja kun äänilähde on lähellä kovaa heijastavaa pintaa, eli murto-osan päässä taajuuden aallonpituuteen verrattuna, se voimistuu. Kontrabassolle ja sen soittajalle tärkeimmät ilmaääntä heijastavat pinnat ovatkin lattia ja lavan takaseinä [21]. Resonoiva lattiatuki saadaan kovan lattiapinnan heijastuksen ja elastisen pinnan värähtelyyn ajavan pistevoiman aiheuttaman ääniaallon välisestä intereferenssistä [38], eli optimaalinen lattia kontrabassolle olisikin kovasta puusta tehty tarpeeksi kiihkeräakenteinen lava. Liian pehmeä ja harva puumateriaali lattiassa taas absorboi ilmasta tulevia matalia taajuuksia [37].

Koska kontrabasso on matalilla taajuuksilla ympärisäteilevä soitin, toinen tärkeä heijastustuki on bassosektion takana oleva seinä. Kovat heijastavat seinät bassojen takana lisäävät matalan värähtelyn energiaa [39]. Seiniin pätee sama kovuuden vaatimustaso kuin lattiaan. Resonoivat seinärakenteet vaimentavat matalien soitinten perustaajuuksia ja ohut puupanelointi absorboi basson energiaa [40]. Basson sointia tukeakseen salin kaikki pinnat paitsi lavan lattia tulisikin olla jäykkää, tiivistä materiaalia ja seinien tulisi olla tarpeeksi suuria ja jäykkiä bassotaajuuksien heijastamiseksi [41, 3]. Kovat seinät bassojen takana tekevät bassojen soinnista selkeämpää ja parempisointista [42]. Matalilla taajuuksilla heijastus seinän pinnasta on vaiheessa suoran äänen kanssa ja yksittäinen kova takaseinä voi lisätä kontrabasson äänekkyyttä jopa 6 desibelillä [1]. Kontrabasson soittaja tarvitsee vahvan seinätuen, sillä isossa salissa ääni katoaa soittajan lähikentästä nopeasti. Takaseinästä, ja myös lattiasta tulevat heijastukset auttavat soittajaa kuulemaan itsensä sekä muut saman soitinryhmän soittajat, jolloin intonaatio, kuulokuva omasta soitostaan, sekä äänenlaatu paranevat. Ilman vastetta omasta soitosta, soitto menee helposti puristamiseksi, jolloin soinnista tulee karkeaa ja raakaa.

Muilla matalaäänisillä orkesterisoittimilla, kuten tuuballa, fagotilla tai patarummuilla, ei ole samanlaista soittimen fysiikasta johtuvaa ongelmaa tuottaa matalimpia ääniä kuin kontrabassoilla [1]. Kahle ehdottaakin, että lavan takaseinä, jonka läheisyydessä nämä soittimet sijaitsevat, voisi olla absorboiva [43]. Sivuseinä- ja kattoheijastukset tukevat orkesteria, mutta takaseinä voisi siirtää energiaa sivuseinille lisäten basson sointia yleisölle lateraalisilla heijastuksilla [41]. Kahlen tutkimus oli tehty perinteisessä kenkälaatikkomallisessa konserttisalissa. Keskusteluissa RSO:n ja HKO:n muusikoiden kanssa ilmenee, että takaseinän absorptio viinitarhamallisissa ei välttämättä ole tarpeellista. Takaseinää vasten

olevat vaski- ja lyömäsoittajat ovat valitelleet oman sointinsa tarkkuuden ja voimakkuuden puutetta.

### 3.2 Salin tekijät muille soittajille

Kullakin soittajalla sinfoniaorkesterissa on erilaisia kuulemistarpeita, mutta tärkeimpiä ovat oman soitinryhmän ja sooloa soittavien instrumenttien kuuleminen. Näiden lisäksi kontrabassojen kuuleminen on hyvin tärkeää muille soittajille, 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 koko soinnun. On siis tarpeellista, että basso kuuluu riittävän selkeästi orkesterin sisällä. RSO:n ja HKO:n muusikot ovat kertoneet, että he toivovat napakkaa ja vahvasti syttyvää kontrabasson sointia, sillä useat kapellimestarit sanovat, että orkesterissa muut soittajat eivät saa soittaa ennen kuin kuulevat kontrabassojen äänen syttyvän. He toivoivat myös, että suurissa dynaamikoissa koko orkesterin soittaessa basso olisi vahvasti kuultavissa ja niiden sointi olisi ympäröivää.

Matalilla taajuuksilla 125 Hz oktaavikaistaan asti ilmaääni liikkuu lavalla soittajien välissä täysin vapaasti. Lattiaheijastukset ovatkin isossa roolissa bassoäänen heijastuksessa, ja ne voivat nostaa matalien taajuuksien äänenpainetasoa. Tasaisella lavalattialla suora ääni ja lattiaheijastukset interferoivat käytännössä aina konstruktiiivisesti, mutta jos orkesteri on raisereilla, lattiaresonanssi heikkenee verrattuna tasaiseen lattiaan, varsinkin 250 Hz oktaavikaistalla [44]. Raiserit kuitenkin auttavat soittamisen näkövihjeiden saamisessa toisilta soittajilta. Kuten edellisessä osiossa todettiin, raiserit voivat olla loppujen lopuksi hyödyllisiä myös muiden soittajien bassovasteelle, mikäli niiden rakenne on oikeanlainen.

Kuten kontrabasson soittajille, bassojen takana olevan kovan pystyseinän on todettu olevan tärkeä myös muille soittajille sekä yleisölle. Halmrastin kokeiluissa Oslon konserttisalissa muut soittajat ja yleisö huomasivat kontrabassojen kuuluvan paremmin sekä soinnin paranevan, kun bassojen taakse lisättiin pystysuorat heijastavat pinnat. Raportin mukaan tämä toimii erityisen hyvin sellaisissa saleissa, jossa lava on leveä, eli käytännössä useimmissa sinfoniakonserttisalissa. Yleisöön bassoilla oli näin täyteläisempi sointi ja muulle orkesterille kontrabassot kuuluivat napakammin, joka helpotti muun muassa tempovihjeiden selkeyttä [45]. Myös Kahle havaitsi samaa omissa kokeiluissaan [42].

### 3.3 Salin tekijät yleisölle

Sinfoniamusiikin yleisöllä on erilaisia mieltymyksiä kuuntelukokemuksen suhteen. Lokin tekemässä tutkimuksessa 17 hengen kuunteluryhmä arvioi yhdeksän eri konserttisalin akustiikkoja. Tutkimuksen tulos oli, että suosituimpia olivat salit, joissa oli tarpeeksi äänekkyyttä, kuulijan ympäröivää sointia, tarkkaa erottelukykyä sekä intimitettiin vaikuttavaa vahvaa bassosointia. Tutkimuksen lopputulokset jakautuivat kahteen ryhmään, joissa kummallekin ryhmälle oli tärkeitä erilaiset sointiominaisuudet. Molemmat ryhmät kuitenkin pitivät sointikuvassa tärkeänä selkeää ja vahvaa basson sointia [2].

Yksi merkittävimmistä yleisön bassoäänten kuulemiseen vaikuttavista tekijöistä on nk. seat-dip-ilmiö. Ilmiö syntyy, kun ääni saapuu yleisön istuinriveille viistäen yleisöä hyvin pienessä kulmassa, jolloin soinnin matalat taajuudet voivat vaimentua merkittävästi [46, 47]. Yleisön tuolirivit levittävät matalien taajuuksien äänienergiaa ajassa, ja tuolien viivästävä sointi interferoi destruktiivisesti suoran äänen kanssa [48]. Ilmiö ei siis niinkään riipu tuolien pehmestyksen omasta absorptiosta, vaan yleisötuolin korkeudesta. Lopullinen seat-dip-taajuus riippuu kuulijan pituudesta [49], ja sen vaimennusalue useimmissa konserttisaleissa löytyy 80–300 Hz:n taajuusalueelta. Mikäli ääni pääsee liikkumaan tuolien alta, niin silloin seat-dip-taajuus on korkeampi [46, 47]. Seat-dip voi aiheuttaa bassoille jopa 6 dB:n vaimennuksen [50], joten luonnollisesti saleissa, joissa seat-dip-taajuus on korkeampi, basso havainnoidaan paremmin [51].

Viinitarhamallisissa konserttisaleissa, kuten Helsingin Musiikkitalossa, seat-dip-taajuus on joko laaja- tai kapeakaistaisesti noin 100 Hz:n taajuusalueella [52]. Matalaäänisten soitinten sointi, kuten kontrabasson, voi peittyä korkeäänisempien sointiin. Esimerkiksi jos seat-dip on 100 Hz:n ympäristössä, perustaajuudet katoavat suorasta äänestä, jolloin bassosta havaittavat vahvemmin soivat harmoniset yläsävelet sekoittuvat soittimiin, jotka soittavat korkeampaa perustaajuutta. Tällaisissa tapauksissa basso vaikuttaa heikommalta yleisölle. Jos taas seat-dip käsittää korkeampia taajuuksia, niin kontrabasson yläsävelet voivat vaimentua, mutta fundamentaalit eivät tule muiden soitinten peittämäksi, ja basso pystytään havainnoimaan orkesterin soinnista selvemmin [53].

Seat-dipin aiheuttaman vaimennuksen parantamiseksi on ehdotettu, että sitä voi korjata esimerkiksi lisäämällä venttiileitä yleisötuolien alle, jotka absorboisivat tuolirivien myöhästämää ääntä Helmholtz-resonaattoreina [54], tai jopa laittamalla yleisötuolit kellumaan metallirasterille isomman montun päälle [55], mutta kuitenkin helpoin ja tehokkain keino seat-dipin korjaamiseksi on keskittyä konserttisalin heijastuksiin. Basson puute huomataan silloin, kun seat-dipin vaimentama taajuuskaista puuttuu myös salin jälkikäynnästä [46].

Koko saliin tasaisesti jakautuneet heijastukset 30–80 ms:n sisällä kuulijalle suorasta äänestä ovat tehokkain tapa seat-dipin kompensointiin [49]. Riittävän aikaisen bassoenergian tuottamiseksi yhtenäisellä tilallisella kattavuudella, konserttisaliin tarvitaan useita bassotaajuuksia heijastavia pintoja, jotka ovat eivästävissä (engl. *non-grazing*, ei liian loiva) tulokulmissa yleisöön nähden. Salissa tulisi siis olla yhdistelmä tarpeeksi suuria seiniä, parvitasoja tai kattoheijastimia erilaisissa orientaatioissa yleisöön nähden, jotta basson ääni kuuluisi yleisölle voimaakkaana ja soinnillisesti laadukkaana [56]. Ääntä diffusoivat sivuseinäpinnat eivät ole tehokkaita seat-dipin korjaamiseen, vaan lateraalit heijastukset tasaisista pinnoista, jotka sisältävät seat-dipin vaimentamia taajuuksia, ovat toimivimpia [57, 52].

Sivuheijastusten määrä vaikuttaa myös kuulohavainnoinnin kynnykseen, jolloin orkesterin soittamat dynamiikan vaihtelut havaitaan paremmin. Tällöin musiikki koetaan voimakkaammin, etenkin crescendoissa, eli äänen voimakkuuden kasvaessa [58]. Tällaisia konserttisaleja pidetään musiikillisesti vaikuttavina. Saleissa, joissa on parempi lateraalienergia, basson vaste on myös parempi [57]. Lateraalien heijastusten lisääminen onkin ollut usein käytetty konserttisalien basson soinnin parannuskeino [5, 6].

Lateraalit heijastukset eivät ole hyödyllisiä pelkästään basson soinnille. Yleisölle konserttisalien laatu perustuu vahvasti siihen, millaisia varhaisia heijastuksia sali saa aikaan. Ensimmäisten 30–60 millisekunnin sisällä kuulijalle saapuvat lateraalit heijastukset ovat erityisen tärkeitä, sillä ne luovat tilavaikutelmaa, lisäävät äänen leveyttä sekä tukevat matalien taajuuksien sointia [27]. Hyvässä tilavaikutelmassa kuulija kokee olevansa musiikin ympäröimänä, ja voimakkaana soivat matalat taajuudet ovat tärkeitä tämän aikaansaamiseksi [59]. Katosta ja suoraan edestäpäin saapuvat heijastukset vaikuttavat pääasiassa äänen sointiväriin, ja eivät näin ole yhtä tehokkaita tilavaikutelman luomisessa kuin sivuilta saapuvat heijastukset [59, 28].

Basson kuuluvuuden kannalta heijastavien pintojen tulisi olla selvästi suurempia kuin matalimpien taajuuksien aallonpituudet. Sivu- ja parviheijastukset, jotka

tuottavat aikaisia heijastuksia loivista, mutta ei-viistävästä tulokulmista, kuitenkin aallonpituuksien koon takia tarpeeksi suurissa avaruuskulmissa äänilähteestä katsottuna, ovat basson tukemiseksi tehokkaimpia [60]. Näiden pintojen tulisi olla alle 15 metrin päässä äänilähteestä sellaisessa orientaatioissa, että niistä tulisi ensimmäisen tai korkeamman kertaluvun heijastuksia joko yleisölle tai takaisin muusikoille [61]. Liian pienet pinnat eivät heijasta bassotaajuuksia, vaan ääniaallot diffraktoituvat niiden ympärille, jolloin basson sointi heikkenee [62].

Suoraa ääntä seuraavat useat peräkkäiset varhaiset heijastukset 30 millisekunnin sisällä yhdistyvät kuulohavainnossa, eikä niitä koeta kaikuna [63]. Tätä kutsutaan presedenssi-, eli Haasin ilmiöksi [64]. Mikäli yksikään heijastus ei ole huomattavasti äänekkäämpi kuin muut, niin aikaiset heijastukset voivat yhdistyä musiikissa vielä pidempään kuin 30 millisekunnin verran, jolloin musiikki koetaan vaikuttavampana ja leveämpänä [65]. Resonoivat seinärakenteet vaimentavat heijastusten ääntä perustaajuuksien lähellä, ja kun erilaiset heijastukset eivät yhdistykään kuulijan korvassa, kuulokuva huononee, eli Haasin ilmiö ei toimi tällaisissa tapauksissa [40]. Heijastavien seinien tulisi olla basson soinnin tukemiseksi raskasta ja tiheää materiaalia, kuten riittävän paksua betonia [3]. Pätyksen ja Lokin tutkimuksessa, jossa kuulijoille soitettiin näytteitä erilaisista simuloituista konserttisaleista 19 kuulijalle, havaittiin, että musiikki koettiin avoimena ja ympäröivänä, ja basson sointi laadukkaampana, kun vahvat heijastukset ympäröivät kuulijan. Niissä saleissa, joissa bassosta pidettiin, oli myös vahvoja varhaisia heijastuksia basson soittajaakin tukevista lavan sivu- ja takaseinistä [40].

Molemmat sekä aikaiset että myöhään saapuvat äänet vaikuttavat basson vahvuuden havainnointiin [66]. Ihmiskorva ei ole herkkä matalien taajuuksien saapumisajalle, joten myöhäinenkin basson sointi voi kompensoida salista puuttuvaa suoraa ääntä [62]. Kaikissa saleissa basson soinnin lämpö riippuukin jälkikäynnästä, ei aikaisesta äänikentästä [67], joten myöhäisetkin varhaiset heijastukset kompensoivat matalien taajuuksien suoran äänen vaimennusta [52].

Lokki on esittänyt, että lämmin sointi konserttisalissa vaatii sen, että konserttisalien suunnittelussa huomioitaisiin standardia matalampia taajuuskaistoja. 63 Hz, ehkä jopa 31 Hz taajuuskaista on basson soinnille hyvin tärkeää, ja vielä tärkeämpää koko orkesterin soinnille ja musiikin vaikuttavuudelle yleisölle [68].

## 4. Pohdinta

Edellisessä luvussa 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 lateraalit heijastukset tuovat bassovastetta orkesterille, ja saavat basson kuulostamaan leveältä ja lämpimältä yleisölle. Tutkimuksista havaitut konserttisalin tekijät ovat linjassa kontrabasson soittajien omien soittotuntumaan ja kuulokuvaan liittyvien havaintojen kanssa.

Kontrabasson soittaja huomaa itse lavasta ja takaseinästä saatavan soittotuen. Kovalla ja jäykällä lattialla soittaja saa heijastuksista vastetta, mutta soitin ei tunnu reagoivan herätteisiin. Joustavalla lattialla soittaminen on helppoa, mutta mikäli lattia on pehmeä, soittajan kuulokuva häiriintyy heijastusten puutteesta ja soittaminen muuttuu pakotetuksi. Lavan takaseinästä saatava vaste parantaa omaa kuulokuvaa, ja sekin helpottaa soittamista. Optimaalisessa tilanteessa salissa olisikin siis kova takaseinä, sekä kova ja joustava lattia. Musiikkitalossa valitettavasti näistä löytyy vain joustava lattia. Lattia on tehty männystä, joka on hyvin paljon pehmeämpää, kuin esimerkiksi Berwald-salissa tai Lindeman Hallissa käytetty Merbaupuu [33]. Pehmeä lavamateriaali absorboi matalia taajuuksia, ja lähes kaikissa muissa konserttisaleissa, joissa kirjoittaja on käynyt, lavan lattiapinnat ovatkin tehty kovasta puusta. Musiikkitalon lavan raiserit ovat sopivan kiikkeriä matalien taajuuksien vahvistukselle sekä soittotuntumaan vaikuttavalle tallaimpedanssille. Vahvistus ja tuntuma riippuvat siitä, millä raiserilla soittaja sijaitsee. Kuitenkaan toivottavaa äänivastetta ei saada aikaiseksi saliin, sillä stakkelivärähtelyn amplitudi on paljon pienempi kuin kaikukopan värähtely ilmaan. Lavan pehmyden takia oman soittonsa kuulee parhaiten, jos stakkelin asettaa lavan tukipalkin päälle, mutta silloin lavan joustavuudesta ei saa hyötyä.

Musiikkitalossa lavan takaseinä on ohutta 3 cm paksua ja 3 cm korkeaa koivurimoitusta, joiden etäisyys toisistaan on 3 cm. Osa äänestä vuotaa sen läpi tyhjään tilaan, missä on mm. johtoja ja muuta tekniikkaa, jotka voivat toimia diffuusereina, jolloin ääni jää seinärakenteen sisään. Ohut rimoitus itsessään absorboi matalia taajuuksia, eikä luo minkäänlaista seinätukea kontrabasson soittajille. Beranekin mukaan puupäällysteisissä saleissa puumateriaalien pitäisi olla kovaa, ja paksuuden tulisi olla vähintään 5 cm [3]. Kontrabassot soittavat kahdessa rivissä, ja eturivin soittajat saavat enemmän tukea takarivin soittajien pystyssä pitämistä soittimista, kuin takarivin soittajat seinästä. Samanlaista seinää on lähes kaikissa lavalle näkyvissä alakatsomon yleisöboksien seinissä, joten

sieltäkään ei tule vastetta orkesterille, tai yleisölle. Muita soittajia pystyykin kuulemaan kunnolla vain, jos istuu katossa olevan ison heijastimen, kanoopin alla. Soittajat tunsivat soinnin parantuvan hieman, kun Musiikkitalon urut valmistuivat, jolloin saliin saatiinkin yksi heijastava seinä lisää.

Kontrabasson kuulumisen tärkeydestä kertoo sekin, että muut soittajat kehuvat usein konserttien jälkeen kontrabassojen kuuluvuutta. Tätä tapahtuu pitkälti vain kiertueilla, jolloin RSO soittaa muualla kuin kotisalissaan. RSO oli viimeksi keväällä 2025 Salzburgissa soittamassa matalassa orkesterimontussa, jossa tilan takia koko orkesteri sijaitsi yhdellä isolla kovakantisella raiserilla, ja kontrabassot olivat yhdessä rivissä montun kovalla takaseinällä. Kontrabassot soivat todella vahvasti ja selkeästi sekä yleisöön että muulle orkesterille, ja kontrabassosektio sai siitä päivittäin positiivista palautetta.

Musiikkitalon konserttisali ei tue kontrabasson sointia, ja soittajista tuntuu, että kaikki ääni pitää tuottaa itse, jolloin soittamisesta tulee puristavaa. Tämä johtuu oman soiton vasteen puuttumisesta. Kontrabasistit eivät kuule toisiaan, varsinkaan takarivissä soittaessa. Etu- ja takarivissä soittotuntumat ovat täysin erilaisia, ja varsinkin takarivissä on käytännössä mahdotonta tuntea tuottavansa kontrabassosta hyvää ääntä. Saliin kontrabassojen terävät artikulaatiot eivät kuulu selkeinä, ja nopea soitto puuroutuu täysin. Kontrabassojen soitosta on helpompi kuulla pizzicatot, mutta se johtunee siitä, että sillä on vahvempi transientti, jolloin se on helpompi ihmiskorvan lokalisoida, kun taas arcolla on tasaisempi energia koko soiton ajan. Näin ollen salin pitäisi tukea myös soinnin jatkuvuutta.

Musiikkitalon orkesterit RSO ja HKO kokeilivat muutama vuosi sitten erillistä rullilla kuljetettavaa kovaa seinää kontrabassosektioiden takana, ja eron huomasivat sekä kontrabasistit, yleisö että muu orkesteri. Erillisen seinän lavalle tuominen oli kuitenkin ongelmallinen lavajärjestäjille, ja sen ulkonäkö haittasi joitakuita yleisön jäseniä. Myös kokeiltiin ylimääräisiä erillisiä raiserilaatikoita, jotka auttavat bassojen projisointiin joissakin kiinteälattiaisissa saleissa. Ne eivät kuitenkaan tuoneet Musiikkitalossa hirveästi ylimääräistä apua sointiin. Tästä voi päätellä, että lavan ilmaääntä heijastavat pinnat eivät tue basson ääntä. Raiserin kautta siirtynyt värähtely välittyy yleisöön vain, jos sen lähellä on matalia taajuuksia heijastavia pintoja.

Musiikkitalossa yleisössä ollessa orkesterin ääni kuulostaa sisältävän vain suoraa ääntä. Lateraalit heijastukset puuttuvat lähes kokonaan, ja kirjoittajan mielestä paras paikka kontrabasson kuuntelemiseen orkesterissa onkin yläparvilla urkujen vieressä, jossa seinät ovat kovaa betonia ja ääni tuntuu ympäröivän kuuntelijaa edes jonkin verran. Sinne ei toisaalta kuulu solisti juurikaan. Kuuluvuutta voisi kenties parantaa erillisillä heijastimilla. Yleisölle kuuluvat muut matalat soittimet, paitsi

lavakontaktissa olevat, eli kontrabasso ja sello. Vasket ja fagotit kuuluvat melko hyvin, mutta niidenkin sointi on metallista, joka kertoo matalien taajuuksien vaimennuksesta. Tämän vaimennuksen takia sellot ja kontrabassot kuuluvat kunnolla vain niiden soittaessa yksin. Kun muut jousisoittimet lisätään sointiin, niin näitä on hyvin vaikeaa kuulla, johtuen yläsävelten sekoittumisesta ja matalien taajuuksien puutteesta.

Musiikkitalossa on konserttisaleille hyvä jälkikaiunta-aika, keskitaajuuksilla yleisön läsnäollessa 2,1 sekuntia [69]. Todellisuudessa kaiunta on riittävän pitkä, paitsi matalilla ja korkeilla taajuuksilla, mutta sen taso on matala. Pitkä jälkikaiunta ei auta, koska suhteessa suoraan ääneen se on aivan liian hiljaisella tasolla, ja näin kaiuntaa ei kuule musiikin soidessa, ainoastaan taukojen aikana. Musiikkitalon kuulokuva sisältääkin pitkälti suoraa ääntä. Salissa olisikin erittäin tärkeää lisätä matalien taajuuksien heijastuksia sekä vahvistaa lateraaleja heijastuksia. Tähän voisi auttaa lavan puumateriaalin vaihtaminen kovemmaksi, ja lavan sekä yleisölohkojen seinien sulkeminen, paksuntaminen ja jäykistäminen. Salissa on joissakin seinissä käytetty umpinaista, samannäköisestä puusta tehtyä pintaa kuin rimoitus, joten rimoituksen korvaaminen sellaisella ei muuttaisi salin ulkonäköä juurikaan. Tulevaisuudessa voisi tutkia sitä, millaisia muutoksia salille voisi tehdä akustiikan parantamiseksi sekä sitä, miten nämä muutokset vaikuttaisivat kontrabassojen sekä muun orkesterin sointiin.

Toinen tulevaisuuden tutkimusaihe voisi olla basson soinnin objektiivisen mitan kehittäminen. Pitkään käytettyjä mittoja ovat olleet bassosuhde BR (engl. *bass ratio*) ja matalien äänten äänekkyyys  $G_{125}$ , mutta molemmat ovat todettu toimimattomiksi [3]. Syynä saattaa olla se, että ne keskittyvät 125 Hz oktaavikaistaan, eikä sitä matalampiin kaistoihin, tai se, että ne eivät ota jälkikaiunnan tasoa huomioon.

## 5. Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin konserttisalin akustisia tekijöitä kontrabasson soinnin näkökulmasta. Työn tavoitteena oli selvittää millä tavalla konserttisalin rakenteelliset tekijät, kuten lattiat, seinät ja yleisötuolit, vaikuttavat kontrabasson soittamiseen, sen äänen kuuluvuuteen orkesterille sekä yleisöön välittyvään sointiin. Aluksi tarkasteltiin kontrabasson rakennetta, taajuusalueita, sointia ja soittamista. Seuraavaksi käytiin läpi sen sointiin vaikuttavia tekijöitä kontrabasistin, muiden orkesterin soittajien sekä yleisön näkökulmasta.

Havaittiin, että kontrabasson sointi- ja säteilyominaisuuksista johtuen, soitin ja soittaja tarvitsee tukea soittoympäristöstään, esimerkiksi lattiasta ja seinistä. Huomattiin, että useat salin rakenteelliset ominaisuudet eivät vaikuta basson sointiin vain yksittäiselle taholle, vaan kaikille, sekä kontrabasson soittajalle itselleen, muille orkesterin jäsenille että yleisölle. Kovapintainen ja tarpeeksi kiihkerä lattia, sekä riittävän suuri ja kova takaseinä kumpikin vahvistavat kontrabasson äänenpainetasoa ja kontrabasistin soittotuntumaa, sekä auttavat orkesterin muita muusikoita ja yleisöä kontrabasson havainnoinnissa. Myös konserttisalin aikaiset lateraalit heijastukset tarpeeksi suurista pinnoista auttavat yleisöä sekä orkesteria kuulemaan leveää ja lämmintä kontrabasson sointia. Nämä heijastukset korjaavat myös seat-dipin vaimentamien taajuuksien puutetta.

Lopuksi pohdittiin Musiikkitalon konserttisalin ongelmakohtia, kuten matalien taajuuksien, lateraalien heijastusten ja basson soittajan oman kuulokuvan puutetta. Niiden esitettiin johtuvan seinä- ja lattiatukien heikkoudesta. Vaikka bassoa on salin jälkikaiunnassa, sitä ei havaita sen pienen äänenpainetason vuoksi. Pohdittiin myös mahdollisia korjausehdotuksia lavan lattian ja seinän sekä yleisöalueen pintojen lateraalien heijastusten voimistamiseksi.

Työssä on kattavasti koottu erilaisia konserttisalin tekijöitä basson soinnin tukemiseksi. Työssä kerätty tieto tarjoaa pohjan jatkotutkimuksille, jotka voivat käsitellä esimerkiksi salirakenteiden optimointia kontrabasson soitettavuuden ja soinnin kannalta, sekä auttaa toimivan bassoakustiikan kehityksessä.

## Viitteet

- [1] Dammerud, J. J. *Stage Acoustics for Symphony Orchestras in Concert Halls*. Väitöskirja. University of Bath. Bath, UK. 2009. 210 s. DOI: 10.13140/RG.2.2.35537.28003.
- [2] Lokki, T. *Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls*. *Physics Today*. Vol. 67:1. 2014. S. 27-32. DOI: 10.1063/PT.3.2242. ISSN 0031-9228 (painettu) ISSN 1945-0699 (sähköinen).
- [3] Beranek, L. L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. 2. painos. New York, NY, USA: Springer. 2004. 661 s. ISBN 978-0-387-95524-7.
- [4] SFS-EN ISO 3382-1:en. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2009. 30 s.
- [5] Scarbrough, P. H. *David Geffen Hall and the Evolution of Acoustics at Lincoln Center*. *Acoustics Today*. Vol. 19:4. 2023. S. 41-49. ISSN 1557-0215. [Viitattu 13.6.2015] Saatavissa: <https://acousticstoday.org/david-geffen-hall-and-the-evolution-of-acoustics-at-lincoln-center-paul-h-scarbrough/>.
- [6] Basso, G. *Correction of a strong seat-dip in the Teatro Argentino of la Plata in Argentina*. *Applied Acoustics*. Vol. 228. 2025. 110284. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110284. ISSN 0003-682x (painettu) ISSN 1872-910X (sähköinen).
- [7] Brun, P. *A New History of the Double Bass*. Lontoo, UK: Yorke Edition, 2000. 450 s. ISBN 978-2951446106.
- [8] 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. 136 s. [Viitattu 30.5.2025] Saatavissa: [https://awbmusic.com/wp-content/uploads/2021/06/2004\\_Acoustical\\_Studies\\_on\\_the\\_Flat\\_backed\\_and\\_Round\\_backed\\_Double\\_Bass.pdf](https://awbmusic.com/wp-content/uploads/2021/06/2004_Acoustical_Studies_on_the_Flat_backed_and_Round_backed_Double_Bass.pdf).
- [9] Cremer, L. *The Physics of the Violin*. 1. painos. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press. 1984. ISBN 978-0262031028. 484 s.
- [10] Croen, T. & Atwood, W. *Report on a bass bar study*. *The Journal of the Violin Society of America*. Vol. 15:2. 1997. S. 65-92. ISSN 1556-5092.

- [11] Skrodzka, E. B. & Linde, B. B. J. & Krupa, A. *Effect of Bass Bar Tension on Modal Parameters of a Violin's Top Plate*. *Archives on Acoustics*. Vol. 39:1. 2014. S. 145-149. DOI: 10.2478/aoa-2014-0015. ISSN 0137-5075 (painettu) ISSN 2300-262X (sähköinen).
- [12] Houssay, A. *F holes and Bass Bar Effects on Plate Tuning*. *Proceedings of the Institute of Acoustics*. Vol. 19:5. 1997. S. 119-124. [Viitattu 17.7.2025] Saatavissa: [https://www.ioa.org.uk/system/files/proceedings/a\\_houssay\\_f\\_holes\\_and\\_bass\\_bar\\_effects\\_on\\_plate\\_tuning.pdf](https://www.ioa.org.uk/system/files/proceedings/a_houssay_f_holes_and_bass_bar_effects_on_plate_tuning.pdf). ISBN 1-901656-03-9
- [13] Askenfelt, A. *Eigenmodes and tone quality of the double bass*. Julkaisussa: *Quarterly Progress and Status Report of KTH Computer Science and Communication*. Vol. 23:4. 1982. S. 149-174. [Viitattu 30.5.2025] Saatavissa: <https://www.yumpu.com/en/document/read/16945479/eigenmodes-and-tone-quality-of-the-double-bass-department-of->.
- [14] Echlin, F. A. *The Double Bass: Its Music and Players*. *The Musical Times*. Vol. 81:1169. 1940. S. 302–303. DOI: 10.2307/920862. ISSN 0027-4666 (painettu) ISSN 2397-5318 (sähköinen).
- [15] Moeckel, K. *Double Bass Notes: The Double Bass in the Orchestra (The Demand for Greater Deepness)*. *American String Teacher*. Vol. 18:4. 1968. S. 13-16. DOI:10.1177/000313136801800406. ISSN 0003-1313 (painettu) ISSN 2515-4842 (sähköinen).
- [16] Shih, W-L. *Simplification and octavation in double bass performance: an overview of historical and contemporary practices*. Väitöskirja. University of North Texas. Denton, Texas, USA. 2017. 58 s. [Viitattu 16.7.2025] Saatavissa: [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc984192/m2/1/high\\_res\\_d/SHIH-DISSERTATION-2017.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc984192/m2/1/high_res_d/SHIH-DISSERTATION-2017.pdf).
- [17] Gough, C. *Musical Acoustics*. Teoksessa: Rossing, T. D. *Springer Handbook of Acoustics*. New York, NY, USA: Springer. 2015. S. 567-701. ISBN 978-1-4939-0754-0. DOI: 10.1007/978-1-4939-0755-7.
- [18] Helmholtz, H. *On the Sensations of Tone*. 2. painos. New York, NY, USA: Dover. 1954. 608 s. ISBN 978-0486607535.

- [19] Guettler, K. & Schoonderwaldt, E. & Askenfelt, A. *Bow speed or bowing position – Which one influences spectrum the most? Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*. Vol. 1. 2003. 4 s. [Viitattu 20.7.2025] Saatavissa: <http://knutsacoustics.com/files/bow-speed-or-bowing-position-smac03.pdf>. ISSN 1104-5787.
- [20] Askenfelt, A. *Double Bass*. Teoksessa: Rossing T. D. *The Science of String Instruments*. New York, NY, USA: Springer. 2010. S. 279-299. ISBN 978-1-4419-7109-8. DOI: 10.1007/978-1-4419-7110-4.
- [21] Askenfelt, A. *Stage floor risers – supporting resonant bodies or sound traps?* Teoksessa: Ternström, S. *Acoustics for Choir and Orchestra*. Tukholma, Ruotsi: Royal Swedish Academy of Music. Vol. 52. 1986. S. 43-61. ISBN 91-85428-46-9.
- [22] Carpentier, T. & Einbond, A. *Spherical correlation as a similarity measure for 3-D radiation patterns of musical instruments*. *Acta Acustica*. Vol. 7:12. 2023. 16 s. DOI: 10.1051/aacus/2023033. ISSN 2681-4617.
- [23] Meyer, J. *Acoustics and the Performance of Music*. 5. painos. New York, NY, USA: Springer, 2009. 446 s. ISBN 978-0-387-09516-5.
- [24] Pätynen, J & Lokki, T. *Directivities of symphony orchestra instruments*. *Acta Acustica United with Acustica*. Vol. 96:1. 2010. S. 138–167. DOI: 10.3813/AAA.918265. ISSN 1610-1928.
- [25] Ziemer, T. & Bader, R. *Complex point source model to calculate the sound field radiated from musical instruments*. *Proceedings of Meetings on Acoustics*. Vol. 25:1. 2015. 035001. DOI: 10.1121/2.0000122. ISSN 1939-800X.
- [26] Lokki, T. & Pätynen, J. *Auditory Spatial Impression in Concert Halls*. Teoksessa: Blauert J. & Braash, J. *The Technology of Binaural Understanding*. Springer. 2020. S. 173-202. ISBN 978-3-030-00385-2.
- [27] Beranek, L. L. *Concert Hall acoustics*. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 92. 1992. S. 1-39. DOI: 10.1121/1.404283. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [28] Barron, M. *The subjective effects of first reflections in concert halls—The need for lateral reflections*. *Journal of Sound and Vibration*. Vol 15:4. 1971. S. 475-494. DOI: 10.1016/0022-460X(71)90406-8. ISSN 0022-460X (painettu) ISSN 1095-8568 (sähköinen).

- [29] 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. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 140:1. 2016. S. 551-562. DOI: 10.1121/1.4958686. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [30] Tahvanainen, H. & Pätynen, J. & Lokki, T. *Perception of bass with some musical instruments in concert halls*. Teoksessa: Cassereau, D. *Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics*. Le Mans, Ranska. 7-12.7.2014. S. 563-568. [Viitattu 31.5.2025] Saatavissa: <http://www.conforg.fr/isma2014/cdrom/data/articles/000077.pdf>.
- [31] Guettler, K. & Buen, A. & Askenfelt, A. *An in-depth analysis of the double bass-stage floor contact*. Teoksessa: *Proceedings of the Institute of Acoustics, Volume 30 Part 3*. Oslo, Norja. 3-5.10.2008. S. 37-44. [Viitattu 30.5.2025] Saatavissa: [https://www.ioa.org.uk/system/files/proceedings/k\\_guettler\\_a\\_buen\\_a\\_askenfelt\\_an\\_in-depth\\_analysis\\_of\\_the\\_double\\_bass-stage\\_floor\\_contact.pdf](https://www.ioa.org.uk/system/files/proceedings/k_guettler_a_buen_a_askenfelt_an_in-depth_analysis_of_the_double_bass-stage_floor_contact.pdf). ISBN 978-1-60560-539-5.
- [32] Askenfelt, A. & Guettler, K. *Stage floor vibrations and bass sound in concert halls. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 133:5. 2013. 3256. DOI: 10.1121/1.4805252. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [33] Guettler, K. & Askenfelt, A. & Buen, A. *Double basses on the stage floor: Tuning fork-tabletop effect, or not? Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 131:1. 2012. S. 795-806. DOI: 10.1121/1.3651791. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [34] Guettler, K. & Buen, A. & Askenfelt, A. *The Lindeman Hall of Oslo - Evidence of low-frequency radiation from the stage floor*. Teoksessa: Burgess, M. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*. Sydney, Australia. 23-17.8.2010. S. 2329-2334. [Viitattu 31.5.2025]. Saatavissa: [https://www.acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p388.pdf](https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p388.pdf). ISBN 978-1-61782-745-7.
- [35] Beranek, L.L. & Johnson, F.R. & Shultz, T.J. & Watters, B.G. *Acoustics of Philharmonic Hall, New York, during its First Season. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 36:7. 1964. S. 1247-1262. DOI: 10.1121/1.1919195. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).

- [36] Yasuda, Y. & Ushiyama, A. & Sakamoto, S. & Sakuma, T. *Numerical and experimental studies on the effects of stage risers. Applied Acoustics*. Vol. 70:4. 2009. S.588-594. DOI: 10.1016/j.apacoust.2008.07.001. ISSN 0003-682X (painettu) ISSN 1872-910X (sähköinen).
- [37] Wulfrank, T. & Lyon-Caen, I. & Jurkiewicz, Y. & Brulez, J. & Kahle, E. *Recent experiences with vibration of stage and audience floors in concert halls. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 133:5. 2013. 3256. DOI: 10.1121/1.4805253. ISSN 1939-800X. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [38] Nakanishi, S. & Sakagami, K. & Daido, M. & Morimoto M. *Acoustic properties of a cavity backed stage floor: A theoretical model. Applied Acoustics*. Vol. 57:1. 1999. S. 17-27. DOI: 10.1016/S0003-682X(98)00040-1. ISSN 0003-682X (painettu) ISSN 1872-910X (sähköinen).
- [39] Lee, J.B. *Note on the interaction of bass viols and stage enclosures. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 71. 1982. S. 1610-1611. DOI: 10.1121/1.387817. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [40] Lokki, T. & Pätynen, J. & Tervo, S. & Siltanen, S. & Savioja, L. *Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 129:6. 2011. S. EL223-EL228. DOI: 10.1121/1.3579145. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [41] Lokki, T. & Pätynen, J. *Architectural Features That Make Music Bloom in Concert Halls. Acoustics*. Vol. 1:2. 2019. S. 439-449. DOI: 10.3390/acoustics1020025. ISSN 2624-599X.
- [42] Kahle, E. *Room acoustical quality of concert halls: Perceptual factors and acoustic criteria – return from experience. Building Acoustics*. Vol. 20:4. 2013. S. 265-282. DOI: 10.1260/1351-010X.20.4.265. ISSN 1351-010X (painettu) ISSN 2059-8025 (sähköinen).
- [43] Kahle, E. *Acoustic feedback for performers on stage – return from experience*. Teoksessa: Miyara, F. *Proceedings of the International Symposium on Musical and Room Acoustics (ISMRA)*. La Plata, Argentiina. 11–13.9.2016. 10 s. [Viitattu 30.5.2025] Saatavissa: <https://www.kahle.be/articles/Genera-KahleAcoustics-AcousticFeedbackForPerformersSubmitted.pdf>. ISBN 978-987-24713-8-5.

- [44] Dammerud, J. J. & Barron M. *Attenuation of direct sound and the contributions of early reflections within symphony orchestras. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 128:4. 2010. S. 1755-1765. DOI: 10.1121/1.3474235. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [45] Halmrast, T. *Orchestral timbre: Comb-filter coloration from reflections. Journal of Sound and Vibration*. Vol. 232:1. 2000. S. 53-69. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2700. ISSN 0022-460X (painettu) ISSN 1095-8568 (sähköinen).
- [46] Schultz, T. & Watters, B. *Propagation of sound across audience seating. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 36:5. 1964. S. 885–896. DOI: 10.1121/1.1919111. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [47] Sessler, G. & West. J. *Sound transmission over theatre seats. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 36:9. 1964. S. 1725-1732. DOI: 10.1121/1.1919271. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [48] Lokki, T. & Southern, A. & Savioja, L. *Studies on seat dip effect with 3D FDTD modeling*. Julkaisussa: *Proceedings of Forum Acusticum*. Aalborg, Tanska. 27.6-1.7.2011. S. 1517-1522. [Viitattu 31.5.2025] Saatavissa: <https://mediatech.aalto.fi/~ktlokki/Publs/000131.pdf>. ISBN 978-84-694-1520-7. ISSN 221-3767.
- [49] Tahvanainen, H. & Pätynen, J. & Lokki, T. *Analysis of the seat-dip effect twelve European concert halls. Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 101:4. 2015. S. 731-742. DOI: 10.3813/AAA.918869. ISSN 1610-1928.
- [50] Bradley, J. S. *Some further investigations of the seat dip effect. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 90:1. 1991. S. 324–333. DOI: 10.1121/1.401302. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [51] Tahvanainen, H., Pätynen, J., & Lokki, T. *Studies on the Perception of Bass in Four Concert Halls. Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*. Vol. 25:3. 2015. S. 294-305. DOI: 10.1037/pmu0000063. ISSN 0275-3987 (painettu) ISSN 2162-1535 (sähköinen).
- [52] Tahvanainen, H. & Lokki, T. *Bass in concert halls – recent studies on the seat-dip effect*. Teoksessa: *Proceedings of the IOA Auditorium Acoustics Volume 37 Part 3*. Pariisi, Ranska. 29-31.10.2015. S. 544-550. ISBN 978-1-5108-1539-1. DOI: 10.25144/16149.

- [53] Nishihara, N. & Hidaka, T. *Loudness perception of low tones undergoing partial masking by higher tones in orchestral music in concert halls. Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 132:2. 2012. S. 799–803. DOI: 10.1121/1.4729547. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [54] Davies, W. J. & Lam, Y. W. *New attributes of seat dip attenuation. Applied Acoustics*. Vol. 41:1. 1994. S. 1-23. DOI: 10.1016/0003-682X(94)90082-5. ISSN 0003-682X (painettu) ISSN 1872-019X (sähköinen).
- [55] Davies, W. J. & Cox, T. J. *Reducing seat dip attenuation. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 108:5 Pt 1. 2000. S. 2211-2218. DOI: 10.1121/1.1317553. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [56] Green, E. & Colella-Gomes, O. & Kriz, J. & Berrier, V. & Wulfrank, T. & Kahle, E. *The influence of reflection surface size in concert halls. Teoksessa: Proceedings of the Institute of Acoustics Volume 45 Part 2*. Ateena, Kreikka. 28-30.9.2023. S. 111-119. ISBN 978-1-7138-8473-6.
- [57] Pätynen, J. & Tervo, S. & Lokki, T. *Analysis of concert hall acoustics via visualisations of time-frequency and spatiotemporal responses. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 133:2. 2013. S. 842-857. DOI: 10.1121/1.4770260. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [58] Green, E. & Kahle, E. *Dynamic spatial responsiveness in concert halls. Acoustics*. Vol. 1:3. 2019. S. 549-560. DOI: 10.3390/acoustics1030031. ISSN 2624-599X.
- [59] Barron, M. & Marshall, A. H. *Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure. Journal of Sound and Vibration*. Vol. 77:2. 1981. S. 211-232. DOI: 10.1016/S0022-460X(81)80020-X. ISSN 0022-460X (painettu) ISSN 1095-8568 (sähköinen).
- [60] Jurkiewicz, Y. & Wulfrank, T. & Kahle, E. *Architectural shape and early acoustic efficiency in concert halls. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 132:3. 2012. S. 1253-1256. DOI: 10.1121/1.4740493. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [61] Jurkiewicz, Y. & Kahle, E. *Early reflection surfaces in Concert Halls - a new quantitative criterion. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 123:5. 3908. 2008. DOI: 10.1121/1.2935902. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).

- [62] Barron, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2. painos. Lontoo, UK: Spon Press. 2010. 504 s. ISBN 978-0-415-24510-0.
- [63] Wallach, H. & Newman, E. & Rosenzweig, M. *The precedence effect in sound localization. The American Journal of Psychology*. Vol. 62:3. 1949. S. 315-336. DOI: 10.2307/1418275. ISSN 0002-9556 (painettu) ISSN 1939-8298 (sähköinen).
- [64] Haas, H. *Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache. Acustica*. Vol. 1:2. 1951. S. 49-58. ISSN 0001-7884.
- [65] J. Blauert. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. 2. painos. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press. 1997. 508 s. ISBN 978-0262024136.
- [66] Bradley, J. S. & Soulodre, G. A. & Norcross, S. *Factors influencing the perception of bass. The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 101. 1997. S. 3135. DOI: 10.1121/1.419017. ISSN 0001-4966 (painettu) ISSN 1520-8524 (sähköinen).
- [67] Beranek, L. L. *Concert Hall Design: Some Considerations. Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*. Vol. 25:3. 2015. S. 181-186. DOI: 10.1037/pmu0000110. ISSN 0275-3987 (painettu) ISSN 2162-1535 (sähköinen).
- [68] Lokki, T. *Why do some concert halls render music more expressive and impressive than others?* Teoksessa: Miyara, F. *Proceedings of the International Symposium on Musical and Room Acoustics (ISMRA)*. La Plata, Argentiina. 11–13.9.2016. 10 s. [Viitattu 31.5.2025] Saatavissa: <http://ica2016.org.ar/ismra2016proceedings/ismra2016/ISMRA2016-72.pdf>. ISBN 978-987-24713-8-5.
- [69] Toyota, Y. & Komoda, M. & Beckmann, D. & Quiquerez, M. & Bergal, E. *Concert Halls by Nagata Acoustics*. 1. painos. Cham, Sveitsi: Springer. 2020. 339 s. ISBN 978-3-030-42449-7. DOI: 10.1007/978-3-030-42450-3.