

VIRTUAALIAKUSTIIKALLA PAREMPIA MUSIIKIN OPETUS- JA HARJOITUSTILOJA?

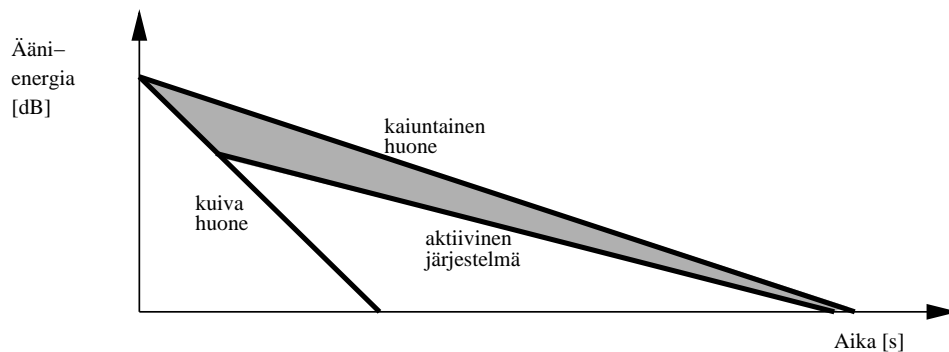
Jukka Pätynen ja Tapio Lokki

Teknillinen korkeakoulu, Tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio
PL 5400, 02015 TKK
jpatynen@tml.hut.fi, Tapio.Lokki@tkk.fi

1 JOHDANTO

Musiikin opetus- ja harjoitustilat ovat akustisesti vaativia tiloja. Tilat ovat usein tilavuudeltaan hyvin pieniä ja akustiikan suunnittelulle ei jää paljon vaihtoehtoja. Pieni huone joko vaimennetaan mahdollisimman hyvin tai sitten ei. Vaimennettu huone ei vahvista ääntä liikaa ja näin ei aiheuta kuulovammariskiä. Valitettavasti kuivassa akustiikassa on tylsää harjoitella ja hyvän äänen tuottaminen on vaikeaa, koska huoneen akustiikka ei tue soittoa. Tällainen huone voi helposti masentaa nuoren musiikin opiskelijan innostuksen, koska soittotunnilla oma soitto kuulostaa paljon huonommalta kuin kotona harjoittellessa. Jos taas opetus-/harjoitushuonetta ei vaimenneta, huoneen akustiikka tukee soittamista ja äänentuotto on paljon helpompaa. Valitettavasti kaiuntainen huone myös vahvistaa ääntä runsaasti, jolloin kuulovammariski suurenee merkittävästi, etenkin opettajilla heidän viettäessään monta tuntia päivässä pienessä luokkahuoneessa.

Ratkaisu edellisiin ongelmiin on rakentaa merkittävästi suurempia harjoitus- ja opetusluokkia, mutta tämä ei yleensä kustannussyistä ole mahdollista. Musiikin opiskelijat ja ammattimuusikot tarvitsevat kuitenkin tarkoituksenmukaisia harjoitustiloja, joiden akustiikka on kuhunkin tilanteeseen sopiva. Eräs ratkaisuehdotus ongelmaan on aktiiviakustiikan käyttö, jolloin parhaimmillaan pienet harjoitustilat saadaan kuulostamaan suurilta tiloilta ilman että äänipainetaso ei nousisi merkittävästi. Tässä artikkelissa raportoidaan käyttökokeuksia ja mittaustuloksia virtuaaliakustiikan käytöstä kahdessa erilaisessa tarkoituksessa. Ensinnäkin kerrotaan Espoon musiikkiopiston opetusluokissa tehdyistä käyttäjäkokeista ja sitten Espoon kulttuurikeskuksen Louhisalin muuttamisesta suuren konserttisalin kuuloiseksi.



Kuva 1: Aika-energiavaste kuivassa ja kaiuntaisessa huoneessa sekä aktiivisen järjestelmän vaste. Harmaa alue kuvaa äänienergian vähentymistä.

2 AKTIIVIAKUSTINEN JÄRJESTELMÄ

Virtuaaliakustiikan käyttö opetustilassa toimii siten, että opetustila vaimennetaan ensin mahdollisimman hyvin. Sen jälkeen tilaan asennetaan sähköakustinen järjestelmä, jonka keskeisin komponentti on aikavariantti kaiuntalaite, joka poimii tilassa tuotetun äänen yhdellä tai muutamalla mikrofonilla ja toistaa virtuaalisen diffuusin jälkikaiunnan useammalla kaiuttimella. Näin harjoitustilasta saadaan hiljaisempi vaimentamalla varhaista äänikenttää, mutta tila kuitenkin kuulostaa suurelta tilalta keinotekoisesti tuotetun jälkikaiuntahännän vuoksi. Kuvassa 1 on havainnollistettu, miltä huoneen energiavaste näyttää kussakin tapauksessa.

Käyttämämme kaiuntalaite [1, 2] tuottaa diffuusioita jälkikaiuntaa. Akustisen kierron minimoimiseksi sähköisen systeemin vaste muuttuu jatkuvasti ajan funktiona. Tämä aikavarianssi on toteutettu muuttamalla kaiuntalaitteen sisäisten elementtien (yhdessä kaiuntalaitteessa 4-8 elementtiä) ryhmäviivettä ajan funktiota. Näin koko järjestelmän taajuusvasteen piikit liikkuvat jatkuvasti muutaman Hertsin alueella ja eri taajuudet liikkuvat eri suuntiin. Näin ollen mitään taajuussiirtymää tai muuta artifaktia ei ole havaittavissa, tosin lievän huojunnan voi havaita joissain tapauksissa.

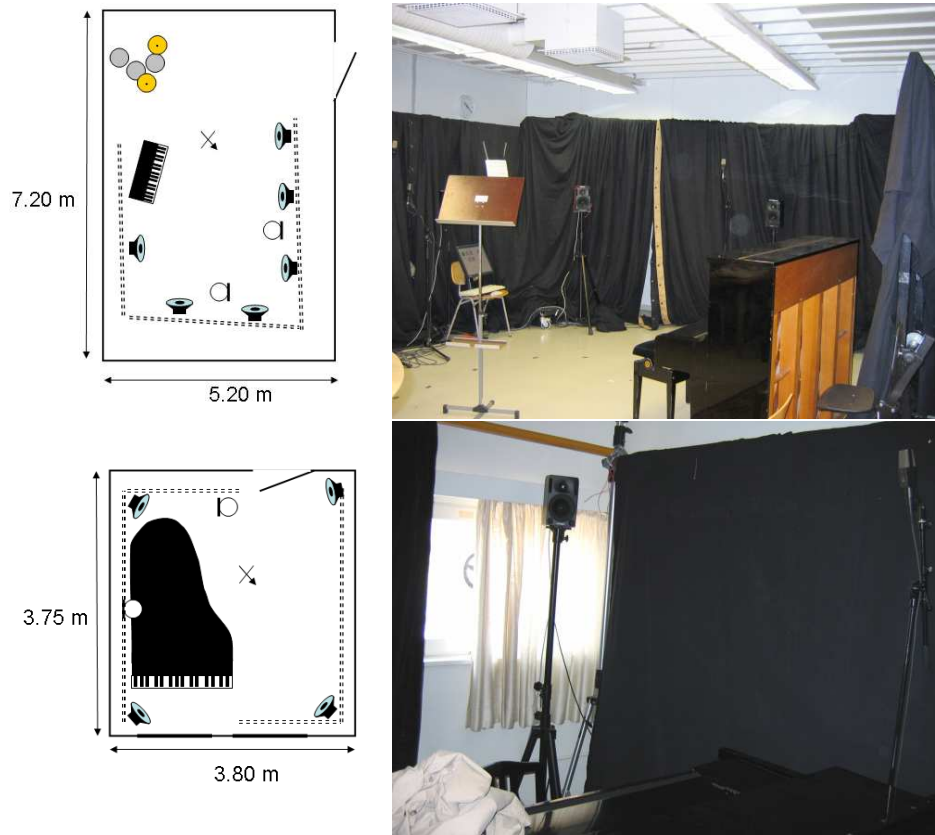
3 PIENET OPETUSTILAT

Pienet opetustilat ovat usein ongelmallisia, koska yksinkertaisesti tilavuutta on liian vähän. Huoneiden katot yleensä vaimennetaan, ja jossain tapauksissa seinille on myös asennettu joko ääntä diffusoivia tai absorboivia elementtejä. Jos tiloja ei vaimenneta lainkaan niin soittaessa äänipainetaso on usein aivan liian korkea pitkäaikaiseen harjoitteluun. Tämän tutkimuksen puitteissa asensimme kahteen Espoon musiikkiopiston opetusluokkaan aktiiviakustisen järjestelmän, kts. kuva 2. Huoneet vaimennettiin rakentamalla mikrofonij- ja valaistusjalustoista sekä putkista kehikko, jonka yli levitettiin Molton-kangasta. Kaksi kerrosta kangasta olivat noin puoli metriä seinästä ja kerrosten väli oli n. 5-10 cm. Tällä rakenteella huoneet saatiin vaimennettua aika hyvin, kuten taulukon 1 mittaustulokset osoittavat.

3.1 Espoon musiikkiopisto, Cage

Espoon musiikkiopiston opetusluokka Cage on Espoon kulttuurikeskuksen pohjakerroksessa, joka alunperin lienee suunniteltu väestösuojaksi. Huoneessa on betoniset seinät, lukuunottamatta yhtä kevytrakenteista seinään naapuriluokkaa vasten. Cage luokkaan asennettiin aktiiviakustinen järjestelmä toukokuussa 2007 ja järjestelmä oli käytössä trumpetin soiton opetuksessa 3 päivää. Vastauksia kyselytutkimukseen saatiin yhteensä 10 luokassa harjoitelleilta oppilailta sekä yhdeltä opettajalta.

Järjestelmä koostui tavanomaisesta PC-tietokoneesta digitaalisin ääniliitännöin, kuudesta kaiuttimesta (Genelec 1029A) sekä kahdesta mikrofonista (AKG C414) (kuva 2). Järjestelmään ohjelmoitiin käyttäjien vaihdettaviksi 4 eri kuuloista asetusta, jotka oli nimetty seuraavasti: Pieni sali, hiljainen; Pieni sali, voimakas; Suuri sali, hiljainen sekä Suuri sali, voimakas. Kaikulaitteen jälkikaiunta-ajan arvoiksi pienelle salille säädettiin



Kuva 2: Opetusluokat Cage (yllä) ja Ives (alla) varustettuina virtuaaliakustiikalla.

1,5 s ja suurelle salille vastaavasti 2,4 s. Hiljaisten salien tuotetun äänen voimakkuutta vaimennettiin kertoimella 0,5 verrattuna voimakkaampien salien asetuksiin.

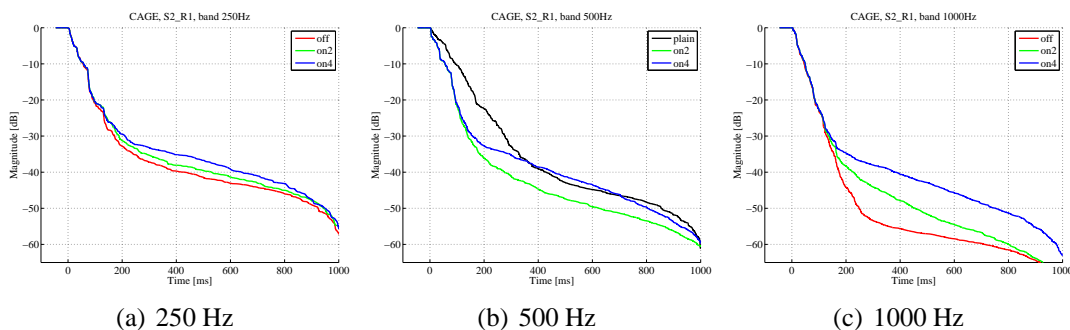
Taulukossa 1 esitetyt vaimennukset luokan äänipainetasoissa tyhjään alkuperäiseen luokkaan ovat merkittäviä. Tästä huolimatta ainoastaan yksi vastanneista ilmaisi luokan olleen hiljaisempi tavanomaiseen verrattuna, vaikka voimakkaimmankin kaiun tuoma äänipainelisäys on suhteellisen pieni. Toisaalta kaikki vastaajat olivat järjestäen sitä mieltä, että oppilaitoksen luokat ovat yleisesti äänekkyydeltään sopivia. Vaimennetun luokan jälkikaiunta-aika pieneni noin puoleen alkuperäisestä. Aktiiviakustisen järjestelmän kanssa T20-arvoissa muutos on olematon johtuen pidemmän jälkikaiun verran alhaisesta tasosta. Kuvissa 3 järjestelmän vaikutus jälkikaiuntaan näkyy selvemmin.

Kymmenestä vastaajasta kolme ei maininnut havainneensa selkeää suuntaa järjestelmän tuottamalle äänelle, ja ainoastaan tutkimukseen osallistuneen opettajan mielestä oli havaittavissa selkeää lokalisatiota. Seitsemän vastaajan mielestä järjestelmän kanssa soittaminen oli ikävämpää kuin tavallisessa luokassa. Syy näihin negatiivisiin vastauksiin saattaa olla soittajien tottuneisuus pienten huoneiden ominaiseen äänekkyyteen, mikä opettajan kertoman mukaan edesauttaa varsinkin nuorten soittajien äänen tuottamista.

Eri asetuksia käyttäneet vastaajat olivat suurimmaksi osaksi sillä kannalla, että luokka kuulosti suuremmalta tilalta järjestelmän kanssa. Kaksi vastaajaa kertoi luokan kuulostaneen alkuperäistä pienemmältä. Neljä kuudesta luokan suuremmaksi arvioinutta vastaajaa kertoi myös soiton kuulostaneen paremmalta kuin luokassa ilman järjestelmää.

Taulukko 1: *Espoon musiikkiopiston tilojen mittaustuloksia oktaavikaistoittain. Cage-luokka asetuksella 'Suuri sali, voimakas' ja Ives-luokka asetuksella 'Pieni sali, voimakas'. Äänipainetasot ovat suhteessa vaimentamattomaan huoneeseen.*

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Cage SPL [dB] (vaimennettu)	-5,9	-7,7	-4,9	-5,6	-9,3	-8,0
Cage SPL [dB] (aktiivinen)	-5,5	-6,4	-4,3	-4,1	-8,0	-7,7
Cage T20 [s] (tyhjä)	0,9	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5
Cage T20 [s] (vaimennettu)	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Cage T20 [s] (aktiivinen)	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Ives SPL [dB] (vaimennettu)	-1,1	-3,1	-2,8	-6,9	-7,5	-7,7
Ives SPL [dB] (aktiivinen)	-0,8	-3,1	-2,6	-6,8	-7,6	-7,6
Ives T20 [s] (tyhjä)	0,31	0,28	0,23	0,24	0,25	0,25
Ives T20 [s] (vaimennettu)	0,22	0,17	0,13	0,12	0,12	0,12
Ives T20 [s] (aktiivinen)	0,27	0,22	0,14	0,12	0,12	0,13



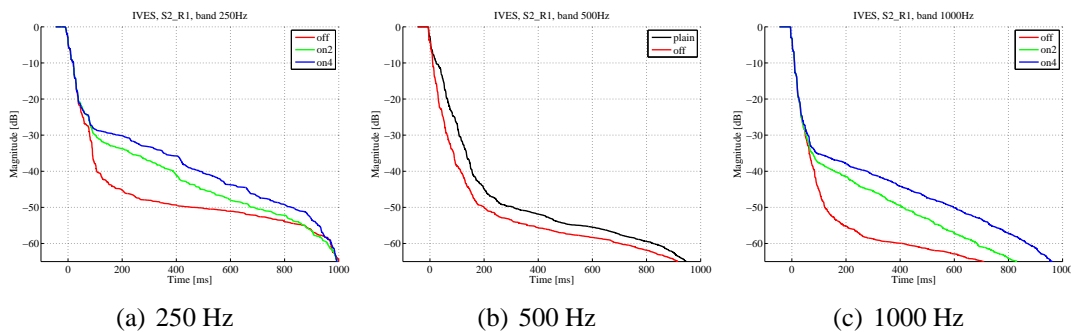
Kuva 3: Äänen vaimeneminen järjestelmän kanssa Cage-luokassa. Reunimmaisissa kuvissa järjestelmää verrataan vaimennettuun luokkaan (*off*) oktaavikaistoilla 250 ja 1000 Hz ja keskimmaisessä tyhjään luokkaan (*plain*) 500 Hz kaistalla. Kuvissa olevat asetukset ovat asetuksista voimakkaammat pieni (*on2*) ja suuri (*on4*) sali.

Samojen vastaajien mielestä lisäkaiunta ei myöskään ollut ristiriidassa luokan ominaisen kaiun kanssa. Keskimäärin vastaajat olivat jonkin verran varautuneita käyttämään tulevaisuudessa vastaavalla järjestelmällä varustettua luokkaa harjoitteluun.

3.2 Espoon musiikkiopisto, Ives

Espoon musiikkiopiston opetusluokka Ives on todella pieni luokka ($V=39 \text{ m}^3$), jossa on kuitenkin flyygeili. Ives-luokkaan asennettiin aktiiviakustinen järjestelmä toukokuussa 2007 ja järjestelmän oli tarkoitus olla käytössä opetuksessa 3 päivää. Valitettavasti tuona aikana luokassa ei ollutkaan aktiivista opetusta ja emme saaneet subjektiivista palautetta kuin yhdeltä opettajalta ja yhdeltä pidemmälle edenneeltä oppilaalta.

Luokassa käytetty järjestelmä oli vastaava kuin Cagessa. Vaimennus toteutettiin myös saman tyyppisellä verhoratkaisulla. Pienemmässä tilassa vain neljä kaiutinta oli käytössä kuuden sijaan. Pohjaltaan neliömäisessä luokassa kaiuttimet oli sijoitettu n. 2 m korkeudelle huoneen kulmiin (kuva 2). Mikrofonit oli sijoitettu seinien puoliväleihin flyygelin reunoille. Samat järjestelmän asetukset olivat käytössä Ives-luokassa sillä ero-



Kuva 4: Äänen vaimeneminen järjestelmän kanssa Ives-luokassa. Reunimmaisissa kuvissa järjestelmää verrataan vaimennettuun luokkaan (*off*) oktaavikaistoilla 250 ja 1000 Hz ja keskimmaisessä vaimennuksen vaikutusta tyhjäin luokkaan (*plain*) 500 Hz kaisalla. Kuvissa käytetyt asetukset ovat voimakkaat pieni (*on2*) ja suuri (*on4*) sali.

tuksella, että suuren salin jälkikaiunta-ajaksi oli määritetty 2,4 s sijasta 2,0 s. Lisäksi oven saranapuolen kaiuttimen ulostuloon lisättiin 3 ms viivettä ja vastakkaiskulman kaiuttimeen 12 ms kumoamaan kaiuttimien läheisyyttä.

Taulukossa 1 on esitetty vaimennuksella saavutettu jälkikaiunta-ajan lyhentyminen sekä äänipainetaso pienentyminen. Jälkikaiunnan T20-arvoissa järjestelmän vaikutus ei ole havaittavissa kaksivaiheisen vaimenemisen takia (kts. kuva 4). Järjestelmän toiminta on kuitenkin selkeästi nähtävissä esim. 1 kHz oktaavikaistalla. Suhteellisten SPL-lukujen pieni erotus Cageen verrattuna johtuu lähempänä seinää olleista verhoista sekä luokassa jo valmiina olleista akustiikkalevyistä, jotka paransivat tyhjän luokan vaimennusta Cageen koviin materiaaleihin verrattuna. Ives-luokassa asetus 'Pieni sali, voimakas' (*on2*), kuulosti koehenkilöiden mielestä luonnollisimmalta kyseisessä tilassa. Merkillepantavaa on äänipainetasojen alle 0,3 dB:n poikkeamat vaimennettun luokan arvoista tällä asetuksella, vaikka esim. kuvassa 4c näkyy selkeä jälkikaiunnan lisäys. Myös järjestelmä päällä vaimennus alkuperäiseen verrattuna on huomattava.

Vastaajat eivät kokeneet luokassa aktiiviakustisen järjestelmän tuottamaa kaiuntaa häiritseväenä luontaisen kaiunnan kanssa. Tämä viittaa paremmin onnistuneeseen luokan vaimennukseen, jolla ominainen jälkikaiunta saatiin minimoitua. Myös molempien koehenkilöiden mielestä soittaminen oli joko hieman tai paljon mukavampaa järjestelmän kanssa. Kokeeseen osallistunut klarinettiopettaja mainitsi soiton kuulostaneen merkittävästi paremmalta verrattuna tavanomaiseen huoneeseen. Poiketen mitatuista arvoista, vastaajien mielestä luokka kuulosti järjestelmän kanssa aavistuksen äänekkäämmältä, vaikkakin Ives-luokkaa pidetään sellaisenaan yleisesti liian äänekkäänä. Järjestelmän tuottama tilantuntu sen sijaan välittyi vastaajille molempien arvioidessa luokan kuulostaneen jonkin verran tavanomaista suuremmalta.

Järjestelmän voimakkain asetus kuulosti toisen koehenkilön mielestä liian ”holvikirkkomaiselta”, ja pienen salin hiljaisempi asetus ei ollut tarpeeksi erottuva. Järjestelmän asetusten hiljaisemmat vaihtoehdot ovat jälkikaiunnan vaimenemiseltaan vastaavia voimakkaampien asetusten kanssa, mutta matalammalla äänipainetasolla. Molemmat kyselyyn vastanneet kokivan järjestelmän positiiviseksi ja käyttökelpoiseksi mahdollisuudeksi harjoitusluokkien parantamiseen tulevaisuudessa.

4 SUURET HARJOITUSTILAT

Suurissa harjoitustiloissa ongelmat ja toiveet ovat hieman erilaisia kuin pienissä tiloissa. Esim. sinfoniaorkesterin harjoitustilan tulisi kuulostaa mahdollisimman samanlaiselta kuin esiintymissalin, mutta käytännössä tätä on ollut mahdotonta saavuttaa passiivisin keinoin. Aiempien tutkimustemme valossa [3, 4] aktiiviakustiikalla tähän saattaisi olla mahdollisuus. Tämän tutkimuksen puitteissa saimme mahdollisuuden asentaa Espoon kulttuurikeskuksen Louhisaliin virtuaaliakustiikan Tapiola Sinfoniettaa varten. Käyttökoe tehtiin elokuussa 2007, jolloin Sinfonietta harjoitteli yhden päivän harjoituksensa virtuaaliakustiikalla varustetussa Louhisalissa.

4.1 Espoon kulttuurikeskus, Louhisali

Louhisali on itsessään suunniteltu puheteatteriksi, joten sinfoniseen musiikkiin se on akustiikaltaan hyvin kuiva tila. Niinpä ylimääräistä vaimennusta ei tarvinnut asentaa koetta varten. Aktiiviakustinen järjestelmä Louhisalissa käsitti kaksi eri parametrein viritettyä kaiuntalaitetta, yksi tuottamaan virtuaalisen salin vaste takaisin lavalle ja toinen parantamaan lavan akustiikkaa. Salisimulaatio toteutettiin kahdella kardioidimikrofonilla ja kahdeksalla kaiuttimella, virtuaaliakustiikan jälkikaiunnan ollessa 2,5 s. Lisäksi järjestelmän sisäänmenoa hieman ekvalisoitiin, vahvistamalla korkeita taajuuksia ja ulostuloa viivästettiin n. 100 ms. Lavajärjestelmässä oli niin ikään kaksi mikrofonia, molemmilla puolilla lavan yläpuolella ja 1,5 s pitkä jälkikaiunta syötettiin takaisin 8 kaiuttimesta n. 70 ms viivästettynä siten, että mikrofonisignaaleita kytkettiin myös ristiin lavan toiselle puolelle.

4.2 Objektiiivinen ja subjektiivinen arviointi

Gaden tutkimusten mukaan hyvinä pidetyissä eurooppalaisissa saleissa jälkikaiunta-aika T20 on lavalla noin 2 s [5]. Virtuaaliakustiikalla varustetussa Louhisalissa jälkikaiunta oli hieman pidempi, kts. taulukko 2. Lavalla mitattu EDT (eli EDTP) taas oli juuri n. 1,5 s, joka on Gaden suositusten mukainen hyvä arvo. Lavatuenta ST1 oli Louhisalissa erittäin korkea, suositusten mukaan jopa liian korkea, mutta subjektiivisesti arvioiden lava ei silti ollut liian äänekäs. Koska aktiiviakustinen järjestelmä tuotti lisää jälkikaiun-

Taulukko 2: Louhisalin lava-akustisia mittaustuloksia tyhjänä ja virtuaaliakustiikalla (va) oktaavikaistoittain. Viimeisessä sarakkeessa Gaden [5] suosituksia hyvälle saleille.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	250 - 2k
T20 [s] (tyhjä)	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	2,0
T20 [s] (va)	2,5	2,4	2,3	2,2	1,7	1,3	2,0
EDTP [s] (tyhjä)	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,5
EDTP [s] (va)	1,4	1,7	1,5	1,5	1,3	1,2	1,5
ST1 [dB] (tyhjä)	-5,7	-9,9	-6,7	-8,4	-6,7	-7,7	> -12,0
ST1 [dB] (va)	-5,8	-9,9	-6,8	-8,3	-6,7	-7,7	> -12,0
SPL [dB] (va - tyhjä)	0,4	0,7	0,6	0,5	0,3	0,2	-



Kuva 5: Tapiola Sinfonietta harjoittelemassa virtuaaliakustiikassa Louhisalissa sekä Tapiolasalissa.

taa vasta n. 100 ms suoran äänen jälkeen, ei ST1:n arvot muutu ollenkaan järjestelmän ollessa päällä. Näin ollen hyvä lavatuenta oli ainoastaan Louhisalin oman lavan ominaisuus. Lopuksi laskimme vielä äänipainetasoa virtuaaliakustiikalla sekä ilman. Taulukosta 2 nähdään, että aktiiviakustinen järjestelmä nostaa äänipainetasoa hyvin vähän, vain noin puoli desibeliä.

Muusikoiden kokemuksia virtuaaliakustiikasta kerättiin harjoitusten jälkeen lyhyellä kysymyslomakkeella, johon lähes kaikki soittajat vastasivat. Analyysissä jokaiselle vastaukselle annettiin arvo välillä -10 - +10, jotta saimme numeerista dataa.

Järjestelmällä varustetun Louhisalin akustiikka koettiin orkesterin harjoitustilalle sopivaksi, ja muusikoiden mielestä harjoitustilan tulisi kuulostaa hieman suuremmalta (vastausten keskiarvo +0,9). Verrattaessa Louhisalia virtuaaliakustiikalla “hyvään akustiseen saliin”, suurin ero oli yhteissoiton tuessa, jota kaivattiin lisää ka. +2,7. Äänekkyyys, kaiuntaisuus ja myöhäinen kaiunta koettiin olevan sopivalla tasolla.

Muusikot kokivat virtuaaliakustisen Louhisalin hyväksi yhteissoiton helppouden kannalta – vastausten ka. oli peräti +5,5. Vastaavaan kysymykseen Tapiola-salista, joka on ongelmallinen yhteissoiton kannalta, vastausten ka. oli -3,5. Louhisalia kokeiltiin myös lyhyesti ilman virtuaaliakustiikkaa, jolloin sali on aivan liian kuiva sinfoniselle musiikille. Subjekttiivinen arvio virtuaaliakustiikan hyväksi oli erittäin suuri (ka. 8,0).

Sinfoniettan muusikoiden palaute oli erittäin positiivista ja rohkaisevaa. Mitään erityisiä artefakteja muusikot eivät raportoineet ja lähes kaikki pitivät järjestelmän tuottamaa virtuaaliakustiikkaa hyvin luonnollisena. Moni soittaja oli jopa päivän harjoittelun jälkeen valmis vaihtamaan Tapiolasalin harjoitukset virtuaaliakustiikalla parannettuun Louhisaliin, kunhan Louhisalin väritystä ja valaistusta parannettaisiin (vrt. kuva 5).

Erittäin mielenkiintoinen tulos oli myös muusikoiden positiivinen asenne vastaavan järjestelmän käyttökelpoisuudesta tulevaisuuden harjoitussaleissa, vastausten keskiarvo oli +5,0. Lopuksi vielä muutamia lainauksia vapaasta palautteesta:

- *“Hyvä ja hieno kokemus. Positiivinen yllätys. Hyvä kokeilu!”*
- *“Ensisijainen ratkaisu oltava kunnollinen akustiikka, mutta akustiikaltaan huonoihin tiloihin tämä on iso apu ja vähentänee turhaa prässäystä, jota helposti tapahtuu kuivassa akustiikassa.”*

- “Tosi paljon parempi kuin Louhisali yleensä, aivan eri olo soittaa.”
- “Järjestelmä toimi häkellyttävän hyvin, harjoittelu ongelmatonta! Solistia välillä vaikea kuulla takariviin, mutta on aika ongelma joka paikassa. Bravo!”

5 YHTEENVETO

Tämä tutkimus osoittaa virtuaaliakustiikan käytön olevan mahdollista harjoitustarkoituksissa etenkin suuremmissa tiloissa, joissa ominainen akustiikka on valmiiksi neutraali. Pienemmissä huoneissa tilan oma sointi vaatii tehokasta vaimennusta, ja soittaja on väkisininkin hyvin lähellä aktiivisen järjestelmän mikrofoneja ja kaiuttimia. Tällöin viivettä ei voida juuri lisätä ennen virtuaalisen jälkikaiuntahännän tuottamista ja hyväkuuloisen virtuaaliakustiikan tuottaminen on vaikeaa. Toisaalta pienissä huoneissa pintojen vaimennuksella saadaan aikaan merkittävä lasku äänipainetasossa, joka on esittämämme ratkaisun tärkeä ominaisuus.

Suuremmissa tiloissa virtuaaliakustiikka saadaan helpommin viritettyä luonnollisemman kuuloiseksi, koska mikrofonit ja kaiuttimet voidaan viedä hieman kauemmaksi äänilähteistä ja järjestelmään voidaan lisätä hieman viivettä. Toisaalta esim. sinfoniaorkesterin tapauksessa äänilähteitä on paljon ja ne ovat laajalla alueella, jolloin tasaisen äänenlaadun ja balanssin toteuttaminen kaikille soittajille on haastavaa. Lisäksi jos orkesterin kokoonpano ja istumajärjestys muuttuvat usein, pitää järjestelmä olla hyvin säädettävissä ja modifioitavissa. Käyttökokeemme kuitenkin osoittavat selvästi, että virtuaaliakustiikan avulla voidaan luoda uskottavia ja virheettömiä harjoitteluolosuhteita.

KIITOKSET

Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet Espoon musiikkiopisto, Espoon kulttuurikeskus ja Espoon kaupungin tekninen keskus. Tapio Lokki kiittää rahoituksesta Suomen Akatemiaa (projektinnumero 119092). Kiitos myös Akukon Oy:lle yhteistyöstä ja avusta.

VIITTEET

- [1] LOKKI T & HIIPAKKA J, A time-variant reverberation algorithm for reverberation enhancement systems, in *COST-G6 Conference on Digital Audio Effects (DAFx-01)*, pages 28–32, Limerick, Ireland, December 6-8 2001.
- [2] TEKNILLINEN KORKEAKOULU (HIIPAKKA, J., LOKKI, T., SAVIOJA, L.), Menetelmä kaikulaiteessa ja kaikulaite, Patentti FI 111571 B, myönnetty 15.8.2003.
- [3] LOKKI T, NUMMELA J, & LAHTI T, An electro-acoustic enhancement system for rehearsal rooms, in *Proc. EAA Symposium on Architectural Acoustics*, Madrid, Spain, Oct. 16-20 2000, paper AAQ06.
- [4] LOKKI T, KAJASTILA R, & TAKALA T, Virtual acoustic spaces with multiple reverberation enhancement systems, in *Proc. AES 30th Int. Conf. on Intelligent Audio Environments*, Saariselkä, Finland, March 15-17 2007.
- [5] GADE A C, Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. II: Field experiments and synthesis of results, *Acustica*, **69**(1989), 249–262.