

KATSOMOVAIMENNUKSESTA KONSERTTISALEISSA

Henna Tahvanainen^{1,2}

¹ A-Insinöörit

Akustiikkasuunnittelu

Puutarhakatu 10, Tampere

henna.tahvanainen@ains.fi

² Aalto -yliopiston elektroniikan ja sähkötekniikan korkeakoulu

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Otakaari 5, 02150 Espoo

Tiivistelmä

Yksi konserttisalien akustisista ilmiöistä on katsomovaimennus. Nimensä mukaisesti katsomoon pienessä kulmassa saapuva ääni, yleensä suora ääni sekä osa varhaisista heijastuksista, vaimenee pienillä taajuuksilla. Viimeaikaiset tutkimukset Aalto-yliopistossa laajentavat katsomovaimennuksen analysointia ja havaittavuuden tutkimusta laaja-alaisin konserttisalimittauksen sekä pienoismallilla. Mittauksissa hyödynnettiin kaiutinorkesteria, jonka avulla katsomovaimennuksesta saadaan kokonaiskuva yksittäisten lähdepisteiden sijaan. Tutkimuksessa huomattiin, että katsomovaimennus on tyypillisesti joko syvä ja kapea notko noin 100 Hz alueella tai laajakaistainen epäsymmetrinen vaimennus, joka on suurimmillaan noin 200 Hz alueella. Vaimennustyyppi riippuu penkkien muodosta sekä lattian kaltevuudesta. Alkuvasteen katsomovaimennukset tasoittuminen ajan kanssa vaihtelee konserttisalin geometrian mukaan. Penkit, joiden alla on ilmatilaa, jossa ääni pääsee kulkemaan, vahvistavat myös pieniä taajuuksia katsomovaimennustaajuuksien alapuolella. Tutkimukset osoittavat, että katsomovaimennusta ei havaita saleissa, joissa on riittävästi heijastuksia. Katsomovaimennuksen haittojen ehkäisyssä tulisi siis katsomoalueen suunnittelun sijaan ensisijaisesti keskittyä riittävien varhaisten heijastuksien varmistamiseen.

1 JOHDANTO

Akustiikkapäivillä on aiemmin esitelty muun muassa katsomon suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä [1] sekä mitattuja katsomovaimentumia suomalaisissa konserttisaleissa [2]. Tässä artikkelissa esitetään yhteenveto viimeaikaisista tutkimuksista katsomovaimentumasta konserttisaleissa [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Tutkimuksessa on käytetty kaiutinorkesterimittauksia konserttisaleissa, pienoismallitutkimuksia, kuuntelukokeita sekä huoneimpulssivasteen tila-aika-analyysimenetelmiä [10, 11].

Copyright ©2021 Henna Tahvanainen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

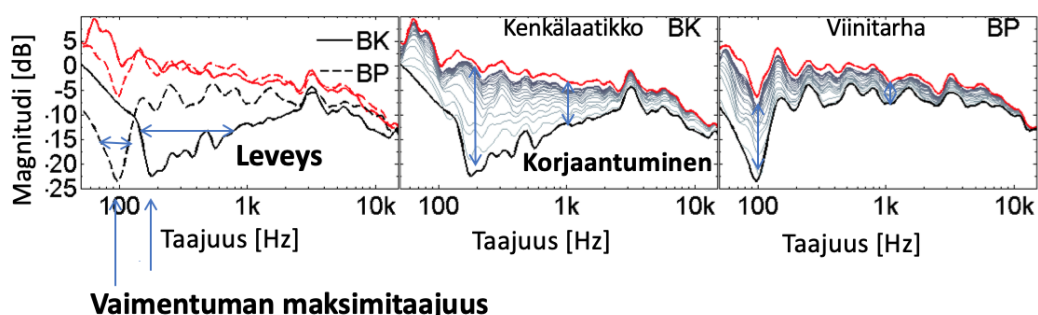
Katsomovaimennus (engl. seat-dip effect) huomattiin ensi kertaa New York Philharmonie-salin avajaisten alla, kun sellojen ja kontrabassojen ääni vaikutti heikolta [12, 13]. Mitauksissa havaittiin noin 20 dB vaimentuma 100-200 Hz alueella ensimmäisen 20-ms taajuusvasteessa [14, 15]. Tyypillisesti maksimivaimentuma on noin 80-300 Hz taajuusalueella jo 5-7 ms suoran äänen jälkeen, ja vaimentuma voi ulottua jopa noin 1 kHz taajuusalueelle [16, 17, 18]. Lisäksi katsomovaimennukseen liittyvät ilmiöt vaikuttavat myös katsomovaimentuman maksimitaajuuden alapuolella.

Katsomovaimennus on seurausta äänen etenemisestä säännöllisen penkkirivistön yli. Maksimivaimentuma syntyy, kun pienessä viistokulmassa katsomoon saapunut ääni ja lavalta tuleva suora ääni yhdistyvät kuuntelupisteessä vastakkaisvaiheessa taajuudella, joka riippuu näiden äänien reittien pituuserosta. Matkaero vastaa noin kaksi kertaa penkin selkänöjan efektiivistä korkeutta, eli penkin selkänöja vastaa vaimentuman neljänneksaaltopituutta. Vastaavasti myös joillakin taajuuksilla ilmenee korostumia, koska äänet ovatkin samassa vaiheessa kuuntelupisteessä. Katsomovaimennukseen kuuluu kuitenkin myös muita ilmiöitä, kuten sironna penkkien istuinosan yläosasta, äänen taipuminen kohti absorpoivaa pintaa, penkkien alla mahdollisesti etenevä pinta-aalto, sekä resonanssi-ilmiö penkkirivien välissä. Näistä mekanismeista löytyy koottua tietoa [9].

2 PENKKITYYPIN, LATTIAN KALTEVUUDEN JA SALIN MUODON VAIKUTUS

Katsomovaimennusta on tavallisesti tutkittu yhden lähdepisteen ja yhden vastaanottopisteen siirtofunktiona. Tämän tutkimuksen salimitauksissa käytettiin kaiutinorkesteria ja kaikki lähdepisteet keskiarvoistettiin kuuntelupisteittäin. Näin saadaan tietoa katsomovaimennuksesta koko orkesterin ääntä ajatellen. Konserttisalista mitatuista huoneimpulssivasteista analysoitiin 20-ms taajuusvastetta sekä vaimennuksen kehittymistä ajassa.

Näiden mittausten perusteella katsomovaimennus voitiin jakaa kahteen eri luokkaan, joiden ominaisuudet riippuvat penkkityypistä, lattian kaltevuudesta ja salin muodosta [3]. Näiden luokkien taajuusvasteita on havainnollistettu esimerkkisalein Kuvassa 1. Kenkälaatikonmuotoisissa konserttisaleissa, joissa tyypillisesti on tasainen lattia ja penkit, joiden istuimien selkänöja ei yllä maahan asti (ns. avoimet penkit), vaimentuma oli taajuudessa leveämpi, ja sen maksimi oli noin 200 Hz taajuusalueella. Viuhka- ja viinitarhanmuotoisissa saleissa, joissa tyypillisesti on nouseva katsomo ja penkkien selkänöjat ylettyvät maahan asti (ns. suljetut penkit), vaimentuma oli hyvin kapeakaistainen ja keskittynyt noin 100 Hz taajuusalueelle. Tämän lisäksi kenkälaatikon muotoisissa saleissa varhaiset heijastukset noin 30-120 ms suoran äänen jälkeen korjasivat vaimentumaa, eikä vaimennusta lopullisessa taajuusvasteessa juurikaan ollut havaittavissa. Tila-aikanalyysi osoitti, että varhaisia heijastuksia tulisi saapua sekä sivusta että ylhäältä. Sen sijaan muissa saleissa myös lopullisessa taajuusvasteessa oli yhä vaimentumaa maksimitaajuudella. Pienoimallilla tehtyjen mittausten perusteella todettiin, että penkkityyppi vaikuttaa erityisesti vaimentuman maksimitaajuuteen, lattian kaltevuus vaimentuman taajuuskaistan leveyteen ja konserttisalin muoto katsomovaimennuksen korjaantumiseen ajassa [8].



Kuva 1: Katsomovaimennuksen taajuusvasteen analysointi ajassa kenkälaatikon muotoisessa salissa (Berlin Konzerthaus, BK), jossa on tasainen lattia ja avoimet penkit, sekä viinitarhan muotoisessa salissa (Berlin Philharmonie, BP), jossa on nouseva katsomo ja suljetut penkit. Vasemmalla kuvassa 20-ms ja lopullinen taajuusvaste, johon on myös merkitty vaimentuman maksimitaajuus ja leveys. Keskellä ja oikealla 10-ms aikaikkunan välein kumuloituvia taajuusvaste, josta voi havaita maksimivaimentuma korjaantuminen.

Lisäksi maksimitaajuuden alapuolella tasot olivat korkeammat avoimilla penkeillä kuin suljetuilla penkeillä. Pienoismallimitauksissa erot olivat noin 3-4 dB 80 Hz taajuusalueella [8]. Tämän on arveltu johtuvan siitä, että ääni pääsee kulkemaan vapaasti penkkien alta [8, 19].

3 YLEISÖN VAIKUTUS

Osa aiemmasta tutkimuskirjallisuudesta on huomannut eroja katsomovaimennuksessa tyhjän salin ja yleisön välillä ja osa ei. Aikaisempien tutkimusten uudelleenanalysointi kuitenkin osoitti, että tutkimustulos riippuu penkkien tyypistä (avoimet vai suljetut) ja lattian kaltevuudesta [6]. Vajaalla yleisömäärällä tai suljetuilla penkeillä ei havaita yleisön vaikutusta. Jos penkkien selkänöjat ovat paljon matalammat kuin istuva yleisö, katsomovaimentuman maksimitaajuus siirtyy matalammalle. Lisäksi avoimilla penkeillä yleisön jalat tukkivat penkkien alla olevaa ilmatilaa ja bassotaajuuksien tasot laskevat.

4 HAVAITSEMINEN

Katsomovaimennuksen on arveltu heikentävän konserttisalin akustiikkaa, ja ilmiötä koskevasta kirjallisuudesta löytyy useita eri ratkaisuja katsomovaimennuksen poistamiseksi, esimerkiksi absorption lisääminen lattialle ja penkin selkänöjan yläosiin, jälkikäiunta-ajan lisääminen, sekä nouseva katsomo.

Maksimivaimentumalle on määritetty kuuntelukokeiden perusteella kynnyisarvo -3.8 ± 0.2 dB 200 Hz oktaavikaistalla [20], vaikkakin tutkimuksessa käytetyt kaksi simuloitua salia olivat verrattaen kuivia. Laajemmissa kuuntelukokeissa havaittavuutta tutkittiin vaihtamalla suoran äänen taajuusvastetta vastaamaan erilaisia katsomoasetelmia mitatuissa saleissa [7]. Huomattiin, että mainittu havaintokynnys ei kuvasta katsomovaimennuksen havaittavuutta. Katsomovaimennus oli kuultavissa yhdessä salissa, jossa kuuntelijat pitivät parhaimpana suoraa ääntä, josta katsomovaimennus oli poistettu. Tämän tarkoit-

tanee siis, että salissa tulisi pyrkiä poistamaan katsomovaimennus silloin, kuin sali on akustisesti liian kuiva.

Voimakas katsomovaimennus saleissa voi myös vaikuttaa salin dynamiikan havaitsemiseen, sillä erityisesti pienillä taajuuksilla bassosoitinten dynamiikka voi kaventua, kun salin bassovaste on heikko [21]. Lisäksi katsomovaimennus voi muuttaa esimerkiksi soitinten äänenväriä [4].

5 KATSOMON SUUNNITTELU

Katsomovaimennuksen syntymekanismi ja havaittavuus luovat pohjaa katsomosuunnittelulle yhdessä katsomon materiaalien, ergonomian ja turvallisuuden kanssa. Akustisesta näkökulmasta katsomovaimennus ei ole merkittävä, mikäli salissa on muuten riittävästi varhaisia heijastuksia, eikä muita ongelmia bassovasteen kanssa. Konserttisalin suunnittelussa kannattaisi siis ensisijaisesti kiinnittää huomiota heijastusten suunnitteluun sekä muiden akustisten ongelmien korjaamiseen pienillä taajuuksilla. Seuraavaksi paras vaihtoehto katsomovaimennuksen kannalta olisi tasainen lattia ja avoimet penkit, jotta maksimivaimentuma ei keskity liian pienelle taajuusalueelle, jolloin sen korjaantuminen voi olla vaikeaa. Nousevan katsomon tapauksessa kannattaisi suosia portaiden sijaan liukuvaa nousua, jotta penkit säilyisivät avoimina. Salimittauksissa katsomovaimennus oli pientä erityisesti kevyillä irtopenkeillä.

6 YHTEENVETO

Katsomovaimennus on joukko konserttisalin varhaisessa vasteessa olevia ilmiöitä, jotka aiheutuvat äänen kulkiessa säännöllisen rakenteen eli katsomon läpi. Katsomovaimennuksen tunnuspiirteitä ovat vaimentuma noin 80-300 Hz taajuudella, mahdollinen korostuma tätä pienemmillä taajuuksilla riippuen penkkityypistä sekä korostuma tai vaimentuma suuremmilla taajuuksilla riippuen penkkityypistä ja lattian kaltevuudesta. Katsomovaimennus ei ole kuultavissa silloin, kun konserttisalissa on riittävästi varhaisia heijastuksia ja siten myös myöhäistä energiaa. Katsomovaimennuksen haittojen vähentämiseksi konserttisalissa on varmintä siis suunnitella riittävästi heijastuksia ja sen jälkeen miettiä katsomoa.

Kiitokset: Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet Emil Aaltosen säätiö, Tekniikan edistämissäätiö, KAUTE-säätiö ja Antti-Jussi Kososen rahasto.

VIITTEET

- [1] N. Näveri. Katsomot akustisissa esitystiloissa. In *Akustiikkapäivät*, 2015.
- [2] J. Pätynen, A. Southern, and T. Lokki. Konserttisalien akustiikan taajuusvaste ajan funktiona. In *Akustiikkapäivät*, 2011.
- [3] H. Tahvanainen, J. Pätynen, and T. Lokki. Analysis of the seat-dip effect in twelve European concert halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(4):731–742, 2015.
- [4] H. Tahvanainen, J. Pätynen, and T. Lokki. Studies on the perception of bass in four concert halls. *Psychomusicology: Music, Mind and Brain*, 2015.

- [5] H. Tahvanainen, J. Pätynen, and T. Lokki. Analysis of the seat-dip effect in an opera house. In *23rd International Congress on Sound & Vibration*, Athens, Greece, 2015.
- [6] H. Tahvanainen and T. Lokki. About the seat-dip effect in the presence of audience. In *Proceedings of the International Congress of Sound and Vibration*, Hiroshima, Japan, 2018.
- [7] H. Tahvanainen, A. Haapaniemi, and T. Lokki. Perceptual significance of seat-dip related direct sound colorations in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3):1560–1570, 2017.
- [8] H. Tahvanainen, T. Lokki, H.-S. Jang, and J.-Y. Jeon. Investigating the influence of seating area design and enclosure on the seat-dip effect using scale model measurements. *Acta Acustica*, 4(4):15, 2020.
- [9] H. Tahvanainen. *Analysis and perception of the seat-dip effect in concert halls*. PhD thesis, Aalto University, 2021.
- [10] J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki. Tila-aika-analyysi eurooppalaisista konserttisaaleista visualisoinnin avulla. In *Akustiikkapäivät*, 2013.
- [11] S. Tervo, J. Pätynen, and T. Lokki. Tilaimpulssivasteiden analyysi ja synteesi huoneakustiikassa. In *Akustiikkapäivät*, 2013.
- [12] L. Beranek, F. Johnson, T. Schultz, and B. Watters. Acoustics of Philharmonic Hall, New York, during its first season. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36(9):1247–1262, 1964.
- [13] T. Schultz. Acoustics of the concert hall. *IEEE Spectrum Magazine*, 2(6):56–67, 1965.
- [14] G. Sessler and J. West. Sound transmission over theatre seats. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36(9):1725–1732, 1964.
- [15] T. Schultz and B. Watters. Propagation of sound across audience seating. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36(5):885–896, 1964.
- [16] K. Ishida. *The Measurement and Prediction of Sound Transmission over Auditorium Seats*. PhD thesis, University of Cambridge, England, 1993.
- [17] W. Davies. *The Effects of Seating on the Acoustics of Auditoria*. PhD thesis, University of Salford, England, 1992.
- [18] J. Bradley. Some further investigations of the seat dip effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(1):324–333, 1991.
- [19] Eckard Mommertz. Attenuation of sound passing over audience at grazing incidence. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4):2303–2303, 1993.
- [20] W. Davies, T. Cox, and Y. Lam. Subjective perception of seat dip attenuation. *Acta Acustica united with Acustica*, 82:784–792, 1996.
- [21] T. Lokki and J. Pätynen. Objektiivinen konserttisalalin dynamiikan arviointi. In *Akustiikkapäivät*, 2017.