

VAIMENNUSMATERIAALIN SIJOITTELULLA ON VÄLIÄ

Tapio Lokki

Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu
Akustiikan laboratorio, Informaatio ja tietoliikennetekniikan laitos
Otakaari 5, 02150 Espoo
tapio.lokki@aalto.fi

Tiivistelmä

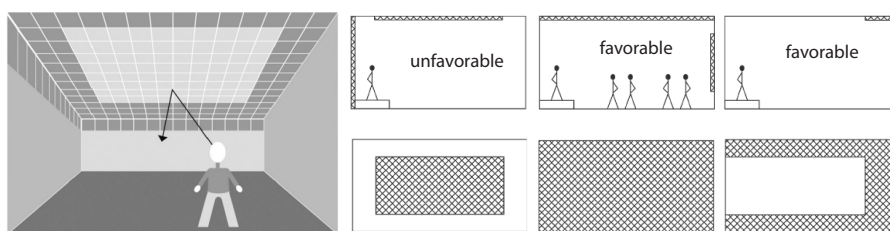
Huoneakustiikan suunnittelijoille lienee itsestään selvää, että vaimennusmateriaalin sijoittelu luokkahuoneissa, auditorioissa sekä avokonttoreissa vaikuttaa havaittuun lopputulokseen. Tässä paperissa esitellään päätulokset kahdesta viimeaikaisesta tutkimuksesta, joissa absorption sijoittelulla oli selkeä vaikutus. Järkevällä sijoittelulla vaimennusmateriaalin määrä voidaan minimoida sekä vaikuttaa havaittuun jälkikaiun määrään ja äänen laatuun. Lisäksi osoitetaan, että Keski-Euroopassa yleisesti käytössä oleva DIN-18041-ohjeistus vaimennusmateriaalien sijoittelusta on harhaanjohtava eikä johda optimaaliseen lopputulokseen, mm. puheen selkeyden kannalta. Tämä osoitettiin sekä mittauksin että kuuntelukokein. Puheen selkeyden kannalta paras paikka vaimennukselle on puhujan läheisyydessä ja takana eikä kuuntelijoiden ympärillä niin kuin DIN-18041 ohjeistaa. Luonnollisesti katon vaimentaminen parantaa myös puheen selkeyttä.

1 JOHDANTO

Huoneakustiikan suunnittelussa on monia keinoja laskea haluttu absorption määrä, jotta saavutetaan haluttu jälkikaiunta-aika. Sabinen kaava lienee yksinkertaisin, mutta nykyään tehtävä onnistuu kohtuullisen nopeasti myös tietokonemallinnuksen avulla. Vaimennusmateriaalin sijoittelua rajoittaa usein käytännölliset seikat, usein ainoastaan katto voidaan vaimentaa ja muille pinnoille ei vaimennusmateriaalia voi syystä tai toisesta laittaa. On kuitenkin itsestään selvää, että vain katon vaimentaminen ei aina riitä ja osa vaimennuksesta pitäisi saada myös jollekin seinäpinnalle, jotta ääni ei jää heijastelemaan seinien välille.

Tässä artikkelissa osoitetaan, että osa yleisesti edelleen käytetyistä ohjeista ei välttämättä tuota optimaalista tulosta. Lähinnä viitataan tässä vanhaan (ennen 2022 päivitystä) SFS-5907-standardiin (2022 päivityksessä kuvalliset ohjeet on poistettu) ja DIN-18041-ohjeeseen, joita käytetään yleisesti edelleen. Kuvassa 1 on nämä ohjeet, jotka tässä artikkelissa osoitetaan harhaanjohtaviksi.

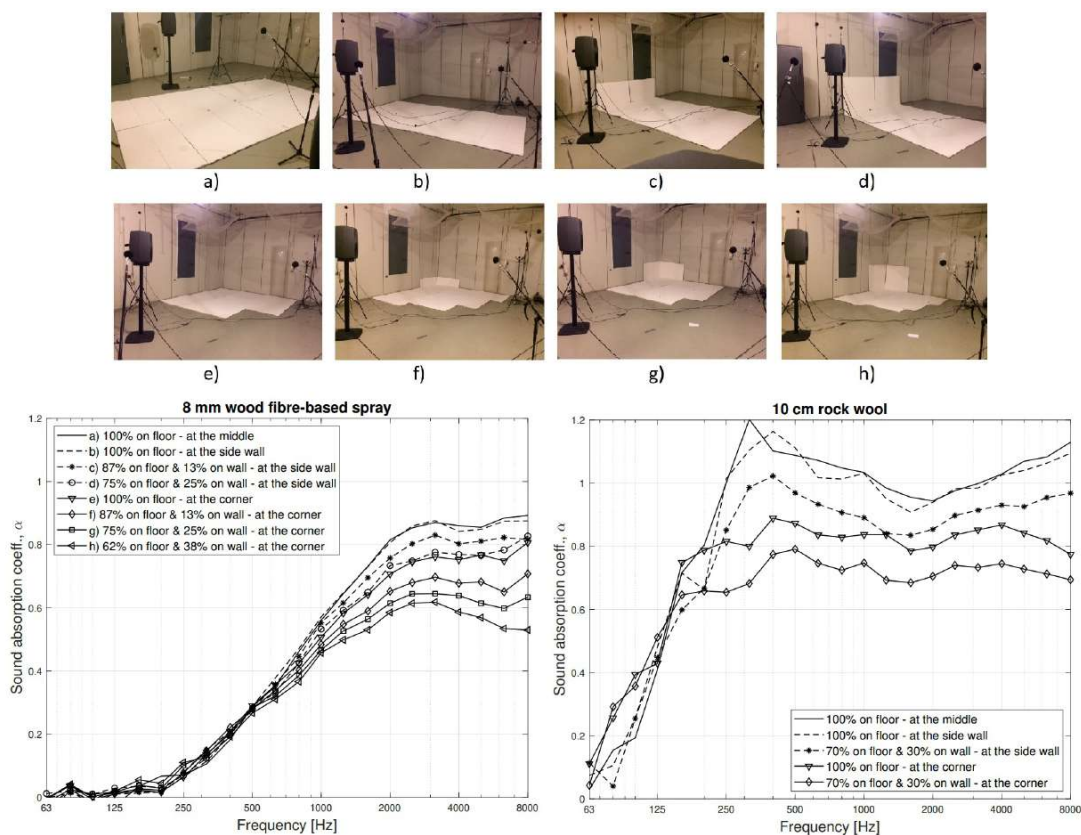
Copyright ©2023 Tapio Lokki. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1: Vasemmalla vanhan SFS-5907 mukainen ohjeistus, jolla "saavutetaan korkea puheenerotettavuus pienimmällä mahdollisella materiaalmäärällä". Oikealla DIN-18041-suosituksen mukaisia ohjeita absorptio sijoitteluun. Tässä artikkelissa osoitetaan, että nämä molemmat suositukset ovat virheellisiä.

2 VAIMENNUSMATERIAALIN MÄÄRÄN MINIMOINTI

Cucharero et al. [1] mittasivat soveltaen absorptiokerrointa parissa kaiuntahuoneessa. Standardin ISO-354 mukaan tutkittava näyte tulisi sijoittaa huoneen keskelle, mutta tässä työssä menetelmää sovellettiin sijoittamalla absorptiota eri kohtiin huoneissa. Vaimennusmateriaalin määrä säilyi siis samana mittaustilanteiden välillä, mutta materiaalin sijoitusta muuteltiin. Kuvassa 2 näkyy selvästi, että mitä lähempänä huoneen nurkkaa tai seinän ja lattian/katon välistä kulmaa vaimennusmateriaali sijaitsee, sinä pienempi on standardin ISO-354 mukaan mittauksista laskettu absorptiokerroin.



Kuva 2: Mittauksista lasketut absorptiokertoimet, vasemmalla 8 mm sellukuiduista valmistettu materiaali ja oikealla 10 cm paksu kivivilla. Yläkuvassa on mittaustilanteet.

Kaikki artikkelissa [1] esitetyt mittaukset osoittivat, että vaimentavaa materiaalia ei kannata sijoittaa kulmiin eikä nurkkiin, kun halutaan minimoida jälkikaiunta-aikaa ja maksimoida puheen ymmärrettävyyttä. Sen sijaan pitäisi pyrkiä sijoittamaan vaimennus vähintään metrin verran kulmista. Joskus on hyödyllistä jättää kattoon keskelle ääntä heijastavaa pintaa, jotta vaimennusta ei tule liikaa, mutta tämä riippuu huoneen tilavuudesta ja käyttötarkoituksesta.

3 VEIMENNUSMATERIAALIN SIJOITTELU PUHEEN SELKEYDEN MAKSIMOIMISEKSI

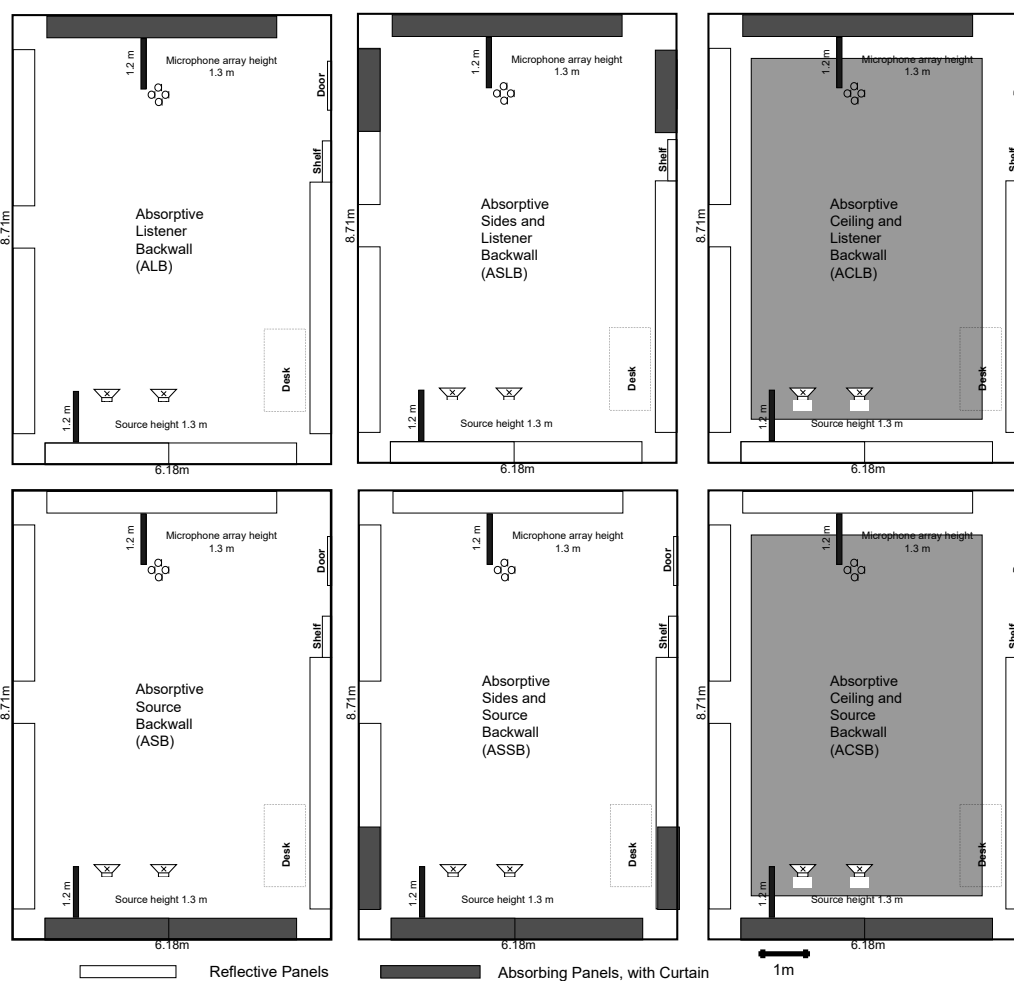
Toinen vaimennuksen sijoitteluun liittyvä tuore tutkimus [2] liittyy DIN-18041-ohjeistukseen [3] luokkahuoneiden, auditorioiden ja koulutustilojen sekä musiikkihuoneiden suunnittelussa. Alunperin tämä saksankielinen suositus (englanninkielinen käännös on olemassa) julkaistiin vuonna 1968 ja sitä on tarkistettu vuosina 2004 ja 2016. Standardi antaa suosituksia jälkikaiunta-ajoista pienissä ja keskikokoisissa huoneissa, joiden tilavuus on enintään 5000 m³, ja urheiluhalleihin, joiden tilavuus on enintään 8500 m³. Lisäksi suositus antaa huoneiden akustisia suunnitteluohjeita hyvän akustisen laadun varmistamiseksi, ensisijaisesti puheviestintään.

Yksi DIN-18041:n käytetyimmistä ominaisuuksista on ohje jälkikaiunta-ajan T pituus tavoitetilavuuden funktiona musiikkihuoneissa, urheilutiloissa ja opetusluokissa (katso myös [4]). Nämä ohjeet pätevät edelleen, tosin uusi standardi ISO-23591:2021 musiikin harjoitustilojen suunnitteluun on parempi. DIN-18041 ohjeistaa myös vaimennusmateriaalien sijoituksessa ja muutama esimerkki suosituksista on esitetty kuvassa 1. DIN-18041:n mukaan epäedullisessa tilanteessa vaimennus on sijoitettu äänilähteen taakse ja keskelle kattoa, mutta mitään psykoakustista perustetta tälle ohjeelle ei ole esitetty. Äänilähteen takana olevan heijastavan seinän hyödyistä ei ole tutkimusnäyttöä, tosin sen ääntä vahvistava vaikutus on todettu hyödylliseksi joissain tilanteissa [5]. Lähes jokainen hifisti tai studioita suunnitellut akustikko kuitenkin tietää, että äänilähteen läheiset pinnat tulisi vaimentaa mahdollisimman hyvin äänen selkeyden vuoksi, mutta tämä on siis DIN-18041 mukaan väärin. Niinpä tutkimme asiaa mittauksin ja kuuntelukokein ja tässä artikkelissa esitetään päätulokset, yksityiskohdat tutkimuksesta voi lukea tuoreesta artikkelista [2].

3.1 Mittaukset ja auralisaatiot

Vaimennusmateriaalin sijoituksen vaikutusta tutkittiin Aalto-yliopiston muunneltavan akustiikan huoneessa, jonka mitat ovat 8,9 m x 6,3 m x 3,6 m. Seinien ja katon paneeleita voi avata ja sulkea sähköisesti, avattuna paneelin sisällä oleva 10 cm mineraalivillaa vaimentaa ääntä tehokkaasti. Auralisaatioita varten mitattiin kahdella kaiuttimella (01dB LS01 ja Genelec 8020B) tilaimpulssivasteet yhdessä pisteessä. Kuvassa 3 on esitetty mittaustilanteet ja koko mittausten ajan vain seinäpaneelien ominaisuuksia (vaimentava/heijastava) muutettiin, kaiuttimet ja mikrofonihila pysyivät paikoillaan.

Auralisaatiot kuuntelukoetta varten renderöitiin seuraavasti. Mittaukset analysoitiin SDM-tekniikalla [6], jonka avulla tilaimpulssivasteet jaettiin 45 kuuntelijan ympärillä olevaan kaiuttimeen. Nämä toistokaiutinkohdaiset vasteet konvoluoitiin kaiuttoman miesäänän (9s äänitys) kanssa. Covid19-rajoitusten vuoksi kuuntelutestiä ei kuitenkaan voitu tehdä



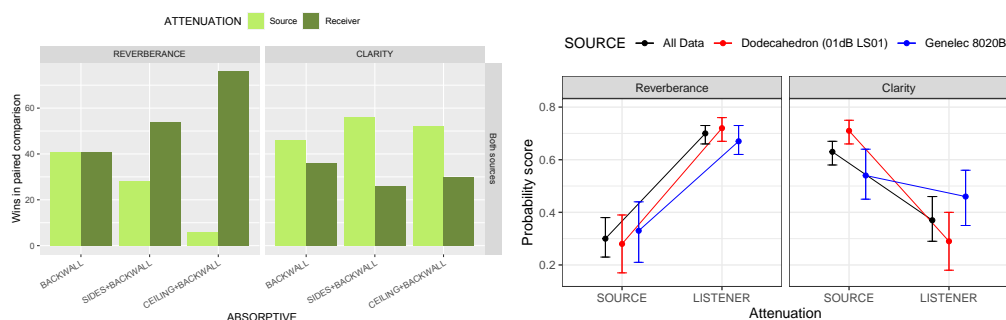
Kuva 3: Vasemmalla on vaimennusta (tummennettu alue) vain kaiuttimen (ASB) tai kuuntelijan (ALB) takana. Keskellä (ASSB ja ASLB) vaimennusta on takaseinän lisäksi myös jonkin matkaa sivuseinillä. Oikealla (ACSB ja ACLB) on vaimennettu takaseinän lisäksi vaimennettu katto.

laboratoriossa (45-kanavaisella toistolla), joten auralisoinnit muutettiin binauraalisiksi SPARTA Binauraliser-pluginilla [7].

Verkkossa toteutettu kuuntelukoe (alustana WebMUSHRA [8]) oli parivertailu, jossa koehenkilöt kuuntelivat pienen harjoituksen jälkeen 30 paria (2 lähettä ja kuusi huoneakustiikka = 2×15 paria) ja valitsivat *kaiuntaisemmän* näytteen. Pienen tauon jälkeen kuuntelijat kuuntelivat uudelleen samat 30 paria ja valitsivat näytteen, joka oli *selkeämpi*. Jokaiselle koehenkilölle näyteparit tulivat satunnaisessa järjestyksessä. Ääninäytteet ja lisätietoja löytyy sivulta <http://research.spa.aalto.fi/publications/papers/ioaaa-2023/>.

3.2 Kuuntelukoetulokset

Kuuntelukokeen suoritti 41 koehenkilöä, jotka pääsääntöisesti käyttivät hyvälaatuisia kuulokkeita. Tulokset on esitetty kuvassa 4 ja niistä nähdään, että kun tilassa on sama määrä vaimennusmateriaalia niin vaimennettaessa seinä lähteen takana kuullaan puhe



Kuva 4: Vasemmalla parivertailun tulokset esitettynä voittavien näytteiden määrinä, molemmille lähteille erikseen. Oikealla todennäköisyys kumpi näytteistä valitaan (BTL-malli), jos vaimennus on lähteen (SOURCE) tai kuuntelijan (LISTENER) takana.

vähemmän kaiuntaisena ja selkeämpänä. Eli vaikka kuuntelijan ympärillä on runsaammin kaiuntaa (ääntä heijastavia pintoja) niin koehenkilöt havaitsivat äänen vähemmän kaiuntaisempuna ja selkeämpänä kuin tapauksissa, joissa heijastavat pinnat olivat lähteen ympärillä (ja vaimentavat kuuntelijan ympärillä). Toisin sanoen DIN-18041 suosituksen "epäsuotuisa" vaimennusmateriaalin sijoittelu havaittiin vähemmän kaiuntaisempuna ja selkeämpänä puheella kuin ohjeistuksen "suositeltu" vaimennusmateriaalin sijoittelu. Tulokset olivat selkeämpiä ympärisäteilevällä kaiuttimella, mutta myös havaittavia suuntaavalla kaiuttimella mitattuna. Alkuperäisessä artikkelissa [2] on esitetty myös objektiiviset huoneakustiset tunnusluvut, jotka eivät merkittävästi eroa toisistaan tapauksissa, joissa absorptiomateriaalin määrä on sama.

3.3 Keskustelua ja huomioita

Esitetyssä tutkimuksessa ei testattu puheen ymmärrettävyyttä, vaan ainoastaan puheen kaiuntaisuutta ja selkeyttä. Puheen ymmärrettävyyttä on tutkittu laajasti puheen vastaanottokynnyksellä (SRT) yhden [9] tai useiden [10] heijastusten tapauksissa. Kaikissa näissä tutkimuksissa käytettiin mallinnettuja huoneita, ei mitattuja vasteita todellisista huoneista. Meidän tutkimuksessa käytettiin mittauksiin perustuvia auralisaatioita ja keskityttiin äänenlaatuun puheen ymmärrettävyyden sijaan.

On tärkeää huomioida, että tässä tutkimuksessa keskityttiin vain puheen laatuun kuuntelijan näkökulmasta. Opettajan näkökulmasta hänen äänensä tukeminen on tärkeää ääniongelmien välttämiseksi ja siksi luokkahuoneita ei voi vaimentaa määräämättömästi. Vaimennusta on kuitenkin oltava riittävästi, koska hälyisä luokkahuone voi aiheuttaa myös terveysongelmia opettajille [11]. Akustiset olosuhteet vaikuttavat melutasoon oppituntien aikana ja voivat vaikuttaa oppilaiden käyttäytymiseen luokkahuoneessa [12].

4 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa tiivistettiin kaksi tutkimusta vaimennusmateriaalin sijoittamisessa (lähinnä) opetustiloissa. Tulokset osoittavat, että vaimennusmateriaalin sijoittelulla voidaan minimoida tarvittavan materiaalin määrää ja vaikuttaa puheen havaittuun selkeyteen. Joissain standardeissa, joita käytetään laajasti ohjaavina periaatteina luokkahuoneiden, kokoushuoneiden ja muiden pienten tilojen akustisessa suunnittelussa, on suorastaan har-

haanjohtavia suunnitteluohjeita (kuva 1), vaikka ohjeiden oikeellisuus olisi ensiarvoisen tärkeää. Toivottavasti tämä artikkeli auttaa akustiikkasuunnittelijoita pohtimaan entistä tarkemmin minne vaimennusmateriaali kannattaa sijoittaa erilaisissa tiloissa suunnitellun käyttötarkoituksen mukaan.

VIITTEET

- [1] J. Cucharero, T. Hänninen, and T. Lokki. Influence of sound absorbing material placement on room acoustics. *Acoustics*, 1(3):644–660, August 2019.
- [2] T. Lokki and A. Kuusinen. Placement of absorption material: DIN 18041 is misleading. In *11th International Conference on Auditorium Acoustics*, Ateena, Kreikka, 2023.
- [3] DIN 18041. Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung (Acoustic quality in rooms – specifications and instructions for the room acoustic design), 2016.
- [4] C. Nocke. DIN 18041 - a German view. In *Euronoise 2018*, pages 1033–1038. European Acoustics Association, Heraklion, Crete, 2018.
- [5] J. Brunskog, A.C. Gade, G. Paya Bellester, and L.R. Calbo. Increase in voice level and speaker comfort in lecture rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4):2072–2082, 2009.
- [6] S. Tervo, J. Pätynen, A. Kuusinen, and T. Lokki. Spatial Decomposition Method for Room Impulse Responses. *Journal of the Audio Engineering Society*, 61(1/2): 17–28, 2013.
- [7] L. McCormack and A. Politis. SPARTA & COMPASS: Real-time implementations of linear and parametric spatial audio reproduction and processing methods. In *AES Int. Conf. on Immersive and Interactive Audio*, 2019.
- [8] M. Schoeffler, S. Bartoschek, F.-R. Stöter, M. Roess, S. Westphal, B. Edler, and J. Herre. webMUSHRA — A Comprehensive framework for web-based listening tests. *Journal of Open Research Software*, 6(1):8, 2018.
- [9] A. Warzybok, J. Rannies, T. Brand, S. Doclo, and B. Kollmeier. Effects of spatial and temporal integration of a single early reflection on speech intelligibility. *Journal of the Acoustical Society of America*, 133(1):269–282, 2013.
- [10] J. Rannies, A. Warzybok, T. Brand, and B. Kollmeier. Measurement and prediction of binaural-temporal integration of speech reflections. *Trends in Hearing*, 23:1–22, 2019.
- [11] G. Tiesler, R. Machner, and H. Brokmann. Classroom acoustics and impact on health and social behaviour. *Energy Procedia*, 78:3108–3113, 2015.
- [12] B. Shield, R. Conetta, J. Dockrell, D. Connolly, T. Cox, and C. Mydlarz. A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in england. *Journal of the Acoust. Soc. of Am.*, 137(1):177–188, 2015.