

KEVYTRAKENTEISEN AKUSTISEN MITTAUSTILAN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Juha Backman¹, Lauri Veko¹, Reino Jaakkola¹

¹ AAC Technologies Solutions Finland Oy

Lemminkäisenkatu 46 A

20520 TURKU

juhabackman@aactechnologies.com (juha.r.backman@gmail.com)

lauriveko@aactechnologies.com

reinojaakkola@aactechnologies.com

Tiivistelmä

AAC:n Turun uudessa akustisessa mittaustilassa kokeiltiin perinteistä jäykkäseinäistä, kiilapintaista kaiutonta huonetta huomattavasti kevyempää ja edullisempaa ratkaisua, jossa seinät toteutettiin pelkinä rungon varaan asennettuina absorbenttilevyinä. Tässä ratkaisussa tingittiin tietoisesti tilan ääneneristävyydestä, mutta mittausten kannalta tärkeät keskitajuuksien absorptio-ominaisuudet vastaavat tavanomaisia kaiuttomia huoneita, ja pienillä taajuuksilla ei esiinny tavanomaisille kaiuttomille huoneille tyypillistä pintojen heijastuskertoimen kasvua.

1 JOHDANTO

Kaiuttomien huoneiden kehittämisen aloitti toisen maailmansodan aikaan Leo L. Beranekin johtama tutkimusryhmä Yhdysvaltojen maavoimille, joka tarvitsi mittaustilaa suurtehokaiuttimien testaamiseen. Lähes tuhannesta tutkitusta rakenteesta parhaaksi osoittautui kiilarakenne, jonka takana oli ilmatila [1]. Ensimmäinen tämän tyyppinen laboratorio rakennettiin Harvardin yliopistoon 1942, ja toinen suorituskyylyltään suunnilleen vastaava toteutettiin Bell Labsin Murray Hillin laboratorioon 1947 [2]. Kiilarakenne on ollut näistä lähtien yleisin tapa toteuttaa kaiuton huone, vaikka muitakin rakenteita tunnetaan. Kun tilaa on käytettävissä riittävästi, tämä lähestymistapa on kiistatta erinomainen, sillä näin saavutetaan hyvä absorptio suurella osalla audioaluetta ja absorptiomateriaalin ja jäykän, massiivisen seinärakenteen yhteisvaikutuksesta tyypillisesti hyvin alhainen melutaso.

Suunnitellessamme AAC:n Turun laboratoriossa käytettävissämme oli laboratoriotila, johon oli jo sijoitettu muita mittausjärjestelmiä, jotka rajoittivat akustisen mittaustilan sijoittelua. Perinteinen yleiskäyttöisen kaiuttoman huoneen toteutus olisi ollut käytännössä mahdotonta, sillä tilaa oli korkeussuunnassa käytettävissä vain 2,55 m, joten pienten taajuuksien kannalta riittävä kiilarakenne olisi jättänyt tilaan liian pienen vapaan alueen. Materiaalivalintoja puolestaan ohjasivat palokuorman välttäminen ja työsuojelunäkökohdat (kivi- tai mineraalivilla olisi pitänyt suojata).

Nämä rajoitteet tarkoittavat käytännössä sitä, että tilan akustisessa toiminnassa sallittavat kompromissit ovat määriteltävä tarkemmin tilan aiotun käyttötarkoituksen mukaan. Tärkeimmät sovellutukset ovat pienoiskaiuttimien mittaustilat, jossa mittaustilaisuus on tyypillisesti 10 – 30 cm, ja riittävä taajuusalue on 200 – 300 Hz ylöspäin, ja äänikentän tuotta-



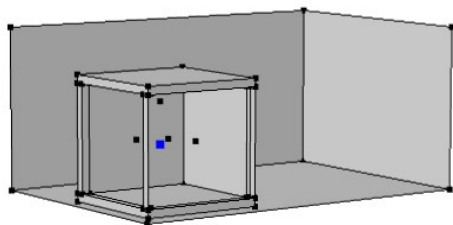
© 2021 Juha Backman, Lauri Veko ja Reino Jaakkola. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan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

minen mikrofoniin testaukseen tilaan asennettavalla kaiutinryhmällä, jossa taas etäisyys äänilähteestä on kaiutinmittauksia suurempi (80 cm), mutta jossa voidaan sallia jonkin verran suurempia väritymiä. Tilassa ei tehdä kuuntelukokeita, ja sekä äänikentän tuottamisessa että lähietäisyydeltä tehtävissä kaiutinmittauksissa äänipaineet (myös särökomponenttien äänipaineet) ovat riittävän suuria jotta normaalin toimistotilan luokkaa oleva taustamelu on hyväksyttävissä.

Näiden tarkentuneiden vaatimusten mukaan päädyttiin lähteä tutkimaan rakennetta, joka poikkeaa oleellisesti tavanomaisista laboratorioista: käytettävissä olevan tilan sisään tehdään mittaustila, jonka seininä käytetään pelkästään mahdollisimman kevyen runkorakenteen varaan asennettuja sileäpintaisia akustiikkalevyjä.

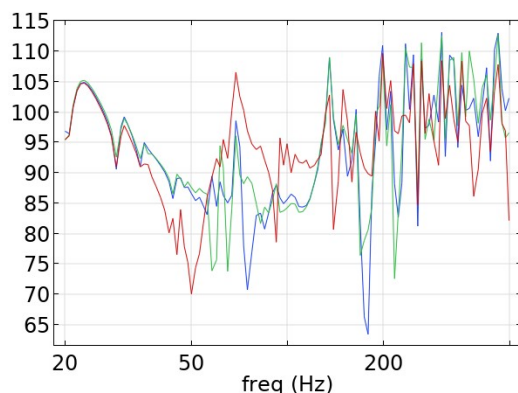
2 TILAN MALLINTAMINEN

Tilan suunnittelu aloitettiin käyttäen mahdollisimman yksinkertaista COMSOLilla toteutettua akustista FE-mallia. Kuituisen absorbentin toiminnan tarvittavia parametrejä ei ollut saatavilla, vaan mallinnukseen oli käytettävä tyypillisiä materiaaliarvoja. Mallinnuksessa oli yksityiskohtaisen suunnittelun sijaan siis tyydyttävä etsimään yleisellä tasolla vastausta kysymyksiin siitä, miltä taajuuksilta alkaen pelkkä absorbentti erottaa sisä- ja ulkopuolen akustisesti, ja toimiiko mittaustila samalla tehokkaana ympäröivän tilan kanssa tehokkaana pientaajuusabsorbenttina. Samalla arvioitiin mikä olisi tarvittava materiaalivahvuus (100 vai 200 mm). Tilaa approksimoitiin kovaseinäisellä suorakulmaisella laatikolla, jonka sisällä oli yksinkertainen absorptiomateriaalikuutio, jonka sisällä olevaan tyhjään tilaan sijoitettiin tarkasteltavat aiottuja mittauspisteitä vastaavat lähde- ja vastaanotin pisteet.

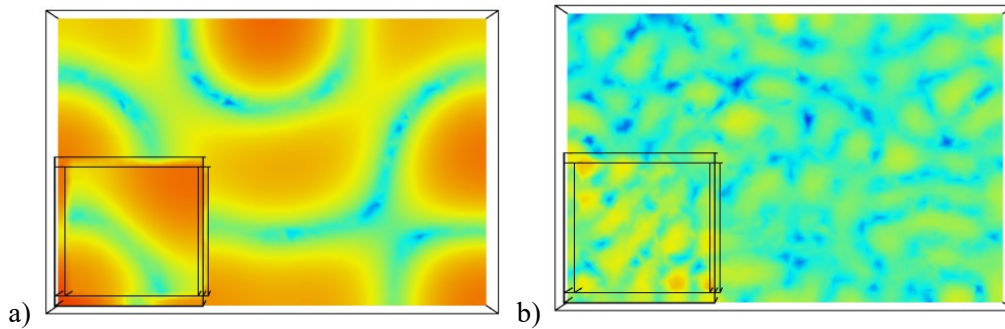


Kuva 1. Simulaation geometria, osa pinnoista poistettu.

Eri lähdepisteistä (mustat pisteet pienemmän kuution sisällä) vastaanottopisteeseen (sininen) osoittaa, että 200 mm materiaalivahvuudella yli 200 Hz taajuuksilla eri pisteiden välisten erot pienenevät, kun taas alle 200 Hz absorptenttikerros ei riitä äänikentän kontrollointiin.



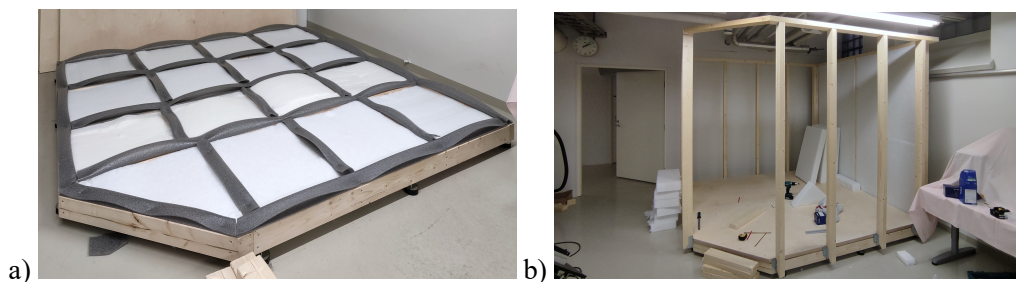
Kuva 2. Simuloitu taajuusvaste eri lähteen sijainneilla.



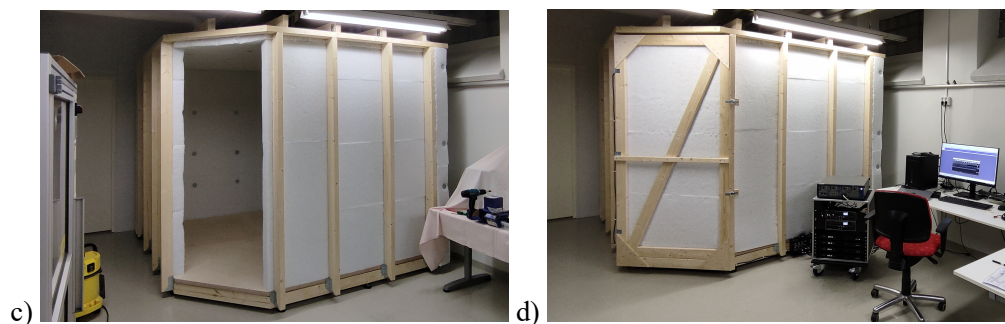
Kuva 3. Kenttäjakauma (äänipainetaso) a) pienillä taajuuksilla (80 Hz), joilla seinärakenne ei erota sisä- ja ulkopuolta riittävästi, ja b) keskitaajuuksilla (315 Hz), joilla sisä- ja ulkopuoliset kentät alkavat erottua toisistaan.

3 KÄYTÄNNÖN RAKENNERATKAISUT

Tilan toteutus on esitetty pääpiirteissään kuvassa 4. Mittaustilan sisälattia korotettiin irti laboratoriotilan omasta lattiasta tärinänvaimennusjalkojen avulla (spesifikaatioita ei saatavilla). Lattian koolausten väliin laitettiin vaimennusmateriaalikaistaleet ja vaahtomuovinauha koolausten ja vanereiden (2*18 mm) väliin, kuva 4a. Tämän varaan koottiin 50*100 mm² puutavarasta runko, jonka väleihin asennettiin 100 mm keinokuitulevy (Ewona) kiinteitä seiniä lähimpiin tilan seiniin, ja joka puolelle tilaa (kaikki seinät, katto) koolausten sisäpuolelle toinen 100 mm levy, eli materiaalin kokonaispaksuus lattialla ja kiinteiden seinien lähellä on 200 mm ja vapaan tilan puolella ja katossa 100 mm. Ohuemmista levyistä vapailla seinillä ja katossa oli vielä se hieman ennakoimaton lisäetu, että tilaan ei tarvittu erillistä valaistusta. (Alun perin ajatuksena oli sijoittaa levyjen väleihin LED-valot.) Kiinteän seinän ja mittaustilan väliin jätettiin noin 40 cm väli, joka sekä parantaa absorptiota pienillä taajuuksilla että mahdollistaa tarvittaessa liikkumisen tilan ympäri esimerkiksi johtojen vetämiseksi. Koolausten sisäpuoleiset akustiikkalevyt ruuvattiin paikalleen käyttäen apuna valkoisiksi maalattuja muovisia mineraalivillan kiinnityslevyjä. Ovi toteutettiin kevyenä kehyksenä, joka jäykistettiin poikkituella, diagonaalituella ja kulmiin asennetuilla vaneripaloilla (kuva 4d).



© 2021 Juha Backman, Lauri Veko ja Reino Jaakkola. 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.

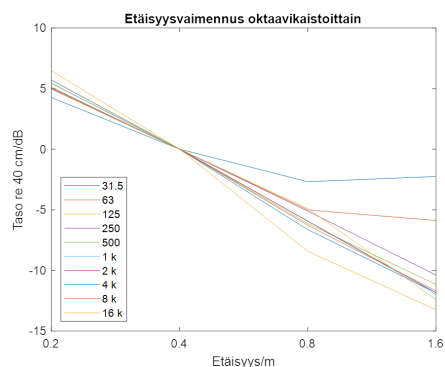


Kuva 4. a) lattian koolaus ja vaimennus, b) runkorakenne, c) asennetut absorbenttilevyt, d) valmis rakenne.

4 MITATTU SUORITUSKYKY

Kaiuttoman tilan toimintaa arvioidaan yleensä mittaamalla kuinka tarkasti isotrooppisen äänilähteen tuottaman äänikentän vaimeneminen etäisyyden funktiona noudattaa $1/r$ -lakia [3] [4] [5]. Tässä tapauksessa verifointimittaukset tehtiin ARTA-ohjelmalla käyttäen pientä kaksitiekaiutinta (Genelec 8020), jolla saatiin tuotettua riittävä äänipaine 50 Hz ylöspäin, mutta jonka ongelmana on (kaksitierefleksikaiuttimille yleisenä piirteenä, ei tähän tiettyyn malliin liittyvänä ominaisuutena) se, että akustinen keskipiste siirtyy taajuuden funktiona, ja lähietäisyyksillä myös mikrofonin ja kaiutinelementtien välinen kulma muuttuu. Toisena, enemmän pistemäistä lähdeä muistuttavana mittausäänilähteenä käytettiin 2” laajakaistakaiutinta (Tymphany). Tälläkin kaiuttimella on havaittavissa diffraktiosta johtuvasta akustisen keskipisteen siirtymästä aiheutuvaa poikkeamaa $1/r$ -laista pienillä taajuuksilla [6], mutta suurilla taajuuksilla käyttäytyminen on kaksitiekaiutinta tasaisempaa. Molemmat testikaiuttimet ovat ISO-standardin oletuksia suuntaavampia, mutta toisaalta tämä vastaa tilan todellista käyttöä. Lisäksi tässä testissä käytännön syistä etäisyyspisteiden määrä oli ISO-standardia pienempi.

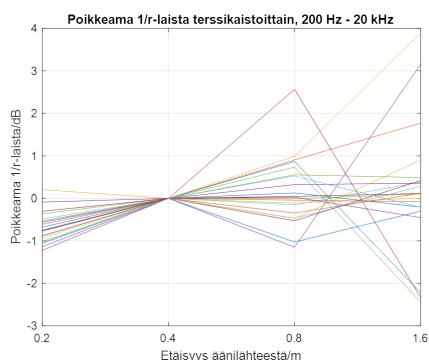
Tilan toimintaa koko kuuloalueella voidaan tarkastella oktaavikaistoittain mitattuna etäisyysvaimennuksena, jonka nähdään käyttäytyvän kaiuttoman tyyppisesti alkaen 125 Hz kaistasta (kuva 5).



Kuva 5. Oktaavikaistoittain mitattu etäisyysvaimennus.

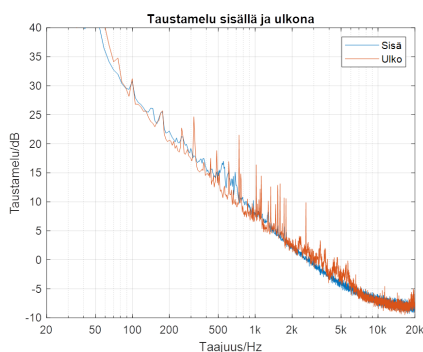
Tarkempi kuva saadaan tarkastelemalla poikkeamaa $1/r$ -laista terssikaistoittain. Suunnittelun tavoitteena olleelle 80 cm etäisyydelle asti poikkeama on 1 desibelin rajoissa lukuun ottamatta 200 Hz kaistaa. 160 cm etäisyys mitattiin jotta ymmärrettäisiin kuinka

suuri virhe tehdään siirryttäessä suunnittelualueen ulkopuolelle, sillä mikrofoni-
piste oli jo hyvin lähellä rajapintaa.



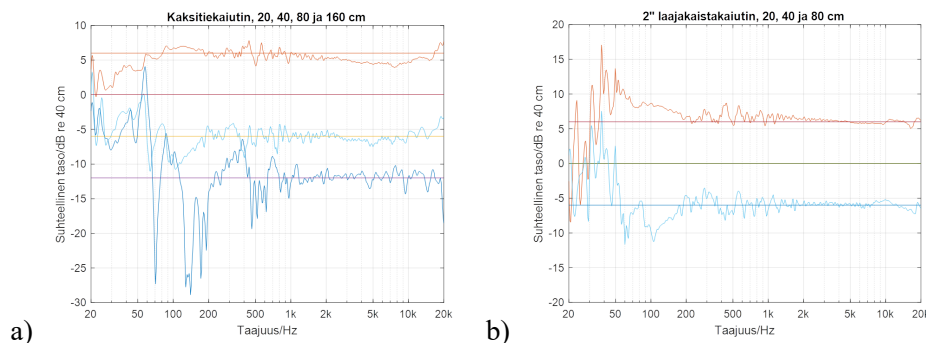
Kuva 6. Poikkeama $1/r$ -laista 200 Hz – 20 kHz terssikaistoilla.

Tilan mitattu ääneneristävyys pienillä taajuuksilla on, kuten oletettiin, käytännössä merkityksetön, mutta toisaalta tilan mitattu taustamelu ei vaikuta suurella osalla taajuuskais-
taa olevan oleellisesti tavanomaisen $\frac{1}{2}$ ” mikrofoniin kohinaa korkeampi. Seinät kuitenkin riittävät vaimentamaan yli 200 Hz taajuuksilla näkyviä kapeakaistaisia, ilmeisesti tilan ilmanvaihdoista aiheutuvia, spektri-
piikkejä (kuva 7).



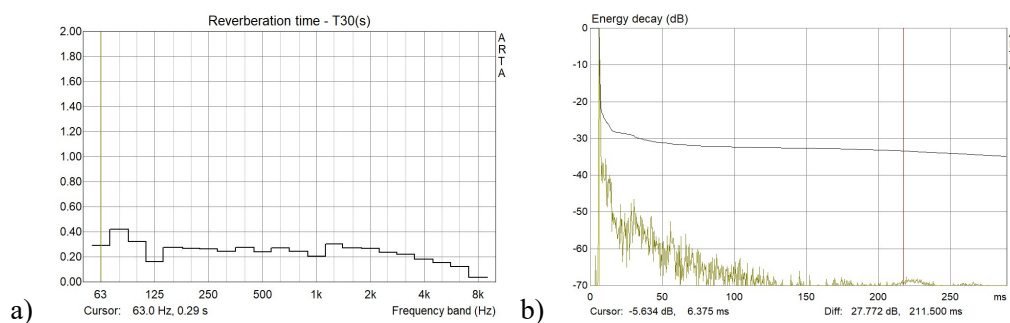
Kuva 7. Taustamelun ja mikrofoni-
kohinan spektri tilan sisä- ja ulkopuolella.

Äänentoistolaitteiden mittauksissa on usein tarpeen pystyä tunnistamaan luotettavasti ka-
peakaistaisia ilmiöitä (resonanssit, seisovien aaltojen vaikutus), jolloin ISO-normin mu-
kaisten terssikaistamittausten ohella on tarpeen varmentaa toiminta myös kapeakaistaisil-
la mittauksilla (kuva 8).



Kuva 8. Kaksitiekaaiuttimen (a) ja laajakaistakaaiuttimen (b) 40 cm etäisyydelle normeera-
tut vasteet.

Tällaisen voimakkaasti vaimennetun tilan jälkikaiunta-aika ei ole kovin mielekkäästi määritelty, mutta mielenkiinnon vuoksi voimme tarkastella sekä jälkikaiuntaa (T30) ja laajakaistaista energia-aika-funktiota (ETC), kuva 9. Mittausjärjestelmän kohina vaikuttaa tällaisen hyvin nopean vaimenemisprosessin mittaustarkkuuteen, joten todellinen vaimeneminen on mitattua jälkikaiunta-aikaa nopeampaa, mutta oleellinen havainto on, että tilan tavanomaisesta poikkeava seinäratkaisu tuottaa hyvin nopean vaimenemisen myös pienimmillä mitatuilla taajuuksilla.



Kuva 9. Jälkikaiunta-aika (T30) ja laajakaistainen energia-aikafunktio.

VIITTEET

- [1] Beranek, Leo L., *Riding the Waves*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2008, ss. 65 – 66.
- [2] Beranek, Leo L., *Acoustical Measurements (revised edition)*, Acoustical Society of America, 1993, ss. 656 – 657.
- [3] ISO 26101:2017(en) *Acoustics — Test methods for the qualification of free-field environments*.
- [4] Nash, Anthony *Qualification of an anechoic chamber*, Proc. 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, Germany, 9 – 13 syyskuuta 2019, ss. 1343 – 1349.
- [5] Russo, Mladen, Kraljevic, Stella, Maja, Sikora, Marjan, *Acoustic performance analysis of anechoic chambers based on ISO 3745 and ISO 26101: standards comparison and performance analysis of the anechoic chamber at the University of Split*, Euronoise 2018, Crete, ss. 2225 – 2230.
- [6] Vanderkooy, John, *The Acoustic Center: A New Concept for Loudspeakers at Low Frequencies*, Audio Engineering Society 121st Convention, San Francisco, lokakuu 5 – 8 2006, Preprint 6912.