



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri, Talotekniikka (AMK)

Kaiuttoman kammion suunnittelu ja toteutus

Aapo Hakulinen

Opinnäytetyö, Marraskuu 2023

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2023
Talotekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Aapo Hakulinen

Nimeke
Kaiuttoman kammion suunnittelu ja toteutus

Toimeksiantaja
S. Kärki Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa kaiuton kammio. Kammion pääkäyttötarkoituksena on pienikokoisten kaiuttimien testaaminen niiden kehitysvaiheessa. Kammion toimivuus määriteltiin mittauksilla, joita verrattiin hallin tuloksiin, johon kammio rakennettaisiin. Opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona S. Kärki Oy:lle.

Työssä esitellään keskeisiä termejä, jotka liittyvät akustisiin mittauksiin sekä erilaisia mitausvälineitä. Työssä esitellään myös kaiuttoman kammion mittausten taustaa sekä sitä, kuinka mittaukset on suoritettu. Työssä rakennettiin kaiuton kammio ja mitattiin kaiun aika, taajuusvaste sekä standardin mukaisia mittauksia kolmeen kertaan eri rakennusvaiheiden välillä. Mittaustuloksia verrattiin toisiinsa ja selvitettiin, kuinka mikäkin rakennusvaihe on vaikuttanut kammion suorituskykyyn. Lisäksi verrattiin kammion tuloksia hallista otettuihin lähtötasomittauksiin.

Tulosten perusteella kammion suorituskyky parani jokaisella mittauksella eri rakennusvaiheiden välillä. Kammio oli tuloksien perusteella parempi kuin hallitila jo ensimmäisessä rakennusvaiheessa. Valmiin kammion suorituskyky täytti tilaajan asettamat vaatimukset jälkikaiunta-ajan sekä kammion koon puolesta. Standardien vaatimissa mittauksissa kammio ei kuitenkaan täyttänyt tilaajan vaatimuksia.

Kieli
suomi

Sivuja 37
Liitteet 2
Liitesivumäärä 3

Asiasanat
kaiuton kammio, kaiku, absorptio



THESIS
November 2023
Degree Programme in Building Services Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author (s)
Aapo Hakulinen

Title
Design And Implementation of Anechoic Chamber

Commissioned by
S. Kärki Oy

Abstract
The purpose of this thesis was to design and implement an anechoic chamber. The main purpose of the chamber is to test compact loudspeakers at their development stage. The functionality of the chamber was determined by measurements. The thesis was commissioned by S. Kärki Oy.

The thesis introduces key terms related to acoustic measurements as well as various measuring instruments. It also presents the background to the anechoic chamber measurements and how they have been carried out. An anechoic chamber was built and echo time, frequency response and standard measurements were measured three times between different construction phases. The measurement results were compared with each other to find out how each construction phase affected the performance of the chamber. In addition, the results of the chamber were compared with baseline measurements taken in the hall.

Based on the results, the chamber was better than the hall space already in the first construction phase. The performance of the finished chamber met the customer's requirements in terms of reverberation time and chamber size. However, in the measurements required by the standards, the chamber did not meet the customer's requirements.

Language
Finnish

Pages 37
Appendices 2
Pages of Appendices 3

Keywords
anechoic chamber, echo, absorption

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Tietoperusta	5
2.1	Ääni	5
2.1.1	Äänenpaine	6
2.1.2	Taajuus	6
2.1.3	Seisovat aallot	7
2.2	Oktaavi	8
2.3	Absorptio	8
2.4	Äänen heijastuminen	10
2.5	Kaiunta	10
2.5.1	Jälkikaiunta-aika	10
2.5.2	RT60	10
2.5.3	T20 ja T30	11
2.6	Taajuusvaste	11
3	Menetelmät	12
3.1	Ohjelmisto	12
3.2	Mittalaitteet	12
3.2.1	Mikrofoni	12
3.2.2	Mittauskaiutin	13
3.3	Kammion suunnittelu	14
3.3.1	Toivottu suorituskyky	14
3.4	Mittausmenetelmät	15
4	Toteutus	16
4.1	Rakentaminen	16
4.2	Akustiset mittaukset	17
4.2.1	Mikrofonien vertailu	17
4.2.2	Lähtökohdan mittaaminen	17
4.2.3	Kammion mittaaminen tyhjänä	19
4.2.4	Kammion mittaus, puolet vaimennusmateriaalista	21
4.2.5	Kammion mittaus, kaikki vaimennusmateriaalit asennettuna	22
5	Tulokset	23
5.1	Mikrofonin tulokset	23
5.2	Hallin mittaustulokset	24
5.3	Kammion mittaustulokset tyhjänä	25
5.4	Kammion mittaustulokset, puolet vaimennusmateriaalista	26
5.5	Kammion mittaustulokset, kaikki vaimennusmateriaalit asennettuna	28
5.6	Tulosten vertailu	31
5.6.1	Mikrofonit	31
5.6.2	Jälkikaiunta-ajat	31
5.6.3	Taajuusvasteet	33
5.6.4	Valmiin kammion vertaaminen puolet vaimennusmateriaaleista olevaan kammioon SFS-EN ISO 26101-1:2022 standardin osalta	34
6	Pohdinta	34
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1 MiniDSP UMIK-1 -mikrofonin tuote-esite.

Liite 2 Norsonic Sound Analyser NOR150 kalibrointitodistus.

1 Johdanto

Kaiuttomilla tiloilla tarkoitetaan yleiskielellä kahta erilaista tilaa. Toinen keskittyy radioaaltojen ja säteilyn mittaamiseen ja toinen äänen (Hemming 2002). Tässä opinnäytetyössä keskitytään äänen mittaamiseen tarkoitettuihin kammioihin. Kaiuton kammio on tila, jossa ääniaallot eivät enää kimpoa takaisin tilaan vaan absorboituvat tilan rakennelmiin, jolloin tilassa kyetään tekemään akustisia mittauksia ilman minkäänlaisia vääristymiä, joita takaisin mikrofoniiin heijastuvat äänet tuottaisivat. Yksinkertaisesti kaiuton tila on tila, josta pyritään luomaan mahdollisimman samankaltainen kuin aukeasta ulkoalueesta, jossa ei ole mitään ääniä. Tällöin tilassa ääniaallot eivät heijastu pinnoilta takaisin mikrofoniiin ja luo virheitä mittauksiin. (Prisco 2018.)

Kaiuttomia tiloja on rakennettu ympäri maailmaa ja niitä käytetään monenlaisiin käyttötarkoituksiin kannettavan tietokoneen kannen sulkemisäänen muokkaamisesta kaiuttimien mittaamiseen sekä kaikkeen siltä väliltä (Prisco 2018). Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa kaiuttimien suunnitteluun tarkoitettu akustinen kammio, jota kutsutaan kaiuttomiksi kammioiksi. Tilan käyttötarkoitus on erilaisten kaiuttimien suorituskyvyn mittaaminen niiden tuotekehitysvaiheessa. Tilan suunnittelusta tekee haasteellista sen pieni tilavuus. Opinnäytetyössä on myös tarkoitus perehtyä akustisten mittausten taustaan ja niiden toteuttamiseen. Valmiista tilasta on tarkoitus mitata sen RT60 suorituskyky, jolla mitataan kaiun kestoa äänen lakattua (SFS 5907:2022, 17). Kammiossa suoritetaan myös taajuusvastemittaus, jossa selvitetään kuinka kammio toimii mitattaessa eri taajuuksia.

2 Tietoperusta

2.1 Ääni

Ääni on värähtelyä. Ääni syntyy, kun jokin asia tai esine värähtelee, jolloin värähtely alkaa siirtymään materiaalissa eri suuntiin. Ääni matkustaa eri nopeudella eri materiaaleissa. Mitä tiheämpää materiaali on, sitä nopeammin ääni kulkee eteenpäin. Tämän takia esimerkiksi junan lähestymisen kykenee kuulemaan jo paljon aikaisemmin laittamalla korvan kiinni raiteeseen kuin vain

kuuntelemalla ilmaa. Myös vedessä ääni kulkee paljon pidempiä matkoja ennen kuin se vaimenee. Äänennopeus ilmassa normaalissa lämpötilassa ja paineessa on noin 344 m/s kun taas teräksessä ääni kulkee noin 5 090 m/s. (Everest & Pohlmann 2015, 1–8.)

Kaasussa ääni voi kulkea nopeammin kuin ilmassa vaikka se olisikin harvempaa. Heliumkaasussa äänennopeus on 972 m/s vaikka helium on ilmaa kevyempi materiaali. (Äänipää 2023.)

2.1.1 Äänenpaine

Äänenpainetta kuvataan pascal-yksiköllä (Pa). Ihmisen kuuloalueen alaraja-arvo on 0,0002 pascalia ja normaalissa puheessa noin 0,02 pascalia (Everest & Pohlmann 2015, 19–30).

Äänenpainetasoa mitataan desibeliyksiköillä (dB), joka on suurimmalle osalle ihmisistä tutumpi yksikkö äänenpaineen mittaamisessa. Desibeliyksiköt ovat logaritminen muunnos pascal-yksikölle ja se yksinkertaistaa äänenpaineen ymmärtämistä. Ihmisen kuulon raja-arvo on pascalleissa 0,0002 Pa, mikä vastaa 0 dB. Normaali puhe on noin 60 dB. (Everest & Pohlmann 2015, 19–30.)

Äänenpainetaso voidaan laskea yhtälöllä 1.

$$\begin{aligned} SPL &= \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} \\ &= 20 \log_{10} \frac{p}{20 \mu Pa} \text{ decibels} \end{aligned} \quad (1)$$

Jossa SPL = äänenpaine taso, dB

p = akustinen paine, μPa tai muu

p_{ref} = akustinen referenssipaine, μPa tai muu

2.1.2 Taajuus

Ääni muodostuu pieni- ja korkeataajuisesta värähtelystä. Pienitaajuinen värähtely on matalia ääniä ja korkeataajuinen korkeita ääniä. Taajuudella tarkoitetaan värähtelyn määrää sekunnissa. Taajuus voidaan laskea käyttämällä yhtälöä 2,

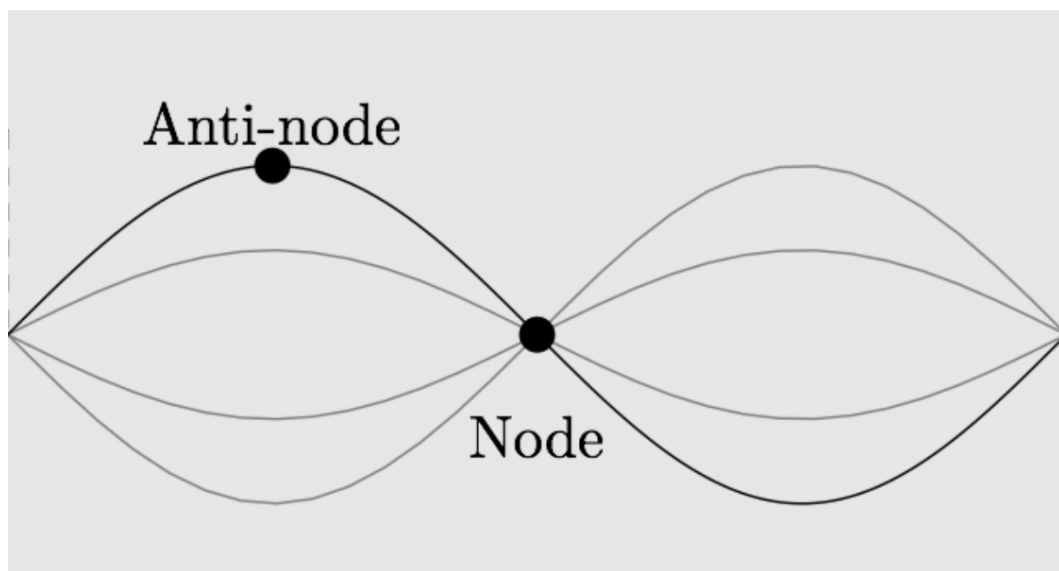
jossa äänen taajuus määritellään aikayksikössä toteutuneiden värähdysliikkeiden määränä. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2007.)

$$Taajuus, Hz = \frac{\text{äänen nopeus}}{\text{aaltopituus}} \quad (2)$$

Ihminen kykenee kuulemaan 20–20 000 hertsin taajuuksia. Tämän alueen alapuolelle jäävät taajuudet luokitellaan infraääniksi ja yläpuolelle jäävät taajuudet ultraääniksi. (Nisbett 2003, 22–23.)

2.1.3 Seisovat aallot

Jokaiseen kaikuvaan tilaan syntyy niin sanottuja seisovia aaltoja. Seisovat aallot ovat taajuuksia, jotka syntyvät, kun esimerkiksi seinästä takaisin kimpoava taajuus kohtaa saman taajuuden (Cuyx 2020, 2). Kun kimmonnut ääniaalto kohtaa kulkevan ääniaallon ilmenee solmu (node) ja kupukohtia (anti-node) (kuva 1). Seisovan aallon kupukohdissa mitattava äänenpaine vahvistuu ja solmukohdassa laskee. (The Physics Classroom 2022a.)



Kuva 1. Havainnekuva seisovan aallon solmu- ja kupukohdista (Kuva: Ottesen 2013).

Seisovat aallot voidaan laskea käyttäen yhtälöä 3.

$$f = \frac{c}{2d} \quad (3)$$

Jossa f = seisova aalto

c = äänennopeus

d = seinän pituus

Seisovien aaltojen vaikutuksesta tilaan syntyy myös harmonisia yläääniä. Harmoniset äänet syntyvät vain tietyillä taajuuksilla. Näiden taajuuksien soidessa seisovat aallot synnyttävät harmonista yläääntä. (The Physics Classroom 2022b.)

2.2 Oktaavi

Oktaavit eli toisin sanoen taajuuskaistat ovat taajuusryhmiä, jotka nousevat tai laskevat logaritmisesti. Oktaaveja käytetään yleisesti musiikissa sekä akustisissa mittauksissa, sillä se mahdollistaa yksityiskohtaisemman analyysin eri taajuuksien välille. Taajuuskaistoissa korkein taajuus on kaksi kertaa pienin taajuus eli taajuudet jakautuvat yhtä suuriin osiin. (Everest & Pohlmann 2015, 11–14.)

Yleisimmin käytetyt oktaavit akustisissa mittauksissa ovat 1/1 oktaavit, kuten 250, 1 000, 4 000 Hz sekä 1/3 oktaavit, kuten 125, 800 ja 2 500 Hz. (Everest & Pohlmann 2015, 14.)

2.3 Absorptio

Absorptiolla tarkoitetaan energian muuttamista joksikin toiseksi energiaksi. Esimerkiksi kun hypätään patjan päälle ja pyritään lieventämään iskua, joka voidaan tuntea maahan osuessa. Tässä tapauksessa henkilö pyrkii vaimentamaan liike-energiaa muuttamalla sen lämpöenergiaksi. Sama periaate pätee äänen vaimentamisessa, jossa ääniaaltojen liike-energia pyritään muuttamaan lämpöenergiaksi käyttäen eri materiaaleja. (Everest & Pohlmann 2015, 183–184.)

Äänen absorboitumisen päätavoitteena on vaimentaa ääntä niin paljon kuin mahdollista ilman, että ääni pääsee ohjautumaan takaisin tilaan, josta se on lähtöisin. Ääni on mekaanista edestakaisin olevaa värähtelyliikettä. Äänen liikkuesssa ilmassa tai muissa materiaaleissa äänen liike-energia muuttuu lämpöenergiaksi. (Everest & Pohlmann 2015, 183–184.)

Äänen absorptioon erilaisissa tiloissa vaikuttavat eniten tilan pinnat. Kovat pinnat heijastavat ääntä enemmän kuin huokoisemmat pinnat. Normaaleissa huoneiloissa kovia pintoja ovat esimerkiksi lattia, katto, seinät sekä osa huonekaluista. Tällöin huoneiden jälkikaiunta-aika on yleensä pidempi kuin tiloissa, joissa on enemmän huokoista, ääntä absorboivaa materiaalia. (Everest & Pohlmann 2015, 183–186.)

Äänen absorptiokerroin ilmoitetaan 0–1 välillä. Täydellisesti absorboivan materiaalin kerroin on 1 ja täydellisesti heijastavan materiaalin kerroin on 0. Äänen absorptioyksikköä nimetään sabiiniksi fyysikko Clement Sabinen mukaan. (Everest & Pohlmann 2015, 184–186.)

Sabiini voidaan laskea käyttämällä yhtälöä 4.

$$A = S\alpha \quad (4)$$

Jossa A = absorptioyksikkö, sabiini

S = pinta-ala, m²

α = absorptiokerroin

Erilaisten materiaalien absorptiokertoimet ilmoitetaan yleensä 1/1 oktaavein käyttäen kuutta taajuutta (125, 250, 500, 1 000, 2 000 ja 4 000 Hz) ja joissain tapauksissa absorptiokerroin on ilmoitettu käyttäen yhtä kerrointa (NRC).

Näissä tapauksissa materiaalin suorituskyky mitataan ilman 125 Hz ja 4 000 Hz taajuuksia ja ilmoitetaan jäljellä olevien taajuuksien mittausten keskiarvo. (Everest & Pohlmann 2015, 183–186.)

Absorptiokertoimet määritetään EN ISO 1164 standardin mukaan, jossa eri kerroimille on määritelty oma luokka kirjaimin A-E. A-luokan omaavalla tuotteella absorptiokerroin sijoittuu 0,7–1 välille taajuuden mukaan. (Ecophon 2019, 6.)

2.4 Äänen heijastuminen

Huoneessa olevat seinät, lattia ja katto voivat vaikuttaa ääniaaltojen heijastumiseen ja heikentää äänen selkeyttä ja puhtautta. Tämä johtuu siitä, että seinät ja muut pinnat voivat aiheuttaa kaikupintoja, jotka vahvistavat tai vaimentavat ääniaaltoja. Tämän vuoksi monissa studioissa ja konserttisaleissa käytetään erilaisia akustisia ratkaisuja, kuten absorboivia materiaaleja ja diffuusioivia muotoja, jotta äänenpaineen ja ääniaaltojen heijastumista voitaisiin hallita. (Everest & Pohlmann 2015, 119–125.)

Äänen heijastuksen vaimentamisessa pätee $\frac{1}{4}$ aallonpituus -sääntö. Tämä tarkoittaa sitä, että äänen liike on heijastumisen jälkeen suurimmillaan $\frac{1}{4}$ aaltopituuden päässä heijastavasta pinnasta, jolloin vaimennusmateriaali toimii tehokkaimmin (Everest & Pohlmann 2015, 190.)

Korkeilla taajuuksilla ääniaallot ovat niin pieniä, että pienikin kalvo eristeen pinnassa heijastaa äänen takaisin tilaan ja vaimennusmateriaalin tehokkuus heikkenee. Mitä huokoisempaa vaimennusmateriaalin pinta on sitä paremmin taajuudet pääsevät kulkemaan siihen. (Everest & Pohlmann 2015, 183–208.)

2.5 Kaiunta

2.5.1 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunta-ajalla kuvataan kaiunnan kestoa ajan funktiona. Tällöin puhutaan ajanjaksosta, jolloin äänenpaineen taso laskee ennalta määrätyn verran äänilähteen hiljennettyä. Jälkikaiunta-aikaa kuvataan usein joko tunnuksella T tai RT. Jälkikaiunta-aika voi olla eri pituinen eri taajuuksilla. Yleensä korkeilla taajuuksilla jälkikaiunta-aika on lyhyempi kuin matalilla taajuuksilla ääniaaltojen pituuden vuoksi. (SFS 5907:2022, 17.)

2.5.2 RT60

RT60 on yleisin määre jälkikaiunta-ajan mittaamisessa. RT60:llä tarkoitetaan aikaa, jossa äänenpaine laskee 60 dB verran äänilähteen hiljennettyä. RT60-

aikaa käytetään niin rakennuksissa kuin myös kaiuttomissa tiloissa. RT60-aika mitataan käyttäen äänilähdettä sekä mikrofonia. Äänilähteen tulee olla äänenpaineeltaan vähintään 60 dB voimakkaampi kuin mitattavan tilan ominaisääni. Esimerkiksi jos tilassa on 35 dB taustääntä, tulisi RT60-ajan mittaamiseen käyttää vähintään 95 dB voimakkaista äänilähdettä. (Svantek Academy 2023.)

RT60-aikoja mitataan 1/1 oktaaveittain tai 1/3 oktaavien keskitäajuuksilla. Oktaaveittain mitattavat taajuudet ovat 125–4 000 Hz väliltä ja 1/3 oktaaveittain 100–5 000 Hz. (ISO 3382-1:2009, 6.)

RT60-arvot lasketaan Schroeder-käyrän kaltevuudella, joka on kuvaaja taaksepäin integroidun impulssivasteen energiasta (neliöarvot) (summattu alkaen päästä ja siirtymällä taaksepäin). Erilaiset RT60-arvot (esimerkiksi T20, T30, REW:n Topt) johdetaan laskemalla parhaiten sopivan viivan kaltevuus Schroeder-käyrään eri alueilla. (Room EQ Wizard 2023.)

2.5.3 T20 ja T30

T20-aika perustuu RT60 vaimennusajan Schroeder-käyrän kulmakertoimeen -5 dB ja -25 dB välillä. -5 dB aika määräytyy RT60 mittauksesta, kun äänenpaine on laskenut 5 dB huipustaan. T30-aika perustuu RT60 vaimennusajan Schroeder-käyrän kulmakertoimeen -5 dB ja -35 dB välillä. -5 dB aika määräytyy RT60 mittauksesta, kun äänenpaine on laskenut 5 dB huipustaan. (Room EQ Wizard 2023.)

T20- ja T30- aikaa käytetään silloin kun mitattavaan huoneeseen ei saada tarpeeksi äänenpainetta RT60-ajan mittaamiseen. Tällöin RT60- aika voidaan mitata laskennallisesti käyttäen T20- ja T30- aikoja. (NoiseMeters Europe 2023.)

2.6 Taajuusvaste

Taajuusvaste on yleensä viivakaaviona esitetty visuaalinen kuvaaja, joka kertoo kuinka tarkasti äänikomponentti toistaa ääntä. Kuvaajassa kuvataan laitteen taajuuden funktio x-akselilla ja laitteen ulostuloamplitudi desibeleinä y-akselilla. (Thomas 2023.)

Taajuusvasteen yleisin mittaussuunnitelma on muutaman sekunnin kestävä, viihdyttävä sinipyyhkäisy. Sinipyyhkäisyssä mitattavasta kohteesta eli kaiuttimesta toistetaan logaritmisesti nouseva taajuuspyyhkäisy noin 20–20 000 Hz välillä. (Aalto-Yliopisto 2023.) Ideaali taajuusvastekuvaaja sinipyyhkäisyyn jälkeen olisi täysin tasainen. Tämä tarkoittaa sitä, että kaiutin toistaa äänitiedoston realistisesti. Kaikki poikkeamat tasaisesta kuvaajasta kertovat äänenlaatuun vaikuttavista haitallisista tekijöistä. (Toole 2018, 63–105.)

3 Menetelmät

3.1 Ohjelmisto

REW EQ on ilmainen ohjelmisto, joka on kehitetty huoneakustiikan ja kaiuttimien mittauksiin. Ohjelmistoa voi käyttää niin henkilökohtaiseen, opetus kuin myös kaupalliseen tarkoitukseen. Ohjelmisto tarjoaa laajat työkalut akustisten mittausten suorittamiseen sekä kattavat tukisivut. (Room EQ Wizard 2023.)

Ohjelmistoa käytettiin Windows 11 -käyttöjärjestelmällä varustetulla kannettavalla tietokoneella. Kannettavan tietokoneen käyttö mahdollisti tarvittaessa joustavuutta mittausten tekoon ja datan analysointiin sen liikuteltavuuden ansiosta.

3.2 Mittalaitteet

3.2.1 Mikrofoni

Yksinkertaisuuden ja helppokäyttöisyyden vuoksi mikrofoni valittiin REW EQ:n sivuilla suositeltu miniDSP UMIK-1 USB -mikrofoni. Mikrofonin käytön tulisi olla niin saumatonta, jotta käyttäjän tarvitsee vain liittää mikrofoni USB-kaapelilla tietokoneeseen. Kun REW EQ on tunnistanut mikrofonin, se pyytää mikrofonin kalibroitiedostot, jotka ovat ladattavissa tuotekohtaisesti miniDSP:n nettisivuilta mikrofonin sarjanumerolla. UMIK-1 -mikrofoni on myös kalibroitu SPL-mittauksia varten, jolloin työhön ei tarvinnut hankkia erillistä äänenpaine-mittaria mikrofonin kalibroimiseen. (miniDSP 2023.)

UMIK-1 -mikrofoni kykenee mittaamaan 20-20 000 Hz taajuusalueella +/- 1 dB tarkkuudella. Tämä on riittävä tarkkuus kaiutinmittauksille, sillä ihmisen kuuloalue on 20–20 000 Hz välillä. (miniDSP 2023.)

Jotta UMIK-1 -mikrofonin mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina, sitä verrattiin Norsonic Sound Analyser NOR150 -mikrofoniin. Kyseinen mikrofoni täyttää IEC 61672-1:2002 standardin Class 1 vaatimuksen (Norsonic 2023).

3.2.2 Mittauskaiutin

Akustisia mittauksia varten tarvittiin kaiutin, joka tuottaa tarpeeksi korkean äänenpaineen. Mittauksia varten käytettiin Karelia-AMK:lta lainattua Norsonic Nor257 puolipallokaiutinta (kuva 2), joka kykenee tuottamaan jopa 120 dB:n äänenpaineen ja täyttää ISO-140/4 standardin (Norsonic 2023). Kaiuttimen kanssa käytettiin Norsonic Nor280 vahvistinta, joka on suunniteltu toimivaksi Nor275 puolipallokaiuttimen kanssa.



Kuva 2. Norsonic Nor257 puolipallokaiutin sekä Norsonic Nor280 vahvistin.

3.3 Kammion suunnittelu

Kammion käyttötarkoitus tulee jatkossa olemaan keskikokoisten ja pienten jaulustakaiuttimien akustisen suorituskyvyn mittaaminen niiden tuotekehitysvaiheessa, jolloin voidaan varmistaa, toimiiko kaiutin toivotulla tavalla. Kammiossa tullaan myös selvittämään kuinka kaiuttimien kotelo sekä kaiutinelementit käyttäytyvät vai syntykö niistä jonkinlaisia epätoivottuja häiriöitä.

Kammio suunniteltiin siten, että se olisi kooltaan mahdollisimman helposti käytettävissä sisätiloissa. Kammio on korkeudeltaan 2 600 mm, pituudeltaan 2 420 mm ja leveydeltään 1 430 mm. Tällöin kammion tilavuus on tyhjänä noin 9 m³.

Kammion suorituskyky olisi teoreettisesti parempi, jos seinämuodot olisivat epäsymmetrisiä, jolloin tilaan ei syntyisi niin vahvoja seisovia ja harmonisia aaltoja. Kammioista rakennettiin kuitenkin suoraseinäinen, sillä sen liikuteltavuus paikasta toiseen oli tärkeä kriteeri sen jatkokäyttötarkoituksessa.

Kammion suorien seinämien takia siihen syntyy seisovia aaltoja. Seisovat aallot saadaan laskettua käyttäen jo edellä mainittua yhtälöä 3. Tällöin kammion laskennalliset seisovat taajuudet 2,6 m seinällä ovat 65 Hz:n, 2,42 m seinällä 70 Hz:n ja 1,43 m seinällä 119 Hz:n taajuudella.

3.3.1 Toivottu suorituskyky

Kaiuton kammio on tarkoitus rakentaa pienikokoisten kaiuttimien mittaamiseen niiden tuotekehitysvaiheessa, minkä vuoksi kammion toivottu suorituskyky keskittyy 200–20 000 Hz välille taajuuskaistassa. Kammiossa seisovat taajuudet jäävät kaikki 200 Hz alle, jolloin niiden ei oleteta vaikuttavan toivottuun suorituskykyyn.

Kammion RT60-aika olisi toivotusti alle 0,1 sekunnin mitattavalla taajuuskaistalla. Jotta kaiutonta tilaa voidaan kutsua kaiuttomaksi tilaksi tulee sen täyttää tiettyjä parametrejä koskien sen suorituskykyä. Jotta kammio on standardin SFS-EN ISO 26101-1:2022 mukainen, sen täytyy täyttää taulukossa 1 olevat raja-arvot. Raja-arvot ovat suurimmat sallitut poikkeamat mittaetäisyyden funktioista taajuuskaistoittain käyttäen käänteisen neliön laskukaavaa.

Testitilan tyyppi	Yhden kolmasosa oktaavin keskikaistataajuus (Hz)	Sallittu poikkeavuus (dB)
Kaiuton kammio	≤630	± 1,5
	800–5000	± 1
	>6300	± 1,5
Semi-kaiuton kammio	≤630	± 2,5
	800–5000	± 2,0
	>6300	± 3,0

Taulukko 1. Standardin sallimat poikkeamat eri taajuuksittain (ISO 26101-1:2022, 14).

3.4 Mittausmenetelmät

Tilojen jälkikaiunta-ajan mittaamiseen käytimme REW EQ -ohjelmistossa olevaa työkalua. Työkalulla voidaan mitata tilan RT60-aika ottamalla tilasta taajuuspyyhkäisy. Ohjelma laskee taajuuspyyhkäisyn perusteella RT60-ajan kappaleessa 2.4.2 esitetyllä tavalla.

Tilojen taajuusvasteen mittauksessa suoritimme mittaukset ajamalla REW EQ:n taajuuspyyhkäisyn. Taajuuspyyhkäisy otettiin 200–20 000 Hz välillä. Tämä taajuusväli valittiin tulevan kammion käytön perusteella.

ISO 26101 mukaan mittauksessa käytettävän äänenpaineen tulisi olla 15 dB yli tilan luontaisen taustamelun. Mittauslähteen eli kaiuttimen tulisi ISO 26101-1:2022 standardin mukaan olla kohdassa, jossa mittauksia tullaan tulevaisuudessa suorittamaan, mieluiten tilan keskellä. (SFS-EN ISO 26101-1:2022, 9.)

Mikrofonin mittauskohtia tulisi ISO 26101-1:2022 mukaan olla vähintään viisi ja enintään kahdeksan kappaletta. Mittauspisteiden tulisi olla alueella, jota jatkossa tullaan käyttämään mittaustilanteissa. (SFS-EN ISO 26101-1:2022, 9.)

Tulosten laskentaan käytimme ISO 26101-1:2022 mukaisesti käänteisen neliön yhtälöä 5.

$$L_p(r_i) = b - 20 \log\left(\frac{r_i}{r_0}\right) \text{ dB} \quad (5)$$

Jossa $L_p(r_i)$ = äänenpaine kohdassa, r_1 arvioituna käänteisen neliön lailla, ilmoitetaan desibeleinä (dB)

r_1 = on mittauspisteen i etäisyys poikittaissuunnan matemaattisesta alkuperästä metreinä (m) ilmaistuna

r_0 = referenssiarvo, $r_0 = 1$ m

b = on lähteen voimakkuuden parametri, jota säädetään mitattujen äänenpainetasojen sovittamiseksi toleranssialueelle siten, että maksi- moidaan desibeleinä (dB) ilmaistu hyväksyty etäisyys testiääniläh- teestä.

Kaikki mittaukset siirrettiin REW EQ -ohjelmasta Microsoft Exceliin, jossa tuloksista tehtiin kuvaajat helpottamaan tulosten tulkintaa.

4 Toteutus

4.1 Rakentaminen

Kaiuttoman kammion rakentaminen aloitettiin pystyttämällä sen runko. Rungon kokoamiseen käytettiin lankkua, jotka kasattiin kehikkomaisesti. Kehikkoon rakennettiin aukko kapealle sivulle, johon asennettiin irti nostettava ovi. Kammion ulkoseiniin asennettiin vahvistettua kipsilevyä sen kustannustehokkuuden vuoksi. Lattiaan ja kattoon asennettiin vanerilevy.

Rungon valmistuttua kammioon lisättiin ääntä eristävää materiaalia vaiheittain mittausten välillä. Äänieristeeksi seiniin asennettiin kaksi kerrosta 10 cm paksua kivivillaa ja kivivillan päälle kiilamuotoisia avoimen solun vaahtomuovia. Lattiaan ja kattoon asennettiin kolme kerrosta kivivillalevyjä ja niiden päälle vaahtomuovia. Tällöin eristeen kokonaispaksuus oli seinissä 30 cm ja lattiassa sekä katossa 40 cm. Eristeet kiinnitettiin sprayliimalla, joka pysyy kuivuuksaan elasti- sena.

Kivivilla valittiin kustannustehokkuuden ja sen akustisten ominaisuuksien vuoksi. Kivivilla soveltuu todella hyvin äänieristeeksi sen tiheän rakenteen ja hyvän ilmanläpäisevyyden ansiosta. Kivivilla on myös paloturvallista sekä paljon käyttäjäystävällisempää verrattuna samankaltaisiin lasivillatuotteisiin. (Paroc 2023.)

Kammioon asennettava vaahtomuovi leikattiin kiilamuotoon ja kiinnitettiin kivivillan pintaan. Kiilamuoto hajottaa ääniaaltoja, kun taas vaahtomuovi toimii tehokkaana äänieristeenä. Vaahtomuovi suojaa myös kammiota kivivillasta mahdollisesti irtoavalta pölyltä. (Aixfoam 2023.)

4.2 Akustiset mittaukset

4.2.1 Mikrofonien vertailu

Vertasimme kammiossa käytettävää UMIK-1 -mikrofonia Class1 sertifikaatin omaavaan NOR150 -mikrofoniin. Vertailumittaukset tehtiin Karelia-AMK:n ATK-luokassa. Mikrofonit aseteltiin vierekkäin, jonka jälkeen NOR275 puolipallo kaiuttimesta toistettiin taajuuspyyhkäisy käyttäen kannettavaan tietokoneeseen asennettua REW EQ -ohjelmistoa. Taajuuspyyhkäisy toistettiin 15–20 000 Hz välillä. Mittaukset suoritettiin käyttäen asetusta, jolloin taajuuspyyhkäisy kestäisi 87,4 sekuntia. Tällöin NOR150 sai mittaustuloksia koko taajuuspyyhkäisyltä.

Mittauksia suoritettiin yhteensä neljä kappaletta, ja joka toisella mittauskerralla mikrofonien paikat siirrettiin vastakkain toistensa kanssa. Mittaus ajastettiin alkamaan viiveellä, jotta tilassa ei mittaustilanteissa olisi ylimääräisiä muuttujia. Tällöin mittaustilasta pystyi poistumaan ennen mittauksen alkua.

4.2.2 Lähtökohdan mittaaminen

Ensimmäiseksi akustisia mittauksia otettiin hallitilasta, johon kaiuton kammio rakennettaisiin. Näin pystytään vertaamaan kuinka suuri ero hallin ja kaiuttoman kammion välillä on ja toteamaan onko kammion suorituskyky parempi.

Ennen mittauksia NOR275 kaiuttimesta toistettiin valkoista melua 98 dB:n voimakkuudella. Kyseinen voimakkuus valittiin siksi, koska mitataksemme hallin RT60-ajan, tulisi äänilähteestä tulevan äänen olla vähintään 60 dB korkeampi kuin tilan normaali taustamelu, joka hallissa oli 35 dB. Äänenpaine mitattiin käyttäen UMIK-1 -mikrofonia 1 m päässä kaiuttimesta, josta myös mittaus suoritettiin. Kaiuttimen asetukset kirjattiin ylös, jotta tulevissa mittauksissa voitiin käyttää samaa äänenpainetta. Tällöin ainoa muuttuja mittauksissa on tila, johon kaiutin asetetaan.

Hallin mittaus suoritettiin asettamalla kaiutin ja mikrofoni kuvan 3 tapaisesti ja toistamalla kaiuttimesta REW EQ:n generoima taajuuspyyhkäisy. Samanaikaisesti REW EQ -ohjelmaan liitetty mikrofoni mittaa pyyhkäyksen tulokset. Mittauksen aloitus ajastettiin REW EQ:n ajastimella alkamaan viiveellä, jolloin tilasta ehdittiin ulos ennen mittauksen alkua häiriöäänten välttämiseksi. Jokainen mittaus suoritettiin vähintään kaksi kertaa, jolloin mahdolliset virheet mittauksen aikana voitaisiin huomata. Hallista mitattiin taajuusvastekäyrä sekä hallin jälkikaiunta-aika.



Kuva 3. Hallin akustisten mittausten asettelu.

4.2.3 Kammion mittaaminen tyhjänä

Kammio mitattiin ilman ääntä vaimentavaa materiaalia. Kammiossa ei tällöin ollut kuin puinen runkorakenne sekä kipsilevyseinät puurungon ulkopuolella (kuva 4).



Kuva 4. Kammio tyhjänä ilman vaimennusmateriaaleja.

NOR275 puolipallokaiutin asetettiin kammioon ISO-26101 mukaisesti sille kohdalle, jossa kaiuttimia tullaan tulevaisuudessa mittaamaan. Mittauskaiutin sijaitsi kammion perällä siten, että sen etäisyys takaseinästä oli 45 cm, sillä seiniin liittävä vaimennusmateriaalit tulivat olemaan noin 35 cm paksut. Tällöin kaiuttimen paikka on vakio vaimennusmateriaalien asentamisen jälkeen. Kaiuttimen sivuille vapaata tilaa jätettiin 40 cm samasta syystä. Kaiutin seisojaisella tulpalla 110 cm korkeudella. Katon ja kaiuttimen välille jäi 100 cm.

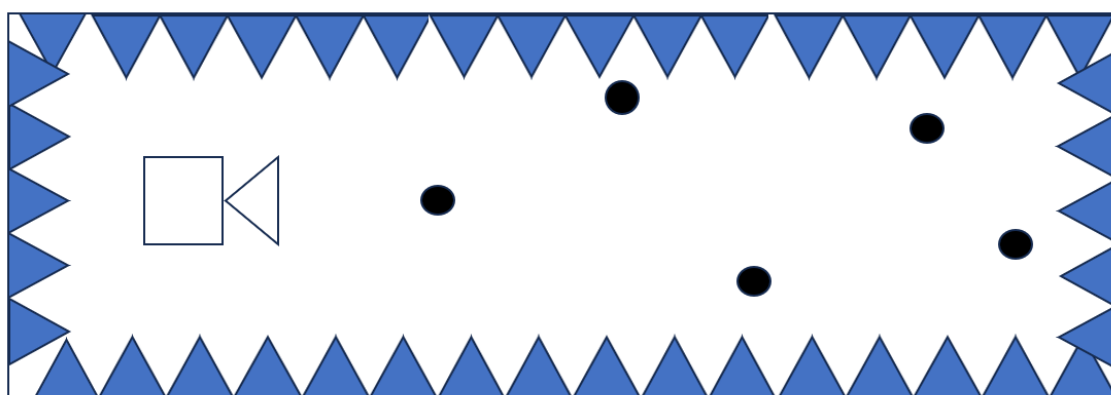
NOR275 kaiutin on melko lähellä kammion taka-, sekä sivuseinämiä, mutta kammiossa tulevaisuudessa mitattavat kaiuttimet eivät kuitenkaan tule olemaan yhtä leveitä kuin kyseinen mittakaiutin, joten mittauskohta on jatkoon kannalta optimaalinen.

Kaiuttimen virta tuotiin seinään tehdyn läpiviennin kautta. Tämä mahdollistaa sen, ettei kaiuttimen vahvistin ole kammion sisällä eikä siten tuota mitään häiriötä mittauksiin.

Mittausmikrofoni asetettiin kammion vastakkaiseen päähän telineeseen, jonka avulla mikrofonia voitiin liikutella eri kohtiin tilassa. Mikrofonin tarvittavat liitännät tuotiin kammion seinään tehdyn läpiviennin kautta. Tällöin mikrofoniiin yhdistetty tietokone pystyttiin pitämään kammion ulkopuolella. Tietokoneen ollessa kammion ulkopuolella, ei tietokoneesta tule minkäänlaista ääntä kammion sisään, joka voisi vaikuttaa mittauksiin.

Kaiuttimen ja tietokoneen asetukset säädettiin niin, että ne vastasivat hallin lähtötasomittausten asetuksia, jolloin äänenpainetaso oli myös ISO 26101-1:2022 standardin mukaan yli 15 dB yli kammion normaalin taustamelun.

Jokaisen mittauksen kohdalla mitattiin, kuinka kaukana mikrofoni (mustat pisteet) on kaiuttimesta ja missä kulmassa mikrofoni on verrattuna kaiuttimen keskipisteeseen (kuva 5). Tämä mahdollistaa johdonmukaisuutta tulevilla mittauksilla sillä mikrofonin mittauskohdat pysyvät vakioina.



Kuva 5. Mittauspisteet kammion sisällä.

Kammiota tyhjänä mitatessa otettiin ylös jälkikaiunta-aika sekä kammion taajuusvaste.

4.2.4 Kammion mittaus, puolet vaimennusmateriaalista

Mittausten seuraava askel oli mitata kammio rakennusvaiheessa, jossa sen sisälle oli asennettu puolet sinne tulevista vaimennusmateriaaleista (kuva 6). Tällöin kammiossa oli ainoastaan kivivillaa ja osa kammion runkorakenteista jäi vielä paljaaksi.



Kuva 6. Kammio täytettynä puoleksi sinne asennettavista vaimennusmateriaaleista.

Kaiutin (NOR275) ja mikrofoni (UMIK-1) asennettiin kammioon samalle paikalle, kun kammiota tyhjänä mitattaessa. Mittaukset suoritettiin käyttämällä samoja kaiuttimen ja mikrofonin asetuksia kuin aikaisemmissa mittauksissa, jolloin ainoa muuttuja mittaustulosten välillä on kammion sisälle asennetut kivivillat.

Kammiossa suoritettiin tässä vaiheessa jälkikaiunta-aika-, taajuusvaste-, sekä SFS-EN ISO 26101-1:2022 standardin vaatimat mittaukset.

4.2.5 Kammion mittaus, kaikki vaimennusmateriaalit asennettuna

Viimeisenä kammio mitattiin valmiina eli siten, että sinne oli asennettu kaikki vaimennusmateriaalit (kuva 7). Mittaukset suoritettiin käyttämällä samaa mallia kuin aikaisemmissa mittauksissa.



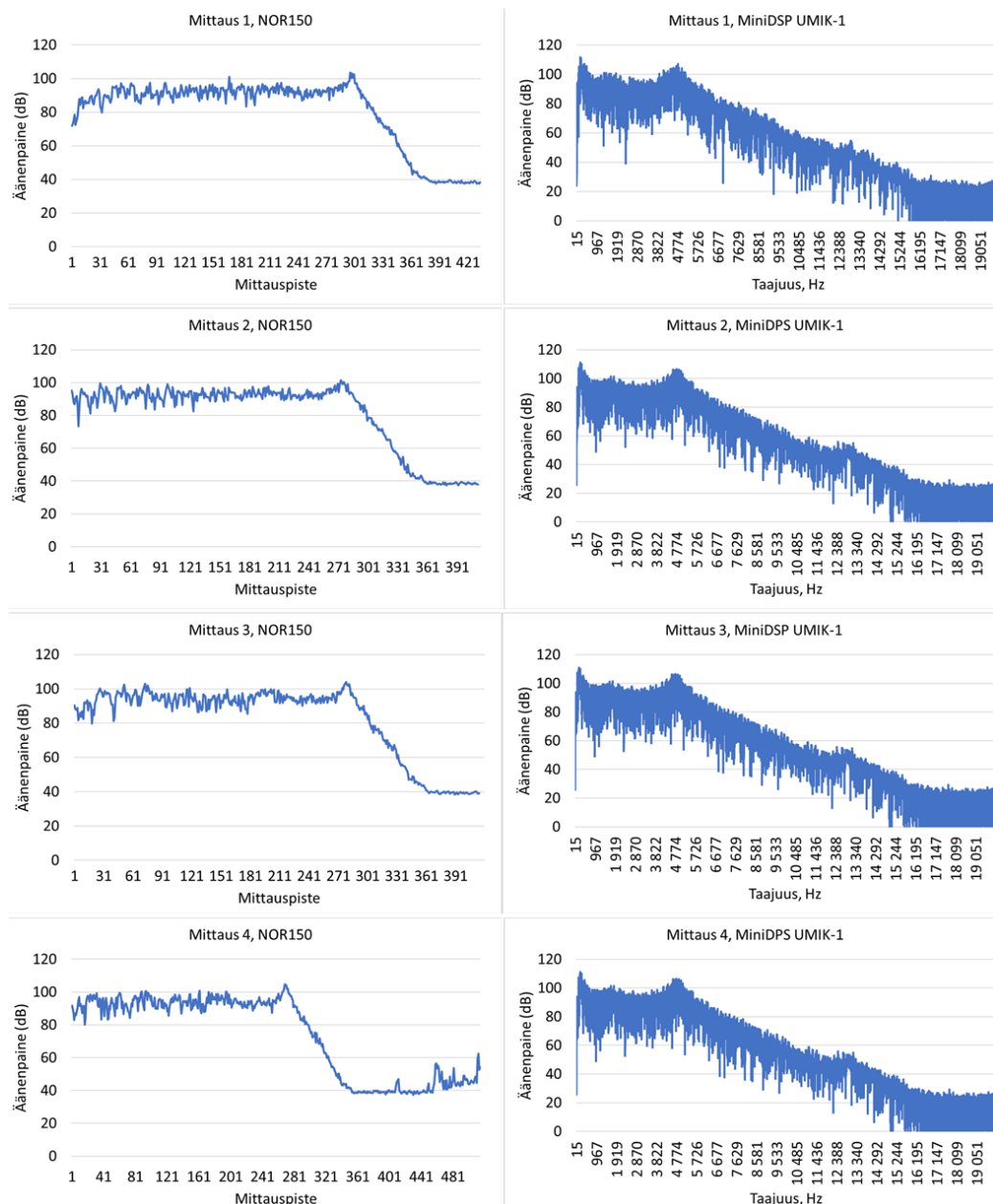
Kuva 7. Valmis kammio täytettynä vaimennusmateriaaleilla.

Kammiossa suoritettiin tässä vaiheessa jälkikaiunta-aika-, taajuusvaste-, sekä SFS-EN ISO ISO 26101-1:2022 standardin vaatimat mittaukset.

5 Tulokset

5.1 Mikrofonin tulokset

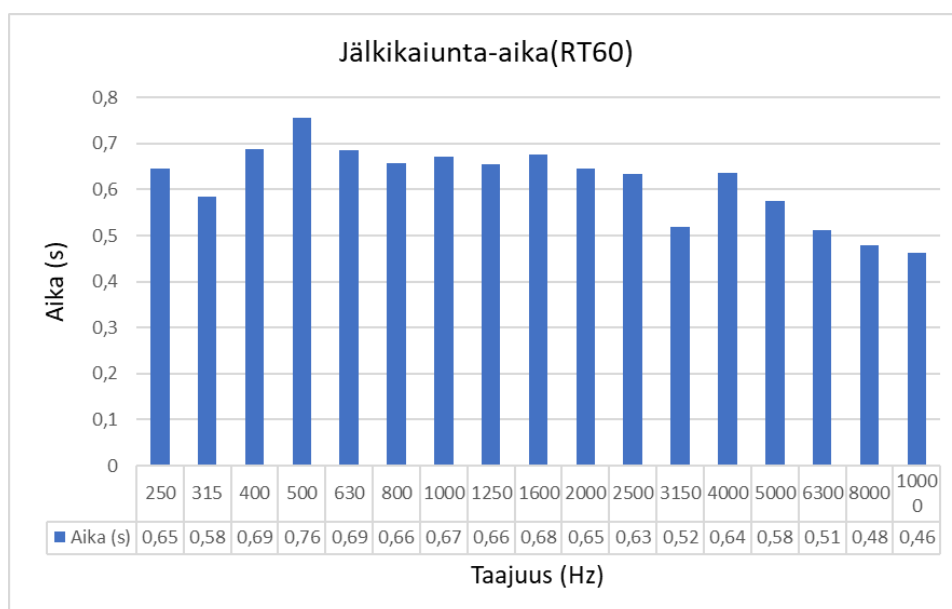
Mikrofonien mittauksissa NOR150 -mikrofonin tulokset ilmoitetaan mittauspisteinä ja UMIK-1 -mikrofonin tulokset taajuuksina mikrofonien ominaisuuksien vuoksi (kuvio 1). Mittauksessa 1 mikrofonien välillä äänenpaine (dB) alkaa laskemaan NOR150 -mikrofonilla mittauspisteen 281 kohdalla ja UMIK-1-mikrofonilla 4 956 Hz taajuudella. Äänenpaine alkaa laskemaan jokaisessa UMIK-1 mittauksessa noin 5 000 Hz kohdalla ja NOR150 tuloksissa 256–274 mittauspisteiden välissä.



Kuvio 1. Mikrofonien vertailutulokset.

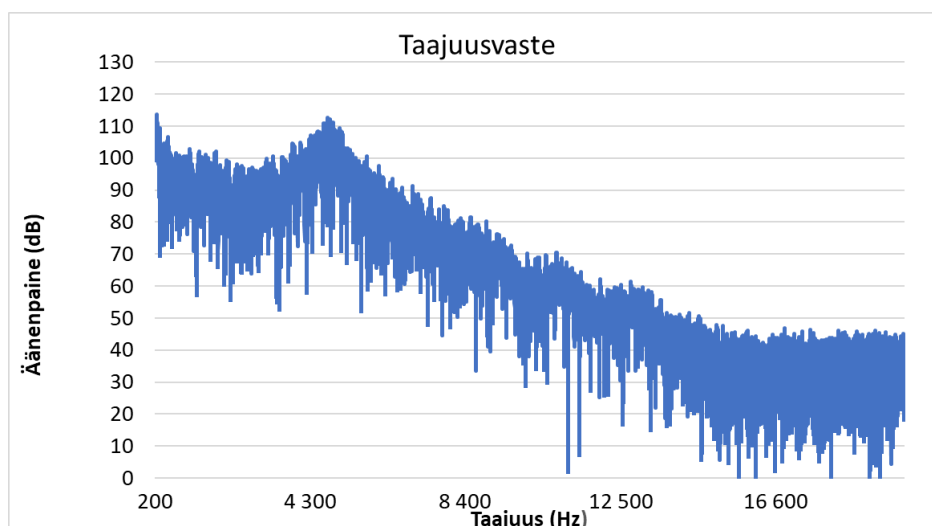
5.2 Hallin mittaustulokset

Kuviossa 2 on esitetty hallin jälkikaiunta aika (RT60). Kuvion x-akselilla on kuvattu taajuus, josta jälkikaiunta-aika on mitattu. Y-akseli kuvaa kuinka kauan taajuudella on kestänyt vaimentua 60 dB. Hallin jälkikaiunta-aika (RT60) oli keskiarvolta 0,62 sekuntia. Pisimmät jälkikaiunta-ajat olivat taajuuksilla 400, 500 ja 630 Hz. Lyhimmät RT60 ajat olivat taajuuksilla 8 000 ja 10 000 Hz.



Kuvio 2. Hallin jälkikaiunta-ajat (RT60).

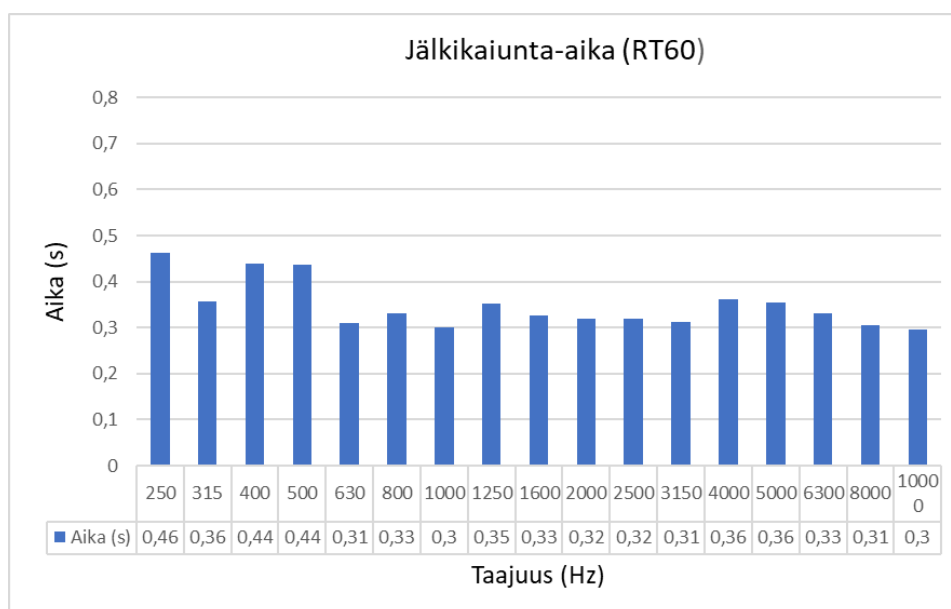
Taajuusvasteeseen syntyi kaksi kohtaa (254 ja 4 831 Hz), joissa äänenpaine on selkeästi korkeampi kuin muilla taajuuksilla (kuvio 3). Pienimmillään äänenpaine menee mittauksissa 0 dB alapuolelle useaan otteeseen 15 300 Hz jälkeen. Tällöin äänenpaine on alittanut mikrofoniin referenssitason. Tilan korkeiden RT60-aikojen seurauksena taajuusvasteessa ilmenee paljon kuoppia seisovien aaltojen solmukohtien seurauksena.



Kuvio 3. Hallin taajuusvaste 200–20 000 Hz välillä.

5.3 Kammion mittaustulokset tyhjänä

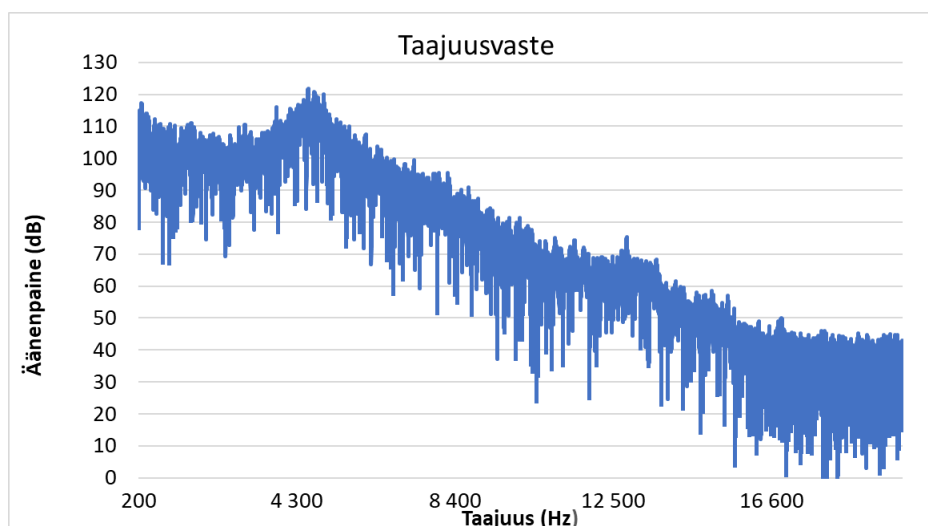
Tyhjänä olevan kammion jälkikaiunta-aika (RT60) oli keskiarvolta 0,35 sekuntia (kuvio 4). Pisimmät jälkikaiunta-ajat olivat taajuuksilla 250, 400 ja 500 Hz. Lyhimmät RT60-ajat olivat taajuuksilla 1 000 ja 10 000 Hz.



Kuvio 4. Tyhjän kammion jälkikaiunta-aika (RT60).

Tyhjänä olevan kammion taajuusvasteessa on kaksi korkeampaa äänenpainetta noin 4 600 Hz taajuudella, jossa äänenpaine kohoaa yli 120 dB (kuvio 5). Tyhjän kammion pitkien RT60-aikojen seurauksena taajuusvasteessa ilmenee paljon kuoppia seisovien aaltojen solmukohtien seurauksena koko mitatulla

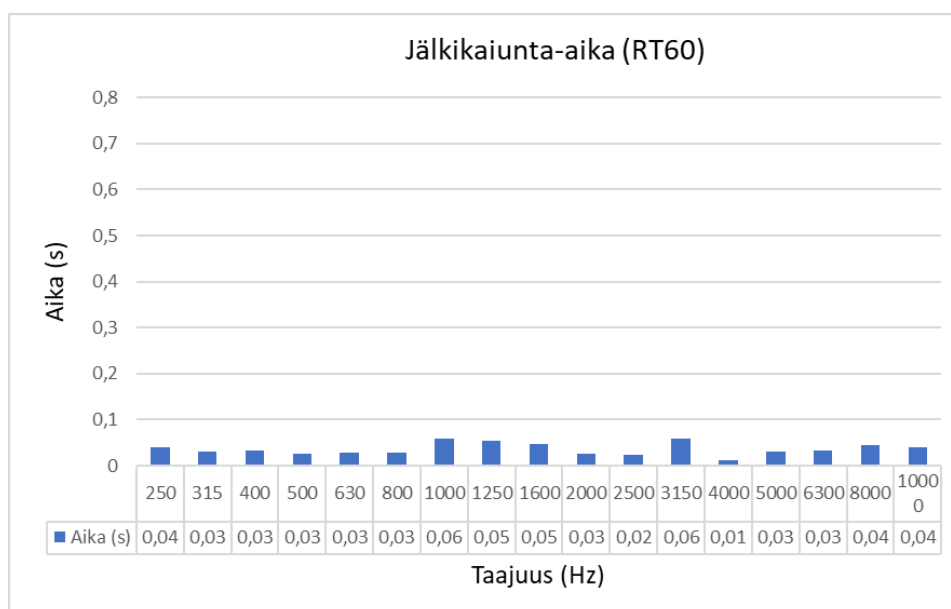
taajuuskaistalla. Äänenpaine laskee 17 500 Hz jälkeen useasti alle 0 dB johtuen mikrofonin referenssitason alittumisesta.



Kuvio 5. Tyhjänä olevan kammion taajuusvaste 200–20 000 Hz välillä.

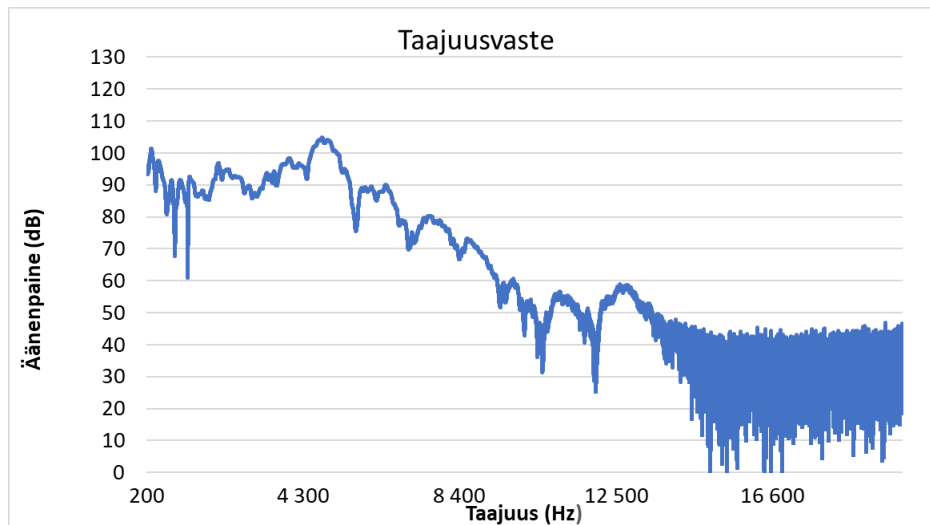
5.4 Kammion mittaustulokset, puolet vaimennusmateriaalista

Puoliksi vaimennetussa kammiossa jälkikaiunta-ajat (RT60) olivat keskiarvoltaan 0,0316 sekuntia (kuvio 6). Pisimmät jälkikaiunta-ajat olivat taajuuksilla 1 000 ja 3 150 Hz, joissa ne nousevat yli 0,05 sekunnin. Lyhimmät RT60-ajat olivat taajuuksilla 2 500 ja 4 000 Hz.



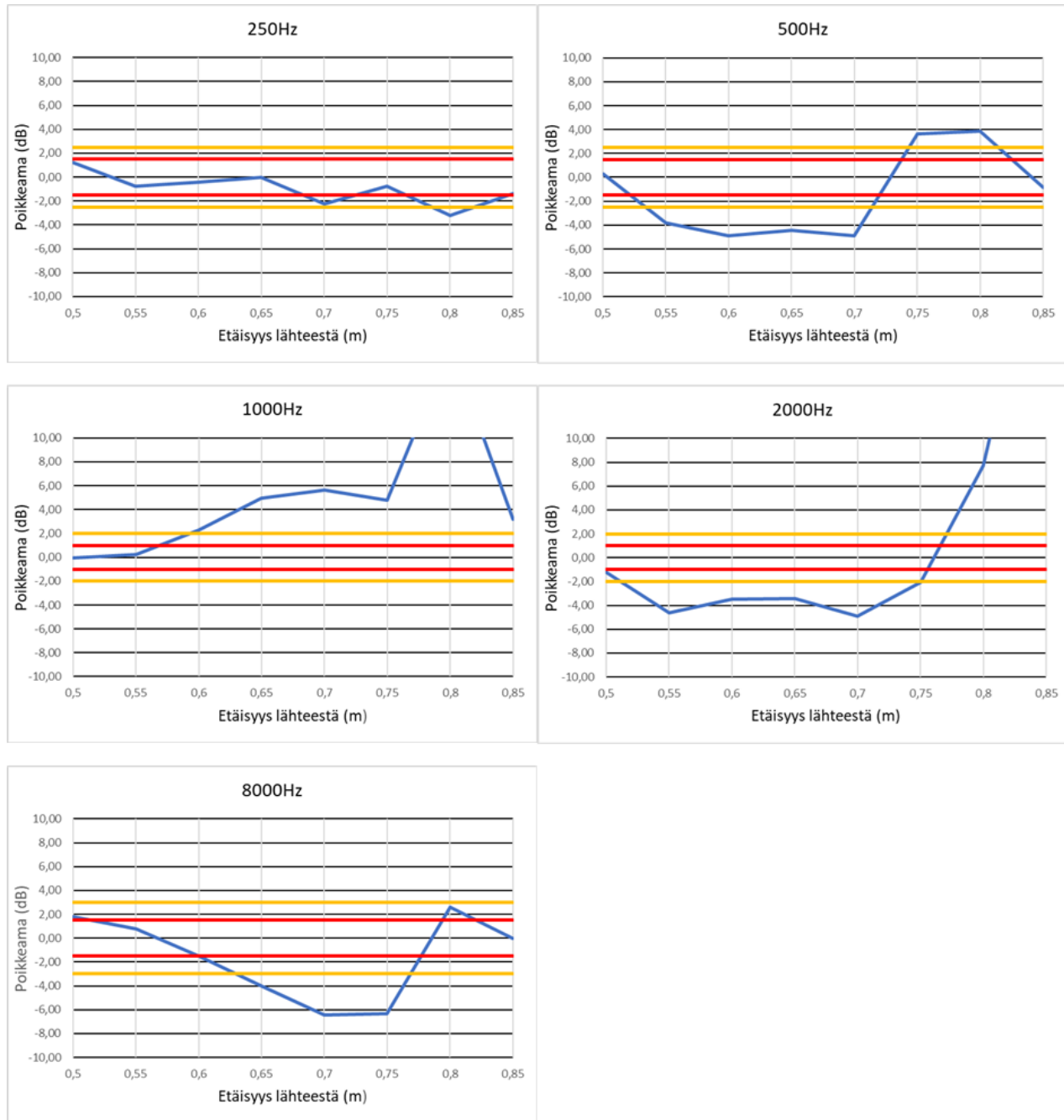
Kuvio 6. Jälkikaiunta-aika (RT60) mitattuna kammiossa, jossa on puolet vaimennusmateriaaleista.

Puoliksi vaimennetun kammion taajuusvasteessa on suuria poikkeamia 943, 1284, 10 567 sekä 11 966 Hz kohdilla (kuvio 7). Mittaustulokset ovat 13 000 Hz jälkeen hajanaisia ja tulokset menevät useasti alle 0 dB:n.



Kuvio 7. Puolet vaimennusmateriaalista täytetyn kammion taajuusvaste 200–20 000 Hz välillä.

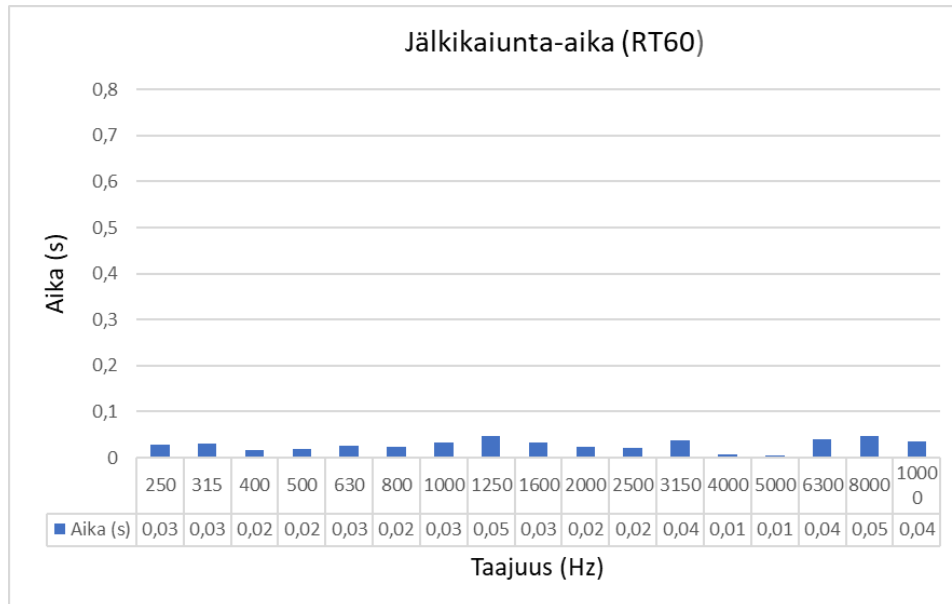
Verratessa poikkeamia eri taajuuksilla havaittiin, että yhdelläkään mitatulla taajuudella ei päästy ISO 26101-1:2022 standardin mukaisiin täysin kaiuttoman tai semi-kaiuttoman kammion arvoihin (kuvio 8). Suurin poikkeama standardista oli 1 000 Hz taajuudella 0,8 m kohdalla, jolloin poikkeama oli 17,6 dB laskennallisesta suorituskyvystä. Punaiset viivat kuvaavat sallittua poikkeamaa neliölain mukaan kaiuttomassa kammiossa. Keltaiset viivat kuvaavat sallittua poikkeamaa semi-kaiuttomassa kammiossa. Sininen viiva kuvaa kammion mitattua suorituskyyä.



Kuvio 8. ISO 26101-1:2022 mukainen poikkeama neliölain mukaan puolet vaimennusmateriaalia täynnä olevassa kammiossa.

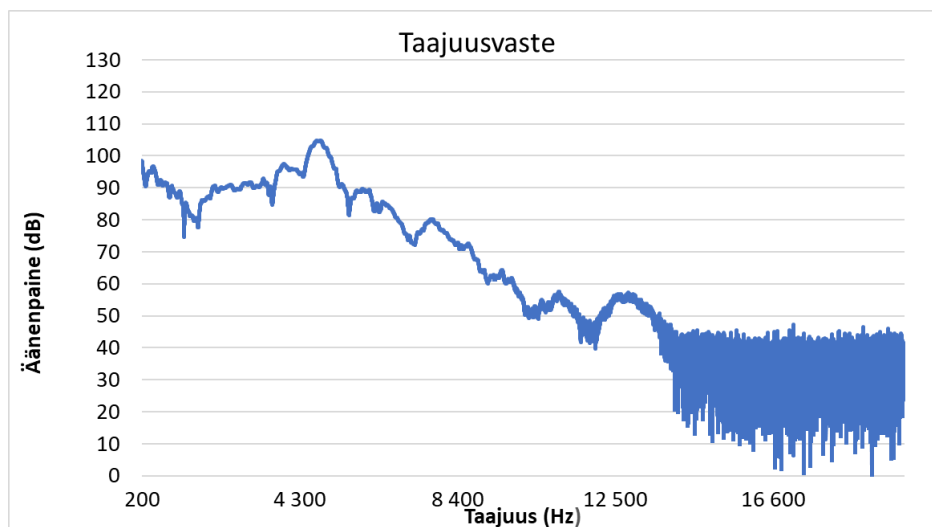
5.5 Kammion mittaustulokset, kaikki vaimennusmateriaalit asennettuna

Täysin vaimennetun kammion jälkikaiunta-ajat olivat keskiarvoltaan 0,027 sekuntia (kuvio 9). Pisimmät jälkikaiunta-ajat olivat taajuuksilla 1 250 ja 8 000 Hz. Lyhimmät RT60-ajat olivat taajuuksilla 4 000 ja 5 000 Hz.



Kuvio 9. Jälkikaiunta-aika (RT60) mitattuna kammiossa, jossa on kaikki vaimennusmateriaalit.

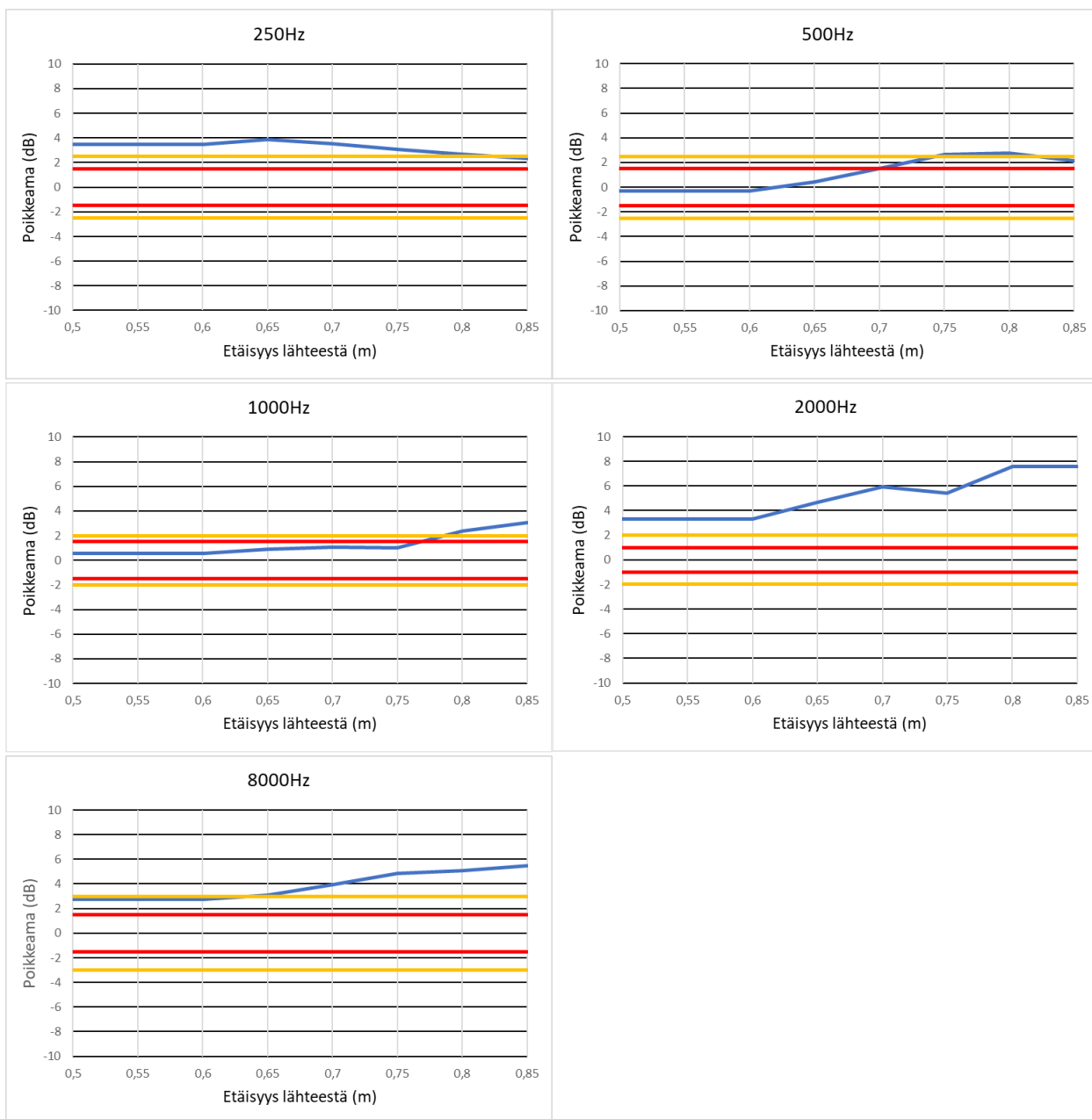
Valmiin kammion taajuusvasteessa on 13 000 Hz jälkeen suurta hajanaisuutta (kuvio 10). Mittaustulokset menevät 19 156 Hz taajuudella alle 0 dB johtuen mikrofonin referenssitason alittumisesta.



Kuvio 10. Kammion taajuusvaste kaikilla vaimennusmateriaaleilla 200–20 000 Hz välillä.

Verratessa poikkeamia eri taajuuksilla havaittiin, että yhdelläkään mitatulla taajuudella ei täysin päästy ISO 26101-1:2022 standardin mukaisiin kaiuttoman tai semi-kaiuttoman kammion arvoihin (kuvio 11). Punaiset viivat kuvaavat sallittua poikkeamaa kaiuttomassa kammiossa. Keltaiset viivat kuvaavat sallittua

poikkeamaa semi-kaiuttomassa kammiossa. Sininen viiva kuvaa kammion mitattua suorituskykyä.



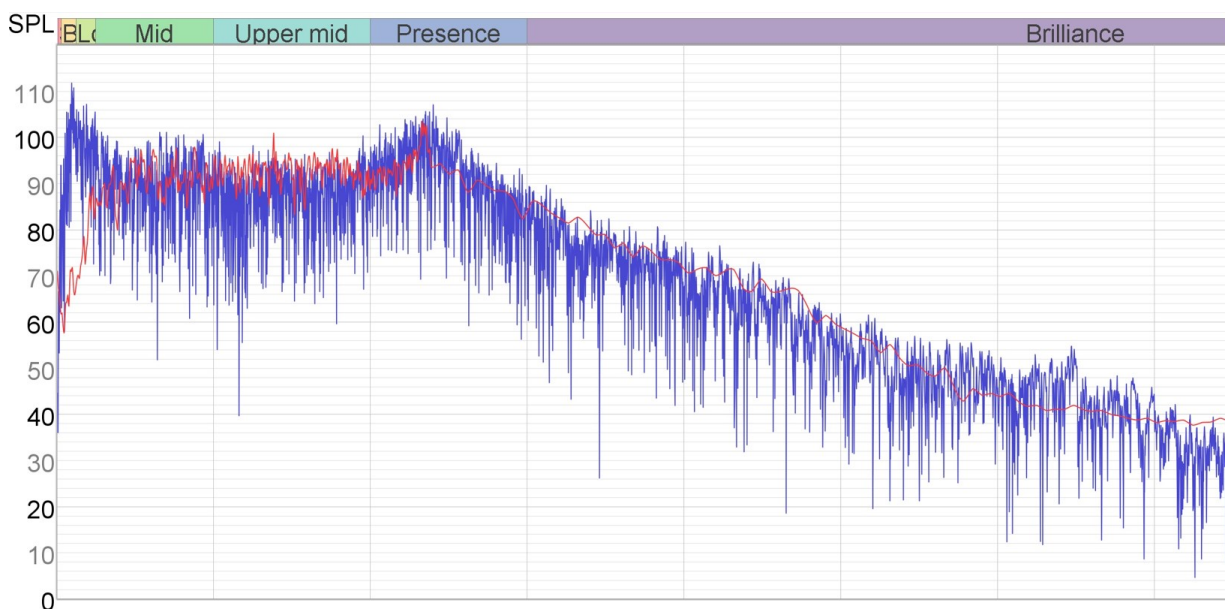
Kuvio 11. ISO 26101-1:2022 mukainen poikkeama neliölain mukaan täysin vai-
mennetussa kammiossa.

5.6 Tulosten vertailu

5.6.1 Mikrofonit

Mikrofonien vertailusta huomataan, että mittaustulokset ovat pääpiirteittäin samankaltaisia. Äänenpaine pysyy jokaisessa tuloksessa noin 90 dB alueella mitausten alussa, kunnes syntyy noin 10 dB piikki, minkä jälkeen äänenpaine alkaa tasaisesti laskemaan.

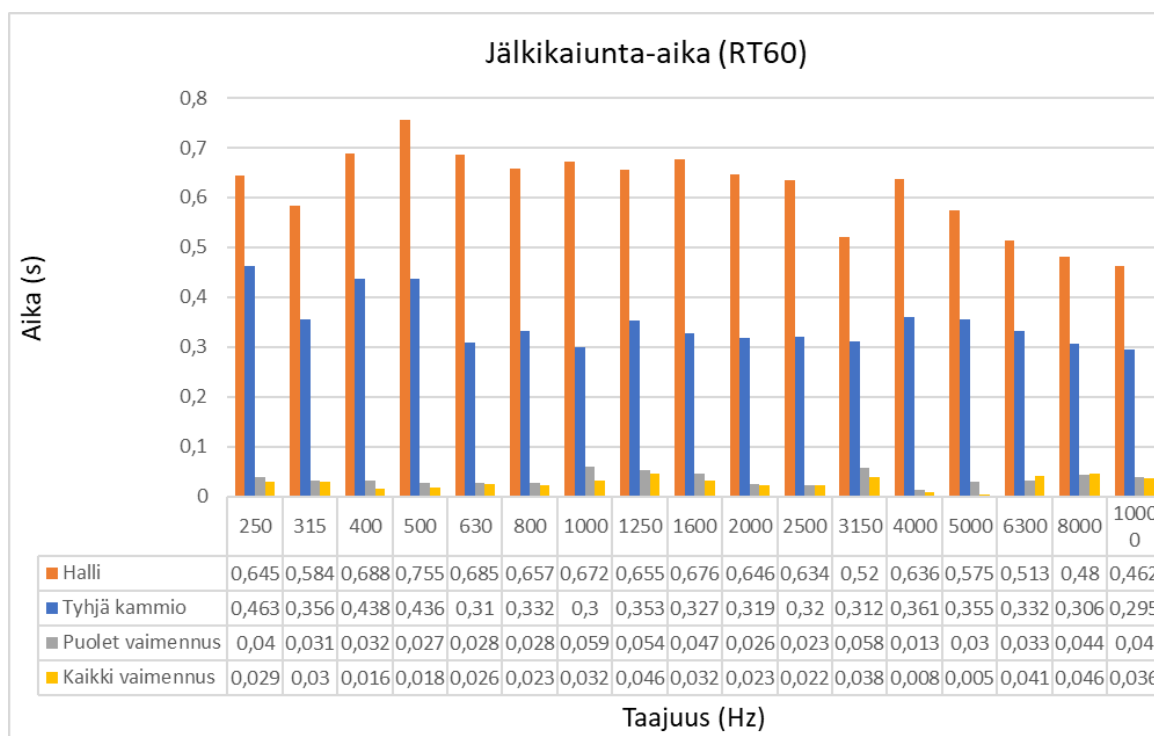
Vertaamalla kuvion 1 ensimmäisen mittauksen tuloksia NOR150 - ja UMIK-1 -mikrofonien välillä saamme paremman kuvan mikrofonien toiminnasta. Asettamalla kummankin kuvaajan selkeän piikin äänenpaineessa kohdakkain, pystytään tuloksia vertaamaan paremmin visuaalisesti (kuvio 12). Alun poikkeaman jälkeen mikrofonien eroavaisuudet ovat noin ± 8 dB. NOR150 (punainen käyrä) tuottama taajuusvaste on kuitenkin selvästi tasaisempi kuin UMIK-1 -mikrofonin mittausta (sininen käyrä).



Kuvio 12. NOR150 -mikrofonin taajuusvaste sekä UMIK-1 -mikrofonin taajuusvaste.

5.6.2 Jälkikaiunta-ajat

Verratessa eri rakennusvaiheissa mitattuja jälkikaiunta-aikoja voidaan huomata, että jokaisen rakennusvaiheen jälkeen jälkikaiunta-aika on keskimääräisesti lyhentynyt (kuvio 13).



Kuvio 13. RT60-ajat koottuna eri rakennusvaiheiden välillä.

Hallin ja tyhjän kammion RT60-aikojen ero oli keskimäärin 0,26 sekuntia. Suurin ero RT60-ajassa tilojen välillä oli 630 Hz:n kohdalla, jolloin ero oli 0,375 sekuntia. Tyhjä kammio on näin ollen teoriassa parempi tila akustisille mittauksille RT60-ajan perusteella.

Verratessa tyhjää kammiota puoliksi vaimennettuun kammioon, oli tyhjän kammion RT60-aika keskimäärin 0,31 sekuntia pidempi kuin puoliksi vaimennetun kammion. Huomattavin ero RT60-ajassa tilojen välillä oli 250 Hz:n kohdalla, jolloin ero oli 0,42 sekuntia. Keskimääräinen ero oli 0,05 sekuntia suurempi kuin hallin ja tyhjän kammion välillä.

Valmiin kammion ja puoliksi vaimennetun kammion välillä erot RT60-ajoissa ovat jo todella pieniä. Keskimääräinen ero oli 0,008 sekuntia. Eniten parannusta valmiin kammion RT60-ajassa oli 400 Hz kohdalla, jolloin ero oli 0,016 sekuntia. Valmiin kammion RT60-ajoista korkeilla taajuuksilla (6 300 ja 8 000 Hz) voitiin huomata, että kammion RT60-aika oli heikentynyt verrattuna puoliksi vaimennetun kammion aikoihin. 6 300 Hz kohdalla RT60-aika oli huonontunut 0,008 sekuntia ja 8 000 Hz kohdalla 0,002 sekuntia.

Vertaamalla valmiin kammion ja hallin RT60-aikaa ero oli keskimäärin 0,58 sekuntia. Suurin ero näiden tilojen RT60-ajassa oli 500 Hz kohdalla, jolloin ero oli 0,737 sekuntia.

5.6.3 Taajuusvasteet

Hallin sekä kammion taajuusvasteista voidaan huomata, kuinka vaimennusmateriaali ja tila vaikuttavat tuloksiin. Hallin ja tyhjän kammion kohdalla taajuusvasteet ovat lähes identtisiä pois lukien 9 000–11 000 Hz kohdalla havaittavat eroavaisuudet. Pitkien RT60-aikojen seurauksena syntyneet seisovat aallot luovat taajuusvasteeseen huomattavan määrän kuoppia sekä nousuja. Nämä syntyvät seisovien aaltojen solmu- sekä kupukohdista. Näiden seurauksena taajuusvasteesta on haastavaa tehdä tulkintoja, sillä mittaustila on vaikuttanut tulosten luotettavuuteen.

Puoliksi vaimennetun kammion taajuusvasteesta voidaan huomata kuinka paljon vaimennusmateriaali vaikuttaa mittaustuloksiin verrattaessa niitä hallin ja tyhjän kammion tuloksiin. Kammion kaiunta-ajan lyhenemisen seurauksena seisovat aallot ovat vähentyneet. Kammion vaikutus mittaustuloksiin on tällöin vähentynyt ja mitattu taajuusvaste vastaa enemmän kaiuttimen todellista suorituskykyä.

Valmiin kammion ja puoliksi vaimennetun kammion taajuusvasteiden välillä selvimmät erot ovat 200–4 000 Hz sekä 9 000–12 000 Hz välillä. Kammion taajuusvaste on kuitenkin tasoittunut verrattuna puolet vaimennusmateriaalista omaavaan kammioon. Seisovien aaltojen vaikutusta mittaustuloksiin on siis saatu vähennettyä lisäämällä loputkin vaimennusmateriaalit kammioon.

Kammion eri rakennusvaiheiden välillä mitattu taajuusvasteen käyrä muuttui tassisemmaksi ja käyrällä olevien vierekkäisten mittauspisteiden vaihteluväli kaiventui. Taajuusvaste ei kuitenkaan saavuta ideaalin tilanteen täysin tasaista kuvaajaa.

5.6.4 Valmiin kammion vertaaminen puolet vaimennusmateriaaleista olevaan kammioon SFS-EN ISO 26101-1:2022 standardin osalta

Valmiin kammion tulokset olivat lähempänä standardin laskennallista tulosta verrattuna puoliksi vaimennettuun kammioon, pois lukien 250 Hz. Tällöin puoliksi vaimennettu kammio oli lähempänä standardin laskennallista tulosta mitausmatkoilla.

Puoliksi vaimennetun kammion suurimmat poikkeamat standardista olivat 1 000 Hz taajuudella 0,8 metrin kohdalla (17,62 dB) ja 2 000 Hz taajuudella 0,8 metrin kohdalla (17,15 dB) sekä 0,85 metrin kohdalla (10,5 dB). Valmiin kammion suurimmat poikkeamat standardista olivat 2 000 Hz taajuudella 0,8 metrin kohdalla (7,57 dB) ja 0,85 metrin kohdalla (7,55 dB).

6 Pohdinta

Mikrofonien tulosten tulkintaa hankaloittaa NOR150 -mikrofonin mittauspisteiden vähäisyys. NOR150 mittasi enimmillään 511 eri mittauskohtaa, joita tuloksissa voitiin käyttää. UMIK-1 -mikrofonilla samalla mittauksella saatiin 54 572 mittauskohtaa. Tulosten vertailua hankaloittaa myös se, että NOR150 -mikrofoni vertasi äänenpainetta kellonaikaan. UMIK-1 -mikrofoni antoi taas äänenpaineen tietylle taajuudelle. NOR150 -mikrofonin taajuusvaste oli kuitenkin paljon tasaisempi verrattaessa UMIK-1 -mikrofonin tuloksiin. Taajuusvasteista voidaan todeta, että UMIK-1 -mikrofonin mittaustulokset ovat kuitenkin samankaltaisia NOR150 -mikrofonin tuloksiin ja tällöin niitä voidaan pitää luotettavina.

Hallin lähtötasomittausten perusteella voidaan todeta, ettei hallitila sovellu tarkkoihin akustisiin mittauksiin. Suurimpana ongelmana tilassa on sen pitkät jälkikaiunta-ajat ja niiden seurauksena syntyvät häiriöt mittaustuloksiin. Hallin mittauksia suoritettaessa äänilähteestä tuleva ääni saavutti mikrofonin, jonka jälkeen se kimposi kovien pintojen kautta takaisin tilaan. Tällöin takaisin kimpoavat ääniaallot vahvistivat seisovia aaltoja ja loivat harmonista yliaäntä, mikä vaikutti mittaustuloksiin.

Tyhjän kammion tulosten kohdalla on havaittavissa samoja ongelmia kuin hallissa. Tilan jälkikaiunta-ajat olivat vieläkin huomattavan suuria vaikkakin ne

olivat parantuneet keskimäärin lähes puoli sekuntia. Yllättävänä yksityiskohtana tyhjässä kammiossa oli RT60-aikojen parantuminen hallin tuloksiin verrattaessa alle 500 Hz taajuuksien alapuolella. Kammion koon vuoksi oli päinvastoin odotettavissa RT60-aikojen pidentymistä 200, 315, 400 ja 500 Hz ääniaaltojen pituuden seurauksena. Etenkin 200 Hz aaltopituus on 1,7 metriä, jolloin se ei mahdu kammioon poikittaissuunnassa. Tällöin taajuus jää tilaan soimaan pidemmäksi aikaa ja synnyttää seisovia aaltoja.

Puolet vaimennusmateriaaleista omaavan kammion mittauksissa nähtiin suurin parannus muihin rakennusvaiheisiin verrattuna RT60-ajoissa. Kammioon asennetuilla vaimennusmateriaaleilla on siis ollut positiivinen vaikutus jälkikaiunta-aikoihin. Parannus jälkikaiunta-ajoissa on havaittavissa myös taajuusvaste käyrässä. Ääniaaltojen nopeampi vaimeneminen on vähentänyt tilaan syntyviä epätoivottuja häiriöitä.

Valmiin kaiuttoman kammion toteutus ei onnistunut tässä työssä täysin tilaajan asettamien toiveiden mukaisesti. Kammion suorituskyky SFS 26101-1:2022 osalta ei ollut riittävä, jotta tilaa voitaisiin kutsua kaiuttomaksi tai semi-kaiuttomaksi kammioksi, koska mittaustulokset ylittivät sallitut raja-arvot. Kammio kuitenkin täytti jälkikaiunta-ajassaan sille asetetun tavoitteen alle 0,1 sekunnin RT60-ajasta.

Tuloksista voidaan huomata, että valmis kammio on akustisesti hallitilaan verrattuna huomattavasti parempi molemmilla käytetyllä mittarilla. Muina positiivisina ominaisuuksia havaittiin kammion erinomainen äänieristävyys. Kovaääniset mittaukset ovat hädin tuskin kuultavissa kammion ulkopuolella. Tämän ansiosta kaiuttimien mittausten aikana ei tarvitse enää käyttää kuulosuojaimia. Akustisia mittauksia voidaan myös suorittaa kellonajasta riippumatta koska mittaukset eivät enää kuulu viereisiin hallitiloihin. Hallissa voitiin akustisten mittausten aikana kammion myötä liikkua ja tehdä töitä ilman että mittaustuloksen vääristyvät. Kuitenkin esimerkiksi pöytäsahan käyttöä tuli rajoittaa mittausten aikana.

Kammion tuloksia olisi saatu parannettua kasvattamalla kammion tilavuutta sekä tekemällä sen rakenteesta epäsymmetrinen. Myös laadukkaammat vaimennusmateriaalit olisivat parantaneet äänenvaimennustehokkuutta. Tämä

kuitenkin asettaisi vaatimuksia tilaan, johon kammio asetettaisiin sekä nostaisi kustannuksia merkittävästi. Etenkin suurempien kaiuttimien tai alle 200 Hz taajuuksia toistavien kaiutinkomponenttien mittaamiseen suurempi kammio olisi pakollinen kaiuttimien koon ja pidempien ääniaaltojen vuoksi.

Kammion ja hallin mittauksiin käytetyn puolipallokaiuttimen lisäksi hallin taajuusvasteen mittaamiseen olisi voinut harkita erilaista kaiutinta. Puolipallokaiutin ei toistanut yli 13 000 Hz taajuuksia enää niin hyvin kuin olisi toivonut. Taajuusvasteiden mittaamiseen olisi voinut käyttää kaiutinta, jossa olisi ollut erilliset kaiutinelementit matalille ja korkeille taajuuksille.

Mikäli kammiota käytetään kaiuttimien tuotekehitykseen, siltä ei ole tarpeen vaatia standardien mukaisia tuloksia, sillä markkinoilla olevia kaiuttimia on testattu erilaisin menetelmin yhtenäisten mittausvaatimusten puuttuessa. Kammiota käyttäessä tuotekehitykseen on huomattu, että mittaustulokset ovat luotettaviksi. Tuotekehityksessä pienetkin muutokset kaiuttimia ohjaavaan elektronikkaan on pystytty huomaamaan mittaustuloksissa ja toistetut testit ilman muutoksia kaiuttimiin ovat tuottaneet identtisiä mittaustuloksia.

Lähteet

- Aalto-Yliopisto 2023. Akustiikkaa voi nyt mitata paremmin kuin koskaan. 29.3.2022. <https://www.aalto.fi/fi/uutiset/akustiikkaa-voi-nyt-mitata-paremmiin-kuin-koskaan> 29.10.2023.
- Aixfoam 2023. Äänieristys ja meluntorjunta vaahtomuovilla. <https://www.aixfoam.fi/info/lexicon/aeaenieristys-meluntorjunta-absorbentti> 29.10.2023.
- Cuyx, B., Buyens, W., Desmet, W. & Waterschoot, T. 2020. Design and validation of a low-cost acoustic anechoic chamber. Audio Engineering Society.
- Ecophon. 2019. Huoneakustiikka: Ohjeita huoneakustiikan toteutukseen. https://www.ecophon.com/globalassets/media/pdf-and-documents/fi/esitteet/ecophon_huoneakustiikka-esite_210x280_2019_n10.pdf 12.11.2023.
- Everest, F. A. & Pohlmann, K. C. 2015. Master handbook of acoustics, Sixth Edition. McGraw-Hill Professional, USA
- Hemming, L. H. 2002. "Electromagnetic Absorbing Materials," in Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide, 1st ed. NJ, USA, Wiley-IEEE Press. 27-48 s.
- miniDSP. 2023. UMIK-1. https://www.minidsp.com/products/acoustic-measurement/umik-1?lang=en&gclid=CjwKCAjwitShBhA6Ei-wAq3RqAwy6nt_g0o4LwCu5JCvA3s91qeaf4wTKfYTAaJcuPMS0n242UkpiBoC7ccQAvD_BwE 2.5.2023.
- Nisbett, A. 2003. Sound Studio: Audio Techniques for Radio, Television Film and Recording, 7. painos. Burlington: Focal Press
- NoiseMeters Europe. 2023. What Is Reverberation Time? <https://eu.noise-meters.com/help/faq/reverberation-time/> 12.11.2023
- Norsonic 2023. <https://web2.norsonic.com/>
- Ottesen, V. 2013. Standing Wave. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StandingWave.png>
- Paroc 2023. Luonnollisesti kestävä kivivilla. <https://www.paroc.fi/> 29.10.2023.
- Prisco, J. 2018. Inside the world's quietest room. CNN. 28.3.2018. <https://edition.cnn.com/style/article/anechoic-chamber-worlds-quietest-room/index.html> 29.10.2023.
- Room Acoustics Software. 2022. <https://www.roomeqwizard.com/index.html>

- SFS-EN ISO 3382-1. 2009. Acoustic - Measurement of room acoustic parameters- Part 1: Performance spaces. Suomen Standardisointiliitto SFS ry, Helsinki
- SFS-EN ISO 26101-1. 2022. Acoustics. Test methods for the qualification of the acoustic environment. Part 1: Qualification of free-field environments. Suomen Standardisointiliitto SFS ry, Helsinki
- SFS 5907:2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Suomen Standardisointiliitto SFS ry, Helsinki
- Suomen Rakennusinsinöörin Liitto. 2007. RIL 243-1-2007 Rakennusten akustisen suunnittelu. Akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto
- Svantek Academy. 2023. What is RT60 Reverberation Time?
<https://svantek.com/academy/rt60-reverberation-time/> 5.10.2023
- The Physics Classroom. 2022a. Formation of Standing Waves
<https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-4/Formation-of-Standing-Waves> 10.11.2023
- The Physics Classroom. 2022b. Fundamental Frequency and Harmonics
<https://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-4/Fundamental-Frequency-and-Harmonics> 20.10.2023
- Thomas, C. 2023. What is frequency response and how does it affect my music? 19.5.2023. <https://www.soundguys.com/frequency-response-explained-16507> 28.10.2023
- Toole, F. A. 2018. Sound reproduction - The acoustics and psychoacoustics of loudspeakers and rooms. Third edition. Routledge. United Kingdom
- Äänipää. 2023. Arkielämän ääni-ilmiöitä. https://webpages.tuni.fi/aa-nipaa/arki_1.htm 11.11.2023



UMIK-1

The UMIK-1 is an omni-directional USB measurement microphone providing Plug & Play acoustic measurement. From speaker & room acoustic measurement to recording, this microphone provides low noise and accurate results you can rely on. Forget about driver installation, OS compatibility and un-calibrated mics. The Umik-1 is a USB Audio class 1 device automatically recognized by all Operating Systems (Windows/Mac/Linux). It is provided with a unique calibration file based on the serial number and the recommended microphone for Dirac Live tuning.

Technical specifications

Item	Description
Capsule Type & Polar pattern	6mm electret, Omni-Directional
Microphone body	Die cast aluminum
Frequency response	20 Hz - 20kHz +/-1 dB with calibration loaded
USB Audio	USB Audio class 1.0 Driverless interface for Windows, Mac & Linux
Resolution & Sample rate	24bit ADC @ 48kHz
Max SPL for 1% THD @ 1kHz	133dB SPL @ 0dB analog gain setting
Calibration file	Unique microphone calibration .txt file referenced to the Serial Number Includes on axis & 90deg - Frequency / Amplitude / Sensitivity drift
Power	USB Powered (5V) - Blue LED indicates unit under Power
Weight	120gm for microphone, 600gm complete kit with accessories
Connector	USB Type C (v2 from Jan 2021) miniUSB (v1)
Accessories	1 x hard cardboard case 1 x 2m long USB cable 1 x pivotal microphone mini-stand 1 x microphone clamp 1 x wind screen

Template applications

- Speaker development
- Room acoustic measurements
- Live Sound tuning
- High quality recording

Compatibility

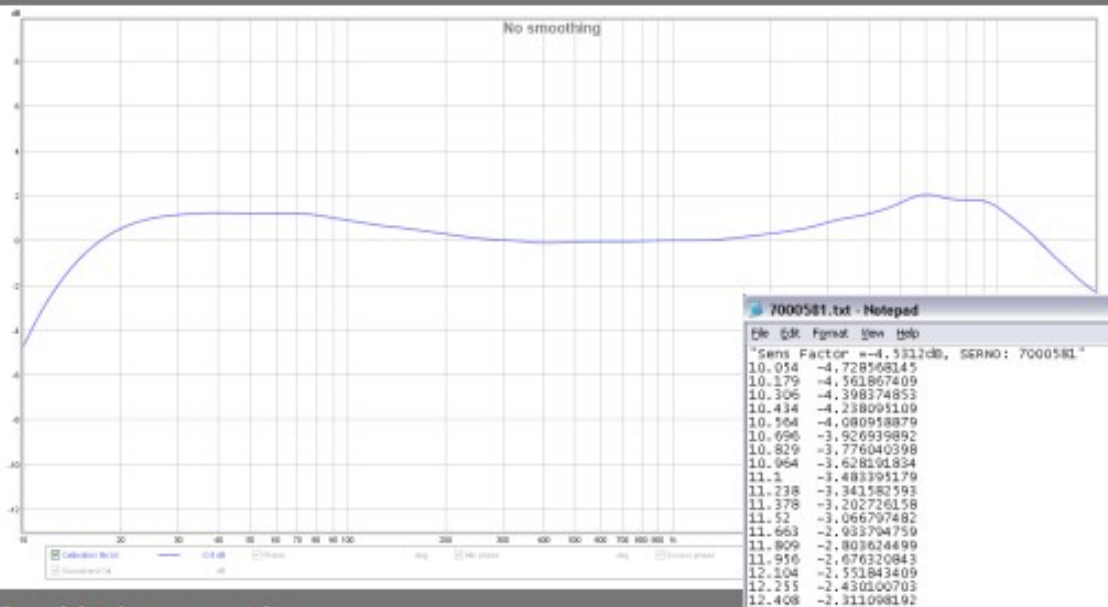
- Windows/Mac/Linux
- All measurement softwares
- Special features such as calibrated SPL measurement enabled under free Room EQ Wizard (REW) and Dirac Live.



miniDSP Ltd - Features and Specifications are subject to change without prior notice
www.miniDSP.com

Lite 1

UMIK-1

Template calibration file loaded into Room EQ Wizard

Provided accessories


miniDSP Ltd - Features and Specifications are subject to change without prior notice
www.miniDSP.com

(miniDSP 2022)

Liite 2

Norsonic
Certificate of Calibration
 Certificate No.: CAL 022-2023-17078



Test object:	Manufacturer :	Type :	Serial No.:	
Sound level meter :	Norsonic	Nor150 Ch2	15030647	
Microphone :	Norsonic	1225	335500	
Preamplifier :	Norsonic	1209	22046	
Sound calibrator :	Norsonic	1256	125626304	Cal 022-2023-17073

Customer: Karelia University of Applied Sciences
 Address: Finland

Order No: CO2315003

The measurements are performed according to the IEC 61672-3 Ed. 2.0 (2013).
 Acoustical levels are stated relative to 20µPa. Other dB levels are relative values.
 The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k, which with the reported effective degree of freedom corresponds to coverage probability of approximately 95%. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with EA publication EA-4/02

Statement of Conformity: (Decision rule from IEC 61672-3:2013.)

The sound level meter submitted for testing has successfully completed the class 1 periodic tests of IEC 61672-3, for the environmental conditions under which the tests were performed. As public evidence was available, from an independent testing organization responsible for approving the results of pattern evaluation tests performed in accordance with IEC 61672-2, to demonstrate that the model of sound level meter fully conforms to the requirements in the IEC 61672-2, the sound level meter submitted for testing conforms to the class 1 requirements of IEC 61672-1.

Indication at the Calibration Check Frequency

The level indication of the sound level meter was controlled using the customers calibrator.

The indicated level was: 113,9 dB. Sensitivity: -25,8 dB rel. 1V/Pa. Preamp correction: -0,1 dB.

This reading should be used henceforth to set up the sound level meter for field use.

Comment : (None)

Environmental conditions:	Pressure :	Temperature :	Humidity :
Reference conditions:	101,325 kPa	23,0 °C	50 %RH
Measurement conditions :	100,10 ±0,20 kPa	22,6°±1,0 °C	42,3 ±3,0 %RH

Date of calibration:	2023-04-17
Date of issue:	2023-04-17

Calibration performed by:
 Nils Jorgen Andersen

Supervisor:
 Daniela Toledo Helboe

The document is signed electronically, hence there are no handwritten signatures.

This certificate of calibration is issued by a laboratory accredited by Norwegian Accreditation (NA). NA is one of the signatories to the EA Multilateral Agreement for mutual recognition of calibration certificates (European Co-operation for Accreditation). The accreditation states that the laboratory meets the NA requirements concerning competence and calibration system for all the calibrations contained in the accreditation. It also states that the laboratory has a satisfactory quality assurance system and traceability to accredited or national calibration laboratories. This certificate is only valid for the test objects stated, and may not be reproduced other than in full.