



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK), Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Akustiset mittaukset osana akustiikkalaboratorion laadunvarmistusta

Mirko Turunen

Opinnäytetyö, Toukokuu 2024

www.karelia.fi



Karelia
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024
Rakennustekniikan koulutus

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

Tekijä
Mirko Turunen

Nimeke
Akustiset mittaukset osana akustiikkalaboratorion laadunvarmistusta.

Toimeksiantaja
Karelia AMK

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä perehdyttiin akustiikkalaboratorion suunnitteluun, rakentamiseen ja testaukseen. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoa akustisten ominaisuuksien testaamiseen tarkoitetun tilan valmistumisesta ja testauksesta. Opinnäytetyössä tehdyn tutkimuksen tukena toimi Karelian tiloihin rakennettu akustiikkalaboratorio. Akustiikkalaboratoriolle suoritettiin akustiset mittaukset rakennetun kokonaisuuden laadunvarmistamiseksi. Tutkimusta tehdään äänen ja rakenteiden akustisista ominaisuuksista.

Akustiikkalaboratorion perustana toimi SFS-EN ISO 10140 standardin osiot 1–5. Standardissa on määritelty akustiikkalaboratorion tavoitteelliset ominaisuudet ja mitat standardien mukaista testausta varten. Standardin perusteella suoritettiin akustiikkalaboratorion vertailua standardin asettamiin tavoitteisiin.

Rakenteiden akustisten ominaisuuksien testauksien tarve on kasvanut rakenteille asetettujen vaatimuksien takia. Akustisten ominaisuuksien testaustilojen avulla rakenneosien akustiset ominaisuudet saadaan määriteltyä ja lasketuille tuloksille saadaan dataa tukemaan laskentaa.

Kieli
suomi

Sivuja 38
Liitteet 3
Liitesivumäärä 4

Asiasanat
akustiikkalaboratorio, akustiikka, ääneneristävyys



THESIS
May 2025
Degree Programme in construction engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Mirko Turunen

Title
Acoustic Measurements as Part of the Quality Assurance of the Acoustics Laboratory

Commissioned by
Karelia AMK

Abstract

In this thesis the objective was to become familiar with the design, construction and testing of an acoustics laboratory. The aim of the thesis was to get knowledge about constructing and testing of space designed for testing acoustic properties. The research carried out in the thesis was supported by the acoustics laboratory built in the premises of Karelia. Acoustic measurements were performed for the acoustic laboratory to ensure the quality of the built entity. Research is conducted on the acoustic properties of sound and structures.

Acoustics laboratory was based on sections 1-5 of the SFS-EN ISO 10140 standard. The standard defines the goal-oriented characteristics and dimensions of the acoustic laboratory for testing according to the standards. Based on the standard, a comparison of the acoustics laboratory with the goals set by the standard was performed.

The need for testing the acoustic properties of structures has grown due to the demands placed on structures. With the help of the acoustic properties testing rooms, the acoustic properties of structural parts can be defined and the results calculated.

Language
Finnish

Pages 38
Appendices 3
Pages of Appendices 4

Keywords
acoustic laboratory, acoustic, soundproofing

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Ääni ja materiaalien ominaisuudet	2
2.1	Äänen ominaisuuksia	2
2.2	Ääneneristys	6
2.3	Rakenteiden ominaisuuksia	8
3	Rakenteet ja eristäminen	11
4	Testaukset osana laadunvarmistusta	12
4.1	Akustiset mittaukset	12
4.2	Ilmaääneneristävyys mittaus	13
4.3	Askelääneneristävyys mittaus	14
5	Akustiikkalaboratorio	15
5.1	Akustiikkalaboratorion rakentaminen	16
5.2	Akustiikkalaboratorion rakenteet	20
6	Akustiikkalaboratorion tarkastelu ja testaus	22
6.1	Standardissa määritellyt testaus olosuhteet	23
6.1.1	Jälkikaiunta-ajan määrittäminen	24
6.1.2	Taustamelun määrittäminen	25
6.1.3	Mikrofonien ja kaiuttimien käyttö ja asennus	25
6.2	Akustiikkalaboratorion vertailu standardiin	26
7	Testaukset	27
8	Lopputulokset	31
9	Pohdinta	36
	Lähteet	38

Liitteet

Liite 1	Akustiikkalaboratorion jälkikaiunta-ajan tulokset
Liite 2	Akustiikkalaboratorion ilmaääneneristysluvun tulokset
Liite 3	Akustiikkalaboratorion äänitasoeroluvun tulokset

1 Johdanto

Opinnäytetyön aiheena on akustiikkalaboratorion suunnittelu, rakentaminen ja akustiset mittaukset laboratoriolle. Akustisilla mittauksilla saadaan varmistettua rakennetun kokonaisuuden toimivuus ja laadunvarmistus. Opinnäytetyössä käsiteltävien akustisten testausten kohteena toimii Karelian tiloihin rakennettava akustiikkalaboratorio. Akustiikkalaboratorio rakennettiin Joensuun Kanervalaan.

Opinnäytetyön tietoperustassa käsitellään äänen ominaisuuksia, rakentamisessa huomioon otettavia rakenteiden ominaisuuksia sekä erilaisia akustisia mittauksia. Opinnäytetyön lopussa käsitellään akustiikkalaboratorion rakentamista ja käytetään akustisia mittauksia varmistamaan akustiikkalaboratorion toimivuus.

Opinnäytetyössä tehdään tutkimusta, rakentamista ja testauksia. Opinnäytetyön alkupuolella tehdyn tutkimuksen pohjalta suoritetaan akustiikkalaboratorion rakentaminen ja testaus. Opinnäytetyössä tehtyyn tutkimukseen käytetään akustiikasta tehtyjä julkaisuja ja standardeja. Standardissa SFS-EN ISO 10140 2021 osioissa 1–5 on annettu ohjeet akustiikkalaboratorion kokoa, ominaisuuksia ja testausta varten.

Opinnäytetyön kohteena toimivasta akustiikkalaboratoriosta raportoitavana on akustiikkalaboratorion työvaiheet, rakenteet ja standardin asettamat vaatimukset sekä testaukset. Opinnäytetyön aikana akustiikkalaboratoriolle suoritetaan rakentamisen valvontaa, laboratorion sisäpuolisten rakenteiden rakentamista ja akustiset testaukset.

Akustiikkalaboratorion valmistumisen jälkeen sille suoritettiin akustiikkalaboratoriolle SFS-EN ISO 10140-5 2021 standardissa määritellyt testaukset. Akustiikkalaboratorion mittojen, materiaalien ja akustisten mittausten avulla saadaan määriteltyä akustiikkalaboratorion testauskapasiteetti ilmaääneneristävyys mittauksia varten. Lopussa raportoituna on testauksista saadut tulokset. Opinnäytetyön liitteinä ovat testausraportit akustisista mittauksista.

2 Ääni ja materiaalien ominaisuudet

Rakenneosien akustisten ominaisuuksien testauksille tarkoitetun tilan toimivuuden kannalta merkittävää ovat äänen ominaisuudet ja materiaalien akustiset ominaisuudet. Äänen ominaisuudet ja kulkeutuminen rakenteessa vaikuttavat testaustilan toimivuuteen ja rakennesuunnitteluun. Rakenteissa tapahtuvan äänen kulkeutumisen minimointi on merkittävässä osassa akustiikkalaboratorion toiminnan kannalta.

2.1 Äänen ominaisuuksia

Äänen määrittelyyn pystytään käyttämään kahta eri tapaa. Ääni on aaltoliikettä tai värähtelyä, kun sitä tarkastellaan fysikaalisesti. Kuulon näkökulmasta se on aistimus, joka pystytään havaitsemaan kuulojärjestelmän avulla. Ääni tarvitsee edetäkseen väliaineen ja ääni pystyy kulkeutumaan kaikissa aineen olomuodoissa. Tämän takia ääni ei pysty kulkemaan tyhjiössä, vaan se tarvitsee aina jonkin väliaineen. Ääni kulkee kiinteässä aineessa poikittais- ja pitkittäisaaltona. Ääntä, joka etenee ilman välityksellä, kutsutaan ilmaääneksi. Taajuusalue 20 Hz -20000 Hz on tärkeä tarkastelu alue akustiikassa, koska se on ihmisen keskeisin kuuloalue. Voimakkaammat pienitaajuiset äänet ihminen voi myös havaita kehossa tapahtuvana värähtelynä. Äänen taajuudella ei ole vaikutusta äänen nopeuteen ilmassa. (Hieman akustiikkaa 2000, 4) (Puuinfo 2021, 6)

Ääni syntyy ilmaan melkein aina mekaanisen värähtelyn aiheuttamana. Laitteiden osissa tapahtuu värähtelyä, joka kulkeutuu ilmaan aiheuttaen ilmassa värähtelyä ja saaden aikaan aaltoliikkeen. Fysikaalisesti tarkasteltuna ääni on ilmanpaineessa tapahtuvaa muutosta staattiseen ilmanpaineeseen nähden. Värähtelevän kappaleen synnyttämä värähtely saa ympäristössään aikaan ilmassa tapahtuvia tihentymiä ja harventumia. Ilmahiukkasten liikkuminen aiheuttaa seuraavissa hiukkasissa liikettä ja ääni pystyy etenemään ympäristössään pitkittäisaaltona. (Hieman akustiikkaa 2000, 4) (Talorakentamisen akustiikka 2023, 37)

Runkoääni on rakenteissa ja rakennuksen rungoissa kulkevaa ääntä. Ilmaäänellä ja runkoäänellä on yhteys, eli ilmaääni tuottaa runkoääntä ja runkoääni tuottaa ilmaääntä. Rakenteessa tapahtuva värähtely aiheuttaa rakennetta ympäröivässä ilmassa värähtelyä, mikä tuottaa ilmaääntä rakenteen ympärille. Rakenteeseen kohdistuva ilmaääni tuottaa rakenteeseen värähtelyä, mikä taas tuottaa runkoääntä. Rakenteeseen voi syntyä runkoääntä myös tärinää aiheuttavien iskujen seurauksena. Äänilähteitä kuten kävely, tavaroiden putoaminen tai siirtely kutsutaan nimellä askelääni. Runkoääntä syntyy kaikista suunnista rakenteen ympärillä. Tämän takia akustisessa suunnittelussa tulee tarkastella rakennuksen sisä- ja ulkopuolta. Äänellä on monta erilaista kulkeutumisreittiä, jotka vaikuttavat akustiseen suunnitteluun. Materiaalissa kulkeva ääni ei ole nopeudeltaan vakio vaan sen nopeuteen vaikuttaa materiaalin ominaisuudet ja äänen taajuus. (Puuinfo 2021, 17) (Kylliäinen 2011, 17)

Ilmanpaineen vaihtelut, jotka havaitaan äänenä ovat hyvin pieniä, kun niitä verrataan staattiseen ilmanpaineeseen. Ilmanpaineen muutoksesta, joka voidaan aistia äänenä, käytetään nimitystä äänenpaine p (Pa). Pienin ilmanpaineen muutos, jonka ihminen pystyy aistimaan, on 0,00002 Pa. Tätä ilmanpaineen arvoa kutsutaan kuulokynnykseksi. Ihmisen kuulon kipukynnys on noin 20 Pa. Äänenpainetta olisi lukuarvojen pienuuden ja kuulo- ja kipukynnyksen suuren eron takia vaikea käyttää laskennassa ja suunnittelussa onkin otettu käyttöön äänenpainetaso eli L_p (dB). Äänenpainetasolla mitattuna ihmisen kuulokynnys on 0 dB ja kuulon kipukynnys noin 120 dB. Äänenpainetason määritelmässä 6 dB kasvu tarkoittaa äänen voimakkuuden kaksinkertaistumista. (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 38)

Äänilähteet tuottavat erilaisia äänenpainetasoja yksittäisillä taajuuskaistoilla. Tämän takia akustiikassa käytetty äänen taajuusjakauma eli äänispektri jaetaan pienemmiksi osiksi, joita kutsutaan taajuuskaistoiksi. Tavallisimmin on käytössä oktaavikaistat tai terssi- eli kolmannesoktaavikaistat. Kaistanleveydeksi kutsutaan taajuusaluetta, jolta mitattavana olevaa ääntä sisältyy tietyllä taajuuskaistalla ilmoitettuun äänenpainetasoon. Rakenteille ja rakennuksille suoritetaan ääneneristysmittauksia terssikaistoittain. Testaukset aloitetaan keskitaajuudella, joka on 50 Hz tai 100 Hz ja testauksen korkein taajuus on 3150 Hz tai 5000 Hz. (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 39)

Hertsi (Hz) kuvastaa äänen värähtelyjen määrää sekunnissa joten 1 Hz on yksi värähdys sekunnissa. Äänentaajuudella on merkittävä vaikutus akustiseen suunnitteluun. Havaitsemme äänen korkeampana, kun äänentaajuus on suurempi. Ihmisen kuuloalue on normaalisti 20 Hz- 20000 Hz, mutta se on herkimmillään taajuusalueella 1000Hz- 2000 Hz. Tämän takia kaikilla äänentaajuuksilla ei ole samanlaista merkitystä akustisessa suunnittelussa. Äänilähteestä syntyvä äänenpainetaso, ääneneristeenä olevan rakenteen akustinen toiminta ja sen kyky toimia ääneneristeenä ovat riippuvaisia äänentaajuudesta. (Puuinfo 2021, 8)

Ominaistaajuus f (Hz) on taajuus, jolloin materiaali värähtelee niin, että siinä esiintyvä värähtely saavuttaa suurimman amplitudin eli materiaalissa esiintyy voimakkainta mahdollista värähtelyä. Rakenneosan tai rakenneosan kokonaisuuden koolla, massalla ja jäykkyydellä on vaikutus ominaistaajuuteen. Siihen vaikuttavat massa, jäykkyys ja mitat. Ominaistaajuus on tärkeä, kun suunnitellaan ääneneristämistä. (Puuinfo 2021, 11)

Resonanssi syntyy värähtelevään materiaaliin silloin, kun materiaalin ulkopuolinen heräte aiheuttaa materiaalissa ominaistaajuudelle osuvaa värähtelyä. Herätteenä voi toimia esimerkiksi ääniaalto tai mekaaninen isku. Resonanssissa värähtelevä materiaali värähtelee hyvin voimakkaasti, koska materiaaliin kohdistuu koko ajan lisää saman taajuista värähtelyä. Resonanssi voi pahimmillaan aiheuttaa rakenteen hajoamisen tai murtumisen. Resonanssi ilmiöllä on suora liitos ominaistaajuuden kanssa. Taajuuksien ollessa ominaistaajuuden alapuolella värähtelevässä materiaalissa tapahtuva värähtely on voimakkaampaa kuin materiaalin ominaistaajuuden yläpuolella. Resonanssista johtuva värähtely voi olla joko haitallista tai hyödyllistä. Tämä riippuu rakenteen toiminnan tarkoituksesta, jossa resonanssia havaitaan. Resonanssia voidaan vähentää rakenteessa asentamalla siihen vaimennusta. (Puuinfo 2021 s.11) (Hieman akustiikkaa 2000, 7)

Absorptiota tapahtuu aina kun äänilähde osuu johonkin materiaaliin. Äänilähde osuu huonetilassa seinään, jolloin osa äänestä heijastuu takaisin huonetilaan, mutta osa äänestä siirtyy rakenteeseen. Tällöin rakenteeseen siirtyvä ääni muuttuu joko lämmöksi tai värähtelyksi. Tätä heijastumattoman äänen rakenteeseen siirtymistä kutsutaan absorptioksi. Materiaalien absorptiokyky on

tärkeä osa äänitason alentamista tiloissa, joissa halutaan pienentää äänilähteen voimakkuutta. Absorptiota voidaan käyttää myös hyödyksi tiloissa, joissa äänen heijastumista halutaan säädellä. Absorption avulla saadaankin säädelyä tilojen ääniolosuhteita tehokkaasti. (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 47–48)

Absorptiosuhteen avulla saadaan kuvattua eri pintojen absorboimaa ääntä ja siihen kohdistuneen äänitehon suhdetta. Absorptiosuhteen määrittelyyn käytetään arvoja nollan ja yhden välillä. Absorptiosuhteen ollessa 0 heijastaa pinta äänen kokonaan ja arvon ollessa 1 pinta absorboi äänen kokonaan. Huokoisilla materiaaleilla pyritään äänienergian absorptioon.

Absorptiomateriaalissa äänienergia muuttuu huokoisessa materiaalissa suurimmaksi osaksi lämmöksi. Huokoisten materiaalien absorptio kykyyn vaikuttaa materiaalin paksuus, pinnoite, asennustapa ja tiheys. Huokoiset materiaalit absorboivat parhaiten aallonpituuksia, jotka ovat nelinkertaisia materiaalin omaan paksuuteen verrattuna. Tämän takia ääntä vaimentavilla materiaaleilla pystytään tehokkaasti suurten taajuuksien vaimennukseen, johtuen niiden lyhyestä aallonpituudesta. Ilmalla on pieni kyky absorboida suuria äänentaajuuksia, mutta ilman vaikutus pienemmillä taajuuksilla on melkein pä merkityksetöntä. (Ympäristöministeriö 2018, 10) (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 129–134)

Huoneakustiikan kannalta tärkeintä on jälkikaiunta-aika. Jälkikaiunta-ajaksi kutsutaan sitä aikaa, jolloin äänenpainetaso pienenee 60 dB äänilähteen lopetettua äänen tuoton. Tätä testataan käyttämällä voimakasta äänilähdettä, joka sammutetaan tilassa, josta jälkikaiunta-aika halutaan mitata. Jälkikaiunta-aikaan vaikuttaa myös muiden akustiikan suureiden tapaan äänentaajuus, sillä materiaalien absorptio kyky muuttuu eri taajuuskaistoilla. Jälkikaiunta-ajan ollessa lyhyt häviää tilassa oleva ääni nopeasti, kun taas jälkikaiunta-ajan ollessa pitkä jää ääni kaikumaan tilaan. Tilaan voidaan rakentaa absorboivia rakenteita, jotka vaimentavat ääntä ja lyhentävät jälkikaiunta-aikaa.

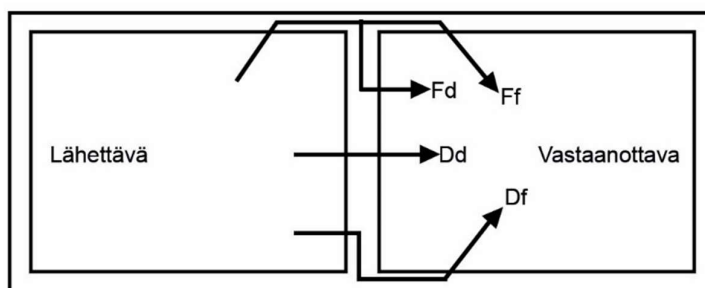
Jälkikaiunta-ajalla ei ole määritelty tiettyä pituutta vaan sen pituus riippuu tilan akustisesta luokituksesta. Tilan akustiikka tulee suunnitella siten että sen jälkikaiunta-aika on huonetilan toimivuuden kannalta oikean pituinen.

(Talonrakentamisen akustiikka 2023, 49–51) (RT 07-10881 2006, 3)

Ääni kulkeutuu erilaisilta pinnoilta ja eri muotoisilta pinnoilta eri tavoilla. Tilan muotojen huomioiminen akustisessa suunnittelussa on tärkeää ja erilaiset muodot tuovat erilaisia äänen kulkeutumisen ominaisuuksia tilaan.

Suorakulmaisessa tilassa ääni kulkeutuu suoraviivaisesti, mutta jos tilassa on erilaisia muotoja voivat ne hajottaa tai keskittää ääntä. Erilaiset muodot katoissa ja lattioissa hajottavat äänen kulkeutumista ja aiheuttavat äänen kulkeutumisen hallintaan haasteita. Monimuotoisissa tiloissa tilan jälkikaiunta-ajan muokkaaminen ja hallinta on haastavampaa. Tämän takia suorakaiteen muotoinen tila on kaikista helpoin muokata sellaiseksi, että se toimii käyttötarkoituksen mukaisesti ja siinä olevat jälkikaiunta-ajat ja äänimaailma vastaavat toivottua tulosta. (SIT 05-610038 2006, 1–10) (RT 07-10881 2006, 1–8)

Ääni kulkeutuu rakenteiden läpi eri tavoilla. D_d kuvastaa ääntä, joka kulkeutuu suoraan väliseinän rakenteen läpi. D_f kuvastaa ääntä, joka kulkeutuu ensin väliseinään, mutta kulkeutuu pois sivusiirtymän kautta sivurakenteesta. F_d kuvastaa ääntä, joka kulkeutuu aluksi sivurakenteeseen, mutta kulkeutuu sivutiesiirtymän avulla väliseinän kautta toiseen tilaan. F_f kuvastaa ääntä, joka kulkeutuu suoraan sivutiesiirtymän kautta toiseen tilaan. (SFS-EN ISO 10140-5, 2022, 16)



Kuva 1. Äänen kulkeutumisen reittejä.

2.2 Ääneneristys

Materiaalien akustisten ominaisuuksien testauksille tarkoitetun tilan suunnittelussa on tärkeää, ettei rakennuksen sisäpuolinen ääni pääse kulkeutumaan ulos ja ulkopuolinen ääni ei pääse kulkemaan sisälle. Testaus tilojen ääneneristyksellä pyritään saavuttamaan tavoitettu tilanne.

Ilmaääneneristyksellä pyritään vähentämään ilmassa siirtyvää ääntä kulkeutumasta huonetilasta toiseen ääntä eristävien rakenteiden läpi. Ilmaääni, joka kulkeutuu ilmassa, osuu rakenneosaan ja aiheuttaa rakenneosassa värähtelyä. Värähtely siirtyy rakenteesta sen toiselle puolelle ja aiheuttaa toisen huoneen ilmassa värähtelyä, joka muuttuu ilmaääneksi. Ilmaääneneristävyys kuvaa rakenneosaa tai rakenneosien kokonaisuuden kykyä pitää ilmaääni alkuperäisessä tilassa. (Puuinfo 2021, 13)

Rakenneosan ilmaääneneristävyys vaikuttaa kaikki mitä rakenneosassa on. Rakennekerrosten paksuus, rakennemateriaalit sekä liitokset ja materiaalien väliset kytkennät vaikuttavat kaikki ilmaääneneristävyys. Rakenteissa ilmaääni siirtyy värähtelyn avulla rakenteista toisiin ja ääni kulkeutuu suoraan rakenteen läpi sekä sivutiesiirtymän avulla ympäröivistä rakenteista toiseen tilaan. Rakennuksen ilmaääneneristykseen vaikuttaa siis kaikki rakenteet ja rakennusosat, joita rakennuksessa on eikä ainoastaan huonetilojen välinen seinä tai lattia. (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 57)

Askeläänit syntyvät kävelystä, esineiden putoamisesta, tavaroiden siirtämisestä lattiaa vasten tai muista lattiaa vasten tapahtuvista osumista, jotka synnyttävät runkoääniä. Askeläänieristyksellä pyritään vähentämään iskujen aiheuttamaa äänenpainetta kulkeutumasta alapuolisiin tai viereisiin tiloihin. Välipohjaan kohdistuu iskuja erilaisista lähteistä, mutta yleisimpiä ovat kävely ja siivous. Askeläänieristys on rakennuksessa haastavaa, koska iskujen aiheuttama runkoääni voi kulkea erittäin pitkiä matkoja rakenteissa. Myös iskujen hyvin erilaiset voimakkuudet ja toistuvuudet luovat rakenteiden suunnitteluun haasteita. Iskujen tuottama runkoääni aiheuttaa rakenteita ympäröivässä ilmassa värähtelyä ja aiheuttaa näin ollen ilmaääntä. Esimerkiksi yläpuolisessa tilassa tapahtuva kävely aiheuttaa rakenteessa runkoääntä, joka muuttuu alemmassa tilassa havaittavaksi ilmaääneksi. Välipohjaan kohdistuva runkoääni kykenee myös kulkemaan sivutiesiirtymällä muihin ympäröiviin tiloihin muiden rakenteiden kautta tai jatkuvan välipohjan avulla. (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 101) (Puuinfo 2021, 18)

2.3 Rakenteiden ominaisuuksia

Akustiikan kannalta rakennetta kutsutaan yksinkertaiseksi silloin kun se sisältää ainoastaan yhtä materiaalia tai materiaalit on asennettu niin tiiviisti että ne värähtelevät yhtenä kiinteänä kokonaisuutena. Yksinkertaisessa rakenteessa merkittävimpiä ominaisuuksia ilmaääneneristävyyden kannalta on massa ja jäykkyys. Massalain mukaan rakenteen massan kaksinkertaistuksessa paranee rakenteen ilmaääneneristävyys noin 6 dB. Sama ominaisuus tapahtuu, jos tarkasteltava äänentaajuus kaksinkertaistuu. Rakenteen massaa lisäämällä saadaan lisättyä tehokkaasti ilmaääneneristävyyttä, kun käytössä on yksinkertainen rakenne. (Puuinfo 2021, 20)

Massalaki ei ole kuitenkaan tarpeeksi tarkka tapa määrittää rakenteen ilmaääneneristävyyttä. Rakenteilla on rajataajuudet, jolloin rakenne alkaa käyttäytyä poikkeavalla tavalla verrattuna massalakiin. Tähän vaikuttaa rakenteen massa ja jäykkyys. Rajataajuuden ilmiön aiheuttaa se, kun ääni kulkee rakenteessa ja ilmassa yhtä nopeasti. Tästä ilmiöstä käytetään nimitystä koinsidenssin rajataajuus. Koinssidenssin rajataajuuden avulla voidaan määritellä, mikä materiaali soveltuu eristämään ääntä ja millaiset ominaisuudet rakenteella on. (Puukerrostalojen ääneneristys 2017, 18)

Koinsidenssin rajataajuus kuvastaa taajuutta ääniaaltorintamassa, joka on aallonpituudeltaan sama kuin levyrakenteen taivutusaalto. Koinssidenssin rajataajuus syntyy ääniaallon osuessa levyn pintaan samalla aallonpituudella levyn nähden. Saman aallonpituuden takia ääniaallot lävistävät levyn, jolloin rakenneosan tai levyn ilmaääneneristävyys on heikompi kuin muilla taajuuksilla. Koinssidenssin rajataajuus on yleensä taajuusalueen 100–3150 Hz välillä. Tämä alue on akustiikan kannalta tärkeä alue, joten koinssidenssin raja taajuus halutaan saada pois tältä alueelta. Rakenteet pyritään suunnittelemaan sellaisiksi, ettei koinssidenssin rajataajuus olisi tämän alueen sisällä, mutta tämä ei aina onnistu johtuen levy rakenteiden erilaisista ominaisuuksista. (Puuinfo 2021, 10)

Ääneneristyksen kannalta yksinkertainen massiivirakenne ei yleensä riitä yksinään saavuttamaan vaadittua ääneneristystä. Kaksinkertainen rakenne on ratkaisu, jolla saadaan parannettua rakenteen ääneneristävyyttä.

Kaksinkertaisessa rakenteessa on kaksi erilaista levymaista massaa, joiden välissä on ilmapäli. Ilmapälistä käytetään myös nimitystä jousi ja sen kyky toimia on riippuvainen ilmapälin paksuudesta. Ilmapäli kykenee toimimaan jousena silloin, kun ilmapälin paksuus on äänen aallonpituutta suurempi. Ilmapäli ei saa olla liian pieni, koska ohut ilmapäli liittää levymäiset rakenteet toisiinsa ja rakenteen ilmapäneristävyys huononee. Kaksinkertainen rakenne tulee suunnitella riittävällä ilmapäliillä eikä eri levyrakenteita saa asentaa samaan runkoon. Samaa runkoon asennettuna rakenteiden ilmapäneristävyys heikkenee, koska rakenteissa ei ole tällöin ilmapäliä estämässä äänen kulkeutumista. (Puuinfo 2021, 23)

Kaksinkertaisen rakenteen välissä olevassa ilmapäliissä tapahtuu ominaisvärähtelyä. Seinässä olevassa ilmapäliissä ääni jää kahden pinnan väliin, joka aiheuttaa voimakkaita seisovia ääniaaltoja rakenteen sisällä. Tämä aiheuttaa rakenteen ilmapäneristävyden heikkenemistä. Tämän takia ilmapäliin tulee asentaa materiaali, joka on ääntä absorboivaa. Yleisin materiaali, jota käytetään ilmapäliin ovat erilaiset villat. Rakenteet tulisikin suunnitella tavalla, jolloin levy rakenteiden väliin jää riittävän suuri ilmapäli. Tällä tavalla rakenteiden ilmapäneristävyys saadaan kasvatettua paremmaksi. Tämä johtuu rakenteen ilmapäneristävyden kasvamisesta yli systeemin resonanssitaajuuden. Tällaisen rakenteen rakentaminen on kuitenkin haastavaa, koska rakennettaessa kaksinkertaista rakennetta toisiinsa liittäviä kohtia on yleensä rakennettava rakenteiden toisiinsa kiinnittämiseksi. (Puuinfo 2021, 23)

Kaksinkertaisesta levyrakenteesta käytetään nimitystä sandwich-rakenne. Sandwich-rakenteeseen kuuluu rakenteen pintapuolilla oleva levyrakenne ja rakenteen sisäpuolelle joustava ja kevyt materiaali, joka yhdistää pintamateriaalin koko rakenteen matkalta. Sandwich-rakenteen toiminta perustuu siinä olevaan massa-jousi-massa systeemiin. Sandwich-rakenteeseen voi joissain tapauksissa syntyä voimakasta resonointia, jos siihen kohdistuu tietty äänentaajuus. (Hongisto 2023, 88)

Sivutiesiirtymä kuvaa kaikkea ääntä, joka siirtyy toiseen tilaan jotain muuta reittiä, kuin tilojen välisen rakenteen läpi. Tätä kutsutaan rakenteelliseksi sivutiesiirtymäksi. Sivutiesiirtymään vaikuttaa kaikki rakenteet ja putket, jotka

ovat kahden tilan rakenteiden kanssa yhteydessä. Kaikki rakenteet, jotka yhdistävät tilat tai ovat kosketuksissa toisen tilan rakenteiden kanssa kuljettavat ääntä sivutiesiirtymän avulla. Rakenteellista sivutiesiirtymää tapahtuu, kun tilojen välillä kulkeutuu runkoääntä tilasta toiseen olevan rakenteen tai rakennusosan takia. Rakenteiden liittämiseen käytetyt kiinnikkeet voivat myös kuljettaa ääntä tilasta toiseen, jos ne jatkuvat kahden tilan välillä.

Puurakenteisessa rakentamisessa on enemmän haasteita sivutiesiirtymien kanssa, kuin betonirakentamisessa juuri kiinnityksien tuomien haasteiden takia. Rakenteiden sivutiesiirtymää vähennetään esimerkiksi tärinäeristeiden avulla. (Talorakentamisen akustiikka, 84–85) (Puuinfo 2021, 55)

Rakenneosien ääneneristävyys heikentyy, jos kaksikerrosrakenteessa on kerroksia yhdistämässä kiinteitä tai jäykkiä liitoksia. Kaksoisrungon avulla saadaan estettyä äänen kulkeutumista rakenneosan läpi paremmin kuin yksinkertaista runkoa käytettäessä. Rakenneosien liitoksien vaikutus ääneneristävyyteen kasvaa, kun rakenneosalle annetut vaatimukset kasvavat. (Rakentaja 2022)

Tärinäeristyksellä pyritään estämään tai vähentämään rungon kautta kulkevaa värähtelyä rakennukseen tai rakenneosaan, joka halutaan eristää. Tärinäeristeen avulla rakenneosa saadaan irrotettua tärinää aiheuttavasta laitteesta tai rakenteesta, jonka kautta tärinä kulkeutuisi eristettyyn rakenteeseen. (Puukerrostalojen ääneneristys 2017, 9)

Rakennuksiin, joiden meluntorjuntavaatimukset ovat suuria, tulee ääneneristyksen parantamisen kannalta massiivirakenteen lisäksi käyttää huone huoneessa ratkaisua. Tällaisessa tilanteessa kaksoisrakenteen käyttäminen kaikissa huoneen pinnoissa, kelluttaminen ja kaikista muista rakenteista irrottaminen ovat ääneneristävyyttä parantavia ratkaisuja. Kelluvan rakenteen tekemiseen on monia ratkaisuja. Helpoin ratkaisu on joustavalla villakerroksella kellutettu rakenne. Suuremman ääneneristyksen tarvitsevilla kohteilla voidaan käyttää esimerkiksi tärinäeristeitä. (Akustiikkapäivät 2021, 114–119)

Seinärakenteet voidaan toteuttaa kahdella erilaisella ratkaisulla. Ensimmäinen ratkaisu on asentaa seinärakenne suoraan kelluvan lattian päälle.

Seinärakenteen kelluttaminen tapahtuu tällöin samalla tavalla kuin lattia rakenteen kelluttaminen. Toinen ratkaisu on asentaa seinärakenne kantavan lattian päälle. Tällaisessa tilanteessa seinän kelluttaminen tehdään irrottamalla seinärakenne kantavasta lattiasta tärinäeristeiden avulla. Seinä- ja kattorakenteiden etäisyydet ympäröivän tilan rakenteisiin tulee olla riittävä tarvittavan ilmapälin saavuttamiseksi. Näin saadaan varmistettua ääneneristyksen toimivuus. (Akustiikkapäivät 2021, 114–119)

3 Rakenteet ja eristäminen

Rakenteiden ja rakennusosien ilmatiiviys on tärkeimpiä asioita ilmaääneneristävyyden kannalta. Pienetkin raot voivat heikentää rakenteiden ilmaääneneristävyyttä merkittävästi. Rakojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen kasvaa, kun taajuus suurenee. Rako vaikuttaa enemmän rakenneosissa, joissa on suurempi ilmaääneneristävyys. Rakenteille, joiden tavoitteena on korkea ilmaääneneristävyys ei saisi olla lainkaan rakoja, sillä jo 0,1 mm leveä rako vaikuttaa rakenteen ilmaääneneristävyyteen merkittävästi heikentämällä sitä. (Puuinfo 2021, 14)

Rakenteiden ilmatiiviyteen pystytään vaikuttamaan erilaisten tiivisteiden avulla. Erilaisia tiivistystuotteita ovat elastinen tiivistysmassa, tiivistysteippi, profiilitiivistenauha ja paisuva saumanauha. Tiivistysmassaa käytettäessä saumojen, joihin tiivistys ollaan tekemässä, tulee aukon tai raon olla riittävän leveä tiivistysmassan asennuksen ja mahdollisen uusimisen kannalta. Käytettävän tiivistysmassan tulee olla tarpeeksi elastista ja sen kyky tarttua asennettavaan materiaaliin tulee testata. Tiivistysteippiä käytettäessä tarttuvuuden varmistaminen asennettavaan materiaaliin tulee myös varmistaa. (Puuinfo 2021, 14)

Profiilitiivistenauhojen avulla rakenteiden liitoksien väliin pystytään tekemään joustava katko. Joustavan katkon avulla saavutetaan akustista etua. Polyuretaani-pohjaisissa paisuvissa saumanauhoissa on hyötynä niiden kyky muovautua saumojen muotoihin ja sauman mahdolliseen liikkumiseen. Saumanauhojen asennuksessa tulee varmistaa jatkoksien liitoskohtiin.

Jatkoksien liitoskohdissa tapahtuu ilmavuotoa, joka vaikuttaa rakenteiden ilmaääneneristävyyteen. (Puuinfo 2021, 14)

Rankarakenteisissa ääntä eristävissä levyrakenteissa, tulee levyjen saumat asentaa rankarungon kohdalle. Rakenteessa käytettäessä useampaa levykerrosta tulee levyt asentaa, siten että saumakohtat on asennettu limittäin eri rankojen kohdalle. Saumakohtien limittäin asennuksen etuna on, ettei saumakohtia tarvitse erikseen tiivistää. Jos levyrakenteiden saumoja tarvitsee eristää, voidaan eristys tehdä myös käyttämällä kalvomaisia ilmansulkutuotteita. (Puuinfo 2021, 14)

4 Testaukset osana laadunvarmistusta

Akustisten ominaisuuksien testauksien tekemiseen tarkoitetulle tilalle tulee suorittaa akustisten ominaisuuksien testaukset, jotta saadaan varmistettua rakenteiden ja tilan kokonaisuuden toimivuus. Testaus tilan testauksessa tulee varmistaa tilan oikeanlainen toimivuus ja mitata sen toiminnan kannalta tärkeät akustiset ominaisuudet.

Tilan testauksessa on tärkeää testata tilan ilmaääneneristävyys. Tilalle suoritettujen testien ja mittausten avulla saadaan tietoon, millaisia testejä tilassa pystytään suorittamaan.

4.1 Akustiset mittaukset

Enimmäisäänitason $L_{A,max}$ mittaamiseen käytetään F- eli fast-aikapainotus menetelmää. F- menetelmässä äänitasomittarilla mitataan 250 ms jaksoissa keskiäänitasoa vaihtelevasta äänitasosta. Kuuloaistin kykyä arvioida äänen voimakkuutta lyhytaikaisena pysytään vertaamaan todella hyvin saataviin äänitasomittauksiin. Enimmäisäänitasoa mitataan koko äänilähteen aiheuttaman melun ajan. (Kylliäinen 2011, 15)

Akustiikan ilmiöiden riippuvuus eri taajuuksiin on johtanut siihen, että niiden ilmoittamisessa on päädytty käyttämään käyrä kuvaajaa. Käyrä kuvaajan avulla

saadaan kuvattua eri taajuuksien vaikutuksia äänenpainetasoon verrattuna. Tulokset on suhteutettu ihmisen korvan herkkyuden mukaan. Kuvaajasta saadaan laskettua yksi äänitaso, jonka avulla äänenpainetasot ilmoitetaan yhden lukuarvon avulla. (Kylliäinen 2011, 14–15)

4.2 Ilmaääneneristävyys mittaus

Ilmaääneneristystä mitatessa alkuperäisessä huonetilassa ollut ääni saa arvon W_1 ja toiseen huoneeseen siirtynyt ääni saa arvon W_2 . W_2 arvoon sisältyy myös hieman rakenteiden sivukautta kulkeutunutta värähtelyä. Näiden arvojen avulla saadaan laskettua ilmaääneneristävyys R (dB). Ilmaääneneristävyys luku on riippuvainen äänilähteen taajuudesta. Ilmaääneneristysluvun R_w avulla pystytään ilmoittamaan rakennusosan ilmaääneneristyskyky.

Ilmaääneneristysluku mitataan taajuuskaistoittain alueelta 50 Hz tai 100 Hz taajuuteen 5000 Hz asti saaduista ilmaääneneristävyyksistä R . R_w saadaan määritettyä laboratoriomittauksien avulla tai mallintamalla. (Puuinfo 2021, 13)

Äänitasoeroluvulla $D_{nT,w}$ saadaan ilmoitettua ilmaääneneristävyys tilojen välillä. Se saadaan laskettua taajuusalueelta 50–5000 Hz saaduista tilojen välisistä äänitasoeroista D_{nT} . $D_{nT,w}$ arvo voidaan myös laskea R_w arvon avulla. $D_{nT,w}$ arvo kuvaa ääneneristävyyttä todenmukaisemmin kuin R_w arvo, koska se huomioi tilojen väliset rakenteelliset sivutiesiirtymät, ääntä eristävän rakenneosan pinta-alan, tilan jälkikaiunta-ajan ja tilan koon. (Talonrakentamisen akustiikka 2023, 86–87)

Ilmaääneneristävyyden mittauksia tehdään joko laboratoriomittauksella tai kenttämittauksella. Ilmaääneneristävyyden mittaamiseen käytetään voimassa olevia standardeja. Lähetystilassa tuotetaan tasaista ympärisäteilevää äänilähdettä, jonka tuottama kohina on 90 dB- 100 dB. Kohinaa tuotetaan lähes samantasoisella äänenpaineella taajuuskaistoille 100 Hz - 3150 Hz.

Laboratoriomittauksessa mittauksen kohteena oleva rakenneosa (Seinä, ikkuna, ovi jne.) asennetaan testausaukkoon kahden mittauskammion väliin, jotka ovat erillään toisistaan. Näin saadaan testattua pelkästään rakenneosan ilmaääneneristävyys. Laboratoriossa tapahtuva sivutiesiirtymä on vähäistä, joten se on merkityksetöntä mittaustuloksen kannalta. Suunnittelussa ei tule

käyttää laboratorion saatuja mittaussuureita, jos tuloksissa ei ole huomioon otettuna rakenteellista sivutiesiirtymää. (Puuinfo 2021, 15)

Mittauksista määritetään $D_{nT,w}$ eli äänitasoeroluku kaistoilta 100 Hz- 3150 Hz saaduista äänitasoeroista D_{nT} . Mittaustulokset ilmoitetaan standardin ISO 717-1 vertailukäyrämenetelmän avulla. $D_{nT,w}$ eli standardisoitu äänitasoeroluku, mitataan 500 Hz kohdalta vertailukäyrältä. Mitä suurempi arvo $D_{nT,w}$ on sitä paremmin rakenneosaa eristää ääntä. (Puuinfo 2021, 15)

4.3 Askelääneneristävyys mittaus

Askeläänieristävyttä mitattaessa ei voida käyttää äänitehoja W_1 ja W_2 . Tämä johtuu siitä, ettei välipohjan yläpuolella ole testaus tilanteessa ilmaääntä vaan sinne tuotettava värähtely johtuu runkoäänestä, joka havaitaan alapuolisessa tilassa ilmaääninä. Askeläänieristävyyden mittauksessa käytetään arvoa L , joka kuvaa askeläänitasoa. Mitä pienemmän arvon L rakenne saa sen parempi on sen askeläänieristävyys. (Puuinfo 2021, 17)

Askeläänitasoa mitattaessa käytetään yleensä askeläänikojetta, joka tuottaa iskuja 10 kertaa sekunnissa. Askeläänikojeeseen ei ole tarkoitus kuvata kävelyä välipohjan yläpuolella, vaan tuottaa tasaisia iskuja rakenteessa. Tämän avulla saadaan mitattua askeläänikojeen tuottamia iskuja toisessa tilassa objektiivisesti koska tiedetään, että iskut välipohjaan ovat samankaltaisia. (Puuinfo 2021, 17)

Askeläänieristävyyden ilmoittamiseen tilojen välillä käytetään askeläänitasolukua $L'_{nT,w}$. Se saadaan laskettua taajuuskaistoilta 50 Hz- 3150 Hz askeläänikojeella tehdyistä testauksista, joiden avulla saadaan selvitettyä askeläänitaso eli L'_{nT} . $L'_{nT,w}$ arvolla saadaan ilmoitettua myös rakenteelliset sivutiesiirtymät. Laboratoriossa tehdyissä testauksissa voidaan laskea yksittäiselle rakennusosalle normalisoitu askeläänitaso, joka ilmoitetaan arvolla L_n . Laboratoriossa mitatut askeläänitasot ilmoitetaan arvolla $L_{n,w}$. Askeläänieristävyyden pystyy myös laskemaan mallinnuksen avulla. (Puuinfo 2021, 17)

Askeläänieristävyyttä voidaan mitata joko laboratorio- tai kenttämittauksina. Kenttämittaukseen voidaan käyttää koerakennusta tai todellista rakennusta. Laboratoriossa tehtävässä mittauksessa välipohja asennetaan kahden erilleen rakennetun mittauskammion väliin, jolloin mittaus tuloksista saadaan ainoastaan rakenteen läpikulkeva äänen määrä. Laboratoriossa tapahtuva sivutiesiirtymä on vähäistä, joten se on merkityksetöntä mittaustuloksen kannalta. Suunnittelussa ei tule käyttää laboratoriosta saatuja mittaussuureita, jos tuloksissa ei ole huomioituna rakenteellista sivutiesiirtymää. (Puuinfo 2021, 17–18)

Mittauksista määritetään $L'_{nT,w}$ eli askeläänitasoluku kaistoilta 50 Hz- 3150 Hz saaduista äänitasoeroista L'_{nT} . Mittaustulokset ilmoitetaan standardin ISO 717-2 vertailukäyrämenetelmän avulla. $L_{nT,w}$ eli standardisoitu askeläänitasoluku, mitataan 500 Hz kohdalta vertailukäyrältä. Mitä pienempi arvo $L'_{nT,w}$ on sitä paremmin rakenneosaa eristää ääntä. (Puuinfo 2021, 18)

5 Akustiikkalaboratorio

Akustiikkalaboratorio muodostuu kahdesta kaiuntahuoneesta.

Akustiikkalaboratorion kokonaisuus vastaa paljon studio rakennetta. Yleensä studio rakenteissa halutaan säilyttää ääni rakennetun kokonaisuuden sisäpuolella. Akustiikkalaboratorion eristys poikkeaa tästä ja sen tulee olla sellainen, ettei ääni pääse kulkeutumaan vastaanottavaan huoneeseen. Tilojen akustiikan suunnittelussa on kuitenkin samanlaisia ominaisuuksia ja äänen ominaisuuksien hallinta tiloissa on tärkeää rakennusten toiminnan kannalta.

Akustiikkalaboratorion rakenteisiin on olemassa monenlaisia ratkaisuja. Akustiikkalaboratorion ääneneristävyyden kannalta rakenneratkaisut, joita akustiikkalaboratoriolle tehtiin tuli olla riittävät akustisten ominaisuuksien testauksien tekemiseen. Rakentamisessa tuli huomioida rakenteiden tarpeeksi hyvä tiivistäminen ja kelluvien rakenteiden toimivuus. Akustiikkalaboratorion seinäelementtien, kattoelementtien ja ovien asennukset tekivät hyvin akustoitujen tilojen rakentamiseen erikoistunut yritys. Nämä rakenneosat tulivat

valmiina asennukset tekevän yrityksen kautta. Loput rakenteet rakennettiin Karelian henkilöstön toimesta.

Akustiikkalaboratorion lähettävän huoneen ulkopuolen mitat ovat 4540x4060x4635 mm ja lähettävän huoneen sisäpuolen mitat ovat 4300x3820x3980 mm. Vastaanottavan huoneen ulkopuolen mitat ovat 4820x3873x4035 mm ja vastaanottavan huoneen sisäpuolen mitat ovat 4290x3340x3560 mm. Vastaanottavassa huoneessa on kaksi kerrosta seinä- ja kattoelementtejä koko huoneen ympäröykseltä ääneneristykseen lisäämiseksi.

5.1 Akustiikkalaboratorion rakentaminen

Akustiikkalaboratoriolle määriteltiin paikka, johon se rakennettiin. Akustiikka laboratorion ja runkorakenteiden seinien väliin jäi akustiikkalaboratorion jokaiselle puolelle vähintään 700 mm pituinen väli. Ensimmäisenä rakennettiin kahden seinä- ja kattoelementti kerroksen vastaanottava huone, kun vastaanottavan huoneen seinät ja katot olivat valmiina, aloitettiin rakentamaan lähettävää huonetta. Vastaanottavan huoneen kahden eri seinä- ja kattoelementti kerroksen väliin jäi noin 15 mm aukko. Molempien huoneiden ulkopuolisten rakenteiden valmistumisen jälkeen tehtiin ovi aukkojen korotus ja ovien asennus. Tämän jälkeen sisäpuolelle rakennettiin kelluva lattiarakenne molempiin tiloihin ja tilojen välissä olevaan testaus aukkoon rakennettiin väliseinä akustiikkalaboratorion R_{max} arvojen testaamista varten.

Ulkopuolinen rakentaja aloitti akustiikkalaboratorion ulkopuolisten rakenteiden asentamisen. Ensimmäisenä kokeiltiin, kuinka akustiikkalaboratorio mahtuu asennettavaan tilaan. Akustiikkalaboratorion alin kerros asennettiin ilman kiinnityksiä paikoilleen, jotta saatiin testattua akustiikkalaboratorion mitat kuvien vastaavuuteen. Akustiikkalaboratorio mahtui suunnitellulle kohdalle, joten sen rakentaminen pystyttiin aloittamaan.

Rakentaminen aloitettiin asentamalla U-kiskot, jotka kiinnitettiin lattiaan niille merkatuille paikoille. U-kisko kiinnitettiin lattiaan porattuun reikään naulatulpan avulla. U-kiskon päälle asennettiin tärinäeristenauhaa koko U-kiskon ja nurkkaprofiilien alle koko rakenteen matkalle. Tärinäeriste irrottaa seinärakenteen lattiasta, jolloin lattian kautta tuleva tärinä ei kulkeudu

rakenteeseen. Tärinäeristeen päälle asennettiin toinen U-kisko, jota ei asennettu kiinni mihinkään, jotta seinärakenteesta saatiin aikaan kelluva rakenne.

U-kiskon päälle asennettiin ensimmäinen seinäelementti ja nurkkaprofiilit, joiden varaan elementit kiinnitettiin. Seinäelementti asennettiin U-kiskon päälle ja kahden nurkkaprofiilin väliin. Seinelementti kiinnitettiin nurkkaprofiileihin elementtikiinnikkeiden avulla. Elementtikiinnike tulee kiinni nurkkaprofiiliin pujottamalla se nurkkaprofiilissa olevalle kiinnikkeelle tarkoitetun aukon sisään. Seinäelementtiin se kiinnitettiin ruuveilla. Elementtikiinnikkeet asennettiin kahden elementin saumakohtien päälle, jolloin kaksi elementtiä saatiin kiinnitettyä toisiinsa. Tämän jälkeen sama prosessi jatkui asentamalla seinäelementtejä toistensa päälle. Seinäelementtien väliin asennettiin liimatiivistemassaa elementtien tiivistämiseksi, jotta rakenteeseen ei jäisi ääneneristävyyttä heikentäviä rakoja. Seinäelementtien ja nurkkaprofiilien välille asennettiin lopuksi peitelistat, joiden avulla saumakohtat saatiin peitettyä ja lopputuloksesta saatiin paremman näköinen.

Kattoelementit asennettiin määriteltyyn korkoon viimeisen seinäelementin päälle. Kattoelementit asennettiin seinäelementin päälle asennettuun U-kiskoon. Kattoelementti kiinnitetään päädyistä poraamalla se ruuvilla kiinni U-kiskoon. Kattoelementti kiinnitettiin seinäelementtiin rakennuksen sisäpuolelta L-listalla. Saumoihin asennettiin liimatiivistemassaa rakenteen tiivistämiseksi. Kattoelementin reunoille asennettiin lopuksi peitelistat peittämään rakenteen ulkoreuna rakennuksen ulkopuolelle.

Akustiikkalaboratorion ovet asennettiin 300 mm korkeuteen lattiasta. Ovien korotus tehtiin sisäpuolelle tulevan kelluvan lattian paksuuden takia. Korotus tehtiin asentamalla seinäelementtiä oviaukon alapuolelle, jolloin 300 mm korotus saatiin aikaiseksi ilman rakenteen ääneneristävyyden heikkenemistä. Oven karmit asennettiin niille tehtyyn aukkoon. Oviaukon koko ympäryksen matkalle asennettiin U-kisko, johon oven karmit saadaan kiinnitettyä. Tämän jälkeen ovet asennettiin paikoilleen. Lähettävään huoneeseen tuli tuplaovet ja vastaanottavaan huoneeseen tuli yksi ovinen kulkureitti. Lähettävän huoneen tuplaovien kautta saa kuljetettua akustiikkalaboratorioon suurempiakin elementtejä tai materiaaleja.



Kuva 2. Akustiikkalaboratorion korotetut ovet.

Akustiikkalaboratorion ulkopuolisten rakenteiden jälkeen alkoi Karelian osuus rakentamisesta, kun akustiikkalaboratorion sisäpuolelle tehtävien rakenteiden asennus aloitettiin. Ensimmäisenä akustiikkalaboratorion sisäpuolelle rakennettiin kelluva lattiarakenne. Lattiarakenteen rakentaminen aloitettiin rakentamalla akustiikka laboratorion sisälle puiset vasat. Vasat rakennettiin noin 10 mm irti seinärakenteesta ja vasat rakennettiin jakamalla kumpikin huone keskeltä kahteen osaan. Kahden osan väleihin tehtiin villoitukselle paikat 600 mm jaolla. Vasojen kiinnitykseen käytettiin ruuveja. Vasojen alle asennettiin tärinäeristeet, jotta kelluva rakenne toimisi. Tärinäeristeitä asennettiin jokaiseen liitos ja kulma kohtaan vasojen alle. Vasojen väliin asennettiin Paroc extra F 100 mm mineraalivillaa kaksi kerrosta, jotta villan saumakohtat saatiin asennettua limittäin ääneneristävyyden parantamiseksi. Vasojen päälle asennettiin MDF-levyt kolmeen kerrokseen limittäin saumakohtista. Lattian kokonaispaksuus on 257 mm.

Akustiikkalaboratorion testausaukkoon rakennettiin väliseinä, jolla pystytään testaamaan akustiikkalaboratorion ilmaääneneristävyyttä ja saadaan testattua akustiikkalaboratorion maksimaalinen testauskapasiteetti. Väliseinän eristävyyden tulee olla riittävä maksimaalisen testauskapasiteetin testaamiseen, joten sen ilmaääneneristävyyden tulisi olla suurempi kuin akustiikkalaboratorion elementtien.

Väliseinän rakennus aloitettiin asentamalla vastaanottavan huoneen sisemmän seinän koko aukon alalle 130 mm leveä havuvaneri. Havuvanerin avulla seinä rakenne saadaan irrotettua lähettävän huoneen seinästä, jolloin äänen aiheuttama värähtely ei kulkeudu lähettävän huoneen rakenteiden kautta vastaanottavaan huoneeseen. Ensimmäisen havuvanerin päälle asennettiin toinen havuvaneri kerros, joka on koko testaus aukon levyinen, eli noin 500 mm leveä. Havuvanerin asennuksen jälkeen aloitettiin Sandwich-rakenteisen seinän rakennus, jonka on tarkoitus peittää koko testausaukko. Väliseinän rakentaminen aloitettiin rakentamalla kaksi runkopontista testausaukkoon kaulus. Runkoponttien väliin jätettiin 200 mm väli, jonka sisäpuolella on Paroc extra F 100 mm elementtivilla kahdessa kerroksessa. Kaulus rakennettiin koko aukon ympäryksen matkalle. Kauluksen sisäpuolelle asennettiin uusi havuvaneri kerros uuden aukon leveydelle. Havuvanerin sisäpuolelle rakennettiin sandwich-rakenne, joka rakennettiin kokonaiseksi seinäksi havuvanerien sisäpuolelle. Runkoponttien väliin jätettiin taas 200 mm aukko, johon asennettiin koko rakenteen matkalle Paroc extra F 100 mm elementtivilla kahdessa kerroksessa. Sandwich-elementtien pinnat tasoitettiin pintatasoitteella. Mahdolliset aukot väliseinässä täytettiin akustiikkakitillä ja eristevillalla ääneneristävyyden parantamiseksi. Testausaukon ulkopuoli, joka on akustiikkalaboratorioiden välillä, eristettiin mineraalivillalla koko matkalta.



Kuva 3. Testausaukon ulkokehä

5.2 Akustiikkalaboratorion rakenteet

Akustiikkalaboratorion seinärakenteena käytetään valmista elementtiä, jossa on käytetty sinkittyjä teräslevyjä, joiden paksuus on 1 mm rakenteen kummallakin puolella. Teräslevyjen väliin on asennettu äänieristeenä toimivat 100 mm paksu mineraalivilla sekä 15 mm paksu kipsilevy. Akustiikkalaboratorion kattorakenteessa käytetään samanlaista elementtiä kuin seinässä. Elementtien paksuus on noin 130 mm.



Kuva 4. Akustiikkalaboratorion tärinäeristys, U-kisko ja seinärakenne.

Akustiikkalaboratorion lattiarakenteessa käytetään puisista vasoista tehtyä kehikkoa. Vasoissa käytetty puu on runkopuuta, jonka mitat ovat 48x198. Vasat on asennettu tärinäeristeiden päälle. Vasojen sisään asennetut kaksi eristevilla kerrosta ovat Paroc Extra F 100 mm mineraalivillaa. Näin saavutetaan 200 mm eristepaksuus. MDF-levyt ovat kaksi kerrosta 18 mm ja yksi kerros 9 mm paksuja.



Kuva 5. Lattiavasat



Kuvat 6. Valmislattia rakenne peitettynä MDF-levyillä

Testausaukkoon tehdyn väliseinän rakenteissa on käytetty sandwich-elementin rakennukseen kaksi runkopontti 300x130x198 harkkoja ja Paroc Extra F 100 mm mineraalivillaa. Havuvanereita, joita käytettiin väliseinän rakentamiseen, paksuudet olivat 9 mm ja 18 mm.



Kuva 7. Väliseinä rakenteen läpileikkaus



Kuva 8. Valmis väliseinärakenne.

6 Akustiikkalaboratorion tarkastelu ja testaus

Akustiikkalaboratorion ominaisuudet ja testaus, joita tarvitaan akustiikkalaboratorion ominaisuuksien määrittelyyn, on ohjeistettu SFS-EN ISO

10140 standardin osioissa 2, 4 ja 5. Seuraavassa osiossa tarkastellaan akustiikkalaboratoriolla annettujen ominaisuuksien toteumista ja tarkastellaan suoritettujen testien avulla akustiikkalaboratoriolle saavutettu ilmaääneneristävyys.

6.1 Standardissa määritellyt testaus olosuhteet

Testauksessa on kaksi vaaka- tai pystysuunnassa vierekkäistä kaiuntahuonetta, joista toinen on lähettävä huone ja toinen vastaanottava huone. Testattava elementti asennetaan näiden huoneiden välissä olevaan aukkoon.

Lähettävässä huoneessa oleva liikkuva kaiutin tai kaiuttimet kahdessa tai useammassa kiinteässä pisteessä tuottavat hajaäänikentän. Keskimääräiset äänenpainetasot mitataan lähettävässä ja vastaanottavassa huoneessa.

Yleensä taajuusalueella 100 Hz – 5000 Hz. (valinnaisesti 50 Hz asti).

Huoneiden välisestä äänen painetasoerosta voidaan arvioida testausaukossa olleen elementin ominaisuudet huomioimalla ekvivalenttinen absorptioala ja mahdollisesti testielementtien koko ja lukumäärä. Taustamelun keskimääräisen painetason ja jälkikaiunta-ajan määrittäminen on eritelty standardissa ISO 10140-4. Testaustiloissa ei saa olla ihmisiä sisällä testausten aikana, jotta ne eivät vaikuttaisi äänikenttään. (SFS-EN ISO 10140-2 2022, 10)

Laboratorion testitilat koostuvat kahdesta vierekkäisestä kaiuntahuoneesta, joiden välissä on testausaukko, johon testattava elementti asennetaan.

Standardissa SFS-EN ISO 10140-5 on määritelty eri testausaukkojen koot.

Testausaukkoja ovat täysikokoinen testausaukko, pienikokoinen testausaukko ja vaihtoehtoinen pieni kokoinen testausaukko. Äänenvaimennusindeksien mittaamiseksi rakenteesta tulee tilojen väliin rakennetun väliseinän olla peruselementti. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 8)

Kaiuntahuoneiden tulee olla tilavuudeltaan vähintään 50 m³. Kaiuntahuoneiden ei tulisi olla täysin samankokoisia, vaan vähintään 10 % koko ero tilavuudessa ja lineaarisissa mitoissa kaiuntahuoneiden välillä on suositeltavaa. Suositeltu tilavuus huoneille on 50–60 m³. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 8)

Testausaukkoon asennetaan testattava elementti. Testausaukon pinta-ala vaihtelee testattavan elementin mukaan. Seinän testaukseen testausaukon

tulisi olla noin 10 m². Aukon lyhyempi reuna ei saa olla alle 2,3 m pitkä. Pienempien testattavien elementtien, kuten ovien tai ikkunoiden testaamiseen aukko voi olla pienempi. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 9)

Akustiikkalaboratoriolle suoritettavat mittaukset tehdään terssi- eli kolmannesoktaavikaistoittain, joiden keskitaajuudet ovat hertseinä: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 600, 2 000, 2 500, 3 150, 4 000 ja 5 000. Jos tarvitaan lisätietoja matalien taajuuksien vaikutuksesta, voidaan testaukset suorittaa myös terssikaistoilla, joiden keskitaajuudet ovat hertseinä: 50, 63 ja 80. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 8)

Laboratorio testitiloissa, jotka on suunniteltu mittaamaan äänenvaimennusindeksiä, tulee epäsuoraa reittiä kulkeutuvan äänen olla merkityksetöntä verrattuna testattavan elementin äänenvaimennusindeksiin. Tämä voidaan saavuttaa tekemällä riittävä rakenteellinen eristys lähettävään ja vastaanottavaan huoneeseen. Toinen tapa on eristää huoneiden sisäpuolet ilman että huoneiden vaatimukset tilavuuksille ja jälkikaiunta-ajalle pysyvät standardin mukaisina. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 9)

6.1.1 Jälkikaiunta-ajan määrittäminen

Huoneiden jälkikaiunta-aika ei saa olla akustiikkalaboratoriossa liian lyhyt tai pitkä. Akustiikkalaboratorion jälkikaiunta-ajan ollessa taajuudella 100 Hz tai enemmän pitempi kuin kaksi sekuntia tai vähemmän kuin yksi sekunti, tulee tarkistaa, onko äänenvaimennusindeksi riippuvainen jälkikaiunta-ajasta. Jos riippuvuus havaitaan, tulee huoneiden jälkikaiunta-aikaa säädellä. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 8)

Jälkikaiunta-aika tulee mitata keskeytys kohinamenetelmällä tai integroidulla impulssi vastausmenetelmällä. Monisuuntaisen säteilevän äänilähteen käyttö voi olla hyödyllistä oikeanlaisen äänikentän luomisessa, mutta muitakin äänilähteitä voidaan käyttää. Kiinteillä mikrofoneilla tulee suorittaa vähintään kuusi mittausta jokaisella taajuuskaistalla. Vähintään yhtä kaiuttimen paikkaa on käytettävä kolmella eri kiinteällä mikrofonin sijainnilla ja suoritettava vähintään kaksi testausta eri kaiuttimen kohdissa. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 12)

6.1.2 Taustamelun määrittäminen

Taustamelun tason mittaus on tehtävä sen varmistamiseksi, että vastaanottavaan huoneeseen ei tule taustamelun aiheuttamaan haittaääntä, joka vaikuttaisi testitulokseen. Vieraat äänet, kuten melu kaiuntahuoneen ulkopuolelta ja sähköinen kohina vastaanottavasta laitteistosta vaikuttavat taustamelutasoon. Taustamelutaso on oltava vähintään 6 dB (mielellään yli 15 dB) signaalin ja taustamelun tason alapuolella jokaisella taajuusalueella. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 10)

Vastaanottavaan huoneeseen tuleva taustamelu pitäisi olla niin vähäistä, ettei se häiritse testausta. Taustamelun tulee olla riittävän alhaista, ettei se häiritse lähettävän huoneen lähettämää äänentehoa tai aiheuta ongelmia laboratoriossa testattaville elementeille. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 9)

6.1.3 Mikrofonien ja kaiuttimien käyttö ja asennus

Äänenpainetaso mittaukseen voidaan käyttää kolmea erilaista tapaa. Testaustavat ovat yksi paikasta toiseen liikkuva mikrofoni, useampi kiinteä mikrofoni tai jatkuvasti liikkuva mikrofoni. Tarkastelun kohteena on useampi kiinteästi asennettu mikrofoni, koska niitä käytettiin testauksissa. Mikrofonien asennukseen on ohjeistettu vähimmäismitat asennusta varten, mutta mittojen tulisi olla suurempia kuin vähimmäisarvojen jos mahdollista. Mikrofonien asentamisetaisyudet:

- Vähintään 0,7 m kiinteiden mikrofonien välillä
- Vähintään 0,7 m mikrofonien ja huoneen reunojen välillä
- Vähintään 0,7 m mikrofonien ja hajottimien välillä
- Vähintään 1,0 m mikrofonien ja testielementin välillä
- Vähintään 1,0 m mikrofonien ja äänilähteen välillä

(SFS-EN ISO 10140-4 2022, 8–9)

Käytettäessä kiinteästi asennettua mikrofonia tulisi testausaika olla taajuuskaistoilla 100 Hz - 400 Hz vähintään 6 sekuntia. Suuremmilla taajuuskaistoilla voidaan testausaika laskea neljään sekuntiin. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 9)

Käytettäessä useampaa kuin yhtä kaiutinta samanaikaisesti tai liikkuvaa kaiutinta tulee molemmissa huoneissa olla vähintään viisi eri mikrofonin testaus paikkaa. Mikrofonien paikat tulee olla sijoitettu määriteltyjen mittojen mukaan ja kaksi eri sijaintia ei saa sijaita täysin samassa kohdassa huoneen mittojen sisällä. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 10)

Käytettäessä yhtä kaiutinta, vähintään viisi eri mikrofonin testaus paikkaa tulee olla molemmissa huoneissa jokaista kaiuttimen sijaintia varten. Mikrofonien paikat tulee olla sijoitettu määriteltyjen mittojen mukaan ja kaksi eri sijaintia ei saa sijaita täysin samassa kohdassa huoneen mittojen sisällä. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 10)

Ääni tulee tuottaa käyttäen kaiutinta vähintään kahdessa eri kohdassa, yhtä kaiutinta, joka liikutellaan kahden kohdan välillä tai yhtä liikkuvaa kaiutinta. Äänenpainetaso mitataan kiinteästi asennettavan mikrofonin tai liikkuvien mikrofonien avulla. (SFS-EN ISO 10140-4 2022, 10)

6.2 Akustiikkalaboratorion vertailu standardiin

Akustiikkalaboratorion kaiuntahuoneet on rakennettu vaakasuuntaisesti vierekkäin. Tämä mahdollistaa rakenteiden ilmaääneneristävyyden mittaamisen. Suurempi kaiuntahuone on lähettävä huone ja pienempi vastaanottava huone. Kaiuntahuoneiden väliin on rakennettu testausaukko, johon testauselementti asennetaan.

Akustiikkalaboratorion lähettävän huoneen sisäpuolen mitat ovat 4300x3820x3980 mm ja vastaanottavan huoneen sisäpuolen mitat ovat 4290x3340x3560 mm. Standardissa SFS-EN ISO 10140-5 mainitaan tavoiteltava 10 % koko ero tilavuudessa ja lineaarisissa mitoissa.

Lähettävän huoneen tilavuus on 65,38 m³ ja vastaanottavan huoneen tilavuus on 51,01 m³. Huoneet ovat standardissa määriteltyjen mittojen mukaisia. Suositeltu tilavuus huoneille on 50–60 m³. Vastaanottava huone vastaa suositeltua tilavuutta, mutta lähettävä huone on 5,38 m³ suositeltua suurempi. Huoneiden tilavuuden ero on noin 22 %, joka on suurempi kuin standardissa SFS-EN ISO 10140-5 määritelty 10 %.

Huoneiden lineaariset mitat ovat lähettävässä huoneessa 4300 mm, 3820 mm ja 3980 mm ja vastaanottavassa huoneessa 4290 mm, 3340 mm ja 3560 mm. Huoneiden pituus mittojen 4300 mm ja 4290 mm välinen pituusero on 10 mm eli pituuksien ero on noin 0,23 %. Huoneiden leveys mittojen 3820 mm ja 3340 mm välinen pituusero on 480 mm eli pituuksien ero on noin 14,37 %. Huoneiden korkeus mittojen 3980 mm ja 3560 mm välinen pituus ero on 420 mm eli pituuksien ero on noin 11,79 %. Huoneiden lineaaristen mittojen keskiarvo pituuserossa on noin 8,80 %, joka on 1,2 % standardissa SFS-EN ISO 10140-5 mainittua pienempi.

Huoneiden välinen testausaukko on kooltaan 3000x3200 mm. Testausaukon pinta-ala on 9,6 m². Testausaukon koko on riittävä seinien mittaamiseen tarkoitettuun noin 10m² määriteltyyn kokoon. Testausaukossa voi myös suorittaa pienempien rakenne osien testauksia ilman testausaukon koon aiheuttamia ongelmia. Testausaukon koko on muunneltavissa erilaisille tuotteille ja elementeille.

7 Testaukset

Akustiikkalaboratoriolle suoritettiin mittaukset sen R_{max} arvon määrittelemiseksi. R_{max} arvolla kuvaillaan maksimaalista mitattavaa äänen vaimennus indeksiä. R_{max} arvon avulla pystytään määrittämään akustiikkalaboratorion testaus mahdollisuudet. Akustiikkalaboratoriossa tehtävien testausten tulisi olla suunnitellulta ääneneristävyydeltään R_{max} arvoa alhaisempia. Testattavan elementin ollessa alle 10 dB tai alle 15 dB R_{max} arvoon verrattuna tulee tulokselle suorittaa standardissa SFS-EN ISO 10140-2 määritelty korjaus. Testattavan elementin dB tason eron määritelmä riippuu elementin koosta. (SFS-EN ISO 10140-5 2022, 16–17) (SFS-EN ISO 10140-2 2022, 16)

Akustiikkalaboratoriosta mitattiin huoneissa kuuluva taustamelu, molempien tilojen jälkikaiunta-ajat, kahden tilan välisten rakenteiden vuotokohdat, sekä tilojen välinen ilmaääneneristävyys ja äänitasoero.

Testauksissa käytettiin äänen ominaisuuksien mittauksiin Sound and vibration analyser Nor150 äänitasomittaria ja Nor1225 Free-field microphone laitteita. Äänen tuottamiseen käytettiin Power amplifier Nor280 kaiutinta ja Dodecahedron loudspeaker Nor276 laitteistoa. Laitteiden kalibrointiin käytettiin Calibrator Nor1256 laitetta.



Kuva 9. Dodecahedron loudspeaker Nor276.



Kuva 10. Sound and vibration analyser Nor150.

Ennen testausten aloittamista kaiuntahuoneista mitattiin ilman lämpötila ja kosteus. Ilman lämpötila oli 21 °C ja ilmankosteus 35 % kummassakin kaiuntahuoneessa.

Akustiikkalaboratorion vuotokohtien selvittäminen tehtiin ilmaääneneristävyyden parantamiseksi. Vuotokohdat akustisten tilojen välisistä rakenteista testattiin käyttämällä Microflown scan and listeniä. Microflown scan and listenin avulla pystytään kuuntelemaan ja mittaamaan vuotokohdat rakenteiden läheltä. Laitteiston avulla pystyy kuuntelemaan äänenpaineen lisäksi hiukkasnopeutta.

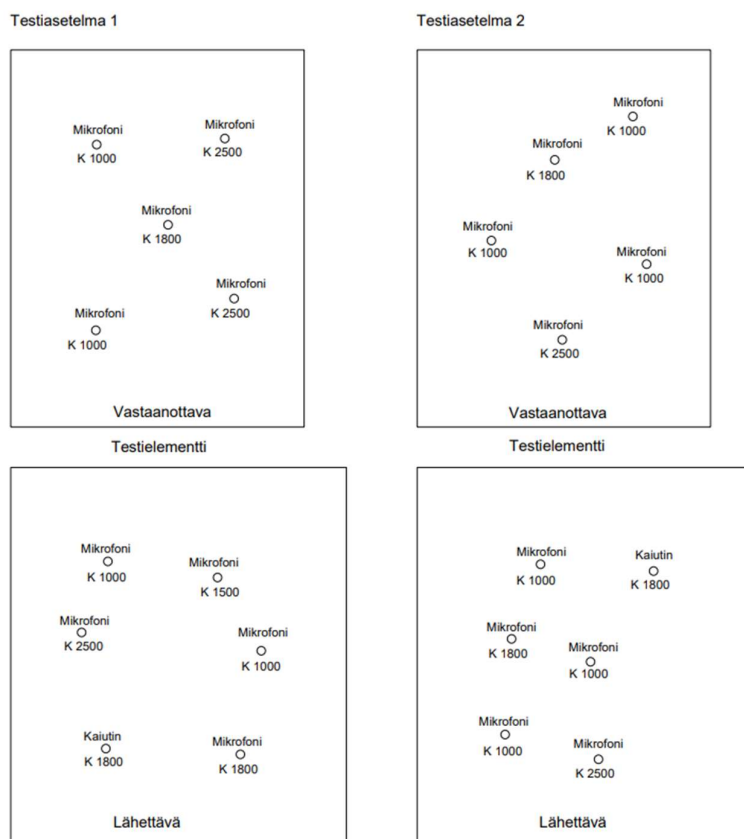
Microflown scan and listenin kuulokkeiden avulla pystyy kuuntelemaan vuotokohdat pienistäkin aukoista. Laitteiston herkkyyden ansiosta rakenteiden eristämässä mahdollisesti jääneet virheet saadaan korjattua. Testauksessa lähettävässä huoneessa tuotettiin vaaleanpunaista kohinaa, jota kuunneltiin vastaanottavassa huoneessa ääntä voimistavan laitteiston avulla. (MIP Electronics)

Huoneissa oleva taustamelu mitattiin mikrofonien avulla molemmista kaiuntahuoneista. Taustamelua testatessa on tavoitteena selvittää, kuinka paljon akustiikkalaboratorioon kulkeutuu ääntä ulkopuolisista äänilähteistä tai mahdollisen värinän seurauksena. Taustamelun testauksessa suoritettiin kaksi 60 sekuntia kestävä testausta molemmista kaiuntahuoneissa. Lähettävässä huoneessa mitattiin taustamelun keskiarvoksi 20,4 dB ja vastaanottavan huoneen keskiarvoksi 19,6 dB. Taustamelun tason ei pitäisi vaikuttaa akustiikkalaboratoriossa suoritettaviin testauksiin sen alhaisuuden takia. Yleensä taustamelua syntyy esimerkiksi erilaisten laitteistojen ja iv-kanavien kautta. Mittauksessa käytettiin Nor150 äänitasomittaria, joka oli sijoitettuna testattavan tilan keskelle.

Jälkikaiunta-aika testattiin keskeytys kohinamenetelmällä. Kaiuttimen avulla tuotettiin testattavassa tilassa vaaleanpunaista kohinaa, joka sitten mitattiin Nor150 äänitasomittarilla. Jälkikaiunta-ajan testauksessa kaiuttimelle määriteltiin molempiin lähettävään ja vastaanottavaan huoneeseen kaksi testauspaikkaa, joten testattavia kaiuttimen paikkoja oli yhteensä neljä. Jokaista kaiuttimen paikkaa kohden testattiin äänen jälkikaiunta-aika kolmesta eri pisteestä äänilähteen kanssa samassa tilassa olevalla mikrofonilla. Yhteensä huonetta kohden testattiin jälkikaiunta-aika kuudesta eri kohdasta. Äänentuottamisen loppumisen jälkeen huoneista saadaan mitattua jälkikaiunta-aika, kun huoneessa oleva äänenpainetaso laskee 60 dB alkuperäisen äänilähteen tuottamasta äänenpainetasosta. Jälkikaiunta-aika mitataan, jotta saadaan selvitettyä, onko tilan jälkikaiunta-aika standardin SFS-EN ISO 10140-5 mukainen. Standardissa määritelty jälkikaiunta-aika on 1–2 sekuntia.

Ilmaääneneristysluku R_w ja äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ testattiin käyttämällä kiinteää kaiutinta ja kiinteitä mikrofoni pisteitä. Kaiuttimien ja mikrofonien paikat mitattiin ennen testausta standardin SFS EN-ISO 10140-5 määrittelemien ohjeiden

perusteella. Kaiuttimelle määriteltiin kaksi paikkaa lähettävästä huoneesta. Mikrofoneille määriteltiin kummallekin kaiuttimen paikalle molempiin kaiuntahuoneisiin viisi eri mittauspistettä, joten kumpaakin kaiuttimen sijaintia kohden oli yhteensä kymmenen mikrofonin paikkaa. Mikrofonipaikkojen korkeus vaihtelee 1000 mm ja 2500 mm välillä, mutta kaiutin on aina samalla 1800 mm korkeudella. Kaiuttimien ja mikrofonien paikat sekä korkeudet merkattuna kuvaan 12. Kaiuttimella tuotettiin vaaleanpunaista kohinaa lähettävässä huoneesta sille mitoitetuilla paikoilla. Jokaisesta mikrofonin sijainnista tehtiin 30 sekuntia kestävä testi, jolloin saatiin testattua huoneissa oleva äänen voimakkuus eri taajuuksilla. Testaukset suoritettiin taajuuksilla 50 Hz – 5000 Hz.



Kuva 12. Kaiuttimien ja mikrofonien sijainnit kaiuntahuoneissa. Vasemmalla ensimmäinen testaus asetelma ja oikealla toinen testausasetelma.

8 Lopputulokset

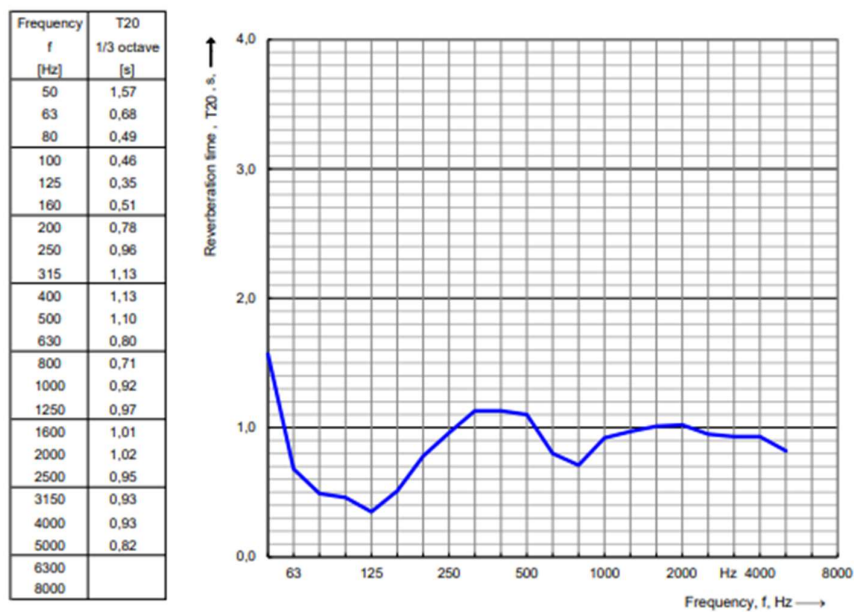
Microflow'n scan and listenin avulla väliseinän rakenteissa havaittiin jonkin verran vuotokohtia, jotka korjattiin lisäämällä vuotokohtiin eristettä ääneneristävyyden parantamiseksi. Vuotokohdat johtuivat todennäköisesti riittämättömästä eristeiden tiivistyksestä tai kittauksen puutteesta. Rakenteiden liitoskohtiin jää helposti pieniä rakoja. Ilman oikeanlaista eristettä tai raon kokoa liitoskohdassa jää siihen helposti pieniä vuotokohtia, joiden kautta ääni pääsee kulkeutumaan. Kuvassa 13. on merkattuna väliseinässä havaitut vuotokohdat. Korjatut kohdat merkattuna punaisella. Keltaisella merkattuja kohtia ei pystytty vielä korjaamaan.

Suurin vuoto tapahtui väliseinän ja kelluvan lattian välissä olevasta saumasta ja testausseinän ja laboratorion seinän välisestä saumasta. Vuotokohdat haluttiin selvittää akustiikkalaboratorion ilmaääneneristävyyden parantamiseksi, jotta akustiikkalaboratorion testauskapasiteettia saadaan mahdollisesti parannettua. Punaisella merkattuihin kohtiin lisättiin mineraalivillaa eristyksen parantamiseksi, mutta keltaisia kohtia ei saatu vielä korjattua.

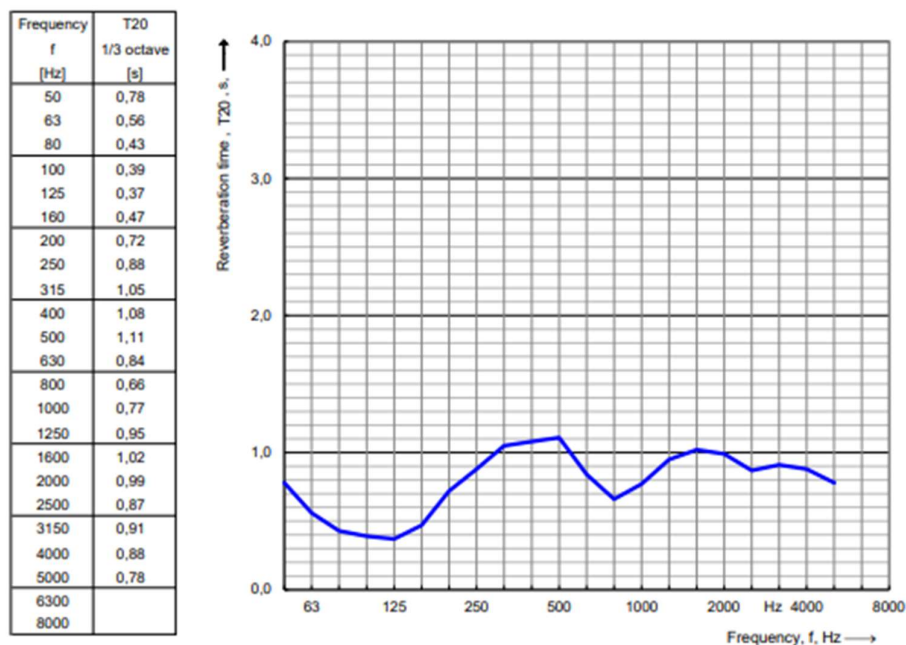


Kuva 13. Testausseinässä havaitut vuotokohdat.

Jälkikaiunta-ajan mittaustulokset saatiin mittaamalla tilassa tuotettua vaaleanpunaista kohinaa ja sen äänenpainetason laskemista 60 dB. Lähettävässä huoneessa mitattiin jälkikaiunta-ajaksi 0,94 sekuntia. Jälkikaiunta-aika lähettävässä huoneessa on 0,06 sekuntia standardin mukaisesta tavoite tuloksesta. Vastaanottavassa huoneessa mitattiin jälkikaiunta-ajaksi 0,90 sekuntia, joka on 0,10 sekuntia standardissa määritelyä tavoitetta alhaisempi. Mittauksista tehdyt testausraportit liitteessä 1. Jälkikaiunta-aika on molemmissa huoneissa alle standardissa määritellyn tavoitteen 1–2 sekuntia ja laboratorion olosuhteiden mahdollista muutosta tulee harkita, jotta saavutetaan standardissa mainittu aikaväli kummallekin testaukselle. Äänenjälkikaiunta-ajan pidentämiseen olisi toimivana ratkaisuna ovat ääntä heijastavat materiaalit. Äänen absorptio on kyseistä materiaalia testatessa tällä hetkellä liian suurta akustiikkalaboratorion molemmissa kaiuntahuoneissa. Suuren äänen absorptioon takia jälkikaiunta-aika jäi kyseisessä testissä liian lyhyeksi. Jälkikaiunta-aika vaihtelee aukossa olevan testauselementin mukaan.

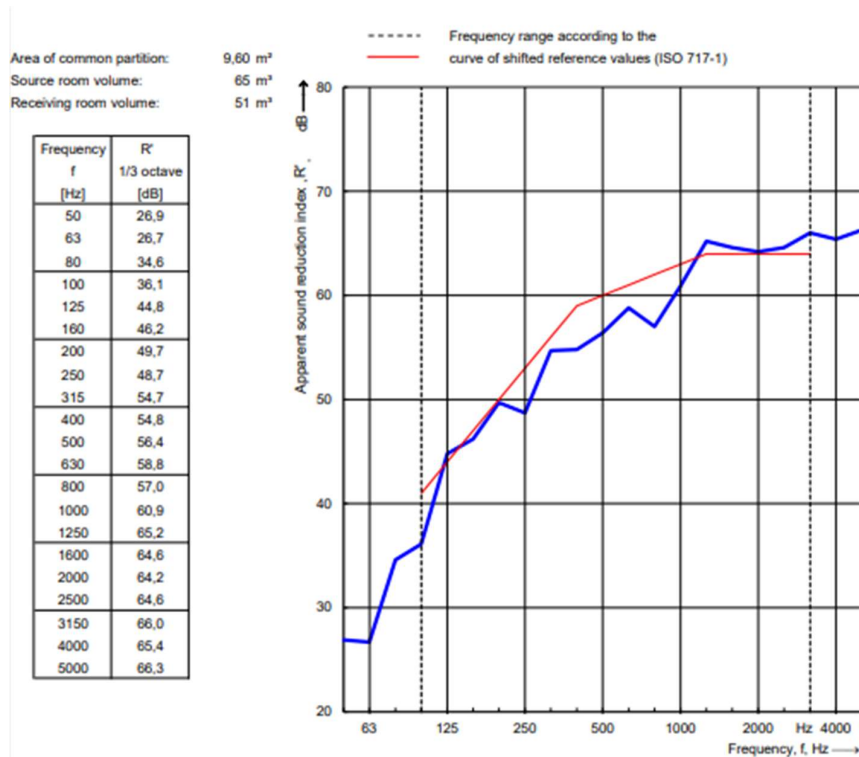


Kuva.14 Jälkikaiunta-ajan tulokset taajuuksittain lähettävässä huoneessa.



Kuva.15 Jälkikaiunta-ajan tulokset taajuuksittain vastaanottavassa huoneessa.

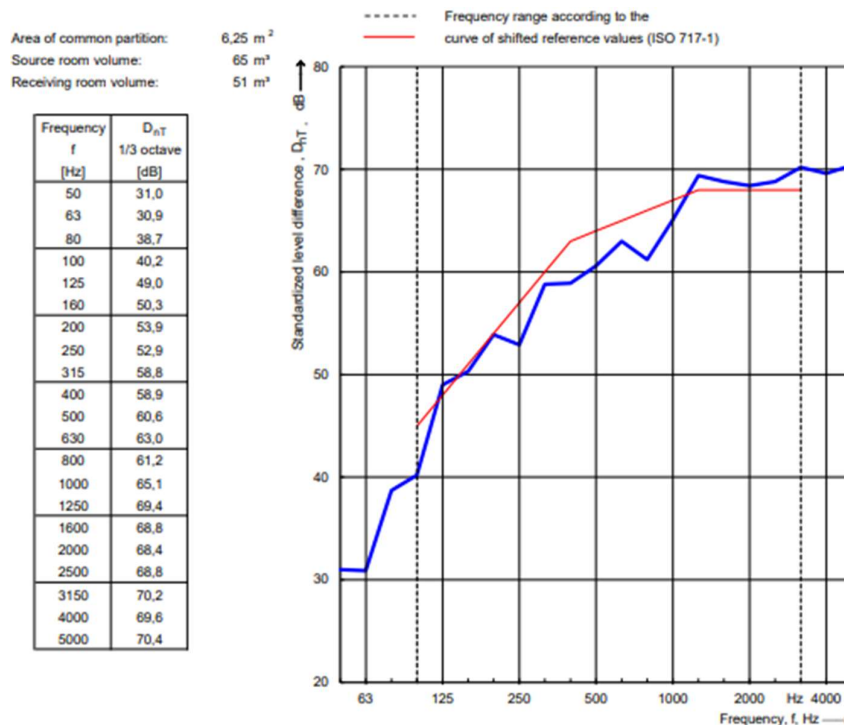
Ilmääneneristysluku R'_w saatiin määritettyä akustiikkalaboratoriolle suoritettujen testausten avulla. Suoritetun testin perusteella saadaan määriteltyä akustiikkalaboratorion R_{max} . Liitteessä 2 näkyy testausraportti suoritetusta testistä. Testauksessa saatiin akustiikkalaboratoriolla R'_w arvoksi eli ilmääneneristysluvuksi $R_w (C; C_{tr}) 60 (-2; -7)$ dB. Akustiikkalaboratorion mittaustulokset on laskettu standardin SFS-EN ISO 717-1 mukaisesti.



Kuva 16. Akustiikkalaboratorion R'_w testauksen tulokset taajuuksittain

R'_w arvon mittauksissa tapahtuu jonkin verran eri taajuus kaistoilla olevaa ei toivottua vaihtelua. Suurin vaihtelu tapahtuu taajuudella 800 Hz, kun taajuudella tapahtuva heitto standardin ISO 717-1 mukaiseen referenssiin on 5,0 dB. Yhteensä vaihtelua tapahtuu koko testauksen taajuuksilla 28,7 dB

Äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ saatiin määritettyä akustiikkalaboratoriolle suoritettujen testausten avulla. Suoritettujen testien perusteella saadaan määriteltyä $D_{nt,w}$ Liitteessä 3 näkyvä testausraportti suoritettavista testistä. Testauksessa saatiin akustiikkalaboratorion $D_{nt,w}$ arvoksi eli äänitasoero luvuksi $D_{nt,w} (C; C_{tr}) 60 (-2; -7) \text{ dB}$



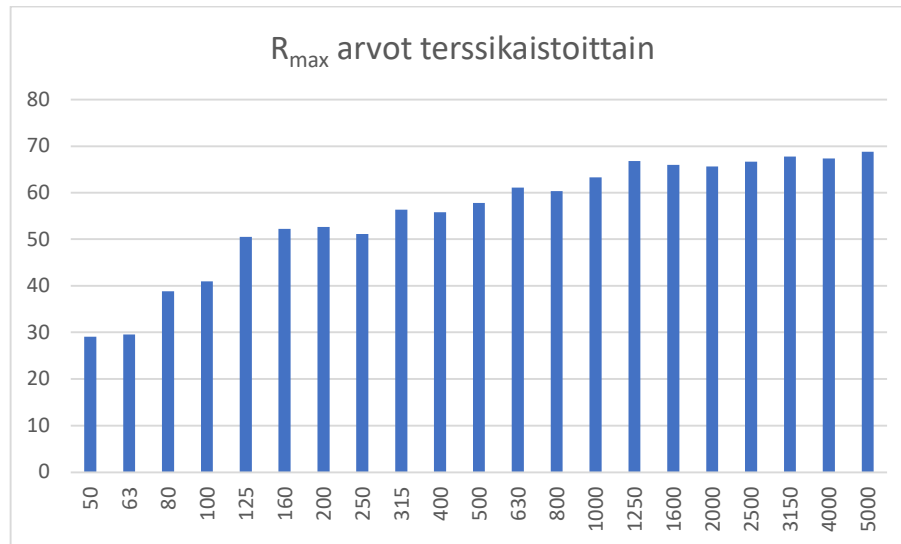
Kuva 17. Akustiikkalaboratorion D_{nT,w} testauksen tulokset taajuuksittain

D_{nT,w} arvon mittauksissa on R'_w arvon mittausten tapaan jonkin verran eri taajuus kaistoilla olevaa ei toivottua vaihtelua. Suurin vaihtelu tapahtuu taajuudella 100 Hz, kun taajuudella tapahtuva heitto standardin ISO 717-1 mukaiseen referenssiin on 4,8 dB. Yhteensä vaihtelua tapahtuu koko testauksen taajuuksilla 27,1 dB

R_{max} arvon avulla saadaan määriteltyä akustiikkalaboratorion maksimaalinen mitattava äänen vaimennusindeksi. R_{max} arvon avulla saadaan määriteltyä akustiikkalaboratoriossa suoritettavien testien maksimaalinen ääneneristävyyys R_{max} arvo voidaan määrittellä standardissa SFS-EN ISO 10140-2 olevalla kaavalla $R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A}$. Kaavassa:

- L₁ on äänenpainetaso keskiarvo lähettävässä huoneessa desibeleinä.
- L₂ on äänenpainetaso keskiarvo vastaanottavassa huoneessa desibeleinä.
- S on testausaukon pinta-ala johon testielementti, on asennettu neliömetreinä
- A on vastaava äänen absorptiopinta-ala vastaanottavassa huoneessa neliömetreinä Kaava ($A = \frac{0,16V}{T}$) eli $A = \frac{0,16 \cdot 51,01}{0,9} = 9,068 \dots$, jossa V on

vastaanottavan huoneen tilavuus ja T on vastaanottavan huoneen jälkikaiunta-aika



Kuva 18. R_{max} arvot terssikaistoittain

Akustiikkalaboratoriossa pystytään suorittamaan ilmajeneristävyyden testit tuotteille, joiden suunniteltu ilmajeneristävyys on alle akustiikkalaboratorion R_{max} arvojen.

9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoperusta ja osaaminen akustiikka laboratorion rakentamiseen ja testausten suorittamiseen. Tähän tavoitteeseen mielestäni päästiin ja Karelian akustiikkalaboratorio saatiin valmiiksi tuotteiden ilmajeneristävyyden testauksia varten. Rakentaminen ja testaus onnistuivat molemmat tavoitteiden mukaisesti.

Opinnäytetyössä tehty tutkimus lisäsi omaa osaamistani akustiikasta ja rakenteiden akustisista ominaisuuksista. Rakenteiden eristämisen erilaiset toteutustavat ja ratkaisujen monipuolisuus antavat monenlaisia mahdollisuuksia akustisten ominaisuuksien testaus tilojen toteutukseen. Tutkimuksen ja rakentamisen aikana opin rakenteiden kelluttamisesta ja kellutuksen toteutuksen tarkkuudesta. Opinnäytetyön aikana minulle kehittyi käsitys

ääneneristyksen tarkkuudesta, kun on tavoitteena tehdä akustista testausta varten tarkoitettua tilaa, jossa äänen kulkeutuminen toiseen tiloista olisi tarkoitus minimoida.

Akustiikkalaboratorio saatiin rakennettua tilanteeseen, jossa siellä pystytään suorittamaan testauksia pienemmille rakenteille, kuten oville ja ikkunoille. Akustiikkalaboratorion testauksissa ei ollut suurempia ongelmia ja ne saatiin suoritettua suunnitellulla tavalla. Rakenteessa olleet vuotokohdat saatiin korjattua lisäämällä niihin eristystä ja rakenteen tiiviyttä saatiin parannettua.

Akustisten mittausten avulla saatiin varmistettua rakenteiden toimivuus toivotulla tavalla. Akustisilla mittauksilla saadaan testattua tilan akustiset ominaisuudet ja varmistettua tilan suunnitellun mukaisuus. Akustisten ominaisuuksien määrittämisen avulla saadaan varmistettua testatilan toimivuus standardin SFS-EN ISO 10140-5 mukaisesti.

Jälkikaiunta-ajan mahdollisen riippuvuuden saa korjattua lisäämällä ääntä heijastavia rakenteita, jolloin tilojen absorptio vähenee. Jälkikaiunta-ajan pituus voi myös vaihdella eri testi kappaleilla. R'_w ja $D'_{nT,w}$ testeillä saatiin testattua akustiikkalaboratoriossa suoritettavien testien mahdollisuudet. R_{max} arvot ovat riittävät tilaan suunniteltujen testauksien suorittamiseen, mutta sitä on mahdollista parantaa tiivistyksien ja rakenteiden muutoksilla.

Toivottavasti opinnäytetyötä voidaan hyödyntää hyvin akustoitujen rakennusten suunnittelussa ja rakentamisessa. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada akustiikkalaboratorion kokonaisuudesta hyvä käsitys ja rakentaa toimiva akustiikkalaboratorio. Mielestäni tavoitteeseen päästiin ja akustiikkalaboratoriosta saatiin tavoitteet täyttävä testauksia ajatellen.

Lähteet

- Hongisto, V. 2023. Rakennusakustiikka ja meluntorjunta.
- Karjalainen, M. 2000. Hieman akustiikkaa. Teknillinen korkeakoulu
- Kekki, T., Kuusinen, A., Kylliäinen, M. & Latvanne, P. 2017. Puukerrostalojen ääneneristys. Joensuu; Karelia-ammattikorkeakoulu.
- Kovalainen, V., Kylliäinen, M., Lahtela, T., Lietzén, J. & Talus, J. 2021. Ääneneristys puutalossa. Helsinki; Puuinfo Oy
- Kylliäinen, M. 2011. Kivitalojen ääneneristys. Helsinki; Suomen Rakennusmedia Oy.
- Kylliäinen, M., Tervo, S. & Yli-Pietilä, A. 2023. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere; Tampereen yliopisto
- MIP Electronics. Äänivuotojen paikantaminen kuuntelemalla.
<https://www.mip.fi/fi/asiakasratkaisut/melulaehteiden-skannaus/aeaenivuotojen-paikannus> 29.5.2024
- Möller, H., Peltonen, T., Penttinen, H., Riionheimo, J., Tervo, S., 2021. Rakennuksen kelluttaminen vs. studion kelluttaminen – akustikon näkökulmasta. Akustiikkapäivät 2021 s.114–119. Akustinen Seura ry.
- Rakentaja. 2022. Ääneneristys ja akustiikka - tiedätkö keskeisimmät termit?
<https://rakentaja.fi/artikkelit/%C3%A4%C3%A4neneristys-ja-akustiikka-tied%C3%A4tk%C3%B6-keskeisimm%C3%A4t-termit/>
 22.5.2024
- RT 07-10881. 2006. Huoneakustiikka. Rakennustietosäätiö RTS.
- SFS-EN ISO 717-1. 2020. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki; Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN ISO 10140-2. 2022. Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Helsinki; Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN ISO 10140-4. 2022. Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 4: Measurement procedures and requirements. Helsinki; Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN ISO 10140-2. 2022. Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 5: Requirements of test facilities and equipment. Helsinki; Suomen Standardisoimisliitto.
- SIT 05-610038. 2006. Huoneakustiikka. Rakennustietosäätiö RTS.
- Ympäristöministeriö. 2018. Ääniympäristö.

Reverberation time according to ISO 3382-2

Ordinary rooms - Engineering method

Client: Karelia

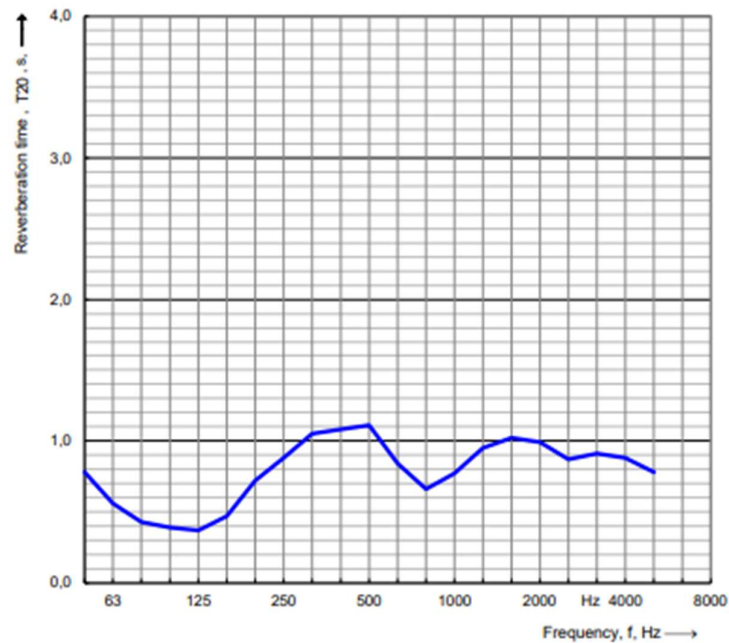
Date of test: 17.5.2024

Room identification:
Receiving Room

Remarks regarding the room situation:

Decay curves: Least-squares fit
 Noise type: Pink
 Averaging: Arithmetic
 Relative humidity: 35,0 %
 Temperature: 21,0 °C
 Barometric pressure: - kPa
 Room volume: 51,0

Frequency f [Hz]	T20 1/3 octave [s]
50	0,78
63	0,56
80	0,43
100	0,39
125	0,37
160	0,47
200	0,72
250	0,88
315	1,05
400	1,08
500	1,11
630	0,84
800	0,66
1000	0,77
1250	0,95
1600	1,02
2000	0,99
2500	0,87
3150	0,91
4000	0,88
5000	0,78
6300	
8000	



Single figure calculated by averaging T (400 Hz to 1250 Hz) according to ISO 3382-1

 $T_{\text{res}} = 0,90 \text{ s}$

Name of test institute:

No. of test report:

Date: 21.5.2024

Signature:

Reverberation time according to ISO 3382-2																																																	
Ordinary rooms - Engineering method																																																	
Client: Karelia	Date of test: 17.5.2024																																																
Room identification: Source room																																																	
Remarks regarding the room situation:																																																	
Decay curves: Least-squares fit																																																	
Noise type: Pink																																																	
Averaging: Arithmetic																																																	
Relative humidity: 35,0																																																	
Temperature: 21,0																																																	
Barometric pressure: -																																																	
Room volume: 65,4																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequency f [Hz]</th> <th>T20 1/3 octave [s]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td>1,57</td></tr> <tr><td>63</td><td>0,68</td></tr> <tr><td>80</td><td>0,49</td></tr> <tr><td>100</td><td>0,46</td></tr> <tr><td>125</td><td>0,35</td></tr> <tr><td>160</td><td>0,51</td></tr> <tr><td>200</td><td>0,78</td></tr> <tr><td>250</td><td>0,96</td></tr> <tr><td>315</td><td>1,13</td></tr> <tr><td>400</td><td>1,13</td></tr> <tr><td>500</td><td>1,10</td></tr> <tr><td>630</td><td>0,80</td></tr> <tr><td>800</td><td>0,71</td></tr> <tr><td>1000</td><td>0,92</td></tr> <tr><td>1250</td><td>0,97</td></tr> <tr><td>1600</td><td>1,01</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1,02</td></tr> <tr><td>2500</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>3150</td><td>0,93</td></tr> <tr><td>4000</td><td>0,93</td></tr> <tr><td>5000</td><td>0,82</td></tr> <tr><td>6300</td><td></td></tr> <tr><td>8000</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Frequency f [Hz]	T20 1/3 octave [s]	50	1,57	63	0,68	80	0,49	100	0,46	125	0,35	160	0,51	200	0,78	250	0,96	315	1,13	400	1,13	500	1,10	630	0,80	800	0,71	1000	0,92	1250	0,97	1600	1,01	2000	1,02	2500	0,95	3150	0,93	4000	0,93	5000	0,82	6300		8000		
Frequency f [Hz]	T20 1/3 octave [s]																																																
50	1,57																																																
63	0,68																																																
80	0,49																																																
100	0,46																																																
125	0,35																																																
160	0,51																																																
200	0,78																																																
250	0,96																																																
315	1,13																																																
400	1,13																																																
500	1,10																																																
630	0,80																																																
800	0,71																																																
1000	0,92																																																
1250	0,97																																																
1600	1,01																																																
2000	1,02																																																
2500	0,95																																																
3150	0,93																																																
4000	0,93																																																
5000	0,82																																																
6300																																																	
8000																																																	
<p>Single figure calculated by averaging T (400 Hz to 1250 Hz) according to ISO 3382-1</p> <p>$T_{\text{red}} = 0,94 \text{ s}$</p>																																																	
Name of test institute:																																																	
No. of test report:																																																	
Date: 21.5.2024	Signature:																																																

Apparent sound reduction index according to ISO 16283-1

Field measurements of airborne sound insulation between rooms

Client: Karelia

Date of test: 17.5.2024

Description:

Object: Akustiikkalaboratorion testausaukon väliseinä

Source room:

Receiving room:

Condition:

Condition:

Type:

Type:

Location:

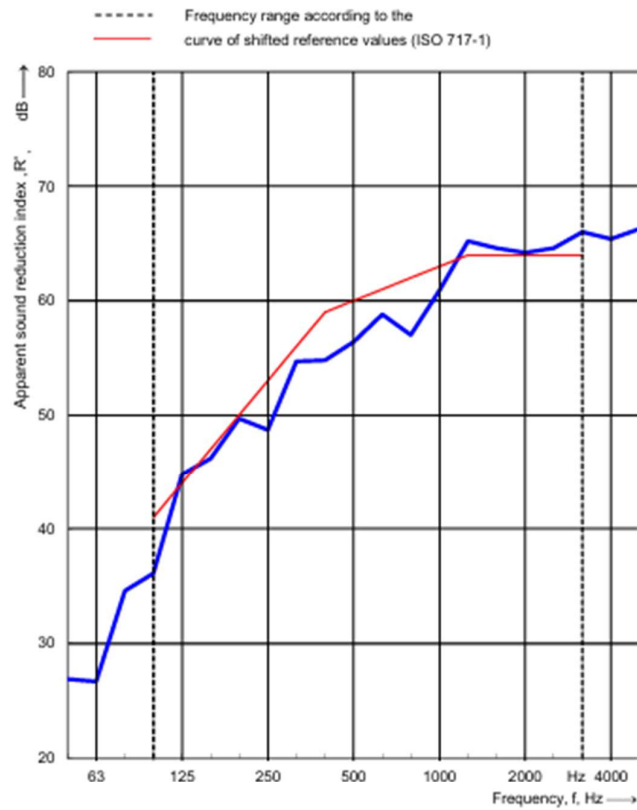
Location:

Area of common partition: 9,60 m²

Source room volume: 65 m³

Receiving room volume: 51 m³

Frequency f [Hz]	R' 1/3 octave [dB]
50	26,9
63	26,7
80	34,6
100	36,1
125	44,8
160	46,2
200	49,7
250	48,7
315	54,7
400	54,8
500	56,4
630	58,8
800	57,0
1000	60,9
1250	65,2
1600	64,6
2000	64,2
2500	64,6
3150	66,0
4000	65,4
5000	66,3



Rating according to ISO 717-1

$R'_w (C; C_v) = 60 (-2 ; -7)$ dB

Evaluation based on field measurement results obtained
in one-third-octave bands by an engineering method.

$C_{50-3150} = -4$ dB $C_{50-5000} = -3$ dB $C_{100-5000} = -1$ dB

$C_{r,50-3150} = -14$ dB $C_{r,50-5000} = -14$ dB $C_{r,100-5000} = -7$ dB

Name of test institute:

No. of test report:

Date: 22.5.2024

Signature:

Standardized level difference according to ISO 16283-1

Field measurements of airborne sound insulation between rooms

Client: Karelia

Date of test: 17.5.2024

Description:

Object: Akustiikkalaboration testausaukon väliseinä

Source room:

Receiving room:

Condition:

Condition:

Type:

Type:

Location:

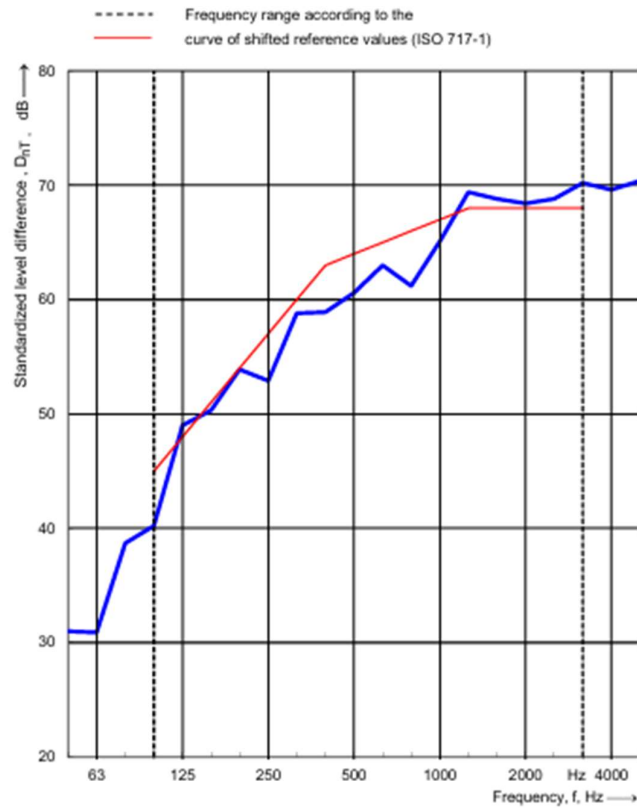
Location:

Area of common partition: 9,60 m²

Source room volume: 65 m³

Receiving room volume: 51 m³

Frequency f [Hz]	D _{nT} 1/3 octave [dB]
50	31,0
63	30,9
80	38,7
100	40,2
125	49,0
160	50,3
200	53,9
250	52,9
315	58,8
400	58,9
500	60,6
630	63,0
800	61,2
1000	65,1
1250	69,4
1600	68,8
2000	68,4
2500	68,8
3150	70,2
4000	69,6
5000	70,4



Rating according to ISO 717-1

$D_{nT,W}(C;C_T) = 64$ (-2 ; -7) dB

Evaluation based on field measurement results obtained
in one-third-octave bands by an engineering method.

$C_{20-3150} = -4$ dB $C_{50-5000} = -3$ dB $C_{100-5000} = -1$ dB

$C_{0,50-3150} = -14$ dB $C_{0,50-5000} = -14$ dB $C_{0,100-5000} = -7$ dB

Name of test institute:

No. of test report:

Date: 17.5.2024

Signature: