

Hannu Ikonen

MITTAUSTIETOKANNAN KEHITYS JA HYÖDYNTÄMINEN AKUSTIIKKASUUNNITTELUSSA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: TkT Mikko Kylliäinen
Tarkastaja: DI Jesse Lietzén
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Hannu Ikonen: Mittaustietokannan kehitys ja hyödyntäminen akustiikkasuunnittelussa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan Diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Kesäkuu 2023

Tämä tutkimus on tehty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:lle. Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää mittaustietokantaa ja luoda tätä mittaustietokantaa hyödyntävä työkalu käyttäen Power BI ohjelmistoa. Tarve mittaustietokantatyökalulle on muodostunut akustiikkayksikössä tapahtuvan jatkuvan kehityksen ja tutkimustyön pohjalta.

Akustiikkasuunnittelu osana rakennesuunnittelun toimialaa eroaa muusta rakennesuunnittelusta siten, että akustiikkasuunnitteluun liittyy paljon mittaustoimintaa. Mittaustoiminnasta saatua mittaustietoa on tarpeen hyödyntää akustiikkasuunnittelijan suunnittelutyön tukena.

Työn teoriaosassa tutkittiin eri mittaustiedon muodostumista sekä niiden käsittelyyn liittyviä laskennallisia keinoja. Tämän yhteydessä tutustuttiin akustiikkamittaustoimintaan liittyviin standardeihin. Lisäksi tutustuttiin kirjallisuudesta löytyvään tutkimusaineistoon mittaustietokantojen hyödyntämisessä akustiikassa.

Diplomityön tuloksena on käyttökelpoinen työkalu suunnittelijoiden jokapäiväiseen käyttöön tarkastus- ja lähtötietotyökaluksi. Mittaustietokanta on muutettu NoSQL tietokannaksi. Tietokanta on helposti laajennettavissa. Työkalun avulla voidaan saada käsitys eri rakenteiden ääneneristyksestä. Työkalun avulla voidaan visualisoida suuria määriä mittaustietoa. Ohjelmisto osaa laskea eri akustiset mittayksiköt sekä analysoida tuloksia tilastollisten menetelmien avulla.

Loppupäätelmänä mittaustietokantatyökalu täyttää sille asetetut tavoitteet. Mittaustietokantaa voidaan hyödyntää suunnittelun tukena. Power BI soveltuu akustiikkamittaustiedon esittämiseen. Mittaustietokantaa sekä mittaustietokantatyökalua suositellaan hyödynnettäväksi myös jatkotutkimuksissa.

Avainsanat: mittaustietokanta, NoSQL, Power BI, akustiikka, akustiset mittaukset, ilmääänitasoeroluku, askeläänitasoluku

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Hannu Ikonen: Developing and use of acoustic measurement database in acoustic design

Master's Thesis

Tampere University

Master Of Science, Civil Engineering

June 2023

This research was made for A-Insinöörit Suunnittelu Oy. The aim of this thesis was to develop the measurement database and create a tool which uses the measurement database using the Power BI software. The research was developed to answer a demand arising from the continuous research and development needs in the company.

Acoustic design as a part of structural engineering differs from other structural engineering disciplines because it contains a lot of measurement activities. It is necessary to utilize the data from said measurements in order to support the work of an acoustic designer

The literary review focused on the formation of information and data in measurements and the computational process of measurement data. Furthermore, research was done into findings in literature regarding to methods of using measurement databases in acoustics.

The outcome of this thesis is an inspecting tool and initial data source for acoustic designers for everyday use. The measurement database has been transformed into NoSQL database. The database is easily expandable. One can get an insight into structural sound insulation with the tool. The tool can visualize vast amounts of measurement data. The software can calculate different acoustical base units and analyze results using statistical methods.

In conclusion measurement database tool fulfills the goals set in the brief. The measurement database can be utilized in acoustical design. Power BI can be used to visualize acoustical measurement information. Measurement database and the tool is recommended to be used in future research.

Keywords: Measurements database, NoSQL, Power BI, acoustics, acoustic measurements, airborne sound insulation, impact sound insulation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Kiitos A-Insinööreille mahdollisuudesta tämän diplomityön aiheesta ja luottamuksesta osaamiseeni aiheen parissa. Kiitos ohjaajilleni Mikko Kylliäiselle sekä Jesse Lietzénille kaikesta avusta ja äärettömästä tuestanne tämän työn parissa. Kiitos Antti Mikkilälle ja Sakari Tervolle ohjeistanne ja kehitysehdotuksistanne työn aikana. Kiitos ystävälleni ja työkaverilleni Ville Kovalaiselle, jolta sain äärettömästi tukea ja vinkkejä ohjelmien käyttöön ja kehittämiseen työn aikana. Kiitos ystävilleni tuesta ja kaikesta ilosta, jonka olette kanssani jakaneet.

Lopuksi kiitän vaimoani Stiinaa, lapsiani Eliasta ja Siljaa sekä sukulaisiani, joiden tuki on kannatellut minua näiden vuosien varrella.

Tampereella, 21.6.2023

Hannu Ikonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TIETOKANNAT AKUSTIIKKASUUNNITTELUSSA	3
2.1	Tietokannat	3
2.2	Raportointiohjelmistot	7
2.3	Empiirinen mallintaminen	8
2.4	Tietokanta suunnittelun tukena	10
3.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO	12
3.1	Äänen kulkeutuminen tilojen välillä	12
3.2	Akustiset mittaukset	17
3.2.1	Äänitasoeromittaukset	17
3.2.2	Askeläänitasomittaukset	18
3.2.3	Taustäänitasomittaukset	19
3.2.4	Jälkikaiunta-ajan mittaukset	19
3.3	Mittausaineisto ja mittauksista kerättävä tieto	20
3.4	Tallentaminen tietokantaan	21
3.5	Mittaustietokanta	22
3.6	Tilastollinen käsittely	23
3.7	Työkalu ja käyttöliittymä	25
4.	TIETOKANTA JA TIETOKANTATYÖKALU	27
4.1	Mittaustietokantatyökalu	27
4.2	Betoniseinän ilmaääneneristävyys	31
4.3	Betonivälipohjan askelääneneristävyys	37
4.3.1	ontelolaatta ja sen pintarakenteet	37
4.3.2	Pintamateriaalina parketti	42
4.3.3	Pintamateriaalina laminaatti	44
5.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	47
5.1	Mittaustietokantatyökalu	47
5.2	Mittaustietokantatyökalun ongelmat	48

5.3	Tietokantatyökalun edut	48
5.4	Jatkotutkimusaiheet	49
LÄHTEET	50

LYHENTEET JA MERKINNÄT

SQL	Structured Query Language
NoSQL	Not Only SQL
C	Spektripainotusermi [dB]
C_{tr}	Ilmääneneristystä kuvaavan mittaluvun spektripainotusermi liikennemelulle (traffic) [dB]
C_i	Askeläänitason spektripainotusermi (impact) [dB]
$C_{i,50-2500}$	Askeläänitason spektripainotusermi (impact) taajuusalueelle 50-2500 Hz [dB]
D	Äänitasoero [dB]
D_w	Äänitasoeroluku [dB]
D_n	10 m ² vertailuabsorptioalaan normalisoitu äänitasoero [dB]
$D_{n,w}$	10 m ² vertailuabsorptioalaan normalisoitu äänitasoeroluku [dB]
D_{nT}	0,5 s vertailujälkikaiunta-aikaan standardisoitu äänitasoero [dB]
$D_{nT,w}$	0,5 s vertailujälkikaiunta-aikaan standardisoitu äänitasoeroluku [dB]
L'_n	10 m ² vertailuabsorptioalaan normalisoitu askeläänitaso [dB]
$L'_{n,w}$	10 m ² vertailuabsorptioalaan normalisoitu askeläänitasoluku [dB]
L'_{nT}	0,5 s vertailujälkikaiunta-aikaan standardisoitu askeläänitaso [dB]
$L'_{nT,w}$	0,5 s vertailujälkikaiunta-aikaan standardisoitu askeläänitasoluku [dB]
L_1	Äänitaso lähetysuoneessa [dB]
L_2	Äänitaso vastaanottohuoneessa [dB]
R	Ilmääneneristys laboratorio-olosuhteissa [dB], joka kuvaa äänitehon siirtymistä tilasta toiseen
R'	Ilmääneneristys kenttäolosuhteissa [dB], joka kuvaa äänitehon siirtymistä tilasta toiseen
R'_w	Ilmääneneristysluku [dB]
JSON	JavaScript Object Notation (Ecma International, 2013) ja on standardoitu tapa luoda järjestettyjä listoja (array) aineistosta.
CSV	Comma Separated Values, yksinkertainen tietokantatyyppe
DBMS	DataBase Management System, tietokannan hallintajärjestelmä
API	Application Programming Interface, eli ohjelmointirajapinta, jonka avulla eri sovellukset voivat jakaa tietoa tai toiminnallisuutta toistensa kanssa
REST API	Representational Stateless Transfer web service. Arkkitehtuurimalli, jossa internetissä sijaitsevia resursseja voidaan kutsua tilattomasti esimerkiksi HTTP:n yli HTTP-keinoja käyttäen. (Fielding, 2000)

1. JOHDANTO

Akustiikkasuunnittelussa voidaan käyttää erilaisia menetelmiä rakennusosien ja tilojen välisen ääneneristävyyden laskemiseen. Laskentamenetelmiä on esimerkiksi parametriset mallit, analyyttiset mallit sekä numeeriset mallit. Parametrisiä malleja on esitetty standardissa ISO 12354 (2017) sekä tutkimuskirjallisuudessa ja käsikirjoissa (esim. Hopkins (2007), Rindel (2017) tai Kylliäinen, et al., (2023)). Parametristä laskentametodia on ilmaäänelle selvitetty muun muassa Jani Riitakankaan opinnäytetyössä (Riitakangas, 2020). Latvanne, et al (2019) on vastaavasti selvittänyt parametristä laskentamallia puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin. Rindel (2017) ja Hopkins (2007) ovat tutkineet analyyttisiä malleja ilmaääneneristyksen mallintamisessa. Analyyttisten mallien rajoitteena on, että ne muodostuvat matemaattisesti monimutkaisiksi tai mahdottomiksi jo yksinkertaistenkin rakenteiden tapauksissa. Lietzen et al. (2021) mukaan numeerisen mallintamisen etuna on, että rakenteiden geometria ja liitokset ympäröiviin rakenteisiin voidaan mallintaa eksaktisti ilman analyyttisten mallien rajoitteita. Numeeristen mallien käytettävyyteen vaikuttaa kuitenkin niiden vaatima laskentakapasiteetti.

Laskentatulosten tarkkuus on keskeinen tekijä laskennallisiin tarkasteluihin perustuvassa suunnittelussa riippumatta käytetystä menetelmästä ja suunnittelualasta. Akustiikkasuunnittelu eroaa esimerkiksi rakennesuunnittelusta siten, että akustiikkasuunnitteluun liittyen muodostuu paljon mittausdataa esimerkiksi peruskorjattavien rakennusten lähtötietomittauksista ja valmistuneiden rakennusten tarkastusmittauksista. Tätä mittausdataa on mahdollista hyödyntää suunnittelutyössä yhtenä vaihtoehtoisena ja tehokkaana keinona arvioida tietyn rakennusosan ääneneristävyyttä tai tilojen välistä ääneneristävyyttä. Vaihtoehtoisesti parametrisen tai analyyttisen laskennan tulosta voitaisiin korjata empiiristen laskentatulosten avulla (Olafsen, 2016), jolloin voidaan saavuttaa tarkempia laskentatuloksia. Toinen mittausdatan mahdollinen käyttötarkoitus voisi olla laskentatulosten arviointi ja laskentamenetelmien validointi, kuten Riitakangas on opinnäytetyössään tehnyt (Riitakangas, 2020).

Akustiikkasuunnitteluun tarvitaan paljon ohjaavaa tietoa. Akustiikkasuunnittelija ei pysty aistimalla määrittämään tarkasti äänenpaineita tai äänitasoja, vaan todelliset äänitasot

selviävät vain mittaamalla. Tästä syystä suunnittelija tarvitsee sekä fyysisiä että laskennallisia työkaluja. Rakennusakustiikassa tarkastellaan mittareina esimerkiksi tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä. Tämän lisäksi rakennusakustiikassa tutkitaan tilojen välistä askelääneneristävyyttä. Huoneakustiikassa tarkastellaan tilan jälkikaiunta-aikaa. Herätteinä tiloissa toimivat askel- ja ilmaäännet, laitteiden ja koneiden tuottama ääni, talotekniikan äänet sekä rakennuksen ulkopuolelta tuleva ääni. Suunnittelutyössä tulee huomioida myös rakennuksesta ulos kulkeutuvaa ääni (Kylliäinen, et al., 2023)

Mittaustietokantaa A-Insinöörien akustiikkayksikössä on kerätty vuodesta 2016. Tietokantaa alettiin keräämään, jotta mahdollistetaan mittaustietokannan tulosten vertailu. Tätä vertailua varten mittausdata haluttiin kerätä yhteen paikkaan automatisoidusti. Mittaustietokanta sai tällöin ensimmäisen muotonsa. Mittaustietokannassa sijaitsevat tiedot koostuvat mittaustapahtumassa kerättävistä tiedoista, sekä tulosten laskennallisista arvoista. Tämän lisäksi tietokantaan on ladattu mittarista saadut arvot, eli raakadata. Mittaustietokannan tavoitteena on mahdollistaa tiedon jatkokäsittely sekä jatkotutkimukset. Myös tiedon kasaaminen yhteen paikkaan mahdollistaa laskelmien uudelleenlaskennan, esimerkiksi standardien muuttuessa. Tämä diplomityö on rajattu koskemaan vain ilma- ja askelääneneristysmittauksia mittaustietokannassa.

Työn tavoitteena on kehittää mittaustietokantaa hyödyntävä suunnittelua tukeva mittaustietokantatyökalu, jolla tietokannassa esitettyä dataa voidaan analysoida ja saada riittävällä tarkkuudella olevia vertailuarvoja suunnittelun tueksi. Ensimmäisenä alitavoitteena on tarpeellista selvittää, millä tavoin yrityksen käytössä olevaa mittaustietokantaa on tarpeen kehittää, jotta sitä voidaan hyödyntää suunnittelutyössä. Toisena alitavoitteena selvitetään, voidaanko mittaustietokantaan liittyviä tekijöitä kehittää siten, että mittaustietokantaan lisättävän tiedon laatu paranee. Kolmantena alitavoitteena on selvittää voiko työkalulla muodostaa laskennallista tietoa suunnittelua varten olemassa olevan tiedon perusteella.

2. TIETOKANNAT

AKUSTIIKKASUUNNITTELUSSA

2.1 Tietokannat

Tietokanta toimii tietovarastona, jonne haluttua dataa kerätään ja tallennetaan. Kielitoimiston määritelmän mukaan tietokanta on määräkohdetta koskevien tietojen kokoelma (Kielitoimisto, 2022). Tietokantoja on erilaisia. Yksinkertaisimmillaan tietokanta voi olla paperilappu, johon on kerätty tärkeitä tietoja. Tietokoneiden kiintolevyt toimivat omanlaisena tietovarastona, mutta siitä tehtävät tietokantahaut ovat hankalia, mikäli tietokannalle ei ole olemassa indeksointia. Tietokanta on jäsenelty tietovarasto, jossa jokaiselle tietueelle on annettu arvoja. Tietokannassa sijaitsevat tiedot voivat sisältää suuren joukon dataa (Beaulieu, 2020).

Relaatiotietomallissa tietueet voivat olla yhteydessä muihin tietueisiin yhteisen tiedon, avaintietueiden välityksellä. Osa tiedoista voi olla uniikkeja, jolloin ne voidaan merkitä tietokantaan uniikeiksi tietueiksi (Beaulieu, 2020). Tietokantaan muodostetaan myös pääavain sekä tietokannan ulkopuoliset avaimet. Avaimien avulla viitataan tietoihin eri tietokannoissa. (Beaulieu, 2020).

Tietokannat ovat oleellinen osa mitä tahansa liiketoimintaa. Tietokantoihin on kerätty tietoa eri lähteistä. Tietokantoja rakennetaan ja luodaan tiedon keräämiseen yhteen paikkaan säilytettäväksi jatkokäsittelyä varten. Tietokannasta voidaan hakea jo tehtyjä tuloksia ja analysoida niitä. (Brownley, 2016) Tietokanta pohjimmiltaan on kokoelma tietoa, jota on kerätty usean vuoden ajan. Tietokantaa hallitaan käyttämällä tietokannan hallintajärjestelmää. Tietokantoja ovat hierarkkinen tietokanta, verkkotietokannat sekä relaatiotietokanta. Näistä tunnetuin ja käytetyin tietokantamalli on relaatiotietokanta ja niistä erityisesti SQL-relaatiotietokanta. SQL on lyhenne termistä Structured Query Language (Ullman & Widom, 2014). SQL-tietokannan rinnalle on kehittynyt myös uudempia tietokantajärjestelmiä.

Tietokantajärjestelmiä voi olla strukturoituja ja ei-strukturoituja. Strukturointi tarkoittaa dataa, joka on ennakkoon määritelty ja muotoiltu sarjarakenteeksi ennen kuin se on sijoitettu tiedonsäilytysjärjestelmään. Strukturoimaton tai toisin sanoen ei-strukturoitu data on tietoa, joka on tallennettu alkuperäismuodossaan eikä sitä prosessoida ennen kuin se otetaan käyttöön (Talend, 2023). Strukturoitua tietokantajärjestelmiä ovat

hierarkkiset tietokannat, verkkotietokannat, objektorientoituneet tietokannat, relaatiotietokannat ja NoSQL-tietokannat.

Hierarkkinen tietokantamalli on vanhin tietojärjestelmiin kehitetyistä tietokantamalleista. Hierarkkinen malli muistuttaa ylösalaisin olevaa puuta, jossa ylimpänä on juurihierarkia ja alempana sijaitsevat tietueet liittyvät juureen isäntä - lapsi mallin mukaisesti. Hierarkkista mallia käytetään useimpien tietokoneiden käyttöjärjestelmissä tiedostojen tallennukseen. Hierarkkisen mallin ongelmina oli sen rajoitus toimia vain fyysisellä tietokantatasolla. (Ullman & Widom, 2014) Tämä tarkoittaa, että tietokanta perustuu vain sen fyysiseen sijaintiin. Tällöin tietokanta oli yksi fyysinen tallennuskapasiteetti kuten kiintolevy. Tämä käytännössä esti ohjelmoijien mahdollisuuden rakentaa suoritettavia ohjelmia suoraan tietokantaan.

Verkkotietokanta luotiin ratkaisemaan hierarkkisen tietokantamallin ongelmia. Verkkotietokanta on hierarkkinen kuten varsinainen hierarkkinen tietokantamalli, mutta yhdellä tietueella oli mahdollista olla useampia isäntiä. Tämä malli on ollut väliaskeleena ennen modernin relaatiotietomallin syntyä ja käyttöönottoa. (Ullman & Widom, 2014)

Tietokantatauluja määrittää skeema, joka muodostetaan taulukkoa luodessa. skeema määrittelee taulukkojen ominaisuudet. Tällöin taulukon sarakkeilla on tunnistettava nimi, on määritelty jokaisen tiedon tyyppi, niiden sallitut arvot ja muut rajoitteet, uniikit avaimet, pää- ja viiteavaimet sekä mahdolliset yhteydet muihin tauluihin. (Grod James R., 1999). Skeemaa luotaessa määritellään yhteydet muihin tauluihin, taulun sarakkeet sekä taulun primääriavaimet sekä ulkopuolisten taulujen avaimet. Relaatiotietokannassa kuten SQL:ssä skeema muodostetaan tietokannan luonnin yhteydessä, eikä siihen tehdä muutoksia. (Ullman & Widom, 2014) Tietokantajärjestelmän skaalautuvuudella tarkoitetaan tietokannan kykyä suurentaa tai pienentää tietokannan samanaikaista käyttöä ilman, että sillä on vaikutusta järjestelmän käyttöön (Grod James R., 1999). Käytännössä tietokantataulun skeeman muuttaminen vaatii uuden taulun luomista ja siten relaatiotietokanta ei ole hyvin skaalautuva. Helposti skaalautuva tietokanta on esimerkiksi NoSQL-tietokanta, jossa varsinaista skeemaa ei ole, vaan tauluun voidaan lisätä sarakkeita vapaasti.

Tietokantajärjestelmässä tieto voi olla tekstiä tai numeroita, mutta myös tiedostoja. Yksinkertaisia pienellä vaivalla toteutettavia tietokantatyyppejä ovat Microsoft Excel ja CSV-tietokannat. Excel-tietokannassa käyttäjä pääsee vapaasti muovaamaan tietokannalleen muodon, eli sijoittamaan tiedon omaan soluun eli tietueeseen. Excel-tietokanta tallentaa tietueen arvon lisäksi paljon solun muotoiluun ja arvoon liittyvää

metadataa, joka kasvattaa tietueen kokoa. CSV-tietomuodossa data on luettavissa tekstieditorilla. Tieto tallennetaan tyhjään tekstitiedostoon siten, että kunkin sarakkeen tiedot eritellään välimerkein. Eri rivien tiedot koskevat samaa tietuetta eli syötettyä tietoa. (Brownley, 2016)

Eräs vaihtoehtoinen tietokantajärjestelmä on 'ei-relaatiotietokanta' NoSQL. Näistä NoSQL-tietokannoista tunnetuimpia on MongoDB, Apache Cassandra ja Amazon DynamoDB (Harrison, 2015). NoSQL tietokannat eivät ole relaatiotietokantamalliin sidottuja, mutta hyödyntävät silti relaatiotietokannan teknologiaa. NoSQL tietokannat ovat rakennettu suuria ja laajoja tietomääriä varten, ilman SQL-tietokantojen rakenteen rajoituksia. Pilvipalveluissa NoSQL-tietokannat ovat yleistyneet (Harrison, 2015) ja niissä halutaan hyödyntää NoSQL tietokannan mahdollisuuksia laajentaa tietokantaa vapaasti. NoSQL-tietokannat käyttävät shared-nothing-arkkitehtuuria, jolloin tieto ei sijaitse vain yhdessä paikassa, vaan on jaettu useammalle palvelimelle. NoSQL-tietokannat ovat jaettu neljään pääluokkaan. Pääluokkia ovat avain-arvopari-tietokanta, sarake-perhe-tietokanta, graafitietokanta ja dokumenttitietokanta. Taulukossa 1 Taulukko 1 on esitetty vertailu hierarkkiseen relaatiotietokantaan perustuvan SQL-tietokannan ja NoSQL-tietokannan välillä.

Taulukko 1 SQL-NoSQL vertailu mukailtu (Beaulieu, 2020)

	SQL	NoSQL
Skeema	Jäykkä, ennalta määrätty	Joustava, dynaaminen
Skaalautuvuus	Heikko	Suuri
Skaalautuvuussuunta	Pysty	Vaaka
Sijainti	Yhdessä paikassa	Jaettu sijainti
Tietokantatyypit	Relaatiotietokanta, OLAP-tietokanta	avain-arvopari-tietokanta sarake-perhe-tietokanta graafitietokanta dokumenttitietokanta

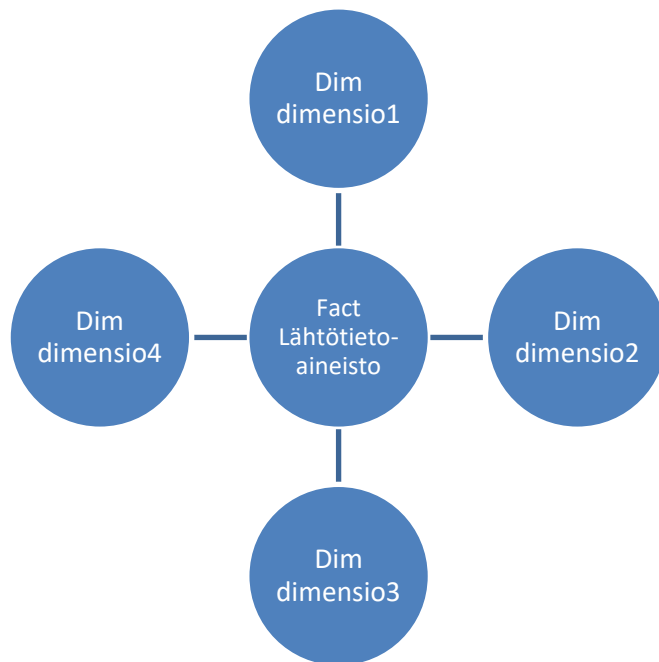
Tietokantaa kerätään ja hyödynnetään tutkimuksien pohja-aineistona, jolloin tietokannasta haetaan johdonmukaisuuksia edeltä annetun teorian mukaan. Tähän tutkimukseen voidaan hyödyntää tilastollisen analyysin keinoja. Kerätyllä tietokannalla ja siten muodostetulla aineistolla voi olla myös kaupallinen merkitys. Tietokantoja ja pääsyä niissä sijaitsevaan aineistoon kaupataan. On olemassa myös avoimia tietokantoja, (Digi- ja väestövirasto, 2022) jotka ovat kaikille käytettävissä. Avoimen datan tietokannassa on esimerkiksi tiedot suomen liikenneverkoista, kaavoituksesta sekä maankäytöstä. Aineistoa palveluun tuottaa muun muassa Väylävirasto ja Tilastokeskus.

Avointa dataa on hyödynnetty esimerkiksi Kouvola-Kotka-Hamina-radon tärinäselvityksessä. (Oksanen & Huhtala, 2023). Tutkimuksessa hyödynnettiin avointa karttatietopalvelua sekä geologian tutkimuskeskuksen avointa maaperätietokantaa. Tutkimuksessa mallinnettiin junaliikenteestä aiheutuvaa tärinää suuressa mittakaavassa. Työtä varten rakennetussa työkalussa hyödynnetään avointa tietokantaa algoritmiavusteisesti. Menetelmä mahdollisti hankealueen kaikkien kiinteistöjen kattavan tärinälaskennan toteuttamisen tehokkaasti.

Mittauksista koostettua tietokantaa on hyödynnetty myös ympäristöministeriön ohjeessa Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mittaustulosten perusteella (Lietzén & Kylliäinen, 2014). Ohjeessa selvitettiin vanhojen mittaustulosten perusteella huoneistojen ääneneristävyyttä. Tätä varten mittaustuloksia kerättiin eri lähteistä ja ne koottiin tietokannaksi. Raportissa on esitetty kerättyjen mittaustulosten määrät eri vuosikymmeniltä sekä niistä saatuja tuloksia. Tämän lisäksi ohjeessa tarkennettiin rakennuksen akustisten ääneneristysvaatimusten kehittyminen vuosien 1920-2008 aikana.

Dimensiomallit relaatiotietokantajärjestelmässä ovat tarkoitettu nopeuttamaan tietokantajärjestelmästä tehtäviä hakuja. Tällöin relaatiot dimensiotaulujen välillä ovat yksinkertaisia ja sidottuja toisiinsa viiteavaimin. Eräs tunnettu malli dimensiomalli on nimeltään tähtiskeema, koska ne muistuttavat rakenteeltaan tähdentapaista rakennetta. Ralph Kimball esitteli tähtiskeeman kirjassaan DW/BI The Data Warehouse toolkit (2013). Tähtimallin periaatteena on luoda järjestelmä, jossa faktatietokannat jaetaan pienempiin kokonaisuuksiin eli dimensiotietokantoihin ja siten parannetaan ohjelmiston suorituskykyä. Tämä nopeuttaa ohjelmistoa varsinkin isojen mallien tapauksessa, jossa faktamalli (tietokanta) on suuri ja dimensiomallit pieniä. (Kimball & Ross, 2013) Kuvassa 1 on esitetty tähtimallin periaate.

Kimball & Ross (Kimball & Ross, 2013) Mukaan vaihtoehtoinen toteutustapa DataWarehouse / Business Intelligence DW/BI järjestelmässä tähtimallille on OLAP-kuutio. OLAP-kuutio eli On-Line Analytical Processing soveltuu kompleksisempiin tallennusrakenteisiin.



Kuva 1 Tähtimalli

2.2 Raportointiohjelmistot

Power BI on Microsoft Oy:n raportointi- ja analysointipalvelu liiketoimintatiedon esittämiseen. Power BI voidaan yhdistää mihin tahansa datalähteeseen. Microsoft Power BI Desktop, Microsoft Power BI App ja Microsoft Power BI mobile ovat Microsoft Oy:n brändinimiä ja osa Power BI- palvelua. (Microsoft, 2023).

Power BI koostuu kahdesta kokonaisuudesta: Microsoft Power Query ja Power BI -sovelluksista. Power Query toimii tiedonhakutyökaluna, jolla voidaan muodostaa yhteys moniin eri tietolähteisiin. Tietolähteistä saataviin tietoihin voidaan Power Queryssa tehdä muutoksia, kuten lisätä ja poistaa tietoja tai suorittaa laskutoimituksia saatujen tietojen perusteella. Power BI toimii Power Queryn kanssa yhdessä saumattomasti ja lisää tähän tehokkaan visualisointi- ja suodatustyökalut.

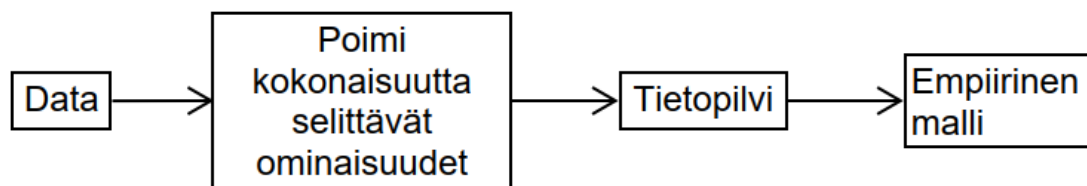
Power BI:ssa ohjelmointikielenä on DAX. DAX on luotu erityisesti käsittelemään datamalleja kaavojen ja lausekkeiden avulla. DAX:ia käytetään muissakin Microsoftin

tuotteissa kuten Microsoft Analysis Services ja Microsoft Power Pivot for Excel. Power Queryssa tietoja suodatetaan M-kaavakielen avulla. M-kaavakieli on funktionaalinen, kirjainkoon huomioon ottava ohjelmointikieli.

2.3 Empiirinen mallintaminen

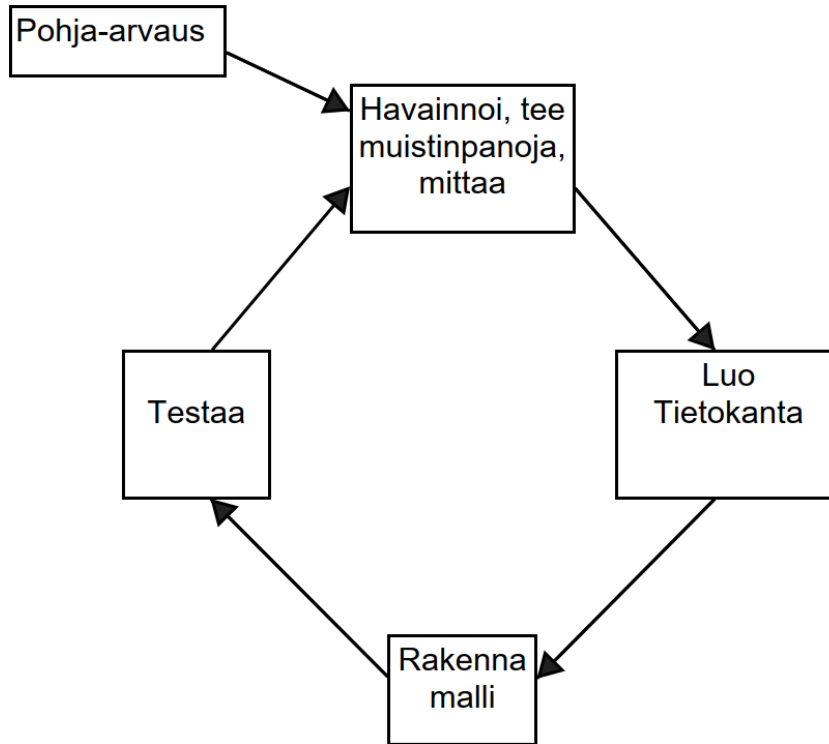
Empiirinen mallintaminen on ilmiön tai asian esittämistä havaintojen pohjalta. James Thompson esittää kirjassaan *Empirical Model Building* (2011) erilaisia tapoja mallintaa todellisuutta. Nämä mallit perustuvat erilaisiin teorioihin. Näistä malleista esimerkkeinä on normaalijakaumaan perustuva tilastollinen analyysi ja Monte-Carlo -menetelmä (Thompson, 2011). Monte Carlo -menetelmä on numeerinen menetelmä, jota käytetään esimerkiksi määrittämään jonkin monesta muuttujasta riippuvan suureen epävarmuutta ja jakaumaa, kun analyttisen epävarmuuslausekkeen muodostaminen on mahdotonta (Pooneh, et al., 2019). Akustiikassa sitä on käytetty esimerkiksi vertailukäyrällä laskettavien ääneneristävyyden mittalukujen epävarmuustarkasteluihin (Hopkins, 2007).

Empiirisessä mallintamisessa käytettävä menetelmä valikoidaan aineiston mukaisesti. Empiirisen mallintamisen prosessissa kerätään dataa ja havaintoja käyttäytymisestä. Tästä syntyy uusi tietopilvi, jonka perusteella saadaan luotua empiirinen malli. Tästä tietopilvestä poimitaan kokonaisuutta parhaiten selittävät tiedot käyttämällä tilastollisia menetelmiä, sovitteita, regressioanalyysia ja vertailemalla niiden sijoittumista tietopilveen. Empiirisen mallintamisen prosessi on esitetty kuvassa 2 (Thompson, 2011).



Kuva 2 Yleinen empiirisen mallintamisen malli, mukailtu (Thompson, 2011)

Sigmund Olafsen käsitteli väitöskirjassaan *Indoor Noise From Urban Railbound Transport* (2016) empiiristä mallinnusta. Olafsenin mukaan empiirisen mallinnuksen prosessi on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3 Empiirisen mallintamisen periaate, mukailtu (Olafsen, 2016)

Kuvasta 3 voidaan havaita, että pohja-arvauksen jälkeen prosessissa toistetaan kohtia 2-5 järjestyksessä, kunnes saavutetaan lopputulos. Sigmund Olafsenin väitöskirjassaan (2016) esittämää prosessia soveltamalla voidaan saavuttaa esimerkiksi seuraavanlainen kokonaisuus:

1. tehdään ääneneristysmittauksia kenttäolosuhteissa
2. kenttämittauksissa havaitaan, että mittauksia olisi hyvä kerätä vertailua varten
3. kaikki kenttämittaukset kerätään mittaustietokantaan
4. mallinnetaan ääneneristysmittausten tuloksista tilastollista mallia jatkuvasti päivittyvän mittaustietokannan avulla
5. analysoidaan tuloksia ja lasketaan mittaustuloksista esimerkiksi sovite tai muu mallinnus. Tuloksia tarkennetaan muilla teoreettisilla tiedoilla, vain jos ne tuottaa lisää tarkkuutta laskentaan

Periaate on siis hyvin samantapainen kuin Thompson (2011) esittää. Empiirisen mallinnuksen menetelmää voidaan hyödyntää vain olemassa olevan tiedon mallintamiseen. Sitä ei voida soveltaa uusiin tai tuntemattomiin rakenteisiin (Olafsen, 2016). Uusien rakenteiden mallintamista varten voidaan hyödyntää tekoälyä empiirisen aineiston pohjalta. Eddin et al. (2022) tutki neuroverkkojen hyödyntämistä puisten välipohjarakenteiden ääneneristyksen mallintamisessa. Tutkimuksen mukaan koneoppimisen keinoin voidaan riittävän laajan tietokanta-aineiston avulla ennustaa uusien rakenteiden ilmaääneneristyskykyä.

Donald Norman selostaa kirjassaan *Design of Everyday Things* (2013) erilaisen suunnittelun painotusarvoa. Suunnittelu voi olla teollista, jolloin tavoitteena on ammattimaisesti luoda ja kehittää funktioita, konsepteja ja arvoa tuotteeseen, jonka tarkoitus on tuottaa arvoa käyttäjälleen ja valmistajalleen. Painotuksena voi olla käytettävyyden suunnittelu, jolloin keskitytään siihen, miten ihmiset toimivat teknologian kanssa. Kolmantena painotusarvona Norman esittää kokemuksen suunnittelun. Tällaisia suunnittelukohteita ovat prosessit, palvelut, tapahtumat ja ympäristöt. Suunnittelu keskittyy silloin kokemuksen laatuun. Tietojärjestelmää tai tietokantaa hyödyntävän käyttöympäristön suunnittelussa edetään pitkälti teollisen suunnittelun periaatteita hyödyntäen. Käytettävyyden osalta suunnittelun tavoitteena voi olla vain toteuttaa toimiva ratkaisu konseptisuunnitteluvaiheessa. Toisena ääripäänä käytettävyys asetetaan prioriteetiksi tuotteen suunnittelussa.

2.4 Tietokanta suunnittelun tukena

Tietokannan hyödyntämistä varten tarvitaan työkalu, jolla tietokannan sisältöä pystyy vaivatta suodattamaan. Yksinkertaisimmillaan tämä suodatin työkaluna on tiedonhakusivu- tai työkalu, johon voidaan antaa suodattimia. Tällöin tuloksia voidaan suodattaa, yhdistää ja ryhmitellä siten, että niiden perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä. Tietokantatyökalun nopeus ja helppokäyttöisyys on ensiarvoisen tärkeää, jotta se helpottaa ja nopeuttaa työn tekemistä. Tietokantatyökalun osien tulee noudattaa tätä periaatetta. Toisin sanoen tietokantaan tiedon lisääminen on oltava tehokasta sekä työkalun käytön tulee olla nopeaa. Työkalu on oltava helppo käyttöönottaa. Hidas ja vaikeakäyttöinen ohjelmisto jää nopeasti pois käytöstä.

Mittaustietokannasta on tarpeellista saada tukea akustiikkasuunnittelijalle suunnittelutyöhön. Akustiikkasuunnittelijan tulee pystyä tarkastamaan, millaisista rakenteista on tehty mittauksia. Mittaustuloksia tulee voida vertailla helposti. Mittaustietokannasta tulee pystyä suodattamaan virheelliset tai puutteelliset mittaukset, koska mittaustietokannassa on onnistuneita tuloksia sekä virheellisiä ja puutteellisia mittaustuloksia. Suunnittelija voi verrata uutta mitattua rakennetta ja verrata tulosta määräysten mukaiseen arvoon sekä mittaustietokannasta löytyvään aineistoon. Tällöin voidaan todentaa esimerkiksi parametrinen laskennan tuloksia onnistuneista mittaustuloksista.

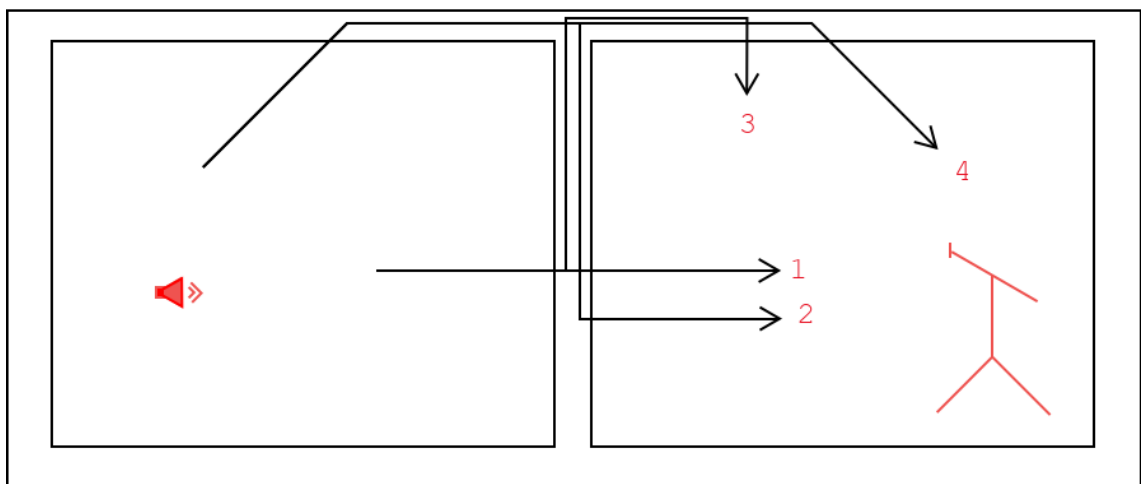
Suunnittelijoiden kanssa käytyjen keskustelujen aikana havaittiin, että vanhaan tietokantaan ei välttämättä lisätty mittaustuloksia jokaisen mittauksen yhteydessä.

Tällöin mittaustuloksia jäi hyödyntämättä jatkokehitystä varten. Tästä syystä tarvitaan työkalu, joka hyödyntää kehitettyä tietokantaa. Tällöin suunnittelijoille realisoituu mittaustietokannan hyöty. Seurauksena voidaan olettaa olevan, että mittaustuloksia lisätään säännöllisesti tietokantaan, koska siitä koetaan olevan hyötyä suunnittelijoille. Tämä työkalu toteutetaan palvelemaan kehitettyä mittaustietokantaa. Työkalu toteutetaan tämän työn laajuudessa.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

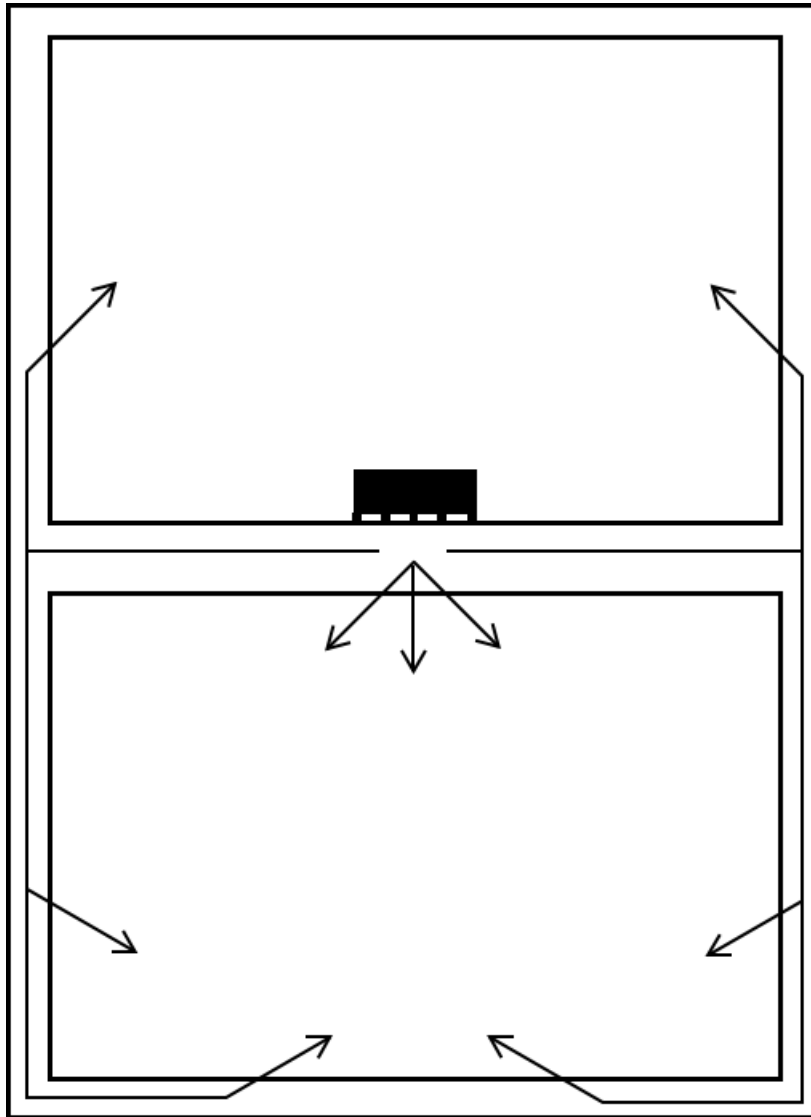
3.1 Äänen kulkeutuminen tilojen välillä

Tilojen väliseen ääneneristykseen vaikuttaa mittaustilanteessa tilan geometria sekä rakenteeseen kytköksissä olevat seinä-, katto ja lattiarakenteet (SFS-EN ISO 12354-1, 2017). Tilanne ja rakenteet eroavat paljonkin eri mitattavien tilojen välillä. Sivutiesiirtymän vaikutus tulokseen voi olla ratkaiseva. Kuvassa 4 on esitetty tilojen välillä tapahtuvan äänen kulkeutumisen periaatteet. Ääni voi kulkeutua tilasta toiseen suoraan tilojen välisen seinän kautta (1), viereisen rakenteen kautta johtuen tilojen välissä olevaan rakenteeseen (2), suoraan tilojen välisen seinän kautta johtuen liittyvän rakenteen kautta (3) tai täysin viereisiä rakenteita pitkin (4).



Kuva 4 Ilmaääneneristysmittauksen periaate ja äänen sivutiesiirtymän periaatepiirustus, mukailtu (SFS-EN ISO 12354-1, 2017) mukaan.

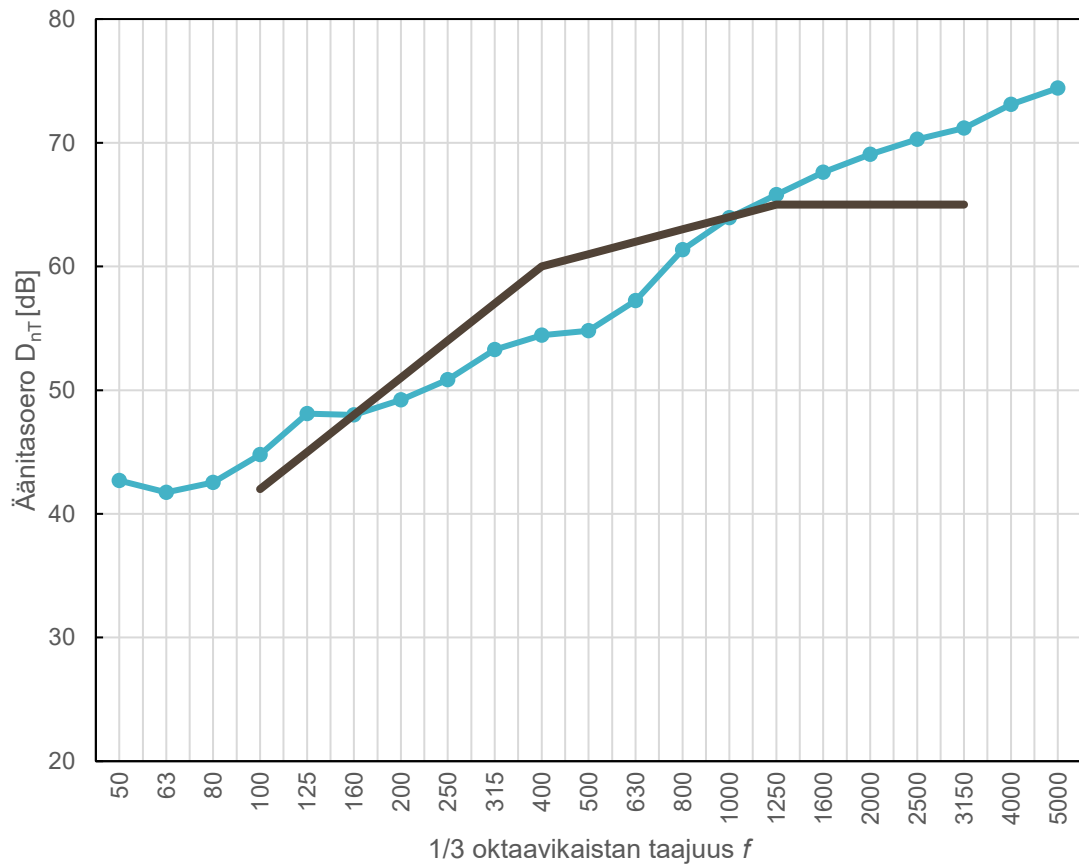
Askeläänikojeessa on viisi kappaletta 500 g metallisia vasaroita, joita tiputetaan 40 mm korkeudelta kutakin kahdesti sekunnissa lattiapintaan (SFS-EN ISO 16283-2, 2020). Laite sijoitetaan eri puolille huonetta, jolla pyritään muodostamaan koko mitattavaan tilaan äänilähteen sijainnista riippumaton keskimääräinen äänitaso, eli diffuusi äänikenttä. Kuvassa 5 on esitetty askeläänen kulkeutumisen periaate, kun mitataan askelääntä ylemmästä tilasta alempaan. Kun mitataan askelääntä alemmasta tilasta ylös sijoitetaan koje alemman tilan lattialle ja mitataan äänitaso ylemmässä huoneessa.



Kuva 5 Askeläänimittauksen periaate ja sivutiesiirtymäreitit. Mukailtu (Kylliäinen, et al., 2023)

Ilmaääneneristävyyden ja askelääneneristyksen mittaustulos esitetään yhtenä lukuna. Vastaavasti ilmaääneneristävyyden ja askelääneneristyksen vaatimukset esitetään tätä vastaavana yhtenä lukuna. Mittaustuloksen yksilukuarvo luetaan vertailukäyrältä 500 Hz taajuudelta. Ilmaääneneristyksen vertailukäyrä sijoitetaan tuloksen yhteyteen. Vertailukäyrää siirretään 1 dB portain sellaiseen asemaan, että taajuuskaistoittain mitattujen arvojen epäsuotuisien poikkeamien summa vertailukäyrän arvoihin on enintään 32 dB (SFS-EN ISO 717-1, 2020). Tulokset ilmoitetaan kaaviona, jonka vaak akselina on 1/3 oktaavikaistan arvot. Äänen spektrin ollessa jatkuvaa, sitä kuvataan erilaisilla kaistamaisilla otannoilla. Akustiikassa tällainen otanta on yhteisesti standardisoitu (American National Standards Institute, 2004) (SFS-EN ISO 266, 1997). Standardisoiduiksi kaistoiksi on valittu oktaavi- ja kolmannesoktaavikaista.

Kolmannesoktaavikaistaa kutsutaan myös terssikaistaksi. Kuvassa 6 on esitetty esimerkki vertailukäyrän sijoittumisesta äänitasoerokäyrälle.

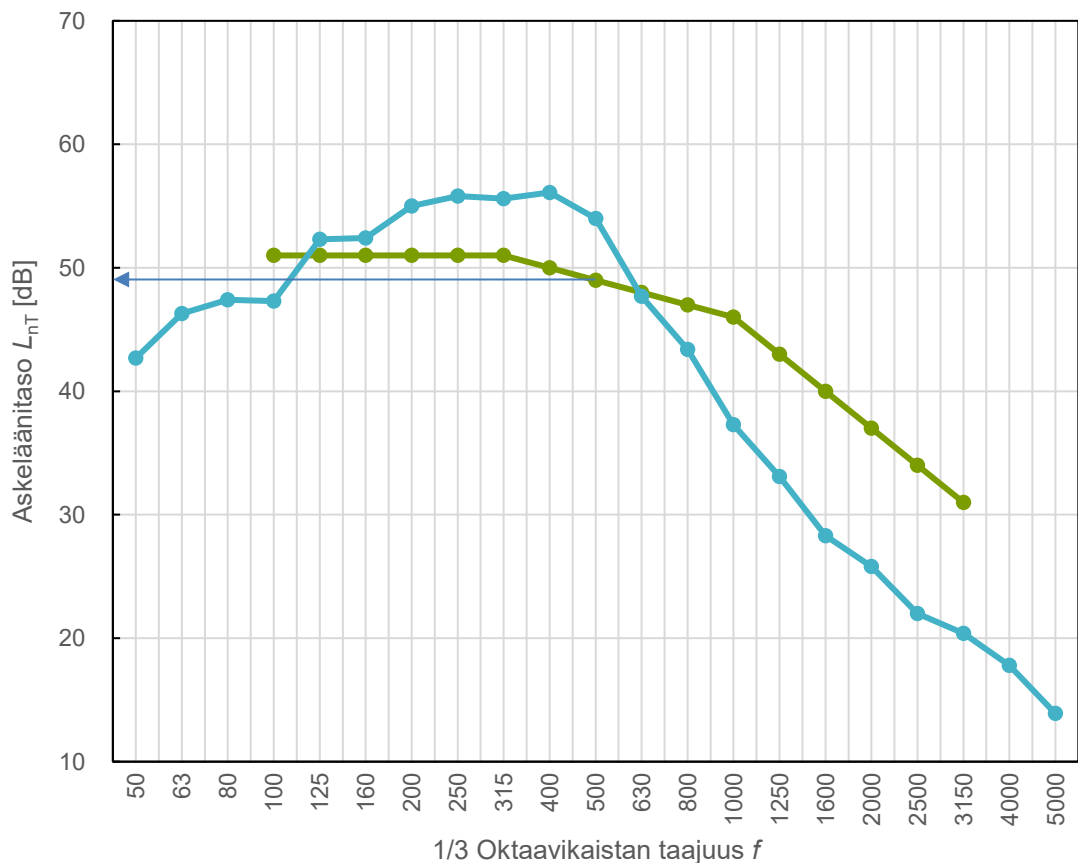


Kuva 6 Ilmaääneneristysten vertailukäyrä sijoitettuna esimerkikäyrän päälle (SFS-EN ISO 717-1, 2020)

Vertailukäyrän sijainnin määrää vertailukäyrän ja ilmaääneneristysten käyrän välisen epäsuotuisen poikkeamisen summa. Ilmaääneneristävyyden epäsuotuisen poikkeamisen summa tarkoittaa niitä arvoja, joilla mitattu äänitasoero on pienempi kuin vertailukäyrän arvo (SFS-EN ISO 717-1, 2020). Äänitasoeron vertailukäyrä, kun $D_{nT,w}$ 0 dB on pienillä taajuuksilla negatiivinen, nousee keskitaajuuksilla positiiviseksi ja asettuu ylätaajuuksille positiiviseen vakioarvoon. Kuvan 6 mukaisella esimerkikäyrällä sijoitettuna vertailukäyrä on alle 160 Hz taajuuksilla pienempi kuin esimerkikäyrä, 160-1000 Hz taajuusalueella suurempi kuin esimerkikäyrä ja jälleen yli 1000 Hz taajuuksilla pienempi kuin esimerkikäyrä. Esimerkkitapauksessa 160-1000 Hz väliseltä taajuusalueelta voidaan lukea ilmaääneneristävyyden epäsuotuiset poikkeamat. Vertailukäyrässä ei ole lukuarvoja taajuuksille 50-80 Hz sekä 3150-5000 Hz. Vertailukäyrän arvoja esitetään vain terssikaistan taajuuksilla 100-3150 Hz, ja oktaavikaistalla arvoilla 125-2000 Hz.

Vastaavasti kuten ilmääneneristykseen, askelääneneristykseen epäsuotuisten poikkeamien summa koskee niitä arvoja, joilla mitattu askeläänitaso on suurempi kuin vertailukäyrän arvo (SFS-EN ISO 717-2, 2020). Askeläänitason vertailukäyrä on pienillä taajuuksilla positiivinen. Käyrä laskee keskitaajuuksilla ja laskee keskitaajuuksilta ylätaajuuksille saakka tasaisesti. Kuten ilmäänen vertailukäyrässä, askeläänien vertailukäyrässä ei ole lukuarvoja taajuuksille 50-80 Hz sekä 3150-5000 Hz.

Vertailukäyrän sijainti määritetään siten, että vertailukäyrää siirretään 1 dB portain sellaiseen asemaan, että taajuuskaistoittain mitattujen arvojen epäsuotuisten poikkeamien summa vertailukäyrän arvoihin on enintään 32 dB (SFS-EN ISO 717-2, 2020). Esimerkki askeläänien vertailukäyrän sijoittumisesta askeläänitasokäyrälle on esitetty kuvassa 7. Kuvassa 7 on viivoilla epäsuotuisten poikkeamien muodostama alue. Standardoidun askeläänitasoluvun $L_{nT,w}$ arvon voi tällöin lukea vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta (esimerkki kuvassa 7 merkitty sinisellä nuolella).



Kuva 7 Askeläänitason vertailukäyrä sijoitettuna askeläänitasokäyrälle. Vertailukäyrältä voidaan lukea tulos $L_{nT,w} = 49$ dB (SFS-EN ISO 717-1, 2020)

Vertailukäyrän lisäksi mittadatatista lasketaan ja esitetään spektripainotusermit C , $C_{1,50-5000}$ $C_{1,50-3150}$. Spektripainotusermien alaindeksissä esitetään taajuusalue, kun se poikkeaa vertailukäyrämenettelyn taajuusalueesta. Lisäksi alaindeksissä esitetään mitä painotusspektriä termi koskee. Esimerkiksi alaindeksi I:llä tarkoitetaan askelääntä (eng. *Impact sound*) ja alaindeksillä tr tieliikennemelua (eng. *Traffic Noise*).

Spektripainotusermien C , C_{tr} , $C_{50-2500}$ ja $C_{50-3150}$ arvot on esitetty taulukossa 2. Lisäksi taulukossa on esitetty askeläänen vertailukäyrän (V_{askel}) arvot terssikaistoittain, kun $L_{nTw} = 49$ dB. Tämän lisäksi taulukossa on esitetty Ilmäänen äänitasoeron vertailukäyrän (V_{ilma}) arvot terssikaistoittain, kun $D_{nT,w} = 49$ dB.

Spektripainotusermien yksilukuarvot lasketaan summaamalla yhteen käyrän arvot ja spektripainotuskäyrän arvot spektripainotusermin alueella kaavalla (SFS-EN ISO 16283-1, 2014)

$$C = -10 * \log_{10} \sum 10^{\frac{(L_j - C_j)}{10}} \quad (1)$$

missä

- C on spektripainotusermin yksilukuarvo,
- L_j on mitatun tuloksen arvo jokaisella terssikaistan taajuudella ja
- C_j on spektripainotusermin arvo jokaisella terssikaistan arvolla.

Spektripainotuskäyrän $C_{1,50-2500}$ arvot lasketaan mittaustuloksista kaavalla

$$C_{1,50-2500} = 10 * \log_{10} \sum 10^{\frac{(L_j)}{10}} - 15 \text{ dB} \quad (2)$$

Taulukko 2 Vertailukäyrien ja spektripainotusermien arvot taulukkona.

Taajuus Hertseinä [Hz]																						
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
V _{askel}				51	51	51	51	51	51	50	49	48	47	46	43	40	37	34	31			
V _{ilma}				30	33	36	39	42	45	48	49	50	51	52	53	53	53	53	53	35		
C				-29	-26	-23	-21	-19	-17	-15	-13	-12	-11	-10	-9	-9	-9	-9	-9			
C _{ir}	-25	-23	-21	-20	-20	-18	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-9	-8	-9	-10	-11	-13	-15	-16	-18	
C ₅₀₋₂₅₀₀	-41	-37	-34	-30	-27	-24	-22	-20	-18	-16	-14	-13	-12	-11	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	
C ₅₀₋₃₁₅₀	-40	-36	-33	-29	-26	-23	-21	-19	-17	-15	-13	-12	-11	-10	-10	-9	-9	-9	-9			

3.2 Akustiset mittaukset

3.2.1 Äänitasoeromittaukset

Äänitasoeromittauksissa mitataan nimensä mukaisesti ilmaäänien äänitasoeroja tilojen välillä. Mittaukset suoritetaan (SFS-EN ISO 16283-1, 2014) esitetyn menetelmän mukaan. A-Insinöörit Oy:lla on äänitasoeromittauksissa käytössä standardeissa esitetty kiinteän mittauspisteen metodi, eli mikrofoni tuetaan mikrofoni- ja jalkalustalle. Tämä on tulkittu tarkoittavan, että mikrofoni sijaitsee mikrofoni- ja jalkalustalla mittauksen aikana. Mikrofonitelineitä siirretään mittauspisteiden välillä. Mittaukset suoritetaan vähintään viidestä mittauspisteestä 15 sekunnin mittausajalla. Mikäli mitattavan lähetysruuon lattiapinta-ala on enemmän kuin 50 m² tulee mittaukset suorittaa vähintään 10 mittauspisteessä.

Mittauksen aikana mitataan äänitasot lähetysruuon (L1) ja vastaanottohuoneessa (L2). Mittaukset suoritetaan kahdella lähetyskaiuttimen sijainnilla K1 ja K2. Mittaukset tulee suorittaa eri korkeuksilta ja eri puolilta huonetta. Mittausta ei tule suorittaa läheltä seinä- tai kalustepintaa. Mittauspisteet eivät saa sijaita 1000 mm lähempänä toisiaan. Mittaustuloksena saadaan äänitasot terssikaistoittain lähetys- ja vastaanottohuoneissa. Ilmaääneneristysmittauksissa mitataan äänitasoeroa kolmannesoktaavikaistoittain eri tilanteissa. Äänitasot mitataan äänilähteen kanssa pinkkiä kohinaa hyödyntäen lähetysruuon viidessä eri pisteessä, sekä vastaanottohuoneessa viidessä eri pisteessä. Tämän lisäksi mitataan taustäänitaso ja jälkikaiunta-aika vastaanottohuoneessa. Ilmaääneneristysmittauksissa on käytetty eri mittayksiköitä.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä määrittelee rakenteiden ääneneristyksen arvot standardoituna äänitasoerona $D_{nT,w}$ (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017, 2017).

Ilmaääneneristyksen mittalukuina on käytetty myös muita yksiköitä. Standardoitu äänitasoero esitetään standardin (SFS-EN ISO 16283-1, 2014) mukaisesti kolmannesoktaavikaistoittain yksikössä äänitasoero D_{nT} [dB]. Ilmaääneneristävyydelle on oma yksikkö R [dB], joka esittää nimensä mukaisesti rakenneosan kykyä eristää ääntä (Hongisto, 2022). Tällöin ei huomioida rakenneosaan liittyvien rakenteiden vaikutusta äänitasoeroon huoneiden välillä. Ilmaääneneristyksen laskennassa huomioidaan rakenteen välinen pinta-ala sekä huoneen tilavuus. Äänitasoero D kuvaa mukaan rakenteen eri puolin olevien diffuusien äänikenttien erotusta. Yksinkertainen äänitasoero lasketaan kaavalla

$$D = L_1 - L_2 \quad (3)$$

jossa äänitasoero D_w on mittaustulokselle sijoitetulta vertailukäyrältä luettu yksilukuarvo, joka kuvaa äänitasoeroa rakenteen eri puolilla.

3.2.2 Askeläänitasomittaukset

Akustinen mittaus askeläänen osalta toteutetaan standardin SFS-EN ISO 16283-2 (2020) mukaan. Mittauksen aikana askeläänikoje sijoitetaan lähetyshuoneeseen. Askeläänikoje sijoitetaan lattialle 45 asteen kulmaan suhteessa kantaviin rakenteisiin. Askeläänikojeen aiheuttaman kopinan äänitaso mitataan vähintään neljällä eri askeläänikojeen paikalla neljällä eri mittauspisteellä. Standardin mukaan äänitasomittauksia suoritetaan siten vähintään 16 kappaletta, kun mitattavien tilojen lattiapinta-ala on korkeintaan 50 m^2 ja käytetään mikrofoniäänitietoa. Mikäli mitattavien tilojen lattiapinta-ala kasvaa yli 50 m^2 tai mitattava rakenne on kevytrakenteinen, tulee mittauspisteiden tai askeläänikojeen sijaintien määrä olla vähintään 8 kappaletta. Äänitasomittauksien jälkeen suoritetaan jälkikäiunta-ajan sekä taustäänitason mittaus vastaanottohuoneessa. Mittaustuloksiksi muodostuu tällöin vähintään 16 eri äänitasomittauksia, 16 jälkikäiunta-ajan mittaustulosta sekä 1 taustäänitasomittaustulos kolmannesoktaavikaistoittain.

Askeläänitasot voidaan mitata huoneesta toiseen vaakasuunnassa tai pystysuunnassa kerrosten välillä. Tällöin mittaussuunta voi olla ylhäältä alas sekä alhaalta ylös. Mitattava rakenne on tällöin se rakenne, jolla mittaussuunnassa sijaitsevat. Esimerkiksi alhaalta ylös

mitattaessa mitattava rakenne on alemman kerroksen lattia, mutta tutkitaan askeläänikojeen aiheuttaman ärsykkeen aiheuttamaa reaktiota ylemmän kerroksen asunnossa.

3.2.3 Taustaäänitasomittaukset

Taustaäänitasolla tarkoitetaan äänitasoa, joka vallitsee kohteessa ilman, että äänilähde on kytketty päälle. Kenttämittausten aikana taustaäänitaso on korkeampi kuin laboratorio-olosuhteissa. Kun mitataan korkeita äänitasoeroja tai matalia askeläänitasoja, on mitattavat äänitasot vastaanottohuoneessa poikkeuksetta matalia tai lähellä taustaäänitasoa. Tällöin vastaanottohuoneen mitatusta äänenpainetasosta voidaan korjata taustaäänitason vaikutus mitattuun äänitasoon (Hopkins, 2007).

Taustaäänitason mittauksen menetelmä on esitetty standardeissa (SFS-EN ISO 16283-1, 2014) sekä (SFS-EN ISO 16032, 2004). Standardin mukaan taustaäänitason korjaus tehdään kaavalla

$$L = 10 * \log_{10} \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) \quad (4)$$

jossa

- L on korjattu äänitaso desibeleinä
- L_{sb} on signaalitaso ja taustaäänitaso yhdistettynä
- L_b on taustaäänitaso desibeleinä

Taustaäänitason mittauksessa mitataan vastaanottohuoneessa äänitasoa otannalla puolen sekunnin välein vähintään 60 sekunnin ajan. Taustaäänitasoksi todetaan keskimääräinen äänitaso tilassa.

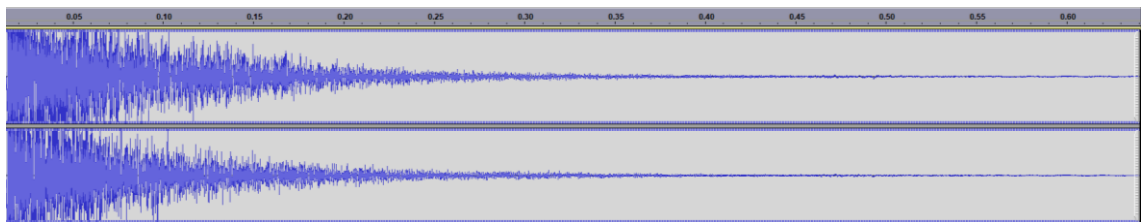
3.2.4 Jälkikaiunta-ajan mittaukset

Ilma- ja askeläänitasomittausten lisäksi mitataan vastaanottotilan jälkikaiunta-aikaa sekä taustaäänitasoa. Jälkikaiunta-aika mitataan standardin SFS-EN ISO 3382-2 (2008) mukaan. Mittaus suoritetaan ääneneristysmittausten yhteydessä käyttämällä 1/3 oktaavikaistan arvoja. Jos mitataan pelkkää jälkikaiunta-aikaa standardin SFS-EN ISO 3382-2 (2008) mukaan tulee mittaus toteuttaa oktaavikaistoittain.

Jälkikaiunta-aika määritellään (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017, 2017) ajaksi, jonka aikana äänitaso vaimenee tilassa 60 dB. Vastaavasti SFS-EN ISO 3382-2 (2008) määrittelee jälkikaiunta-ajan vaadituksi

ajaksi, jona tilavuuden mukaan vakioitu äänenpainetaso suljetussa tilassa laskee 60 dB lähteen vaimenemisen jälkeen.

Jälkikaiunta-ajan mittaus voidaan toteuttaa katkaistun kohinan menetelmällä (FINAS, 2021), eli katkaisemalla kaiuttimesta kuuluva signaaliääni ja mittaamalla äänen vaimenemisaika. Jälkikaiunta-aika voidaan mitata myös mittaamalla tilan impulssivaste sekä käyttämällä erityisiä äänisignaalia kuten sinipyyhkäisyä. Näiden menetelmien mukaista mittausta ei tarkastella tämän työn laajuudessa. Vaimenemisaika mitataan kolmannesoktaavikaistoittain. Vaimenemisaikana mitataan $T(20)$ aika, eli se aika, minkä aikana ääni vaimenee 20 dB ja kerrotaan se kolmella. Mikäli $T(20)$ aikaa ei saada mitattua, voidaan käyttää $T(30)$ vaimenemisaikaa. $T(30)$ vaimenemisaika on aika, jona ääni vaimenee 30 dB ja tämä kerrotaan kahdella. Tällöin saadaan mitattua 60 dB vaimenemisaika myös äänekkäissä ympäristöissä. Kuvassa 8 on esitetty ote äänen vaimenemisesta kotini portaikossa. Kuvasta voidaan havainnoida, miten ääni vaimenee ajan funktiona. Kuvan vaaka-akselilla on aika sekunteina ja pystyakseleilla äänitaso tilassa.



Kuva 8 äänitason vaimeneminen tilassa.

3.3 Mittausaineisto ja mittauksista kerättävä tieto

Mittausdata kerätään mittareista käyttäen mittareiden valmistajan omaa ohjelmistoa. Ohjelmiston avulla siirretään mittauksen aikana kerätyt kertamittaukset mittajaan tietokoneelle. Mittaustulokset eli raakadata käsitellään tietokoneella. Mittaustulokset kootaan ja eritellään standardin mukaisesti mittauslaskentatyökaluun. Tämän jälkeen kirjataan tila-, rakenne- ja projektitiedot valmiiksi raportointia varten. Kun mittaustyökaluun on eritelty kaikki tarvittavat tiedot, ohjelma laskee automaattisesti tulokset. Laskennan jälkeen tiedot tallennetaan mittaustietokantaan. Tämän jälkeen voidaan standardin mukainen mittausraportti tulostaa ja toimittaa asiakkaalle.

Työssä käytettävä aineisto on akustiikkayksikön alkuperäiseen tietokantaan kerättyä mittausdataa. Mittausdataksi oli kerätty kaikki mittaussuorituksen kuuluva tieto. Projektitiedoista kerätään sisäinen projektitunnus, osoitetiedot sekä mittausajankohta,

raportin päivämäärät sekä tietokantaan tallentamispäivämäärä. Kohteen tiedoista tallennetaan rakennustyyppi, rakennusvuosi ja tilatiedot, sekä onko tila kalustettu vai ei. Sisäistä laadunvarmistusta varten kirjataan, ketkä suunnittelijat mittaukset ovat suorittaneet ja mikä mittari on ollut kyseessä. Varsinaisesta mittaustapahtumasta kerrotaan mittaussuunta, mitattavan rakenteen tunnistet ja rakenteen kuvaus. Tämän lisäksi tietokantaan lisätään tieto, kuinka monta mittausta on suoritettu, koje- ja mikrofonipaikkojen lukumäärät laskentaa varten sekä mahdollisten laskennallisten korjausten jälkeen muutetut arvot (esimerkiksi käytäntöjen ja määräysten mukaiset tilavuusrajoitukset). Huonetiloista kirjataan rakenteiden ja rakenneosien paksuudet, huoneen tilavuudet mittauksen osalta oleellisin osin ja välisen rakenteen pinta-ala.

Mittaustulosten lisäämisen jälkeen lasketaan ilma- tai askelääneneristävyyden yksilukuarvot. Mittaustuloksista lisätään tietokantaan ainakin seuraavat arvot, riippuen mittauksesta (askel, Ilma): Laskennallisen absorptioalan arvot terssikaistoittain, äänitaso vastaanottohuoneessa, jälkikaiunta-ajan laskentatulokset terssikaistoittain, ilmaäänien tai askeläänien laskentatulokset terssikaistoittain (D , D_n , D_{nT} , R' , L'_n , L'_{nT} , mahdolliset yksittäiset laskenta-arvot (D_w , $D_{n,w}$, $D_{nT,w}$, R'_w , $L'_{n,w}$, $L'_{nT,w}$) sekä edellä mainitut laskenta-arvot korjatuilla spektrikorjaustermeillä spektrikorjaustermit (C , C_{tr} , $C_{150-2500}$). Näiden lisäksi tietokantaan kirjataan erilliset korjausarvot lähetys- ja vastaanottohuoneen äänitasoille taajuuksille 50 Hz, 63 Hz ja 80 Hz (SFS-EN ISO 16283-1, 2014) Low Frequency Proceduren mukaan. Tämän lisäksi tallennetaan kaikki mittauksessa käytetty lähtötieto, eli yksittäiset mittaustulokset terssikaistoittain.

Mittaustietokannassa mittaustulokset sekä tuloksista laskettu aineisto on tullaan esittämään kolmannesoktaavikaistaisena. Mittaustietokantaan voidaan luoda oktaavikaistalle omat tunnistet. Käytännössä se ei ole tarpeen, koska helpompaa hyödyntää oktaavikaistan arvoja kolmannesoktaavikaistalta. Standardeissa (SFS-EN ISO 16283-2, 2020), (SFS-EN ISO 16283-1, 2014) on esitetty keino kolmannesoktaavikaistan arvojen muuntamisen oktaavikaistaiseksi. Tämän menettelyn toteutus mittaustietokantaan on kuitenkin rajattu pois työn laajuudesta ja jää tarvittaessa jatkokehityksen kohteeksi.

3.4 Tallentaminen tietokantaan

Tietokantaan tallentaminen ohjelmoitiin suoraan mittaustulosten laskentaohjelmaan. Mittaustulokset ja laskenta-arvot kerättiin ensin listaksi arvoja ohjelman muuttuinaan. Mittaustuloksia varten koostettiin lista tunnistetia eli otsikoita tietokantaa varten. Näitä

tunnuksia olivat esimerkiksi projektinumero tai mittauspäivämäärä. Mittaustuloksista kerätty lista ja otsikot parsittiin nimi-arvo-pareiksi JSON-muotoon. Tämän jälkeen JSON-tietue lähetettiin tietokantaan. JSON on yksinkertainen ja kevyt avoimen standardin tiedostomuoto tiedonvälitykseen ja -tallennukseen.

Tiedonsiirtoa ohjelmien välillä varten muodostettiin ohjelmointirajapinta mittausten käsittelyohjelman ja tietokannan välille. Ohjelmointirajapinnan avulla tietokantaan ei pääse käsiksi suorilla kyselyillä hakemaan tietoja, vaan ohjelmointirajapinta toimii tulkkina ohjelmien välillä. Toisin sanoen ohjelmointirajapinta ohjaa tiedon eteenpäin oikeaan tietokantaan tämän tietokannan ymmärtämässä muodossa ja sen ymmärtämällä käskyillä (Moilanen, et al., 2018). Tallentamisen yhteydessä jokaiselle mittaustietokantaan lisätylle mittaukselle luodaan uniikki ID, joka palautetaan laskentaohjelmaan mahdollista jälkeensä tapahtuvaa tarkastustoimintaa. Tämän jälkeen tiedot ovat luettavissa mittaustietokannassa.

3.5 Mittaustietokanta

Työn aikana selvitettiin ja testattiin vaihtoehtoisia tallennustapoja. Yhdysvaltalainen yritys Agile IT kertoo vertailussaan (Agile IT Inc., 2022), että .CSV-tiedostomuodon tai .xml-tiedostomuodon käyttö ei pienentäisi tiedostokokoa Excel-tiedostoihin verrattuna. Vertailun mukaan Excel-tiedostojen koko on pienempi kuin kilpailevien CSV, JSON ja XML-tiedostojen. Tätä kokeiltiin myös kohdeaineiston kanssa ja päästiin samaan lopputulokseen. Tämä tarkoitti sitä, että nämä tiedostotyypit hylättiin, koska ne eivät kehittäisi nykytilannetta paremmaksi. Tietokannan tuli mahdollistaa tietojen lataamisen tietokantaan ilman koko mittaustietokannan lataamista.

Toissijainen ratkaisu oli eritellä askelääneneristysmittaustietokanta ja ilmaääneneristysmittaustietokanta omiin tietokantoihinsa. Tämä pienensi tiedostokokoa ja latausaikoja, koska ladattavan tiedoston koko pieneni noin kymmenesosaan alkuperäisestä. Haluttiin kuitenkin valita tietokantatyypin, joka mahdollistaa tietokannan vapaan laajentamisen, joten tämä menettely hylättiin.

NoSQL-tietokannat mahdollistivat tietokannan laajentamisen myös tietokannan luonnin jälkeen, eikä sarakkeiden lukumäärälle ole asetettu teknisiä rajoituksia. Mahdollisuuksien selvityksen jälkeen valikoitiin sopiva kaupallinen tietokantajärjestelmä. Tietokannan valintaan vaikutti myös yhteensopivuus Power BI:n kanssa.

Mittaustulosten laskentatyökalu ei suoraan ollut yhteensopiva NoSQL-tietokannan kanssa, joten työkalun ja tietokannan välille rakennettiin ohjelmointirajapinta eli API (Moilanen, et al., 2018), jonka avulla on mahdollista kirjoittaa ja lukea tietokannasta. Tällaisten rajapintojen rakentaminen on yleistä IT-hankkeissa.

3.6 Tilastollinen käsittely

Sovellusalueeksi tietojen käsittelyä varten valittiin Power BI. Power BI oli käytettävänä Business Intelligence -ohjelmistona ensisijainen valinta. Työn tilaajan tavoitteena oli kokeilla, pystyykö Power BI:a hyödyntämään tällaisessa tutkimuksessa. Vastaavan suuren tiedon suodattamistyökalun voi toteuttaa Excelillä sekä kilpailevilla ohjelmistoilla. (Microsoft, 2023)

Tietokannasta saadut tiedot ladattiin Power BI:n ja esitystapaa ryhdyttiin muodostamaan. Esimerkki mittauksen esitystavasta ja raportissa esitettävistä arvoista on standardeissa (SFS-EN ISO 16283-1, 2014) (SFS-EN ISO 16283-2, 2020) liitteessä C.1. Esitystapa on näiden rajoitusten puitteissa kuitenkin vapaa. Mittaustulokset haluttiin esittää sellaisenaan eri ääneneristysarvojen perusteella, että keskiarvon ja tilastollisten jakaumien avulla.

Mittaustietokantaan on tallennettu mittaustuloksia korjausrakennushankkeiden lähtötietomittauksista sekä hankkeiden käyttöönottomittauksista. Standardin mukaiseen laskentamenetelmään ei näillä määräyksillä tosin ole ollut vaikutusta. Tästä syystä mittaustuloksissa on esitetty myös tuloksia, mitkä eivät välttämättä ole täyttäneet mitattavalle rakenteelle esitettyjä vaatimuksia esimerkiksi rakennusvirheen takia. Mittaustietokannassa on siten esitetty tilojen välisen rakenteen vaatimukset täyttäviä mittaustuloksia sekä hylättyjä mittaustuloksia. Tästä syystä mittaustietokannan tuloksista haluttiin karsia ei-haluttuja tuloksia pois. Power BI:ssa on mahdollista suodattaa ja valita esitettävät tulokset, jolloin voidaan ääneneristyskäyrien perusteella tehdä esivalintaa esitettävistä tuloksista. Kaikkien mittaustulosten yhteydessä rakenteessa olevista virheistä ja puutteista ei ole tietoa.

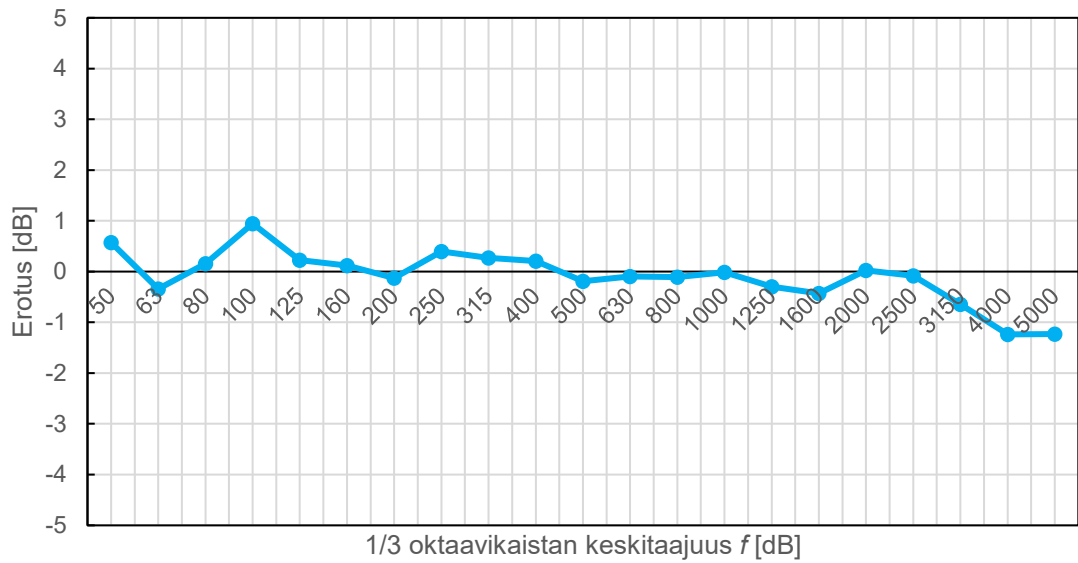
Asiakasyrityksessä mittaustoiminta on akkreditoitua, eli mittausohjeet, -laitteet ja menetelmät on tarkastettu ulkopuolisen tarkastajan eli akkreditoijan puolesta (FINAS, 2021). Tällöin aikaansaadun mittaustuloksen vaatimukset täytyvät sisäisen toiminnan tarkastuksen puitteissa. Mittaustoiminnan yhteydessä yksittäisen mittauksen kokonaisvirhe on laskettu ja se raportoidaan asiakkaalle. Tämän perusteella voidaan todeta, että akustisissa mittauksissa käytettävä mittausstapa on vakioitu. Tästä

riippumatta mittaajat, ympäristö ja mittauslaitteet vaihtuvat. Koska kyse on kenttämittauksista eikä laboratoriomittauksista, mittausten jakaumiin voi tulla paljon vinoutta, mistä seuraa, että tulokset eivät noudata normaalijakaumaa.

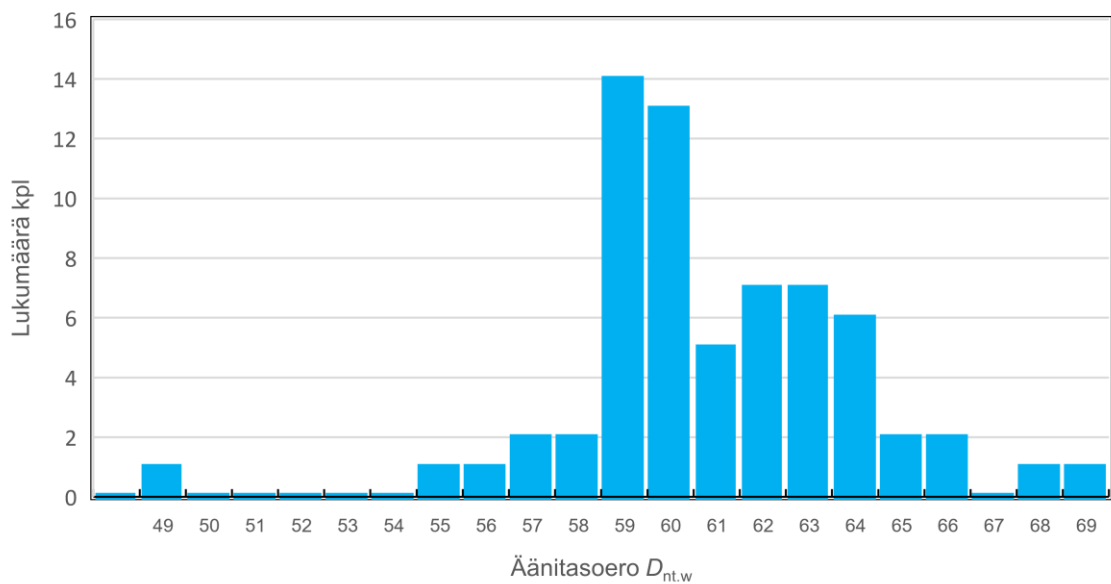
Koska mittaustietokantaan tallennetut tulokset eivät ole normaalijakautuneita tilastollisen analyysiin jakaumaksi valittiin 25. ja 75. persentiili jokaisesta terssikaistan arvosta (Donnelly & Abdel-Raouf, 2016). Kvantiilit eli osuuspisteet (tai fraktiilit) ovat suuruusjärjestykseen lajitellun muuttujan jakauman kohtia, joiden ala- ja yläpuolella puolelle jää tietty osa havainnoista. Kvantiilit jakavat jakauman neljään yhtä suureen osaan ... persentiilit jakavat jakauman sataan yhtä suureen osaan (Tilastokeskus, 2023). Kvantiili on 25. persentiili (kvantiili) eli osuuspiste. Tällöin mittaustuloksia arvioidaan tuloksen mukaan järjestetyn tilaston 25. persentiileillä ja 75. persentiileillä sekä keskiarvolla. Persentiilit toimivat yhdessä keskiarvon kanssa riittävinä laskennallisina arvoina terssikaistaisten mittaustulosten jakaumaa arvioidessa. Tällöin jätetään järjestetystä otannasta 25 % matalimpia ja 25 % korkeimpia tuloksia pois. Mediaani eli 50. persentiili kertoo järjestetyn tilaston keskimmäisen luvun. Keskiarvo ilmoittaa mihin kohtaan muuttujan jakauman keskikohta mitatulla ulottuvuudella sijoittuu. Keskiarvo voi poiketa mediaanista. Mediaanissa huomioidaan vain käyrän yksittäisten arvojen järjestetyn listan keskimäinen luku. Keskiarvo voi poiketa merkittävästikin mediaanista. Mikäli keskiarvo on suurempi kuin mediaani, niin tämä viittaa oikealle vinoon jakaumaan. Mikäli keskiarvo on mediaania pienempi niin tämä viittaa vasemmalle vinoon jakaumaan (Taanila, 2011).

Kuvassa 9 on esitetty 200 mm betoniseinän ilmajänseneristyksen arvojen keskiarvon ja mediaanin erotus. Tulosten keskiarvo on suurempi kuin mediaani, kun käyrän arvot ovat positiivisia. Tällöin jakauma on oikealle vino. Tulosten keskiarvo on pienempi, kuin mediaani kun käyrän arvot ovat negatiivisia. Kuvasta 9 havaitaan, että arvot ovat lähellä nollaa, joten otostilastossa sekä keskiarvo ja mediaani kuvaavat melko hyvin tilaston keskikäyrää.

Kuvassa 10 on esitetty eri mitattujen äänitasoerojen yksilukuarvojen jakauma, kun kyseessä on 200 mm betoniseinä. Kuvasta voidaan todeta, että mittaustuloksissa on melko paljon hajontaa. Tästä riippumatta tulosten keskiarvo on 60,9 dB ja mediaani 60dB. Tästä voidaan havaita, että tulosten vinouma on vähäisissä määrin oikealle vino.



Kuva 9 200 mm betoniseinän ilmaääneneristyksen keskiarvon ja mediaanin erotus



Kuva 10 200 mm betoniseinän standardisoidun äänitasoeron $D_{nt,w}$ arvojen jakauma

3.7 Työkalu ja käyttöliittymä

Lopputuloksen suunnittelussa haluttiin toteuttaa ulkonäkö ja käyttöliittymä yksinkertaisena, mutta työkalulta vaaditut toiminnot täyttävänä. Blank & Dorf esittää tämän tapaisesta suunnittelumenettelystä nimeä Minimum Viable Product (MVP) - toteutusmalli. MVP-mallissa laaditaan yksinkertaisin tarpeelliset toiminnot täyttävä toteutus. Tämän jälkeen tuotetta kehitetään käyttäjiltä saadun palautteen perusteella. (Blank & Dorf, 2020) Menettely on yleinen esimerkiksi tuotekehityksen

markkinatutkimuksessa, jossa kokeillaan erilaisia pieniä tuotteita. Tämän jälkeen tuote hylätään tai sitä kehitetään saadun palautteen perusteella. MVP-menettelystä esimerkkinä on UI-suunnittelussa käytetty rautalankamalli, johon on kytketty kaikki tarvittavat toiminnot. Rautalankamallissa osat on sijoitettu paikoilleen ilman graafista muotoilua. osat tekevät mitä niiden pitääkin tehdä. Tuotteen ulkonäkö on tällöin usein täysin tekemättä. Esimerkiksi napit ovat yksinkertaisia laatikoita. (Blank & Dorf, 2020)

Työkalu piirtää valitut käyrät ja esittää kunkin mittauksen yhteydessä lasketut yksilukuarvot (esim. $D_{nT,w}$, C , C_{tr}). Tämän lisäksi työkalu esittää tietoja kohteesta kuten tilojen välisen rakenteen pinta-alan, lähetys- ja vastaanottohuoneen tilavuudet. Tulokset esitetään mittaustyyppin mukaan. Toisin sanoen askelääneneristyksen tuloksissa ei esitetä lähetyshuoneen tilavuutta, koska sillä ei ole vaikutusta askelääneneristyksen tulokseen. Lähetyshuoneen tilavuutta ei siten tarvitse kirjata standardin (SFS-EN ISO 16283-2, 2020) mukaisissa mittauksissa. Mittaustietokantaan kirjatut arvot on esitetty työkalun kaavioissa sekä taulukoissa terssikaistoittain.

Työkalun käyttöympäristö muokattiin Power BI:ssa siten, että näkymä pysyy samankaltaisena, mutta vaihtuu sen mukaan, mistä mittayksiköstä tehdään hakuja. Toiminnot automatisoitiin siten, että käyttäjän ei tarvitse tehdä muokkauksia tai toimenpiteitä esitystapaan. Käyttöliittymän ominaisuuksia ja tarpeita varten järjestettiin työpaja käyttäjän kanssa. Sieltä saadun palautteen perusteella käyttöliittymää parannettiin ja lisättiin toiminnallisuuksia. Näitä parannuksia ja toiminnallisuuksia olivat

- lisättiin suodattimien määrää
- käyrän jakauman keskiarvon sekä ylä- ja alarajan arvot listattuna sekä jokaisen mittaustuloksen arvot taulukoituna
- yksilukuarvojen jakaumat sekä ylä- ja alaraja esitettynä
- yksilukuarvojen laskennallisia arvoja kuten keskihajonta ja keskiarvo
- yksilöivät projektitiedot ja geometriatiedot (tilojen välinen rakenne ja tilavuudet)

Näiden muutosten jälkeen todettiin työkalun olevan riittävä toimimaan suunnittelutyön tukena. Tulen käsittelemään työkalulla aikaansaatuja tuloksia ja havaintoja seuraavassa luvussa esimerkkien avulla.

4. TIETOKANTA JA TIETOKANTATYÖKALU

4.1 Mittaustietokantatyökalu

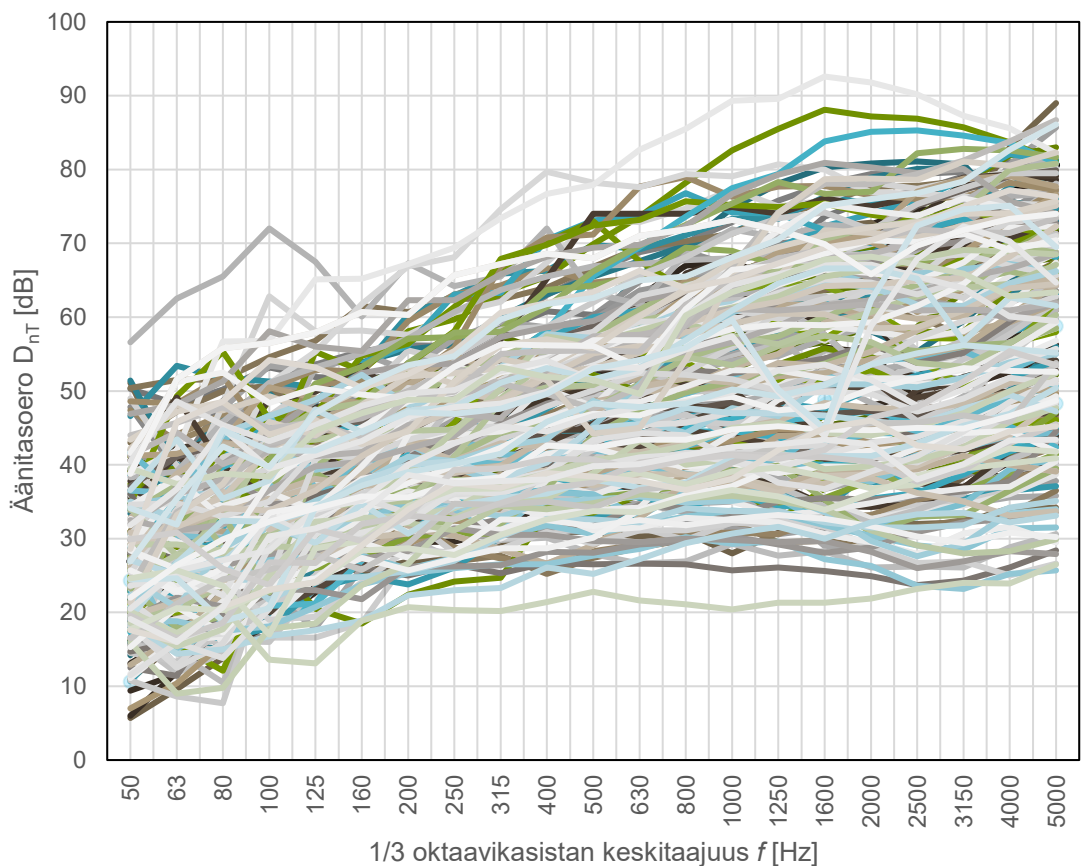
Työn aikana siirrettiin ja muokattiin olemassa olevaa tietokantaa pilvipalveluun. Mittaustietokannan lisäksi luotiin mittaustietokantatyökalu, jolla mittaustietokannasta voidaan hakea mittaustuloksia. Mittaustietokantatyökalu toteutettiin lopulta Power BI-sovellukseen. Sovellusalusta valittiin sen saatavuuden sekä yhteensopivuuden perusteella. Valintaan vaikutti myös akustiikkayksikön tahtotila selvittää Power BI:n soveltuminen tällaiseen. Mittaustietokannan tiedot päivittyvät kerran vuorokaudessa automaattisesti Power BI:n, joten tietokannasta saatavat tiedot ovat tavanomaisen suunnittelutyön suhteen riittävässä määrin ajan tasalla. Automaattisen päivityssyklin tehostamista ei nähty tietokannan käyttö- ja päivitystahdin takia tarpeellisenä. Päivityksen voi myös kytkeä käyntiin käsin, jolloin tarvittaessa tieto on heti ajantasainen käyttäjille.

Mittaustuloksia voidaan siten vertailla keskenään tai koostaa niistä kokonaisuuksia. Työkalussa vertailtavia mittaustuloksia ja -arvoja on, R' , D , D_n , D_{nT} , L_{nT} ja L_n -arvot ja niitä vastaavat vertailukäyrältä luetut yksilukuarvot $D_{nT,w}$, $D_{n,w}$, D_w , R_w , $L_{nT,w}$ sekä $L_{n,w}$. Luvussa 4 esitettyjen kuvaajien mittaluvut on valikoituneet ympäristöministeriön asetuksen (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017, 2017) sekä sen perusteluina olleen selvityksen (Kylliäinen, et al., 2015) perusteella. Selvityksen perusteella äänitasoero D_{nT} ja sen vastaava yksilukuarvo $D_{nT,w}$ kuvaavat parhaiten tilannetta kenttämittauksissa. Vanhojen vaatimusten vertailukelpoisuuden vuoksi myös muut mittaluvut on toteutettu työkaluun.

Työkalulla voi asettaa reunaehdoja, joilla suodattaa mittauksia. Reunaehdoja ovat rakennuksen rakennusvuosi, rakennetyyppi, mittaussuunta, tilatyyppi ja esimerkiksi minkä tyyppinen rakennus on kyseessä tai käänteisesti, mitkä ovat minimi- ja maksimiyksilukuarvot esimerkiksi äänitasoerolle. Ohjelmoitujen nappien avulla pystytään lisäämään vertailukäyrä kuvaajaan tai vaihtamaan esitystapaa kaikista käyristä jakaumaan.

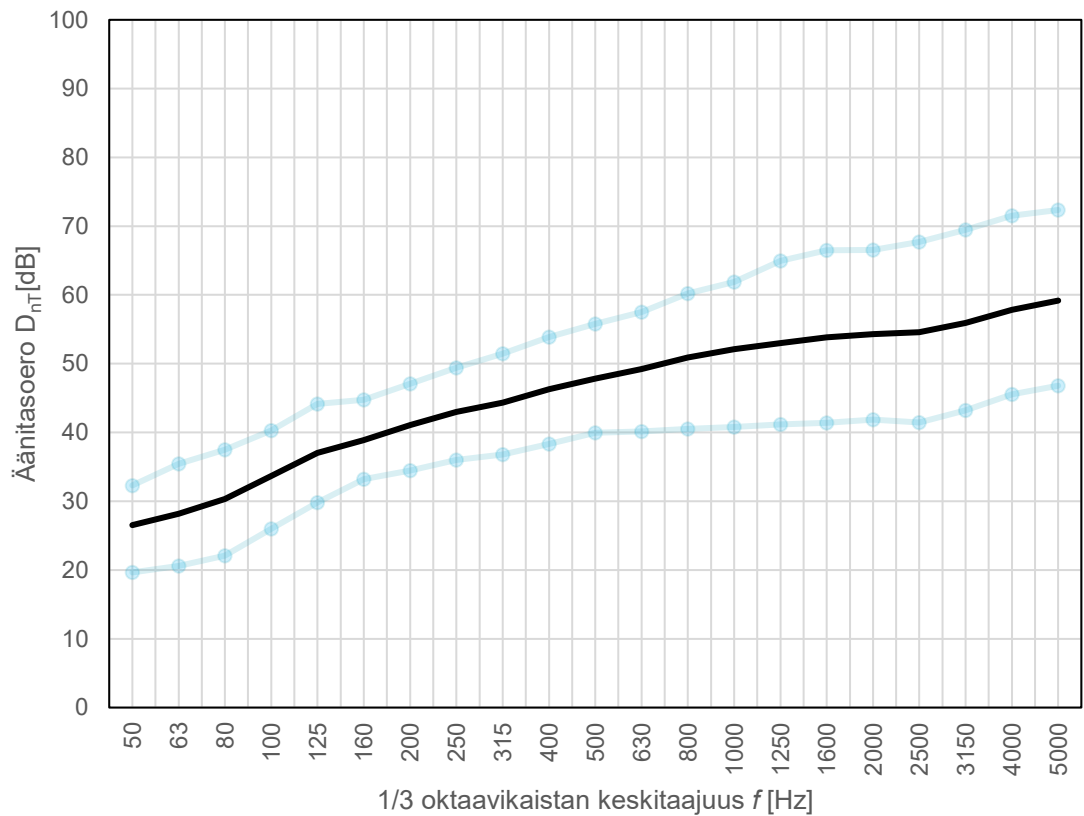
Kuvassa 11 on esitetty satunnaisotanta mittaustietokantaan tallennetuista mittaustuloksista. Käyräparvi sisältää erilaisten rakenteiden ja erilaisten kohteiden standardoituja äänitasoeroja. Kuvissa 11, 12 ja 13 ei esitetä tietokannan kaikkia tuloksia,

vaan kuvat sisältävät 255 mittaustuloksen otannan kaikista mittaustietokannan ilmaäänimittauksista. Käyräparvessa on rakenteelle esitetyn vaatimuksen täyttäviä mittaustuloksia sekä vaatimusta heikompia tuloksia. Näitä heikompia tuloksia ovat esimerkiksi mittaustulokset, joissa mittauksen aikana on havaittu reikiä rakenteessa tai sivutiesiirtymä viereisten rakenteiden kautta.



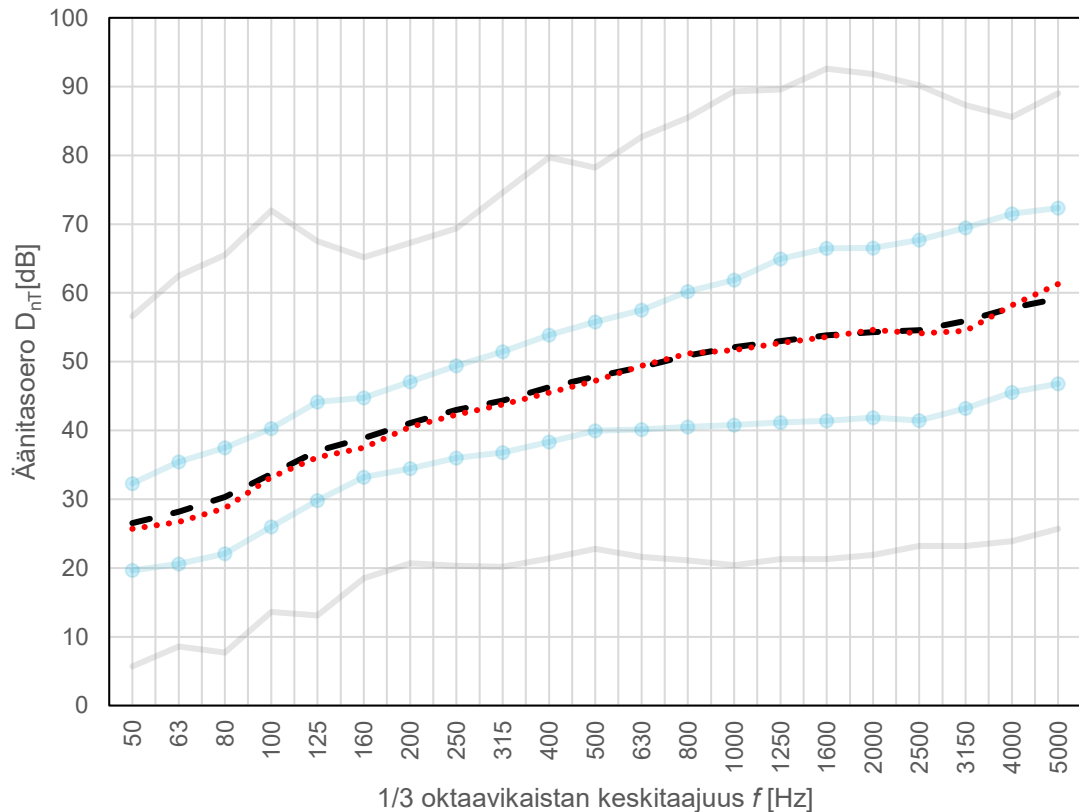
Kuva 11 Satunnaisotos äänitason D_{nT} mittaustuloksia ja niistä muodostettu käyräparvi ($n=255$ kpl). Esimerkkitulokset on kerätty tietokannasta satunnaisotannalla.

Kuvassa 12 on esitetty kuvan 11 satunnaisotoksesta muodostettu jakauma. Ylimpänä on 75. persentiili, keskimmäisenä on jakauman keskiarvo ja alimpana 25. persentiili. Kuvan vaaka-akselilla on esitetty taajuudet 50-5000 Hz alueella. Käyräparvesta voidaan havaita, että 25. persentiili ja 75. persentiili on kaukana keskiarvosta, joten käyräparven mittaustuloksia on hyvin laajalla alueella.



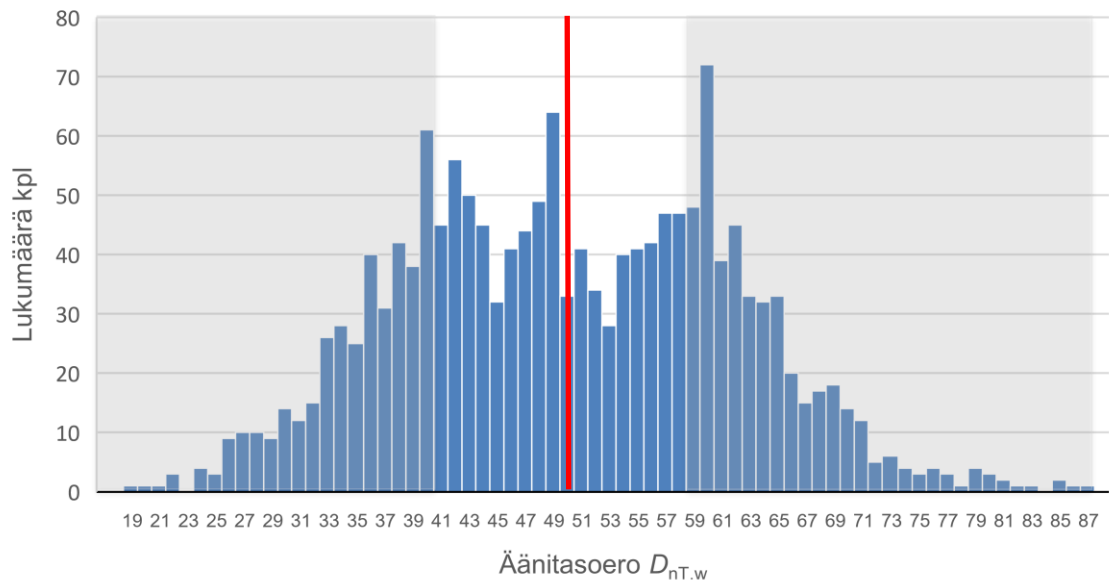
Kuva 12 Kuvan 11 Äänitasoeron D_{nT} käyräparvesta saatu jakauma ($n=255$).

Kuvaajien asteikko on esitetty siten, että käyrästön minimi- ja maksimiarvosta otetaan keskiarvo. Vertailun vuoksi kuvassa 13 on esitetty käyrästön minimi ja maksimiarvot sekä mediaani. Keskiarvo ja mediaani on tämän tapaisessa satunnaisessa tilastossa hyvin lähellä toistensa arvoja. Kuvasta voidaan myös havaita, että minimi- ja maksimiarvot antavat perspektiiviä keskimmäisten 25. - 75. persentiilin välin hoikkeudesta. Tämän perusteella voidaan todeta, että persentiilit antavat hyvän käsityksen tilaston jakaumasta.



Kuva 13 Äänitasoeron D_{nT} minimi (alin harmaa) ja maksimi (ylin harmaa) ja mediaani (punainen pisteiviiva) käyrät. Lisäksi kuvassa on esitetty jakauman 25. ja 75. persenttiilit

Tilojen välisille äänitasoeroille on asetettu vaatimuksia Ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017 (2017). Rakennusten akustisia vaatimuksia on esitetty myös standardissa SFS 5907 rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2022). Näistä ohjeista ja vaatimuksista kirjoitushetkellä ympäristöministeriön asetus on velvoittava ja siinä asetettuja vaatimuksia tulee noudattaa rakennusten ääneneristystä suunnitellessa. Kuvasta 14 voidaan havaita kolme huippua, 40-44dB kohdalla, 48-50dB-kohdalla ja 55-60dB välillä. Kolmihuippuinen jakauma on selitettävissä mitattavien tilojen käyttötarkoituksella. Käyttötarkoituksen perusteella määritellään ääneneristys tilojen välillä. $D_{nT,w}$ 40dB tiloja ovat esimerkiksi toimistorakennuksen toimistohuoneiden väliset äänitasoerot. Ympäristöministeriön asetuksen mukaan $D_{nT,w}$ 48dB tiloja ovat esimerkiksi koulujen oppilashuollon tilat eli esimerkiksi kouluterveydenhoitajan tai -psykiatrin vastaanotto. Ympäristöministeriön asetuksen mukaan äänitasoero vaatimus asuntojen välille on $D_{nT,w}$ 55dB. Yli $D_{nT,w}$ 60 dB mittaustulokset selittyvät esimerkiksi koulujen musiikkiluokkien ja sen ympäröivien tilojen välisistä ääneneristysvaatimuksista. Jakauman tulosten keskiarvo on 50,02 dB ja 25. persenttiili on 41 dB. 75. persenttiili on 59dB.



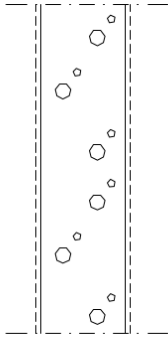
Kuva 14 Standardoidun ilmääneneristysluvun $D_{nT,w}$ jakauma.

4.2 Betoniseinän ilmääneneristävyys

Oletetaan, että halutaan selvittää 200 mm betoniseinän ilmääneneristykseen hyödyntämällä tietokantaa. Työkalun avulla tietokannasta voidaan suodattaa rakenneosia "betoni 200 mm". Rakenteen tekstiosan suodattimesta valittiin parhaiten haluttua rakennetta kuvaavat rakenteen kuvaukset. Kaikista mittaustuloksista on suodatettu vain vaakasuunnassa tehdyt mittaukset ja valittu ne tulokset, missä ei ole ovia tai lasiseiniä.

Kuvassa 15 on esitetty 200 mm kantavan betoniseinän rakennetyyppi. 200 mm kantava betoniseinä on tavanomainen ratkaisu asunnoissa tilojen välillä. 200 mm kantava betoniseinä on valittu tähän esimerkiksi, koska siitä on paljon mittaustuloksia. Rakenteen pintakäsittelyn vaikutus rakenteen ääneneristykseen oletetaan olevan vähäinen. Rakennustyön aikana betoniseinät tasoitetaan ja maalataan, mutta tasoitteen paksuus jää ohueksi. Rakennustöiden laatu 2017 (Rakennustieto Oy, 2017) mukaan, rakenteen paksuus voi vaihdella 200 mm betonirakenteen tapauksessa jopa ± 15 mm riippuen elementtien saumojen keskinäisestä sijainnista ja etuoikaisun määrästä. Rakenteen pinnoille tuleva pintakäsittelyn massa on siten vähäinen suhteessa betoniseinän massaan sekä tavanomaiseen vaihteluväliin. Märkätilojen välisiä mittauksia ei mittaustuloksissa myöskään ole. Ympäristöministeriön asetuksen (2017) mukaan Ilmääneneristävyydelle asetettu vaatimus ei koske mittausta asuinhuoneistoon kuuluvista wc-, kylpyhuone- ja löylyhuonetiloista toisen asuinhuoneiston vastaavaan

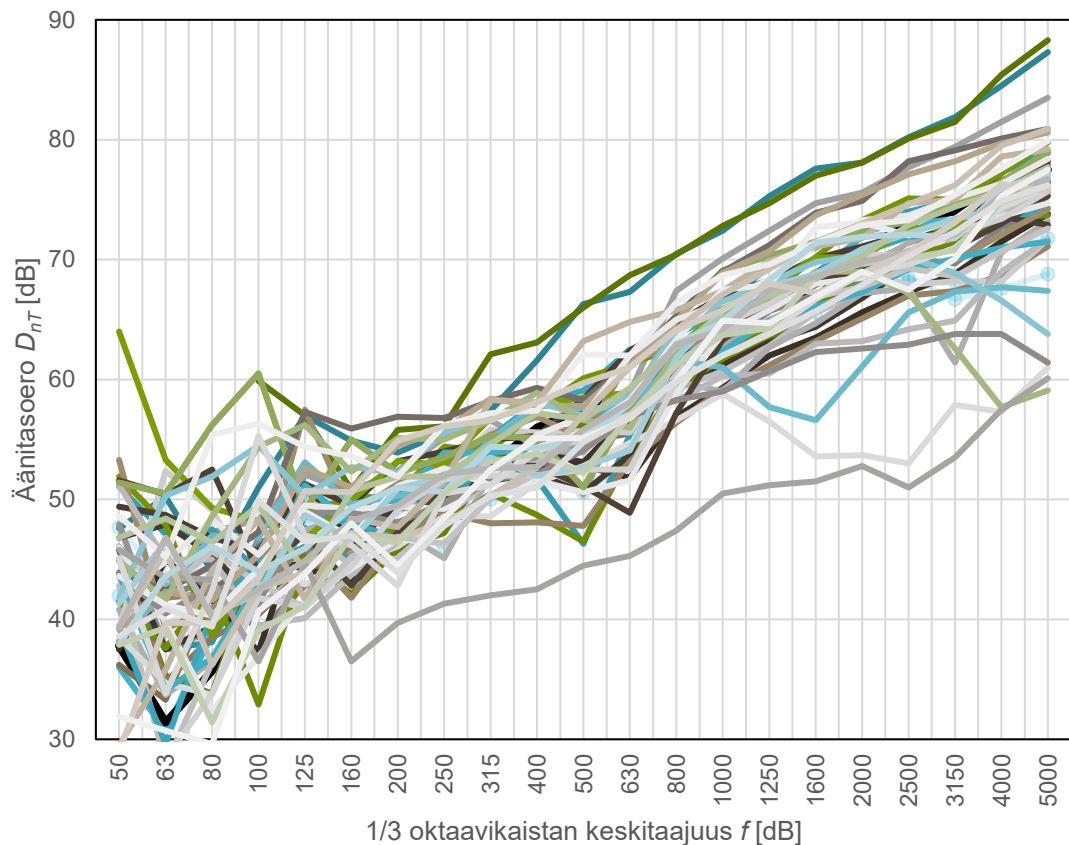
tilaan. Näissä tapauksissa rakenne on vähintään vastaava kuin asuinhuoneistojen välisissä rakenteissa.

RAKENNETYYPPI	VS
1:5	KANTAVA BETONISEINÄ
	

Kuva 15 200 mm kantava betoniseinä

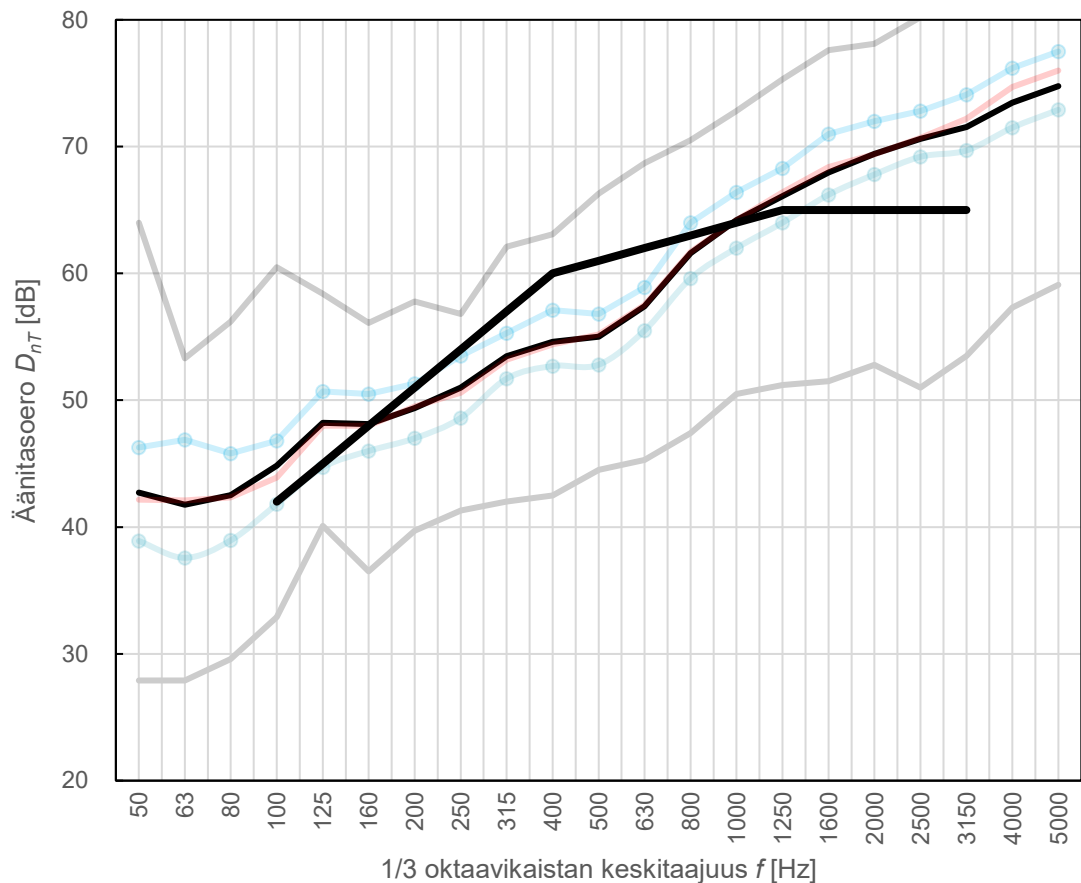
Kuvassa 16 on esitetty 200 mm betonirakenteen ääneneristysten mittaustulosten jakauma. Mittaustuloksia on yhteensä 60 kpl (N=60). Kuvan 16 Kuva 16 yksittäisistä tuloksista voidaan todeta, että mittaustapahtuman aikana on havaittu puutteita. Osassa tuloksista on päästy parempiin arvoihin kuin tulosten keskiarvo. Mittaustapahtuman ja lähtötietojen puutteiden takia kaikissa tilanteissa ei täysin tarkkaa tietoa rakenteesta voida saada. Suuresta käyräparvesta voidaan havaita, että suurin osa käyristä sijaitsee lähellä toisiaan.

Hypoteettisessa mahdollisimman paljon äänitasoeroa parantavassa tilanteessa elementtisauma sijaitsee keskellä isojen tilojen välistä yhteistä seinää. Tämän lisäksi yhteisen pinta-alan määrä on pieni, jolloin etuoikaisun määrä on suuri molemmin puolin seinää lähes koko seinän pinta-alan. Lisäksi toiselle puolelle seinää on sijoitettu keittiökaluusteet. Tällöin ääneneristysarvo voi nousta vaaditun ääneneristysarvon yläpuolelle.



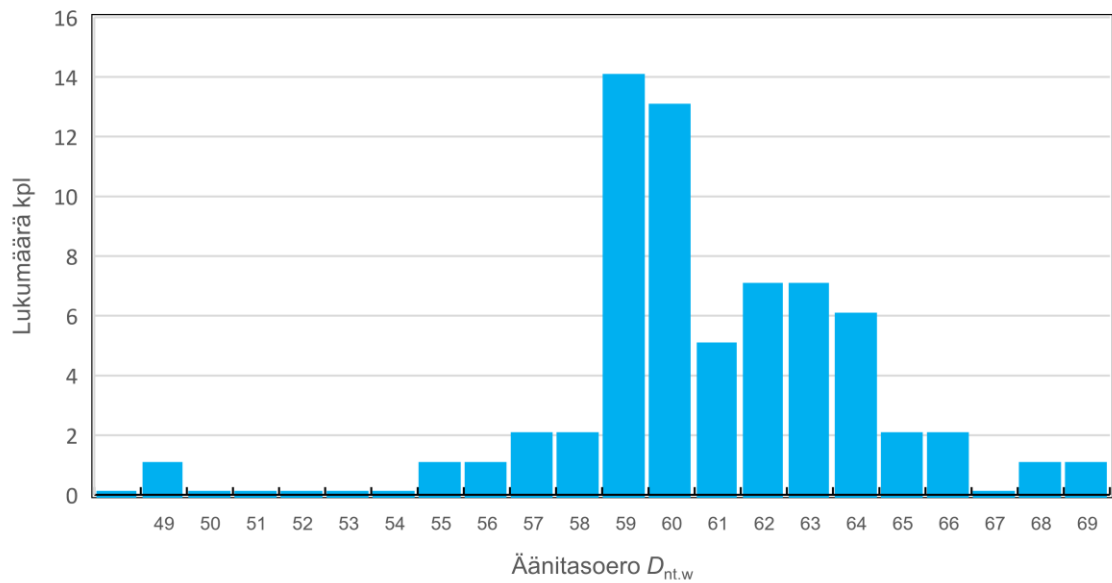
Kuva 16 200 mm betoni rakennehaun mukainen käyräparvi (N=65)

Kuvassa 17 on esitetty jakauman keskiarvo, mediaani, minimi- ja maksimiarvot, 75. persentiili ja 25. persentiili. Mustalla katkoviivalla on merkitty mittaustulosten keskiarvo. Punaisella pisteviivalla on esitetty tulosten mediaani. Tilastollinen käsittely poistaa jakaumasta huonoimmat ja parhaimmat tulokset. Jakaumat voidaan nähdä ylätaajuuksilla, että jakauman alaosa on lähellä keskiarvoa. Tällöin voidaan päätellä, että mittaustuloksien jakaumasta suuri osa on lähellä keskiarvoa. Vertailukäyrä on sijoitettu keskiarvon mukaan. Vertailun vuoksi kuvassa 17 on esitetty myös mittaustulosten minimi- ja maksimiarvot, kun kyseessä on yksi rakenne. Tästä voidaan havaita, että tulosten minimi- ja maksimiarvot eivät anna lisätietoa rakenteen toiminnasta. Minim- ja maksimiarvot kertovat tulosten hajautuvan melko laajalle ja kuvaavat tilaston ylä- ja alarajaa. Minim- ja maksimiarvoja jakaumalle ei siten koettu olennaisena tietona ja jätetään pois muiden esimerkkirakenteiden tapauksista. Vertailukäyrä on sijoitettu keskiarvokäyrälle. Vertailukäyrän perusteella keskimääräinen äänitasoero rakenteelle on $D_{nT,w}$ 61dB.



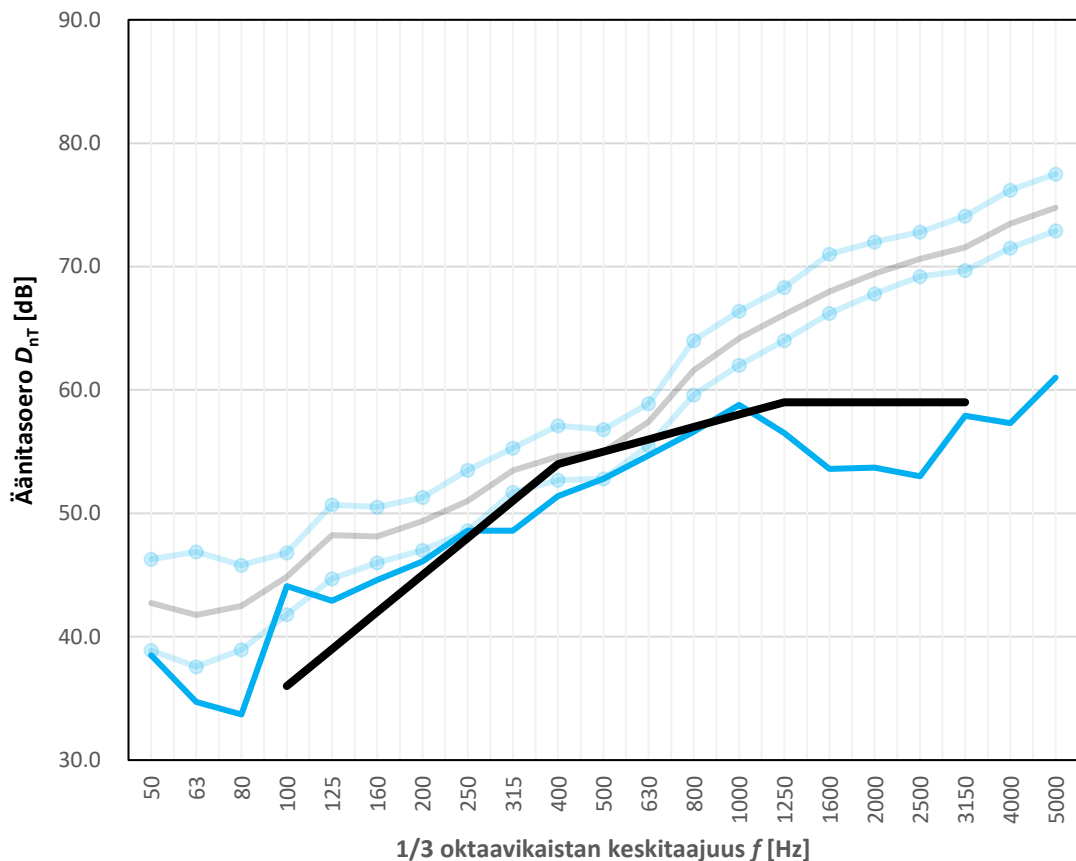
Kuva 17 200 mm betoniseinän tilastollinen äänitasoero, 25. kvanttili ja 75.kvanttili (n=65) sekä liittyvät minimi- ja maksimiarvot vertailua varten

Kuvassa 18 on esitetty mittaustietokannasta saatava jakauma standardoidulle äänitasoerolle $D_{nT,w}$, kun rakenteena on 200 mm kantava betoniseinä. Mittaustuloksista on havaittavissa, että rakenteen mukaiset mittaustulokset täyttävät lähes poikkeuksetta Ympäristöministeriön asetuksen $D_{nT,w}$ 55dB vaatimuksen asuntojen väliselle ääneneristykselle. Jakauman vasemmassa reunassa oleva mittaustulos ei täytä vaatimusta. Mittaustietokannan etuja on myös mahdollisuus vaivatta selvittää projektitiedot ja tarkistaa onko mittaustulos vertailukelpoinen. Projektitietojen kautta pääsee tarkastamaan mittausraportin yrityksen järjestelmässä. Mittaustuloksen $D_{nT,w}$ 49 dB tilanteessa on ollut kyse äänen sivutiesiirtymästä porrashuoneen tiivistämättömien läpivientien kautta.



Kuva 18 Standardoidun äänitasoeron $D_{nT,w}$ jakauma, kun rakenteena on 200 mm betoniseinä (N=65)

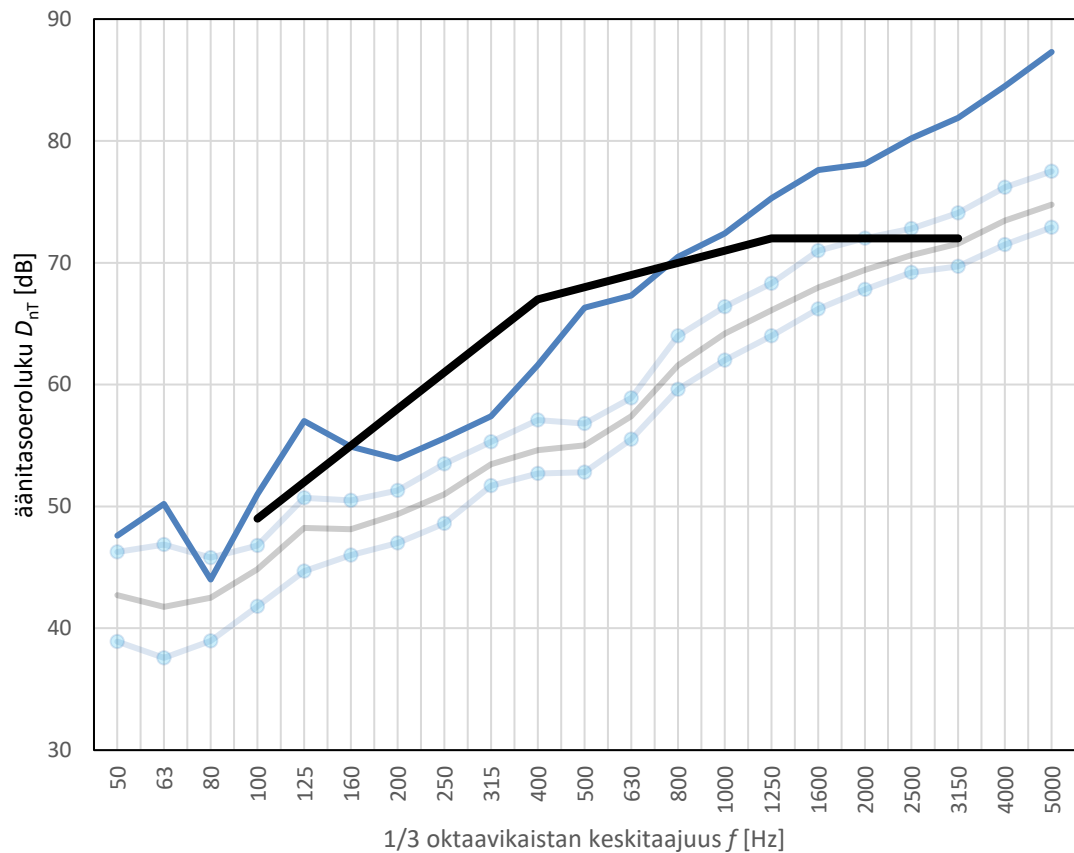
Käyrästä voidaan havaita myös, jos jossain mittaustuloksista on havaittavissa puutteita, esimerkiksi reikä tilojen välisessä rakenteessa, mikäli mittaustuloksia on riittävästi tilastollisen arvion tekemistä varten. Kuvassa 19 on esitetty äänitasoeron D_{nT} mittaustulos ja sille sijoitettu vertailukäyrä. Tämän lisäksi kuvassa on esitetty koko jakauman keskiarvo- ja 25. ja 75. persentiilikäyrät mittaustulosten vertailua helpottamaan. Kylliäisen et al. (2023) mukaan pienetkin raot rakenteessa vaikuttavat keski- ja ylätaajuuksille heikentävästi. Käyrän perusteella voidaan arvioida siten raon kokoa. Vertailukäyrältä voidaan lukea tulokseksi äänitasoeron $D_{nT,w} = 55$ dB. Jakauman perusteella voidaan todeta, että 200 mm betoniseinä täyttää valtaosassa tapauksia Ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä annetun vaatimuksen asuntojen väliselle äänitasoerolle



Kuva 19 Reikä 200 mm kantavassa betoniseinässä

Arvoille, jotka ovat suurempia kuin jakauman 75. persentiili on löydettävissä selitys tilojen sijoittumisesta toisiinsa suhteen mittaustilanteessa. Kun tilojen välinen yhteinen pinta-ala on vain osittain kohdakkain, näkyy sen vaikutus parempana mittaustuloksena. Lähetyshuoneessa oleva äänenpaine aktivoi tällöin vain osaa seinää, eikä ääni välity koko seinän alalta tilasta toiseen. Mittaustulosta voi parantaa myös huoneiston kiintokalustus tilojen välisellä seinällä. Mittaustulokseen voi vaikuttaa myös huoneistojen välisellä rakenteella oleva yksittäinen kiintokaluste. Kiintokalustuksen äänitasoeroa parantava vaikutus on aina tapauskohtainen. Mikäli kalustus peittää koko seinämän, voidaan parannusta kuitenkin havaita koko äänen spektrin alueella. Kuvassa 20 on esitetty mittaustulos, kun tilat ovat vain osittain kohdakkain. Kuvassa on esitetty ääneneristysmittausten tulos sekä siihen liittyvä vertailukäyrä. Kuvassa on lisäksi esitetty esimerkkirakenteen tulosten jakauman 25. ja 75.kvantiilit ja keskiarvokäyrä vertailua varten. Mittaustietokannasta oli mahdollista tarkistaa projektinumero ja selvittämään sen avulla pohjasyyn poikkeukselliselle mittaustulokselle. Esimerkkitapauksessa mittaustietokannan tietojen perusteella tilojen välisen seinän pinta-ala on pieni. Tällöin voidaan epäillä, että tilat eivät ole koko seinän alalta yhteydessä toistensa suhteen.

Kuvan tulosten perusteella voidaan todeta, että tilojen välisen yhteisen pinta-alan pienentäminen parantaa tilojen välistä äänitasoeroa.



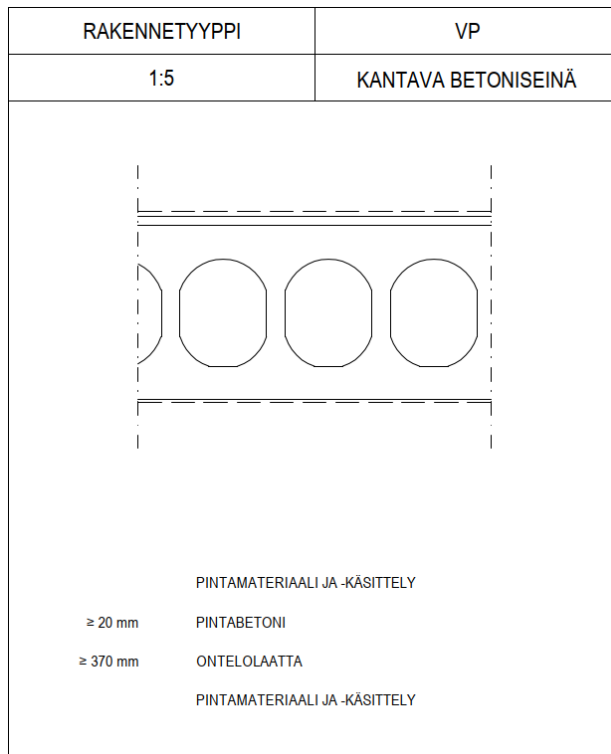
Kuva 20 ilmaaneneristysmittausten tulos, kun kyse on osittain yhteisestä seinästä

4.3 Betonivälipohjan askelääneneristävyys

4.3.1 Ontelolaatasto ja pintarakenteet

Esimerkkirakenteena askelääneneristykseen laskennassa on kuvassa 21 esitetyn betonivälipohjan askelääneneristävyys, kun rakenteena on 370 mm paksu ontelolaattarakente, jonka päällä on 10...20 mm tasoitevalu ja lattiapinnoite. Ontelolaattojen pintabetonin, eli tavanomaisissa tilanteissa tasoitevalun määrä voi vaihdella toteutuksen aikana. Lattian pintamateriaalin parannusluvusta ΔL ei ole tarkkaa tietoa, joten kuvan 22 käyrästä on esitetty vertailun vuoksi kaikki parketti- ja muovimattolattiat sekä mahdolliset muut lattiapinnoitteet sekä niiden askelääneneristystä parantavat alusmateriaalit (esim. Tuplex).

Rakenteen alapinnassa on maalaus käsittely. 370 mm ontelolaattaväli pohja on valittu tähän esimerkiksi, koska se on hyvin yleisesti tunnettu ja käytetty rakenne ja siitä on tietokannassa paljon mittaustuloksia. Kaikista 370 mm ontelolaattaväli pohjarakenteen sisältävistä mittauksista on valittu ne rakenteet, joissa rakennekuvauksen mukaan ei ole alakattoa, kelluvaa pintabetonilaattaa tai muuta muulla tavoin askelääneneristystä parantavaa rakennetta.

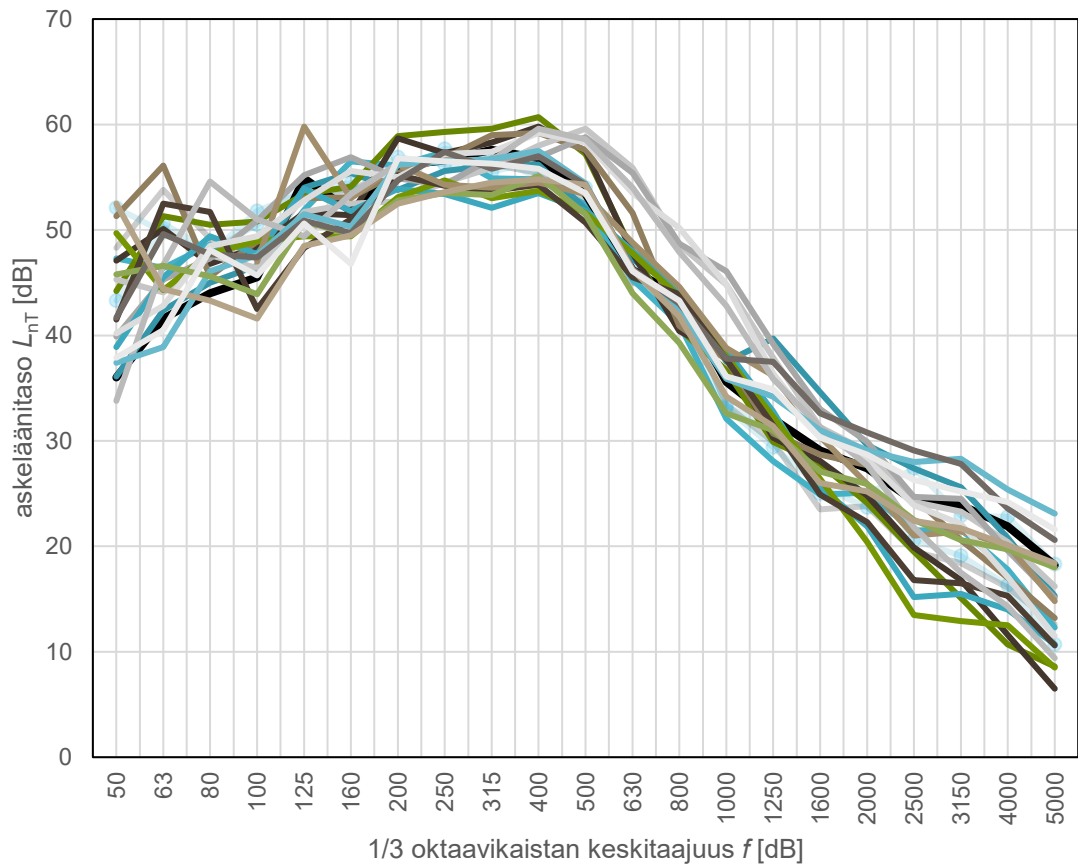


Kuva 21 esimerkkirakenne 370 mm kantava ontelolaattarakenne, jossa 20 mm pintavalu

Kuvassa 22 on esitetty kaikki esimerkkirakenteen mittaustulokset käyräparvena. Käyrästä on esitetty ne mittaukset tietokannasta, jotka on mitattu ylhäältä alaspäin. Mittaustuloksista voidaan havaita eroja pienillä taajuuksilla ja korkeilla taajuuksilla. Pienten taajuuksien ongelmat tulevat vaaditun äänenpaineen ongelmasta. Mittarien herkkyys suhteessa taustäänitasoon voi vaikeuttaa äänen havaitsemista vastaanottohuoneessa. Hopkinsin (2007) mukaan äänikenttä on pienillä taajuuksilla epädiffuusi. Epädiffuusi äänikenttä tarkoittaa, että tilan jälkikaiunta-aikaa ei voida arvioida suoralla linjalla, vaan ääni heijastuu eri suuntiin eri tavoin.

Mittaustuloksista voidaan havaita, että 370 mm betonirakenteen mittaustulokset ovat samankaltaisia toistensa kanssa, eli askeläänitaso L_{NT} on heikoimmillaan (suurimmillaan) ala- ja keskitaajuuksilla ja parhaimmillaan korkeilla taajuuksilla. Korkeilla

taajuuksilla hajontaa aiheuttaa mm. pintamateriaalin vaikutus (Kylliäinen, et al., 2023). Keskitajaajuuksilla mitatut arvot ovat lähellä toisiaan, pääosin välillä 50 ... 60 dB.

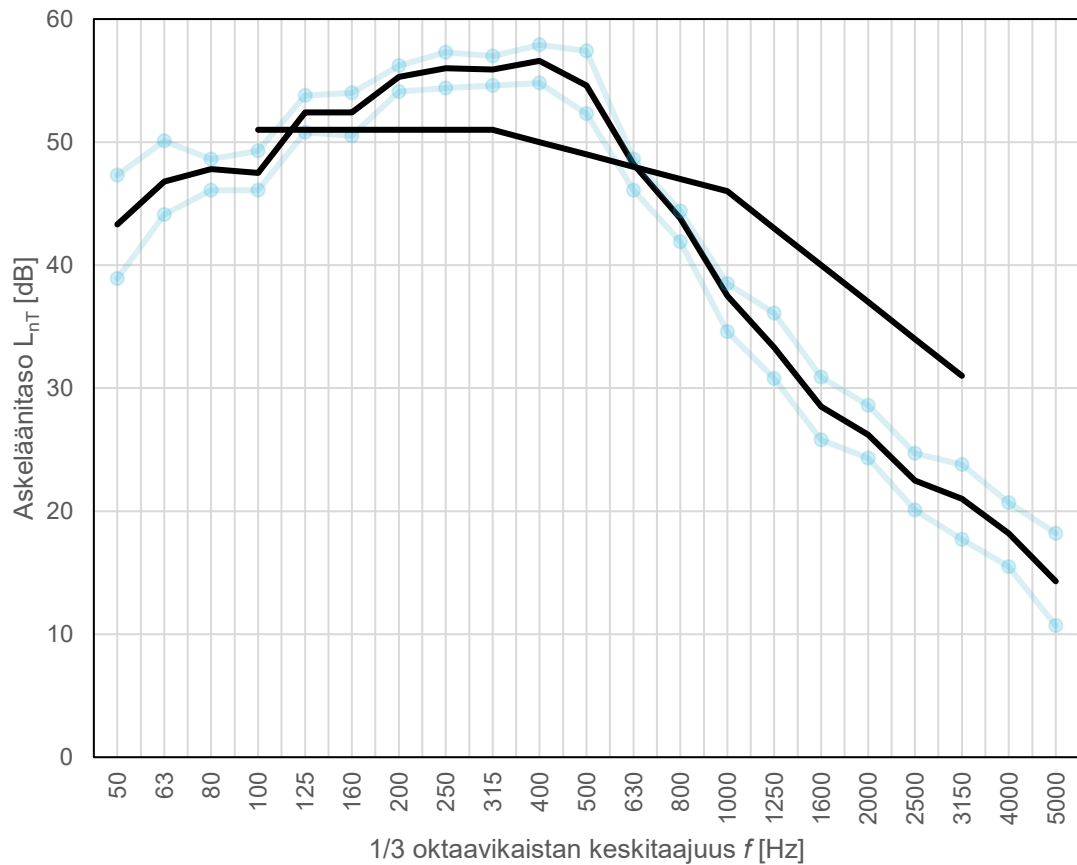


Kuva 22 370 mm ontelolaattarakenteen ääneneristysarvot (n=22)

Mittauksissa hajontaa aiheuttaa myös mittausepävarmuus pienillä taajuuksilla. Tähän vaikuttaa mm. taustäänitaso, eli kykeneekö mittari mittaamaan ympäristön äänistä riippumatta haluttua äänitasa. Taustäänitasoon pyritään vaikuttamaan mittauskohteessa, mikäli se on mahdollista esimerkiksi valitsemalla mittausajankohta siten, ettei kohteessa ole muuta toimintaa. Työmaa-aikana rakennuskohteissa on muita toimijoita, jolloin heidän kanssaan mittausajankohdan sopiminen tarkemmin helpottaa mittaustoimintaa. Äänikenttä tilojen välillä voi olla merkittävästikin erilainen. Tällöin esimerkiksi tilojen tilavuudessa on mittaluokkaero tai tilat sijaitsevat vain osittain toistensa päällä. Silloin äänikenttä ei aktivoidu koko lattiapinta-alalta.

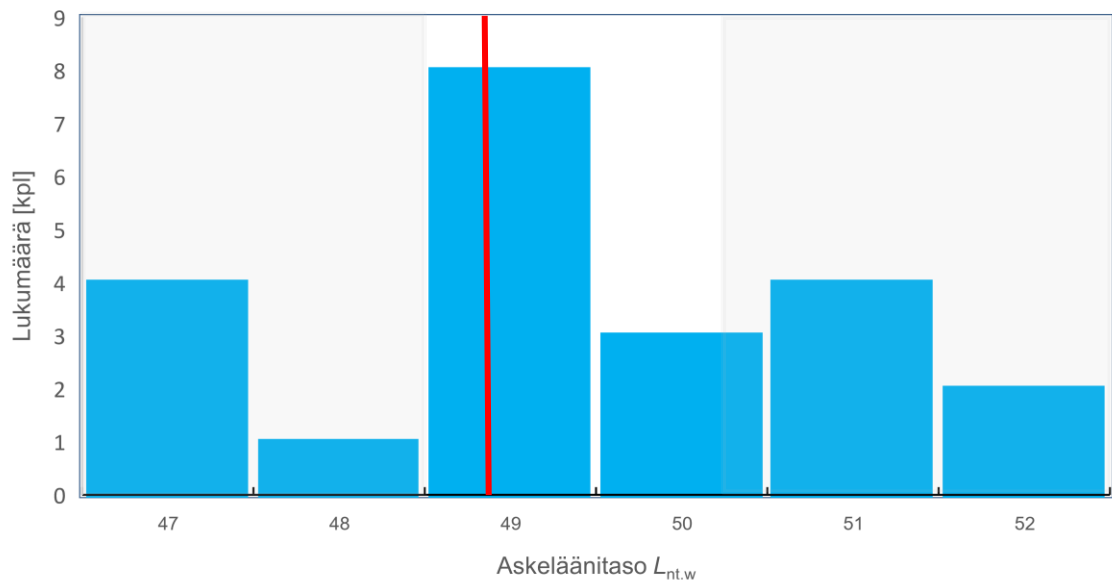
Kuvassa 23 on esitetty 370 mm ontelolaattarakenteen mittaustuloksista lasketut keskiarvot ja 25. ja 75. persentiilit. Keskiarvokäyrälle on sijoitettu vertailukäyrä. Keskiarvokäyrän yksilukuarvo luettuna vertailukäyrältä on $L_{nT,w}$ 49dB. Persentiilit todentavat kuvan 22 käyräparvesta havaittua. suuri osa järjestetyistä tuloksista on hyvin

lähellä keskiarvoa. Jakaumasta voidaan päätellä, että tulokset ovat lähellä keskiarvoa, mutta hajontaa tapahtuu enemmän matalilla taajuuksilla ja ylätaajuuksilla.



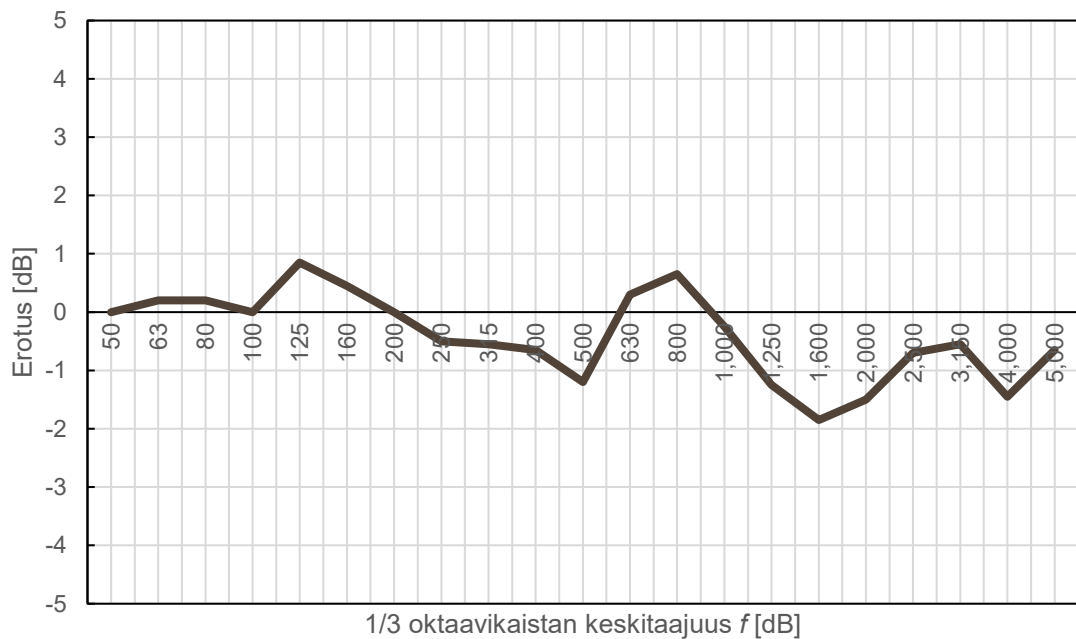
Kuva 23 Jakauma 370 mm betonirakenteelle, kun lattiamateriaaleja ei ole lajiteltu

Kuvassa 24 on esitetty askeläänitason jakauma, kun lattian pintamateriaalia ei ole lajiteltu. Tuloksista voidaan havaita, että jakauman arvot ovat välillä $L_{nT,w}$ 47-52dB. Suurin osa arvoista on välillä 49-51 dB. Askeläänitasojen keskiarvo on $L_{nT,w} = 49,37$ dB. 25. persentiili on 49 dB ja 75. persentiili on 50,75 dB. Tällöin puolet tuloksista sijaitsee välillä 49 – 50,75 dB. 370 mm ontelolaatta on paljon asunnoissa käytetty kustannustehokas rakenne. 370 mm ontelolaattavälipohjarakennetta käytetään monissa eri käyttötarkoituksissa. Jos kaikki mitatut rakenteet ovat asuinrakennuksissa tehtäviä mittaustuloksia, niin voidaan todeta, että mittaustulokset täyttävät Ympäristöministeriön asetuksen rakennuksen ääniympäristöstä (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017, 2017) vaatimukset tilojen väliselle askelääneneristykseksi.



Kuva 24 Askeläänitason L_{nt} tulosten jakauma [dB]

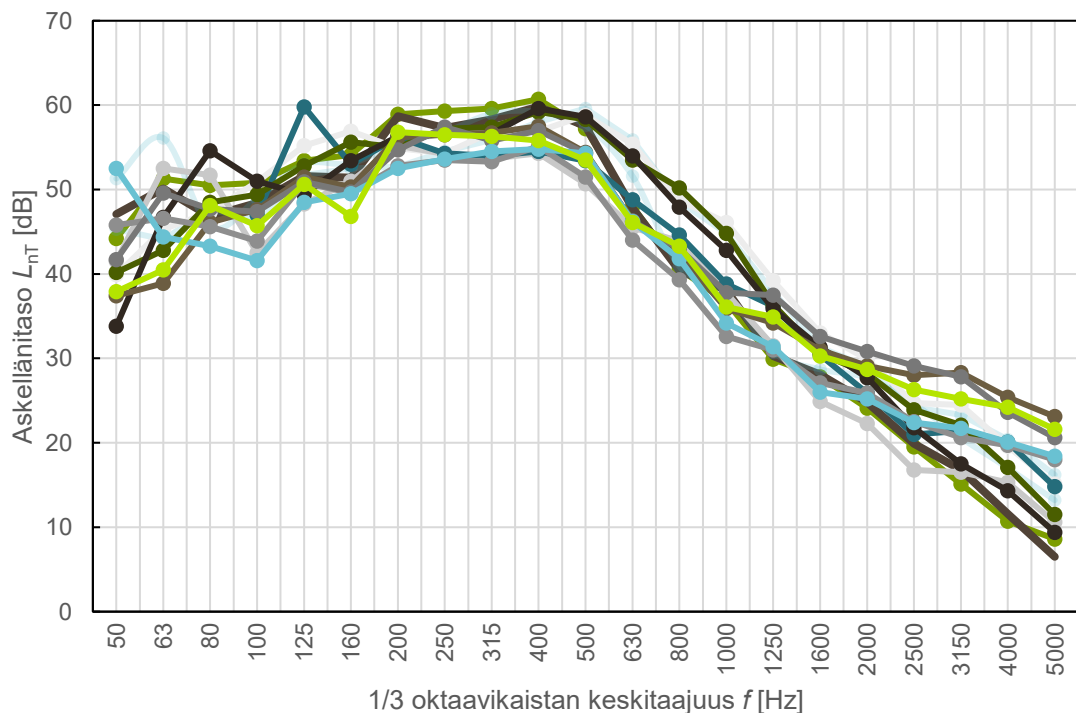
Kuvassa 25 on esitetty jakauman keskiarvon ja mediaanin laskennallinen erotus. Tästä voidaan havaita, että molemmat tilastoa kuvaavat lukuarvot ovat lähellä toisiaan ja lähellä nollaa. Tällöin voidaan todeta, että tilaston jakauma on tasaisesti jakautunut molemmin puolin. Mikäli erotus olisi merkittävästi suurempi (esimerkiksi +10 dB) tai merkittävästi pienempi (esimerkiksi -10 dB) jollain 1/3 oktaavintaajuudella, voitaisiin silloin päätellä, että tilaston hajonta on suurta ja tilasto on näillä taajuuksilla voimakkaasti vino.



Kuva 25 Askeläänitason keskiarvon ja mediaanin erotus 1/3 oktaavikaistoittain, kun lattian pintamateriaalia ei ole tuloksista lajiteltu (N=23)

4.3.2 Pintamateriaalina parketti

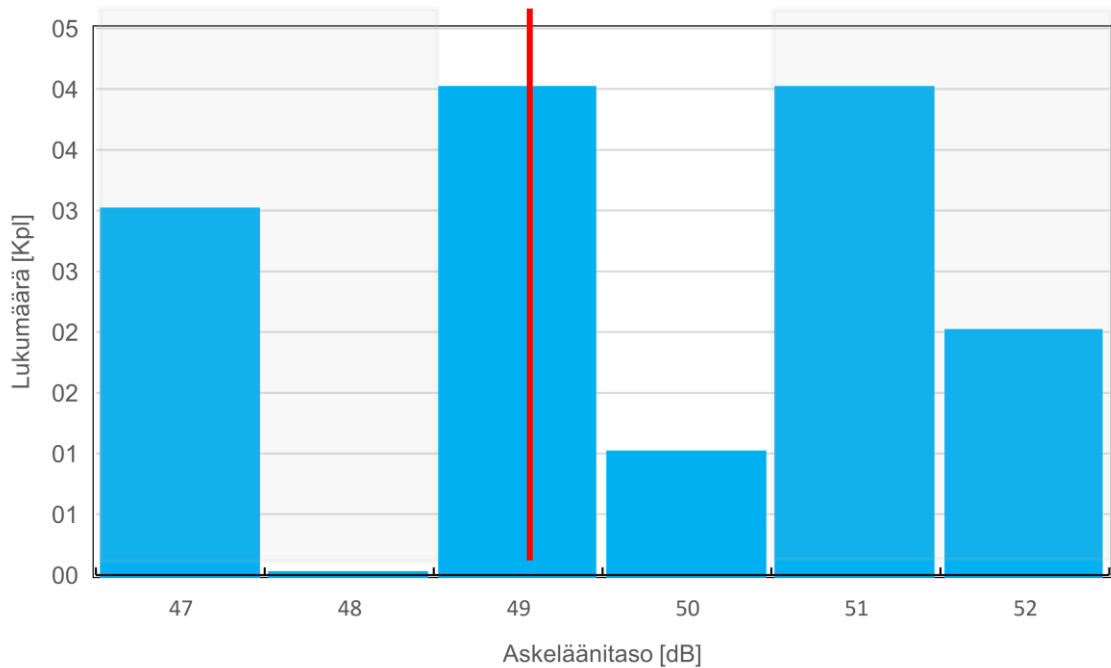
Kuvassa 26 on esitetty mittaustietokannan käyrästön askeläänitasot, kun lattiamateriaalina on parketti. Tuloksista on havaittavissa hyvin samankaltaisia havaintoja kuin kaikkien ontelolaattaväli­pohjien jakaumasta; Keskitaa­juuksilla mittaustulokset ovat lähellä toisiaan ja ala- sekä ylätaajuuksilla hajontaa on enemmän. Mitattuihin äänitasoihin alle 125 Hz taajuuksilla vaikuttaa mittausepävarmuus sekä mittausympäristön vaikutus. Tuloksissa havaitaan pientä hajontaa kaikilla taajuuksilla. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi lattiapäällysteen alusmateriaalin valinta tai parketin paksuus ja siten sen massa ja jäykkyys. Alusmateriaalin tietoja ei tässä ole huomioitu.



Kuva 26 Askeläänitaso esimerkkirakenteella, kun lattiapinnoitteena on parketti (N=12)

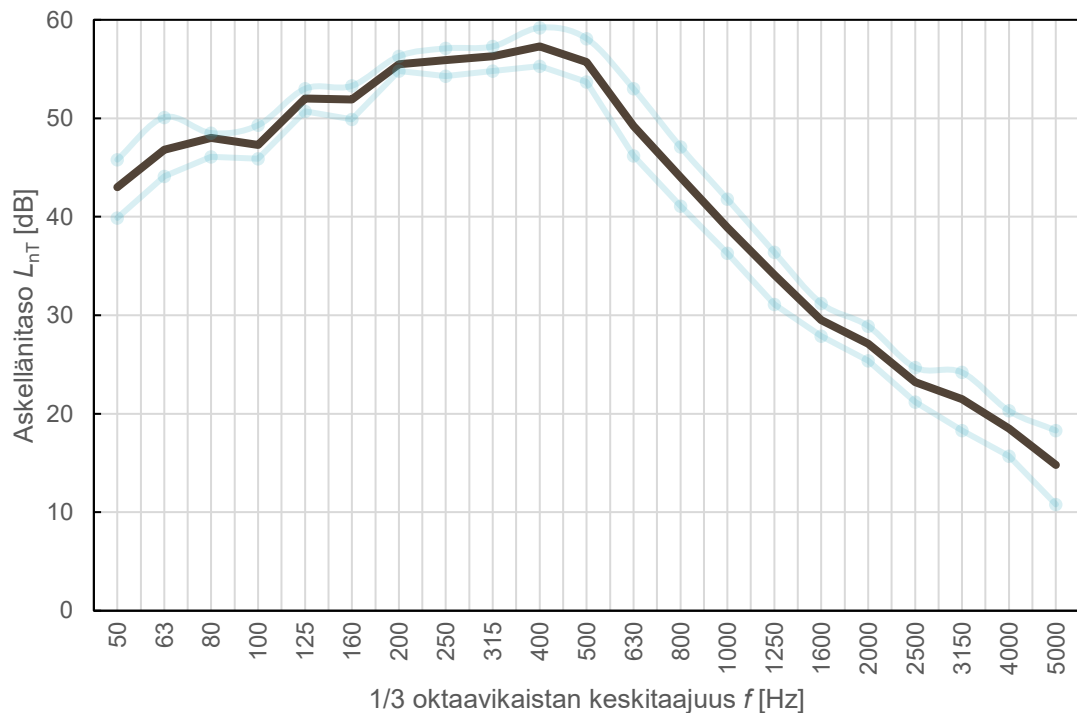
Kuvassa 27 on esitetty standardoidun askeläänitason $L_{nT,w}$ arvojen jakauma, kun lattiamateriaalina on parketti. Saatujen tulosten keskiarvo on 49,64 dB, 25. persentiili on 49 dB ja 75. persentiili on 51 dB. Tästä voidaan havaita, että jakauman keskiarvo on lähempänä jakauman 25. persentiiliä kuin 75. persentiiliä. Tulokset täyttävät ympäristöministeriön asetuksessa (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017, 2017) annettuja vaatimuksia muun muassa asuntojen välillä

$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 53$ dB. Kaikki mittaustulokset eivät tosin ole asuntojen välisien mittausten tuloksia.



Kuva 27 Standardoidun askeläänitason $L_{nT,w}$ arvojen jakauma, kun lattian pintamateriaalina on parketti. $N=12$

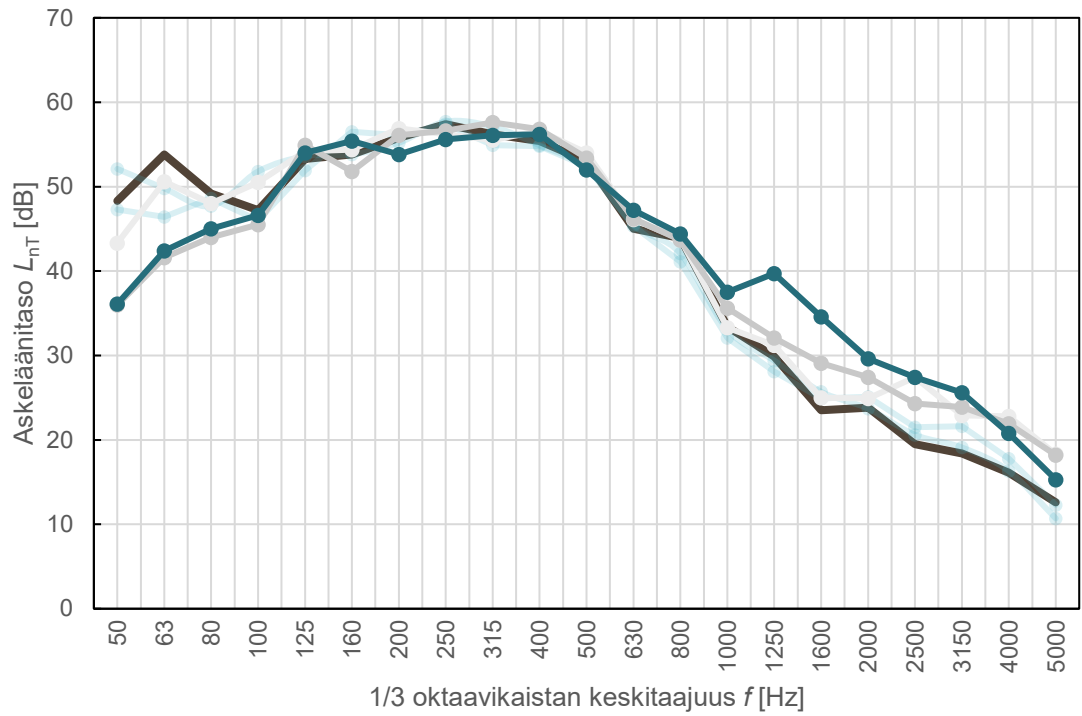
Kuvasta 28 voidaan havaita, että 25. ja 75. persentiilit ovat lähellä keskiarvoa. Järjestettyjen tulosten 50 keskimmäistä persentiiliä ei siten ole kaukana toisistaan. Saatuja tuloksia voidaan siten käyttää rakenteesta mitattujen mittalukujen arviointiin. Kuvan 28 jakaumassa muodostuu hajontaa ylä- ja alataajuuksille. Tämän voidaan olettaa olevan seurausta epädiffuusista äänikentästä pienillä taajuuksilla. Korkeilla taajuuksilla mitatut äänitasot vastaanottohuoneessa ovat matalia ja voivat jäädä taustäänitason alle. Tämä lisää mittaustilanteen tuloksiin hajontaa.



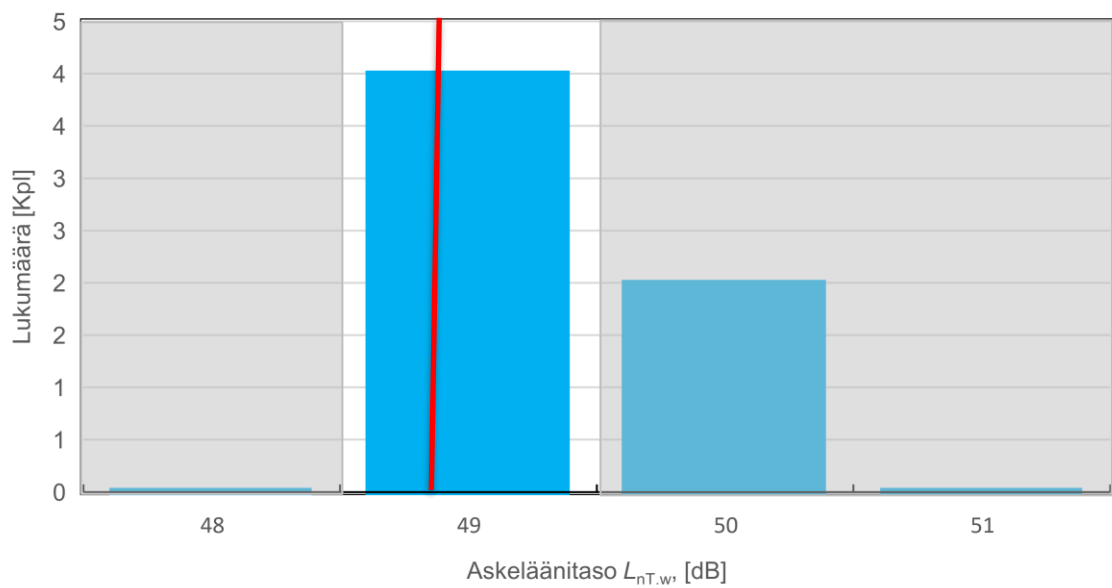
Kuva 28 Askeleen taso, kun lattiamateriaali on parketti. $N=12$

4.3.3 Pintamateriaalina laminaatti

Vaihtoehtoisesti pintamateriaaliksi voidaan valikoida laminaatti + alusmateriaali. Tietokannasta saatavat tulokset laminaattilattioille on esitetty kuvassa 29. Kuvan perusteella mittaustulokset vastaavat hyvin toisiaan 125 – 800 Hz taajuusalueella. Kun otetaan huomioon kaikki mitatut tulokset laminaattilattiarakenteella, on hajontaa havaittavissa alle 125 Hz taajuuksilla sekä 1000 Hz ja sen yllä olevilla taajuuksilla. Toisaalta kuvan 30 perusteella askeläänitasoluvut ovat välillä 49-50 dB. Tietokannassa ei ole eritelty onko asennettu alusmateriaalia laminaatin alle. Mittaustietokannasta suodatettujen tulosten keskiarvo on 49,33 dB, 25. persentiili on 49 dB ja 75. persentiili 50 dB. Tulosten perusteella voidaan todeta mittaustulosten olevan lähellä toisiaan.

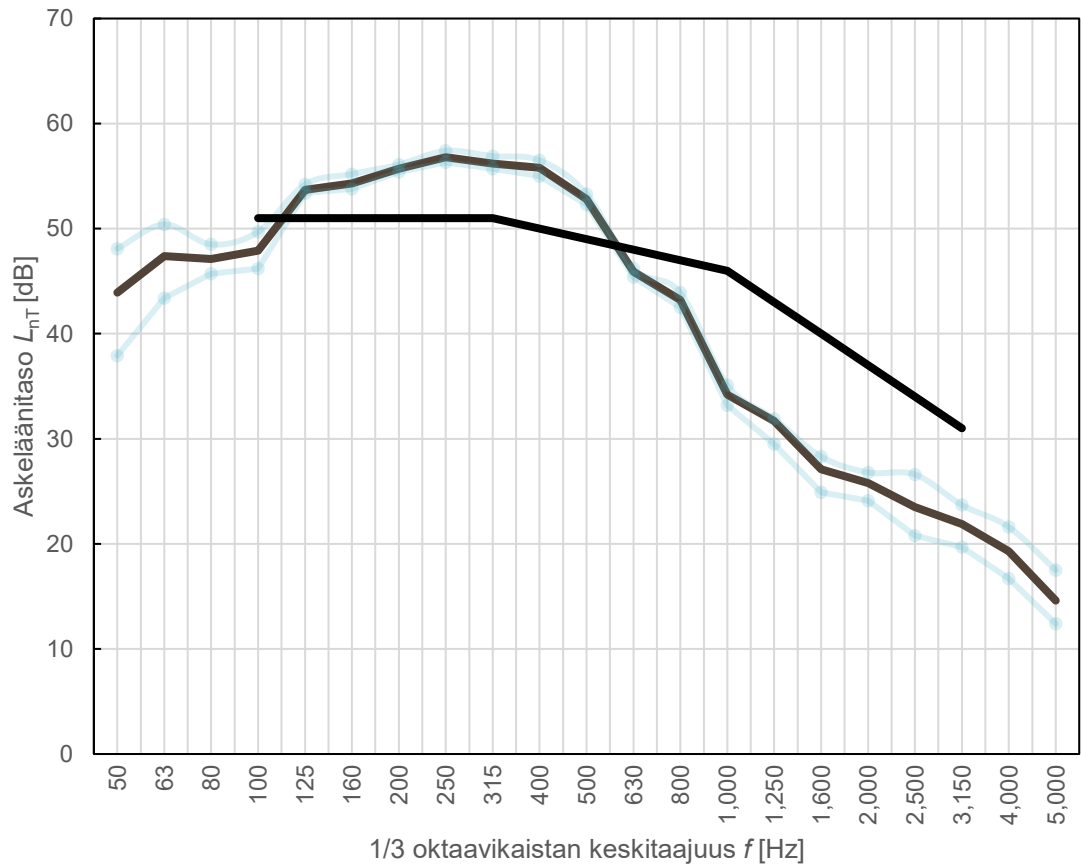


Kuva 29 Mittaustulokset, kun lattiamateriaalina on laminaatti (N=6)



Kuva 30 Askeläänitason jakauma, kun lattian pintamateriaalina on alusmateriaali + laminaatti

Kuvassa 31 on esitetty esimerkkirakenteen askeläänitason keskiarvokäyrä sekä persentiilikäyrät, kun pintamateriaalina on laminaatti. Kuvan 31 käyristä voidaan havaita, että keskiarvo sekä 25. ja 75. persentiilit ovat hyvin lähellä toisiaan. Poikkeuksena hoikkeuteen on alataajuudet (alle 100Hz) sekä ylätaajuudet (yli 2000Hz). ala- ja ylätaajuuksilla on havaittavissa hajontaa tuloksissa. Mittaustulokset ovat persentiilien perusteella hyvin lähellä toisiaan ja kuvaavat hyvin rakenteen mukaista askeläänitasoa.



Kuva 31 Askeläänitaso esimerkkirakenteella, kun lattian pintamateriaalina on laminaatti.
N=6

5. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

5.1 Mittaustietokantatyökalu

Työn tavoitteena oli kehittää mittaustietokantaa hyödyntävä suunnittelua tukeva työkalu. Mittaustietokantaa kehitettiin lähtötilanteesta ja työn tuloksena saatu mittaustietokannan hakutyökalu on käyttöön otettu. Akustiikkasuunnittelijat pystyvät tarkastamaan parametrisella tarkastelulla tehtyjä laskentatuloksia todellisten mittausten perusteella. Tämä tarkoittaa suunnittelutyöhön käytettävän ajan tehostamista. Taulukossa 3 Taulukko 3 on esitetty tämän työn ongelmia ja niihin tehtyjä ratkaisuja.

Taulukko 3 työn tavoitteiden ja tavoitteiden mukaisten ratkaisujen vertailu

Ongelma / Tavoite	Ratkaisu
Mittaustietokantaa hyödyntävä työkalu	Toteutettiin mittaustietokantatyökalu, joka hyödyntää mittaustietokantaa.
Mittaustietokannan kehittäminen	Tietokannan kokoa ja tallennettavia tietoja on muutettu ja jäsennelly. Mittaustietokanta on muunnettu NoSQL-tietokannaksi
Mittaustoiminnan lähtötietojen laadun varmistaminen	<ul style="list-style-type: none"> - muokattiin lähtötietojen syöttömenettelyä - ohjeistettiin tietojen syöttöä - toteutettiin suppea rakenneosatietokanta mittaustietokannan tueksi
Mittaustietokannan hyödyntäminen suunnittelussa	Mittaustietokantatyökalun avulla mittaustietokantaa voidaan hyödyntää suunnittelun tukena. Työkalulla voi suodattaa tehtyjä mittauksia sekä muodostaa keskiarvo- ja jakaumakäyriä sekä muodostaa laskenta-arvoja

5.2 Mittaustietokantatyökalun ongelmat

Työn aikana havaittiin, että mittaustietokannassa merkittävimpana ongelmana on mittaustoiminnan lähtötietojen laatu tai niiden puuttuminen kokonaan. Tällöin mittauksen yhteydessä kirjattavan rakenteen kuvaus voi olla suppea tai jopa olematon. Mittaustoiminnasta saatavan mittadatan laatuun vaikuttavat tekijät on huomioitu mittaustoiminnan akkreditoinnin yhteydessä.

Samaa rakennetta voidaan kuvata usealla eri tavalla. Tietokanta sekä Power BI suorittaa hakuja merkkikorippuvaisesti. Mittaustietojen käsittelyn yhteydessä kirjattava käsitteistö ja tuotenimet tarkoittavat eri rakenteita. Havaittiin, että eri henkilöiden tekemät merkinnät jopa samasta rakenteesta vaihtelivat. Näihin laadullisiin ongelmiin ratkaisuna poistettiin mittausten käsittelyn yhteydessä mahdollisuus kirjata seinä- tai lattiarakenteen rakenneosat vapaasti ja luotiin rakennetietokanta mistä eri rakenneosia on mahdollista hakea. Vanhojen mittaustulosten kirjauksia muutettiin suoraan tietokannassa, jotta tietokannan vanhoja kirjauksia voisi myös hyödyntää jatkotutkimuksien yhteydessä.

Tietokantaan on tallennettu myös tietoa mitattavan rakenteen ympäröivistä rakenteista. Näitä rakenteita ovat mitattavan rakenteen ympäröivät ulko- ja väliseinät sekä väli-, ala- tai yläpohjarakenteista mahdollista sivutiesiirtymäanalyysiä varten. Ympäröivissä rakenteissa toistuu lähtötieto-ongelmat, sekä kirjaustavan ongelmat.

5.3 Tietokantatyökalun edut

Työn aikana kehitetyllä työkalulla on tarkoitus esittää mitattuja rakenteita ja esittää käyrästöt sekä mittaukseen liittyvät lähtöarvot suunnittelun lähtötiedoiksi. Mittaustietokannalla

- voidaan selvittää keskimääräisiä tuloksia sekä esittää tulosten jakauma erilaisille rakenteille vertailua varten
- voidaan arvioida rakenteen muutoksia eri rakennetyyppien välillä yksittäisten mittausten perusteella
- saadaan paremman käsityksen mitattujen rakenteiden ääneneristyksestä

Työkalun etuja ovat nopea tiedon latausaika tietokantaan. Tietokannan muoto on valikoitu siten, että tietokantaa voidaan jatkossa laajentaa vähäisellä vaivalla, mikäli esimerkiksi mittausmenetelmät kehittyvät tai halutaan lisätä tietokantaan muunlaista mittausdataa. Valittuun NoSQL-tietokantaan on mahdollista lisätä tietueita lähes rajatta sekä hyödyntää tietokantaa myös muihin mittausaloihin.

Mittaustietokantatyökalun avulla voidaan havainnoida eri virheiden ja puutteiden vaikutusta ääneneristykseen. Ääneneristystä heikentävien tai parantavien ilmiöiden vaikutus on ollut tiedossa kirjallisuudessa, mutta työkalun avulla tuloksia voidaan verrata tietokantaan. Ilmiöiden todenmukainen esittäminen antaa esimerkiksi aloittelevalle suunnittelijalle mahdollisuuden havainnoida, miten ja millä taajuusalueella parantavat tai heikentävät ääneneristysilmiöt vaikuttavat mittaustulokseen. Työkalun etuina on mahdollisuus suodattaa rakenteita hyvinkin tarkasti.

5.4 Jatkotutkimusaiheet

Vaikka tässä työssä on saatu paljon aikaan, kannattaa tietokantaa hyödyntää jatkotutkimuksissa. Jatkotutkimusaiheita on esimerkiksi

- Oppivien neuroverkkojen ja koneälyn hyödyntäminen ilmaääneneristuksen empiirisessä mallintamisessa
- Oppivien neuroverkkojen ja koneälyn hyödyntäminen akustiikkasuunnittelussa
- Oppivien neuroverkkojen ja koneälyn hyödyntäminen askelääneneristuksen empiirisessä laskennassa
- Mittaustietokannan tulosten analyysin jatkojalostaminen
- Väliseinärakenteiden empiirinen mallintaminen neuroverkkoja ja koneälyä hyödyntämällä
- Julkisivurakenteiden empiirinen mallintaminen mittaus- ja rakennetietotietokannan avulla hyödyntämällä neuroverkkoja ja koneälyä

LÄHTEET

- Agile IT Inc., 2022. *Comparing file sizes for data stored in csv excel json and xml*. [Online] Available at: <https://www.agileit.com/news/comparing-file-sizes-for-data-stored-in-csv-excel-json-and-xml/> [Accessed 07 03 2023].
- American National Standards Institute, 2004. *ANSI S1.11*, Melville, New York: ASA Standards.
- Beaulieu, A., 2020. *Learning SQL*. Third Edition ed. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.
- Blank, S. G. & Dorf, B., 2020. *The Startup owner's manual: The step-by-step guide for building a great company*. 1st edition ed. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Brownley, C. W., 2016. *Foundations for Analytics with Python*, Sebastopol: O'Reilly Media, Inc..
- Digi- ja väestövirasto, 2022. *Palvelukuvaus*. [Online] Available at: <https://www.avoindata.fi/fi/palvelukuvaus> [Accessed 09 03 2023].
- Donnelly, R. A. J. & Abdel-Raouf, F., 2016. *Statistics*. 3rd Edition ed. Indianapolis, Indiana: Alpha.
- Ecma International, 2013. *ECMA-404 The JSON Data Interchange Format*. Geneve: Ecma International.
- Eddin, M. B. et al., 2022. *Prediction of Sound Insulation Using Artificial Neural Networks Part I: Lightweight Wooden Floor Structures*. Basel: MDPI.
- Fielding, R. T., 2000. *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*, Irvine, CA: University of California.
- FINAS, 2021. *Akkreditointipäätös A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Akustiikkasuunnittelu*, Tampere: FINAS Finnish Accreditation Service.
- Grodd James R., W. P. N., 1999. *SQL: The Complete Reference*. Berkeley, California: Osborne/McGraw-Hill.
- Harrison, G., 2015. *Next Generation Databases: NoSQL and Big Data*. 1st edition ed. Berkeley, CA: Apress.
- Hongisto, V., 2022. *Rakennusakustiikka ja meluntorjunta*. s.l.:s.n.
- Hopkins, C., 2007. *Sound Insulation*. First Edition ed. Oxford: Elsevier Ltd..
- Kielitoimisto, 2022. *Kielitoimiston sanakirja*. [Online] Available at: <https://www.kielitoimistonsanakirja.fi/tietokanta> [Accessed 10 3 2023].
- Kimball, R. & Ross, M., 2013. *The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional modeling*. Third Edition ed. Indianapolis(Indiana): John wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana.
- Kylliäinen, M., 2006. *Talonrakentamisen akustiikka*. 1.painos ed. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.

- Kylliäinen, M., Takala, J. & Hongisto, V., 2015. Ilmaääneneristysluku sekä standardisoitu ja normalisoitu äänitasoeroluku huoneistojen välisen ilmaääneneristykseen kuvaajina. Tamepre, Akustinen seura ry.
- Kylliäinen, M., Tervo, S. & Yli-Pietilä, A., 2023. *Talonrakentamisen akustiikka*. 2. uudistettu painos ed. Tampere: Tampereen yliopisto.
- Latvanne, P., Kylliäinen, M., Kovalainen, V. & Lietzén, J., 2019. *Parametrinen laskentamalli puuvälipohjien askelääneneristävyyden arviointiin*. Espoo, Akustinen Seura ry.
- Lietzén, J. & Kovalainen, V., 2021. Rakenteiden ilmaääneneristävyyden arviointi elementimenetelmällä. Turku, Akustinen Seura Ry.
- Lietzén, J. & Kylliäinen, M., 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mittaustulosten perusteella, Helsinki: s.n.
- Microsoft, 2023. *What Is Power BI?*. [Online] Available at: <https://powerbi.microsoft.com/en-us/what-is-power-bi/> [Accessed 9 Maaliskuu 2023].
- Moilanen, J., Niinioja, M., Seppänen, M. & Honkanen, M., 2018. *API-talous 101*. Ensimmäinen painos ed. Helsinki: Alma Talent Oy.
- Norman, D. A., 2013. *Design Of Everyday Things*. Revised & Expanded Edition ed. New York, New York: Basic books.
- Oksanen, B. & Huhtala, T., 2023. *Uudet laskentamenetelmät raideliikenteen tärinän ja runkomelun arvioinnissa*. Tampere, Raideliikenteen Teknisten ja Toimihenkilöiden Liitto RTTL ry.
- Olafsen, S., 2016. *Indoor noise from urban railbound transport*, Lund: Engineering Acoustics, LTH, Lund University.
- Pooneh, S. B. et al., 2019. Theory, Application, and Implementation of Monte Carlo Method in Science and Technology. 1st ed. Lontoo: Intechopen Limited.
- Rakennustieto Oy, 2017. *Rakennustöiden laatu 2017*, Helsinki: Talonrakennusteollisuus ry ja Rakennustietosäätiö RTS sr.
- Riitakangas, J., 2020. Ilmaääneneristävyyden parametrinen laskentamallin validointi. s.l.:Savonia-Ammattikorkeakoulu.
- Rindel, J. H., 2017. *Sound Insulation in Buildings*. 1st edition ed. s.l.:CRC Press.
- SFS-EN ISO 12354-1, 2017. Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN ISO 12354-1, 2017. Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN ISO 16032, 2004. Akustiikka. Talotekniikan laitteiden aiheuttaman äänenpainetason mittaaminen. Tekninen menetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto Ry.
- SFS-EN ISO 16283-1, 2014. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

- SFS-EN ISO 16283-2, 2020. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.
- SFS-EN ISO 266, 1997. *Akustiikka. Suositeltavat taajuudet*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.
- 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 ry.
- SFS-EN ISO 717-2, 2020. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2022. *Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus*. 2. painos ed. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Taanila, A., 2011. *Tunnuslukuja*, s.l.: Aki Taanila.
- Talend, 2023. *Structured vs. Unstructured Data: A Complete Guide*. [Online] Available at: <https://www.talend.com/resources/structured-vs-unstructured-data/> [Accessed 27 03 2023].
- Thompson, J. R., 2011. *Empirical Model Building: Data, Models, and Reality*. toinen painos ed. Hoboken: John Wiley & Sons INC.
- Tilastokeskus, 2023. *Kvanttiili*. [Online] Available at: <https://www.stat.fi/meta/kas/kvanttiili.html> [Accessed 24 03 2023].
- Ullman, J. D. & Widom, J., 2014. *A First Course in Database Systems*. Third Edition ed. Harlow(Essex): Pearson Education Limited.
- Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 976/2017 (2017).