

Kevyen kaksoisrakenneseinän teräsrangan dynaamisen jäykkyyden mittaaminen ja ääneneristävyys

Tuomas Pärnänen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 25.1.2016.

Työn valvoja:

Prof. Ville Pulkki

Työn ohjaajat:

Dipl. ins. Pekka Taina

Tekn. toht. Jukka Linjama

Tekijä: Tuomas Pärnänen

Työn nimi: Kevyen kaksoisrakenneseinän teräsranan dynaamisen jäykkyyden mittaaminen ja ääneneristävyys

Päivämäärä: 25.1.2016

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+47

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Professuuri: Akustiikka

Työn valvoja: Prof. Ville Pulkki

Työn ohjaajat: Dipl. ins. Pekka Taina, Tekn. toht. Jukka Linjama

Kevyillä kaksinkertaisilla väliseinärakenteilla voidaan saavuttaa kilpailukykyinen ääneneristävyys asuin- ja toimistorakennuksissa. Paras ääneneristävyys saavutetaan käyttämällä seinäpaneelien tuentana joustavaa teräsrankaa. Teorian mukaan tekemällä pystyrangasta joustava puristussuunnassa saavutetaan parempi ääneneristävyys. Testitulokset prototyyppirangoilla ovat olleet ristiriidassa tämän teorian kanssa. Rangan dynaamista jäykkyyttä käytetään yhtenä parametrina kaksoisrakenneseinän ääneneristävyyden ennustemallissa. Rangan dynaaminen jäykkyys voidaan selvittää kokeellisesti. Tässä työssä esitetään mittausmenetelmä, jolla dynaaminen jäykkyys selvitetään teräsranan ja kuormamassan muodostaman massa-jousisysteemin ominaistajuudesta. Systemin herätteenä voidaan käyttää joko iskuvasaran impulssia tai tärstimen jatkuvaa kohinaa. Mittausjärjestelmällä mitattiin kymmenen rankanäytettä yksinkertaisella ja kaksinkertaisella kiinnitystavalla. Tuloksista havaittiin, että kaksinkertaistamalla kiinnitysruuvien määrä, massa-jousisysteemin dynaaminen jäykkyys kasvoi keskimäärin 160 %. Mittaustulosten ja pohdintojen perusteella esitetään akustisesti paremman teräsranan kehitysehdotus ja pohditaan kevytrakenneseinän muita kehityspolkuja ääneneristävyyden kannalta.

Avainsanat: Dynaaminen jäykkyys, mittaaminen, teräsranka, kevytrakenneseinä, ääneneristävyys, rakennusakustiikka, teknillinen akustiikka

Author: Tuomas Pärnänen

Title: Measuring dynamic stiffness of steel stud for lightweight double partition wall and sound insulation

Date: 25.1.2016

Language: Finnish

Number of pages: 7+47

Department of Signal Processing and Acoustics

Professorship: Acoustics

Supervisor: Prof. Ville Pulkki

Advisors: M.Sc. (Tech.) Pekka Taina, D.Sc. (Tech.) Jukka Linjama

A competitive sound insulation can be achieved with light weight double partition walls compared to heavy alternatives. Best insulation can be attained using flexible steel studs as wall panel support. According to conventional theory the most compressible flexible stud gives best results in sound insulation. Recent test results are in conflict with the theory. Dynamic stiffness of the steel stud is used as a parameter in double partition wall sound insulation prediction method. The dynamic stiffness can be experimentally measured. This thesis presents a measurement method which derives dynamic stiffness from the natural frequency of mass-spring system of steel stud and preload mass. Impulse hammer or shaker can be used as stimulus. Ten steel studs were measured using single and double screw fastenings. Doubling the number of fastenings increased the dynamic stiffness of the system by 160 % by average. A development proposal for steel studs is presented on the grounds of measurement results and speculations. Other development paths in the acoustics of light weight double partition walls are discussed.

Keywords: Dynamic stiffness, measurement, steel stud, double partition, sound insulation, building acoustics, technical acoustics

Esipuhe

Opintotaipaleeni on ollut pitkä, mutta onneksi kivetön. Lopulta polku johdatti minut pisteeseen, jossa päädyin tekemään diplomityöni aiheesta teräsranan dynaaminen jäykkyys. Kiitokset Matias Remekselle, kenen vinkistä päädyin sekä töihin Helimäki Akustikoille että diplomityöni aiheen pariin. Kiitokset Aulis Lundell Oy:n Leena Lundell-Pendoville mahdollisuudesta tutkia tätä aihetta. Suuret kiitokset kuuluvat tietenkin työni ohjaajille TkT Jukka Linjamalle ja DI Pekka Tainalle. Ilman heidän apuaan diplomityö aiheesta, joka oli minulle osittain uutta tieteenalaa, olisi voinut osoittautua loputtomaksi suoksi. Kiitos professori Ville Pulkille työn valvonnasta ja kommentteista. Kiitokset kuuluvat myös Helimäki Akustikot Oy:n Heikki Helimäelle, joka antoi työtilat ja työkalut käyttööni diplomityön ajaksi. Kiitokset Heikille myös asiantuntevista kommentteista ja asiaankuuluvasta hoputuksesta. Syvimmät kiitokset perheelle ja ystäville loputtomasta opiskelijan ymmärtämisestä ja tuesta. Olen ikuisesti kiitollinen myös opiskelukavereilleni, jotka pyyteettömästi avasivat prujunsa minulle vuodesta toiseen. Lopuksi lämpimät kiitokset opiskelijakerhoille ja harrastuskavereille PO, Resovolt, Cykles, Kuuba ja PIK. Teitte opiskeluvuosistani lystä.

Otaniemi, 25.1.2016

Tuomas Pärnänen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vi
1 Johdanto	1
2 Ääneneristävyiden teoria	3
2.1 Levyseinän ääneneristävyys	3
2.2 Dynaaminen jäykkyys	11
2.3 Vaimennussuhde	13
3 Mittausjärjestelmä ja -kohde	16
3.1 Järjestelmän kuvaus	16
3.2 Mittauskohde	18
3.3 Mittausmenetelmät	21
3.4 Mittausanalysointori	24
3.5 Mittausepävarmuudet	28
4 Mittaustulokset	31
4.1 Mittausjärjestelmän validointi	31
4.2 Dynaamisen jäykkyyden mittaustulokset	33
4.3 Testirankaparin erot	35
4.4 Isku- ja jatkuvan herätteen vertailu	36
5 Tulosten analysointi ja johtopäätökset	38
5.1 Teorian ja mittausten vertailu	38
5.2 Teräsangan äänitekniikkaan vaikuttavat ominaisuudet	39
5.3 Teräsangan kehitysehdotus	40
5.4 Mahdolliset jatkotutkimukset ja avoimet kysymykset	42
6 Yhteenveto	44
Lähdeluettelo	45

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

α_{eff}	kaviteetin efektiivinen absorptiokerroin
α_c	absorptiomateriaalin absorptiokerroin
b	koolausjako tai rankaväli
c_0	äänennopeus ilmassa
C	viskoosi vaimennuskerroin
C_0	kriittisen vaimennuksen viskoosi vaimennuskerroin
d	rangan syvyys
E	kimmokerroin
η	häviökerroin
f	taajuus
f_{br}	siltataajuus
f_c	koinsidenssitaajuus
f_{c1}	kaviteetin pitkittäisresonanssi
f_d	kaviteetin poikittaisresonanssi
f_{mam}	massa-ilma-massaresonanssi
f_n	ominaistaajuus
f_r	massa-jousi-massasysteemin resonanssitaajuus
$\Delta f_{3\text{dB}}$	3 dB:n kaistanleveys
F	voima
FR	täyttösuhde
k	jousivakio
K'	dynaaminen jäykkyys per metri
K''	dynaaminen jäykkyys per neliometri
L	rankanäytteiden yhteispituus
L_x	kaviteetin leveys
L_y	kaviteetin korkeus
m	massa
m'	pintamassa
ω	kulmataajuus
ω_n	ominaiskulmataajuus
Q	hyvyysluku
R	ääneneristävyys
ρ_0	ilman tiheys
t	aika
τ	läpäisykerroin
W	ääniteho
x	poikkeutus tasapainotilasta
ζ	vaimennussuhde

Lyhenteet

FFT	Fast Fourier Transform
ISO	International Organization for Standardization
TTL	Työterveyslaitos

1 Johdanto

Melu on ei-toivottua ääntä, joka häiritsee ja ärsyttää kuuliijaansa tai on tämän terveydelle haitallista. Ihminen voi kokea voimakkaan musiikin joko meluna tai taiteena, mutta melu voi heikentää terveyttä myös tiedostamatta vaikuttamalla esimerkiksi unenlaatuun [1, 2]. Melun aiheuttaman haitan suuruuteen vaikuttaa melun fysikaaliset ominaisuudet kuten voimakkuus ja taajuussisältö. Melu on siten sekä subjektiivinen että objektiivinen käsite.

Melunhallinta on tärkeä osa niin asumisessa kuin työnteossa. Rakennusten melunhallintaa ohjaa kansalliset lait ja määräykset [3]. Rakennetussa ympäristössä melua hallitaan usein ääneneristyksellä eli estämällä sen eteneminen tilasta toiseen. Ääneneristys on siten rakennusteollisuuden tärkeä osa-alue. Rakennusteollisuus noudattaa ääneneristyksessä Suomen rakentamismääräyskokoelmassa [4] annettuja määräyksiä. Esimerkiksi asuntojen välinen ilmaääneneristysluku on oltava 55 dB tai enemmän. Tarkoituksenmukaisella ääneneristyksellä saavutetaan työ- ja asumisympäristöön yksityiset, viihtyisät ja terveelliset akustiset olosuhteet.

Yksinkertaisin tapa kasvattaa seinän ääneneristävyttä on suurentaa sen pintamassaa eli massaa per pinta-ala. Tämä ei kuitenkaan kaikissa tapauksissa ole järkevää eikä kustannustehokasta. Esimerkiksi toimistot rakennetaan nykyisin tulevaisuudessa muunneltaviksi, jolloin seinärakenteet toteutetaan kevyinä. Myös asuintaloissa voi tulla vastaan tilanne, jolloin muut rakenneratkaisut eivät salli seinämässän kasvattamista. Näin ollen ääneneristävyttä täytyy parantaa toisin keinoin. Kevyillä rakenteilla voidaan saavuttaa raskaaseen rakenteeseen verrattava ääneneristävyys etenkin puhetaajuuksilla ja sitä suuremmilla taajuuksilla. Kevyen rakenteen ääneneristävyys on on pienillä taajuuksilla merkittävästi heikompi kuin raskaan rakenteen ääneneristävyys. Kotimaisessa tutkimuksessa on tutkittu asukkaiden tyytyväisyyttä eri tavoin rakennettujen talojen akustisiin olosuhteisiin. Raskas- ja kevytrakenteisissa taloissa asuvien välillä ei havaittu merkittävää eroa tyytyväisyydessä [5].

Kevyt ääntä eristävä seinärakenne voidaan toteuttaa kaksinkertaisena siten, että kahden seinälevyn välissä on ilmapäli. Näin saavutetaan parempi ääneneristävyys kasvattamatta seinän pintamassaa. Tällaisen rakenteen paras ääneneristävyys saavutetaan, kun seinäpuoliskot eivät ole kytketty kiintein rakentein yhteen. Kevyet seinäpaneelit eivät kuitenkaan ole yksin riittävän lujia rakenteita kestäväseen käyttöä, joten paneelit tuetaan rankoihin, jotka voidaan valmistaa esimerkiksi puusta tai teräksestä. Usein seinäpuoliskot kiinnitetään vielä samaan rankaan esimerkiksi tilarajoitusten vuoksi. Kuvassa 1 on esitetty kevytrakenneseinän rakenne ja tässä työssä käytettyjä termejä.

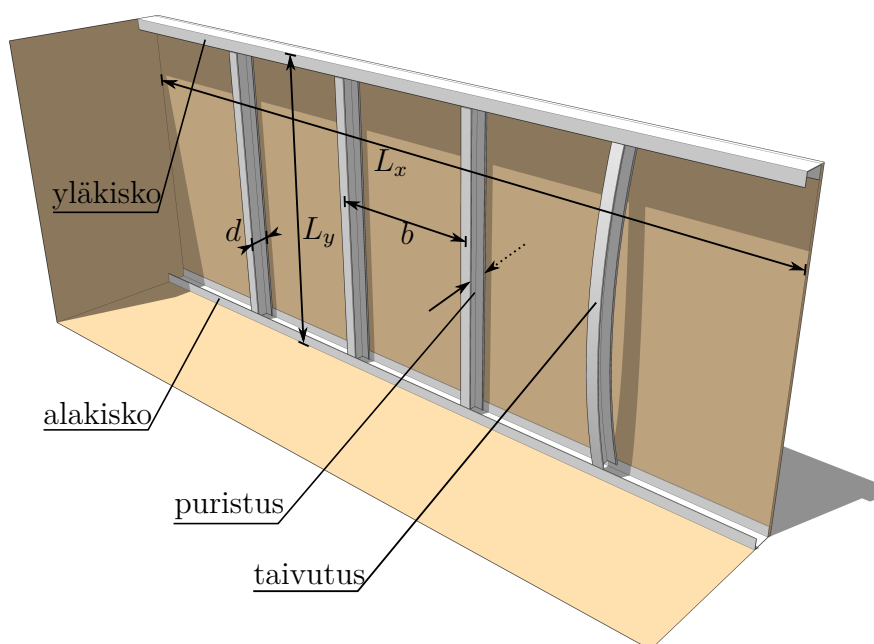
Ranka luo seinäpaneelien välille fyysisen kytkennän, jota pitkin äänienergia etenee seinän puolelta toiselle. Ääniaallot liikuttavat seinäpaneelia, jonka liike välittyy rangan kautta toisen puolen seinäpaneelin, joka tuottaa äänen toiseen huoneeseen. Vaikuttamalla suotuisasti rangan ominaisuuksiin voidaan kasvattaa kaksoisrakenteen ääneneristävyttä. Tämä on nykyisin entistä tärkeämpää, sillä kipsilevyvalmistajat ovat pienentäneet seinäpaneeliensa pintamassaa, mikä heikentää ääneneristävyttä.

Perinteisesti on ajateltu, että mahdollisimman joustava ranka takaa parhaan ääneneristävyden teräsraangoilla tuetuissa kaksoisrakenteissa. Viimeaikaisissa Heli-

mäki Akustikkojen ja Aulis Lundell Oy:n suorittamissa prototyypirankojen äänen-eristävyyden vertailumittauksissa tämä teoria on kuitenkin haastettu. Prototyypin todella pieni dynaaminen jäykkyys ei parantanutkaan seinärakenteen äänen-eristävyyttä, päinvastoin. Äänen-eristävyys verrattuna kilpaileviin tuotteisiin oli lähes sama tai hieman heikompi. Syntyi tarve saada mitattua väliseinärangan dynaaminen jäykkyys, jotta rankoja voitaisiin näiltä osin vertailla.

Diplomityön tavoitteena oli rakentaa yksinkertainen ja edullinen mittaussysteemi, jolla dynaaminen jäykkyys voidaan mitata isku- ja jatkuvan herätteen menetelmällä. Järjestelmällä tehtiin dynaamisen jäykkyyden mittaussarja kymmenelle eri teräsrankalle. Rankojen muuttuvina ominaisuuksina oli rankaprofilin malli, profiilin syvyys ja materiaalin paksuus. Työn aikana kehittyi myös alustava ajatus teräsran- gan äänitekniselle kehityssuunnalle. Työn lopussa esitetään tämä kehitysehdo- tus ja alustava malli rankaprototyypille.

Tämä diplomityö on jaettu neljään lukuun. Luvussa 2 esitetään ensin yksin- kertainen kaksoisrakenneseinän äänen-eristävyyden ennustemalli, johon vaikuttaa teräsran- gan dynaaminen jäykkyys. Lisäksi luvussa käsitellään mittaussysteimillä mitattavan dynaamisen jäykkyyden ja vaimennussuhteen teoria. Luvussa 3 esitetään työssä rakennetun mittaussysteimin toiminta, rakenne ja epävarmuudet. Luvussa 4 esitetään ensin mittaussysteimin validointimittaukset. Tämän jälkeen edetään varsinaisiin työssä tehtyihin mittauksiin ja esitetään tulokset. Luvussa vertaillaan myös eri mittaussysteimillä saadut tulokset. Luvussa 5 pohditaan mittaustulosten merkitystä syvemmin ja esitetään teräsran- gan kehitysehdo- tus. Lopuksi käydään läpi avoimeksi jääneitä kysymyksiä ja mahdollista jatkotutkimusta.



Kuva 1: Kevytrakenneseinän rakenne ja työssä käytettyjä termejä: ilmavälin leveys L_x , ilmavälin korkeus L_y , ilmavälin tai profiilin syvyys d , rankaväli tai koolausjako b . Kuvassa ran- gan taipumista on liioiteltu ja jätetty pois seinäpaneelin mukana taipuminen. Kuvassa näkyvien rankojen päälle asennetaan toinen paneelikerros.

2 Ääneneristävyyden teoria

Tässä luvussa esitellään ensin seinän ääneneristävyyden teoriaa. Ääneneristävyydestä keskitytään eniten kaksinkertaiseen kevytrakenneseinään ja esitetään ennustemalli, jolla voidaan arvioida seinärakenteen ääneneristävyyttä. Mallilla on yhteys seinärangan dynaamiseen jäykkyyteen, johon tutustaan ääneneristävyyden jälkeen. Lopuksi käsitellään vielä vaimennussuhdetta, jolla myös on yhteys seinän ääneneristävyyteen.

2.1 Levyseinän ääneneristävyys

Ääni liikkuu rakennuksessa monin tavoin. Äänen siirtymäreittejä ovat esimerkiksi suoraan seinän läpi ja sivutiesiirtymät. Sivutiesiirtymällä tarkoitetaan usein talon rungon kautta tai ilmastointi- ja lämpöputkia pitkin huoneesta toiseen etenevää ääntä. Ääneneristykseen vaikuttaa siten suuri määrä ilmiöitä, joiden mallintaminen on joissain tapauksissa hyvin monimutkaista. Seinän ääneneristävyyttä voidaan kuitenkin ennustaa kohtalaisella tarkkuudella myös yksinkertaisin mallein. Tässä työssä keskitytään suoraan seinän läpi siirtyvään äänen.

Ääneneristykseen ennustamiseen on useita malleja, joita on esitelty kattavasti lähteessä [6]. Numeerisia menetelmiä kaksoisrakenneseinän ääneneristävyyteen on esitetty vuodesta 1949 alkaen, jolloin Beranek ja Work esittivät ensimmäisen mallinsa [7]. Sharp kehitti mallinnusta ottamalla huomioon seinäpaneelien välisen rakenteellisen kytkennän [8]. Gu ja Wang kehittivät tätä mallia eteenpäin ottamalla huomioon joustavan teräsranan dynaamisen jäykkyyden [9].

Seuraavissa luvuissa esitetään kolme numeerista ääneneristykseen ennustemallia erilaisille rakenteille. Näistä malleista havaitaan, kuinka nopeasti mallinnus monimutkaistuu sitä tarkennettaessa. Viimeisenä esitetään kaksinkertaisen seinärakenteen ennustemalli, jolla on suora yhteys ranan dynaamiseen jäykkyyteen. Lukujen 2.1.1, 2.1.2 ja 2.1.3 mallit on esitetty lähteessä [10].

2.1.1 Massalaki

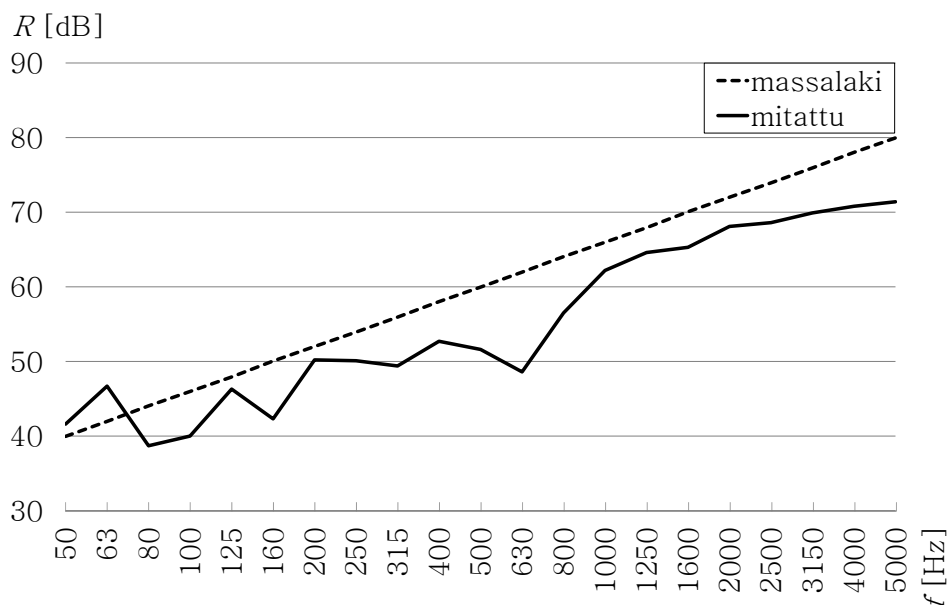
Seinän ääneneristävyys määritellään seinään kohdistuvan ja seinän läpi siirtyvän äänitehon suhteena. Ääneneristävyys ilmoitetaan desibeleinä eli logaritmisesti. Esimerkiksi äänitehon kaksinkertaistuminen kasvattaa äänitehoa aina noin 3 dB ja äänenpaineen kaksinkertaistuminen äänenpainetasoa 6 dB [11]. Ääneneristävyys siirtyvän äänitehon suhteena on

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{W_1}{W_2}, \quad (1)$$

missä τ on läpäisykerroin, W_1 on rakenteeseen osuva ääniteho ja W_2 on rakenteen läpäisevä ääniteho.

Kasvattamalla seinän pintamassaa [kg/m²], ääneneristävyys paranee. Ääneneristävyys paranee noin kuusi desibeliä kun massa kaksinkertaistuu. Tätä kutsutaan myös ääneneristävyyden massalaksiksi, joka on riippuvainen seinän pintamassasta ja taajuudesta. Ääneneristävyys on massalain mukaan

$$R_0 = 20 \log_{10} m' f - 48, \quad (2)$$



Kuva 2: Massalain ennustama 200 mm betoniseinän ääneneristävyyys ja kentällä mitatun betoniseinän ääneneristävyyys.

jossa m' on seinän pintamassa [kg/m^2] ja f on äänen taajuus [Hz]. Ääneneristävyyys on siten taajuusriippuva suure. Äänen taajuuden kasvaessa ääneneristävyyys pääsääntöisesti paranee, mutta tähän on myös poikkeuksia, joita käydään läpi hieman jäljempänä.

Yksinkertaisenkin seinän ääneneristävyyteen vaikuttavat pintamassan lisäksi muutkin tekijät. Massalaki antaa peruslähtökohdan esimerkiksi betoniseinän ääneneristävyyden mallintamiseen. Kuvassa 2 on vertailtu massalain ennustamaa ääneneristävyyttä ja mitattua ääneneristävyyttä. Kuvasta nähdään, että todellinen mitattu ääneneristävyyys on massalain ennustamaa eristävyyttä heikompi. Sivutiesiirtymät heikentävät ääneneristävyyttä merkittävästi. Lisäksi 630 Hz taajuuskaistalla näkyy niin sanotusta parkettiresonanssista johtuva ääneneristävyyden heikennys. Massalaki ei ole riittävä ennustamaan ohuiden levyjen, kuten kipsilevyjen, ääneneristävyyttä.

2.1.2 Ohuen levyn ääneneristys

Massalaki ei päde kaikilla taajuusalueilla, kun tutkitaan ohuen levyn ääneneristävyyttä. Ohuen levyn, esimerkiksi kipsi- tai teräslevyn, ääneneristävyyttä heikentää koinsidenssi-ilmiö. Koinsidenssi-ilmiö johtuu levyssä tapahtuvasta taivutusaallosta. Toisin kuin ilmaääni, taivutusaallon etenemisnopeus on riippuvainen taajuudesta ja sen nopeus kasvaa taajuuden kasvaessa. Sopivalla taajuudella äänennopeus ilmassa ja taivutusaallon nopeus ovat samat, jolloin ääniaalto läpäisee ohuen levyn hyvin tehokkaasti. Ilmiö on riippuvainen myös äänen tulosuunnasta. Koinsidensitaajuutta f_c pienemmillä taajuuksilla ilmaääni ja taivutusvärähtely eivät kytkeydy tehokkaasti toisiinsa, koska aallonpituus levyn värähtelyllä on pienempi kuin ilmaäänellä.

Massalaki pätee koinsidenssitaaajuuden alapuolella, kun äänen taajuus $f < 1/2f_c$. Koinsidenssitaaajuuden yläpuolella ääneneristävyyys kasvaa massalakia nopeammin,

mutta noin oktaavin alueella koinsidenssi heikentää ääneneristävyyttä merkittävästi. Ilmiö on kapeakaistainen, mutta levyssä tapahtuvien epäideaalisuuksien ja ilmiön suuntariippuvuuden vuoksi vaikutuskaista on noin oktaavin levyinen. Ohuen levyn ääneneristävyys lasketaan kahdella taajuusalueella yhtälöllä

$$R = \begin{cases} 20 \log_{10} m' f - 48, & f < 1/2 f_c \\ 20 \log_{10} m' f + \left[\eta \left(\frac{f}{f_c} \right) - 1 \right] - 44 & f > f_c, \end{cases} \quad (3)$$

missä η on kokonaishäviökerroin ja f_c on koinsidenssitaajuus. Yhtälön 3 taajuusalueiden väliin jää alue, jonka ääneneristävyyttä ei voida laskea yksinkertaisesti. Hyvän estimaatin tämän alueen ääneneristävyydelle saa piirtämällä taajuuksien $1/2 f_c$ ja f_c välille suoran. Kokonaishäviökerroin η kuvaa, kuinka nopeasti levyn taivutusvärähtely vaimenee ja muuttuu lämmöksi. Tyypillisesti esimerkiksi kipsilevyn kokonaishäviökerroin on hyvin pieni, luokkaa 0,02 koinsidenssitaajuuden yläpuolella. Koinsidenssitaajuus lasketaan yhtälöllä

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)m'}{Eh^3}}, \quad (4)$$

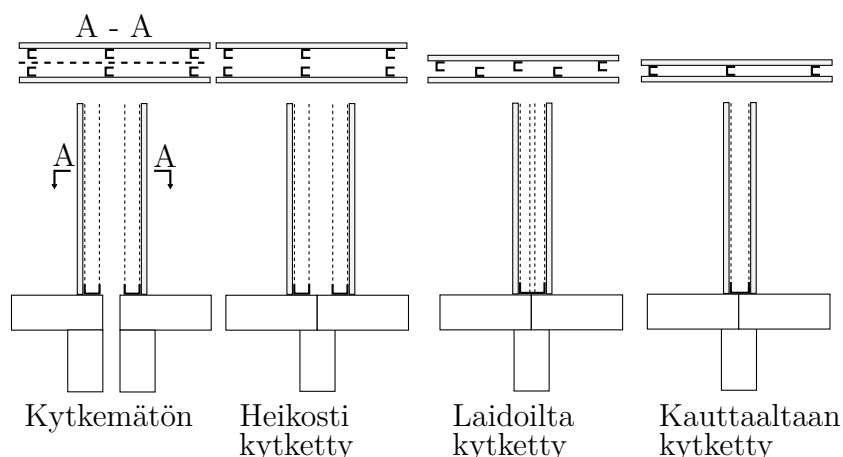
missä c_0 on äänennopeus ilmassa [m/s], μ on levymateriaalin Poissonin vakio, E on kimmokerroin (myös kimmomoduuli tai Youngin moduuli) [N/m²] tai [Pa] ja h on levyn paksuus [m].

2.1.3 Kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristys

Aina ei ole järkevää eikä mahdollista parantaa ääneneristävyyttä kasvattamalla seinän massaa. Massan lisääminen voi kasvattaa kohtuuttomasti muiden kantavien rakenteiden lujuusvaatimuksia ja siten rakennuskustannuksia. Tällöin parempi tapa parantaa ääneneristävyyttä on rakentaa seinä kahdesta levykerroksesta ja jättää niiden väliin kaviteetti eli ilmapäli. Seinän rakenteellista kestävyyttä parannetaan tukemalla levyt pystyrankoihin, jotka useimmiten valmistetaan puusta tai teräksestä.

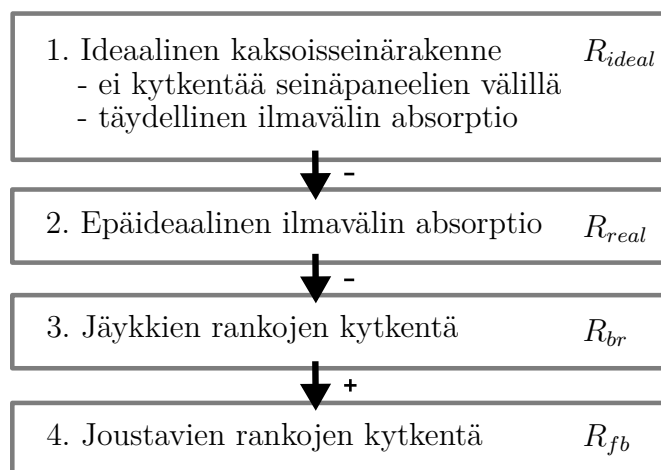
Kaksoisrakenneseinän tuenta voidaan toteuttaa eri tavoin, mikä vaikuttaa rakenteen ääneneristävyyteen. Kuvassa 3 on esitetty neljä erilaista seinän kytkentää alkaen heikoimmasta kytkennästä siirtyen oikealle vahvimpaan kytkentään. Tämän työn keskiössä on oikeanpuoleinen tilanne, missä seinäpaneelit ovat kauttaaltaan kytketty joustavalla teräsrankalla. Teräsranka käyttäytyy puristussuunnassa joustavasti, mikä parantaa ääneneristävyyttä puuhun verrattuna. Teorian mukaan mitä joustavampi ranka on puristussuunnassa sitä parempi ääneneristävyys rakenteella on.

Seuraavaksi esitetään kaksinkertaisen seinän ääneneristykseen yksinkertainen enustemalli. Malli rakennetaan vaiheittain aloittaen ideaalisesta kahden levyn ja ilmapälin ääneneristävydestä ja lisäämällä siihen vaiheittain eri epäideaalisuuksia. Mallinnuksen neljä vaihetta on esitetty kuvassa 4. Malli kuvaa levyseinässä tapahtuvia akustisia ilmiöitä kattavasti. Usein todellisella seinällä ei kuitenkaan päästä yhtä hyviin ääneneristävyysarvoihin kun malli ennustaa. Tämä on seurausta seinän kehyksistä tai kiskoista, joihin rangat kiinnitetään. Reunakiskot ovat usein jäykkiä ja niiden kautta kulkeva ääni heikentää koko seinän ääneneristävyyttä [12].



Kuva 3: Erilaisia seinäpuoliskojen kytkentätapoja. Ääneneristävyys heikentyy vasemmalta oikealle. Tässä työssä keskitytään oikeanpuoleisen kuvan tilanteeseen, missä sekä alakiskot että seinärangat kytkevät seinäpuoliskot yhteen. Kuva lähteen [10] mukaan.

Ideaalisen kaksoisrakenteen ääneneristävyys lasketaan kolmella taajuusalueella erikseen. Kaviteetti oletetaan täysin absorboivaksi, eli seinäpuoliskojen väliin jäävään ilmvälisiin ei muodostu pitkittäisiä resonansseja suuntiin L_x ja L_y (katso kuva 1). Sen sijaan seinään muodostuva poikittainen massa-ilma-massa -resonanssi otetaan huomioon. Tämän resonanssitaajuuden alapuolella seinän ääneneristävyys noudattaa massalakia. Massa-ilma-massa -resonanssin taajuudella eristävyys on huono, mutta kasvaa sen yläpuolella jopa 18 dB/oktaavi, kunnes äänen aallonpituus alkaa olla kaviteetin syvyyden mittaluokkaa. Tämän taajuuden yläpuolella kaviteettiin muodostuvien resonanssien vuoksi ääneneristävyys kasvaa pienemmällä kulmakertoimella.



Kuva 4: Kaksoisrakenneseinän ääneneristävyysennustemallin pääperiaate Hongiston mukaan. Ilmaääneneristävyys lasketaan neljässä vaiheessa. Tässä työssä keskitytään erityisesti vaiheeseen neljä.

Ideaalisen kaksoisrakenneseinän ääneneristävyys lasketaan seuraavilla yhtälöillä:

$$R_{\text{ideal}} = \begin{cases} 20 \log_{10}[(m'_1 + m'_2)f] - 48, & f < 1/2 f_{\text{mam}} \\ R_1 + R_2 + 20 \log_{10}(fd) - 29, & f_{\text{mam}} < f < f_d \\ R_1 + R_2 + 6, & f > f_d \end{cases} \quad (5)$$

missä m'_1 ja m'_2 on seinäpuoliskojen pintamassat [kg/m^2], R_1 ja R_2 ovat seinälevyjen ääneneristävydet [dB], d on ilmapälin paksuus [m], f_{mam} on massa-ilma-massa-resonanssitaajuus [Hz] ja f_d on rajataajuus [Hz], jonka yläpuolella poikittaiset resonanssit suunnassa d (kuva 1) alkavat vaikuttaa ääneneristävyyteen. Massa-ilma-massa-resonanssitaajuus on

$$f_{\text{mam}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8\rho_0 c_0^2 (m'_1 + m'_2)}{dm'_1 m'_2}} \cong 80 \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{dm'_1 m'_2}}, \quad (6)$$

missä ρ_0 on ilman tiheys [kg/m^3] ja c_0 on äänennopeus ilmassa [m/s]. Jälkimmäinen approksimaatio yhtälölle saadaan käyttämällä ilmalle tiheyttä $1,20 \text{ kg}/\text{m}^3$ ja äänennopeutta $343 \text{ m}/\text{s}$. Ilmapälin paksuuteen liittyvä resonanssitaajuus f_d on

$$f_d = \frac{c_0}{2\pi d}, \quad (7)$$

missä d on ilmapälin paksuus [m]. Massa-ilma-massa-resonanssitaajuuden kohdalla ei ole laskentakaavaa ääneneristävyydelle, mutta sille saadaan hyvä arvio interpoloimalla suora lähimpien laskettujen arvojen välillä.

Edellä oletettiin, että seinän absorptio on täydellinen, eli seinän sisällä ei synny pitkittäisiä resonansseja. Tämä on hyvä approksimaatio, mikäli seinän sisään on laitettu riittävästi absorptiomateriaalia. Absorptiomateriaali ei kuitenkaan vaimenna tarpeeksi tehokkaasti poikittaisia, seinän syvyysuunnassa, syntyviä resonansseja, minkä vuoksi ne otettiin edelläkin huomioon. Seuraavassa otetaan huomioon myös epätäydellisen ilmapäliabsorption negatiivinen vaikutus ääneneristävyyteen. Pienillä taajuuksilla ääneneristävyys lasketaan kuten aiemminkin. Taajuuden kasvaessa ja aallonpituuden lyhentyessä johonkin seinän sisällä olevaan dimensioon mahtuu seisova aalto eli resonanssi. Epätäydellinen absorptio otetaan huomioon tämän taajuuden yläpuolella seuraavasti:

$$R_{\text{real}} = \begin{cases} R_{\text{ideal}}, & f < f_{c1} \\ R_{\text{ideal}} + \Delta R_{\text{abs}}, & f \geq f_{c1} \end{cases}, \quad (8)$$

missä ΔR_{abs} on epätäydellisen absorption vaikutus [dB] ja f_{c1} on kaviteettiin pitkittäin muodostuva pienitaajuisin resonanssi [Hz]. Resonanssitaajuus f_{c1} lasketaan yhtälöllä

$$f_{c1} = \frac{c_0}{2 \cdot \max[L_{x,c}; L_{y,c}]}, \quad (9)$$

missä $L_{x,c}$ ja $L_{y,c}$ ovat seinän vaaka- ja pystydimensiot. Suurimmaksi vaakadimensioksi voidaan katsoa myös rankojen väli, mikäli ääni voi jäädä niiden väliin resonoimaan. Epätäydellisen absorption vaikutus on

$$\Delta R_{\text{abs}} = 10 \log_{10} \alpha_{\text{eff}}, \quad (10)$$

missä α_{eff} on efektiivinen absorptiosuhde välillä 0...1. ΔR_{abs} voi siis saada vain negatiivisia arvoja. Jos ilmaväli ei ole täytetty kokonaan absorptiomateriaalilla, efektiivinen absorptiosuhde saa arvon

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_c \cdot \text{FR}, \quad (11)$$

missä α_c on absorptiomateriaalin oma absorptiosuhde ja FR on seinän täyttösuhde. Täyttösuhde FR saa arvoja väliltä 0...1, missä 1 on täysin täytetty ilmaväli ja 0 tyhjä.

Seuraavaksi mallissa otetaan huomioon rankojen aiheuttaman kytkennän äänen-eristävyyttä heikentävä vaikutus. Rangat oletetaan tässä vaiheessa jäykiksi. Pienillä taajuuksilla äänen-eristävyys lasketaan yhtälöllä 8, mutta niin sanottua siltataajuutta suuremmilla taajuuksilla kytkentä alkaa heikentää seinän äänen-eristävyyttä. Kytketyn kaksoisrakenneseinän äänen-eristävyys on

$$R_{\text{br}} = \begin{cases} R_{\text{real}}, & f < f_{\text{br}} \\ \min[R_{\text{real}} ; R_0 + \Delta R_M] & f \geq f_{\text{br}}, \end{cases} \quad (12)$$

missä R_0 on massalain mukainen äänen-eristävyys, ΔR_M on rangallisen kaksoisrakenteen tuottama parannus äänen-eristävyyteen verrattuna massalakiin ja f_{br} on siltataajuus [Hz], jonka yläpuolella ΔR_M otetaan huomioon. Massalaki lasketaan kahdelle levyille kuten yhtälössä 5 massa-ilma-massa taajuuden alapuolella. Rangallisen kaksoisrakenteen tuottama parannus on

$$\Delta R_M = 10 \log_{10}(bf_c) + 20 \log_{10} \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18, \quad (13)$$

missä b on rankojen väli [m] ja f_c on seinän puoliskojen koinsidenssien taajuuksien keskiarvo [Hz]. Koinssidenssitaajuus laskettiin aiemmin yhtälössä 4. Kun seinäpaneeli asennetaan rankaan tarpeeksi tiheällä ruuvi kiinnityksellä, ranka toimii viivalähteenä. Siltataajuus on tällöin

$$f_{\text{br}} = f_{\text{mam}} \left(\frac{\pi b f_c}{2c_0} \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

missä f_{mam} on seinäpaneelien ja ilmavälin muodostama massa-ilma-massaresonanssi [Hz].

Lopuksi otetaan vielä huomioon joustavan rangan tuottama parannus äänen-eristävyyteen verrattuna jäykkään rankaan. Samoin kuin jäykällä rangalla, äänen-eristävyys paranee vain siltataajuutta f_{br} suuremmilla taajuuksilla, eikä voi olla ideaalista rakennetta parempi. Äänen-eristävyys joustavalla rangalla on

$$R_{\text{fb}} = \begin{cases} R_{\text{real}}, & f < f_{\text{br}} \\ \min[R_{\text{real}} ; R_0 + \Delta R_{\text{fb}}] & f \geq f_{\text{br}}, \end{cases} \quad (15)$$

missä ΔR_{fb} on joustavan rangan tuottama äänen-eristävyyden parannus verrattuna jäykkään rankaan. Parannus on joustavan ja jäykän rangan äänen-eristävyyksien erotus

$$\Delta R_{\text{fb}} = R_{\text{flex}} - R_{\text{br}}, \quad (16)$$

missä R_{flex} on ääneneristävyys joustavarankaisessa seinässä. Ääneneristävyyden parannus syntyy jousimaisen rangan jäykkää rankaa heikommasta kyvystä siirtää äänienergiaa rangan toiselle puolelle sekä rangassa tapahtuvista häviöistä. Parannus on

$$\Delta R_{\text{fb}} = -5 \log_{10} \left(\frac{1 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_r}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_r}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_r}\right)^2} \right), \quad (17)$$

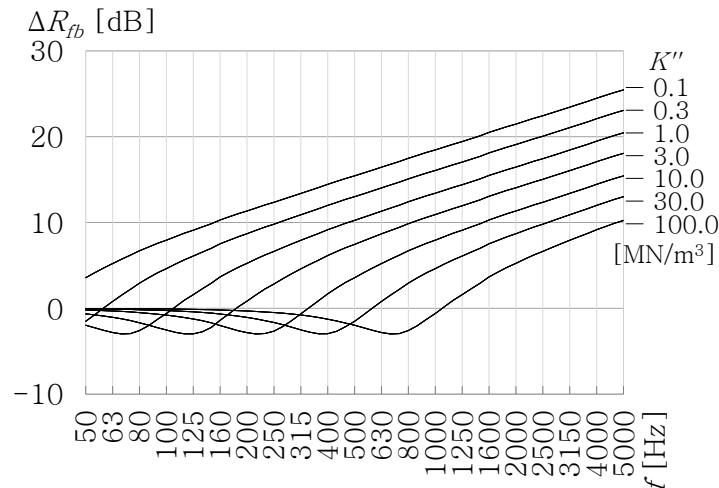
missä ζ on vaimennussuhde ja f_r on rangan ja seinäpaneelin muodostaman massa-jousi-massasysteemin luonnollinen resonanssitaajuus [Hz], joka muodostuu seinälevyjen ja joustavan rangan systeemiin. Edellinen yhtälö (17) on logaritminen esitys yksinkertaisen harmonisen värähtelijän voimanläpäisykertoimelle. Vaimennussuhde on $\zeta = C/C_0$, missä C on viskoosi vaimennuskerroin ja C_0 on viskoosi vaimennuskerroin kriittisellä vaimennuksella. Hongiston mukaan mittauksissa on havaittu teräsrangan vaimennussuhteen olevan luokkaa 0,3 [13]. Vaimennussuhdetta käsitellään tarkemmin luvussa 2.3. Yhtälön (17) resonanssitaajuus f_r on

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K'' \frac{m'_1 + m'_2}{m'_1 m'_2}}, \quad (18)$$

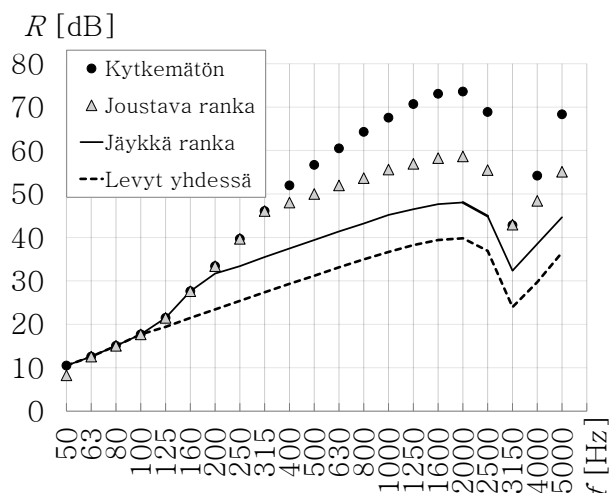
missä K'' on joustavan rangan dynaaminen jäykkyys.

Kuvassa 5 on esitetty yhtälöllä (17) laskettuja ääneneristävyyden parannuksia eri dynaamisen jäykkyyden arvoilla. Yhtälö liioittelee saavutettavaa ääneneristystä suurilla taajuuksilla. Hongiston mukaan ääneneristävyyden parannus on korkeintaan luokkaa 8...15 dB [13]. Kuvassa 6 on esitetty edellä esitetyllä nelivaiheisella ennustemallilla laskettuja ääneneristävyyksiä.

Ennustemalli ei kerro koko totuutta kaksoisrakenneseinän ääneneristävyydestä. Malli olettaa rakenteen olevan ääretön eli se ei ota huomioon seinää ympäröiviä

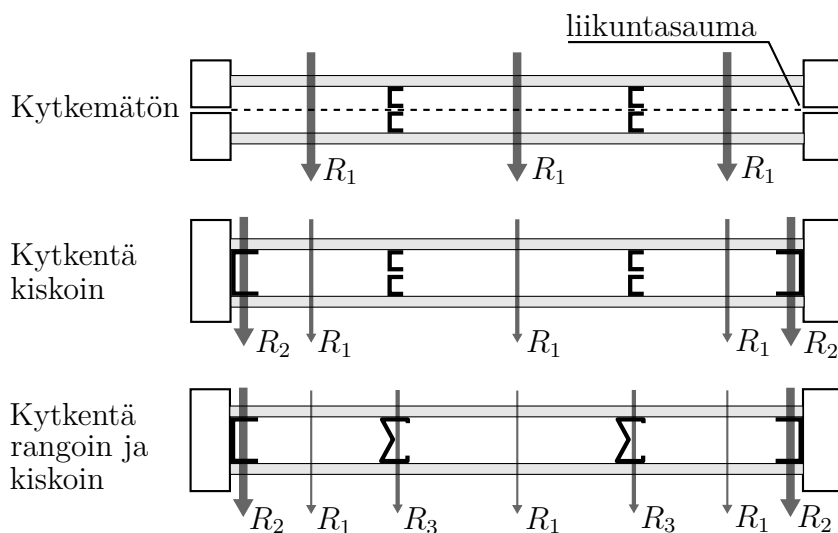


Kuva 5: Joustavan rangan parannustermi ΔR_{fb} eri dynaamisen jäykkyyden K'' arvoilla. Vaimennussuhde $\zeta = 0,3$.



Kuva 6: Ennustemallilla laskettuja kaksoisrakenneseinän ääneneristävyyden esimerkkejä. Malli liioittelee joustavalla rangalla saatua ääneneristävyyden parannusta korkeilla taajuuksilla.

rakenteita, jotka heikentävät kokonaisrakenteen ääneneristävyyttä. Rangat kiinnitetään usein ylä- ja alakiskoihin. Kisko on useimmiten jäykkä, jolloin se välittää ääntä seinän puolelta toiselle. Kiskojen vaikutus kasvaa sitä määräävämmäksi mitä pienempi seinän pinta-ala on, koska seinän reuna-alueen suhteellinen osuus kasvaa koko seinän pinta-alasta. Kuvassa 7 on kuvattu äänen etenemisreitit ja niiden osuutta ääneneristävyyden heikkenemiseen. Uudemmissa ennustemalleilla kiskojen vaikutus voidaan ottaa hyvin huomioon ääneneristävyyttä laskettaessa. [12]



Kuva 7: Äänen läpäisyreitit seinän läpi. R_1 on ääneneristävyys ilmapälin läpi, R_2 on ääneneristävyys kiskojen välityksellä ja R_3 on ääneneristävyys pystyrangojen välityksellä. Nuolen paksuus kussakin tilanteessa kuvastaa läpäisyreitien merkitystä koko seinän läpäisevässä äänienergiassa. Kuva lähteen [10] mukaan.

2.2 Dynaaminen jäykkyys

Dynaamisen jäykkyyden ja teräsrankalla tuetun seinän ääneneristävyyden yhteys näytettiin luvun 2.1.3 yhtälössä (18). Tässä luvussa perehdytään tarkemmin dynaamiseen jäykkyyteen.

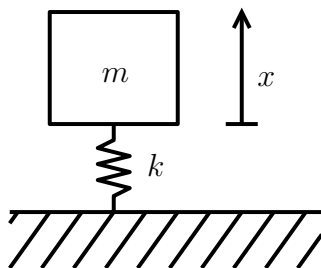
Teräsranka kytkee seinäpaneelit yhteen mekaanisesti ja akustisesti. Tätä kytkentää on luvun 2.1.3 mallissa mallinnettu yhden vapausasteen jousella. Seinäpaneelit, joiden välillä jousi eli teräsranka on, liikkuvat toisiaan vasten kohtisuoraan. Tätä yksinkertaista mallia kutsutaan massa-jousi-massasysteemiksi. Tämän työn mittauksissa rankoja mitattiin tilanteessa, jossa jousen eli rangon toisella puolella on kova liikkumaton alusta. Koska tässä työssä tutkitaan erityisesti rangon jäykkyyttä, tämä ero todellisen tilanteen ja mittaustilanteen välillä ei ole merkityksellinen. Kuvassa 8 on esitetty yksinkertainen massajousisysteemin malli.

Rangan jousimaisuuden lisäksi jäykkyyteen vaikuttaa myös liitokset. Seinäpaneelit kiinnitetään rankaan ruuvein, mikä vaikuttaa kokonaisrakenteen joustavuuteen. Liitoskohdissa tapahtuva jousto on epälineaarinen ilmiö ja siksi vaikeasti mallinnettava. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että mittaukset tehdään todellisuutta vastaavilla kiinnityksillä. Näin saadaan paremmin tietoa kiinnityksen ja rangon muodostaman systeemin dynaamisesta jäykkyydestä.

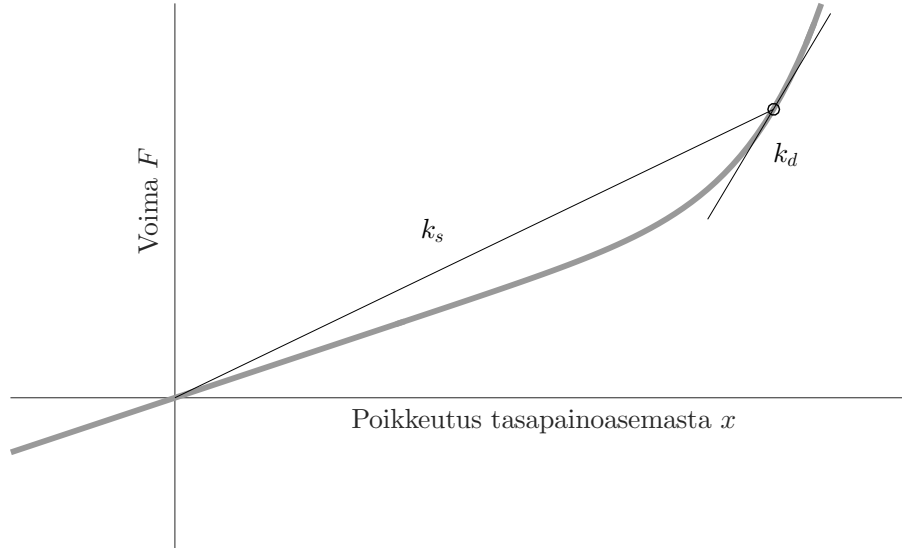
Jousivakio on jousen jäykkyyden suure yksikössä Newtonia per metri. Se kertoo, kuinka suuri voima tarvitaan puristamaan tai venyttämään joustu tietyn matkan. Jousivakiota voidaan kutsua myös staattiseksi jäykkyydeksi. Staattinen jäykkyys on voiman ja poikkeutuksen suhde, kun voima on staattinen eli muuttumaton. Dynaaminen jäykkyys on voiman ja poikkeutuksen suhde, kun voima dynaaminen eli muuttuva. Tämä voima on usein oskilloiva eli värähtelevä tai transientti eli nopeasti suuruudesta toiseen muuttuva. Jatkossa tätä voimaa kutsutaan herätevoimaksi.

Pienellä jousen poikkeutuksella staattinen ja dynaaminen jäykkyys ovat usein samat. Tämä ei kuitenkaan päde kaikilla poikkeutuksilla. Mikäli joustu puristetaan riittävästi kasaan, alkaa jousivakio muuttua suuremmaksi, eli tarvitaan suurempi voima poikkeuttamaan joustu sama matka. Tällöin dynaaminen jäykkyys alkaa kasvaa staattista jäykkyyttä nopeammin. Kuvassa 9 on esitetty staattisen ja dynaamisen jäykkyyden ero, kun joustu on poikkeutettu epälineaarille alueelle.

Seuraavassa johdetaan dynaamisen jäykkyyden yhtälö ominaistajuuden funk-



Kuva 8: Jousimassasysteemi. Kuvassa m on liikkuva massakappale, k on jousivakio ja x on poikkeutus tasapainoasemasta. Jousi on kiinnitetty toisesta päästään jäykkään liikkumattomaan alustaan.



Kuva 9: Jousen poikkeutukseen tarvittava voima poikkeutuksen funktiona. Kuvajassaja janan k_s kulmakerroin on staattinen jäykkyys ja janan k_d kulmakerroin on dynaaminen jäykkyys.

tiona Hooken laista lähteen [14] mukaisesti. Hooken laki antaa riippuvuuden jousen tasapainotilan poikkeutuksen ja siihen tarvittavan voiman suhteelle. Tämä voima on

$$F = -kx, \quad (19)$$

jossa k on jousivakio ja x [m] on poikkeutus tasapainotilasta. Sijoittamalla lausekkeeseen (19) Newtonin toinen laki, saadaan

$$m\ddot{x} + kx = 0, \quad (20)$$

missä m on massa [kg] ja \ddot{x} on kiihtyvyys eli poikkeutuksen toinen derivaatta. Saadun differentiaaliyhtälön yleinen ratkaisu on

$$x = B_1 \sin \omega_n t + B_2 \cos \omega_n t, \quad (21)$$

missä B_1 ja B_2 ovat vakioita, ω_n on ominaiskulmataajuus [rad/s], t on aika [s]. Yleisen ratkaisun (21) toinen derivaatta on

$$\ddot{x} = -\omega_n^2 (B_1 \sin \omega_n t + B_2 \cos \omega_n t). \quad (22)$$

Sijoitetaan yhtälöt (21) ja (22) yhtälöön (20) ja saadaan

$$(-\omega_n^2 m + k)(B_1 \sin \omega_n t + B_2 \cos \omega_n t) = 0. \quad (23)$$

Koska $(B_1 \sin \omega_n t + B_2 \cos \omega_n t) \neq 0$, saadaan yhtälön (23) ensimmäisestä sulkulausekkeesta ratkaistua luonnollinen kulmataajuus jousivakion ja massan suhteen

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (24)$$

Sijoittamalla yhtälöön (24) ominaiskulmataajuus $\omega_n = 2\pi f_n$, jossa f_n on ominaistajuus Hertzeinä, saadaan ratkaistua jousivakio

$$k = 4\pi^2 m f_n^2, \quad (25)$$

joka on samalla myös dynaaminen jäykkyys. Dynaaminen jäykkyys normalisoidaan vielä mitattavan rangan pituudella, jolloin tässä työssä tarvittavan dynaamisen jäykkyyden yhtälöksi saadaan

$$K' = 4\pi^2 m f_n^2 / L, \quad (26)$$

missä L on yhdellä kertaa mitattujen rankanäytteiden yhteispituus [m]. Tulos laennetaan lopuksi pituudella L/L , jolloin tulos on yksikköä N/m^2 . Näin johdettu dynaaminen jäykkyys pätee systeemin ollessa resonanssissa. Teräsrangan dynaaminen jäykkyys voidaan olettaa olevan akustiikan taajuusalueella olennaisesti samaa luokkaa, jotta resonanssista selvitettyä dynaamista jäykkyyttä voidaan käyttää yleisemmin.

Jotta dynaamista jäykkyyttä voitaisiin käyttää luvussa 2.1.3 esitettyssä ääneneristyksen ennustemallissa, täytyy se normeerata. Mallinnuksessa dynaamista jäykkyyttä käytetään yksikössä N/m^3 , eli yhtälöllä (26) saatu tulos normeerataan koolausvälin mukaan. Koolausväli on pystysuoraan asennettavien rankojen välille jäävä etäisyys. Dynaaminen jäykkyys normeerataan

$$K'' = K' / b, \quad (27)$$

missä b on koolausväli. Suomessa tyypillinen koolausväli on k600, eli rankojen etäisyys keskeltä keskelle on 600 mm.

Myös seinäpuoliskojen väliin jäävä ilmassa toimii jousen tavoin, mikäli rakenteen ovat riittävän tiiviit. Tämän ilmapälin dynaaminen jäykkyys [10] voidaan laskea yhtälöllä

$$k_a = \rho_0 c_0^2 / d, \quad (28)$$

jossa ρ_0 on ilman tiheys, c_0 on äänennopeus ilmassa ja d on ilmapälin paksuus. Yhtälö pätee äärettömän suurille levyille, jolloin levyjen reunoilta ei vuoda ilmaa ulos systeemistä. Todellinen ilmapälin jäykkyys on näin ollen pienempi vuotojen aiheuttamista häviöistä johtuen. Lisäksi lisäämällä absorptiomateriaalia ilmapäliin jäykkyys pienenee noin 20 % täysin täytetyssä ilmapäliissä [15].

2.3 Vaimennussuhde

Kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristävyys riippuu joustavan rangan dynaamisen jäykkyyden lisäksi rangan vaimennussuhteesta. Luvun 2.1.3 yhtälössä (17) on esitetty yhteys joustavan rangan tuomalle lisä-ääneneristävyydelle ΔR_{ff} ja vaimennussuhteelle ζ . Joustavaa teräsrangaa mallinnettiin ennustemallissa yhden vapausasteen vaimennettuna jousena.

Vaimeneminen muuttaa oskilloivan liike-energian lämmöksi rakenteessa eli poistaa sen kyseisestä massa-jousi-massasysteemistä. Vaimenemiseen vaikuttavat useat

mekanismit kuten kitka, rakenteiden yhteen iskeytyminen, fluidien liikkeet kuten äänensäteily sekä viskoelastinen eli materiaalin sisäinen vaimeneminen [16]. Viskoelastiset häviöt itse rankamateriaalissa eli teräksessä ovat hyvin pieniä, $\zeta \ll 0,01$. Asennettujen teräsrankojen mitatut vaimennussuhteet ovat kuitenkin luokkaa 0,3 [13]. Luultavammin teräsrankojen suurimmat häviöt tapahtuvatkin ruuviliitoksissa. Ruuviliitosten häviöt ovat epälineaarisia ja hyvin monimutkainen ja siten vaikeasti tarkasti mallinnettava ilmiö. Tässä työssä kuitenkin tehdään oletus lineaarisuudesta. Sekä dynaaminen jäykkyys että vaimennusparametri oletetaan linearisoiduiksi eli niille haetaan efektiivinen arvo. Lineaarisuusoletus yksinkertaistaa vaimennussuhteen laskentaa merkittävästi ja antaa riittävän tarkan approksimaation vaimennussuhteesta työn tarkoitukseen.

Vaimennetun massa-jousisysteemin liikeyhtälö on muotoa

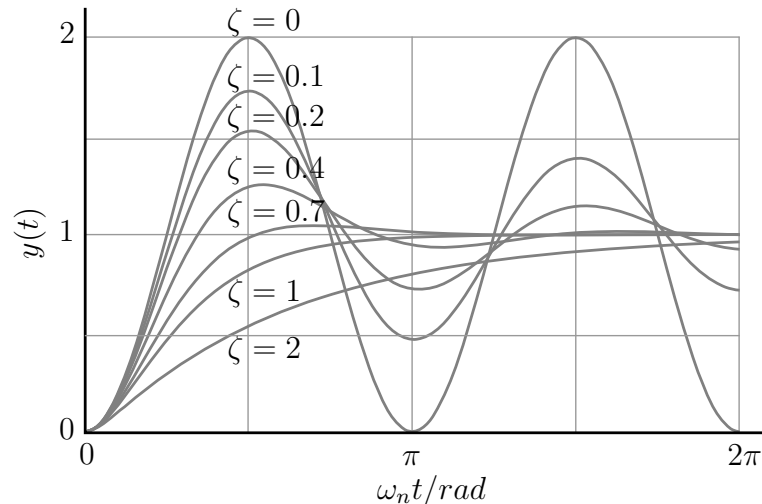
$$m\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + kx(t) = f(t), \quad (29)$$

missä m on massa, C vaimennuskerroin, k on jousivakio, $f(t)$ on systeemiin aiheutettu voima, $x(t)$ on massan poikkeutus ajan suhteen ja yläpisteet merkitsevät poikkeutuksen ensimmäistä ja toista aikaderivaattaa eli nopeutta ja kiihtyvyyttä. Liikeyhtälö voidaan merkitä myös vaimennussuhteen kautta jakamalla massalla

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = f(t)/m, \quad (30)$$

missä ω_n on systeemin ominaistajuuus ja vaimennussuhde on määritetty $\zeta = C/C_0 = C/2\sqrt{km}$. Vaimennussuhde kuvaa siis vaimenemiskertoimen C suhdetta kriittiseen vaimenemiskertoimeen C_0 . Kun systeemi vaimenee kriittisesti, eli $\zeta = 1$, se vaimenee mahdollisimman nopeasti värähtelemättä. Jos $0 < \zeta < 1$, systeemi värähtelee vaimentuen. Kun $\zeta > 1$, systeemi on ylivaimennettu. Kuvassa 10 on esitetty massa-jousisysteemin värähtelykäyttäytyminen eri vaimennussuhteen arvoilla.

Vaimennussuhteen käänteisarvo on niin sanottu hyvyysluku eli Q-arvo. Hyvyysluku kuvaa oskilloivan systeemin ominaistajuuuspiikin huipukkuutta taajuusvasteessa.



Kuva 10: Yhden vapausasteen massa-jousisysteemin askelvaste vaimennussuhteen ζ eri arvoilla.

Mitä suurempi hyvyysluku, sitä piikkikämpi ja korkeampi taajuuspiikki on, ja sitä pienemmät ovat systeemin häviöt. Hyvyysluvun, vaimennussuhteen ja häviökertoimen suhde on seuraava

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{\eta}, \quad (31)$$

missä η on häviökerroin. Yhtälö (31) on kuitenkin approksimaatio. Oikeammin häviökertoimen ja hyvyysluvun suhde on muotoa

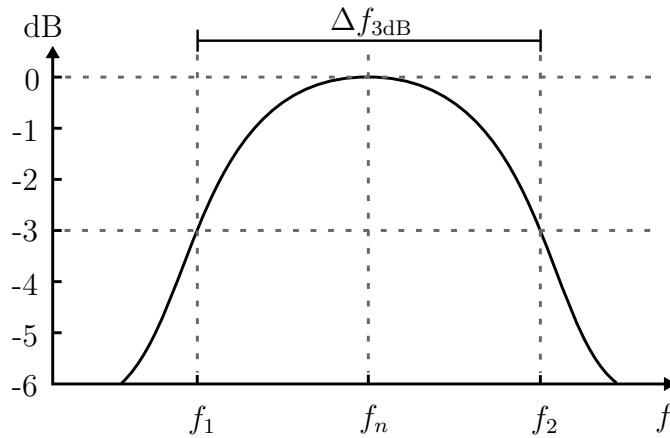
$$Q^{-1} = \sqrt{1+\eta} + \sqrt{1-\eta}, \quad (32)$$

mutta edellä esitetty approksimaatio on hyvin yleinen ja toimii pienillä vaimennuksen arvoilla. Mikäli häviökerroin on riittävän pieni, $0 \leq \eta \leq 0,28$, approksimaation tuottama virhe on noin 1% [17].

Vaimennussuhde voidaan määrittää kokeellisesti massa-jousisysteemin taajuusvasteesta. Määrittämiseen käytetään niin sanottua 3 desibelin sääntöä resonanssin kaistanleveydelle. Ominaistaajuuden ympäriltä etsitään pisteet, joissa taajuusvasteen magnitudi on 3 dB pienempi kuin ominaistaajuudella. Näiden pisteiden väliin jäävää taajuuskaistaa kutsutaan 3 dB:n kaistanleveydeksi. Vaimennussuhde saadaan siten

$$\zeta = \frac{\Delta f_{3\text{dB}}}{2f_n}, \quad (33)$$

missä $\Delta f_{3\text{dB}}$ 3 dB:n kaistanleveys. Kuvassa 11 on esitetty kaistanleveyden määrittäminen graafisesti.



Kuva 11: Resonanssin vaimennuskertoimen määrittäminen taajuusvasteesta. Kuvassa 3 dB:n kaistanleveys on $f_2 - f_1$ ja f_n on ominaistaajuus.

3 Mittausjärjestelmä ja -kohde

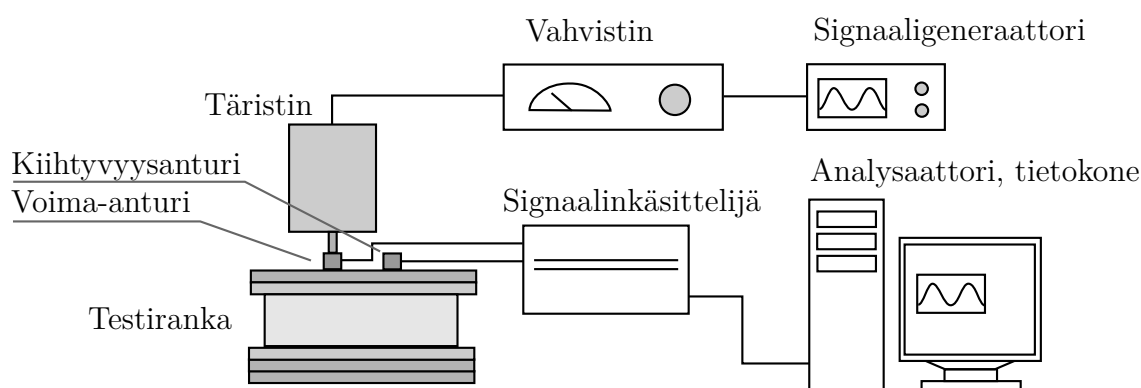
Tässä luvussa esitetään työssä rakennettu dynaamisen jäykkyyden mittausjärjestelmä ja -metodit, järjestelmän osat ja toiminta sekä mittauskohde. Luvussa käsitellään myös mittausepävarmuuksia.

3.1 Järjestelmän kuvaus

Suurin osa nykyisistä dynaamisen jäykkyyden mittausmenetelmistä perustuu mittausmenetelmiin, jotka on alunperin kehitetty kumimaisten värähtelynvaimennusmateriaalien testaamiseen. Näitä menetelmiä ja kirjallisuutta on käsitelty ansiokkaasti lähteessä [18]. Lähde [19] perehtyy kaksoisrakenneseinien teräsrankojen mallinnukseen ja kokeelliseen testaamiseen. Artikkelissä sisältyy myös laajan kirjallisuuskatsauksen.

Mittausmenetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan: epäsuoraan ja suoraan mittausmenetelmään. Suoralla menetelmällä mitataan materiaalin siirto-ominaisuudet mittaamalla eri puolilta näytettä voimaheräte ja poikkeutusvaste, joiden suhde on suoraan dynaaminen jäykkyys. Kimmoisten eristemateriaalien dynaamisen jäykkyyden mittaaminen suoralla menetelmällä on esitetty esimerkiksi standardisarjassa ISO 10846 [20]. Epäsuorassa menetelmässä, jota tässä työssä käytetään, mitataan jokin muu suure, kuten massa-jousisysteemin ominaistajuus, josta dynaaminen jäykkyys johdetaan.

Tämän työn mittausjärjestelmä ja -metodi perustuvat soveltuvin osin standardiin ISO 9052-1 [21], joka on tarkoitettu kelluvien lattioiden eristemateriaalien dynaamisen jäykkyyden mittaukseen. Samankaltainen mittausjärjestely on esitetty myös lähteessä [22]. Kuten luvussa 2.2 esitettiin, teräsranan dynaaminen jäykkyys saadaan laskettua massa-jousisysteemin ominaistajuudesta, kun tiedetään systeemin mitat ja massat. Systeemin ominaistajuus voidaan selvittää sen taajuusvasteesta. Taajuusvaste kuvaa herätteen ja vasteen riippuvuutta vahvistuksena ja vaiheena. Ominaisuus näkyy piikkinä vahvistuskuvassa ja 90 asteen muutoksena vaihekuvassa. Tässä työssä ominaistajuus selvitetään vahvistuskuvasta sen matemaattisen yksinkertaisuuden ja tarkoituksen riittävän tarkkuuden vuoksi.



Kuva 12: Mittausjärjestelmän systeemikaavio. Täristimen sijaan voidaan käyttää vasaraa, jolloin järjestelmä yksinkertaistuu entisestään.

Mittausjärjestelmän systeemikaavio on esitetty kuvassa 12. Testirangasta ja kuormalevystä muodostuva massa-jousisysteemi makaa vakaalla alustalla omalla painollaan. Rankoihin on kiinnitetty kipsilevyपालत ruuvein molemmin puolin, mikä vastaa tavallista kaksoisrakenneseinää. Koska kuormalevy on rangan päällä, maan vetovoima aiheuttaa rankaan sen ominaistaajuutta kasvattavan esijännityksen, mitä ei oteta huomioon kaavassa (26). Tämä aiheuttaa todellista suuremman mitatun dynaamisen jäykkyyden. Virhe on positiivinen, eli käyttämällä mitattua tulosta luvun 2.1.3 ennustemallissa aliarvioidaan seinän ääneneristävyyttä.

Massa-jousisysteemi herätetään ja sen vastesignaali johdetaan IMC Cronos-PL2 -signaalinkäsittelijälle, joka vahvistaa signaalia, muuntaa sen digitaaliseksi ja lähettää eteenpäin mittausanalysaattorille eli tietokoneelle. Tietokoneella digitaalista signaalia käsitellään IMC Studio 5.0 -ohjelmassa. Mittausta ohjataan kyseisellä ohjelmalla luodulla graafisella käyttöliittymällä. IMC Studio kutsuu tarvittaessa IMC Famos 7.0 -ohjelmaa, joka suorittaa tarvittavat laskennat ja palauttaa ne takaisin Studiossa esitettäväksi. Analyysaattoria käsitellään tarkemmin luvussa 3.4.

Taulukko 1: Antureiden ominaisuudet [23, 24]

Anturi	Voima-anturi PCB Piezotronics 208C03
Ylärajataajuus	36 kHz
Voimankesto, dynaaminen	2224 N
Voimaresoluutio	0,02 N (rms)
Epälineaarisuus	≤ 1 %
Anturi	Kiihtyvyysanturi PCB Piezotronics 353B01
Ylärajataajuus ± 5 %	7 kHz
Maksimikiihtyvyys	± 98100 m/s ²
Kiihtyvyysresoluutio	0,03 m/s ² (rms)
Epälineaarisuus	≤ 1 %

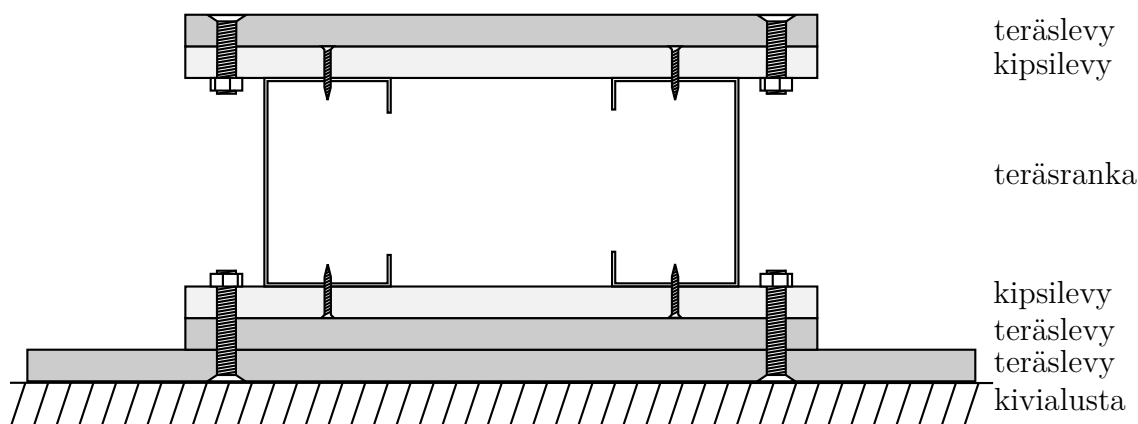
Mittausjärjestelmän herätevoima voi olla joko yksittäinen impulssi tai jatkuvaa kohinaa. Impulssi aiheutetaan vasaran iskulla ja kohina tuotetaan inertiatäristimellä. Systeemin vaste on kuormalevyn kiihtyvyys. Iskun voimasignaali mitataan yksiakselisella eli yhteen suuntaan mittaavalla pietsosähköisellä voima-anturilla. Anturin pietsokide muuntaa kokoon puristuessaan siihen aiheutetun voiman sähkövaraukseksi. Anturin sisällä oleva varausvahvistin muuntaa ja vahvistaa varauksen mitattavaksi sähköjännitteeksi. Kiihtyvyysanturin toiminta perustuu myös pietsosähköiseen ilmiöön, mutta anturissa pietsokiteen päällä on lisäksi kiinteä massakappale, jonka kiihtyvyys aiheuttaa kiteeseen voiman. Molemmat työssä käytetyt anturit ovat PCB Piezotronicsin valmistamia. Antureiden tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Anturit kiinnitetään kuormalevyyn kovalla synteettisellä mehiläisvahalla (Petro

Wax). Mehiläisvaha sopii kiinnitykseen hyvin, sillä kiinnitys ei ole liiman tapaan pysyvä vaan helposti uudelleen kiinnitettävä. Mehiläisvaha ei myöskään vaikuta mittaustulokseen käytössä olevalla taajuuskaistalla. Lähteen [25] mukaan anturin resonanssitaajuus mehiläisvahakiinnityksellä oli noin 29 kHz huoneenlämmössä ja jäykällä pulttikiinnityksellä 31 kHz. Resonanssin taajuus on yli kaksi dekadia suurempi kuin rankamittausten mittaускаista 5-200 Hz eikä siten vaikuta mittaukseen.

Mittauspenkki on esitetty kuvassa 13. Kaikki levyt ovat pinta-alaltaan 20 x 30 cm² lukuun ottamatta pohjalevyä, jonka koko on 30 x 30 cm². Mittauspenkki muodostuu seuraavista kerroksista ylhäältä alaspäin luetellen:

- 10 mm teräksinen kuormalevy kiinnitettynä kipsilevyyn pultein, noin 5 kg
- 13 mm kipsilevy kiinnitettynä rankoihin ruuvein
- 66 - 120 mm teräsranka (2 kpl)
- 13 mm kipsilevy kiinnitettynä rankoihin ruuvein
- 10 mm teräksinen kuormalevy kiinnitettynä kipsi- ja pohjalevyyn pultein
- 10 mm teräksinen pohjalevy
- ~1 mm pohjalevyn liimakiinnitys sinitarralla kivialustaan

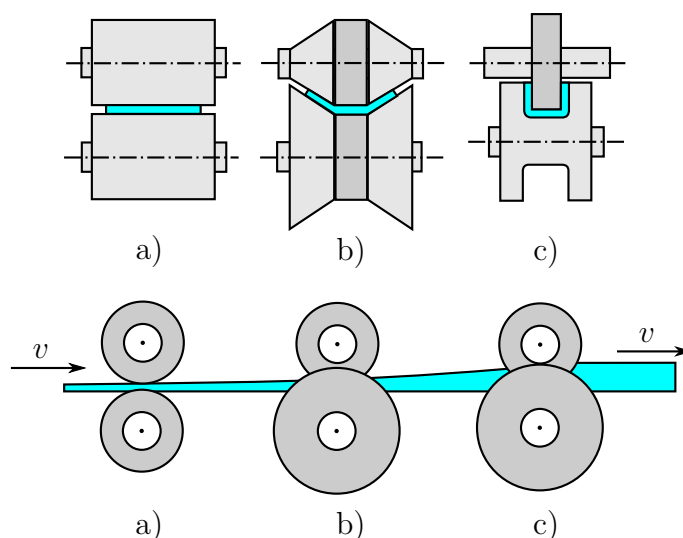


Kuva 13: Mittauspenkin poikkileikkaus. Kipsilevyt on kiinnitetty ruuvein teräsrankaan. Pulttikiinnitys on vain kipsilevyjen ja teräslevyjen välillä.

3.2 Mittauskohde

Teräsranka valmistetaan rullamuovauksella kelalla olevasta teräslevynauhasta. Kelasta syötetään rullamuovauslinjalle teräslevyä, joka taivutetaan pitkittäin usealla rullaparilla vähitellen ja leikataan lopuksi määrämitta. Samalla linjalla rankaan voidaan leikata tai pistää reikiä esimerkiksi sähköjohtojen läpivientejä varten. Rullamuovaus tapahtuu huoneenlämmössä jolloin käytetään termiä kylmämuovaus. Kuvassa 14 esitetty rullamuovauslinjan peruseriaate. [26]

Teräsranan dynaamiseen jäykkyyteen voi vaikuttaa monin tavoin: materiaallipaksuudella, materiaalin pintalaadulla, profiilin muodolla ja leikkauksilla. Mitä ohuempaa teräslevyä käytetään, sitä joustavampi teräsrangasta tulee. Rangan laipan on oltava kuitenkin riittävän vahva, jotta se ei anna periksi ja käänny alta pois,

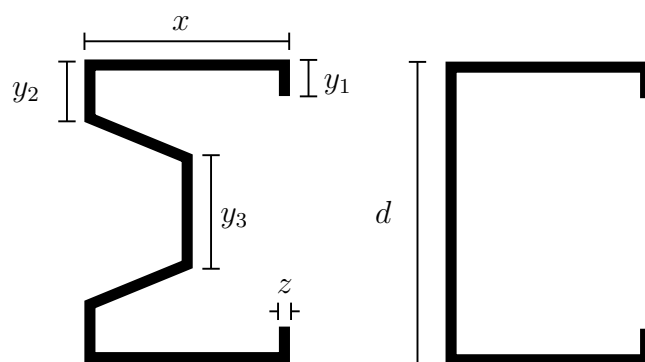


Kuva 14: Rullamuovauslinjan peruseriaate. Muovauslinja valmistaa yksinkertaisen C-profilirangan. Yllä rullaparien a, b ja c pituusleikkaus ja alla samojen rullaparien poikkileikkaus. Vektori v osoittaa rangon etenemissuunnan. [26]

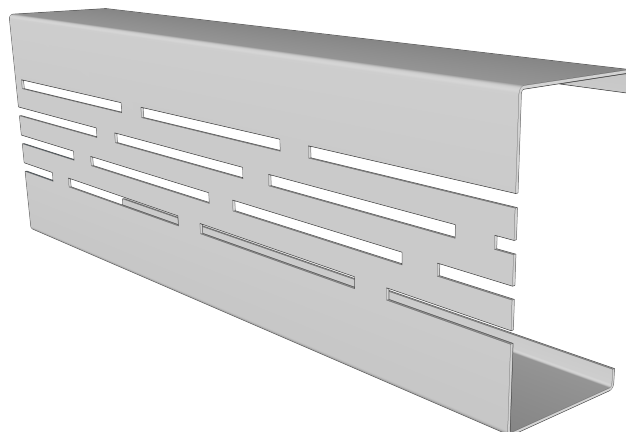
kun seinäpaneelia ruuvataan kiinni. Alhaista dynaamista jäykkyyttä ei voida saavuttaa pelkästään käyttämällä ohutta materiaalia, sillä se vaikuttaa koko profiilin jäykkyyteen.

Materiaalin pintaa muovaamalla saadaan ohuemmasta levystä jäykempää. ELPR-rangan pinta on rypyttetty ristikkäisaallolle, mikä jäykistää peltiä. Valmistajan mukaan materiaalin efektiivinen paksuus on 1,15 mm, vaikka materiaalin reaalinen paksuus on noin 0,5 mm. Tällä tekniikalla saavutetaan keveämpiä ja helpommin käsiteltäviä rankoja, jotka ovat samalla kuitenkin kantavampia kuin vastaavan paksuinen sileä ranka.

Profiilin muotoa muokkaamalla voidaan lisätä rangon puristusjoustavuutta, kuten on tehty XR-rangassa. XR-rangan muoto muistuttaa kreikkalaisten aakkosten Σ -kirjainta. Jokaisen profiilin selkään eli uumaan tehty mutka pienentää rangon



Kuva 15: Profiilityypit: vasemmalla XR66-rangan sigma-profiili. Muiden rankojen malli oli oikealla esitetty C-profiili. Mitattujen rankojen mitat on esitetty taulukossa 2.



Kuva 16: RYC100b-ranka, jossa neljä reikälinjaa.

dynaamista jäykkyyttä puristussunnassa. Kuvassa 15 on esitetty työssä mitattujen rankojen profiilit. XR-rankaa lukuun ottamatta kaikki rangat olivat C-profiilin rankoja.

Talojen ulkoseinissä käytetään usein RYC-rankaa, missä lämmöneristävyys on tärkeä ominaisuus. RYC-rangan lämmöneristävyttä on parannettu leikkaamalla rangan uumaan pitkittäisiä reikiä, jotka yhdistyvät toisiinsa kapeilla kannaksilla. Rakenne pienentää myös rangan dynaamista jäykkyyttä. Työssä mitattiin kaksi 0,7 mm materiaalivahvuuden RYC-rankaa, joihin oli leikattu eri määrä pitkittäisiä reikälinjoja: kolme ja neljä linjaa. Taulukossa 2 näihin viitataan nimillä RYC100a/b, vastaavasti. Kuvassa 16 on havainnollistettu rangan pitkittäisiä reikiä. RYC100c:ssä on neljä reikälinjaa, mutta on materiaaliltaan a:ta ja b:tä paksumpi.

Tässä työssä mitattujen rankojen mitat on esitetty taulukossa 2. Kaikkien testi-

Taulukko 2: Mitattujen rankojen fyysiset mitat [mm]. Kuvassa 15 on esitetty taulukon kirjaimia vastaavat mitat. RYC100a ja -b eroavat uuman reikälinjojen määrässä.

Ranka	d	z	x	$y_1 / y_2 / y_3$
LR66	66	0,46	40	9 / - / -
LR66	66	0,56	40	9 / - / -
LR95	95	0,545	40	9 / - / -
LR120	120	0,475	40	9 / - / -
ELPR	66	0,47	40	9 / - / -
XR66	66	0,46	44	7 / 12 / 24
C100	100	0,70	50	11 / - / -
RYC100a	100	0,70	50	11 / - / -
RYC100b	100	0,70	50	11 / - / -
RYC100c	100	1,20	50	11 / - / -

rankojen pituus oli 300 mm, eli testirankaparin yhteispituus L (katso yhtälö (26)) oli 600 mm. Testirangan lyhyt pituus vaikutti mittaustulosten luotettavuuteen. Rankanäytteet eivät pysy välttämättä täysin muodossaan niitä asennettaessa testi-penkkiin. Useimminten tämä kasvattaa näytteen dynaamista jäykkyyttä. Luvussa 4.3 käsitellään tätä asiaa tarkemmin.

3.3 Mittausmenetelmät

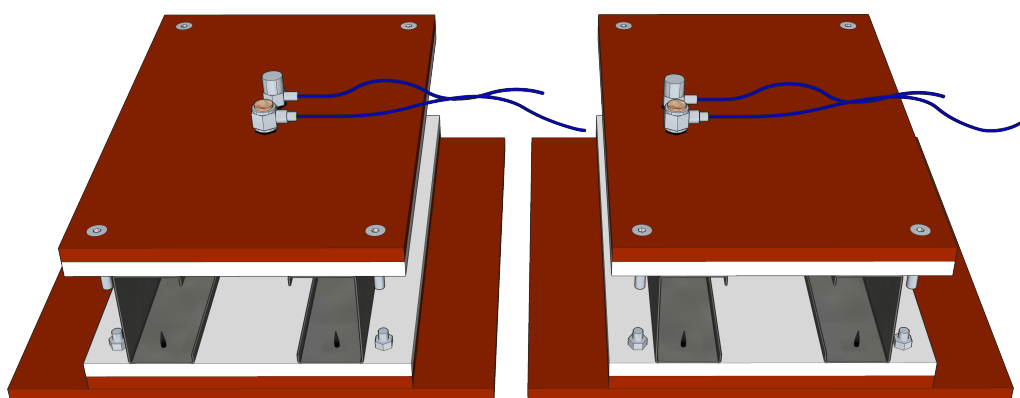
Teräsrankojen varsinaisissa mittauksissa käytettiin herätteenä iskuvasaraa. Mittausjärjestelmä rakennettiin kuitenkin siten, että herätteenä voidaan käyttää myös tärhistimen tuottamaa kohinasignaalia. Seuraavissa luvuissa esitellään molemmat menetelmät hyvine ja huonoine puolineen.

3.3.1 Iskuheräte

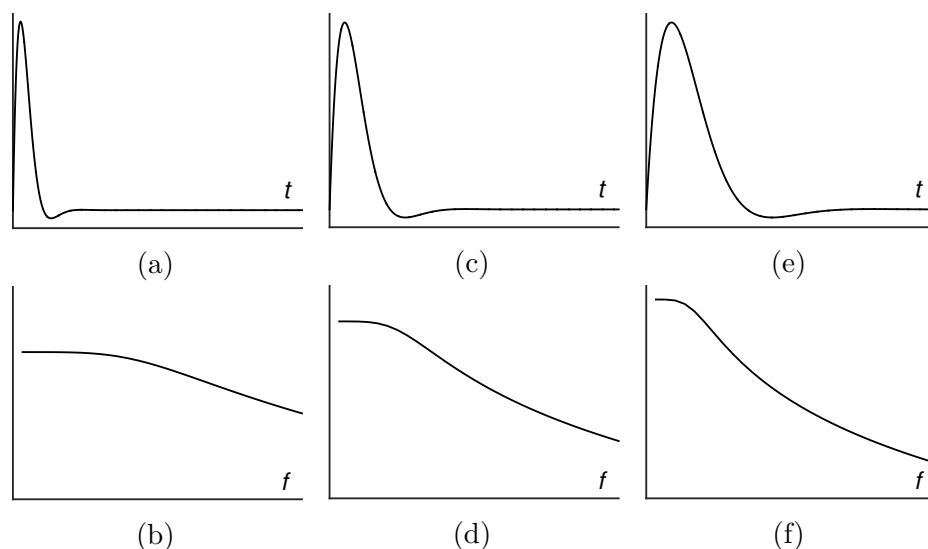
Mittaaminen iskuherätteellä on nopea ja yksinkertainen menetelmä selvittää systeemin ominaistajuus. Systemi herätetään iskemällä vasaralla voima-anturiin. Kiihtyvyyssanturi mittaa systeemin vasteen. Sekä voima- että kiihtyvyyssanturi on sijoitettu mittauksessa kuormalevyn keskilinjalle muutaman senttimetrin päähän toisistaan.

Rankanäyteparin keskinäisiä eroja tutkittiin tekemällä lisämittaukset (sekundäärimittaukset) siten, että anturit sijoitettiin suoraan rangan päälle. Mikäli keskeltä mitatuissa tuloksissa (primäärimittaukset) oli useampia resonanssipeikkejä, kunkin rangan päältä vuorollaan mittaamalla saatiin selvitettyä, mitkä ominaistajuudet kuuluivat kullekin rangalle. Kuvassa 17 on esitetty antureiden sijainnit eri mittauksissa. Primäärisellä mittauksella tarkoitetaan mittausta, jossa selvitetään systeemin taajuusvasteesta ominaistajuus, ja sekundaarisissa mittauksissa selvitettiin rankojen ominaistajuuksien eroavaisuudet.

Tämän työn mittauksissa keskiarvoistettiin kymmenen taajuusvastemittausta per näytepari. Kymmenen iskun sarja per primäärimittaus havaittiin alustavissa mittauksissa hyvin riittäväksi. Jo viiden mittauksen jälkeen mitatun ominaistajuus-



Kuva 17: Vasemmalla: antureiden paikat primäärimittauksen aikana. Oikealla: antureiden paikat toisen sekundäärimittauksen aikana. Toisen rangon sekundäärimittauksessa anturit oli sijoitettu vastaavasti peilikuvana.



Kuva 18: Yläpuolella kuvissa a, c, e esimerkki-impulsseja ja alapuolella kuvissa b, d, ja f niiden taajuusvasteet vastaavasti. Kuvissa a ja b vasara on kova, joten impulssi on lyhyt ja taajuusvasteen kaista leveä. Mitä joustavampi vasaran kärki on, sitä leveämpi impulssi on ja sitä enemmän taajuusvaste painottuu pienille taajuuksille, kuten nähdään kuvista e ja f.

den keskiarvo pysyi samana yhden desimaalin tarkkuudella. Sekundaarimittauksissa tehtiin viiden iskun sarja. Yhden rankaparin mittauksiin meni näin ollen vain viitisen minuuttia, jos ei lasketa mukaan mittaustenkin asentamiseen ja purkamiseen kuluvaa aikaa.

Herätesignaalin taajuussisältöä voidaan säätää vaihtamalla vasaran iskupäätä tai kiinnittää siihen erilaisia kumimaisia materiaaleja. Mitä joustavampaa vasaran iskupää käytetään, sitä enemmän herätteen energia painottuu pienille taajuuksille. Mittauksissa käytetty vasaran iskupää valittiin kiinnittämällä erilaisia kumi-materiaaleja vasaraan, ja näistä valittiin mittaustaajuusalueelle sopivin. Erilaisia impulssiherätteiden taajuusjakaumia on esitetty kuvassa 18.

Mittausmenetelmän heikkouksia ovat mittaajalta vaadittu harjaantuminen ja mahdollinen heikko signaalikohinasuhde. Alustavissa mittaukskokeiluissa rajoitettiin impulssin hetkelliseksi maksimivoimaksi 8 - 20 newtonia. Mikäli heräte ei osunut näihin rajoihin, mittaustulos hylättiin. Pienempi heräte johti liian suureen kohinatason, joka aiheutti epävarmuutta mitattuun ominaistajuuteen. Suurempi voima taas vastaa heikosti ääniaaltojen aiheuttamaa voimaa. Tässä tutkittujen teräsrankojen ominaistajuuden käyttäytyminen käytetyn voiman suhteen osoittautui kuitenkin hyvin lineaariseksi. Linearisuutta käsitellään myöhemmin luvussa 3.5.

3.3.2 Jatkuva heräte

Taajuusvaste voidaan mitata iskuherätteen lisäksi myös jatkuvalla herätteellä, vaikka varsinaiset teräsrankojen tutkimusmittaukset tehtiin iskuherätejärjestelyllä. Tässä työssä mittaus jatkuvalla herätteellä osoitettiin toimivaksi konseptiksi, mutta muu-

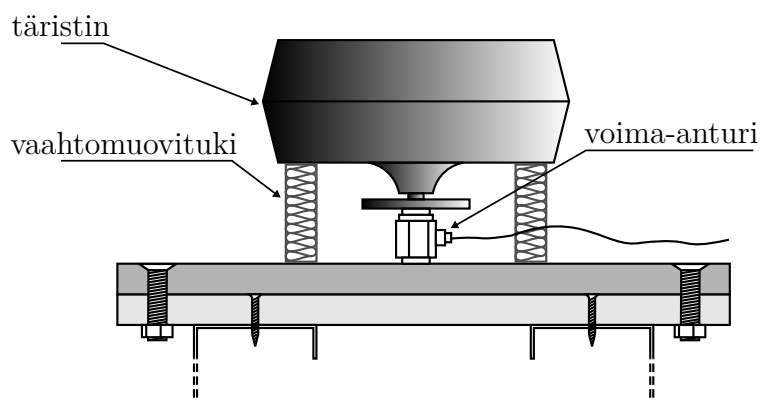
Taulukko 3: Valmistajan ilmoittamat pintakaiutinelementin ominaisuudet [27]

Taajuuskaista	40 - 15 000 Hz
RMS tehonkesto	50 W
Impedanssi	8 Ω
Nettomassa	1,045 kg
Korkeus	51 mm
Halkaisija	101 mm

toin jatkuvan herätteen mittaus oli sivuosassa. Tekniikassa on työn valmistuttua vielä muutamia rajoitteita, mutta niiden rajoissa saatiin aikaiseksi toimiva ja edullinen jatkuvan herätteen mittausjärjestely. Herätelähteenä käytettiin pintakaiutinelementtiä (tyyppi Dayton Audio HDN-8 Sound Exciter Transducer [27]), jota käytettiin pienimuotoisena inertiatäristimenä mittauslaitteistossa. Pintakaiutinelementtiä käytetään tavallisesti runkoäänilähteenä, jolla voidaan tehdä esimerkiksi pöytäpinnasta kaiutin. Elementti soveltui myös kohinalähteeksi jatkuvan herätteen mittauksiin, vaikka puutteitakin oli. Elementin spesifikaatiot on esitetty taulukossa 3

Kokeellinen inertiatäristinjärjestely on esitetty kuvassa 19. Täristin ei vaadi erityistä kiinnitystä, vaan makaa vapaasti omalla painollaan voima-anturin päällä. Täristimen sivuille asetettiin rengasmaisen vaahtomuovipala varmistamaan, ettei täristin pääse kaatumaan mittauksen aikana. Ennen mittauksia tarkistettiin vertailumittauksin, ettei täristimen liike siirry vaahtomuovin kautta kuormalevyyn merkittävästi. Vertailumittauksien tuloksissa ei nähty eroa vaahtomuovin kanssa tai ilman. Täristimen massa on noin yksi kilogramma, mikä rajoittaa käytettävän herätesignaalin tason noin 10 Newtoniin. Tätä suuremmilla herätesignaaleilla vapaasti makaava täristin alkaa hyppiä voima-anturin päällä, mikä johtaa epälineaarisuuksiin herätteessä. Pienestä massasta johtuen laitteen taajuusvaste on heikko pienillä taajuuksilla. Käytännössä alle 50 Hz:n taajuuksia ei voitu mitata.

Yleisesti vastaavissa mittauksissa käytetty täristin on mitaustarkoitukseen valmistettu laite. Tällaisen täristimen massa on merkittävästi suurempi tai laite on



Kuva 19: Poikkileikkaus täristimisestä ja anturista.

kiinteästi asennettu sekä laitteen taajuusvaste on leveämpi ja ulottuu pienemmille taajuuksille. Yleisesti jatkuvalla herätteellä saadaan iskuherätettä suurempi signaali-kohinasuhde, mutta tässä työssä asia oli päinvastainen tärstimen pienestä massasta ja tehosta johtuen.

Kaupallisissa tärstimissä voima siirretään mittauskohteeseen tankoa (engl. stinger) pitkin, joka rajoittaa voiman välittymisen yksisuuntaiseksi. Tanko on jäykkä pituusakselin suuntaan, mutta joustava muissa suunnissa, jolloin voima siirtyy vain tangon suuntaisesti. Tämän työn tärstimellä herätevoiman suunta voi olla hieman vino, sillä tärstin makaa vapaasti voima-anturin päällä. Tällä voi olla pieni heikentävä vaikutus herätteen koherenssiin.

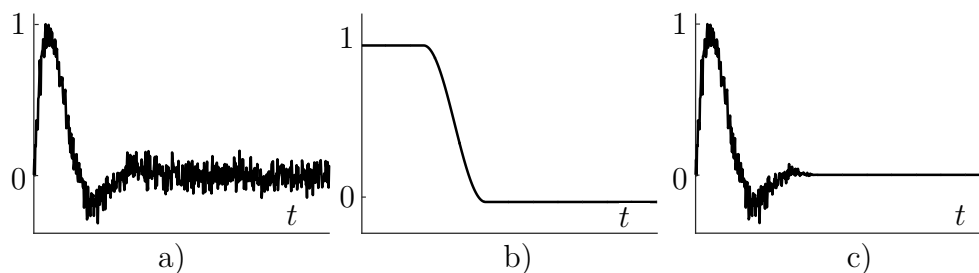
Jatkuvan herätteen etu on toistettavuus, mikä on hyödyksi tutkittaessa epälineaarisia ilmiöitä. Herätteen taso säädetään tärstimä ohjaavalla vahvistimella, jolloin taso pysyy vakiona valittuna. Mittaukseen kuuluu kuitenkin enemmän aikaa kun iskuherätteellä mitattaessa. Pitkän ajan yli keskiarvoistaminen parantaa heikkoa signaali-kohinasuhdetta.

3.4 Mittausanalysointori

Seuraavaksi esitetään mittausanalysointorina toimivan IMC Studio 5.0 -ohjelman ja siihen välittömästi liittyvien osien toiminta sekä analysointoriin koodatut ominaisuudet. Antureiden analoginen signaali johdetaan ensin IMC Cronos-PL2 -signaalinkäsittelijälle, joka vahvistaa signaalin ja muuntaa sen digitaaliseen muotoon. Cronos kykenee myös reaaliaikaiseen laskentaan, mutta sitä ei kuitenkaan käytetty tässä sen rajallisten valmiiden funktioiden vuoksi. Digitaalinen signaali käsitellään tietokoneella IMC Studiassa. Studio toimii sekä graafisena käyttöliittymänä sekä signaalien ohjaimena. Tarvittaessa Studio kutsuu IMC Famos 7.0 -matematiikkaohjelmaa, jossa kaikki laskenta lopulta suoritetaan. Famoksen valmiiden funktioiden valikoima oli Cronosta merkittävästi laajempi. Laskenta ei tapahdu reaaliajassa vaan aina mittausyötyä.

Impulssivasaralla lyödessä saattaa käydä niin, että vasara pomppaa iskun jälkeen ja osuu uudestaan voima-anturiin ennen kuin vasaran ehtii nostaa pois. Tämä tapahtuu nopeasti eikä mittausväline välttämättä huomaa sitä itse. Tällainen kaksoisisku vääristää mitattua taajuusvastetta eikä tulokseen tällöin voi luottaa. Näin ollen on tärkeää havaita mahdollinen kaksoisisku ohjelmallisesti. Mittausohjelmaan koodattiin tätä varten ominaisuus, joka havaitsee herätesignaalin paikalliset maksimit. Herätesignaali voi olla hieman aaltoileva, koska iskun voimasta kasaan painuvat rangat aiheuttavat anturiin kuormalevyn kautta iskua vastakkaisuuntaisen voiman. Ilmiö on nähtävissä kuvassa 20 a). Tämän vuoksi tarvittiin kynnyksarvot, joita pienempiä paikallisia maksimeita ei lueta. Aaltoilun amplitudi riippuu täysin iskun voimasta, joten vakiosuuruiset kynnyksarvot eivät toimisi. Tästä syystä kynnyksarvo lasketaan jokaiselle iskulle erikseen suhteellisenä osuutena iskun maksimivoimasta.

Iskun maksimivoiman raja-arvoiksi valittiin 8 - 20 N alustavien testien jälkeen. Tämä voima katsottiin riittävän suureksi, ettei signaali huku kohinaan. Voima ei myöskään ollut niin suuri, että epälineaarisuudet voisivat vaikuttaa mitattuun ominaisuuteen. Lyönnin tavoitevoimakkuus oli noin 15 N. Mikäli lyönti epäonnistuu



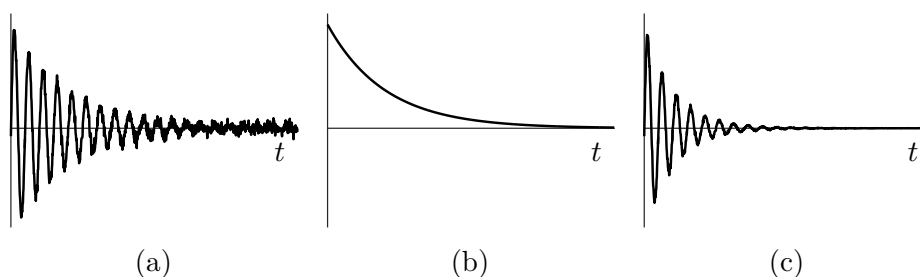
Kuva 20: a) Käsittelemätön herätesignaali aikatasossa, b) kosini-ikkuna ja c) ikkunoitu herätesignaali.

jollain tavalla tai mittaustulokseen ilmestyy joku muu virhe, voidaan edellinen mittaustulos hylätä. Tällöin ohjelma poistaa edellisen tallennetun heräte-vasteparin eikä sitä oteta huomioon keskiarvoistuksessa.

Analysaattori laskee aikatazon herätteestä ja vasteesta taajuusvasteen FFT:llä (FFT, fast fourier transform). Tämän jälkeen analysaattori etsii taajuusvasteesta ominaistajuuden automaattisesti. Mitatun taajuusvastekaistan alku- ja loppupäässä oli tyypillisesti kohinaa. Kohinan vuoksi ohjelma etsii taajuusvasteen suurimman arvon eli ominaistajuuden 5 - 150 Hz:n alueelta. Tämä oli myös iskuvasarana käytetyn spektrin hyötykaista. Ominaistaajuuden ympäristöstä etsitään 3 dB:ä vaimeammatt pistee, joista määritetään 3 dB:n kaistanleveys pisteiden erotuksena ja vaimennussuhde kuten esitettiin aiemmin kuvassa 11.

Ikkunoimalla signaalia sopivasti voidaan pienentää mitatun vasteen kohinatasa ja näin ollen tarkentaa resonanssiipiikistä luettavan ominaistajuuden lukemaa. Herätteessä on hyötysignaalia vain alussa ja loput on kohinaa. Yhden mittaussyklin pituus on noin 16 sekuntia, josta hyötysignaalin eli impulssin osuus on noin 15 millisekuntia. Kohinaa poistettiin ikkunoimalla herätettä puolikkaalla kosini-aallolla. Herätteen ikkunointi on esitetty kuvassa 20. Kertomalla herätesignaalia näyte näytteeltä ikkunointifunktiolla herätesignaalin alku eli impulssi pysyy koskemattomana ja loppuosan kohinatasa menee nolnaan.

Vastesignaalia ikkunointiin samalla periaatteella mutta eri funktiolla. Vastesignaalin eksponentiaalisesti vaimenevasta luonteesta johtuen luonteva valinta ikkunafunktioksi on käänteinen eksponentiaalifunktio $1/e^x = e^{-x}$. Vastesignaalin



Kuva 21: a) Käsittelemätön kohinainen vastesignaali aikatasossa, b) eksponentiaali-ikkuna ja c) ikkunoitu vastesignaali.

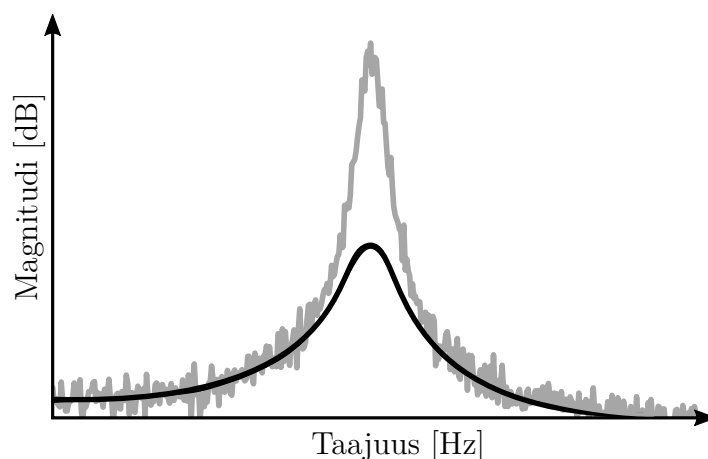
ikkunointi on esitetty kuvassa 21. Kertomalla vastesignaalia käänteisellä eksponentiaalifunktiolla näyte näytteeltä saadaan herätteen loppuosa nolnaan, mikä vähentää FFT-muunnoksen virheitä. FFT-menetelmä olettaa, että signaali toistuu jaksollisena, jolloin nolnaan päättymätön signaali aiheuttaisi tässä toistuvassa signaalissa epäjatkuvuuskohdan ja särökomponentteja FFT:llä laskettuun taajuusvasteeseen.

Ikkunointi vääristää mitattua taajuusvasteen muotoa. Käyttämällä eksponentiaalifunktiota aikatasossa lisätään systeemiin vaimennusta. Ikkunoitu signaali vaimenee ikkunoimatonta signaalia nopeammin, mikä nähdään myös kuvassa 21. Signaalin vaimentuminen ja kohinan suodattuminen on esitetty kuvassa 22. Vaimennuksen kasvattaminen ilmenee loivempuna ominaistajuuspiikkinä. Tämä kasvattaa 3 desibelin kaistanleveyttä ja siitä laskettua vaimennussuhdetta.

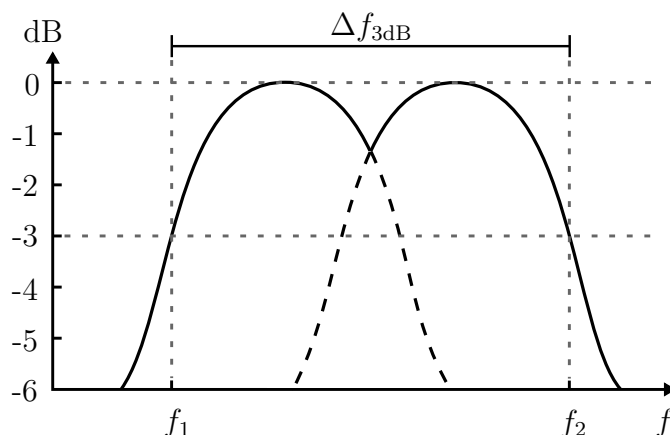
Vaimennussuhteen mittaamisessa havaittiin myös toinen ongelma. Mittauspenkkiin asennetuilla rangoilla on omat hieman toisistaan eroavat dynaamiset jäykkyudet. Tästä seuraa kaksi osittain päällekkäin olevaa ominaistajuuspiikkiä taajuusvasteeseen. Mikäli piikit ovat tarpeeksi lähellä toisiaan, ei 3 dB:n kaistanleveyttä voida määrittää yksinkertaisesti edellä mainitulla tavalla. Vierekkäisten ominaistajuuspiikkien ongelmaa on havainnollistettu kuvassa 23. Ongelman voi kiertää tekemällä molemmille resonanssi- ja vaimennuspiikeille erilliset käyränsovitukset, joista 3 dB:n kaistanleveys voidaan edelleen määrittää. Käyränsovitus jätettiin toistaiseksi tekemättä, sillä työssä pyrittiin keskittymään dynaamisen jäykkyyden mittaamiseen. Tähän tarkoitukseen sopivia käyränsovitusmetodeja on esitetty esimerkiksi lähteessä [28]. Luvussa 4.3 käsitellään tarkemmin testirankaparin eroja.

Työssä käytetyt ikkunointimetodit ovat alun perin jo 1970-luvulla kehitettyjä signaalinkäsittelytekniikoita ja esitetty esimerkiksi lähteessä [29]. Työn edetessä huomattiin, että järjestelmän signaalikohinasuhde on ilman ikkunointia iskuherätemittauksissakin riittävän suuri. Näin ollen ikkunointia ei käytetty lopullisissa mittauksissa.

Mittauksen jälkeen analysaattori laskee herätteen ja vasteen tehospektrit sekä



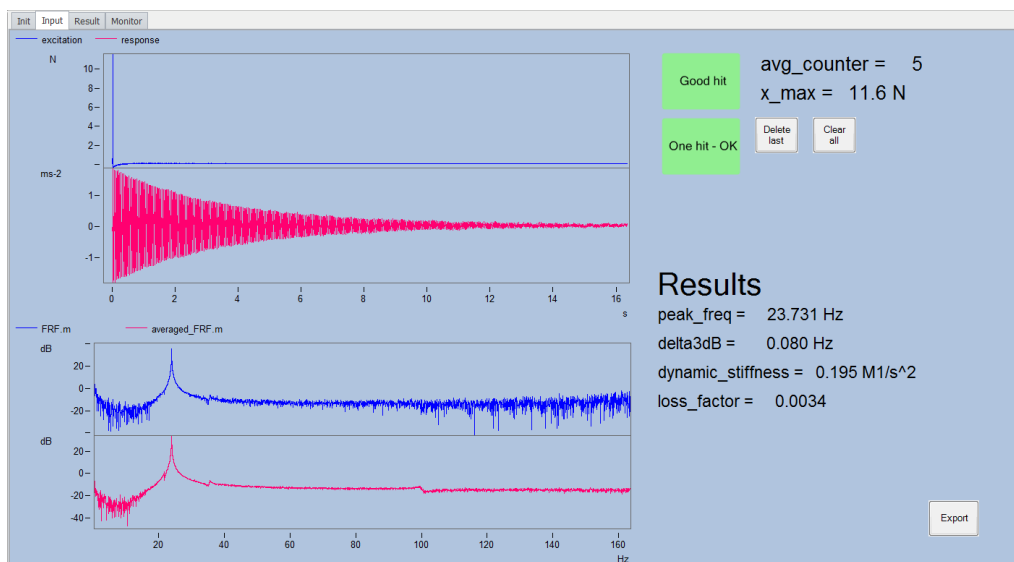
Kuva 22: Ikkunoinnin vaikutus taajuustasossa. Ikkunoimatonta ja suodattamatonta signaalia harmaalla, ikkunoitu ja vaimentunut signaali mustalla.



Kuva 23: Kahden liian lähekkäisen ominaistaaajuuspiikin vaikutus 3 dB:n kaistanleveyteen Δf_{3dB} . Jos kaksi resonanssiipiikkiä on liian lähellä toisiaan, luvun 2.3 menetelmä liioittelee mitattua vaimennussuhdetta. Todellinen 3 dB:n kaistaleveys olisi vain yhden resonanssiipiikin kaista kuten kuvassa 11.

ristitehospektrit. Nämä tiedot tallennettiin mahdollista jälkikäsitteilyä varten. Lisäksi datasta lasketaan koherenssi herätteen ja vasteen välillä. Koherenssikuvasta selviää, millä taajuuksilla energia välittyy iskuvasarasta systeemiin. Koherenssista nähdään myös mahdolliset epälineaariset ilmiöt, mitkä näkyvät muutoin tasaisessa koherenssikäyrässä kuoppana jollain taajuudella. Koherenssi tarkistettiin alustavissa iskuvasaramittauksissa olevan kunnossa oleellisella taajuuskaistalla 0-150 Hz.

IMC Studioissa toteutettuun käyttöliittymään suunniteltiin neljä liittymäikkunaa,



Kuva 24: Kuvakaappaus IMC Studio -ohjelmasta, jolla mittausjärjestelmän käyttöliittymä on koodattu. Yläpuolella heräte (sininen) ja vaste (punainen) aikatasossa, alapuolella edellinen mitattu taajuusvaste (sininen) ja mitattujen taajuusvasteiden keskiarvo (punainen).

joista kuvassa 24 on esitetty mittauksen aikana käytetty pääikkuna. Ensimmäisessä ikkunassa, nimeltään "Init", määritetään käytettävät parametrit kuten ikkunoinnin aikavakio. Toista ikkunaa, nimeltään "Input", käytetään mittauksen aikana ja se sisältää tärkeimmät tiedot kuten mitattu taajuusvaste, keskiarvoistettu taajuusvaste, ilmoitus mahdollisesta kaksoisiskusta ja iskun liian heikosta tai suuresta voimakkuudesta, iskun maksimivoima, ominaistaaajuus, ominaistaaajuudesta laskettu dynaaminen jäykkyys, 3 dB:n kaistanleveys, vaimennussuhde ja keskiarvoistuksessa mukana olevien iskujen määrä. Mitatut tulokset voidaan viedä ulos ASCII-muodossa mittausten päätyttyä. ASCII-muoto valittiin sen helppouden takia, ja lisäksi suurin osa taulukkoja ja matematiikkaohjelmistoista ymmärtää ASCII-muotoa. Tässä työssä mittausdataa analysoitiin Matlab-matematiikkaohjelmalla piirretyistä kuvista.

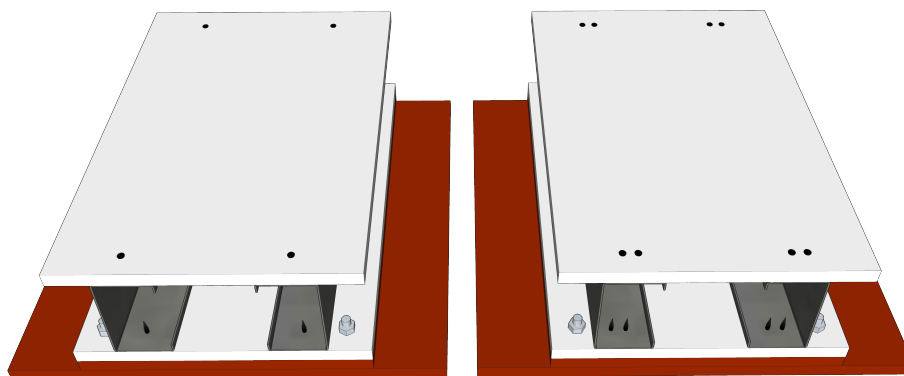
Käyttöliittymässä on kaksi vähemmän käytettyä ikkunaa. "Results-näkymässä esitetään on kaikki vasteesta ja herätteestä lasketut suureet, jotka lueteltiin edellä. Näkymää käytetään lähinnä tarkastamaan, että herätteen tehospektri on oletetun kaltainen ja että keskiarvoistuksessa mukana olevien mittausten koherenssi on oleellisella taajuusalueella riittävän suuri. Lopuksi on vielä "Monitor -ikkuna, jonka tarkoituksena on näyttää reaaliaikainen antureilta syötettävä data.

3.5 Mittausepävarmuudet

Tässä luvussa käydään läpi mittausjärjestelmän merkittävimpiä mittausepävarmuuden lähteitä ja niiden merkittävyyttä. Merkittävimmän osan mittausepävarmuuteen toi rangan mittauspenkkiin asentamisen ongelmat. Kipsilevy kiinnitettiin rankaan kahdella ruuvilla tai ruuviparilla per ranka noin 25 cm välein. Kiinnittäessä rankaa se saattoi asettua hieman kiereen asentoon, mikä jännitti rankaa ja nosti näin systeemin ominaistaaajuutta. Tämän vuoksi osassa mitatuista taajuusvasteista näkyi kaksi lähekkäistä ominaistaaajuuspiikkiä. Eri ominaistaaajuuspiikeistä lasketut dynaamiset jäykkyydet kasvoivat keskimäärin 32 % verrattaessa suurinta ja pienintä ominaistaaajuutta. Tässä hajonnassa on mukana sekundaarimittauksista saadut tulokset. Todellisuudessa ero ei siis ole aivan niin suuri, sillä sekundaarimittauksissa systeemin efektiivinen massa on kuormalevyn todellista massaa pienempi. Sekundaarimittauksissa iskemällä levyn reunaan herätetään pääasiassa kiertymämode (engl. torsional mode), jolloin kuormalevy ei liiku keskikohdastaan eikä siten koko massa ole liikkeessä. Dynaamista jäykkyyttä laskiessa käytettiin kuormalevyn koko massaa, sillä efektiivisen massan laskeminen ei ollut työn tulosten kannalta oleellista.

Dynaamisen jäykkyyden mittauksen virhe kasvaa ominaistaaajuuden virheen neliössä, kuten nähdään yhtälöstä (26). Epävarmuudet kiinnityksessä, joka osoittautui merkittävimmäksi epävarmuustekijäksi, kasvavat siis neliöllisesti lopputuloksessa. Kiinnityksen vaikutusta dynaamiseen jäykkyyteen tutkittiin myös tekemällä mittauksia, joissa kiinnitysruuveja käytettiin kaksinkertainen määrä. Kuvassa 25 on esitetty ruuvien paikat eri mittauksissa. Ruuvien määrällä huomattiin olevan merkittävä vaikutus systeemin ominaistaaajuuteen. Mitattu dynaaminen jäykkyys kasvoi kaksinkertaisella kiinnityksellä jopa nelinkertaiseksi yksinkertaiseen kiinnitykseen verrattuna. Näitä tuloksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.2

Esijännitysmassana käytetyn teräslevyn taajuusominaisuudet mitattiin ennen



Kuva 25: Vasemmalla kipsilevyn yksinkertainen ruuvikiinnitys ja oikealla kaksinkertainen ruuvikiinnitys.

varsinaisia mittauksia. Levyn ominaistajuus oli iskun voimakkuudesta riippuen noin 500 - 600 Hz, joka on vähintään 300 Hz suurempi kuin jäykimmällä mitatulla rangalla. Teräslevyn ominaistajuus ei näin ollen vaikuttanut mitaustuloksiin.

Järjestelmän kohina ei suoranaisesti vaikuta mittausepävarmuuteen, mikäli heräte on tarpeeksi voimakas. Luonnollisesti, mikäli signaalikohinasuhde on hyvin heikko, kohinan tuottamat taajuuspiikit voivat siirtää mitattua luonnollista taajuutta muutamia prosentteja. Signaalikohinasuhteeltaan heikot mitaustulokset kuitenkin poistettiin mitausdatasta ennen lopullista laskentaa.

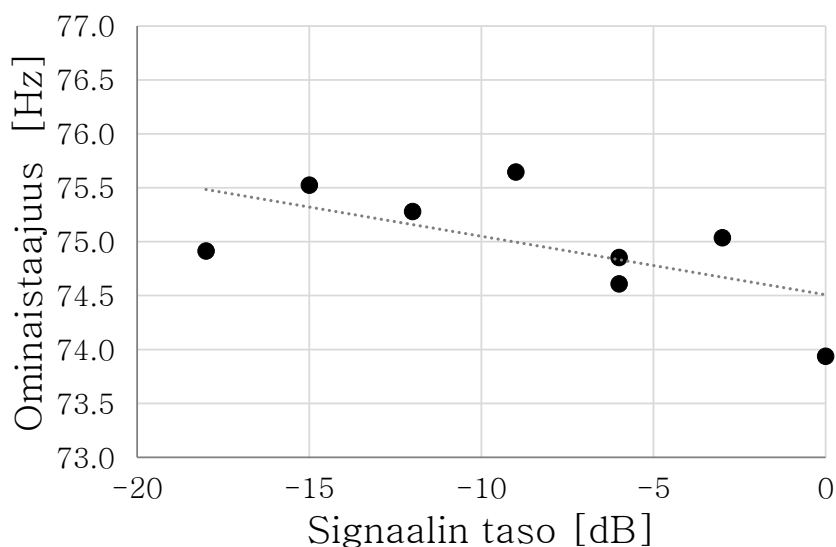
Alustavissa mittauksissa selvitettiin myös mittausjärjestelyn mahdollinen epälinearisuus. Linearisuusmittauksissa selvitettiin, kuinka paljon mitattu ominaistajuus riippuu käytetystä herätevoimasta. Mittaukset tehtiin sekä isku- että jatkuvalla herätteellä. Iskuherättemittauksissa pienimmän käytetyn voiman määräksi käytetyn vasaran massa ja mittaajan kyky iskeä voima-anturia pienellä voimalla. Mikäli käytetyllä vasaralla yritettiin iskeä vaimeammin, vasara ei enää noussut kimmoisasti ylös anturin pinnasta, eikä aiheutettu isku näin ollen ollut enää impulssimainen. Suurin käytetty voima rajoittui voimaan, jonka mittaaja pystyi toistettavasti aiheuttamaan anturiin noin ± 5 N:n vaihteluvälillä. XR66-rangan käyttäytyminen iskuherätteellä osoittautui erittäin lineaariseksi. Käytetyllä voimalla ei havaittu olevan mitään vaikutusta mitattuun ominaistajuuteen yhden desimaalin tarkkuudella. Taulukossa 4

Taulukko 4: XR66-rangasta mitatun ominaistajuuden lineaarisuus iskuvoiman suhteen.

Iskuherätteen maksimi [N]	Mitattu ominaistajuus [Hz]
3 - 5	23,7
5 - 10	23,7
20 - 30	23,7
50 - 60	23,7

on esitetty XR66-rangalla tutkittu iskuherätteen lineaarisuus.

Lineaarisuutta tutkittiin myös jatkuvan herätteen mittauksissa. Tutkittava ranka oli RYC100a (katso taulukko 2). Mittaus suoritettiin kasvattamalla signaaligeneraattorin signaalitason 3 dB:n pykälissä ja keskiarvoistamalla tulosta noin 5 minuuttia per signaalitason. Ero suurimman ja pienimmän signaalitason välillä oli 18 dB ja ominaistajuuden vaihteluväli 2,3 % verrattuna tulosten keskiarvoon. Mittausdataan pienimmän neliösumman metodilla sovitetun suoran kulmakerroin on -0,05. Mitattu ominaistajuus näyttäisi siis pienenevän signaalitason kasvaessa, mutta kulmakerroin on datamäärään vähyyteen nähden lähes merkityksetön. Kuvassa 26 on esitetty mitattu ominaistajuus signaalitason funktiona.



Kuva 26: Mitattu ominaistajuus signaaligeneraattorin signaalitason funktiona. Signaalitasot on normeerattu siten, että suurin käytetty signaalitason on kuvassa 0 dB.

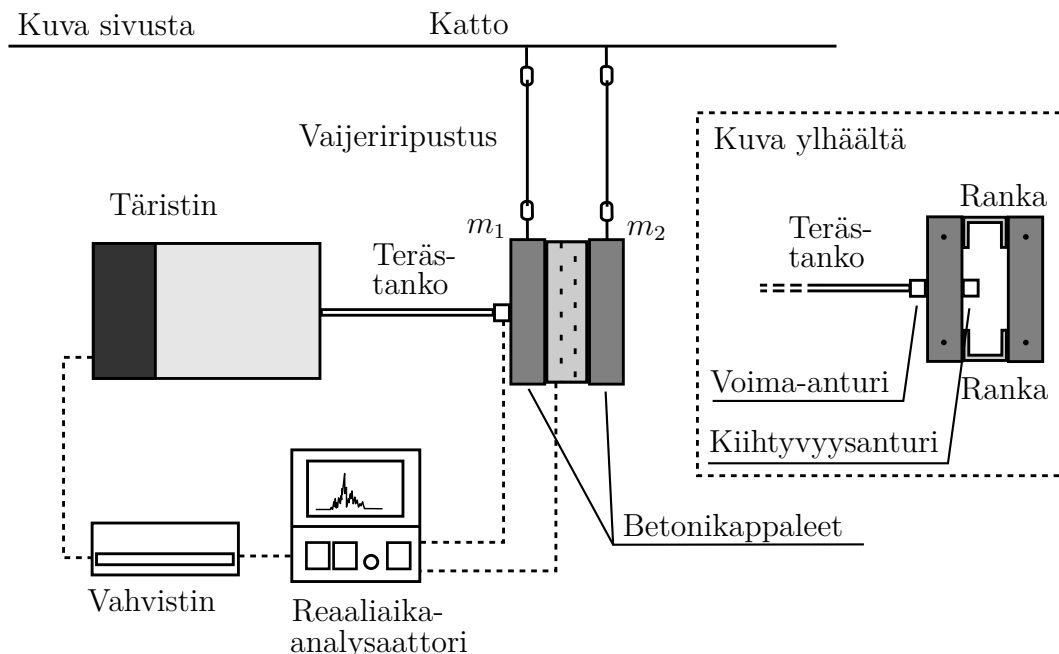
4 Mittaustulokset

Tässä luvussa esitetään iskuherätteellä mitattujen kymmenen rangan mittaustulokset ja suorat päätelmät. Mittaustulosten oikeellisuus varmistettiin vertaamalla kahden rangan mittaustuloksia Työterveyslaitoksella mitattuihin tuloksiin. Tämä vertailu esitetään ennen varsinaisia tuloksia. Mittaustuloksista havaittiin, että näyteparien ominaistajuudet eivät olleet aina samat. Erojen syitä pohditaan mittaustulosten jälkeen. Mittausjärjestelmä rakennettiin siten, että herätteenä voidaan käyttää iskuvasaraa tai tärhistintä. Mittausmenetelmien vertailu esitetään luvun lopussa.

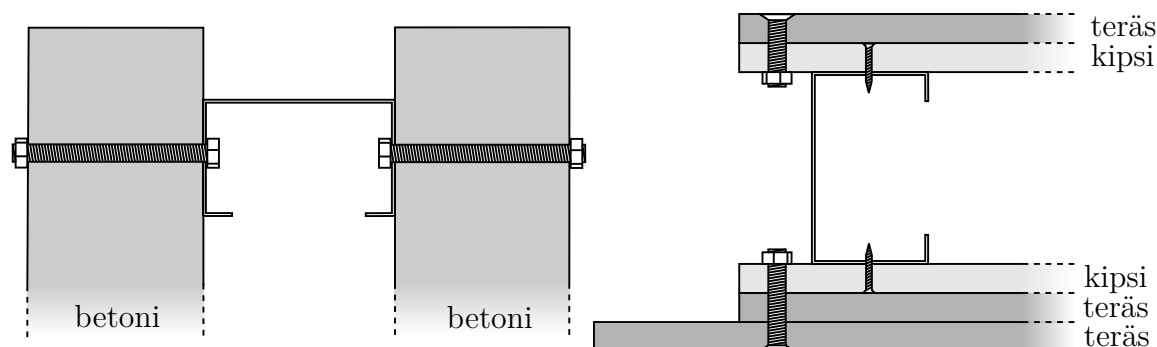
4.1 Mittausjärjestelmän validointi

Mittausjärjestelmän luotettavuutta tarkasteltiin vertaamalla tämän työn tuloksia aikaisemmin Työterveyslaitoksella (TTL) mitattujen rankojen tuloksiin [30, 31]. TTL:n mittausten menetelmä poikkeaa tämän työn menetelmästä hieman. TTL:n mittausten järjestelmän systeemikaavio on esitetty kuvassa 27. TTL:n menetelmässä rangat on asennettu kahteen vajereista rokotettuun betonimassaan, joista toista herätetään tärstimellä. Menetelmän etu on, että kuormalevy ei esijännitä mitattavaa rankaa ja kasvata rangan ominaistajuutta. Koska liikkuvia massalevyjä on kaksi, dynaaminen jäykkyys lasketaan hieman erilaisella kaavalla, mutta yhtälö on olennaisilta osiltaan sama kuin (26).

Merkittävin ero TTL:n ja tämän työn mittausjärjestelmässä on kuitenkin kiinnitystapa. TTL:lla rangat kiinnitettiin suoraan betoniin pultein ja mutterein. Tässä työssä ranka on suorassa kontaktissa betonin sijaan kipsilevyyn, mikä on kiinnitetty rankaan



Kuva 27: TTL:n käyttämän mittausjärjestelmän systeemikaavio. Alkuperäinen kuva on peräisin lähteestä [10].



Kuva 28: Vasemmalla kiinnitys betonisiin massakappaleisiin pultein TTL:n mittauksissa ja oikealla ruuvikiinnitys tässä työssä. Ruuvikiinnitys on samanlainen kuin seinärakentamisessa tavanomaisesti käytetty kiinnitys.

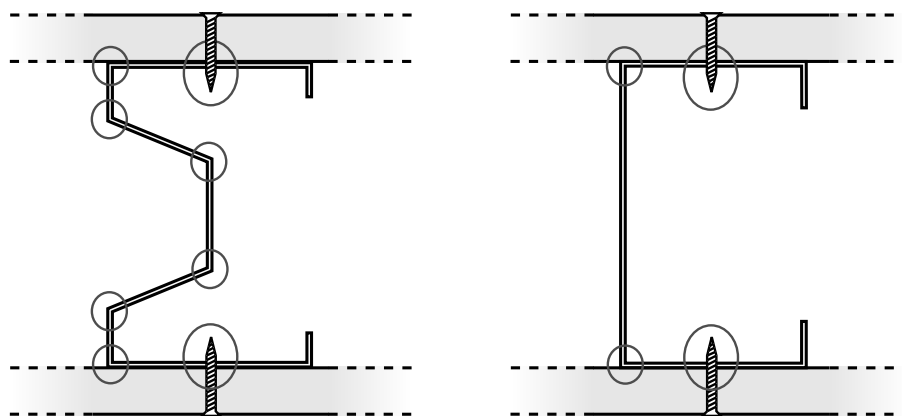
ruuvilla. Ruuvikiinnitys kipsilevyyn on pulttikiinnitystä joustavampi, joka osaltaan selittää eroja ELPR66-rangan mittaustuloksissa. Kiinnitystavat on esitetty kuvassa 28.

TTL:n ja tämän työn mittaustuloksia on vertailtu taulukossa 5. Tässä työssä mittauksia tehtiin kahdella eri kiinnitystavalla: yksinkertaisella ja kaksinkertaisella ruuvauksella. Eri kiinnitystavoilla saadut mittaustulokset eroteltu taulukossa kauttaviivalla. Taulukosta nähdään, että XR66-rangan tapauksessa mittaustulokset ovat lähes samat molemmissa tämän työn mittauksissa sekä TTL:n mittauksissa. Tästä pääteltiin, että paneelin asennustavalla ei ole merkittävää vaikutusta XR66-ranka-paneelisysteemin dynaamiseen jäykkyyteen. XR66-rangan laippaosa on jäykempi kuin uuman joustava muoto, jolloin rangan joustavuutta dominoi rankaprofilin keski-osa, eikä kiinnityksellä ole niin suurta merkitystä. Ruuvikiinnityksessä laipan ja ruuvin liitos ei pääse siis liikkumaan eikä siten lisää systeemin joustavuutta.

ELPR66-rangan tuloksissa sen sijaan on merkittävää hajontaa. Tuloksista nähdään, että kiinnityksellä on kohtuullinen rooli rangan ja kiinnityksen muodostaman kokonaisuuden dynaamiseen jäykkyyteen. Vaikka TTL:n mittauksissa kiinnitystapa on ollut keskenään sama, ero tulosten välillä on lähes 100 % pienimmästä suurimpaan. Eron syytä voidaan vain spekuloida mittausraporttien perusteella. Tämän

Taulukko 5: TTL:n ja tämän työn mittausten vertailu. Kauttaviivan vasemmalla puolella on yksinkertaisen ruuvikiinnityksen mittaustulos, oikealla kaksinkertaisen ruuvikiinnityksen mittaustulos. ELPR66-ranka on mitattu TTL:llä kahteen kertaan.

Ranka	Mittaaja	Dynaaminen jäykkyys [MN/m ²]
XR66	TTL	0,21
	Pärnänen	0,20 / 0,21
ELPR66	TTL	0,6 ja 1,1
	Pärnänen	0,6 / 1,7



Kuva 29: Vasemmalla merkittävimmät joustavat kohdat XR66-rangassa ja oikealla ELPR-rangassa. ELPR66-rangassa kiinnityksen merkitys on suurempi.

työn tulosten perusteella syy voisi olla eri tiukkuuteen ruuvatut kiinnityspultit mitausten kesken. Kuvassa 29 on esitetty XR66- ja ELPR66-rankojen profiilin paikat, joiden arvellaan määrävän ranka-seinäpaneelisysteemin dynaamisen jäykkyyden. ELPR66-rangan pienin mitattu dynaaminen jäykkyys on saatu tavanomaisella yksinkertaisella kiinnityksellä. On hyvin mielenkiintoista, että selvästi jäykemmällä pulttikiinnityksellä on kuitenkin saatu rangalle ensimmäisessä TTL:n mittauksessa sama jäykkyydsarvo.

4.2 Dynaamisen jäykkyyden mittaustulokset

Tässä luvussa esitetään työssä kehitetyllä mittausjärjestelmällä mitatut teräsrankojen dynaamisen jäykkyydet ja suorat päätelmät niistä. Tulokset on esitetty taulukossa 6. Mittaustulosten epävarmuus on suuri ja joidenkin tulosten välillä on ristiriitaisuuksia. Tässä pyritään selvittämään näitä mittaustulosten ristiriitoja.

Mittaustulosten selkein trendi on nähtävissä kiinnitystapojen välillä. Yksin- ja kaksinkertaisen kiinnityksen välillä on merkittävä ero. Kaksinkertaisen ruuviliitoksen systeemi on noin 160 % jäykempi kuin yksinkertaisen liitoksen systeemi. Suurimmillaan kaksinkertaisen kiinnityksen jäykkyys on 4,5-kertainen C100- ja RYC100c-rankojen (materiaalivahvuus 1,2 mm) kohdalla. Näyttäisi siis siltä, mitä jäykempi ranka on, sitä suurempi vaikutus kiinnityksellä on dynaamiseen jäykkyyteen. Tämä tukee myös edellä kappaleessa 4.1 ja kuvassa 29 esitettyä päätelmää XR- ja ELPR-rankojen erosta

LR66- ja ELPR66-rangoilla on sama profiilin muoto ja materiaalipaksuus, mutta dynaamisessa jäykkyydessä on merkittävä ero. Eron selittää ELPR-rangan käsitelty materiaali, joka vahvempaa ja jäykempää kuin vastaava käsittelemätön materiaali. Materiaalin efektiivinen paksuus on suurempi, mikä selittää eron mittaustuloksissa.

Eri vahvuisten LR66-rankojen tulosten välillä on ristiriita teorian kanssa. Ohuempi materiaali on mitausten mukaan jäykempi kuin paksumpi. Tämän eron selittänee mittausepävarmuus yhdessä ruuvikiinnityksen kanssa. Ruuvauksen kireys ei ole välttämättä ollut yhtenevä mitausten välillä. Yksinkertaisessa ruuvauksen mittauksissa

Taulukko 6: Tässä työssä mitatut teräsrankojen dynaamiset jäykkyydet yksinkertaisella ja kaksinkertaisella kiinnityksellä.

Ranka	Materiaali- paksuus [mm]	Dynaaminen jäykkyys [MN/m ²]	
		Yksinkertainen kiinnitys	Kaksinkertainen kiinnitys
LR66	0,46	0,24	0,88
LR66	0,56	0,18	0,90
LR95	0,545	1,35	1,35
LR120	0,475	0,67	2,55
ELPR66	0,47	0,63	1,68
XR66	0,46	0,20	0,21
C100	0,70	0,52	2,34
RYC100a	0,70	0,75	1,04
RYC100b	0,70	0,61	1,10
RYC100c	1,20	0,78	3,54

systemissä on yhteensä kahdeksan ruuvia, jolloin ruuvikiinnityksen epävarmuus vaikuttaa enemmän kuin kaksinkertaisen kiinnityksen mittauksissa. Jälkimmäisissä mittauksissa suurempi ruuvimäärä keskiarvoistaa kiinnityksen epävarmuutta pienemmäksi. Samalla huomataan, että kaksinkertaisen ruuvauksen mittaustulokset noudattavat teoriaa, jonka mukaan materiaaliltaan paksumpi ranka on myös jäykempi.

Samantapainen ristiriita havaitaan eri profiilisyvyyden LR-rangoissa. Yksinkertaisella kiinnityksellä tulokset eivät ole johdonmukaisia profiilin syvyyden kasvaessa, mutta kaksinkertaisen kiinnityksen mittauksissa dynaaminen jäykkyys kasvaa. Selitys tälle epäjohdonmukaisuudelle on luultavasti sama kuin edellä materiaalipaksuuden tapauksessa. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että syvempi ranka on myös jäykempi.

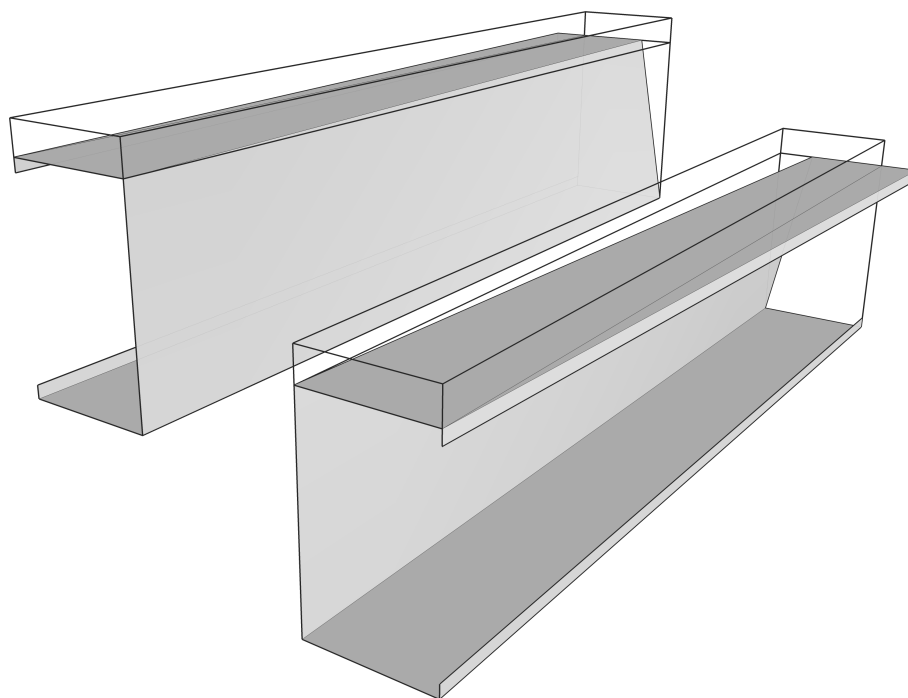
Verrataan seuraavaksi rankoja C100 ja RYC100 (0,7 mm). Rangat ovat profiililtaan, mitoiltaan ja materiaalipaksuudeltaan identtisiä. RYC-rangan uumaan tehdyt reiät tekevät RYC-rangasta kuitenkin merkittävästi joustavamman, mikä nähdään kaksinkertaisen kiinnityksen tuloksista. Samalla on kuitenkin huomattava, että kun kiinnitys on yksinkertainen, ruuviliitoksen joustavuus dominoi, eikä mittaustulosten välillä ole merkittävää eroa. RYC100c-ranka on kuitenkin huomattavasti jäykempi kuin C100-ranka RYC100c-rangan suuremman materiaalipaksuuden vuoksi.

Mittaustulosten perusteella RYC100b olisi jäykempi kuin RYC100a, mikä on odotusten vastaista. RYC100b:ssä on neljä reikälinjaa a-mallin kolmen reikälinjan sijaan. Tästä syystä RYC100b:n pitäisi olla joustavampi. Erot mittaustulosten välillä ovat kuitenkin hyvin pieniä, joten edellä mainittu epäjohdonmukaisuus johtunee mittaasepätkä tarkkuudesta.

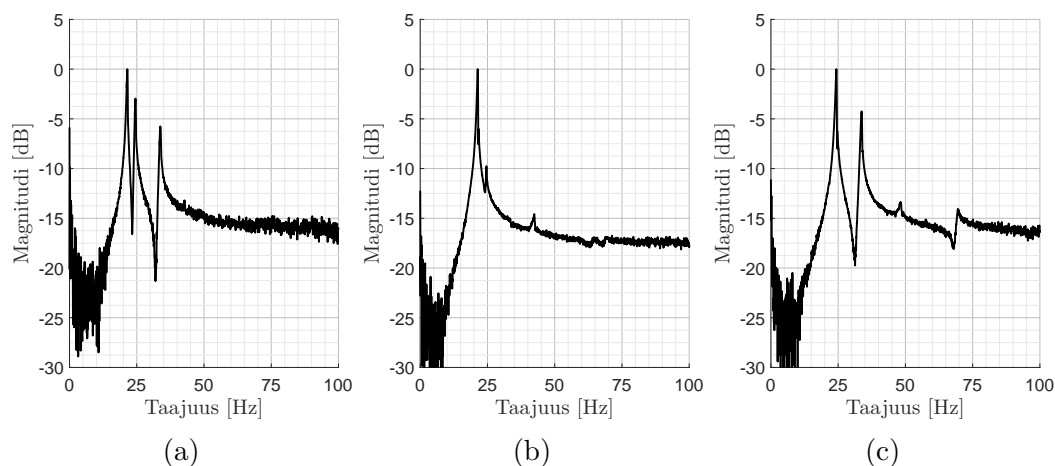
4.3 Testirankaparin erot

Lähes kaikissa mittauksissa taajuusvastassa näkyi useampi kuin yksi taajuuspiikki. Tämä tarkoittaa sitä, että mittauspennkkiin kiinnitetyt testirangat eivät ole täysin yhtä jäykkiä. Eroavaisuus jäykkyyksissä voi johtua materiaalipaksuuksien eroista, ruuvi kiinnityksen tiukkuudesta, rangan asennosta tai profiilin jännityksistä. Eroavaisuudet testirankaparien kesken niiden materiaalien paksuuksissa ovat kuitenkin marginaalisen pieniä. Rankoja asennettaessa pyrittiin kiinnittämään mahdollisimman paljon huomiota ruuvi kiinnityksen tiukkuuteen, jotta se olisi yhä tiukka kaikissa mittauksissa. Ruuvit asennettiin rakennustuotevalmistaja Gyprocin ohjeiden [32] mukaan siten, että ruuvin kanta uppoaa kipsilevyn kartonkipinnan tason alapuolelle kuitenkin rikkomatta kartonkipintaa.

Eroavaisuus ominaistajuuksissa rankojen välillä johtuu enimmäkseen rankojen kiertymisestä ja vinoon asettumisesta rankaa asennettaessa. Ruuvi ruvataan kipsilevyn ja rangan laipan läpi suoraan ilman porausta. Ruuvin kärki joutuu poraamaan oman reiän rangan läpi, jolloin se menee läpi paikasta, jossa on pienin läpäisyvastus. Tästä johtuen ruuvi saattaa vetää rangan laippaa sivulle, jolloin rangan kylki kiertyy pituusakselinsa ympäri. Kuvassa 30 on havainnollistettu rangan kiertymistä. Testien aikana ilmeni, että mitä joustavampi ranka on, sitä vaikeampi se on asentaa testipennkkiin täysin suoraan. Rangan kierous on luultavimmin ainoastaan mittausjärjestelmän ongelma eikä vaikuta rangan jäykkyyteen oikeissa seinissä, sillä mitattavat rankanäytteet ovat vain 30 cm pitkiä. Seinäasennuksissa ranka tukeutuu kipsilevyn pidemmältä matkalta ja näin ollen pysyy luultavasti suurempana.



Kuva 30: Kuvassa on esitetty rangan kiertyminen liioiteltuna kahdesta kuvakulmasta. Rangan päälle piirretyt apuviivat ovat suorissa kulmissa.



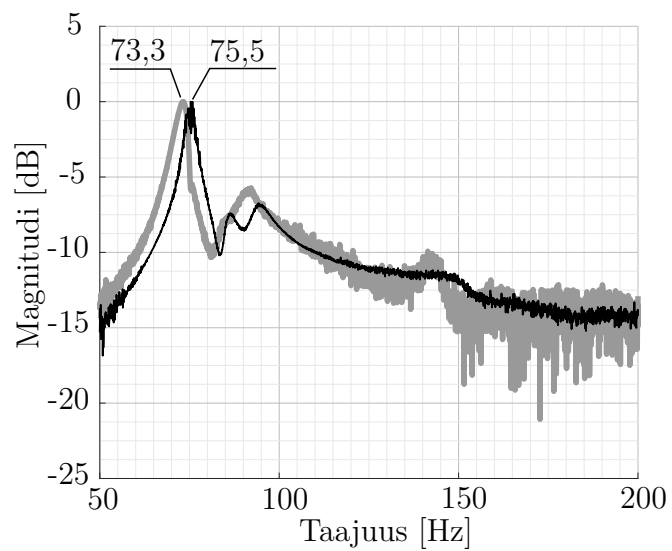
Kuva 31: Kuvissa on esitetty eri kohdista kuormalevyä mitatut taajuusvasteet. Anturit ovat olleet a) keskellä, b) suoran rangan päällä ja c) kieron rangan päällä.

Suurimmassa osassa mittauksia, ainakin toinen asennetuista rangoista oli muutamana millimetrin sivussa suorasta linjasta toisessa päästään. Tämä kiertyminen jännittää rankaa ja kasvattaa levy-rankasysteemin ominaistajuutta. Kuvassa 31 on esitetty mitatut taajuusvasteet mitattuna keskeltä ja rankojen päältä. Kuvassa 31 a) olevat kaksi ensimmäistä resonanssiipiikkiä ovat suoran ja kieron rangan ominaistajuudet. Kolmas piikki on luultavasti torsionaalinen moodi, joka herää paremmin kiero rankaa iskiessä. Tästä syystä kuvassa b) ei näy juurikaan kolmatta ominaistajuutta.

4.4 Isku- ja jatkuvan herätteen vertailu

Mittausjärjestelmällä tehtiin testimittaukset myös jatkuvalla herätteellä. Alustavissa jatkuvan herätteen mittauksien kokeiluissa havaittiin, että metodilla ei saada mitattua alle 50 Hz ominaistajuuksia täristimen rajoitteiden vuoksi. Vertailumittaukseen valittiin RYC100a-ranka, jolla on suhteellisen suuri ominaistajuus. Täristimen heikko vaste pienillä taajuuksilla ei vaikuttanut siten mittaustulokseen. Mittaukset isku- ja jatkuvalla herätteellä tehtiin peräkkäin siten, ettei mittauspennkkiin eikä kiinnityksiin tehty muutoksia.

Kuvassa 32 on esitetty jatkuvalla herätteellä saatu vaste verrattuna iskuherätteen vasteeseen. Iskuvasaran kärjen joustavuus määräsi herätteen hyötysignaalin ylärajataajuudeksi noin 150 Hz, mikä selittää taajuuden funktiona kasvavan kohinan iskuherättemittauksessa. Jatkuvalla herätteellä mitattu ominaistajuus on noin 3 % suurempi verrattuna iskuherätteellä mitattuun ominaistajuuteen. Eron voi selittää täristimen 1 kg massan painon aiheuttama rankojen lisäjännitys. Tällä on huomattavasti pienempi vaikutus mitattuun dynaamiseen jäykkyyteen kuin kiinnityksestä johtuvilla epävarmuuksilla, eikä sitä siten voi pitää merkittävänä. Lisäksi 3 % ero dynaamisessa jäykkyydessä tuottaa vain noin 0,1 dB eron seinän ääneneristävyydessä.



Kuva 32: Iskuherätteellä mitattu RYC100a-rangan taajuusvaste harmaalla paksulla viivalla ja jatkuvalla herätteellä mitattu taajuusvaste mustalla ohuella viivalla.

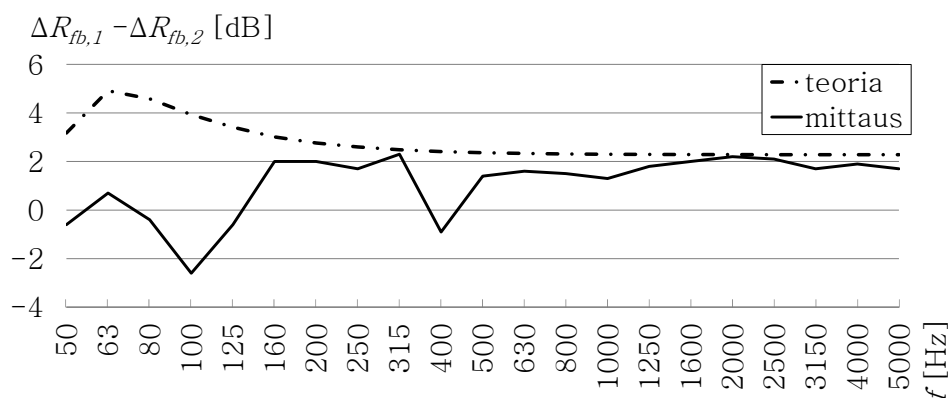
5 Tulosten analysointi ja johtopäätökset

Tässä luvussa pohditaan syvemmin mittaustulosten merkitystä ja teräsrankojen äänitekniistä kehittämistä. Aluksi verrataan XR-rankaisen seinän ääneneristävyyden mittaustulosta luvun 2.1.3 ennustamaan ääneneristävyyteen, missä on käytetty mitattua dynaamista jäykkyyttä. Lopuksi esitetään työssä avoimeksi jääneet kysymykset ja jatkotutkimusta vaativat seikat.

5.1 Teorian ja mittausten vertailu

Tässä luvussa vertaillaan eri rangoilla tuettujen seinien ilmaääneneristystä. Vertailtaviksi rangoiksi valittiin XR66- ja ELPR66-rangat. Näille rangoille löytyy dynaamisen jäykkyyden mittaustulokset sekä tästä työstä että TTL:ltä. Rankojen ääneneristävyys on myös mitattu Helimäki Akustikkojen laboratoriossa keväällä 2015. Rankojen profiilit on esitetty kuvassa 15.

Luvun 2.1.3 yhtälö (17) ennustaa noin 2 dB:n eron suurilla taajuuksilla ELRP:n ja XR:n välille, kun dynaamista jäykkyyttä pienennetään 0,6:sta 0,21 MN/m²:iin. Kuvassa 33 on esitetty teorian ennustama erotus ja ääneneristävyyden mittaustuloksista laskettu erotus. Käyrät ovat paremmin yhteneviä yli 500 Hz taajuudella, mutta eroavat merkittävästi pienillä taajuuksilla. Teorian mukaan joustava ranka parantaa ääneneristävyyttä vasta siltataajuutta f_{br} suuremmilla taajuuksilla. Kyseisen rakenteen siltataajuus yhtälön (14) mukaan on noin 180 Hz. Tämä huomion ottaen, laboratoriomittauksen tulos näyttää tukevan teorian ennustamaa ääneneristävyyden parannusta. Laboratoriomittausten epävarmuus on Helimäki Akustikkojen mittauksissa havaittu olevan ± 1 -2 dB standardien [33] ja [34] mukaan, joten tuloksen ei voida odottaa yhtenevän teorian kanssa täysin. Ääneneristävyyden parannukseen vaikuttaa myös vaimennussuhde ζ , joka kuvassa 33 on tyypillinen 0,3 molemmille rangoille [13]. Molempien rankojen vaimennussuhde ei kuitenkaan ole välttämättä täysin sama.



Kuva 33: Yhtälön (17) mukainen joustavan rangan parannustermien erotus dynaamisilla jäykkyyksillä $K'_1 = 0,21 \text{ MN/m}^2$ ja $K'_1 = 0,6 \text{ MN/m}^2$ (rankaväli $b = 600 \text{ mm}$) esitettynä katkoviivalla. Yhtenäisellä viivalla XR66- ja ELPR66-rangoilla tuettujen seinien ilmaääneneristävyyden erotus. Vaimennussuhde $\zeta = 0,3$.

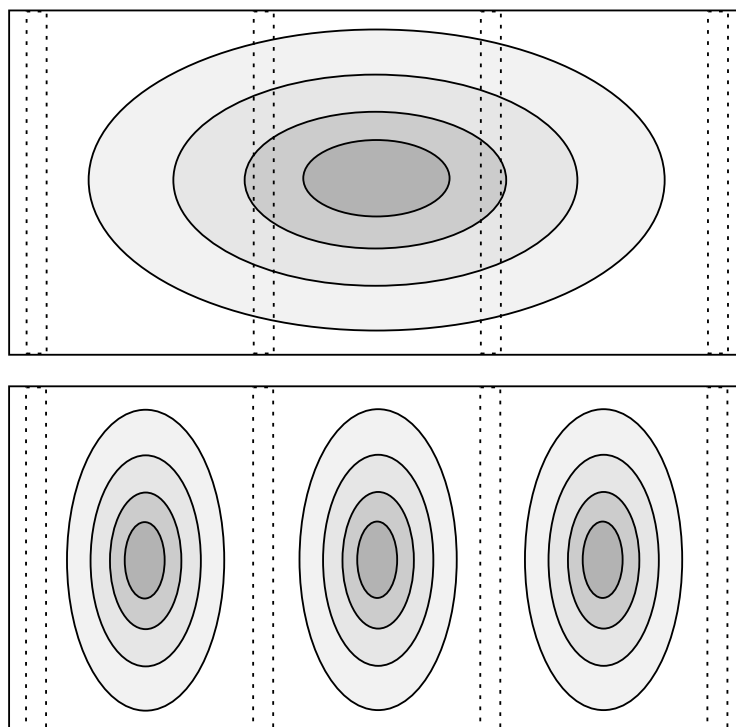
5.2 Teräsrangan äänitekniikkaan vaikuttavat ominaisuudet

Tässä luvussa pohditaan väliseinärangan ominaisuuksia, joilla voidaan vaikuttaa teräsrangan dynaamiseen jäykkyyteen ja sen muihin ominaisuuksiin sekä itse väliseinän ääneneristävyyteen. Seuraavassa ei pohdita profiilin syvyyden (d) vaikutusta. Profiilin syvyys vaikuttaa suoraan ilmapälin paksuuteen, jolloin akustiselta kannalta se ei ole rangon vaan seinärakenteen ominaisuus. Kuvassa 1 on esitetty tässä luvussa käytettyjä termejä.

Perinteisesti on ajateltu, että mitä joustavampi ranka on, sen parempi on seinän ääneneristävyys. Oletusta tukee myös luvussa 2.1.3 esitetty ennustemalli. Ennustemalli mallintaa rangon yhden vapausasteen jousena, jolloin muiden ulottuvuuksien rangon ominaisuuden jäävät mallintamatta.

Oletuksen paikkansapitävyyttä on kokeiltu prototyyppirangalla (Aulis Lundell Oy), jonka dynaaminen jäykkyys on merkittävästi pienempi kuin nykyisissä ääneneristysrangoissa. Vertailu tehtiin kokein, joissa mitattiin neljän kipsilevyseinän ääneneristävyyttä ja joissa ainoana muuttujana oli teräsranka. Ilmapälin paksuus, seinämateriaali, rankaväli ja ruuvaustiheys pidettiin samana. Ilmapälin oli tyhjä kaikissa mittauksissa. Vertailuissa huomattiin, ettei teräsrangan erittäin matala dynaaminen jäykkyys enää paranna seinän ääneneristävyyttä, vaan tällöin muut tekijät alkavat määrätä seinän ääneneristävyyden.

Seuraavassa hypoteesissa täydellisesti ääntä eristävä erillisrankaseinä sisältää



Kuva 34: Seinän värähtelykäyttäytyminen pienillä taajuuksilla. Rangat on esitetty katkoviivoin. Harmaan sävyt esittävät paneelin liikettä syvyysuunnassa. Ylhäällä: taivutusjoustavilla rangoilla, alhaalla: taivutusjäykkillä rangoilla.

kaksi ominaisuutta: seinälevy ei saa värähdellä missään suunnassa ja ranka ei saa välittää äänienergiaa seinäpuoliskojen välillä. Kevytrakenneseinässä ei voida kasvattaa massaa loputtomasti saavuttaakseen parempaa ääneneristävyyttä ja jäykkyyttä. Näin ollen seinärakenteen jäykkyyttä voidaan lisätä rangalla. Rangalla on erilaisia jäykkyyksominaisuuksia eri dimensioissa. Jäykistääkseen seinää rangan olisi oltava taivutusjäykkä. Tällöin seinälevyssä kulkevat taivutusaallot eivät pääsisi etenemään levyssä ainakaan rankalinjojen suuntaisesti, eikä suuret taivutusaallonpituudet pääse värähtelemään levyssä vapaasti. Kuvassa 34 on havainnollistettu hypoteesin mukaista seinän värähtelyjen käyttäytymistä pienillä taajuuksilla. [35]

Jotta värähtelysignaali ei etenisi seinän puolelta toiselle, täytyy rangan olla mahdollisimman joustava puristus suunnassa. Tämä on yleisesti saavutettu joustavalla profiilin keskiosan muodolla, esimerkkinä XR-ranka. Tältä osin teoria mahdollisimman joustavasta rangasta hyvänä ääneneristäjänä on oikein. Periaatteen vieminen äärimmäisyyksiin ei kuitenkaan johtanut parempiin ääneneristävyystuloksiin, kuten yllä mainittiin. Tämän syyksi epäiltiin rangan pientä taivutusjäykkyyttä, joka oli sivuvaikutus haettaessa pientä puristusjäykkyyttä.

Lopuksi otamme huomioon ilmavälin oman dynaamisen jäykkyyden. Suljetussa tilassa, eli seinäpaneelien väliin jäävässä tilassa, ilma toimii jousen tavoin. Ohuen ilmavälin dynaaminen jäykkyys voidaan laskea kaavan (28) mukaan. Kaavan mukaan 66 millimetrin paksuisen ilmavälin jäykkyys on $2,3 \text{ MN/m}^3$, kun taas XR66-rangan jäykkyys k600 rankavälillä on $0,35 \text{ MN/m}^3$. Lisäämällä ilmaväliin absorptiomateriaalia kuten mineraalivillaa, ilmavälin dynaaminen jäykkyys pienenee noin 20 % [15]. Kaava (28) ei luultavasti ole tarkka enää näin paksulle ilmavälille, mutta se antaa mittakaavan ilmavälin jäykkyydestä. Tästä voidaan päätellä, ettei huomattavasti nykyisiä rankoja joustavammista rangoista ole enää suurta hyötyä ääneneristävyiden kannalta.

5.3 Teräsrangan kehitysehdotus

Työn aikana ja mittaustulosten tukemana pohdittiin joustavien teräsrangojen kehitysuuntaa. Tätä pohdintaa käytiin läpi edellisessä luvussa 5.2. Tässä luvussa esitetään varsinainen kehitysehdotus. Seuraavaksi tässä luvussa esitetyissä laskelmissa seinärakenteeksi on oletettu seuraava:

- 13 mm kipsilevy
- 66 mm teräsranka
- 13 mm kipsilevy

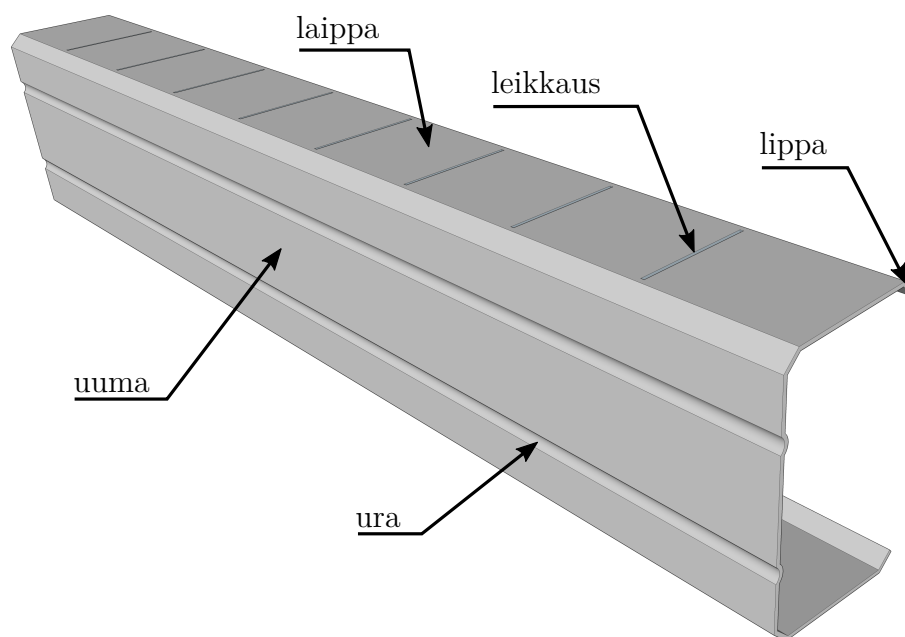
Mitatuista rangoista joustavin oli XR66, jonka dynaaminen jäykkyys on $0,2 \text{ MN/m}^2$. Teorian mukaan pienentämällä dynaamista jäykkyyttä edelleen $0,05 \text{ MN/m}^2$:iin ääneneristävyiden parannus verrattuna XR66-rankaan olisi 3 dB siltataajuuden yläpuolella. Ilmaääneneristysluku R_W standardin ISO 717-1 [36] mukaan olisi tällöin 1 dB suurempi kuin XR-rangalla. Tämä on laskettu lisäämällä XR66-rankaseinän mitattuun ilmaääneneristykseen R ensin 3 dB:ä siltataajuuden 180 Hz yläpuolella ja määritetty ilmaäänieristysluku R_W lisäyksen jälkeen.

Mikäli rangan dynaaminen jäykkyys, ja samalla staattinen jäykkyys eli jousivakio,

on näin pieni, seinäpaneelien asentaminen voi osoittautua hankalaksi. Tavanomaisesti seinäpaneelit ruuvataan rankaan kiinni suoraan käyttämällä hyväksi ruuvin omaa terää rangan laipan läpäisyyn, mikä aiheuttaa rankaan voiman. Jotta ruuvi voi läpäistä rangan laipan, täytyy rangan tuottaa yhtä suuri vastakkaissuuntainen jousivoima. Jos rangasta tehdään erityisen joustava, täytyy asennuksessa käyttää tavanomaista terävämpiä ja kovempia ruuveja tai antaa ruuvauksen ajaksi vastavoima muilla keinoin.

Kuvassa 35 on esitetty alustava ajatus uudelle teräsrankamallille. Rangan muodoilla haetaan kahta ominaisuutta: joustavuutta puristussuunnassa ja jäykkyyttä taivutussuunnassa. Puristussuunnan joustavuus pyritään saamaan aikaan laippaosaan tehtävillä poikittaisilla katkaisuilla tai leikkauksilla. Puristussuunnan joustavuus syntyy näin ruuvikiinnityksessä. Ruuvin kautta siirtyvä voima vaikuttaa leikkausten vuoksi pienemmälle pinta-alalle, jolloin se joustaa helpommin verrattuna yhtenäisen laippaan. Tämän toivotaan kasvattavan myös rangan staattisen ja dynaamisen jäykkyyden eroa tavanomaista rakennetta suuremmaksi ruuvikiinnitykseen liittyvien epälineaarisuuksien vuoksi.

Rangan selkäosasta eli uumasta pyritään tekemään mahdollisimman vahva. Uumaan pitkittäiset urat jäykistävät rakennetta taivutussuunnassa. Sama muoto sallii rangan taipumisen kuitenkin puristussuunnassa, mikä on toivottua ääneneristyksen kannalta. Laipan kärjessä oleva lipa lisää taivutusjäykkyyttä entisestään.



Kuva 35: Teräsrankan kehitysehdotus.

5.4 Mahdolliset jatkotutkimukset ja avoimet kysymykset

Edellisessä luvussa 5.3 annettiin kehitysehdotus uudelle paremmin ääntä eristävälle teräsranhalle. Voidaan kuitenkin kyseenalaistaa, onko rangan kehittäminen tehokkain tapa parantaa kevytrakenneseinän ääneneristävyyttä. Kuten havaittiin luvussa 5.2, ilmapölyn oma dynaaminen jäykkyys on samaa luokkaa tai suurempi kuin nykyiset joustavat teräsranat. Lähteessä [12] on käsitelty kaksoisrakenneseinän reunakiskojen vaikutusta ääneneristävyyteen mittauksiin. Tutkimuksen johtopäätös on, että laidan kytkennät rajoittavat joustavan rangan tuoma ääneneristävyyden parannusta verrattuna puurankaiseen. Tätä asiaa olisi hyvä tutkia enemmän, sillä paremmilla reunakiskoilla koko seinän ääneneristävyys voisi kasvaa merkittävästi.

Nykyisissä ääneneristyksen numeerisissa ja simuloituissa mallinuksissa käytetään usein kokeellisesti selvitettyä rangan dynaamista jäykkyyttä. Kuten edellä on havaittu, ranka-kipsilevyysteemin dynaaminen jäykkyys vaihtelee merkittävästi laboratorioolosuhteissa ja todennäköisesti myös todellisissa asennuksissa. Todellisten asennusten tapauksessa on kuitenkin huomattava, että dynaaminen jäykkyys keskiarvoistuu ruuvi kiinnitysten suuren määrän myötä. Mittapenkissä rangan pituus on vain 300 mm tyyppillisen seinän 2700 mm:n sijaan.

Edellä mainittujen seikkojen valossa mitatun dynaamisen jäykkyyden käyttäminen laskentaparametrina ääneneristävyydellä mallinnuksessa voi johtaa virheellisiin tuloksiin. Kiinnitysmenetelmiä ei ole standardisoitu niin laboratoriomittauksissa kuin kenttäasennuksissakaan. Ongelma on dynaamisen jäykkyyden mittauksissa, mutta se on otettava huomioon ääneneristävyydellä mallinnuksessa. Mallinnuksella on päästään useissa tapauksissa 2 dB:n epävarmuuteen, joka on jo hyvin tarkka. Käytännön kokemukset ovat kuitenkin osoittaneet, että mallinnuksen ja käytännön asennusten erot voivat olla merkittävästi suurempiakin. Tähän vaikuttaa monet muutkin seikat kuten rakennusvirheet, mutta se ei vähennä dynaamisen jäykkyyden mittauksen kehittämisen merkitystä.

Esitetty mittausjärjestelmä ei ole ongelmaton. Tavoitteena olikin rakentaa edullinen ja yksinkertainen järjestelmä ja tutustua mittaamiseen tarkemmin. Työn edetessä heräsi paljon avoimeksi jääneitä kysymyksiä, joihin täytyy paneutua mahdollisissa jatkotutkimuksissa. Merkittävin näistä on rangan taivutusjäykkyyden merkitys kaksoisrakenneseinän ääneneristävyydelle. Nykyisellä mittausjärjestelyllä taivutusjäykkyyttä ei voida mitata. Samoin tulisi selvittää, kuinka jäykkä ranka vaikuttaa kipsilevyssä eteneviin taivutusaaltoihin, ja vaikuttaako tämä lopulta seinän läpäisevään äänienergiaan.

Mittausjärjestelmässä on vielä kehitettävää. Yksi ongelma tässä mittausjärjestelmässä oli näyterangan kiertyminen mittapenkkiin asennettaessa. Seuraavaksi olisi hyvä selvittää, saataisiinko mittausepävarmuutta pienennettyä suuremmalla mitattavan näytteen pituudella. Pidempi näyte voisi olla helpompi asentaa suoraan, jolloin suhteellinen kiertyminen olisi vähäisempää ja vaikutus mitattuun dynaamiseen jäykkyyteen pienempi. Samalla vaimennuskertoimen mitattu arvo tarkentuisi suoraan nykyisellä analysaattorilla. Näytepituuden kasvattamisen lisäksi kiinnitystapaa voisi kehittää edelleen. Erilaisten ruuvien vaikutus dynaamiseen jäykkyyteen olisi mielenkiintoista selvittää kuten myös ruuvauksen kireyden vaikutus. Ruuvien kiristäminen

momenttiavaimella parantaisi mittauksen luotettavuutta ja erityisesti eri rankojen mittaustulosten vertailtavuutta. Momenttiavaimella kiristetty ruuvikiinnitys olisi tarkemmin jäykkyydeltään saman suuruinen.

Kuormalevyn painon aiheuttama esijännitys vääristää mitatun ominaistajuuden todellista suuremmaksi. Tämän efektin suuruus olisi hyvä selvittää. Mikäli vaikutus on suuri, olisi mittausjärjestelmää hyvä kehittää esimerkiksi luvussa 4.1 esitetyn TTL:n järjestelmän suuntaan. TTL:n järjestelmässä massa-jousisysteemi värähtelee vaakatasossa, jolloin kuormamassa ei esijännitä mitattavaa rankaa.

Vaimennuskertoimen mittaaminen ja laskenta analysaattorissa vaatii kehittämistä, jotta mitattuja arvoja voisi käyttää mallinnuksessa luotettavasti. Nykyisessä järjestelmässä kaksi lähekkäistä ominaistajuutta on suurin haaste vaimennuskertoimen kannalta. Vaimennuskertoimen mittaus olisi tällöin luotettavinta aikatason vasteesta taajuustason sijaan. Vaimennuskertoimen mittaus oli tässä työssä sivuosassa, joten sen kehittämistä ei priorisoitu.

6 Yhteenveto

Kevytrakenteinen, ohut ja ääntä eristävä väliseinä on rakennustekniikan suuri haaste. Tavanomainen ja riittävästi ääntä eristävä betoniseinäratkaisu ei ole aina mahdollinen joko taloudellisista tai rakenteellisista syistä. Kevyillä rakenteilla säästetään rahaa ja voidaan saavuttaa kilpailukykyinen ääneneristävyys.

Kaksinkertainen seinärakenne tuetaan pystyrankoihin, jotka on useimmiten kiinnitetty yhteiseen kiskoon erillisten sijaan tilan säästämiseksi. Teorian mukaan tekemällä pystyrangasta joustava puristus suunnassa saavutetaan parempi ääneneristävyys. Aulis Lundell Oy yhdessä Helimäki Akustikkojen kanssa teki ääneneristävyysmittauksia uusilla prototyyppirangoilla keväällä 2015. Testitulokset olivat ristiriidassa edellä mainitun teoria kanssa. Erittäin joustava ranka ei tuonutkaan odotettua parannusta ääneneristävyyteen.

Hongiston kehittämä numeerinen taajuusriippuva ääneneristävyden ennustemalli käyttää dynaamista jäykkyyttä parametrinaan kaksoisrakenneseinän ääneneristävyden mallintamiseen. Mallin mukaan ranka toimii jousena seinäpaneelien välillä. Mitä joustavampi ranka on, sen parempi on seinän ääneneristävyys verrattuna jäykkään puurankaan. Dynaaminen jäykkyys on ennustemallin parametri, joka vaikuttaa seinäpaneelien ja rangan muodostaman massa-jousisysteemin ominaistajuuteen. Dynaaminen jäykkyys on näin ollen tärkeä tunne kehitettäessä uusia rankatuotteita.

Tässä työssä esitettiin mittausjärjestelmä, jolla pystytään mittaamaan teräsrakojen dynaaminen jäykkyys. Menetelmä perustuu kuormamassalevyn ja rangan muodostaman massa-jousisysteemin ominaistajuuden mittaamiseen. Ominaisajuudesta voidaan laskea suoraan rangan dynaaminen jäykkyys, kun tunnetaan kuormalevyn massa. Ominaisajuus selvitetään voima- ja kiihtyvyyksianturilla mitatusta taajuusvasteesta. Menetelmä on yksinkertainen ja nopea. Sen suurin ansio on oikeaa seinää vastaava kiinnitystapa, jolloin mittaustulos vastaa paremmin olosuhteita tavallisissa seinissä. Menetelmän suurimmat ongelmat ovat pienestä näytekoosta johtuva rangan kiertyminen ja sen kautta ominaistajuuden nousu. Lisäksi kuormalevyn aiheuttama esijännitys vaikuttaa mitatun rangan ominaistajuuteen, mitä ei voida ottaa suoraan huomioon laskiessa dynaamista jäykkyyttä.

Työssä mitattiin 10 teräsrangan dynaaminen jäykkyys. Mittaustulosten perusteella voitiin päätellä, että rangan kiinnityksellä on merkittävä vaikutus rangan dynaamiseen jäykkyyteen. Kaksinkertaistamalla ruuvien määrä mitatun systeemin dynaaminen jäykkyys kasvoi keskimäärin 160 %.

Mittaustulosten ja pohdintojen perusteella työssä esitettiin akustisesti paremman teräsrangan kehitysehdotus. Kaksoisrakenneseinän kehitystyössä olisi hyvä selvittää myös kiskojen vaikutus ääneneristävyyteen ja mahdollisuudet niiden kehittämiseen. Jatkossa rangoista tulisi selvittää myös rangan taivutusjäykkyys ja sen vaikutus seinän ääneneristävyyteen. Nykyinen mittausjärjestelmä ei sovellu tähän mittaukseen vaan tarvittaisiin täysin uudenlainen järjestelmä. Nykyistäkin dynaamisen jäykkyyden mittausjärjestelmää tulee jatkossa kehittää esimerkiksi TTL:n järjestelmän suuntaan, missä rangat ovat pystyssä ilman kuormalevyn esijännitystä ja värähtelevät vaakatasossa.

Lähdeluettelo

- [1] H. Ining, B. Kruppa. Health effects caused by noise – Evidence in the literature from the past 25 years. *Noise and Health*, vol. 6(22), s. 5 – 13, 2004.
- [2] A. Skåneberg, E. Öhrström. Adverse health effects in relation to urban residential soundscapes. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 250(1), s. 151 – 155, 2002.
- [3] B. Rasmussen. Sound insulation between dwellings – requirements in building regulations in europe. *Applied Acoustics*, vol. 71(4), s. 373 – 385, 2010.
- [4] Suomen rakentamismääräyskokoelma C1-1998, Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Ympäristöministeriö. 4.6.1998.
- [5] V. Hongisto, M. Suokas. Tyytyväisyys äänieristykseen kerrostaloasunnoissa – väliseinän rakennetyypin vaikutus. *Akustiikkapäivät 2015*, 1.-2.9.2015, Kuopio. Akustinen seura ry, 2015.
- [6] V. Hongisto. *Airborne sound insulation of wall structures – Measurement and prediction methods*. Helsinki University of Technology, 1.12.2000.
- [7] L. L. Beranek, G. A. Work. Sound transmission through multiple structures containing blankets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 21(4), s. 419 – 428, 1949.
- [8] B. Sharp. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering*, vol. 11(2), s. 53 – 63, 1978.
- [9] Q. Gu, J. Wang. Effect of resilient connection on sound transmission loss of metal stud double panel partitions. *Chinese Journal of Acoustics*, vol. 2(2), s. 113 – 126, 1983.
- [10] V. Hongisto. *S-89.3471 Meluntorjunta, Oppikirja kurssille*. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, 28.10.2013.
- [11] T. Lahti. *S-89.130 Akustinen mittaustekniikka, luennot 1995*. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, 1995.
- [12] P. Virjonen, V. Hongisto. Joustavarankaisen levyrakenneseinän äänenläpäisy. *Akustiikkapäivät 2013*, 22.-23.5.2013, Turku. Akustinen seura ry, 2013.
- [13] V. Hongisto. *Monikerroksisen seinärakenteen ääneneristävyyden laskentamalli*. Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2, 2003.
- [14] F. Fahy, J. Walker. *Fundamentals of Noise and Vibration*. Taylor & Francis, 1998.

- [15] M. Vanstraelen. Manufacturer's statement: influence of the air stiffness in high performing floating floors with discrete isolators. Technical report, CDM, 26.4.2010.
- [16] M. J. Crocker. *Handbook of noise and vibration control*. Jonh Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
- [17] M. Carfagni, E. Lenzi, M. Pierini. The loss factor as a measure of mechanical damping. *IMAC XVI - 16th International Modal Analysis Conference*, vol. 3243(1), s. 580 – 584, 1998.
- [18] J. C. Snowdon. Vibration isolation: Use and characterization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 66(5), s. 1245 – 1274, 1979.
- [19] J. Poblet-Puig ym. The role of studs in the sound transmission of double walls. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 95(3), s. 555 – 567, 2009.
- [20] ISO International Standard. *Acoustics and vibration – Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements – Part 2: Direct method for determination of the dynamic stiffness of resilient supports for translatory motion*. ISO 10846-2:2008, 15.8.2008.
- [21] ISO International Standard. *Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings*. ISO 9052-1:1989, 15.2.1989.
- [22] R. Helenius ym. Seinärakenteiden ääneneristykseen mallinnuksessa tarvittavien parametrien mittausten menetelmät. *Akustiikkapäivät 2001*, 8.-9.10.2001, Espoo. Akustinen seura ry, 2001.
- [23] PCB Piezotronics 208C03 voima-anturin spesifikaatiot. Saatavissa: http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/ForceTorque/Products/Specsheets/208C03_H.pdf. Viitattu 20.11.2015.
- [24] PCB Piezotronics 353B01 kiihtyvyyssanturin spesifikaatiot. Saatavissa: http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Specsheets/353B01_J.pdf. Viitattu 20.11.2015.
- [25] *Measuring vibration*. Brüel & Kjær, 9/1982. Saatavissa: <http://www.bksv.com/doc/br0094.pdf>. Viitattu 26.12.2015.
- [26] M. P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [27] Dayton Audio HDN-8 Sound Exciter Transducer pintakaiutinelementin spesifikaatiot. Saatavissa: <http://www.daytonaudio.com/media/resources/300-387-dayton-audio-hdn-8-spec-sheet.pdf>. Viitattu 3.12.2015.
- [28] C. Sujatha. *Vibration And Acoustics*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2010.

- [29] W.G. Halvorsen, D.L. Brown. Impulse technique for structural frequency response testing. *S V Sound and Vibration*, pages vol. 11(11), s. 8 – 21, 1977.
- [30] K. Reijula, P. Virjonen. Dynamic stiffness of resilient wall studs. Technical Report TY11-2009-102837e, Finnish Institute of Occupational Health, 13.3.2009.
- [31] R. Pääkkönen, J. Keränen. Determination of dynamic stiffness in laboratory conditions. Technical Report TY11-2009-120252e, Finnish Institute of Occupational Health, 19.9.2009.
- [32] Gyproc Saint-Gobain teräsrunkoseinän asennusohjeet. Saatavissa: <http://www.gyproc.fi/toteutus/asennusohjeet/terasrunkoseinat->. Viitattu 4.12.2015.
- [33] ISO International Standard. *Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation*. ISO 10140-2:2010, 1.9.2010.
- [34] ISO International Standard. *Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation*. ISO 12999-1:2014, 15.5.2014.
- [35] Keskustelut DI Heikki Helimäen ja TkT Jukka Linjaman kanssa, Helimäki Akustikot, Helsinki, 15.7.2015.
- [36] ISO International Standard. *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation*. ISO 717-1:2013, 17.6.2013.