



Karelia-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennus ja yhdyskuntatekniikka

Puisen kotelolaatan värähtely- ominaisuuksien tutkimus ja kiin- nitysmenetelmien vaikutus

Jaakko Hokkanen, Tino Pekkarinen

Opinnäytetyö, kesäkuu 2025

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
toukokuu 2025
rakennustekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijät

Jaakko Hokkanen, Tino Pekkarinen

Nimeke

Puisen kotelolaatan värähtelyominaisuuksien tutkimus ja kiinnitysmenetelmien vaikutus.

Toimeksiantaja

Karelia-ammattikorkeakoulu

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin puurakenteisten välipohjalaattojen, erityisesti kotelolaattojen, värähtelyominaisuuksia. Työn päätavoitteena oli selvittää, miten erilaiset kiinnitysratkaisut ja rakenteelliset muutokset vaikuttivat lattiarakenteen värähtelytasoon ja rakenteiden käyttömukavuuteen. Tutkimus toteutettiin osana PuuHyvä-hanketta, jonka tavoitteena oli kehittää puurakenteisten välipohjien suunnittelu- ja rakennusratkaisuja värähtelyteknisten, akustisten ja ympäristöön liittyvien ominaisuuksien näkökulmasta.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin värähtelysuunnittelun keskeisiä periaatteita, kuten ominaistajuutta, taipumaa ja kiihtyvyyttä. Puurakenteiset välipohjat luokitellaan yleisesti korkeataajuisiksi rakenteiksi, joissa kävelykuorman aiheuttama taipuma muodostuu usein mitoittavaksi tekijäksi.

Kokeellisessa osuudessa rakennettiin 5 metriä pitkä ja 1,2 metriä leveä kotelolaatta, jolla testattiin kahdeksaa erilaista rakennevaihtoehtoa. Tutkittavat muuttujat sisälsivät muun muassa ruuvien koon ja jaon sekä EPDM-eristysmateriaalin käytön. Mittaukset toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa hyödyntäen heel-drop -menetelmää sekä VibroMetra VM-FFT+ -mittauslaitteistoa.

Tulokset osoittavat, että käytetyillä kiinnitysratkaisuilla tai EPDM-eristeellä ei ollut merkittävää vaikutusta tämän kokoisen rakenteen värähtelyominaisuuksiin. Tutkimus tuottaa luotettavaa ja käyttökelpoista tietoa, joka tukee puurakenteisten välipohjien värähtelyominaisuuksien huomioimista suunnitteluprosessissa.

Kieli
suomi

Sivuja 55
Liitteet 1
Liitesivumäärä 3

Asiasanat

välipohja, värähtely, kiinnitysmenetelmä



THESIS
May 2025
Degree Programme in Construction Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Authors

Jaakko Hokkanen, Tino Pekkarinen

Title

Study of the Vibration Characteristics of a timber box slab and the Effect of Mounting Methods.

Commissioned by

Karelia University of Applied Sciences

This thesis investigated the vibration characteristics of timber intermediate floor slabs, with a particular focus on box slabs. The main objective was to examine how various fastening solutions and structural modifications affect the vibration levels of the floor structure and user comfort. The research was conducted as part of the PuuHyvä project, which aims to develop timber floor design and construction solutions with regard to vibration performance, acoustics, and environmental impact.

The theoretical section addressed key principles of vibration design, including natural frequency, deflection, and acceleration. Timber intermediate floors are generally classified as high-frequency structures, where deflection caused by walking loads is often the governing design criterion.

In the experimental section, a 5-meter-long and 1.2-meter-wide box slab was constructed to test eight different structural configurations. The variables included screw size and spacing, as well as the use of an EPDM insulation material. Measurements were conducted in the laboratory of Karelia University of Applied Sciences using the heel-drop method and the VibroMetra VM-FFT+ measurement system.

The results show that neither the fastening solutions nor the use of EPDM insulation had a significant effect on the vibration characteristics of a structure of this size. The study provides reliable and useful data to support the consideration of vibration characteristics in the design process of timber intermediate floors.

Language
Finnish

Pages 55
Appendices 1
Pages of Appendices 3

Keywords

floor, vibration, fastening method

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Puupalkkivälipohjat	6
2.1	Puupalkkivälipohjien käytön kehitys tähän päivään	6
2.2	Välipohja	6
2.3	Viilupuu	7
2.4	Kerto-Ripa-lattiapalkkielementit	7
3	Välipohjien teoreettinen värähtelysuunnittelu	9
3.1	Värähtelyn aistiminen	9
3.2	Välipohjan värähtelyn mitoituskriteerit	11
3.2.1	Kiihtyvyyuskriteeri	12
3.2.2	Taipumakriteeri	13
3.3	Välipohjien värähtelyssä tarkasteltavia ilmiöitä ja käsitteitä	13
3.3.1	Ominaistaaajuus	13
3.3.2	Lattian taipuma	15
3.3.3	Kiihtyvyyys	17
3.3.4	Kiihtyvyyuskriteeri matalataajuuksisilla lattioilla	19
3.4	Matala- ja korkeataajuuslattiat	22
3.5	Värähtelyn hallinta	23
4	Välipohjien ominaistaaajuusmittaukset ja vertailulaskennat	24
4.1	Koekappaleen rakentaminen	24
4.1.1	Rakenteen mitat	25
4.1.2	Rakennusprosessi	26
4.2	Mittaus ja mittaussuunnitelma	31
4.2.1	Mittausmenetelmät	32
4.2.2	Mittapisteiden valinta	32
4.2.3	Mittauskalusto	34
5	Tutkimuksen tulokset	36
5.1	Tulokset	36
5.2	Laskennalliset tulokset	48
5.2.1	Finnwood -laskentaohjelma	48
5.2.2	Tulokset	49
6	Tulosten tulkinta	50
7	Pohdinta	52
7.1	Tutkimuksen ja tulosten luotettavuus	52
7.2	Tutkimuksen eettiset näkökulmat	53
7.3	Jatkotutkimusideat	54
Lähteet	56
	Aineistonhallintasuunnitelma	1
	1. Aineiston yleiskuvaus	1
	2. Eettiset periaatteet, lainsäädäntö ja henkilötietojen käsittely	1
	3. Aineiston dokumentointi	1
	4. Tallentaminen ja tietoturva opinnäytetyöprosessin aikana	2
	5. Aineisto opinnäytetyön valmistuttua: tuhoaminen, säilyttäminen tai mahdollinen jatkokäyttö ja avaaminen	2
	6. Tehtävät ja vastuut	2

Kuvat

Kuva 1	Paikallisesta kuormituksesta aiheutuva lattian pinnan kallistuma
Kuva 2	Kertoimen kL riippuvuus lattian pisimmästä mitasta
Kuva 3	Rakenne alapuolelta. Ruuvien jakoväli 200 mm
Kuva 4	Rakenne yläpuolelta. Ruuvien jakoväli 150 mm
Kuva 5	Rakenne sivusta
Kuva 6	150 x 150 mm puupalkit CLT-palkkien päällä
Kuva 7	Palkit lyhennettiin viiteen metriin
Kuva 8	Pohjalevy vasojen päällä
Kuva 9	Pohjalevyt vasojen päällä
Kuva 10	Alusruuvit. 5 mm k200
Kuva 11	Rakenne käännetty ympäri ja EPDM-eristeet asennettu
Kuva 12	Koekappaleen viimeisten ruuvien kiinnityksiä
Kuva 13	Anturi mittapisteessä 1
Kuva 14	Anturi mittapisteessä 2
Kuva 15	Käynnissä oleva mittaus
Kuva 16	Finnwood. Mittapiste 1, mittaus 1 mitoitustulos
Kuva 17	Finnwood. Kuormitus mittapiste 1, mittaus 1
Kuva 18	Finnwood. Mitoitustulos mittapiste 2, mittaus 1
Kuva 19	Finnwood. Kuormitus mittapiste 2, mittaus 1
Kuva 20	Puuinfo 2020 Primääripalkkien ja välipohjarakenteiden asettelu

Kuviot

Kuvio 1	5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 1
Kuvio 2	5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 2
Kuvio 3	5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 1
Kuvio 4	5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 2
Kuvio 5	6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 1
Kuvio 6	6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 2
Kuvio 7	6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 1
Kuvio 8	6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 2

Taulukot

- Taulukko 1 Välipohjien värähtelyluokat
- Taulukko 2 Kuvaus välipohjan värähtelyn voimakkuudesta
- Taulukko 3 Mitattavat rakennevariaatiot
- Taulukko 4 5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 1
- Taulukko 5 5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 2
- Taulukko 6 5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 1
- Taulukko 7 5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 2
- Taulukko 8 6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 1
- Taulukko 9 6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 2
- Taulukko 10 6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 1
- Taulukko 11 6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 2

Liitteet

- Liite 1 Aineistonhallintasuunnitelma

Käsitteet

Amplitudi	Amplitudi tarkoittaa värähtelyn tai aaltoliikkeen maksimipoikkeamaa tasapainoasemasta.
Anisotrooppinen	Suunnasta riippuva ominaisuus materiaalissa tai rakenteessa.
CLT	Cross Laminated Timber, eli ristiinliimattu puulevy.
EPDM	Kestävä synteettinen kumimateriaali.
Eurokoodi	Eurokoodit (Eurocodes) ovat eurooppalaisia rakennusalan suunnittelustandardeja, jotka määrittelevät tekniset säännöt rakennusten ja infrastruktuurin suunnitteluun eri rakennusmateriaaleilla.
Heel-drop	Lattiavaikutuksen mittaus iskutestillä.
Heräte	Testissä käytetty värähtelyärsyke.
Jäykkyys	Jäykkyys on voiman ja aikaan saadun siirtymän (tai venymän) suhde.
Kelluva pintalaatta	Pintalaatta, joka on irrotettu alemmasta rakenteesta.
LVL	Laminoiduista viiluista tehty rakennepuu.
Ortotrooppinen	Ortotrooppinen tarkoittaa materiaalia tai rakennetta, jolla on eri mekaaniset ominaisuudet kolmessa toisiinsa vastaan kohtisuorassa suunnassa.
Taajuus f [Hz]	Taajuus ilmoittaa värähdysten lukumäärän aikayksikköä kohden. Taajuuden yksikkönä käytetään Hertsiä.

Vaste	Vaste tarkoittaa rakenteen tai järjestelmän reaktiota siihen kohdistuvaan kuormitukseen.
Viilupuu	Puuviiluista liimattu kantava puuelementti.
Värähtely	Värähtelyllä tarkoitetaan jaksottaista liikettä asian tai esineen tasapainoaseman ympärillä.

1 Johdanto

Puisten välipohjalaattojen käyttö on yleistynyt erityisesti kevytrakenteisessa rakentamisessa niiden ekologisuuden ja kustannustehokkuuden ansiosta. Puun keveys ja anisotrooppiset ominaisuudet voivat kuitenkin johtaa haasteisiin rakenteiden värähtelykäyttäytymisessä, mikä vaikuttaa sekä rakenteen käyttökävyyteen että kestävyysvaatimukseen.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia puisten välipohjalaattojen värähtelyominaisuuksia sekä analysoida niiden vaikutusta rakenteen toimivuuteen. Työssä tarkastellaan eri tekijöitä, kuten laatan kiinnitysmekanismia, taipuman kiihtyvyyttä ja vaimennusominaisuuksia, ja arvioidaan, miten nämä vaikuttavat värähtelytasoon ja sen hallintaan. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää rakenteiden suunnittelussa ja kehittämisessä, jotta puuvälipohjat täyttäisivät paremmin sekä rakennusmääräysten että käyttäjien mukavuusvaatimukset.

Opinnäytetyö toteutetaan osana PuuHyvä-hanketta, jota Etelä-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus rahoittaa. Opinnäytetyö suoritetaan rinnakkais-työnä yhdessä toisen ryhmän kanssa, jonka tutkimuskohteena on puupalkkivälipohjien kiinnitysmekanismit. PuuHyvä eli Puu- ja hybridirakenteisten välipohjatuotteiden rakennusakustiikka, värähtely ja elinkaaren päästöt -hankekoko-
naisuus toteutetaan yhteistyössä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun, Tampereen yliopiston, Karelia-ammattikorkeakoulun sekä Luonnonvarakeskuk-
sen kanssa 1.9.2023–31.8.2026 aikana.

Eurokoodi uudistuu vuonna 2025. Tämä vaikuttaa myös puupalkkivälipohjien mitoitus suunnitteluun ja toteutukseen (Karelia-ammattikorkeakoulu 2024a). Projektikonaisuuden tavoitteena on tehostaa opinnäytetyötä laajempaan kokonaisuutena puurakenteisten välipohjien toteutusta ja suunnittelua.

2 Puupalkkivälipohjat

2.1 Puupalkkivälipohjien käytön kehitys tähän päivään

Puurakentamisella on Suomessa vuosisatojen perinteet, ja se on ollut pitkään hallitseva rakennustapa erityisesti maaseudulla. Varhaisimmat hirsirakennukset sisälsivät yksinkertaisia puurakenteisia välipohjia, jotka koostuivat massiivipuupalkeista ja niiden päälle asetetuista lankuista tai hirsistä. Näitä rakenteita käytettiin erityisesti maaseudun asuinrakennuksissa, piharakennuksissa ja kartoissa. (Lindberg 2021, 4.)

1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa teollistuminen vaikutti merkittävästi puurakentamiseen. Kerrostalorakentamisen yleistyessä kaupungeissa välipohjissa alettiin hyödyntää palkistoja ja täyteaineita, kuten hiekkaa tai kuonaa, ääni- ja lämpöeristyksen parantamiseksi. Perinteisten palkistojen rinnalle kehitettiin myös kevyempiä ratkaisuja, kuten ripa- ja kotelolaattoja, jotka tarjosivat paremman jäykkyyden ja kantavuuden suhteessa niiden massaan. (Berger & Böök 2023.)

1950-luvulta lähtien betonirakenteet alkoivat syrjäyttää puuvälipohjia erityisesti kerrostaloissa, sillä betoni tarjosi paremman paloturvallisuuden, suuremman kantokyvyn ja vähemmän ongelmia värähtelyn suhteen. Puisten välipohjien keveys ja pienempi vaimennuskyky voivat johtaa herkempiin värähtelyilmiöihin, mikä on ollut haaste erityisesti kevytrakenteisessa rakentamisessa. (Sistonen 2022, 9.)

2.2 Välipohja

Välipohja on kerrosrakenteessa alakerran katon ja yläkerran lattian väliin sijoitettava osa, joka koostuu useista erilaisista materiaaleista. Sen kantavana osana toimii yleensä puupalkisto. Suunnitteluun vaikuttaa se, että välipohjaratkaisuja

on monia erilaisia, mikä tekee suunnitteluprosessista haastavan. Puuvälipohjat ovat usein monimutkaisia rakenteita, ja siksi niiden toteutuksessa on riski rakennusvirheisiin, minkä vuoksi huolellinen suunnittelu ja toteutus ovat erityisen tärkeitä. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2025b.)

Tekniset vaatimukset edellyttävät, että puuvälipohjat ovat yleensä monikerrosrakenteita, joissa eri materiaalit on kiinnitetty mekaanisesti toisiinsa. Tämä lisää rakennuskustannuksia, vaikka osia valmistettaisiin tehtaalla valmiiksi. Näin ollen puuvälipohjat ovat usein yksi kalleimmista rakenneosista, esimerkiksi puukerrostaloissa. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2025b.)

2.3 Viilupuu

Viilupuulla tarkoitetaan sorvatuista viiluista liimaamalla valmistettua rakenteellista puutuotetta, jota käytetään laajasti uudis- ja korjausrakentamisessa sekä teollisuudessa. Tyypillisiä käyttökohteita ovat kantavat rakenteet, kuten palkit, pilarit ja ristikot, sekä ikkuna- ja oviteollisuuden komponentit. (Puuinfo 2020a.)

Suomalainen viilupuu koostuu 3 mm paksuisista kuusiviiluista, jotka liimataan joko syysuunnaltaan yhdensuuntaisesti tai osittain ristiin. Viilupuun pinnat ovat yleensä hiomattomia, mutta tarvittaessa ne voidaan käsitellä ja painekyllästää. Tuote määritellään SFS-EN 14374 -standardin mukaisesti, mistä käy ilmi tuotteen tarkat vaatimukset. (Puuinfo 2020a.)

Viilupuun maksimileveydeksi on määritelty 2,5 metriä ja pituudeksi jopa 25 metriä. Puun paksuus vaihtelee 27–75 mm välillä, ja korkeudet määräytyvät valmistajakohtaisesti. Viilupuun kantavien vaakarakenteiden tyypillinen jänneväli on 5–12 metriä. Lisäksi sitä käytetään jäykistävässä rakenteissa sekä aukko- ja tukipalkkeina. (Puuinfo 2020a.)

2.4 Kerto-Ripa-lattiapalkkielementit

Nykyajan rakennuksissa suositaan avaria tiloja ilman ylimääräisiä tukipilareita. Tämä onnistuu käyttämällä pitkän jännevälän lattiarakenteita, joihin voidaan hyödyntää esivalmistettuja puuelementtejä. Erityisesti ripa- ja laatikkorakenteiset koteloelementit soveltuvat tähän tarkoitukseen, sillä ne ovat kevyitä, mutta kestäviä. (Metsä Group 2025.)

Laatikkorakenteisilla elementeillä voidaan saavuttaa jopa 10 metrin jännevälit ja jopa 24 metrin pituiset yksittäiset osat. Valmistajien mukaan taloudellisin tilanne käyttää elementtejä on, kun niiden jänneväli on noin 6–9 metriä. Laatikkorakenteisten elementtien mallien ansiosta valmistajat lupaavat jopa 70 % edun valmistuksessa kuluvan puun määrän suhteen verrattuna massiivipuurakenteisiin. Rakennusprojektin mukaan voidaan valita joko ripaelementti tai laatikkorakenteinen elementti. (Metsä Group 2025.)

Ripaelementit voidaan valmistaa siten, että niiden rivat ovat joko ylä- tai alapuolella. Rakenteeseen voidaan jo tehtaalla lisätä eristystä tai esimerkiksi soraa äänenvaimennusta varten, mikä auttaa säästämään tilaa ja vähentämään rakennuksen kokonaiskorkeutta. (Metsä Group 2025.)

Kotelolaatat ovat yleisesti pitkien jänneväliden yläpohjaelementtejä, joiden pituus voi olla jopa 20 metriä. Kotelolaatan rakenne koostuu kantavista palkeista sekä levymäisestä yläpinnasta, jossa usein käytetyt havuvanerilevyt muodostavat rakenteelle kantavan levykentän. (VVR Wood 2025.)

Etuna rakenteessa on, että laatan levyrakenteet toimivat sekä kantavana rakenteena että rakennuksen jäykistävänä elementtinä, mikä parantaa rakenteen vakautta ja vähentää vaakasuuntaisia siirtymiä. Tämä mahdollistaa suuret avoimet tilat ilman perinteisiä tukirakenteita, mikä edistää tilankäytön tehokkuutta ja rakennuksen muuntojoustavuutta. (VVR Wood 2025.)

Esimerkkinä rakennejärjestelmästä toimii Joensuun kaupungissa sijaitseva Metla-talo. Metla-talossa tehdyt rakenneratkaisut mahdollistavat tilojen ja talotekniikan joustavan muokkaamisen, jos rakennuksen käyttötarkoitus tai käyttäjät

muuttuvat. Metla-talossa muuntojousto on varauduttu 1,2 metrin moduulissa. (Puuinfo 2020b.)

Toinen etu rakenteella on, että rakenteeseen voidaan tehdä valmiiksi tilaa ilmanvaihdolle, sähkövedoille ja muille järjestelmille. Rivoille annetaan jopa 70 % korkeudesta käytettäväksi näille järjestelmille, mikä helpottaa asennustyötä ja vähentää myöhemmin tarvittavia muutoksia. Pintamateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi kipsilevyä, mutta elementit voidaan myös jättää näkyviin. (Metsä Group 2025.)

Tällaiset esivalmistetut elementit mahdollistavat tehokkaan tuotantoprosessin, sillä ne voidaan valmistaa ja liimata valmiiksi tehtaalla ennen toimitusta työmaalle. Tämä nopeuttaa rakentamista ja voi parantaa lopputuloksen laatua. Lisäksi rakennusmateriaalien ja valmistusmenetelmien kehitys auttaa varmistamaan, että tällaiset ratkaisut pysyvät käyttökelpoisina myös tulevaisuudessa. (Metsä Group 2025.)

3 Välipohjien teoreettinen värähtelysuunnittelu

3.1 Värähtelyn aistiminen

Rakenteiden värähtelyt voivat aiheuttaa ihmisessä häiriötuntemuksia joko suoraan kehon kautta aistittuna tai epäsuorasti kuten esineiden liikkeen tai siitä aiheutuvien äänten välityksellä. Rakennuksissa tapahtuvaa värähtelyä aistitaan monilla eri tavoilla, mutta useimmiten selkeimmät värähtelyn aistimusten lähteenä toimivat kasvien tai muiden esineiden heiluminen sekä astioiden ja irtaimiston synnyttämät ääni-ilmiöt tai suoraan keholliset tuntemukset. (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 10.)

Välipohjarakenteet luokitellaan värähtelyominaisuuksiensa perusteella tiettyihin värähtelyluokkiin riippumatta mistä materiaalista välipohja on valmistettu. Näiden luokkien avulla voidaan arvioida välipohjan soveltuvuus käyttökohteeseen

sopivaksi (Taulukko 1). Välipohjan värähtelyt havaitaan yleensä kehossa tai esimerkiksi huonekalujen ja esineiden liikkeenä, kuten hyllyssä kilisevinä laseina. Taulukko 2 esittää värähtelyluokkiin perustuvat kuvaukset värähtelyn voimakkuuden aistimisesta. (Lahtela. 2020, 101.)

Värähtelyluokka	Sovelluskohde
A1	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B2	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
C3	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
D4	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa. Esimerkiksi omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E5	Luokka, jolle ei ole asetettu rajoituksia.

Taulukko 1. Välipohjien värähtelyluokat (Lahtela 2020, 101).

Värähtelyn aistittavuus kehon avulla	Värähtelyn aistittavuus esineiden värähtelyn avulla
A Värähtely ei yleensä ole havaittavaa	1 Astioiden kilinää ei esiinny. Kasvien lehtien heilumista ei yleensä esiinny.
B Värähtely on juuri havaittavaa	2 Astioiden kilinää ei yleensä esiinny. Kasvien lehtien heiluminen on juuri havaittavaa.
C Värähtely on havaittavaa	3 Astioiden kilinä juuri havaittavaa. Kasvien lehtien heiluminen on havaittavaa.
D Värähtely on selvästi havaittavaa	4 Astioiden kilinä on selvästi havaittavaa. Kasvien lehtien heiluminen on selvästi havaittavaa.

Taulukko 2. Kuvaus välipohjan värähtelyn voimakkuudesta (Lahtela 2020, 101).

Yleisesti ottaen värähtelyn ja taipuman aiheuttaja eli kävelevä henkilö ei itse havaitse aiheuttamaansa lattian värähtelyä tai taipumaa, toisin kuin muut henkilöt tilassa, jotka voivat kokea voivat nämä ilmiöt jopa häiritsevänsä. Erityisesti paikallaan oleva henkilö saattaa pitää kävelyn aiheuttamaa värähtelyä häiritsevänsä silloin, kun kävelystä syntyvät jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat resonanssin seurauksena, kantapäähän osuminen lattiaan aiheuttaa voimakasta

tärinää tai lattian taipuma askelten vaikutuksesta on merkittävä. (Talja ym. 2002, 10.)

Kuten mainittu kävelyn aiheuttamat värähtelyt voivat ilmetä myös epäsuorina häiriöinä, kuten astioiden helinänä tai kasvien lehtien liikehtimisena. Näiden ilmiöiden häiritsevyys riippuu ensisijaisesti lattian paikallisesta taipumasta yksittäisten askelten kohdalla, mikä voi johtaa esimerkiksi kaapiston tai kukkatelineen kallistumiseen. Tällaisia ilmiöitä esiintyy erityisesti kelluvissa lattiarakenteissa, korotuslattioissa sekä lattioissa, joiden pintamateriaali on joustavaa tai joiden poikittainen jäykkyys on vähäinen. (Talja ym. 2002, 10.)

Välipohjan värähtelykäyttäytymiseen vaikuttavat ensisijaisesti lattian massa ja sen ominaisvärähtelyn taajuus. Raskailla lattiarakenteilla värähtelytasoon vaikuttaa merkittävästi myös vaimennus. Mikäli lattian massa on suuri ja sen ominaistajuus matala, värähtelyä dominoi ominaisvärähtely. Toisaalta, mikäli lattian massa on pieni ja ominaistajuus korkea, värähtelyä hallitsevat kävelykuorimituksesta syntyvät taipumat. Tämän perusteella lattiat voidaan luokitella matalataajuuksiin ja korkeataajuuksiin rakenteisiin, joista tyypillisesti kevytrakenteiset lattiat kuuluvat jälkimmäiseen ja raskaat lattiat edelliseen ryhmään. (Talja ym. 2002, 10.)

3.2 Välipohjan värähtelyn mitoituskriteerit

Eurokoodien mukaisessa mitoituksessa ei tällä hetkellä edellytetä koko välipohjarakenteen systeemin ominaistajuuden määrittämistä, vaan tarkastelu voidaan rajoittaa välipohjan jännesuuntaiseen ominaistajuuteen. Kokonaisuuden ominaistajuuden analysointi on kuitenkin suositeltavaa harkita tapauskohtaisesti, erityisesti tilanteissa, joissa rakenteessa käytetään esimerkiksi teräksisiä primäärirakkeja. Käsikirjoissa esitetty ominaistajuuden laskentakaava on yleispätevä ja yksinkertainen, mutta sen käyttö voi joissain tilanteissa johtaa primäärirakkeen ylimitoitukseen värähtelytarkastelun näkökulmasta. (Puuinfo 2020c.)

Välipohjan suunnittelussa värähtelymitoitus muodostuu usein rakenteen mitoit-
tavaksi tekijäksi. Ensisijaisesti tarkastellaan välipohjan hetkellistä taipumaa (δ),
jonka aiheuttaa jännevälin keskelle kohdistettu 1 kN:n pistekuorma. Suomessa
suurin sallittu taipuma tässä tarkastelussa on 0,5 mm. Taipuman lisäksi huomi-
oidaan myös rakenteen alin ominaistajuus (f_1), jonka tulee Suomessa olla vä-
hintään 9 Hz. Nämä raja-arvot eivät ole yhtenäisiä koko Euroopassa, vaan ne
määritellään kunkin maan eurokoodin kansallisessa liitteessä. (Puuinfo 2020c.)

Välipohjien värähtelymitoituksessa keskeinen kuormitustekijä on kävelyn syn-
nyttämä heräte. Kävelyn aiheuttama värähtely voi muodostua häiritseväksi sisä-
tiloissa erityisesti silloin, jos se saa aikaan resonanssi-ilmiön kantavissa raken-
teissa, kantapään iskut synnyttävät voimakasta tärinää tai jos välipohja joustaa
askelten vaikutuksesta liiallisesti. (Lahtela 2020, 101.)

Välipohjan värähtelymitoituksessa resonanssia pidetään merkittävänä mitoitus-
tekijänä silloin, kun rakenteen alin ominaistajuus jää alle 10 hertsin. Tämä joh-
tuu siitä, että kävelyn aiheuttaman kuormituksen taajuusalue sijoittuu pääsään-
töisesti alle 10 hertsiin. Taajuusalueen asettuessa alle 10 Hz kuormitus voi ai-
heuttaa resonanssin, mikäli värähtelevän rakenteen ominaistajuus on myös
alle tämän rajan. Resonanssiriskin pienentämiseksi välipohjan alimman omi-
naistajuuden tulisi kuitenkin olla vähintään 3 Hz. Jos rakenteen alin ominais-
taajuus ylittää 10 Hz, kävelystä aiheutuvaa resonanssia ei synny, jolloin väräh-
telymitoituksessa korostuvat kävelystä aiheutuvat taipumat ja tärinä, jotka voivat
muodostua käyttäjien kannalta häiritseviksi. (Lahtela 2020, 101.)

3.2.1 Kiihtyvyysskriteeri

Resonanssin ollessa mitoittava tekijä tietyllä taajuusalueella, välipohjan väräh-
telyn hyväksyttävyyys arvioidaan kiihtyvyysehdon perusteella. Tässä yhteydessä
kiihtyvyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka nopeasti välipohjan kantavat rakenteet al-
kavat värähdellä ulkoisen herätteen, kuten kävelyn, seurauksena. heräte saa ai-
kaan liiketilan, jossa rakenteet värähtelevät tietyllä nopeudella, jossa yksikkönä
käytetään v [m/s]. (Lahtela 2020, 102.)

Välipohjan rakenteellisten ominaisuuksien mukaan värähtelyllä on tietty alkuarvo, josta liikkeen määrä alkaa kasvamaan. Alkuperäisen arvon suurus määrittää, että miten nopeasti rakenne saavuttaa huipun värähtelyssä. Arvo on siis suoraan sidoksissa rakenteen värähtelyn kehittymiseen. (Lahtela 2020, 102.)

3.2.2 Taipumakriteeri

Taajuusalueella, jolla kantavien rakenteiden taipuma toimii mitoittavana tekijänä, välipohjan värähtelyn hyväksyttävyyys arvioidaan taipumaehdon perusteella. Taipumaehto edellyttää, että välipohjapalkin keskelle kohdistettu 1 kN:n pistekuorman alla rakenne ei saa taipua liikaa rasituksesta. Mikäli välipohja on tuettu pääkannattimien varaan, tulee kokonaistaipumaan sisällyttää myös pääkannattimien osuus. Koko rakennejärjestelmän yhteinen taipuma ei saa ylittää määritettyä rajaa. Periaate koskee myös välipohjan muita rakenteellisia osia kuten kantta tai kelluvaa pintalaattaa paikallisen taipuman osalta. Useimmissa tapauksissa välipohjapalkkien sijoittelu enintään 600 mm välein mahdollistaa kuitenkin sen, että rakenneosien erillistä tarkastelua ei tarvitse ottaa huomioon, kun tarkastella taipumaehto. (Lahtela 2020, 102.)

3.3 Välipohjien värähtelyssä tarkasteltavia ilmiöitä ja käsitteitä

3.3.1 Ominaistaajuus

Ominaistaajuus, jota merkitään symbolilla f ja yksikkönä käytetään hertsiä (Hz), tarkoittaa rakenteen tai järjestelmän luonnollista värähtelytaajuutta. Tällä taajuudella rakenne värähtelee kaikkein voimakkaimmin eli saavuttaa suurimman amplitudin, kun siihen kohdistuu ulkoinen häiriö. Jokaisella rakenteella on useita ominaistaajuuksia, joista alin taajuus on niin sanottu perustaajuus, ja sitä korkeammat ominaistaajuudet ovat sen monikertoja. Kullekin ominaistaajuudelle

kuuluu oma ominaisvärähtelymuotonsa. (Lahtela, Kylliäinen, Lietzén, Kovalainen & Talus 2004, 6.)

Ominaistaajuus määräytyy rakenteen massan, jäykkyyden ja geometrinen mittojen perusteella. Rakennustekniikassa ominaistaajuuden tunteminen on tärkeää esimerkiksi ääneneristystä suunniteltaessa, kun tarkastellaan välipohjien tai rakennuksen rungon värähtelyä, sekä suunniteltaessa perustuksia koneille tai laitteille, jotka aiheuttavat tärinää. Näissä tapauksissa ominaistaajuuden huomioiminen auttaa ehkäisemään ei-toivottua resonanssia ja parantamaan rakenteen käyttömukavuutta sekä turvallisuutta. (Talja & Toratti 2003, 3.)

Lattian värähtelyominaisuudet vaikuttavat lähinnä rakenteiden jännevälit, jäykkyys pituus tai poikittaissuunnassa, massa sekä käytetyt vaimentimet. Valmiiksi rakennetun lattian värähtelyominaisuuksia on vaikea parantaa jälkikäteen. Lattian värähtelyominaisuudet riippuvat sen rakenteesta, joten parhaan lopputuloksen saamiseksi, ne tulisi huomioida jo rakenteen suunnitteluvaiheessa. (Talja & Toratti 2003, 3.)

Yhteen suuntaan kantavan ja kahdelta sivulta tuetun rakenteen kuten kotelolattian alin ominaistaajuus lasketaan ominaistaajuuden kaavasta 1 (Lahtela 2020, 104).

$$F_{0,L} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (1)$$

missä L = välipohjan jänneväli [m]

$(EI)_L$ = välipohjan taivutusjäykkyys suunnassa L metrin levyistä kaistaa kohden [Nm²/m]

m = lattian oman painon ja pitkäaikaisen hyötykuorman pinta-alayksikköä kohden yhteen laskettu massa [kg/m²]

Mikäli välipohja tukeutuu pääkannattimiin, voidaan välipohjasysteemin alin resonanssitaajuus määrittää kaavalla 2 (Lahtela 2020, 105).

$$f_{0,D} = \frac{\pi}{2D^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_D}{m}} \quad (2)$$

missä $f_{0,D}$ = pääkannattimen alin resonanssitaajuus [Hz]

D = pääkannattimen jänneväli

$(EI)_D$ = pääkannattimien ja välipohjan kansirakenteen yhteinen taivutusjäykkyys suunnassa D metrin levyistä kaistaa kohti [Nm^2/m]

m = välipohjan paino + hyötykuorma 30 kg/m^2 [kg/m^2]

Välipohjan värähtely voidaan myös laskea taipuman perusteella. Taipuman perusteella laskiessa lasketaan ensin taipuma käyttämällä kaavaa 3, ja seuraavaksi taipuman perusteella ominaistajuus (f_1) käyttämällä kaavaa 4. (Lahtela 2020, 16.)

$$\omega = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI} \quad (3)$$

missä ω = taipuma laskettuna

q = rakenteelle kohdistuva kuorma [kg/m^2]

L = rakenteen mitta [m]

EI = taivutusjäykkyys

$$f_1 = 0,18 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{\omega}} \quad (4)$$

missä ω = taipuma

9,81 = putoamiskiihtyvyyys

3.3.2 Lattian taipuma

Värähtelyjen aistittavuutta arvioitaessa esineisiin välittyvän värähtelyn perusteella tarkastelun kohteena on lattian pinnan kallistuma, joka aiheutuu 1 kN:n paikallisesta kuormituksesta. Näiden kallistumien perusteella asetetut raja-arvot muodostavat perustan värähtelyluokitukselle. Tarkastelu voidaan suorittaa käsinlaskentamenetelmin tai FEM-analyysia hyödyntäen. Välipohjat jaotellaan viiteen värähtelyluokkaan raja-arvojen perusteella, ja suunnittelussa valittava

luokka määräytyy sen mukaan, kuinka paljon värähtelyä kohteessa voidaan sallia ilman toiminnallista tai aistimuksellista haittaa. (Talja ym. 2002, 4.)

Lattian värähtelyluokan määrittämiseen annetaan myös suosituksia kokeellisen arvioinnin tueksi. Luokittelu perustuu vertailuun mitattujen askelvärähtelyjen, paikallisista kuormista aiheutuvien taipumien ja kallistumien sekä ohjeellisten raja-arvojen välillä. (Talja ym. 2002, 4.)

Kun lattian ominaistajuus on korkea, arvioidaan 1 kN:n pistekuorman aiheuttama staattinen taipuma. Taipumalle voidaan laskea arvio neljältä sivulta tuetun, suorakaiteen muotoisen ortotrooppisen laatan perusteella. Laatan keskikohdan taipuma saadaan, kun sitä rasitetaan 1 kN voimalla saadaan, kaavalla 5 (Talja ym. 2002, 23.)

$$\delta_{\max} = \gamma \cdot \frac{F \cdot l^2}{(EI)_l} \quad (5)$$

jossa

$$\gamma = \frac{4}{\alpha \pi^4} \sum_m \sum_n \frac{1}{(2m-1)^4 + \beta \left(\frac{2n-1}{\alpha}\right)^4} \quad (6)$$

$$\text{missä } \alpha = \frac{b}{l} \text{ ja } \beta = \frac{(EI)_b}{(EI)_l} \quad (7)$$

Reunojen tuennan huomioon ottaminen ei juuri vaikuta tuloksiin, joten kaavan 5 sijaan voidaan käyttää kaavaa 8 (Talja ym. 2002, 23).

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right]^{1/4}} \quad (8)$$

Mikäli kaavan 5 mukainen laskettu taipuma ylittää pistekuormalla 1 kN kuormitetun korvauspalkin taipuman, käytetään vertailuarvona korvauspalkin perusteella määritettyä taipumaa kaavan 9 mukaisesti (Talja ym. 2002, 23).

$$\delta = \frac{Fl^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} \quad (9)$$

missä δ = taipuman suuruus

$F = 1000 \text{ N}$

l = välipohjapalkin jänneväli

EI = välipohjapalkin taivutusjäykkyys välipohjapalkkien suuntaisesti metrin leveyistä kaistaa kohden [Nm^2/m]

s = välipohjapalkkien k-jako [m]

Kaavassa muuttuja s kuvaa lattiapalkkien välistä etäisyyttä. Laskennassa on oletettu, että 600 mm:n etäisyydellä tapahtuva taipuma vastaa kuormitetun kohdan taipumaa. Jos lattiarakenne joustaa, paikallinen taipuma huomioidaan erikseen ohjeistuksen mukaan. Matalataajuisissa lattiarakenteissa rakenteiden yhteisvaikutus voidaan jättää huomioimatta, sillä mitoituskriteerit arvioidaan erikseen perusrakenteelle ja muille lattiarakenteille kuten korotus- tai kelluvalle lattialle.

Lattiapalkkien tukeutuessa pääkannattimiin, on taipumaan lisättävä pääkannattimien taipuma. (Talja ym. 2002, 24.)

3.3.3 Kiihtyvyys

Tarkasteltaessa värähtelyiden aistimuksia käytetään mittausmenetelmänä, joko taipumalle ominaista eli 1 kN rasituksesta johtuvaa paikallista taipumaa tai kiihtyvyydelle ominaista yhden henkilön aiheuttamaa kiihtyvyyttä. Taipumakriteerin ala-arvona käytetään 10 Hz, muussa tapauksessa käytetään kiihtyvyydekriteeriä. Mikäli huoneen suurin mitta on enintään 6 m, taulukossa 3 sallittuja kiihtyvyyksiä ja taipumarajoja voidaan nostaa alla olevan kaavan 10 avulla, joka toimii hyväksymiskriteerin k_L korotuskertoimena. (Talja ym. 2002, 20.)

Lattian värähtelyjen havaitsemista arvioidaan kehon tuntemusten perusteella, tarkastelussa käytetään joko 1 kN:n pistekuorman aiheuttamaa taipumaa tai yksittäisen henkilön kävelystä syntyvää pystysuuntaista kiihtyvyyttä. Taipumaa

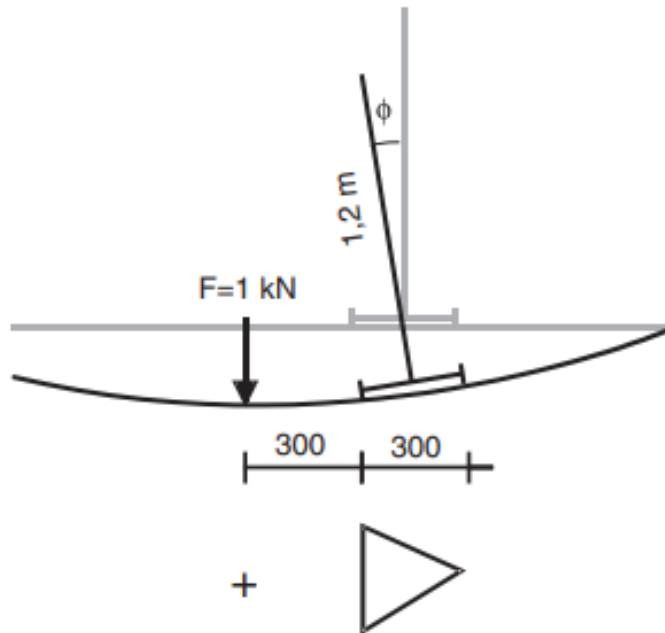
tarkastellaan silloin, kun rakenteen alin ominaistajuus ylittää 10 Hz. Tätä alemmilla taajuuksilla arviointi perustuu kiihtyvyyteen. (Talja ym. 2002, 20)

$$k_L = \frac{1}{0,318+0,114L} \quad (10)$$

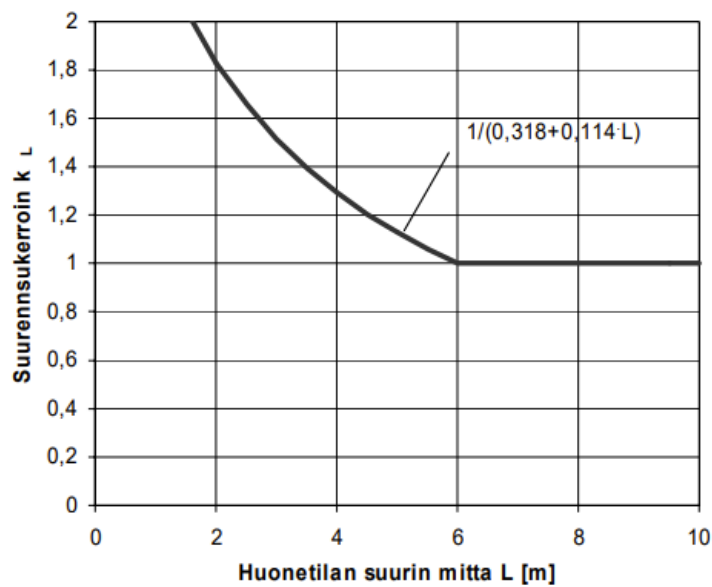
Värähtelyluokka	Kiihtyvyydkriteeri	Taipumakriteeri
A	$a \leq 0,03 \text{ m/s}^2$	$\omega \leq 0,12 \text{ mm}$
B	$a \leq 0,05 \text{ m/s}^2$	$\omega \leq 0,25 \text{ mm}$
C	$a \leq 0,075 \text{ m/s}^2$	$\omega \leq 0,5 \text{ mm}$
D	$a \leq 0,12 \text{ m/s}^2$	$\omega \leq 1,0 \text{ mm}$
E	$a > 0,12 \text{ m/s}^2$	$\omega > 1,0 \text{ mm}$

Taulukko 3. Raja-arvot välipohjan kiihtyvyydelle ja taipumalle (Lahtela 2020, 103).

Pienennystä ei käytetä yhdessä kallistumaehdon kanssa tai kun värähtelyt siirtyvät huoneistosta toiseen. Kertoimella otetaan pienet tilat huomioon siten, että huoneistojen mahdollinen kävelynopeus on keskimäärin pienempi kuin suuremmissa huoneistoissa. Nopeuden vuoksi kävelystä johtuva rasitus on pienempi. Kuvassa 2 on esitetty graafisesti kertoimen riippuvuus huoneen suurimmasta mitasta. (Talja ym. 2002, 19.)



Kuva 1. Paikallisesta kuormituksesta aiheutuva lattian pinnan kallistuma. (Talja ym. 2002, 19).



Kuva 2. Kertoimen k_L riippuvuus lattian pisimmästä mitasta. (Talja ym. 2002, 20).

3.3.4 Kiihtyvyysskriteeri matalataajuuksisilla lattioilla

lattian ollessa matalataajuuksinen, voidaan kiihtyvyyssamplitudi arvioida kaavasta 8 (Talja ym. 2002, 24).

$$a_{max} = \frac{R \cdot P}{W \cdot \zeta} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35f_0} \quad (11)$$

missä $P = 800 \text{ N}$

$e = 2,718$ (Neperin luku).

$R = 0,7$ eli pienennyskerroin, jolla otetaan huomioon, että resonanssi-ilmiö ei ehdi kehittyä täyteen potentiaaliinsa herätteen aikana.

$f_0 =$ välipohjan alin resonanssitaajuus [Hz].

W Määritetään kaavalla 12, kun välipohja tukeutuu joustama omiin tukiin kuten kantaviin seiniin, ja määritetään kaavalla 14, kun välipohja tukeutuu pääkannattimiin

$\zeta =$ vaimennussuhde, jolle käytetään arvoa 0,03

Kaavassa 11 vaimennussuhteena käytetään tavallisesti arvoa 0,03. Jos välipohjarakenteessa on vain vähän ei-kantavia osia, kuten kevyitä väliseiniä, jotka lisäävät lattian massaa, suositellaan pienempää vaimennusarvoa 0,02. Neljältä sivulta tuetun lattian värähtelyyn osallistuvan tehollisen massan W arviointi perustuu kaavaan 12. (Talja ym. 2002, 24)

$$W = m \cdot g \cdot b_{eff} \cdot L \quad (12)$$

missä $m =$ välipohjan paino + hyötykuorma 30 kg/m^2 [kg/m^2]

$g =$ putoamiskiihtyvyyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)

$b_{eff} =$ määritellään kaavalla 13

$L =$ välipohjapalkin jänneväli [m]

$$b_{eff} = 2,0 \cdot \left[\frac{EI_b}{EI_L} \right]^{1/4} \cdot L \quad (13)$$

missä $b_{eff} =$ värähtelevän alueen tehollinen leveys [m]

$(EI)_L =$ välipohjan taivutusjäykkyys suunnassa L metrin levyistä kaistaa kohden [Nm^2/m]

$(EI)_b =$ välipohjan taivutusjäykkyys suunnassa b metrin levyistä kaistaa kohden [Nm^2/m]

L = välipohjapalkin jänneväli [m]

b = välipohjan leveys suunnassa b

Laskennassa b_{eff} ehtona on kuitenkin, että se saa olla enintään $2/3$ lattiapalkkeihin nähden poikittaissuuntaisesta lattian kokonaisleveydestä. Laskennassa on huomioitava, jos suorakaiteen muotoisen lattian toinen lattiapalkkien suuntainen reuna ei ole tuettu. Tällöin kaavassa 10 käytettävä kerroin on 1,0 normaalin 2,0 sijaan. Jos taas lattiapalkit tukeutuvat pääkannattimiin, välipohjan värähtelyyn osallistuva tehollinen lattian massa määritetään kaavan 14 mukaisesti. (Talja ym. 2002, 25.)

$$W = \frac{w_L}{1+f_{0,L}^2/f_{0,D}^2} + \frac{w_D}{1+f_{0,D}^2/f_{0,L}^2} \quad (14)$$

missä W = värähtelyssä mukana oleva välipohjan tehollinen paino [N]

w_L = kaavan 12 mukaan määritelty W [N]

w_D = määritellään kaavalla 15 [N]

$f_{0,L}$ = määritellään alimman resonanssitaajuuden kaavalla 1 [Hz]

$f_{0,D}$ = määritellään alimman resonanssitaajuuden kaavalla 2 [Hz]

$$W_D = m \cdot g \cdot L_{\text{eff}} \cdot D \quad (15)$$

missä W_D = värähtelyssä mukana oleva välipohjan paino

m = välipohjan paino + hyötykuorma 30 kg/m^2 [kg/m^2]

g = maan vetovoiman kiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)

L_{eff} = määritellään kaavalla 16 [m]

D = pääkannattimien jänneväli [m]

$$L_{\text{eff}} = 1,6 \left[\frac{EI_L}{EI_D} \right]^{0,25} \cdot D \quad (16)$$

missä L_{eff} = värähtelevän alueen tehollinen leveys

$(EI)_L$ = välipohjan taivutusjäykkyys suunnassa L metrin levyistä kaistaa kohden [Nm^2/m]

$(EI)_D$ = pääkannattimien ja välipohjan kansirakenteen yhteinen taivutusjäykkyys suunnassa D metrin levyistä kaistaa kohden [Nm^2/m]

L = välipohjapalkin jänneväli [m]

Kaavassa kerroin L_{eff} saa kuitenkin olla enimmillään kaksi kolmasosaa pääkannattimiin nähden poikittaissuunnassa mitatusta lattian kokonaisleveydestä. Mikäli pääkannatin sijoittuu lattian vapaaseen reunaan, lattian jäykkyys $(EI)_L$ vähennetään puolella. (Talja ym. 2002, 25.)

3.4 Matala- ja korkeataajuuslattiat

Lattiarakenteiden värähtelyominaisuudet voidaan luokitella niiden alimman ominaistaajuuden perusteella matala- ja korkeataajuuksiin rakenteisiin. Matalataajuiset lattiat ovat tyypillisesti raskarakenteisia, ja niissä värähtelykäyttäytymistä hallitsee resonanssi-ilmiö. Matalataajuuslattioihin lukeutuu usein lattiat, joiden ominaispaino ylittää 300 kilogrammaa neliometriä kohden ja jänneväli on usein yli 10 metriä. Näissä rakenteissa alin ominaistaajuus on alle 10 hertsiä, mikä johtaa siihen, että lattian ominaisvärähtely hallitsee rakennetta. Tällöin yksittäisten askelten aiheuttamat värähtelyt peittyvät ja ovat vaikeasti erotettavissa. Ominaisvärähtely saattaa jatkua pitkään ja koetaan usein epämiellyttävänä tai häiritsevänä, erityisesti silloin kun se osuu kehon herkkyysalueelle. (Talja & Toratti 2003, 4–5.)

Korkeataajuiset lattiat, joihin puupalkkilattiatkin lukeutuvat, ovat yleensä kevyempiä, painoltaan alle 300 kilogrammaa neliometriä, ja niiden jännevälit ovat selvästi lyhyempiä kuin matalataajuisissa rakenteissa. Näiden rakenteiden alin

ominaistaajuus ylittää 10 hertsiä, minkä seurauksena yksittäisten askelten aiheuttamat värähtelyt havaitaan selkeästi erillisinä iskuina. Vaikka nämä iskut ovat lyhytkestoisia, niiden toistuvuus ja odottamattomuus voivat aiheuttaa ihmisessä epämukavuutta tai häiriöitä. (Talja & Toratti 2003, 4–5.)

Matalataajuisilla lattioilla yhteisvaikutusta ei tarvitse huomioida. Annetut mitoituskriteerit tarkastellaan erikseen peruslattialle sekä korotus- tai kelluvalle lattialle. Korkeataajuisilla lattioilla taipuma- ja kallistumisehdossa on sen sijaan arvioitava lattiarakenteen eri osien ja pintarakenteen eri materiaalikerrosten yhteisvaikutus. (Talja ym. 2002, 25.)

3.5 Värähtelyn hallinta

Värähtelyominaisuuksiin vaikuttaa lattiatyypin, mittojen ja tukirakenteiden lisäksi muutkin asiat. Niihin vaikuttavat myös rakennekerrosten joustot, kerrosten väliset liitokset sekä valmistus- ja asennusvaiheen epätarkkuudet. Lattiarakenteen eri kerrosten kontaktipinnat sekä liitokset tukirakenteisiin on suunniteltava mahdollisimman jäykiksi. Erityisesti on varmistettava, että jäykkyys säilyy riittävänä kävelystä aiheutuvien, ihmisen painosta johtuvien kuormitusten alla. (Talja ym. 2002, 15.)

Välipohjien värähtelyn suunnittelussa liitosten jäykkyyden on säilyttävä myös pidemmällä aikavälillä riippumatta altistumiskertojen määrästä toistuville mitoituskormituksille. Pitkäaikaisessa toimivuudessa on otettava huomioon myös rakennekerrosten väliset kontaktiongelmien, jotka voivat johtua esimerkiksi materiaalien eroista virumisesta, lämpölaajenemisesta tai kosteuskäyttäytymisestä. Koska haitalliset värähtelyamplitudit ovat usein vain muutaman kymmenesosamillimetrin suuruisia, pienetkin materiaalien suoruus-, kontakti- tai asennusvirheet voivat merkittävästi heikentää lattian värähtelyominaisuuksia. (Talja ym. 2002, 15.)

Ongelmallisesti värähteleville lattioille löytyy useita vaihtoehtoja niiden värähtelyn hallinnalle. Vaimennusta voidaan lisätä esimerkiksi erillisten vaimentimien

avulla, tämä lähestymistapa on usein sekä teknisesti monimutkainen että kustannuksiltaan huomattava. Sen sijaan rakenteen huolellinen yksityiskohtasuunnittelu, kuten jäykistäminen, ristikoolaus tai liitosten toiminnan optimointi, voi vaikuttaa olennaisesti värähtelykäyttäytymiseen ja parantaa rakenteen kykyä ottaa vastaan värähtelyä. (Vesänen & Viljakainen 2015, 116.)

Värähtelyn hallinnassa voidaan myös käyttää vaimentimia. Vaimennuksella voidaan vaikuttaa sekä pakotettuun että vapaaseen värähtelyyn siten, että mitä enemmän rakenteessa on vaimennusta, niin sitä nopeammin värähtelyt vaimenevat. Materiaalin vaikutus rakenteeseen on usein vähäinen, ja suurin osa vaimennuksesta syntyy rakenteiden kitkasta, johon vaikuttavat liitokset, tuenta ja detaljit. (Vesänen & Viljakainen 2015, 113.)

Vapaasti tuetuille palkeille vaimennus on noin 1 % luokkaa, kun taas jäykille tuenta voi nostaa sen 8 %:iin. Puurakenteisten lattioiden tehollinen vaimennus vaihtelee 1–3 % rakenteesta ja värähtelystä riippuen. Massiiviset esineet voivat lisätä vaimennusta selvästi kevyissä rakenteissa. Liimapuurakenteiden kevyen olemuksen vuoksi, niillä yksin ole suurta vaimennuskykyä, ellei mukana ole esimerkiksi betonimassaa tai raskaita kuormia. (Vesänen & Viljakainen 2015, 113.)

4 Välipohjien ominaistajuusmittaukset ja vertailulaskennat

4.1 Koekappaleen rakentaminen

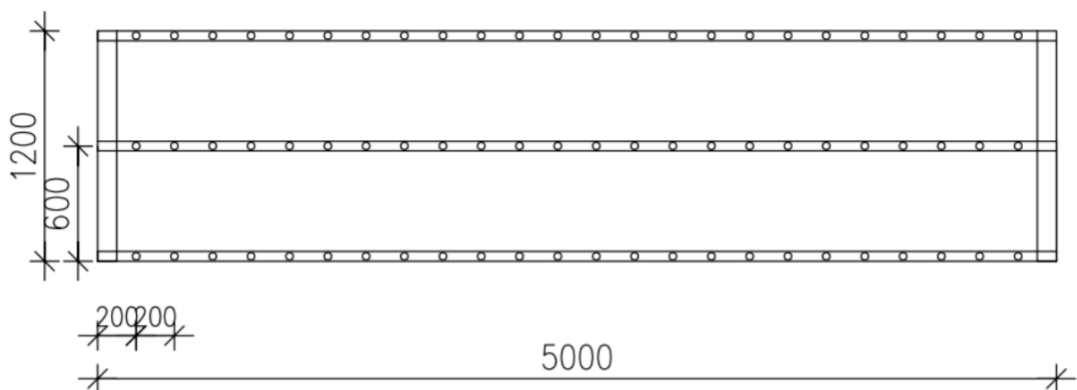
Koekappale rakennettiin laboratorio-olosuhteissa käyttäen Karelia-ammattikorkeakoulun tiloja. Kaikki rakentamiseen käytetyt materiaalit on hankittu Karelian toimesta. Koekappale oli kotelolaatta, joka koostui seitsemästä pääkomponentista, joita olivat neljä kerto-Q levyä. Levyjen lisäksi rakennelmaan kuului kolme 5 metriä pitkää viilupuupalkkia.

Koekappaleen pohjassa sijaitsevat kerto-Q levyt kiinnitettiin 5 mm ruuveilla kiinni rakenteen sisälle jääviin viilupuuelementteihin 200 millimetrin jaolla.

Päällä olevien levyjen kiinnittimien määrä vaihteli koko tutkimuksen ajan, mikä oli yksi keskeinen osa tutkimusta. Koekappale rakennettiin CLT-palkkien päälle, joiden päällä se myös mitattiin. CLT-palkit tarjosivat myös apua kappaleen rakennusvaiheessa, jolloin ne toimivat niin sanottuina pukkeina ja mahdollistivat rakennelman helpon käsittelyn.

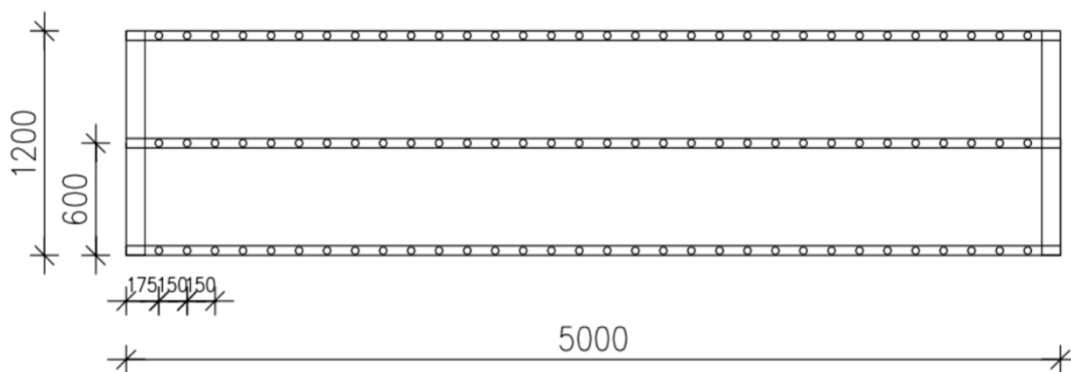
4.1.1 Rakenteen mitat

Rakenteessa käytettiin neljää Kerto-Q havuvanerilevyä rakenteen molemmilla puolilla. Levyt olivat mitoiltaan 2400 mm pitkiä ja 1200 mm leveitä. Levyjen välissä oli kolme 5 metriä pitkää 50 x 200 mm viilupuupalkkia. Rakenteen pohja koostui kahdesta levystä, jotka olivat kiinnitetty koko mittauksen ajan vakiokiinnityksellä, jossa kiinnittimet olivat jaoteltu 200 mm välein 5 mm pitkillä ruuveilla välipohjapalkkeihin. Yläpuolinen rakenne koostui kahdesta samanlaisesta levystä, mutta erona alapuoliseen levyyn oli, että levyn kiinnittimien kiinnitysväli vaihteli 150 mm ja 450 mm välein riippuen koetilanteesta. Rakenteen lopulliset mitat olivat 5 metriä pituutta ja 1,2 metriä leveyttä. Sekä ylä- että alapuolen levyt olivat kooltaan 4800 × 1200 mm.



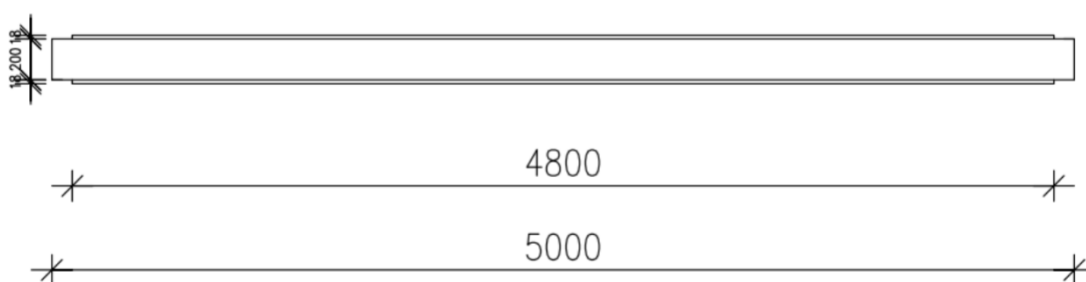
Kuva 3. Rakenne alapuolelta. Ruuvien jakoväli 200 mm.

Alapuolella rakenne kuvattuna sen yläpuolelta.



Kuva 4. Rakenne yläpuolelta. Ruuvien jakoväli 150 mm.

Alapuolella rakenne kuvattuna rakenteen sivulta.



Kuva 5. Rakenne sivusta.

4.1.2 Rakennusprosessi

Ensimmäisessä vaiheessa koekappaleen kasaaminen aloitettiin asettamalla puupalkit työskentelykorkeudelle CLT-palkkien päälle. Rakenteen kasaaminen palkkien päälle helpotti käsittelyä ja mahdollisti rakenteen tarkan kokoamisen (kuva 6). Käytössä olleet puupalkit olivat mitoiltaan 50 x 200 mm.

Seuraavaksi palkit lyhennettiin haluttuun pituuteen suunnitelmien mukaisesti. Lyhentäminen tapahtui akkukäyttöistä pyörösahaa ja suorakulmaviivainta käyttäen. Mittaamiseen ja merkitsemiseen käytimme rullamittaa ja lyijykynää. Mittaamalla ja merkitsemällä leikkauskohta varmistettiin, että jokainen palkki oli täsmälleen viisi metriä pitkä (kuva 7). Rakenteiden oikeilla mitoilla pyrittiin varmistamaan, ettei myöhemmin mittavaiheessa ilmenisi epätarkkuuksia tai virheellistä dataa rakenteen rakennusvaiheen pohjalta.

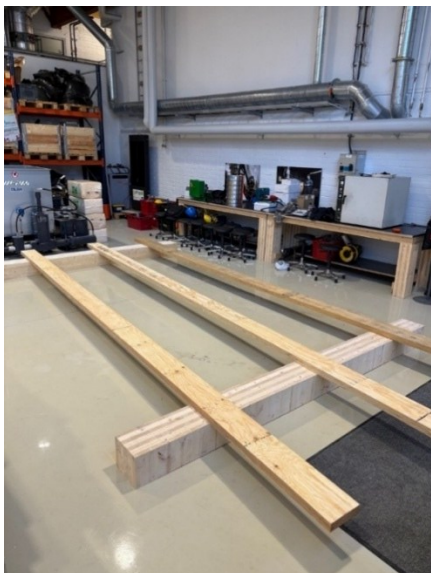
Kantavien palkkien ollessa mitassaan, lisäsimme pohjaan kiinnitettävät havuunerilevyt. Kuvassa 8 näkyy, kuinka ensimmäinen pohjalevy asetettiin huolellisesti palkkien päälle. Levy asetoitiin niin, että se kattoi koko rakenteen leveyden ja asetui suoraan palkkirungon yläpuolelle palkkien mukaisesti. Levyn asetoiminen vaati tarkkuutta, jotta levy pysyi suorassa ja oikealla paikallaan myöhemmää kiinnitystä varten.

Kuvassa 9 pohjalevyt on asetettu paikoilleen koko rakenteen matkalle. Levyjen ollessa paikallaan, niiden suoruuus ja liitosten kohdistus varmistettiin vielä kerran mittaamalla, jotta levyt olisivat kohdillaan ennen kiinnitystä.

Kohdistamisen jälkeen kiinnitimme levyt palkkeihin. Rakenteen alapuolisen levyn kiinnittiminä toimivat 5 mm pitkät ruuvit, jotka olivat asennettu 200 mm välein koko matkalta levyjen läpi puupalkkeihin. Ruuvien tiheällä jaolla varmistimme levyjen tukevan kiinnityksen ja estimme niiden liikkumisen rakenteen sisällä myöhemmässä käytössä tai mittausten aikana.

Seuraavaksi rakenne käännettiin ympäri, jolloin kiinnitetyt levyt jäivät alapuolelle. Tämän jälkeen palkkien päälle asennettiin EPDM-kumikaistat. Kumikaistat toimivat rakenteessa vaimentavana elementtinä värähtelyä vastaan. Kaistat asennettiin siten, että ne sijaitsivat keskellä kutakin palkkia ja kulkivat palkin päästä päähän.

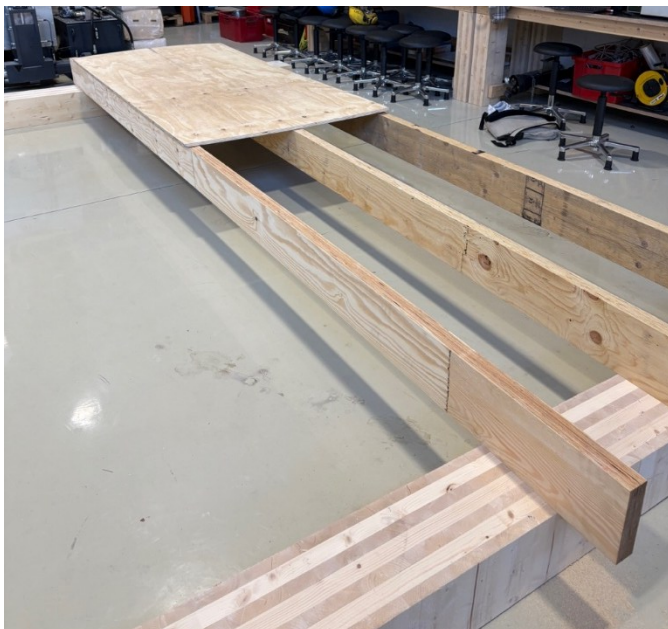
Lopuksi vielä asensimme kansilevyt kiinni palkkien päälle varoen, ettei kumikaistat liikahtaa asetetuilta paikoiltaan. Kansilevyt kiinnitimme kahdella eri ruuvi-koollla ja -jaolla kiinni alla kulkeviin palkkeihin riippuen mittaustilanteesta. Ensimmäinen mitattava variaatio rakennelmasta oli 150 mm ruuvijaolla ja EPDM-kais-talla toteutettu yhdistelmä (Kuva 10).



Kuva 6. Puupalkit CLT-palkkien päällä (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 7. Palkit lyhennettiin viiteen metriin (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 8. Pohjalevy palkkien päällä (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 9. Pohjalevyt palkkien päällä (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 10. Alusruuvit. 5 mm k200 (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 11. Rakenne käännetty ympäri ja EPDM-eristeet asennettu (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 12. Koekappaleen viimeisten ruuvien kiinnityksiä (Kuva: Jaakko Hokkanen).

4.2 Mittaus ja mittaussuunnitelma

Mittauksissa selvitimme erilaisten kiinnitysmenetelmien vaikutukset rakenteen värähtelylle. Mittaustuloksiin vaikuttivat kolme eri muuttujaa rakenteessa, joita ovat ruuvien koko, ruuvijako ja EPDM-eristyskumi.

Koekappaletta muokattiin niin, että eri rakennevariaatioita tuli olemaan kahdeksan kappaletta. Jokaista variaatiota mitattiin kahdesta eri kohdasta ja molemmille mittapisteille tehtiin kaksi mittausta eri suunnista.

Variaatio	EPDM-kaista	Ruuvien halkaisija	Ruuvausväli
1	Kyllä	5 mm	150 mm
2	Kyllä	5 mm	450 mm
3	Kyllä	6 mm	150 mm
4	Kyllä	6 mm	450 mm
5	Ei	5 mm	150 mm
6	Ei	5 mm	450 mm
7	Ei	6 mm	150 mm
8	Ei	6 mm	450 mm

Taulukko 3. Mitattavat rakennevariaatiot.

4.2.1 Mittausmenetelmät

Mittausmenetelmänä käytimme heel-drop-menetelmää. Heel-drop-menetelmä on käytännöllinen ja yleisesti käytetty tapa puurakenteisten lattioiden värähtelyominaisuuksien arviointiin. Menetelmässä tutkija tuottaa lattiaan iskuherätteen pudottautumalla kantapäilleen seisaaltaan. Tämä yksinkertainen, mutta tehokas kuormitusmenetelmä mahdollistaa rakenteen luonnollisen vasteen analysoinnin ilman raskasta testauslaitteistoa. Kyseinen menetelmä soveltuu erityisen hyvin kenttäolosuhteisiin, ja sen avulla voidaan tunnistaa lattian ominaistajuus sekä arvioida vaimennusominaisuuksia ja käyttäjämukavuutta. (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 47.)

4.2.2 Mittapisteiden valinta

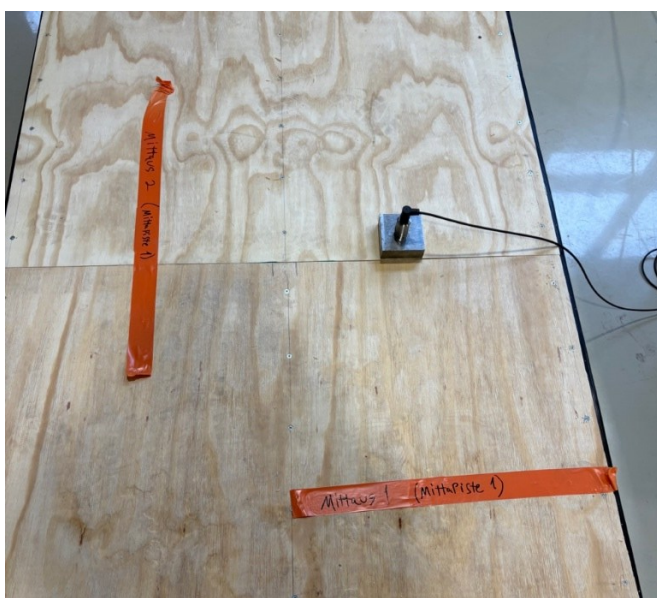
Mittapisteiden valinnassa huomioitiin mahdolliset riskit, jotka saattoivat vaikuttaa mittaustulosten todenmukaisuuteen. Yksi mahdollinen riski oli, että koekappaleessa olevat 50 mm x 200 mm välipohjapalkit vaikuttaisivat värähtelyyn

mittausten kannalta ei toivotulla tapaa niiden kohdalla, joten värähtelyä mittaava anturi oli sijoitettava kohdille, joissa palkkeja ei kulkenut alapuolella.

Kuvassa 13 näkyy ensimmäinen mittapiste, joka sijaitsee 30 cm rakenteen reunasta, sekä on rakenteen keskellä. Anturi ei kuitenkaan sijaitse kansilevyjen risteyskohdassa, vaan on asetettu kokonaan toisen levyn päälle, jotta värähtelyn siirtyminen levytä levyllä ei vaikuttaisi virheellisesti mittaustuloksiin.

Tutkimuksessa halusimme aiheuttaa anturille herätteen useasta eri suunnasta ja täten käytämme kahta eri herätteenantokohtaa, jotka aiheuttavat herätteen 90 astetta eri suunnasta toisiinsa nähden. Sijainnit herätteenantokohdille näkyvät kuvassa 13 merkattuna oranssilla teippinauhalla ja tekstillä mittausta 1 ja mittausta 2. Molemmat sijainnit ovat 50 cm päässä anturista siitä syystä, että mittaushjelmiston valmistaja oli kehottanut tätä etäisyyttä.

Toinen mittauspiste sijaitsee toisen kansilevyn keskipisteessä samassa linjassa kuin ensimmäinen mittapiste (kuva 14). Myös toiseen mittapisteeseen toimii sama käytäntö, että heräte annetaan kahdesta eri suunnasta, jotka sijaitsevat 50 cm anturista ja 90 asteen erolla anturiin nähden. Nämä kaksi eri mittauspistettä mahdollistavat havaitsemaan värähtelyä tehokkaimmin rakenteessa. Olisi ollut mahdollista lisätä enemmän mittapisteitä, mutta tämä olisi vaatinut enemmän resursseja projektille.



Kuva 13. Anturi mittapisteessä 1 (Kuva: Jaakko Hokkanen).



Kuva 14. Anturi mittapisteessä 2 (Kuva: Jaakko Hokkanen).

4.2.3 Mittauskalusto

Tutkimuksessa käytetty mittausohjelmisto oli saksalaisvalmisteinen Manfred Weberin VibroMetra VM-FFT+. Kyseisellä ohjelmistolla pystyy selvittämään mitattavan objektin värähtelykiihtyvyyden spektrin, värähtelynopeuden ja värähtelysiirtymän. Monipuolisen toiminnallisuutensa takia se soveltuu useisiin käyttökohteisiin, mutta teollisuudessa sitä käytetään laakereiden tutkimuksissa. Tässä opinnäytetyössä ohjelmistoa käytettiin ominaistajuuden, sekä kiihtyvyyden mittaamiseen. Ohjelmisto on helppokäyttöinen.

Käytössämme oli myös VibroMetran USB-mittausmoduuli M312B johon kiinnitettiin kiihtyvyyssanturi. Kiihtyvyyssanturi sijoitettiin kiinni magneettialustaan, joka asetettiin haluttuun mittapisteeseen rakenteessa (Kuva 15). Herätteen tullessa

kiihtyvyyssanturi siirsi tiedon mittausmoduulille, joka antoi mittauksen datan tietokoneessa olevaan VM-FFT+ ohjelmistoon, josta dataa voitiin tarkastella.

VM-FFT+ ohjelmisto oli ladattavissa tietokoneelle valmistajan verkkosivuilla. Latauksen jälkeen, kun ohjelman avaa, se tarjoaa havaitut laitteet, jotka siihen voi yhdistää ja tässä tapauksessa havaitut laitteet olivat mittausanturi ja M312B USB-mittausmoduuli johon anturi kiinnittyy. Laitteiden valinnan jälkeen ohjelmisto pyytää valitsemaan halutun instrumentin, joka tässä tutkimuksessa oli VM-FFT+. Valinnan jälkeen instrumentti aukeaa ja testin pystyy suorittamaan. Instrumentti tarjoaa asetuksia, joista pystyy säätämään instrumentin toimintoja ja yksiköitä mittaukseen sopivaksi. Tässä tutkimuksessa esimerkiksi olennaista oli vaihtaa kiihtyvyyden yksikkö mm/s^2 muotoon. Mittauksen aikaikkuna asetettiin kymmeneen sekuntiin herätteen annosta.

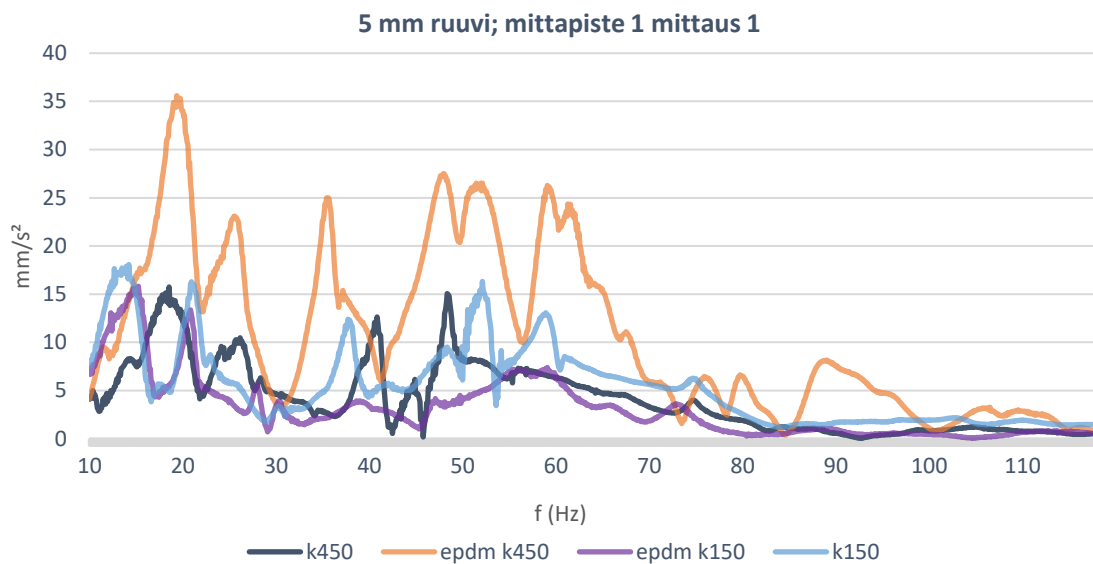


Kuva 15. Käynnissä oleva mittaus (Kuva: Jaakko Hokkanen).

5 Tutkimuksen tulokset

5.1 Tulokset

Tulokset työlle saimme VM-FFT+ ohjelmistosta graafisesti, sekä data muodossa. Mitatut tulokset kirjattiin laitteelta suoraan Excel-taulukkoon mittapiste ja mittauskohtaisesti. Tulosten pohjalta mitatuille arvoille loimme ”graafit”, jotka havainnollistivat mittaustuloksia. Lisäksi listasimme kunkin muuttujan kuten ruuvijaon tai kumikaistan käytön tulokset mittaushetkellä taulukkoon, jonka avulla tietoa oli helpompi tulkita vielä tarkemmin (Kuvio 1).



Kuvio 1. 5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 1.

Koetilanne	Ruuvijako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s^2)
epdm k450	450 mm	Kyllä	17 Hz, 43 Hz, 60 Hz	$\sim 36 \text{ mm/s}^2$
k450	450 mm	Ei	18 Hz, 35 Hz, 45 Hz	$\sim 16 \text{ mm/s}^2$
k150	150 mm	Ei	16–20 Hz	$\sim 15 \text{ mm/s}^2$
epdm k150	150 mm	Kyllä	17–19 Hz	$\sim 13 \text{ mm/s}^2$

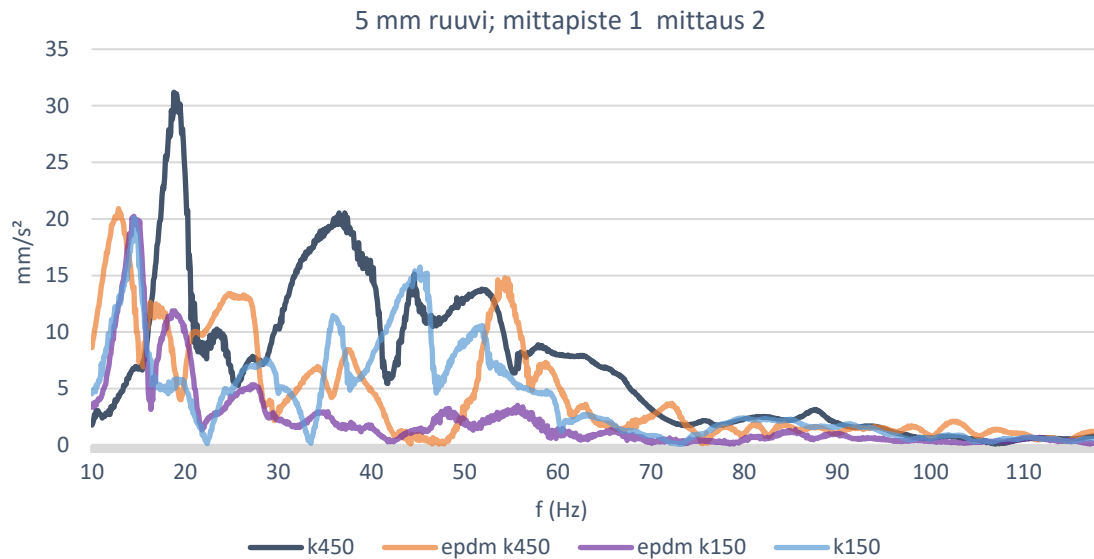
Taulukko 4. 5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 1.

Rakenteessa, jossa käytetään EPDM-kaistaa ja harvaa ruuvijakoa (EPDM k450), vaste oli korkein. Tässä tapauksessa huippuarvot kohosivat jopa 36 mm/s^2 tasolle ja esiintyivät laajalla taajuusalueella, suurimpina piikkeinä kohdissa 17 Hz, 43 Hz ja 60 Hz. Tämä viittaa siihen, että EPDM ei toiminut tehokkaasti vaimentimena, vaan päinvastoin, se jopa korosti värähtelyä. Tämä voi johtua materiaalin matalasta jäykkyydestä, joka yhdessä harvan kiinnityksen kanssa muodosti melko heikon kokonaisuuden jäykkyyden puolesta.

Sama ruuvijako ilman EPDM-kaistaa (k450) paransi tilannetta selvästi. Huippuarvot jäivät noin 16 mm/s^2 tasolle, ja vastekin oli tasaisempi. Tästä voitiin päätellä, että rakenteellinen yksinkertaisuus toi mahdollisesti etua, kun mukana ei ollut pehmyttä EPDM-kumimateriaalia.

Tiheämpi ruuvijako ilman EPDM-kaistaa (k150) johti vielä matalampaan vasteseen, noin 15 mm/s^2 , ja huiput rajoittuvat alemmalle taajuusalueelle (16–20 Hz). Tämä kertoi, että rakenteen suurempi jäykkyys onnistui hillitsemään resonanssivasteita tehokkaasti.

Paras tulos saatiin yhdistelmällä kumikaista k150 ruuvijakoon. Yhdistelmällä EPDM-kaista toimi yhdessä tiheän ruuvijaon kanssa odotetulla tapaa parhaiten. Tässä kokoonpanossa huippuarvot jäivät matalimmiksi ($\sim 13 \text{ mm/s}^2$), ja taajuusvaste oli tasainen ilman voimakkaita resonanssipiikkejä. Malli tukee käsitystä, että vaimennusmateriaalin tehokkuus edellyttää riittävää mekaanista tukea. Kun rakenne on riittävän jäykkä, jolloin EPDM voi toimia sitä täydentävänä värähtelyä hillitsevänä elementtinä.



Kuvio 2. 5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 2.

Koetilanne	Ruuvijako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s ²)
k450	450 mm	Ei	18 Hz, 45 Hz	~30 mm/s ²
epdm k450	450 mm	Kyllä	20–25 Hz	~14 mm/s ²
k150	150 mm	Ei	20–50 Hz	~15 mm/s ²
epdm k150	150 mm	Kyllä	15–25 Hz	~10 mm/s ²

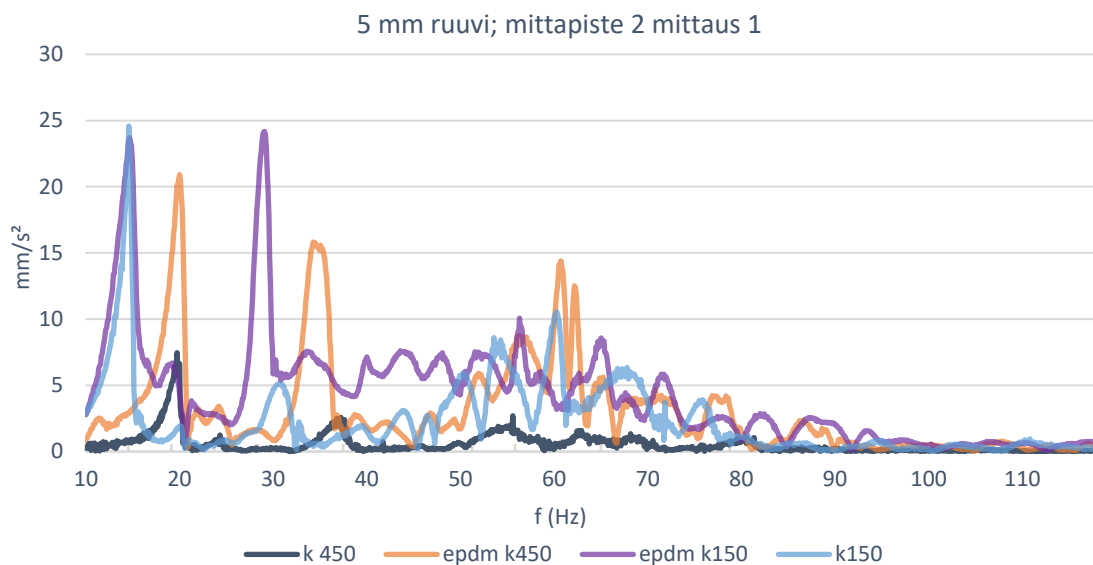
Taulukko 5. 5 mm ruuvi; mittapiste 1, mittaus 2.

Rakenne, jossa käytettiin 450 mm ruuvijakoa ilman EPDM-kaistaa (k450), tuotti selvästi suurimmat huippuarvot kiihtyvyydessä (30 mm/s²) ja esiintyi kaksi merkittävää resonanssitaajuutta (18 Hz ja 45 Hz). Tämä viittaa rakenteen heikkoon vaimennuskykyyn sekä suureen värähtelyherkkyyteen.

EPDM-kaistan lisääminen samaan ruuvijakoon (EPDM k450) laski huippuarvoja hieman (~14 mm/s²) ja siirsi resonanssialuetta hieman ylemmäs (20–25 Hz), mikä osoittaa lievää parannusta värähtelyn hallinnassa.

Tiheämmällä ruuvijaolla (150 mm) ilman EPDM-kaistaa (k150) kiihtyvyyden huippuarvo jäi kohtuullisen matalaksi ($\sim 15 \text{ mm/s}^2$) ja vaste tasaantui. Tämä osoittaa, että tiheä ruuvijako itsessään parantaa rakenteen värähtelyominaisuuksia merkittävästi.

Parhaat tulokset saavutettiin yhdistämällä tiheä ruuvijako ja EPDM-kaista (EPDM k150). Tässä kokoonpanossa resonanssi siirtyi alemmaksi (15–22 Hz), ja huippuarvo jäi noin 10 mm/s^2 :iin. Rakenteen vaste oli tasaisin ja värähtelyvaimennus tehokkain.



Kuvio 3. 5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 1.

Koetilanne	Ruuvijako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s^2)
k450	450 mm	Ei	20–25 Hz	$\sim 5 \text{ mm/s}^2$
epdm k450	450 mm	Kyllä	20, 30, 60 Hz	$\sim 20 \text{ mm/s}^2$
k150	150 mm	Ei	18–25 Hz	$\sim 25 \text{ mm/s}^2$
epdm k150	150 mm	Kyllä	20–30 Hz	$\sim 23 \text{ mm/s}^2$

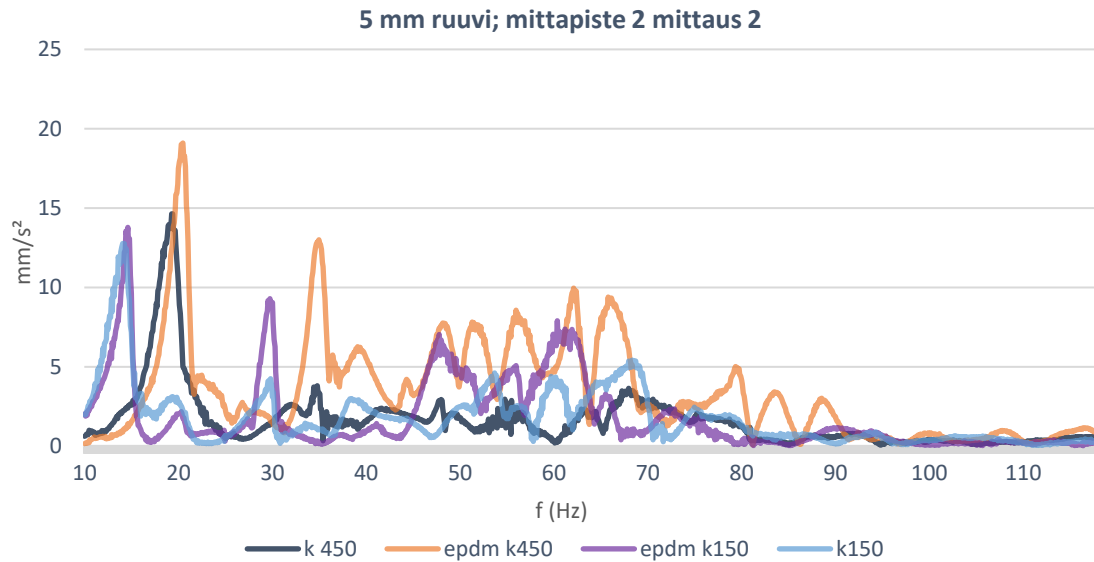
Taulukko 6. 5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 1.

Rakenteessa k450 (ruuvijako 450 mm, ilman EPDM-kaistaa) saavutettiin pienin huippuarvo ($\sim 5 \text{ mm/s}^2$), ja vaste jakautui kahdelle taajuusalueelle (20–25 Hz ja 60–80 Hz). Tämä rakenne tuotti parhaan vasteen tasaisuuden, vaikka se ei vaimentanut korkeita huippuja tehokkaasti. Rakenne myös poikkesi muista kiihtyvyyden alhaisten arvojen puolesta huomattavasti, mikä voi viitata vikaan laitteessa tai poikkeamaan mittauksessa.

EPDM-kaistan lisääminen tähän rakenteeseen (EPDM k450) johti huomattavasti korkeampiin vasteisiin ($\sim 26 \text{ mm/s}^2$) taajuusalueella 20–30 Hz. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että EPDM-kaista ei tässä kokoonpanossa toiminut odotetulla tavalla, ja sen vaimennusvaikutus jäi vähäiseksi tai rakenteellinen yhteensopivuus heikensi toimintaa.

Rakenteessa k150 (tiheä ruuvijako ilman EPDM-kaistaa) vasteet olivat selvästi voimakkaampia ($\sim 25 \text{ mm/s}^2$) taajuusalueella 20–25 Hz. Vaste oli kuitenkin jyrkempi ja rajoittui suppeammalle taajuusalueelle, mikä viittaa resonanssin keskittymiseen mutta myös mahdolliseen jäykempään rakenteeseen.

Paras värähtelyvaimennus havaittiin rakenteessa EPDM k150 (150 mm ruuvijako ja EPDM-kaista). Tässä huippuarvo ($\sim 23 \text{ mm/s}^2$) oli edelleen suuri, mutta taajuusvaste tasoittui ja huiput jakautuivat laajemmalle alueelle (20–30 Hz). Lisäksi korkeita yksittäisiä huippuja ei havaittu, mikä viittaa rakenteen tasaisempaan vasteeseen ja parempaan vaimennuskykyyn.



Kuvio 4. 5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 2.

Koetilanne	Ruuvija-ko	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s ²)
k450	450 mm	Ei	18–22 Hz	~10–14 mm/s ²
epdm k450	450 mm	Kyllä	17–20 Hz, 30–60 Hz	~20–35 mm/s ²
k150	150 mm	Ei	21–23 Hz	~12–16 mm/s ²
epdm k150	150 mm	Kyllä	19–22 Hz, 30–60 Hz	~12–15 mm/s ²

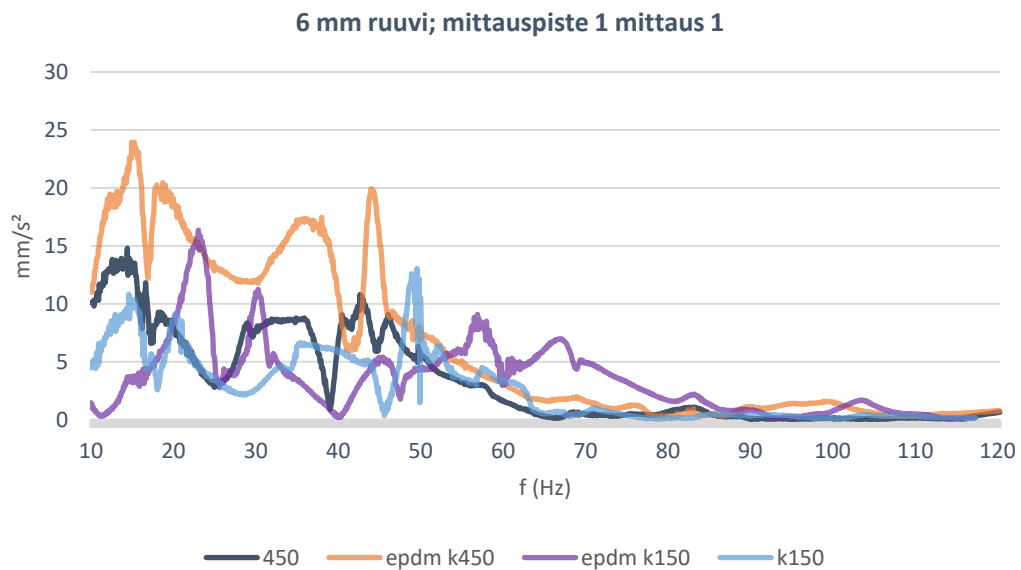
Taulukko 7. 5 mm ruuvi; mittapiste 2, mittaus 2.

k450-rakenteessa (ruuvijako 450 mm ilman EPDM-kaistaa) vaste oli tasainen, ja suurimmat taajuushuiput sijoituivat alueelle 18–22 Hz. Huippuarvot olivat matalia (~10–14 mm/s²), mikä viittaa rakenteen hyvään vaimennukseen ilman merkittäviä resonanssipeikkoja.

EPDM k450-rakenteessa (450 mm ruuvijako EPDM-kaistalla) vasteessa esiintyi useita korkeita huippuja, erityisesti taajuuksilla 17–20 Hz ja 30–60 Hz. Huippuarvot nousivat jopa 35 mm/s² kiihtyvyyden puolesta. Tulokset osoittavat, että EPDM-kaista ei tässä variaatiossa vaimentanut värähtelyä tehokkaasti, vaan saattoi jopa lisätä paikallista värähtelyherkkyyttä.

k150-rakenteessa (150 mm ruuvijako ilman EPDM-kaistaa) mitattiin taajuusalueeksi 21–23 Hz ja huippuarvoiksi noin 12–16 mm/s². Rakenteen vaste oli jyrkkä ja vähemmän hajautunut, mikä kertoo jäykästä rakenteesta ja korkeammasta ominaistaajuudesta.

EPDM k150-kokoonpano (150 mm ruuvijako ja EPDM-kaista) tuotti tasaisimman vasteen. Resonanssihuiput sijoituivat alueille 19–22 Hz ja 30–60 Hz, ja huippuarvot jäivät tasolle ~10–15 mm/s². Tämä yhdistelmä osoittautui selvästi tehokkaammaksi kuin epdm k450, sillä vaimennus toimi paremmin tiheämmän ruuvijaon kanssa.



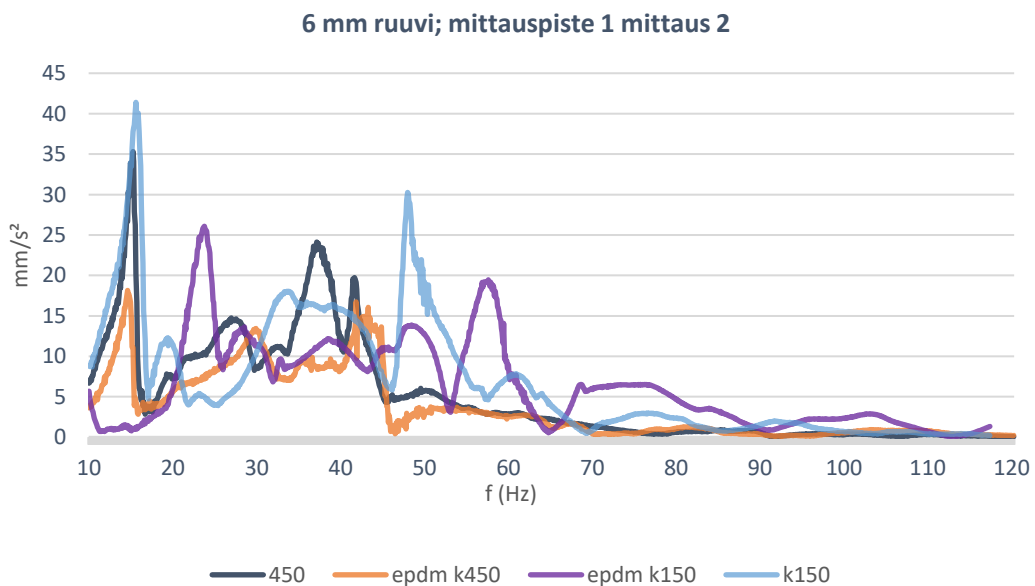
Kuvio 5. 6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 1.

Koetilanne	Ruuvi-jako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s ²)
450	450 mm	Ei	18–22 Hz	~10 mm/s ²
epdm k450	450 mm	Kyllä	18 Hz, 30–50 Hz	~24 mm/s ²
k150	150 mm	Ei	17–23 Hz	~14 mm/s ²
epdm k150	150 mm	Kyllä	20 Hz, 40–60 Hz	~12 mm/s ²

Taulukko 8. 6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 1.

Tässä mittauksessa siirryttiin isompaan ruuvikokoon. Tulosten perusteella kiinnitysjaolla ja EPDM-kaistan käytöllä oli selvä vaikutus värähtelytasoon eri taajuuksalueilla. Perusratkaisu ilman EPDM-kaistaa ja 450 mm ruuvijaolla antoi tasisimman vasteen noin 18–22 Hz:n taajuuksalueella, ja sen huippuarvo oli noin 10 mm/s². Kun samaan rakenteeseen lisättiin EPDM-kaista (EPDM k450), vasteeseen ilmaantui useita voimakkaita piikkejä 30–50 Hz:n alueella ja huippuarvo nousi 24 mm/s²:iin, mikä osoittaa vaimennuksen heikentyneen.

Tiheämmällä ruuvijaolla (150 mm) rakenteesta saatiin jäykempi. Ilman EPDM-kaistaa rakenne käyttäytyi odotetusti, mutta värähtely ei merkittävästi vähentynyt, ja huippuarvo oli noin 14 mm/s². EPDM-kaistan lisääminen tähän kokoonpanoon (EPDM k150) johti hieman parempaan vaimennukseen, ja huippuarvo jäi 12 mm/s²:iin. Kokonaisuudessaan havaittiin, että EPDM-kaista ei automaattisesti parantanut vaimennusominaisuuksia, ja sen vaikutus riippui merkittävästi rakenteen muista ominaisuuksista, kuten ruuvijaosta ja jäykkyydestä.



Kuvio 6. 6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 2.

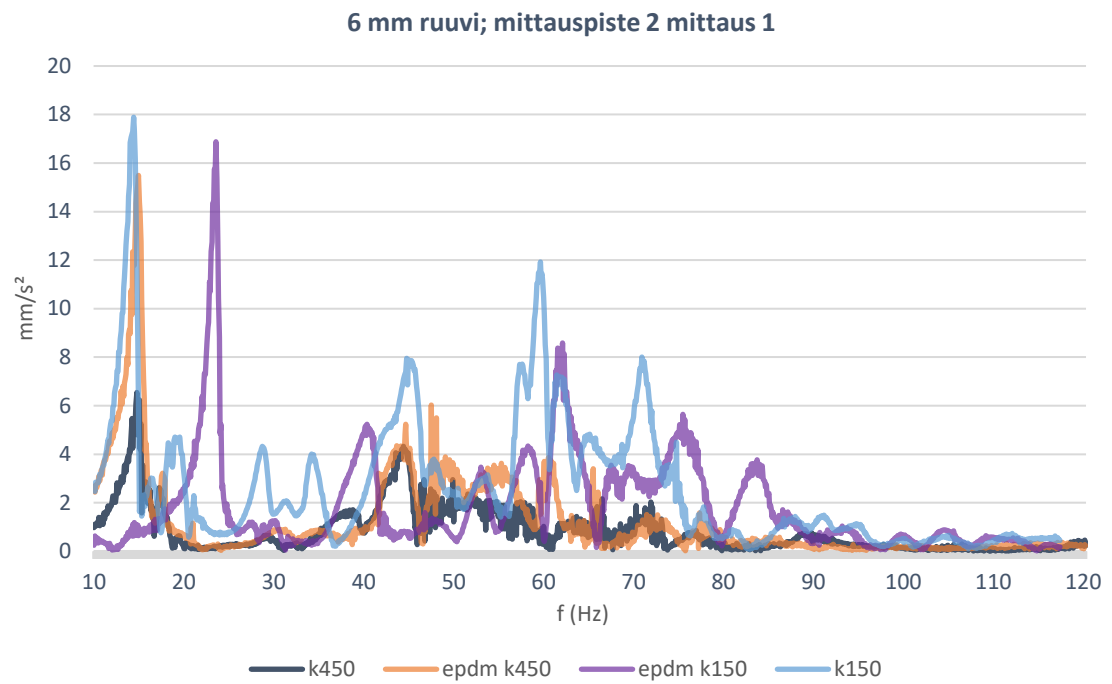
Koetilanne	Ruuvi-jako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s ²)
450	450 mm	Ei	18 Hz, 45 Hz	~22 mm/s ²
epdm k450	450 mm	Kyllä	20–30 Hz	~15 mm/s ²
k150	150 mm	Ei	15 Hz	~40 mm/s ²
epdm k150	150 mm	Kyllä	20, 50–60 Hz	~25 mm/s ²

Taulukko 9. 6 mm ruuvi; mittauspiste 1, mittaus 2.

Ilman EPDM-kaistaa ja 450 mm ruuvijaolla vasteessa havaittiin selkeitä piikkejä erityisesti 18 Hz:n ja 45 Hz:n taajuuksilla, ja huippuarvo oli noin 22 mm/s².

EPDM-kaistan lisääminen samaan ruuvijakoon (EPDM k450) tasoitti taajuusvastetta hieman ja pienensi huippuarvon noin 15 mm/s²:iin. Vaikka vaste oli tasanaisempi, vaimennus ei ollut merkittävästi tehokkaampaa. Rakenteella k150 (150 mm ruuvijako ilman EPDM:ää) mitattiin selvästi korkein huippuarvo (~40 mm/s²), ja vaste oli voimakkaasti resonanssipainotteinen 15 Hz:n taajuudella.

EPDM-kaistan ja tiheämmän kiinnityksen yhdistelmä (EPDM k150) antoi vasteen, joka jakautui laajemmalle taajuusalueelle (20 Hz ja 50–60 Hz), mutta huippuarvo (n. 25 mm/s²) oli edelleen korkea. Kokonaisvaimennus ei ollut merkittävästi parempi kuin ilman EPDM-kaistaa. Tulokset osoittavat, että pelkkä EPDM:n lisääminen ei riitä parantamaan vaimennusominaisuuksia, ja tiheämpi kiinnitys voi jopa lisätä värähtelyvasteiden voimakkuutta tietyillä taajuusalueilla.



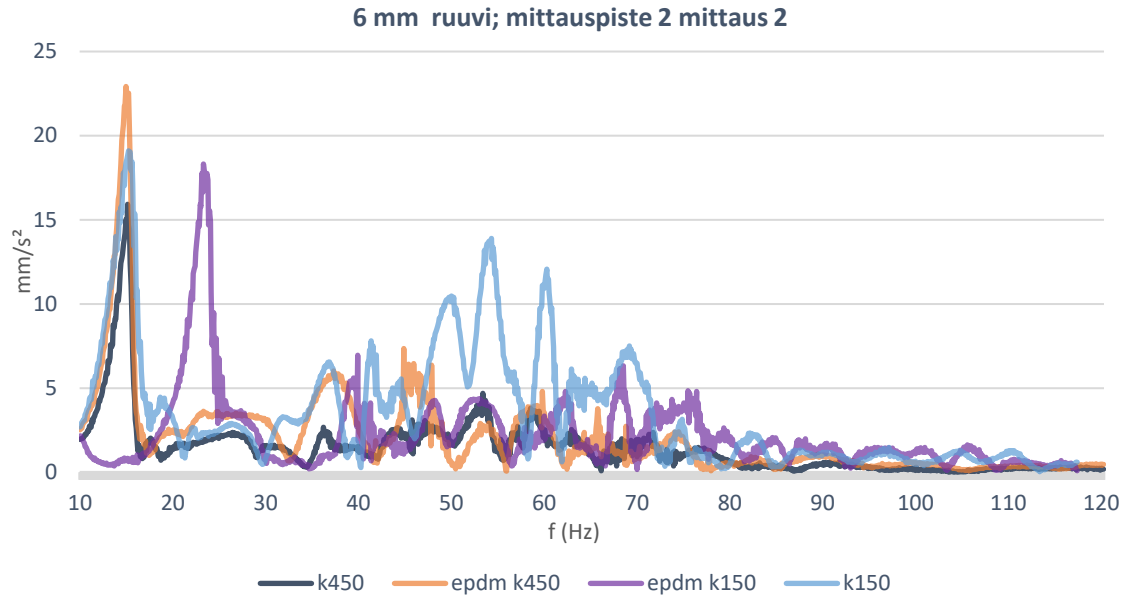
Kuvio 7. 6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 1.

Koetilanne	Ruuvijako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s ²)
k450	450 mm	Ei	18 Hz	~6 mm/s ²
epdm k450	450 mm	Kyllä	18–20 Hz	~16 mm/s ²
k150	150 mm	Ei	18 Hz, 60 Hz	~18 mm/s ²
epdm k150	150 mm	Kyllä	24 Hz, 60–70 Hz	~16 mm/s ²

Taulukko 10. 6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 1.

Tässä mittauksessa nähtiin selkeitä eroja eri kiinnitystapojen välillä. Kun käytössä oli 450 mm ruuviväli ilman EPDM-kaistaa värähtelyt pysyivät matalina ja vaste oli tasainen. Tämä vaihtoehto tuotti mittauksen pienimmän huippuarvon, noin 6 mm/s², mikä kertoo rauhallisesta käyttäytymisestä. Sen sijaan 450 mm ruuviväli EPDM-kaistalla tuotti yllättävän korkean piikin värähtelyissä, noin 16 mm/s². Tämä viittaa siihen, että EPDM-kaista ei onnistunut vaimentamaan tärinää tehokkaasti tässä mittauksessa. Kun ruuviväli oli tiheämpi, 150 mm ilman EPDM-kaistaa vaste voimistui huomattavasti. Huippuarvo nousi noin 18 mm/s²:iin, ja mittauksessa korostuivat selvästi tietyt värähtelytaajuudet.

EPDM-kaistan lisääminen 150 mm ruuviväliin hieman paransi tilannetta. Vaikka värähtelyt olivat yhä melko voimakkaita (~16 mm/s²), ne jakautuivat useammalle taajuudelle ja piikit eivät olleet aivan yhtä teräviä. Tämä viittaa siihen, että vaimennusta tapahtui jossain määrin, mutta vaikutus ei ollut kovin merkittävä.



Kuvio 8. 6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 2.

Koetilanne	Ruuvi-jako	EPDM-kaista	Suurin huippu (n. Hz)	Huippuarvo (mm/s ²)
k450	450 mm	Ei	18 Hz	~6 mm/s ²
epdm k450	450 mm	Kyllä	18 Hz	~22 mm/s ²
k150	150 mm	Ei	18 Hz, 60 Hz	~15 mm/s ²
epdm k150	150 mm	Kyllä	24 Hz, 60–70 Hz	~16 mm/s ²

Taulukko 11. 6 mm ruuvi; mittauspiste 2, mittaus 2.

Tässä mittauksessa ilman EPDM-kaistaa ja 450 mm ruuvijaolla (k450) havaittiin tasainen vaste ilman merkittäviä huippuja, mikä viittaa vakaaseen rakenteelliseen käyttäytymiseen. Kun samaan kokoonpanoon lisättiin EPDM-kaista vasteeseen, ilmestyi poikkeuksellisen korkea huippu 18 Hz:n kohdalle. Tämä kertoo siitä, että vaimennus ei toiminut odotetusti tällä asetuksella.

Tiheämmällä 150 mm ruuvijaolla ilman EPDM-kaistaa mitattiin useita huippuja 18 ja 60 Hz:n kohdilla, mikä kertoo yleisesti korkeammasta vasteesta ja rakenteen alttiudesta resonansseille. EPDM-kaistan lisääminen tähän kokoonpanoon (EPDM k150) ei täysin poistanut resonansseja, mutta vaimensi niitä hieman – suurimmat huiput näkyivät 24–70 Hz:n alueella.

5.2 Laskennalliset tulokset

5.2.1 Finnwood -laskentaohjelma

Työn vertailulaskelmat suoritettiin Metsä Woodin Finnwood -laskentaohjelmaa käyttäen. Metsä Woodin kehittämä Finnwood on ilmainen rakenteellisten puutuotteiden mitoitukseen käytettävä ohjelma. Ohjelmalla mitoitus perustuu suoraan EN 1995-1-1 (EC5) Eurokoodeihin ja A1:2008+A2:2014, näiden Suomen kansallisten liitteiden sekä RIL 205-1-2017 ja RIL 205-2-2009 -suunnitteluohjeiden mukaisesti puurakenteita käyttäjän valitsemille rakennemalleille ja kuormituksille. (Puuinfo 2023.)

Ohjelmalla voidaan mitoittaa eri puutuotteita, mutta ensisijaisesti ohjelma tukee vain Metsä Woodin omia valmistamia tuotteita kuten Kerto-S tai Kerto-Q puuelementtejä. Ohjelma mahdollistaa myös kokonaisten rakenneosien mitoituksen, sillä ohjelmalla voidaan mitoittaa esimerkiksi työssämme käyttämiä kertonripa-elementtejä tai muita puurakentamisessa käytettyjä rakennekokonaisuuksia pilareista katto- ja lattiarakenteisiin. (Puuinfo 2023.) Ohjelman ominaisuuksiin sisältyy myös monipuolisesti kuormitustyyppien sekä reunaehtojen määrittelyä esimerkiksi ohjelmassa voidaan valita, kuinka rakenne on liitoksissa, muihin rakenteisiin tai onko kyseessä jatkuva rakenne, joka mahdollistaa kerrostalorakennuksessa huoneiden välisen mitoittamisen.

Laskentaosio sisältää sekä lujuusraja ja käyttörajatilojen tarkastelun. Lisäksi laskentaan voidaan lisätä mukaan myös rakennetyypistä riippuen esimerkiksi värähtelytarkastelut ja palomitoitus. Tuloksina ohjelma antaa muun muassa normaalijännityksiä, leikkausjännityksiä, taipumia ja momenttikäyriä. Yleisesti Ohjelman käyttöliittymä on selkeä ja visuaalinen, ja se sisältää graafisia esityksiä rakenteista ja kuormituksista, mikä tekee siitä helposti lähestyttävän myös suunnittelun alkuvaiheessa. Finnwood soveltuu erityisesti pienrakennusten ja elementtirakenteiden esisuunnitteluun ja mitoitukseen, mutta sitä voidaan

hyödyntää myös ammattimaisessa rakennesuunnittelussa osana laajempaa suunnitteluprosessia.


5.2.2 Tulokset

Tervetuloa | RAKENNEMALLI | Kuormitus | MITOITUS | Reiät ja lovet | Laskentatulokset | TULOSTE

POIKKILEIKKAUS

Poikkileikkaustyyppi:
Kerto-Ripa -kotelolaatta

Poikkileikkauksista:
H236-2400x25-4(1)x51x200-2400x18
H236-2400x25-4(1)x51x200-2400x18
Ylälevy = KERTO-Q (21-24) 1200x18
Rivat = KERTO-S 3x50x200
Alalevy = KERTO-Q (21-24) 1200x18
PITUUS: 5000 mm
PAINO: 34 kg/m²



Etsi ensimmäinen sopiva (listan alusta)
Etsi seuraava sopiva (valitusta eteenpäin)
Edellinen Seuraava

MITOITUSASETUKSET

Käyttöluokka: 2
Seuraamusluokka: CC2 (KFI=1.0)

RAKENNEMITOITUS

MURTORAJATILA (MRT) -----

KÄYTTÖRAJATILA (KRT)

Taipumatarkastelu -----

Väriähtelytarkastelu -----

PALO- JA ONNETTOMUUSTILANTI

Murtorajatilatarkastelu (MRT) -----

Käyttörajatilatarkastelut (KRT)

Taipumatarkastelu -----

HUOM! Tarkista rakenneosan laskenta-asetukset (MRT ja KRT) ennen kuin mitoitat poikkileikkauksen.

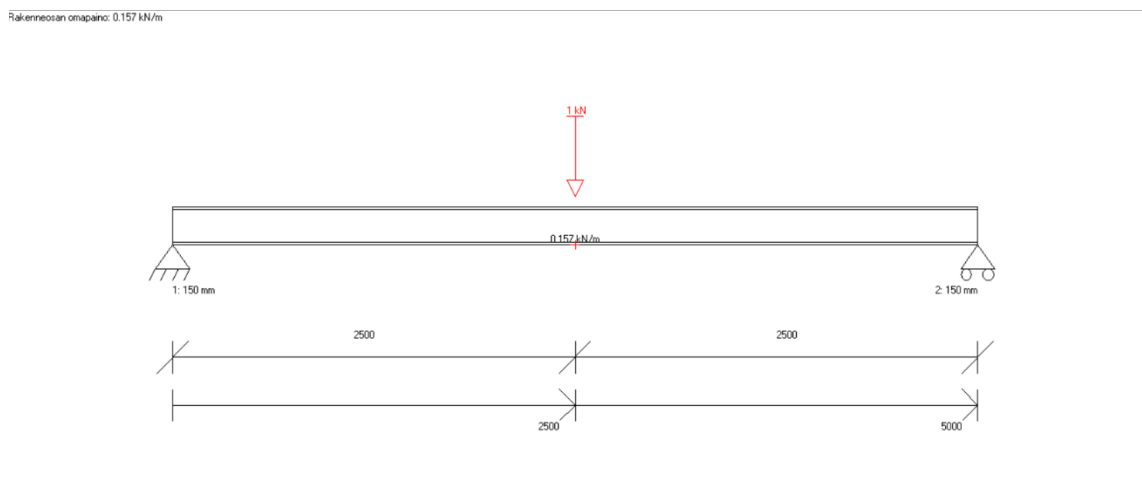
Mitoituksen jälkeen tarkista myös, että tuloksena saadun Kerto-Ripa -poikkileikkauksen ripatyyppi on sama kuin

MITOITUSTULOS

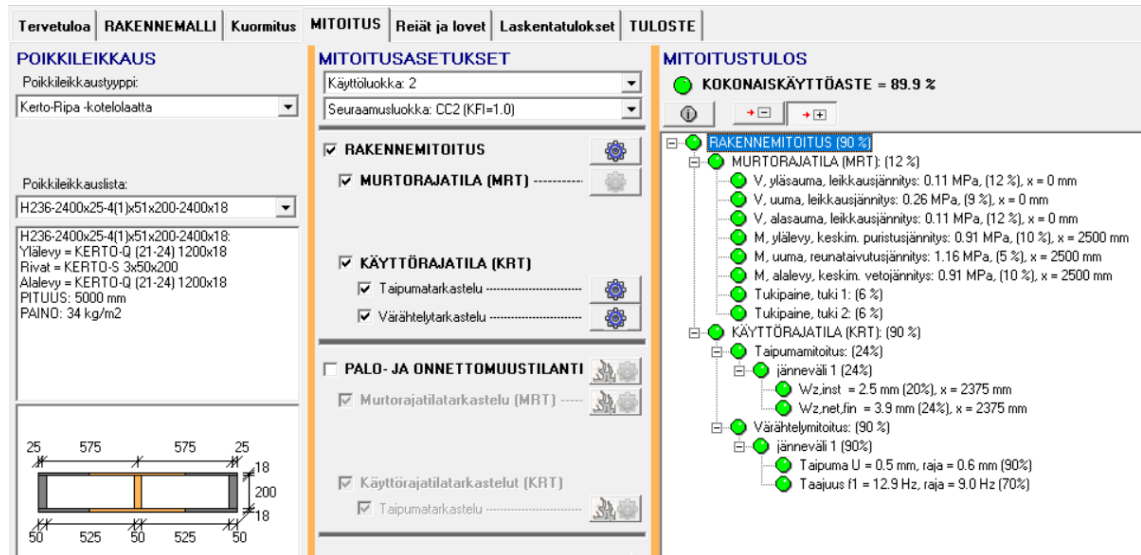
KOKONAISKÄYTTÖASTE = 89.9 %

- RAKENNEMITOITUS (90 %)
 - MURTORAJATILA (MRT): (12 %)
 - V, yläsauma, leikkausjännitys: 0.07 MPa, (12 %), x = 5000 mm
 - V, uuma, leikkausjännitys: 0.17 MPa, (8 %), x = 5000 mm
 - V, alasauma, leikkausjännitys: 0.07 MPa, (12 %), x = 5000 mm
 - M, ylälevy, keskim. puristusjännitys: 1.59 MPa, (11 %), x = 2500 mm
 - M, uuma, reunataivutusjännitys: 2.01 MPa, (6 %), x = 2500 mm
 - M, alalevy, keskim. vetojännitys: 1.59 MPa, (11 %), x = 2500 mm
 - Tukipaine, tuki 1: (6 %)
 - Tukipaine, tuki 2: (6 %)
 - KÄYTTÖRAJATILA (KRT): (90 %)
 - Taipumanmitoitus: (26%)
 - jänneväli 1 (26%)
 - Wz.inst = 2.9 mm (23%), x = 2500 mm
 - Wz.net.fin = 4.3 mm (26%), x = 2500 mm
 - Väriähtelymitoitus: (90 %)
 - jänneväli 1 (90%)
 - Taipuma U = 0.5 mm, raja = 0.6 mm (90%)
 - Taajuus f1 = 12.9 Hz, raja = 9.0 Hz (70%)

Kuva 16. Finnwood. Mittapiste 1, mittaus 1 mitoitustulos.

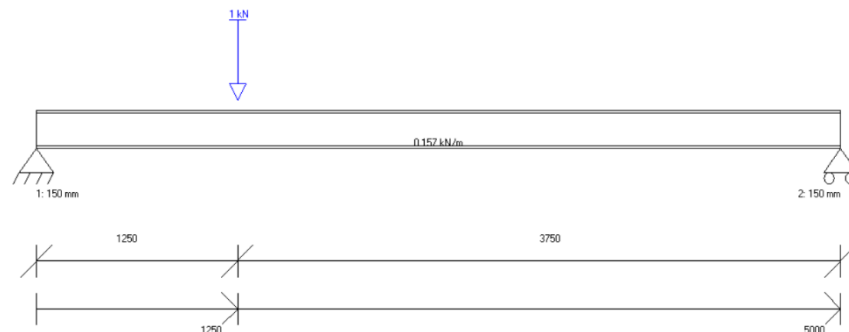


Kuva 17. Finnwood. Kuormitus mittapiste 1, mittaus 1.



Kuva 18. Finnwood. Mitoitustulos mittapiste 2, mittaus 1.

Rakennosan omapaino: 0.157 kN/m



Kuva 19. Finnwood. Kuormitus mittapiste 2, mittaus 1.

6 Tulosten tulkinta

Tulosten perusteella voidaan todeta, että rakenteen jäykkyyteen ja tulosten taseisuuteen vaikuttavat merkittävimmin ruuvi kiinnityksen tiheys sekä EPDM-kais-tan käyttö. Ruuvien koolla ei ollut suurinta vaikutusta tässä tutkimuksessa.

Ensinnäkin ruuvien tiheydellä on huomattava vaikutus rakenteen jäykkyyteen. Kun ruuvijako pienennetään esimerkiksi k450:stä k150:een, havaittiin selvä li-säys rakenteen jäykkyydessä. Tämä ilmenee erityisesti ominaistaajuuden nou-suna. Mittauksista ilmennyt tulos on johdonmukainen ja teknisesti perusteltu,

sillä kiinnityspisteiden lisätty määrä vähentää levyjen välistä liikettä, mikä parantaa koko rakenteen mekaanista jäykkyyttä.

Toiseksi EPDM-kumikaistan lisääminen vaikuttaa rakenteeseen vastakkaisella tavalla. Se laskee rakenteen ominaistajuutta, mikä tarkoittaa sen joustavuuden kasvua. Tämä voidaan tulkita siten, että kumimateriaali mahdollistaa enemmän paikallista liikettä levyjen välillä ja siten alentaa kokonaisjäykkyyttä. Vaikka tällä menetelmällä saavutetaan paremmat vaimennusominaisuudet, johtaa se myös rakenteen jäykkyyden heikkenemiseen.

Kolmanneksi havaitaan, että suurin ominaistajuus saavutetaan yhdistämällä tiheä ruuvikiinnitys EPDM-kaistan poisjättämiseen. Tämä yhdistelmä muodostaa rakenteellisesti optimaalisimman vaihtoehdon, mikäli tavoitteena on ominaistajuuden maksimointi. Korkea ominaistajuus voi olla toivottavaa esimerkiksi silloin, kun pyritään vähentämään matalataajuisesta tärinästä tai askeleenistä aiheutuvaa häiritsevyyttä.

Tuloksista voidaan siis todeta, että rakenteen ominaistajuus kasvaa, kun ruuvijako tiivistetään ja EPDM-kaistaa ei käytetä. Näin ollen ominaistajuutta voidaan pitää luotettavana indikaattorina rakenteen jäykkyyden arvioinnissa.

Finnwood-laskenta ja mittaukset osoittivat myös yhteneväisiä tuloksia erityisesti ominaistajuuden suhteen. Laskennallinen taajuus, joka oli 12,9 Hz ja mitatut arvot, jotka olivat 9–14 Hz välillä, olivat hyvin linjassa keskenään. Taipuma pysyi sallituissa rajoissa laskennassa, ja mittausten perusteella rakenne käyttäytyi vastaavasti. Etenkin tiheällä ruuvijaolla saatiin vastaavia tuloksia, johtuen että Finnwood -mitoitushjelmassa ei löydy vaihtoehtoa kiinnittimien jakovälille.

Laskenta ei arvioinut kiihtyvyyttä tai vaimennusta, mutta mittaukset täydensivät tätä. Pienimmät värähtelyvasteet saatiin tiheällä ruuvijaolla ilman EPDM-kaistaa. EPDM:n vaikutus jäi laskennassa huomioimatta, mutta mittauksissa se havaittiin usein kaksijakoiseksi eli vaimennusta parantavaksi mutta jäykkyyttä heikentäväksi tekijäksi.

Yhteenvetona laskenta tarjosi luotettavan perustan mitoitukselle, ja mittaukset vahvistivat sen tulokset, erityisesti värähtelymukavuuden ja vaimennuksen osalta. Tuloksista voidaan siis todeta, että rakenteen ominaistajuus kasvaa, kun ruuvijako tiivistetään ja EPDM-kaistaa ei käytetä. Näin ollen ominaistajuutta voidaan pitää luotettavana indikaattorina rakenteen jäykkyyden arvioinnissa.

On kuitenkin syytä huomioida, että pelkkä jäykkyyden maksimointi ei aina johda parhaaseen lopputulokseen, erityisesti jos tavoitteena on kävelymukavuuden parantaminen. Tällöin optimaalinen ratkaisu edellyttää tasapainoa jäykkyyden ja sen myötä ominaistajuuden sekä vaimennusominaisuuksien välillä, jotta rakenteen dynaaminen käyttäytyminen olisi käyttäjäkokemuksen kannalta miellyttävä.

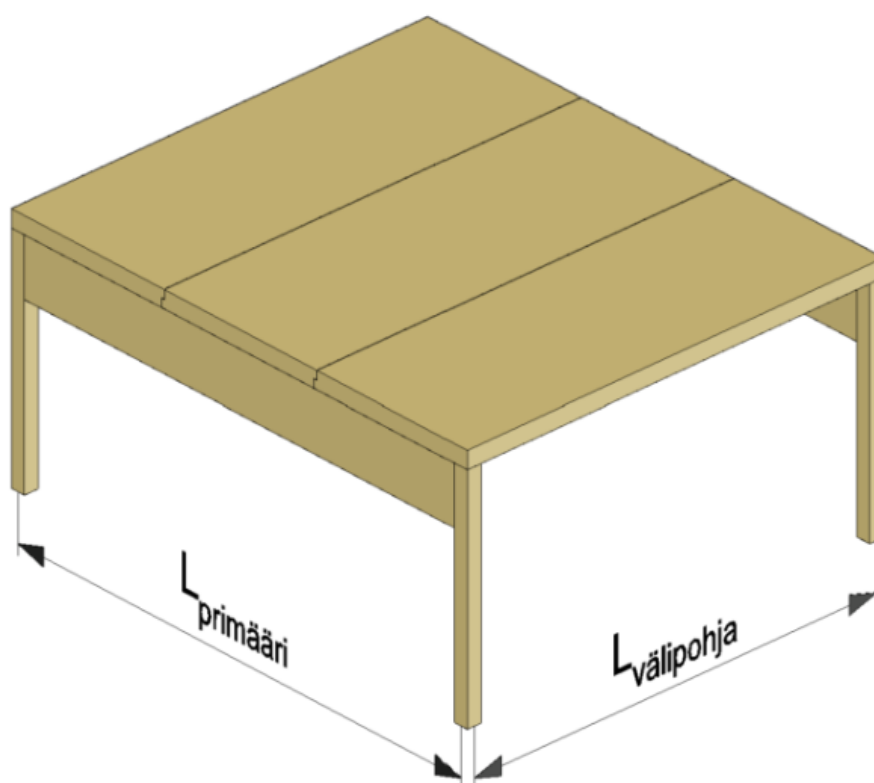
7 Pohdinta

7.1 Tutkimuksen ja tulosten luotettavuus

Tutkimus suoritettiin laboratorio-olosuhteissa ilman ulkoisia häiriötekijöitä. Tulokset olivat toistuvia, sekä odotusten mukaisia ja näin ollen tulosten luotettavuus kasvaa. Lisäksi tutkimus suoritettiin rinnakkaistyönä toisen vastaavan tutkimuksen kanssa, ja tulokset töiden välillä olivat lähes täysin rinnastettavissa toisiinsa, mikä lisää tutkimuksen luotettavuutta.

Tutkimuksessa käytetyssä heel-drop-menetelmässä ihminen toimii herätteenantajana, joten herätteessä voi tapahtua muutosta, mutta ei niin oleellisesti, että se olisi vaikuttanut tulokseen. Mittauksia ja testejä suoritettiin laaja määrä, joka karsii yksittäisten mittausvirheiden marginaalia. Yksi muuttuja olisi voinut olla lattiapalkkien kiinnitys CLT-palkkeihin, joiden päällä rakennetta testattiin. Tällöin työn vastaavuus olisi ollut lähempänä todellista rakennetyyppiä, jossa se makaa primääripalkkien päällä (Kuva 20).

Rakenteen luotettavuus herättää kysymyksiä erityisesti sen uudelleenkäytettävyyden suhteen, sillä koekappaletta hyödynnettiin useissa mittauksissa, ja sitä käsitteli kaksi eri mittausryhmää. Lukuisat muuttujat ja toistuvat mittaukset ovat todennäköisesti kuormittaneet rakenteen liitoksia merkittävästi, mikä asettaa kyseenalaiseksi niiden eheyden koko tutkimusprosessin ajan. Vaikka mittausdata oli rinnakkaistyön tekijöillä keskenään vertailukelpoista, ei voida täysin sulkea pois sitä mahdollisuutta, että rakenteen kuluminen olisi vaikuttanut tuloksiin.



Kuva 20. Primääripalkkien ja välipohjarakenteiden asettelu (Puuinfo 2020c).

7.2 Tutkimuksen eettiset näkökulmat

Tutkimuksen eettisyys on keskeinen osa tieteellistä toimintaa ja sen huomioiminen varmistaa tutkimuksen luotettavuuden ja osallistujien oikeuksien kunnioittamisen. Opinnäytetyössä eettisiä periaatteita noudatettiin erityisesti osallistujien informoidun suostumuksen hankkimisessa, yksityisyyden suojaamisessa sekä aineiston käsittelyssä. Tutkimukseen osallistujille tarjottiin selkeä ja ymmärrettävä kuvaus tutkimuksen tarkoituksesta, menetelmistä sekä mahdollisista

riskeistä. Lisäksi osapuolet saivat päättää osallistumisestaan tutkimukseen ilman painostusta. Henkilötietoja tässä tutkimuksessa ei käsitelty. Eettisten periaatteiden rikkominen voi johtaa tutkimuksen laadun heikkenemiseen, mutta sitä ei tässä tapauksessa käynyt.

7.3 Jatkotutkimusideat

EPDM-kumi on laajasti käytetty materiaali rakenteellisessa värähtelyn ja äänen vaimennuksessa, erityisesti puurakenteisten lattioiden yhteydessä kuten työsämme. Kumin käyttö perustuu kykyyn joustaa ja hajottaa värähtelyä, jolloin esimerkiksi askeläänet tai muut iskut eivät siirry suoraan rakenteisiin ja sitä mukaa toisiin asuntoihin. Yleisesti rakennusfysiikan ja akustiikan näkökulmasta EPDM toimii näin tehokkaana välikerroksena, joka parantaa käyttömukavuutta erityisesti asuin- ja toimistorakennuksissa.

Käytettäessä EPDM:n kaltaista kumimateriaalia herää kuitenkin oleellinen kysymys, joka liittyy tämän tyyppisten elastomeerimateriaalien käyttöön liittyen, on niiden pitkäaikainen kestävyys. Kuten muidenkin materiaalien, niin myös EPDM:n ominaisuudet muuttuvat ajan myötä, kun materiaali altistuu ympäristöolosuhteille kuten lämmölle, kosteudelle, hapelle ja ultraviolettisäteilylle.

Nämä tekijät käynnistävät materiaalissa kemiallisia ja fysikaalisia prosesseja, joiden voidaan olettaa vaikuttavan materiaalin käyttäytymiseen värähtelyn estämisessä. Materiaalin vanheneminen voi johtaa EPDM:n kovettumiseen, kimmoisuuden heikkenemiseen ja jopa mikrohalkeamien muodostumiseen. Tämä vaikuttaa suoraan sen vaimennuskykyyn, mikä puolestaan voi heikentää koko rakenneratkaisun toimivuutta.

Tutkimuksen tavoitteena olisi selvittää, kuinka merkittävästi ja millä aikavälillä EPDM:n vaimennuskyky heikkenee käyttöolosuhteissa. Keskeisenä kiinnostuksen kohteena olisi ymmärtää, onko materiaalin suorituskyvyssä merkittäviä muutoksia jo muutamassa vuodessa, vai säilyykö sen toiminta hyväksyttävällä tasolla esimerkiksi rakennuksen suunnitellun elinkaaren ajan.

Tutkimus voitaisiin toteuttaa altistamalla EPDM-näytteitä kiihdytettyyn vanhenukseen, jossa materiaalia kuormitetaan samankaltaisilla tekijöillä kuin todellisessa käytössä – mutta nopeutetusti. Tämän jälkeen vaimennusominaisuuksia mitattaisiin tarkasti esimerkiksi työssämme käyttämällämme VM-FFT+ instrumentilla.

Tämäntyyppinen tutkimus olisi tärkeä lisä rakennusalan tietopohjaan. Vaikka EPDM:n lyhytaikaisesta toimivuudesta on jo runsaasti käytännön kokemusta, sen pitkäaikaiskäyttäytymisestä on niukasti tietoa. Tutkimuksen tulokset voisivat auttaa määrittämään suosituksia EPDM:n käyttöiästä, tarvittavista huoltoväleistä tai vaihtoehtoisista materiaaliratkaisuista erityisen herkkiin kohteisiin. Lisäksi parempi ymmärrys materiaalin vanhenemisprosessista mahdollistaisi rakennusten elinkaarisuunnittelun tarkemman optimoinnin.

Lähteet

- Archinfo. 2023. Ainoastaan puuta – Suomalaisen puurakentamisen historiaa. <https://www.archinfo.fi/artikkelit/ainoastaan-puuta-suomalaisen-puurakentamisen-historiaa>. 4.6.2025.
- Lahtela, T. 2020. Ääneneristys puutalossa. Helsinki. Wood Focus Oy.
- Lahtela, T., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V., & Talus, L. 2021. Ääneneristys puutalossa. Helsinki. Puuinfo.
- Lindberg, L. 2021. Puurakentamisen rooli osana kestävämpää Suomea. Karelia-ammattikorkeakoulu. 2025a. PuuHyvä — Puu- ja hybridirakenteisen välipohjatuotteiden rakennusakustiikka, värähtely ja elinkaaren päästöt. <https://rakentaminen.karelia.fi/projektit/puuhyva/>. 4.6.2025.
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2025b. Välipohjien suunnittelu ja toteutus puurakentamisessa. <https://www.karelia.fi/2025/04/valipohjien-suunnittelu-ja-toteutus-puurakentamisessa/>. 4.6.2025.
- Metsä Group. 2025. Kerto-Ripa floor elements. <https://www.metsa-group.com/metsawood/explore-wood/kerto-lvl-applications/floor-elements/kerto-ripa-floor-elements/>. 20.2.2025.
- Puuinfo. 2020a. Viilupuu (LVL). <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööri tuotteet/viilupuu-lvl/>. 23.3.2025.
- Puuinfo. 2020b. Metla-talo, Metsäntutkimuslaitoksen tutkimuskeskus. <https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/julkiset-rakennukset/metla-talo-metsäntutkimuslaitoksen-tutkimuskeskus/>. 12.4.2025.
- Puuinfo. 2020c. Jännevälit. <https://puuinfo.fi/rakenteet/hirsirakenteet/jannevalit/>. 10.5.2025.
- Puuinfo. 2023. Finnwood 2.4.3 mitoitusohjelma. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/finnwood-mitoitusohjelma/>. 18.5.2025.
- Sistonen, P. 2022. Rankarunkoisen puukerrostalorakentamisen kehittäminen.
- Talja, A., & Toratti, T. 2003. Lattioiden värähtelysuunnittelu. Rakentajain kalenteri 2003 (s. 467–478). Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.
- Talja, A., Toratti, T., & Järvinen, E. 2002. Lattioiden värähtelyt: Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Vesänen, T., & Viljakainen, M. 2015. Liimapuukäsikirja osa 2. Helsinki. Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy.
- VVR Wood. 2020. Kerto Ripa puuelementit. <https://www.vvr.fi/tuotteet/kerto-ripa-puuelementit/>. 28.2.2025

Aineistohallintasuunnitelma

Suunnitelman tekijät: Hokkanen Jaakko, Pekkarinen Tino
Opinnäytetyön nimi: Värähtely puupalkkipohjissa
Opinnäytetyön toimeksiantaja: Karelia-ammattikorkeakoulu
Suunnitelma laadittu pvm: 24.3.2025

1. Aineiston yleiskuvaus

1.1 Aineiston kuvaus: Kerättävä tai olemassa oleva aineisto

Aineisto kerätään sekä mittaamalla käyttämällä värähtelyä mittaavaa ohjelmistoa nimeltä VM-FFT että havainnoinnin avulla. Aineistoa kerätään myös muistiinpanoilla, kuvaamalla ja videoimalla mittaus- ja havainnoinnin aikana.

1.2 Aineiston laadun varmistaminen

Aineistoa käsitellään huolellisesti siten, että alkuperäinen tietosisältö säilyy eikä se muutu. Kerätty aineisto tallennetaan opinnäytetyön tekijöiden tietokoneelle siihen tarkoitettuun kansioon kopioiden kera.

Aineisto kerätään systemaattisesti mittausten aikana, yksi toimenpide kerrallaan. Ennen mittauksia ja havainnointia varmistetaan, että toimenpiteet lähdetään suorittamaan oikealla tavoilla suunnitelman mukaisesti. Toimenpiteiden jälkeen varmistetaan vielä kertaalleen, että toimenpiteet on suoritettu oikein sekä kaikki tarvittavat toimenpiteet on suoritettu ja niistä on olemassa aineisto jatkokäsittelyä varten.

2. Eettiset periaatteet, lainsäädäntö ja henkilötietojen käsittely

2.1 Aineiston hallinnointi

Aineiston kerääjät ja hallinnoijat eli opinnäytetyön osalliset pidättävät kaikki oikeudet aineistoon, ja ne poistetaan opinnäytetyön valmistuttua. Työn tulokset jäävät luettavaksi verkko-osoitteeseen.

3. Aineiston dokumentointi

3.1. Aineiston dokumentointi

- Aineiston suunnittelusta vastaavat opinnäytetyön tekijät Jaakko Hokkanen ja Tino Pekkarinen Karelia-ammattikorkeakoulusta.
- Suunnittelu tapahtuu osana PuuHyvä-hanketta, jota toteutetaan yhteistyössä Karelia-ammattikorkeakoulun, Tampereen yliopiston, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Luonnonvarakeskuksen kanssa.

- Hankkeen rahoitus tulee Etelä-Savon ELY-keskukselta osana PuuHyvä-hanketta (2023–2026).
 - Tutkimusasetelmana toimii kokeellinen laboratoriotutkimus, ei poikkileikkaustutkimus. --Tutkimuksessa selvitetään eri rakenteiden vaikutusta värähtelyominaisuuksiin vakioituissa olosuhteissa.
 - Aineistotyyppinä on mittaussaineisto (värähtelymittaukset); kysely- tai haastatteluaineistoa ei käytetä.
 - Aineistoon sisältyy mittaussarjoja eri rakennevaihtoehdoista (8 erilaista kokoonpanoa) sekä laskennalliset vertailutulokset (Finnwood-ohjelmalla).
 - Aineiston keräävät opinnäytetyön tekijät itse, ja mittaukset toteutetaan Karelia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa.
 - Rakennevaihtoehdot valitaan harkinnanvaraisesti tutkimusongelman perusteella, ei satunnaisotannalla.
 - Otokseen sisältyy yhteensä 8 erilaista rakennekokoonpanoa, joista kunkin osalta tehdään mittaukset kahdesta mittapistestä, kaksi mittausta mittapistettä kohden.
 - Aineisto kerätään keväällä
- Kenttätyön ohjeistus:**
- Mittaukset suoritetaan suunnitelman mukaisesti määritellyistä mittapististä, ja anturit sijoitetaan mittausteknisin perustein.
- Tiedonkeruun täsmennykset:**
- Mittauksissa käytetään heel-drop-menetelmää, ja mittauslaitteena toimii VibroMetra VM-FFT+. Anturit sijoitetaan kahteen mittapisteseen rakenteessa.

4. Tallentaminen ja tietoturva opinnäytetyöprosessin aikana

Mittaussaineisto tallennetaan suoraan tietokoneelle siihen tarkoitettuun kansioon, ei pilveen. Havainnoiva materiaali (kuvat ja videot) otetaan yhden opinnäytetyön osallisen henkilökohtaisella puhelimella, josta ne siirretään tietokoneelle USB-kaapelilla samaan kansioon tallentaen. Kun kaikki tiedot ovat kansiossa, kansion sisältö kopioidaan ja tarvittaessa jaetaan koulun salatulla sähköpostilla.

5. Aineisto opinnäytetyön valmistuttua: tuhoaminen, säilyttäminen tai mahdollinen jatkokäyttö ja avaaminen

Kerätty aineisto tuhotaan opinnäytetyön valmistuttua. Kerätyt aineistot poistetaan puhelimelta, sähköpostista, tietokoneen kansioista ja lopullisesti myös näiden roskakorista.

6. Tehtävät ja vastuut

Aineisto kerätään paikallaolevien opinnäytetyötä tekevien toimesta suoraan tietokoneelle. Kuvaukset suoritetaan puhelimella ja siirretään välittömästi tietokoneelle. Aineistoa jaetaan salatulla sähköpostilla koulun sähköpostiosoitetta

käyttäen opinnäytetyön osallisille. Aineiston hävittämisestä pidetään opinnäytetyön osallisten kesken palaveri, jossa varmistetaan, että aineiston hävittäminen toteutuu kuten kuuluukin.