

Eveliina Helakari

PUUPALKKIVÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYMITOITUS

PUUPALKKIVÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYMITOITUS

Eveliina Helakari
Opinnäytetyö
Kevät 2023
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, talonrakennustekniikka

Tekijä: Eveliina Helakari

Opinnäytetyön nimi: Puupalkkivälipohjan värähtelymitoitus

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Vibration Analysis of Timber Beam Floor

Työn ohjaaja: Antti Ukonmaanaho

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2023

Sivumäärä: 47 + 2 liitettä

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia joustavan tuen vaikutusta puupalkkivälipohjan värähtelyyn. CASE-kohteena oli puurakenteinen kaksikerroksinen päiväkotirakennus, jossa oli tiloja, missä välipohja tukeutui palkin päälle.

Aiheen tutkiminen koostui Finnwoodilla ja käsin tehdystä välipohjan värähtelymitoituksesta sekä välipohjan RFEM-ohjelmalla tehdystä värähtelyanalyysistä. Murtorajatilan mitoituksen yhteydessä Finnwood-ohjelmalla tarkastettiin rakenteiden värähtelymitoitus ja mitoitus suoritettiin sen jälkeen myös käsinlaskennalla. Viimeisenä vaiheena luotiin RFEM-ohjelmalla mallit, joita verrattiin Finnwoodin sekä käsinlaskujen tuloksiin sekä tutkittiin joustavan tuen vaikutusta ominaistajuuteen sekä 1 kN pistekuorman aiheuttamaan painumaan.

Käsinlaskulla pystyttiin hyvin arvioimaan yksinkertaisten rakenteiden ominaistajuuksia. Rakenteiden muuttuessa monimutkaisemmiksi RFEM-ohjelmalla suoritettu värähtelyanalyysi on hyvä lisä värähtelymitoituksessa. Työssä tuli selvästi esille se, että välipohjan ja palkiston yhdistetyllä ominaistajuudella on iso vaikutus välipohjan alimpaan ominaistajuuteen. Tämän perusteella voidaan todeta, että yhdistetyn ominaistajuuden sekä painuman tarkastaminen tulisi ehdottomasti tehdä tilanteissa, jossa välipohja tukeutuu palkistoon. Tällä vältetään epämiellyttävältä värähtelyltä rakennuksen käytön aikana.

Asiasanat: värähtely, välipohja, puu, systeemivärähtely, ominaistajuus, RFEM

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House building Engineering

Author: Eveliina Helakari
Title of thesis: Vibration Analysis of Timber Beam Floor
Supervisor: Antti Ukonmaanaho
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2023
Number of pages: 47 + 2 appendices

This thesis was commissioned by A-Insinöörit Suunnittelu Ltd. The purpose of the thesis was to study how elastic support affects the vibrations of a timber beam floor. The target for a CASE study was a timber framed two-story kindergarten building. In this building there were places where a timber beam floor was supported by beams.

Studying the subject consisted of dimensioning made with Finnwood program and by hand calculation and also a vibration analysis made with RFEM program. When performing ultimate limit state dimensioning the vibration parameters were checked. After this, vibrations were also calculated by hand. The last stage was to create an accurate model of the structure with RFEM program and perform a vibration analysis. The results of these calculations were then compared with the results of the RFEM models and effects of elastic support were examined.

Hand calculation is an easy way to evaluate vibrations of simple structures. As the structures become more complex the vibration analysis made with RFEM program is a good addition to dimensioning. This work clearly states that elastic supports had a big impact of structures natural frequency. Based on this study it can be stated that the combined frequency and the deflection of the floor and beam must be checked. With this inspection it is possible to avoid unpleasant vibrations during use of the building.

Keywords: timber, vibration, frequency, floor, RFEM

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	RAKENTEIDEN VÄRÄHTELY	8
2.1	Värähtelyn aiheuttajat ja aistiminen	8
2.2	Korkea- ja matalataajuuslattiat	9
2.3	Systeemivärähtely	11
2.4	Laskennassa käytettävät ohjelmistot	11
3	SUUNNITTELUOHJEET	12
3.1	Eurokoodi EN 1995 ja kansallinen liite	12
3.1.1	Ominaisaajuus	12
3.1.2	1kN pistekuorman aiheuttama painuma	14
3.2	Muut värähtelyparametrit	16
4	RFEMIN KÄYTTÖ VÄRÄHTELYMITOITUKSESSA	24
4.1	Aiheen alustus ja lähtötiedot	24
4.2	Mallin luominen	26
4.3	Värähtelyyn liittyvät parametrit	27
5	CASE-KOHDE	31
5.1	Finnwood	32
5.2	Käsinlaskut	33
5.3	RFEM	35
5.4	Tulokset	39
5.5	Muut värähtelyn parametrit	41
6	YHTEENVETO	44
	LÄHTEET	46
	LIITTEET	
	Liite 1 Käsinlaskut	
	Liite 2 Eurokoodiluonnoksen laskut	

SANASTO

Elementtimenetelmä	numeerinen menetelmä, jolla pystytään ratkaisemaan differentiaaliyhtälöitä tietokoneella
Eurokoodit	kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja
Hertsi	taajuuden yksikkö, joka kuvaa, kuinka monta värähdystä tapahtuu yhdessä sekunnissa
Kansallinen liite	ympäristöministeriön julkaisemat ohjeet Eurokoodien soveltamisesta Suomessa
Käyttörajatila	rajatila, jossa tarkastellaan rakenteen käyttökelpoisuuden ehdoksi asetettuja vaatimuksia
Monikerta	kerrannainen eli luvut, jotka saadaan, kun luku kerrotaan luonnollisella luvulla
Murtorajatila	rajatila, jossa tarkastellaan rakenteen sortumista, murtumista
Ominaismuoto	ominaistaajuuden aiheuttama värähtelymuoto
Ominaistaajuus	taajuus, jolla rakenne värähtelee saadessaan herätteen
Ortotrooppinen rakenne	rakenne, jonka jäykkyys on erilainen pituus ja poikittaissuunnassa
Resonanssi	myötävärähtely, joka syntyy, kun ulkoinen värähtely vahvistaa kapaleen ominaisvärähtelyä.

1 JOHDANTO

Värähtelymitoitus tulee usein määrääväksi mitoituksiksi puurakenteisessa välipohjassa. Värähtelyllä on asumis- ja käyttömukavuuteen iso vaikutus. Kuitenkin se, miten epämiellyttäväksi värähtely koetaan, riippuu paljon käyttäjän henkilökohtaisesta kokemuksesta. Suomessa käytössä olevat värähtelykriteerit määritetään eurokoodi 5:ssä sekä siihen liittyvässä Suomen kansallisessa liitteessä. Uuden eurokoodin laadinta on tällä hetkellä tekeillä, ja sen on arvioitu tulevan käyttöön vuosien 2022–2027 välillä (Eurokoodit 2021).

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä päiväkotikohteen välipohjan värähtelymitoitus ja tutkia RFEM-ohjelmistolla tehdyn mallin avulla, miten systeemivärähtely vaikuttaa välipohjan värähtelymitoitukseen, kun välipohjapalkisto tukeutuu joustavaan tukeen. Päiväkotikohteessa, johon tämän opinnäytetyön aiheena oleva värähtelymitoitus tehdään, on välipohjassa paikkoja, jossa välipohjapalkisto tukeutuu liimapuupalkkeihin tai teräspalkkeihin. Tällaisissa tapauksissa on hyvä tarkastaa myös välipohjan systeemivärähtely, koska joustavalla tuella on vaikutusta värähtelyyn. Tavotteena on koota yhteen tietoa värähtelystä sekä systeemivärähtelystä ja sen vaikutuksesta välipohjan värähtelyyn.

Tässä työssä perehdytään vain Kertopuu–kelluva laatta -välipohjan värähtelymitoitukseen ja tämän rakenteen tulosten analysointiin. Murtorajatilamitoitus on tehty välipohjalle ja palkeille erikseen, eikä sitä käsitellä tässä opinnäytetyössä.

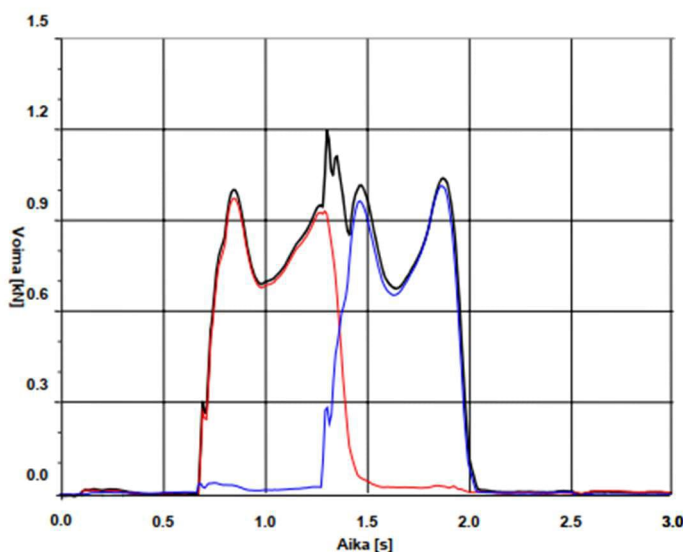
Työn tilaajana toimii A-Insinöörit Suunnittelu Oy. A-Insinöörit Oy on vuonna 1959 perustettu suomalainen rakentamisen suunnitteluun ja rakennuttamiseen erikoistunut asiantuntijayritys. Yrityksellä on Suomessa 16 toimipaikkaa ja noin 1 100 työntekijää. A-Insinöörit toimialoja ovat rakennuttaminen, rakennesuunnittelu, yhdyskunta- ja ympäristösuunnittelu, teollisuus- ja talotekniikka sekä arkkitehtisuunnittelu. (A-Insinöörit.)

2 RAKENTEIDEN VÄRÄHTELY

2.1 Värähtelyn aiheuttajat ja aistiminen

Tyypillisimpiä rakenteiden värähtelyiden aiheuttajia ovat kävely, pyykinpesukone sekä liikennetälinä (Puuinfo, 2). Näistä värähtelyn lähteistä yleisin on kävelyheräte, joten värähtelymitoitusta tehtäessä asuin- ja toimistorakennusten välipohjiin tutkitaan vain kävelyn aiheuttamat värähtelyt (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 9). Suomessa värähtelykriteerit ovat tiukat, joten värähtely nousee monesti mitoittavaksi tekijäksi välipohjaa tarkasteltaessa (Puuinfo 2020).

Kävelyheräte sisältää iskumaisia ja jaksottaisia komponentteja (kuva 1). Kävelytaajuudella 1,6–2,2 Hz tapahtuu matalin jaksottainen kuormitus, mutta myös tämän taajuuden toisella ja kolmannella moninkerralla 3,2–8,8 Hz esiintyy kuormituskomponentteja. (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 9.)



KUVA 1. Kävelykuormituksen syntyminen vasemman ja oikean jalan kosketusvoimasta (Talja, Toratti & Järvinen, 10)

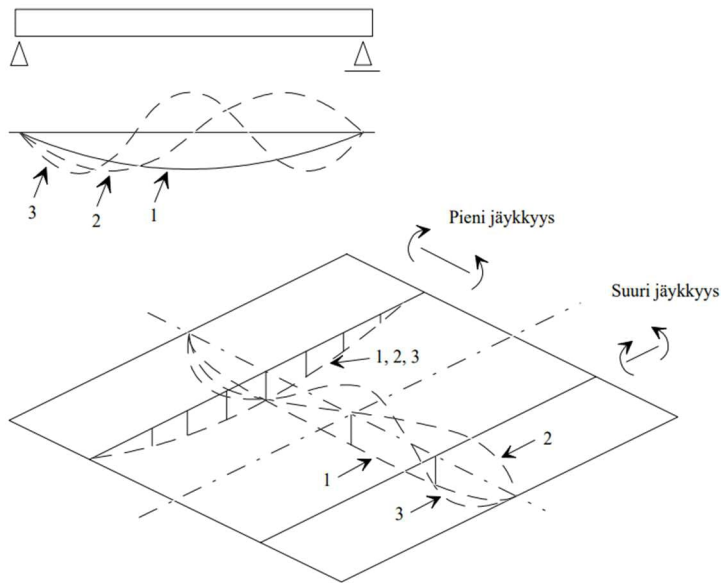
Ihminen voi kokea värähtelyn joko kehon tai esineiden värähtelyn kautta, kuten esimerkiksi kasvien lehtien ja esineiden heilumisena tai esineiden ja astioiden aiheuttamina ääнинä. Ihmisen keho on herkimmillään värähtelyn aistimisessa välillä 4–8 Hz (Puuinfo, 2). Suomessa puulattiat mitoitetaan

korkeataajuuslattioina, koska Suomessa ei vielä ole käytössä mitoitusmenetelmiä, joilla voidaan puulattiat mitoittaa matalataajuuksisena (Puuinfo 2020).

Värähtelyn häiritsevyyden aistiminen riippuu jokaisen ihmisen omasta kokemuksesta. Kävelevä henkilö ei yleensä tunne värähtelyä, joita hän aiheuttaa, kuitenkin ympärillä olevat ihmiset voivat pitää värähtelyä hyvin epämiellyttävänä. Värähtelylähteen sijainnilla on myös merkitystä siihen, miten epämiellyttävänä värähtely koetaan. Yleensä pahempana pidetään naapuriasunnosta siirtyvää värähtelyä. (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 9, 15.) Värähtelyn häiritsevyyteen vaikuttaa myös häiriön kesto. Esimerkiksi iskumaisen impulssikuormituksen, joka voi olla esimerkiksi kantapään osuminen lattiaan kävellessä, häiritsevyys on paljon pienempi kuin vastaavan pitkäaikaisen herätteen. (Talja 1996, 15.)

2.2 Korkea- ja matalataajuuslattiat

Lattiarakenteen värähtelyominaisuudet määräytyvät pääasiassa pitkittäisestä ja poikittaisesta jäykkyydestä, massasta, jännevälistä sekä vaimennusominaisuuksista (Talja & Toratti, 468). Valmistus- ja asennusepätkätkuudet sekä liitosten väliset joustot vaikuttavat myös rakenteen värähtelyominaisuuksiin (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 14). Lattiarakenteen värähtelyominaisuudet tulee ottaa jo suunnitteluvaiheessa huomioon, koska valmiin lattian värähtelyominaisuuksia on vaikea jälkikäteen parantaa (Talja & Toratti, 468). Alin ominaismuoto vastaa palkeilla omasta painosta aiheutuvaa taipumaa, ortotrooppisella rakenteella taas alin ominaismuoto vastaa yleensä koko laatan taipumamuotoa (Talja 1996, 27). Kuvassa 2 nähdään palkin sekä ortotrooppisen rakenteen kolme alinta ominaisvärähdysmuotoa.



KUVA 2. Palkin ja laatan kolme alinta ominaismuotoa (Talja 1996, 27)

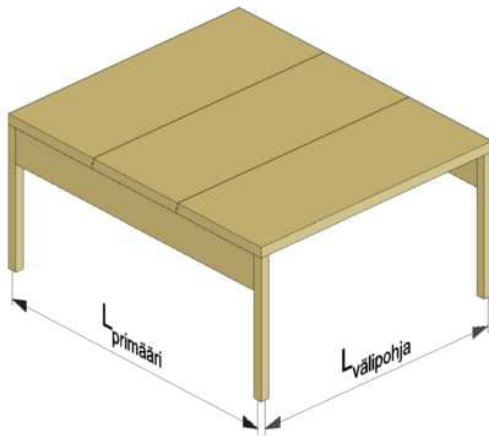
Rakenteet jaetaan yleensä kahteen eri perustyyppiin niiden ominaistaajuuden mukaan, matala- ja korkeataajuuslattioihin. Matalataajuuslattioiden alin ominaistaajuus on alle 8 Hz ja korkeataajuuslattian yli 8 Hz. (Talja 1996, 28.) Eurokoodin Suomen kansallinen liite määrittää lattiat korkeataajuuslattioiksi kuitenkin vasta silloin, kun niiden alin ominaistaajuus on yli 9 Hz (Suomen RakMk 2016, 18).

Korkeataajuuslattioiden jänneväli on yleensä alle 10 m sekä paino yleensä alle 300 kg/m² (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 15). Korkeataajuuslattioilla ei resonanssia pääse muodostumaan, koska niiden rakenteen alin ominaistaajuus on askelkuormituksista aiheutuvia taajuuksia suurempi (Talja 1996, 28). Korkeataajuuslattialla tarkastellaan siis 1 kN:n pistekuormasta aiheutuvaa hetkellistä painuma (Puuinfo 2020).

Matalataajuuslattioiden jänneväli on usein yli 10 m sekä paino yleensä yli 300 kg/m² (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 14). Matalataajuuslattioilla jokin kävelystä aiheutuva taajuus resonoi lattiarakenteen oman ominaistaajuuden kanssa (Talja 1996, 28).

2.3 Systemivärähtely

Monessa värähtelyä käsittelevässä teoksessa esitetään ominaistajuuden laskennan yhteydessä kuvan 3 tapaus, jossa välipohja tukeutuu primääripalkistoon. Välipohja- ja primääripalkiston yhdistetty ominaistajuus olisi hyvä tällaisissa tapauksissa tarkastaa, koska joustava tuki vaikuttaa ominaistajuuteen. Teoksista löytyy yksinkertainen kaava, jolla kuvan mukaisen tapauksen yhdistetyn ominaistajuuden pystyy laskemaan. (Puuinfo 2020.)



KUVA 3. Systemivärähtely tarkastetaan, kun välipohja tukeutuu primääripalkistoon (Puuinfo 2020)

2.4 Laskennassa käytettävät ohjelmistot

Opinnäytetyön värähtelymitoitusta on tehty käyttäen Finnwood-ohjelmistoa. Finnwood on Metsä Woodin mitoitusohjelma, jolla voidaan mitoittaa rakenneosia Metsä Woodin omilla tuotteilla eurokoodin ja sen Suomen kansallisen liitteen mukaan. Ohjelmalla pystyy mitoittamaan pilareita, kattoja ja lattiapalkkeja sekä myös Kerto-Ripa-elementtejä. (Metsä Group.)

RFEM on Dlubal Softwaren elementtimenetelmään perustuva laskentaohjelma, jolla voidaan suorittaa rakenteellisia ja dynaamisia analyyseja. RFEMillä voidaan laskea esimerkiksi muodonmuutoksia, sisäisiä voimia ja tukivoimia. Ohjelma sisältää myös erilaisia lisämoduuleita, joilla voidaan suorittaa laskelmat esimerkiksi tietyn standardin mukaan. (Dlubal Software GmbH.) Tässä opinnäytetyössä käytetään RF DYNAM Pro -moduulia, jolla tutkitaan välipohjarakenteen ja primääripalkin yhdistettyä ominaistajuutta.

3 SUUNNITTELUOHJEET

3.1 Eurokoodi EN 1995 ja kansallinen liite

Suomessa puurakenteiden värähtelymitoitus tehdään standardin SFS-EN 1995-1-1, eli eurokoodi 5:n mukaan. Lisäksi ympäristöministeriö julkaisee Suomen rakentamismääräyskokoelmassa Suomen kansalliset liitteet, josta löytyy Suomessa käytössä olevat eurokoodin kansalliset valinnat, viimeisin puurakenteiden liite on julkaistu vuonna 2016 (Suomen RakMk 2016, 2).

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL on julkaissut puurakenteiden suunnitteluohjeen, jossa on tiivistetyssä muodossa eurokoodeihin perustuvat puurakenteiden suunnitteluohjeet (RIL). Lisäksi Puuinfo sivuilta löytyy Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, josta löytyy lyhyessä muodossa eurokoodi 5:n asiat (Puuinfo 2022). Lyhennetyssä suunnitteluohjeessa on värähtelymitoitukselle yksinkertaistettu malli, mutta tässä opinnäytetyössä mitoitus tehdään RIL 205-1-2017 mukaan.

Värähtelyt, jotka johtuvat kävelystä, otetaan huomioon käyttörajatilamitoituksessa. Eurokoodi määrittää, että rakenteen kuormat eivät saa missään tilanteessa aiheuttaa käyttäjilleen eikä rakenteelle haitallista värähtelyä. Värähtelytasoja voidaan arvioida joko mittaamalla tai laskemalla. Laskennassa otetaan huomioon rakenteen jäykkyys ja vaimennussuhde, joka vastaa värähtelymuotoa. Välipohjien vaimennussuhde on yleensä $\xi = 0,01$, eli 1 %. Muutakin arvoa voidaan käyttää, jos se pystytään osoittamaan oikeammaksi. (RIL 205-1-2017 2017, 99.)

3.1.1 Ominaistaajuus

Puurakenteisen välipohjan alimman ominaistaajuuden tulee olla yli 9 Hz. Jos tämä kriteeri ei täyty, tulee rakenteelle suorittaa erityistarkastelu. (RIL 205-1-2017 2017, 99.)

Alin ominaistaajuus lattiarakenteelle, joka kantaa yhteen suuntaan, saadaan kaavasta 1.

KAAVA 1. Yhteen suuntaan kantavan lattiarakenteen ominaistaajuuden laskentakaava (RIL 205-1-2017 2017, 100)

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

f_1 = ominaistaajuus (Hz)

l = lattian jänneväli (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

m = massa pinta-alayksikköä kohti (kg/m²)

Alin ominaistaajuus lattiarakenteelle, joka kantaa kahteen suuntaan saadaan kaavasta 2.

KAAVA 2. Kahteen suuntaan kantavan lattiarakenteen ominaistaajuuden laskentakaava (RIL 205-1-2017 2017, 100)

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

f_1 = ominaistaajuus (Hz)

l = lattian jänneväli (m)

b = lattian leveys (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

$(EI)_b$ = poikittaissuuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

m = massa pinta-alayksikköä kohti, omapaino ja hyötykuorman osuus (kg/m²)

Kahteen suuntaan kantavan lattiarakenteen poikittaissuunnan b tueksi voi värähtelymitoituksessa käyttää esimerkiksi päätyseinää, johon lattian reunapalkki, poikittaiskoolaukset tai pintalevyt kiinnitetään. Kiinteää väliseinää, joka kiinnitetään lattiarakenteeseen ilman joustovaroja, voidaan myös käyttää poikittaissuunnan tukena. (RIL 205-1-2017 2017, 101.)

Lattiarakenteen taivutusjäykkyyttä laskettaessa voidaan hyödyntää kelluvan pintalaatan, kuten esimerkiksi betonilaatan, jäykkyyttä sekä lattian kaikkia koolauksia ja levytyksiä. Poikittaisjäykisteet otetaan huomioon vain lattian poikkisuunnan taivutusjäykkyydessä. (RIL 205-1-2017 2017, 101.)

Tapauksissa, jossa välipohja tukeutuu joustavan tuen päälle, tulisi tarkastaa myös välipohjan ja primääripalkin yhdistetty alin ominaistajuuus. Yhdistetyn ominaistajuuden laskentakaavaa ei ole eurokoodissa eikä Suomen kansallisessa liitteessä. Kaava löytyy VTT:n tiedotteesta ja sitä pystytään käyttämään materiaalista riippumatta (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 12).

Yhdistetty ominaistajuuus saadaan laskettua kaavalla 3.

KAAVA 3. Yhdistetty ominaistajuuus (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 22)

$$f_0 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1l}^2} + \frac{1}{f_{1L}^2}}}$$

f_0 = välipohjan ja palkin yhdistetty ominaistajuuus (Hz)

f_{1l} = välipohjan ominaistajuuus (Hz)

f_{1L} = palkin ominaistajuuus (Hz)

3.1.2 1 kN pistekuorman aiheuttama painuma

Lattiarakenteen alimman ominaistajuuden ollessa yli 9 Hz tulee seuraavan ehdon toteutua (RIL 205-1-2017 2017, 99–100):

$$\delta \leq 0,5 \text{ mm}$$

Yhteen suuntaan kantavan lattiarakenteen lattiapalkin kohdalla sijaitsevan 1 kN:n pistekuorman aiheuttama lattian painuma saadaan laskettua kaavalla 4.

KAAVA 4. 1 kN pistekuorman aiheuttama lattian painuma (RIL 205-1-2017 2017, 101)

$$\delta = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Fl^2}{42 \cdot k_{\delta} \cdot (EI)_l} \\ \frac{Fl^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} \end{array} \right.$$

δ = 1kN pistekuorman aiheuttama painuma (mm)

F = 1kN pistekuorma (kN)

l = lattian jänneväli (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

s = lattiapalkkien välinen etäisyys (m)

Painuman laskemisessa tarvittava apusuure saadaan laskettua kaavalla 5.

KAAVA 5. Apusuure (RIL 205-1-2017 2017, 101)

$$k_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

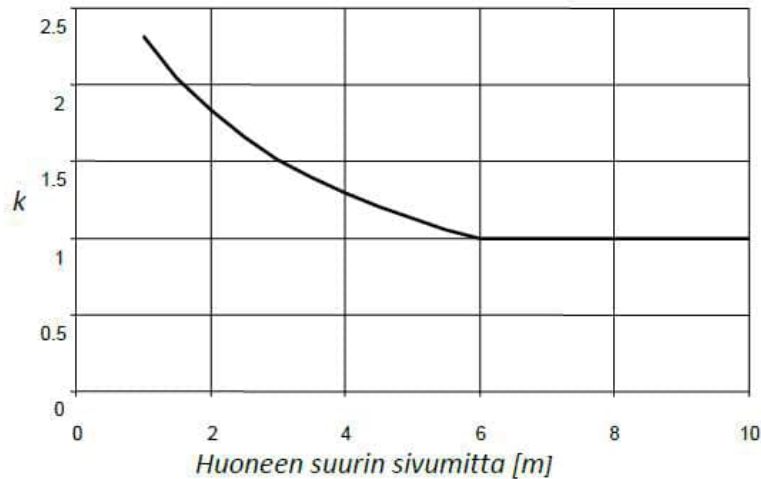
$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

$(EI)_b$ = poikittaissuuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

Rajoituksena $k_{\delta} \leq b/l$

Kaavaa 4 voidaan käyttää myös laskettaessa kahteen suuntaan kantavan lattiarakenteen painumaa. Tällaiselle rakenteelle ei kerrointa k_{δ} kuitenkaan tarvitse rajoittaa tekijällä b/l . (RIL 205-1-2017 2017, 101.)

Painumarajoitusta voidaan korottaa korotuskertoimella k , joka saadaan kuvan 4 kuvaajasta, kun huoneen suurin mitta alittaa 6 m (RIL 205-1-2017 2017, 100).



KUVA 4. Taipumarajoituksen korotuskerroin k (Suomen RakMk 2016, 18)

3.2 Muut värähtelyparametrit

Eurokoodit ovat tällä hetkellä uudistettavana. Tämän uudistuksen tarkoituksena on ollut yksinkertaistaa eurokoodeja. Uudistamisessa on mukana asiantuntijoita myös Suomesta. (Eurokoodit 2021.) Nämä uudistukset tulevat tulevaisuudessa vaikuttamaan myös värähtelymitoitukseen. Tässä työssä käydään mitoitusta läpi käyttäen Schirénin ja Swahnin tekemän diplomityön liitettä, josta löytyy vuoden 2019 eurokoodiluonnoksen värähtelymitoituksen osuus. Mitoitukseen tulee todennäköisesti muutoksia tähän luonnosversioon verrattuna lopullisen version ilmestyessä tulevaisuudessa. Kansalliset liitteet määrittelevät lopulta Suomessa käytössä olevat värähtelykriteerit ja mitoitushjeet.

Vuoden 2019 eurokoodiluonnoksessa lattiat jaetaan eri suoritustasoluokkiin taulukon 1 mukaan. Suoritustasoluokat vaihtelevat välillä I – VII, joista I-taso on paras suoritustasoluokka ja VII-taso hylätty. (Schirén & Swahn 2019, 19.)

TAULUKKO 1. Vuoden 2019 eurokoodiluonnoksen suoritustasoluokkien kriteerit (Schirén & Swahn 2019, 98)

	Floor performance levels						
Criteria	level I	level II	level III	level IV	level V	level VI	Level VII
<u>Stiffness criteria</u> for all floors w_{1kN} [mm] ≤	0,25		0,5	0,8	1,2	1,6	No criteria
Response factor R ≤	4	8	12	16	24	32	
<u>Frequency criteria</u> for all floors f_1 [Hz] ≥	4,5						
<u>Acceleration criteria</u> for resonant vibration design_situations a_{rms} [m/s²] ≤	R × 0,005						
<u>Velocity criteria</u> for transient vibration design_situations v_{rms} [m/s] ≤	R × 0,0001						

Taulukossa 2 esitetään suositukset suoritustasoluokan valinnasta asuin- ja toimistokäyttöön (Schirén & Swahn 2019, 98). Uusi eurokoodi antaa ohjeet puulattian mitoittamiseen myös matalataajuukslattiana, mutta tässä opinnäytetyössä tutkitaan vain yhteen suuntaan kantavan korkeataajuukslattian mitoitusta.

TAULUKKO 2. Vuoden 2019 eurokoodiluonnoksen suositukset suoritustasoluokan valinnasta (Schirén & Swahn 2019, 98)

Use category	Quality choice	Base choice	Economy choice
A (residential) multi-storey Single house	level I, II, III level I, II, III, IV	level IV level V	level V level VI
B (office)	level I, II	level III	level IV

Väli pohjien vaimennussuhteet ovat (Schirén & Swahn 2019, 90):

- $\xi = 0,02$ palkkilattioille
- $\xi = 0,025$ puu-betoni- ja massiivilattioille
- $\xi = 0,03$ palkkilattioille, joiden päällä on kelluva laatta
- $\xi = 0,035$ puu-betoni- ja massiivilattioille, joiden päällä on kelluva laatta
- $\xi = 0,04$ kaikille lattioille, jossa on kelluva laatta ja ne ovat tuettuja neljältä sivulta

Ominaistaajuus

Lattiarakenteen ominaistaajuus lasketaan kaavalla 6.

KAAVA 6. Lattiarakenteen ominaistaajuuden laskentakaava (Schirén & Swahn 2019, 91)

$$f_1 = k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

f_1 = lattiarakenteen ominaistaajuus (Hz)

$k_{e,1}$ = taajuuskerroin jatkuvalle lattiarakenteelle jäykällä tuilla. Yksiaukkoiselle rakenteelle $k_{e,1}=1.0$

$k_{e,2}$ = taajuuskerroin kahteen suuntaan kantavalle rakenteelle

l = lattian jänneväli (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

m = massa pinta-alayksikköä kohti, omapaino (kg/m²)

Toiselta puolelta joustavaan tukeen tuetun välipohjan ominaistaajuus lasketaan kaavalla 7.

KAAVA 7. Toiselta puolelta joustavaan tukeen tuetun välipohjan ominaistaajuus (Schirén & Swahn 2019, 92)

$$f_{1,res} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,joist}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam}^2}}}$$

Molemmilta puolilta joustavaan tukeen tuetun välipohjan ominaistaajuus lasketaan kaavalla 8.

KAAVA 8. Molemmilta puolilta joustavaan tukeen tuetun välipohjan ominaistaajuus (Schirén & Swahn 2019, 93)

$$f_{1,res} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,joist}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam,1}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam,2}^2}}}$$

$f_{1,joist}$ = välipohjarakenteen ominaistajuus (Hz)

$f_{1,beam}$ = tukipalkin ominaistajuus (Hz)

Nopeus

Kävelevän henkilön aiheuttaman värähtelyn nopeuden varmennusta varten tulee laskea nopeuden tehollisarvo. (Schirén & Swahn 2019, 94.)

Lattiarakenteen ominaistajuuden ollessa yli 8 Hz, värähtely oletetaan hetkelliseksi. Hetkellisen värähtelyn suunnittelutilanteissa nopeus arvioidaan kaavoilla 9–15. (Schirén & Swahn 2019, 94.)

Keskimääräinen ominaisimpulssi voidaan laskea kaavalla 9.

KAAVA 9. Keskimääräinen ominaisimpulssi (Schirén & Swahn 2019, 94)

$$I = \frac{42 \cdot f_w^{1.43}}{f_1^{1.3}}$$

I = Keskimääräinen ominaisimpulssi (Ns)

f_w = kävelytaajuus, jonka voidaan olettaa olevan 1,5 Hz (Hz)

f_1 = lattiarakenteen ominaistajuus (Hz)

Lattian suurin nopeus sen alimmassa ominaistajuudessa voidaan laskea kaavalla 10.

KAAVA 10. Lattian suurin nopeus sen alimmassa ominaistajuudessa (Schirén & Swahn 2019, 94)

$$V_{1,peak} = K_{red} \frac{I}{M^*}$$

$V_{1,peak}$ = Lattian suurin nopeus sen alimmassa ominaistajuudessa (m/s)

K_{red} = korjauskerroin, 0,7

I = keskimääräinen ominaisimpulssi (Ns)

M^* = lattian ominaismassa laskettuna kaavalla 11 (kg)

Yhteen suuntaan kantavan lattian ominaismassa saadaan laskettua kaavalla 11.

KAAVA 11. Yhteen suuntaan kantavan lattian ominaismassa (Schirén & Swahn 2019, 93–94)

$$M^* = \frac{m \cdot l \cdot b}{2}$$

M^* = lattian ominaismassa (kg)

l = lattiarakenteen jänneväli (m)

b = lattiarakenteen leveys (m)

Alinta ominaistajuutta korkeampien ominaismuotojen vaikutus lattian vasteeseen otetaan huomioon kertoimella K_{imp} . Kertoimen minimiarvo on 1,0. (Schirén & Swahn 2019, 94.)

Kerroin K_{imp} saadaan laskettua kaavalla 12.

KAAVA 12. Kerroin K_{imp} (Schirén & Swahn 2019, 95)

$$K_{imp} = \max \left\{ 0.48 \cdot \left(\frac{b}{l} \right) \cdot \left(\frac{(EI)_l}{(EI)_T} \right)^{0.25}, 1.0 \right\}$$

K_{imp} = korkeammat ominaismuodot huomioiva kerroin

l = lattiarakenteen jänneväli (m)

b = lattiarakenteen leveys (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

$(EI)_T$ = poikkisuuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

Kokonaisnopeus saadaan kaavalla 13.

KAAVA 13. Kokonaisnopeus (Schirén & Swahn 2019, 95)

$$V_{tot,peak} = K_{imp} \cdot V_{1,peak}$$

$V_{tot,peak}$ = kokonaisnopeus (m/s)

K_{imp} = isommat ominaisuudet huomioiva kerroin

$V_{1,peak}$ = Lattian suurin nopeus sen alimmassa ominaistajuudessa (m/s)

Nopeuden tehollisarvo lasketaan kaavasta 14.

KAAVA 14. Nopeuden tehollisarvo (Schirén & Swahn 2019, 95)

$$V_{rms} = \beta \cdot V_{tot,peak}$$

V_{rms} = nopeuden tehollisarvo (m/s)

$V_{tot,peak}$ = kokonaisnopeus (m/s)

$$\beta = (0,65 - 0,01 \cdot f_1) \cdot (1,22 - 11,0 \cdot \xi) \cdot \eta$$

$$\eta = 1,52 - 0,55K_{imp}, \text{ kun } 1,0 \leq K_{imp} \leq 1,5 \text{ muuten } \eta = 0,69$$

Nopeuskriteerin vastekerroin saadaan laskettua kaavalla 15.

KAAVA 15. Nopeuskriteerin vastekerroin (Schirén & Swahn 2019, 95)

$$R = \frac{V_{rms}}{0.0001}$$

R = vastekerroin

V_{rms} = nopeuden tehollisarvo (m/s)

Jäykkyyskriteerit

Yksiaukkoisen lattiarakenteen suurin painuma epäedullisimpaan paikkaan sijoitetusta 1 kN:n piste-
tekuormasta, lattiarakenteen tehokas leveys on b_{ef} . Painuman tulee täyttää taulukossa 1 annetut
vaatimukset. (Schirén & Swahn 2019, 95.)

Suurin 1 kN:n kuorman aiheuttama painuma voidaan laskea kaavalla 16.

KAAVA 16. 1 kN kuormasta aiheutunut painuma (Schirén & Swahn 2019, 96)

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{ef}}$$

w_{1kN} = suurin painuma 1 kN pistekuormasta (mm)

F = epäedullisimpaan kohtaan laitettu pistekuorma, 1 kN

l = lattiarakenteen jänneväli (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

b_{ef} = tehokas leveys (m)

Tehokas leveys saadaan laskettua kaavalla 17.

KAAVA 17. Tehokas leveys (Schirén & Swahn 2019, 96)

$$b_{ef} = \min \left\{ \frac{l}{1.1} \sqrt{\frac{(EI)_l}{(EI)_T}}, b \right\}$$

l = lattiarakenteen jänneväli (m)

b = lattiarakenteen leveys (m)

$(EI)_l$ = kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

$(EI)_T$ = poikkisuuntaa vastaava taivutusjäykkyys lattian leveysyksikköä kohti (Nm²/m)

Toisesta päästä joustavasti tuetun lattiarakenteen painuma 1 kN pistekuormasta saadaan laskettua kaavalla 18.

KAAVA 18. Toisesta päästä joustavasti tuetun lattiarakenteen painuma (Schirén & Swahn 2019, 97)

$$w_{1kN} = 0.5 \cdot w_{beam} + w_{joist}$$

Molemmista päistä joustavasti tuetun lattiarakenteen taipuma 1 kN pistekuormasta saadaan kaavalla 19.

KAAVA 18. Molemmista päistä joustavasti tuetun lattiarakenteen taipuma (Schirén & Swahn 2019, 97)

$$w_{1kN} = 0.5 \cdot w_{beam.1} + 0.5 \cdot w_{beam.2} + w_{joist}$$

w_{joist} = lattiarakenteen painuma 1 kN kuormasta (mm)

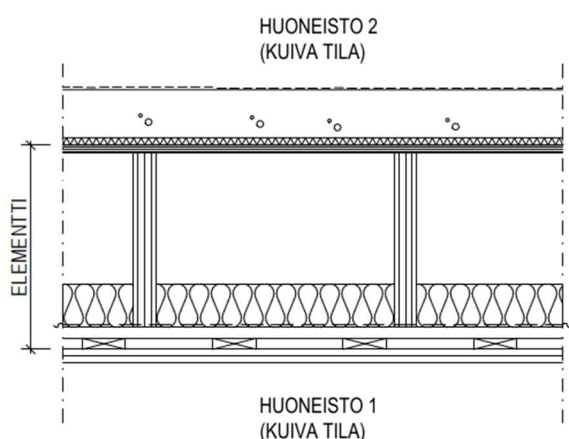
w_{beam} = 0,5kN pistekuorman aiheuttama tukipalkin taipuma (mm)

4 RFEMIN KÄYTTÖ VÄRÄHTELYMITOITUKSESSA

4.1 Aiheen alustus ja lähtötiedot

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin puupalkkivälipohjan värähtelymitoitukseen. Ensimmäisenä työvaiheena oli tarkastella värähtelyparametreja murtorajatilan mitoituksen yhteydessä sekä tarkastaa samalla kohdat, joissa välipohja tukeutuu joustavalle tuelle, käyttäen kaavaa 3. Murtorajatilan mitoitusta ei tässä opinnäytetyössä kuitenkaan käydä läpi. Murtorajatilan mitoitus suoritettiin Finnwood-ohjelmalla, josta saatiin suoraan ohjelman laskemat rakenteen värähtelyparametrit näkyville. Värähtelyparametrit laskettiin tämän jälkeen vielä käsinlaskulla.

Kohteessa, johon työn mitoitus tehtiin, oli kuvan 5 mukainen, yhteen suuntaan kantava Kertopuu-palkkirakenne. Palkiston mitat ja palkkijako vaihteli tilan jännevälin mukaan.



KUVA 5. CASE-kohteen välipohjan rakenneleikkaus

Välipohjan rakennekerrokset ja materiaalit ovat:

10 mm	Lattiatasoite, matala-alkalinen, itsetasaava
100 mm	Pintalaatta (kelluva), C30/37
30 mm	Askelääneneriste, THERMSOL STEP
18 mm	Kertokate
300–500 mm	Kerto-S-palkisto, koko ja jako rakennesuunnitelmien mukaan

25+25 mm

Ristiinkoolaus 25x100 k300

15+15 mm

Palokipsilevy, Gyproc GFL15 FireLine

Värähtelymitoituksessa käytössä olevat kuormat olivat rakenteen omapaino, joka vaihtelee hieman palkkikoon vaihtelun takia sekä hyötykuormasta osuus 30 kg/m^2 eli $0,29 \text{ kN/m}^2$. Tässä kohteessa pysyvänä kuormana välipohjarakenteella oli myös ripustuskuorma $0,5 \text{ kN/m}^2$ ja kantamattomien kevyiden väliseinien kuormat $0,5 \text{ kN/m}^2$, jotka laskettiin mukaan mitoituksessa käytettävään lattian omapainoon. Kantamattomat kevyet väliseinät otettiin laskelmiin mukaan, koska on mahdollista, että tulevaisuudessa tilajako tulee muuttamaan ja sen myötä myös väliseinien paikat muuttuvat. Kun tämä otettiin alkuvaiheessa huomioon, vältetään häiritseviä värähtelyitä myös tilanteessa, jossa tilajako muuttuu.

Alkuperäiset Finnwoodin laskelmat sekä käsinlaskut tehtiin ilman palkin sekä vanerin liittovaikutusta, koska elementtitoimittaja ei mitoitusta tehtäessä ollut vielä tiedossa. RFEM-mallien luomisessa käytettiin tätä samaa oletusta.

Ennen varsinaisen mallin luomista ja analysointia tehtiin muutamia testipalkkeja ja -rakenteita, joilla varmistettiin, että malli on luotu oikein sekä mallin asetukset ovat kunnossa. Tarkasteltaessa yksittäistä palkkia vain omalla painolla tehtiin havainto, että RFEMin ja käsinlaskujen tuloksen eroavat hieman toisistaan. Eroja mallin ja käsinlaskujen välillä ei löytynyt, mutta syyksi saatiin lopulta se, että käsinlaskukaavat ja Finnwood-ohjelma ei ota ollenkaan huomioon leikkausmuodonmuutoksen vaikutusta värähtelyyn. Tähän asiaan ei kuitenkaan tässä opinnäytetyössä lähdetty perehtymään.

4.2 Mallin luominen

Laskentamalli luotiin RFEM-ohjelmiston perusnäkymässä. Kertopuupalkisto mallinnettiin kuorirakenteena, kuoren paksuudeksi määritettiin palkin paksuus. Materiaalikirjastosta ei löytynyt Suomen standardeja vastaavaa Kerto-S materiaalia, joten materiaaliksi valittiin Saksan standardisoimisliiton mukainen materiaali. Materiaalin ominaisuudet vastasivat kuitenkin RIL 205-1-2017-taulukon 3.5S mukaisia arvoja lukuun ottamatta syysuunnan veto ja puristuskestävyyttä, jotka olivat valitussa materiaalissa 3 MPa isommat. Mallinnuksen ja materiaalivalinnan jälkeen kuorirakennetta käännettiin 90°, jotta palkki saatiin malliin oikein. Palkkirakennetta kopioitiin tarvittava määrä vastaamaan tarkasteltavaa välipohjapaikkaa. Teräs- ja liimapuupalkit mallinnettiin sauvarakenteena. Teräspalkin materiaalina käytettiin SFS-EN-1993-1-1:2005–05 mukaista materiaalia ja liimapuupalkille käytettiin SFS-EN 14080:2023–08 mukaista materiaalia.

Seuraavassa vaiheessa määritettiin palkkien tuet. Tuet määritettiin mallikohtaisesti vastaamaan mahdollisimman lähelle oikeaa tilannetta rakenteessa.

Kertopuupalkit liitettiin teräs- ja liimapuupalkkeihin jäykän sauvarakenteen, rigid memberin, avulla. Palkin alapään liitoksessa sallittiin kiertymä palkin suunnassa ja yläpään liitoksessa sallittiin kiertymä sekä liukuma palkin suunnassa, näin liitos saatiin toimimaan nivelen tapaan.

Rakennemallia yksinkertaistettiin jättämällä mallista pois kertopuupalkiston päälle tuleva vanerilevy. Vanerilevyn taivutusjäykkyys verrattuna palkiston sekä betonin taivutusjäykkyyteen on niin pieni, että sen merkitys ominaistajuuteen ei ole merkittävä ilman sen liittorakennetta kertopuupalkiston kanssa.

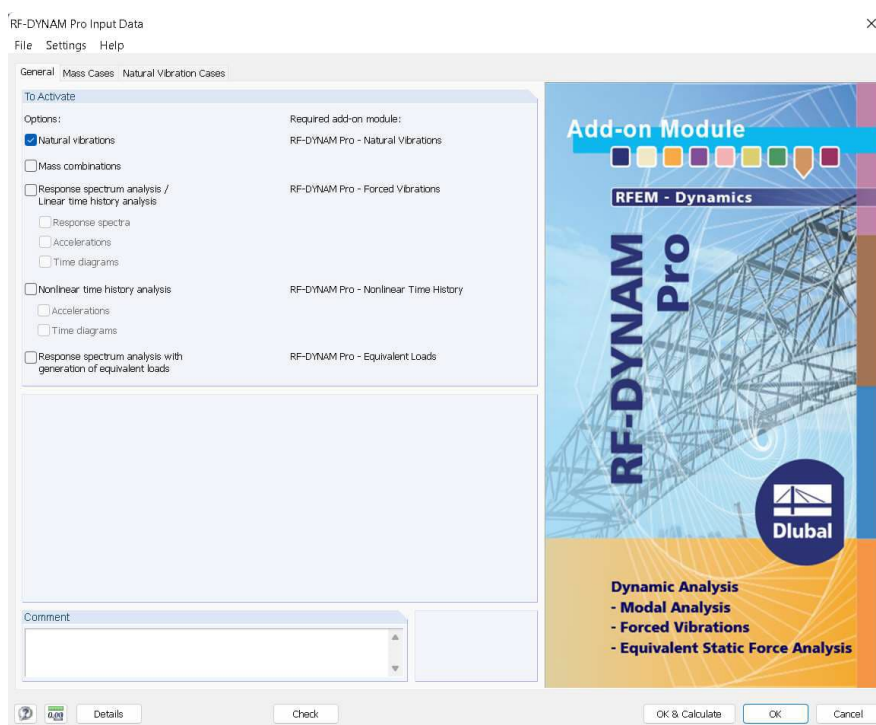
Betonilaatta mallinnettiin kuorirakenteena kertopuupalkiston päälle, Eccentricity-toiminnolla laatta saatiin nostettua kertopuupalkiston päälle. Ilman vapausasteiden määrittystä kertopuupalkki on jäykästi kiinni betonilaatassa. Laatta on kuitenkin rakenteen päällä kelluvana, joten sen liukuma palkin suunnassa ja palkkia vastaan kohtisuorassa suunnassa vapautettiin. Vapausasteet palkin ja betonin välille pystyttiin määrittämään Line hinge -toiminnolla. Nämä vapausasteet kuitenkin estivät mallin laskemisen, koska betonilaatta pääsi vapaasti liikkumaan kertopuupalkiston päällä. Tämä

ratkaistiin tekemällä yhden palkin keskelle pieni kaista, joka kiinnittää palkin sekä betonin toisiinsa. Tämä mahdollisti laskennan.

Ominaistaajuuden laskentaa varten tehtiin yksi kuormitustapaus, joka sisältää rakenteiden omapainon. Kuorma lisättiin betonilaatan päälle neliökuormana käyttäen Surface load -toimintoa. Neliökuorma sisältää välipohjarakenteen omapainon ilman kertopuupalkkeja ja betonilaattaa, hyötykuorman pysyvän osuuden sekä ripustus- ja väliseinäkuormat. 1 kN:n painuman laskentaa varten tehtiin yksi kuormitustapaus, joka ei sisällä rakenteiden omapainoa. Tälle kuormitustapaukselle kuorma lisättiin pistekuormana käyttäen Nodal load -toimintoa.

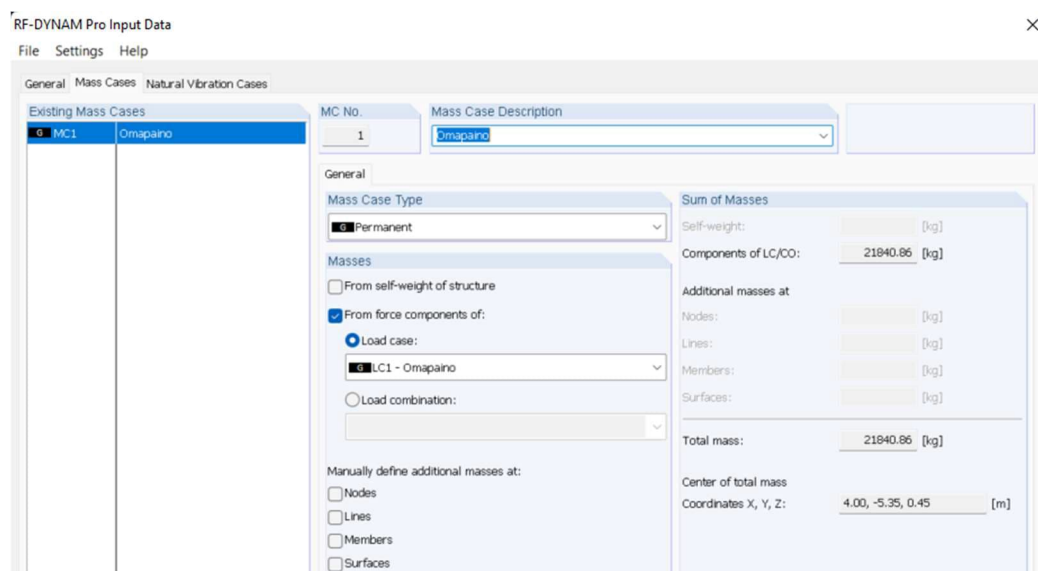
4.3 Värähtelyyn liittyvät parametrit

RFEM-ohjelmistolla ominaistaajuus laskettiin käyttäen RF-Dynam Pro -moduulia. General-välilehdeltä (kuva 6) valitaan Natural Vibrations -moduuli, jolla saadaan laskettua rakenteiden ominaistaajuuksia.



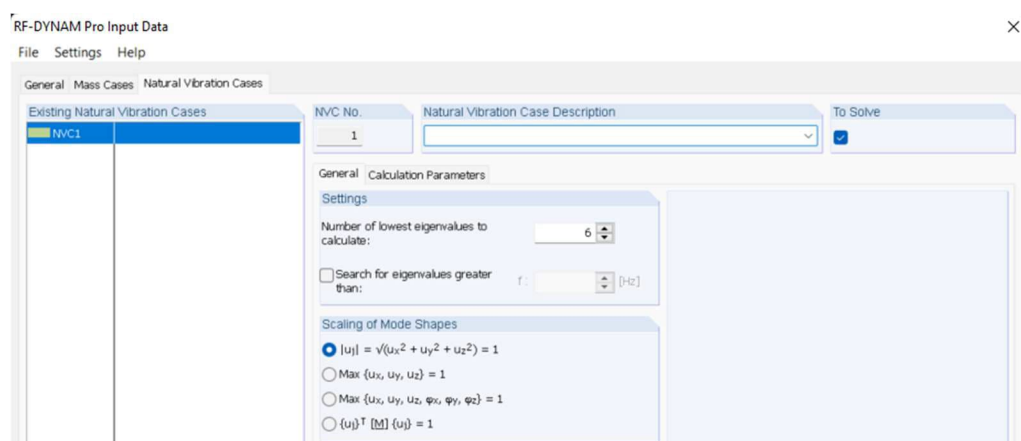
KUVA 6. RF-Dynam Pro -moduulin General-välilehti

Mass Cases -välilehdellä (kuva 7) luotiin oma massatapaus laskentaan. Massat valittiin aikaisemmin luodusta värähtelyn kuormitustapauksesta. Kuormitustapaus sisältää rakenteiden omapainot, joten oli tärkeää, että valinta From self-weight of structure -kohdasta ei ollut aktiivisena. Muuten oman painon aiheuttamat massat olisivat olleet laskelmissa kahteen kertaan. Sum of masses -kohdasta tarkistettiin, että laskennassa käytössä olevat massat olivat oikein.



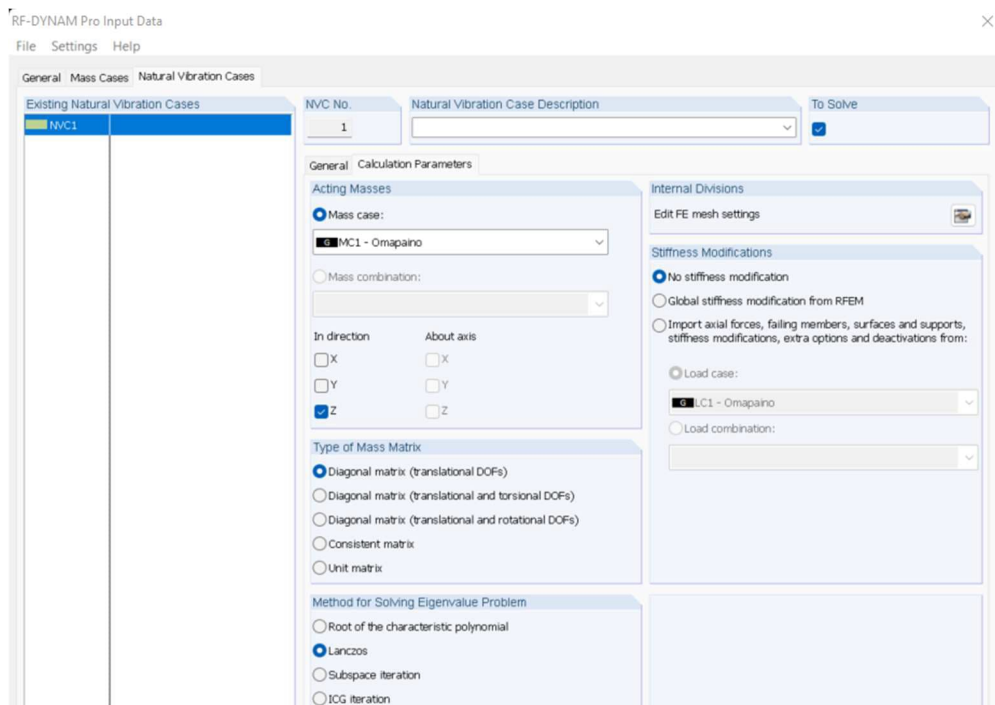
KUVA 7. RF-Dynam Pro -moduulin Mass cases -välilehti

Natural Vibration Cases -välilehden General-välilehdeltä (kuva 8) oli mahdollista Settings-kohdasta valita, montako värähtelyn ominaisarvoa haluttiin laskea.



KUVA 8. RF-Dynam Pro -moduulin Natural Vibration Cases -välilehti, General

Calculation Parameters -välilehdeltä (kuva 9) voitiin värähtelytapaukselle määrittää, mitä massoja laskennassa käytettiin ja missä suunnassa massat toimivat. Tässä laskennassa massat määritettiin toimivaksi vain z-suunnassa. Type of mass matrix -kohdassa voidaan valita, minkä tyyppistä massamatriisia käytetään. Method for Solving Eigenvalue Problem -kohdassa määritettiin mitä erilaisista laskentamenetelmistä käytettiin värähtelyn laskemisessa. Kun kaikki moduulin laskenta-asetukset käytiin läpi, voitiin laskenta suorittaa.



KUVA 9. RF-Dynam Pro -moduulin Calculation Parameters -välilehti

Laskennan tulokset tulevat näkymään taulukko-osioon. Rakenteen ominaisaajuudet nähtiin ensimmäiseltä välilehdeltä (taulukko 3)

TAULUKKO 3. RFEM-ohjelman taulukko-osio, jossa näkyvät rakenteen ominaistajuuudet

5.1 Natural Frequencies

NVC1 - Omapaino Mode Shape 1 (f: 10.155 Hz)

Mode No.	A Eigenvalue λ [1/s ²]	B Angular Frequency ω [rad/s]	C Natural frequency f [Hz]	D Natural period T [s]	E
1	4071.029	63.805	10.155	0.098	
2	4262.080	65.285	10.390	0.096	
3	5564.836	74.598	11.873	0.084	
4	7454.742	86.341	13.742	0.073	
5	9299.297	96.433	15.348	0.065	
6	20937.840	144.699	23.030	0.043	

Natural Frequencies | Mode Shapes by Node | Mode Shapes by Member | Mode Shapes by Surface | Mode Shapes by Mesh Node | Masses in Mesh Points | Effective Modal Mass Factors

1kN:n painuma saatiin laskettua perusnäkymässä. Valittiin painuman laskentaa varten luotu kuormitustapaus ja suoritettiin laskenta. Rakenteen painuma saatiin taulukko osiosta Results-kohdasta (taulukko 4).

TAULUKKO 4. RFEM-ohjelman taulukko-osio, josta nähdään 1 kN:n kuormasta aiheutunut painuma

4.0 Results - Summary

LC2 - 1 kN painuma

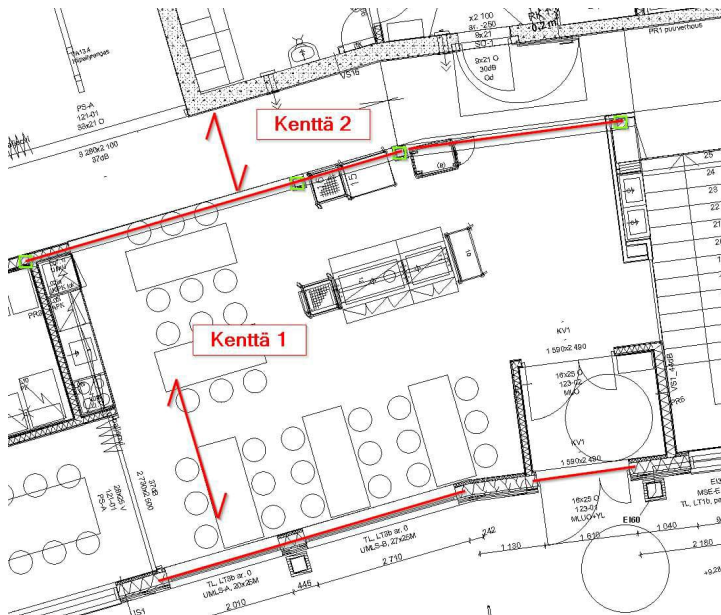
A Description	B Value	C Unit	D Comment
Sum of support forces in Z	-1.00	kN	Deviation: 0.00 %
Resultant of reactions about X	0.200	kNm	At center of gravity of model (X: 4.105, Y: -6.200, Z: 0.499 m)
Resultant of reactions about Y	0.000	kNm	At center of gravity of model
Resultant of reactions about Z	0.000	kNm	At center of gravity of model
Maximum displacement in X-direction	-0.011	mm	FE Mesh Node No. 90 (X: 1.105, Y: -6.400, Z: 0.000 m)
Maximum displacement in Y-direction	-0.009	mm	FE Mesh Node No. 1754 (X: 7.105, Y: -8.600, Z: 0.500 m)
Maximum displacement in Z-direction	-0.054	mm	FE Mesh Node No. 91 (X: 4.105, Y: -6.400, Z: 0.500 m)
Maximum vectorial displacement	0.055	mm	FE Mesh Node No. 91 (X: 4.105, Y: -6.400, Z: 0.500 m)

Results - Summary | Nodes - Support Forces | Nodes - Deformations | Surfaces - Local Deformations | Surfaces - Global Deformations | Surfaces - Basic Internal Forces | Surfaces - Principal Internal Forces

5 CASE-KOHDE

Tarkat käsin lasketut mitoitukset sekä tulokset ovat nähtävillä opinnäytetyön liitteessä 1. Mitoitukset suoritettiin ensin Finnwoodilla sekä sen jälkeen käsinlaskut käyttäen teosta RIL 205-1-2017. Rakenteen värähtelymitoitus suoritettiin rakenteen määräävimpään kohtaan sekä Finnwoodilla että käsinlaskennalla, jonka jälkeen luotiin RFEM-ohjelmalla mallit samoilla lähtötiedoilla.

CASE-kohteena oli kuvan 10 mukainen kohta päiväkotirakennuksen välipohjassa. Kyseisessä kohdassa välipohja tukeutuu aukossa olevaan palkkiin. Jatkuvan palkin jännevälit ovat 5,0 m ja 1,9 m. Välipohjakentän 1 jänneväli on 6,0 m ja kentän 2 jänneväli on 1,8 m. Kentän 2 välipohja tukeutuu toisesta päästä osittain myös ontelolaataston reunavaluun. Tämä kohta oletetaan kuitenkin tässä tutkimuksessa seinäksi, koska mallin luominen ja laskenta laajenee liikaa, jos mallinnetaan myös ontelolaatasto. Välipohjarakenne ei tutkittavassa kohdassa ole täysin symmetrinen, joten käsinlaskut tehdään yksinkertaistetulla rakenteella, jossa kentän 1 välipohja tukeutuu molemmista päistä samanlaiseen jatkuvaan palkkiin. Lopullisen välipohjarakenteen ominaistajuutta tarkastellaan RFEM-mallin avulla. Jatkuvan palkin kohta välipohjassa on määräävä, joten käsinlaskut suoritetaan kyseiselle kohdalle kentän 1 puolelta.



KUVA 10. CASE-kohteen tarkastelussa oleva kohta välipohjassa

5.1 Finnwood

Finnwood-ohjelmassa värähtelymitoituksessa käytettävät valinnat määritettiin MITOITUS-välilehdeltä Värähtelytarkastelu-kohdasta. Laskennassa käytettävät massat ohjelma laskee automaattisesti peruskuormien kuorma-arvoista. Finnwood ohjelmassa betonilaatan paksuudeksi pystyi valitsemaan maksimissaan 80 mm K20 lujuusluokalla, kohteessa laatan paksuus on kuitenkin 100 mm ja lujuusluokka C30/37, joten oli selvää, että Finnwoodin ja käsinlaskun tulokset tulevan jonkin verran eroamaan toisistaan.

Välipohjapalkiksi valittiin murtorajatilamitoituksessa Kerto-S 75x500 k400. Kuvassa 11 näkyy kentän 1 välipohjapalkin värähtelymitoituksessa käytettävät valinnat. Välipohjapalkin ominaistajuudeksi saatiin 10,3 Hz sekä taipumaksi 0,07 mm.

Asetukset	
Värähtelyn parametrit Info	
Pinta-alayksikön massan määrittäminen:	Automaattinen
Pinta-alayksikön massa [kg/m ²]:	498
Huoneen suurin mitta L [m]:	6
Lattiarakenteen leveys B [m]:	6.9
Välipohjan tuentatapa:	2 reunaa tuettu
Ulokkeen lyhennys [mm]:	0.0
Poikittaisjäykisteet:	Ei jäykisteitä
Yläpuolinen lattialevy / rakenne:	Havuvanerit 18 mm
Liittorakennevaikutus:	Ei liittovaikutusta
Kelluva rakenne / poikittaiskoolaus+levytys:	80 mm betonilaatta (K20)
Alapuoliset poikittaiskoolaukset:	Ei alapuolista poikittaiskoolausta

KUVA 11. Finnwoodin laskenta-asetukset välipohjalle

Jatkuvaksi palkiksi valittiin murtorajatilamitoituksessa aluksi GL30c 215x585. Liimapuupalkin värähtelymitoituksessa käytettävät valinnat näkyvät kuvassa 12. Finnwood antaa jatkuvan palkin molemmille jänneväleille oman ominaistajuuden ja ohjelma huomioi palkin jatkuvuuden käyttäen mitoituksessa ekvivalentteja jännevälejä. Pidemmän jännevälin ominaistajuudeksi saatiin 9,7 Hz ja taipumaksi 0,04 mm. Lyhyemmän jännevälin ominaistajuudeksi saatiin 66,9 Hz ja taipumaksi 0 mm.

Asetukset	
Värähtelyn parametrit	Info
Pinta-alayksikön massan määrittäystapa:	Automaattinen
Pinta-alayksikön massa [kg/m ²]:	506
Huoneen suurin mitta L [m]:	6.0
Lattiarakenteen leveys B [m]:	7.8
Välipohjan tuentatapa:	2 reunaa tuettu
Ulokkeen lyhenys [mm]:	0.0
Poikittaisjäykisteet:	Ei jäykisteitä
Yläpuolinen lattialevy / rakenne:	Ei huomioida
Liittorakennevaikutus:	Ei liittovaikutusta
Kelluva rakenne / poikittaiskoolaus+levytys:	Ei kelluvaa rakennetta
Alapuoliset poikittaiskoolaukset:	Ei alapuolista poikittaiskoolautusta

KUVA 12. Finnwoodin laskenta-asetukset liimapuupalkille

Rakenteiden yhdistetty ominaistaajuus laskettiin kaavalla 3 käyttäen Finnwood ohjelmalla saatuja lattiarakenteen ja liimapuupalkin ominaistaajuuksia. Yhdistetyksi ominaistaajuudeksi saatiin 7,1 Hz, joka ei täytä Suomen kansallisen liitteen mitoituskriteeriä, jonka mukaan lattiarakenteen alimman ominaistaajuuden tulee olla yli 9 Hz.

Finnwoodilla saatujen tulosten perusteella vasta palkkikoon ollessa 240x900 päästiin tarpeeksi korkeaan ominaistaajuuteen, jotta yhdistetty ominaistaajuus saatiin nousemaan yli 9 Hz:n. Yhdistetty ominaistaajuus oli tällöin 9,1 Hz. Tässä vaiheessa päädyttiin ratkaisuun, että liimapuupalkin tilalle vaihdetaan teräspalkki, jotta palkin profiilia saadaan pienemmäksi. Teräspalkin ominaistaajuus laskettiin RFEM-ohjelmalla jatkuvana palkkina, palkiksi valikoitui IPE550, koko palkin ominaistaajuudeksi saatiin 19,4 Hz. Yhdistetty ominaistaajuus Finnwoodin tuloksilla lasketulla Kerto-S välipohjalla ja IPE550 palkilla oli 9,1 Hz.

5.2 Käsinlaskut

Kentän 1 välipohjapalkki oli Kerto-S 75x500 k400. Välipohjarakenteen ominaistaajuus laskettiin käyttämällä kaavaa 1. Jänneväli I kyseisessä kohdassa oli 6,0 m, kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys (EI) oli $2,97 \times 10^7 \text{ Nm}^2/\text{m}$, johon laskettiin mukaan palkiston sekä pintalaatan taivutusjäykkyys metriä kohden. Laskennassa käytettävä massa oli 507 kg/m^2 , joka sisältää lattiarakenteen omapainon, hyötykuormasta pysyvän osuuden sekä ripustus- ja väliseinäkuorman. Välipohjarakenteen ominaistaajuudeksi saatiin 10,56 Hz.

Välipohjarakenteen painuma 1 kN:n pistekuormasta laskettiin käyttäen kaavaa 4. Kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys $(EI)_l$ oli $2,97 \times 10^7 \text{ Nm}^2/\text{m}$, johon lasketaan mukaan palkiston sekä pintalaatan taivutusjäykkyys metriä kohden. Poikittaissuuntaa vastaava taivutusjäykkyys $(EI)_b$ oli $2,75 \times 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$, johon lasketaan mukaan vain pintalaatan taivutusjäykkyys. Välipohjarakenteen painumaksi saatiin 0,052 mm.

Liimapuupalkki oli aluksi GL30c 215x585. Liimapuupalkin pidemmän jännevälin ominaistuuksia laskettiin käyttämällä kaavaa 1. Jatkuvan palkin pidemmän aukon jänneväli I kyseisessä kohdassa oli 5,0 m, kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys $(EI)_l$ oli $1,55 \times 10^7 \text{ Nm}^2/\text{m}$, jossa on mukana vain liimapuupalkin oma taivutusjäykkyys. Laskennassa käytettävä massa oli $525,9 \text{ kg/m}^2$, joka sisältää liimapuun omapainon, lattiarakenteen omapainon, hyötykuormasta pysyvän osuuden sekä ripustus- ja väliseinäkuorman. Liimapuupalkin pidemmän jännevälin ominaistuuksiksi saatiin 10,80 Hz. Palkin jatkuvuutta ei käsinlaskuissa huomioitu vaan ominaistuuksia laskettiin värähtelyn peruskaavalla pidemmän jännevälin pituudella.

Liimapuupalkin painuma 1 kN:n pistekuormasta laskettiin käyttäen kaavaa 4. Kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys $(EI)_l$ oli $4,66 \times 10^7 \text{ Nm}^2$, jossa on mukana vain liimapuupalkin oma taivutusjäykkyys. Poikittaissuuntaa vastaava taivutusjäykkyys oli $0 \text{ Nm}^2/\text{m}$, joten päädyttiin käyttämään kaavan 4 osaa, jossa ei tarvita apusuuretta. Välipohjarakenteen painumaksi saatiin tällä kaavalla 0,056 mm.

Käsin laskettujen rakenteiden yhdistetty ominaistuuksia laskettiin kaavalla 3. Yhdistetyksi ominaistuuksiksi saatiin 7,55 Hz. Kuten Finnwoodista saatujen tulosten perusteella jo voitiin todeta, rakenteiden yhdistelmä ei täytä värähtelymitoitusvaatimuksia. Rakenteiden yhdistetty painuma oli 0,108 mm. Painuman laskennassa laskettiin yhteen välipohjan sekä liimapuupalkin painuma

Käsinlaskujen perusteella palkkikoolla 240x855 päästäisiin yhdistetyn ominaistuuksien laskennassa ominaistuuksien arvoon 9,33 Hz, joka täyttää värähtelykriteerit. Tämä eroaa Finnwoodin mitoitusten perusteella tehdystä lopputuloksesta, näiden laskelmien mukaan palkkikoon tulisi olla 240x900.

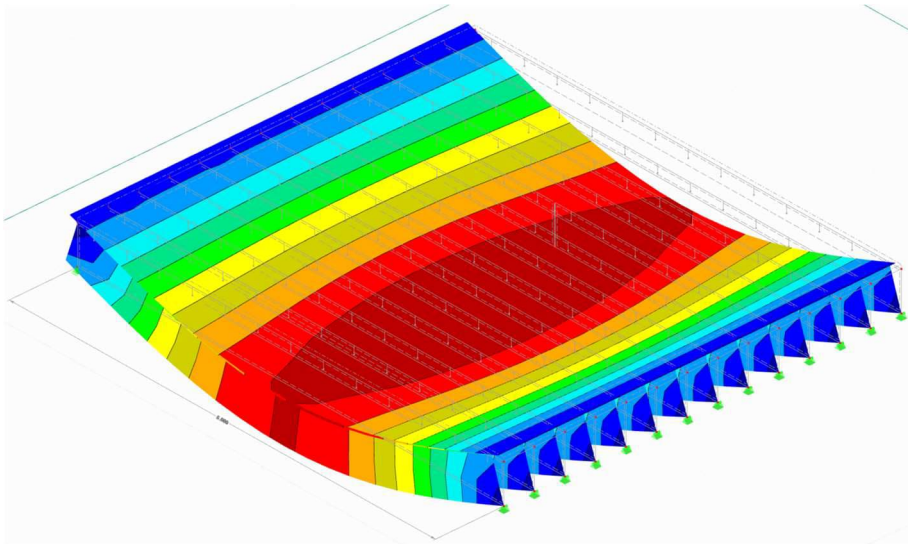
Liimapuupalkin tilalle tulevan teräspalkin ominaistajuus oli RFEM-ohjelmalla laskettuna 19,4 Hz. Yhdistetty ominaistajuus käsinlaskun tuloksilla lasketulla Kerto-S välipohjalla ja IPE550 palkilla oli 9,33 Hz.

Todellinen rakenne ei kuitenkaan ole täysin Finnwoodissa ja käsinlaskuissa käytettyjen oletusten kaltainen. Yhdistetyn ominaistajuuden kaava olettaa, että joustava tuki on välipohjarakenteen molempien päästen tuilla, joten kaavaa käyttämällä saatiin varmalla puolella oleva tulos. CASE-kohteen tapauksessa välipohja tukeutuu toisesta päästä teräspalkkiin ja teräspalkin toisella puolella välipohja jatkuu kuvan 12 mukaan sekä välipohjan toinen pää on osittain ison ikkuna-aukon kohdalla. Oikea rakenne ei myöskään ole täysin suorakulmion muotoinen. Ilman yhdistetyn ominaistajuuden tarkastamista olisi voitu päätyä tilanteeseen, jossa rakenne värähtelee käytön aikana ja aiheuttaa epämukavuutta käyttäjilleen. Vaihtamalla liimapuupalkki teräspalkkiin saatiin myös pienennettyä kantavan palkin profiilia, joka helpottaa esimerkiksi ilmanvaihtokanavien sijoittelua.

5.3 RFEM

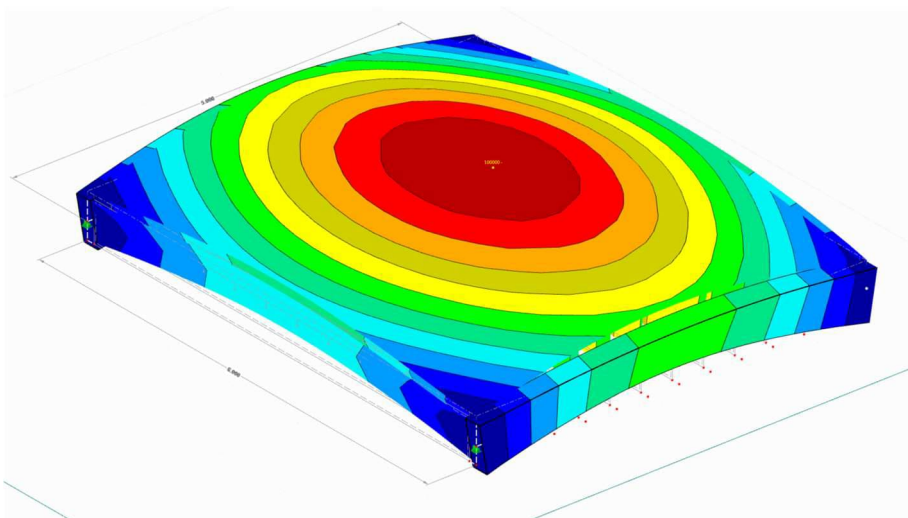
RFEM ohjelmalla luotiin erilaisia malleja luvun 4.2 mukaisesti. Näiden mallien tarkastelun jälkeen luotiin case kohteen mukainen malli tarkastelussa olevasta kohdasta rakennuksen välipohjassa.

Ensimmäinen malli luotiin Kerto-S 75x500 k400 välipohjasta, joka tukeutuu molemmista päistä kiinteän tuen päälle. Mallin alimmaksi ominaistajuudeksi saatiin 10,22 Hz. Kuvassa 13 nähdään rakenteen alimman ominaistajuuden ominaismuoto. Ohjelman antama alin ominaistajuus on suuruusluokaltaan sama kuin Finnwoodin ja käsinlaskujen tulokset. Painumaksi saatiin 0,054 mm.



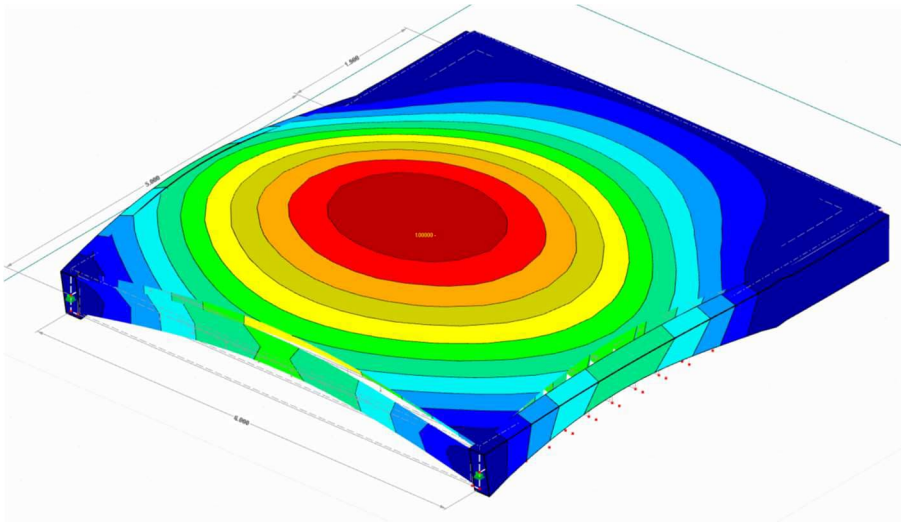
KUVA 13. Kerto-S 75x500 mm k400 välipohjan alimman ominaistaajuuden ominaismuoto

Seuraavana vaiheena tarkasteltiin välipohjarakennetta, joka tukeutuu molemmista päistä GL30c 215x585 liimapuupalkkiin, eli rakenteen yhdistettyä ominaistaajuutta. Tilannetta tarkasteltiin ensin niin, että liimapuupalkki oli yksiaukkoinen 5,0 m jännevälillä. Tällä rakenteella alimmaksi ominaistaajuudeksi saatiin 8,33 Hz. Kuvassa 14 nähdään rakenteen alimman ominaistaajuuden ominaismuoto. Painumaksi saatiin 0,072 mm. RFEM-ohjelmalla painuma laskettiin asettamalla kuormitus-tapauksessa 1 kN:n kuorma vain välipohjarakenteen keskelle.



KUVA 14. Liimapuupalkin ja välipohjan yhdistetyn rakenteen alimman ominaistaajuuden ominaismuoto

Sama rakenne luotiin seuraavaksi käyttäen liimapuupalkkina jatkuvaa palkkia 5,0 m ja 1,9 m jänneväleillä, tällä rakenteella ominaistajuudeksi saatiin 8,9 Hz ja painumaksi 0,060 mm. Kuvassa 15 nähdään rakenteen alimman ominaistajuuden ominaismuoto. Tuloksista voidaan huomata, että kun tarkasteltiin rakennetta vain yksiaukkoisena rakenteena, alin ominaistajuus oli matalampi kuin jatkuvapalkkisella rakenteella. Jatkuvan palkin lyhyempi jänneväli oli tässä tapauksessa lyhyt, joten se nosti palkin ominaistajuutta kokonaisuudessaan. Jatkuvapalkkisella rakenteella olisi RFEM-tulosten perustella päästy jo lähelle värähtelymitoituksen 9 Hz:n rajaa.

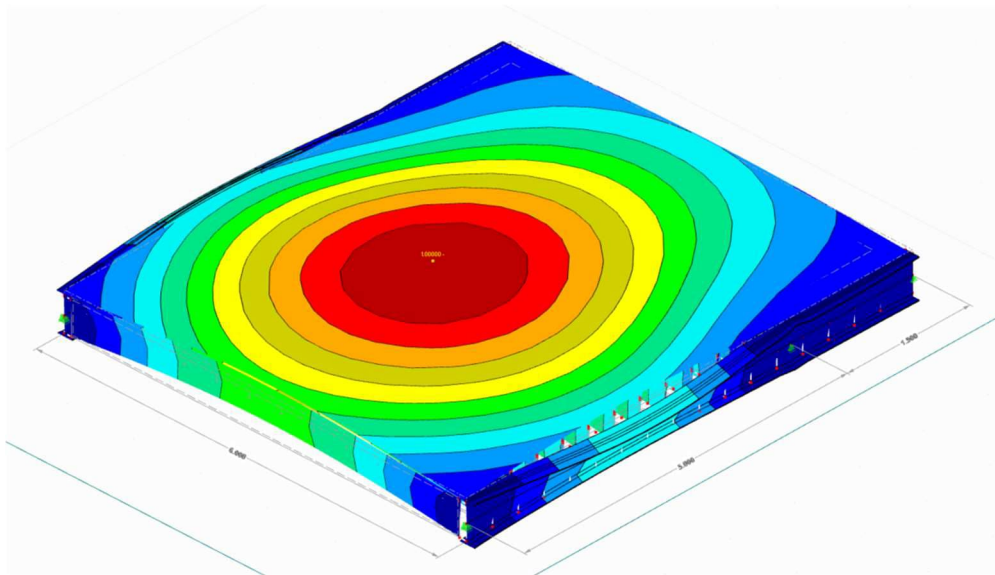


KUVA 15. Liimapuupalkin ja välipohjan yhdistetyn rakenteen alimman ominaistajuuden ominaismuoto

Samat tarkastelut tehtiin käsinlaskujen perusteella saadulle GL30c 240x855 palkille. Yksiaukkoisen rakenteen ominaistajuudeksi saatiin 9,63 Hz ja painumaksi 0,060 mm sekä jatkuvan palkkirakenteen ominaistajuudeksi saatiin 9,80 Hz ja painumaksi 0,057 mm.

Ohjelmalla luotiin myös mallit, jossa välipohja tukeutuu vain toisesta päästä joustavaan tukeen. Tällaiselle tilanteelle ei käsinlaskukaavoja vielä löydy Eurokoodista tai sen kansallisesta liitteestä. Oletettavasti tällaisten rakenteiden ominaistajuudet ja painumat asettuivat kiinteillä tuilla olevan välipohjan ja molemmista päistä joustavasti tuetun välipohjan tulosten väliin.

Malli luotiin seuraavaksi rakenteesta, jossa liimapuupalkki vaihdettiin IPE550 palkkiin. Rakenteen alimmaksi ominaistajuudeksi saatiin 9,38 Hz ja painumaksi 0,060 mm. Kuvassa 16 nähdään rakenteen alimman ominaistajuuden ominaismuoto.

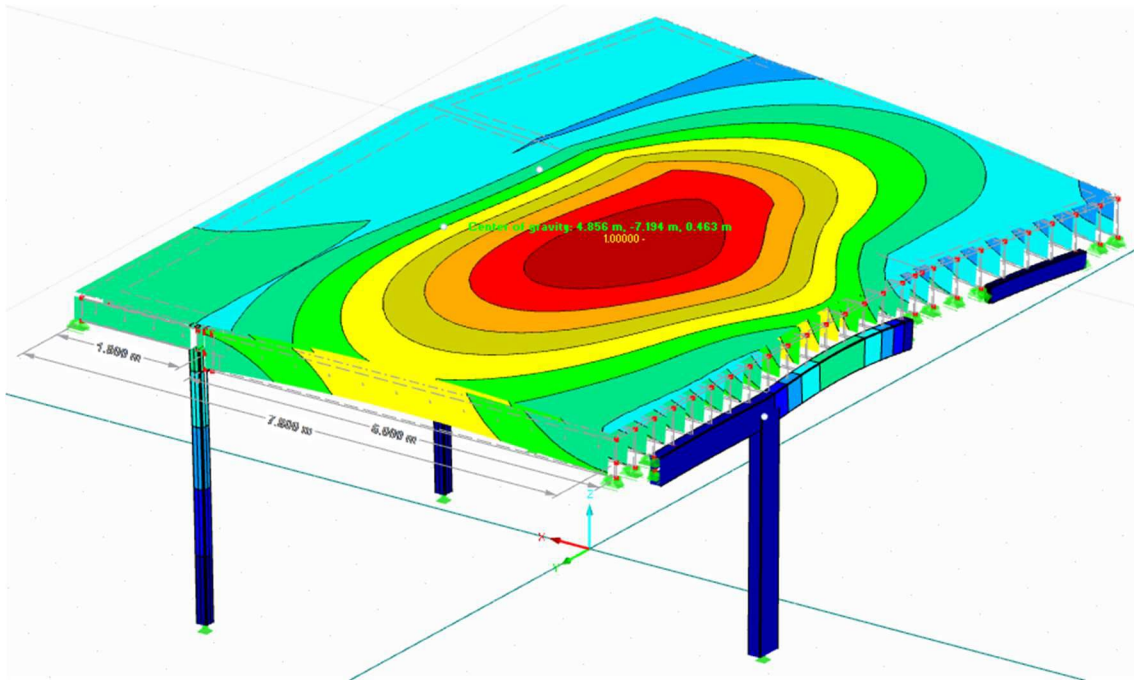


KUVA 16. IPE550 palkin ja välipohjan yhdistetyn rakenteen alimman ominaistaajuuden ominaismuoto

Käsin laskettujen yksiaukkoisten liimapuupalkkien ja kertopuupalkiston yhdistetty ominaistaajuus on matalampi kuin RFEM-ohjelman antama ominaistaajuus. Tämä johtuu osittain ainakin siitä, että käsinlaskut suoritettiin 6,0 m jännevälillä olevalle välipohjarakenteelle, kun taas mallissa rakennetta lyhennettiin molemmista päistä puolikkaan liimapuupalkin leveyden verran.

RFEM-malleja tutkimalla päädyttiin samaan lopputulokseen kuin Finnwood laskelmien sekä käsinlaskujen perusteella, että alun perin murtorajatilamitoituksessa valitulla GL30c 214x585 liimapuupalkilla ei päästä mitoituskriteerien vaatiman 9 Hz ominaistaajuuden yli.

Viimeisessä vaiheessa luotiin välipohjasta kokonaismalli, jossa otettiin lisäksi huomioon myös kentän 2 välipohja, pilarit sekä ulkoseinällä olevat aukonylityspalkit. Tutkittavan alueen ominaistaajuudeksi saatiin 9,52 Hz ilman pilareita ja pilarien kanssa 9,10 Hz. Kuvassa 17 nähdään rakenteen alimman ominaistaajuuden ominaismuoto. Tuloksista voidaan huomata, että tutkimalla määräävintä kohtaa välipohjassa päästiin lähelle oikean rakenteen ominaistaajuutta. Huomionarvoista on myös se, että pilareilla on rakenteen ominaistaajuuteen myös vaikutusta. Tämän tutkimuksen perusteella yksinkertaisilla rakenteilla päästään melko lähelle samoihin tuloksiin kuin käsinlaskujen perusteella.



Kuva 17. Koko rakenteen alimman ominaistajuuden ominaismuoto

5.4 Tulokset

Alla näkyvät taulukoituna tiivistetyssä muodossa Finnwoodista, käsinlaskuista ja RFEM ohjelmasta saatujen ominaistajuuksien sekä painumien arvot. Taulukon merkintä 1x tarkoittaa, että välipohja tukeutuu vain toisesta päästä joustavalle tuelle ja 2x tarkoittaa, että välipohja tukeutuu molemmista päistä joustavalle tuelle.

Taulukosta 5 huomataan, että yksinkertaiselle välipohjarakenteelle kaikki laskentamenetelmät antavat samansuuruisia tuloksia. Finnwoodista saatujen tulosten erot käsinlaskujen tuloksiin selittyvät osittain sillä, että ohjelmassa on valittavana vain 80 mm K20 lujuusluokan pintabetoni, joka vaikuttaa rakenteen taajuuteen ja painumaan.

TAULUKKO 5. Kiinteällä tuella olevan välipohjan ominaistajuudet ja painumat

RAKENNE	Finnwood	Käsinlasku	RFEM
Välipohja Kerto-S 75x500 k400	10,3 Hz 0,07 mm	10,56 Hz 0,052 mm	10,22 Hz 0,054 mm

Taulukon 6 tuloksista nähdään, että joustava tuki vaikuttaa rakenteen ominaistajuuuteen. Välipohjan sekä 215x585 liimapuupalkin ominaistajauudet olivat molemmat yli 9 Hz, kuitenkin yhdistettynä rakenteena niiden ominaistajuuus jää alle 9 Hz:n. Joustavan tuen vaikutus ominaistajuuuteen pienenee mitä jäykempi tukipalkki on. Käsinelaskujen tulokset poikkeavat hieman RFEMin antamasta tuloksesta. Käsien laskemalla päädytään rakenteen ominaistajuuden suhteen varmalle puolelle

1 kN aiheuttama painuma kasvaa, kun välipohja tukeutuu joustavaan tukeen. CASE-tapauksessa painuma on melko pieni, joten se ei kuitenkaan muodostu ongelmaksi, vaikka joustavat tuet tulevatkin välipohjarakenteen päähän. Suomen kansallisessa liitteessä pistekuorman aiheuttaman painuman raja on kuitenkin niin pieni, että joustavan tuen vaikutus painumaan tulee tarkastaa.

TAULUKKO 6. Tutkitut välipohjan ja palkkien yhdistelmät sekä niiden ominaistajauudet ja painumat

RAKENNE	Finnwood	Käsinlasku	RFEM
Välipohja + 1x GL30c 215x585	-	-	8,89 Hz 0,064 mm
Välipohja + 2x GL30c 215x585	-	7,55 Hz 0,108 mm	8,33 Hz 0,072 mm
Välipohja + 1x GL30c 215x585, jatkuva palkki	-	-	9,31 Hz 0,060 mm
Välipohja + 2x GL30c 215x585, jatkuva palkki	7,1 Hz	-	8,95 Hz 0,065 mm
Välipohja + 1x GL30c 240x855	-	-	10,01 Hz 0,057 mm
Välipohja + 2x GL30c 240x855	-	9,33 Hz 0,068 mm	9,63 Hz 0,060 mm
Välipohja + 1x GL30c 240x855, jatkuva palkki	-	-	9,96 Hz 0,055 mm
Välipohja + 2x GL30c 240x855, jatkuva palkki	8,9 Hz	-	9,80 Hz 0,057 mm
Välipohja + 1x IPE550, jatkuva palkki	-	-	9,40 Hz 0,060 mm
Välipohja + 2x IPE550, jatkuva palkki	9,1 Hz	9,3 Hz	9,38 Hz 0,061 mm

Ilman yhdistetyn ominaistajuuden tarkastamista olisi päädytty tilanteeseen, jossa yhdistetty ominaistajuus jää alle Suomen kansallisen liitteen määrittämän alarajan. Tämä olisi johtanut tilanteeseen, jossa välipohjarakenne värähtelee käytön aikana ja aiheuttaa epämukavuutta käyttäjilleen. Jälkeenpäin rakenteen värähtelyominaisuuksia on vaikea korjata, joten on tärkeää, että rakenteen värähtelyä tutkitaan ennen rakentamista.

Taulukosta 7 nähdään CASE-kohteen välipohjarakenteen ominaistajuus. Tuloksista voidaan huomata, että tutkimalla oletettavasti määrittävimmän kohdan ominaistajuutta päästään lähelle RFE-Millä saatua ominaistajuutta. Pilarien vaikutusta ei käsinlaskennalla voida ottaa huomioon, joten RFEM-malli antaa myös valmiudet tutkia tätä asiaa. Tuloksista huomataan, että myös pilareilla on vaikutusta yhdistettyyn ominaistajuuteen, kuitenkin tässä tapauksessa pilareiden vaikutus on melko pieni. RFEM-mallien perusteella saadaan välipohjarakenteen ominaistajuus pysymään yli Suomen kansallisen liitteen määrittämän 9 Hz:n rajan.

TAULUKKO 7. CASE-kohteen välipohjarakenteen ominaistajuudet

RAKENNE	RFEM
Tutkittava alue, ilman pilareita	9,52 Hz
Tutkittava alue, pilarit	9,10 Hz

5.5 Muut värähtelyn parametrit

Kentän 1 välipohjarakennetta haluttiin vielä arvioida vuoden 2019 eurokoodiluonnoksen värähtelykriteerien mukaan. Luonnoksessa lattiarakenteet jaetaan erilaisiin suoritustasoluokkiin kuvan 5 mukaan. Eurokoodiluonnoksen mukaiset käsinlaskut löytyvät liitteestä 2.

Luonnoksen ohjeiden mukaan välipohjan ominaistajuudeksi saatiin 10,56 Hz, joka vastaa myös tällä hetkellä voimassa olevan eurokoodin mukaan saatua taajuutta. Luonnoksen ohjeiden mukaan ominaistajuuden ollessa 4,5–8 Hz, lattia lasketaan matalataajuuslattiaksi ja tällöin tarkastellaan

rakenteen kiihtyvyyttä. Opinnäytetyössä tarkastelussa oleva lattiarakenne on kuitenkin yli 8 Hz, joten sitä tarkastellaan rakenteen nopeuden perusteella.

Jäykkyyskriteeri tarkastetaan sekä matala- että korkeataajuuslattian tapauksessa, kuvassa 5 on annettu suoritustasoluokkien mukaiset jäykkyyskriteerin maksimipainumat. Jäykkyyskriteerin painumaksi saatiin käsin laskemalla 0,05 mm, jolla päästään suoritustasoluokkaan I. Jäykkyyskriteeri vastaa lähes RIL:n ohjeen mukaista 1 kN:n painuman laskentaa ja sillä saatiinkin käsin laskemalla lähes sama painuma kuin RIL:n mukaan suoritettulla laskennalla. Kuvasta 5 huomataan, että Suomessa tällä hetkellä käytössä olevalla 0,5 mm maksimipainumalla päästäisiin eurokoodiluonnoksella suoritustasoluokkaan III.

Vastekerroin R lasketaan sekä matala- että korkeataajuuslattian tapauksessa. Kertoimeksi saatiin 1,03 jolla päästään suoritustasoluokkaan I. Nopeuskriteerin mukaan nopeuden tehollisarvo tulee olla pienempi kuin $Rx0,0001$. Tämä kriteeri täyttyi, joten rakenne täyttää nopeuskriteerin.

Käsinlaskujen perusteella CASE-kohteen lattiarakenne kuuluu suoritustasoluokkaan I sekä jäykkyyskriteerin että vastekertoimen perusteella. Myös ominaistaajuuden sekä nopeuden kriteerit täytyivät.

Luonnoksesta löytyy myös kaavoja, joilla pystytään arvioimaan joustavan tuen vaikutusta ominaistaajuuteen. Tällä hetkellä voimassa olevasta eurokoodissa ei tällaisia kaavoja löydy. Luonnoksesta löytyvät kaavat sekä tilanteelle, jossa välipohja tukeutuu vain toisesta päästä joustavaan tukeen, että tilanteelle, jossa välipohja tukeutuu molemmista päistä joustavaan tukeen.

Eurokoodiluonnoksessa olevilla kaavoilla päästiin lähemmän RFEM ohjelman laskemia yhdistetyn ominaistaajuuden arvoja sekä pystyttiin helposti arvioida myös rakennetta, jossa joustava tuki on vain toisella puolella välipohjaa (taulukko 8). Tuleva eurokoodi antaa ohjeita ja helpottaa rakenteiden systeemivärentelyn laskemista.

TAULUKKO 8. Välipohjan ja GL30c palkin yhdistettyjä ominaisuuksia

RAKENNE	Käsinlasku	Käsinlasku uusi Eurokoodi	RFEM
Välipohja + 1x GL30c 215x585	-	9,19 Hz	8,89 Hz
Välipohja + 2x GL30c 215x585	7,55 Hz	8,25 Hz	8,33 Hz

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, miten paljon välipohjan tukeutuminen joustavalle tuelle vaikuttaa välipohjan värähtelyyn. Alkuun välipohjan murtorajatilan mitoituksen yhteydessä tarkastettiin myös välipohjan värähtelykriteerit. Nämä kriteerit täyttyivät Finnwood-ohjelmalla saatujen tulosten perusteella. Kuitenkin tulokset, jotka ohjelmalla saatiin, olivat tilanteelle, jossa välipohja tukeutuu joustamattoman tuen päälle. CASE-kohteena olevassa päiväkotirakennuksessa oli paikkoja, joissa välipohja tukeutui palkkiin. Näiden kohtien systeemivärähtely tarkastettiin ensin käyttäen käsinlaskentakaavaa. Viimeisessä vaiheessa tarkasteltiin saatuja tuloksia RFEM-ohjelmalla tehtyjen mallien avulla.

Finnwood ohjelmalla saatiin helposti yksittäisten rakenteiden värähtelymitoitus tehtyä, käsinlaskennalla ja RFEM-ohjelmalla saatiin yksinkertaisten rakenteiden ominaistajuudet tällaisilla rakenteilla lähes samaksi kuin Finnwoodilla. Välipohjan ja tukipalkkien yhdistettyä ominaistajuutta laskettaessa käsinlaskulla päädyttiin matalampaan ominaistajuuteen kuin RFEM-ohjelmalla. Värähtelymitoitusta tehtäessä vain käsinlaskun perusteella, päädytään varmalla puolella olevaan tulokseen. Jos rakenteita halutaan optimoida, RFEM ohjelmalla tehty värähtelymitoitus on hyvä vaihtoehto. Kuitenkin oikeanlaisen mallin luominen välipohjasta puupalkkirakenteilla vaatii perehtymistä asiaan ja voi viedä huomattavasti aikaa, jos asiaa alkaa vasta opettelemaan.

Tässä opinnäytetyössä rakennetta yksinkertaistettiin jättämällä mallista pois kertopuupalkiston päälle tuleva vaneri. Opinnäytetyötä tehtäessä ei ollut tiedossa elementtitoimittaja, joten ei ollut tiedossa tuleeko vaneri rakenneliimattuna kertopuupalkiston päälle. Tämän vuoksi mitoituksessa ei ole otettu huomioon kertopuupalkiston ja vanerin liittovaikutusta. Jos rakenne tulee liimattuna se tulee nostamaan rakenteen alinta ominaistajuutta. Käsinlaskujen ja RFEM ohjelman perusteella ei kuitenkaan voida arvioida täysin oikein oikean rakenteen värähtelyä, koska esimerkiksi liitosten jousto ja valmistus- sekä asennusepätkätkuudet vaikuttavat rakenteen värähtelykäyttäytymiseen. RFEM-mallin toimivuuteen vaikuttaa myös, kuinka hyvin malli on saatu vastaamaan oikeaa rakennetta.

Joustavalla tuella on iso vaikutus lattian alimpaan ominaistaajuuteen. Käsinelaskennan ja RFEM mallien perusteella on käynyt ilmi, että jos välipohja mitoitetaan vain sellaiselle tilanteelle, että välipohja tukeutuu joustamattomalle tuelle, eikä tarkasteta välipohjan ja primääripalkin yhdistettyä ominaistaajuutta, voi välipohjan värähtely jäädä helposti alle 9 Hz jos ominaistaajuus on yksittäisillä rakenneosilla lähelle 9 Hz:n rajaa. Pilari-palkki rakenteisella välipohjalla yhdistetty ominaistaajuus tulisi ehdottomasti tarkastaa, jotta ei päädytä rakenteeseen, joka ei täytä värähtelyn osalta mitoituskriteerejä.

Joustavalla tuella on vaikutusta myös 1 kN pistekuorman aiheuttamaan painumaan. Käsinelaskulla tukipalkin painuma huomioitiin laskemalla yhteen liimapuupalkin sekä välipohjapalkin painuma. RFEMillä painuma laskettiin lisäämällä pistekuorma vain palkkiin tukeutuvan välipohjan keskelle. Suomen kansallisen liitteen mukaan painuma saa olla maksimissaan 0,5 mm. Tämä raja on niin pieni, että tukipalkkien vaikutus painumaan tulisi tarkastaa pelkän välipohjarakenteen painuman tarkastamisen sijaan.

Vuoden 2019 Eurokoodiluonnoksen perusteella värähtelymitoituksen kulku tulee muuttumaan nykyisestä. Luonnoksessa lattiat jaetaan eri suoritustasoluokkiin ja siitä löytyy ohjeet sekä matala- että korkeataajuuslattian mitoittamiseen. Matalataajuuslattian kohdalla arvioidaan rakenteen kiihtyvyyttä ja korkeataajuuslattian kohdalla nopeutta. Lisäksi värähtelyä arvioidaan myös jäykkyyskriteerin perustella, joka on hyvin lähelle sama kuin tällä hetkellä voimassa olevan Suomen kansallisen liitteen mukainen 1 kN:n painuma. CASE-kohteena olevan rakennuksen välipohja arvioitiin tämän luonnoksen perusteella ja päädyttiin luokkaan I, joka on luokituksista paras. Värähtelymitoitukselle on tällä hetkellä olemassa melko vähän ohjeistusta, joten on hyvä, että uusi eurokoodi tulee antamaan enemmän työkaluja suunnittelijoille arvioida rakenteiden värähtelyä.

Työn loppuvaiheessa tuli esille se, että tuleeko värähtelymitoituksessa ottaa betonin viruma huomioon. Tästä asiasta ei löydy ohjeistusta eurokoodista tai RIL:n kirjasta, joten tässä opinnäytetyössä virumaa ei huomioitu laskelmissa. Viruma ja sen huomioiminen värähtelymitoituksessa olisi mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe.

LÄHTEET

1. A-Insinöörit. Yritys. A-Insinöörien tarina. Hakupäivä 11.1.2023. <https://www.ains.fi/yritys/tarina>.
2. Dlubal Software GmbH. RFEM 5 FEA Structural Analysis Software. Hakupäivä 2.1.2023. <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-5/what-is-rfem>.
3. Eurokoodit 2021. Toinen sukupolvi. Tilanne. Hakupäivä 2.2.2023. <https://www.eurocodes.fi/eurokoodien-tilanne-nyt/>.
4. Metsä Group. Finnwood mitoitusohjelmisto. Hakupäivä 2.1.2023. <https://in/www.metsa-group.com/fi/metsawood/tuotteet-ja-palvelut/digitaaliset-tyokalut/finnwood/>.
5. Puuinfo. Vaapu-luentoaineistot. Puuvälipohjan värähtelymitoitus. Hakupäivä 24.3.2023. https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/43_Puuv%C3%A4lipohjan-v%C3%A4r%C3%A4htelymitoitus.pdf.
6. Puuinfo 2020. Rakenteet, rankarakenteet, jännevälit, välipohjat. Hakupäivä 6.12.2022. <https://puuinfo.fi/rakenteet/rankarakenteet/jannevalit/>.
7. Puuinfo 2022. Suunnittelu, ohjeet, Eurokoodi 5 lyhennetty suunnitteluohje. Hakupäivä 7.3.2023. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/eurokoodi-5-lyhennetty-suunnitteluohje/>.
8. RIL. Kirjakauppa, ohjeet ja normit. RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje Eurokoodi. Hakupäivä 7.3.2023. <https://www.ril.fi/kirjakauppa/ohjeet-ja-normit/ril-205-1-2017-puurakenteiden-suunnitteluohje-eurokoodi-p-714.html>.
9. RIL 205-1-2017 2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
10. Schirén, Whokko & Swahn, Trixie 2019. Vibrations in residential timber floors. A comparison between the current and the revised Eurocode 5. Linnaeus University. Faculty of Technology

Department of Building Technology. Master's Thesis in Structural Engineering. Hakupäivä 3.2.2023. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1354527/FULLTEXT01.pdf>.

11. Suomen RakMk 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Puurakenteet. Helsinki: Ympäristöministeriö. Hakupäivä 2.1.2023. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf/7b5d70f7-f18f-66fe-8da1-d467e39c5ffe/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf?t=1603260650690.
12. Talja, Asko 1996. Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallinta. VTT tiedote 1970. Hakupäivä.17.11.2022. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1996/T1790.pdf>.
13. Talja, Asko & Toratti, Tomi. VTT ohje. Lattioiden värähtelysuunnittelu. Hakupäivä 6.12.2022. <https://tiedostot.rakennustieto.fi/rakentajain-kalenteri/RK030302.pdf>.
14. Talja, Asko, Toratti Tomi & Järvinen Erkki 2002. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. VTT tiedote 2124. Hakupäivä 17.11.2022. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf>.

Välipohjan ominaistaajuus**Kerto-S 75x500 k400**

Lähtötiedot:

$$l := 6 \text{ m}$$

Lattiarakenteen jänneväli

$$b_p := 75 \text{ mm}$$

Palkin leveys

$$h_p := 500 \text{ mm}$$

Palkin korkeus

$$s_p := 400 \text{ mm}$$

Palkkijako

$$\gamma_p := 5.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Kertopuun tilavuuspaino

Laskennassa käytettävät massat:

$$g_{palkki.75x500} := \gamma_p \cdot b_p \cdot h_p \cdot \frac{1}{s_p} = 0.48 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Palkin omapaino

$$g_{välipohjarak.} := 3.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Välipohjarakenteen omapaino

$$g_{ripustus} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Ripustuskuorma

$$g_{välis.} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Väliseinäkuorma

$$g_{yht} := g_{palkki.75x500} + g_{välipohjarak.} + g_{ripustus} + g_{välis.} = 4.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Pysyvät kuormat yhteensä

$$m_{pk} := \frac{g_{yht}}{g} = 477.04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Pysyvien kuormien massa

$$m_{hk} := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Hyötykuorman osuus massasta

$$m := m_{pk} + m_{hk} = 507.04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Laskennassa käytettävä massa

Kerto-S-palkin taivutusjäykkyys:

$$E_p := 13800 \frac{N}{mm^2}$$

Kerto-S palkin kimmokerroin

$$I_p := \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = (7.81 \cdot 10^8) mm^4$$

Kerto-S-palkin neliömomentti

$$EI_p := E_p \cdot I_p \cdot \frac{1}{s_p} = (2.7 \cdot 10^7) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Palkin kantavaa suuntaa l vastaanava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti

Pintalaatan taivutusjäykkyys:

$$b_c := 1000 mm$$

Laatan leveys

$$h_c := 100 mm$$

Laatan korkeus

$$s_c := 1000 mm$$

Tarkasteltava leveys

$$E_c := 33000 \frac{N}{mm^2}$$

Betonin kimmokerroin (Lujuusluokka C30/37)

$$I_c := \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} = (8.33 \cdot 10^7) mm^4$$

Pintalaatan neliömomentti

$$EI_c := E_c \cdot I_c \cdot \frac{1}{s_c} = (2.75 \cdot 10^6) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Pintalaatan kantavaa suuntaa l vastaanava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti

$$EI_l := EI_p + EI_c = (2.97 \cdot 10^7) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Palkiston ja betonin yhdistetty taivutusjäykkyys

$$f_{1,l} := \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} = 10.56 Hz$$

$$f_{1,l} \geq 9 Hz = 1$$

Lattiarakenteen alin ominaistajuuus

Liimapuupalkin ominaistaajuus:
GL30c 215x585

Lähtötiedot:

$l := 5 \text{ m}$

Palkin pituus

$b_p := 215 \text{ mm}$

Palkin leveys

$h_p := 585 \text{ mm}$

Palkin korkeus

$s_p := 3000 \text{ mm}$

Kuormitusleveys

$\gamma_p := 4.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Liimapuun tilavuuspaino

Laskennassa käytettävät massat:

$g_{palkki.215x585} := \gamma_p \cdot b_p \cdot h_p \cdot \frac{1}{s_p} = 0.18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Palkin omapaino

$g_{välipohjarak.} := 3.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + g_{palkki.75x500} = 3.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Välipohjarakenteen kuormat

$g_{välis.} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Väliseinäkuorma

$g_{ripustus} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Ripustuskuorma

$g_{yht} := g_{palkki.215x585} + g_{välipohjarak.} + g_{ripustus} + g_{välis.} = 4.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Pysyvät kuormat yhteensä

$m_{pk} := \frac{g_{yht}}{g} = 495.85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

Pysyvien kuormien massa

$m_{hk} := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

Hyötykuorman osuus massasta

$m := m_{pk} + m_{hk} = 525.85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

Laskennassa käytettävä massa

Liimapuupalkin taivutusjäykkyys:

$$E_{lp1} := 13000 \frac{N}{mm^2}$$

Liimapuupalkin kimmokerroin

$$I_{lp1} := \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = (3.59 \cdot 10^9) mm^4$$

Liimapuupalkin neliömomentti

$$EI_{lp1} := E_{lp1} \cdot I_{lp1} \cdot \frac{1}{s_p} = (1.55 \cdot 10^7) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Liimapuupalkin kantavaa suuntaa
vastaava taivutusjäykkyys
leveysyksikköä kohti

$$f_{1.L} := \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{lp1}}{m}} = 10.8 Hz$$

$$f_{1.L} \geq 9 Hz = 1$$

Liimapuupalkin alin ominaistaajuus

Yhdistetty ominaistaajuus:

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1.L}^2} + \frac{1}{f_{1.L}^2}}} = 7.55 Hz$$

$$f_0 \geq 9 Hz = 0$$

Kertopuuvälipohjan ja liimapuupalkin
yhdistetty ominaistaajuus

Liimapuupalkin ominaistaajuus:
GL30c 240x855

Lähtötiedot:

$$l := 5 \text{ m}$$

Palkin pituus

$$b_p := 240 \text{ mm}$$

Palkin leveys

$$h_p := 855 \text{ mm}$$

Palkin korkeus

$$s_p := 3000 \text{ mm}$$

Kuormitusleveys

$$\gamma_p := 4.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Liimapuun tilavuuspaino

Laskennassa käytettävät massat:

$$g_{palkki.240x855} := \gamma_p \cdot b_p \cdot h_p \cdot \frac{1}{s_p} = 0.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Palkin omapaino

$$g_{välipohjarak.} := 3.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + g_{palkki.75x500} = 3.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Välipohjarakenteen kuormat

$$g_{välis.} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Väliseinäkuorma

$$g_{ripustus} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Ripustuskuorma

$$g_{yht} := g_{palkki.240x855} + g_{välipohjarak.} + g_{ripustus} + g_{välis.} = 4.98 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Pysyvät kuormat yhteensä

$$m_{pk} := \frac{g_{yht}}{g} = 507.73 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Pysyvien kuormien massa

$$m_{hk} := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Hyötykuorman osuus massasta

$$m := m_{pk} + m_{hk} = 537.73 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Laskennassa käytettävä massa

Liimapuupalkin taivutusjäykkyys:

$$E_{I_{p2}} := 13000 \frac{N}{mm^2}$$

Liimapuupalkin kimmokerroin

$$I_{p2} := \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = (1.25 \cdot 10^{10}) mm^4$$

Liimapuupalkin neliömomentti

$$EI_{p2} := E_{I_{p2}} \cdot I_{p2} \cdot \frac{1}{s_p} = (5.42 \cdot 10^7) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Liimapuupalkin kantavaa suuntaa
vastaava taivutusjäykkyys
leveysyksikköä kohti

$$f_{1,L} := \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{p2}}{m}} = 19.94 Hz$$

$$f_{1,L} \geq 9 Hz = 1$$

Liimapuupalkin alin ominaistaajuus

Yhdistetty ominaistaajuus:

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,L}^2} + \frac{1}{f_{1,L}^2}}} = 9.33 Hz$$

$$f_0 \geq 9 Hz = 1$$

Kertopuuvälipohjan ja liimapuupalkin
yhdistetty ominaistaajuus

Yhdistetty ominaistaajuus:

$$f_{1,L} = 10.56 Hz$$

$$F_{1,L} := 19.4 Hz$$

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,L}^2} + \frac{1}{f_{1,L}^2}}} = 9.33 Hz$$

$$f_0 \geq 9 Hz = 1$$

Kertopuuvälipohjan ja IPE-palkin
yhdistetty ominaistaajuus

1kN pistekuorman aiheuttama painuma:
Kerto-S 75x500 k400

Lähtötiedot:

$$s := 400 \text{ mm}$$

$$l := 6 \text{ m}$$

$$b := 5 \text{ m}$$

$$F := 1 \text{ kN}$$

$$EI_l := (2.97 \cdot 10^7) \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$EI_c := (2.75 \cdot 10^6) \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$k_\delta := \sqrt[4]{\frac{EI_c}{EI_l}} = 0.55$$

$$k_\delta \leq \frac{b}{l} = 1$$

$$\delta_1 := \min\left(\frac{F \cdot l^2}{42 \cdot k_\delta \cdot EI_l}, \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot s \cdot EI_l}\right) = 0.052 \text{ mm}$$

$$\delta_1 \leq 0.5 \text{ mm} = 1$$

Lattiapalkkien välinen etäisyys

Lattiarakenteen jänneväli

Lattiarakenteen leveys

1kN kuorma

Lattian taivutusjäykkyys kantavassa suunnassa

Lattian taivutusjäykkyys poikkisuunnassa (vain pintalaatta)

Apusuure

Ehto -> Ok

Välipohjan painuma

Mitoituskriteeri

1kN pistekuorman aiheuttama painuma:
GL30c 215x585

Lähtötiedot:

$$s := 6000 \text{ mm}$$

$$l := 5 \text{ m}$$

$$b := 6 \text{ m}$$

$$F := 1 \text{ kN}$$

$$EI_{lp11} := E_{lp1} \cdot I_{lp1} = (4.66 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_c := 0 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$\delta_2 := \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI_{lp11}} = 0.056 \text{ mm}$$

$$\delta_2 \leq 0.5 \text{ mm} = 1$$

Kokonaispainuma

$$\delta := \delta_1 + \delta_2 = 0.108 \text{ mm}$$

$$\delta \leq 0.5 \text{ mm} = 1$$

Lattiapalkkien välinen etäisyys

Lattiarakenteen jänneväli

Lattiarakenteen leveys

1kN kuorma

Palkin taivutusjäykkyys kantavassa suunnassa

Palkin taivutusjäykkyys poikkisuunnassa

Palkin painuma

Mitoituskriteeri

Mitoituskriteeri

1kN pistekuorman aiheuttama painuma:
GL30c 240x855

Lähtötiedot:

$$s := 6000 \text{ mm}$$

$$l := 5 \text{ m}$$

$$b := 6 \text{ m}$$

$$F := 1 \text{ kN}$$

$$EI_l := E_{lp2} \cdot I_{lp2} = (1.63 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_c := 0 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$\delta_3 := \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI_l} = 0.016 \text{ mm}$$

$$\delta_3 \leq 0.5 \text{ mm} = 1$$

Kokonaispainuma

$$\delta := \delta_1 + \delta_3 = 0.068 \text{ mm}$$

$$\delta \leq 0.5 \text{ mm} = 1$$

Lattiapalkkien välinen etäisyys

Lattiarakenteen jänneväli

Lattiarakenteen leveys

1kN kuorma

Palkin taivutusjäykkyys kantavassa suunnassa

Palkin taivutusjäykkyys poikkisuunnassa

Palkin painuma

Mitoituskriteeri

Mitoituskriteeri

Välipohja: Kerto-S 75x500 k400**Ominaistaajuus (Frequency criteria)**

$$f_1 = k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}}$$

Ominaistaajuus yksiaukkoiselle lattialle jäykällä tuilla

$$k_{e,1} := 1$$

Yksiaukkoinen rakenne

$$k_{e,2} := 1$$

Yhteen suuntaan kantava rakenne

$$l := 6 \text{ m}$$

Jänneväli 1

$$EI_l := (2.97 \cdot 10^7) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Lattian kantavaa suuntaa vastaava taivutusjäykkyys

$$m := 507 \frac{kg}{m^2}$$

Lattian massa

$$f_{1,joist} := k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} = 10.56 \text{ Hz}$$

Yksiaukkoisen välipohjan ominaistaajuus

Nopeuskriteeri (Velocity criteria)

$$f_w := 1.5 \text{ Hz} \quad f_{w1.5} := \frac{f_w}{\text{Hz}} = 1.5$$

Kävelytaajuus, oletus

$$I := \frac{42 \cdot f_{w1.5}^{1.43}}{\left(\frac{f_{1,joist}}{\text{Hz}}\right)^{1.3}} \cdot N \cdot s = 3.5 \text{ N} \cdot s$$

Keskimääräinen ominaisimpulssi

$$b := 6.9 \text{ m}$$

Lattiarakenteen leveys

$$M' := \frac{m \cdot l \cdot b}{2} = 10494.9 \text{ kg}$$

Ominaismassa

$$k_{red} := 0.7$$

Korjauskerroin

$$V_{1,peak} := k_{red} \cdot \frac{I}{M'} = 0.00023 \frac{m}{s}$$

Huippunopeuden vaste

$$EI_T := (2.75 \cdot 10^6) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Lattian poikkisuunnan taivutusjäykkyys

$$k_{imp} := \max \left(0.48 \cdot \left(\frac{b}{l} \right) \cdot \left(\frac{EI_l}{EI_T} \right)^{0.25}, 1.0 \right) = 1$$

Isommat ominaismuodot huomioiva kerroin

$$v_{tot,peak} := k_{imp} \cdot V_{1,peak} = 0.00023 \frac{m}{s}$$

Kokonaishuippunopeuden vaste

$$\xi := 0.035$$

Vaimennussuhde

$$1.0 \leq k_{imp} \leq 1.5 = 1$$

$$\eta := 1.52 - 0.55 \cdot k_{imp} = 0.97$$

Apusuure

$$\beta := \left(0.65 - 0.01 \cdot \left(\frac{f_{1,joist}}{\text{Hz}} \right) \right) \cdot (1.22 - 11.0 \cdot \xi) \cdot \eta = 0.4$$

Apusuure

$$v_{rms1} := \beta \cdot v_{tot,peak} = 0.0001030099 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad v_{rms} := \frac{v_{rms1}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Nopeuden tehollisarvo

$$R := \frac{v_{rms}}{0.0001} = 1.0300991$$

Vastekerroin

$$R \cdot 0.0001 = 0.0001030099$$

Jäykkyyskriteeri (Stiffness criteria)

$$F := 1 \text{ kN} \quad EI_l := 2.97 \cdot 10^7 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} \quad EI_T := 2.75 \cdot 10^6 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} \quad b := 6.9 \text{ m} \quad l_{palkki} := 6 \text{ m}$$

$$B_{ef} := \min \left(\frac{l_{palkki}}{1.1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_T}{EI_l}}, b \right) = 3.01 \text{ m}$$

Tehokas leveys

$$w_{1kN,joist} := \frac{F \cdot l_{palkki}^3}{48 \cdot EI_l \cdot B_{ef}} = 0.0504 \text{ mm}$$

Painuma 1 kN:n kuormasta

Mitoituskriteerit:

$$\text{Ominaistaajuus (Frequency criteria):} \quad f_{1,joist} \geq 4.5 \text{ Hz} = 1$$

-> Ok

$$\text{Jäykkyyskriteeri (Stiffness criteria):} \quad w_{1kN,joist} \leq 0.25 \text{ mm} = 1$$

-> Taso 1

$$\text{Vastekerroin (Response factor):} \quad R \leq 4 = 1$$

-> Taso 1

$$\text{Nopeuskriteeri (Velocity criteria):} \quad v_{rms} \leq R \cdot 0.0001 = 1$$

-> Ok

-> Lattiarakenne kuuluu suoritustasoluokkaan 1

Yhdistetty ominaistaajuus:

Välipohja: Kerto-S 75x500 k400, tukipalkki: GL30c 215x585

$$f_{1.joist} := k_{e.1} \cdot k_{e.2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} = 10.56 \text{ Hz}$$

Yksiaukkoisen välipohjan ominaistaajuus

Tukipalkki

$$EI_l := (1.55 \cdot 10^7) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

Tukipalkin taivutusjäykkyys

$$k_{e.1} := 1$$

$$k_{e.2} := 1$$

$$m := 525.85 \frac{kg}{m^2}$$

$$l_{tp} := 5 \text{ m}$$

$$f_{1.beam.1} := k_{e.1} \cdot k_{e.2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l_{tp}^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} = 10.79 \text{ Hz}$$

Tukipalkin ominaistaajuus

Välipohja joka on tuettu joustavaan tukeen toiselta puolelta

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1.joist}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1.beam.1}^2}}} = 9.19 \text{ Hz}$$

Välipohja joka on tuettu joustavaan tukeen molemmilta puolilta

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1.joist}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1.beam.1}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1.beam.1}^2}}} = 8.25 \text{ Hz}$$

Yhdistetty taipuma:

$$EI_{palkki} := (4.66 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot m^2$$

$$w_{1kN.beam} := \frac{\frac{F}{2} \cdot l_{palkki}^3}{48 \cdot EI_{palkki}} = 0.048 \text{ mm}$$

Tukipalkin taipuma

Taipuma kun välipohja on tuettu toisesta päästä joustavaan tukeen

$$w_{1kN} := 0.5 \cdot w_{1kN.beam} + w_{1kN.joist} = 0.074 \text{ mm}$$

Taipuma kun välipohja on tuettu molemmista päistä joustavaan tukeen

$$w_{1kN} := 0.5 \cdot w_{1kN.beam} + 0.5 \cdot w_{1kN.beam} + w_{1kN.joist} = 0.099 \text{ mm}$$