

Ella Latvala

**PUU-TERÄS HYBRIDIVÄLIPOHJAN
VÄRÄHTELY**
Nordic system – välipohjan värähtelyn tutkiminen

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Professori Sami Pajunen
Väitöskirjatutkija Aku Aspila
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Ella Latvala: Puu-teräs hybridivälipohjan värähtely
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan DI-tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023

Tässä työssä tutkitaan puun ja teräksen muodostaman hybridivälipohjarakenteen värähtelyominaisuuksia. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, sekä neljän testirakenteen testamisena laboratorio-olosuhteissa. Tarkasteltava rakenne on Nordic system -hybridiliittovälipohja, joka muodostuu CLT-levystä (Cross Laminated Timber) ja WQ-palkista. Puu-teräs hybridivälipohjalla on paljon hyviä ominaisuuksia. Se on rakenteena kevyt, nopea asentaa ja muuntojoustava, sillä teräspalkit mahdollistavat yhdessä CLT-levyjen kanssa matalan välipohjarakenteen ja pitkät jännevälit. Kevyet välipohjat ovat värähtelyn osalta kuitenkin haastavia ja puu-teräs-hybridivälipohjarakenteita on tutkittu melko vähän.

Työssä selvitetään, kuinka liittovaikutus muuttaa rakenteen värähtelyominaisuuksia ja sitä tutkitaan niin laskemalla kuin testaamalla Nordic system -hybridivälipohjaa. Eurokoodeihin on tulossa puurakenteiden osalta päivitys ja työssä vertaillaan nykyisten mitoitusohjeiden ja päivittyvän eurokoodin ohjeiden eroja värähtelyn mitoituksessa. Laskelmat tehdään lattiarakenteelle, jossa CLT-levyjä ei ole kiinnitetty teräspalkkiin, eikä niiden välillä ole siten liittovaikutusta, sekä rakenteelle, jossa on liittovaikutus.

Hybridivälipohjarakennetta testataan laboratorio-olosuhteissa kahdella eri jännevälillä. Testirakenteilta mitataan kiihtyvyyttä ja siirtymää heel drop-testin perusteella, sekä välipohjarakenteen taipumaa 1 kN staattisella pisteuormalla. Testit tehdään sekä ennen CLT-levyjen kiinnitystä teräspalkkiin, että kiinnityksen jälkeen. Tulosten perusteella voidaan päätellä, kuinka liittorakenne vaikuttaa välipohjarakenteen värähtelyominaisuuksiin.

Lopuksi vertaillaan nykyisillä ja tulevilla ohjeilla laskettuja tuloksia testeissä mitattuihin tuloksiin sekä ilman liittovaikutusta, että sen kanssa. Tulosten perusteella voidaan arvioida, kuinka hyvin mitoitusohjeet vastaavat testeissä mitattuja tuloksia.

Avainsanat: hybridivälipohja, liittorakenne, värähtely

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Ella Latvala: Vibration of steel-timber composite floor
Master of Science Thesis
Tampere University
Masters Programme in Civil Engineering
June 2023

This work investigates the vibration properties of a steel-timber composite floor. The research is carried out as a literature review and by testing four test structures under laboratory conditions. The structure under consideration is the Nordic system composite floor, consisting of CLT (Cross Laminated Timber) and WQ beams. The steel-timber composite floor has many good properties. It is lightweight, quick to install and flexible, as the steel beams, together with the CLT panels, allow for a low midfloor structure and long spans. However, lightweight floors are challenging in terms of vibration and relatively little research has been done on steel-timber composite floors.

This work investigates how the composite effect changes the vibration characteristics of the structure and is studied both by calculating and testing the Nordic system composite floor. The Eurocodes are being updated for timber structures and the work compares the differences between the current design guidelines and the future Eurocode guidelines for vibration design. The calculations are carried out for a floor structure where the CLT plates are not fixed to the steel beam and therefore there is no composite effect between them, and for a structure where there is a composite effect.

The hybrid floor structure is tested under laboratory conditions at two different spans. The acceleration and displacement of the structures are measured using the heel drop test, and the deflection of the midfloor structure is measured using a 1 kN static point load. The tests are performed both before and after the CLT plates are fixed to the steel beam. The results allow the conclusion to be drawn as to the influence of the connector structure on the vibration characteristics of the floor structure.

Finally, the results calculated with the current and future guidelines are compared with the results measured in the tests, both without and with the connection effect. The results allow an assessment of how well the design guidelines match the results measured in the tests.

Keywords: steel-timber, composite structure, vibration

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

ALKUSANAT

Tämän työn aihe tuli yliopistolta, mutta valikoitui yhteistyössä työnantajani Sweco Finland Oy:n kanssa. Työ on tehty Tampereen yliopistolle ja olen saanut tehdä työtä yhdessä väitöskirjatutkija Aku Aspilan kanssa, joka työssään tutkii Nordic system -rakennetta. Oma työni liittyy pieneltä osin tähän kokonaisuuteen. Työn tekemiseen meni muun elämän aiheuttamien haasteiden vuoksi kauemmin kuin oli tarkoitus ja haluankin kiittää kaikkia osapuolia kärsivällisyydestä ja ymmärryksestä. Erityisesti ohjaajina toimivia Aku Aspilaa ja Sami Pajusta. Aku on ollut suuri tuki ja apu koko työn tekemisen ajan.

Suuri kiitos myös työnantajalleni ymmärryksestä ja joustamisesta tämän urakan kanssa. Minulla on maailman parhaimmat työkaverit, joista erityismaininta Topi Moisiolle kaikesta avusta Excelin kanssa ja Riina Savikolle tuesta ja työn testilukijana toimimisesta.

Viimeisimpänä, muttei todellakaan vähäisimpänä haluan kiittää perhettäni, läheisiäni ja ystäviäni kaikesta tuesta, jota olen saanut. Ystäväni ja muut läheiseni ovat olleet ehtymätöntsemppien lähde. Vanhempani ovat usein mahdollistaneet rauhalliset hetket työn parissa ja tukeneet vaikeina hetkinä. Mikään tästä ei kuitenkaan olisi ollut mahdollista ilman puoliisoani Jukkaa, joka on mahdollistanut koko jatko-opiskeluni, mutta erityisesti tämän työn tekemisen kaikin mahdollisin tavoin. Kiitos, että olet vierelläni. Kiitos myös rakkaille, ihailulle tyttärilleni Kertulle, Elville ja Hilmalle. Lapset eivät varsinaisesti helpota tämän urakan kanssa, mutta muistutatte joka päivä minua siitä, mikä tässä elämässä on lopulta oikeasti tärkeää. Se on tietenkin te.

Kangasalla,

Ella Latvala

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuskysymykset ja tutkimuksen tavoitteet	2
1.3 Tutkimuksen rajaukset	2
1.4 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen toteutus	2
2. KEVYEN VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELY	4
2.1 Värähtely rakennesuunnittelussa	4
2.2 Värähtelyn tutkiminen	5
2.2.1 Subjekttiivinen tutkimus	5
2.2.2 Suoraan mitattava tutkimus	6
2.2.3 Tutkimusolosuhteet	8
2.3 Puu-teräs hybridirakenteiden värähtelytutkimus maailmalla	8
2.4 Värähtelymitoitus nykyisen Eurokoodin mukaan	10
2.4.1 Lattian alin ominaistaajuus	10
2.4.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle	11
2.4.3 Lattian värähtelynopeus	11
2.4.4 Värähtelymitoitusten vertailu	13
2.5 Värähtelymitoitus tulevan Eurokoodin mukaan	15
2.5.1 Lattian alin ominaistaajuus	17
2.5.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle	19
2.5.3 Värähtelyn kiihtyvyys ja nopeus	21
3. NORDIC SYSTEM – VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYN TUTKIMINEN	24
3.1 Tutkimuksen toteutus	24
3.2 Tutkimuksen tulokset	27
3.2.1 Kiihtyvyys	28
3.2.2 Siirtymä	29
3.2.3 Taipuma	30
3.2.4 Taajuus	30
4. VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYMITOITUS	32
4.1 Laskentaesimerkki: CLT-laatan värähtely	32
4.1.1 Nykyinen Eurokoodi	34
4.1.2 Tuleva Eurokoodi	35
4.1.3 Tulokset	36
4.2 Laskentaesimerkki: CLT-laatta tuet huomioiden	37
4.2.1 Nykyinen Eurokoodi	39
4.2.2 Tuleva Eurokoodi	40
4.2.3 Liittorakenne	41
4.2.4 Tulokset	45
5. TULOSTEN ANALYSOINTI	47
5.1 Laskennan tulokset	47
5.2 Testien tulokset	48
5.3 Tulosten vertailu	49

6. YHTEENVETO.....	52
LÄHTEET	54
LIITE 1: ESIMERKKILASKELMA CLT-LAATAN VÄRÄHTELYSTÄ	56
LIITE 2: ESIMERKKILASKELMA LIITTORAKENTEEEN VÄRÄHTELYSTÄ	66

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Puurakentaminen yleistyy erityisesti sen betonirakentamista pienemmän hiilijalanjäljen ansiosta. Ympäristöministeriön pyrkimyksenä on vuonna 2025 toteuttaa 45 % kaikesta julkisesta uudisrakentamisesta ja 46 % asuinkerrostalojen rakentamisesta puurakenteisina (Ympäristöministeriö).

Rakennuksen välipohjaan liittyy kantavuuden lisäksi useita erilaisia vaatimuksia, jotka tulee rakennetta suunniteltaessa huomioida. Yksi tällainen tekijä on värähtely, sillä kävelystä aiheutuva värähtely välipohjarakenteissa koetaan erityisesti asuinrakennuksissa usein häiritsevänä. (Latvanne et al. 2019) Värähtely voidaan kokea kehon värähtelynä tai värähtelyn aiheuttamina ääninä. Välipohjan rakenteella on iso merkitys värähtelyn voimakkuuteen ja ominaisuuksiin. Kevyet rakenteet, kuten puurakenteinen välipohja, värähtelevät voimakkaammin kuin raskaat rakenteet, kuten betonivälipohja. (Talja et al., 2002) Eurokoodin mukaan rakenteiden värähtelyominaisuuksien määrittämisessä tulee huomioida rakenteen toimivuuden lisäksi myös käyttäjän mukavuus (SFS-EN 2014). Tämänhetkinen voimassa oleva Eurokoodi tulee puurakenteiden suunnittelun osalta päivittymään ja tulevassa ohjeessa käsitellään lattian värähtelyominaisuuksien mitoitusta nykyistä monipuolisemmin.

Puurakentamisen yleistyessä myös hybridirakentaminen herättää kasvavaa kiinnostusta, sillä siinä päästään hyödyntämään päärakennusmateriaalien parhaimpia ominaisuuksia. Puu-teräs – hybridiliittorakenteet tarjoavat materiaalitehokkaita ratkaisuja, joissa voidaan saavuttaa perinteistä levy-puupalkki -rakennemallia matalammalla rakenteella pidempiä jännevälejä. Puu-teräshybridirakenteelle ei ole kuitenkaan määritelty yleisesti yhteistä linjaa värähtelykriteereistä, vaikka erilaisia standardeja, ohjeita ja suunnittelukriteereitä eri maista löytyykin. Teräksen ja betonin muodostamalle liittorakenteelle löytyy suunnitteluohjeita, mutta ne eivät kaikilta osin sovellu puun ja teräksen muodostamalle liittorakenteelle. (Cheraghi-Shirazi 2022) Tampereen yliopistossa tutkitaan Nordic system –välipohjakonseptia, jossa CLT-laatta tai puinen kotelopalkkirakenne yhdistetään WQ-palkkiin te-

räslevyyillä luoden näin hybridiliittorakenteen. Kyseessä on kuitenkin massaltaan melko kevyt rakenne, jolloin liittovaikutuksen merkitystä lattian värähtelyominaisuuksiin on syytä tutkia. Tutkimus liittyy väitöskirjaan, jossa kehitetään Nordic system –välipohjakonseptia.

1.2 Tutkimuskysymykset ja tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksessa selvitetään puu-teräs –hybridivälipohjan värähtelyn mitoitusohjeita Suomessa ja tutkitaan Nordic system – välipohjakonseptin värähtelyä laboratorio-olosuhteissa.

Tutkimuskysymykset ovat:

- Mitkä ovat tämänhetkiset mitoitusohjeet puu-teräs -hybridivälipohjan värähtelylle Suomessa?
- Mitkä ovat Nordic system –välipohjakonseptin värähtelyn avainluvut laboratorio-olosuhteissa liittovaikutuksella ja ilman sitä?
- Kuinka ohjeiden mukaan lasketut värähtelyn avainluvut vastaavat laboratoriossa mitattuja arvoja?

Tutkimuksessa selvitetään Nordic system – välipohjan värähtelyä suunnittelun avainluku-
jen perusteella. Avainlukuja ovat tässä tutkimuksessa lattian alin ominaistaajuus, taipuma ja kiihtyvyys. Työssä selvitetään, kuinka hyvin nykyisten ja tulevien ohjeiden mukaan lasketut arvot vastaavat koetilanteessa saatuja lukuja ja minkälainen merkitys liittovaikutuksella on Nordic system – välipohjan värähtelyyn.

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa keskitytään käsittelemään kävelyn aiheuttamaa värähtelyä asuinrakennusten välipohjissa ja erityisesti puu-teräs -hybridiliittorakenteissa. Puun osalta keskitytään CLT:hen (Cross-Laminated Timber), sillä sitä käytetään myös Nordic system – välipohjarakenteissa.

1.4 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutetaan sekä kirjallisuusselvityksenä, että laboratoriossa suoritettulla ko-
keella. Kirjallisuusselvityksessä tutkitaan, millaiset nykyiset ohjeet hybridiliittorakenteis-
ten laattojen värähtelyn mitoitukselle on Suomessa ja käydään läpi Eurokoodin nykyiset ja
tulevat ohjeet, sekä muuta kirjallisuutta aiheesta. Tämän lisäksi mitoitetaan Nordic system
– välipohjarakenteen ominaistaajuus ja 1 kN pistekuorman aiheuttama taipuma Eurokoo-
din nykyisten ja luonnosvaiheessa olevien ohjeiden perusteella. Ohjeiden mukaan lasket-
tuja arvoja verrataan koetilanteessa saatuihin arvoihin.

Nordic system -välipohjarakenteen värähtelyä tutkitaan mittaamalla kahden erilaisen herätteen aiheuttamaa värähtelyä lattiassa. Herätteet ovat impulssimainen heräte, joka tehdään heel drop -menetelmällä, ja jatkuva heräte, joka tehdään kävelemällä lattialla tasaiseen tahtiin. Testattava rakenne koostuu kolmesta päistään tuetusta CLT-levystä, jotka on ruuvattu kiinni toisiinsa vinoruuvauksella. Levyjen toinen pää lepää teräspalkin päällä ja toinen WQ-palkin päällä. Liittovaikutus tehdään kiinnittämällä teräslevy pulteilla WQ-palkkiin ja ruuveilla CLT-levyyn. Kokeet tehdään lattialle ilman liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa. Näin saadaan vertailtua liittovaikutuksen merkitystä rakenteen värähtelyominaisuuksiin. Kokeet suoritetaan Tampereen yliopiston laboratoriossa.

2. KEVYEN VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELY

2.1 Värähtely rakennesuunnittelussa

Värähtely on jaksollista ja toistuvaa liikettä värähtelijässä, jonka aiheuttaa jokin ulkopuolinen heräte. Rakennuksissa värähtelijä on jokin rakennusosa, usein lattia, ja värähtelyä aiheuttaa esimerkiksi ihminen, laite, talotekniikka tai rakennusosaan kohdistuva ilmaääni. (Lahtela, 2021) Rakennusosan värähtelyominaisuuksiin vaikuttaa erityisesti rakennusosan massa ja jäykkyys, minkä johdosta raskaiden ja jäykkien välipohjien värähtelyn ominaisuudet ovat erilaisia kuin kevyillä välipohjilla (Lahtela, 2021). Rakennesuunnittelussa värähtely huomioidaan laskemalla tai mittaamalla rakennusosan värähtelyominaisuuksia, missä laskelmien avulla voidaan selvittää alin ominaistajuus, taipuma ja värähtelynopeus. (SFS-EN 2014). Tämän lisäksi mittaamalla voidaan selvittää myös vaimennussuhde ja lattian kiihtyvyyttä (EN16929).

Ominaistajuudella tarkoitetaan taajuutta, jolla värähtelijän, eli tässä tapauksessa rakennusosan, värähtely on voimakkainta. Värähtelysuunnittelussa tutkitaan erityisesti rakennusosan alinta ominaistajuutta. Värähtelijän alimman ominaistajuuden lisäksi on ylempiä ominaistajuuksia, joilla kaikilla on omat ominaisvärähtelymuodot. Ominaistajuuteen vaikuttaa rakennusosan massa, jäykkyys ja koko. (Lahtela, 2021) Välipohjat jaetaan alimman ominaistajuutensa mukaan matalataajuus- ja korkeataajuuslattiaoihin. Eurokoodi määrittelee jaottelun raja-arvoksi 8 Hz (EN16929, 2018), mutta arvo vaihtelee hiukan eri lähteissä sekä eri maiden välillä.

Matalataajuuslattioilla on suuri massa ja matala alin ominaistajuus, alle 8 Hz. Erityisesti matalataajuuslattioiden haasteena on resonanssi-ilmiö, jolloin herätteen taajuus vastaa värähtelijän ominaistajuutta (EN16929, 2018). Tällöin koko rakenne värähtelee samalla taajuudella. Resonanssissa värähtelijä värähtelee suurella amplitudilla, sillä värähtelijä saa energiaa samalla taajuudella värähtelevästä herätteestä. Pahimmillaan resonanssissa oleva rakenne voi vaurioitua tai jopa sortua. Resonanssin syntyminen tulee estää erityisesti värähtelevien rakennusosien, kuten välipohjien, suunnittelussa. Ominaistajuuden ja herätteen taajuuden suhde tulee olla vähintään kaksi. (Lahtela 2021). Resonanssia pyritään välttämään puurakenteisissa lattioissa rajoittamalla rakenteen alinta ominaistajuutta. Esimerkiksi kävelytaajuus on noin 2 Hz, jolloin lattiarakenteen alimman ominaistajuuden tulisi

olla vähintään 4 Hz. Tällä hetkellä Eurokoodin antama raja-arvo alimmalle ominaistaajuudelle on 8 Hz. (Wallner-Novak 2014)

Korkeataajuuslattiat ovat kevyempiä ja niiden alin ominaistaajuus on yli 8 Hz. Korkeataajuuslattioiden haasteena värähtelyssä on kuormituksen aiheuttama taipuma ja herätteen aiheuttama värähtely. Korkeataajuuslattioiden värähtely vaikuttaa asuin- ja toimistorakennuksissa erityisesti käyttömukavuuteen. Käyttömukavuuden osalta hyväksyttävän värähtelyn arvioiminen on kuitenkin haastavaa, sillä värähtelyn havaitseminen, kokeminen ja hyväksyttävyyden eivätkä ole sama asia ja niiden rajat eivät ole määriteltävissä tarkasti niin, että päättäisiin kaikkia tyydyttävään ratkaisuun. Toinen voi kokea sellaisen värähtelyn häiritseväksi, mitä toinen ei välttämättä huomioi ollenkaan. (Talja, 2002) Kevyiden välipohjien värähtely huomioidaan nykyisten Eurokoodin ja Suomen kansallisten liitteiden ohjeiden mukaan rajoittamalla rakennusosan ominaistaajuutta ja taipumaa.

2.2 Värähtelyn tutkiminen

Välipohjan värähtelylle voidaan tehdä sekä subjektiivisia tutkimuksia, että mittaamalla tehtyjä tutkimuksia, jolloin tutkimukset tehdään aistinvaraisesti havainnoimalla tai suoraan mittaamalla värähtelyn avainlukuja, kuten värähtelyn taajuutta ja kiihtyvyyttä. Subjektiivisilla havainnoilla tutkitaan lattian käyttömukavuutta ja siltä osin hyväksyttävän värähtelyn raja-arvoja, kun taas suoraan mittaamalla saatuja lukuja voidaan käyttää rakenteen värähtelymitoituksessa.

2.2.1 Subjektiivinen tutkimus

Koehenkilön kokemat subjektiiviset havainnot perustuvat aistinvaraisiin arvioihin, joissa tutkitaan kävelyn aiheuttamaa värähtelyä. Aistinvaraisissa arvioissa voidaan tutkia esineiden värähtelyä tai kehon tuntemuksia. Esineiden värähtelyä voidaan havainnoida esimerkiksi seuraamalla kasvin lehtien liikettä, veden liikettä lasisessa kulhossa tai kahvikupin kielinää vieressä olevaa lusikkaa vasten. Kehon tuntemukset havainnoidaan jakkaralla istuen. Havainnot tehdään havainnointipisteissä, joiden suositeltu etäisyys herätteestä riippuu siitä, havainnoidaanko esineiden liikettä vai kehon tuntemuksia. Mikäli havainnot tehdään kehon tuntemusten perusteella, havaintopiste tulee olla korkeintaan 600 mm päässä herätteestä ja korkeintaan 450 mm päässä, kun havainnoidaan esineiden liikettä. Subjektiivisissa kokeissa testeihin tarvitaan kaksi ihmistä, joista toinen kävelee tutkittavalla lattialla kävelinää pitkin ja toinen istuu tai seisoo ja tekee havainnot. Kävelytestissä kävelijän askeleen

tulisi osua referenssipisteeseen. Mikäli on syytä epäillä, että lattia on liian joustava, tulee myös kävelijän itse tehdä havainnot värähtelystä. (Talja, 2002).

Subjektiiiviset havainnot luokitellaan havaintojen perusteella seuraavasti:

- ei havaintoa
- havainto juuri todettavissa
- havainto todetaan selvästi
- havainto todetaan voimakkaasti

Näiden lisäksi voidaan kysyä havaintojen hyväksyttävyyttä, mikäli kyseessä olisi asuinhuoneiston lattia. Koska havainnoitsijoiden kokemus hyväksyttävästä värähtelystä voi vaihdella suuresti, on subjektiivisessa havainnoinnissa hyvä käyttää vähintään viittä eri havainnoijaa. (Talja, 2002)

2.2.2 Suoraan mitattava tutkimus

Mitattaessa suoraan lattian värähtelyä, herätteenä voi olla kävely, heel drop -testi tai mekaaninen laite, esimerkiksi vasara. Heräte valitaan sen mukaan, mitä halutaan selvittää. Värähtelyn tutkimisen kannalta olennaisimmat tiedot ovat lattian alin ominaistuuksia ja vaimennussuhde, mutta tärkeää tietoa rakenteen värähtelystä kertoo myös kiihtyvyyden ja 1 kN pistekuorman aiheuttama taipuma. (Talja, 2002) Mittaus suoritetaan aiheuttamalla tutkitavalle lattialle heräte referenssipisteessä ja mittaamalla sen pystysuuntaista värähtelyä mittausantureilla. Usein mittausanturit ovat kiihtyvyyksiantureita. Kaikille testitilanteille suositellaan otettavan kolme peräkkäistä testiä. Referenssipisteiden lukumäärä riippuu tarkasteltavan alueen mallista, mutta mittauksia tulee tehdä riittävän monesta kohdasta, jotta taajuudet ja ominaismuodot saadaan mitattua kaikista halutuista taajuuksista. Yksinkertaisille lattioille riittää usein yksi referenssipiste lattian keskikohdassa. (EN16929, 2018) Monimutkaisempien lattioiden tapauksissa oikean referenssipisteen valinta voi vaatia muutamien esikokeiden, joiden avulla kriittiset pisteet valitaan. Laboratorio-olosuhteissa tehtävissä mittauksissa tulee varmistaa, että tutkittavan rakenteen tuet ja tuentatapa eivät vaikuta testattavan lattiarakenteen värähtelyyn. Pienetkin tukien siirtymät ja värähtelyt vaikuttavat mittausten tuloksiin ja ne on huomioitava suunnittelussa. (Talja, 2002) Tukirakenteiden jäykkyyden tulee olla siten selvästi jäykemmät kuin mitattavan lattiarakenteen (EN16929, 2018).

Heel drop -testissä pudotetaan varpaillaseisonnasta kantapäille 60 mm korkeudelta suoraan referenssipisteeseen ja aiheutetaan näin heräte lattialle. Heel drop – testiä käytetään, kun halutaan voimakkaampi heräte kuin pelkässä kävelytestissä saadaan aiheutettua. (Talja, 2002) Näytteestä saadaan analysoitua kiihtyvyys ja sen avulla voidaan laskea lattian alin ominaistajuus. Heel drop – testiä ei suositella kuitenkaan esimerkiksi lattian vaimennussuhteen tai lattian kiihtyvyyden mittaamiseen, sillä testi aiheuttaa vain impulssimaisen herätteen. Impulssimainen heräte ei yleensä riitä saavuttamaan lattian ominaistajuutta, jolloin ei voida luotettavasti mitata myöskään ominaistajuuden vaimenemista. (EN16929, 2018)

Lattian kiihtyvyys ja vaimennussuhde saadaan mitattua joko laitteen tai kävelyn aiheuttamasta herätteestä. Kävelytestissä kävelijän tulee kävellä erikseen määriteltyä nopeutta, joka riippuu lattian alimmasta ominaistajuudesta. Kävelytaajuuden tulisi olla joko puolet tai 1/3 lattian alimmasta ominaistajuudesta. Kävelyn aiheuttamaa värähtelyä arvioitaessa tulee huomioida alle 40 Hz – 50 Hz taajuudet, sillä sitä korkeammat taajuudet eivät ole enää havaittavia. Kävelynopeuden arviointiin voidaan käyttää apuna esimerkiksi metromia. Lattian kiihtyvyyttä mitataan herätteen aikana. Kun tasainen, jatkuva värähtely on saavutettu, heräte pysäytetään ja mitataan lattian vaimeneva värähtely. Heräte aiheutetaan siinä kohdassa, missä oletetaan suurin kiihtyvyys. Yksinkertaisille lattioille se on usein lattian keskikohta. (EN16929, 2018)

Pistekuorman aiheuttama taipuma mitataan laitteella lattian ylä- tai alapinnasta. Pistekuorma voidaan tehdä laitteella tai se voi olla ihminen tai jokin muu pysyvä kuorma. Kuormitus saa olla maksimissaan 1 kN, ellei erikseen haluta mitata suurempaa muodonmuutosta. Kuormitus aiheutetaan oletetun suurimman taipuman kohdalla ja mittauksia tehdään kolme kappaletta. (EN16929, 2018) Taipuman mittaamiseen tarvitaan referenssitaso. Referenssitaso voi olla jokin ympäröivä rakenne, joka ei painu, kun lattialla liikutaan. (Talja, 2002)

Suoraan mittaamalla saadut näytteet voidaan analysoida moodianalyysillä. Moodianalyysin avulla saadaan määritettyä lattian dynaamisia ominaisuuksia, esimerkiksi alin ominaistajuus ja värähtelymuodot. Moodianalyysissä mittauskalustoon kuuluu herätteen aiheuttaja, heräte- ja värähtelysignaalin tallennuslaitteisto ja signaalin analysointilaitte, jolla määritetään halutut värähtelysuureet. Heräte tulee aiheuttaa pisteessä, jossa saadaan aiheutettua tärkeimmät värähtelyn muodot. Mittauksilla voidaan selvittää mittauspisteen siirtymä, nopeus tai kiihtyvyys, jotka mitataan kiihtyvyyssantureilla. (Talja, 2002)

2.2.3 Tutkimusolosuhteet

Subjektiiiviset ja suoraan mitattavat tutkimukset voidaan tehdä kenttätutkimuksina tai laboratorio-olosuhteissa. Kenttätutkimukset tehdään valmiissa rakennuksessa ja erityisesti silloin testaamisessa on hyvä sopia hyväksymiskriteerit etukäteen asiakkaan kanssa (Talja, 2002). Molemmista tutkimustavoista lattialle aiheutetaan heräte, joka aiheuttaa lattian värähtelyn. Heräte on joko jatkuvaa, esimerkiksi kävelyä tietyllä nopeudella, tai impulssi-maista, kuten heel drop -testi. Heräte aiheutetaan referenssipisteessä, joka valitaan sen mukaan, missä lattialla on suurin kiihtyvyys. Usein referenssipisteessä on myös lattian suurin taipuma. Huoneistojen ei-kantavat väliseinät tulee huomioida referenssipisteiden valinnassa, sillä ne vaikuttavat lattian värähtelyominaisuuksiin parantavasti varsinkin korkeataajuuslattioilla. (Talja, 2002) Sekä laboratoriossa, että valmiissa huoneistossa tehtävissä mittauksissa huoneen lämpötila ja suhteellinen kosteus tulisi kirjata ylös. (EN16929, 2018)

2.3 Puu-teräs hybridirakenteiden värähtelytutkimus maailmalla

Puu rakennusmateriaalina on kasvattanut suosiotaan, joten myös vaatimukset puurakenteille ovat kasvaneet. Rakennusten jännevälien kasvaessa puuvälipohjien värähtelyominaisuudet korostuvat, jolloin niihin kiinnitetään myös tutkimuksissa huomiota. CLT-laatan osalta jännevälien kasvattaminen laskee sen alinta ominaistajuutta ja kasvattaa värähtelyn kiihtyvyyttä. Simuloiduilla tutkimuksilla on havaittu, että kasvattamalla palkin jäykkyyttä tiettyyn tasoon asti, CLT-laatan alin ominaistajuus kuitenkin kasvaa ja käytettävyys paranee. (Huang, 2020)

Chiniforush et al. (2019) on tutkinut teräksen ja CLT-laatan muodostamaa palkkirakennetta ja sen värähtelyä. Tutkittavassa rakenteessa tutkittiin sekä CLT-laatan ja palkin välisen liitoksen, että CLT-laatan paneelien suunnan vaikutuksia rakenteen värähtelyyn. Tutkimuksessa tehtiin rakenteelle testejä laboratorio-olosuhteissa ja muodostettiin rakenteesta FEM-malli (Finite Element Method). FEM-ohjelmat käyttävät mallien mitoituksessa elementtimenetelmää. FEM-malliin määriteltiin muuttujat yhden testatun palkin arvojen mukaan ja kalibroitiin niiden perusteella malli. FEM-mallilla pyrittiin ennustamaan muiden testattujen palkkien taajuuksia. Testeillä saadut arvot ja FEM-mallin ennustamat arvot vastasivat hyvin toisiaan. Tutkimuksessa verrattiin myös mm. Eurokoodin värähtelymitoituksen kaavojen

antamia arvoja testattuihin arvoihin. Testeistä saatu taajuus vastasi hyvin Eurokoodin kaavoilla saatua taajuutta virheen keskiarvon ollessa 9,5 %. Virheen keskiarvo oli Eurokoodilla pienin kaikista mukana olleista laskentaohjeiden kaavoista.

Hassanieh et al (2019) arvioi edellisen tutkimuksen kalibroitua FEM-mallia ja erilaisten parametrien vaikutusta puu-teräs hybridilattian dynaamisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksessa arvioitiin mallin avulla myös mm. Eurokoodi 5:n ja AISC:n standardeja (American Institute of Steel Construction) ja niiden kaavojen perusteella saatuja värähtelyarvoja verrattiin FEM-mallista saatuihin arvoihin. FEM-mallissa laskettiin lattian ominaistajuus, taipuma 1kN pistekuormalle sekä suurin impulssin aiheuttama värähtelynopeus. Mallin perusteella kaikki näytteet täyttivät taipuman ja värähtelynopeuden osalta vaatimukset. Kuitenkin yli 10 m jännevälin rakenteiden ominaistajuudet jäivät alle 8 Hz. Eurokoodi 5 ei tällä hetkellä anna ohjetta alle 8 Hz lattioille. Tulosten perusteella värähtelynopeuden raja-arvo ei ollut määräävä ja taipuma oli huomattavasti kriittisempi raja-arvo.

Cheraghi-Shirazi et al. (2022) on tehnyt tutkimuskatsauksen eri maiden puu-teräs hybridirakenteisten lattioiden värähtelyn tutkimuksista, standardeista ja mitoitusohjeista. Katsauksessa tultiin kirjallisuuden osalta siihen tulokseen, että 1 kN aiheuttama taipuma on edelleen toistaiseksi paras indikaattori lattian värähtelyn arvioimiseksi, vaikka muitakin kriteereitä on yritetty kehittää. Kuitenkin pitkän jännevälin puu-teräs -hybridilattioille, joissa käytetään massiivipuuta (esim. CLT) ei ole vielä riittävästi referenssejä, joiden perusteella voitaisiin arvioida oleelliset kriteerit lattian värähtelyn mitoittamiseksi. Kirjallisuuskatsauksen perusteella toistaiseksi kattavin lähestymistapa oli AISC:n ja CCIP:n (Concrete Society for The Concrete Centre) standardeilla, kun taas Eurokoodi 5:n osalta puu-teräshybridilattioita on tutkittu hyvin vähän. Katsauksessa todettiin myös, että tehtyjen tutkimusten perusteella parametrisoitu FEM-malli, johon voidaan sisällyttää mitoituksen ja rakenteen ominaisuuksien kannalta tärkeimmät parametrit, tarjoaa hyvän työkalun värähtelyominaisuuksien arvioimiseksi.

Erityisesti massiivipuun ja teräksen muodostaman hybridivälipohjan värähtely vaatii lisää tutkimuksia. Tällaiselle lattiarakenteelle ei ole juuri tehty subjektiivisia kokeita, joiden perusteella voitaisiin arvioida lattian värähtelyn kannalta tärkeimpiä kriteereitä käyttömukavuuden osalta. Tarvitaan lisää sekä subjektiivisia testejä käyttäjille, että tarkempaa värähtelymitoituksen tutkimista, jotta löydetään yhtenäinen mitoitus tapa puu-teräs -hybridilattian värähtelylle. (Cheraghi-Shirazi, 2022)

2.4 Värähtelymitoitus nykyisen Eurokoodin mukaan

Eurokoodissa värähtelymitoitus on määritelty tehtäväksi niin, etteivät kuormat aiheuta epämukavuutta käyttäjien kannalta. Rakennusosan suunnittelussa värähtely tulee arvioida joko mittaamalla tai laskemalla, jolloin huomioidaan rakennusosan jäykkyys ja värähtelymuotoa vastaava vaimennussuhde (SFS-EN 2014). Lattian jäykkyys muodostuu rakenteen osien taivutusjäykkyydestä, jolloin lattiarakenteen koolaukset, levytykset ja mahdollinen pintalaatta saadaan huomioida taivutusjäykkyyden laskennassa. Taivutusjäykkyys lasketaan näin ollen koko lattiarakenteelle käyttämällä esimerkiksi gamma-menetelmää. Lisäksi välipohjaan liittyvät rakenteet, kuten alaslasketut katot ja väliseinät vaikuttavat rakenteen värähtelyominaisuuksiin erityisesti kasvattamalla rakenteen massaa. Lattioiden värähtelyä rajoitetaan antamalla raja-arvo alimmalle ominaistaajuudelle, lattian taipumalle ja värähtelynopeudelle. Lattian alimman ominaistaajuuden tulee olla yli 8 Hz. Lattian taipuman ja värähtelynopeuden raja-arvot ovat toisistaan riippuvaisia niin, että mitä suurempi sallittu taipuma, sitä pienempi sallittu värähtelynopeus. Eurokoodin suosittelema taipuman yläraja-arvo on alle kaksi.

2.4.1 Lattian alin ominaistaajuus

Alimman ominaistaajuuden laskennassa tulee huomioida lattiarakenteen massan lisäksi muut pysyvät kuormat. Yhteen suuntaan kantavan lattian tai palkin alin ominaistaajuus lasketaan kaavalla (2.1).

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (2.1)$$

missä

L on lattiarakenteen jänneväli

m on massa pinta-alayksikköä kohden

$(EI)_L$ on lattian kantavaa suuntaa (l) vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden

B on lattian leveys

Eurokoodin antama ohje alimman ominaistaajuuden laskentaan ei kuitenkaan huomioi kahteen suuntaan kantavan lattian tai tukien vaikutusta ominaistaajuuteen.

2.4.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle

Mikäli lattian alin ominaistajuus on yli 8 Hz, tulee lattian täyttää vielä taipumalle ja värähtelynopeudelle asetetut ehdot (2.2) ja (2.4). Eurokoodi ei määrittele staattisen pistekuorman suuruutta, vaan antaa taipuman ja pistekuorman suhteelle yläraja-arvon. Suomen kansallisen liitteen mukaan taipuma lasketaan kuitenkin 1 kN pistekuormalle.

$$\frac{w}{F} \leq a \quad (2.2)$$

missä

w on suurin hetkellinen staattisen pistekuorman F aiheuttama taipuma missä tahansa kohdassa lattiaa

a on ylärajaparametri mm/kN

Palkkirakenteen taipuma voidaan laskea keskellä jänneväliä olevalle pistekuormalle kaavalla (2.3).

$$w = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_L} \quad (2.3)$$

missä

F on staattinen pistekuorma ja suuruudeltaan 1 kN

2.4.3 Lattian värähtelynopeus

Värähtelynopeuden raja-arvo saadaan kaavalla (2.4), missä ylärajaparametri b riippuu taipuman ylärajaparametrin a ja värähtelynopeuden suurin alkuarvo. Suomen kansallinen liite jättää värähtelynopeuden arvon huomioimatta.

$$v \leq b (f_1 \cdot \zeta^{-1}) \quad (2.4)$$

missä

v on yksikköimpulssin aiheuttama lattian pystysuoran värähtelynopeuden suurin alkuarvo, m/Ns²

ζ on värähtelymuotoa vastaava vaimennussuhde

b on ylärajaparametri

Lattioille voidaan käyttää vaimennussuhteen arvoa $\zeta=0,01$ (eli 1 %), mikäli sitä ei tiedetä tarkemmin esimerkiksi testien perusteella. Kaavan (2.5) laskennassa oletetaan, että ainoa kuormitus on lattiarakenteen oma paino.

Eurokoodi (SFS-EN 2014) ohjeistaa laskemaan värähtelynopeuden likimääräisen alkuarvon v kaavalla (2.5). Alkuarvon määrittämisessä voidaan jättää huomioimatta yli 40 Hz komponentit, jolloin tulee selvittää taajuukseltaan alle 40 Hz olevien ominaismuotojen lukumäärä.

$$v = \frac{4*(0,4+0,6*n_{40})}{m*b*l+200} \quad (2.5)$$

missä

v on yksikköimpulssin aiheuttama värähtelynopeuden alkuarvo

n_{40} on sellaisten ominaismuotojen lukumäärä, joiden ominaistajuus on alle 40 Hz

b on lattian leveys

m on rakenteen massa

l on lattian jänneväli

Niiden ominaismuotojen lukumäärä, joiden ominaistajuus on alle 40 Hz, voidaan laskea kaavalla (2.6).

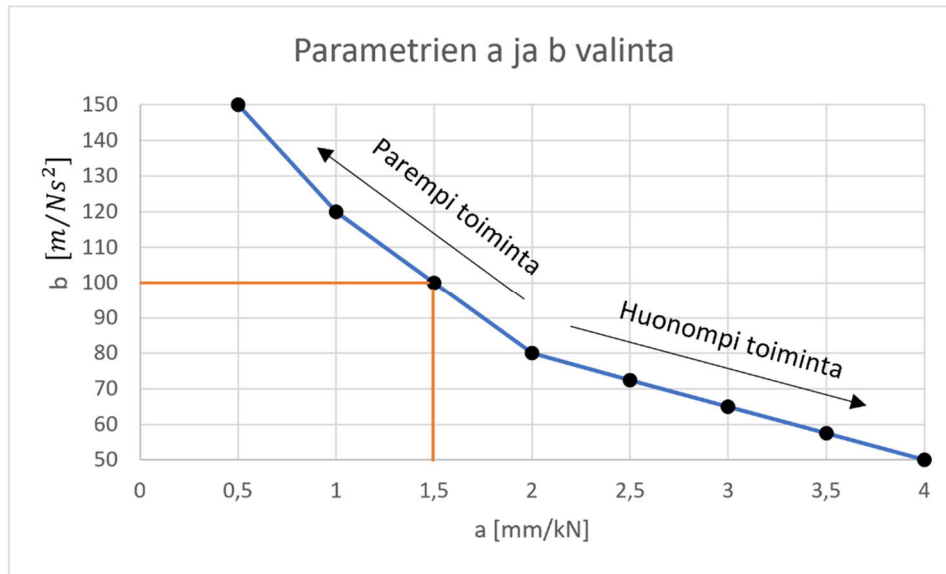
$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) * \left(\frac{b}{l} \right)^4 * \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad (2.6)$$

missä

$(EI)_b$ on lattian poikittaista suuntaa (b) vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden

Eurokoodissa on määritelty taipuman ja värähtelynopeuden välinen yhteys niin, että taipuman ja värähtelynopeuden raja-arvojen suuruudet riippuvat toisistaan. Sallittu suurempi taipuma pienentää sallittua värähtelynopeutta ja päinvastoin. Näin pyritään siihen, että lattian toiminta värähtelyssä pysyy hyvänä. Lattian parempi toiminta värähtelyn kannalta on rakenne, jossa sekä taipuma, että yksikköimpulssin aiheuttama värähtelynopeus ovat mahdollisimman pieniä. Ehdoissa on esitetty taipuman ja värähtelynopeuden yhteys kuvaajalla, joka antaa suositusalueen ylärajaparametreille a ja b. Kuvaaja on esitetty kuvassa 2.1. Eurokoodissa ei määritellä suoraan raja-arvoja, vaan annetaan kansallisten liitteiden määrittellä halutessaan kyseiset parametrit. Esimerkiksi Ruotsissa taipuman raja-arvo on 1,5 mm/kN, jolloin parametrin b arvoksi saadaan 100 m/Ns². Näin saadaan kasvatettua sallitun taipuman raja-arvoa rajoittamalla lattian värähtelynopeutta. Suomessa tai-

puman raja-arvo on 0,5 mm/kN, jolloin lattialle sallitaan suurempi värähtelynopeus. Kuvan 2.1 kuvaajassa on esitetty Ruotsissa käytössä olevat parametrien a ja b arvot.



Kuva 2.1. Taipuman ja värähtelynopeuden suositeltu riippuvuus toisistaan ja Ruotsissa käytetyt arvot (SFS-EN 2014)

2.4.4 Värähtelymitoitusten vertailu

Suomen kansallisten liitteiden (RIL 2017b) ohjeet puurakenteisen välipohjan värähtelymitoitukseen poikkeavat joiltakin osin Eurokoodin (SFS-EN 2014) ohjeista. Suomessa värähtelymitoituksessa riittää, että lasketaan lattian alin ominaistajuus ja pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma, eikä lattian värähtelynopeutta tutkita erikseen. Asuinrakennuksen puurakenteisen lattian alimman ominaistajuuden tulee olla nykyisen Eurokoodin ohjeen mukaan yli 8 Hz. Tämä kuitenkin poikkeaa Suomen kansallisen liitteen vaatimuksista, jonka mukaan alimman ominaistajuuden tulee olla yli 9 Hz. Sekä Eurokoodissa, että Suomen kansallisessa liitteessä vaaditaan erityistarkastelua, mikäli annettu taajuusehto ei täyty, mutta erityistarkastelua ei ole tarkemmin määritelty. Myös laskelmissa käytettävä massa m on määritelty kansallisessa liitteessä Eurokoodista poikkeavalla tavalla niin, että lattiarakenteen oman painon lisäksi käytetään hyötykuormasta 30 kg/m^2 lisäkuormaa.

Suomen kansallinen liite antaa kaavan myös kahteen suuntaan kantavan lattian alimman ominaistajuuden laskentaan. Lattiarakenteen kantaessa molempiin suuntiin, tulee laskea lattiarakenteen taivutusjäykkyys myös poikittaiseen suuntaan. Kahteen suuntaan kantavan lattian alin ominaistajuus lasketaan kaavalla (2.7) (RIL 2017b). Tällainen rakenne on esimerkiksi CLT-laatta.

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} * \sqrt{1 + \left[2 * \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{L}{B}\right)^4 \right] * \frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \quad (2.7)$$

Palkkirakenteisella lattialla lattiapalkkien suuntainen tuki vaikuttaa hyvin vähän ominaistajuuteen, jolloin voidaan tällaisessa tilanteessa käyttää yksinkertaisempaa kaavaa (2.1) (Talja, 2002).

Suomen kansallisessa liitteessä alimman ominaistajuuden ehdon lisäksi on asetettu taipumalle ehto, jossa 1 kN pistekuorman aiheuttaman suurimman hetkellisen taipuman tulee jäädä alle 0,5 mm. Sellaisten tilojen, joiden lattian suurin sivumitta on alle 4 m, sallittua taipumaa voidaan korottaa kertoimella k . Kerroin k lasketaan kaavalla (2.8).

$$k = \frac{1}{0,318+0,114*L} \geq 1 \quad (2.8)$$

missä

L on huoneen suurin sivumitta

Taipuma lasketaan kaavalla (2.9). Mikäli lattia on tuettu neljältä sivulta, voidaan jättää kaavan (2.10) rajoitus $k_\delta \leq \frac{b}{l}$ huomioimatta.

$$\delta = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Fl^2}{42*k_\delta*(EI)_l} \\ \frac{Fl^3}{48*s*(EI)_l} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

missä

s on lattiapalkkien välinen etäisyys

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \text{ , yhteen suuntaan kantavalle lattialle } k_\delta \leq \frac{b}{l} \quad (2.10)$$

Suomen kansallisen liitteen lisäksi käytössä on myös mm. VTT:n (valtion teknisen tutkimuslaitoksen) ohjeita, joilla voi huomioida lattiarakenteen ja pääkannatinten synnyttämän systeemin alimman ominaistajuuden ja taipuman. Lisäksi esimerkiksi CLT-laattojen värähtelymitoituksessa hyödynnetään mm. ruotsalaista The CLT Handbook-suunnitteluohjetta ja itävaltalaisista proHolzin CLT-suunnitteluohjetta. The CLT Handbook -suunnitteluohjeessa taipuma 1 kN pistekuormalle poikkeaa hiukan Eurokoodin ohjeista. Taipuma lasketaan kaavan (2.11) mukaisesti, jossa huomioidaan CLT-levyn jäykkyys myös poikittaiseen suuntaan kertoimella B_{ef} . Kerroin lasketaan kaavan (2.12) mukaan. (Swedish Wood, 2019)

$$w = \frac{F*L^3}{48*(EI)_L*B_{ef}} \quad (2.11)$$

$$B_{ef} = \frac{L}{1,1} * \sqrt{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \quad (2.12)$$

Itävaltalaisen proHolzin ohjeessa sekä taipuman mitoitus, että alimman ominaistajuuden mitoitus poikkeavat jonkin verran Eurokoodin ohjeista. Alin ominaistajuus voidaan proHolzin ohjeen mukaan mitoittaa esimerkiksi kaavalla (2.13). (Wallner-Novak, 2014)

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} * k_e * k_{transverse} \quad (2.13)$$

missä kerroin k_e riippuu rakenteen staattisesta systeemistä, eli onko rakenne yksi- vai kaksiaukkoinen ja millaiset tuet rakenteella on. Kerroin $k_{transverse}$ voidaan laskea kaavalla (2.14) ja se huomioi lattian jäykkyyden myös poikittaiseen suuntaan. (Wallner-Novak, 2014)

$$k_{transverse} = \sqrt{1 + \left[\left(\frac{L}{B} \right)^2 + \left(\frac{L}{B} \right)^4 \right] * \frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \quad (2.14)$$

Taipuman mitoituksen osalta proHolzin ohje vastaa melko hyvin The CLT Handbookin mitoitusohjetta. Ohjeessa taipuman kaava on muuten sama, kuin kaava (2.11), mutta tehollista leveyttä B_{ef} on rajoitettu kaavan (2.15) mukaisesti. (Wallner-Novak, 2014)

$$B_{ef} = \min \left\{ \frac{L}{1,1} * \sqrt{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}}; B \right\} \geq 1 \quad (2.15)$$

2.5 Värähtelymitoitus tulevan Eurokoodin mukaan

Toistaiseksi luonnosvaiheessa olevassa Eurokoodissa (CEN 2021e) värähtelymitoitus huomioi tarkemmin erilaiset välipohjarakenteet, tuet ja niiden vaikutukset värähtelyyn. Tulevan Eurokoodin värähtelymitoituksessa on mukana muista suunnitteluohjeista tuttuja kaavoja, jotka huomioivat paremmin mm. CLT-laatan värähtelymitoituksen.

Eurokoodin suosittelemat vaatimukset lattian värähtelylle on esitetty taulukossa 2.1, jossa lattiat on jaettu kuuteen eri vaatimustasoon. Valittava taso riippuu käyttökohteesta (asuin- vai toimistorakennus) ja halutusta laatuluokasta. Eri laatuluokat mahdollistavat esimerkiksi sen, että omakotitalon välipohjan ei tarvitse täyttää yhtä tiukkoja kriteereitä kuin kerrostalon välipohjan. Eurokoodin antamat suositukset vaatimustason valintaan on esitetty taulukossa 2.2. Vaatimustason rakenteelle määrittelee suunnittelija.

Alimman ominaistajuuden laskeminen poikkeaa nykyisistä ohjeista siten, että kertoimilla huomioidaan yksi- ja kaksiaukkoinen lattia. Lisäksi uusissa ohjeissa huomioidaan lattiarakenteen mahdolliset taipuvat tuet, sekä lattian epätasainen kuormitus. Raja-arvo alimmalle ominaistajuudelle on 4,5 Hz, missä resonanssin mahdollisuus on kuitenkin huomioitu

määrittelemällä raja-arvo, jota suuremmalla lattian alimmalla ominaistajuudella ei tarvitse erikseen huomioida resonanssia. Tämä raja-arvo on neljä kertaa kävelytaajuus tai 8 Hz riippuen siitä, kumpi on suurempi. Asuinrakennuksissa kävelytaajuutena voidaan pitää 1,5 Hz, jolloin 8 Hz on määrävä raja-arvo. Resonanssi huomioidaan ohjeissa laskemalla lattian kiihtyvyyden neliöllinen keskiarvo. Kiihtyvyyden neliölliselle keskiarvolle on annettu raja-arvot eri vaatimusluokissa.

Taipuman osalta uudet ohjeet huomioivat paremmin erilaiset lattiarakenteet ja taipuvat tuet. Lattiarakenteen taipumaan vaikuttavat poikittaistuet on huomioitu lattian tehollisen leveyden laskennassa. Taipuman raja-arvot riippuvat lattialle asetetusta vaatimustasosta, jossa laadukkaalle lattiarakenteelle on asuin- ja toimistorakennuksissa sama 0,5 mm taipumaraja kuin nykyisillä kansallisen liitteen ohjeilla kaikille lattioille.

Värähtelynopeuden laskennassa huomioidaan mm. kävelytaajuus erilaisissa tiloissa (asuin- vai toimistotilat) sekä värähtelyn havaitseman henkilön sijainti kävelijään nähden. Värähtelynopeuden sallitut arvot riippuvat määritetystä vaatimustasosta. Uusien ohjeiden perusteella on mahdollista huomioida erilaiset rakenteet ja värähtelytilanteet sekä tarkastella enemmän värähtelyominaisuuksia. On kuitenkin huomioitava, että uusiin ohjeisiin voi tulla myöhemmin kansallisia ohjeita, jotka voivat vaikuttaa esimerkiksi lattioiden ehtoihin ja raja-arvoihin.

Taulukko 2.1. Värähtelyvaatimukset lattioille Eurokoodin luonnoksen mukaan (CEN 2021e, s.177).

Ehto	Lattian vaatimustasot					
	I	II	III	IV	V	VI
R -kerroin	4	8	12	24	36	48
Ylempi taipumaraja $w_{lim,max}$ (mm)	0,25	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0
Taipumaraja w_{1kN} (mm) \leq	0,25	0,25	0,5	$\frac{150 * R}{L}$		
Taajuus f_1 (Hz) \geq	4,5					
Kiihtyvyys a_{rms} (m/s ²) \leq (jos $f_1 \leq 8$ Hz)	0,02	0,04	0,06	0,12	0,18	0,24
Nopeus v_{rms} (m/s) \leq	0,0004	0,0008	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048

Taulukko 2.2. Lattioiden suositellut vaatimustasot Eurokoodin luonnoksen mukaan (CEN 2021e, s.177).

	Laadukas	Perustaso	Taloudellinen
A (asuinrakennus)			
- kerrostalo	I, II, III	IV	V
- omakotitalo	I, II, III, IV	V	VI
B (toimisto)	I, II, III	IV	V

2.5.1 Lattian alin ominaistajuus

Alimman ominaistajuuden kaavassa voidaan ottaa huomioon kaksiaukkoisen lattian vaikutus ominaistajuuteen kertoimella $k_{e,1}$. Kerroin riippuu lattian jännevälien suhteesta. Mitä suurempi ero jännevälien pituudella on, sitä suurempi on myös ominaistajuutta kasvattava kerroin. Mikäli jännevälit ovat yhtä pitkät, kerroin on 1. Kun lattia kantaa kahteen suuntaan, alinta ominaistajuutta kasvatetaan kertoimella $k_{e,2}$. Kertoimen suuruus riippuu lattian eri suuntien taivutusjäykkyyksien sekä lattian mittojen suhteesta. Kertoimen $k_{e,2}$ ominaistajuuden kaava muistuttaa nykyisen ohjeen mukaista kaavaa kahteen suuntaan kantavalle lattialle, mutta ei kuitenkaan täysin vastaa sitä. Nykyinen ohje antaa suuremman alimman ominaistajuuden kahteen suuntaan kantavalle lattialle. Tulevassa eurokoodissa lattian massaun lisätään 10 % hyötykuormasta, mikä osaltaan pienentää ominaistajuuden laskennan tulosta. Lattian alin ominaistajuus lasketaan kaavalla (2.11).

$$f_1 = k_{e,1} * k_{e,2} * \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (2.11)$$

missä

$k_{e,1}$ kerroin, jonka suuruus riippuu lattian leveydestä ja pituudesta, kun lattiarakenne on kaksiaukkoinen. Kertoimelle on annettu arvo taulukossa 2.3. Yksiaukkoiselle lattialle kerroin on 1.

$k_{e,2}$ kerroin, joka huomioi lattian taivutusjäykkyyden poikittaiseen suuntaan kahteen suuntaan kantavalle lattialle ja se lasketaan kaavalla (2.12). Yhteen suuntaan kantavalle lattialle kerroin on 1.

$$k_{e,2} = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{L}{B}\right)^4 * (EI)_T}{(EI)_L}} & \text{kahteen suuntaan kantava lattia} \\ 1 & \text{yhteen suuntaan kantava lattia} \end{cases} \quad (2.12)$$

- L on lattian jänneväli
 $(EI)_L$ on lattian kantavaa suuntaa L vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden
 $(EI)_T$ on lattian poikittaista suuntaa vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden
 B on lattian leveys
 m on lattian massa, joka on lattian pysyvä kuorma, mukaan lukien väliseinien oma-paino ja 10 % täydestä hyötykuormasta

Taulukko 2.3. Kertoimen $k_{e,1}$ arvo kaksiaukkoisen lattian tapauksessa Eurokoodin luonnok-sen mukaan (CEN 2021e, s.171).

l_2/L	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
$k_{e,1}$	1,00	1,09	1,16	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,41
<p>L on pidempi jänneväli ja sama, mitä käytetään ominaistajuuden laskennassa l_2 on kaksiaukkoisen lattian lyhempi jänneväli $k_{e,1}$ arvo voidaan interpoloida suoraan, mikäli suhdeluku on kahden arvon välissä</p>									

Ominaistajuus voidaan myös laskea yksiaukkoiselle lattialle taipuman perusteella kaavalla (2.13), jolloin voidaan huomioida tarkemmin taipumaan vaikuttavat tilanteet, kuten epäta-sainen kuormitus tai kun lattian tuet eivät ole jäykkiä. Kertoimet $k_{e,1}$ ja $k_{e,2}$ ovat vastaavat kuin kaavassa (2.11), mutta mikäli taipuman laskennassa on jo huomioitu lattian poikittai-sen suunnan taivutusjäykkyys, kerroin $k_{e,2}$ on 1. Lisäksi, kun taipuman laskennassa on jo huomioitu taipuvat tuet, ei niitä tarvitse enää huomioida kaavan (2.14) mukaisesti.

$$f_1 = k_{e,1} * k_{e,2} * \frac{18}{\sqrt{w_{sys}}} \quad (2.13)$$

missä

w_{sys} on lattian taipuma, kun sitä kuormittaa lattian massa m (kuten kaavassa 2.11)

$k_{e,1}$ kertoimelle on annettu arvo taulukossa 2.3. Yksiaukkoiselle lattialle kerroin on 1.

$k_{e,2}$ kertoimen kaava (2.12). Yksiaukkoiselle lattialle kerroin on 1.

Yksiaukkoiselle lattialle, joka on tuettu taipuvaan palkkiin joko yhdeltä tai kahdelta sivulta, ominaistajuus lasketaan kaavalla (2.14), jolla voidaan mitoittaa koko systeemin alin omi-naistajuus. Kaava (2.14) löytyy myös mm. Talja et al. (2002) tekemästä VTT:n tiedotteesta, jossa on kaava systeemin ominaistajuudelle. Muista suunnitteluohjeista poiketen tulevan Eurokoodin kaavassa systeemin alimmalle ominaistajuudelle on lisätty kuitenkin palkeille kertoimet.

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,rigid}^2} + \frac{1}{3f_{1,beam,1}^2} + \frac{1}{3f_{1,beam,2}^2}}} \quad (2.14)$$

missä

$f_{1,rigid}$ on lattian ominaistajuus, kun lattian tuet ovat jäykkiä

$f_{1,beam,1}$ on lattian sivun tukipalkin ominaistajuus

$f_{1,beam,2}$ on lattian toisen sivun tukipalkin ominaistajuus

Kaikille lattioille on annettu ominaistajuudelle raja-arvo 4,5 Hz. Resonanssia ei tarvitse huomioida, mikäli lattian ominaistajuus on enemmän kuin 8 Hz tai neljä kertaa kävelytaajuus, joista valitaan suurempi.

2.5.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle

Lattian taipuma lasketaan 1 kN pistekuormalle niin, että kuormitus sijaitsee siinä, missä on lattian suurin taipuma. Yksiaukkoiselle lattialle pistekuorma sijaitsee yleensä keskellä jänneväliä ja taipuma voidaan laskea kaavalla (2.15). Taipuman laskennassa on huomioitu lattian tehollinen leveys B_{ef} , jonka laskentaan on annettu kaavat riippuen siitä, onko lattian poikittainen taivutusjäykkyys koko leveydeltään sama, vai onko lattiaa jäykistetty poikittaisilla tuilla.

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_L \cdot B_{ef}} \quad (2.15)$$

missä

F on 1 kN pistekuorma lattian taipuman kannalta epäedullisimmassa paikassa

L on lattian jänneväli

$(EI)_L$ on lattian kantavaa suuntaa L vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden

B_{ef} on lattian tehollinen leveys

Lattialle, jonka poikittainen taivutusjäykkyys on sama koko leveydellä, kuten CLT-levyllä, voidaan laskea tehollinen leveys kaavalla (2.16).

$$B_{ef} = \min \left\{ 0,95 \cdot L \cdot \left(\frac{(EI)_T}{(EI)_L} \right)^{0,25} ; B \right\} \quad (2.16)$$

missä

L on lattian jänneväli

$(EI)_L$ on lattian kantavaa suuntaa L vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden

$(EI)_T$ on lattian poikittaista suuntaa vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden
 B on lattian leveys

Lattialle, jonka palkkien väleihin on kiinnitetty erilliset poikittaiset palkit keskelle jännevälillä, voidaan tehollinen leveys laskea kaavalla (2.17).

$$B_{ef} = \min \left\{ 1,07 * L^{0,75} * \left(\frac{(EI)_{ST} + 0,63 * L * (EI)_T}{(EI)_L} \right)^{0,25} ; B \right\} \quad (2.17)$$

missä

$(EI)_{ST}$ on poikittaispalkin taivutusjäykkyys

Lattian, joka tukeutuu yhdestä tai molemmista päistään taipuvalle tuelle, taipuma lasketaan kaavalla (2.18). Kaavalla lasketaan yhteen päätukien ja lattiarakenteen taipuma niin, että tuille oletetaan 0,5 kN pystysuora pistekuorma ja lattiarakenteelle 1 kN pistekuorma.

$$w_{1kN} = 0,5 * w_{beam,1} + 0,5 * w_{beam,2} + w_{rigid} \quad (2.18)$$

missä

$w_{beam,1}$ on tukipalkin taipuma 0,5 kN pistekuormalle

$w_{beam,2}$ on toisen tukipalkin taipuma 0,5 kN pistekuormalle

w_{rigid} on lattian taipuma kaavan (2.15) mukaan

Taipumalle on annettu raja-arvo, joka riippuu lattian vaatimustasosta. Mikäli vaatimustason taipumalle antama ylempi raja-arvo ($w_{lim,max}$) on korkeintaan 0,5 mm, on se suoraan myös taipuman raja-arvo w_{lim} . Muussa tapauksessa, eli kun $w_{lim,max} > 0,5$, raja-arvo saadaan kaavasta (2.19).

$$w_{lim} = w_{lim,max} \quad \text{kun } w_{lim,max} \leq 0,5 \quad (2.19)$$

$$0,5 \leq w_{lim} = \frac{150R}{L} \leq w_{lim,max} \quad \text{kun } w_{lim,max} > 0,5$$

missä $w_{lim,max}$ ja R -luku riippuvat valitusta vaatimustasosta ja niille on annettu arvot taulukossa 2.1.

2.5.3 Värähtelyn kiihtyvyys ja nopeus

Lattian kiihtyvyyden neliöllinen keskiarvo tulee laskea, kun lattian alin ominaistajuus jää alle 8 Hz. Kiihtyvyyden laskennassa käytetään vaimennussuhdetta ζ , jonka arvo riippuu lattian rakenteesta. Mikäli vaimennussuhdetta ei tiedetä tarkemmin esimerkiksi mittausten perusteella, voidaan arvona käyttää taulukon 2.4 antamaa lukua. Kiihtyvyyden neliöllinen keskiarvo lasketaan kaavalla (2.20).

$$a_{rms} = \frac{k_{res} \cdot \mu \cdot F_h}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M^*} \quad (2.20)$$

missä

k_{res} on kerroin, joka huomioi korkeimmat värähtelymuodot. Kerroin lasketaan kaavalla (2.21).

μ on kerroin, joka huomioi resonanssin. Kertoimen arvona voidaan yleensä pitää arvoa 0,4, sillä heräte harvoin aiheuttaa todellisessa tilanteessa täyden resonanssin rakenteeseen ja kävelyheräte tapahtuu harvoin pelkästään keskellä jänneväliä. Mikäli mitoitettavalla lattialla on mahdollista kävellä esteettömästi 10 m (esimerkiksi käytävät), tulee kertoimen arvona käyttää $\mu = 0,8$. Mikäli saavutetaan täysi resonanssi ja kävelyheräte aiheutetaan keskellä lattian jänneväliä, arvona tulee käyttää $\mu = 1$.

F_h on kävelijän aiheuttama pystykuorma.

ζ on vaimennussuhde, joka valitaan taulukosta 2.4

M^* on ominaismassa, joka lasketaan kaavalla (2.22).

Taulukko 2.4. Lattioiden vaimennussuhteet Eurokoodin luonnoksen mukaan (CEN 2021e, s.168).

Lattiarakenne	Vaimennussuhde ζ
Palkkirakenteinen lattia	0,02
Puu-betoni liittorakenteinen, levy- tai ripalaattarakenteinen lattia (esim. CLT, LVL, GLT)	0,025
Palkkirakenteinen, kelluvalla lattialla	0,03
Puu-betoni liittorakenteinen, levy- tai ripalaattarakenteinen lattia (esim. CLT, LVL, GLT), kelluvalla lattialla	0,04

Kertoimella k_{res} otetaan huomioon korkeammat värähtelymuodot ja se on aina vähintään 1. Kertoimen suuruuteen vaikuttaa lattian taivutusjäykkyyksien ja mittojen suhde. Kerroin lasketaan kaavalla (2.21).

$$k_{res} = \max \left\{ 0,192 * \left(\frac{B}{L} \right) * \left(\frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right)^{0,25} ; 1 \right\} \quad (2.21)$$

missä

L on lattian jänneväli

$(EI)_L$ on lattian kantavaa suuntaa L vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden

$(EI)_T$ on lattian poikittaista suuntaa vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohden

B on lattian leveys

Ominaismassaa M^* tarvitaan myös värähtelynopeuden laskennassa ja se saadaan kaavalla (2.22).

$$M^* = \frac{m * L * B}{4} \quad (2.22)$$

missä

m on lattian massa, joka on lattian pysyvä kuorma ja 10 % täydestä hyötykuormasta

Lattian kiihtyvyyden tehollisarvolle on annettu raja-arvot, jotka riippuvat lattialle asetetusta vaatimustasosta. Raja-arvot on esitetty taulukossa 2.1.

Lattian värähtelynopeuden neliöllinen keskiarvo v_{rms} tulee laskea kaikille lattioille riippumatta alimman ominaistajuuden arvosta. Nopeuden neliöllinen keskiarvo lasketaan herätteen aiheuttaman impulssin keskiarvon perusteella. Värähtelynopeuden laskennassa herätteenä on kävelijä. Värähtelynopeuden neliöllinen keskiarvo lasketaan kaavalla (2.23).

$$v_{rms} = v_{tot,peak} * (0,65 - 0,01 * f_1) * (1,22 - 11 * \zeta) * \eta \quad (2.23)$$

missä

f_1 on ominaistajuus

ζ on vaimennussuhde, joka valitaan taulukosta 2.4

η on kerroin, joka on määritetty kaavassa (2.24).

$$\eta = 1,35 - 0,4 * k_{imp} \quad (2.24)$$

- palkkirakenteisille lattioille $1,0 \leq k_{imp} \leq 1,9$, muussa tapauksessa $\eta = 0,59$
- muille lattiarakenteille $1,0 \leq k_{imp} \leq 1,7$, muussa tapauksessa $\eta = 0,67$
- k_{imp} -kerroin lasketaan kaavalla (2.25)

Lattian korkeammat värähtelymuodot huomioidaan kertoimella k_{imp} , joka on vähintään 1. Kertoimella kasvatetaan ominaistajuuden värähtelynopeuden huippuarvoa.

$$k_{imp} = \max \left\{ 0,48 * \left(\frac{B}{L} \right) * \left[\frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right]^{0,25} ; 1 \right\} \quad (2.25)$$

Keskiarvo tavallisimmalle herätteelle lasketaan kaavalla (2.26), joka perustuu kävelyherätteen taajuuteen ja lattian alimpaan ominaistaajuuteen.

$$I_m = \frac{42 * f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}} \quad (2.26)$$

missä

f_w on kävelytaajuus, joka asuinrakennuksille on vähintään 1,5 Hz ja muille tiloille 2,0 Hz. Tiloille, joissa pystyy kävelemään esteettömästi vähintään 10 m matkan, kävelytaajuutena käytetään 2,5 Hz.

Perustapauksen värähtelynopeuden huippuarvo $v_{1,peak}$ lasketaan kaavalla (2.27). Perustapaus on tavanomaisen kävelyherätteen keskiarvolla ja lattiarakenteen ominaismassalla saatu keskimääräisen värähtelynopeuden huippuarvo, jota pienennetään kertoimella k_{red} silloin, kun herätteen aiheuttaja ja värähtelyn kokija ovat eri paikoissa lattialla.

$$v_{1,peak} = k_{red} \frac{I_M}{(M^* + 70kg)} \quad (2.27)$$

missä

M^* on ominaismassa kaavasta (2.22)

k_{red} on pienennyskerroin, joka on 0,7, kun värähtelyn havaintaja on jonkin matkan päässä herätteen aiheuttajasta (kävelijästä). Arvo voi olla 1, kun kävelijä ja värähtelyn havaintaja ovat samassa paikassa.

I_m on keskimääräinen impulssi kaavasta (2.26).

Lopullinen nopeuden huippuvaste lasketaan kaavalla (2.28), jossa keskimääräistä värähtelynopeutta kasvatetaan korkeammat värähtelymuodot huomioivalla kertoimella k_{imp} .

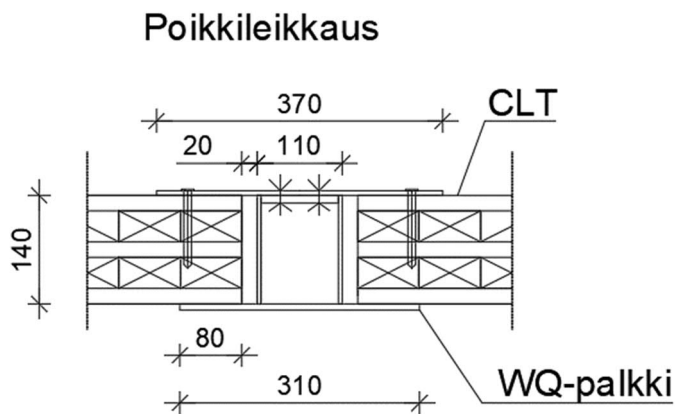
$$v_{tot,peak} = k_{imp} * v_{1,peak} \quad (2.28)$$

Lattian värähtelynopeuden neliölliselle keskiarvolle on annettu raja-arvot, jotka riippuvat lattialle asetetusta vaatimustasosta. Raja-arvot on esitetty taulukossa 2.1. Värähtelynopeuden neliöllinen keskiarvo saadaan kaavalla (2.23).

3. NORDIC SYSTEM – VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYN TUTKIMINEN

3.1 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksessa tarkastellaan Nordic system -välipohjan värähtelyä mittaamalla sen värähtelyominaisuuksia. Nordic system -lattiarakenne koostuu CLT-laatoista, jotka tukeutuvat WQ -teräspalkkiin palkin molemmin puolin. Rakenteen liittovaikutus saadaan aikaan kiinnittämällä CLT-laatat ruuveilla yläpinnastaan teräslevyillä ja teräslevyt pulteilla WQ-palkkiin. Rakenne on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Nordic system -välipohja

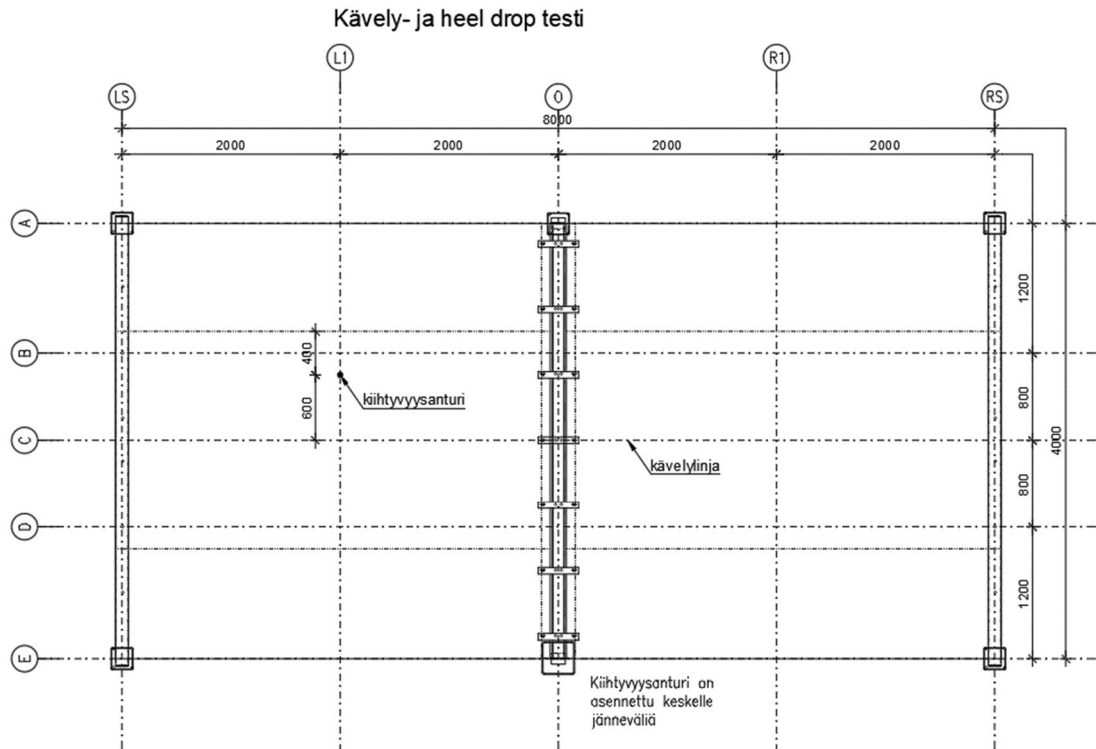
Testeissä mitataan kävelyn ja heel drop -testin aiheuttamia herätteitä sekä 1 kN pistekuorman aiheuttamaa taipumaa. Mittaamalla saatuja tuloksia voidaan verrata laskemalla saatuihin tuloksiin, jolloin voidaan arvioida, kuinka hyvin lasketut ja mitatut arvot vastaavat toisiaan. Mittaukset herätteille ja taipumalle tehdään liittovaikutuksen kanssa ja ilman sitä. Näin voidaan tarkastella myös sitä, kuinka liittovaikutus muuttaa värähtelyominaisuuksia. Tutkimus tehdään vain suoraan värähtelyä mittaamalla, eikä subjektiivisia testejä tehdä ollenkaan, sillä tutkittava rakenne on lattian runko, eikä valmis rakenne, jolloin siitä puuttuu mm. pintarakenteet. Pintarakenteet vaikuttavat lattian värähtelyominaisuuksiin ja voivat vaikuttaa myös värähtelyn kokemiseen.



Kuva 3.2. Testattava rakenne

Testattavan välipohjan CLT-laatat ovat 140 mm paksuja, 1–2 m leveitä ja niitä on kolme molemmin puolin WQ-teräspalkkia. WQ-palkki on yksiaukkoinen ja tuettu päistään nivelistä. Testattavia välipohjia on neljä, joissa on kahta eri CLT-levyn jänneväliä. Testiraken-

teissa 1 ja 2 jänneväli on 4 m ja testirakenteissa 5 ja 6 jänneväli on noin 2,6 m. Laatat lepäävät toisesta päästään teräsputkipalkin päällä. Tutkimuspiste on sijoitettu keskelle lattiaa. Tutkimusasetelma testirakenteille 1 ja 2 on esitetty kuvassa 3.3. Samalla periaatteella on toteutettu myös testirakenteet 5 ja 6.



Kuva 3.3. Tutkimusasetelma testirakenteissa 1 ja 2, joissa CLT-levyn jänneväli on 4 m.

Heel drop – testi on usein riittävän tarkka tutkimusmenetelmä lattian ominaistajuuden arvioinnille ja siten tutkimuksessa päädyttiin käyttämään sitä lattian kiihtyvyyden määrittämiseksi. (Talja, 2002) Testattavat rakenteet ovat muodoltaan melko yksinkertaisia, jolloin heel drop –testin referenssipisteeksi valittiin CLT-laatan jännevälin keskikohta. Keskellä on laatan suurin taipuma ja siten suurin kiihtyvyys. (Talja, 2002) Herätteen suoritti suunnitellun suositellun 80 kg painoinen henkilö, joka pudottautui varpaillaseisonnasta kantapäille kolme kertaa. Heel drop-testi tehtiin kaikkiin tutkittaviin lattiarakenteisiin.

Lattian taipuma 1 kN pistekuormalla tutkittiin asettamalla CLT-laataston keskelle 1 kN painoinen staattinen kuormitus. Lattian taipuma mitattiin kaikilla testirakenteilla. Testirakenteen alin ominaistajuus määritellään mitatun taipuman perusteella kaavan (3.1) mukaisesti, missä alin ominaistajuus saadaan arvioitua lattiarakenteen oman painon aiheuttaman taipuman perusteella (Kollár, 2017).

$$f_1 \approx \frac{18}{\sqrt{w}} \quad (3.1)$$

missä w on lattian suurin taipuma rakenteen omasta painosta.

Merkittävin värähtelyn aiheuttaja asuinhuoneistossa on liikkuva ihminen, jolloin kävelyheräte lattian värähtelytarkastelussa on myös perusteltu tutkimustapa. Kävelyheräte aiheutettiin kävelemällä laatan keskilinjaa reunasta reunaan kolme kertaa noin 1,5 Hz taajuudella. Kävelytaajuuden valintaan vaikutti laatan pituus, sillä tutkimusolosuhteissa kävelymatka on lyhyt, jolloin kävelytaajuuskin jäi hiukan suositeltua taajuutta pienemmäksi sujuvan kävelyn varmistamiseksi. Tulevassa Eurokoodissa mainitaan, että kävelytaajuutena voidaan käyttää 1,5 Hz, kun tilassa pääsee kävelemään keskeytyksettömästi enintään 5 m. (CEN 2021e, s.368) Kävelijänä toimii suunnilleen suositellun 80 kg painoinen henkilö ja kävelynopeuden määrittämisen apuna käytetään metronomia. Kävelyn aiheuttama värähtely mitattiin vain testirakenteessa 2. Kävelyn aiheuttaman värähtelyn perusteella voidaan selvittää lattian vaimennussuhde, mutta tässä tutkimuksessa vaimennussuhteen tutkiminen jätettiin pois, jolloin kävelyn aiheuttamaa värähtelyä ei tutkittu muissa testirakenteissa.

Lattian pystysuuntaiset värähtelyt mitataan lattian pinnasta kiihtyvyyssantureilla. Mittaus tehdään kalibroidulla mittausanturilla, joka on asetettu havaintopisteeseen. Havaintopiste tulee olla vähintään 600 mm päässä referenssipisteestä. Näytteenottotaajuuden tulee olla riittävän suuri ja näytteen oikein suodatettu. (Talja, 2002).

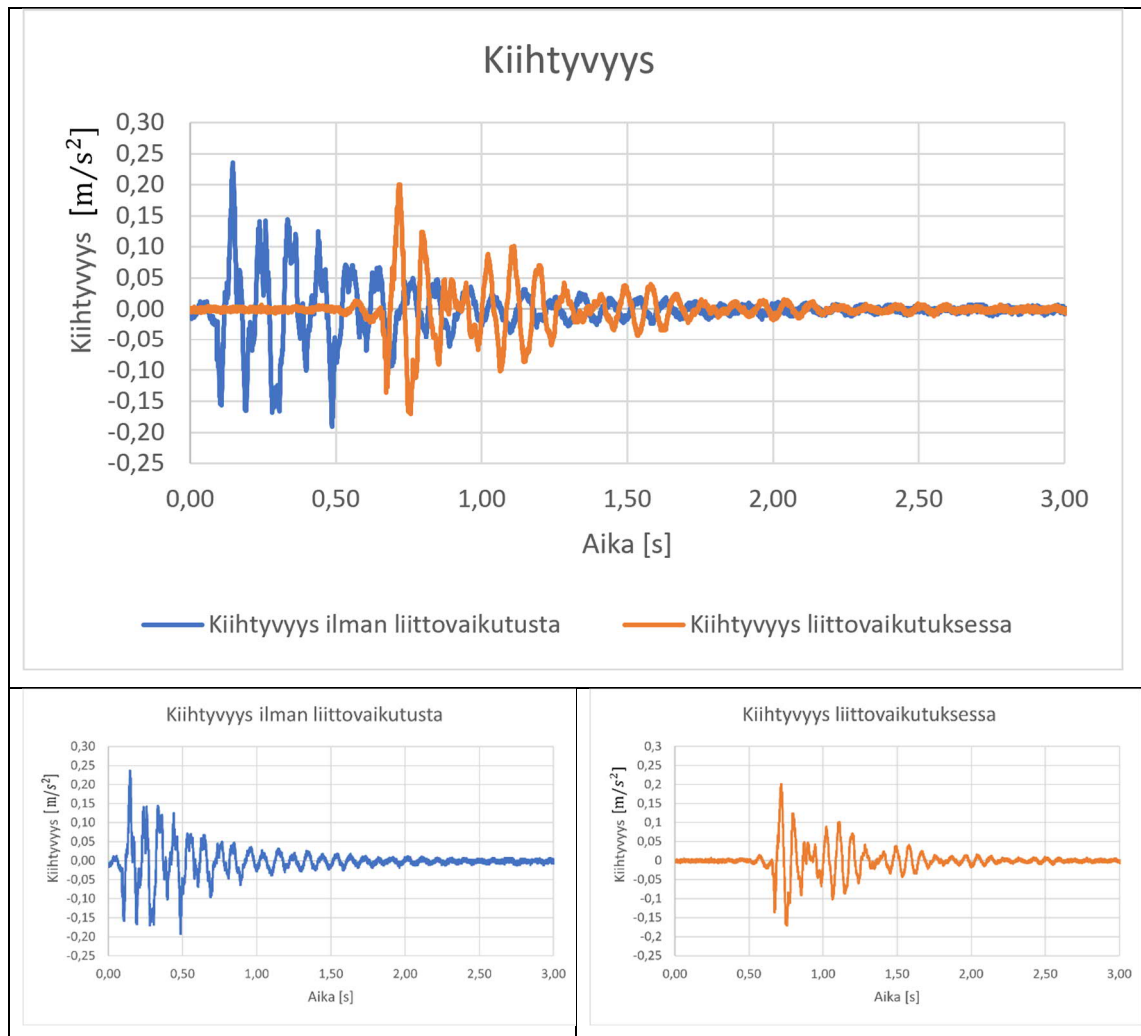
Tutkimuksessa saatavat tulokset analysoidaan moodianalyysillä, jonka avulla saadaan määritettyä mm. lattian ominaistajuudet ja värähtelymuodot. Moodianalyysilaitteisto koostuu tietokoneesta, jossa on mittauksista saatavan datan käsittelemä ohjelmisto. Data syötetään muuntimen läpi, joka muuttaa analogisen signaalin digitaaliseksi. Signaali muuntimelle tulee vahvistimilta, joissa sisäänmenona on herätteen aiheuttaja ja ulostulona anturi tai muu tunnistin. Tunnistimet eivät saa liikkua mittauksen aikana, sillä liike voi aiheuttaa virhettä mittauksiin. (Heikkinen, 2009) Mittaustilanteesta on hyvä tehdä selvät merkinnät mm. käytetyistä antureista, mittauspisteistä yms., jotta koe voidaan tarvittaessa toistaa.

3.2 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksissa mitattiin testirakenteen kiihtyvyyttä, siirtymää ja 1 kN pistekuorman aiheuttamaa taipumaa sekä ennen liittovaikutusta, että liittovaikutuksen jälkeen. Herätteet aiheutettiin kaikkiin testirakenteisiin heel drop -menetelmällä.

3.2.1 Kiihtyvyys

Testirakenteiden kiihtyvyyden arvot on otettu heel drop -testeissä mitatuista tuloksista. Testirakenteesta 1 on tehty kuvaajat, joissa näkyy testirakenteen kiihtyvyys ennen liittovaiikutusta ja liittovaiikutuksen jälkeen. Kuvaajat on esitetty kuvassa 3.4. Kuvaaja on tehty parhaiten keskiarvoa edustavista testeistä. Kiihtyvyyden arvot on kalibroitu kaikissa kuvaajissa jälkikäteen niin, että kuvaajat lähtevät nollasta.



Kuva 3.4. Testirakenteen 1 kiihtyvyys ilman liittovaiikutusta ja sen kanssa

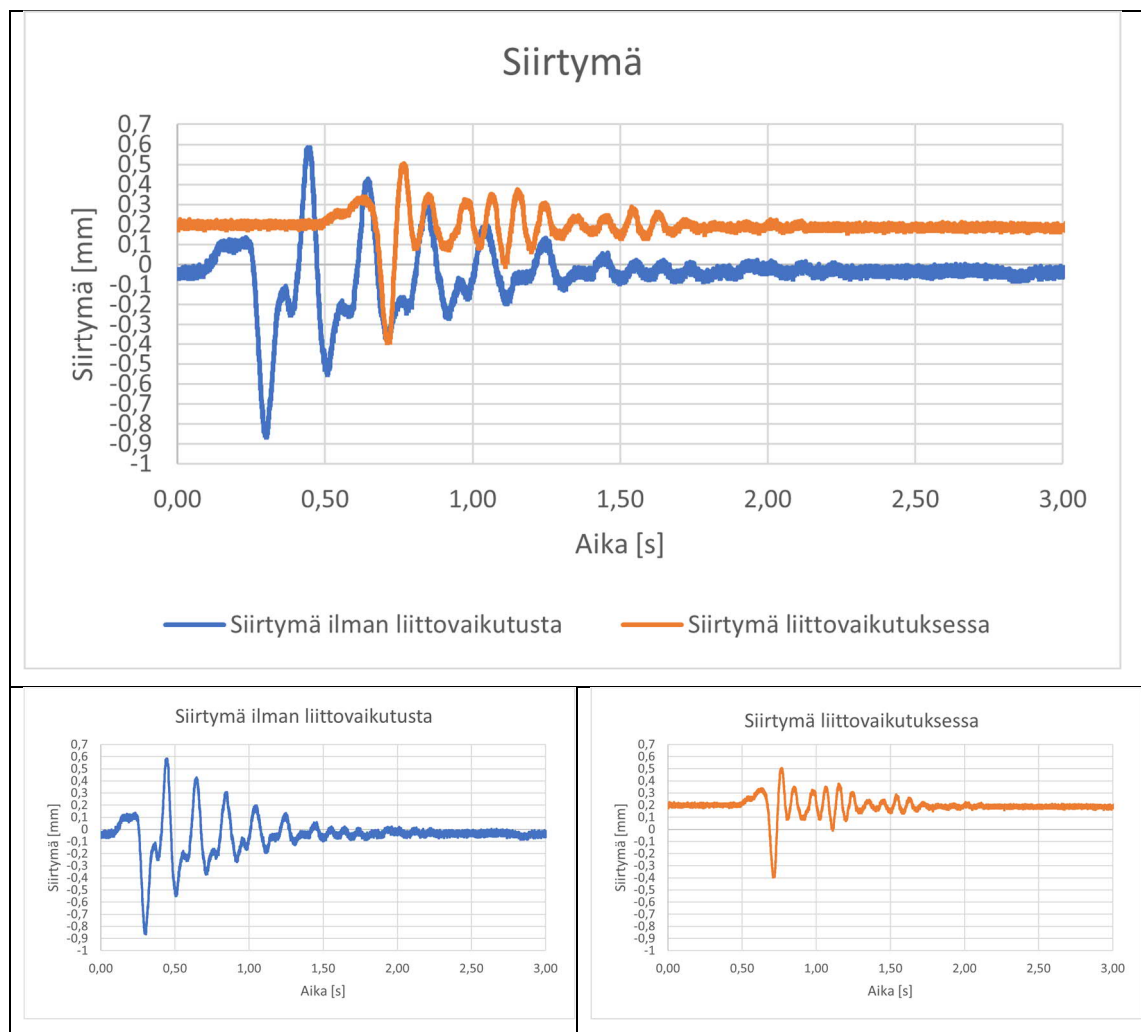
Kaikissa testirakenteissa heel drop -testi toistettiin 2-5 kertaa. Tulosten keskiarvot kiihtyvyyden maksimiarvolle on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Testirakenteiden maksimikihtyvyydet ennen liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa

Testirakenne	Kiihtyvyys max., ei liittovaikutusta, m/s^2	kiihtyvyys max., liittovaikutus, m/s^2	Muutos, %
1	0,26	0,21	-19,2 %
2	0,28	0,28	0 %
5	0,24	0,26	+8,3 %
6	0,2	0,17	-15 %

3.2.2 Siirtymä

Siirtymän tulokset heel drop -testin aikana testirakenteelle 1 on esitetty kuvassa 3.5. Kuvaajiin on valittu testirakenteista parhaiten keskiarvoa vastaava testi. Siirtymän kuvaaja ei ole erikseen kalibroitu jälkikäteen ja ne vastaavat testitilanteen arvoja. Siirtymän lähtötilanteen arvoon vaikuttaa heel drop -testin suorittajan paino.



Kuva 3.5. Testirakenteen 1 siirtymät ilman liittovaikutusta ja sen kanssa

Kaikista testeistä saatu keskiarvo siirtymistä on esitetty taulukossa 3.2. Siirtymä on laskettu maksimi ja minimiarvojen summasta, jolloin mittaustuloksen lähtöpiste ei vaikuta tulokseen.

Taulukko 3.2. Testirakenteiden kokonaissiirtymät ilman liittovaikutusta ja sen kanssa

Testirakenne	siirtymä max. ilman liittovaikutusta, <i>mm</i>	siirtymä max. liittovaikutuksessa, <i>mm</i>	Muutos, %
1	1,14	0,95	-16,7 %
2	1,08	1,02	-5,6 %
5	0,852	0,835	-2,0 %
6	0,636	0,585	-8,0 %

3.2.3 Taipuma

Taipuman arvot 1 kN pistekuormasta on esitetty taulukossa 3.3. Taipuman tulokset on saatu mitatun siirtymän keskiarvoista ennen 1 kN pistekuormaa ja sen jälkeen. Taipuma on laskettu näiden lukujen erotuksesta.

Taulukko 3.3. Testirakenteiden taipumat 1 kN pistekuormalle ilman liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa.

Testirakenne	Taipuma ilman liittovaikutusta, <i>mm</i>	Taipuma liittovaikutuksessa, <i>mm</i>	Muutos, %
1	0,514	0,407	-20,8 %
2	0,55	0,415	-24,5 %
5	0,387	0,286	-26,1 %
6	0,326	0,288	-11,7 %

3.2.4 Taajuus

Testirakenteiden lattian alin ominaistaajuus on laskettu kaavalla (3.1). Taipumana on käytetty 1 kN pistekuorman aiheuttaman taipuman arvoja. Taajuuden arvoissa on siis mukana 1 kN pistekuorma. Taajuudet on esitetty taulukossa 3.4.

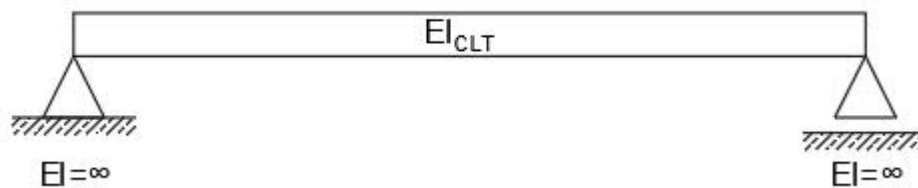
Taulukko 3.4. Testirakenteiden taajuudet taipuman perusteella ilman liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa.

Testirakenne	Taajuus ennen liittoa, Hz	Taajuus liiton jälkeen, Hz	Taajuus ennen liittoa, Hz
1	25,10	28,21	+12,4 %
2	24,27	27,93	+15,1 %
5	28,93	33,67	+16,4 %
6	31,50	33,52	+6 %

4. VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYMITOITUS

4.1 Laskentaesimerkki: CLT-laatan värähtely

Lasketaan testeissä käytetty CLT-laatta värähtelylle. Vertailemalla pelkän CLT-levyn värähtelymitoituksen tuloksia on helppo nähdä erot nykyisen ja tulevan Eurokoodin laskentaohjeissa. Laskentaesimerkissä oletetaan, että tuet eivät taivu ja ne ovat äärettömän jäykkiä, eikä niitä siten huomioida tämän esimerkin laskelmissa. Rakennemalli on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Laskettavan CLT-laatan rakennemalli

Lasketaan kaksi tapausta, joissa CLT-levyillä on eri jännevälit, mutta muuten rakenne on sama. Jännevälit ovat 2,585 m ja 3,985 m. CLT-levyissä on viisi kerrosta, joista kolme on 20 mm vahvuisia ja kaksi 20 mm vahvuisia. CLT-levy on näin ollen vahvuudeltaan 140 mm. Lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Esimerkkilaskelmassa 4.1 käytetyt lähtötiedot.

Lähtötieto	Nykyinen Eurokoodi	Tuleva Eurokoodi
CLT	Lamellikerrokset: 20-40-20-40-20 Kokonaisvahvuus: 140 mm Lujuusluokka: C24	
CLT:n ominaisuudet	Kimmokerroin $E_0 = 11000$ MPa Liukumoduuli $G_{090} = 650$ MPa Liukumoduuli $G_{9090} = 50$ MPa Tiheys $\rho_{CLT} = 350$ kg/m ³	
Taivutusjäykkyys kanta-vaan suuntaan, $(EI)_L$	$12,79 \cdot 10^{11}$ N*mm ²	
Taivutusjäykkyys poikittaiseen suuntaan, $(EI)_B$	$6,70 \cdot 10^{11}$ N*mm ²	
Jänneväli, L tai l	2,585 m, 3985 m	

Laatan leveys, B tai b	2 m	
Massa, m	49 kg/m ² kansallinen liite: m+30 kg hyötykuormaa	49 kg/m ² kaavan mukaan: m+ 10 % hyötykuormasta
$k_{e.1}$ ja $k_{e.2}$	-	1,0
k_{red}	-	0,7
f_w	-	1,5 Hz
Ominaismassa, M^*	-	63,333 kg

Värähtelymitoituksessa tarvitaan rakenteen poikkileikkauksen taivutusjäykkyyttä, joka voidaan laskea CLT:lle esimerkiksi gamma-menetelmällä. Eurokoodin EN1995-1-1 liitteessä B on esitetty yksinkertaistettu gamma-menetelmä, jolla voidaan laskea 3- ja 5-kerroksisten CLT-levyjen taivutusjäykkyys. Sama menetelmä löytyy myös tulevan Eurokoodin liitteestä I. Yksinkertaistettu menetelmä sopii rakenteille, joissa on kaksi tai kolme kantavaa kerrosta. Laajennetulla gamma-menetelmällä ei ole rajoituksia kerrosten lukumäärän suhteen ja sillä voidaan laskea esimerkiksi betoni-CLT – liittorakenteen taivutusjäykkyys. Yksinkertaistettu tehollisen taivutusjäykkyyden kaava gamma-menetelmällä on esitetty kaavassa (4.1).

$$EI_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i A_i E_i a_i^2) \quad (4.1)$$

missä E_i on rakennekerroksen kimmokerroin, I_i on rakennekerroksen neliömomentti, γ_i on gamma-kerroin, A_i on rakennekerroksen ala tarkasteluleveydellä ja a_i on rakennekerroksen etäisyys neutraaliakselilta. Mikäli tarkastellaan 5-kerroksista, symmetristä CLT-levyä, keskimmäisen kerroksen osalta jälkimmäinen termi ($\gamma_i A_i E_i a_i^2$) jää pois. Gamma-kerroin kuvaa rakennekerrosten välistä tartuntaa ja on välillä 0-1, jolloin 1 vastaa täydellistä tartuntaa kerrosten välillä. Eurokoodin tarjoama gamma-kertoimen kaava on tarkoitettu mekaanisin liittimin kootuille rakenteille, jolloin se ei sellaisenaan sovi CLT-levyn taivutusjäykkyyden laskentaan. CLT:lle soveltuva gamma-kertoimen kaava on esitetty kaavassa (4.2) (Swedish Wood, 2019).

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i t_i}{l^2 G_i b_i}} \quad (4.2)$$

missä l on yksiaukkoisella levyllä jänneväli, t_i on poikittaisen suunnan lamellin korkeus, b_i on tarkasteluleveys ja G_i on laskettavan rakennekerroksen liukumoduuli lamellin suuntaisesti.

4.1.1 Nykyinen Eurokoodi

Lattiarakenteen värähtelyominaisuudet selvitetään laskemalla lattian alin ominaistaajuus lattiarakenteen massalla m , taipuma 1 kN pistekuormalla ja lattian värähtelynopeus. Nykyisen Eurokoodin EN1995-1-1 mukaiset kaavat on esitetty luvussa 2.3. Perustapauksessa, jossa mitoitetaan yhteen suuntaan kantavaa lattiaa, alimman ominaistaajuuden kaava vastaa hyvin paljon tulevan Eurokoodin kaavaa.

Alin ominaistaajuus lasketaan kaavalla (2.1).

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$$

Alimman ominaistaajuuden raja-arvoksi on määritelty nykyisessä Eurokoodissa 8 Hz ja sen kansallisessa liitteessä 9 Hz. Suomessa käytetään ominaistaajuuden raja-arvona 9 Hz.

Taipuma 1 kN pistekuormalle jännevälin keskellä lasketaan kaavalla (2.3).

$$w = \frac{F * L^3}{48 * (EI)_L}$$

Tämä taipuman kaava ei kuitenkaan huomioi sitä, että CLT-laatta kantaa levyn molempiin suuntiin ja jakaa näin ollen kuormaa levyille myös poikittaiseen suuntaan. Kuorman jakautuminen CLT-levyllä voidaan huomioida laskemalla CLT-levyn taipuma kaavalla (2.11). Tässä kaavassa kerroin B_{ef} huomioi CLT-levyn taivutusjäykkyyden myös poikittaiseen suuntaan (Swedish Wood, 2019). Kerroin voidaan laskea kaavalla (2.12).

$$w = \frac{F * L^3}{48 * (EI)_L * B_{ef}}$$

$$B_{ef} = \frac{L}{1,1} * \sqrt{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}}$$

Värähtelynopeuden laskennassa selvitetään yksikköimpulssin aiheuttaman värähtelyn suurin alkuarvo kaavalla (2.5).

$$v = \frac{4 * (0,4 + 0,6 * n_{40})}{m * b * l + 200}$$

Tässä laskutavassa jätetään pois yli 40 Hz komponentit, jolloin täytyy selvittää sen alle jäävien ominaismuotojen lukumäärä kaavalla (2.6).

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) * \left(\frac{B}{L} \right)^4 * \frac{(EI)_L}{(EI)_B} \right\}^{0,25}$$

Yksikköimpulssi ajatellaan tapahtuvan lattian siinä pisteessä, missä saadaan suurin vaste. Taipuman ja värähtelyn nopeuden sallitut raja-arvot riippuvat nykyisessä Eurokoodissa toisistaan. Eurokoodissa määritelty kuvaaja määrittää hyvän ja huonon lattian toiminnan, jossa valittu taipuman raja-arvo vaikuttaa kertoimen b suuruuteen. (Swedish Wood, 2019)

4.1.2 Tuleva Eurokoodi

Tulevan Eurokoodin värähtelymitoituksessa lasketaan myös alin ominaistajuus, taipuma ja värähtelyn nopeus. Tulevassa Eurokoodissa annetaan myös kiihtyvyydelle raja-arvot ja laskentakaavat, mikäli lattian alin ominaistajuus jää alle 8 Hz. Alin ominaistajuus voidaan laskea myös palkkien ja siihen tukeutuvan lattiarakenteen muodostavalle systeemille, jolloin lasketaan myös palkkien alin ominaistajuus.

Alin ominaistajuus lasketaan kaavalla (2.11). Koska kyseessä on yksiaukkoinen ja yhteen suuntaan kantava laatta, kertoimet $k_{e,1}$ ja $k_{e,2}$ ovat molemmat 1,0.

$$f_1 = k_{e,1} * k_{e,2} * \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$$

Taipuman mitoituksessa huomioidaan rakenteen tehollinen leveys silloin, kun lattian taivutusjäykkyys on yhtenäinen koko rakenteen leveydeltä myös poikittaiseen suuntaan. Käytännössä tällainen rakenne on laattarakenne, esimerkiksi CLT-laatta. Tehollinen leveys lasketaan tässä tapauksessa kaavan (2.16) mukaan.

$$B_{ef} = \min \left\{ 0,95 * L * \left(\frac{(EI)_B}{(EI)_L} \right)^{0,25} ; B \right\}$$

Taipuma lasketaan kaavalla (2.15), kun pistekuorma sijaitsee yksiaukkoisen rakenteen keskellä.

$$w = \frac{F * L^3}{48 * (EI)_L * B_{ef}}$$

Tuleva Eurokoodi antaa raja-arvot värähtelyn nopeuden neliölliselle keskiarvolle, joka kuvaa värähtelyn nopeuksien keskilukua. Tulevassa ohjeessa huomioidaan myös ominaistajuutta korkeammat värähtelytaajuudet kertoimella, jonka avulla saadaan lopullinen värähtelyn nopeuden huippuarvo. Lopullinen värähtelyn nopeuden huippuarvo lasketaan kaavalla (2.28).

$$v_{tot,peak} = k_{imp} * v_{1,peak}$$

missä kertoimella k_{imp} korotetaan perustapauksen värähtelynopeutta, jotta huomioidaan myös korkeammat värähtelytaajuuudet. Kertoimen arvo saadaan laskettua kaavalla (2.25).

$$k_{imp} = \max \left\{ 0,48 * \left(\frac{B}{L} \right) * \left[\frac{(EI)_L}{(EI)_B} \right]^{0,25} ; 1 \right\}$$

Perustapauksen värähtelynopeuden huippuarvo $v_{1,peak}$ lasketaan kaavalla (2.27),

$$v_{1,peak} = k_{red} * \frac{I_M}{(M^* + 70kg)}$$

missä kertoimen k_{red} arvo on 0,7. Keskiarvo tavallisimmalle herätteelle I_M lasketaan kaavalla (2.26)

$$I_M = \frac{42 * f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}}$$

missä kävelytaajuudeksi f_w on valittu 1,5 Hz, mikä vastaa asuintilojen kävelytaajuutta.

Ominaismassa M^* lasketaan kaavalla (2.22).

$$M^* = \frac{m * L * B}{4}$$

Värähtelynopeuden neliöllisen keskiarvon laskennassa huomioidaan lattian vaimennussuhde ja lattian rakenne ja se lasketaan kaavalla (2.23).

$$v_{rms} = v_{tot,peak} * (0,65 - 0,1 * f_1) * (1,22 - 11 * \zeta) * \eta$$

missä kertoimen η arvo riippuu kertoimen k_{imp} arvosta ja se lasketaan kaavalla (2.24).

$$\eta = 1,35 - 0,4 * k_{imp}$$

Kertoimelle η on annettu ehto riippuen lattian rakenteesta. Ehdot on esitetty tarkemmin kappaleessa 2.4.3.

4.1.3 Tulokset

Alimman ominaistajuuden osalta yksiaukkoisen CLT-laatan mitoitus nykyisen ja tulevan Eurokoodin antamat kaavat vastaavat hyvin paljon toisiaan, kun kyseessä on yksinkertainen rakenne ja kuormitustilanne. Ominaistaajuuden erot johtuvat massasta, jonka kasvattaminen tulevassa Eurokoodissa antaa pienemmän alimman ominaistaajuuden. Tässä laskentaesimerkissä ei ole kuitenkaan huomioitu hyötykuormaa, sillä kyseessä on testirakenne, joka on pelkkä runko. Näin ollen myös tulokset ovat paremmin vertailtavissa, kun kaikki rakenteet lasketaan pelkällä omalla painolla. Koska hyötykuormaa ei huomioida, alin ominaistaajuus on molemmilla mitoitusavoilla sama.

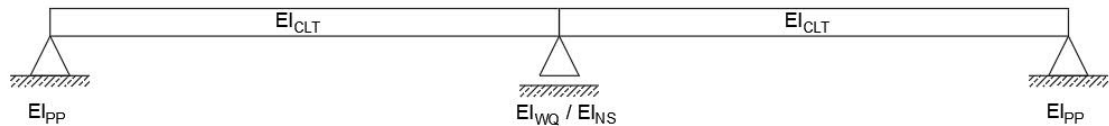
Taipuman tulokseen vaikuttaa merkittävästi se, huomioidaanko CLT-laatan jäykkyys myös poikittaiseen suuntaan. Mikäli taipuman laskennassa käytetään kerrointa B_{ef} , erot taipuman suuruuksissa ovat melko pienet. Värähtelyn nopeuden tulokset eivät ole suoraan verrattavissa, sillä jo lähtötilanne on laskutavoissa erilainen. Nykyisillä ohjeilla tutkitaan yksikköimpulssin aiheuttamaa värähtelyä ja tulevissa ohjeissa tutkitaan kävelyn aiheuttamaa värähtelyä, jonka perusteella lasketaan vielä värähtelyn nopeuden neliöllinen keskiarvo. Laskelmissa saadut tulokset on merkitty taulukkoon 4.2. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 1 välivaiheineen.

Taulukko 4.2. Esimerkkilaskelman tulokset CLT-laatan värähtelylle.

	Nykyiset ohjeet	Tulevat ohjeet
Alin ominaistajuus <i>Hz</i>		
Jänneväli 2,585 m:	38,0	38,0
Jänneväli 3,985 m:	17,0	17,0
Taipuma <i>mm</i>		
Jänneväli 2,585 m:	0,28 (ilman B_{ef}) 0,17 (B_{ef} huomioitu)	0,14 mm (B_{ef})
Jänneväli 3,985 m:	0,91 (ilman B_{ef}) 0,37 (B_{ef} huomioitu)	0,46 mm (B_{ef})
Värähtelyn nopeus		
Jänneväli 2,585 m:	0,006 m/Ns ²	-
Jänneväli 3,985 m:	0,006 m/Ns ²	-
Värähtelyn nopeuden neliöllinen keskiarvo		
Jänneväli 2,585 m:	-	0,0008 m/s
Jänneväli 3,985 m:	-	0,003 m/s

4.2 Laskentaesimerkki: CLT-laatta tuet huomioiden

Lasketaan CLT-laatan ja tuennan muodostaman systeemin värähtely. Kyseessä on sama päistään tuettu CLT-levy kuin laskentaesimerkissä kohdassa 4.1, mutta tässä huomioidaan tukien vaikutus värähtelyyn. Systeemin värähtelymitoitukseen vaikuttaa tukien taivutusjäykkyys. Rakennemalli on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Laskettavan testirakenteen rakennemalli

Laskennassa käytetään testitilanteen rakenteita, jolloin CLT-laattojen toinen pää on tuettu Nordic system-rakenteen mukaisesti WQ-palkilla ja toinen pää putkiprofiililla. Laskelmat tehdään systeemille ilman liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa. Lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3. Esimerkkilaskelmassa 4.2 käytetyt lähtötiedot.

Lähtötieto	Nykyinen Eurokoodi	Tuleva Eurokoodi
Taivutusjäykkyys kanta-vaan suuntaan, $(EI)_L$	12,79*10 ¹¹ N*mm ²	
Taivutusjäykkyys poikittaiseen suuntaan, $(EI)_B$	6,70*10 ¹¹ N*mm ²	
WQ-palkin taivutusjäykkyys, $(EI)_{WQ}$	3,62*10 ¹² N*mm ²	
Putkipalkin taivutusjäykkyys, $(EI)_{PP}$	1,18*10 ¹² N*mm ²	
Jänneväli, L tai l	2,585 m, 3985 m	
Laatan leveys, B tai b	2 m	
Palkit	Putkipalkki: 120x120x6 WQ-palkki: $A_{WQ}=4880$ mm ²	
Palkkien ominaisuudet	Kimmokerroin $E_S= 210$ GPa Tiheys $\rho_S= 7850$ kg/m ³	
Palkin pituus, L_{WQ} tai L_{PP}	4 m	
Massa, m	49 kg/m ² kansallinen liite: m+30 kg hyötykuormaa	49 kg/m ² kaavan mukaan: m+ 10 % hyötykuormasta
$k_{e.1}$ ja $k_{e.2}$	-	1,0
k_{red}	-	0,7
f_w	-	1,5 Hz
Ominaismassa, M^*	-	63,333 kg
k_S	-	2660 N/mm

Nordic system-rakenteeseen kuuluvan WQ-palkin taivutusjäykkyys lasketaan Steinerin menetelmällä. Steinerin menetelmää voidaan hyödyntää myös, kun selvitetään CLT-laatan ja WQ-palkin muodostaman liittorakenteen yhteistä taivutusjäykkyyttä.

4.2.1 Nykyinen Eurokoodi

Nykyinen Eurokoodi EN1995 ei ota kantaa erilaisten systeemien ja liittorakenteiden värähtelymitoitukselle. Liittorakenteiden värähtelymitoitukselle löytyy kuitenkin ohjeita, joita käytetään tässä vertailukohtana tulevan Eurokoodin ohjeisiin. Laskuesimerkissä käytetään lähteenä VTT:n tiedotetta 2124, jossa esitellään muun muassa kaava (4.5) palkkien muodostaman systeemin alimman ominaistaajuuden laskentaan. (Talja, 2002)

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0,l}^2} + \frac{1}{f_{0,L}^2}}} \quad (4.5)$$

missä $f_{0,l}$ on lattiapalkin ominaistaajuus ja $f_{0,L}$ on pääkannattimen ominaistaajuus.

Kaavan (3.5) lisäksi on esitetty joitakin variaatioita systeemin alimman ominaistaajuuden laskemiseksi. Suomalainen (2006) on diplomityössään johtanut systeemin alimmalle ominaistaajuudelle kaavan, jota voidaan käyttää, kun kyseessä on toisesta päästään joustavasti tuettu ja toisesta vapaasti tuettu ortotrooppinen laatta. Kaava (4.6) on johdettu tällaisen systeemin taipuman kautta. (Suomalainen, 2006)

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0,l}^2} + \frac{1}{2*f_{0,L}^2}}} \quad (4.6)$$

missä $f_{0,l}$ on lattiapalkin ominaistaajuus ja $f_{0,L}$ on pääkannattimen ominaistaajuus.

Mitoitettavassa rakenteessa CLT-laatta tukeutuu pääkannattimeen, jolloin $f_{0,l}$ on lattiapalkin, eli tässä tapauksessa CLT-laatan alin ominaistaajuus ja $f_{0,L}$ on pääkannattimen, eli WQ-palkin alin ominaistaajuus. Koko testitilanteen lattiarakenteen alin ominaistaajuus voidaan laskea lisäämällä myös CLT-laatan toisen pään putkipalkin alin ominaistaajuus. Kaikkien systeemiin kuuluvien osien alin ominaistaajuus lasketaan kaavan (2.1) mukaan kuten laskentaesimerkissä 4.1.

Lattian taipuma voidaan laskea laskentaesimerkin 3.1 mukaisesti kaavalla (4.3). Kun CLT tukeutuu pääkannattimeen, taipumaan tulee lisätä myös pistekuorman aiheuttama taipuma pääkannattimelle. Pääkannattimen taipuma voidaan laskea kaavalla (2.3).

Värähtelynopeuden mitoittamiseen liittorakenteen osalta ei ole tarjolla mitoitusohjeita. Värähtelynopeuden laskemisen osalta tukien vaikutus värähtelynopeuteen näkyy alimmassa ominaistajuudessa. Muutoin pääkannattimia ei huomioida lattian värähtelynopeuden laskennassa.

4.2.2 Tuleva Eurokoodi

Tulevan Eurokoodin mukaan esimerkkilaskelman mukaisen rakenteen alin ominaistajuus voidaan mitoittaa koko rakenteen taipuman perusteella tai huomioiden lattiarakenteen lisäksi pääkannattinten alin ominaistajuus. Taipuman perusteella mitoitettaessa täytyy huomioida tukien, liitosten ja liittorakenteiden vaikutus taipumaan ja taipuma lasketaan tasaiselle kuormalle m , joka on lattian pysyvän kuorman lisäksi 10 % hyötykuormasta. Yksinkertaisempi ja tämänhetkistä ohjetta paremmin vastaava tapa on huomioida pääkannattinten alin ominaistajuus. Yhdistetty lattiarakenteen alin ominaistajuus lasketaan kaavalla (2.14)

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,rigid}^2} + \frac{1}{3f_{1,beam,1}^2} + \frac{1}{3f_{1,beam,2}^2}}}$$

Taipuman osalta lasketaan 1 kN pistekuorman aiheuttama taipuma lattialle jäykällä tuilla ja 0,5 kN pistekuorman aiheuttama taipuma kannatinpalkeilla. Taipuma lasketaan sekä CLT-laatalle, että pääkannattimille esimerkkilaskun 3.1 mukaisesti kaavalla (2.15).

Koko rakenteen taipuma lasketaan kaavalla (2.18)

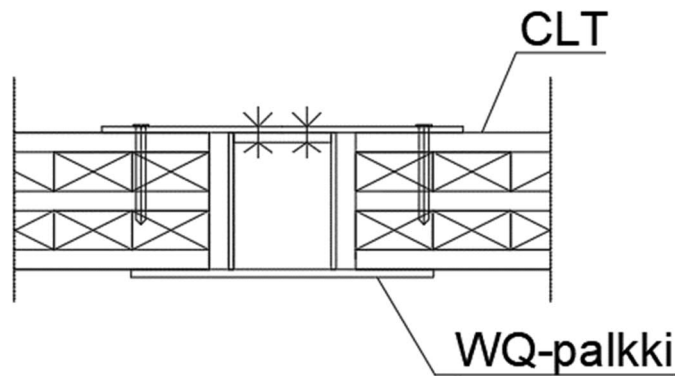
$$w_{1kN} = 0,5w_{beam,1} + 0,5w_{beam,2} + w_{rigid}$$

Lattian värähtelynopeuden kaavoissa tuet ja liittovaikutus huomioidaan vain alimman ominaistajuuden osalta. Lattian värähtelynopeuden neliöllinen keskiarvo lasketaan samalla tavalla kuin kohdan 4.1 esimerkkilaskelmissa.

Lattian kiihtyvyyden kaavoihin pääkannattimilla ei ole vaikutusta.

4.2.3 Liittorakenne

Liittorakenteen taivutusjäykkyys voidaan laskea kerroksellisen rakenteen kimmoteorian mukaan. Kyseisestä kimmoteoriasta käytetään tässä lyhennettä ETLB, joka tulee sanoista Elastic Theory of Layered Beam. Jotta voidaan käyttää kyseistä laskentatapaa, tulee CLT-laatta homogenisoida, sillä CLT-laatan taivutusjäykkyydet vaihtuvat levyn kerroksissa riippuen laatan kantosuunnasta. CLT-laatan homogenisointi tehdään tässä käyttämällä EI-ekvivalenttimenetelmää Aspila et al (2022) mukaisesti.



Kuva 4.3. Nordic system-rakenne

CLT-laatan homogenisoinnissa EI-ekvivalenttimenetelmällä huomioidaan pääsääntöisesti vain palkin suuntaiset kerrokset. Poikkisuuntaisten kerrosten kimmomoduuli voidaan huomioida silloin, kun kerrokset on liimattu myös kyljistään. EI-ekvivalenttimenetelmässä homogenisoidun CLT-laatan taivutusjäykkyyden tulee vastata alkuperäisen, kerroksellisen CLT-laatan taivutusjäykkyyttä. Kerroksellisen CLT-laatan taivutusjäykkyys lasketaan kaavan (3.1) mukaisesti gamma-menetelmällä. Näin ollen saadaan kaava (4.7) homogenisoidulle CLT-laatan kimmomoduulille. (Aspila, 2022)

$$E_{h,EI} = \frac{EI_{ef}}{I_h} = \frac{\sum_{i=1}^3 (E_i * I_i + \gamma_i * A_i * E_i * a_i^2)}{I_h} \quad (4.7)$$

missä EI_{ef} on alkuperäinen, kerroksellisen CLT-laatan taivutusjäykkyys palkin suuntaisten kerrosten osalta ja I_h on homogenisoidun poikkileikkauksen neliömomentti, joka voidaan laskea kaavan (4.8) mukaan.

$$I_h = \frac{b_{eff} * h_0^3}{12} \quad (4.8)$$

missä b_{eff} on CLT-levyn tarkasteltavan osan leveys ja yleensä 1 m, ja h_0 on CLT-laatan paksuus. (Aspila, 2022)

Homogenisoidun kimmomoduulin perusteella saadaan laskettua liittorakenteen taivutusjäykkyys CLT-laatan osalta kaavalla (4.9)

$$EI_{h,CLT} = E_{h,EI} * I_{CLT} \quad (4.9)$$

missä I_{CLT} on liittorakenteen CLT-laatan osuuden neliömomentti, joka lasketaan CLT-laatan tehollisen leveyden B_{eff} perusteella. Tehollinen leveys lasketaan kaavalla (4.11).

Heinisuo et al. (2019) ovat esittäneet, että CLT-laatan ja teräspalkin muodostaman liittorakenteen taivutusjäykkyyden laskennassa voidaan hyödyntää teräspalkin ja betonin muodostaman liittopalkin mitoitusta. Teräksen ja betonin muodostamassa liittopalkissa betonilaatan tehollinen leveys määritellään kaavan (4.10) mukaisesti. Betonin ja CLT:n kimmo-kerrointen ollessa samaa suuruusluokkaa, voidaan toistaiseksi käyttää samaa menetelmää myös CLT-laatan tehollisen leveyden määrittämiseksi. (Heinisuo, 2019)

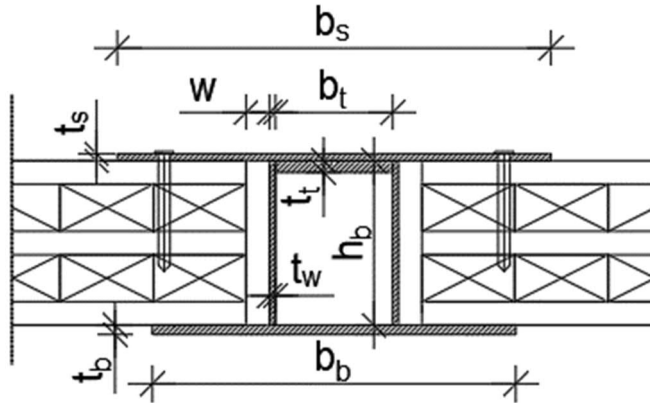
$$L_{eff} = \frac{L_1}{4} \quad (4.10)$$

missä L_1 on palkin pituus.

Liittorakenteen taivutusjäykkyyden laskennassa CLT:lle käytetään tehollista leveyttä B_{eff} , joka saadaan laskettua kaavalla (4.11). Laskentaesimerkin liittorakenteessa CLT-levy tulee WQ-palkin molemmin puolin, jolloin tehollisesta leveydestä L_{eff} vähennetään WQ-palkki sekä palkin ja CLT:n väliin jäävä rako. (Heinisuo, 2019)

$$B_{eff} = \frac{L_1}{4} - 2t_w - 2w - b_t \quad (4.11)$$

missä t_w , b_t ja w on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4. Nordic system-rakenteen mitat

Liittorakenteen liittovaikutuksen taivutusjäykkyys lasketaan Steinerin termillä kaavalla (4.12). (Aspila, 2022)

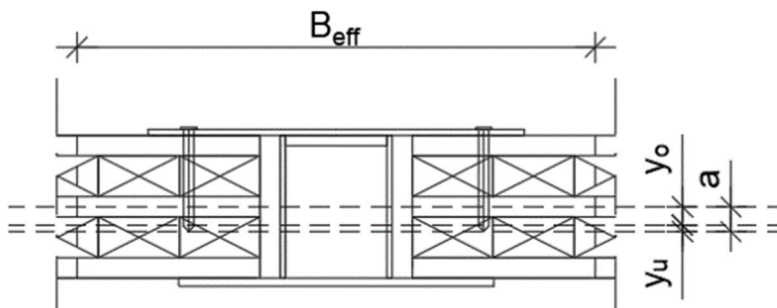
$$EI_s = \sum_{i=1}^n E_i A_i y_i^2 \quad (4.12)$$

missä y_i on tarkasteltavan rakenneosan (CLT tai WQ-palkki) poikkileikkauksen keskipisteen sijainti liittorakenteen painopisteestä ja se voidaan laskea kaavalla (4.13). (Aspila, 2022)

$$y_o = - \frac{E_u * A_u}{E_o * A_o + E_u * A_u} * a \quad (4.13)$$

$$y_u = + \frac{E_o * A_o}{E_o * A_o + E_u * A_u} * a$$

missä y_o on liittorakenteen yläpuolisen rakenneosan koordinaatti ja y_u vastaavasti alapuolisen osan koordinaatti. Koordinaatit on esitetty kuvassa 4.5. Samoin E_o, A_o vastaavat liittorakenteen yläpuolista rakenneosaa ja E_u, A_u alapuolista rakenneosaa. Kaavan a on liittorakenteen painopisteakseleiden etäisyys toisistaan.



Kuva 4.5. Liittorakenteen keskipisteiden y-koordinaattien sijainnit rakenteessa

Liittorakenteen alimman ominaistajuuden laskennassa hyödynnetään kerrospalkkiteoriaa, jossa palkki koostuu kahdesta osasta ja niiden välillä on kimmainen liitin (Hokkanen, 2016). Teräksen ja CLT-levyn liittorakenteeseen vaikuttava liitinten jäykkyys k saadaan laskettua kaavalla (4.14) (Aspila, 2022).

$$k = \frac{k_s a^2}{l_s} \quad (4.14)$$

missä k_s on yhden liittimen jäykkyys, a on palkin osien painopisteakseleiden etäisyys toisistaan ja l_s on liitinten etäisyys toisistaan palkin suuntaisesti.

Liittorakenteen alin ominaistajuus saadaan laskettua kaavalla (4.15) (Aspila, 2022).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_s}{\mu L^4} \frac{1+\alpha+\alpha\beta\pi^2}{1+\beta\pi^2}} \pi^4 \quad (4.15)$$

missä α on jäykkyyksien suhteesta saatava kerroin, joka voidaan laskea kaavalla (4.16) ja β on parametri, joka huomioi kiinnikkeiden jäykkyyden ja voidaan laskea kaavalla (4.17). (Aspila, 2022)

$$\alpha = \frac{EI_u}{EI_s} + \frac{EI_o}{EI_s} \quad (4.16)$$

missä EI_u ja EI_o vastaavat liittorakenteen ylä- ja alapuolisen rakenneosan taivutusjäykkyyksiä.

$$\beta = \frac{EI_s}{kL^2} \quad (4.17)$$

missä L on palkin pituus.

4.2.4 Tulokset

Alimman ominaistajuuden osalta CLT-laatan ja pääkannatinten muodostaman systeemin mitoitus tämänhetkisten ohjeiden ja tulevan Eurokoodin osalta muistuttavat paljon toisiinsa, kun kyseessä on yksinkertainen rakenne ja kuormitustilanne. Tämänhetkiset ohjeet perustuvat pitkälti VTT:n tiedotteen ohjeisiin, joissa Talja et al. (2002) on määritellyt systeemin alimmalle ominaistajuudelle laskentakaavan. Laskuissa päädyttiin käyttämään Suomalaisen (2006) johtamaa kaavaa (4.6) systeemin alimman ominaistajuuden mitoittamiseen, sillä se vastaa hyvin tulevan Eurokoodin ohjetta. Tuleva Eurokoodi antaa vaihtoehtoisen laskentatavan alimmalle ominaistajuudelle, jossa ominaistajuus lasketaan taipuman perusteella. Tässä laskuesimerkissä käytettiin kuitenkin tapaa, jossa lasketaan kannattimille ja lattiarakenteelle alimmat ominaistajuudet, sillä se vastaa paremmin tällä hetkellä käytössä olevia ohjeita.

Tällä hetkellä käytössä olevissa ohjeissa on mainittu, että lattian tukeutuessa pääkannattimiin, tulee pääkannatintenkin taipuma huomioida (Talja, 2002). Ohjeessa ei kuitenkaan määritellä tarkemmin, kuinka pääkannatinten taipuma huomioidaan. Tässä laskuesimerkissä on käytetty kannattimille 0,5 kN pistekuormaa keskellä palkkia, sillä se vastaa tulevan Eurokoodin antamaa laskukaavaa.

Värähtelynopeus lasketaan samoin kuin esimerkkilaskussa 3.1. Tuloksiin vaikuttaa lattiarakenteen alin ominaistajuus. Laskelmissa saadut tulokset on merkitty taulukkoon 4.4. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 2 välivaiheineen.

Taulukko 4.4. Esimerkkilaskelman tulokset CLT-laatan ja pääkannatinten värähtelylle.

CLT jänneväli 2,585 m	Alin ominais- taajuus, <i>Hz</i>	Taipuma, <i>mm</i>	Värähtelynopeus, <i>m/Ns²</i>	Värähtelynopeu- den neliöllinen keskiarvo, <i>m/s</i>
1.1CLT+WQ+PP ¹ , nykyiset ohjeet	12,167	0,634	0,012	-
1.2CLT+WQ+PP ¹ , uusi EC	14,534	0,375	-	0,005
2.1 CLT+NS+PP ² , nykyiset ohjeet	12,516	0,615	-	-
2.2 CLT+NS+PP ² , uusi EC	14,929	0,366	-	-

CLT jänneväli 3,985 m	Alin ominais- taajuus, <i>Hz</i>	Taipuma, <i>mm</i>	Värähtelynopeus, <i>m/Ns²</i>	Värähtelynopeu- den neliöllinen keskiarvo, <i>m/s</i>
1.1CLT+WQ+PP ¹ , nykyiset ohjeet	9,126	0,837	0,008	-
1.2CLT+WQ+PP ¹ , uusi EC	10,451	0,689	-	0,007
2.1 CLT+NS+PP ² , nykyiset ohjeet	9,333	0,819	-	-
2.2 CLT+NS+PP ² , uusi EC	10,657	0,680	-	-
¹ Lattiarakenne, joka muodostuu CLT-levystä, WQ-palkista ja teräsputkipalkista				
² Lattiarakenne, joka muodostuu CLT-levystä, Nordic system -liittopalkista ja teräsputki- palkista				

5. TULOSTEN ANALYSOINTI

5.1 Laskennan tulokset

Työssä laskettiin putkipalkin, WQ-palkin ja CLT-levyn muodostaman välipohjarakenteen värähtelyominaisuuksia ilman liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa. Liittovaikutus muodostettiin teräslevyillä WQ-palkin ja CLT-levyjen välille. Laskenta tehtiin nykyisten ohjeiden ja tulevan eurokoodin ohjeiden mukaan, jolloin voidaan vertailla eri ohjeiden antamia tuloksia. Laskenta on tehty jänneväleiltään noin 2,6 m ja 4 m testirakenteille. Taipuman mitoituksessa oletettiin palkeille tuleva 0,5 kN pistekuorma tasaisesti jakautuneeksi. Taulukossa 5.1 on esitetty nykyisten ohjeiden mukaan lasketut värähtelyominaisuudet testirakenteelle ilman liittovaikutusta ja liittovaikutuksen kanssa.

Taulukko 5.1. Laskennan tulokset, kun CLT:n jänneväli on 2,6 m.

CLT:n jänneväli 2,585 m	1.1 CLT+WQ+PP ¹ , ilman liittovaikutusta	1.2 CLT+NS+PP ² , liittovaikutuksessa	Muutos, %
Alin ominaistajuus, <i>Hz</i> Nykyinen ohje	12,167	12,469	+2,5
Alin ominaistajuus, <i>Hz</i> Tuleva EC	14,534	14,876	+2,4
Taipuma, <i>mm</i> Nykyinen ohje	0,634	0,615	-3,0
Taipuma, <i>mm</i> Tuleva EC	0,375	0,366	-2,4
¹ Lattiarakenne, joka muodostuu CLT-levystä, WQ-palkista ja teräsputkipalkista ² Lattiarakenne, joka muodostuu CLT-levystä, Nordic system -liittopalkista ja teräsputkipalkista			

Laskennan tuloksia vertailemalla voidaan todeta, että liittovaikutus parantaa lattiarakenteen alinta ominaisuutta melko vähän. Tämä johtuu siitä, että laskennallisesti liittopalkin alin ominaistajuus on vain vähän korkeampi kuin pelkän WQ-palkin alin ominaistajuus. Suomalaisen (2006) johtamaa kaavaa käytettäessä alin ominaistajuus ei juuri poikkea tulevan ohjeen mukaan lasketusta alimmasta ominaistajuudesta. Tuleva Eurokoodi antaa

hiukan korkeammat alimmat ominaistuujuudet testirakenteelle. Nykyisten ohjeiden mukaiset arvot antavat rakenteille matalammat alimmat ominaistuujuudet ja toisaalta suuremmat taipumat kuin tulevan Eurokoodin mukaisesti saadut arvot.

Erot nykyisten ohjeiden mukaan lasketuissa arvoissa tulevan Eurokoodin antamiin arvoihin on huomattava erityisesti taipuman osalta. Tulevan Eurokoodin mukaan lasketut arvot ovat melkein puolet nykyisten ohjeiden mukaan lasketuista taipuman arvoista. Tämä ero johtuu tulevan Eurokoodin taipuman yhdistelmäkaavasta, missä palkkien taipumat jaetaan kahdella. Liittorakenne vaikuttaa taipumaan hieman parantavasti, jolloin taipuma on noin 3 % pienempi liittovaikutuksessa. Laskennan perusteella testirakenne ei täyttäisi taipuman osalta nykyistä 0,5 mm raja-arvovaatimusta nykyisten ohjeiden mukaan laskettuna. Tulevan Eurokoodin mukaan lattiarakenne täyttää 0,5 mm taipuman raja-arvon niin liittovaikutuksessa kuin ilman sitä.

5.2 Testien tulokset

Testeissä mitattiin neljän testirakenteen värähtelyominaisuuksia. Testeissä mitattiin kiihtyvyyssantureilla herätteen aiheuttama kiihtyvyys ja siirtymä, sekä pistekuorman aiheuttama taipuma. Testien perusteella tutkitaan liittorakenteen vaikutusta tuloksiin. Liittovaikutus on tehty kiinnittämällä CLT-levyt teräsosilla WQ-palkkiin. Testit on tehty ennen levyn kiinnitystä CLT-levvyyn ja kiinnityksen jälkeen. Testirakenteen 1 ja 2 vastaavat mitoiltaan toisiaan samoin kuin 5 ja 6 toisiaan. Testirakenteiden 1 ja 2 jänneväli on noin 4 m ja testirakenteilla 5 ja 6 noin 2,6 m.

Testitulokset ovat hyvin linjassa keskenään, joskin testirakenteen 6 osalta tuloksissa oli joitakin epäselvyyksiä. Testirakenteen 6 kuvaajat poikkeavat muodoltaan jonkin verran muiden testirakenteiden kuvaajista, jolloin todennäköisesti testitilanteessa on tapahtunut jonkinlaista häiriötä, joka on vaikuttanut mitattuihin tuloksiin. Kuitenkin tulosten keskiarvojen vertailussa testirakenteen 6 tulokset ovat samaa suuruusluokkaa muiden testirakenteiden tulosten kanssa. Tulokset vastaavat myös siltä osin toisiaan, että testirakenteiden 1 ja 2 tulokset ovat keskenään samaa suuruusluokkaa ja vastaavasti testirakenteiden 5 ja 6 tulokset ovat lähellä toisiaan.

Testitulosten kuvaajista nähdään, että kun WQ-palkki on kiinnitetty CLT-laattaan, kiihtyvyyden amplitudit vaimenevat nopeammin. Liittovaikutuksen aiheuttama muutoksen keskiarvo oli noin -6,5 %, jolloin kiihtyvyyden maksimiarvot pienenevät hiukan liittovaikutuksessa. Kiihtyvyyden arvoissa on kuitenkin paljon vaihtelua, sillä herätteen voimakkuuden

vaikutus tuloksiin on suuri. Korkeampi ja voimakkaampi pudottautuminen kantapäältä vaikuttaa kiihtyvyyden maksimiarvoihin niin paljon, että liittovaikutuksessa kiihtyvyyden arvot saattavat olla jopa suuremmat. Lattian värähtelyn kiihtyvyyden vaimeneminen on kuitenkin jokaisella testirakenteella nopeampaa liittovaikutuksessa.

Testirakenteiden siirtymissä tuloksista lasketut arvot ovat liittovaikutuksessa pienempiä, mutta vaikutuksen suuruus vaihtelee. Suurin muutos siirtymän maksimiarvoissa on testirakenteessa 1, jossa siirtymän maksimiarvo pieneni 16,7 %. Kaikkien testirakenteiden muutosten keskiarvo on noin -8,1 % liittovaikutuksen pienentäessä siirtymän arvoja. Kuvaajista voidaan myös nähdä, kuinka liittovaikutus vaikuttaa siirtymienkin vaimenemiseen.

Kaikissa testirakenteissa taipuma parani merkittävästi. Muutos oli myös hyvin tasaista, sillä kaikkien testirakenteiden muutosten keskiarvo oli -20,8 %. Suurin muutos taipumassa saatiin testirakenteen 5 tuloksista, jossa taipuma pieneni liittorakenteessa 26,1 %. Taipuman tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että liittovaikutus parantaa välipohjan jäykkyyttä huomattavasti, jolloin taipumakin pienenee.

Kaikissa testirakenteissa lattioiden alin ominaistajuus on korkea, ja ne ylittävät helposti sekä eurokoodin, että kansallisen liitteen määrittelemän hyväksytyyn taajuuden raja-arvon, joka on eurokoodissa 8 Hz ja kansallisessa liitteessä 9 Hz. Testirakenteissa 5 ja 6 on lyhyempi jänneväli ja testien perusteella myös korkeampi alin ominaistajuus kuin testirakenteilla 1 ja 2. Alimmat ominaistajuudet ovat korkeampia liittovaikutuksessa, joten voidaan olettaa, että palkin liittäminen CLT-levvyyn kasvattaa rakenteen jäykkyyttä. Kun rakenteen jäykkyys kasvaa, myös alin ominaistajuus kasvaa, jolloin tulos on siltä osin johdonmukainen. Taajuudet on laskettu taipuman perusteella ja mitä pienempi taipuma on, sitä korkeampi on lattian alin ominaistajuus. Liittovaikutuksen aiheuttaman muutoksen keskiarvo kaikista testirakenteista oli noin 12,5 % kasvattaen kaikkien testirakenteiden alinta ominaistajuutta. Suurin muutos on testirakenteessa 5, mikä on oletettavaakin, kun taajuudet on laskettu taipumien perusteella, sillä testirakenteessa 5 on myös suurin muutos taipumassa.

5.3 Tulosten vertailu

Laskennallisia ja testattuja tuloksia voidaan vertailla taipuman ja alimman ominaistajuuden perusteella. Testirakenteiden alimmassa ominaistajuudessa on testitulosten osalta mukana 1 kN kuorma, jolloin kyseessä ei ole puhtaasti taipuma rakenteen omasta painosta.

Tämä lisäkuorma vaikuttaa alimpaan ominaistajuuteen alentavasti niin, että todellisuudessa lattian alin ominaistajuus on todennäköisesti korkeampi pelkästä rakenteen omasta painosta. Kiihtyvyyden arvoja ei ole laskettu, jolloin testituloksille ei niiltä osin ole vertailukohtaa. Taulukossa 5.2 on koottuna sekä lasketut mitoitus tulokset, että testitulokset ilman liittovaikutusta. Tuloksista nähdään, että alimman ominaistajuuden osalta sekä nykyinen, että tuleva eurokoodi antavat matalammat alimmat ominaistajuudet kuin testirakenteille taipuman perusteella saatiin. Mitoitusohjeet antavat alimmalle ominaistajuudelle melko konservatiiviset arvot, joskin tuleva eurokoodi on lähempänä mitattuja arvoja.

Taipuman osalta nykyiset mitoitusohjeet antavat korkeampia tuloksia kuin testirakenteille mitattiin, eikä testirakenne täyttäisi laskettujen arvojen perusteella vaadittua 0,5 mm taipuman raja-arvoa. Lyhyemmällä jännevälillä mitatut testitulokset jäävät alle 0,5 mm raja-arvon ja vastaavat melko hyvin tulevan Eurokoodin mukaan laskettua taipumaa. Pidemmällä jännevälillä sekä mitatut, että lasketut taipumat ylittävät sallitun taipuman raja-arvon ilman liittovaikutusta. Pidemmällä jännevälillä tuleva Eurokoodi on kuitenkin lähempänä mitattuja arvoja.

Taulukko 5.2. Lattiarakenteen mitoitus tulokset ja testitulokset ilman liittovaikutusta

Jänneväli 2,6 m	CLT+WQ+PP ¹ , nykyinen EC	CLT+WQ+PP ¹ , uusi EC	Testirakenne 5	Testirakenne 6
Alin ominaistajuus, <i>Hz</i>	12,17	14,53	28,93	31,50
Taipuma, <i>mm</i>	0,634	0,375	0,387	0,326
Jänneväli 4 m	CLT+WQ+PP ¹ , nykyinen EC	CLT+WQ+PP ¹ , uusi EC	Testirakenne 1	Testirakenne 2
Alin ominaistajuus, <i>Hz</i>	9,13	10,45	25,10	24,27
Taipuma, <i>mm</i>	0,837	0,689	0,514	0,55
¹ Lattiarakenne, joka muodostuu CLT-levystä, WQ-palkista ja teräspalkista				

Taulukossa 5.3 on esitetty nykyisten mitoitusohjeiden ja tulevan eurokoodin mukaan mitoitettut värähtelyominaisuudet, sekä testirakenteiden testitulokset liittovaikutuksessa. Huomioitavaa on, että mitoitusohjeiden mukaan alin ominaistajuus nousee liittovaikutuksessa huomattavasti vähemmän kuin testitulosten perusteella näyttää tapahtuvan. Mitoitusohjeiden mukaan laskettu liittopalkin alin ominaistajuus on vain vähän parempi kuin

WQ-palkilla, jolloin mitoituksen perusteella liittovaikutus ei merkittävästi paranna lattiarakenteen värähtelyominaisuuksia. Liittovaikutus nostaa alinta ominaistajuutta tämänhetkellä laskentaohjeilla ja tulevan eurokoodin laskentaohjeilla vain noin 2,5 %, kun testien perusteella se nostaa alinta ominaistajuutta keskimäärin 12,5 %.

Testitulosten ja laskettujen tulosten perusteella liittovaikutuksessa taipuma pienenee. Laskentatulosten perusteella taipuman arvot ovat edelleen konservatiivisia ja huomattavasti suurempia kuin testitulosten perusteella. Laskettujen arvojen mukaan liittovaikutus alentaa taipumaa vain noin 3 %, kun testituloksissa taipuman arvot paranevat huomattavasti liittovaikutuksessa. Liittovaikutus pienentää testien perusteella taipuman arvoa keskimäärin jopa 20,8 %. Tulevan eurokoodin mukaan laskettu taipuma kuitenkin täyttää 0,5 mm raja-arvon juuri ja juuri. Testitulosten taipuma ja alin ominaistajuus ovat lähempänä tulevan eurokoodin mukaan laskettuja arvoja.

Taulukko 5.3. Lattiarakenteen mitoitustulokset ja testitulokset liittovaikutuksessa

Jänneväli 2,6 m	CLT+NS+PP ² , nykyinen EC	CLT+NS+PP ² , uusi EC	Testirakenne 5	Testirakenne 6
Alin ominaistajuus, <i>Hz</i>	12,52	14,93	33,67	33,52
Taipuma, <i>mm</i>	0,615	0,366	0,286	0,288
Jänneväli 4 m	CLT+NS+PP ² , nykyinen EC	CLT+NS+PP ² , uusi EC	Testirakenne 1	Testirakenne 2
Alin ominaistajuus, <i>Hz</i>	9,33	10,66	28,21	27,93
Taipuma, <i>mm</i>	0,819	0,680	0,407	0,415
² Lattiarakenne, joka muodostuu CLT-levystä, Nordic system -liittopalkista ja teräsputkipalkista				

Taulukosta voidaan huomata, että erityisesti taipuman osalta testirakenne on jäykempi kuin laskennallisesti on arvioitu ja lasketut arvot ovat selkeästi konservatiivisempia kuin mitatut arvot.

6. YHTEENVETO

Puurakentamisen yleistyessä erilaiset puun hybridiliittorakenteet herättävät kiinnostusta, jolloin rakennusmateriaalien parhaista ominaisuuksista voidaan saada enemmän irti. Tässä työssä tutkitaan Nordic system -välipohjakonseptia, jossa CLT-laatta tai puinen kotelopalkkirakenne yhdistetään WQ-palkkiin teräslevyillä, jolloin syntyy hybridiliittorakenne. Kyseessä on massaltaan melko kevyt rakenne, jolloin myös lattian värähtelyominaisuuksia, ja liittorakenteen vaikutusta niihin, on syytä tutkia.

Tässä työssä tutkittiin Nordic system -välipohjakonseptin värähtelyominaisuuksia liittovaikutuksessa ja ilman sitä. Värähtelyominaisuuksia tutkittiin laskennallisesti mitoitusohjeiden mukaan ja laboratoriossa suoritettujen testien perusteella. Työssä selvitettiin, kuinka nykyiset mitoitusohjeet ja tulevan Eurokoodin ohjeet eroavat värähtelymitoitukseltaan, kuinka liittovaikutus muuttaa Nordic system -välipohjakonseptin värähtelyominaisuuksia ja kuinka hyvin lasketut ja mitatut värähtelyominaisuudet vastaavat toisiaan.

Mitoitusohjeissa keskityttiin erityisesti nykyisiin ja tuleviin Eurokoodin ohjeisiin, sekä niiden eroihin. Nykyisen Eurokoodin mitoitusohjeita täydennettiin myös yleisesti Suomessa käytössä olevilla ohjeilla. Eurokoodien ja täydentävien ohjeiden mukaan laskettiin sekä pelkän CLT-levyn, että levyn ja tuen muodostaman systeemin alin ominaistajuus ja taipuma 1 kN pistekuormalle. Systeemin muodostivat tässä tapauksessa testirakenteen mukaisesti teräsputkipalkki, CLT-levy ja WQ-palkki. Laskelmat tehtiin sekä ilman liittorakennetta, että liittorakenteella. Tulosten perusteella liittovaikutus paransi lattian värähtelyominaisuuksia. Liittovaikutus nosti alinta ominaistajuutta keskimäärin 2,3 % ja pienensi taipumaa keskimäärin 2,2 %. Sekä taipuman, että alimman ominaistajuuden osalta nykyiset laskentaohjeet antavat konservatiivisempia arvoja kuin tulevat ohjeet.

Nordic system-välipohjakonseptin värähtelyominaisuuksia tutkittiin neljällä testirakenteella laboratorio-olosuhteissa. Näistä testirakenteista kahdessa jänneväli oli 4 m ja kahdessa n. 2,6 m. Kaikkiin testirakenteisiin tehtiin testit heel drop-menetelmällä ja 1 kN staattisella pistekuormalla ennen CLT-levyjen kiinnitystä WQ-palkkiin ja kiinnityksen jälkeen. Näin saatiin vertailtua liittorakenteen vaikutuksia lattian värähtelyominaisuuksiin. Testituloksista voidaan päätellä, että CLT-levyjen kiinnittäminen WQ-palkkiin parantaa lattian värähtelyominaisuuksia huomattavasti. Liittovaikutuksessa lattian värähtely vaimenee nopeammin ja siirtymät värähtelyssä pienenevät. Myös 1 kN pistekuorman aiheuttama taipuma

pienenee ja alimmat ominaistajuudet kasvavat. Liittovaikutus parantaa lattian jäykkyyttä, jolloin lattian värähtelyominaisuudetkin paranevat. Kiihtyvyyden ja siirtymän osalta isoin muutos mitattiin testirakenteella 1, jossa kiihtyvyys pieneni 19,2 % ja siirtymä 16,7 %. Taipumalle suurin muutos mitattiin testirakenteelle 5, jossa muutos oli 26,1 %. Liittovaikutus pienensi huomattavasti taipumaa, sillä kaikkien testirakenteiden taipuma pieneni keskimäärin 20,8 %.

Mitoitusohjeiden mukaan laskettuja tuloksia vertailtiin testituloksiin ja vertailulukuina oli taipuma 1 kN pistekuormasta sekä alin ominaistajuus. Testitulosten alin ominaistajuus laskettiin mitattujen taipumien perusteella, jolloin mukana on myös 1 kN pistekuorma. Kuormitus vaikuttaa alimpaan ominaistajuuteen hiukan alentavasti, jolloin todellisudessa testirakenteiden alimmat ominaistajuudet ovat todennäköisesti hiukan korkeampia. Sekä nykyisten ohjeiden, että tulevan eurokoodin mukaan lasketut taipumat ja alimmat ominaistajuudet ovat heikompia kuin testeissä mitattiin, näistä tulevan eurokoodin mukaan laskettujen arvojen ollessa lähempänä testeissä mitattuja tuloksia. Testeissä mitatut alimmat ominaistajuudet ovat keskimäärin yli kaksi kertaa suurempia kuin rakenteelle lasketut alimmat ominaistajuudet. Taipuman osalta erot eivät olleet yhtä suuret, mutta liittovaikutuksessa mitatut taipumat olivat keskimäärin melkein puolet laskettujen taipumien keskiarvosta.

Parametrisoitu FEM-malli (Finite Element Method) voisi tarjota hyvän työkalun värähtelyominaisuuksien arvioimiseksi. FEM-ohjelmat käyttävät mallien mitoituksessa elementtime-netelmää, jolla on mahdollista saada tuotettua tarkkoja laskentamalleja, jolloin ne ovat hyviä työkaluja rakenteiden mitoittamisessa ja esimerkiksi värähtelyn tutkimisessa. FEM-malli antaisi tärkeää lisätietoa siitä, mitä rakenteessa tapahtuu värähtelyn aikana. Erityisesti silloin, kun FEM-mallissa käytetään todellisesta rakenteesta mitattuja arvoja, voidaan ennustaa myös muiden, vastaavanlaisten rakenteiden värähtelyä ja mitoittaa rakenteet tarkemmin.

Massiivipuun ja teräksen muodostaman liittorakenteen värähtelyä on tutkittu vielä verrattain vähän. Tällaiselle lattiarakenteelle ei ole juuri tehty subjektiivisia kokeita, jolloin käyttömukavuuden kannalta ei pystytä arvioimaan tärkeimpiä kriteereitä värähtelylle. Yleisesti ei ole löydetty konsensusta siitä, mitkä ovat lattiarakenteen värähtelymitoituksen kannalta kriittisimpiä ominaisuuksia. Tarvitaan lisää sekä subjektiivisia tutkimuksia, että erilaisten värähtelymitoitustapojen vertailua, jotta saadaan yhtenäinen ja sopivan tarkka mitoitus-tapa tällaiselle rakenteelle.

LÄHTEET

- Aspila, A., Heinisuo, M., Mela, K., Malaska, M., Pajunen, S., (2022). Elastic design of steel-timber composite beams, Wood Material Science & Engineering, Taylor & Francis Group
- CEN (lokakuu 2021e). CEN TC 250 SC5 N1488. Consolidated draft prEN 1995-1-1:20XX
- Cheraghi-Shirazi, N., Crews, K., Malek, S., (2022). Review of Vibration Assessment Methods for Steel-Timber Composite Floors, Buildings, <https://doi.org/10.3390/buildings12122061>
- Chiniforush, A., Alamdari, M., Dackermann, U., Valipour, H.R., Akbarnezhad, A., (2019). Vibration Behaviour of Steel-Timber Composite Floors, Part 1: Experimental & numerical investigation, Journal of Constructional Steel Research
- EN16929, (2018). Test methods – Timber floors – Determination of vibration properties, European Committee for standardization
- Hassanieh, A., Chiniforush, A.A., Valipour, H.R., Bradford, M.A., (2019). Vibration Behaviour of Steel-Timber Composite Floors, Part 2: Evaluation of human-induced vibrations, Journal of Constructional Steel Research
- Heikkinen, J. (2009). Moodianalyysin perusteet, Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- Heinisuo, M., Mela, K., Pajunen, S., Malaska, M., (2019). New Steel-timber composite beam, Nordic system, <https://doi.org/10.1002/cepa.1194>
- Hokkanen, S., (2016). Betonirakenteiden stabiliteettilaskelmat eurokoodin mukaan. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto
- Huang, H., Gao, Y., Chang, W-S., (2020). Human-induced vibration of cross-laminated timber (CLT) floor under different boundary conditions, <https://doi.org/10.1016/j.engstruc.2019.110016>
- Kollár, L., Pap, Z., (2017). Modal Mass of Floors Supported by Beams, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.12.002>
- Lahtela, T., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V., Talus, L., (2021). Ääneristys puutalossa, Puuinfo Oy, Helsinki
- Lahtela, T. (2018). Puuvälipohjan värähtelymitoitus, Vaativien puurakenteiden suunnittelu –koulutus, Puuinfo Oy
- Latvanne, P., Kylliäinen, M. (2019). Puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskennallinen arviointi, Puu-lehti
- RIL (2017b). RIL 2015-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry

Suomalainen, E. (2006). Lattian värähtelymitoitus pientalossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto

SFS-EN (2014). Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+AC:2006, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Swedish Wood (2019). The CLT Handbook, CLT structures – facts and planning, Swedish Wood, Tukholma

Talja, A., Toratti, T. & Järvinen, E., (2002). Lattioiden värähtelyt, Suunnittelu ja kokeellinen arviointi, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT)

Talja, A., (1996). Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyn hallinta, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT)

Ympäristöministeriö (2020), Julkisen puurakentamisen kansalliset tavoitteet, Puurakentamisen toimenpideohjelma 2016-2022

Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J., Pock, K., (2014). Cross-Laminated Timber Structural Design, Basic design and engineering principles according to Eurocode, proHolz Austria, Wien

LIITE 1: ESIMERKKILASKELMA CLT-LAATAN VÄ- RÄHTELYSTÄ

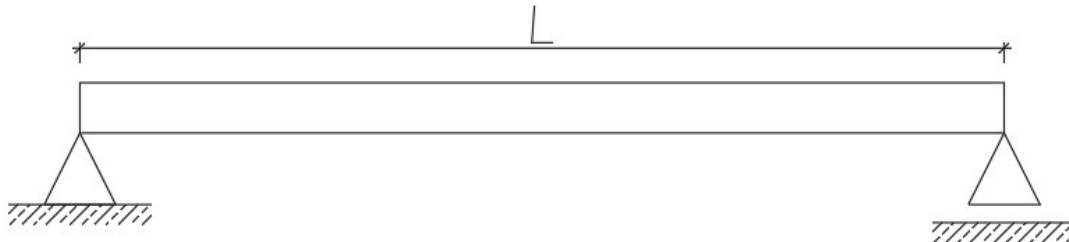
Tässä liitteessä on esitetty luvun 4.1 laskentaesimerkin laskelmat. Laskut on tehty Mathcad-ohjelmalla tässä työssä esitettyjen kaavojen ja lähtötietojen mukaisesti.

CLT-laatan värähtelymitoitus pelkälle CLT-levylle

1. Lähtötiedot ja materiaaliominaisuudet
 - 1.1 CLT:n taivutusjäykkyys Gamma-menetelmällä
2. Värähtelyn mitoitus nykyisen EN1995-1-1 Eurokoodin mukaan
 - 2.1 Alin ominaistaajuus
 - 2.2 Taipuma 1 kN pistekuormalle
 - 2.3 Värähtelynopeus
3. Värähtelyn mitoitus tulevan Eurokoodin mukaan
 - 3.1 Alin ominaistaajuus
 - 3.2 Taipuma 1 kN pistekuormalle
 - 3.3 Värähtelynopeus
 - 3.4 Kiihtyvyys

1. Lähtötiedot ja materiaaliominaisuudet:

Mitoitettava rakenne:



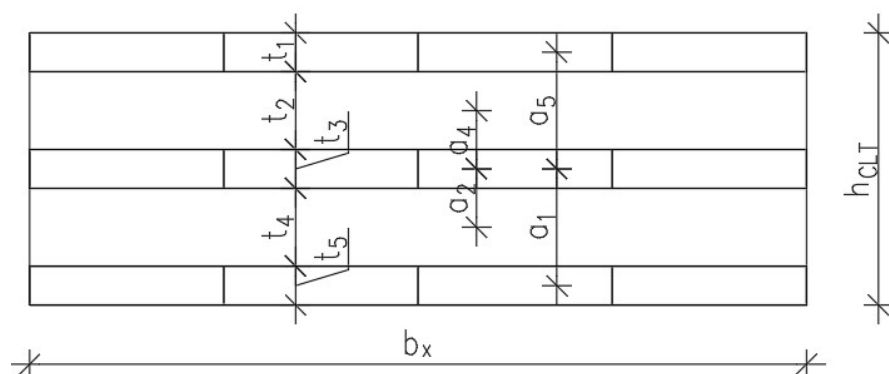
$L := 2585 \text{ mm}$ jänneväli
 $B := 2 \text{ m}$ laatan leveys

CLT:n tiedot:

$h_{CLT} := 140 \text{ mm}$
 $b_x := 1000 \text{ mm}$
 $b_y := 1000 \text{ mm}$

$t_1 := 20 \text{ mm}$
 $t_2 := 40 \text{ mm}$
 $t_3 := 20 \text{ mm}$
 $t_4 := 40 \text{ mm}$
 $t_5 := 20 \text{ mm}$

$a_1 := 60 \text{ mm}$
 $a_2 := 30 \text{ mm}$
 $a_3 := 0 \text{ mm}$
 $a_4 := 30 \text{ mm}$
 $a_5 := 60 \text{ mm}$



Lujuusluokka C24

$$E_0 := 11000 \text{ MPa}$$

$$G_{090} := 650 \text{ MPa}$$

$$G_{9090} := 50 \text{ MPa}$$

Kuormat:

$$g_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.14 \text{ m} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{CLT oma paino, lähde: puuinfo}$$

$$q_k := 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{hyötykuorma}$$

Esimerkkirakenteena käytetään testitilannetta, jossa lattiarakenteena on ainoastaan kuvan mukainen päistään tuettu yksiaukkoinen CLT-levy, joka lepää pääkannattimien päällä. Näin ollen ei oleteta liittovaikutusta CLT-levyn ja kannattimen välille.

1.1 Tehollinen taivutusjäykkyys Gamma-menetelmällä:

Gamma-menetelmä (Eurokoodi 5, liite B) sopii 3- ja 5-kerroksisiin CLT-levyihin.

Menetelmässä huomioidaan vain kantavat kerrokset ja Eurokoodin ohjeen mukaisessa laskentatavassa voi olla mukana vain 3 kerrosta.

Gamma-menetelmässä poikkileikkauksen arvot riippuvat osan pituudesta tai jännevälistä, jolloin laskuissa käytetään arvoa l_{ref} . Yksiaukkoiselle levyille (palkille) $l_{ref} := L$.

Kun kyseessä on esimerkin kaltainen symmetrinen rakenne, tehollisen taivutusjäykkyyden laskenta yksinkertaistuu.

$$E_{x.1} := E_0 \quad \text{Kimmokerroin}$$

$$G_{9090.2} := G_{9090} \quad \text{Liukumoduuli}$$

Taivutusjäykkyys kantavaan suuntaan:

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot t_1}{l_{ref}^2} \cdot \frac{t_2}{G_{9090}}} = 0.794$$

$$I_{ex.ef} := b_x \cdot \left(\frac{3 \cdot t_1^3}{12} + 2 \cdot \gamma_1 \cdot t_1 \cdot a_1^2 \right) = (116.29 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$EI_L := E_0 \cdot I_{ex.ef} = (1.279 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$EI_L := \frac{EI_L}{m} = (1.279 \cdot 10^{12}) \frac{N \cdot mm^2}{m}$$

Taivutusjäykkyys poikittaiseen suuntaan:

$$l_{ref} := 2000 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{x.1} \cdot t_2 \cdot t_1}{l_{ref}^2 \cdot G_{9090}}} = 0.697$$

$$I_{ey.ef.1} := \frac{b_y \cdot t_2^3}{12} + \gamma_2 \cdot t_2 \cdot b_y \cdot a_2^2 = (3.043 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$I_{ey.ef} := 2 \cdot I_{ey.ef.1} = (6.087 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Metrin leveälle kaistalle

$$EI_B := E_0 \cdot I_{ey.ef} = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Metrin leveälle kaistalle

$$EI_B := \frac{EI_B}{m} = (6.695 \cdot 10^{11}) \frac{N \cdot mm^2}{m}$$

2. Värähtelyn mitoitus EN1995-1-1 mukaan

$$m := g_k = 49 \frac{kg}{m^2}$$

lattian massa,
kansallinen liite:

lattian oma paino + $30 \frac{kg}{m^2}$ hyötykuormaa

EN1995-1-1:
lattiarakenteen massa

$$\zeta := 0.025$$

vaimennussuhde CLT:lle (lähde: CLT Handbook)

2.1 Alin ominaistaajuus:

$$f_1 := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 37.981 \text{ Hz}$$

EN1995-1-1: kaava (7.5)

EN1995-1-1:

Kansallinen liite:

if $f_1 \geq 8 \text{ Hz}$

|| "OK"

else

|| "Vaatii erityistarkastelun"

= "OK"

if $f_1 \geq 9 \text{ Hz}$

|| "OK"

else

|| "Vaatii erityistarkastelun"

= "OK"

CLT-levyn alin ominaistajuus ylittää Eurokoodin antaman 8 Hz ja kansallisen liitteen 9 Hz raja-arvon.

$$f_{1, \text{vanha}} := f_1 = 37.981 \text{ Hz}$$

2.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle:

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

$$L = 2.585 \text{ m} \quad \text{lattian jänneväli}$$

$$EI_L := EI_L = (1.279 \cdot 10^{12}) \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$EI_B := EI_B = (6.695 \cdot 10^{11}) \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$B_{ef} := \frac{L}{1.1} \cdot \sqrt{\frac{EI_B}{EI_L}} = 1.7 \text{ m}$$

kertoimen kaava,
CLT Handbook, kaava 5.13

$$w := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI_L \cdot B_{ef}} = 0.165 \text{ mm}$$

taipuman kaava,
CLT Handbook, kaava 5.12

Sallitun taipuman raja-arvo riippuu muuttujan a valinnasta. Hyväksytyt raja-arvot määritellään kuvaajasta, joka antaa muuttujille a ja b arvot. Nämä muuttujat vaikuttavat taipuman ja nopeuden raja-arvoihin. Mikäli taipuman raja-arvona pidetään 0,5 mm (a=0,5 mm/kN), nopeuden raja-arvoon vaikuttavaksi muuttujaksi b saadaan b=150. Suomen kansallinen liite on määritellyt 1 kN pistekuorman aiheuttaman taipuman raja-arvoksi 0,5 mm.

$$\frac{w}{F} \leq a$$

EN1995-1-1: kaava (7.3)

$$a := 0.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$\text{if } \frac{w}{F} \leq a \quad \left| \begin{array}{l} \text{“OK”} \\ \text{“OK”} \end{array} \right.$$

$$w_{\text{vanha}} := w = 0.165 \text{ mm}$$

2.3 Värähtelynopeus:

Värähtelynopeuden laskentaan vaikuttaa myös poikittaisen suunnan taivutusjäykkyys.

$$m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.14 \text{ m} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

massa [kg/m^2]

$$f_1 := \frac{f_1}{\text{Hz}} = 37.981$$

$$EI_L := EI_L \cdot m = (1.279 \cdot 10^6) \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2}$$

$$EI_B := EI_B \cdot m = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$n_{40} := \left(\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^4 \cdot \frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} = 0.523$$

EN1995-1-1: kaava (7.7)

$$v := \frac{4 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot n_{40})}{m \cdot B \cdot L + 200 \text{ kg}} = 0.006 \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

EN1995-1-1: kaava (7.6)

$$b := 150$$

nopeusvaste $\left[\frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} \right]$ kun

a=0,5 -> b=150

(EN1995-1-1: Kuva 7.2)

$$v := v \cdot \text{kg} = 0.006$$

$$b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} = 0.777$$

sallittu yksikköimpulssin aiheuttama värähtelynopeus

$$\text{if } v \leq b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} \mid = \text{“OK”}$$

|| “OK”

EN1995-1-1: kaava (7.4)

$$v_{\text{vanha}} := v \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 0.006 \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

3. Värähtelyn mitoitus tulevan Eurokoodin ohjeen mukaan:

$$m := g_k + 0.1 \cdot q_k = 69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

lattian massa: lattian pysyvä kuorma + 10% täydestä hyötykuormasta

$$m := g_k = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Käytetään tässä pelkkää omaa painoa: vastaa paremmin testitilannetta

$$\zeta := 0.025$$

vaimennussuhde CLT:lle
CEN2021e: kappale 9.3.3 (s.168)

3.1 Alin ominaistajuus

Tässä lasketaan CLT-levyn värähtely ja jätetään huomioimatta palkki, jolle levy tukeutuu.

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

CEN2021e: taulukko 9.1,
yksiaukkoiselle lattialle arvo on 1,0

$$k_{e,2} := \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{L}{B}\right)^4 \cdot EI_B}{EI_L}} = 1.569$$

CEN2021e: kaava (9.13),
yhteen suuntaan kantavalle lattialle arvo
on 1,0

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

$$B = 2 \text{ m}$$

$$EI_B := \frac{EI_B}{m} = (6.695 \cdot 10^5) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

$$EI_L := \frac{EI_L}{m} = (1.279 \cdot 10^6) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

$$f_1 := k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 37.981 \text{ Hz}$$

CEN2021e: kaava (9.12)

if $f_1 > 8 \text{ Hz}$ "OK" also if $4.5 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 8 \text{ Hz}$ "Tarkasta kiihtyvyyys" else "Vaatii erityistarkastelun"	= "OK"
--	--------

Ylittää 4,5 Hz ja 8 Hz raja-arvot.

$$f_{1,uusi} := f_1 = 37.981 \text{ Hz}$$

3.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle

$$B_{ef} := 0.95 \cdot L \cdot \left(\frac{EI_B}{EI_L}\right)^{0.25} = 2.089 \text{ m}$$

CEN2021e: kaava (9.18)

$$w_{1kN} := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI_L \cdot B_{ef}} = 0.135 \text{ mm}$$

CEN2021e: kaava (9.17)

Ehto	Lattian vaatimustasot					
	I	II	III	IV	V	VI
R -kerroin	4	8	12	24	36	48
Ylempi taipumaraja $w_{lim,max}$ (mm)	0,25	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0
Taipumaraja w_{1kN} (mm) \leq	0,25	0,25	0,5	$\frac{150 \cdot R}{L}$		
Taajuus f_1 (Hz) \geq	4,5					
Kiihtyvyyden a_{rms} (m/s ²) \leq (jos $f_1 \leq 8$ Hz)	0,02	0,04	0,06	0,12	0,18	0,24
Nopeus v_{rms} (m/s) \leq	0,0004	0,0008	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048

Lattian taipuman sallittu arvo riippuu valitusta vaatimustasosta. Vaatimustaso III vastaa taipuman osalta nykyistä kansallisen liitteen raja-arvoa $w_{1kN} = 0,5$ mm.

$$w_{uusi} := w_{1kN} = 0.135 \text{ mm}$$

3.3 Lattian värähtelynopeus:

$$f_w := 1.5$$

Kävelytaajuus huoneistossa,
CEN2021e

$$f_1 := f_1 \cdot s = 37.981$$

$$I_m := \frac{42 \cdot f_w^{1.43}}{f_1^{1.3}} = 0.663$$

CEN2021e: kaava (9.24)

$$I_m := I_m \cdot N \cdot s = 0.663 \cdot N \cdot s$$

$$m := 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

massa [kg/m^2], lattian pysyvä kuorma + 10% hyötykuormasta, tässä pelkkä massa

$$M := \frac{m \cdot L \cdot B}{4} = 63.333 \text{ kg}$$

CEN2021e: kaava (9.23)

$$k_{red} := 0.7$$

Pienennyskerroin

$$v_{1,peak} := k_{red} \cdot \frac{I_m}{(M + 70 \text{ kg})} = 0.003 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

CEN2021e: kaava (9.25)

$$k_{imp} := \left(\left[0.48 \cdot \left(\frac{B}{L} \right) \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \right] \right) = \begin{bmatrix} 0.437 \\ 1 \end{bmatrix}$$

CEN2021e: kaava (9.26)

$$k_{imp} := \max \left(\left[\begin{array}{c} 0.48 \cdot \left(\frac{B}{L} \right) \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right] \right) = 1$$

$$v_{tot.peak} := k_{imp} \cdot v_{1.peak} = 0.003 \frac{m}{s}$$

CEN2021e: kaava (9.27)

$$\eta := 1.35 - 0.4 \cdot k_{imp}$$

CEN2021e: kaava (9.29)

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } 1 \leq k_{imp} \leq 1.9 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 1.35 - 0.4 \cdot k_{imp} \end{array} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 0.59 \end{array} \right. \end{array} \right| = 0.95$$

Palkkirakenteinen lattia

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } 1 \leq k_{imp} \leq 1.7 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 1.35 - 0.4 \cdot k_{imp} \end{array} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 0.67 \end{array} \right. \end{array} \right| = 0.95$$

Muut lattiat

$$v_{rms} := v_{tot.peak} \cdot (0.65 - 0.01 \cdot f_1) \cdot (1.22 - 11 \cdot \zeta) \cdot \eta = (8.445 \cdot 10^{-4}) \frac{m}{s}$$

CEN2021e: kaava (9.28)

Mikäli pysytään lattian vaatimustasossa III, sallittu arvo $v_{rms.sall} := 0.0012 \frac{m}{s}$

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } v_{rms} < v_{rms.sall} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{"OK"} \end{array} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{"Tarkasta vaatimustaso"} \end{array} \right. \end{array} \right| = \text{"OK"}$$

$$v_{uusi} := v_{rms} = (8.445 \cdot 10^{-4}) \frac{m}{s}$$

3.4 Lattian kiihtyvyyys

Kiihtyvyyys täytyy huomioida, kun alin ominaistaajuus jää alle 8 Hz.

$$F_h := 50 \text{ N}$$

Pystykuorma, jonka kävelijä aiheuttaa, Eurokoodi CEN2021e

$$\mu := 0.4$$

Kerroin, jolla huomioidaan resonanssi, Eurokoodi CEN2021e

$$k_{res} := \left(\begin{array}{c} 0.192 \cdot \frac{B}{L} \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right) = \begin{bmatrix} 0.175 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.22)}$$

$$k_{res} := \max \left(\begin{array}{c} 0.192 \cdot \frac{B}{L} \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right) = 1$$

$$a_{rms} := \frac{k_{res} \cdot \mu \cdot F_h}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M} = 4.466 \frac{m}{s^2} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.21)}$$

Mikäli pysytään lattian vaatimustasossa III, sallittu arvo $a_{rms.sall} := 0.06 \frac{m}{s^2}$

if $a_{rms} < a_{rms.sall}$ "OK" else "Tarkasta vaatimustaso"	= "Tarkasta vaatimustaso"
--	---------------------------

Tässä tilanteessa sallittu arvo ylittyy, mutta sillä ei ole merkitystä, sillä kiihtyvyyks ei ole kriittinen tekijä värähtelyn tarkastelussa, kun alin ominaistajuus on enemmän kuin 8 Hz.

4. Tulokset:

4.1 Alin ominaistajuus:

$$f_{1.vanha} = 37.981 \text{ Hz}$$

$$f_{1.uusi} = 37.981 \text{ Hz}$$

4.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle:

$$w_{vanha} = 0.165 \text{ mm}$$

$$w_{uusi} = 0.135 \text{ mm}$$

4.3 Värähtelyn nopeus:

$$v_{vanha} = 0.006 \frac{m}{N \cdot s^2}$$

$$v_{uusi} = (8.445 \cdot 10^{-4}) \frac{m}{s}$$

LIITE 2: ESIMERKKILASKELMA LIITTORAKEN- TEEN VÄRÄHTELYSTÄ

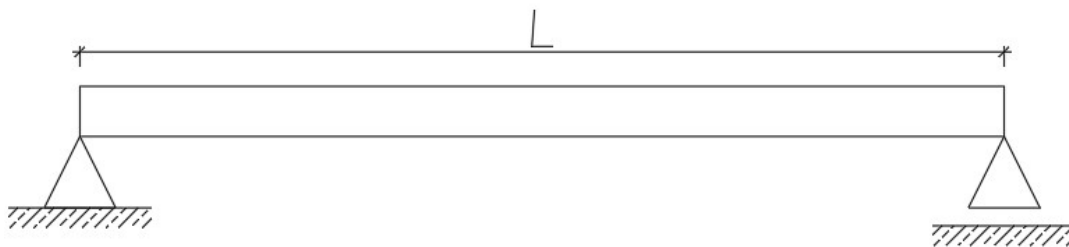
Tässä liitteessä on esitetty luvun 4.2 laskentaesimerkin laskelmat. Laskut on tehty Mathcad-ohjelmalla tässä työssä esitettyjen kaavojen ja lähtötietojen mukaisesti.

Testirakenteen värähtelymitoitus huomioiden pääkannattimet

1. Lähtötiedot ja materiaaliominaisuudet
 - 1.1 CLT:n taivutusjäykkyys Gamma-menetelmällä
 - 1.2 WQ-palkin taivutusjäykkyys Steinerin menetelmällä
2. Värähtelyn mitoitus nykyisten ohjeiden mukaan
 - 2.1 Alin ominaistajuus
 - 2.2 Taipuma 1 kN pistekuormalle
 - 2.3 Värähtelynopeus
3. Värähtelyn mitoitus tulevan Eurokoodin mukaan
 - 3.1 Alin ominaistajuus
 - 3.2 Taipuma 1 kN pistekuormalle
 - 3.3 Kiihtyvyyys
 - 3.3 Värähtelynopeus
4. Liittorakenne
 - 4.1 Liittorakenteen taivutusjäykkyys
 - 4.2 Alin ominaistajuus
 - 4.3 Taipuma
5. Tulokset
 - 5.1 Alin ominaistajuus
 - 5.2 Taipuma
 - 5.3 Värähtelynopeus

1. Lähtötiedot ja materiaaliominaisuudet:

Mitoitettava rakenne:



$L := 2585 \text{ mm}$ jänneväli
 $B := 2 \text{ m}$ laatan leveys

CLT:n tiedot:

$h_{CLT} := 140 \text{ mm}$

$b_x := 1000 \text{ mm}$

$b_y := 1000 \text{ mm}$

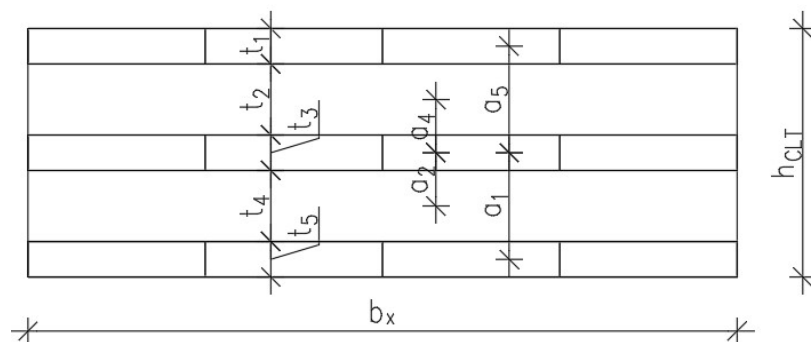
$t_1 := 20 \text{ mm}$

$t_2 := 40 \text{ mm}$

$t_3 := 20 \text{ mm}$

$t_4 := 40 \text{ mm}$

$t_5 := 20 \text{ mm}$



$$a_1 := 60 \text{ mm}$$

$$a_2 := 30 \text{ mm}$$

$$a_3 := 0 \text{ mm}$$

$$a_4 := 30 \text{ mm}$$

$$a_5 := 60 \text{ mm}$$

Lujuusluokka C24

$$E_0 := 11000 \text{ MPa}$$

$$G_{090} := 650 \text{ MPa}$$

$$G_{9090} := 50 \text{ MPa}$$

$$\rho_{CLT} := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ruuvien tiedot:

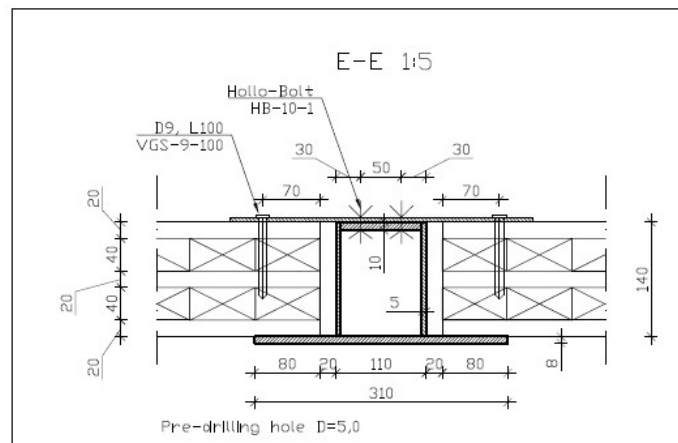
Rothoblaas VGS 9-100, ETA:

$$f_{tens,k} := 25.4 \text{ kN}$$

$$M_{y,k} := 27.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d := 9 \text{ mm}$$

$$\rho_m := \rho_{CLT} = 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Liitoksen leikkausjäykkyys (siirtymä):

Voidaan laskea Eurokoodin kaavalla:

$$K_{ser} := \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot 2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = (5.124 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{EN1995-1-1, taulukko 7.1, s.50}$$

$$K_{ser} := 2660 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Lähtötieto rakenteesta}$$

Kuormat:

$$g_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.14 \text{ m} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{CLT oma paino, lähde: puuinfo}$$

$$q_k := 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

hyötykuorma

Esimerkkirakenteena käytetään testitilannetta, jossa lattiarakenteena on ainoastaan kuvan mukainen päistään tuettu yksiaukkoinen CLT-levy. CLT-levy kiinnitetään toisesta päästään pääkannattimeen (WQ-palkki), jolloin levy ja pääkannatin muodostavat systeemin. Värähtelymitoituksessa huomioidaan siten myös pääkannattimen jäykkyys.

1.1 CLT:n taivutusjäykkyys Gamma-menetelmällä:

Gamma-menetelmä (Eurokoodi 5, liite B, tuleva Eurokoodi, liite I) sopii 3- ja 5-kerroksisiin CLT-levyihin.

Menetelmässä huomioidaan vain kantavat kerrokset ja Eurokoodin ohjeen mukaisessa laskentatavassa voi olla mukana vain 3 kerrosta.

Gamma-menetelmässä poikkileikkauksen arvot riippuvat osan pituudesta tai jännevälistä, jolloin laskuissa käytetään arvoa l_{ref} . Yksiaukkoiselle levyille (palkille) $l_{ref} := L$.

Kun kyseessä on esimerkin kaltainen symmetrinen rakenne, tehollisen taivutusjäykkyyden laskenta yksinkertaistuu.

$$E_0 = (1.1 \cdot 10^{10}) \text{ Pa}$$

Kimmokerroin

$$G_{9090} = (5 \cdot 10^7) \text{ Pa}$$

Liukumoduuli

Taivutusjäykkyys kantavaan suuntaan:

Gamma-kerroin määrittää, kuinka hyvin liitos toimii ja on välillä 0-1, missä 1 tarkoittaa täysin kiinnittynyttä tilannetta. (CLT-elementin mitoitus, Markku Hentonen)

Koska CLT-laatat ei käytetä mekaanisia liittimiä, gammakertoimen kaava muuttuu muotoon:

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot t_1}{l_{ref}^2} \cdot \frac{t_2}{G_{9090}}} = 0.794$$

(Lähde: CLT Handbook)

$$A_1 := t_1 \cdot b_x = 0.02 \text{ m}^2$$

$$A_3 := A_1$$

Uloimpien kerrosten neliömomentit saadaan Steinerin lauseen mukaisesti, jossa huomioidaan myös gamma-kerroin.

$$a_1 = 0.06 \text{ m}$$

uloimman kerroksen keskipisteen etäisyys
neutraaliakselilta

$$I_{x.1} := \frac{b_x \cdot t_1^3}{12} + \gamma_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2$$

$$I_{x.3} := I_{x.1} = (5.781 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$I_{x.2} := \frac{b_x \cdot t_3^3}{12} = (6.667 \cdot 10^{-7}) \text{ m}^4$$

$$I_{x.ef} := I_{x.1} + I_{x.2} + I_{x.3} = (1.163 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$EI_L := E_0 \cdot I_{x.ef} = (1.279 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$EI_L := \frac{EI_L}{m} = (1.279 \cdot 10^{12}) \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Metrin leveälle kaistalle

Taivutusjäykkyys poikittaiseen suuntaan:

$$l_{ref} := 2000 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot t_2}{l_{ref}^2} \cdot \frac{t_1}{G_{9090}}} = 0.697$$

$$A_2 := t_2 \cdot b_y = 0.04 \text{ m}^2$$

$$A_4 := A_2$$

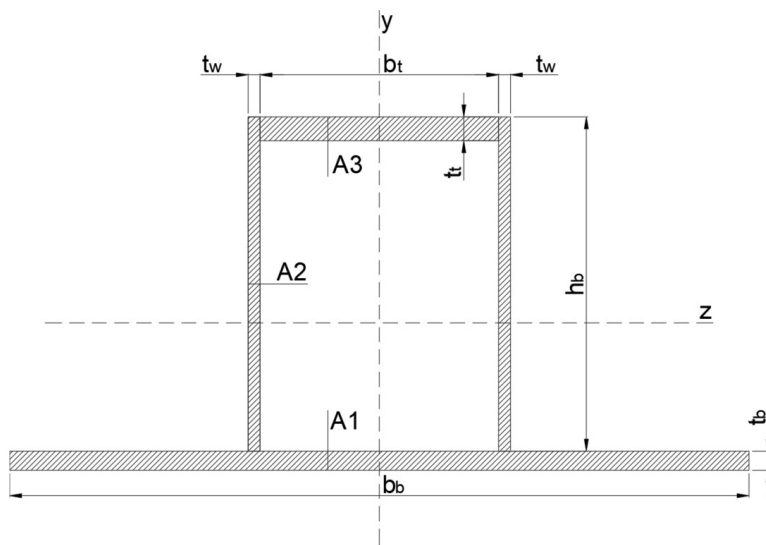
$$I_{y.1} := \frac{b_y \cdot t_2^3}{12} + \gamma_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 = (3.043 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$I_{y.ef} := 2 \cdot I_{y.1} = (6.087 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$EI_B := E_0 \cdot I_{y.ef} = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Metrin leveälle kaistalle

1.2 WQ-palkin taivutusjäykkyys Steinerin menetelmällä:



WQ-palkin lähtötiedot:

$$b_b := 310 \text{ mm} \quad t_b := 8 \text{ mm} \quad A_1 := b_b \cdot t_b = (2.48 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$t_w := 5 \text{ mm} \quad h_b := 140 \text{ mm} \quad A_2 := t_w \cdot h_b = 700 \text{ mm}^2$$

$$t_t := 10 \text{ mm} \quad b_t := 100 \text{ mm} \quad A_3 := t_t \cdot b_t = (1 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$A_{WQ} := A_1 + 2 \cdot A_2 + A_3 = (4.88 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$E_{WQ} := 210 \text{ GPa} \quad E_s := E_{WQ}$$

$$\rho_{WQ} := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{WQ} := A_{WQ} \cdot \rho_{WQ} = 38.308 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Painopisteakselin sijainti y-akselilla poikkileikkauksen alapinnasta

$$x := \frac{A_1 \cdot \frac{t_b}{2} + 2 \cdot A_2 \cdot \left(t_b + \frac{h_b}{2} \right) + A_3 \cdot \left(t_b + h_b - \frac{t_t}{2} \right)}{A_1 + 2 \cdot A_2 + A_3} = 53.713 \text{ mm}$$

Steinerin lause:

$$I = I_0 + A \cdot c^2$$

$$I_1 := \frac{b_b \cdot t_b^3}{12} + A_1 \cdot \left(x - \frac{t_b}{2}\right)^2 = (6.142 \cdot 10^{-6}) \text{ m}^4$$

$$I_2 := 2 \cdot \left(\frac{t_w \cdot h_b^3}{12}\right) + 2 \cdot A_2 \cdot \left(x - \left(t_b + \frac{h_b}{2}\right)\right)^2 = (3.112 \cdot 10^{-6}) \text{ m}^4$$

$$I_3 := \frac{b_t \cdot t_t^3}{12} + A_3 \cdot \left(x - \left(t_b + h_b - \frac{t_t}{2}\right)\right)^2 = (7.98 \cdot 10^{-6}) \text{ m}^4$$

$$I_0 := I_1 + I_2 + I_3 = (1.724 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$I_{WQ} := I_0 = (1.724 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$EI_{WQ} := I_{WQ} \cdot E_{WQ} = (3.619 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

2. Värähtelyn mitoitus EN1995-1-1 mukaan

$$m := g_k = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

lattian massa,
kansallinen liite:

lattian oma paino + $30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ hyötykuormaa

EN1995-1-1:
lattiarakenteen massa

$$\zeta := 0.025$$

vaimennussuhde CLT:lle (lähde: CLT Handbook)

2.1 Alin ominaistaajuus:

Nykyinen Eurokoodi ei anna tarkempia ohjeita lattialaatan ja palkin muodostaman systeemin ominaistaajuuden laskentaan.

Talja (2002) s. 22 antaa lausekkeen, millä voidaan laskea pääkannattimeen tukeutuvan lattiapalkin ja pääkannattimen muodostaman systeemin alin ominaistaajuus. Kaavaa voidaan soveltaa myös tässä tilanteessa, kun lasketaan CLT-levyn ja liittorakenteen muodostaman systeemin alin ominaistaajuus.

Lattialaatan alin ominaistaajuus:

$$f_{0,CLT} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 37.981 \text{ Hz}$$

EN1995-1-1: kaava (7.5)

WQ-palkin alin ominaistajuus:

$$EI_l := EI_{WQ} = (3.619 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

WQ-palkin taivutusjäykkyys

$$m_{beam.1} := m \cdot L + m_{WQ} = 164.973 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Palkin paino + CLT molemmin puolin palkkia

$$L_{WQ} := 4 \text{ m}$$

$$f_{0.WQ} := \frac{\pi}{2 \cdot L_{WQ}^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m_{beam.1}}} = 14.542 \text{ Hz}$$

EN1995-1-1: kaava (7.5)

Putkipalkin alin ominaistajuus:

$$I_{PP} := 562.16 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Lähde: Ruukki, Rakenneputket

$$EI_{PP} := E_s \cdot I_{PP} = (1.181 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$L_{PP} := L_{WQ} = 4 \text{ m}$$

$$m_{PP} := 20.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Lähde: Ruukki, Rakenneputket

$$m_{beam.2} := m \cdot \frac{L}{2} + m_{PP} = 84.133 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Palkin paino + puolet CLT:stä

$$f_{0.PP} := \frac{\pi}{2 \cdot L_{PP}^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{PP}}{m_{beam.2}}} = 11.629 \text{ Hz}$$

Lattialaatan ja pääkannatinten muodostaman systeemin alin ominaistajuus:

1. Testitilanteen lattiarakenteen alin ominaistajuus CLT+WQ-palkki+putkipalkki

$$f_{1.1.vanha} := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0.CLT}^2} + \frac{1}{2 \cdot f_{0.WQ}^2} + \frac{1}{2 \cdot f_{0.PP}^2}}} = 12.167 \text{ Hz}$$

Systeemin yhdistetty alin ominaistajuus (Talja, 2002, s.22 Suomalainen, 2006, LIITE 8)

2.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle:

CLT-laatan taipuma

$$EI_L := EI_L = (1.279 \cdot 10^6) \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_B := \frac{EI_B}{\text{m}} = (6.695 \cdot 10^5) \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

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

$$B_{ef} := \frac{L}{1.1} \cdot \sqrt{\frac{EI_B}{EI_L}} = 1.7 \text{ m}$$

kertoimen kaava,
CLT Handbook, kaava 5.13

$$w_{CLT} := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI_L \cdot B_{ef}} = 0.165 \text{ mm}$$

taipuman kaava,
CLT Handbook, kaava 5.12

WQ-palkin taipuma

Pistekuormalle:

$$F := 0.5 \text{ kN}$$

$$w_{0.5.WQ} := \frac{F \cdot L_{WQ}^3}{48 \cdot EI_{WQ}} = 0.184 \text{ mm}$$

Tasaiselle kuormalle:

$$w_{0.5.WQ.0} := \frac{5 \cdot \left(\frac{F}{L_{WQ}} \right) \cdot L_{WQ}^4}{384 \cdot EI_{WQ}} = 0.115 \text{ mm}$$

Oletetaan, että CLT jakaa
kuorman palkille tasaisesti

Putkipalkin taipuma

Pistekuormalle:

$$F := 0.5 \text{ kN}$$

$$w_{0.5.PP} := \frac{F \cdot L_{PP}^3}{48 \cdot EI_{PP}} = 0.565 \text{ mm}$$

Tasaiselle kuormalle:

$$w_{0.5.PP.0} := \frac{5 \cdot \left(\frac{F}{L_{PP}} \right) \cdot L_{PP}^4}{384 \cdot EI_{PP}} = 0.353 \text{ mm}$$

Oletetaan, että CLT jakaa
kuorman palkille tasaisesti

1. Testitilanteen lattiarakenteen taipuma CLT+WQ-palkki+putkipalkki pistekuormalle

$$w_{tot.1.vanha} := w_{CLT} + w_{0.5.WQ} + w_{0.5.PP} = 0.914 \text{ mm}$$

2. Testitilanteen lattiarakenteen taipuma CLT+WQ-palkki+putkipalkki tasaiselle kuormalle

$$w_{tot.1.vanha.0} := w_{CLT} + w_{0.5.WQ.0} + w_{0.5.PP.0} = 0.634 \text{ mm}$$

2.3 Värähtelynopeus:

Värähtelynopeuden laskentaan vaikuttaa myös poikittaisen suunnan taivutusjäykkyys.

$$m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.14 \text{ m} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{massa [kg/m}^2 \text{]}$$

$$f_1 := \frac{f_{1.1.vanha}}{\text{Hz}} = 12.167$$

$$EI_B := EI_B \cdot m = (6.695 \cdot 10^5) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_L := EI_L \cdot m = (1.279 \cdot 10^6) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$n_{40} := \left(\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^4 \cdot \frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} = 1.61 \quad \text{EN1995-1-1: kaava (7.7)}$$

$$v := \frac{4 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot n_{40})}{m \cdot B \cdot L + 200 \text{ kg}} = 0.012 \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} \quad \text{EN1995-1-1: kaava (7.6)}$$

$$b := 150$$

kun a=0,5 -> b=150
(EN1995-1-1: Kuva 7.2)

$$v := v \cdot \text{kg} = 0.012$$

$$b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} = 0.031$$

EN1995-1-1: kaava (7.4)

$$\text{if } v \leq b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} \text{ } \left| \begin{array}{l} \text{“OK”} \\ \text{“OK”} \end{array} \right.$$

$$v_{1.vanha} := v = 0.012$$

3. Värähtelyn mitoitus tulevan Eurokoodin ohjeen mukaan:

$$m := g_k = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

lattian massa: lattian pysyvä kuorma
+ 10% täydestä hyötykuormasta,
tässä kuitenkin pelkkä lattian oma
paino

$$\zeta := 0.025$$

vaimennussuhde CLT:lle
CEN2021e: kappale 9.3.3

3.1 Alin ominaistajuus

Tutkittavassa välipohjarakenteessa CLT tukeutuu taipuvaan WQ-palkkiin. Tuleva Eurokoodi antaa muutaman mitoitusvaihtoehdon alimmalle ominaistajuudelle, kun lattia tukeutuu taipuvalle tuelle. Tässä kuitenkin laskettu vain pääkannatinten ja CLT-laatan yhteenlaskettu alin ominaistajuus.

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

Lattian alin ominaistajuus:

$$EI_L := \frac{EI_L}{m} = (1.279 \cdot 10^6) \frac{N \cdot m^2}{m}$$

$$f_{1,CLT,uusi} := k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 37.981 \text{ Hz}$$

$$f_{1,rigid} := f_{1,CLT,uusi} = 37.981 \text{ Hz}$$

WQ-palkin alin ominaistajuus:

$$f_{1,beam,1} := f_{0,WQ} = 14.542 \text{ Hz}$$

Putkipalkin alin ominaistajuus:

$$f_{1,beam,2} := f_{0,PP} = 11.629 \text{ Hz}$$

1. Testitilanteen lattiarakenteen alin ominaistajuus (CLT+WQ+PP):

$$f_{1,2,uusi} := \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,rigid}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam,1}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam,2}^2}}} = 14.534 \text{ Hz CEN2021e: kaava (9.15)}$$

3.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle

$$EI_B := EI_B = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$EI_L := EI_L \cdot m = (1.279 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$B_{ef} := \min \left(0.95 \cdot L \cdot \left(\frac{EI_B}{EI_L} \right)^{0.25}, B \right) = 2 \text{ m} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.18)}$$

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

$$w_{rigid} := \frac{F_{1kN} \cdot L^3}{48 \cdot EI_L \cdot B_{ef}} \cdot 1000 \text{ mm} = 0.141 \text{ mm} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.17)}$$

$$w_{CLT.uusi} := w_{rigid}$$

Putkipalkin taipuma:

$$F_{0.5kN} := 0.5 \text{ kN}$$

$$w_{beam.2} := \frac{F_{0.5kN} \cdot L_{PP}^3}{48 \cdot EI_{PP}} = 0.565 \text{ mm} \quad \text{Pistekuormalle}$$

$$w_{beam.2.0} := w_{0.5.PP.0} = 0.353 \text{ mm} \quad \text{Tasaiselle kuormalle}$$

WQ-palkin taipuma:

$$w_{beam.1} := \frac{F_{0.5kN} \cdot L_{WQ}^3}{48 \cdot EI_{WQ}} = 0.184 \text{ mm} \quad \text{Pistekuormalle}$$

$$w_{beam.1.0} := w_{0.5.WQ.0} = 0.115 \text{ mm} \quad \text{Tasaiselle kuormalle}$$

Testitilanteen lattiarakenteen taipuma CLT+WQ-palkki+putkipalkki pistekuormalle

$$w_{tot.1.uusi} := 0.5 \cdot w_{beam.1} + 0.5 \cdot w_{beam.2} + w_{rigid} = 0.515 \text{ mm} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.20)}$$

Testitilanteen lattiarakenteen taipuma CLT+WQ-palkki+putkipalkki tasaiselle kuormalle

$$w_{tot.1.uusi.0} := 0.5 \cdot w_{beam.1.0} + 0.5 \cdot w_{beam.2.0} + w_{rigid} = 0.375 \text{ mm} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.20)}$$

	Lattian vaatimustasot					
Ehto	I	II	III	IV	V	VI
R -kerroin	4	8	12	24	36	48
Ylempi taipumaraja $w_{lim,max}$ (mm)	0,25	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0
Taipumaraja w_{1kN} (mm) ≤	0,25	0,25	0,5	$\frac{150 \cdot R}{L}$		
Taajuus f_1 (Hz) ≥	4,5					
Kiihtyvyyden a_{rms} (m/s ²) ≤ (jos $f_1 \leq 8$ Hz)	0,02	0,04	0,06	0,12	0,18	0,24
Nopeus v_{rms} (m/s) ≤	0,0004	0,0008	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048

Lattian taipuman sallittu arvo riippuu valitusta vaatimustasosta. Vaatimustaso III vastaa taipuman osalta nykyistä kansallisen liitteen raja-arvoa $w_{1kN} := 0.5 \text{ mm}$

Testitilanteen lattiarakenne

if $w_{tot.1.uusi} < w_{1kN}$ "OK" else "Tarkasta vaatimustaso"	= "Tarkasta vaatimustaso"
--	---------------------------

3.3 Lattian värähtelynopeus:

$$m := 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

massa [kg/m^2], lattian pysyvä kuorma + 10% hyötykuormasta, tässä pelkkä oma paino

$$M := \frac{m \cdot L \cdot B}{4} = 63.333 \text{ kg}$$

CEN2021e: kaava (9.23)

Testitilanteen rakenteen värähtelynopeus (WQ-palkki+CLT+putkipalkki)

$$f_w := 1.5$$

Kävelytaajuus huoneistossa, CEN2021e

$$f_1 := \frac{f_{1.2.uusi}}{\text{Hz}} = 14.534$$

$$I_m := \frac{42 \cdot f_w^{1.43}}{f_1^{1.3}} = 2.312$$

CEN2021e: kaava (9.24)

$$I_m := I_m \text{ N} \cdot \text{s} = 2.312 \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$k_{red} := 0.7$$

Pienennyskerroin

$$v_{1,peak} := k_{red} \cdot \frac{I_m}{(M + 70 \text{ kg})} = 0.012 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

CEN2021e: kaava (9.25)

$$k_{imp} := \left(\left[\begin{array}{c} 0.48 \cdot \left(\frac{B}{L} \right) \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right] \right) = \left[\begin{array}{c} 0.437 \\ 1 \end{array} \right]$$

CEN2021e: kaava (9.26)

$$k_{imp} := \max \left(\left[\begin{array}{c} 0.48 \cdot \left(\frac{B}{L} \right) \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right] \right) = 1$$

$$v_{tot.peak} := k_{imp} \cdot v_{1.peak} = 0.012 \frac{m}{s} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.27)}$$

$$\eta := 1.35 - 0.4 \cdot k_{imp} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.29)}$$

$$\begin{cases} \text{if } 1 \leq k_{imp} \leq 1.9 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 1.35 - 0.4 \cdot k_{imp} \\ \text{else} \\ 0.59 \end{array} \right\| \end{cases} = 0.95 \quad \text{Palkkirakenteinen lattia}$$

$$\begin{cases} \text{if } 1 \leq k_{imp} \leq 1.7 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 1.35 - 0.4 \cdot k_{imp} \\ \text{else} \\ 0.67 \end{array} \right\| \end{cases} = 0.95 \quad \text{Muut lattiat}$$

CEN2021e: kaava (9.28)

$$v_{rms.1} := v_{tot.peak} \cdot (0.65 - 0.01 \cdot f_1) \cdot (1.22 - 11 \cdot \zeta) \cdot \eta = 0.005 \frac{m}{s}$$

Mikäli pysytään lattian vaatimustasossa III, sallittu arvo $v_{rms.sall} := 0.0012 \frac{m}{s}$

$$\begin{cases} \text{if } v_{rms.1} < v_{rms.sall} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{“OK”} \\ \text{else} \\ \text{“Tarkasta vaatimustaso”} \end{array} \right\| \end{cases} = \text{“Tarkasta vaatimustaso”}$$

$$v_{1.uusi} := v_{rms.1} = 0.005 \frac{m}{s}$$

3.4 Lattian kiihtyvyys

Kiihtyvyys täytyy huomioida, kun alin ominaistaajuus jää alle 8 Hz.

Kiihtyvyys

$$F_h := 50 \text{ N} \quad \text{Pystykuorma, jonka kävelijä aiheuttaa, Eurokoodi CEN2021e}$$

$$\mu := 0.4 \quad \text{Kerroin, jolla huomioidaan resonanssi, Eurokoodi CEN2021e}$$

$$k_{res} := \left(\left[\begin{array}{c} 0.192 \cdot \frac{B}{L} \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right] \right) = \left[\begin{array}{c} 0.175 \\ 1 \end{array} \right]$$

CEN2021e: kaava (9.22)

$$k_{res} := \max \left(\left[\begin{array}{c} 0.192 \cdot \frac{B}{L} \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_B} \right)^{0.25} \\ 1 \end{array} \right] \right) = 1$$

$$a_{rms} := \frac{k_{res} \cdot \mu \cdot F_h}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M} = 4.466 \frac{m}{s^2} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.21)}$$

4. Liittorakenne

4.1 Liittorakenteen taivutusjäykkyys:

[CLT:n](#) taivutusjäykkyydet on laskettu ylempänä.

$$EI_L = (1.279 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Kantavaan suuntaan}$$

$$EI_B = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Poikittaiseen suuntaan}$$

Liittorakenteen taivutusjäykkyys saadaan laskemalla yhteen [CLT:n](#), WQ-palkin ja niiden yhdistelmän taivutusjäykkyys käyttäen apuna Steinerin termiä. Liittorakenne homogenisoidaan, jolloin koko rakenteella on sama kimmomoduuli. Homogenisointi tehdään käyttämällä EI-ekvivalenttimenetelmää (Aspila et al. 2022).

Liittorakenteen taivutusjäykkyyden laskennassa käytetään [CLT:n](#) tehollista leveyttä.

Teräksen ja betonin liittopalkissa betonilaatan tehollinen leveys on $L_{eff} = \frac{L_1}{4}$, missä

L_1 on palkin pituus. Betonin ja CLT:n kimmokerroin E on samaa suuruusluokkaa, jolloin CLT-laatan tehollinen leveys voidaan arvioida samaksi kuin betonilaatalla. Tehollisesta leveydestä jätetään pois WQ-palkki sekä palkin ja CLT-levyn välinen aukko (w). (Heinisuo, Mela)

$$h_{CLT,eff} := 60 \text{ mm}$$

$$w := 20 \text{ mm}$$

$$L_{WQ} = 4 \text{ m}$$

$$b_{eff,CLT} := \frac{L_{WQ}}{4} - b_t - 2 \cdot w - 2 \cdot t_w = 0.85 \text{ m}$$

CLT-laatan homogenisoitu kimmomoduuli EI-ekvivalenttimenetelmällä

Homogenisoinnissa huomioidaan pääsääntöisesti vain palkin suuntaiset kerrokset. Poikittaisuunnan kimmomoduuli voidaan huomioida silloin, kun kerrokset on liimattu myös sivuilta. Testitilanteen rakenteessa kerrokset 2 ja 4 ovat palkin suuntaisesti, jolloin niiden kerrosten kimmomoduuli homogenisoidaan vastaamaan koko CLT-kerroksen kimmomoduulia.

$$t_1 = 20 \text{ mm}$$

$$t_2 = 40 \text{ mm}$$

$$t_3 = 20 \text{ mm}$$

$$a_2 = 30 \text{ mm}$$

$$b_{eff} := 1000 \text{ mm}$$

$$L_{eff} := 2000 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot t_2}{L_{eff}^2} \cdot \frac{t_3}{G_{9090}}} = 0.697$$

$$A_2 := t_2 \cdot b_{eff} = 0.04 \text{ m}^2$$

$$I_{y,1} := \frac{b_{eff} \cdot t_2^3}{12} + \gamma_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 = (3.043 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$E_{h,EI,y} := \frac{2 \cdot E_0 \cdot I_{y,1}}{\frac{b_{eff} \cdot h_{CLT}^3}{12}} = (2.928 \cdot 10^3) \text{ MPa}$$

$$EI_{WQ} = (3.619 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$EI_{CLT,B} := EI_B = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

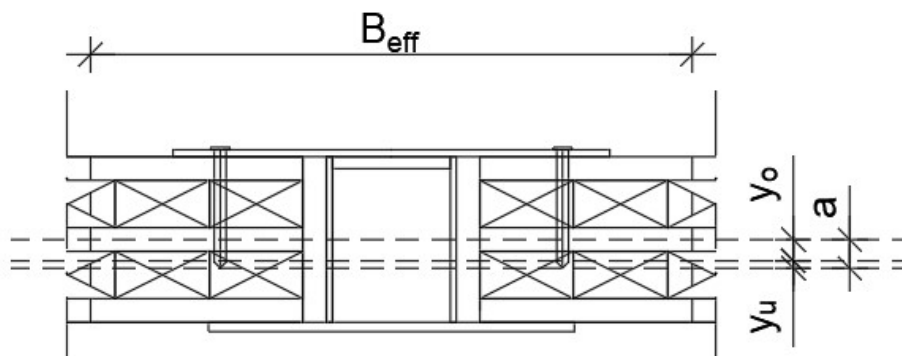
CLT:n taivutusvastus ennen homogenisointia

$$I_{CLT} := \frac{b_{eff} \cdot h_{CLT}^3}{12} = (2.287 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$EI_{h,CLT,EI} := E_{h,EI,y} \cdot I_{CLT} = (6.695 \cdot 10^{11}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Homogenisoitu taivutusvastus

$$A_{CLT} := h_{CLT} \cdot b_{eff,CLT} = 0.119 \text{ m}^2$$



$$pp_{CLT} := \frac{h_{CLT}}{2} + t_b = 0.078 \text{ m}$$

$$pp_{WQ} := x = 53.713 \text{ mm}$$

$$a := \left(t_b + \frac{h_{CLT}}{2} \right) - x = 24.287 \text{ mm}$$

$$y_o := -\frac{E_{WQ} \cdot A_{WQ}}{E_{WQ} \cdot A_{WQ} + E_{h.EI.y} \cdot A_{CLT}} \cdot a = -18.125 \text{ mm}$$

$$y_{CLT} := y_o$$

$$y_u := \frac{E_{h.EI.y} \cdot A_{CLT}}{E_{WQ} \cdot A_{WQ} + E_{h.EI.y} \cdot A_{CLT}} \cdot a = 6.162 \text{ mm}$$

$$y_{WQ} := y_u$$

Steinerin termi

$$EI_s := y_{WQ}^2 \cdot E_{WQ} \cdot A_{WQ} + y_{CLT}^2 \cdot E_{h.EI.y} \cdot A_{CLT} = (1.534 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^2 \cdot N$$

$$EI_{WQ} = (3.619 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Koko systeemin taivutusjäykkyys

$$EI_{NS} := EI_{h.CLT.EI} + EI_{WQ} + EI_s = (4.442 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

4.2 Liittorakenteen alin ominaistajuus:

$$l_s := 600 \text{ mm}$$

Liitoslevyjen k-jako

$$k_s := K_{ser} = (2.66 \cdot 10^3) \frac{kN}{m}$$

Liitoksen leikkausjäykkyys

$$a := 24.287 \text{ mm}$$

[CLT:n](#) keskipisteen etäisyys
WQ-palkin keskipisteestä

$$k := \frac{k_s \cdot a^2}{l_s} = (2.615 \cdot 10^3) \text{ N}$$

Teräslevyt huomioidaan kertoimella k ,
jolla tasataan teräslevyjen vaikutus
koskemaan koko palkin matkalta.

$$L_{WQ} = 4 \text{ m}$$

Palkin pituus

$$\alpha_1 := \frac{EI_{WQ}}{EI_s} = 23.598$$

$$\alpha_2 := \frac{EI_{h.CLT.EI}}{EI_s} = 4.365$$

$$\alpha := \alpha_1 + \alpha_2 = 27.964$$

$$\beta := \frac{EI_s}{k \cdot L_{WQ}^2} = 3.666$$

$$q := (m \cdot L + m_{WQ}) = 164.973 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Palkille tuleva tasainen kuorma
(CLT:n + palkin oma paino)

1. Pelkkä liittopalkin oma paino

$$f_{0.EI} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{EI_s}{q \cdot L_{WQ}^4} \cdot \frac{1 + \alpha + \alpha \cdot \beta \cdot \pi^2}{1 + \beta \cdot \pi^2} \cdot \pi^4} = 15.837 \text{ Hz}$$

$$f_{0.EI.liitto} := f_{0.EI}$$

2. Liittorakenne + 30 kg hyötykuormaa (EN1995-1-1)

$$q := \left(m \cdot \frac{L}{2} + m_{WQ} \right) + 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \frac{L}{2} = 140.416 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$f_{0.EI.vanha} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{EI_s}{q \cdot L_{WQ}^4} \cdot \frac{1 + \alpha + \alpha \cdot \beta \cdot \pi^2}{1 + \beta \cdot \pi^2} \cdot \pi^4} = 17.166 \text{ Hz}$$

3. Liittorakenne + 10 % hyötykuormaa (tuleva Eurokoodi)

$$q := \left(m \cdot \frac{L}{2} + m_{WQ} \right) + 0.1 \cdot q_k \cdot \frac{L}{2} = 127.491 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$f_{0.EI.uusi} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{EI_s}{q \cdot L_{WQ}^4} \cdot \frac{1 + \alpha + \alpha \cdot \beta \cdot \pi^2}{1 + \beta \cdot \pi^2} \cdot \pi^4} = 18.015 \text{ Hz}$$

4.3 Liittorakenteen taipuma:

Tasaiselle kuormalle (Heinisuo, Mela)

$$p := \frac{F_{0.5kN}}{L_{WQ}} = 0.125 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pistekuorma jaettuna tasaisesti palkille

$$x_{NS} := \frac{L_{WQ}}{2} = 2 \text{ m}$$

Tarastelupisteen sijainti
pituussuunnassa (tässä palkin keskellä)

$$\xi := \frac{x_{NS}}{L_{WQ}} = 0.5$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{1+\alpha}{\alpha \cdot \beta}} = 0.532$$

$$w_{NS} := \frac{p \cdot L_{WQ}^4}{EI_{NS}} \cdot \left(\frac{1}{24} \cdot \xi \cdot (1 - 2 \cdot \xi^2 + \xi^3) + \frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \lambda^2} \cdot \xi \cdot (1 - \xi) - \frac{1}{\alpha \cdot \lambda^4} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\lambda}{2}\right) - \cosh\left(\lambda \cdot \frac{(1-2 \cdot \xi)}{2}\right)}{\cosh\left(\frac{\lambda}{2}\right)} \right)$$

$$w_{NS} = 0.097 \text{ mm}$$

$$w_{0.5.WQ.0} = 0.115 \text{ mm}$$

$$w_{tot.vanha.0} := w_{0.5.PP.0} + w_{CLT} + w_{NS} = 0.615 \text{ mm}$$

$$w_{tot.uusi.0} := 0.5 \cdot w_{0.5.PP.0} + w_{rigid} + 0.5 \cdot w_{NS} = 0.366 \text{ mm}$$

5. Tulokset:

5.1 Alin ominaistajuus:

Testitilanteen lattiarakenne (CLT+WQ+PP)

$$f_{0.CLT} = 37.981 \text{ Hz} \quad f_{0.PP} = 11.629 \frac{1}{s}$$

$$f_{0.WQ} = 14.542 \frac{1}{s} \quad f_{0.EI.liitto} = 15.837 \frac{1}{s}$$

Testirakenne ilman liittoa, nykyisellä Eurokoodilla/VTT:n ohjeella

$$f_{1.1.vanha} := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0.CLT}^2} + \frac{1}{2 \cdot f_{0.WQ}^2} + \frac{1}{2 \cdot f_{0.PP}^2}}} = 12.167 \text{ Hz}$$

Systeemin yhdistetty alin ominaistajuus
(Talja, 2002, s.22, Suomalainen, 2006, LIITE 8)

Testirakenne liitto, nykyisellä Eurokoodilla/VTT:n ohjeella

$$f_{1.liitto.vanha} := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1.rigid}^2} + \frac{1}{2 \cdot f_{0.EI.liitto}^2} + \frac{1}{2 \cdot f_{1.beam.2}^2}}} = 12.516 \text{ Hz}$$

Testirakenne ilman liittoa, tulevalla Eurokoodilla

$$f_{1.1.uusi} := \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1.rigid}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1.beam.1}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1.beam.2}^2}}} = 14.534 \text{ Hz} \quad \text{CEN2021e: kaava (9.15)}$$

Testirakenne liitto, tulevalla Eurokoodilla

$$f_{1.liitto.uusi} := \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1.rigid}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{0.EI.liitto}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1.beam.2}^2}}} = 14.929 \text{ Hz}$$

5.2 Lattian taipuma 1 kN pistekuormalle:

Testitilanteen lattiarakenne (CLT+WQ+PP) palkkien tasaiselle kuormalle

$$w_{tot.1.vanha.0} = 0.634 \text{ mm} \quad \text{Nykyinen Eurokoodi}$$

$$w_{tot.1.uusi.0} = 0.375 \text{ mm} \quad \text{Tuleva Eurokoodi}$$

Liittorakenne:

$$w_{tot.vanha.0} = 0.615 \text{ mm} \quad \text{Nykyinen Eurokoodi}$$

$$w_{tot.uusi.0} = 0.366 \text{ mm} \quad \text{Tuleva Eurokoodi}$$

5.3 Värähtelynopeus:

Testitilanteen lattiarakenne (CLT+WQ+PP)

$$v_{1.vanha} = 0.012 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} \quad \text{Nykyinen Eurokoodi}$$

$$v_{1.uusi} = 0.005 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Tuleva Eurokoodi}$$