



Nils-Johan Steffansson

CLT-välipohjalaatan alakattora- kenne värähtelymitoituksen osana

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

14.10.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Nils-Johan Steffansson
Otsikko:	CLT-välipohjalaatan alakattorakenne värähtelymitoituksen osana
Sivumäärä:	62 sivua + 1 liite
Aika:	14.10.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaajat:	Mikko Leino toimitusjohtaja Janne Manninen yrittäjä Ilkka Honkonen toimitusjohtaja Mauri Konttila tuntiopettaja

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia CLT-välipohjalaattojen alakattorakenteiden vaikutus rakenteen ominaisvärähtelyyn.

Tutkimuksessa suoritettiin ensin laskelmia olemassa olevien Eurokoodi 5 ja Stora Enson ripalaatta laskentaohjeiden mukaan ja sen perusteella tehtiin suunnitelmia laattojen ominaisvärähtelyn mittaamista varten. Tutkimuksessa mitattiin CLT-laatta ilman koolauksia ja koolauksilla erilaisilla kiinnitysmenetelmillä.

Tutkimus nähtiin tarpeelliseksi, koska rakennustyömailla rakenteista mitatut ominaisvärähtelytaajuudet olivat korkeampia kuin laskelmat osoittivat kohteissa, joista löytyi välipohjan alapuolinen koolaus. Tämän perusteella olisi mahdollista pidentää välipohjalaatan jännevälejä koolauksen ansiosta rakenteissa, joissa ominaisvärähtely on mitoituksen suhteen määräävä. Tavoitteena oli löytää ominaisvärähtelyn suhteen laskentatapa, missä voidaan ottaa koolaus huomioon.

Tutkimuksen tulosten perusteella on mahdollista laskea 5-kerroksisen koolatun CLT-välipohjalaatan ominaisvärähtely tutkimuksessa käytettyjen kaavojen mukaan, kun koolaukset liimataan kiinni CLT-laattaan. Toimeksiantajayritys voi näitä kaavoja käyttäen pidentää CLT-välipohjalaattojen jännevälejä tarvittaessa ja näin säästää materiaalimenekkiä.

Avainsanat: CLT, välipohja, värähtely, alakatto, koolaus, värähtelymitoitus

Abstract

Author: Nils-Johan Steffansson
Title: CLT floor slabs subceiling structure as part of vibration design
Number of Pages: 62 pages + 1 appendices
Date: 14 September 2022
Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Civil Engineering
Professional Major: Structural engineering
Supervisors: Mikko Leino, CEO
Janne Manninen, entrepreneur
Ilkka Honkonen, CEO
Mauri Konttila, part-time lecturer

The topic of the thesis was to investigate the sub-ceiling ribs effect on the vibration of CLT, cross laminated timber panels.

In the study, calculations were performed according to the Eurocode 5 and Stora Enso's rib panels structural design instructions. Based on the calculations, plans were made for measuring the characteristic vibration of the CLT panels with and without ribs. The tests were made using different fasteners considering the ribs.

The study was deemed necessary because the vibration frequencies measured on construction sites were higher than the calculations showed, where the sub-ceiling ribs were added. Based on this, it would be possible to extend the spans of the CLT floor slab thanks to the effect of the ribs in structures, where the vibration is decisive in terms of dimensioning.

The goal was to find a method of calculating the rate of vibrations, which can take the addition of ribs that are screwed, glued, or attached by angel units of steel into account.

Based on the results of the study, it is possible to calculate the vibration of a 5-layered CLT floor panel according to the formulas used in the study when the ribs are glued to the CLT panel. It is possible for the company that ordered this study to use these formulas for extending the spans of the CLT floor panels if necessary and by that, save on material consumption.

Keywords: CLT, panel, vibration, sub-ceiling, rib, structural design

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Värähtely	3
2.1	Ihminen ja värähtely	3
2.2	Värähtelyyn liittyvät periaatteet	4
2.3	Ominaisvärähtely	8
2.4	Palkissa esiintyvä värähtely	10
2.5	Välipohjarakenteen värähtelyyn liittyvät tekijät	10
2.6	Yhteen suuntaan kantavan lattian värähtely	13
2.7	Kahteen suuntaan kantava laatta	14
2.8	Pistekuorman aiheuttama taipuma	14
2.9	Rakenteiden muut ominaisvärähtelymuodot	15
2.10	Rakenteiden värähtelyä koskevat määräykset ja ohjeet	16
2.11	Lattioiden värähtelyyn liittyvät raja-arvot Euroopassa	17
3	Rakenteet	20
3.1	CLT-levy	20
3.2	CLT-laatan koolauksen vaikutus	22
3.3	Koolauksen kiinnikkeiden vaikutus	22
3.3.1	Ruuvikiinnitys	24
3.3.2	Kulmarautakiinnitys	28
4	Tutkimus	30
4.1	Perustiedot	30
4.2	CLT-laatan ominaisvärähtelyn laskeminen	33
4.2.1	Ominaisvärähtely lasketaan käyttörajatilassa	33
4.2.2	Pelkän CLT-laatan ominaisvärähtelyn laskeminen	33
4.2.3	Ruuvatun liitoksen γ -arvo	37
4.2.4	Koolaus ja CLT-laatan osat laskettuna erikseen	39
4.2.5	Koolaus ja CLT-laatta laskettuna T-poikkileikkauksena	43
4.2.6	Ominaisvärähtelylaskenta ripalaattana	46
4.3	Mittaus suunnitelma	52
4.4	Mittauslaitteet	54

4.5	1 kN pistekuorman aiheuttaman taipuman mittaaminen	56
4.6	Mittaukset	58
4.7	Mittaustulokset	58
5	Tutkimuksen tulokset	59
5.1	Laskelmien ja mittaustulosten vertailu	59
5.2	Laskentamallin käyttökelpoisuus	59
6	Pohdinta	60
	Lähteet	61
	Liitteet	
	Liite 1: Ominaisvärähtelyn mittaustaulukko	

Lyhenteet

CLT: Ristiinliimattu massiivipuu, Cross laminated timber

LVL: Kertopuu, Laminated vaneer lumber

1 Johdanto

Puurakentaminen on lisääntynyt viime vuosien aikana ja varsinkin puukerrostaloja rakennetaan nyt enemmän kuin aikaisemmin Suomessa. Suomen hallitus on hallitusohjelmassaan vuonna 2019 asettanut kansalliseksi tavoitteeksi, että vuonna 2025 puurakentamisen markkinaosuus kaikesta julkisesta uudisrakentamisesta olisi 45 %. Puurakentaminen sanotaan olevan keino vähentää alueellisia kasvihuonepäästöjä puun hiiltä sitovan ominaisuuden perusteella. Rakennussektorilla syntyy tällä hetkellä kolmannes kaikista päästöistä [1 s. 4].

Tämä ominaisuus halutaan myös käyttää hyödyksi kaupallisessa rakentamisessa ja pienentää tällä tavalla ympäristörasituksia. Markkinoinnissa on etu kertoa käytännön asioista, jotka edistävät kestäväää kehitystä. Edellä mainitut tekijät selittävät osaltaan puurakentamisen lisääntymistä ja syitä löytyy varmasti muitakin, mutta puurakentamisen tuotekehityksessä tämä on huomattu, ja siinä halutaan tehdä puurakentamisesta suoraviivaisempaa, tehokkaampaa ja taloudellisempaa.

Puurakenteisissa välipohjissa värähtelyn aiheuttamat ongelmat korostuvat. Puuvälipohjissa värähtelymitoitus tulee määrääväksi, vaikka puun kestävyys sallisi pitempiä jännevälejä. Tämä aiheutuu puun alhaisesta tiheydestä verrattuna esimerkiksi betoniin. Betonirakenteiden massa vaimentaa värähtelyn hyvin tehokkaasti ja tästä syystä ei määritellä erikseen raja-arvoja ominaistajuuksille betonirakenteille Eurokoodeissa. Välipohjiin kohdistuu myös paljon värähtelyä aiheuttavia tilanteita kuten kävelyä ja koneiden aiheuttamaa tärinää.

Rakenteiden värähtelyä ihminen aistii voimakkaimmillaan taajuuksien 4–8 Hz välillä, mutta havaintokyky heikkenee värähtelytaajuuden kasvaessa. Lattialla kävely aiheuttaa jaksottaisen kuormituksen minkä taajuus yleensä on 1,6–2,2 Hz. Taajuuden monikerroissa esiintyy myös kuormituskomponentteja ja taajuus saattaa olla tämän perusteella 3,2–8,8 Hz. Kävelyn tai koneen aiheuttama taajuus muuntuu rakenteessa sen ominaisuuksien kuten taivutusjäykkyyden, materiaalin

kimmoisuuden ja tiheyden perusteella rakenteen ominaisvärähtelyksi. Tämä värähtely vaikuttaa rakenteissa hetken värähtelyherätteen jälkeen mutta laantuu rakenteen vaimentavan vaikutuksen ansiosta [2 s. 9].

Opinnäytetyön tehdään Puurakentajat Group Oy:lle. Yhtiöllä on ilmennyt monessa projektissa, että CLT-välipohjarakenteissa värähtelymitoituksen laskelmat johtavat suurempiin poikkileikkauksiin rakenteissa kuin mitä valmiiden rakenteiden värähtelymittaukset osoittavat. Laskelmissa ei tällä hetkellä oteta huomioon välipohjalaattaan kiinnitettyjä alakattorakenteita niiden rakennetta taivutusjäykistävältä osalta ja tavoitteena on löytää laskentatapa, mikä hyödyntää myös näiden rakenteiden ominaisuuksia. Koolauksen kiinnitystavan vaikutus rakenteen jäyhyyteen on myös määrä selvittää värähtelylaskentakaavojen päivittämistä varten.

Opinnäytetyön tehtävänä on suunnitella välipohjarakenteita, laskea teoreettiset ominaisvärähtelyarvot näissä rakenteissa ja mitata värähtely suunnitelmien mukaan rakennetuista rakenteista. Mittausten perusteella on tutkittava, löytyykö tapa millä pystyisi määrittelemään kokonaisrakenteen ominaisvärähtelyä suora- viivaisemmin verrattuna mittausten perusteella saatuihin tuloksiin.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan vaan yhteen suuntaan kantavat CLT-välipohjalaatat, mittausten menevän suhteellisen vaikeaksi ja tilaa vieviksi, jos rakennettaisiin neljältä sivulta tuetuille laatoille mittauskentän.

Tutkimuksessa keskitytään värähtelyn laskemiseen ja mittaamiseen. Taipumia mitataan ja tulokset verrataan laskentatuloksiin pyrkimällä näin saada selville poikkileikkauksen taivutusjäykkyyden muutosta koolauksien ansiosta.

2 Värähtely

2.1 Ihminen ja värähtely

Eurooppalaisten sosiaali- ja hyvinvointitutkimusten perusteella kevytrakenteisten kerrostalojen, kuten puurakenteisten, asukkaat kokevat akustisten ja rakenteiden värähtelyä kodeissaan ja toimistoissaan häiritsevinä piirteinä.

Häiritsevintä värähtelyä aiheuttava lähde on liikenne, joka aiheuttaa melkein joka kolmannelle ihmiselle terveysongelmia hyvinvoinnin suhteen Euroopan alueella Maailman terveysjärjestön mukaan. Seuraavaksi häiritsevin värähtelyn lähde on naapureiden aiheuttama, ja on arvioitu, että yli 50 miljoonaa eurooppalaista ovat altistuneita tällaisille elämänlaatua heikentäville tapahtumille. Ihminen kokee esimerkiksi naapurin aiheuttamat värähtelyt tai äänet paljon haitallisimpana kuin omassa asunnossa syntyviä. Muita värähtelyä rakenteisiin aiheuttavia tekijöitä saattaa olla koneet, esimerkiksi pesukoneet ja kuivausrummut asuinkerrostoissa [3 s. 593].

Puurakenteisissa rakennuksissa välipohjan värähtelyn herätteenä toimii yleensä ihmisen kävely ja lasten hyppiminen mahdollisten koneiden tärinän lisäksi. Sven Ohlssonin tekemän tutkimuksen Floor vibrations and human discomfort:in mukaan ihminen pidetään niin sanottuna kriittisenä anturina kevytrakenteisissa rakennuksissa ja siksi rakenteiden värähtely tulisi ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa. Sven Ohlssonin tutkimusta on suurelta osin käytetty perustana Eurokoodien värähtelymitoitus standardien laatimisessa. Ohlssonin tutkimuksen mukaan ihmisen herkkyyys ja havaintokyky rakenteiden värähtelyyn

- on suhteessa värähtelyn kiihtyvyyteen taajuuksille mitkä ovat suurempia kuin 8 Hz
- on suhteessa värähtelyn nopeuteen taajuuksille mitkä ovat pienempiä kuin 8 Hz
- kasvaa kun värähtelyn kesto pitkittyy

- vähenee kun on tietoinen värähtelyn lähteestä
- vähenee fyysisen toiminnan myötä.

Näiden tietojen perusteella Ohlsson teki useita kokeita puurakenteisille välipohjille ja analysoinnin jälkeen ehdotti useita parametreja, mille kannattaisi esittää raja-arvoja ihmisten hyvinvointia ajatellen. Nämä ehdotukset sisälsivät alinta ominaisvärähtelyn taajuutta, suurinta sallittua taipumaa 1 kN pistekuormalla ja yksiköimpulssin aiheuttamaa värähtelyn nopeuden alkuarvoa [3 s. 595].

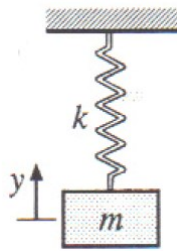
2.2 Värähtelyyn liittyvät periaatteet

Kappaleen tai systeemin värähtelyn taajuutta mitataan yksikössä Hz (1/s) tai radiaaneja sekunnissa. Taajuus määrittelee, miten nopeasti systeemi liikkuu edestakaisin tai kappale aaltoilee äärisiirtymäpisteiden välillä. Esimerkkinä tästä voidaan ajatella, että systeemiin lisätään ja poistetaan suhteellisen suuri kuormitus yhdessä sekunnissa. Tämä aiheuttaa suuren rasituksen systeemiin 1 Hz:n taajuudella ja jos kuorma lisättäisiin ja poistettaisiin 0,01 Hz taajuudella, rasitus systeemille olisi pieni, koska systeemi ei ehtisi reagoida niin nopeaan muutokseen [4 s. 4].

Värähtelyä tutkitaan oppikirjojen mukaan joko vaimentamattomana harmonisena värähtelynä tai vaimenevana värähtelynä. Kuvassa 1 käy ilmi vaimentamattoman värähtelyn liike ja mikä värähtelyn teoreettinen systeemi on. Kun kappale on lepotilassa, voidaan määritellä niin sanotun neutraaliakselin y-suunnassa (pystysuunta). Kun kappale vedetään alaspäin ja päästetään irti, voidaan laskea taajuus järjestelmän täyden kierroksen ajankulun perusteella. Voidaan myös määrittellä amplitudi mittaamalla neutraaliakselin ja liikkeen ääripisteen väliä.

Toinen tapa ajatella värähtelyä on esimerkiksi kitaran kieli. Tällöin aaltoileva liike tapahtuu osassa missä päät ovat kiinnitetty ja osassa on jännitys ja tietty taipumavastus. Värähtelyn taajuutta voidaan muuttaa muuttamalla kielessä olevaa vetojännitystä. Tämä muuttaa myös kielen senhetkistä taipumavastusta. Kitaran kieli muistuttaa statiikan järjestelmän kannalta välipohjalaatan värähtelyä, vaikka kielen taivutusjäykkyys ei ole lähelläkään kantavan laatan ominaisuuksia. Näiden

järjestelmien vertailu tekee mielenkiintoiseksi kielen kiristämisestä johtuva taajuusarvon nouseminen. Jos painaa kitaran kieltä sormella ja lisää siihen vetojännitystä kiristämällä sitä yhtä aikaa huomaa, että saman siirtymän pitämiseen tarvitaan lisää voimaa, eli taivutusjäykkyys suurenee lisäämällä vetojännitystä. Puisen välipohjalaatan koolaamisella on sama vaikutus taivutusjäykkyyden suhteen. Koolauksen jälkeen tarvitaan lisää kuormitusta päästäkseen samaan suuruiseen taipumaan.



Kuva 1. Vaimentamaton jousivärähtelijän periaate [5 s. 95].

Vaimentamattomassa harmonisessa värähtelyssä taajuus eli frekvenssi laskeaan kaavalla 2.1.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

k	jousivakio [N/m]
m	massa [kg]

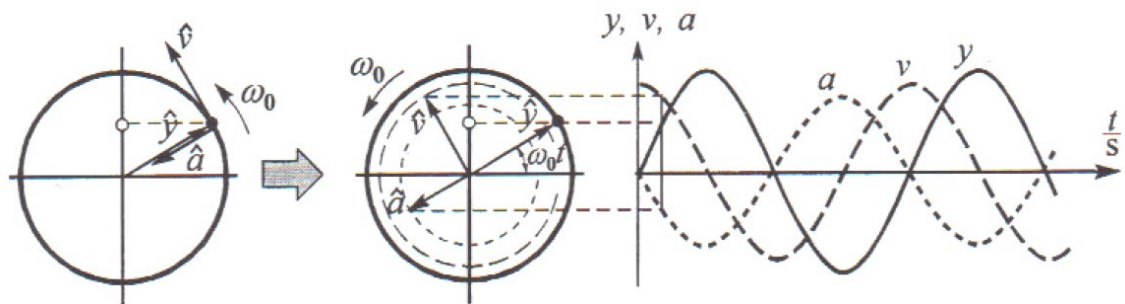
Jousivakio k saadaan seuraavista yhtälöistä 2.2.

$$F = -ky \Rightarrow -ky = ma \quad (2.2)$$

y	siirtymän pituus [m]
a	vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys 9,81 m/s ²

Jousivakion yksikkö on yhtälön perusteella N/m. Tämä on hyvä pitää mielessä, kun tutkitaan eurokoodeissa käytettyä välipohjarakenteiden ominaisvärähtelykaavaa.

Kuvasta 1 käy ilmi, että liike pystysuunnassa on edestakainen ja jatkuva. Kuvaajaksi piirrettynä liikkeen rata saa siniaallon muodon, joka on esitetty kuvassa 2.

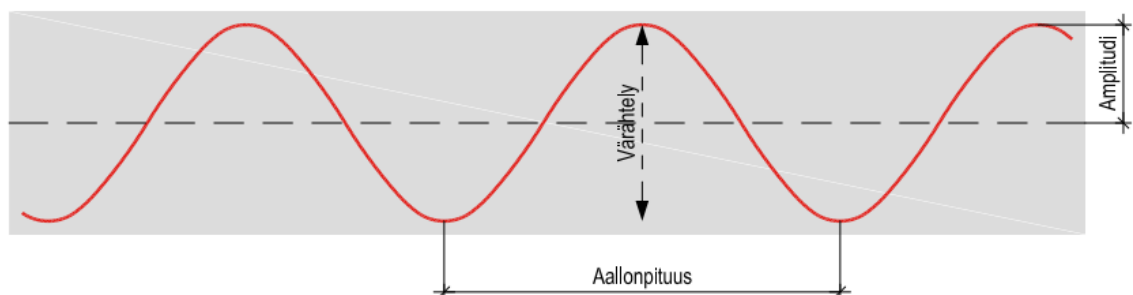


Kuva 2. Värähtelyn liike kuvaajan muodossa [5 s. 95].

Kuvaajasta y-aalto vastaa kappaleen alinta ominaisvärähtelymuotoa.

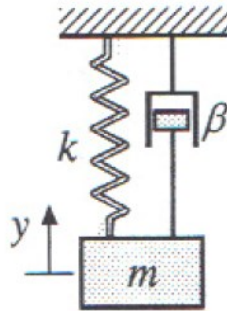
Jotta kuvaajaa pystyisi ymmärtämään, on kuvassa 3 esitetty asiat, jotka tulevat siitä ilmi.

Poikittaisaalto kiinteässä aineessa



Kuva 3. Kuvaajassa esitetty värähtelyaallon selitykset [6 s. 6].

Vaimennetussa värähtelyliikkeessä liike vaimenee tietyllä ajanjaksolla, koska materiaali itsessään toimii vastuksena tai järjestelmään on lisätty vastus niin kuin kuvassa 4 esitetty. Vastus merkitty β :lla.



Kuva 4. Vaimeneva värähtelijä [5 s. 97].

Vaimennetun värähtelyliikkeen ominaistajuus lasketaan kaavalla 2.3.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \delta^2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{\beta^2}{4m^2}} \quad (2.3)$$

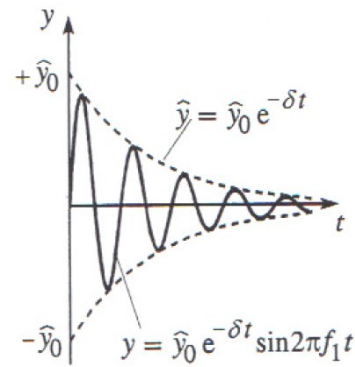
Edellisessä kaavassa käytetty vaimennuskerrointa voidaan kirjoittaa kaavan 2.4 mukaan.

$$\delta = \frac{\beta}{2m} \quad (2.4)$$

Vastuskerroin β täytyy olla tiedossa, ja sen täytyy täyttää ehdon, joka esitetty kaavassa 2.5.

$$\beta < 2\sqrt{mk} \quad (2.5)$$

Vaimennetun värähtelyn kuvaajasta käy ilmi kuvassa 5, että amplitudi, etäisyys keskiakselista aallon korkeammalle pisteelle, pienenee ajan myötä. Tämä tullaan huomaamaan tämän tutkimuksen mittausten kuvaajista myös. Puu materiaalina toimii vaimentimena hyvin tehokkaasti. Tästä huolimatta tämän tutkimuksen mitauksissa kävi myös ilmi, että ominaistajuus ei muuttunut huomattavasti, vaikka amplitudi pieneni materiaalin vaimennustekijän ja maan vetovoiman ansiosta.

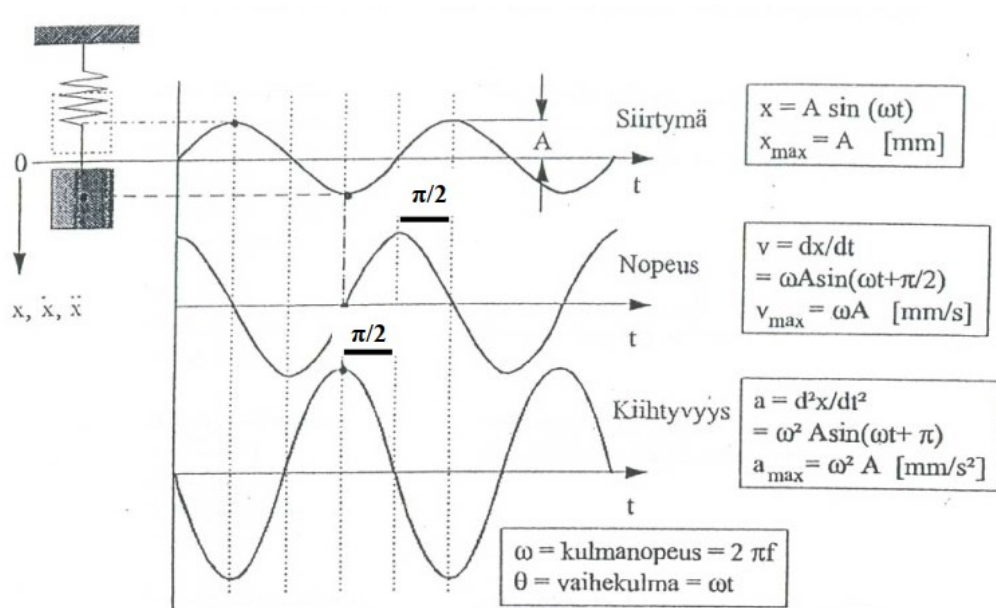


Kuva 5. Vaimennetun värähtelyn kuvaaja [5 s. 97].

2.3 Ominaisvärähtely

Kun esimerkiksi palkkirakenteelle kohdistetaan impulssi herätteenä, se alkaa värähdellä tasapainoasemansa suhteen. Rakenteeseen kohdistetun voiman suuruus on suhteessa heilahdusamplitudin liikkeen laajuuteen. Liike hidastuu rakenteen vaimennusvoimien ansiosta. Jousivoiman kx ja massahitusvoiman ma suhde vaihtelee kappaleen ollessa vapaassa värähtelytilassa, vapaassa värähtelyssä niiden summan ollessa nolla.

Ominaisvärähtelyn laskentakaavaan liittyvät asiat on esitetty kuvassa 6. Massaa kutsutaan yhden vapausasteen värähtelijäksi, koska värähtelyllä on ainoastaan siirtymämahdollisuus yhteen suuntaan.



Kuva 6 Ominaisvärähtelyn liike ja kuvaajat [7 s. 8].

Kuvasta 6 selviää myös että:

- x siirtymä
- v nopeus, siirtymä 1. derivaatta ajan suhteen $= A \omega$
- a kiihtyvyys, siirtymä 2. derivaatta ajan suhteen $= A \omega^2$
- A siirtymän heilahdusamplitudi
- ω kulmanopeus, kulmataajuus, rad/s
- T heilahdusaika, värähtelyjakso $= 2\pi / \omega$

Kun sijoitetaan kuvan mukainen kiihtyvyyssindeksi $a = x\omega^2$ kaavaan 2.2, saadaan $m x \omega^2 = k x$ ja kun yhtälöä sievennetään, saadaan ensimmäisen resonanssin ominaiskulmataajuus, joka on esitetty kaavassa 2.6.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]} \quad (2.6)$$

Kun merkitään $\omega_n = 2 \pi f_n$ saadaan ominaistajuuden kaava, katso kaava 2.1 [7 s. 8].

2.4 Palkissa esiintyvä värähtely

Vapaasti värähtelevän palkin n värähtelymuodon taajuus voidaan laskea kaavalla 2.7:

$$f_n = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (2.7)$$

Kertoimen K_n arvot vaihtelevat päiden tuentatavan mukaan. Joitakin perusarvoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Taulukossa esitetty K_n kertoimien arvot [4 s. 6].

Tuentamuoto	K_n kerroin ominaisvärähtelymuodolle n		
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
Vapaa molemmissa päissä	π^2	$4\pi^2$	$9\pi^2$
Jäykkä molemmissa päissä	22,4	61,7	121
Jäykkä (Uloke)	3,52	22	61,7

2.5 Välipohjarakenteen värähtelyyn liittyvät tekijät

Kaavasta 2.7 selviää että palkin tai välipohjan ominaisvärähtelyn taajuuteen vaikuttaa poikkileikkauksen jäyhyysmomentti, materiaalin kimmokerroin, palkkiin tai lattiaan vaikuttava paino tai kuorma ja kappaleen pituus. Kappaleen päiden kiinnitysjäykkyydellä on myös vaikutusta värähtelyyn.

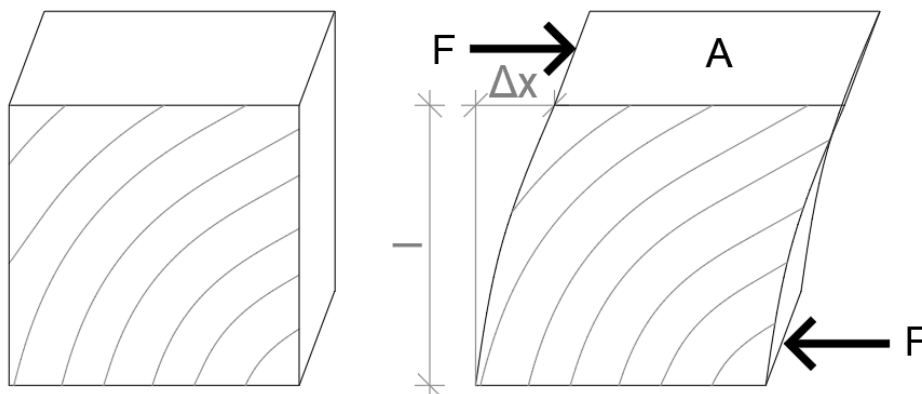
Jäyhyysmomentti kuvaa tietyn muotoisen homogeenisen kappaleen kykyä vastustaa taipumaa poikkileikkaustason tietyn akselin suuntaan. Suorakulmion muotoisen poikkileikkauksen kappaleen jäyhyysmomentti lasketaan kaavan 2.8 mukaisesti.

$$I = \frac{b x h^3}{12} \quad (2.8)$$

I	jäyhyysmomentti [mm^4]
b	kappaleen leveys [mm]
h	kappaleen korkeus [mm]

Materiaalin kimmomoduuli kuvaa kiinteän aineen jäykkyyttä. Se kertoo kappaleen suhteellisen venymisen suhteessa siihen kohdistuvaan jännitykseen. Materiaaliesimerkkeinä kimmokertoimen suhteen voidaan esittää rakenteissa yleisesti käytettävä teräs, millä on kimmokerroin $E = 200000 \text{ MPa}$, betonin $E = 27000\text{--}44000 \text{ MPa}$ riippuen betonin lujuudesta sekä betonissa käytetystä kiviaineksestä ja puu millä kimmokertoimet vaihtelevat suunnan ja puunlaadun mukaan. Yleisimmin käytetyllä puulaadulla luokassa C24 pituussuuntainen kimmokerroin on 11000 MPa ja syitä kohtisuoraan vaikuttava kimmokerroin on 370 MPa .

CLT levyn ominaisvärähtelylaskelmissa käytetään myös suuruus, joka kutsutaan liukukertoimeksi G . Tämä suure kertoo materiaalin kyky vastustaa leikkausjännityksen aiheuttamaa muodonmuutosta. Puun $G_{9090, \text{mean}}$ tai vaihtoehtoisesti käytetty $G_{R, \text{mean}}$ moduuli eli kun voimat vaikuttavat kohtisuoraan syitä vastaan kuten kuvassa 7 esitetty, on CLT laatoissa valmistajien mukaan noin $50\text{--}65 \text{ N/mm}^2$. CLT laattojen poikkileikkauksen poikkisuuntaiset puukerrokset vaikuttavat efektiiviseen jäyhyysmomenttiin negatiivisella tavalla johtuen puun heikosta $G_{R, \text{mean}}$ arvosta, joka mahdollistaa pitkittäiskerrostien välisen liukuman.

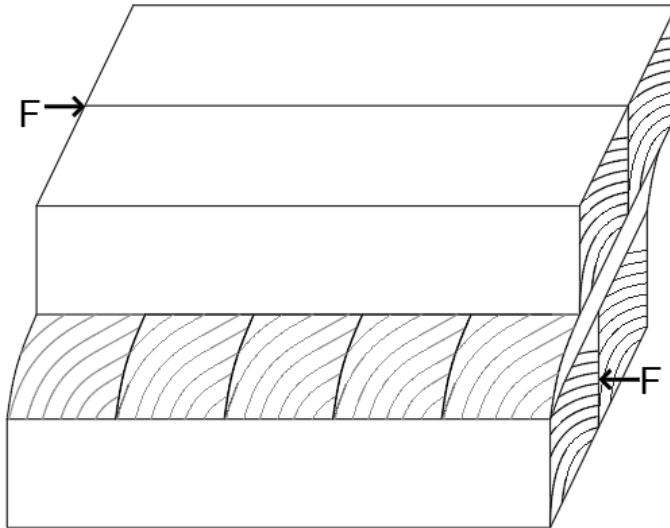


Kuva 7. Liukukertoimen periaate, kun voima kohtisuoraan syitä vastaan.

Periaate liukukertoimen laskemiseen löytyy seuraavasti yhtälöstä 2.9.

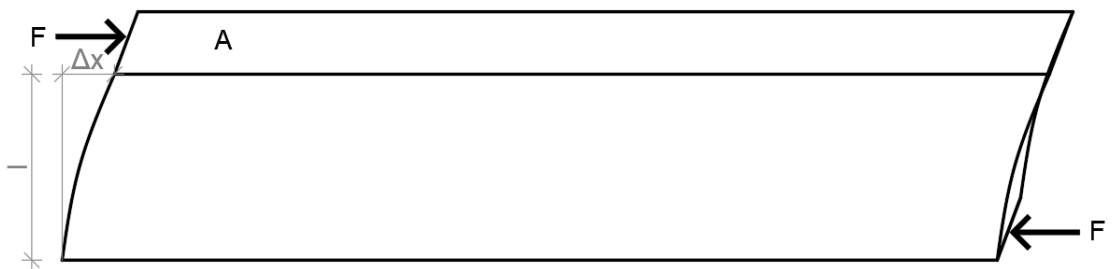
$$G = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta x}{l}} = \frac{F l}{A \Delta x} \quad (2.9)$$

Kuvassa 8 esitetty miten pitkittäiset lautakerrokset pääsevät liukumaan toisiaan suhteen poikkikerrosten heikon G_R kertoimen ansiosta.



Kuva 8. CLT levyn poikkikerrosten mahdollistama liukuma.

Ripalaattojen efektiivisen I arvon laskemiseen tarvitaan myös syiden suuntaisen liukukertoimen G_{mean} arvoa. G_{mean} arvon vaikutus esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. G_{mean} tekijän vaikutussuunta ja sen johdosta siirtymä.

Ominaisvärähtelyyn vaikuttaa myös rakenteen omapaino ja rakenteeseen vaikuttava kuormitus sekä rakenteen jänneväli, joiden vaikutus on suhteellisen suuri, kun laskentakaavan mukaan arvo nostetaan eksponenttiin kaksi.

2.6 Yhteen suuntaan kantavan lattian värähtely

Kun käytetään K_n arvona $n = 1$ kaavassa 2.7 selviää, että kyseinen kaavaa käytetään Eurokoodi 5 suorakaiteen muotoisen lattian alimman ominaistajuuden laskemiseksi niin kuin kaavassa 2.10 [8 s. 52].

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (2.10)$$

m	käyttörajatilayhdistelmän massa neliömetriltä missä otettu mukaan muuttuvan kuorman osuus 30 kg/m^2
L	rakenteen pituus
$(EI)_L$	pituuksuunnan taivutusjäykkyys

Kaavasta 2.10 tehty yksikköanalyysi näyttää seuraavalta

$$[f_1] = \frac{1}{m^2} \sqrt{\frac{\text{kg m m}^4 \text{ m}^2}{s^2 \text{ m}^2 \text{ kg}}} \rightarrow \frac{\sqrt{m}}{s}$$

Käy ilmi, että EI :n yksikkönä ei voida käyttää suoraan $\text{N m}^4 / \text{m}^2$ vaan sen täytyy vielä laskea per metri, mikä tulee ilmi seuraavassa. EI : yksikkönä tulisi siis käyttää $\text{N m}^4 / [\text{m}^2 \times \text{m}]$ jolloin yksiköksi tulee $\text{N m}^2 / \text{m}$. Tämä asia on esitetty Eurokoodeissa kaavan sisällön selityksissä. Asian täytyy kuitenkin huomioida, jos tekee kaavalle yksikköanalyysin [3 s. 595].

Kaavaa 2.10 voidaan käyttää yhteen suuntaan kantavan laatan ominaisvärähtelyn laskentaan

Kaavaa tarkastaessa voidaan todentaa edellä ilmi tulleen asian johdosta, että yksikkötarkastelussa kaava ei toimi täydellisesti ilman että neliöjuuren jakoviivan alapuolelle lisätä s tekijää, joka vastaa lattiapalkkien välistä etäisyyttä. Tällöin kaavan mukaan laskettaessa saadaan yksiköksi $1/s$ eli Hz kuten kaavassa 2.11 ja sen yksikköanalyysissä selviää. RIL kirjassa Puurakenteiden suunnitteluohje

todetaan, että seuraavaa kaavaa tulisi käyttää lattiarakenteen alinta ominaistaajuutta laskettaessa [9 s.197].

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{s m}} \quad (2.11)$$

Kaavasta 2.11 tehty yksikköanalyysi näyttää seuraavalta

$$[f_1] = \frac{1}{m^2} \sqrt{\frac{kg \cdot m \cdot m^4 \cdot m^2}{m \cdot s^2 \cdot m^2 \cdot kg}} \rightarrow \frac{1}{s} \rightarrow Hz$$

2.7 Kahteen suuntaan kantava laatta

Eurokoodien Suomen kansallisen liitteen mukaan kahteen suuntaan kantavan lattiarakenteen ominaisvärähtely tulisi laskea kaavan 2.12 mukaan.

$$f_1 = \frac{\eta}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \cdot \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (2.12)$$

2.8 Pistekuorman aiheuttama taipuma

Lattiapalkin kohdalla 1 kN pistekuorman aiheuttama lattian painuma voidaan yhteen suuntaan kantavan rakenteen tapauksessa laskea lausekkeesta 2.13.

$$\delta = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Fl^2}{42 \cdot k_\delta \cdot (EI)_l} \\ \frac{Fl^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} \end{array} \right. \text{ missä} \quad (2.13)$$

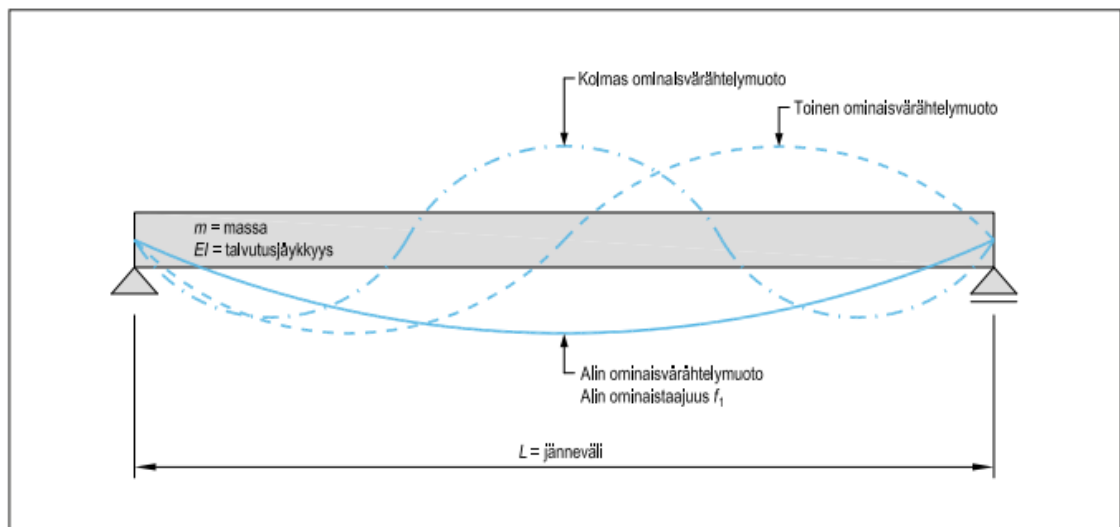
$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad \text{rajoituksena } k_\delta < b/L \quad (2.14)$$

Neljältä sivulta tuetulle laatalle voidaan käyttää lauseketta 2.14. Tällöin kerrointa k_δ ei tarvitse rajoittaa tekijällä b/L [10 s.19].

2.9 Rakenteiden muut ominaisvärähtelymuodot

Kappaleen ominaistaajuus on taajuus, millä kappale värähtelee niin, että värähtely on voimakkaimmillaan ja suurinta amplitudia on saavutettu.

Kappaleella ominaistaajuuden yläpuolella löytyviä muita ominaistaajuuksia kutsutaan taajuuden monikerroiksi. Jokaisella ominaistaajuudella on myös ominaisvärähtelymuotoja kuvan 10 mukaan. Ominaistaajuus on riippuvainen rakennusosan tai rakennusosakokonaisuuden niin sanotun systeemin mitoista, massasta ja jäykkyydestä. Rakentamisessa ominaistaajuutta tarvitaan muun muassa äänieristys suunnittelussa, välipohjan värähtelysuunnittelussa, rakennuksen rungon värähtelysuunnittelussa ja tärinää aiheutuvien laitteiden kiinnityksen suunnittelussa [6 s.11].



Kuva 10. Esimerkkejä yksiaukkoisen rakennusosan värähtelymuodoista [6 s.12].

Tässä tutkimuksessa tutkitaan välipohjan alinta ominaisvärähtelyä ja muut ominaisvärähtelymuodot voidaan tästä syystä rajata tutkimuksen ulkopuolelle.

2.10 Rakenteiden värähtelyä koskevat määräykset ja ohjeet

Suomessa kävelystä aiheutuva lattioiden värähtely puurakenteiden suunnittelussa käytetään Suomen ympäristöministeriön mukaan Standardin SFS-EN 1995-1-1 kansallista liitettä NCCI 2. Tämä liite korvaa standardissa kohdan 7.3.3 täyttäen siinä kaikki esitetyt kriteerit.

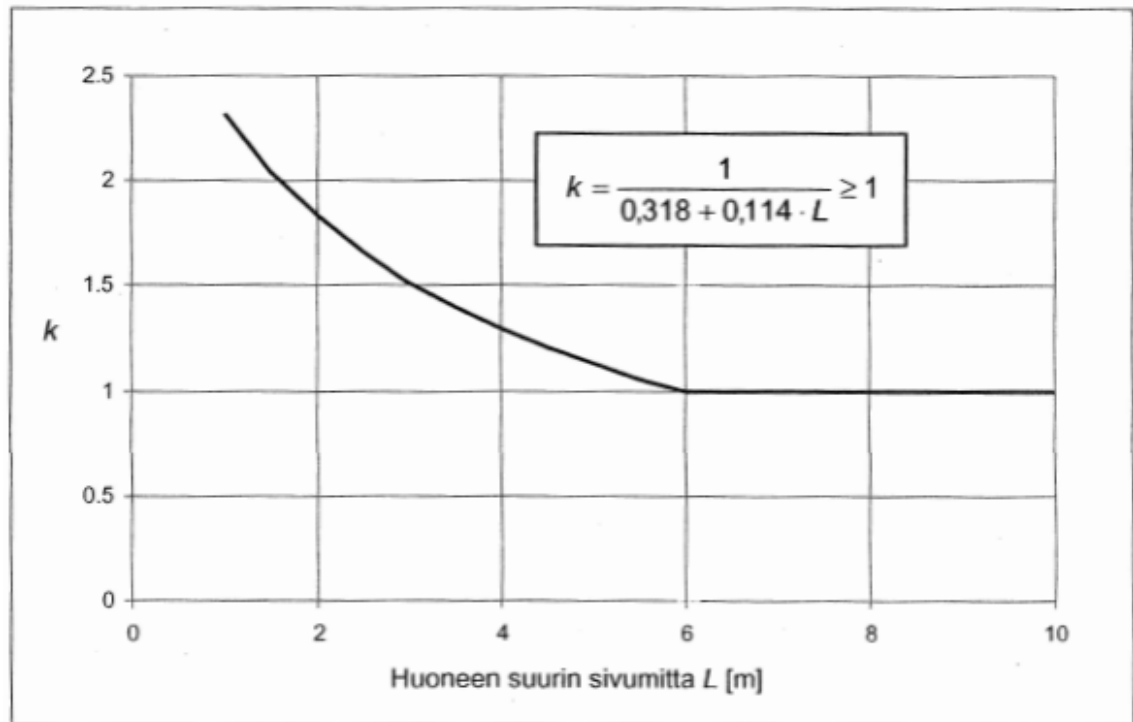
Värähtelytarkastelu suoritetaan käyttörajatilassa. Tämä tarkoittaa, että jos kriteerit eivät täyty ja joudutaan sen takia tekemään rakenteen osalta erityistarkastelu, rakenne ei ole sortumassa vaan sen käyttömukavuus saattaa olla kyseenalaista.

Asuinkäytössä pysyvästi olevat tai toimistohuoneistojen osalta sovelletaan seuraavat kriteerit.

- asuin- tai toimistohuoneistojen lattiarakenteen alin ominaistaajuus on 9 Hz. [$f_1 > 9$ Hz] muuten erityistarkastelu on tarpeen, mitä erityistarkastelu tarkoittaa ei ole selitetty.
- kun asuin- tai toimistohuoneiston lattiarakenteen alin ominaistaajuus on > 9 Hz, tarkistetaan, että seuraava ehto toteutuu

$$\delta \leq 0,5 \text{ mm} \quad (2.15)$$

missä δ on 1 kN staattisen pistevoiman aiheuttama suurin hetkellinen painuma lattiapalkin kohdalla. Pienillä huonetiloilla sallittua 0,5 mm:n taipumaa voidaan korottaa kuvan 11 kertoimella k [10 s.18].



Kuva 11. Huoneen koosta riippuva taipumarajoituksen korotuskerroin k [9 s.100].

2.11 Lattioiden värähtelyyn liittyvät raja-arvot Euroopassa

Euroopassa käytetään yleisesti asuin- ja toimistohuoneistojen välipohjien värähtelyn raja-arvona > 8 Hz, Suomi on ainoa maa, jossa raja-arvo on >9 Hz. Kaikissa Euroopan maissa käytetään samaa kaavaa, kun lasketaan yhteen suuntaan kantavan lattiarakenteen alinta ominaisvärähtelyn taajuutta.

Suomi ja Itävalta käyttävät kahteen suuntaan kantavissa välipohjarakenteissa muita Euroopan maita tarkempia laskentakaavoja. Itävallassa otetaan huomioon L/B kerrointa ja sen poikittaissuuntaista jäykkyyttä, Itävallan laskentatavassa jätetään kuitenkin $[L/B]^2$ kerroin huomioimatta. Suomessa käytetään neljään seinään tukeutuvan lattiarakenteen ominaisvärähtelyn laskelmissa sekä toisen että neljännen asteen lukuja L/B :n suhteen laatan poikittaisjäykkyyttä määrittäessä [3 s. 569].

1 kN pistekuorman aiheuttamaan taipumaan laskentakaavoja ei löydy Eurokoodista. Kaava löytyy vaan joidenkin maiden kansallisissa liitteissä. Näyttää olevan niin että vain Itävalta, Suomi, Irlanti ja Iso-Britannia ovat lisänneet laskentakaavat tämän taipuman laskemista varten. Kansallisissa liitteissä taipuma sallitaan olevan 0,5 mm ja 4 mm välillä. Kansallisten liitteiden perusteella mailla on taulukon 2 mukaiset raja-arvot 1 kN pistekuorman aiheuttaman taipuman suhteen [3 s. 596].

Taulukko 2 Euroopan maiden 1 kN pistekuorman taipuman raja-arvot [3 s. 596].

Maa	Taipuman laskentakaava	Raja- arvo [mm/ kN]
EC5-1-1	Ei määritelty	0,5–4
Itävalta	$W = \frac{FL^3}{48(EI)_1 b_F}$ $b_F = \frac{L}{1.1} \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}}$	1,5 ja 1,0 jos vaikutta vie-reisiin rakenteisiin
Belgia	Ei määritelty	Ei määritelty
Tanska	Ei määritelty	Ei määritelty
Suomi	$w = \min \left\{ \frac{FL^2}{42k_s(EL)_L} \right\}$ $k_s = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \text{ rajoituksena } k\delta < b/l$	0,5k kun $L \leq 6000$ $k=0,5$ kun $L > 6000$ Uiville ja korotetuille latti-oille 0,5 mm lisäys sallittu [k arvo katso kuva 11]
Ranska	Ei määritelty	$1,3 \pm 0,3$
Saksa	Ei määritelty	Ei määritelty
Irlanti	$W = \frac{1000 k_{dist} L_{eq}^3 k_{amp}}{48 (EI)_{joist}}$ $k_{dist} \geq 0.30$ $k_{amp} = 1.05-1.45$	1,8 kun $L \leq 4000$ $16,500 / L^{1.1}$ kun $L > 4000$
Italia	Ei määritelty	1,0
Alankomaat	Ei määritelty	1,0
Norja	Ei määritelty	0,9 tavanomaisille raken-teille 0,6 vaativille raken-teille mutta ainoastaan kun $L \leq 4500$
Espanja	Ei määritelty	Ei määritelty
Ruotsi	Ei määritelty	1,5
Iso- Britannia	$W = \frac{1000 k_{dist} L_{eq}^3 k_{amp}}{48 (EI)_{joist}}$ $k_{dist} \geq 0.30$ $k_{amp} = 1.05-1.45$	1,8 kun $L \leq 4000$ $16,500 / L^{1.1}$ kun $L > 4000$

Useat Euroopan maat ovat asettaneet raja-arvoja yksikköimpulssin aiheuttaman värähtelyn nopeuden alkuarvon suhteen. Suomen kansallisessa liitteessä tähän arvoon ei enää oteta kantaa. Laskentakaava kyseiselle arvolle löytyy Eurokoodeista.

3 Rakenteet

3.1 CLT-levy

Ristiin liimatuista lautakerroksista koostuva laatta kutsutaan CLT:ksi eli Cross Laminated Timber. Tuote saattaa koostua kolmesta tai jopa seitsemästä kerroksesta ja kerroksien määrä on aina pariton numero. CLT-rakennelevyt ovat hyvin paloa kestäviä, sekä lujia, jäykkiä ja kevyitä kantavuutensa nähden.

Raaka-aineena CLT-levyissä käytetään tavallisesti mäntyä tai kuusta. Näkyviin jäävissä pinnoissa voidaan asiakkaan niin toivoessa käyttää myös muita puulajeja, saavuttaakseen näin toiveiden mukaisen esteettisen kokonaisuuden. CLT-levyihin käytettävä materiaali lajitellaan lujuuden perusteella ja sormijatketaan.

CLT-levyjen valmistustapoja on useita. Yleisesti käytetty tapa on liimata laudat toisiinsa tyhjiön avulla, näin etenkin Keski-Euroopassa. Levyjä voidaan myös valmistella puristamalla liimatut kappaleet prässien avulla. Liimaustapoja löytyy kaksi. Lautakerrokset liimataan ensin ehyiksi syrjistään niin sanotussa syrjäliimatussa levyssä. Tämän jälkeen levyt liimataan tasot ristissä päällekkäin toisiinsa.

Levyt voidaan myös valmistella ilman syrjäliimausta. Tässä tapauksessa lautoihin levitetään liimaa vain lappeelle ennen kuin ne ladotaan ristiin. Liimaustavalla on vaikutusta levyjen ominaisuuksiin. Syrjäliimattu levy on täysin ilmatiivis mutta kuivuminen voi aiheuttaa lautojen halkeilua. Syrjistään liimaamaton levy ei ole täysin ilmatiivis ja kosteuseläminen voi tapahtua levyissä sumojen kohdilla [11].

CLT Plant Oy, Oy CrossLam Kuhmo Ltd ja CLT Finland Oy toimivat suomessa CLT levyjen valmistajina. Myös Stora Enso toimittaa CLT-levyä Suomeen. CrossLam valmistaa ei-syrjäliimattuja levyjä. Levyn dimensiot ja valmistustekniikka vaihtelevat valmistajakohtaisesti. Levyn pituus voi olla enintään 12–20 m, paksuus voi olla 60–400 mm ja leveys enintään 2,95–4,8 m valmistajasta riippuen [11].

CNC-jyrsimen avulla työstetään liimauksen jälkeen levyt oikeaan kokoon ja muotoon. Levyihin työstetään myös valmiiksi ikkuna- ja oviaukot, kiinnitysten, talotekniikan ja nostojen yms. tarvitsemat lävistykset. Mittatarkkuus on +/- 1 mm.

Levyn käyttökohde määrittää levyn pintakäsittelyn ja viimeistelyn. Näkyviin jäävät pinnat voidaan pintakäsitellä valmiiksi tilauksen mukaisesti jo tehtaalla. Seinä- ja lattiarakenteissa voidaan käyttää CLT-levyjä sekä kantavina että jäykistävinä rakenneosina. Palomääräysten salliessa voidaan sisätiloissa jättää CLT-levyjen pinnat sellaisenaan ja levyistä voidaan myös muotoilla mittatarkkoja sisustuksellisia rakennuselementtejä, jos se on sisustussuunnitelman perusteella hyödyksi. Ikkunat ja ovet voidaan sijoittaa hyvin vapaasti julkisivuissa, ja kulmaikkunat onnistuvat levymäisten rakenteiden toimivan tarvittaessa ulokkeina.

Ulkoseinissä levyt eristetään normaaliin tapaan siten, että eriste sijoitetaan levyn ulkopuolelle.

Välipohjissa levyjä voidaan käyttää joko sellaisenaan, liittorakenteena betoniva-lun kanssa ja yhdessä puupalkiston kanssa. Puu toimii liittorakenteessa palosuo-jana, äänieristeenä toimii betoni- tai kipsivalu ja liittorakenteella saavutetaan kan-tavuus. Uivilla lattiakerroksilla voidaan korvata liittorakennetta ja levyjä pystytään jäykistämään palkeilla. Pelkkiä CLT-levyjä voidaan käyttää kohteissa, joissa väli-pohjan ääneneristävyydelle ei ole asetettu kovia vaatimuksia.

Keski-Euroopassa CLT-levyjen käyttö on hyvin suosittua koska näillä alueilla käyttäjät ovat tottuneet massiivisiin rakenteisiin. CLT-levyjen käyttö on myös kas-vamassa. CLT sopii hyvin esimerkiksi tilaelementtien runkorakenteeksi. CLT-le-vyn kilpailukyky runkorakenteena paranee kerrosmäärän kasvaessa.

CLT-levyt voidaan CE-merkitä eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan koska niillä ei ole olemassa harmonisoitua eurooppalaista tuotestandardia. CLT-levyn tekniset ominaisuudet ja rakenteiden mitoitus ovat valmistajakohtaisia [11].

3.2 CLT-laatan koolauksen vaikutus

Tässä tutkimuksessa päämääränä on tarkastella CLT välipohjalaatan alapuolisen koolauksen vaikutus kyseisen rakenteen ominaisvärähtelyyn. Alapuolisen koolauksen vaikutus on suurilta osin taivutusjäykkyyden kasvaminen koolauspoikkileikkauksen pinta-alan ja erityisesti koolauskappaleiden korkeuden perusteella. Koolauksen kiinnitystavalla on myös vaikutusta rakenteen kokonaistaivutusjäykkyyden muodostamiseen.

Koolauksen vaikutus vaihtelee myös koolauskappaleen kimmokertoimen mukaan. Taulukossa 3 esimerkkejä puulaatujen kimmokertoimista.

Taulukko 3. Puulaatujen tiheydet ja kimmomoduulit [9 s. 51]

Puun lujuusluokka	Tiheys keskiarvo ρ_m [kg/m ³]	Kimmomoduuli $E_{0,mean}$ [N/mm ²]
C14 (T0)	350	7000
C18 (T1)	380	9000
C24 (T2)	420	11000
C30 (T3)	460	12000

Työmailla useimmin käytetty puun lujuusluokka rakenteellisissa osissa on C24.

Levyjen valmistajien tuotetiedoista voi joidenkin osalta löytää informaatiota materiaalin tiheydestä mutta sitä ei aina ole selkeästi esitetty. Tiheys tarvitaan, kun laskee ruuvien liukukerroin K_{ser} arvoa ja rakenteen omapainoa laatan kuormitukseen, joka on osa ominaisvärähtelyn laskentakaavaa.

3.3 Koolauksen kiinnikkeiden vaikutus

Koolauslankkujen kiinnitystapa vaikuttaa rakenteen taivutusjäykkyyteen. Kun koolauslankut liimataan hallituissa olosuhteissa mitkä voi verrata tehdasolosuhteisiin voidaan laskea poikkileikkauksen kokonaisena kappaleena. Tällöin kerroin

γ_i on yhtä kuin yksi ja taivutusjäykkyys on suurempi kuin esimerkiksi kiinnitys ruuveilla.

RIL:in kirjassa 205–1–2017 on ohjeistettu palkeista ja levyistä valmistetuille lattiarakenteelle, että kun liimaus suoritetaan työmaalla, saa liittovaikutuksesta hyödyntää 50 % kaavan 3.1 mukaan jolloin

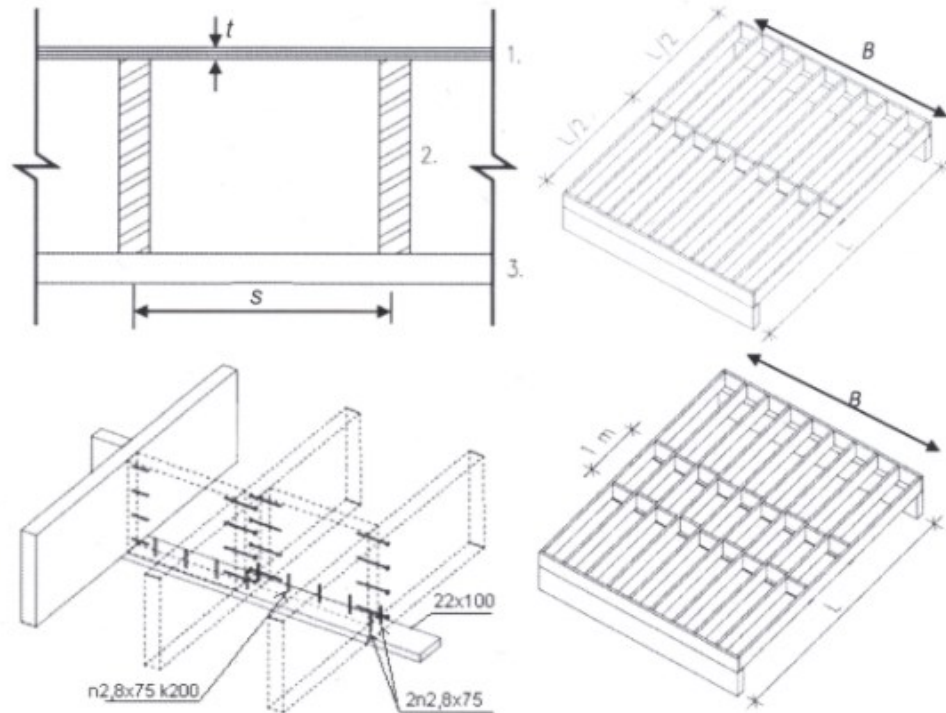
$$EI_L = 0,5 ((EI)_P + (EI)_T) \quad (3.1)$$

kun $(EI)_P$ on palkin ja $(EI)_T$ on T- poikkileikkauksen taivutusjäykkyys [9 s.197].

T-poikkileikkauksen taivutusjäyhyydelle voidaan värähtelymitoituksessa käyttää kaavan 3.2 likiarvoa, kun välipohjan rakenne kuvan 12 mukainen.

$$(EI)_T = (2,2 - 0,1 \cdot L) \cdot (0,4 + 2) \cdot (EI)_P \quad (3.2)$$

Kaava 3.2 pätee kun lattiapalkin leveys on pienempi kuin 50 mm. Kaavan 3.2 taivutusjäyhyys pienennetään kertoimella $k = 1,15 - 0,003 \cdot b$ jos lattiapalkin leveys on 50 mm ja 100 mm välillä. Palkin leveys on tällöin b millimetreissä [9 s.197].



Kuva 12. Palkkirakenteinen poikkijäkistetty välipohja missä $L < 7,2$ m [9 s.198].

3.3.1 Ruuvikiinnitys

Puikkotyypisellä, kuten ruuvikiinnityksellä, taivutusjäykkyyden laskeminen aloitetaan selvittämällä ruuvien ansiosta tapahtuva kappaleiden välinen liukuma, kun rakennetta kuormitetaan. K_{ser} suure kertoo ruuvikohtaisesti tämän taulukossa 4 kun puikkojen asento on kohtisuoraan puusyitä vastaan.

Taulukko 4. Kahden puuosan tai puulevyn ja puuosan välisessä liitoksessa käytettävien liittimien siirtymäkertoimen K_{ser} arvot [N/mm] [9 s. 97].

Liitintyyppi	K_{ser}
Tappivaarnat Välykselliset tai välyksettömät pultit ^a Ruuvit Naulat (reikä esiporattuna)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Naulat (ilman esiporausta)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Hakaset	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Standardin EN 912 tyyppin A mukaiset rengasvaarnat Standardin EN 912 tyyppin B mukaiset lautasvaarnat	$\rho_m d_c/2$
Hammasvaarnat	
– Standardin EN 912 tyyppien C1...C9 mukaiset hammasvaarnat	$1,5\rho_m d_c/4$
– Standardin EN 912 tyyppien C10...C11 mukaiset hammasvaarnat	$\rho_m d_c/2$
^a Välyks lisätään erikseen liittimen kohdalla syntyvään osien väliseen siirtymään.	

ρ_m tiheyden keskiarvo

d liitintyyppin halkaisija

Jos liitokset tehdään puun ja teräksen tai betonin välissä taulukon 4 arvot kerrotaan kahdella ja kaavoissa käytetään puuosan tiheydet $\rho_m = \rho_{mean}$.

Edellisen taulukon arvot pätevät, kun ruuvit ovat syitä kohtisuoraan kuvan 13 mukaan.

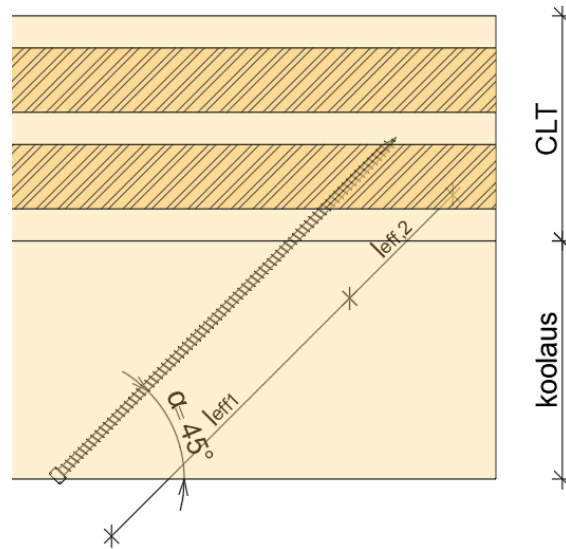


Kuva 13. Kaksi kappaletta yhdistetty ruuveilla, ruuvattu yläpuolelta [13 s. 19].

Jos liitettävien puurakennneosien keskimääräiset tiheydet ovat erilaiset suure ρ_m korvataan yhtälöllä 3.3.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m1} \cdot \rho_{m2}} \quad (3.3)$$

Jos ruuvit ovat esimerkiksi 45 asteen kulmassa kuvan 14 mukaisesti pätee seuraavat kaavat.



Kuva 14. 45° kulmassa ruuvatun täyskierreruuvien pituussuuntaiset suureet.

Esimerkkinä voidaan esittää 7 mm täyskierreruuvien pituus on 300 mm ja koolauksen korkeus on 148 niin saadaan l_{eff} pituudet kaavojen 3.4 ja 3.5 mukaan seuraavasti

$$l_{eff,1} = \sqrt{2} \cdot 148 - 15 = 194,3 \text{ mm} \quad \text{ruuvien pää vähennetty pituudesta} \quad (3.4)$$

$$l_{eff,2} = 300 - \sqrt{2} \cdot 148 - 8 = 82,7 \text{ mm} \quad \text{ruuvien kärjen osa vähennetty} \quad (3.5)$$

Kanadalaisen ruuvinvalmistajan mukaan, K_{ser} lasketaan 45 asteen kulmassa ruuvatun ruuvien kohdalla kaavalla 3.6 [13 s. 21].

$$K_{ser} = \frac{780 \cdot d^{0,2}}{\frac{1}{l_{eff,1}^{0,4}} + \frac{1}{l_{eff,2}^{0,4}}} \quad (3.6)$$

Esimerkin ruuvien K_{ser} arvo laskettu kaavassa 3.7.

$$K_{ser} = \frac{780 \cdot 7^{0,2}}{\frac{1}{194,3^{0,4}} + \frac{1}{82,7^{0,4}}} = 3935 \text{ N/mm} \quad (3.7)$$

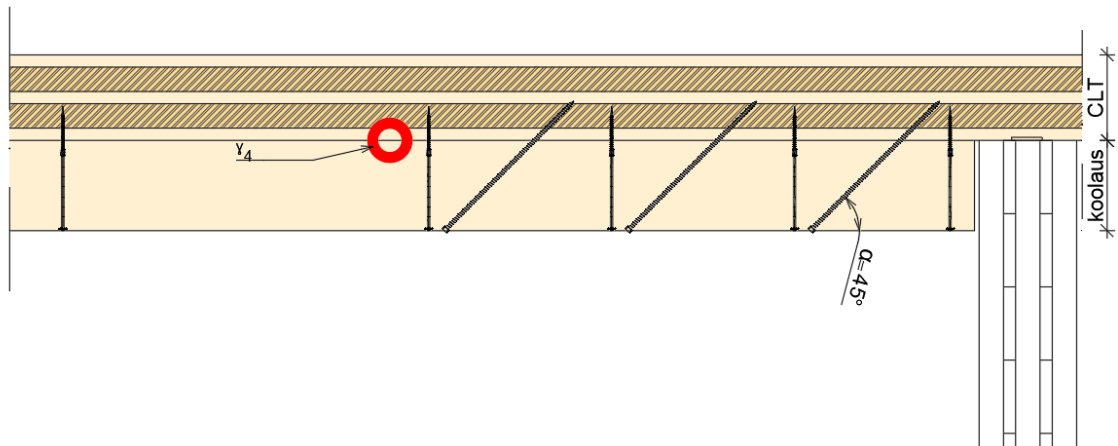
Kyseistä arvoa käytetään laskelmissa, joissa selvitetään useasta kappaleesta koostuvan osan tehollisen jäyhyysmomentin.

Kanadalaisvalmistajan ohjeissa viitattiin vinojen ruuvien laskentakaavan osalta lähteeseen: Holzbau: Grundlagen und Bemessungen nach EC5, Springer Vieweg p.290/291.

Jäyhyysmomenttia laskiessa otetaan huomioon siirtymäkertoimen laskemalla koko liitoksen heikkeneminen kaavan 3.8 mukaan.

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2}} \quad (3.8)$$

Tekijä s_i on tässä tapauksessa liittimien välit. Jos kiinnitettäviä osia on useampia, määritetään liitinväli s_i kyseisissä liitospinnoissa vaikuttavien liittimien yhteismääränä pituusyksikköä kohti Eurokoodien mukaan. γ_i kerrointa käytetään kaavoissa 4.4 ja 4.5 tehollisen jäyhyysmomentin ja neutraaliakselin siirtymää laskettaessa. Kuvassa 14 esitetty, missä kohtaa koolauksen vaikuttava γ_4 esiintyy poikkileikkauksessa, CLT-laatan ja koolauksen välissä. Tässä kohtaa täytyy ottaa kiinnikkeiden muodostama sauman kappaleiden keskinäisen liukumisen vaikutus huomioon laskelmissa.



Kuva 15. Liitoskohta, missä koolauksen liukukerroin vaikuttaa.

3.3.2 Kulmarautakiinnitys

Tutkimuksessa käytetään myös kulmarautakiinnitystä missä ankkuriruuvit ovat kooltaan 5 x 40 mm. Päissä käytetään 240 mm pitkiä kulmarautoja molemmin puolin koolausta mihin ruuvataan 15 ruuvia ylöspäin ja 15 ruuvia sivulle. Keskellä lankkua käytetään 65 x 65 x 90 mm kulmarautoja molemmin puolin minkä jako on 850 mm ja ruuvataan 5 + 5. Esimerkkilaatan, minkä jänneväli 4700 mm, kohdalla 240 mm kulmarautoja on 4 kpl ja 65 mm kulmarautoja on 8 kpl koolauslankkua kohden. Ruuveja on laatan ja kulmaraudan kiinnityksessä 100 kpl ja koolauslankun ja kulmaraudan kiinnityksessä myös 100 kpl.

Kun lasketaan ruuvien K_{ser} arvoa $(\rho_m^{1,5} d) / 23$ kaavalla kuten taulukossa 4 ohjeistetaan, lasketaan ensin kulmaraudan ja CLT levyn liitos ja sitten kulmaraudan ja koolauksen liitos. Kun käytetään CLT-laatan tiheyttä 470 kg/ m³ niin K_{ser} on kaavan 3.9 mukaan

$$K_{ser} = \frac{(470 \frac{kg}{m^3})^{1,5} \cdot 5 \text{ mm}}{23} = 2215 \text{ N/mm} \quad (3.9)$$

Koolauksen osalta, kun tiheydeksi määritetään 420 kg/ m³ on kaavan 3.10 mukaan

$$K_{ser} = \frac{(420 \frac{kg}{m^3})^{1,5} \cdot 5 \text{ mm}}{23} = 1871 \text{ N/mm} \quad (3.10)$$

Koska liitokset tehdään teräksen ja puun välillä kerrotaan lasketut K_{ser} arvot kahdella. CLT-laatan ja kulmarauta liitoksen sauman γ_4 lasketaan kaavan 3.8 mukaan, niin kuin kaavassa 3.11, kun ruuvien väli on $4700 \text{ mm} / 100 \text{ kpl} = 47 \text{ mm}$ ja koska koolauksia on 1450 mm leveydellä 3 kappaletta niin koolauksia per metri löytyy $3 \text{ kpl} / 1,45 \text{ m} = 2,07 \text{ kpl} / \text{m}$. Koolauksen osalta lasketaan jäyhyysmomentti yhteen, joten kulmarautojen ruuvien suhteen voidaan laskea RIL:in ohjeen mukaan $47 \text{ mm} / 2,07 = 22,7 \text{ mm}$.

$$\gamma_4 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 12500 \cdot 20000 \cdot 22,7}{2 \cdot 2215 \cdot 4700^2}} = 0,635 \quad (3.11)$$

Kulmaraudan ja koolauksen sauman γ_4 on saman periaatteen mukaan kaavassa 3.12.

$$\gamma_4 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 12500 \cdot 20000 \cdot 47}{2 \cdot 1871 \cdot 4700^2}} = 0,596 \quad (3.12)$$

Ruuvien määrä ollessaan sama molemmissa saumoissa voidaan laskea γ_4 kokonaisarvo ruuvimäärien osuuksien mukaan seuraavasti kaavan 3.13 mukaan.

$$\gamma_4 = 0,635 \cdot \frac{100}{200} + 0,596 \cdot \frac{100}{200} = 0,615 \quad (3.13)$$

Edellisessä on esitetty, miten kaavat käytännössä käytetään. Tulokset edellisistä laskelmista käytetään seuraavassa osiossa ruuvien osalta ominaisvärähtelylaskelmissa. Edellisessä laskelmassa käytetyt arvot ovat tulevan esimerkin lähtötiedoissa.

4 Tutkimus

4.1 Perustiedot

Tutkimuksessa lasketaan ensiksi mitattavien rakenteiden ominaisvärähtelyn taa-juutta. Laskelmat suoritetaan tässä tutkimuksessa RIL 205-1-2017 CLT-laattavalmistajien lisäyksessä esitetyllä tavalla ja Stora Enson ripalaattalaskentaohjeiden mukaisesti. Laskelmien perusteella selviää rakenteiden pituudet, jotka täyttävät värähtelyn standardit ilman koolauksia. Näille jänneväleille lasketaan myös koolauksien vaikutus. Tällä tavalla saadaan enemmän vertailuarvoja, joilla pystyy vertailemaan laskettujen tulosten paikkansapitävyyttä verrattuna mitattuihin tuloksiin.

Kun osan värähtely saadaan mittaamalla selville, pidennetään jänneväliä niin isoksi, että rakenne koolauksen kanssa pystyisi läpäisemään asetetut vaatimukset laskentatulosten perusteella. Jos mittaustulokset ovat hyväksyttävällä puolella, voidaan todeta, että laskentamenetelmän tuloksiin pystyy luottamaan ja käyttämään tulevaisuudessa puurakenteisten välipohjien värähtelymitoituksessa. Mittauksia on suoritettava mahdollisimman paljon saadakseen tulosten määrän perusteella myös selville mittaustulosten mahdollinen vaihtelu ja luotettavuus.

Mittaukset suoritetaan CLT-laatoille 140-L5-20 jonka valmistaja on CLT Plant Oy ja CrossLam Kuhmon valmistama L5-200–40. Koolausvaihtoehtoina käytetään 48 x 148 mm² ja 48 x 98 mm² soiroja. Laskelmien mukaan käytetään jännevälejä CLT 140 kohdalla 3700 mm ja 4700 mm. CLT 200 osalta käytetään jännevälejä 4900 mm, 5400 mm ja 5600 mm.

CLT-laatan ominaisvärähtelyä lasketaan 1 m leveänä osana. 1 kN pistekuorman taipuman laskennassa käytetään yhtälöiden mukaan laatan kokonaisleveyttä. Pistekuorman taipuman laskelmia ei käydä tässä läpi koska tutkimuksen aiheena on ominaisvärähtely.

Laskelmien selkeyttämiseksi käytetään esimerkkinä CLT Plantin valmistamaa CLT-laattaa, jonka kohdalla lasketaan ominaisvärähtely ensin ilman koolausta ja

sitten koolauksella. Ruuvatun koolauksen laskelmat suoritetaan ensin tavalla, missä lasketaan kaikki osat erikseen. Tämän jälkeen tehdään laskelma T-poikkileikkauksena missä lasketaan ensin CLT-laatan osalta tehollinen jäyhyysmomentti ja tämän jälkeen yhdistetään osat jäyhyysmomentin laskennan osalta. Lopuksi lasketaan poikkileikkaus ripalaattana.

Laskelmassa käytetyt arvot perustuvat mittauksissa käytettyyn CLT laattaan. Laatta on CLT Planti Oy:n valmistama 140 mm paksu L rakenteinen levy mikä tarkoittaa, että pintakerrokset ovat pituussuuntaisia. CLT laatan ominaisuuksien arvot ovat peräisin CLT Planti Oy:n ETA arvioinnista. Kyseinen dokumentti, ETA 20/1292 päivitetty 21.12.2020, toimitettiin valmistajan toimesta.

Kuormien osalta sovittiin opinnäytetyön toimeksiantajan kanssa, että CLT laatan päällä olisi uiva betonilaatan vastaava paino. Muut kuormat koostuvat rakenteiden omapainosta.

Laskelmassa jännevälin mitta perustuu tehtyihin laskenta-arvioihin, missä laskettu potentiaalinen pituus missä ominaistajuus pysyisi yli 9 Hz käytetyllä koolauksella.

CLT laatta	140 L20	
		paksuus 140 mm ja kerrokset 20 40 20 40 20
d ₁		20 mm
d ₁₂		40 mm
d ₂		20 mm
d ₂₃		40 mm
d ₃		20 mm
A ₁		20000 mm ²
A ₂		20000 mm ²
A ₃		20000 mm ²
laatan kokonaisleveys	b _k	1450 mm
laskentaleveys	b	1000 mm
jänneväli laatan osalta	L	4700 mm
kimmomoduuli CLT	E _{0,mean}	12500 N/mm ²
kimmomoduuli koolaus	E _{0,mean}	11000 N/mm ²
liukumoduuli	G _{R,mean}	50 N/mm ²
liukumoduuli syysuunta	G _{0,mean}	690 N/mm ²
laatan tiheys	ρ _m	470 kg/m ³
laatan omapaino		65,8 kg/m ²
koolaus 48 x 148 C24 k600		6,7 kg/m ²
muun rakenteen omapaino		140 kg/m ²
muuttuvan kuorman osuus		30 kg/m ²
laattaan vaikuttava massa 1 m leveydeltä		242,5 kg/m²

Vertailuna liimaus missä γ arvona käytetään 1

Koolausten liittämistapojen mahdollinen vaikutus haluttiin myös selvittää. Tutkittiin ruuvikiinnitys, kulmarautakiinnitys ja liimaus vaihtoehtoja ja niiden mahdollinen vaikutus kokonaisen rakenneosan värähtelyyn.

4.2 CLT-laatan ominaisvärähtelyn laskeminen

CLT-laatan ominaisvärähtelylaskentaa hankaloittavat kerrokset, missä puuosat on asetettu niin, että puun syyt ovat poikkisuunnassa. Puuosat kestävät puristusta syitä kohtisuoraan huomattavasti huonommin kuin syiden suuntaisesti. Kun puhutaan vetojännityksestä puunsyitä kohtisuorassa suunnassa, niin kestävyys on todella heikkoa. Tämä tarkoittaa, että puuosat missä on jännitys puunsyiden kohtisuorassa suunnassa ovat alttiita muuttamaan muotoaan helpommin kuin puunsyiden suunnassa jännitetyt osat.

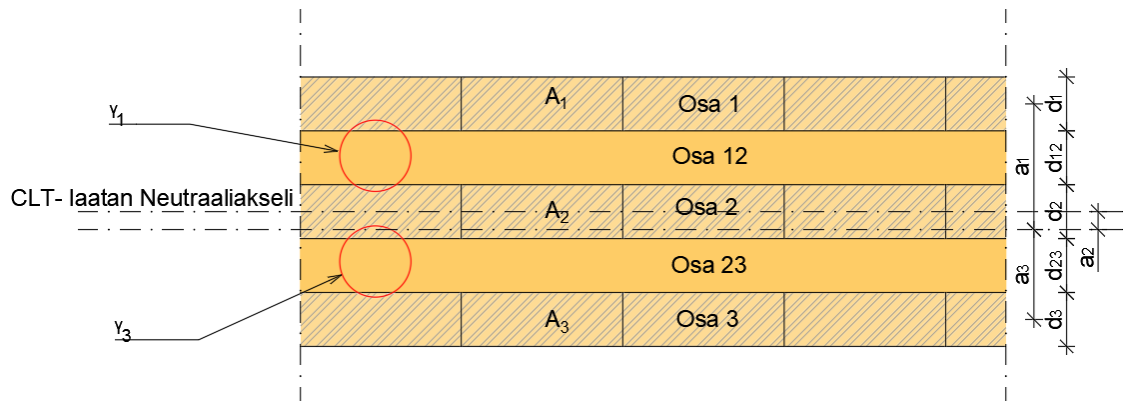
4.2.1 Ominaisvärähtely lasketaan käyttörajatilassa

Rakenteiden ominaisvärähtely saattaa jossain tilanteessa aiheuttaa ihmiselle epämiellyttävän tunteen mutta rakenteen romahtamisvaaraa se ei normaalisti aiheuta. Tämän takia ominaisvärähtelyä lasketaan käyttörajatilassa.

Tämä tarkoittaa, että laskelmissa rakenteiden omapainoa lasketaan omana arvona ilman varmuuskertoimia ja hyötykuorman osuus on esitetty käytettäväksi asunto- ja toimistokiinteistöissä ominaisvärähtelyä laskettaessa 30 kg/m^2 , niin kuin esimerkin tiedoissa on esitetty.

4.2.2 Pelkän CLT-laatan ominaisvärähtelyn laskeminen

Kun lasketaan CLT-levyn taivutusjäykkyyttä, nämä poikittaiset kerrokset on otettava huomioon poikkileikkauksen jäyhyysmomentin pienenemisenä. Laskettaessa CLT-välipohjalaatan ominaisvärähtelyä voidaan käyttää kaavaa 2.11. Kuvassa 16 käy ilmi, missä kohtaa kertoimet vaikuttavat ja millä symboleilla poikkileikkauksen mitat on merkitty kaavaan.



Kuva 16. CLT-levyn poikkileikkaus katsottuna pituussuunnassa.

Välipohjarakenteen ominaisvärähtely lasketaan kaavan 4.1 mukaan.

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{s m}} \quad (4.1)$$

Yksittäisten osien jäyhyysmomentti lasketaan kaavan 4.2 mukaisesti.

$$I = \frac{b x h^3}{12} \quad (4.2)$$

Näin esimerkkikappaleen kerrosten I arvot ovat kaavan 4.3 mukaan

$$I_{1,2,3} = \frac{1000 * 20^3}{12} = 666667 \text{ mm}^4 \quad (4.3)$$

CLT-laatta, jossa on 5 kerrosta, tehollinen jäyhyysmomentti lasketaan tekemällä seuraava yhdistely Eurokoodeissa esitettyä yhtälöä 4.4 käyttäen. Kaava perustuu Steinerin sääntöön. Kuten kaavassa käy ilmi, yhteen liimatun tai ruuvatun kappaleen jäyhyysmomentti muuttuu γ - arvon ja α - arvon perusteella.

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^3 I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \quad (4.4)$$

Gamma kerroin kuvaa poikkisuuntaisen kerroksen koko kappaleen pitkittäis-suuntaista jäyhyysmomenttia pienentävää vaikutusta. Gammakertoimet lasketaan RIL 205-1-2017 kaavan 9.B.4 mukaan kaavassa 4.5 esitetyllä tavalla

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2}} \quad (4.5)$$

RIL-205-2017 lisäohjeen mukaan koskien Stora Enson CLT ja CrossLam Kuhmo CLT-rakenteiden osia voidaan käyttää seuraavaa yhtälöä joustavasti kootuissa kerrospalkeissa RIL:in kaavan 3.8.1S mukaan [12 s. 1].

$$\frac{s_i}{K_i} = \frac{d_i}{[G_{R,mean} \cdot b]} \quad (4.6)$$

d_i	poikkittaislamellin paksuus
b	CLT- laatan leveys

Poikkittaislamellien taivutusjäykkyyttä ei huomioida. Täytyy ottaa huomioon, että RIL-205-2017 lisäyksessä sanotaan selkeästi tämän laskentatavan toimivan enintään viisikerroksisille laatoille. Edellisen kaavan perusteella CLT-laatan poikkisuuntaisten kerrosten osalta lasketaan γ_i kaavan 4.7 mukaisesti.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_1 \cdot d_{12}}{G_{R,mean} \cdot b \cdot l^2}} \quad (4.7)$$

Kerrosten d_{12} ja d_{23} osalta γ arvot ovat yhtä suuria ja lasketaan esimerkin osalta kaavan 4.8 mukaan

$$\gamma_{1,3} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 12500 \cdot 20000 \cdot 40}{50 \cdot 1000 \cdot 4700^2}} = 0,917 \quad (4.8)$$

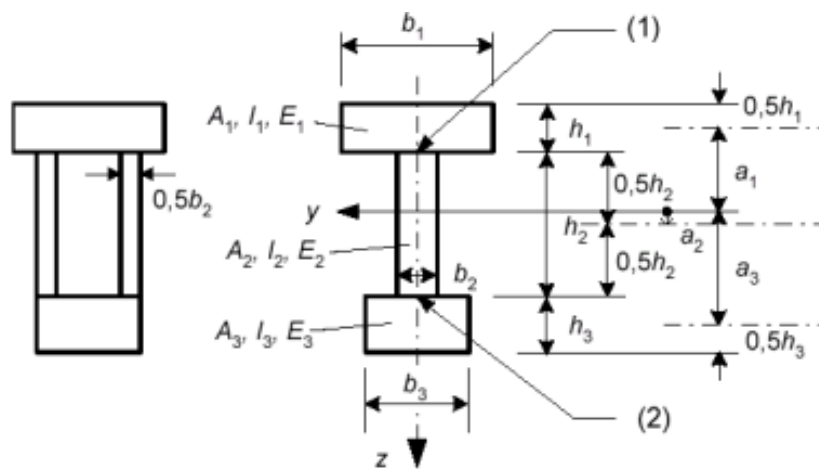
α kerroin kertoo etäisyyden koko kappaleen neutraaliakselin ja laskettavan reu-
nakappaleen pystysuuntaisen neutraaliakselin välillä kaavan 4.9 mukaan.

$$a_1 = \left(\frac{d_1}{2} + d_{12} + \frac{d_2}{2} \right) - a_2 \quad (4.9)$$

Koska CLT- laatan poikkileikkaus on symmetrinen ilman koolausta, $\alpha_2 = 0$ ja $\alpha_1 =$
 α_3 , ja esimerkkipoikkileikkauksen osalta kaavan 4.10 mukaan

$$a_{1,3} = \frac{20 \text{ mm}}{2} + 40 + \frac{20 \text{ mm}}{2} = 60 \text{ mm} \quad (4.10)$$

α_2 on tässä tapauksessa koolauksen aiheuttama epätasapaino, joka aiheuttaa
koko kappaleen neutraaliakselin siirtyminen koolauksen suuntaan, koska kysei-
sessä suunnassa poikkileikkauksen pinta-ala kasvaa neutraaliakselin suhteen.
Kun laatta lasketaan ilman koolausta osat ovat tasapainossa keskenään ja $\alpha_2 =$
0. RIL 205-1-2017 on α_2 laskentakaava esitetty kuvassa 17 ja kaavassa 4.11.



Kuva 17 Palkki poikkileikkaus, jossa esitetty merkinnät RIL-205-1-2017 kirjasta.

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} \quad (4.11)$$

CLT-laatan I_{ef} lasketaan kaavan 4.4 mukaan seuraavasti kaavassa 4.12

$$I_{ef} = 3 \cdot 666667 + 2 \cdot 0,917 \cdot 20000 \cdot 60^2 = 134187939 \text{ mm}^4 \quad (4.12)$$

Laatan taivutusjäykkyys on näin esitetty kaavassa 4.13

$$(EI)_L = 12500 \text{ N/mm}^2 \times 134187939 \text{ mm}^4 = 1,677 \times 10^{12} \text{ Nmm}^2/\text{m} \quad (4.13)$$

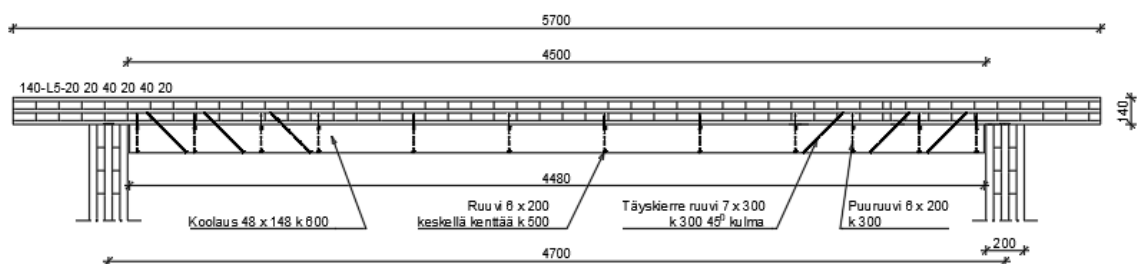
Pelkän CLT-laatan värähtely 4,7 m jännevälillä, kun kuormitus päällä lasketaan aiemmin esitetyllä kaavalla 2.11 kaavan 4.14 mukaan

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot (4,7\text{m})^2} \sqrt{\frac{1677349 \text{ Nm}^2/\text{m}}{1 \text{ m} \cdot 242,5 \text{ kg/m}^2}} = 6,0 \text{ Hz} \quad (4.14)$$

Huomioitavaa on, että edellä lasketulla jännevälillä laatan osalta mitattiin ominaisvärähtelyn taajuudeksi 6,7 Hz. Esimerkissä käytetyllä jännevälillä mitattiin ominaisvärähtelyn taajuuden arvoksi 9,6 Hz kun kiinnitys suoritettu ruuveilla ja 10,0 Hz kun kiinnitys tehty liimaamalla ja koolauksen poikkileikkaus oli 48 x 148 mm².

4.2.3 Ruuvatun liitoksen γ -arvo

γ on koolauksen ja CLT-laatan välisen kiinnityksen liukumakerroin, jolle saadaan arvo 1 jos liimaus on tehty standardien mukaan. Jos koolauskiinnitys tehdään ruuvaamalla, niin kuin kuvassa 17 esitetty, γ lasketaan seuraavasti. Täyskierre-ruuvin 7x300, joka on ruuvattu 45 asteen kulmassa, K_{ser} arvoksi laskettiin aikaisemmin 3935 N/mm.



Kuva 18. Esimerkkilaskelman mitat ja koolauksen kiinnitys.

Pystysuorien ruuvien K_{ser} arvo lasketaan taulukon 4 kaavan mukaan niin kuin kaavassa 4.15 esitetty

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \frac{kg}{m^3} \cdot d}{23} \quad (4.15)$$

CLT-laatan tiheydeksi lasketaan $470 \frac{kg}{m^3}$ ja koolauspuiden, joka on C24, lasketaan $420 \frac{kg}{m^3}$ ja keskimääräinen tiheys kaavan 4.16 mukaan.

$$\rho_m = \sqrt{470 \frac{kg}{m^3} \cdot 420 \frac{kg}{m^3}} = 444,3 \frac{kg}{m^3} \quad (4.16)$$

K_{ser} arvoksi saadaan tällöin 6 x 200 ruuveille kaavassa 4.17

$$K_{ser} = \frac{444,3^{1,5} \frac{kg}{m^3} \cdot 6 \text{ mm}}{23} = 2443 \text{ N/mm} \quad (4.17)$$

Jos koolaus ruuvattu niin kuin kuvassa 17 esitetty, kokonais- s_i / K_i arvoa laskettaessa täytyy ottaa huomioon pystysuoran ja vinoon ruuvattujen ruuvien K_{ser} arvoja osuuksina. Koolauspalkkien lukumäärä leveysmetriä kohti, kun laatta on 1,45 m leveä ja koolauslankkuja on 3 kpl, lasketaan $3 \text{ kpl} / 1,45 \text{ m} = 2,07 \text{ kpl/m}$. Kuten kuvasta 17 näkyy niin pystysuoria ruuveja, on 12 kpl per lankku ja vinoja täyskierre ruuveja on 6 kpl per lankku. Ruuvien kokonaismäärä on siis 18 kpl per lankku. Kun lasketaan K_{ser} per ruuvien osuudet, saadaan pystysuoralle ruuville kaavasta 4.18.

$$K_{ser,pyst} = \frac{2443 \text{ N}}{\text{mm}} \cdot \frac{12 \text{ kpl}}{18 \text{ kpl}} = 1628 \text{ N/mm} \quad (4.18)$$

Ja vinoille ruuveille saadaan kaavasta 4.19.

$$K_{ser,vino} = \frac{3935 \text{ N}}{\text{mm}} \cdot \frac{6 \text{ kpl}}{18 \text{ kpl}} = 1312 \text{ N/mm} \quad (4.19)$$

Kun laatta lasketaan 1 m leveänä osana ja koolauksia on 2,07 kpl / metri saadaan ruuvien kokonaismääräksi $2,07 \times 18 \text{ kpl} = 37,2 \text{ kpl}$. Liitinväli s kyseisissä liitospinnoissa liittimien yhteismääränä pituusyksikköä kohti määritetään seuraavasti kaavassa 4.20.

$$\frac{s_i}{K_i} = \frac{\frac{4700 \text{ mm}}{37,2 \text{ kpl}}}{1628 \text{ N/mm} + 1312 \text{ N/mm}} = 0,042 \text{ mm}^2/\text{N} \quad (4.20)$$

Koska osilla on eri kimmokertoimia lasketaan niiden keskiarvo EC5 ohjeiden mukaan kaavassa 4.21 kun $E_{\text{mean,CLT}} = 12500 \text{ N/mm}^2$ ja $E_{\text{mean,koolaus}} = 11000 \text{ N/mm}^2$.

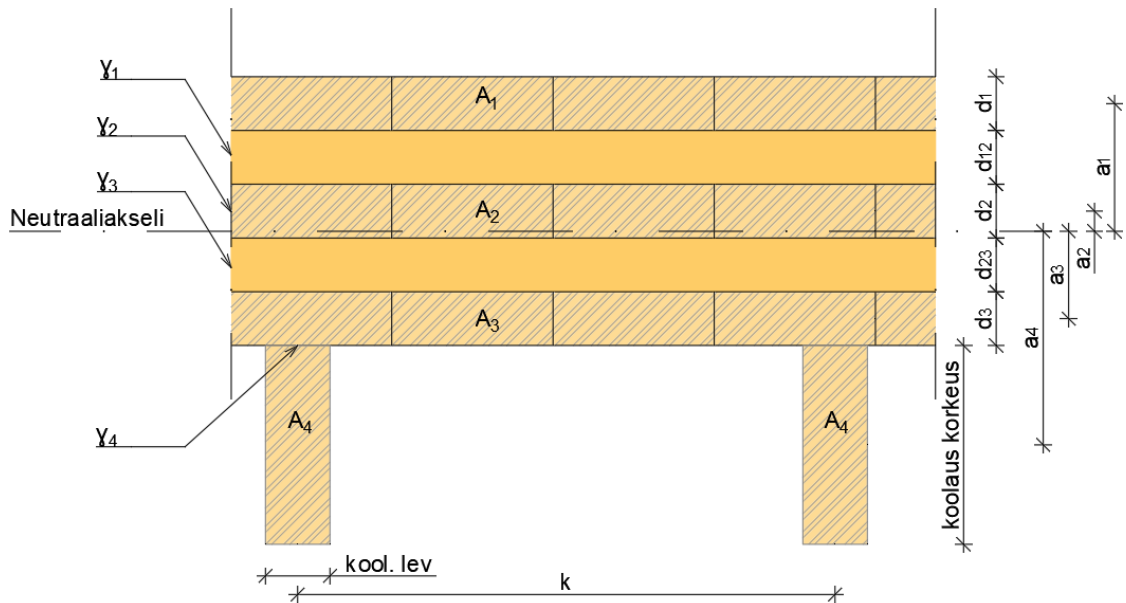
$$E_{\text{mean,yhd}} = \frac{12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{2} = 11750 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.21)$$

Ja kaavan 4.3 mukaan saadaan laskettua liitoksen gamma arvon kaavassa 4.22.

$$\gamma_4 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 11750 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 48 \text{ mm} \cdot 148 \text{ mm} \cdot 2,07 \text{ kpl} \cdot 0,042 \text{ mm}^2/\text{N}}{(4700 \text{ mm})^2}} = 0,231 \quad (4.22)$$

4.2.4 Koolaus ja CLT-laatan osat laskettuna erikseen

Lasketaan EC 5 esitetyllä tavalla kuvan 18 esimerkin mukaan, niin että kaikki osat sisältäen koolauksen lasketaan erikseen, kuten kuvassa 19 esitetty. Laskenta on aloitettava laskemalla osien poikkipinta-alat, osien etäisyydet neutraaliakselista, osien jäyhyysmomentit, liukukertoimet ja sen perusteella rakenteen tehollinen jäyhyysmomentti. Jäyhyysmomentin perusteella saadaan selville rakenteen taiputusjäykkyys, ja sen mukaan ominaisvärähtely.



Kuva 19. Osien etäisyydet neutraaliakseliin, kun kaikki osat lasketaan erikseen yhteen.

Edellä laskettiin jo CLT-levyn kerrosten I arvot missä $I_{1,2,3}$ oli 666667 mm^4 . Koolauslankun jäyhyysmomentti on kaavan 4.23 mukaan.

$$I = \frac{48 \text{ mm} \cdot (148 \text{ mm})^3}{12} = 12967167 \text{ mm}^4 \quad (4.23)$$

Rakenteen leveys ollessa $1,45 \text{ m}$ ja koolauksia 3 kpl saadaan koolauksia per metri kaavan 4.24 mukaan.

$$\frac{3 \text{ kpl}}{1,45 \text{ m}} = 2,07 \frac{\text{kpl}}{\text{m}} \quad (4.24)$$

I_{kool} on tällöin kaavan 4.25 mukaan

$$2,07 \text{ kpl} \cdot 12967167 \text{ mm}^4 = 26828623,45 \text{ mm}^4 \quad (4.25)$$

Koolauksen kokonaispinta-ala per metri saadaan Excelissä laskettuna kaavasta 4.26.

$$2,07 * 48 \text{ mm} * 148 \text{ mm} = 14698 \text{ mm}^2 \quad (4.26)$$

Liukukertoimet, eli γ arvot lasketaan kaavan 4.7 pohjalta kaavoissa 4.27–4.29.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 12500 \text{ N/mm}^2 \cdot 20000 \text{ mm}^2 \cdot 40 \text{ mm}}{50 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot (4700 \text{ mm})^2}} = 0,918 \quad (4.27)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (4.28)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 12500 \text{ N/mm}^2 \cdot 20000 \text{ mm}^2 \cdot 40 \text{ mm}}{50 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot (4700 \text{ mm})^2}} = 0,918 \quad (4.29)$$

γ_4 arvona käytetään kaavasta 4.22 saatu tulos 0,231.

Rakenneseosan neutraaliakseli ja yksittäisten osien painopisteiden etäisyydet lasketaan selvittämällä ensin neutraaliakselin sijainti pystysuunnassa verrattuna keskimmäisen osan painopisteeseen, niin kuin kuvassa 19 käy ilmi. Siirtymä a_2 selvitetään kaavassa 4.30.

$$a_2 =$$

$$\frac{0,918 \cdot 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 20000 \text{ mm}^2 \cdot 60 \text{ mm} - 0,918 \cdot 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 20000 \text{ mm}^2 \cdot 60 \text{ mm} - 0,231 \cdot 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 14698 \text{ mm}^2 \cdot 144 \text{ mm}}{0,918 \cdot 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 20000 \text{ mm}^2 + 1 \cdot 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 20000 \text{ mm}^2 + 0,918 \cdot 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 20000 \text{ mm}^2 + 0,231 \cdot 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 14698 \text{ mm}^2}$$

$$a_2 = -7,23 \text{ mm} \quad (4.30)$$

Muiden osien etäisyydet neutraaliakseliin laskettu kaavan 4.9 mukaan esitetty kaavoissa 4.30–4.33.

$$a_1 = \frac{20 \text{ mm}}{2} + 40 \text{ mm} + \frac{20 \text{ mm}}{2} - (-7,23 \text{ mm}) = 67,23 \quad (4.31)$$

$$a_3 = \frac{20 \text{ mm}}{2} + 40 \text{ mm} + \frac{20 \text{ mm}}{2} + (-7,23) = 52,77 \text{ mm} \quad (4.32)$$

$$a_4 = \frac{20\text{mm}}{2} + 40\text{mm} + 20\text{mm} + \frac{148\text{mm}}{2} + (-7,23) = 136,77\text{mm} \quad (4.33)$$

Tehollinen jäyhyysmomentti lasketaan edellä laskettujen lukujen perusteella kaavan 4.4 mukaan niin kuin kaavassa 4.34 esitetty.

$$\begin{aligned} I_{ef} &= 3 \cdot 666667\text{mm}^4 + 0,918 \cdot 20000\text{mm}^2 \cdot (67,23\text{mm})^2 + 1 \cdot 20000\text{mm}^2 \cdot \\ &(7,23\text{mm})^2 + 0,918 \cdot 20000\text{mm}^2 \cdot (52,77\text{mm})^2 + 0,231 \cdot 14698\text{mm}^2 \cdot \\ &(136,77\text{mm})^2 = \quad \quad \quad \mathbf{227746652 \text{ mm}^4} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Laatan taivutusjäykkyys on näin esitetty kaavassa 4.35

$$\begin{aligned} (EI)_L &= 227746652 \text{ mm}^4 \cdot \left(12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{60000}{60000+14698} + \right. \\ &\left. 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{14698}{60000+14698} \right) = 2,287 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2/\text{m} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Rakenteen ominaisvärähtely lasketaan tällöin 4.1 kaavan perustuen kaavalla 4.36.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot (4,7\text{m})^2} \sqrt{\frac{2286676 \text{ Nm}^2/\text{m}}{1 \text{ m} \cdot 242,5 \text{ kg/m}^2}} = 6,9 \text{ Hz} \quad (4.36)$$

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että jos γ_4 arvo on 1 niin a_2 , jota lasketaan ensin kaavan 4.9 mukaan on -26,72 mm ja sen perusteella samalla tavalla kuin kaavoissa 4.31–4.33 on laskettu muut etäisyydet ovat

a_1	86,72 mm
a_3	33,26 mm
a_4	117,26 mm

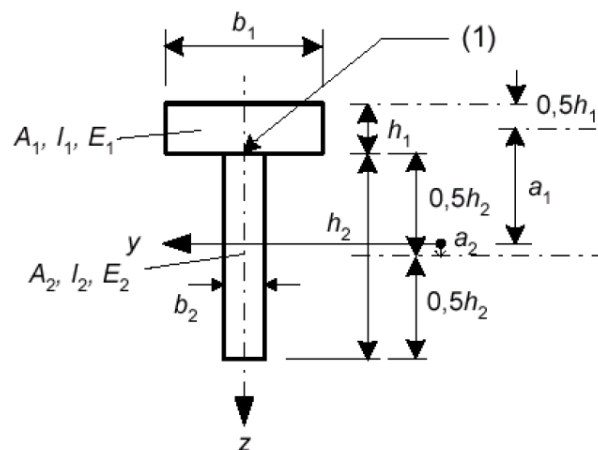
I_{ef} on näiden etäisyyksien perusteella kaavan 4.4 mukaan laskettuna 403667319 mm^4 . $(EI)_L$ lasketaan samalla tavalla kuin kaavassa 4.35 ja on 4052997 Nm^2/m . Rakenteen ominaisvärähtely on tällöin kaavan 4.1 perusteella kaavan 4.37 mukaan.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot (4,7\text{m})^2} \sqrt{\frac{4052997 \text{ Nm}^2/\text{m}}{1 \text{ m} \cdot 242,5 \text{ kg}/\text{m}^2}} = 9,19 \text{ Hz} \quad (4.37)$$

Vertailussa mitattuihin arvoihin, jotka olivat 4700 mm jännevälillä koolaus ruuvi-kiinnityksellä 9,6 Hz ja liimattuna 10,0 Hz voidaan todeta, että tässä laskentata-
vassa ruuvien osalta tämä ei toimi. Liimatun rakenteen suhteen tapa toimii suh-
teellisen hyvin mutta ei kuitenkaan tarkasti.

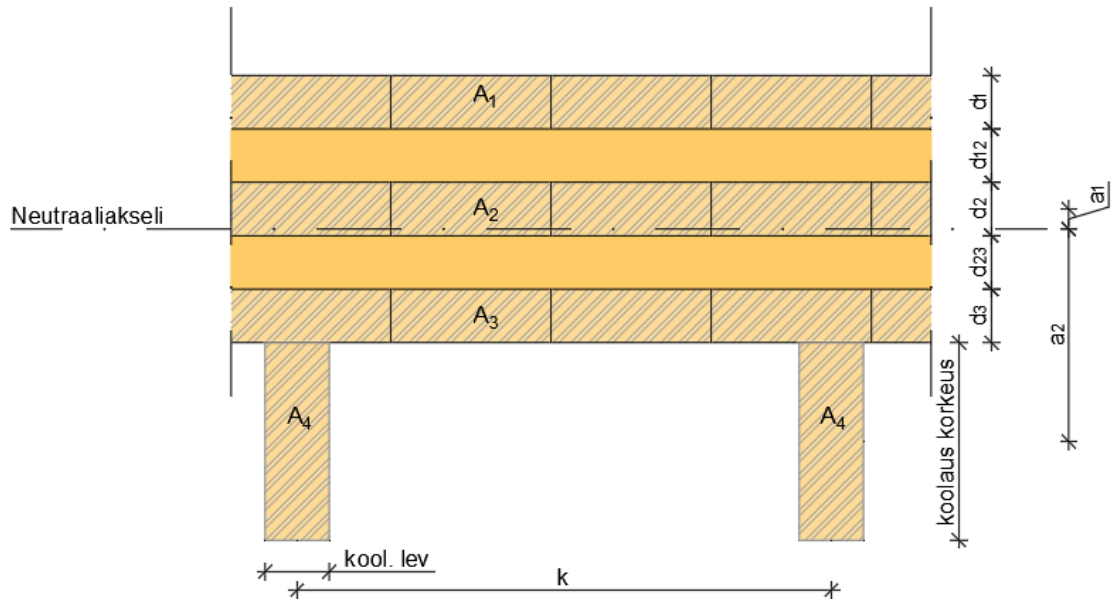
4.2.5 Koolaus ja CLT-laatta laskettuna T-poikkileikkauksena

Kun lasketaan rakenteen T-poikkileikkauksena, aloitetaan CLT-laatan I_{ef} arvolla
edellä esitetyn tavan mukaan ja yhdistetään CLT-laatan ja koolauksen EC 5 ku-
vassa 20 esitetyllä tavalla.



Kuva 20. T-poikkileikkaus EC 5 mukaan.

Kuvassa 21 esitetty laskelmissa käytettävät mitat.



Kuva 21. CLT-laatan poikkileikkauksen mittasymbolit.

CLT-laatan I_{ef} arvo laskettiin jo aikaisemmin kaavassa 4.12, ja tuloksesi saatiin 134187939 mm^4 . Yhden koolauslankun I arvo saadaan kaavasta 4.38.

$$I = \frac{48 \text{ mm} \cdot (148 \text{ mm})^3}{12} = 12967167 \text{ mm}^4 \quad (4.38)$$

Rakenteen leveys ollessa 1,45 m ja koolauksia 3 kpl saadaan koolauksia per metri kaavan 4.39 mukaan.

$$\frac{3 \text{ kpl}}{1,45 \text{ m}} = 2,07 \frac{\text{kpl}}{\text{m}} \quad (4.39)$$

I_{kool} on tällöin kaavan 4.40 mukaan.

$$2,07 \text{ kpl} \cdot 12967167 \text{ mm}^4 = 26828623,45 \text{ mm}^4 \quad (4.40)$$

Vastaukset otettu Excel-ohjelmasta tarkkuuden säilyttämiseksi, Excel ottaa suuren määrän desimaaleja mukaan, ellei pyöristä lukuja.

Poikkileikkauksen neutraaliakselin siirtymä a_1 lasketaan kaavan 4.11 perusteella kaavassa 4.43. Kaavassa 4.11 esitetty a_2 vastaa tässä a_1 .

Koolauksen painopisteen etäisyys CLT-laatan painopisteeseen pystysuunnassa kaavassa 4.41.

$$\frac{140 \text{ mm}}{2} + \frac{148 \text{ mm}}{2} = 144 \text{ mm} \quad (4.41)$$

Koolauksen kokonaispinta-ala per metri saadaan kaavasta 4.42.

$$2,07 * 48 \text{ mm} * 148 \text{ mm} = 14698 \text{ mm}^2 \quad (4.42)$$

Kokonaiskappaleen neutraaliakselin siirtymä a_1 lasketaan kaavassa 4.43. Koolauksen ruuvikiinnitys muodostaa tässä laskelmassa γ_2 arvoksi kaavan 4.22 perusteella 0,231.

$$a_1 = \frac{0 - 0,231 \cdot 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 14698 \text{ mm}^2 \cdot 144 \text{ mm}}{1 \cdot 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 60000 \text{ mm}^2 + 0,231 \cdot 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 14698 \text{ mm}^2} = -6,83 \text{ mm} \quad (4.43)$$

Koolauksen a_2 - arvo on tällöin kaavan 4.44 mukaan

$$a_2 = 144 \text{ mm} - 6,83 \text{ mm} = 137,17 \text{ mm} \quad (4.44)$$

Poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti I_{ef} on tällöin esitetty kaavassa 4.45 kaavan 4.4 perusteella.

$$I_{ef} = 134187939 \text{ mm}^4 + 26828623,45 \text{ mm}^4 + 1 \cdot 60000 \text{ mm}^2 \cdot 6,83 \text{ mm}^2 + 0,231 \cdot 14698 \text{ mm}^2 \cdot (137,17 \text{ mm})^2 = 227698603 \text{ mm}^4 \quad (4.45)$$

Laatan taivutusjäykkyys on näin esitetty kaavassa 4.46

$$(E I)L = 227698603 \text{ mm}^4 \cdot \left(12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{60000}{60000+14698} + 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{14698}{60000+14698}\right) = 2,779 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2/\text{m} \quad (4.46)$$

Rakenteen ominaisvärähtely lasketaan tällöin 4.1 kaavan perustuen kaavalla 4.47.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot (4,7\text{m})^2} \sqrt{\frac{2779027,9 \text{ Nm}^2/\text{m}}{1 \text{ m} \cdot 242,5 \text{ kg}/\text{m}^2}} = 7,61 \text{ Hz} \quad (4.47)$$

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että jos γ_4 arvo on 1 niin a_1 , jota lasketaan ensin kaavan 4.9 mukaan on -25,5 mm ja sen perusteella samalla tavalla kuin kaavassa 4.44 on laskettu toinen etäisyydet on

$$a_2 \qquad 118,5 \text{ mm}$$

I_{ef} on näiden etäisyyksien perusteella kaavan 4.4 mukaan laskettuna 406408011 mm⁴. $(EI)_L$ lasketaan samalla tavalla kuin kaavassa 4.46 ja on 4960150 Nm²/m. Rakenteen ominaisvärähtely on tällöin kaavan 4.1 perusteella kaavan 4.48 mukaan.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot (4,7\text{m})^2} \sqrt{\frac{4960150 \text{ Nm}^2/\text{m}}{1 \text{ m} \cdot 242,5 \text{ kg}/\text{m}^2}} = 10,17 \text{ Hz} \quad (4.48)$$

Kuten vertailussa huomaa, liimattu koolaus toimii laskelmien mukaan suhteellisen hyvin mittauksiin verrattuna. Käy myös selväksi, miten suuri ero on tehollisessa jäyhyysmomentissa, kun vertaa ruuvi- ja liimauskiinnitys.

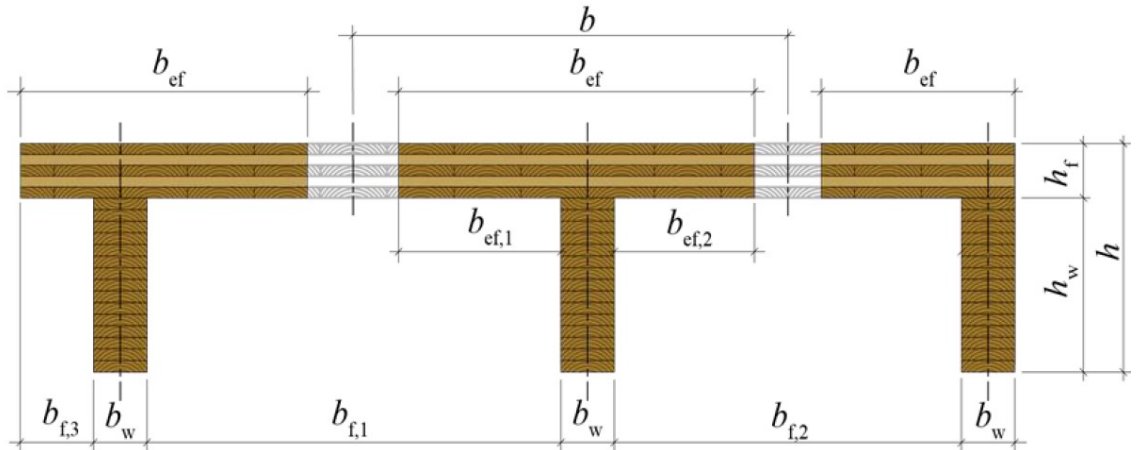
4.2.6 Ominaisvärähtelylaskenta ripalaattana

Kun lasketaan rakennetta ripalaattana StoraEnson ohjeiden mukaan käy selväksi ohjeista, että kyseisessä rakenteessa liimataan ripa tai koolaus kiinni laattaan. Ohjeistusta yksinomaan ruuvatulle rivalle ei löydy. Liitokset tehdään yleisimmin ruuvaamalla ja liimaamalla. missä ruuvit pitää rivat paikallaan liimauksen kuivumisen ajaksi [14].

Ominaisvärähtely lasketaan ripalaatoissa, niin kuin muidenkin välipohjarakenteiden osalta 4.1 kaavan mukaan. Ero verrattuna edellisiin laskelmiin tulee jäyhyysmomentin laskentatavassa. Jäyhyysmomentin laskemisessa on eroa, riippuen minkälainen kuormitus rakenteeseen kohdistuu. Tämä on seuraus laatasta esiintyvän jännityksen muodosta. Viivakuorman ja pistekuorman osalta käytetään eri

kaavoja. Koska meidän esimerkissämme kuormitus vaikuttaa koko laatan osalta, käytetään viivakuorman mukaisia kaavoja.

Ripalaatan laskennassa käytetään mittoja mitkä on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Ripalaatan jäyhyysmomentin laskennassa tarvittavia mittoja [14 s.18].

Kun laatta on kuormitettu viivakuormalla selvitetään $b_{ef,i}$ seuraavasti kaavan 4.49 mukaan. Kyseinen luku tarvitaan laatan jäyhyysmomentin laskennassa.

$$b_{ef,i} = b_{f,j} \cdot \min \left\{ 0,5 - 0,35 \cdot \left(\frac{b_{f,j}}{l} \right)^{0,90} \cdot \left(\frac{(E \cdot A)_x}{S^*_{xy}} \right)^{0,45} \right. \quad (4.49)$$

$b_{ef,i}$	tehollinen leveys uuman molemmin puolin [mm]
$b_{f,i}$	ripojen väli [mm]
EA_x	CLT- laatan taivutusvastus laatan pituussuunnassa kaavassa 4.50

$$(E \cdot A)_x = \sum E_{i,0} \cdot b_{ef} \cdot t_{i,x} \quad (4.50)$$

S^*_{xy}	CLT-laatan tasonsuuntainen liukumavastus kaavassa 4.51.
------------	---

$$S^*_{xy} = \frac{G_{0,mean} \cdot t}{1 + 6 \cdot p_s \cdot \left(\frac{t_{max}}{a} \right)^{q_s}} \quad (4.51)$$

missä	
$G_{0,mean}$	Puusyidensuuntaisen liukumoduulin keskiarvo [N/mm^2]
t	CLT-laatan kokonaiskorkeus [mm]
t_{max}	CLT-kerrosten maksimi paksuus [mm]
α	CLT-tasojen lautojen yleisleveys [14 s.19].

Lautojen leveys määritetään taulukon 5 mukaan.

Taulukko 5. CLT-laatassa käytettyjen lautojen leveys α [14 s. 19].

Visual quality VI	<130mm in AU <150mm in SE	100mm
Industrial visual quality IVI	<130mm in AU <150mm in SE	100mm
Non-visual quality NVI	<250mm	130mm

if a value is unknown a width of $a = 80$ mm should be used

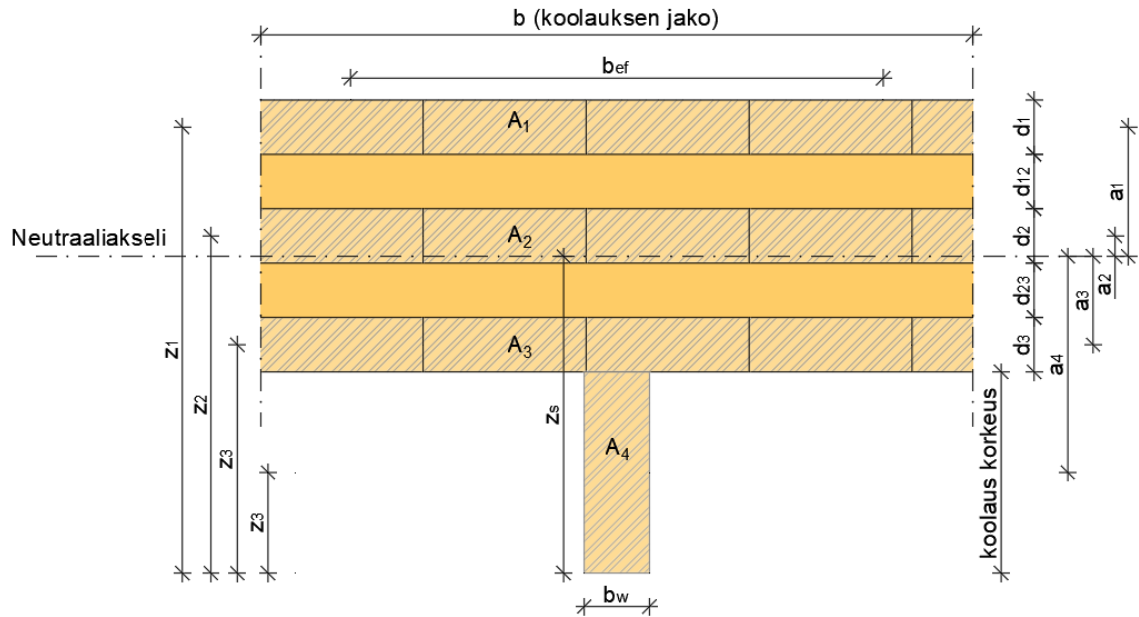
Taulukossa 6 esitetty p_s ja q_s suureiden arvot, jotka ovat yhteydessä CLT-laatan rakenteeseen.

Taulukko 6. Laskennassa tarvittavien p_s ja q_s arvot [14 s. 19]

Parameter	Number of layers		
	3	5	7
p_s	0,53	0,43	
q_s	1,21		

Esimerkkilaskelman p_s on 0,43 ja q_s on 1,21. CLT laatan taivutusvastus pituus-suunnassa lasketaan kaavan 4.50 perusteella kaavassa 4.52.

Laskelmissa auttaa kuva 23 jossa esitetty tarvittavat mitat.



Kuva 23. Ripalaatan poikkileikkauksen mittojen kohdat [14 s.22]

$$(E \cdot A)_x = (12500 \text{ N/mm}^2 \cdot 20 \text{ mm}) \cdot 3 = 750000 \text{ N/mm} \quad (4.52)$$

Laatan tasosuuntainen liukumavastus lasketaan kaavan 4.51 perusteella kaavassa 4.53.

$$S^*_{xy} = \frac{690 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 140 \text{ mm}}{1 + 6 \cdot 0,43 \cdot \left(\frac{40 \text{ mm}}{100 \text{ mm}}\right)^{1,21}} = 52178 \text{ N/mm} \quad (4.53)$$

Uuman molemmin puolinen tehollinen leveys lasketaan StoraEnson ohjeiden mukaan kaavalla 4.54 niin kuin kaavassa 4.55 on laskettu.

$$b_{ef,i} = b_{f,j} \cdot \min \left\{ 0,5 - 0,35 \cdot \left(\frac{b_{f,j}}{l}\right)^{0,90} \cdot \left(\frac{(E \cdot A)_x}{S^*_{xy}}\right)^{0,45} \right\} \quad (4.54)$$

$$b_{ef,i} = (600 \text{ mm} - 48 \text{ mm}) \cdot 0,5 - 0,35 \cdot \left(\frac{552 \text{ mm}}{4700 \text{ mm}}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{750000 \text{ mm}}{52178 \text{ mm}}\right)^{0,45} = 182,7 \text{ mm} \quad (4.55)$$

Tehollinen leveys b_{ef} arvo lasketaan ohjeiden mukaan kaavan 4.56 perusteella kaavassa 4.57.

$$b_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} b_w + \sum b_{ef,i} \\ b \end{array} \right. \quad (4.56)$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 48\text{mm} + 182,7\text{mm} + 182,7\text{mm} = \mathbf{413\text{mm}} \\ 600\text{mm} \end{array} \right. \quad (4.57)$$

Jokaisen kerroksen painopisteen etäisyys kappaleen alareunasta pystysuunnassa esitetty seuraavasti. Kuvassa 23 esitetty mittojen sijainnit.

z_1	278 mm
z_2	218 mm
z_3	158 mm
z_4	7 4 mm

Ripalaatan neutraaliakselin sijainti alapinnasta lasketaan kaavan 4.58 mukaisesti [14 s. 23].

$$z_s = \frac{\sum_i E_i \cdot A_i \cdot a_i}{\sum_i E_i \cdot A_i} \quad (4.58)$$

Kerrosten tehollinen pinta-ala lasketaan seuraavasti kaavassa 4.59. Merkinnot kuvan 23 mukaan.

$$A_{ef,1} = b_{ef} \cdot t \quad (4.59)$$

$A_{ef,1}$	8269 mm ²
$A_{ef,2}$	8269 mm ²
$A_{ef,3}$	8269 mm ²
$A_{ef,4} = 148 \text{ mm} \cdot 48 \text{ mm}$	7104 mm ²

Kappaleen neutraaliakseli sijaitsee tällöin kaavan 4.58 perusteella alapinnasta kaavassa 4.60 lasketussa kohdassa.

$$z_s = (12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 \cdot 278mm + 12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 \cdot 218mm + 12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 \cdot 158mm + 11000 \frac{N}{mm^2} \cdot 7104mm^2 \cdot 74mm) / (12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 + 12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 + 12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 + 11000 \frac{N}{mm^2} \cdot 7104mm^2) = \mathbf{188mm} \quad (4.60)$$

Kun tiedetään kappaleen neutraaliakselin sijainnin, voidaan laskea jokaisen osan painopisteen etäisyys pystysuunnassa neutraaliakseliin. Tämä on osoitettu seuraavassa, missä etäisyydet laskettu kaavan 4.61 mukaan.

$$a_i = z_i - z_s \quad (4.61)$$

278 mm – 188 mm	z_1	90 mm
218 mm – 188 mm	z_2	30 mm
158 mm – 188 mm	z_3	30 mm
74 mm – 188 mm	z_4	114 mm

Jokaisen osan taivutusjäykkyys lasketaan erikseen kaavan 4.62 mukaan. Seuraavassa laskettu ylin kerros esimerkkinä kaavassa 4.63 ja annettu seuraavien osien taivutusjäykkyydet Excel-laskelmien perusteella.

$$EI_i = \frac{E_i \cdot b_{i,eff} \cdot d_i^3}{12} + E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (4.62)$$

d_i	kyseisen kerroksen paksuus
z_i	kerroksen painopisteen etäisyys neutraaliakseliin

$$EI_1 = \frac{12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 413mm \cdot (20mm)^3}{12} + 12500 \frac{N}{mm^2} \cdot 8269mm^2 \cdot (90mm)^2 = 8,41188 \cdot 10^{11} Nmm^2 \quad (4.63)$$

EI_2	$1,2076 \times 10^{11}$	N mm ² /m
EI_3	96300163798	N mm ² /m

$$EI_4 \quad 1,21033 \times 10^{12} \quad \text{N mm}^2/\text{m}$$

Yhteenlaskettu EI_{ef} arvo tällöin **2,268578 * 10¹² Nmm²**

Ominaisvärähtely voidaan tällöin laskea kaavan 4.1 mukaan kuten kaavassa 4.64 on tehty. Tässä lasketaan kuormitus ripalevyn jaon mukaan, mikä meillä on 0,6 m, koska sen verran kuormaa kohdistuu rivalle.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot (4,7\text{m})^2} \sqrt{\frac{2268578 \text{ Nm}^2/\text{m}}{0,6 \text{ m} \cdot 242,5 \text{ kg/m}^2}} = 8,88 \text{ Hz} \quad (4.64)$$

Kuten huomataan, niin arvo on pienempi kuin mittauksissa kävi ilmi. Yksi syy tähän on kuormitusleveys. Laskelmissa lasketaan tässä tapauksessa 600 mm jaolla, mutta koska esimerkissä laatta on 1450 mm leveä ja siinä on kolme ripaa, niin jako on pienempi kuin 600 mm. Jos laatta olisi 1800 mm leveä kolmella rivalla niin kuormitus leveys olisi oikea. Laskelman ja mittausten perusteella näyttää siltä, että laatta jakaa kuorman kaikille rivoille suhteellisen tasaisesti.

Esimerkin vuoksi voidaan verrata laskelmaan missä jaetaan 1450 mm kolmella saadaan 483 mm. Jos kerrataan kuormituksen neliökuorman 0,483 metrillä niin saadaan ominaisvärähtelyn laskenta tulokseksi 9,9 Hz. Tämä on lähempänä mitattuja arvoja.

Ripalaatan laskemiseen pelkästään ruuvikiinnitetyille koolauksille ei löydy ohjeita. Kokeilujen perusteella lambda arvon lisääminen laskentaan ei tuottanut mitattujen arvojen kaltaisia tuloksia.

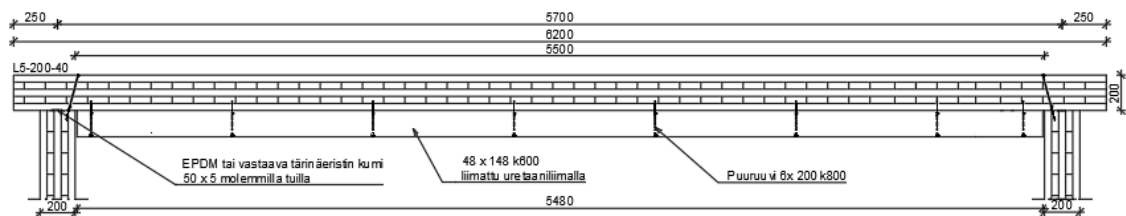
4.3 Mittaussuunnitelma

CLT välipohjalaatan värähtelymittauksien rakenteet koostuivat seuraavista:

- CLT 140-L5-20, jänneväli 3700, ilman koolausta
- CLT 140-L5-20, jänneväli 3700, koolaus 48 x 148 ruuvikiinnityksellä
- CLT 140-L5-20, jänneväli 3700, koolaus 48 x 148 kulmarauta kiinnityksellä

- CLT 140-L5-20, jänneväli 4700, ilman koolausta
- CLT 140-L5-20, jänneväli 4700, koolaus 48x148 ruuvi kiinnityksellä
- CLT 140-L5-20, jänneväli 4700, koolaus 48 x 148 kulmarautakiinnityksellä
- CLT 140-L5-20, jänneväli 4700, koolaus liimattuna CLT laattaan
- CLT L5-200–40, jänneväli 4900, ilman koolausta
- CLT L5-200–40, jänneväli 4900, koolaus 48 x 148 ruuvattuna viidellä ruuvilla per lankku
- CLT L5-200–40, jänneväli 4900, koolaus 48 x 148 ruuvattuna suunnitelmien mukaan
- CLT L5-200–40, jänneväli 4900, koolaus 48 x 148 kulmarautakiinnityksellä
- CLT L5-200–40, jänneväli 5400, koolaus 48 x 148 kulmarauta samalla koolauslankuilla kuin jännevälissä 4900, koolauspituus 4680 mm
- CLT L5-200–40, jänneväli 5400, ilman koolausta
- CLT L5-200–40, jänneväli 5400 koolaus 48 x 98 ruuvattuna viidellä ruuvilla per lankku
- CLT L5-200–40, jänneväli 5600, ilman koolausta
- CLT L5-200–40, jänneväli 5900, koolaus 48 x 148 ruuvattu viidellä ruuvilla
- CLT L5-200–40, jänneväli 5900, koolaus 48 x 148 ruuvattu suunnitelmien mukaan
- CLT L5-200–40, jänneväli 5900, koolaus 48 x 148 kulmarautakiinnityksellä
- CLT L5-200–40, jänneväli 5900, koolaus 48 x 148 liimattuna CLT laattaan

Kuvassa 24 esitetty yksi piirustus mittaus suunnitelmista.



Kuva 24. Kuva mittaus suunnitelman piirustuksesta missä koolaus liimattu.

Rakenteen painona käytettiin kertolevyjä mitkä löytyivät tehtaan varastolta. Periaatteena oli, että lattiarakenne koostui CLT-levyn päällä olevasta uivasta betonilattiasta. Siksi kuormat mitä tarvittiin, oli suhteellisen suuria. Käytetyt pinta-ala-kuormat esitetty laskuesimerkin lähtötiedoissa.

Molempien CLT laattojen leveys oli 1450 mm. Käytettiin samaa leveyttä rakenteiden keskinäisen verrattavuuden helpottamiseksi. Rakenteen pystysuuntaisina tukiseinäinä käytettiin 200 mm CLT-levyjä, jotka vinotuettiin rakenteen tukevuuden varmistamiseksi. Kuvassa 25 esitetty mittauksissa käytetty asetelma.



Kuva 25 Värähtelymittauksissa käytetty tukiseinä

Mittaustutkimukset suoritettiin Timberpoint Oy:n tiloissa Loviisan Valkossa 30-31.3.2022 ja 20-21.4.2022.

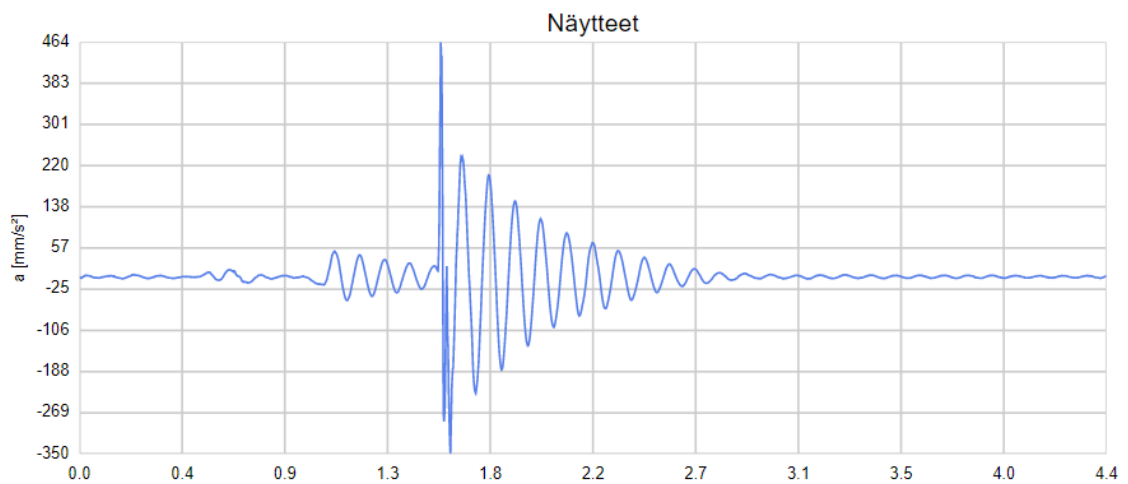
4.4 Mittauslaitteet

Värähtelyn taajuuden mittaamista varten asennettiin rakenteeseen kiihtyvyyssanturi. Tässä tutkimuksessa käytetyllä anturilla oli resoluutio eli tarkkuus 5 μg :tä

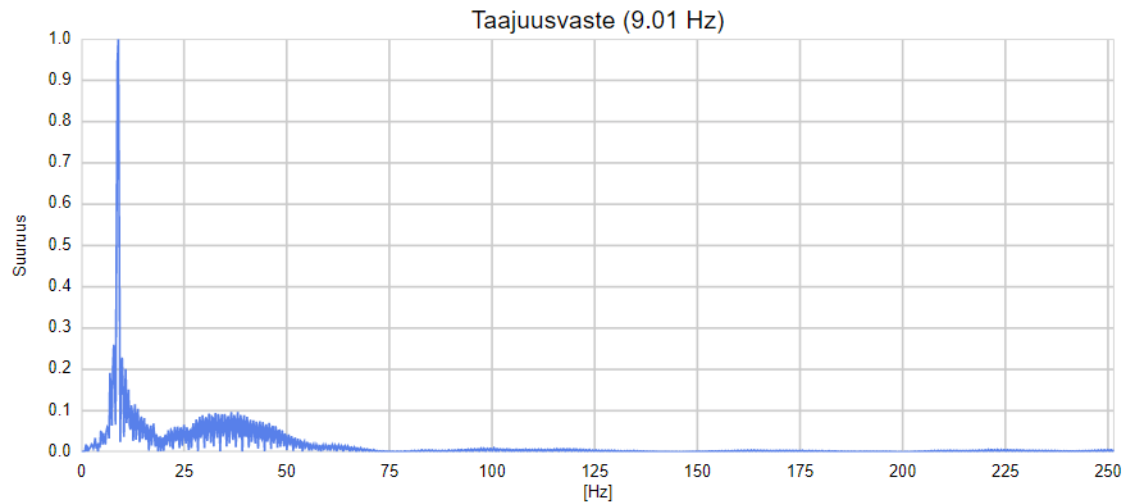
(micro), g tässä tapauksessa vastaa $9,81 \text{ m/s}^2$. Mittausalueena valittiin 0–500 Hz. Mittausanturissa käytetään alipäästösuodatinta (LPF) jolla rajataajuus 125 Hz. Anturilla pystyy mittaamaan x-, y- ja z-suunnassa. Tavalla millä anturi tässä tutkimuksessa oli kiinnitetty, mitattiin z- suuntaiset liikkeet.

Kiihtyvyydentalle (x-akseli: aika, y-akseli: kiihtyvyys) tehdään FFT-muunnos (Fast Fourier Transform) ja saadaan taajuusdata (x-akseli: taajuus, y-akseli: magnitudi).

Anturia kytketään kannettavalle tietokoneelle USB kaapelin avulla. Jokaisesta mittauksesta tallennetaan tulokset omalle tiedostolle. Jokaista mittaustulosta voidaan näin analysoida yksittäisinä tapauksina. Tuloksia pystyy tarkastelemaan suoraan kuvaajan muodossa calculationtools-verkkosovelluksessa lataamalla mittaustuloksen tiedoston ohjelmaan. Kuvassa 26 ja 27 esitetty calculationtools-verkkosivulla esitetyt kuvaajat kiihtyvyyden ja taajuusvasteen osalta, kun mittaus suoritettiin 200 mm CLT-laatalle, jossa koolausta oli liimattu kiinni.



Kuva 26. Calculationtoolsissa esitetty kuvaaja pystysuuntaisen kiihtyvyyden osalta mittaustulosten perusteella



Kuva 27. Kuvassa esitetty edellisen kuvan perusteella mittaustulosten taajuusvasteen kuvaajan muodossa.

Kuvassa 27 esitetty anturin kiinnityskohta CLT-laatan alapintaan.



Kuva 28. Värähtelyanturi asennettuna pituussuunnassa keskelle jänneväliä.

4.5 1 kN pistekuorman aiheuttaman taipuman mittaaminen

1 kN pistekuorman taipuman sallitaan olevan puuvälipohjarakenteissa korkeintaan 0,5 mm jos alimman ominaisvärähtelyn $> 9\text{ Hz}$ ehto on täyttynyt. Koska tai-

puma on näin pieni sen mittaaminen mittanauhalla ei ole mahdollista. Tässä tutkimuksessa käytettiin mittakellomittaria, esitetty kuvassa 29. Sen tarkkuus oli 0,01 mm. Näitä mittauksia varten piti asentaa mittalaite varren päähän niin että mittauksia pystyttiin suorittamaan koska itse laatan alapinta oli 1900 mm korkeudessa lattiapinnasta.

Mittauksissa osoittautui vaikeaksi saada mittalaite pidettyä niin tukevasti paikallaan, että saatiin luotettavia lukuarvoja. Mittaustulosten perusteella todettiin, että tulosten vaihtelun ansiosta tuloksiin ei voitu luottaa.



Kuva 29. 1 kN pistekuorman taipuman mittauksessa käytetty mittakelloa.

4.6 Mittaukset

CLT-laattana käytettiin pidempää laattaa kuin olisi tarvinnut. Ideaalitulanteessa laatta olisi yltänyt tukiseinien keskelle mutta tällöin olisi tarvittu neljä laattaa kahden sijasta. Ennen varsinaisten ominaistajuuden mittaamisen aloittamista suoritettiin kokeita missä tuettiin tukiseinien ulkopuolelle ylettyvät ulokkeet lattiasta. Tällöin havaittiin mittaustuloksista, että ominaistajuus pysyi suurin piirtein samana verrattuna ilman tukia mutta amplitudi väheni toiseen suuntaan merkittävästi. Koska haluttiin pitää värähtelyn niin luonnollisena muodossaan kuin mahdollista, päätimme jatkaa mittauksia ilman ulokkeiden tukia.

Kokeilimme myös erilaisia herätteitä, esimerkiksi iso kumileka aiheutti paljon häiriöitä ja turhaa liikehdintää painona käytetyissä levyissä. Ihmisen hyppääminen oli herätteenä paras vaihtoehto kokeilujen perusteella. Varsinkin ponnistuksen jälkeen ja ennen laskeutumista saatiin niin sanotut puhtaimmat mittaustulokset. Tuloksiin vaikuttaa myös laskeutumisen jälkeen hyppyä suorittavan ihmisen paino, joka lisää kuormitusta mitattavalle rakenteelle. Alastulon jälkeisessä mittaustuloksessa oli huomattavissa enemmän häiriöitä amplitudi/ aika kuvaajassa.

Mittauksia suoritettiin 2–6 kappaletta rakennetta kohti per jänneväli. Jos ilmeni häiriöitä tuloksissa, suoritettiin suurempi määrä mittauksia tulosten laadun varmistamiseksi.

Rakenteiden ominaisvärähtelytaajuuden mittauksia varten tehtiin suunnitelma mistä selvisi tutkittavat rakenteet, jännevälit, koolausten kiinnitystavat, rakenteen päälle asetettavat kuormat sekä mittaustöiden järjestys. Suunnitelmaan sisältyi myös rakenteiden piirustukset.

4.7 Mittaustulokset

Tutkimuksessa mitatut ja liitteen taulukossa esitetyt ominaisvärähtelyn mittaustulokset ovat Calculationtoolsin analysoimat.

Mittaustulokset vastasivat melko hyvin laskennallisia tuloksia, kun laskelmissa käytettiin koolauksen kiinnitysmenetelmänä liimausta. Jos laskelmissa käyttää K_{ser} arvoa, joka vastaa ruuvikiinnitystä tavanomaiset EC5:ssä esitetyt laskentatavat rakenteen taivutusjäykkyyden osalta eivät suoraan vastaa käytännössä tehtyjä mittauksia.

CLT-laattojen ominaisvärähtelyn mittaustulokset on lisätty liitteenä raporttiin. Liitteessä ominaisvärähtelyn laskelmissa on ensin laskettu CLT-laatan tehollinen jäyhyysmomentti minkä jälkeen CLT-laatan ja koolauksen jäyhyysmomentit laskettu yhteen Steinerin säännön ja sen perusteella RIL 205-1-2017 Stor Enson lisäyksen mukaan.

5 Tutkimuksen tulokset

5.1 Laskelmien ja mittaustulosten vertailu

Yksi asia, jonka näyttää vaikuttavan laskennallisiin ongelmiin, on kappaleiden painopisteen ja koko kappaleen neutraaliakselin etäisyyden a_i arvon pienentyminen γ arvon takia, kun lasketaan koko kappaleen tehollista taivutusjäykkyyttä Steinerin säännön mukaisesti, kaavaa 4.4 käyttäen. Tämä vaikuttaa olevan syy miksi Stora Enson lisäyksessä RIL:in aineistoon CLT-laatan laskemisessa sanotaan, että kaavat on tarkoitettu korkeintaan 5 kerroksisille rakenteille. Kun kappaleen a mitta menee toisen kerroksen yli missä myös vaikuttaa toinen γ arvo, joka on eri kuin 1, tavanomaiset kaavat eivät enää toimi.

5.2 Laskentamallin käyttökelpoisuus

Yleisesti voidaan käyttää olemassa olevia laskentatapoja CLT-laatan ja koolauksen taivutusjäykkyyden selvittämiseksi, kun koolaus on liimattu kiinni tehdasolosuhteissa. Tällöin koolaus ja laatan alin kerros voidaan laskea yhtenä kappaleena. Laskelmat täytyy kuitenkin suorittaa asiaan perehtynyt henkilö, joka ymmärtää Steinerin säännön tekijöiden vaikutuksen. Varsinkin kun kaavaan lisätään γ ja E arvot.

7 kerroksisille CLT-laatoille ei tässä tutkimuksessa oteta kantaa mutta tällaisille rakenteille tulisi tehdä ominaisvärähtelymittauksia ja tutkia laskentatapoja, jotta saataisiin selville mahdollinen täsmäävä ratkaisu. Liimatut alapuoliset koolaukset on mahdollista laskea ripalaattalaskentaohjeiden mukaan.

6 Pohdinta

Mittausten ja laskelmien erot pidemmällä jänneväleillä osoittaa, että laskelmien suhteen löytyy vielä tutkittavaa.

Liimattujen koolauksien osalta laskelmat toimivat suhteellisen tarkasti.

Lisätutkimuksia olisi syytä suorittaa ruuvien K_{ser} arvojen toimivuuden, varsinkin värähtelyn suhteen. Mittauksien perusteella koolauksen kiinnitys pienellä määrällä ruuveja tuotti paljon paremman tuloksen kuin laskemat osoittivat. Tähän saattaa olla syy kiinnityspintojen kitka, ja varsinkin lepokitka. Lepokitka on usein suurempi kuin kitka ja kiinnityskohdissa ruuvit muodostavat pintaan selkeän paineen, joka vaikeuttaa pintojen keskinäisen liikehännän. Värähtelyssä rakenteen taipumat ovat suhteellisen pieniä ja sen myötä ovat myös rakenteiden väliset liukumukset pienet. Tämän perusteella kitkalla on suuri vaikutus.

Materiaalien kimmokertoimilla saattaa olla vaikutusta mittaustulosten epätarkkuuteen, mutta koska liimattujen rakenteiden laskentatulokset täsmäävät mittaustuloksien suhteen, näillä ei vaikuta olevan suurempaa vaikutusta tämän tutkimuksen tuloksiin.

Tämä tutkimus ottaa ainoastaan kantaa 5 kerroksisten CLT-laattojen värähtelyyn Stora Enson ja Cross Lam laskentaohjeen mukaan, mikä on tehty lisäyksenä RIL 205-1-2017. 7 kerroksisten CLT-laattojen suhteen on vielä tutkittava alakaton koolauksen vaikutusta laskelmien ja testien perusteella.

Lähteet

- 1 Ympäristöministeriön verkkosivut. Julkisen puurakentamisen kansalliset tavoitteet. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Julkisenpuurakentamisen-kansalliset-tavoitteet-45F5028E_8436_408A_8CD7_510C6C1AD000-161609.pdf/1fc95a52-5c50-4c9b-1f5d-325395658d72/Julkisen-puurakentamisen-kansalliset-tavoitteet-45F5028E_8436_408A_8CD7_510C6C1AD, luettu 12.2.2022
- 2 Asko, Taija. Vepsä, Ari. Kurkela, Juha. Halonen, Matti. vttresearch.com verkkosivut, *Lattioiden värähtelyt*. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2008/T2425.pdf>, luettu 12.02.2022
- 3 Bingseng, Zhang. jne. researchgate.net verkkosivut, Comparison of vibrational serviceability criteria for design of timber floors among the European Union countries. 2012. https://www.researchgate.net/publication/260976409_Comparison_of_vibrational_serviceability_criteria_for_design_of_timber_floors_among_the_European_Union_countries, luettu 14.4.2022
- 4 Smith.A.I, Hicks.S.J, Devine.P.J. Steelconstruction.info verkkosivut, https://www.steelconstruction.info/images/5/5a/SCI_P354.pdf, luettu 15.4.2022
- 5 Mäkelä, Mikko ym. Tekniikan Kaavasto. 2017. Bookwell Oy, Porvoo.
- 6 Lahtela, Tero. Kylliäinen, Miko. Leizen, Jesse. Kovalainen, Ville. Talus, Lauri. Puuinfo.fi verkkosivut, Äänieristys Puutalossa. https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2021/05/Aanikirja_kokonainen-1.pdf, luettu 17.3.2022
- 7 Tampereen Teknillinen Yliopisto. sgy.fi verkkosivut, Maa- ja pohjarakenteet. Rakentamisen aiheuttamat värähtelyt - projekti, Taustaselvitykset. 2008. <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/taustaselvitykset.pdf>, luettu 10.5.2022
- 8 European committee for standardization. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. 2014. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki
- 9 Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry. RIL-205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje. 2019. Grano Oy. Helsinki

- 10 Suomen Ympäristöministeriön verkkosivut.. Rakenteiden lujuus ja vakaus/ Puurakenteet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. 12 2016. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf/7b5d70f7-f18f-66fe-8da1-d467e39c5ffe/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf?t=1603260650690, luettu 19.4.2022
- 11 Puuinfo Oy verkkosivut. Monikerroslevy (CLT). 2020. <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööri tuotteet/monikerroslevy-clt/>, luettu 10.5.2022
- 12 Ari, Kevarinmäki. OAMK.fi verkkosivut. RIL-205_2017 CLT lisäohjeet Stora Enso CLT. http://www.oamk.fi/~pekkaki/puurakenteet_2/suunnitteluohjeita/CLT/StoraEnso/RIL%20205-1-2017%20Stora%20Enso%20CLT%20lis%C3%A4ohjeet%202017.pdf, luettu 16.5.2022
- 13 MyTICon Timber Connectors verkkosivut. MyTICon Timber Connectors White paper. https://mtcsolutions.com/wp-content/uploads/2019/04/Reinforcing_Wood_with_Full_Thread_ASSY-screws.pdf, luettu 30.5.2022
- 14 Stora Enso Oy:n verkkosivut, CLT Rib Panels by Stora Enso, Structural Design. 18.12.2020. <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-specifications/wood-products/rib-panel-technical/structural-design-manual-clt-rib-panels-by-stora-enso.pdf>, luettu 28.5.2022