



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# PUURUNKOISEN VÄLIPOHJAN TAIVUTUS- JÄYKKYYS JA VÄRÄHTELYMITOITUS

Tatu Saastamoinen



Opinnäytetyö  
Toukokuu 2018  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Talonrakennustekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Talorakennustekniikka

SAASTAMOINEN, TATU:

Puurunkoisen välipohjan taivutusjäykkyys ja värähtelymitoitus

Opinnäytetyö 32 sivua, joista liitteitä 12 sivua

Toukokuu 2018

---

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää esimerkkilaskulla puupalkkirunkoisen välipohjan värähtelymitoitus ja luoda värähtelymitoituksen ja siihen liittyvän taivutusjäykkyyden laskentaohje sekä Excel-pohjainen laskentaohjelma Sweco Rakennetekniikka Oy:n NR-osastolle. Ohjeella on tarkoitus pystyä helposti hyödyntämään kaikkia mahdollisia rakennekerroksia välipohjasta.

Aiheen tutkiminen koostui olemassa olevan tiedon etsimisestä, haastatteluista ja esimerkkilaskelman laatimisesta. Lopputuloksena syntyi aiempaa tietoa soveltaen värähtelylaskentaohjelma ja -ohje enintään neljäleikkeiselle liittorakenteelle sekä pintalaatalle. Värähtely- ja taivutusjäykkyyden laskentaa havainnollistamaan tehtiin esimerkkilaskelma. Värähtelymitoituksen kulku on esitetty viimeisimmän RIL:n ohjeen mukaan.

Laskentaohjelmaa on mahdollista päivittää normien tai tiedon muuttuessa. Mahdollisia kehityksiä ovat mm. yhteensopivuus NR-osaston tulevan ristikkosuunnitteluohjelman kanssa sekä kipsilevyn hyödyntämisen selvittäminen alalevynä. Laskentaohjelma on yrityksessä käytössä eikä se ole liitettynä tähän opinnäytetyöhön.

---

Asiasanat: värähtely, puu, välipohja, jäykkyys, ominaistaajuus

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Construction Engineering  
Building Construction

SAASTAMOINEN, TATU:  
Bending Stiffness and Vibration Analysis of a Timber Floor

Bachelor's thesis 32 pages, appendices 12 pages  
May 2018

---

The purpose of this thesis was to create a designing guide and an Excel-based program for vibration analysis and for calculating the bending stiffness of a timber floor for Sweco Rakennetekniikka Oy. The program was required to take advantage of all the possible layers in floors. The program was kept confidential.

Data were collected through interviews and a literature review. The result was a design guide and program for a five-layered composite structure floor, with a possibility for a floating or an attached slab on top. An example vibration analysis was also made, with focus on calculating the bending stiffness in both directions of the floor. The analysis followed Eurocode 5 and the latest Finnish national standards.

The program can be updated easily. Further study is needed for determining whether plasterboard can be utilized as a base plate in vibration analysis.

---

Key words: vibration, timber, bending stiffness, floor, frequency

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	VÄLIPOHJAN JÄYKKYYDEN MÄÄRITYS .....	6
2.1	Esimerkkirakenne .....	6
2.2	Taivutusjäykkyys .....	7
2.3	Mekaaniset kiinnikkeet ja liukuma .....	8
2.4	Liimaus .....	12
2.5	Jäykkyys eri suuntiin .....	13
2.6	Poikkijäykisteet.....	13
2.7	Pintalaatta ja askelääneneristys.....	15
3	VÄRÄHTELYMITOITUS .....	16
3.1	Normit ja ohjeet .....	16
3.2	Ominaistaajuus.....	16
3.3	1 kN:n pistekuorman aiheuttama painuma .....	17
4	POHDINTA.....	19
	LÄHTEET .....	20
	LIITTEET .....	21
	Liite 1. Esimerkki värähtelymitoituksesta.....	21
	Palkkien suunnan jäykkyys .....	22
	Sivusuunnan jäykkyys .....	26
	Värähtelymitoitus .....	30
	Liite 2. Kiinnikkeiden vaikutus värähtelyominaisuuksiin.....	32

## 1 JOHDANTO

Välipohjien värähtelymitoitusta on tehty Suomessa laajasti Eurokoodi 5:n käyttöönotosta lähtien. Nykyään kävelystä aiheutuva värähtelytarkastelu joudutaan tekemään kaikkiin asuintilojen välisiin välipohjiin. Eurokoodi jättää maille suuret kansalliset tulkintavarat värähtelyn ehtojen asettamiselle. Suomen kansallisten ohjeiden painumaraja on tiukka, minkä takia värähtelymitoitus määrittää usein kokonaan välipohjarakenteen. Lattian kantavuus ei tule useinkaan määrääväksi tekijäksi. Tämän takia välipohjan suunnittelu kannattaa aloittaa värähtelymitoituksella.

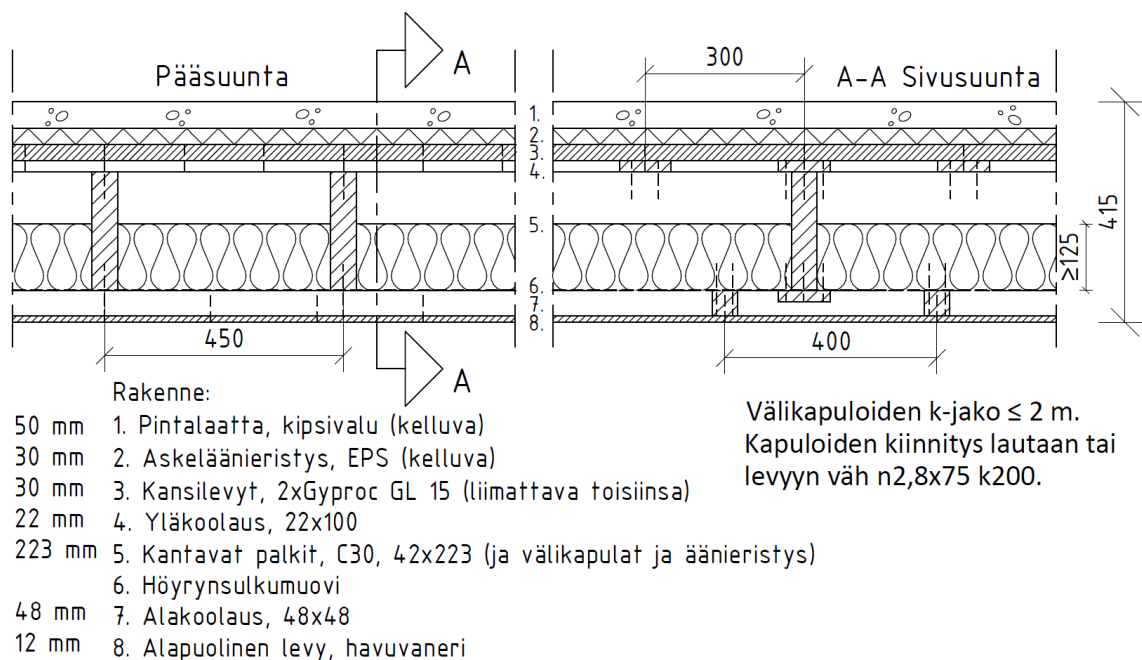
Tässä opinnäytetyössä tehdään tutkimusta, jonka tuotoksena toteutuu testaamisen jälkeen taulukkolaskentaohjelma yrityksen käyttöön puurunkoisen vasarakenteisen välipohjan värähtelylaskentaan. Raportissa käsitellään ohjelman tekoon vaadittava teoria sekä laskuesimerkki. Mitoitus tehdään viimeisimmän kansallisen suunnitteluohjeen RIL 205-1-2017 mukaan, paitsi välipohjan jäykkyyden laskenta tehdään soveltuvilta osin Eurokoodi 5:n mukaan. Opinnäytetyössä ei käsitellä värähtelyä ilmiönä tai sen vaikutuksia ihmiseen tai asumismukavuuteen. Opinnäytetyössä käsitellään vain puupalkkirunkoisia välipohjia.

Opinnäytetyön päätarkoitus on tehdä taulukkolaskentaohjelma värähtelymitoitukselle Sweco Rakennetekniikka Oy:n käyttöön, erityisesti NR-osastolle. Raportin tarkoitus on esittää laskentaperusteet Excel-tiedoston taustalla. Ohjelmasta tehdään mahdollisimman nopea- ja helppokäyttöinen. Opinnäytetyön idea tuli harjoittelun aikana NR-suunnittelijoilta, jotka joutuvat uusien ohjeiden mukaan tekemään usein myös värähtelymitoituksia. Opinnäytetyön ohjaajana toimii NR-osaston osastopäällikkö Asko Pajukoski, ja ohjaavana opettajana Lehtori Heikki Saarenpää.

## 2 VÄLIPOHJAN JÄYKKYYDEN MÄÄRITYS

### 2.1 Esimerkkirakenne

Kuviossa 1 on esitetty eräs tässä työssä käsiteltävä välipohjarakenne. Välipohjalla tarkoitetaan tässä työssä lattiaa, jonka alapuolella ja päällä on asuintilaa. Välikapuloiden laipat ja kiinnitykset on jätetty pääsuunnan leikkauksesta pois selkeyden vuoksi. Tätä rakennetta käytetään liitteen (1) jäykkyyss- ja värähtelylaskentaesimerkissä. Kuvion rakenteessa on kaikki rakennekerrokset, mitä suomalaisessa puurunkoisessa välipohjassa useimmiten esiintyy. Kyseisellä rakenteella voidaan päästä värähtelymitoituksen osalta jopa kuuden metrin jänneväliin. Pällekkäiset levyt on liimattava yhteen, jotta ne toimivat yhtenä levynä.



KUVIO 1. Välipohjarakenne

Rakenteessa palkit muodostavat liittorakenteen molempiin suuntiin levyjen ja koolausten kanssa. Nämä toimivat palkeille tavallaan laippoina, jolloin ohutkin levy hyvin kiinnitetynä voi parantaa jäykkyyttä molempiin suuntiin paljon. Palkit voivat olla sahatavaraa, liimapuuta tai LVL:ää eli viilupuuta, kuten Kerto-S:ää. Kipsilevyä ei kannata hyödyntää jäykkyydessä alalevynä, sillä sen jäykkyyssominaisuudet vedettynä levynä ovat epävarmat.

## 2.2 Taivutusjäykkyys

Rakenteen tehollisen taivutusjäykkyyden  $(EI)_{\text{ef}}$  arvo rakenteelle, jossa on  $n$ -määrä rakennekerroksia, lasketaan kaavalla

$$(EI)_{\text{ef}} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2), \quad (1)$$

jossa  $E$  on materiaalin kimmokertoimen keskiarvo,  $I$  jäyhyysmomentti rakennekerroksen oman keskiakselin suhteen,  $\gamma$  liukukerroin,  $A$  tehollinen pinta-ala ja  $a$  rakennekerroksen keskiviivan etäisyys koko rakenteen jäykkyyskeskiakseliin kyseisessä suunnassa. Jäykkyysakselin sijainti palkkien suunnassa nelileikkeisessä poikkileikkauksessa palkin keskikohtaan nähden saadaan kaavasta

$$a_{l,\text{palkki}} = a_3 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2 + h_3) - \gamma_5 E_5 A_5 (h_5 + h_4 + h_3)}{2 \cdot (\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_3 E_3 A_3 + \gamma_5 E_5 A_5)}, \quad (2)$$

jossa esimerkiksi alaindeksi 1 on kansilevyille, 2 yläkoolaukselle, 3 palkille, 4 alakoolaukselle ja 5 alalevyille. Sivusuunnan neutraaliakselin sijaintia laskiessa kaavaan lisätään myös koolauskerrokset.

$$a_{b,\text{palkki}} = a_3 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2 + h_3) + \gamma_2 E_2 A_2 (h_2 + h_3) - (\gamma_4 E_4 A_4 (h_4 + h_3) + \gamma_5 E_5 A_5 (h_5 + h_4 + h_3))}{2 \cdot \sum_{i=1}^5 \gamma_i E_i A_i}. \quad (3)$$

(Eurokoodi 5 2014, liite B).

Tulee huomata, että kaavojen (2) ja (3) keskenään samannimiset symbolit, paitsi  $h$ , voivat olla erisuuria keskenään, sillä niiden arvo voi riippua suunnasta. Luku  $a$  voi olla palkille myös negatiivinen eli jäykkyysakseli voi sijaita keskiviivan alla, mutta taivutusjäykkyyden kaavassa se ei haittaa, sillä  $a$  korotetaan siinä toiseen potenssiin, jonka tulos on aina positiivinen. Tämä potenssiin korotus myös tarkoittaa, että liittovaikutuksen vaikutus jäykkyyteen kasvaa valtavasti korkeilla rakenteilla. Tasalaatuisen, suorakulmaisen kappaleen jäyhyysmomentti  $I$  oman keskiakselinsa suhteen lasketaan kaavasta

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (4)$$

jossa  $b$  on rakenneosan leveys ja  $h$  on korkeus. (Eurokoodi 5 2014, liite B).

Taivutusjäykkyys metrille saadaan laskemalla ensin rakenteen taivutusjäykkyys yhdeltä palkkiväliltä  $s$ , ja kerrotaan saatu tulos kertoimella  $\frac{1000}{s}$ .

### 2.3 Mekaaniset kiinnikkeet ja liukuma

Kaavassa (1) käytetty liukukerroin on suhdeluku rakennekerroksen liukumalle suhteessa rakennekerrokseen, joka on keskijäykkyysakselin kohdalla. Akselilla sijaitsevan rakenteen liukukerroin on aina 1. Palkkien suunnassa tämä kerros on yleensä kantava palkisto. Kerroin lasketaan kaavalla

$$\gamma_i = \left( \frac{1 + \pi^2 E_i A_i s_i}{K_{\text{tot},i} l^2} \right)^{-1}, \quad (5)$$

jossa  $A$  on rakennekerroksen poikkipinta-ala,  $K_{\text{tot}}$  on kokonaissiirtymäkerroin,  $s$  on kiinnikejako ja  $l$  on rakenneosan jänneväli (Eurokoodi 5 2014, liite B). Jänneväli voi olla esimerkiksi elementin leveys, lattian leveys  $B$  tai lattiapalkin jänneväli  $L$ , riippuen kumpaan suuntaan jäykkyyttä lasketaan ja onko kyseessä elementtirakenne. Sivusuunnassa koolauksen jännevälinä voi käyttää sahatavaran pituutta, tai noin 4000 mm, jos koolauspuut ovat jatkettuja (Suomalainen 2006, liite 1). Jälkivalettavan laatan jänneväli on aina laatan pituus laskettavassa suunnassa.

Käyttörajatilassa yhden kiinnikkeen siirtymäkertoimenä on  $K_{\text{ser}}$ . Liittimien ja rakennekerrosten tulee olla tarpeeksi korkeita, jotta liittimet toimivat toivotulla tavalla, eivätkä esimerkiksi irtoa. Liittimien asennuskulmalla ei ole laskennassa merkitystä, kunhan tunkeumat ovat sallituissa rajoissa. Yhden liittimen arvo välyksettömälle pultti-, tappivaarna- tai ruuvikiinnitykselle sekä esiporatulle naulaukselle saadaan kaavasta

$$K_{\text{ser}} = \frac{\rho_m^{1,5} d}{23} [\text{N/mm}], \quad (6)$$



jossa  $\rho_m$  on materiaalien muunnettu tiheys ja  $d$  on kiinnikkeen halkaisija. Ruuvilla käytetään sisähalkaisijaa. Naulalle on esiporattava reikä, jos  $d > 6$  mm tai puutavaran ominaistiheys  $\rho_k > 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Naulaukselle, jolle ei ole esiporattu reikiä, käytetään siirtymäkertoimelle kaavaa

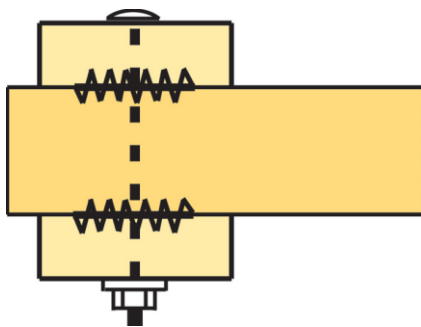
$$K_{\text{ser}} = \frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{30} [\text{N/mm}]. \quad (7)$$

$K_{\text{ser}}$ -kaavojen yksiköt eivät potenssilaskujen jälkeen täsmää, mutta yksiköksi tulee [N/mm] joka tarkoittaa siirtymää yhden Newtonin voimaa kohden. (Eurokoodi 5 2014, liite B).

Hammasvaarnaliitokselle eli puunsitojalevyn ja pultin liitokselle ei ole määritetty siirtymäkertoimelle laskukaavaa, mutta oikein mitoitetuna ja toteutettuna sen voi olettaa täysin jäykäksi jolloin siirtymäkerroin oletetaan äärettömäksi ja liukukerroin on 1. Eräs puunsitojalevy on kuvassa (1) ja kaksileikkeisen hammasvaarnaliitoksen periaate kiristuspultteineen näkyy kuviossa (2).



KUVA 1. Puunsitojalevy (Simpson Strong-Tie)

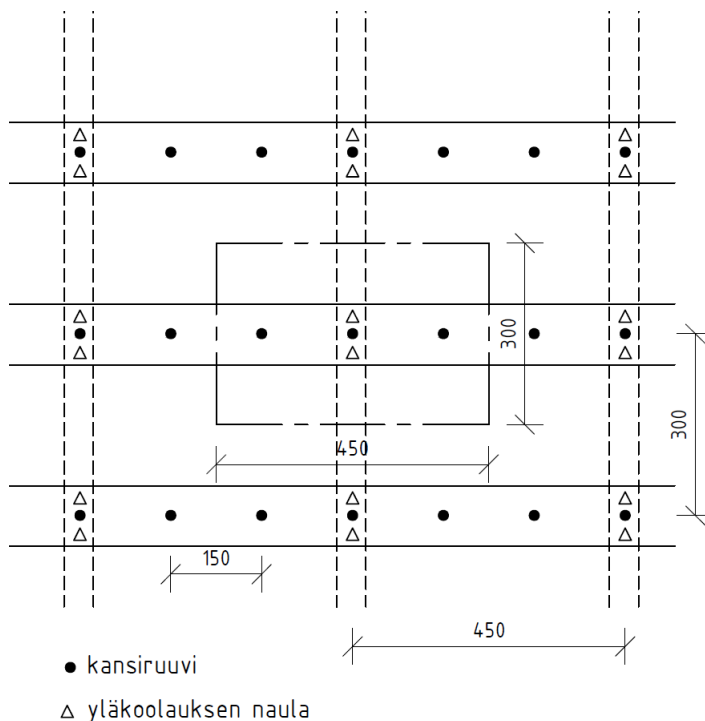


KUVIO 2. Kaksileikkeinen hammasvaarnaliitos (Simpson Strong-Tie)

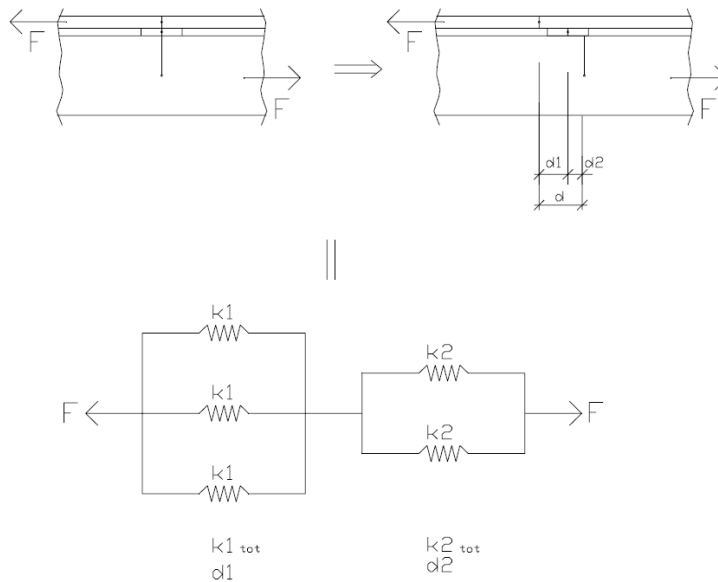
Puu–betoni- tai puu–teräs-liitoksissa muunnettuna tiheytenä käytetään puun keskitiheyden arvoa kerrottuna kahdella (Eurokoodi 5 2014, 50). Puu–kipsi-liitokselle ei ole Eurokoodissa määritetty muunnetun tiheyden laskukaavaa, joten kipsilevyille kannattaa käyttää kipsiruuvien valmiita taulukkoarvoja siirtymäkertoimille valmistajakohtaisesti. Toinen vaihtoehto on käyttää liitoksen heikompa keskitiheyttä. Liitettävien puurakennesien muunnettuna tiheytenä käytetään keskitiheyksien geometristä keskiarvoa

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{\text{mean1}} \cdot \rho_{\text{mean2}}} \quad (8)$$

Kaavassa (5) käytetään kokonaissiirtymäkerrointa  $K_{\text{tot}}$ , joka ottaa huomioon koko kiinnityksen, eikä vain yhtä kiinnikettä. Kokonaissiirtymäkertoimien laskemisen helpottamiseksi voidaan rakenteen liittimet piirtää sarjan- ja rinnankytkentöihin, joissa kiinnikkeet ovat lineaarisia jousia (Suomalainen 2006, liite 2). Rakenteesta ikään kuin leikataan tietyn kokoinen leike, ja eri rakennekerrosten liittimet toimivat sarjaan kytkettyinä, ja saman rakennekerroksen liittimet rinnankytkettyinä. Palan leveys on hyvä olla vaikkapa palkkiväli, ja pituus ylä- tai alakoolauksen k-jako. Tätä on havainnollistettu kuvioissa (3) ja (4).



KUVIO 3. Kiinnikkeiden jakautuminen ja leike



KUVIO 4. Rakenteen kytkentä (Suomalainen, 2006)

Kuviossa (3) valitaan mitat niin, että leikkeeseen tulee tasan 3 kansiruuvia ja 2 yläkoolauksen naulaa. Tämä kiinnitys on esitetty jousiliitoksena kuviossa (4). Samaa teoriaa voi käyttää kolmi- ja nelileikkeisissäkin rakenteissa. Kiinnikkeiden määrän tietyssä kerroksessa ei tarvitse olla kokonaisluku. Tätä samaa leikettä käytetään määrittämään rakennekerroksen tehokasta poikkipinta-alaa ja kiinnikejakoa. Pinta-ala  $A$  lasketaan leikkeen leveyden matkalta. Kiinnikejako  $s$  on leikkeen pituus tarkasteltavassa suunnassa kaikille rakennekerroksille. Kerrosten omat kiinnikejaot huomioidaan kiinnikkeiden määrässä kokonaissiirtymäkertoimessa. Leikkeen mitat voi valita erikseen eri suunnan liukukertoimia laskiessa. Mahdollinen alakoolauksen  $k$ -jaon ero yläkoolauksen  $k$ -jakoon tulee huomioida niin alakoolauksen kuin alalevynkin arvoja laskiessa. Havainnollinen esimerkki nelileikkeiselle rakenteelle tästä on liitteessä (1).

Kuviossa (4)  $d_i$  tarkoittaa kunkin rakennekerroksen liukumaa ja  $k_i$  jousivakiota eli yhden liittimen siirtymäkerrointa. Rinnankytkettyjen eli vierekkäisten jousien kokonaissiirtymäkerroin lasketaan kaavalla

$$K_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n K_i. \quad (9)$$

Sarjaan kytkettyjen eli peräkkäisten jousien kokonaissiirtymäkerroin saadaan kaavasta

$$K_{\text{tot}} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} \right)^{-1}. \quad (10)$$

(Suomalainen 2006, liite 2). Rinnankytketyt jouset yksinkertaistetaan kaavalla (9) yksittäisiksi jousiksi, ja koko systeemin kokonaissiirtymäkertoimen saa tämän jälkeen kaavalla (10). Liitteessä (2) on esitetty erilaisten kiinnitysten vaikutus liukukertoimiin ja muihin värähtelyominaisuuksiin.

## 2.4 Liimaus

Levyt ja koolaukset on hyvä liimata alustaansa. Lisäksi levyt liimataan ponteistaan toisiinsa, jolloin levyt toimivat yhdessä jäykistäen välipohjaa. Pällekkäiset levyt on liimattava toisiinsa, jotta molempia voi käyttää yhtenä levynä. Tehdasliimaus tarkoittaa valvoituissa oloissa, kuten elementtitehtaalla tehtyä jäykkää liimausta alustaan. Tehdasliimauksen liukukertoimena voi käyttää lukua 1. Työmaaliimaus alustaan oletetaan epävarmemmaksi, ja se vaatii myös mekaanisen kiinnityksen lisäksi. Työmaaliimaus kannelle tai koolaukselle, joka on suoraan kiinni palkistossa, voidaan liitovaikutuksesta huomioida puolet eli käyttää liukukertoimena lukua 0,5 (RIL 2017, 197). Jos työmaalla liimataan kansilevy koolaukseen, voidaan kannelle käyttää liukukertoimena puolta koolauksen liukukertoimen arvosta.

Jos työmaaliimauksen lisäksi käytettävä mekaaninen kiinnitys antaa korkeammat arvot liukukertoimille, kannattaa käyttää korkeampia arvoja ja unohtaa liimaus laskennasta. Liimaus kannattaa tehdä silti, vaikkei siitä olisikaan laskennassa hyötyä. Liimaus silti todellisuudessa parantaa lattian jäykkyyttä ja vähentää lattian narinaa. Levyjen kiinnittäminen toisiinsa oletetaan täysin jäykäksi myös työmaalla, koska levyillä on niin suuri yhteinen liimapinta-ala, toisin kuin vaikkapa levyllä ja palkistolla. Käytetyn liiman tulee soveltua kiinnitettäville materiaaleille, ja toteutuksen on oltava tarkkaa.

## 2.5 Jäykkyys eri suuntiin

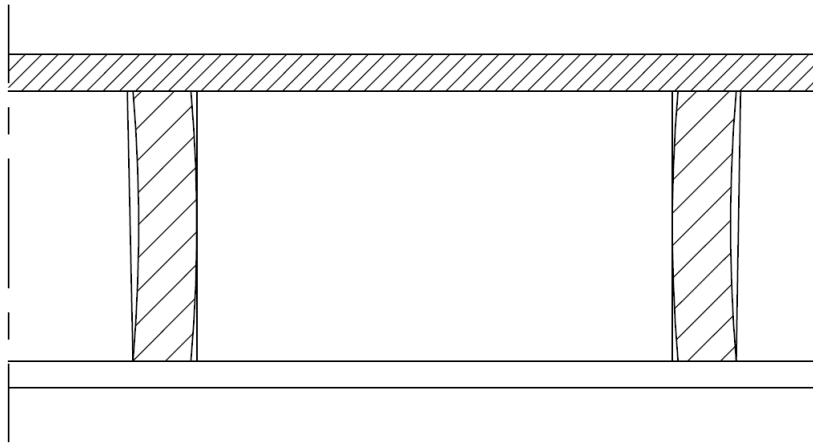
Palkkirunkoisen välipohjan jäykkyys on aina suurin palkkien suunnassa. Palkkien vastaisen suunnan suurella jäykkyydellä on kuitenkin parantavaa vaikutusta värähtelyominaisuuksiin, varsinkin jos välipohja on kahteen suuntaan kantava. Tämä parannus johtuu siitä, että molempiin suuntiin jäykkä välipohja jakaa pistekuorman leveämmälle alueelle.

Palkkien suuntaista jäykkyyttä laskiessa otetaan huomioon vain palkkien suuntaiset rakennekerrokset. Tätä vastaan kohtisuorille, sivusuuntaisille rakennusosille ei tällöin lasketa jäykkyyttä. Sama toimii käännettynä sivusuuntaista jäykkyyttä laskiessa, jolloin esimerkiksi pääpalkeille ei lasketa jäykkyyttä. Levymäiset rakenteet, kuten pintalaatta, lasketaan molempiin suuntiin jäykistäviksi. Esimerkiksi kipsilevyllä ja vanerilla on erisuuriset kimmokertoimet levyn eri suuntiin niiden valmistustavasta johtuen (Gyproc Käsi- kirja 2016, 476). Ero voi olla kymmeniä prosentteja. Tämä tulee ottaa huomioon joko käyttämällä näistä heikompaa kimmokerrointa molempiin suuntiin, tai määräämällä levyn asennussuunta, jolloin voi käyttää todellisia arvoja.

## 2.6 Poikkijäykisteet

Poikkijäykisteet ovat kantavien palkkien väleihin asennettavat, useimmiten palkkien kanssa samasta materiaalista sahatut välikapulat. Poikkijäykisteet voivat parantaa merkittävästi välipohjan sivusuuntaista jäykkyyttä. Jäykistelinjojen suurin sallittu välimatka toisistaan on kaksi metriä (RIL 2017, 198). Vaikka laskennallinen väli olisi tätä pienempi, kannattaa jäykkyyden laskemisessa käyttää kahta metriä, jolloin linjojen sijaintia voi säätää työmaalla ja ollaan varmalla puolella.

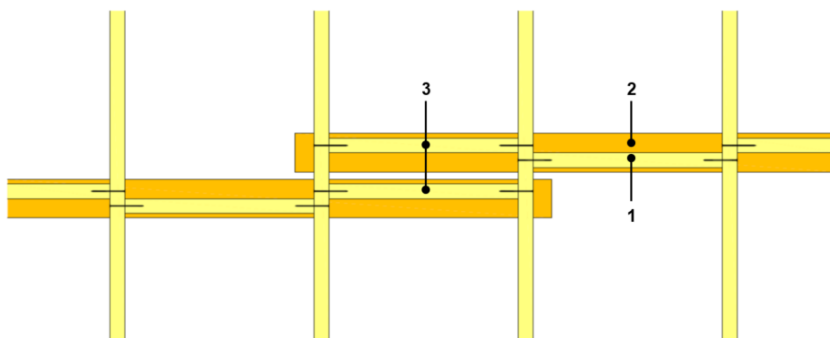
Poikkijäykisteiden asennus ja katkaisu tulee suorittaa hyvin tarkasti. Jos sahattu pää ja kantava palkki eivät ole täysin kiinni toisissaan koko matkalta, niin kantavat palkit pääsevät liikkumaan sivusuunnassa ja eivät täten ole kunnolla jäykistettyjä värähtelyn kannalta. Haitallisen värähtelyn aallonpituus voi olla vain kymmenesosamillimetrejä, joten materiaalien suoruudella ja asennustarkkuudella on suuri merkitys (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 15). Kuviossa (5) on pääsuunnan leikkaus virheellisistä välikapuloiden liitoksista.



KUVIO 5. Välikapuloiden asennusepätkä tarkkuudet

Jäykisteet asennetaan vuorottelevaan linjaan kuvion (6) mukaan siten, että seuraavan kapulan mahtuu kiinnittämään palkkiin vähintään kahdella kiinnikkeellä molemmista päistään ylä- ja alaosasta kapulaa sallitun reunaetäisyyden kohdalta. Keskelle tulevat kiinnikkeet eivät ole yhtä hyödyllisiä.

Linjan alle ja päälle tulee asentaa vähintään linjan levyiset ala- ja ylälaipat, jotka kiinnitetään välikapuloihin vähintään naulauksella n2,8x75 k200 (RIL 2017, 199). Ruuvaus toimii todellisuudessa naulausta paremmin. Lisäksi kannattaa käyttää liimaa. Laippojen tulisi olla yhtenäiset. Jos laippoja joutuu jatkamaan, tulee se tehdä kuvion (6) mukaisesti limittämällä yhden palkkivälin matkalta. Ylä- tai alalaipan voi korvata jäykällä levyllä tai koolauslaudalla, joka on kiinnitetty myös välikapuloihin. Jäykistelinjojen paikat suunnitellaan siten, että ne ovat jatkuvia eivätkä ole koolausten tiellä.



**Poikittaisjäykisteen osat**

- 1 = välikapula
- 2 = ala- tai ylälaippa
- 3 = poikittaisjäykisteen limitetty jatkos

KUVIO 6. Laippojen limitys (Puuinfo)

Välikapuloiden taivutusjäykkyys on tässä työssä laskettu olettaen välipalkisto kahden metrin k-jaolliseksi kantavaksi palkistoksi sivusuunnassa. Välikapuloiden tehollisen korkeuden voi halutessaan olettaa matalammaksi epätarkkuudet huomioiden. Laippoja ei hyödynnetä jäykkyyslaskennassa. Tällä tavalla laskettu sivusuunnan jäykkyys noin puollittaa välipohjan painuman, kun käytetään välikapuloita ilman alakoolauksia tai -levyjä. Huomioitaessa sivusuunnan jäykkyydessä myös alakoolaus tai -levy, on välikapuloiden merkitys painumaan paljon pienempi. RIL:n yksinkertaistetussa värähtelymitoituksessa (2017) sivusuunnan jäykkyys välikapuloiden kanssa huomioidaan kertomalla taipuma luvulla 0,5, mikä on samaa luokkaa tämän työn tarkemman laskennan tulosten kanssa.

## 2.7 Pintalaatta ja askelääneneristys

Pintalaatta on kansilaatan tai askeläänieristyksen päälle valettava 40 mm – 80 mm laatta, jonka tarkoitus on vaimentaa ilma- ja askelääniä ja värähtelyitä. Laatta voi olla betonia, kipsiä tai lattiatasoitetta. Kun pintalaatan olettaa täysin kelluvaksi, sen ja mahdollisen askeläänieristyksen jäykkyyden voi lisätä liittorakenteen molempien suuntien jäykkyyksiin välipohjan jäykkyyttä laskiessa sellaisenaan ilman liittovaikutusta laatasta.

Pintalaatan voi myös kiinnittää mekaanisin kiinnikkein kansilevyyn ja palkkeihin. Laatan alle ei tällöin tule askelääneneristyskerrosta. Myöskään yläkoolausta ei kannata käyttää, koska useampi leike johtaa suurempaan liukumaa laatasta. Myös jäykkyytlaskenta on helpompaa vähäleikkeisillä rakenteilla. Kiinnitettynä laatta toimii osana liittorakennetta, ja kerroksen siirtymä- ja liukukertoimet lasketaan kuten levyille. Todellisuudessa myös kitka vähentää laatan liukumaa, mutta sen vaikutusta on vaikea arvioida, joten se kannattaa jättää huomioimatta. Laatan mekaaniset kiinnikkeet voidaan hyödyntää kansilevyinkin kiinnikkeinä, jos ne tunkeutuvat palkistoon vähintään  $6d$  syvyydelle, mutta sileillä nauiloilla tunkeuman on oltava vähintään  $8d$  (Eurokoodi 5 2014, 60, 71).

Pintalaatta lisää lattiaan paljon massaa, jolloin usein varsinkin kelluva pintalaatta laskee välipohjan ominaistajuutta merkittävästi, mutta laatan jäykkyys toisaalta pienentää pistekuormasta aiheutuvaa painumaa. Kannattaa myös huomioida, että vaikka painuma laatalta vähenee, niin taipuma silti kasvaa omasta painosta.

### 3 VÄRÄHTELYMITOITUS

#### 3.1 Normit ja ohjeet

Suomessa puurakenteiden suunnittelussa käytetään pääasiassa Eurokoodi 5:ä, eli standardia SFS-EN 1995-1-1, sekä Ympäristöministeriön sille julkaisemia kansallisia liitteitä, joista viimeisin on tullut voimaan vuoden 2017 alussa. Tässä luvussa on käytetty ohjekirjana RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohjetta.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään kävelystä aiheutuvaan värähtelyyn. Värähtelymitoituksessa käytetään käyttörajatilan kuormia ja kertoimia. Eri huoneistojen välillä ei saa olla jatkuvia välipohjarakenteita, sillä toisesta huoneistosta kantautuvat värähtelyt ja äänet koetaan erityisen häiritseviksi (Talja ym. 2002, 15).

#### 3.2 Ominaistaajuus

Asuin- tai toimistohuoneiston puurakenteisen välipohjan alin ominaistaajuus  $f_1$  tulee olla yli 9 Hz. Jos näin ei ole, tulee Eurokoodin mukaan tehdä ”erikoistarkastelu”. Tähän erikoistarkasteluun ei tässä opinnäytetyössä oteta kantaa, vaan pidetään voimassa ehto

$$f_1 \geq 9 \text{ Hz} \quad (11)$$

Yhteen suuntaan kantavan lattian alin ominaistaajuus  $f_1$  saadaan kaavasta

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}, \quad (12)$$

jossa  $m$  on lattian oma massa, johon lisätään 30 kg hyötykuormasta neliometriä kohden. 30 kg on ilmeisesti päätetty olevan tyypillinen hyötykuorman todellinen arvo. Puun keskitiheytinä käytetään vähintään  $500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Kahteen suuntaan kantavan lattian alin ominaistaajuus  $f_1$  saadaan kaavasta



$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(2 \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{L}{B}\right)^4\right) \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}. \quad (13)$$

Kaavaan (13) on lisätty kaavaan (12) nähden kerroin loppuun, joka riippuu eri suuntien jänneväliden ja jäykkyyksien suhteista. Kerroin on aina yli 1, joten kahteen suuntaan kantavan rakenteen ominaistajuus on korkeampi. (RIL 2017, 99–100).

Jos lattiavasat tukeutuvat pääpalkkeihin jotka taipuvat, koko välipohjan ominaistajuus lasketaan kaavalla

$$f_{1,\text{tot}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_{1,\text{pääpalkki}}^2}}}, \quad (14)$$

jossa  $f_1$  lasketaan kaavalla (12) ja  $f_{1,\text{pääpalkki}}$  saadaan kaavasta

$$f_{1,\text{pääpalkki}} = \frac{\pi}{2B^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_{\text{pääpalkki}} + (EI)_{\text{pintalaatta}}}{m}}, \quad (15)$$

jossa  $B$  on pääpalkin jänneväli ja " $(EI)_{\text{pääpalkki}} + (EI)_{\text{pintalaatta}}$ " on pääpalkin ja mahdollisen pintalaatan yhteinen taivutusjäykkyys metriä kohden ja  $m$  on lattian massa ja 30 kg hyötykuormasta pääpalkin kohdalla neliömetrin alueella. (Talja ym. 2002, 2122). Taipuvalla tuella olevalla lattialla ominaistajuus on aina matalampi kuin vastaavalla kiinteätukisella lattialla. Siksi kaavaa (15) kannattaa käyttää, vaikka sitä ei löydykään Eurokoodista tai RIL:n ohjeista, sillä sitä käyttämällä ollaan värähtelyehdon kannalta varmalla puolella ja lähempänä totuutta.

### 3.3 1 kN:n pistekuorman aiheuttama painuma

Ominaistajuuden lisäksi tarkastetaan, että lattiapalkin kohdalla olevan pistekuorman  $F = 1$  kN aiheuttama suurin mahdollinen hetkellinen painuma  $\delta$  toteuttaa ehdon

$$\delta \leq k \cdot 0,5 \text{ mm}, \quad (16)$$

jossa  $k$  on huoneen koosta riippuva kerroin. Kerroin perustuu siihen, että ihmisten on todettu kävelevän hitaammin pienissä tiloissa (Talja ym. 2002, 18). Kerroin  $k$  saa arvon 1, jos huoneen suurin mitta  $l$  on 6 m tai suurempi. Kertoimen  $k$  arvo lasketaan kaavalla

$$k = \frac{1}{0,318 + 0,114 \cdot l} \geq 1. \quad (17)$$

Välipohjan hetkellinen painuma on pienempi lausekkeista

$$\delta = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{FL^2}{42 \cdot k_\delta \cdot (EI)_l}, \\ \frac{FL^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} \end{array} \right., \quad (18)$$

joissa  $L$  on palkkien jänneväli tuen keskeltä tuen keskelle,  $s$  on palkkien k-jako ja kerroin  $k_\delta$  lasketaan kaavalla

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}. \quad (19)$$

Yhteen suuntaan kantavassa lattiassa kertoimella  $k_\delta$  on lisäehto

$$k_\delta \leq \frac{B}{L}. \quad (20)$$

(RIL 2017, 100–101).

Jos lattiakannakkeet tukeutuvat pääpalkkeihin, painumaan on lisättävä pääpalkeista aiheutuva lisäpainuma (Talja ym. 2002, 23). Ulukkeellisissa lattioissa ulokkeen pituus katsotaan vain niin pitkäksi, missä kävely on mahdollista. Jatkuvilla ulukkeellisissa rakenteissa tulee tarkastaa hetkelliset painumat sekä ylös että alas. Moniaukkoisen rakenteen voi yksinkertaistaa yksiaukkoiseksi. Tällöin ollaan aina varmallalla puolella. Tällöin jänneväli  $l$  valitaan lattian suurimman jännevälän mukaan. Monimutkaiset rakenteet voi mitoitaa tarkemmin elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmilla. (RIL 2017, 101).

## 4 POHDINTA

Tässä työssä haasteena oli koota olemassa olevasta teoriasta ja ohjeista laskentaohje, joka on kattavampi ja tarkempi kuin muut värähtelymitoitushjelmat, mutta vähintään yhtä helppo käyttää. Esimerkiksi alalevyä tai kiinnitettyä pintalaattaa ei muissa ohjeissa hyödynnetty. Tämän johdosta tuli taiputusjäykkyyden ja liukukertoimien laskemiseen todella syventyä ja johtaa kaksi- ja kolmileikkeisten rakenteiden kaavoja nelileikkeiselle liittorakenteelle.

Laskentaesimerkissä haastavinta ja aikaa vievintä oli kaikkien mahdollisten rakenneratkaisujen huomiointi. Ohjelmassa tämä johti todella pitkiin ja sekaviin ehtolauseisiin kaavoissa. Tämän takia ohjelmaan luotiin eri välilehtiä erilaisille rakenteille, jolloin kaavojen luonti selkeytyi. Tämä myös ehkäisi virheitä ja helpotti tarkastusta. Ohjelmaa tarkasti yksi NR-osaston työntekijä, joka löysikin pari virhettä kaavoista. Ohjelma on myös ollut osastolla testikäytössä. Ohjelma saatetaan tarkastuttaa Swecon laskentaosastolla. Ohjeen ja ohjelman tuloksia voi pitää tarkempana kuin aiempia värähtelylaskentamenetelmiä. Tutkimusmenetelmä oli kirjallisuuteen tutustuminen ja haastattelut, ja kyseinen menetelmä oli onnistunut.

Laskentaohjelmaa on mahdollista päivittää esimerkiksi normien muuttuessa. Yksi jatkokehityksen paikka olisi esimerkiksi parempi yhteensopivuus olemassa olevan tai tulevan NR-suunnitteluohjelman kanssa. Mahdollisia jatkotutkimuksen aiheita ovat esimerkiksi kipsilevyn hyödyntäminen alalevynä, kitkan hyödyntäminen pintalaatan ja kipsilevyn välillä jäykkyytlaskennassa sekä tarkempi välikapuloiden jäykkyyden määrittäminen. Näiden tutkiminen vaatisi käytännössä koekuormituksia todellisille välipohjille.

## LÄHTEET

Eurokoodi 5. 2014. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Vahvistettu 16.6.2014. 3. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Gyproc Käsikirja. 2016. Kevytrakennejärjestelmät. Julkaistu 26.9.2016. Luettu 14.3.2018. <http://www.gyproc.fi/tilaa-ja-lataa/gyproc-kasikirja>

RIL205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje. 2017. Päivittänyt Ari Kevarinmäki. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suomalainen, E. 2006. Lattian värähtelymitoitus pientaloissa. Rakennustekniikan osasto. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Talja A., Toratti T. & Järvinen E. 2002. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. VTT tiedote 2124. Luettu 7.4.2018. [www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf)

**LIITTEET**

1 (11)

Liite 1. Esimerkki värähtelymitoituksesta

**Lähtötiedot**

Lasketaan välipohjan värähtelymitoitus ja taivutusjäykkyys välipohjan molempiin suuntiin kuvion (1) mukaiselle rakenteelle. Tätä esimerkkilaskelmaa voi soveltaa helposti myös käyttämättä pintalaattaa, askelääneneristystä tai alalevyä jäykkyyden laskemisessa mukana. Sitä vähäkerroksisempien rakenteiden jäykkyyden laskeminen on yksinkertaisempaa, mutta eroaa tästä esimerkistä.

Keksitään ristiinkantavalle välipohjalle tarvittavat lähtötiedot, rakenteet ja kiinnitykset.

Välipohjan  $L = 6000$  mm,  $B = 5000$  mm. Koolaukset ovat jatkamattomat.

Pintalaattana on 50 mm Knauf LM80 -kipsivalu, jonka  $E_{\text{mean,laatta}} = 17000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja

$$\rho_{\text{mean,laatta}} = 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

Askeläänieristys on 30 mm EPS-levyä, jonka  $E_{\text{mean,askel}} = 4000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja  $\rho_{\text{mean,askel}} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Kansilevyinä on kaksi kappaletta 15 mm Gyproc GL 15 -kipsilevyjä, levykerrokset liimitetään ja liimataan jäykästi yhteen esimerkiksi saneerauslaastilla, jolloin ne voidaan laskuissa ajatella yhtenäisenä levyinä. Levyt asennetaan pituussuunta koolauspuihin nähdessä poikittain, eli palkkien suuntaisesti, joten  $E_{l,\text{mean,kansi}} = 5200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ,  $E_{b,\text{mean,kansi}} = 4700 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja  $\rho_{\text{mean,kansi}} = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Kiinnitys QGG 33 -kipsiruuvilla 150 mm välein. Kiinnityksen  $K_{\text{ser,kansi}} = 1300 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ . (Gyproc-käsikirja 2016, 456, 477).

Yläkoolaus on 22 mm x 100 mm lautaa, käytetään lujuusluokan C18 arvoja eli

$E_{0,\text{mean,yläk}} = 9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ,  $\rho_{\text{mean,yläk}} = 380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Koolauksen k-jako on 300 mm. Kiinnitys 2,9 mm esiporaamaton naula, 2 kpl liitoksessa.

2 (11)

Kantavat palkit ovat lujuusluokan C30 42 mm x 223 mm lankkua, k-jako 450 mm.

$E_{0,\text{mean,palkki}} = 12000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja  $\rho_{\text{mean,palkki}} = 460 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Välikapulat palkkien materiaalista ja korkeintaan kahden metrin välein kohdan (2.5) mukaan.

Alakoolaus on 48 mm x 48 mm sahatavaraa, käytetään lujuusluokan C18 arvoja eli

$E_{0,\text{mean,yläk}} = 9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ,  $\rho_{\text{mean,yläk}} = 380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . K-jako 400 mm. Kiinnitys 2,9 mm esi-poraamaton naula, 2 kpl liitoksessa.

Alapuolinen levy on 12 mm havuvaneri. Levyt asennetaan pituussuunta koolauspuihin

nähdessä poikittain, jolloin  $E_{l,\text{mean,alalevy}} = 7963 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ,  $E_{b,\text{mean,alalevy}} = 5037 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ,

$\rho_{\text{mean,alalevy}} = 520 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Ruuvikiinnitys 3,1 mm 200 mm välein.

### Palkkien suunnan jäykkyys

Lasketaan lattiakerrosten taivutusjäykkyys palkkien suuntaan metrin leveydeltä. Taivutusjäykkyys on tulo ( $EI$ ).  $E$  saadaan lähtötiedoista, ja  $I$  voidaan laskea kaavalla (4). Liittorakenteen osalta leveys lasketaan laskemalla yhden palkin muodostaman liittorakenteen taivutusjäykkyys sen leveydeltä ja kertomalla se kertoimella  $\frac{1000}{s_{\text{palkki}}}$ , joka on palkkien ja liittorakenteiden lukumäärä metrin matkalla. Liittorakenteen leveys  $b_l$  lasketaan kaavalla  $\min\left\{s_{\text{palkki}}; \frac{L}{10}\right\} = \min\left\{450 \text{ mm}; \frac{6000 \text{ mm}}{10}\right\} = 450 \text{ mm}$  (Suomalainen, 2006). Palkki-jako kannattaa pitää tässä ehdossa määrävänä, jolloin koko poikkileikkaus toimii laskennallisesti jäykistävänä. Kelluva pintalaatta ja askeläänieristys voidaan laskea suoraan 1000 mm leveänä.

$$(EI)_{\text{laatta}} = E_{\text{mean,laatta}} \cdot \frac{1000 \text{ mm} \cdot h_{\text{laatta}}^3}{12} = 17000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1000 \text{ mm} \cdot (50 \text{ mm})^3}{12} = 1,77083 \cdot 10^8 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 177083 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

$$(EI)_{\text{askel}} = E_{\text{mean,askel}} \cdot \frac{1000 \text{ mm} \cdot h_{\text{askel}}^3}{12} = 4000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1000 \text{ mm} \cdot (30 \text{ mm})^3}{12} = 9000000 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 9000 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

3 (11)

$$(EI)_{l,\text{kansi}} = E_{l,\text{mean,kansi}} \cdot \frac{b_l \cdot h_{\text{kansi}}^3}{12} = 5200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{450 \text{ mm} \cdot (30 \text{ mm})^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{\text{palkki}}} =$$

$$1,1700 \cdot 10^7 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} \cdot \frac{1000}{450 \text{ mm}} = 11700 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

$$(EI)_{\text{palkki}} = E_{0,\text{mean,palkki}} \cdot \frac{b_{\text{palkki}} \cdot h_{\text{palkki}}^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{\text{palkki}}} = 12000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{42 \text{ mm} \cdot (223 \text{ mm})^3}{12} \cdot$$

$$\frac{1000}{450 \text{ mm}} = 1,035026 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 1035026 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

$$(EI)_{l,\text{alalevy}} = E_{l,\text{mean,alalevy}} \cdot \frac{b_l \cdot h_{\text{alalevy}}^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{\text{palkki}}} = 7963 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{450 \text{ mm} \cdot (12 \text{ mm})^3}{12} \cdot \frac{1000}{450 \text{ mm}} =$$

$$1147000 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 1147 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

Koko rakenteen taivutusjäykkyys palkkien suuntaan ilman liittovaikutusta on kaikkien kerrosten summa, eli

$$(EI)_{\text{min},l} = \sum (EI)_l = 177083 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 9000 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 11700 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 1035026 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} +$$

$$1147 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} = 1233956 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

Lasketaan puuttuvat siirtymäkerroimet yksittäisille liittimille. Kansilevyn siirtymäkerroin saatiin Gyproc-käsikirjasta (2016),  $K_{\text{ser,kansi}} = 1300 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ . Ylä- ja alakoolauksen esiporaamattomien nauhojen siirtymäkerroin lasketaan kaavoilla (7) ja (8).

$$K_{\text{ser,yläk}} = K_{\text{ser,alak}} = \frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{30} = \frac{\sqrt{380 \cdot 460}^{1,5} \cdot 2,9^{0,8}}{30} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 668 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

Ja alalevyn ruuvien siirtymäkerroin lasketaan kaavoilla (6) ja (8).

$$K_{\text{ser,alalevy}} = \frac{\rho_m^{1,5} d}{23} = \frac{\sqrt{520 \cdot 380}^{1,5} \cdot 3,1}{23} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 1263 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

4 (11)

Liitosten havainnollistamiseksi leikataan kuvitteellinen pala rakenteesta siten, että palan leveys on yksi palkkiväli, ja pituus yläkoolausten väli. Muodostetaan saadusta leikkauksesta jousiliitos. Kannen ja yläkoolausten osalta jousiliitos vastaa kuviota 2, sillä yläkoolaus on kiinni kahdella kiinnikkeellä ja palkkivälille mahtuu 3 kansiruuvia  $\frac{450 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} = 3$  kpl. Alakoolausten kiinnikkeitä on leikkauksessa laskennallisesti koolausten k-jakojen suhteen mukaisesti  $\frac{300 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} \cdot 2 \text{ kpl} = 1,5$  kpl. Alalevynkin kiinnikkeiden määrä riippuu koolausten k-jakojen suhteesta, eli niitä on  $\frac{300 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} \cdot \frac{450 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 1,69$  kpl.

Kansi- ja alalevyn kokonaissiirtymäkertoimiksi levyille saadaan kaavat (9) ja (10) yhdistämällä

$$K_{l,\text{tot},\text{kansi}} = \left( \frac{1}{3 \cdot 1300 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} + \frac{1}{2 \cdot 668 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} \right)^{-1} = 995 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \text{ ja}$$

$$K_{l,\text{tot},\text{alalevy}} = \left( \frac{1}{1,5 \cdot 668 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} + \frac{1}{1,69 \cdot 1263 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} \right)^{-1} = 682 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

Koolausten kokonaissiirtymiä ei tarvitse palkkien suunnassa laskea erikseen, sillä ne eivät ole jäykistäviä palkkien suunnassa. Niiden siirtymät sisältyvät levyjen kaavoihin.

Lasketaan seuraavaksi kerrosten poikkipinta-alat. Koska liitos on leikattu yhden palkkivälin eli 450 mm:n leveydeltä, on palkin poikkipinta-ala  $A_{l,\text{palkki}} = 42 \text{ mm} \cdot 223 \text{ mm} = 9366 \text{ mm}^2$ , kansilevyn poikkipinta-ala on  $A_{l,\text{kansi}} = 450 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm} = 13500 \text{ mm}^2$  ja alalevyn poikkipinta-ala on  $A_{l,\text{alalevy}} = 450 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm} = 5400 \text{ mm}^2$ .

Viimeinen puuttuva osa liukukertoimen kaavasta on kiinnikejako  $s_{l,\text{tot}}$ , joka on kaikissa rakennekerroksissa yläkoolausten k-jaon verran, eli 300 mm. Tämä tulee leikatusta rakenteen osasta, jonka perusteella siirtymät laskettiin. Tässä ei tule käyttää levyjen omia



5 (11)

kiinnikejakoja, sille ne on jo huomioitu kokonaissiirtymäkertoimessa. Jäykkyysskeskiakseli sijaitsee varmasti palkkien kohdalla, joten  $\gamma_{l,palkki} = 1$ . Pintalaatan ja askeläänieristeen liukukertoimet ovat 0, eli ne eivät ole osa liittorakennetta.

Lasketaan kerrosten liukukertoimet kaavalla (5).

$$\gamma_{l,kansi} = \left( \frac{1 + \pi^2 \cdot E_{l,kansi} \cdot A_{l,kansi} \cdot S_{l,tot}}{K_{l,tot,kansi} \cdot L^2} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1 + \pi^2 \cdot 5200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 13500 \text{ mm}^2 \cdot 300 \text{ mm}}{995 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (6000 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,147$$

$$\gamma_{l,alalevy} = \left( \frac{1 + \pi^2 \cdot E_{l,alalevy} \cdot A_{l,alalevy} \cdot S_{l,tot}}{K_{l,tot,alalevy} \cdot L^2} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1 + \pi^2 \cdot 7963 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 5400 \text{ mm}^2 \cdot 300 \text{ mm}}{328 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (6000 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,162$$

Nyt voidaan laskea neutraaliakselin sijainti palkin keskikohtaan nähden taivutukselle kaavalla (2).

$$a_{l,palkki} = \frac{0,147 \cdot 5200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 13500 \text{ mm}^2 \cdot (30 \text{ mm} + 22 \text{ mm} + 223 \text{ mm}) - 0,162 \cdot 7963 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 5400 \text{ mm}^2 \cdot (12 \text{ mm} + 48 \text{ mm} + 223 \text{ mm})}{2 \cdot \left( 0,147 \cdot 5200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 13500 \text{ mm}^2 + 1 \cdot 12000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 9366 \text{ mm}^2 + 0,162 \cdot 7963 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 5400 \text{ mm}^2 \right)}$$

$$a_{l,palkki} = 3,4 \text{ mm.}$$

Positiivinen luku tarkoittaa, että neutraaliakseli sijaitsee palkkikerroksen keskiviivasta 3,4 mm yläpuolella. Tästä voidaan laskea etäisyydet muiden kerrosten keskiviivoihin.

$$a_{l,kansi} = \frac{30 \text{ mm}}{2} + 22 \text{ mm} + \frac{223 \text{ mm}}{2} - 3,4 \text{ mm} = 145,1 \text{ mm.}$$

$$a_{l,alalevy} = \frac{12 \text{ mm}}{2} + 48 \text{ mm} + \frac{223 \text{ mm}}{2} + 3,4 \text{ mm} = 168,9 \text{ mm.}$$

Nyt voidaan laskea välipohjan palkkien suuntainen taivutusjäykkyys metrin kaistalta kaavalla (1). Korvataan summan ensimmäinen termi jo lasketulla minimijäykkyydellä. Minimijäykkyyteen kuuluu myös pintalaatan ja askeläänieristeen jäykkyys.

6 (11)

$$\begin{aligned}
(EI)_{ef,l} &= \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) = (EI)_{\min,l} + \sum_{i=1}^n \gamma_i E_i A_i a_i^2 (EI)_{ef,l} = \\
&1233956000 \frac{\text{N}\cdot\text{mm}^2}{\text{mm}} + 0,147 \cdot 5200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 13500 \text{ mm}^2 \cdot (145,1 \text{ mm})^2 + 1 \cdot \\
&12000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 9366 \text{ mm}^2 \cdot (3,4 \text{ mm})^2 + 0,162 \cdot 7963 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 5400 \text{ mm}^2 \cdot \\
&(168,9 \text{ mm})^2 = 2,16007 \cdot 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{mm}^2}{\text{mm}} = 2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.
\end{aligned}$$

Kun lasketaan tehokkaan jäykkyyden ja minimijäykkyyden suhde, huomataan että liittovaikutus huomioituna taivutusjäykkyys on 1,75-kertainen kerrosten itsenäisiin jäykkyyksiin nähden. Vaikutus olisi suhteessa suurempi ilman kelluvaa pintalaattaa.

$$\text{Liittovaikutus}_l = \frac{(EI)_{ef,l}}{(EI)_{\min,l}} = \frac{2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}{1233956 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}} = 1,75.$$

### Sivusuunnan jäykkyys

Lasketaan seuraavaksi taivutusjäykkyys sivusuuntaan. Liittorakenteen leveys  $b_b$  lasketaan kaavalla  $\min \left\{ s_{yläk}; \frac{B}{10} \right\} = \min \left\{ 300 \text{ mm}; \frac{5000 \text{ mm}}{10} \right\} = 300 \text{ mm}$  (Suomalainen, 2006). Lasketaan seuraavaksi puuttuvien kerrosten jäykkyydet.  $(EI)_{laatta} = 177083 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}$  ja  $(EI)_{askel} = 9000 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}$ .

$$\begin{aligned}
(EI)_{b,\text{kansi}} &= E_{b,\text{mean},\text{kansi}} \cdot \frac{b_b \cdot h_{\text{kansi}}^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{yläk}} = 4700 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{300 \text{ mm} \cdot (30 \text{ mm})^3}{12} \cdot \frac{1000}{300 \text{ mm}} = \\
&10575000 \frac{\text{N}\cdot\text{mm}^2}{\text{mm}} = 10575 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(EI)_{yläk} &= E_{0,\text{mean},\text{yläk}} \cdot \frac{b_{yläk} \cdot h_{yläk}^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{yläk}} = 9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{100 \text{ mm} \cdot (22 \text{ mm})^3}{12} \cdot \frac{1000}{300 \text{ mm}} = \\
&2662000 \frac{\text{N}\cdot\text{mm}^2}{\text{mm}} = 2662 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(EI)_{väli} &= E_{0,\text{mean},\text{palkki}} \cdot \frac{b_{\text{palkki}} \cdot h_{\text{palkki}}^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{väli}} = 12000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{42 \text{ mm} \cdot (223 \text{ mm})^3}{12} \cdot \\
&\frac{1000}{2000 \text{ mm}} = 2,32881 \cdot 10^8 \frac{\text{N}\cdot\text{mm}^2}{\text{mm}} = 232881 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.
\end{aligned}$$

7 (11)

$$(EI)_{\text{alak}} = E_{0,\text{mean,alak}} \cdot \frac{b_{\text{alak}} \cdot h_{\text{alak}}^3}{12} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{s_{\text{alak}}} = 9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{48 \text{ mm} \cdot (48 \text{ mm})^3}{12} \cdot \frac{1000}{400 \text{ mm}} = 9953000 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 9953 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

$$(EI)_{b,\text{alalevy}} = E_{b,\text{mean,alalevy}} \cdot \frac{b_b \cdot h_{\text{alalevy}}^3}{12} \cdot \frac{1000}{s_{\text{yläk}}} = 5037 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{300 \text{ mm} \cdot (30 \text{ mm})^3}{12} \cdot \frac{1000}{300 \text{ mm}} = 725000 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 725 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

Koko rakenteen taivutusjäykkyys sivusuuntaan ilman liittovaikutusta on kaikkien kerrosten summa, eli

$$(EI)_{\text{min},b} = \sum (EI)_b = 177083 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 9000 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 10575 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 2662 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 232881 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 9953 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} + 725 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}} = 442880 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

Liitosten havainnollistamiseksi leikataan kuvitteellinen pala rakenteesta siten, että palan leveys on yläkoolausten väli 300 mm, ja pituus kansiruuvin ruuvausväli 150 mm. Muodostetaan saadusta leikkauksesta jousiliitos. Kannessa on tällöin yksi liitin. Yläkoolauksessa liittimiä on kannen ruuvivälin ja k-jaon suhteessa  $\frac{150 \text{ mm}}{450 \text{ mm}} \cdot 2 \text{ kpl} = 0,667 \text{ kpl}$ . Alakoolauksen kiinnikkeitä on leikkauksessa laskennallisesti koolausten k-jakojen suhteessa  $\frac{300 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} \cdot \frac{150 \text{ mm}}{450 \text{ mm}} \cdot 2 \text{ kpl} = 0,500 \text{ kpl}$ . Alalevyn kiinnikkeiden määrä riippuu koolausten k-jakojen ja levyjen ruuvijakojen suhteesta, eli niitä on  $\frac{150 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} \cdot \frac{300 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 0,563 \text{ kpl}$ .

Kokonaissiirtymäkertoimiksi saadaan kaavoilla (9) ja (10)

$$K_{b,\text{tot,yläk}} = 0,667 \cdot 668 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 445 \frac{\text{N}}{\text{mm}},$$

$$K_{b,\text{tot,kansi}} = \left( \frac{1}{445 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} + \frac{1}{1300 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} \right)^{-1} = 332 \frac{\text{N}}{\text{mm}},$$

$$K_{b,tot,alak} = 0,500 \cdot 668 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 334 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \text{ ja}$$

$$K_{b,tot,alalevy} = \left( \frac{1}{334 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} + \frac{1}{0,563 \cdot 1263 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} \right)^{-1} = 227 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

Kerrosten poikkipinta-alat lasketaan sivusuunnassa 300 mm:n leveydeltä. Välikapulan poikkipinta-ala  $A_{b,väli} = \frac{300 \text{ mm}}{2000 \text{ mm}} \cdot 42 \text{ mm} \cdot 223 \text{ mm} = 2107 \text{ mm}^2$ , kansilevyn poikkipinta-ala on  $A_{b,kansi} = 300 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm} = 9000 \text{ mm}^2$ , yläkoolauksen  $A_{b,yläk} = 22 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm} = 2200 \text{ mm}^2$ , alakoolauksen  $A_{b,alak} = \frac{300 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} \cdot 48 \text{ mm} \cdot 48 \text{ mm} = 1728 \text{ mm}^2$  ja alalevyn poikkipinta-ala on  $A_{b,alalevy} = 300 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm} = 3600 \text{ mm}^2$ . Kiinnikejako  $s_{b,tot}$  on kaikissa kerroksissa sama, eli kannen kiinnikejako 150 mm.

Jäykkyykeskiakseli sijaitsee välikapuloiden kohdalla, joten  $\gamma_{b,väli} = 1$ . Pintalaatan ja askeläänieristeen liukukertoimet ovat 0, eli ne eivät ole osa liittorakennetta.

Lasketaan kerrosten liukukertoimet kaavalla (5).

$$\gamma_{b,kansi} = \left( \frac{1 + \pi^2 \cdot E_{b,kansi} \cdot A_{b,kansi} \cdot s_{b,tot}}{K_{b,tot,kansi} \cdot B^2} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1 + \pi^2 \cdot 4700 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 9000 \text{ mm}^2 \cdot 150 \text{ mm}}{332 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (5000 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,117$$

$$\gamma_{b,yläk} = \left( \frac{1 + \pi^2 \cdot E_{0,alak} \cdot A_{b,alak} \cdot s_{b,tot}}{K_{b,tot,alak} \cdot B^2} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1 + \pi^2 \cdot 9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 2200 \text{ mm}^2 \cdot 150 \text{ mm}}{445 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (5000 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,275$$

$$\gamma_{b,alak} = \left( \frac{1 + \pi^2 \cdot E_{0,yläk} \cdot A_{b,yläk} \cdot s_{b,tot}}{K_{b,tot,yläk} \cdot B^2} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1 + \pi^2 \cdot 5037 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1728 \text{ mm}^2 \cdot 150 \text{ mm}}{334 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (5000 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,266$$

$$\gamma_{b,\text{alalevy}} = \left( \frac{1 + \pi^2 \cdot E_{b,\text{alalevy}} \cdot A_{b,\text{alalevy}} \cdot S_{b,\text{tot}}}{K_{b,\text{tot,alalevy}} \cdot B^2} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1 + \pi^2 \cdot 5037 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 3600 \text{ mm}^2 \cdot 150 \text{ mm}}{227 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (5000 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,175$$

Nyt voidaan laskea neutraaliakselin sijainti välipalkin keskikohtaan nähden taivutukselle kaavalla (3). Jätetään sijoitus tekemättä tilanpuutteen vuoksi.

$$a_3 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2 + h_3) + \gamma_2 E_2 A_2 (h_2 + h_3) - (\gamma_4 E_4 A_4 (h_4 + h_3)) + (\gamma_5 E_5 A_5 (h_5 + h_4 + h_3))}{2 \sum_{i=1}^5 \gamma_i E_i A_i}$$

$$a_{b,\text{väli}} = 7,9 \text{ mm.}$$

Positiivinen luku tarkoittaa, että neutraaliakseli sijaitsee välipalkkikerroksen keskivivasta 7,9 mm yläpuolella. Tästä voidaan laskea etäisyydet muiden kerrosten keskivivoihin.

$$a_{b,\text{kansi}} = \frac{30 \text{ mm}}{2} + 22 \text{ mm} + \frac{223 \text{ mm}}{2} - 7,9 \text{ mm} = 140,6 \text{ mm.}$$

$$a_{b,\text{yläk}} = \frac{22 \text{ mm}}{2} + \frac{223 \text{ mm}}{2} - 7,9 \text{ mm} = 114,6 \text{ mm.}$$

$$a_{b,\text{alāk}} = \frac{48 \text{ mm}}{2} + \frac{223 \text{ mm}}{2} + 7,9 \text{ mm} = 143,4 \text{ mm.}$$

$$a_{l,\text{alalevy}} = \frac{12 \text{ mm}}{2} + 48 \text{ mm} + \frac{223 \text{ mm}}{2} + 7,9 \text{ mm} = 173,4 \text{ mm.}$$

Sivusuuntainen taivutusjäykkyys metrin kaistalta saadaan kaavalla (1). Korvataan summan ensimmäinen termi jo lasketulla minimijäykkyydellä.

$$(EI)_{\text{ef},b} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) = (EI)_{\text{min},b} + \sum_{i=1}^n \gamma_i E_i A_i a_i^2 =$$

$$442880000 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} + 0,117 \cdot 4700 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 9000 \text{ mm}^2 \cdot (140,6 \text{ mm})^2 + 0,275 \cdot$$

$$9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 2200 \text{ mm}^2 \cdot (114,6 \text{ mm})^2 + 1 \cdot 12000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 2107 \text{ mm}^2 \cdot (7,9 \text{ mm})^2 +$$

10 (11)

$$0,117 \cdot 9000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1728 \text{ mm}^2 \cdot (143,4 \text{ mm})^2 + 0,175 \cdot 5037 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 3600 \text{ mm}^2 \cdot (173,4 \text{ mm})^2 = 1,586269 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = 1586269 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}.$$

$$\text{Liittovaikutus}_b = \frac{(EI)_{\text{ef},b}}{(EI)_{\text{min},b}} = \frac{1586269 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}{442880 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}} = 3,58.$$

Vertailun vuoksi täysin jäykän, tehtaalla liimatun rakenteen liittovaikutus olisi ollut 15,22.

### Värähtelymitoitus

Välipohjan massa neliötä kohti lasketaan puun osalta vähintään keskitiheydellä  $500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Lisätään omaan massaan 30 kg hyötykuormasta, saadaan  $m = 157 \text{ kg} + 30 \text{ kg} = 187 \text{ kg}$ .

Välipohja on ristiinkantava, joten sen alin ominaistajuus saadaan kaavalla (13).

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(2 \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{L}{B}\right)^4\right) \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} = \frac{\pi}{2 \cdot (6,000 \text{ m})^2} \cdot \sqrt{\frac{2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}{187 \text{ kg}}}.$$

$$\sqrt{1 + \left(2 \left(\frac{6,000 \text{ m}}{5,000 \text{ m}}\right)^2 + \left(\frac{6,000 \text{ m}}{5,000 \text{ m}}\right)^4\right) \cdot \frac{1586269 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}{2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}} = 10,10 \text{ Hz} \geq 9 \text{ Hz. Taajuus OK.}$$

Painumalaskennassa  $k_\delta$  saadaan kaavalla (19). Lisäehtoa (20) ei huomioida tässä ristiinkantavassa välipohjassa.

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} = \sqrt[4]{\frac{1586269 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}{2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}}} = 0,926.$$

1 kN:n pistekuormasta aiheutuva painuma lattiakannakkeen kohdalla lasketaan kaavalla (16).

11 (11)

$$\delta = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{FL^2}{42 \cdot k_\delta \cdot (EI)_l} = \frac{1000 \text{ N} \cdot (6,000 \text{ m})^2}{42 \cdot 0,926 \cdot 2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}} = 0,00043 \text{ m} = 0,43 \text{ mm} \\ \frac{FL^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} = \frac{1000 \text{ N} \cdot (6,000 \text{ m})^3}{48 \cdot 0,45 \text{ m} \cdot 2160070 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}} = 0,00463 \text{ m} = 4,63 \text{ mm} \end{array} \right.$$

$$\delta = 0,43 \text{ mm}.$$

Oletetaan asuinhuoneen suurimmaksi sivumitaksi suurempi arvoista  $B$  ja  $L$ , eli 6000 mm. Tällöin  $k$ -kerroin on 1.

Painumaehto on kaava (16).

$$\delta = 0,43 \text{ mm} \leq k \cdot 0,5 \text{ mm} = 1 \cdot 0,5 \text{ mm}, \text{ painuma OK.}$$

Käyttöaste on  $\frac{0,43 \text{ mm}}{1 \cdot 0,5 \text{ mm}} \cdot 100 \% = 86 \%$ .

Rakenne on siis kunnossa värähtelyn suhteen.

## Liite 2. Kiinnikkeiden vaikutus värähtelyominaisuuksiin

Taulukossa (2.1) on esitetty eri kiinnitystavat, taulukossa (2.2) on eri kiinnitysten vaikutus liukukertoimiin ja taulukossa (2.3) vaikutus taiputusjäykkyyksiin ja värähtelyominaisuuksiin muuten liitteen (1) mukaisessa välipohjassa, jossa kiinnitys on ainoa muuttuva tekijä.

TAULUKKO 2.1. Kiinnitykset

Kiinnitys	kansilevy	yläkoolaus	alakoolaus	alalevy
1. alkuperäinen	QGG 33 k150	2 x naula 2,9	2 x naula 2,9	ruuvi 3,1 k200
2. tiheä	QGG 33 k100	3 x ruuvi 3,1	3 x ruuvi 3,1	ruuvi 3,1 k100
3. harva	QGG 33 k400	2 x naula 2,9	2 x naula 2,9	ruuvi 3,1 k400
4. tehdasliima	tehdasliimaus	tehdasliimaus	tehdasliimaus	tehdasliimaus
5. työmaaliima	työmaaliimaus	työmaaliimaus	työmaaliimaus	työmaaliimaus

TAULUKKO 2.2. Kiinnitysten vaikutus liukukertoimiin

Kiinnitys	$\gamma_{l,kansi}$	$\gamma_{l,alalevy}$	$\gamma_{b,kansi}$	$\gamma_{b,yläk}$	$\gamma_{b,alāk}$	$\gamma_{b,alalevy}$
1. alkuperäinen	0,147	0,162	0,117	0,275	0,266	0,175
2. tiheä	0,273	0,308	0,224	0,496	0,484	0,328
3. harva	0,108	0,124	0,085	0,275	0,266	0,134
4. tehdasliima	1	1	1	1	1	1
5. työmaaliima	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25

TAULUKKO 2.3. Kiinnitysten vaikutus jäykkyyksiin ja värähtelyominaisuuksiin

Kiinnitys	$(EI)_{ef,l} \left[ \frac{\text{kN} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} \right]$	$(EI)_{ef,b} \left[ \frac{\text{kN} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} \right]$	$f_1$ [Hz]	$\delta$ [mm]
1. alkuperäinen	2160	1586	10,10	0,43
2. tiheä	2973	2568	12,64	0,30
3. harva	1928	1430	9,58	0,48
4. tehdasliima	7184	6742	20,33	0,12
5. työmaaliima	2738	2534	12,48	0,32

Taulukosta 2.3 nähdään että tiheällä kiinnityksellä saatiin paremmat tulokset kuin työmaaliimauksella, jolloin työmaaliimausta ei kannata käyttää laskuissa.