



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# MATALATAAJUUKSISEN CLT-RAKENTEEN SOVELTU- VUUS ASUINRAKENNUKSEN LATTIAKSI

TEKIJÄ: Pekka Pentti

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Pekka Pentti	
Työn nimi Matalataajuuksisen CLT-rakenteen soveltuvuus asuinrakennuksen lattiaksi	
Päiväys	3.5.2016
Sivumäärä	77
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja lehtori, DI Matti Mikkonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Olament Oy	
Tiivistelmä	
<p>Opinnäytetyön taustana oli rakennusinsinööri Tero Lahtelan, Puuinfo, näkemys, jonka mukaan olisi syytä tutkia CLT-rakenteisen matalataajuuslattian ominaisuuksia ja soveltuvuutta Suomessa rakennettavien asuinrakennusten lattiaksi. Nykyisten normien mukaan Suomessa ei sallita matalataajuuksisia CLT-rakenteita asuinrakennusten lattiaksi. Opinnäytetyössä tehtyä tutkimusta pidettiin ajankohtaisena CLT-rakentamisen noususuhdanteen vuoksi. Lisäksi CLT-rakentaminen on uudenlainen rakennustapa Suomessa, joten kyseisestä aiheesta ei juurikaan ole tehty vastaavanlaisia tutkimuksia. Taustaoletuksena oli, että CLT-rakenteinen matalataajuuslattia lisäisi CLT-rakenteiden kustannuskilpailukykyä, koska matalataajuuksinen lattia mahdollistaisi ohuemmat ja/tai pidemmät lattiat, joiden seurauksena saavutettaisiin materiaalisäästöjä. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua CLT-rakenteisen ala- ja välipohjan värähtelymitoitukseen sekä analysoida matalataajuuksisen CLT-rakenteen kannattavuutta.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin Suomessa voimassa oleviin määräyksiin ja ohjeisiin, joita sovelletaan puurakenteisten lattioiden värähtelymitoitukseen. Lisäksi perehdyttiin olemassa oleviin värähtelymitoituksen määräyksiin ja ohjeisiin, jotka koskevat matalataajuuksisia lattioita. Opinnäytetyössä tutkittiin määräykset ja ohjeet täyttävien matalataajuuksisten CLT-rakenteiden lattioiden värähtelyä. Tutkimisen jälkeen tuloksia analysoitiin ja tehtiin johtopäätöksiä CLT-rakenteiden matalataajuuslattioiden toimivuudesta ja kannattavuudesta.</p> <p>Opinnäytetyönä laadittiin raportti, joka koostuu teoriaosiesta, esimerkkilaskelmista, tutkimusosiesta sekä tulokset ja yhteenveto-osiesta. Teoriaosiossa perehdyttiin värähtelymitoitukseen ja kuvattiin sen eri vaiheita. Teoriaosion jälkeen raporttiin laskettiin esimerkkilaskelmia havainnollistamaan CLT-rakenteiden ominaisuuksia ja mitoitusmenetelmiä. Varsinainen tutkimus tehtiin laatimalla Excel-laskentataulukko, jonka pohjalta voitiin tehdä laajuudeltaan tarpeita vastaava analyysi CLT-lattioiden värähtelyistä. Laskentataulukon arvoja ja esimerkkilaskelmia verrattiin Abaqus-mitotusohjelmalla laskettuihin tuloksiin, jolloin saatiin parempi käsitys tulosten paikkansa pitävyydestä. Tulokset ja yhteenveto -lukuun koottiin laskentataulukolla laaditut analyysit, joista tehtiin johtopäätöksiä.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin useita erilaisia analyyseja, jotka on esitetty kuvioina. Kuvioiden pohjalta voitiin paremmin hahmottaa kokonaiskuva CLT-rakenteiden lattioiden värähtelykäyttäytymisestä. Kuvioiden avulla tehtiin johtopäätöksiä matalataajuuksisten CLT-rakenteiden soveltuvuudesta asuinrakennuksen lattiaksi. Tämän opinnäytetyön perusteella tehty keskeisin johtopäätös osoitti, ettei matalataajuuksisten CLT-lattioiden suunnittelua ja toteutusta ole järkevää mahdollistaa asuinrakennuksiin Suomessa. Sen sijaan saatujen tulosten perusteella esitettiin ehdotelmia jatkotutkimuksista, jotka voisivat paremmin tuoda kustannussäästöjä CLT-rakentamiseen. Tämän opinnäytetyön tulokset olivat hyödyksi tilaajalle, koska joitakin tutkimussuuntia voitiin rajata pois ja uusia saatiin tilalle.</p>	
Avainsanat CLT, lattia, värähtely, resonanssi, matalataajuus, korkeataajuus	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Pekka Pentti			
Title of Thesis Suitability of Low-Frequency CLT Structure for Residential Building Floor			
Date	3 May 2016	Pages	77
Supervisor(s) PhD Arto Puurula, Principal Lecturer, Mr Matti Mikkonen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Olament Oy			
<p>Abstract</p> <p>The background of this thesis was an announcement by a construction engineer, Tero Lahtela, Puuinfo, which indicated that there was a reason to research the properties of low-frequency CLT structures. The aim was to research how low-frequency CLT structures would work as a structure in the residential building floor in Finland. The research seemed to be topical because of the boom in CLT construction. In addition, the CLT construction is a new way to construct in Finland so not many similar researches have been carried out. The background pre-supposition was that CLT structured low-frequency floors would increase the cost-competitiveness of CLT structures as a result of longer and thinner floors. The crystallized aim was to study the vibration design methods of floors and then analyze the profitability of the low-frequency CLT structure.</p> <p>Valid design norms of vibration in wood floors were studied in this thesis. Also the design norms of vibration in low-frequency floors were studied. After researching low-frequency CLT floors that qualified the vibration design norms the results were analyzed and some conclusions were made.</p> <p>The report of this thesis consists of a theory section, an example of the calculations, the research section, as well as a summary section. Design methods of vibration in floors and their different stages were studied in the theory section. Sample calculations were made after the theory section to demonstrate the properties of CLT structures and methods of vibration design. The actual research was done by composing a spreadsheet by the Excel program on the basis of which it was possible to analyze the vibration in CLT floors as much as needed. The results from the spreadsheet were compared to the values that were calculated with the Abaqus design software to see correspondence between the results. The analyzed results from the spreadsheet were included in the summary section of which the conclusions were made.</p> <p>The results of this thesis consist of several different analyses which are presented in the format of figures. On the basis of these figures it is easier to understand the big picture of behavior of vibration in CLT structured floors. The conclusions about the suitability of CLT structures to residential building floors was made with the help of these figures. The key conclusion on the basis of this thesis is that it makes no sense to enable design and implementation of low-frequency CLT floors in the residential building in Finland. On the other hand, based on this thesis some further research ideas that could better bring cost-competitiveness to the CLT construction were found. The results of this thesis were beneficial to the Client Organisation because some areas of research could be ruled out and some new ideas were found for further research.</p>			
Keywords CLT, floor, vibration, resonance, low-frequency, high-frequency			

## ALKUSANAT

Suuret kiitokset toimitusjohtaja Jorma Kataiselle Olament Oy:stä hyvästä yhteistyöstä opinnäytetyön tekemisen aikana. Kiitän myös työni ohjaajaa yliopettaja, tekniikan tohtori Arto Puurulaa ammattitaisesta ohjauksesta ja viisaista neuvoista opinnäytetyön tekemiseen. Iso kiitos myös tärkeitä neuvoja antaneelle rakennustekniikan diplomi-insinööri Jussi-Pekka Matilaiselle opinnäytetyössä eteenpäin pääsemiseksi.

Erityiskiitokset rakkaalle vaimolleni pitkäjänteisyydestä opinnäytetyön aikana sekä tuen antamisesta ja kannustamisesta koko opintojeni aikana.

Kuopiossa 3.5.2016

Pekka Pentti

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
1.1	Taustat ja tavoitteet.....	8
1.2	Olament Oy .....	8
1.3	Lyhenteet ja määritelmät.....	9
1.4	Termejä .....	9
2	CLT-LEVYN OMINAISUUDET .....	11
2.1	CLT-levyn määrittely ja käyttökohteet .....	11
2.2	Materiaaliominaisuudet.....	13
2.3	Mitoitusperiaatteet .....	13
3	VÄRÄHTELYN HUOMIOIMINEN SUUNNITTELUSSA .....	16
3.1	Värähtelymitoitettavat rakenteet .....	16
3.2	Liikenteen aiheuttama värähtely .....	16
3.3	Pyykinpesukoneen aiheuttama värähtely .....	17
3.4	Kävelyn aiheuttama värähtely .....	17
4	VÄRÄHTELYN VAIKUTUKSET IHMISIIN.....	19
4.1	Milloin värähtely on epämiellyttävää? .....	19
4.2	Ulkoisten ja sisäisten tekijöiden merkitys .....	20
5	JATKUVAN SYSTEEMIN VÄRÄHTELY.....	22
5.1	Palkin liikeytälö .....	22
5.2	Ominaistaajuuden laskentakaava .....	23
6	KORKEATAAJUUKSINEN JA MATALATAAJUUKSINEN VÄLIPOHJA .....	25
6.1	Välipohjien värähtelymuoto .....	25
6.2	Jako matala- ja korkeataajuuksiin välipohjiin .....	26
6.3	Korkeataajuksiset välipohjat .....	27
6.4	Matalataajuksiset välipohjat.....	28
7	ALA- JA VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYMITOITUS .....	30
7.1	Euronormit .....	30
7.2	Suomen kansallinen liite .....	30
7.3	EU:n alueella esiintyviä kansallisia määräyksiä .....	32
8	LASKUESIMERKIT.....	33
8.1	Tehollisen jäyhyysmomentin laskenta 5-kerroksiselle CLT-levylle.....	33

8.1.1	Jännevälin suuntainen tehollinen jäyhyysmomentti.....	33
8.1.2	Poikittaissuunnan tehollinen jäyhyysmomentti.....	35
8.2	Esimerkki 1.....	36
8.3	Esimerkki 2.....	38
8.4	Esimerkki 3.....	38
9	ABAQUS-MITOITUSOHJELMA .....	41
9.1	ABAQUS-ohjelman esittely .....	41
9.2	CLT-välipohjan värähtelyn analysointia .....	41
9.3	Esimerkkitapausten tarkastaminen ABAQUS-ohjelmalla .....	41
9.3.1	Esimerkki 1.....	41
9.3.2	Esimerkki 2.....	50
10	MATALATAAJUUKSISEN CLT-LATTIAN TOIMIVUUDEN ARVIOINTI .....	51
10.1	Analysoinnin lähtötiedot .....	51
10.2	Excel-laskentaohjelman toteutus.....	53
10.2.1	Taustaselvityksiä .....	53
10.2.2	Laskentaohjelman suunnittelu.....	54
10.2.3	Laskentaohjelman toteutus .....	54
10.3	Värähtelyn analysoiminen laskentaohjelman tulosten avulla.....	60
10.3.1	Skenaario-työkalu .....	60
10.3.2	Skenaarioraporttien yhdistäminen .....	60
10.4	Lattian värähtelyn aistinvarainen arviointi .....	60
10.4.1	Aistinvaraisen arvioinnin menetelmät.....	61
10.4.2	Havaintojen kirjaaminen taulukkoon.....	61
10.4.3	Lattian hyväksyttävyyys .....	62
11	TULOKSET JA YHTEENVETO.....	63
11.1	Tulosten esitysmuoto .....	63
11.2	Laskentamenetelmien tarkkuudesta .....	63
11.3	Hyvän lattian vaatimukset .....	63
11.4	Edellytykset johtopäätösten tekemiseen .....	63
11.5	Kahdelta reunalta tuetut lattiat .....	64
11.5.1	Levytyyppikohtaiset tulokset .....	64
11.5.2	Yhdistettyjen skenaarioiden tulokset.....	64

11.5.3	Yhdistettyjen skenaarioiden keskiarvot .....	68
11.5.4	Ominaistaajuuden esiintymisalue.....	69
11.6	Neljältä reunalta tuetut lattiat .....	70
11.6.1	Levytyypikohtaiset tulokset .....	70
11.6.2	Yhdistettyjen skenaarioiden tulokset.....	71
11.6.3	Yhdistettyjen skenaarioiden keskiarvot .....	75
11.7	Johtopäätökset .....	75
11.8	Pohdinta.....	76
LÄHTEET	.....	77

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Taustat ja tavoitteet

Sain opinnäytetyön aiheen pohjustukseksi insinööri Tero Lahtelalta Puuinfosta tietoa siitä, että muualla Euroopassa voidaan esimerkiksi ala- ja välipohjia mitoittaa ominaistajuudeltaan matalataajuisiksi, kun taas Suomessa kyseiset rakenteet täytyy mitoittaa ominaistajuudeltaan korkeataajuisiksi (Lahtela, 2015-10-8). Tämä johtuu siitä, että Suomessa ei ole mitoitusmenetelmää puurakenteisille matalataajuuksilattioille. Kyseisen mitoitusmenetelmän puute johtaa siihen, että Suomessa edellä mainituista rakenteista joudutaan tekemään paksumpia verrattuna johonkin muuhun Euroopan maahan. Paksummat rakenteet johtavat erityisesti CLT-välipohjilla epätaloudelliseen ratkaisuun jopa pientaloissa, kun pintalaatta on massiivinen. (Lahtela 2014, 20.)

Tässä opinnäytetyössä on tavoitteena selvittää värähtelyn käsitteitä, tutkia CLT-välipohjien värähtelyä sekä tehdä vertailua erityyppisten lattioiden välillä. Tavoitteena on saada konkreettinen esimerkki siitä, mitä eri lähtötietojen muuttaminen vaikuttaa värähtelymitoituksessa ja millaisia johtopäätöksiä siitä voidaan tehdä. Samoin tavoitteena on saada kattava kuva siitä, että onko nykyinen ohjeistus värähtelymitoituksessa puurakenteisille lattioille ja erityisesti CLT-lattioille hyvä sellaisenaan, vai kaipaisiko se jotain parannuksia.

Edellä mainittujen tavoitteiden toteuttamiseksi, laadin CLT-levyjen ominaisuuksista Excel-taulukon, johon kokoan kaikkien CLT-välipohjalevyjen suunnitteluparametrit. Tätä ominaisuus taulukkoa hyödyntäen laadin laskentataulukon, jossa tutkitaan ensin CLT-välipohjan kestävyyttä Eurokoodiin pohjautuvilla laskentamenetelmillä sekä lopulta suoritetaan värähtelyanalyysi, jossa voidaan helposti tutkia äärimitoiltaan, kuormiltaan ja levytyypeiltään erilaisten välipohjien värähtelyä.

Excel-pohjaisen analysoinnin tueksi tarkastelen värähtelyä myös Abaqus-ohjelmalla, joka soveltuu hyvin välipohjien värähtelyn tutkimiseen ja analysointiin. Vertailemalla Abaqus-ohjelman tuloksia käsin laskemiini tuloksiin, voin todeta laskujeni tarkkuuden ja paikkaansa pitävyyden. Yhteen lukuun on tavoitteena kirjoittaa esittely Abaqus-ohjelmasta.

## 1.2 Olament Oy

Olament Oy on Lapinlahdella sijaitseva CLT-massivipuelementtejä puutaloihin varusteleva yritys. Olament Oy on aloittanut liiketoimintansa vuonna 2014 Vieremällä. Olamentin varustelemat CLT-elementit ovat rakennuksen runkona lattiassa, seinissä ja katossa, jolloin CLT muodostaa yhtenäisen massiivipuisen vaipan rakennuksen sisäpuolelle.

Olamentin varustelemat elementit voivat olla joko suurelementtejä tai tilaelementtejä. Suurelementeillä voidaan helposti ja nopeasti rakentaa yksilöllisiä omakotitaloja ja tilaelementeillä saadaan ra-

kennukseen entistä valmiimpia kokonaisuuksia kuivissa sisätiloissa tehtynä. Kohteen mukaan tilaelementeissä voi olla jopa huonekalut paikallaan. Olivatpa kyseessä suurelementit tai tilaelementit, niin Olament valmistele ne tehtaalla mahdollisimman valmiiksi. (Olament Oy:n verkkosivustot, 2016.)

### 1.3 Lyhenteet ja määritelmät

CLT = Cross laminated timber, ristiinliimattu massiivipuu

LVL = Laminated Veneer Lumber, viilupuu

CNC-työstö = Computerized Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus

### 1.4 Termejä

taajuus	kuvaa jonkin toistuvan ilmiön tapahtumien määrää aikayksikköä kohti
ominaisvärähtely	mekaanisen systeemin liike, jossa se liikkuu ilman siihen kohdistuvia ulkoisia herätevoimia
resonanssi	myötävärähtely joka syntyy, kun ulkoinen värähtely vahvistaa kappaleen ominaisvärähtelyä
monikerta	kerrannainen, eli määrä joka saadaan kertomalla perusluku jollakin kokonaisluvulla, esim 6:n kerrannaisia ovat 12, 18 jne.
amplitudi	värähdyslaajuus, joka ilmaisee värähdysliikkeen laajuutta
kiihtyvyys	kappaleen nopeuden muutos tietyssä ajassa
ominaisvärähdysaika	aikaväli, jonka välein liike toistuu samanlaisena
ominaisvärähdysmuoto	kappaleen ominaistaaajuutta vastaavan värähtelyaallon muoto
ominaistaaajuus	ominaisvärähdysajan käänteisarvo
alin ominaistaaajuus	ensimmäinen eli pienin ominaistaaajuus
ominaiskulmataajuus	kertoo systeemin värähtelyn nopeuden
vaimennuskerroin	suure, joka kuvaa järjestelmän värähtelyn vaimenemista
värähtelyluokka	esimerkiksi kiihtyvyyden perusteella määritelty lattian laatuluokka
poissonin luku	materiaalille ominainen kerroin, toiselta nimeltään suppeumakerroin, joka on poikittaissuuntaisen venymän ja pitkittäissuuntaisen venymän suhteen vastaluku
mekaniikka	tieteenala, joka tutkii vuorovaikutuksia ja liikeilmiöitä. Mekaniikka voidaan jakaa statiikkaan ja dynamiikkaan
dynamiikka	mekaniikan osa, joka tutkii voimien vaikutusta kappaleiden liikkumiseen
statiikka	tasapaino-oppi, joka tutkii tasapainotilassa olevia kappaleita ja niihin vaikuttavia voimien muodostavia systeemejä
eurokoodit	kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja
suurelementti	yleensä rakennuksen yhden seinän mittainen, ainoastaan nosturilla siirrettävissä oleva osa rakennuksen seinä

tilaelementti	rakennuselementti, jossa on valmiina vähintään ylä- ja alapohja, sekä päätyseinät. Elementissä voi olla myös sivuseinät joko osittain tai kokonaan
pihta	toiselta nimeltään jalokuusi, joka on mäntykasveihin kuuluva puu. Pihdat kasvavat lähinnä pohjoisen pallonpuoliskon viileällä ja lauhkealla ilmastoalueella, usein vuoristossa.
liittorakenne	liittorakenteessa yhdistetään eri materiaaleja ja kutakin eri materiaalia käytetään optimaalisesti vain niissä rakenteen osissa, joissa sen ominaisuudet ovat parhaimmillaan
kelluvalattia	lattia, jonka kantavan osan päällä on joustava kerros ja sen päällä pintarakenne (pintalaatta, tasoite tai levyrakenne)
ortotrooppinen materiaali jäyhyysmomentti	materiaali, jonka lujuusominaisuudet ovat erilaiset eri suuntiin lujuusopin suure, joka kuvaa poikkileikkaukseltaan tietyn muotoisen homogeenisen kappaleen kykyä vastustaa taipumaa poikkileikkaustason tietyn akselin suuntaan
FEM	Finite Element Method. Elementtimenetelmä, eli numeerinen menetelmä integraali- ja differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen
käyttöluokka	puurakenteet jaotellaan kolmeen eri käyttöluokkaan pääasiassa niiden sijoituskohteen kosteusolosuhteiden perusteella
luotettavuusluokka	rakenteet jaotellaan kolmeen eri luotettavuusluokkaan kohteen seuraamusluokan perusteella
seuraamusluokka	kuvaa rakennuksen käyttötarkoituksen perusteella arvioidun uhan suuruutta esimerkiksi ihmishenkien menettämiseen tai taloudellisiin vahinkoihin

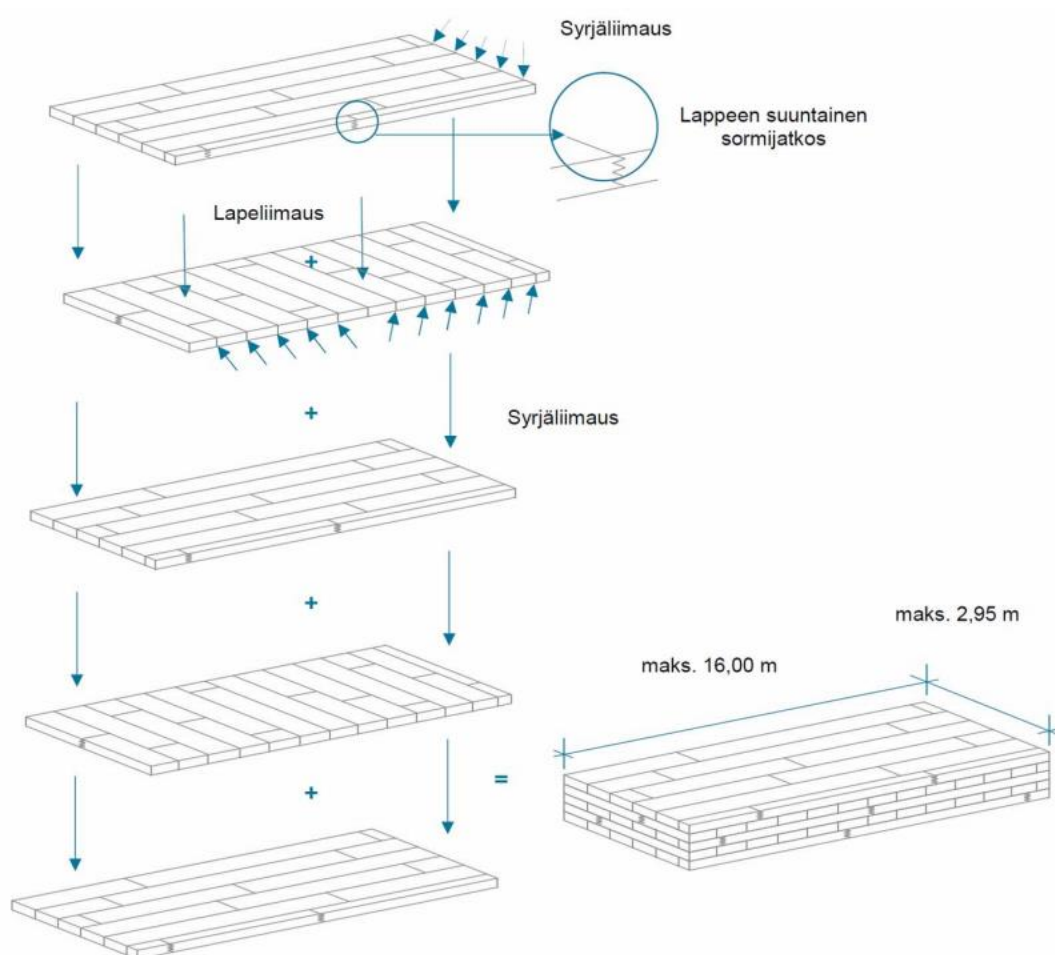
## 2 CLT-LEVYN OMINAISUUDET

### 2.1 CLT-levyn määrittely ja käyttökohteet

Tässä aluvuussa kuvatut CLT-levyjen ominaisuudet vastaavat Stora Enson levytyyppejä, mutta pääpiirteissään CLT-levyjen ominaisuudet ovat samankaltaisia valmistajasta riippumatta. Cross Laminated Timber on nimensä mukaisesti ristiinliimattua massiivipuuta (kuva 1). CLT-levyissä käytetään sormijatkettua lujuuslajiteltua kuusi-, pihta- tai mäntysahatavaraa. Lamellien lujuusluokka jokaisessa kerroksessa on C16...C40. Kerroksissa käytettävät laudat ovat ympäröhöylättyjä, joiden paksuus on 14...45 mm ja lautojen leveydet ovat vähintään nelinkertaiset lamellien paksuuteen nähden. (RIL 205-1-2009, CLT lisäykset 2014.)

CLT-levyt ovat aina symmetrisiä poikkileikkaukseltaan ja sen vuoksi niissä on vähintään 3 lamellikerrosta. Enintään lamellikerroksia voi olla 20 ja CLT-levyn kokonaispaksuus vaihtelee 42...350 mm (RIL 205-1-2009, CLT lisäykset 2014). Yksi levy voi enimmillään olla 2,95 m leveä ja 16 m pitkä (Puuinfon verkkosivusto, 2016). Viisikerroksisten levyjen lamelleista enimmillään kaksi lautakerrosta saa olla samaan suuntaan. Vastaavasti 7 kerroksisten levyjen lamelleista enintään kolme päällekkäistä saa olla samaan suuntaan. (RIL 205-1-2009, CLT lisäykset 2014.)

Pääosa Stora Enson valmistamien CLT-levyjen lamellien syrjistä liimataan toisiinsa ei-rakenteellisesti. Rako vierekkäisten lamellien välissä saa olla enimmillään 2 mm 10 %:ssa laudoista ja enimmillään 4 mm 3 %:ssa laudoista. Kuvassa 1 esitellään CLT-levyn valmistusprosessi yksinkertaistetusti. (RIL 205-1-2009, CLT lisäykset 2014.)



Kuva 1. Esimerkki 5-kerroksisesta CLT-levystä (Lahtela 2015a, 2)

Levyjä on mahdollista käyttää kantavina ja jäykistävinä rakenteina niin seinissä kuin lattiarakenteisakin. Levyjen ristiinliimauksen ansiosta ne ovat erittäin lujia ja jäykkiä, joten esimerkiksi jäykistämiseen ne soveltuvat hyvin. Materiaalin keveys suhteessa sen jäykkyyteen mahdollistaa tehokkaan rakennusprosessin. Sisätiloissa levyn elävä pinta voidaan jättää näkyviin tai pinnoittaa se mieltymyksien ja palomääräyksien mukaisesti. Levyt ovat CNC-työstön jäljiltä mittatarkkoja ja ne pysyvät hyvin äärimitoissaan ristiinliimauksen ansiosta. CLT:n käyttö rakennuksen runkona mahdollistaa ikkuna- ja oviaukkojen sijoittelun vapaasti kuten myös nurkkaikkunoiden käytön, koska levyt toimivat tarvittaessa myös ulokkeina. (Puuinfor verkkosivusto, 2016.)

Ulkoseinien ulkopuolelta levyt voidaan eristää normaalisti. Välipohjat tehdään tavallisesti liittorakenteena betonin kanssa, jolloin puu toimii rakenteelle palosuojana ja massiivinen betoni- tai kipsivalu antaa paremman ääneneristävyyden sekä kantavuuden. Mikäli kohteessa ei ole asetettu vaatimuksia ääneneristävyydelle, välipohja voidaan toteuttaa ilman betonivalua. Myös uivat lattiat ovat vaihtoehto ääneneristävyyden parantamiseen, jolloin levyä voidaan jäykistää tarvittaessa palkeilla. (Puuinfor verkkosivusto, 2016.) Olament Oy käyttääkin yleensä kohteissaan uivaa lattiarakennetta, jossa CLT-levyn päälle asennetaan ensin polyuretaanilevy ja sen päälle betonivalu pintarakenteineen (Komalainen 2016-03-07).

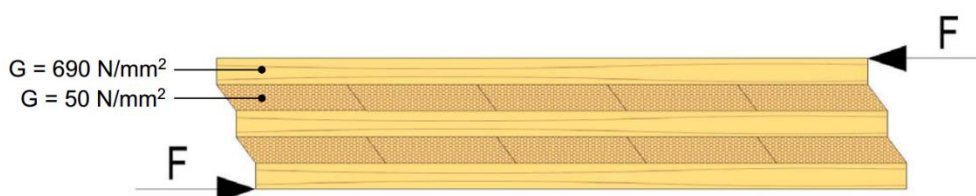
## 2.2 Materiaaliominaisuudet

Koska CLT-levyt ovat ristiinliimattuja, niiden materiaaliominaisuudet ovat erilaiset levyn pituus- ja leveys suunnissa. CLT-rakenteiden mitoittamisessa levyn poikkileikkauksesta huomioidaan kantaviksi vain ne kerrokset, joiden syysuunta on sama ulkoisten kuormien aiheuttamien jännitysten suunnan kanssa. Mitoitettaessa CLT-rakenteita, on huomioitava leikkausmuodonmuutosten vaikutus jännitysten ja levyn sisäisten rasitusten määrittelyyn. (RIL 205-1-2009, CLT lisäykset 2014.)

Esimerkiksi CLT-vaakarakenteiden mitoituksessa tarvitaan seuraavia poikkileikkauksen kantavuuteen vaikuttavia materiaalin ominaisarvoja (RIL 205-1-2009, CLT lisäykset 2014):

- pituussuuntaisten kerrosten keskimääräinen kimmomoduuli,  $E_{0,mean}$  [ $N/mm^2$ ]
- kantavien kerrosten ominaislujuudet ja jäykkyydet lautojen lujuusluokan mukaisesti,  $f_{m,k}$  [ $N/mm^2$ ] ja  $f_{v,k}$  [ $N/mm^2$ ]
- pääkantosuuntaan nähden poikittaisen kerroksen tasoleikkauslujuuden ominaisarvo,  $f_{R,0^\circ}$  [ $N/mm^2$ ]
- pääkantosuuntaan nähden poikittaisen kerroksen tasoleikkausmoduulin keskiarvo,  $G_{R,mean}$  [ $N/mm^2$ ]
- kuormanjakoluku,  $k_{sys}$ .

CLT-välipohjien suunnittelussa on huomioitava myös poikittaisten lamellikerrosten liukuma. Kuvassa 2 on havainnollistettu, mitä liukuma aiheuttaa CLT-rakenteelle (Lahtela 2015b, 33):



Kuva 2. Havainnekuva CLT-levyn poikittaisten lamellien liukumasta (Lahtela 2015b, 33)

## 2.3 Mitoitusperiaatteet

Tässä aluvussa tarkastellaan enintään viisikerroksisten laattojen taivutus- ja leikkauskestävyysmitoituksen periaatteet, jotka soveltuvat ainoastaan CrossLam Kuhmon CLT-levyille (RIL 205-1-2009, lisäykset 2014).

Jotta taivutus- ja leikkauskestävyys voidaan laskea, täytyy ensin olla tiedossa levytyypin jäyhyysmomentti. Jäyhyysmomentti saadaan laskettua kaavalla

$$I_{ef} = \sum_1^3 (I_i + \gamma_i * A_i * a_i^2), \text{ jossa} \quad (1)$$

$$A_i = b_i * h_i \quad (2)$$

$$I_i = \frac{b_i * h_i^3}{12} \quad (3)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,mean} * A_1 * d_{12}}{G_{R,mean} * b * l^2}} \quad (4)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (5)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,mean} * A_3 * d_{23}}{G_{R,mean} * b * l^2}} \quad (6)$$

$$a_1 = \left( \frac{h_1}{2} + d_{12} + \frac{h_2}{2} \right) - a_2 \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 * A_1 * \left( \frac{h_1}{2} + d_{12} + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 * A_3 * \left( \frac{h_2}{2} + d_{23} + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_1^3 (\gamma_i * A_i)} \quad (8)$$

$$a_3 = \left( \frac{h_2}{2} + d_{23} + \frac{h_3}{2} \right) + a_2, \text{ missä} \quad (9)$$

$h_i$  = kuormitusta ottavan pituussuuntaisen kerroksen  $i$  paksuus

$d_{ij}$  = pituussuuntaisten kerrosten  $i$  ja  $j$  välissä olevan poikittaisen kerroksen paksuus

$a_i$  = etäisyys neutraaliakselilta tehollisen poikkileikkauspinnan painopisteeseen

$b$  = laatan leveys

$l$  = jänneväli

$G_{R,mean}$  = tasoleikkausmoduulin kerkiarvo

$E_{0,mean}$  = kimmomodulin ominaisarvo syyn suuntaan.

Kun kyseessä on symmetrinen 5-kerroksinen levy, kaavassa (8)  $a_2 = 0$  ja  $\gamma_1 = \gamma_3$ . Vastaavasti silloin, kun levy on kolmikerroksinen, niin  $h_2 = 0$ ,  $d_{12} = d_{23} = \frac{d}{2}$  (puolet keskimmäisen lamellin paksuudesta  $d$ ).

Kun jäyhyysmomentti ja sen laskemiseen tarvittavat termit tunnetaan, voidaan taivutusjännitys pituussuuntaisten lautojen reunalla laskea kaavasta

$$\sigma_{m,r,i,d} = \frac{M_d}{I_{ef}} * \left( \gamma_i * a_i + \frac{h_i}{2} \right) \quad (10)$$

Taivutuskestävyys saadaan varmistettua vertaamalla taivutusjännitystä taivutuskestävyyteen, josta saadaan mitoitusehto

$$\sigma_{m,r,i,d} \leq f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * f_{m,k} * k_{sys}, \text{ missä} \quad (11)$$

$k_{mod}$  = kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin  
 $\gamma_M$  = materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluku  
 $f_{m,k}$  = materiaalin lujuusluokasta riippuva taivutuskestävyyden ominaisarvo  
 $k_{sys}$  =  $\min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,025 * n \\ 1,2 \end{array} \right.$  = CrossLam Kuhmo CLT -kuormajakoluku, missä  
 $n$  = vierekkäisten lamellien määrä tarkasteltavassa poikkileikkauksessa.

Liimasaumassa vaikuttava tasoleikkausjännitys voidaan laskea kaavalla

$$\tau_{R,d} = \frac{V_d * \gamma_i * S_i}{I_{ef} * b}, \text{ missä} \quad (12)$$

$$S_i = S_{ef,1} = A_1 * \gamma_1 * a_1. \quad (13)$$

Leikkauskestävyys liimasaumassa saadaan varmistettua vertaamalla liimasaumassa vaikuttavaa leikkausjännitystä liimasauman leikkauskestävyyteen, josta saadaan mitoitusehto

$$\tau_{R,d} \leq f_{R,0^\circ} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * f_{R,K,0^\circ}. \quad (14)$$

Lopuksi tarkastellaan vielä pituussuuntaisten lamellien leikkauskestävyys, joka mitoitetaan tavalliseen tapaan sahatavaran syysuuntaisen leikkauslujuuden mukaan.

### 3 VÄRÄHTELYN HUOMIOIMINEN SUUNNITTELUSSA

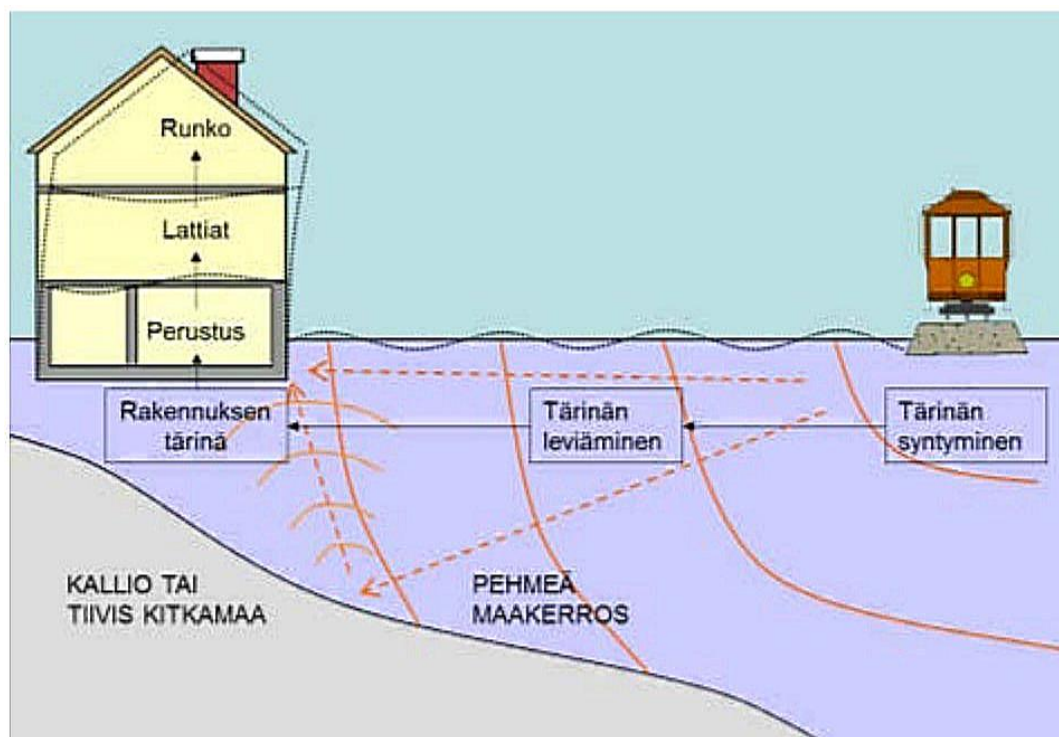
#### 3.1 Värähtelymitoitettavat rakenteet

Rakennusosista värähtelymitoitettavia ovat lähinnä vaakarakenteet. Vaakarakenteista kevyet välipohjat, kuten teräs- ja puuvälipohjat tulee mitoittaa värähtelylle. Samoin pitkien jänneväliden betonilattioille tulee tehdä värähtelymitoitus. Muita lattioita, joille värähtelytarkastelu tulee tehdä, ovat keluvat lattiat ja korokelattiat. (Lahtela 2014, 2.)

Värähtelyn huomioiminen rakennuksia suunniteltaessa on tärkeää, koska suunnitteluvaiheessa se on helpompaa ja halvempaa, verrattuna jälkikäteen korjaamiseen. Lisäksi värähtelyn haittavaikutusten minimoiminen on merkittävä asumismukavuutta lisäävä tekijä. (Lahtela 2014, 2.)

#### 3.2 Liikenteen aiheuttama värähtely

Liikenne yleensä ja varsinkin junaliikenne tunnetusti aiheuttaa maaperän tärinää. Maaperä johtaa tärinää eteenpäin ja sen vaikutusalue riippuu lähinnä maalajista. Pehmeikköalueilla tärinän haitta-alue on laajimmillaan ja kun maaperä on kovaa, suurempi ongelma voi olla maan kautta välittyvä runkoääni (kuva 3). Liikenteen aiheuttama tärinä voi häiritä keskittymistä, asumismukavuutta tai nukkumista ja lisäksi se saattaa aiheuttaa pelkoa rakennevaurioiden syntymisestä sekä kiinteistön arvon alenemisesta. (Talja & Törnqvist 2014, 4.)



Kuva 3. Liikennetärinän syntyminen ja heijastuminen rakennukseen (Talja & Törnqvist 2014, 4)

### 3.3 Pyykinpesukoneen aiheuttama värähtely

Rakennusten rakenteet resonoivat usein pyykinpesukoneen aiheuttamasta tärinästä. Tämän ilmiön yleisyys johtuu siitä, että pesukoneen värinä tapahtuu taajuusalueella 5–60 Hz. Taajuusalue on niin laaja, että lähes varmasti rakennuksesta löytyy lattia, jonka ominaistajuus sattuu samalle taajuusalueelle pesukoneen aiheuttaman herätteen kanssa. Siksi on yleistä, että linkousvaiheessa lattia alkaa resonoida pesukoneen värähtelyn kanssa. Resonanssivärähtelyä voi tapahtua kaikilla tavanomaisilla lattiaratkaisuilla ja pyykinpesukonetyypeillä. (Lahtela 2014, 15.)

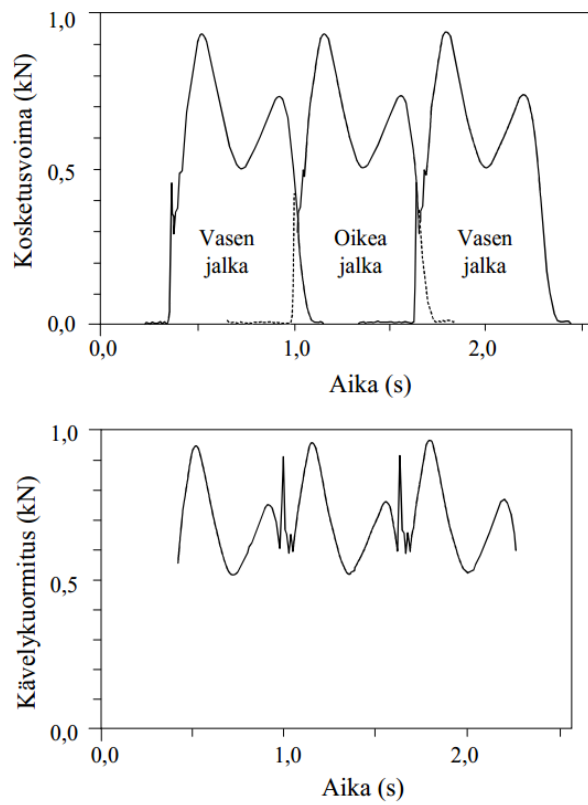
Jotta välttyisi pyykinpesukoneen aiheuttamilta värähtelyongelmilta, pesukone tulisi sijoittaa mieluiten mahdollisimman lähelle kantavia rakenteita. Pesukonemallin tai -merkin vaihtaminen voi myös pienentää värähtelyongelmia, koska värähtelytaajuus muuttuu. (Lahtela 2014, 15.)

### 3.4 Kävelyn aiheuttama värähtely

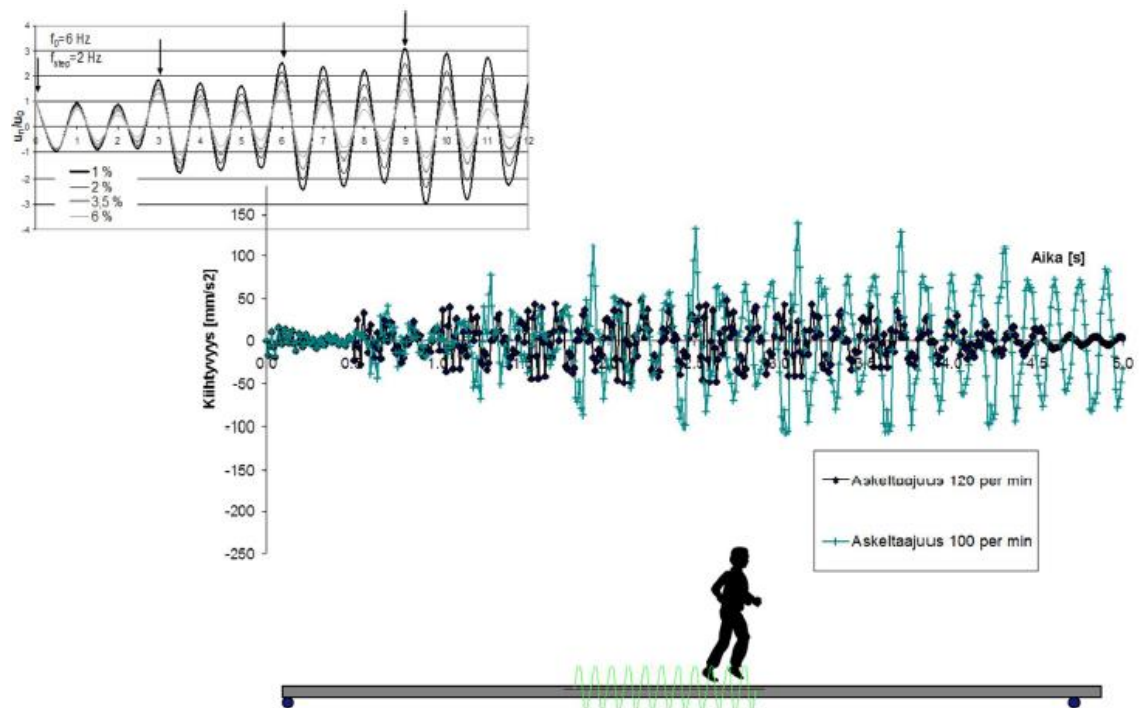
Kävely on hyvin yleinen värähtelyn lähde, kun taas esimerkiksi pienten lasten juokseminen, hyppely tai muu liikunta ovat harvinaisempia ja voimakkuudeltaan paljon suurempia värähtelyn lähteitä. Tarkasteltaessa normaalista kävelystä poikkeavaa värähtelyn aiheuttajaa, tulisi ottaa huomioon häiriön toistuvuus ja sen ilmenemisaika, joilla on suuri merkitys värähtelyn häiritsevyydelle. (Talja, Toratti & Järvinen 2002, 9.)

Yleensä henkilö ei havaitse itse aiheuttamiaan värähtelyjä tai lattian notkunaa, vaikka ympärillä olevat kokisivat häiriön hyvinkin haitallisena. Värähtely koetaan haitallisena silloin, kun kävelyn jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat liikaa resonanssi-ilmiön seurauksena, jos kävelijän kantapää aiheuttaa liian voimakasta tärinää tai jos lattian notkuminen on liian voimakasta askelten alla. (Talja ym. 2002, 9.)

Kävelyssä syntyvät askelherätteet koostuvat sekä askelrytmistä syntyvistä matalataajuuksisista (0–8 Hz) komponenteista että kantapään iskuista aiheutuvista korkeataajuuksisista komponenteista (8–40 Hz). Normaalisti askeltaajuus käveltäessä on 1,4–2,5 Hz (rakennusten sisällä noin 1,6 Hz), juostessa askeltaajuus on yleensä alle 3 Hz, vaikka voi nousta sitäkin korkeammaksi. Kävelystä aiheutuvaan kuormitukseen vaikuttavat henkilön painon lisäksi sukupuoli, kävelynopeus, kävelytyyli sekä kengänpohjien ja lattian materiaali. (Talja 1996, 9.) Kuviossa 1 on esitetty kahden peräkkäisen askeleen aiheuttama kuormitus. Kuviossa 2 voidaan nähdä värähtelyn vahvistuminen askeltaajuuden monikerrojen seurauksena.



Kuvio 1. Kahden peräkkäisen askeleen aiheuttama askelkuormitus (Talja 1996, 10)



Kuvio 2. Värähtely voi vahvistua myös askeltaajuuden monikerroilla (Talja 2013, 15).



## 4.2 Ulkoisten ja sisäisten tekijöiden merkitys

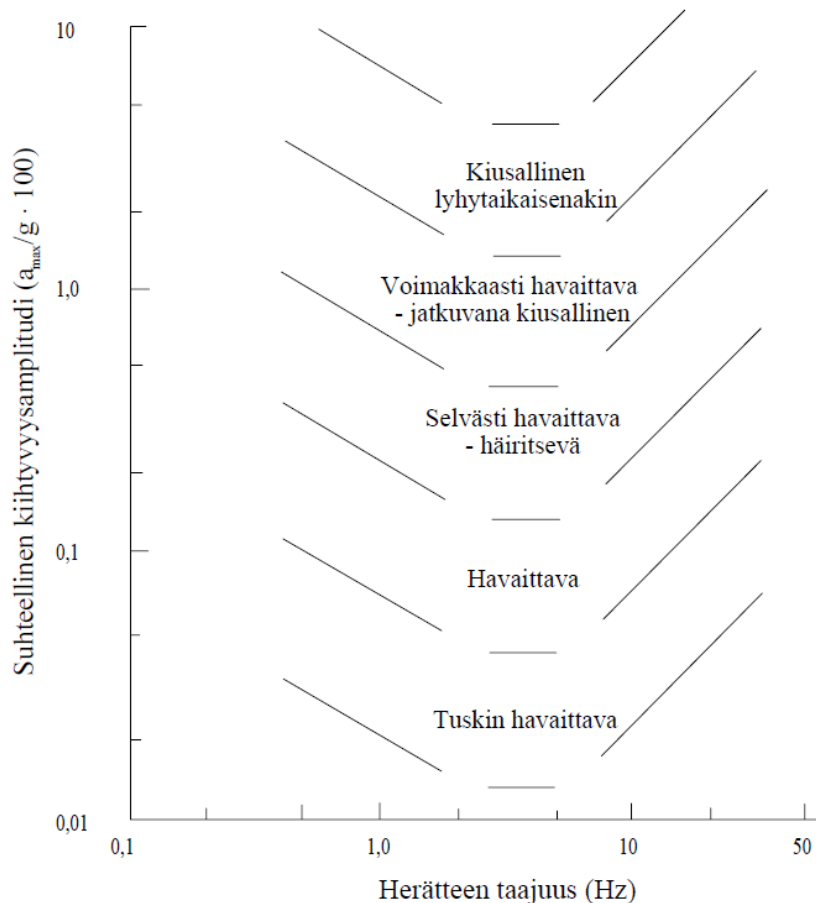
Värähtelyn epämiellyttävyyteen vaikuttavia ulkoisia ja sisäisiä tekijöitä on kuvattu taulukossa 1. Ne kuvaavat hyvin sitä, että värähtelyn häiritsevyys on monen eri tekijän summa.

Taulukko 1. Värähtelyjen häiritsevyyteen vaikuttavia tekijöitä (Talja 1996, 14)

Ulkoiset tekijät	Sisäiset tekijät
<ul style="list-style-type: none"> <li>- värähtelyn suuruus</li> <li>- värähtelyn taajuus</li> <li>- värähtelyn suunta</li> <li>- värähtelyn kesto</li> <li>- värähtelyn kohdistumispaikka</li> <li>- melu, lämpötila, jne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vartalon asento (seisova, istuva)</li> <li>- kehon paino</li> <li>- kehon dynaaminen vaste</li> <li>- ikä, sukupuoli</li> <li>- tottumukset, odotukset, asenteet</li> <li>- toiminnallinen tila (työ, harrastus, lepo)</li> </ul>

Värähtelyn suuruus ja taajuus ovat merkittävimpiä ulkoisia tekijöitä. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksen häiritsevyyttä on mallinnettu kuviossa 3. Kun värähtelyä tapahtuu pienillä taajuuksilla (alle 1–2 Hz), värähtelyt välittyvät sellaisenaan ihmiseen. Hieman suuremmat taajuudet saavuttavat eri kehon osien ominaisvärähdysajan (rintakehä, vatsa, kasvot, hartiat). Kuviossa 3 olevat vaakasuorat alueet kuvaavat tilanteita, joissa värähtelyn vaikutus korostuu eri elinten resonanssi-ilmiöiden johdosta. Mikäli taajuudet ovat vieläkin suurempia (yli 8 Hz), elimistön oma vaimennus alkaa vaikuttaa ja vaikutukset ihmiseen ovat verrannollisia värähtelyn suuruuteen.

Kuviossa 3 on kuvattu myös kiihtyvyyden vaikutusta häiritsevyyteen. Kun kiihtyvyydsamplitudi on alle 0,05 % g värähtely alkaa olla havaittavissa, mutta häiritseväksi värähtely muodostuu vasta, kun amplitudi kasvaa kymmenkertaiseksi. (Talja 1996, 14–15.)



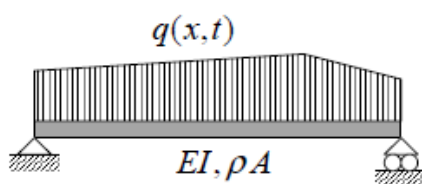
Kuvio 3. Jatkuva jaksollinen värähtelyn taajuuden ja kiihtyvyyssamplitudin vaikutukset ihmiseen (Talja 1996, 15)

Värähtelyn kestolla on myös suuri merkitys häiritsevyyteen. Lyhytaikainen impulssikuormitus, esim. kantapään osuminen lattiaan kävellessä, häiritsee huomattavasti paljon vähemmän, kuin vastaavan suuruinen jatkuva heräte. (Talja 1996, 15.)

## 5 JATKUVAN SYSTEEMIN VÄRÄHTELY

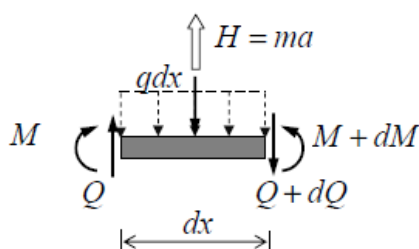
## 5.1 Palkin liikeyhtälö

Tarkastellaan kuvan 5 kaltaista suoraa palkkia, jota on kuormitettu kuormalla  $q(x,t)$ . Täytyy huomioida, että dynamiikan tehtävässä kuormitus  $q$  on riippuvainen myös ajasta  $t$ . Aluksi määritetään palkin taipuma, johon vaikuttaa myös aika  $t$  eli  $v(x,t)$ . Palkin taipuma voidaan määrittää palkin liikeyhtälön avulla. Kun taipuma on määritetty, selvitetään palkin leikkausvoima  $Q$  ja taivutusmomentti  $M$ , joiden lausekkeet saadaan johdettua lujuusopin kaavoilla yhtälöstä  $M(x,t) = -EIv''(x,t)$  ja  $Q(x,t) = M'(x,t)$ , missä derivointi tapahtuu paikkamuuttujan  $x$  suhteen.



Kuva 5. Palkki, jota on kuormitettu ajasta riippuvalla kuormalla (Perälä 2013, 1).

Sitten tutkitaan kuvan 6 mukaista mitättömän lyhyttä osaa palkista, palkkialkiota, jonka pituus on  $dx$ . Palkkialkiota kuormittaa kuormaa  $q$ , jonka jakaantumisen kokonaisvaikutusta kuvaa kuormituksen resultantti  $qdx$ . Kuvassa 6 näkyvä symboli  $H$  kuvaa palkkialkion hitausvoimaa  $H$ , joka voidaan kirjoittaa muotoon  $H = ma = m\ddot{v}$ , missä piste  $a$  symbolin päällä tarkoittaa derivaattaa ajan suhteen eli palkkialkion kiihtyvyyttä on  $a = \ddot{v}$ . Toisin sanoen hitausvoimaa voidaan kuvata myös lausekkeella  $H = \rho A dx \ddot{v}$ . Hitausvoiman suunta on ylöspäin, jolloin sen vaikutus on palkkialkion liikettä vastustava.



Kuva 6. Hyvin lyhyt palkin osa, palkkialkio (Perälä 2013, 2)

Palkkialkion pystyvoimista saadaan tasapainoyhtälö

$$\downarrow Q + dQ - Q + qdx - \rho A dx \ddot{v} = 0. \quad (15)$$

Kun jaetaan yhtälö (1)  $dx$ :llä saadaan

$$\frac{dQ}{dx} - \rho A \ddot{v} + q = 0 \quad (16)$$

Koska  $Q = -EIv'''$ , palkin liikeyhtälöksi muodostuu

$$\boxed{EIv'''' + \rho A \ddot{v} = q}. \quad (17)$$

Edellä tehtiin oletus, että palkilla on vakio poikkileikkaus ja se on homogeeninen, jolloin  $EI$  ja  $\rho A$  ovat vakioita. Mikäli kuormitusta  $q$  ei ole yhtälössä (17), värähtelyn liikeyhtälöksi muodostuu

$$\boxed{EIv'''' + \rho A\ddot{v} = 0}. \quad (18)$$

## 5.2 Ominaistaajuuden laskentakaava

Johdetaan ominaistaajuuden laskemisessa käytettävä kaava.

Ensin täytyy ratkaista vapaan värähtelyn liikeyhtälö (18) tapauksessa, jossa palkki on vapaasti tuettu (kuva 7).



Kuva 7. Päistään vapaasti tuettu palkki (Perälä 2013, 3)

Käytetään laskennan helpottamiseksi lyhennysmerkintää

$$k = \frac{\rho A}{EI}, \quad (19)$$

jolloin yhtälöstä (18) saadaan

$$\boxed{v'''' = -k\ddot{v}}. \quad (20)$$

Ratkaistaan taipuma muotoon  $v(x, t) = X(x)T(t)$ , jonka derivaatoille saadaan  $v'''' = X''''T$  ja  $\ddot{v} = X\ddot{T}$ . Sijoitetaan saadut arvot yhtälöön (20), jolloin

$$X''''T = -kX\ddot{T} \quad ||: XT \quad (21)$$

$$\frac{X''''}{X} = -k\frac{\ddot{T}}{T} = \lambda^4 \quad (=vakio) \quad (22)$$

Viimeisimmästä muodostuu kaksi differentiaaliyhtälöä:

$$\boxed{X'''' - \lambda^4 X = 0} \quad (\text{paikasta riippuva}) \quad (23)$$

ja

$$\frac{\ddot{T}}{T} = -\frac{\lambda^4}{k} = -\omega^2 \quad (=vakio) \quad \Rightarrow \quad (24a)$$

$$\boxed{T + \omega^2 T = 0} \quad (\text{ajasta riippuva}) \quad (24b)$$

Reunaehdot palkin päissä:

$$v(0, t) = X(0)T(t) = 0 \Rightarrow X(0) = 0, \quad (25a)$$

$$v''(0, t) = X''(0)T(t) = 0 \Rightarrow X''(0) = 0, \quad (25b)$$

$$v(L, t) = X(L)T(t) = 0 \Rightarrow X(L) = 0, \quad (25c)$$

$$v''(L, t) = X''(L)T(t) = 0 \Rightarrow X''(L) = 0. \quad (25d)$$

Yleinen ratkaisu paikkariippuvalle differentiaaliyhtälölle (23) on

$$X(x) = C_1 \sin \lambda x + C_2 \cos \lambda x + C_3 \sinh \lambda x + C_4 \cosh \lambda x, \quad (26)$$

joka derivoidaan kaksi kertaa, jolloin saadaan

$$X''(x) = -C_1 \lambda^2 \sin \lambda x + C_2 \lambda^2 \cos \lambda x + C_3 \lambda^2 \sinh \lambda x + C_4 \lambda^2 \cosh \lambda x, \quad (27)$$

Vasemman pään reunaehdoista saadaan

$$X(0) = 0 \Rightarrow C_2 + C_4 = 0, \quad (28a)$$

$$X''(0) = 0 \Rightarrow -C_2 + C_4 = 0, \quad (28b)$$

jotta edelliset toteutuisivat täytyy olla  $C_2 + C_4 = 0$ . Oikean pään reunaehdoista saadaan yhtälöt

$$X(L) = 0 \Rightarrow C_1 \sin \lambda L + C_3 \sinh \lambda L = 0, \quad (29a)$$

$$X''(L) = 0 \Rightarrow -C_1 \sin \lambda L + C_3 \sinh \lambda L = 0. \quad (29b)$$

Edellisille yhtälöille (ominaiskulmataajuudet) saadaan ratkaisu yhtälöparin kerroinmatriisin determinantin häviämisehdosta

$$\begin{vmatrix} \sin \lambda L & \sinh \lambda L \\ -\sin \lambda L & \sinh \lambda L \end{vmatrix} = 0, \quad (30)$$

joka antaa ns. frekvenssiyhtälön

$$2 \sin \lambda L \sinh \lambda L = 0, \quad (31)$$

joka toteutuu, jos

$$\sin \lambda L = 0, \quad (32)$$

josta saadaan

$$\lambda L = i\pi \quad (i = 1, 2, 3, \dots). \quad (33)$$

Alimmalle (pienimmälle) ratkaisulle, kun  $i = 1$ , saadaan

$$\lambda = \frac{\pi}{L}. \quad (34)$$

Toisaalta aikaisemmin todettiin, että ominaiskulmataajuuden  $\omega$  neliölle oli voimassa  $\omega^2 = \frac{\lambda^4}{k}$ . Siitä seuraa edelleen

$$\omega^2 = \frac{\pi^4}{kL^4} = \frac{\pi^4 EI}{L^4 \rho A}. \quad (35)$$

josta alimmalle ominaiskulmataajuudelle saadaan tulos

$$\omega_1 = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}. \quad (36)$$

Alimmalle ominaistajuudelle saadaan seuraava tulos, yhteyden  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  avulla

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}. \quad (37)$$

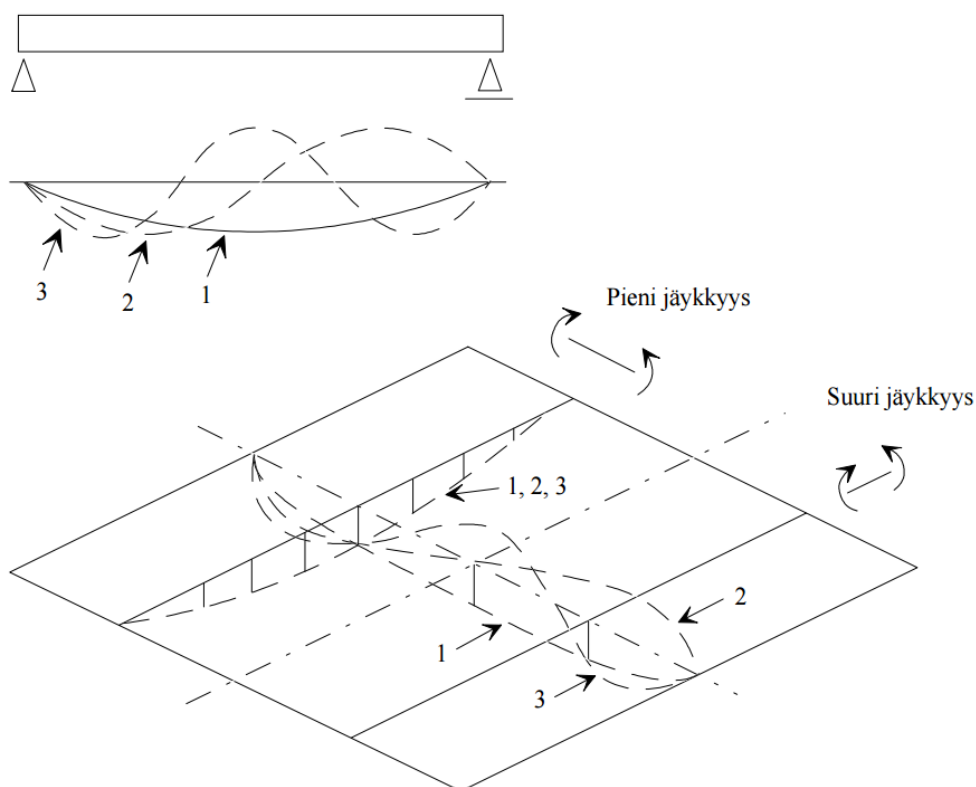
Kaavojen johtaminen mukailee M. Perälän 2013 kirjoittamaa raporttia jatkuvan systeemin värähtelystä.

## 6 KORKEATAAJUUKSINEN JA MATALATAAJUUKSINEN VÄLIPOHJA

### 6.1 Välipohjien värähtelymuoto

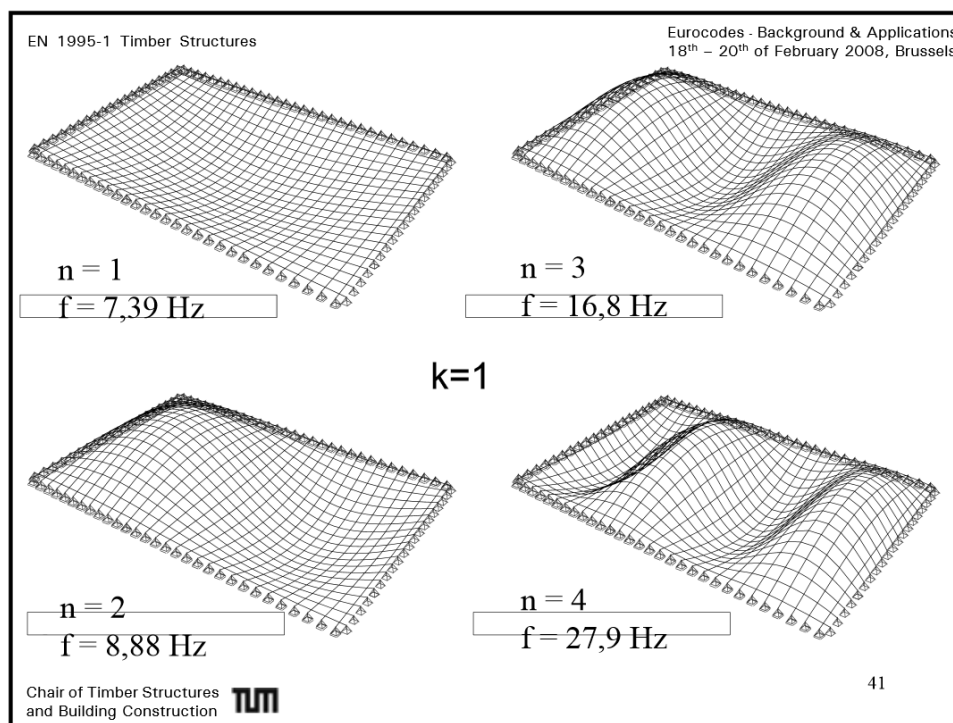
Yleensä välipohjat muodostetaan palkeista ja laatoista, poikkeuksena tästä esimerkiksi CLT-välipohjat, joissa ei ole yleensä palkkeja, vaan välipohja koostuu pelkästään laatasta. Silloin, kun välipohja koostuu sekä palkeista että laatoista, välipohjan ominaisuudet ovat erilaiset pituus- ja poikkisuunnassa (ortotrooppinen laatta). Ortotrooppisuudesta johtuen, rakenteen värähtely ei ole yhden vapaus asteen värähtelyä, vaan eri massapisteet ja poikkileikkauksen jäykkyyserot voivat saada aikaan suuren määrän erityyppisiä ominaisvärähdysmuotoja. (Talja 1996, 27.)

Yleensä ortotrooppisen laatan ensimmäinen värähdysmuoto vastaa koko laatan taipumamuotoa (kuva 8). Kun lattialla on pituusjäykkyyden lisäksi poikkittäisjäykkyyttä, kokonaisjäykkyys kasvaa ja ensimmäinen ominaistajuus on suurempi verrattuna palkkitarkasteluun. (Talja 1996, 27.) Näistä syistä yksiaukkoisen CLT-levyn ominaisvärähdysmuoto on yleensä levyn molempiin suuntiin rakenteen taipumamuodon mukainen johtuen siitä, että lattiasa ei ole kantavia palkkeja.



Kuva 8. Kolme alinta ominaisvärähdysmuotoa niveltuetulle palkille ja niveltuetulle ortotrooppiselle laatalle (Talja 1996, 27)

Kuvassa 9 olevat rakenteen erilaiset värähtelymuodot havainnollistavat matalataajuuksisessa ja korkeataajuuksisessa lattiassa tapahtuvan värähtelyn eroa.

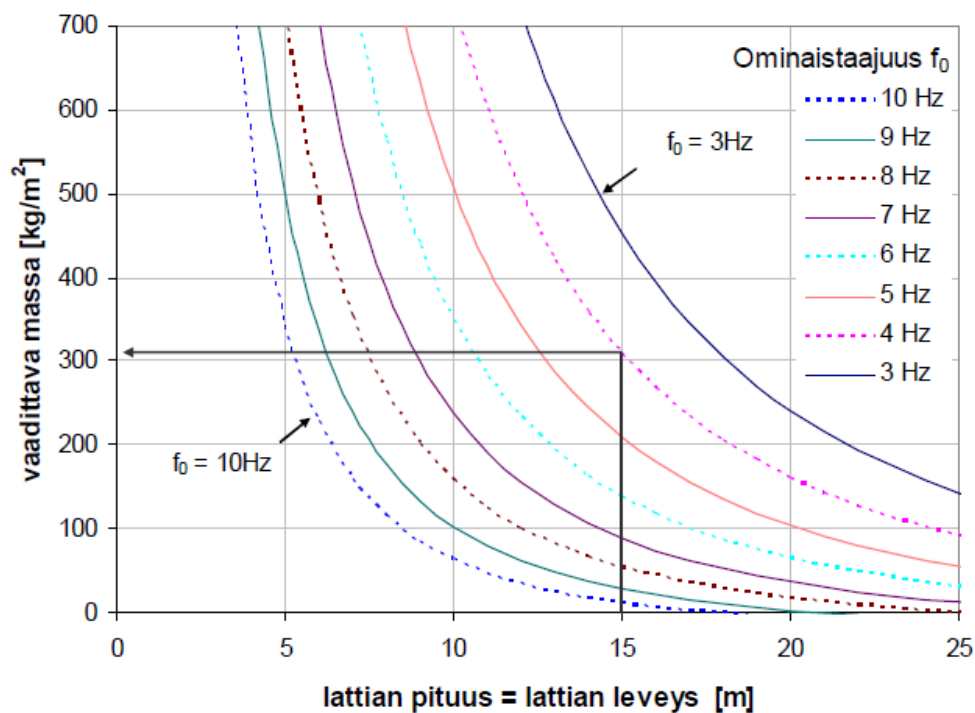


Kuva 9. Rakenteen erilaisia värähtelymuotoja (Eurokoodien tausta ja sovellukset 2008, 60)

## 6.2 Jako matala- ja korkeataajuuksiin välipohjiin

Yleisenä käytäntönä on jakaa välipohjarakenteet kahteen eri tyyppiin, korkeataajuuksiin ja matalataajuuksiin. Korkeataajuuksisen lattian alin ominaistaajuus on yli 8 Hz ja matalataajuuksisen lattian alin ominaistaajuus on alle 8 Hz. Kyseiset ominaistaajuuden rajat eivät ole vakiintuneita ja riippuen käytetystä lähteestä, raja on jotain väliltä 7–9 Hz. (Talja 1996, 28.) VTT:n Lattioiden värähtelytiedotteen mukaan matalin hyväksytty ominaistaajuus on 3 Hz ja matalataajuuksisen lattian ylin ominaistaajuus on 10 Hz (Talja ym. 2002, 13–14). Kun taas Euronormien mukaan Suomessa puuvälipohjien täytyy olla korkeataajuuksisia ja alin niille sallittu ominaistaajuus on 9 Hz (Puurakenteiden suunnittelu. Lyhennetty suunnitteluohje RIL 205-1-2009 B, 23). Näistä ohjeista seuraa se, että Suomessa täytyisi matalataajuuksisille puurakenteisille välipohjille asettaa nykyisellään ominaistaajuusrajaksi  $3 \text{ Hz} \leq 9 \text{ Hz}$ . Tämä taajuusväli on kuitenkin oma arvioni ottaen huomioon se, ettei puurakenteisille välipohjille ole Suomessa olemassa matalataajuuksisten lattioiden osalta mitoitusmenetelmiä. Voitaneen todeta, että kyseinen taajuusväli kutakuinkin pitää paikkansa ja että sitä ainakin tässä työssä voidaan käyttää eri yhteyksissä tausta oletuksena.

Lattiat, joiden paino on yli  $300 \text{ kg/m}^2$  ja jänneväli on enemmän kuin 10 m, ovat yleensä matalataajuuksisia ja niiden ominaistajuus on alle 10 Hz. Korkeataajuuksiset lattiat puolestaan ovat painoltaan yleensä alle  $300 \text{ kg/m}^2$  ja niiden jänneväli on selvästi alle 10 m. (Talja ym. 2002, 14–15.) Kuvista 4 voidaan nähdä, miten lattian äärimittojen ja massan muuttaminen vaikuttavat sen ominaistajuuteen.



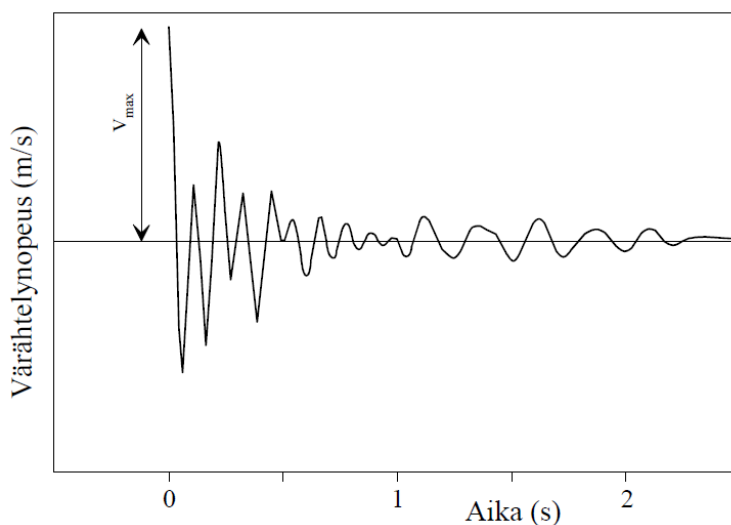
Kuvio 4. Toimivan matalataajuuksisen lattian massan täytyy olla suhteellisen suuri. (Talja 2013, 25)

### 6.3 Korkeataajuuksiset välipohjat

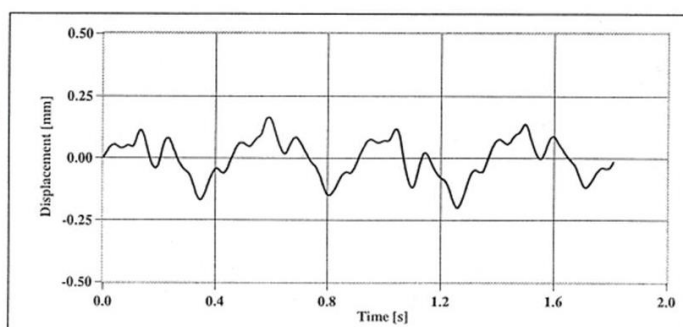
Yleensä kevyet tai keskiraskaat lattiat ovat korkeataajuuksisia. Tällaisen rakenteen alin ominaistajuus on kävelystä aiheutuvia taajuuksia niin paljon suurempi, että resonanssia ei pääse syntymään. (Talja 1996, 28.) Tällaisen lattian värähtelystä voidaan selkeästi havaita eri askeleista aiheutuneet iskut. Ihmiskeho voi kokea askeleista aiheutuvat värähtelyt häiritseviksi. (Talja ym. 2002, 15.)

Mitoittavaksi tekijäksi korkeataajuuksisella lattialla muodostuu siten joko lattian notkuminen askelten alla tai kävelyn kuormituksesta aiheutuva värinä. Lattian notkuminen tarkoittaa kävelyn taajuudella (1,6–2 Hz) tapahtuvaa värähtelyä, joka tuntuu epämiellyttävältä joko kävelijälle tai yleensä lähistöllä oleville muille ihmisille. (Talja 1996, 28.) Lattian notkumisen häiritsevyyttä voidaan arvoida paikallisen 1 kN voiman aiheuttaman siirtymän (ts. taipuman)  $d$  [mm] perusteella. Voiman etäisyys tarkastelussa olevasta pisteestä on vähintään 600 mm. Siirtymä voi olla moniaukoisten rakenteiden tapauksissa myös ylöspäin. (Talja ym. 2002, 17.)

Tärinän käynnistäjänä toimii kantapää, jonka aiheuttama lattian värähtely jatkuu hitaasti vaimenevana (kuvio 5). Vaikkakin lattian luonnollinen vaimennus heikentää värähtelyä nopeasti, impulssin aiheuttama vaste on merkittävä, koska värähtelevä massa on pieni. (Talja 1996, 28–29.)



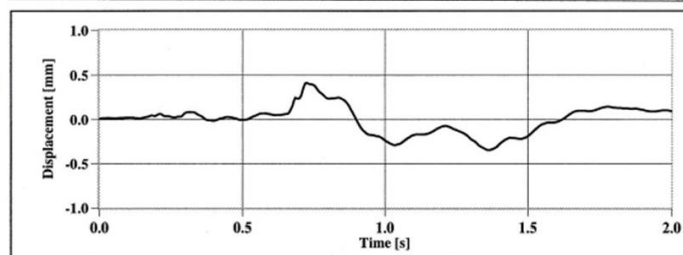
Kuvio 5. Idealisoidun impulssin aiheuttama lattian vaste (Talja 1996, 29)



$$m = 110 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 9 \text{ Hz}$$

$$l = 9 \text{ m}$$



Kelluvalla lattialla  
varustettu välipohja:

$$m = 240 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 8 \text{ Hz}$$

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

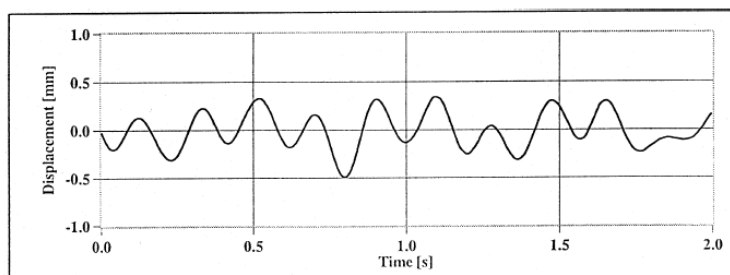
Kuvio 6. Kevyen lattian ja kelluvalla lattialla varustetun välipohjan värähtelyä (Talja 2013)

#### 6.4 Matalataajuiset välipohjat

Matala ominaistaajuus on tyypillistä raskaille, suurijännevälisille lattioille, mutta esiintyy myös keskiraskailla välipohjilla, mikäli jänneväli on yli 6–8 m. Hyvin raskailla välipohjilla massa on jo niin suuri, että kävelyn aiheuttamat impulssit eivät resonoi lattian kanssa siten, että sillä olisi käytännön merkitystä. (Talja 1996, 28.)

Kun matalataajuuksista lattiaa kuormitetaan kävelyherätteellä, alin ominaistajuus resonoi jonkin kävelystä johtuvan taajuuden kanssa. Koska tällöin koko lattia värähtelee samalla taajuudella, lattian massa vaimentaa värähtelyä ja vaikuttaa myös värähtelyamplitudin suuruuteen. (Talja 1996, 28.)

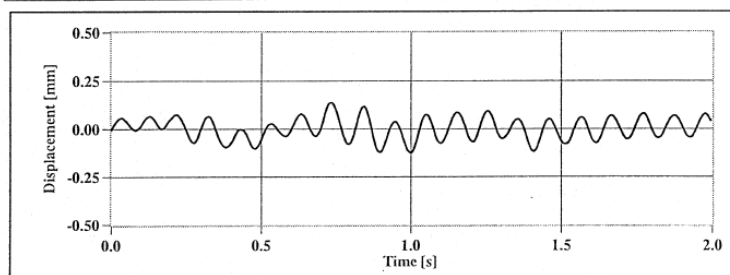
Matalataajuuksisten lattioiden värähtelyssä voidaan erottaa selvästi lattian ominaisvärähtely, mutta eri askelten aiheuttamaa värähtelyä on vaikea havaita. Ihmiskeho voi kokea tällaisen lattian ominaisvärähtelyn häiritseväksi. (Talja ym. 2002, 14.)



$$m = 220 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 5 \text{ Hz}$$

$$l = 8,4 \text{ m}$$



$$m = 200 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

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

Kuvio 7. Massiivisten lattioiden värähtelyä (Talja 2013, 17)

## 7 ALA- JA VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELYMITOITUS

### 7.1 Euronormit

Eurokoodi 5:ssä (EN1995-1-1) on kuvattu värähtelyä koskevat mitoitusohjeet puurakenteisille lattioille. Eurokoodi rajoittaa puurakenteisen lattian alimmaksi ominaistajuudeksi 8 Hz, jolloin 1 kN:n pistekuormasta saa aiheutua maksimissaan 0,5–4 mm taipuma. Jos lattian alin ominaistajuus on kuitenkin  $3 \leq 8$  Hz, niin sille täytyy tehdä erityistarkastelu kiihtyvyyden osalta. Kiihtyvyys on suure, joka kuvaa kappaleen nopeuden muutosta tietyssä ajassa ja jonka SI-järjestelmän mukainen yksikkö on  $m/s^2$ . Yli 8 Hz:n lattiat ovat korkeataajuuksisia ja alle 8 Hz:n lattiat ovat matalataajuuksisia. Matalataajuuksisten lattioiden kiihtyvyyden raja-arvot ovat kullekin värähtelyluokalle omansa. Eurokoodi 5:n mukaan kiihtyvyyden ollessa  $< 0,1 m/s^2$ , lattia kuuluu parempaan laatuluokkaan ja kun kiihtyvyys on alle  $0,35 m/s^2$ , niin lattia kuuluu huonompaan laatuluokkaan. (Eurokoodien tausta ja sovellukset 2008, 54–55.)

### 7.2 Suomen kansallinen liite

Suomessa Eurokoodin kansallinen liite rajoittaa puisten lattiarakenteiden värähtelyn 9 Hz:iin. Eli lattian alin ominaistajuus täytyy olla yli 9 Hz ja mikäli alin ominaistajuus on tämän alle, täytyy lattialle tehdä erityistarkasteluja. Korkeataajuuksisten, yli 9 Hz:n lattioiden taipuma staattisen 1 kN:n pistekuorman aiheuttamana saa suurimmillaan olla 0,5 mm. (Puurakenteiden suunnittelu. Lyhennetty suunnitteluohje RIL 205-1-2009 B, 23.) Tämä Suomessa käytössä oleva raja on siis tiukin mahdollinen.

Tässä opinnäytetyössä on sovellettu niin sanottua yleistä lattioiden värähtelyyn soveltuvaa mitoitusohjetta (Talja ym. 2002). Koska ohje on yleispätevä, sen ominaistajuuden rajat poikkeavat Suomessa käytettävistä ominaistajuuden rajoista. Talja ym. 2002 -raporttiin pohjautuen, matalataajuuksisten lattioiden kiihtyvyysehdot ja niitä vastaavat värähtelyluokat näkyvät alla olevassa taulukossa 2. Myös korkeataajuuksisten lattioiden maksimi hetkellinen taipuma 1 kN:n pistekuormasta kussakin värähtelyluokassa on taulukoitu alla olevassa taulukossa 2.

Taulukko 2. Laskennassa huomioitavat raja-arvot (Talja ym. 2002, 19)

Matalataajuuksiset lattiat		Korkeataajuuksiset lattiat, korotuslattiat ja kelluvat lattiat		Kaikki lattiat	
Kiihtyvyysehto		Taipumaehto		Kallistumaehto	
Luokka	$3 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 10 \text{ Hz}$	Luokka	$f_0 > 10 \text{ Hz}$	Luokka	
A	$a \leq 0,03 m/s^2$	A	$\delta \leq 0,12 \text{ mm}$	1	$\phi \leq 0,2 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
B	$a \leq 0,05 m/s^2$	B	$\delta \leq 0,25 \text{ mm}$	2	$\phi \leq 0,4 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
C	$a \leq 0,075 m/s^2$	C	$\delta \leq 0,5 \text{ mm}$	3	$\phi \leq 0,8 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
D	$a \leq 0,12 m/s^2$	D	$\delta \leq 1,0 \text{ mm}$	4	$\phi \leq 1,6 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
E	$a > 0,12 m/s^2$	E	$\delta > 1,0 \text{ mm}$	5	$\phi > 1,6 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$

Värähtelyluokkakohdaiset värähtelyn häiritsevyyttä kuvaavat sanalliset ilmaisut on kuvattu taulukossa 3.

Taulukko 3. Sanallinen kuvaus värähtelyn voimakkuudesta värähtelyluokittain (Talja ym. 2002, 16)

Värähtelyiden aistittavuus kehon tunte- muksen perusteella	Värähtelyiden aistittavuus esineisiin synty- vän värähtelyn perusteella
A Värähtely ei ole yleensä havaitta- vissa.	1 Astioiden kilinää ja kasvin lehtien heilumista ei yleensä esiinny.
B Värähtely on juuri havaittavaa.	2 Astioiden kilinää ei yleensä esiinny ja kasvin lehtien heiluminen on juuri havaittavaa.
C Värähtely on havaittavaa.	3 Astioiden kilinä on juuri havaittavaa. Kasvin lehtien heiluminen on ha- vaittavaa.
D Värähtely on selvästi havaittavaa.	4 Astioiden kilinä ja kasvin lehtien heiluminen on selvästi havaittavaa.
E Värähtely on voimakasta.	5 Astioiden kilinä ja kasvin lehtien heiluminen on voimakasta.

Mikäli lattialle on tehty kaikki tarvittavat tarkastelut, se voidaan alla olevan taulukon (taulukko 4) mukaisesti luokitella soveltuvaksi tiettyyn kohteeseen.

Taulukko 4. Värähtelyluokkien soveltuminen erilaisiin kohteisiin kiihtyvyyden ja kallistumaehdon pe-  
rusteella, sovellusesimerkkejä (Talja ym. 2002, 17)

Lattian väräh- telyluokka	Sovelluskohde
A1	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B2	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn ai- heuttaja on samassa huoneistossa.
C3	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn ai- heuttaja on samassa huoneistossa.
D4	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on sa- massa huoneistossa. Esim. omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E5	Luokka, jolle ei aseteta rajoituksia.

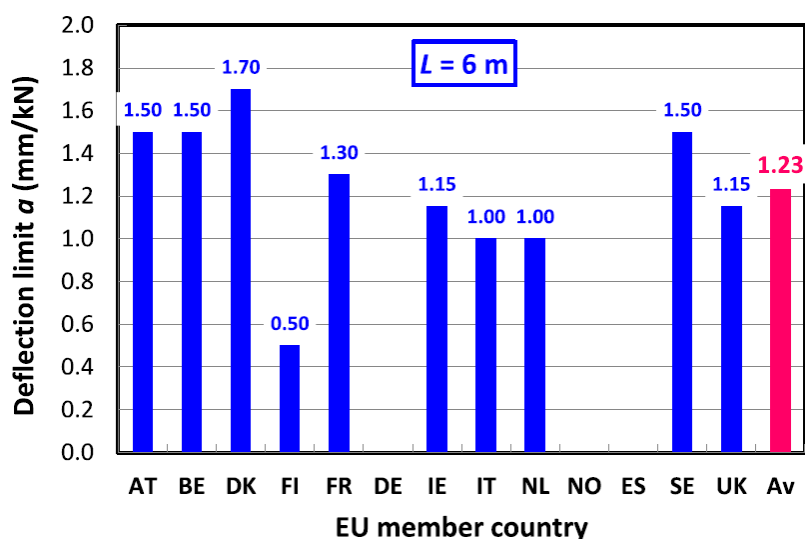
Taulukon 5 perusteella voidaan karkeasti arvioida lattian soveltuvuutta tiettyyn kohteeseen myös pelkän kirjain-luokan perusteella.

Taulukko 5. Värähtelyluokan soveltumisen jako tapahtuu vastaavalla tavalla, vaikka kallistumaehtoa ei tarkasteltaisikaan (Talja 2013, 21)

Värähtelyluokka	Värähtelyluokan soveltamisalue
A	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
C	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
D	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa. Esim. omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E	Luokka, jolle ei aseteta rajoituksia.

### 7.3 EU:n alueella esiintyviä kansallisia määräyksiä

Kuviossa 8 on esitelty eri EU jäsenmaiden asettamia korkeataajuuksisen puurakenteisen lattian hetkellisen taipuman raja-arvoja. Taulukon perusteella voidaan todeta, että Suomen määräykset ovat huomattavasti tiukemmat muihin EU:n jäsenmaihiin nähden. Suomessa raja-arvo on asetettu 0,5 mm:in, kun taas koko EU:n alueen keskiarvo on 1,23 mm.



Kuvio 8. Eri EU:n jäsenmaiden asettamia korkeataajuuksisen puulattian hetkellisen taipuman rajoja (Toratti)

## 8 LASKUESIMERKIT

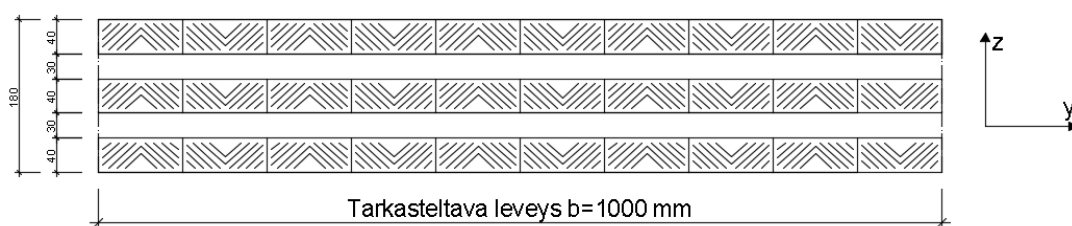
Selvitetään aluksi, miten 5-kerroksisen CLT-levyn pituus- ja poikittaissuuntainen jäyhyysmomentti lasketaan ja sen jälkeen tarkastellaan kolmea värähtelymitoitusta tapauksien avulla. Värähtelymitoitusesimerkeissä jäyhyysmomentit on laskettu tapauksissa oleville CLT-levyille soveltaen alaluvussa 8.1 tarkasteltua tapauksia jäyhyysmomenttien laskennasta. Koska tässä opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa värähtelyä, muut välipohjan mitoituksen vaiheet jätetään tarkasteluissa huomiotta.

### 8.1 Tehollisen jäyhyysmomentin laskenta 5-kerroksiselle CLT-levylle

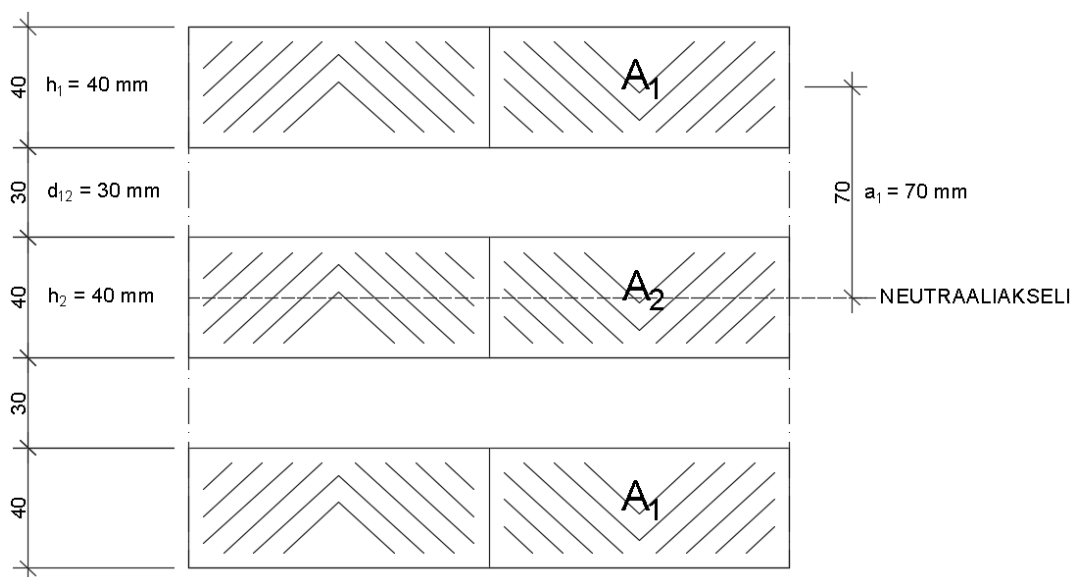
#### 8.1.1 Jännevälän suuntainen tehollinen jäyhyysmomentti

Lähtötiedot:

Levytyyppi = CrossLam Kuhmo CLT, L11



Jäyhyysmomentin laskennassa tarvittavat suureet on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10. Jäyhyysmomentin laskennassa tarvittavat suureet (Pentti 2016)

$$\begin{aligned}
h_1 &= 40 \text{ mm} \\
h_2 &= 40 \text{ mm} \\
d_{12} &= 30 \text{ mm} \\
a_1 &= 70 \text{ mm} \\
b &= 1000 \text{ mm (tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys)} \\
A_1 = A_2 &= 1000 \text{ mm} * 40 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2 \\
l &= 5000 \text{ mm} \\
G_{R,mean} &= 65 \text{ N/mm}^2 \\
E_{0,mean} &= 11500 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

Koska kyseessä on symmetrinen 5-kerroksinen levy, kaavassa (8)  $a_2 = 0$  ja  $\gamma_1 = \gamma_3$ .

Lasketaan jäyhyysmomentti pituussuuntaisten lamellien poikkileikkaukselle kaavalla

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{b * h^3}{12}.$$

Sijoitetaan kaavaan arvot ja lasketaan jäyhyysmomentti

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{1000 * 40^3}{12} = 5333333 \text{ mm}^4.$$

Koska pituussuuntaisten lamellien välissä on poikittaissuuntaisia lamelleja heikentämässä levyn jäykkyyttä liukuman takia, tarvitaan liukuman huomioiva pienennyskerroin  $\gamma_1$ . Tässä tapauksessa  $\gamma_1 = \gamma_3$  ja  $\gamma_2 = 1$ . Lasketaan sitten  $\gamma_1 = \gamma_3$  kaavalla

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,mean} * A_1 * d_{12}}{G_{R,mean} * b * l^2}}.$$

Sijoitetaan kaavaan tarvittavat arvot ja lasketaan liukuman huomioiva pienennyskerroin

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 11500 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * 30 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm} * 5000^2 \text{ mm}^2}} = 0,922666.$$

Lasketaan sen jälkeen poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti kaavalla

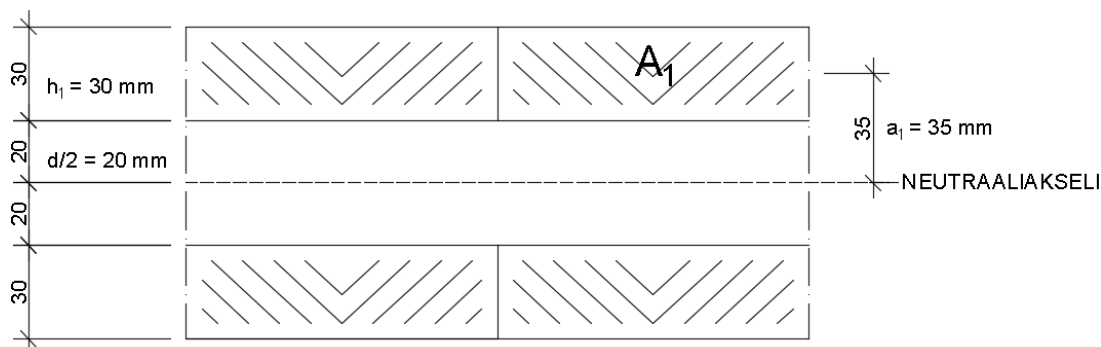
$$I_{ef} = \sum_1^3 (I_i + \gamma_i * A_i * a_i^2).$$

Sijoitetaan sitten tarvittavat arvot kaavaan ja lasketaan lopputulos

$$\begin{aligned}
I_{ef} &= 2 * (5333333 \text{ mm}^4 + 0,922666 * 40000 \text{ mm}^2 * 70^2 \text{ mm}^2) \\
&\quad + (5333333 \text{ mm}^4 + 1 * 40000 \text{ mm}^2 * 0 \text{ mm}) = \underline{\underline{377685071 \text{ mm}^4}} \text{ (metrin leveää kaistaa kohti)}.
\end{aligned}$$

## 8.1.2 Poikittaissuunnan tehollinen jäyhyysmomentti

Tämän alaluvun laskuissa lähtökohtana on edellisen alaluvun lähtötiedot. Poikittaissuunnan jäyhyysmomentin laskennassa tarvittavat suureet on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Poikittaissuunnan jäyhyysmomentin laskennassa tarvittavat suureet (Pentti 2016)

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 30 \text{ mm} \\
 d_{12} = \frac{d}{2} &= 20 \text{ mm} \\
 a_1 &= 35 \text{ mm} \\
 b &= 1000 \text{ mm (tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys)} \\
 A_1 &= 1000 \text{ mm} * 30 \text{ mm} = 30000 \text{ mm}^2 \\
 l &= 2400 \text{ mm (CLT-levyn leveys kohtisuoraan jänneväliä vastaan)} \\
 G_{R,mean} &= 65 \text{ N/mm}^2 \\
 E_{0,mean} &= 11500 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Lasketaan jäyhyysmomentti tarkasteltavan suunnan pitkittäissuuntaisten lamellien poikkileikkaukselle kaavalla

$$I_1 = I_2 = \frac{b * h^3}{12}. \quad (3)$$

Sijoitetaan kaavaan arvot ja lasketaan jäyhyysmomentti

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{1000 * 30^3}{12} = 2250000 \text{ mm}^4.$$

Koska tarkasteltavassa suunnassa olevien pituussuuntaisten lamellien välissä on poikittainen lamelli heikentämässä levyn jäykkyyttä liukuman takia, tarvitaan liukuman huomioiva pienennyskerroin  $\gamma_1$ . Tässä tapauksessa  $\gamma_1 = \gamma_2$ . Lasketaan sitten  $\gamma_1 = \gamma_2$  kaavalla

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,mean} * A_1 * d_{12}}{G_{R,mean} * b * l^2}}. \quad (4)$$

Sijoitetaan kaavaan tarvittavat arvot ja lasketaan liukuman huomioiva pienennyskerroin

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 11500 \text{ N/mm}^2 * 30000 \text{ mm}^2 * 20 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm} * 2400^2 \text{ mm}^2}} = 0,846101.$$

Lasketaan sen jälkeen poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti kaavalla

$$I_{ef} = \sum_1^3 (I_i + \gamma_i * A_i * a_i^2). \quad (1)$$

Sijoitetaan sitten tarvittavat arvot kaavaan ja lasketaan lopputulos

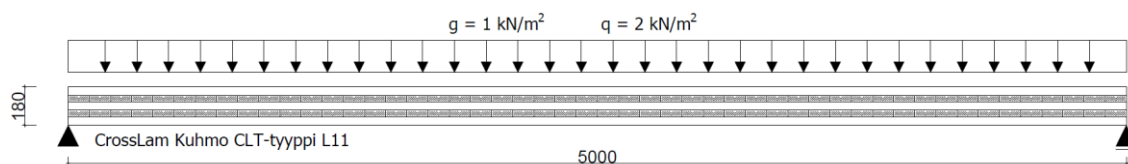
$$I_{ef} = 2 * (2250000 \text{ mm}^4 + 0,846101 * 30000 \text{ mm}^2 * 35^2 \text{ mm}^2) = \underline{66688424 \text{ mm}^4} \text{ (metrin leveää kaistaa kohti).}$$

## 8.2 Esimerkki 1

Tarkastellaan tässä esimerkissä yksiaukkoisen, kahdelta reunalta tuetun CLT-lattian värähtelymitoituksen vaiheita, kun lattia on matalataajuuksinen.

Lähtötiedot:

- asuinrakennuksen yksiaukkoisen, kahdelta reunalta tuettu välipohja
- käyttöluokka 1
- luotettavuusluokka RC2
- pysyväkuorma =  $1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 102 \text{ kg/m}^2$  (perustuu kuvan 27 tietoihin)
- hyötykuorma =  $2 \text{ kN/m}^2$
- jänneväli,  $l = 5 \text{ m}$
- lattian leveys,  $b = 7 \text{ m}$
- lattiamateriaalina CrossLam Kuhmon CLT-levy, levytyyppi L11 => materiaalin ominaisuudet CrossLam Kuhmon ohjeilla
- CLT:n omapaino =  $500 \text{ kg/m}^3$
- $(EI_{ef})_l = 11500 \text{ N/mm}^2 * 10^6 * (\frac{377685071 \text{ mm}^4}{10^{12}}) = 4343379 \text{ Nm}^2$  (johdettu luvun 8.1.1 perusteella)
- $(EI_{ef})_b = 11500 \text{ N/mm}^2 * 10^6 * (\frac{66688424 \text{ mm}^4}{10^{12}}) = 766917 \text{ Nm}^2$  (johdettu luvun 8.1.2 perusteella)
- $m = 102 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,18 \text{ m}^3 + 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 222 \text{ kg/m}^2$
- värähtelymitoituksessa käytetyt parametrit:
  - kävelijän paino P: 800N
  - vaimennuskerroin: 0,03.



Kuva 12. Välipohjarakenteen staattinen malli (Pentti 2016)

Perälän opetusmateriaalin (2013, 6) mukaan yksiaukkoisen, kahdelta reunalta tuetun lattian alin ominaistaajuus lasketaan kaavasta,

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI_{eff})_l}{m}} \quad (37)$$

Sijoitetaan lähtötietojen mukaiset arvot kaavaan ja lasketaan tulos

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 5^2 \text{ m}^2} \sqrt{\frac{4343379 \text{ Nm}^2}{222 \text{ kg/m}^2}} = 8,8 \text{ Hz}$$

Koska lattian ominaistaajuus on alle 9 Hz, täytyy sille tehdä kiihtyvyydestarkastelu. Taljan yms. tiedotteen (2002, 23) mukaan kiihtyvyyssamplitudin suuruus arvioidaan kaavasta

$$a_{max} = \frac{R \cdot P}{W \cdot \zeta} * 0,83 * e^{-0,35 \cdot f_0} \quad (38)$$

Kiihtyvyyden laskemiseksi täytyy ensin laskea lattian värähtelevän osan tehollinen massa, joka lasketaan kahdelta reunalta tuetulle, yksiaukkoiselle lattialle Taljan yms. tiedotteen (2002, 23) mukaan kaavasta

$$W = m * b_{eff} * l, \text{ jossa} \quad (39)$$

$$b_{eff} = b = 7 \text{ m}. \quad (40)$$

Nyt sijoitetaan tunnetut arvot tehollisen massan kaavaan

$$W = 222 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 7 \text{ m} * 5 \text{ m} = 7770 \text{ kg}.$$

Sitten sijoitetaan kiihtyvyyden kaavaan tarvittavat arvot ja lasketaan kiihtyvyyssamplitudi

$$a_{max} = \frac{0,7 \cdot 800 \text{ N}}{7770 \text{ kg} \cdot 0,03} * 0,83 * e^{-0,35 \cdot 8,8 \text{ Hz}} = 0,092 \text{ m/s}^2.$$

Saatua kiihtyvyyssamplitudin arvoa verrataan taulukon 2 arvoihin. Koska kiihtyvyyssamplitudin suuruus on yli  $0,075 \text{ m/s}^2$ , mutta kuitenkin alle  $0,12 \text{ m/s}^2$ , niin lattia kuuluu tällöin värähtelyluokkaan D.

## 8.3 Esimerkki 2

Lähtötiedot:

Tässä esimerkissä tehdään vertailulaskelma esimerkille 1. Tässä tapauksessa lattia on yksiaukkoinen, mutta neljältä reunalta tuettu.

Yksiaukkoisen, neljältä reunalta tuetun lattian alin ominaistajuus lasketaan Taljan yms. tiedotteen (2002, 21) mukaan kaavasta

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI_{ef})_l}{m}} * \sqrt{1 + \left[ 2 \left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI_{ef})_b}{(EI_{ef})_l}}. \quad (41)$$

Sijoitetaan lähtötietojen mukaiset arvot kaavaan ja lasketaan tulos

$$f_0 = \frac{\pi}{2 * 5^2 m^2} \sqrt{\frac{4343379 Nm^2}{222 kg/m^2}} * \sqrt{1 + \left[ 2 \left(\frac{5}{7}\right)^2 + \left(\frac{5}{7}\right)^4 \right] \frac{766917 Nm^2}{4343379 Nm^2}} = 9,7 \text{ Hz}$$

Huomataan, että lattian ominaistajuus kasvaa esimerkkiin 1 verrattuna. Koska lattian ominaistajuus on nyt yli 9 Hz, sille ei tarvitse tehdä kiihtyvyydstarkestelua, vaan tästä eteenpäin lattian mitoitus jatkuu Euronormien mukaisesti korkeataajuuksisen lattian tarkasteluilla.

## 8.4 Esimerkki 3

Tarkastellaan yksiaukkoista, neljältä reunalta tuettua lattiaa, jonka lähtötiedot ovat erilaiset, kuin esimerkeissä 1 ja 2.

Lähtötiedot:

- asuinrakennuksen yksiaukkoinen, neljältä reunalta tuettu välipohja
- käyttöluokka 1
- luotettavuusluokka RC2
- pysyväkuorma =  $1,4 \frac{kN}{m^2} = 143 \text{ kg/m}^2$
- hyötykuorma =  $2 \text{ kN/m}^2$
- jänneväli,  $l = 5,5 \text{ m}$
- lattian leveys,  $b = 8 \text{ m}$
- lattiamateriaalina Crosslamin CLT-levy, levytyyppi L12 => materiaalin ominaisuudet Crosslamin ohjeilla
- CLT:n omapaino =  $500 \text{ kg/m}^3$
- $(EI_{ef})_l = 11500 \text{ N/mm}^2 * 10^6 * \left( \frac{484710414 \text{ mm}^4}{10^{12}} \right) = 5574170 \text{ Nm}^2$  (johdettu ja laskettu soveltaen lukua 8.1)
- $(EI_{ef})_b = 11500 \text{ N/mm}^2 * 10^6 * \left( \frac{113682986 \text{ mm}^4}{10^{12}} \right) = 1307354 \text{ Nm}^2$  (johdettu ja laskettu soveltaen lukua 8.1)
- $m = 143 \frac{kg}{m^2} + 500 \frac{kg}{m^3} * 0,2 \text{ m}^3 + 30 \frac{kg}{m^2} = 273 \text{ kg/m}^2$

- värähtelymitoituksessa käytetyt parametrit:
  - kävelijän paino  $P = 800\text{N}$
  - vaimennussuhde  $= 0,03$ .

Yksiaukkoisen, neljältä reunalta tuetun lattian alin ominaistajuuus lasketaan Taljan yms. tiedotteen (2002, 21) mukaan kaavasta

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI_{ef})_l}{m}} * \sqrt{1 + \left[ 2 \left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI_{ef})_b}{(EI_{ef})_l}}. \quad (41)$$

Sijoitetaan lähtötietojen mukaiset arvot kaavaan ja lasketaan tulos

$$f_0 = \frac{\pi}{2 * 5,5^2 \text{m}^2} \sqrt{\frac{5574170 \text{ Nm}^2}{273 \text{ kg/m}^2}} * \sqrt{1 + \left[ 2 \left(\frac{5,5}{8}\right)^2 + \left(\frac{5,5}{8}\right)^4 \right] \frac{1307354 \text{ Nm}^2}{5574170 \text{ Nm}^2}} = 8,4 \text{ Hz}$$

Koska lattian ominaistajuuus on alle 9 Hz, täytyy sille tehdä kiihtyvyytarkastelu. Kiihtyvyyssamplitudin suuruus arvioidaan Taljan yms. tiedotteen (2002, 23) mukaan kaavasta

$$a_{max} = \frac{R * P}{W * \zeta} * 0,83 * e^{-0,35 * f_0}.$$

Kiihtyvyyden laskemiseksi täytyy ensin laskea lattian värähtelevän osan tehollinen massa, joka lasketaan neljältä reunalta tuetulle, yksiaukkoiselle lattialle Taljan yms. tiedotteen (2002, 23) mukaan kaavasta

$W = m * b_{eff} l$ , jossa

$$b_{eff} = 2,0 \left[ \frac{(EI_{ef})_b}{(EI_{ef})_l} \right]^{1/4} * l, \quad (42)$$

mutta  $b_{eff}$  saa enintään arvon  $2/3$  lattian poikittaissuuntaisesta kokonaisleveydestä.

Lasketaan sitten  $b_{eff}$

$$b_{eff} = 2,0 * \left[ \frac{1307354 \text{ Nm}^2}{5574170 \text{ Nm}^2} \right]^{1/4} * 5,5 \text{ m} = 7,66 \text{ m} > \frac{2}{3} * 8 \text{ m} = 5,3 \text{ m}, \text{ joten valitaan } 5,3 \text{ m}.$$

Sijoitetaan tunnetut arvot tehollisen massan kaavaan

$$W = 273 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 5,3 \text{ m} * 5,5 \text{ m} = 7958 \text{ kg}.$$

Sitten sijoitetaan kiihtyvyyden kaavaan tarvittavat arvot ja lasketaan kiihtyvyydsamplitudi

$$a_{max} = \frac{0,7 \cdot 800 \text{ N}}{7958 \text{ kg} \cdot 0,03} * 0,83 * e^{-0,35 \cdot 8,4 \text{ Hz}} = 0,103 \text{ m/s}^2.$$

Koska kiihtyvyydsamplitudin suuruus on yli  $0,075 \text{ m/s}^2$ , mutta kuitenkin alle  $0,12 \text{ m/s}^2$ , niin lattia kuuluu tällöin värähtelyluokkaan D.

## 9 ABAQUS-MITOITUSOHJELMA

### 9.1 ABAQUS-ohjelman esittely

ABAQUS on useisiin eri tarkoituksiin soveltuva "Finite element method" -ohjelma (FEM), joka on suunniteltu soveltuvaksi erityisesti ulkopuolisten kuormien vaikutusten analysoimiseen kiinteissä aineissa ja rakenteissa. Ohjelma sisältää muun muassa seuraavia ominaisuuksia:

- valmius staattiseen ja dynaamiseen mallintamiseen
- kyky suurten muodonmuutosten mallintamiseen 2-D ja 3-D malleja käyttäen
- kattava elementtivalikoima
- useita välineitä kontaktien mallintamiseen
- kattava materiaalikirjasto, joka mahdollistaa elastisen, elastisplastisen ja plastisen käyttäytymisen mallintamisen sekä esimerkiksi vaahtokumi-, betoni-, maaperä- ja pietsosähköisten materiaalmallien käyttämisen.
- mahdollisuus mallintaa värähtelyjä, nesteen ja kiinteän rakenteen vuorovaikutusta, akustisia ilmiöitä, lommahtamista, jne.
- kytketyn termomekaanisen analyysin suorittaminen.

ABAQUS-ohjelma on suosittu lentokone-, auto-, öljy- ja mikroelektroniikkateollisuudessa, mutta myös tutkimuslaitoksissa ja yliopistoissa. (Elo 2011, 4.)

### 9.2 CLT-välipohjan värähtelyn analysointia

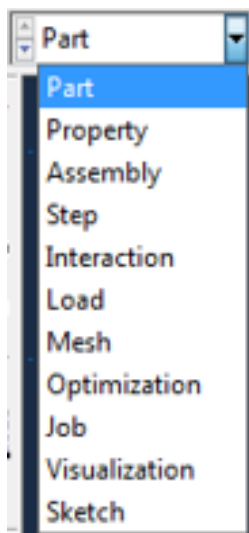
Tämän opinnäytetyön tekemisessä hyödynnettiin ABAQUS-ohjelmaa tulosten tarkastamisessa. CLT-levyn mallintamiseenkin olisi varmaan useita eri tapoja, mutta helpoimmaksi osoittautui tapa, jossa mallinnetaan levyn äärimittojen kokoinen hyvin ohut kuori ja sille annetaan materiaaliominaisuudet komposiitti -työkalun avulla. CLT-levyn mallinnus ei ristiinliimatun rakenteen takia ole niin yksinkertaista, kuin tavallisen sahatavaran tai liimapuun mallintaminen. ABAQUS-ohjelman käytössä sain paljon hyödyllistä opastusta sähköpostin välityksellä rakennustekniikan diplomi-insinööri Jussi-Pekka Matilaiselta. (ABAQUS-ohjelman käytön opastaminen 2016-12-03.)

### 9.3 Esimerkkitapausten tarkastaminen ABAQUS-ohjelmalla

#### 9.3.1 Esimerkki 1

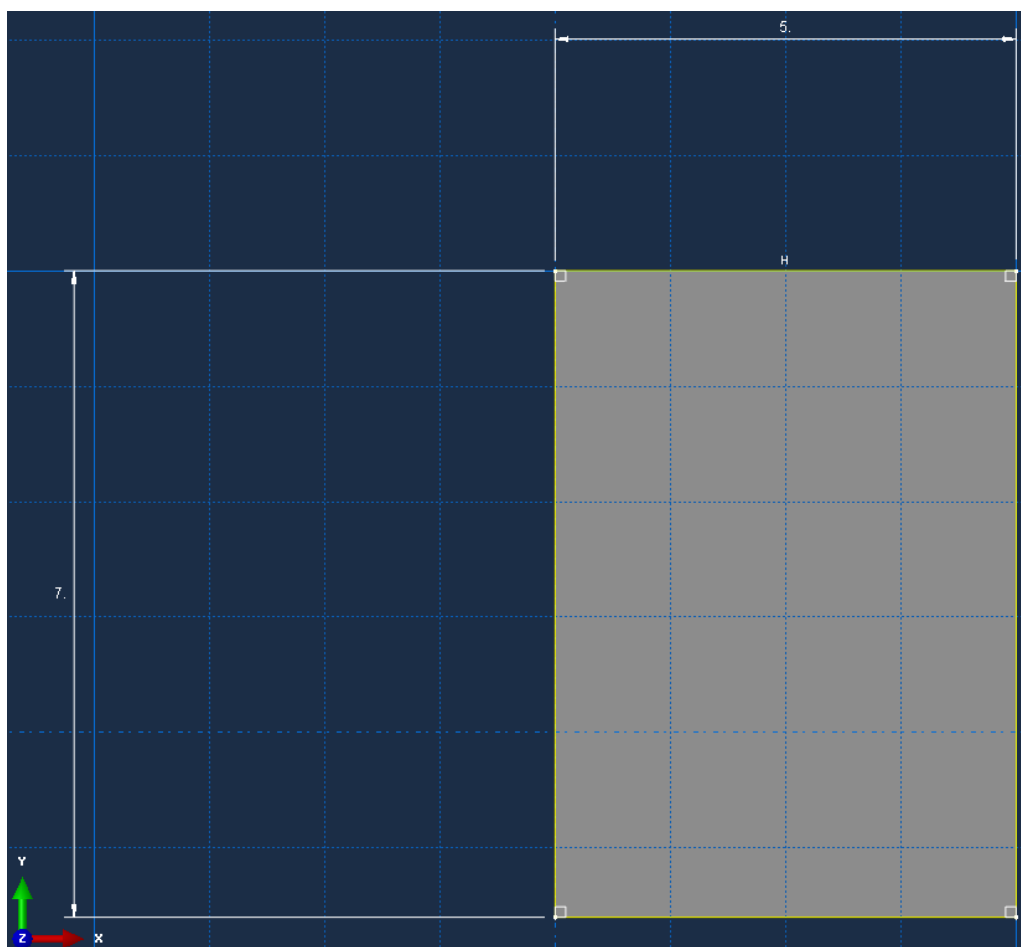
Tarkastellaan yhtä käsin laskettua esimerkkiä ABAQUS-ohjelmalla ja vertaillaan tuloksia keskenään. Jo yhden esimerkin vertaaminen ABAQUS-ohjelmaan antaa suuntaviivoja sille, että miten tarkasti käsin lasketut arvot pitävät paikkansa.

Ohjelmassa on tietty järjestys, jonka mukaan lattialle on annettava arvoja. Eteneminen arvojen syöttämisessä tapahtuu vaihtamalla moduulia. Moduulit ovat luetteloituna kuvassa 13.



Kuva 13. Moduulit (Pentti 2016)

Luodaan ensin esimerkin mukaisen lattian äärimitat Part-moduulissa (kuva 14).

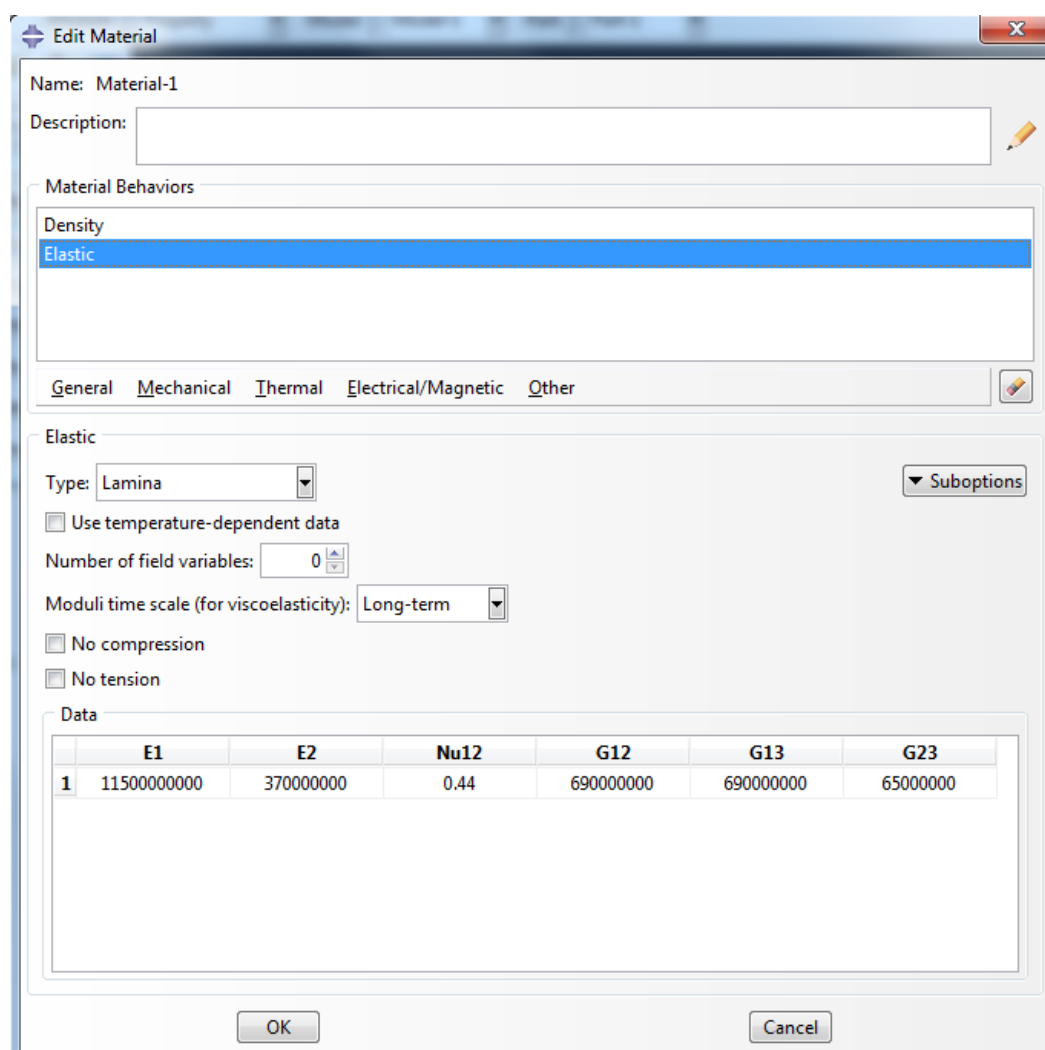


Kuva 14. Lattian äärimitat luodaan Create Part -työkalulla (Pentti 2016)

Kun lattialla on ääriimitat, siirrytään Property-moduuliin, jossa lattialle voidaan antaa materiaali. Materiaaliarvot ovat valmistajan ohjeiden mukaiset. CLT-levyn materiaaliarvot täytyy antaa Lamina-tyyppinä, jolloin materiaalille voidaan antaa kimmomoduulit useaan eri suuntaan (kuva 15).

Ohjelman käyttämien materiaalin ominaisuuksien symbolien selitykset (3ds.com):

- $E1 = E_{0,mean}$  = Lamellin kimmomoduuli
- $E2 = E_{90,mean}$  = Lamellin poikittaissuunnan kimmomoduuli
- $\nu_{12}$  = Poissonin luku
- $G12 = G_{mean}$  = Lamellin liukumoduuli
- $G13 = G_{mean}$  = Lamellin liukumoduuli
- $G23 = G_{r,mean}$  = Tasoleikkauksen liukumoduuli



Kuva 15. Materiaalin arvot syötetään Lamina-tyyppille (Pentti 2016)

Koska olemme kiinnostuneita lattian ominaistajuudesta, täytyy sille antaa ominaistiheys ja hyötykuormasta  $30 \text{ kg/m}^2$  osuus, joka vastaa suunnittelussa käytettävää lattian käyttötilan kuormitusta. Kun käyttötilan kuormitus otetaan huomioon ominaistajuuden laskennassa, siitä saatava tulos vastaa paremmin käytännön tilannetta. Ominastiheyden arvo annetaan ohjelmalle omanpainon mukaisesti. Koska tässä esimerkissä CLT-lattian tiheys on  $500 \text{ kg/m}^3$  ja sen lisäksi rakenteella on sekä pintarakenteiden että alaslasketun katon tuomaa omapainoa  $102 \text{ kg/m}^2$ , niin niistä saadaan laskettua lattialle syötettävä tiheyden arvo lattian äärimittojen avulla seuraavasti:

CLT-levyn omapaino neliometriä kohden kaavasta

$$500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,18 \text{ m} = 90 \text{ kg/m}^2.$$

Lattian omapaino yhteensä neliometriä kohden saadaan laskemalla omapainot yhteen

$$90 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 102 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 192 \text{ kg/m}^2.$$

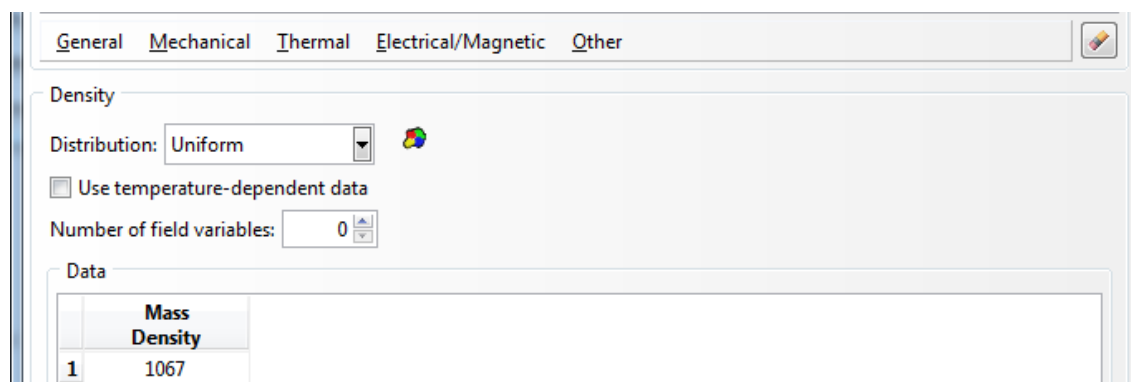
Nyt lasketaan koko lattian paino kaavalla

$$192 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 5 \text{ m} * 7 \text{ m} = 6720 \text{ kg}.$$

Josta edelleen saadaan laskettua lattian tiheydeksi

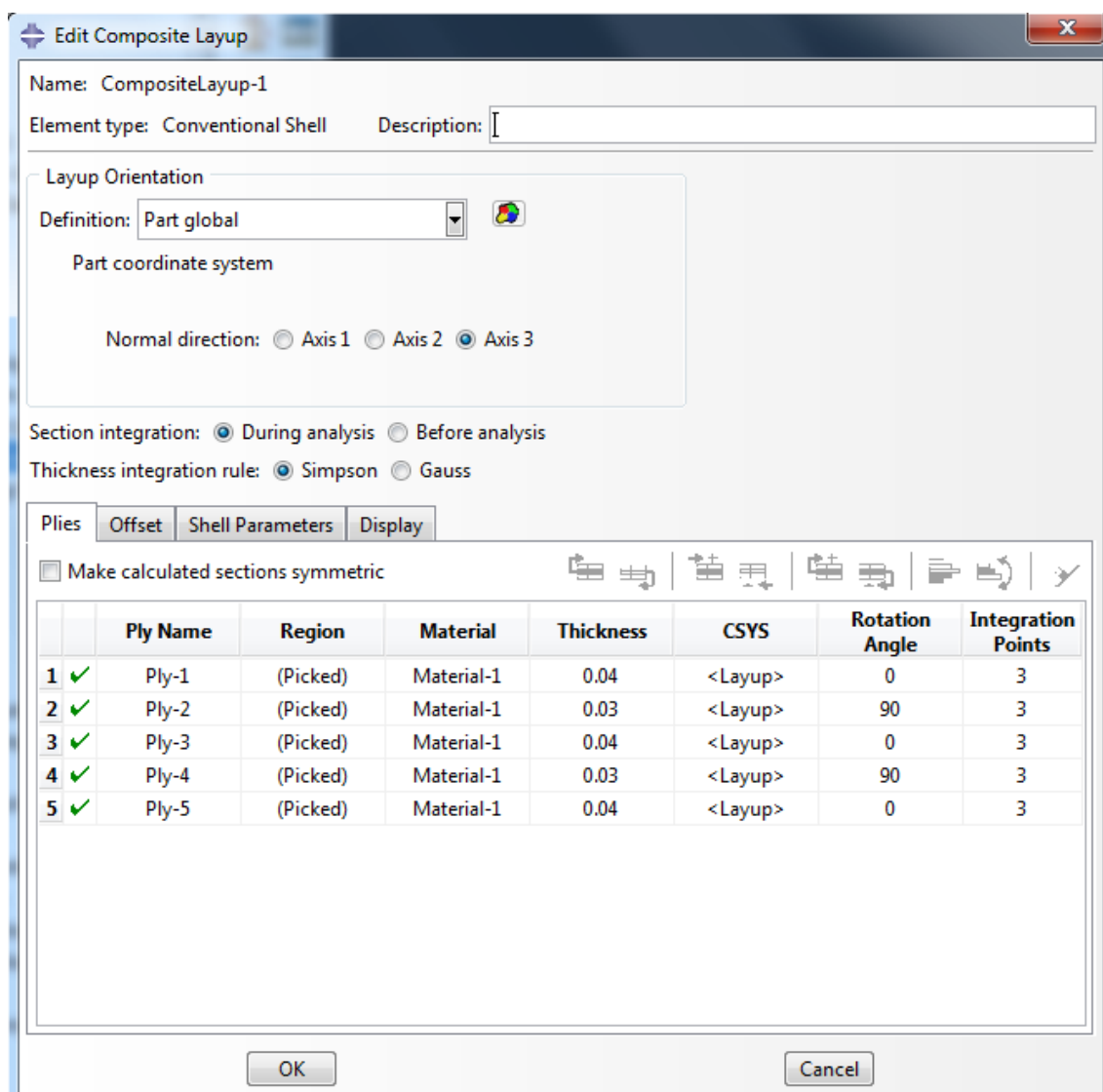
$$\frac{6720 \text{ kg}}{0,18 \text{ m} * 5 \text{ m} * 7 \text{ m}} = 1067 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

Tiheyden arvona lattialle siis käytetään  $1067 \text{ kg/m}^3$  (kuva 16).



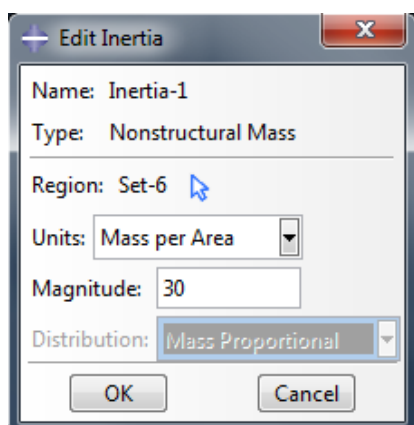
Kuva 16. Tiheyden arvon syöttäminen (Pentti 2016)

Materiaaliominaisuuksien asettamisen jälkeen voidaan luoda ohuelle kuorelle CLT-levyn poikkileikkaus Composite Layup -työkalulla. Siinä ohuelle kuorelle annetaan kaikki CLT-poikkileikkauksen tiedot, eli lamellien paksuudet, suunnat ja materiaalit (kuva 17).



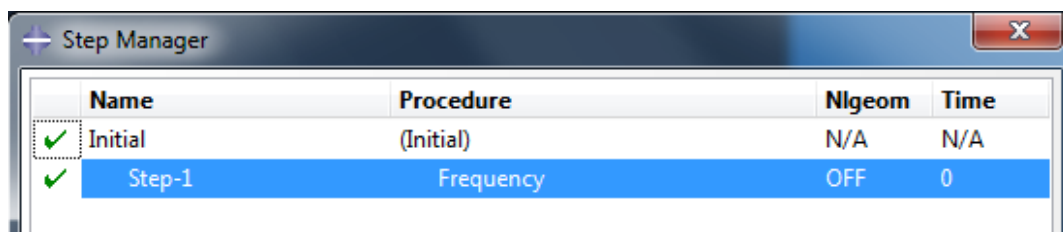
Kuva 17. Composite Layup -työkaluun syötettävät arvot (Pentti 2016)

Koska levyn materiaaliominaisuuksissa ei tiheyden arvoon otettu ominaistajuuden laskennassa tarvittavaa  $30 \text{ kg/m}^2$  osuutta hyötykuormasta, niin se täytyy antaa levylle inertia-työkalulla (kuva 18).



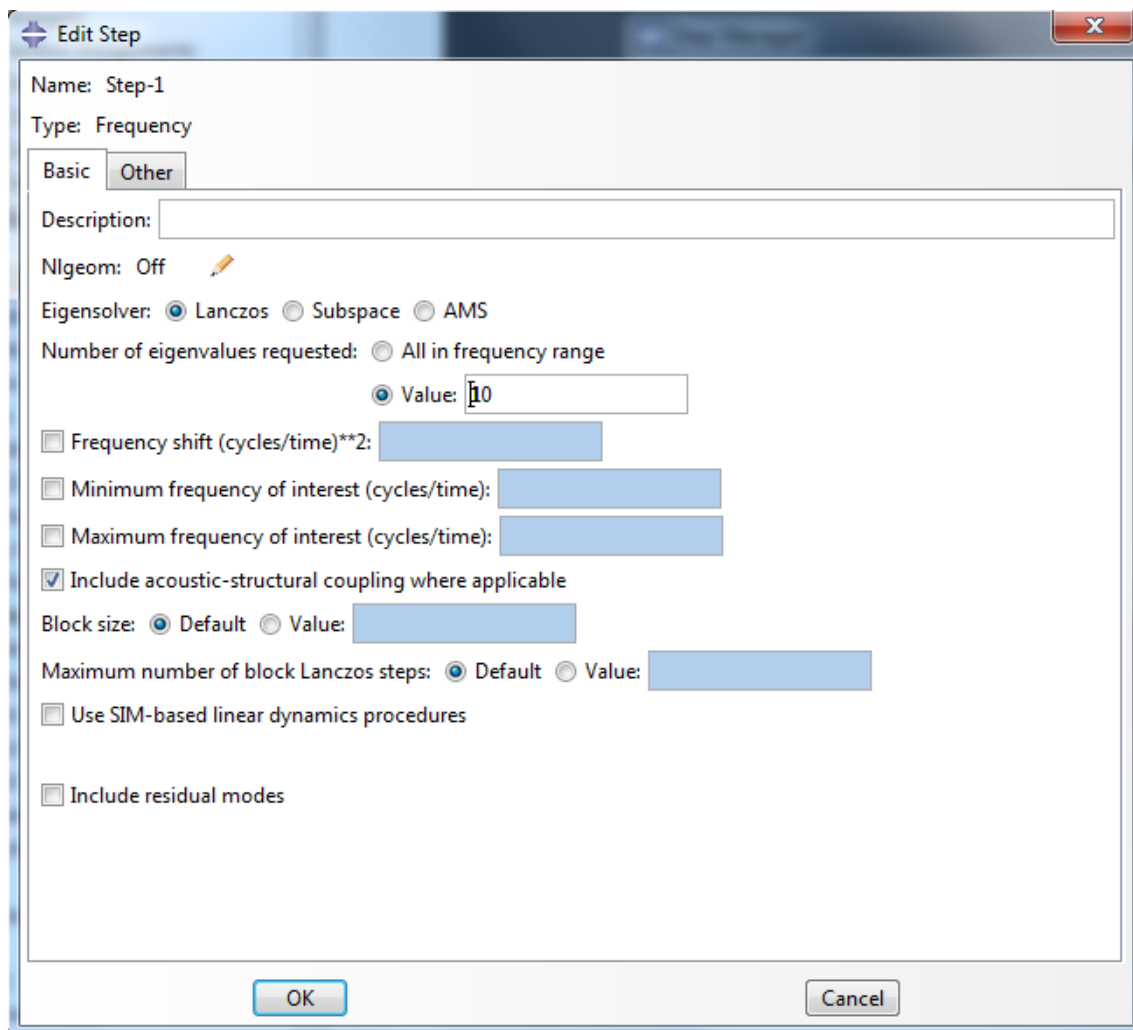
Kuva 18. Hyötykuorman osuuden asettaminen Inertia-työkalulla (Pentti 2016)

Näiden vaiheiden jälkeen luotu elementti tuodaan "varastosta" ja siirrytään analysointi askeleiden luomiseen. Analysointi askeleet luodaan Step-moduulissa Create step -työkalulla. Ominaisuuksien laskentaan tarvittava askel on Frequency-askel, joka luodaan heti oletuksena olevan Initial-askeleen jälkeen (kuva 19).



Kuva 19. Frequency-askeleen luominen (Pentti 2016)

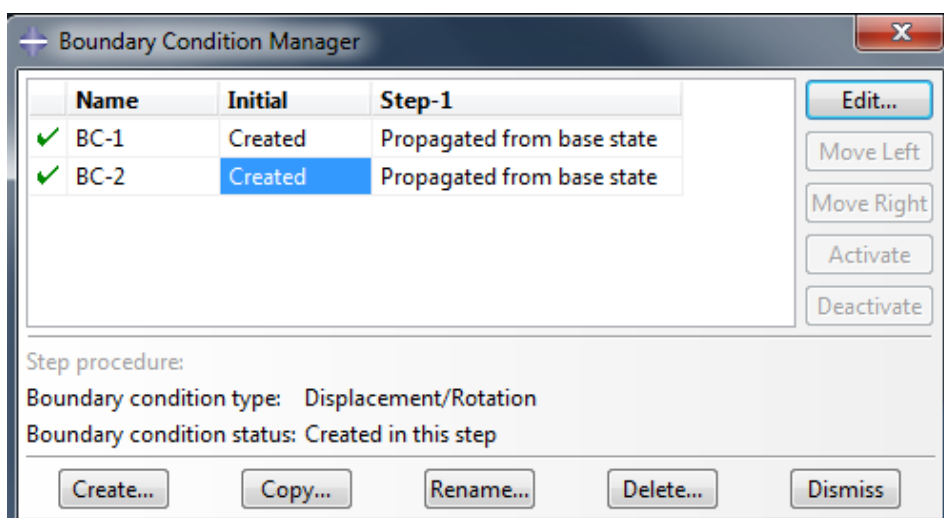
Frequency-askelelle kerrotaan, että ollaan kiinnostuneita vain kymmenestä alimmasta ominaisuuudesta (kuva 20).



Kuva 20. Frequency-askeleen asetusten asettaminen (Pentti 2016)

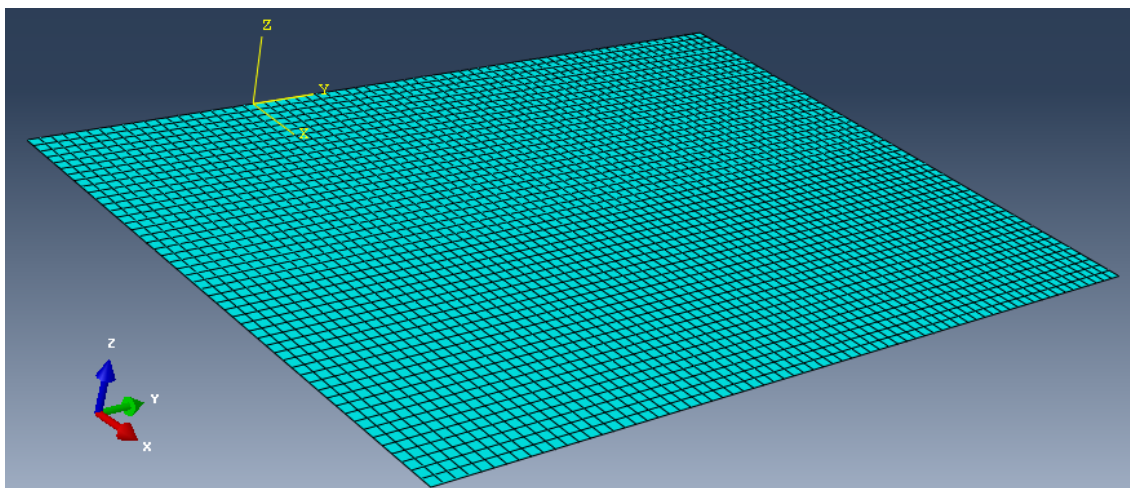
Sen jälkeen valitaan mistä arvoja halutaan tuloksiin ottaa mukaan output-työkalulla. Valitaan ainoastaan sellaiset tulokset, joista ollaan kiinnostuneita, jotta säästetään aikaa ja vältetään tarpeettomilta laskutoimituksilta.

Seuraavaksi luodaan tuennat lattian reunoille Load-moduulin Boundary Condition -työkalulla. Tässä esimerkissä lattian tuet ovat kahdella reunalla (kuva 21). Molemmille tuille määritellään myös oikeanlaiset vapausasteet.



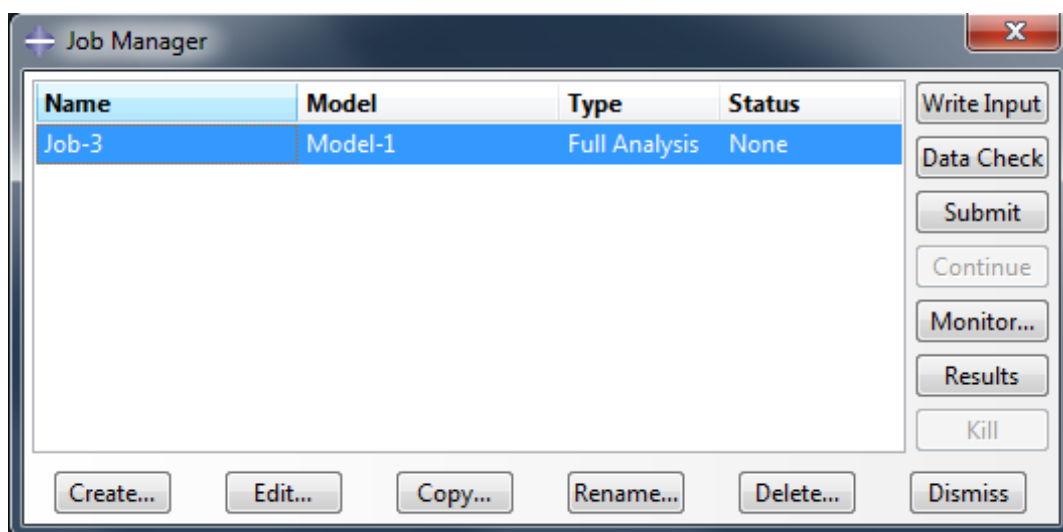
Kuva 21. Tukien lisääminen lattian reunoille (Pentti 2016)

Seuraavaksi voidaan siirtyä Mesh-moduuliin, jossa lattia jaetaan halutun kokosiin ruutuihin. Periaatteenä on, että mitä tiheämpi ruudukko, sitä parempi laskentatarkkuus. Ruudukko ei kuitenkaan voi olla äärettömän tiheä, koska laskennassa kestäisi sen seurauksena liian pitkään (kuva 22).



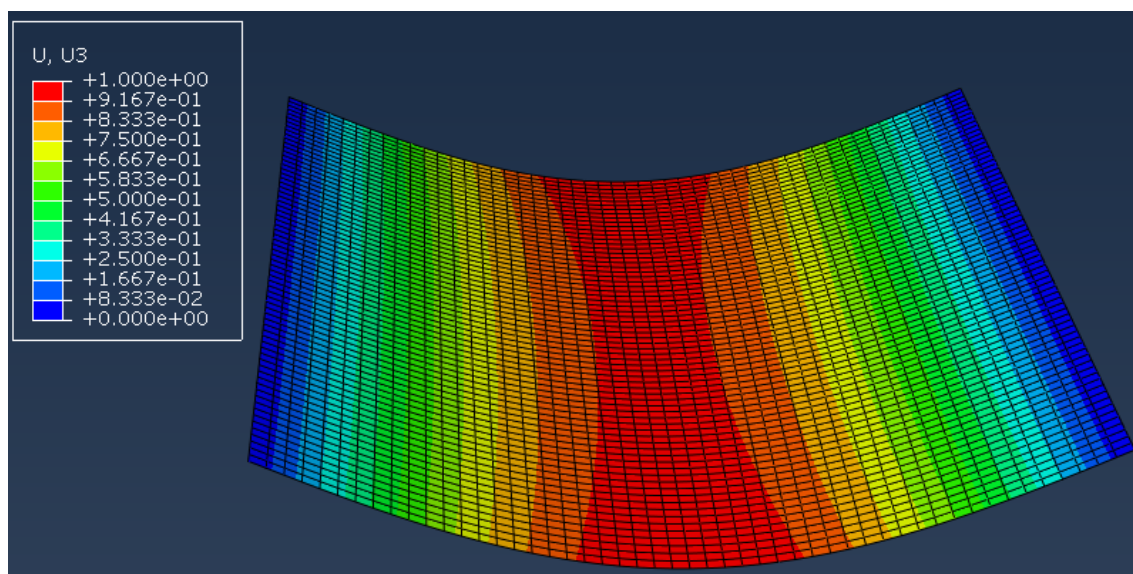
Kuva 22. Mesh-moduulissa lattiasta luotu ruudukko, tässä tapauksessa ruudun koko on 10 cm x 10 cm. (Pentti 2016)

Sitten voidaankin suorittaa laskutoimitus Job-moduulissa. Laskenta tapahtuu Job Manager -työkälulla, jossa ensin luodaan halutun mukainen laskenta, jonka jälkeen käynnistetään laskenta painamalla Submit-nappia (kuva 23).



Kuva 23. Laskennan suorittaminen (Pentti 2016)

Laskennan jälkeen tarkastellaan tuloksia ja verrataan niitä käsin laskettuihin arvoihin. Kun valitaan tuloksista näkyviin värähtelyn suhteellisen ominaisuuden siirtymät (U, U3), huomataan, että kyseisen siirtymän arvo on 0 tuilla ja vastaavasti 1 ominaisuuden määräävässä kohdassa (kuva 24).



Kuva 24. Värähtelyn suhteellisen ominaisuuden siirtymät (U, U3) (Pentti 2016)

Lattian alin ominaistajuus nähdään Step/Frame -tulosteesta. Tulosteesta huomataan, että lattian alin ominaistajuus vastaa hyvin tarkasti käsin laskettua arvoa, 8,8 Hz (kuva 25).

Step Name	Description
Step-1	

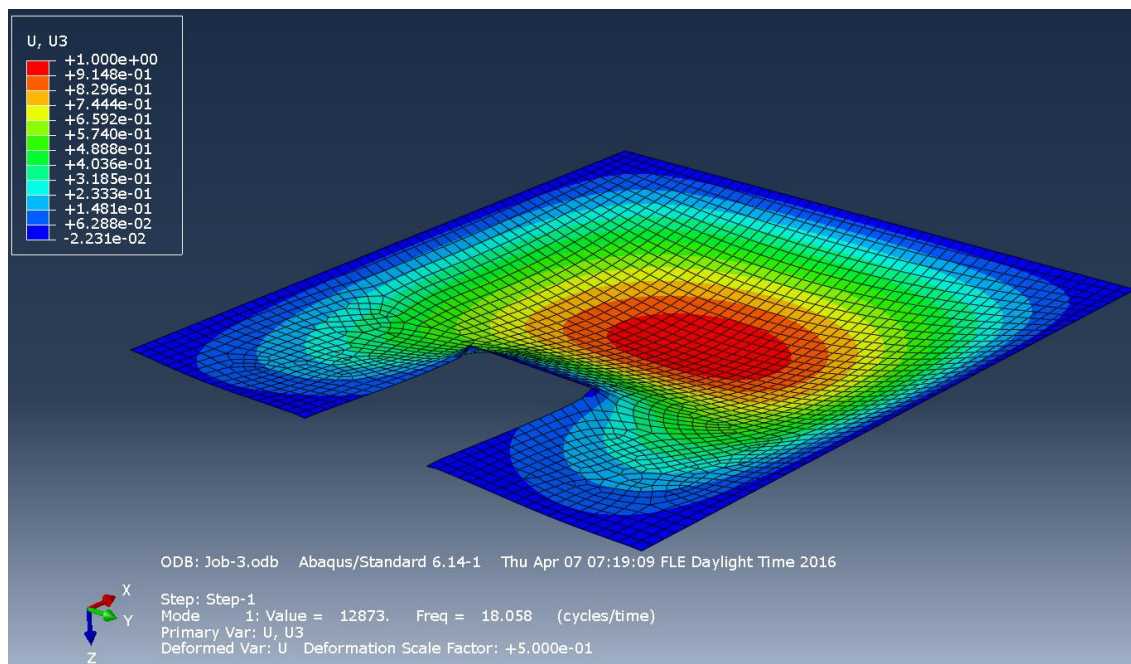
  

Index	Description
0	Increment 0: Base State
1	Mode 1: Value = 3053.8 Freq = 8.7951 (cycles/time)
2	Mode 2: Value = 3475.2 Freq = 9.3823 (cycles/time)
3	Mode 3: Value = 5721.3 Freq = 12.038 (cycles/time)
4	Mode 4: Value = 13409. Freq = 18.430 (cycles/time)
5	Mode 5: Value = 32222. Freq = 28.569 (cycles/time)
6	Mode 6: Value = 39112. Freq = 31.476 (cycles/time)
7	Mode 7: Value = 40391. Freq = 31.986 (cycles/time)
8	Mode 8: Value = 45244. Freq = 33.853 (cycles/time)
9	Mode 9: Value = 56802. Freq = 37.932 (cycles/time)
10	Mode 10: Value = 67612. Freq = 41.384 (cycles/time)

Kuva 25. Ominaistaajuustarkastelun tulokset kymmenelle alimmalle ominaistaajuudelle (Pentti 2016)

## 9.3.2 Esimerkki 2

Tehdään nyt esimerkin 1 lähtötiedoilla tarkastelu lattialle, jossa on aukko. Aukko mallintaa tässä tapauksessa porraskaukkoa. Lattian mitat ovat 5 m x 5 m, jossa tuet ovat kolmella pitkällä sivulla sekä kuvitellun portaan yläpäässä. Porraskaukon kohdalla lattian reunalla oleviin nurkkapisteisiin on asetettu myös pistemäiset tuet kuvaamaan pilareita. Tarkastelun tulos on nähtävillä kuvassa 26.



Kuva 26. Aukollisen lattian ominaistajuustarkastelu (Pentti 2016)

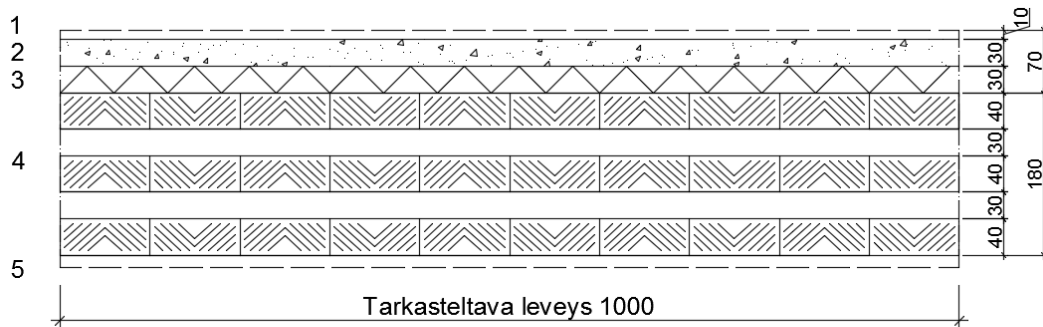
Kuvasta 26 voidaan huomata, että kyseisen lattian ominaistajuudeksi saadaan noin 18 Hz.

Tämän esimerkin mukaisten lattioiden ominaistajuutta on hyvin vaikea, ellei jopa mahdotonta tarkastella käsin laskemalla. Abaqus-ohjelma suorittaa kuitenkin tarkastelun kohtuullisen helposti. Voidaan myös todeta, että yhden lyhyenkin tuen lisääminen lähelle laatan keskustaa nostaa lattian ominaistajuutta huomattavasti. Lattian ominaistajuus kohoaa yksinkertaisesti siitä syystä, että keskituen lisääminen lyhentää värähtelevän rakenteen pituutta.

## 10 MATALATAAJUUKSISEN CLT-LATTIAN TOIMIVUUDEN ARVIOINTI

### 10.1 Analysoinnin lähtötiedot

Kuvataan tässä aluvussa pääpiirteissään arvioinnin pohjalla olleet lähtötiedot. Kuvassa 27 on poikkileikkaus Olamentin yleisimmin käyttämästä lattiarakenteesta. Sen perusteella voitiin määritellä analysoinnissa oleva omapainon alue.



- 1 Pintamateriaali 10 mm, yleensä joko laminaatti tai parketti, noin 10 kg/m<sup>2</sup>
- 2 Lattiavalu 30 mm, 75 kg/m<sup>2</sup>
- 3 Kingspan polyuretaanilevy 30 mm, 1,1 kg/m<sup>2</sup>
- 4 CLT 180 L11, 90 kg/m<sup>2</sup>
- 5 Tekniikka ja alakatto (tekniikka, 1 kg/m<sup>2</sup>, koolaus 48x48 k300, 2 kg/m<sup>2</sup>, kipsilevy 13mm, 9 kg/m<sup>2</sup>), yhteensä 12 kg/m<sup>2</sup>

Kuva 27. Olament Oy:n käyttämän yleisimmän lattiarakenteen poikkileikkaus ja rakenteiden painot (Pentti 2016)

Analysoinnissa oli mukana kaikki CrossLam Kuhmon CLT-levytyypit, joiden poikkileikkaustiedot on kuvattu taulukossa 6.

Taulukko 6. CrossLam Kuhmon CLT-levyjen poikkileikkausten mitat (CrossLam Kuhmo Oy:n verkkosivut)

L Panel		1	2	3	4	5	6	7
nr.	paksuus mm	L	C	L	C	L	C	L
L1	60	20	20	20				
L2	80	30	20	30				
L3	100	40	20	40				
L4	90	30	30	30				
L5	100	30	40	30				
L6	120	40	40	40				
L65	140	50	40	50				
L7	160	60	40	60				
L8	100	20	20	20	20	20		
L9	130	30	20	30	20	30		
L10	160	40	20	40	20	40		
L11	180	40	30	40	30	40		
L12	200	40	40	40	40	40		
L13	140	20	20	20	20	20	20	20
L14	180	30	20	30	20	30	20	30
L15	220	40	20	40	20	40	20	40
L16	260	50	20	50	20	50	20	50
L17	300	60	20	60	20	60	20	60

Näin ollen voitiin muodostaa seuraavanlainen yhteenveto analysoinnissa lähtötietoina olleista seikoista:

- käyttöluokka 1
- luotettavuusluokka RC2
- lattian reunoilla olevien tukien lukumäärä: 2 tai 4
- pysyväkuorma:  $0,4\text{--}1,6\text{ kN/m}^2$  ( $0,4\text{ kN/m}^2$  porrastuksella)
- hyötykuorma:  $2\text{ kN/m}^2$
- jänneväli: 3–10 m (0,5 m porrastuksella)
- lattian leveys: 3–10 m (0,5 m porrastuksella)
- lattia-ateriaalina Crosslamin CLT-levy, levytyypit L6–L17
- CLT:n omapaino  $500\text{ kg/m}^3$
- käyttöasterajat:
  - taivutuskestävyydelle 95 %
  - leikkauskestävyydelle 95 %
  - taipumalle 95 %
- värähtelymitoituksessa käytetyt parametrit:
  - kävelijän paino P: 800N
  - vaimennuskerroin: 0,03

## 10.2 Excel-laskentaohjelman toteutus

### 10.2.1 Taustaselvityksiä

Jotta laskentaohjelman laatiminen onnistuisi, täytyy olla tiedossa laskennassa tarvittavat kaavat, laskennan lähtötiedot sekä jokin valmis esimerkki, johon saatuja tuloksia voidaan verrata. Aluksi on hyvä tehdä laskentaohjelma yleistetyt esimerkin pohjalta ja sen jälkeen tarkentaa laskentaohjelmaa vastaamaan oman analysoinnin tarpeita.

Aluksi perehdyin välipohjien laskentamenetelmiin ja siihen liittyviin esimerkkeihin. Huomasin jo alkuvaiheessa, että välipohjien poikkileikkauksien ominaisuudet poikkeavat hyvin paljon toisistaan levykohtaisesti ja jokaisella levyllä on niihin liittyvät yksilölliset arvonsa. Siitä syystä päätin aivan ensiksi opetella poikkileikkauksien ominaisuuksien laskennan. Samalla päätin taulukoida kaikki arvot omalle välilehdelle Excel-laskentaohjelmaan, joita käytin hyväkseni työn edetessä (taulukko 7).

Taulukko 7. Ote Excel-pohjaisesta ominaisuustaulukosta (Pentti 2016)

CROSSLAMIN LEVYT												***Lam ellena ufbau								
Tuote	C-LEVYT	Nimellinen paksuus	Tuote	Kerrokset	L	C	L	C	L	C	L									
L1		60	L1	3	20	20	20											11500	690	65
L2		80	L2	3	30	20	30											11500	690	65
L3		100	L3	3	40	20	40											11500	690	65
L4		90	L4	3	30	30	30											11500	690	65
L5		100	L5	3	30	40	30											11500	690	65
L6		120	L6	3	40	40	40											11500	690	65
L6S		140	L6S	3	50	40	50											11500	690	65
L7		160	L7	3	60	40	60											11500	690	65
L8		100	L8	5	20	20	20	20	20									11500	690	65
L9		130	L9	5	30	20	30	20	30									11500	690	65
L10		160	L10	5	40	20	40	20	40									11500	690	65
L11		180	L11	5	40	30	40	30	40									11500	690	65
L12		200	L12	5	40	40	40	40	40									11500	690	65
L13		140	L13	7	20	20	20	20	20	20	20							11500	690	65
L14		160	L14	7	30	20	30	20	30	20	30	20	20					11500	690	65
L15		220	L15	7	40	20	40	20	40	20	40	20	40					11500	690	65
L16		260	L16	7	50	20	50	20	50	20	50	20	50					11500	690	65
L17		300	L17	7	60	20	60	20	60	20	60	20	60					11500	690	65

Kun työ eteni, päätin laskea ja koota ainoastaan CrossLam Kuhmon levyjen tuoteominaisuudet taulukkoon, koska Stora Enso käyttää poikkileikkauksominaisuuksien laskemiseen eri teoriaa, jolloin laskentatyö olisi paisunut liian suureksi. Lisäksi totesin, että CrossLam Kuhmon levytyypit edustavat ominaisuuksiltaan tarpeeksi kattavasti tämän opinnäytetyön tavoitteita.

CrossLam Kuhmon nettisivuilta löytyi yksi esimerkki 5-kerroksisen CLT-levyn laskentaan, jota soveltamalla voitiin laskea 3- ja 5-kerroksisten levyjen poikkileikkauksominaisuudet. CrossLam Kuhmon tuotevalikoimasta löytyy lisäksi 7-kerroksisia levyjä, joiden ominaisuuksien laskentaan täytyi löytää muita lähteitä. Niiden laskentaan soveltui parhaiten internetissä oleva CLT-käsikirja (Gagnon & Pirvu 2011, 33–39). Kyseiseltä sivulta löysin tarvitsemäni tiedon 7-kerroksistenkin levyjen laskentaan.

CLT-levyjen poikkileikkauksominaisuusarvojen tarkastamiseen hyödynsin Stora Enson kehittämää CLT-mitoitusohjelmaa sekä AutoCadin massprop-komentoa. CLT-mitoitusohjelman tuloksia vertasin karkealla tasolla laskemiini arvoihin, johtuen Stora Enso käyttämän laskentateorian eroista CrossLam Kuhmon käyttämään laskentateoriaan. AutoCad-ohjelmastakin saamani jäyhyysmomentin arvot olivat käsin laskettuja arvoja suurempia siitä syystä, että AutoCad ei huomio poikittaislamellien aiheuttamaa jäyhyysmomenttia pienentävää liukumaa. Siksi vertasin jäyhyysmomentin arvoja AutoCad-

ohjelman arvoihin vain suuruusluokaltaan. Kaikkiaan oli hyvä, että oli useita eri tapoja tarkastaa poikkileikkausominaisuuksien arvot, jolloin laskujen luotettavuus parani huomattavasti.

### 10.2.2 Laskentaohjelman suunnittelu

Lopullisena tavoitteenani oli analysoida kaikkia eri CLT-levytyyppejä yksiaukkoisena, kahdelta -ja neljältä reunalta tuettunalevynä, samoilla jänneväli- ja kuorma-alueilla sekä saada lopulta tuloksina levyille ominaistajuudet ja värähtelyluokat. Lähtökohtana kuitenkin oli, että laskelmat eivät kohdistu johonkin tunnettuun rakennuksen pohjaratkaisuun, vaan niiden tulee olla ns. yleispäteviä. Nämä taustatiedot toimivat laskentaohjelman suunnittelun lähtötietoina. Värähtelyluokkien A–D määrittämisessä käytettiin ainoastaan kiihtyvyysehtoa, koska se on merkityksellisin. Siten lattian paikallisen kallistuman ehtoa ei tarkasteltu ollenkaan. Menetelmä todettiin käyttökelpoiseksi erikoistutkija Asko Taljan, VTT, kanssa käymäni sähköpostikeskustelun pohjalta. (CLT-lattian värähtelytutkimukset 2016-27-01.)

### 10.2.3 Laskentaohjelman toteutus

Päätin toteuttaa laskentaohjelman samaan Excel-laskentaohjelmaan, johon aiemmin olin jo yhdelle välilehdelle koonnut CLT-levyjen materiaali- ja jäykkyysominaisuudet. Se mahdollisti CLT-levyjen ominaisuuksien hyödyntämisen laskentaohjelmassa.

Jaottelin laskentaohjelman neljään eri välilehteen, jotka nimesin seuraavasti:

1. ominaisuustaulukko
2. kuormat
3. kestävyyslaskenta
4. värähtelyn analysointi.

Lähtökohtana oleva tieto siitä, että laskennassa tulisi ottaa huomioon useita eri kuormitustapauksia, johti siihen, että laskentaohjelmasta ja taulukoista muodostui matriisityyppisiä. Kuormitusvaihtoehtoja täytyi olla riittävän laaja otanta, jotta analyyseistä saatavat tulokset olisivat tarpeeksi kattavia. Koska Olamentin kohteiden yleisin lattiarakenne on kuvan 27 mukainen, jossa lattiarakenteen omapaino on 1 kN/m<sup>2</sup>, oli järkevää ottaa kattavamman tuloksen takaamiseksi laskentaan mukaan myös vaihtoehtoisia lattioita, joiden omapainot ovat tätä enemmän ja vähemmän. Laskentaa varten täytyi ensin laatia taulukko, joka laskee varmuuskertoimilla korotetut kuormat halutulle kuormitusvälille. Valitsin omapainon vaihtoehtoiksi arvoja väliltä 0,4–1,6 kN/m<sup>2</sup> ja hyötykuormaksi valitsin 2 kN/m<sup>2</sup>, koska se on standardien mukainen asuinrakennuksen hyötykuorma (taulukko 8).

Taulukko 8. Analysoinnissa käytettävä kuorma-alue (Pentti 2016)

CLT:n omapaino:	80	kg/m
		<b>Muuttuvakuorma kN/m</b>
<b>Pysyvä kuorma kN/m</b>		<b>2</b>
0,4	1,2	4,4
0,6	1,4	4,6
0,8	1,6	4,8
1	1,8	5,1
1,2	2,0	5,3
1,4	2,2	5,5
1,6	2,4	5,7

Kun kuormat-välilehti valmistui, aloitin kestävyyslaskenta välilehden laatimisen. Aluksi oli luotava kenttä, joissa voidaan valita tarvittavat lähtötiedot. Tämä osio taulukosta tarkentui sen mukaan, kun uusia lähtötietoja oli annettava (taulukko 9).

Taulukko 9. Lähtötietotaulukko (Pentti 2016)

<b>Lähtötiedot</b>	
CLT-levyn tyyppi	L10
Jänneväli	5 m
Levyn leveys B	2,4 m
Lattian leveys	5 m
Huoneen suurin mitta	5 m
Luotettavuusluokka	RC2

Seuraavaksi täytyi luoda laskentataulukko, jolla voidaan laskea määriteltyä kuorma-aluetta, jänneväliä ja levytyyppiä vastaavat momentit  $M_{y,d}$  ja niitä vastaavat jännitykset  $\sigma$ . Samaa taulukkopohjaa hyödyntäen laadin laskentataulukon, jolla voidaan laskea lähtötietojen pohjalta taivutuskestävyys ja sen pohjalta käyttöasteet (taulukko 10).

Taulukko 10. Taivutuskestävyyden käyttöasteet laskeva laskentataulukko (Pentti 2016)

Käyttöasteet	Muuttuvakuorma kN/m
Pysyvä kuorma kN/m	2
1,18	20 %
1,38	21 %
1,58	22 %
1,78	23 %
1,98	24 %
2,18	25 %
2,38	26 %

Samaan tyyliin laadin laskentataulukot, joilla voidaan laskea lähtötietojen perusteella leikkauskestävyys niin liimasaumoissa 1,2 ja 3 kuin neutraaliakselillakin.

Oli luotava myös laskentataulukko, jossa lasketaan taipuma  $W_{inst}$  ja  $W_{net,fin}$ . Niitä verrattiin taipuman sallittuihin rajoihin, joista saattiin edelleen laskettua taipuman arvoja vastaavat käyttöasteet (taulukko 11).

Taulukko 11. Taipumaa  $W_{net,fin}$  vastaavat käyttöasteet (Pentti 2016)

		Muuttuvakuorma kN/m
Taipuma $W_{net,fin}$		2
Pysyvä kuorma kN/m		4,90
1,18	2,90	68 %
1,38	3,39	73 %
1,58	3,88	78 %
1,78	4,37	84 %
1,98	4,86	89 %
2,18	5,35	94 %
2,38	5,84	100 %

Seuraavaksi laadin laskentataulukon, jossa lasketaan lähtötietojen perusteella lattian alin ominaistajuus, korkeataajuuksisen lattian hetkellinen taipuma ja matalataajuuksisen lattian kiihtyvyys (taulukko 12).

Taulukko 12. Värähtelymitoituksen eri vaiheiden laskeminen (Pentti 2016)

Värähtelymitoitus	Lattian ominaistajuus	Korkeataajuuslattian hetkellinen taipuma	Matalataajuuslattian kiihtyvyys:
Omapaino	$f_1$ [Hz]	$\delta$ [mm]	$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]
1,18	9,32	0,37	
1,38	8,75	Siirry eteenpäin-->	0,169
1,58	8,27	Siirry eteenpäin-->	0,179
1,78	7,86	Siirry eteenpäin-->	0,186
1,98	7,51	Siirry eteenpäin-->	0,192
2,18	7,20	Siirry eteenpäin-->	0,197
2,38	6,93	Siirry eteenpäin-->	0,201

Kun laskenta välilehdellä olevien taulukoiden luotettavuus oli testattu, ryhdyin tekemään värähtelyn analysointi -välilehdelle laskentataulukkoita, joiden perusteella eri tapauksia on mahdollista analysoida.

Ennen analysointia, on määritettävä reunaehdot. Tässä työssä reunaehtoina käytettiin kaikille käyttöasteille 95 %:n rajaa, jotta tuloksiin saataisiin lisävarmuutta lujusteknisen kestävyysosalta. Matalataajuuslattian alimpana ominaistajuutena käytettiin 3 Hz ja ylimpänä ominaistajuutena 9 Hz (taulukko 13).

Taulukko 13. Analysointia edeltävät reunaehtoasetukset (Pentti 2016)

			Reunaehdot	
käyttöasterajat				
taivutuskestävyys	leikkauskestävyys	taipuma	Matalataajuuslattian alin ominaistajuus [Hz]	Matalataajuuslattian ylin ominaistajuus [Hz]
95 %	95 %	95 %	3,0	9,0

Reunaehtoien jälkeen laskentaohjelma tarkastelee, että läpäiseekö valitun levytyypin ominaisuudet tarkastelussa olevilla äärimitoilla ja kuorma-alueella kaikki asetetut reunaehtoien mukaiset käyttöasterajat (taulukko 14).

Taulukko 14. Laskentataulukko, joka tarkastaa kaikkien reunaehtoien toteutumisen (Pentti 2016)

Kuorma-alue	Hyötykuorma
<b>Omapaino</b>	<b>2</b>
<b>1,18</b>	KÄYTTÖASTE OK
<b>1,38</b>	KÄYTTÖASTE OK
<b>1,58</b>	KÄYTTÖASTE OK
<b>1,78</b>	KÄYTTÖASTE OK
<b>1,98</b>	KÄYTTÖASTE OK
<b>2,18</b>	KÄYTTÖASTE OK
<b>2,38</b>	Taipuma Wnet,fin ei ok

Mikäli yksikin reunaehto tulee laskennassa ylityksi, laskentaohjelma hylkää kyseisen alueen, eikä ota sitä värähtelyn analysoinnissa huomioon. Tällainen laskentatapa johtuu siitä, että kestävyys- ja taipumatarkastelu tehdään aina ennen värähtelymitoitusta.

Jos analysointiin valittu levytyyppi on täyttänyt valituilla lähtötiedoilla kaikki reunaehtojen vaatimukset tähän saakka, sille tehdään ominaistajuustarkastelu. Mikäli ominaistajuus on yli 9 Hz:ä, laskentataulukko antaa tulokseksi "korkeataajuuksinen", mutta mikäli taajuus on alle 9 Hz:ä ja kuitenkin yli 3 Hz:ä, niin laskentataulukko antaa vastaukseksi ominaistajuutta vastaavan lukuarvon. Jos taulukko antaa vastauksen "ei kestä aiemmin", se tarkoittaa, että CLT-levyn lujuusteknisen kestävyyskäytösteraja on ylittynyt. Laskentataulukko antaa lukuarvon ainoastaan matalataajuuksisille lattioille, koska tässä opinnäytetyössä oltiin kiinnostuneita analysoimaan matalataajuuksisten lattioiden värähtelyluokkia (taulukko 15). Taulukossa oleva sarake "hyötykuorma 0,3 kN/m<sup>2</sup>", tarkoittaa, että ominaistajuustarkastelussa lattialla on omapainon lisäksi vain 30 kg/m<sup>2</sup> hyötykuormaa.

Taulukko 15. Ominaisajuuksien koontitaulukko, jonka pohjalta voidaan tehdä värähtelyluokkianalysointia (Pentti 2016)

Ominaisajuus, jos alle 9Hz	Hyötykuorma 0,3 kN/m <sup>2</sup>
<b>Omapaino</b>	
<b>1,18</b>	<b>Korkeataajuuksinen</b>
<b>1,38</b>	<b>8,75</b>
<b>1,58</b>	<b>8,27</b>
<b>1,78</b>	<b>7,86</b>
<b>1,98</b>	<b>7,51</b>
<b>2,18</b>	<b>7,20</b>
<b>2,38</b>	<b>Ei kestä aiemmin</b>

Matalataajuuksisen lattian värähtelyluokan määrittelevä lattian kiihtyvyys täytyi laskea seuraavaksi jokaisen matalataajuuksisen ominaistajuuden pohjalta. Tulokset koottiin taulukkoon, josta jätettiin pois kaikki muut paitsi matalataajuuksiset tapaukset (taulukko 16). Taulukossa oleva sarake "hyötykuorma 0,3 kN/m<sup>2</sup>", tarkoittaa, että kiihtyvyydestarkastelussa lattialla on omapainon lisäksi vain 30 kg/m<sup>2</sup> hyötykuormaa.

Taulukko 16. Kiihtyvyydet taulukossa, joka ottaa huomioon vain matalataajuuksiset lattiat (Pentti 2016)

Kiihtyvyys [m/s <sup>2</sup> ]	Hyötykuorma 0,3 kN/m <sup>2</sup>
<b>Omapaino</b>	
<b>1,18</b>	<b>-</b>
<b>1,38</b>	<b>0,169</b>
<b>1,58</b>	<b>0,179</b>
<b>1,78</b>	<b>0,186</b>
<b>1,98</b>	<b>0,192</b>
<b>2,18</b>	<b>0,197</b>
<b>2,38</b>	<b>-</b>

Kun kiihtyvyydet oli laskettu, niiden perusteella voitiin määrittää kutakin kiihtyvyyttä vastaavat värähtelyluokat (taulukko 17).

Taulukko 17. Kiihtyvyyksiä vastaavat värähtelyluokat eri kuormitustapauksille (Pentti 2016)

Värähtelyluokka	Hyötykuorma 0,3 kN/m <sup>2</sup>
<b>Omapaino</b>	
<b>1,18</b>	-
<b>1,38</b>	E
<b>1,58</b>	E
<b>1,78</b>	E
<b>1,98</b>	E
<b>2,18</b>	E
<b>2,38</b>	-

Seuraavaksi tein laskentataulukon, joka laskee kutakin värähtelyluokkaa vastaavien tapausten lukumäärät värähtelyluokkataulukon pohjalta. Esimerkiksi taulukossa 17 näkyvät värähtelyluokka E:n tapaukset olisivat yhteenlaskettuna muodostaneet sarakkeeseen "E" luvun viisi. Luku viisi kuvaa, että kyseessä olevilla lähtötiedoilla tarkastelussa oleva lattia on viidessä tapauksessa seitsemästä matalataajuuksinen ja täyttää värähtelyluokka E:n kriteerit. Värähtelyluokka E:n tapauksia ei kuitenkaan huomioitu tämän opinnäytetyön tutkimuksessa, koska siihen luokkaan kuuluvien lattioiden kiihtyvyydet ovat liian suuria, ollakseen huomion arvoisia. Myöhemmin tätä laskentataulukkoa voitiin hyödyntää skenaarioiden tekemisessä (taulukko 18).

Taulukko 18. Laskentataulukko, joka laskee merkityksellisiä värähtelyluokkia vastaavien tapausten lukumäärän värähtelyluokittain (Pentti 2016)

Värähtelyluokkien lukumäärät			
D	C	B	A
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

### 10.3 Värähtelyn analysoiminen laskentaohjelman tulosten avulla

#### 10.3.1 Skenaario-työkalu

Koska analysointi täytyi tehdä niin suurelle joukolle eri variaatioita, oli helpointa käyttää Excelissä olevaa skenaario-työkalua. Se osoittautui erittäin hyödylliseksi työkaluksi, jonka avulla työ helpottui huomattavasti.

Tein skenaariotyökalulle kaikista mahdollisista lähtötietojen mukaisista eri jänneväli- ja leveysvaihtoehdoista skenaarion (taulukko 19). Ennen skenaarion toteuttamista työkalulle osoitettiin solut, joiden perusteella se kerää värähtelyluokkien lukumäärät. Sitten toteutin kaikki skenaariot jokaiselle levytyypille. Skenaariotyökalu ”ajoi” kaikki mahdolliset eri lattian äärimittojen tapaukset läpi ja tulosti raportin kaikista tuloksista uudelle välilehdelle. Jokaisesta raportista voi lukea eri skenaarioita vastaavien eri värähtelyluokkien tapausten lukumäärät. Koska tein saman analyysin jokaiselle levyille erikseen, niistä syntyi siten yhteensä 17 eri raporttia.

Taulukko 19. Skenaarioiden tyyppiesimerkki, tässä tapauksessa x:n arvot kuvaavat jännevälin arvoja ja y:n arvot kuvaavat lattian leveyden arvoja. (Pentti 2016)

<b>Skenaarion periaate</b>		
<b>nro</b>	<b>X:n arvot</b>	<b>Y:n arvot</b>
1	3	3
2	3	3,5
3	3	4
4	3	4,5
5	3	5
6	3,5	3
7	3,5	3,5
8	3,5	4
9	3,5	4,5
10	3,5	5

#### 10.3.2 Skenaarioraporttien yhdistäminen

Kun kaikille levytyypeille oli tehty skenaarioiden yhteenveto, täytyi suurta tietomäärää käsitellä helpommin luettavaan muotoon, jotta siitä sai tarvittavat tiedot helpommin esiin. Yhdistin kaikki yhteenvetoraportit samaan taulukkoon uudelle välilehdelle, osin kopioimalla ja osin käsin kirjoittamalla sekä tein niille tarvittavat toimenpiteet kuvioiden luomista varten. Taulukoiden tietojen perusteella tehtiin riittävän laajasti laskutoimituksia, joiden pohjalta kuviot luotiin. Kuvioista tarkemmin tulokset ja yhteenveto -luvussa.

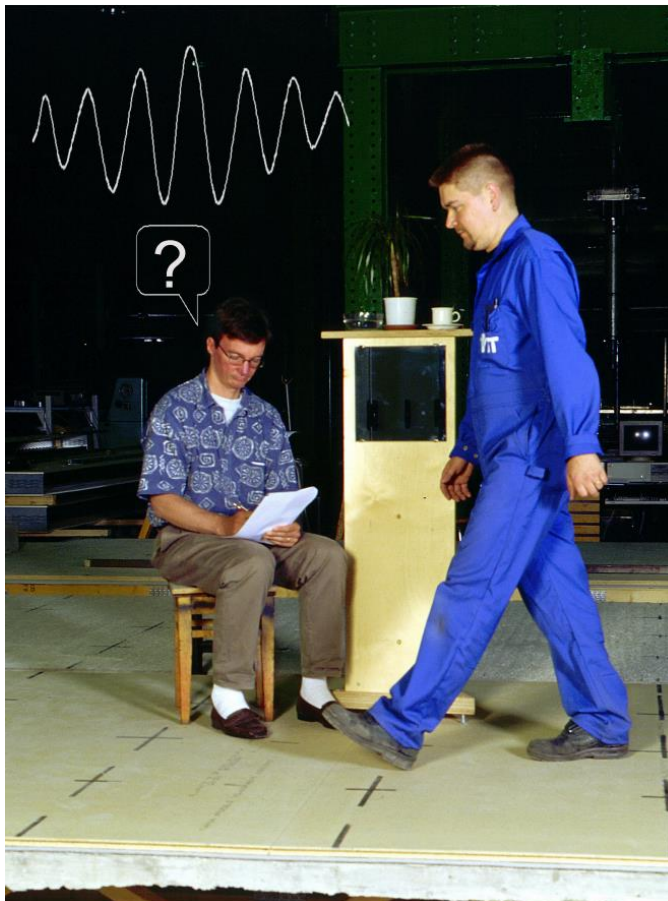
### 10.4 Lattian värähtelyn aistinvarainen arviointi

Uudentyyppisten lattioiden värähtelyä olisi syytä aina tutkia myös aistinvaraisesti, johtuen laskenta-menetelmiin liittyvistä useista eri epävarmuustekijöistä. Sitä varten on kehitelty menetelmä, jolla ihmisen kävelystä aiheutuvia värähtelyjä voidaan arvioida. Kyseistä menetelmää voidaan soveltaa niin

tuotekehityksessä oleville lattioille kuin myös valmiissa kohteissa oleville lattioille. Laboratorio-olosuhteissa tehtävät kokeet tulee tehdä siten, että tuentatapa ja tukirakenteet vastaavat mahdollisimman lähelle todellista tilannetta. (Talja ym. 2002, 29.)

#### 10.4.1 Aistinvaraisen arvioinnin menetelmät

Aistinvarainen arviointi suoritetaan vähintään kahden henkilön toimesta. Toinen henkilöistä istuu ja havainnoi lattian värähtelyä, kun toinen henkilöistä kävelee lattian päällä. Menetelmä on tällainen siitä syystä, että kävelevä henkilö ei itse pysty havainnoimaan lattian värähtelyn haitallisuutta. Värähtelyn lähteenä kokeessa on kävelevä henkilö, koska useimmiten värähtelyt aiheutuvat ihmisten liikkeistä ja menetelmä on laajasti hyväksytty arvioinnin perusteeksi. Kuvassa 28 on aistinvarainen arviointi käynnissä, jossa istuva henkilö tekee havaintoja lattian värähtelyn epämukavuudesta ja vie-reen asetetun telineen ja sen päällä olevien esineiden värähtelyn häiritsevyydestä. (Talja ym. 2002, 29–30.)



Kuva 28. Koetilanne lattian värähtelyn aistinvaraisesta havainnoinnista (Talja ym. 2002, 1)

#### 10.4.2 Havaintojen kirjaaminen taulukkoon

Suoritettaessa värähtelyn analysointia, havainnoijat kirjoittavat mielipiteensä lattian värähtelystä samalla, kun noin 80 kg:n painoinen henkilö kävelee etukäteen määriteltyä kävelylinjaa pitkin. Kävelijän nopeus täytyy olla myös sopiva, jotta sen perusteella voitaisiin tehdä tarpeeksi hyvä arvio värähtelystä. (Talja ym. 2002, 31.)

Taulukosta 20 voidaan nähdä havainnoijalla oleva arviointitaulukko, johon havainnoija kirjaa ylös omat mielipiteet lattian värähtelystä.

Taulukko 20. Havainnoija kirjaa mielipiteensä taulukkoon koehenkilön kävellessä lattialla. (Talja ym. 2002, 34)

### Kävelystä aiheutuva lattian värähtelyn arviointi

#### Värähtelyn voimakkuus

Värähtely on

- ei todettavissa (**Ei**)
- juuri todettavissa (**J**)
- selvästi todettavissa (**S**)
- voimakkaasti todettavissa (**V**)

#### Värähtelyn hyväksyttävyys

Soveltuuko lattia tehdyn havainnon suhteen uuden asunnon olohuoneen lattiaksi ?

- + kyllä      ++ epäilyksettä hyvä
- ei          -- epäilyksettä huono

Koe 1	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								
Kahvikupin kilinä								
Kasvin lehtien heiluminen								
Vedenpinnan väräily								
Lasin helinä								
Koe 2	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								
Kahvikupin kilinä								
Kasvin lehtien heiluminen								
Vedenpinnan väräily								
Lasin helinä								

Myös kävelijä itse voi tehdä värähtelystä havaintoja ja kirjata niitä ylös arviointilomakkeeseen taulukon 21 mukaisesti.

Taulukko 21. Lattian päällä kävelevä koehenkilö tekee myös omat havaintonsa lattian värähtelystä oheiseen arviointilomakkeeseen. (Talja ym. 2002, 34)

### Arviointi havainnoitsijan omasta kävelystä

Koe 1	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								
Koe 2	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								

#### 10.4.3 Lattian hyväksyttävyys

Suosituksena on, että vähintään viideltä havainnoijalta pyydetään asiantuntijamielipide lattian värähtelyn häiritsevyydestä. Kunkin havainnoijan tapauksessa kävelijä kävelee vähintään kolmesti havaintopisteen ohitse. Lopulta lattian hyväksyttävyys todetaan kaikkien havainnoijien mielipiteiden enemmistön perusteella. Vaikka tällainen kriteeri vaikuttaisi hieman löysältä, on huomioitava, että koetilanteessa havainnoidaan lattian huonointa kohtaa ja reipasta kävelyä. Koetilanteessa havainnoijat ovat myös tavallista kriittisempiä värähtelyille, kuin arkielämän tilanteissa. (Talja ym. 2002, 32–35.)

## 11 TULOKSET JA YHTEENVETO

### 11.1 Tulosten esitysmuoto

Lopputuloksena tässä opinnäytetyössä saatiin Excel-laskentaohjelman pohjalta kuvioita, jotka kuvaavat matalataajuuksisten CLT-lattioiden tyypillisiä piirteitä. Kuvioiden pohjalta voidaan tehdä alustavia johtopäätöksiä siitä, että onko taloudellisesti kannattavaa tehdä jatkotoimenpiteitä suunnitteluohjeiden muuttamiseksi mahdollistamaan matalataajuuksiset CLT-lattiat. Kannattavuusarvioissa on huomioitava kuitenkin se, että tässä opinnäytetyössä tutkitut tapaukset ovat yleistettyjä, eivätkä välttämättä kaikilta osin kuvaa aina todellisia tilanteita.

### 11.2 Laskentamenetelmien tarkkuudesta

On huomioitava tuloksia tarkasteltaessa, että laskentakaavat eivät aina vastaa käytännön tilanteita. Suositeltavin testausmenetelmä kävelyherätteelle on todellinen kävely, jossa kävelijänä on oikean painoinen henkilö (CLT-lattian värähtelytutkimukset 2016-27-01). Siksi laskennallisille arvoille olisi hyvä saada vertailupohjaa käytännön kävelyherätekokeista, mikäli tarkempaa tutkimusta pidetään tarpeellisena. Laskennallisten arvojen voidaan kuitenkin riittävällä tarkkuudella todeta kuvaavan värähtelyominaisuuksia, jotta alustavia johtopäätöksiä voidaan tehdä. Toisaalta CLT on hyvin erilainen materiaali muihin verrattuna sen ristiinliimauksen vuoksi, joten käytännön tutkimuksia olisi perusteltua tehdä.

### 11.3 Hyvän lattian vaatimukset

Jotta tuloksina saatuja kuvioita voitaisiin tulkita oikealla tavalla, on määriteltävä riittävän hyvän matalataajuuksisen lattian kriteerit. Taulukosta 2 voidaan havaita, että korkeataajuuksisen lattian taipumaraja 1kN:n pistekuormasta, 0,5 mm vastaa värähtelyluokkaa C. Sen perusteella voidaan asettaa matalataajuuksiselle lattialle kiihtyvyyksrajaksi  $0,075 \text{ m/s}^2$ , koska se vastaa värähtelyluokan C kiihtyvyysehtoa. Voidaan todeta, että värähtelyluokan C lattia täyttää riittävän hyvän asuinrakennuksen lattian kriteerin.

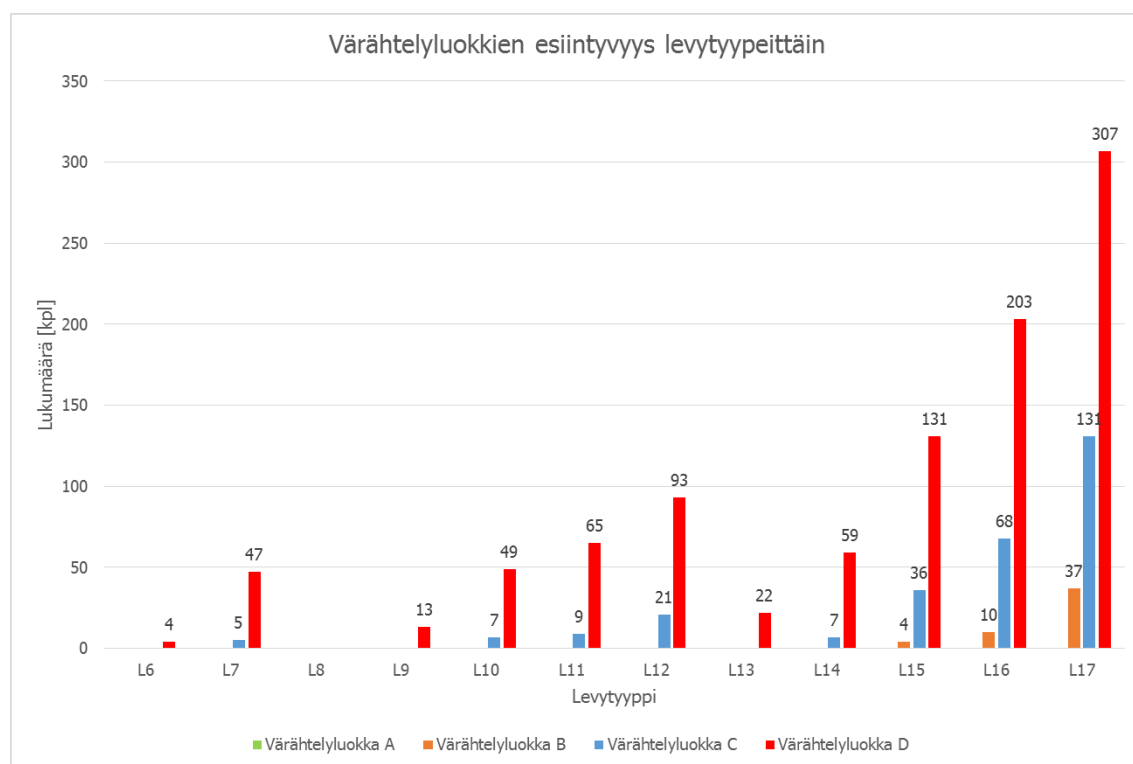
### 11.4 Edellytykset johtopäätösten tekemiseen

Kuvioiden pohjalta tehtävien johtopäätösten edellytyksenä on tietää kussakin kuviossa käsiteltyjen tapausten maksimi lukumäärät. Tapausten maksimi lukumäärillä tarkoitetaan kaikkia niitä eri lattiarakenteiden kombinaatioita, jotka muodostuivat huomioimalla kaikki järkevät eri mahdollisuudet lattian äärimitoille sekä lattian erilaisille kuormituksille. Maksimilukumäärä siis käsittää matalataajuuksisten tapausten lisäksi myös kaikki korkeataajuuksisten lattioiden ja lujuusteknisen kestävyys ylittäneiden tapausten lukumäärät. Kyseiset maksimilukumäärät mainitaan kuvioiden ohessa, silloin kun sillä on olennaista merkitystä johtopäätösten tekemiseen. Kaikkien tarkasteltujen tapausten maksimilukumäärä saadaan laskettua sen lähtötiedon perusteella, että lattian äärimittaa kasvatettiin portaittain 3 m:stä 10 m:iin, 0,5 metriä kerrallaan ja vastaavasti lattian omapaino vaihteli  $0,4 \text{ kN/m}^2$ :stä  $1,6 \text{ kN/m}^2$ :iin,  $0,2 \text{ kN/m}^2$  porrastuksella.

## 11.5 Kahdelta reunalta tuetut lattiat

### 11.5.1 Levytyyppikohtaiset tulokset

Pidin tarpeellisenä sitä, että skenaarioiden yhteenvetojen pohjalta saadaan tietoa eritellysti, levykohtaisesti, koska se helpottaa kokonaiskuvan muodostamista. Siksi laadin kuvion, jossa näkyvät kaikkien niiden levytyyppien osalta hyväksytyt tapaukset erikseen, joiden osalta matalataajuuksisia, värähtelyluokaltaan A–D lattioita ilmeni (kuvio 9). Kuviossa 9 esiintyvien termien, L6, L7 jne. selitykset ovat nähtävillä alaluvun 10.1 taulukossa 6, mutta selvyuden vuoksi kyseisten levytyyppien paksuudet on mainittu myös kuvion 9 kuvatekstissä.



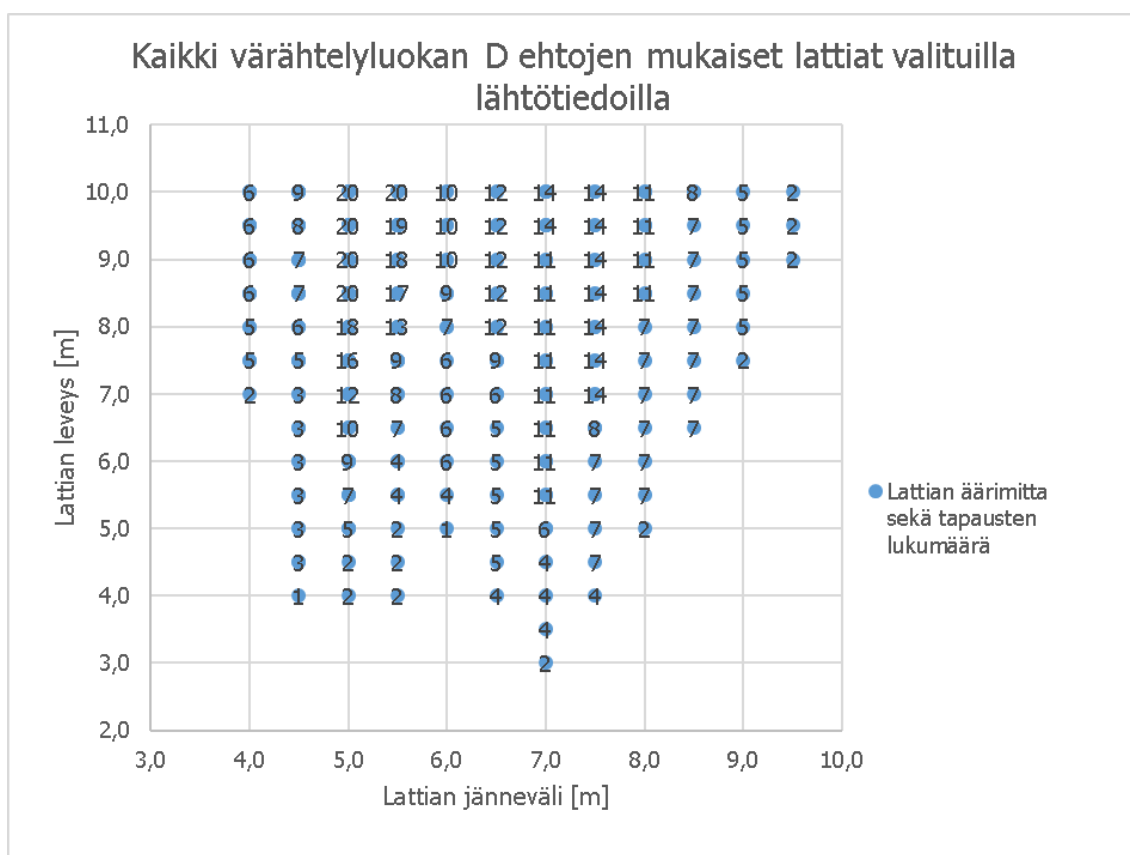
Kuvio 9. Matalataajuuksisten lattioiden värähtelyluokkien lukumäärät levytyyppikohtaisesti lattian ollessa kahdelta reunalta tuettu. Tässä kuviossa kaikkia mahdollisia eri kombinaatioita kullekin levytyypille kussakin värähtelyluokassa on yhteensä tarkastelussa olevilla lähtötiedoilla 1575 kappaletta. Levytyyppien paksuudet: L6 = 120 mm, L7 = 160 mm, L8 = 100 mm, L9 = 130 mm, L10 = 160 mm, L11 = 180 mm, L12 = 200 mm, L13 = 140 mm, L14 = 180 mm, L15 = 220 mm, L16 = 260 mm, L17 = 300 mm. (Pentti 2016)

Kuvion 9 pohjalta voidaan todeta, että suhteessa kombinaatioiden lukumäärään, hyviä matalataajuuksisia lattioita (värähtelyluokka C) ilmenee niukasti vielä kaikista paksuimpienkin levyjen kohdalla

### 11.5.2 Yhdistettyjen skenaarioiden tulokset

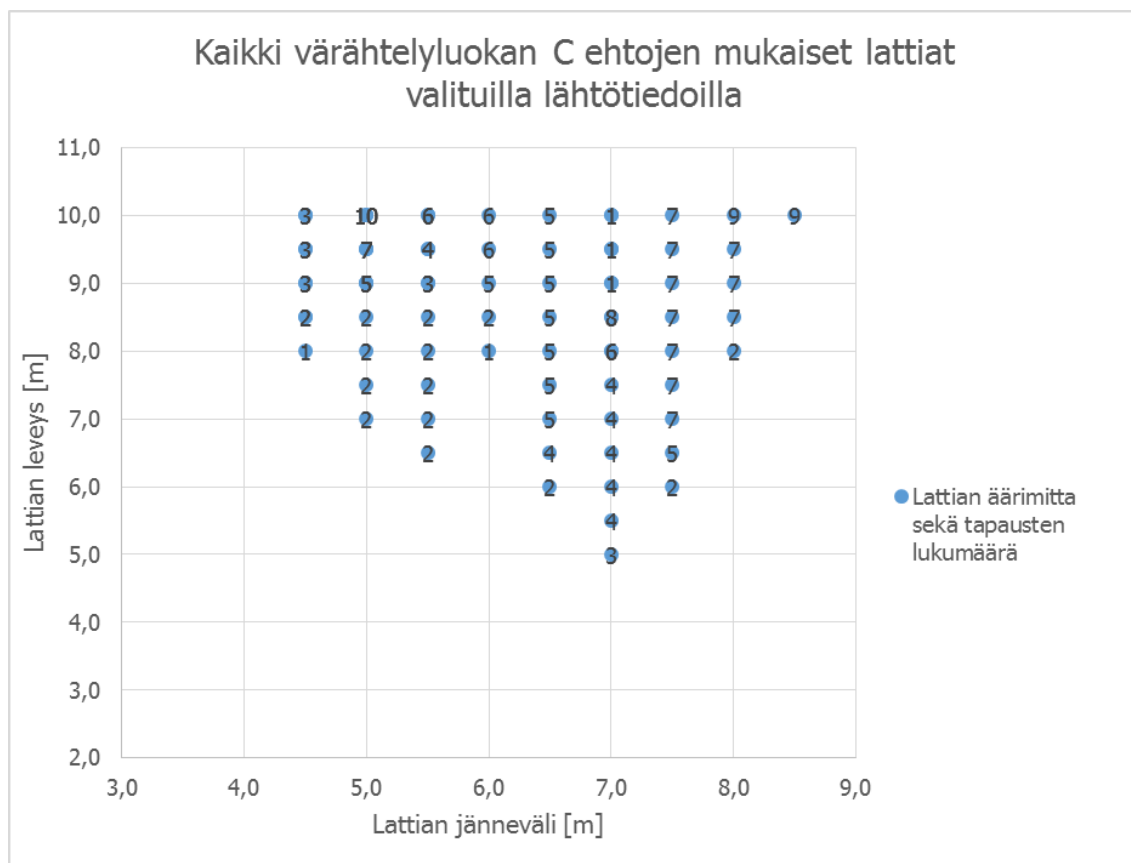
Parantaakseni kokonaiskuvan hahmottamista, yhdistin kaikkien skenaarioiden yhteenvetoreportit yhdeksi kokonaisuutta kuvaavaksi kuvioksi. Koska värähtelyluokkia ei ilmennyt A-luokassa, niin kuviota muodostui kolme kappaletta, B–D värähtelyluokista. Kyseiset kuviot kuvaavat sitä, kuinka monta matalataajuuksisen lattian tapausta täytti kyseessä olevan värähtelyluokan ehdot ja mitkä ovat

niissä tilanteissa lattioiden äärimitat. Kuvioista voidaan päätellä yleisimmät jänneväli-levyysuhteet, joilla matalataajuuksisia CLT-lattioita yleisimmin esiintyy (kuviot 10,11 ja 12).



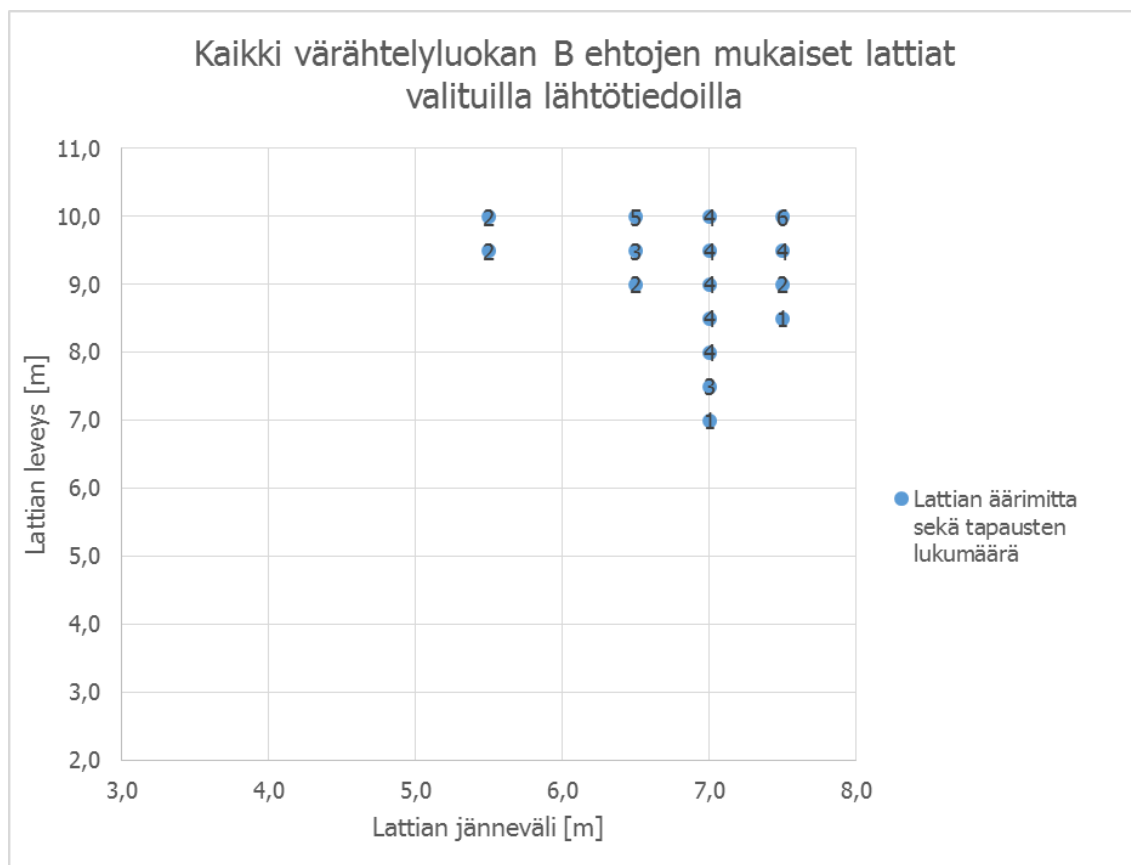
Kuvio 10. Värähtelyluokan D ehtojen mukaisten matalataajuuksisten lattioiden lukumäärät sekä lattioiden äärimitat lattioiden ollessa kahdelta reunalta tuettuja. Tässä kuviossa värähtelyluokkiin D kuuluvien eri lattioiden kombinaatioiden maksimilukumäärä kaikille L6–L17 levytyypeille yhteensä on 81900 kappaletta. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa äärimitoiltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuksisten värähtelyluokkaan D kuuluvien lattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)

Kuvion 10 perusteella toimivia värähtelyluokan D lattioita on huomattavasti enemmän, kuin kuviossa 11 esiintyviä toimivia värähtelyluokan C lattioita, mutta suhteessa kombinaatoiden lukumäärään, värähtelyluokan D tapauksiakin on hyvin vähän.



Kuvio 11. Värähtelyluokan C ehtojen mukaisten matalataajuuksisten lattioiden lukumäärät sekä lattioiden äärimitat lattioiden ollessa kahdelta reunalta tuettuja. Tässä kuviossa värähtelyluokkaan C kuuluvien eri lattioiden kombinaatioiden maksimilukumäärä kaikille L6–L17 levytyypeille yhteensä on 61425 kappaletta. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa äärimitoiltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuksisten värähtelyluokkaan C kuuluvien lattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)

Kuvion 11 perusteella voidaan havaita, että hyviä matalataajuuksisia lattioita ilmenee hyvin rajatulla äärimitta alueella.

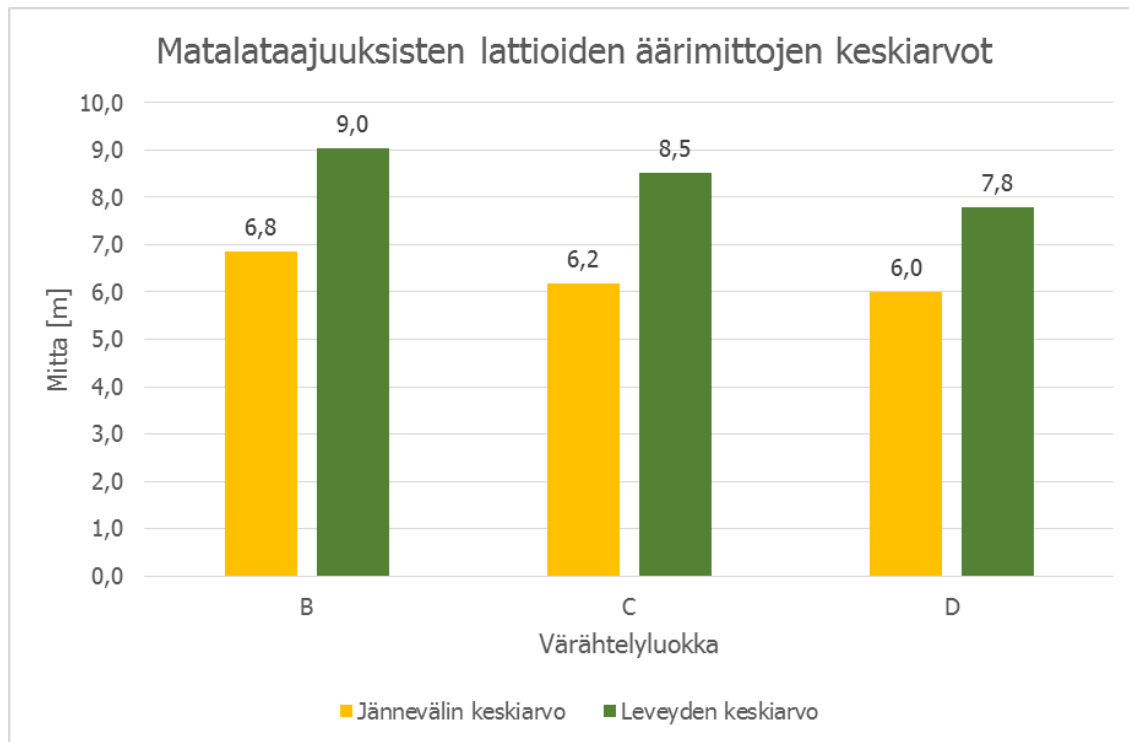


Kuvio 12. Värähtelyluokan B ehtojen mukaisten matalataajuuksisten lattioiden lukumäärät sekä lattioiden äärimittat lattioiden ollessa kahdelta reunalta tuettuja. Tässä kuviossa värähtelyluokkaan B kuuluvien eri lattioiden kombinaatioiden maksimilukumäärä kaikille L6–L17 levytyypeille yhteensä on 40950 kappaletta. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa äärimitoiltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuksisten värähtelyluokkaan B kuuluvien lattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)

Kuvioiden 10,11 ja 12 perusteella voidaan todeta, että mitä leveämpi lattia, sitä paremmat värähtelyominaisuudet, eli kiihtyvyydet ovat pienempiä. Lattian leveys vaikuttaa kiihtyvyyteen ja ominaistajuuteen sen tuoman suuremman massan takia. Koska leveällä lattialla massa on suurempi, sen ominaistajuus on pienempi, jolloin matalataajuuksisten lattioiden osuus kasvaa. Koska matalataajuuksisten lattioiden osuus kasvaa, on todennäköisempää, että lukumäärällisesti useampi lattia läpäisee kiihtyvyysehdoit. Kuvioiden 10,11 ja 12 tulkintaa täytyy tosin rajoittaa koskemaan vain niitä lattioita, jotka ovat puhtaasti kahdelta reunalta tuettuja.

### 11.5.3 Yhdistettyjen skenaarioiden keskiarvot

Laskin kaikkien toimivien matalataajuuslattioiden tapausten pohjalta sekä jännevälien että leveyksien keskiarvon. Keskiarvo osoittaa todennäköisimmät äärimitat lattioille värähtelyluokittain B:stä D:hen, joilla niiden ominaistajuudet täyttävät matalataajuuksisten lattioiden kriteeristön (kuvio 13).



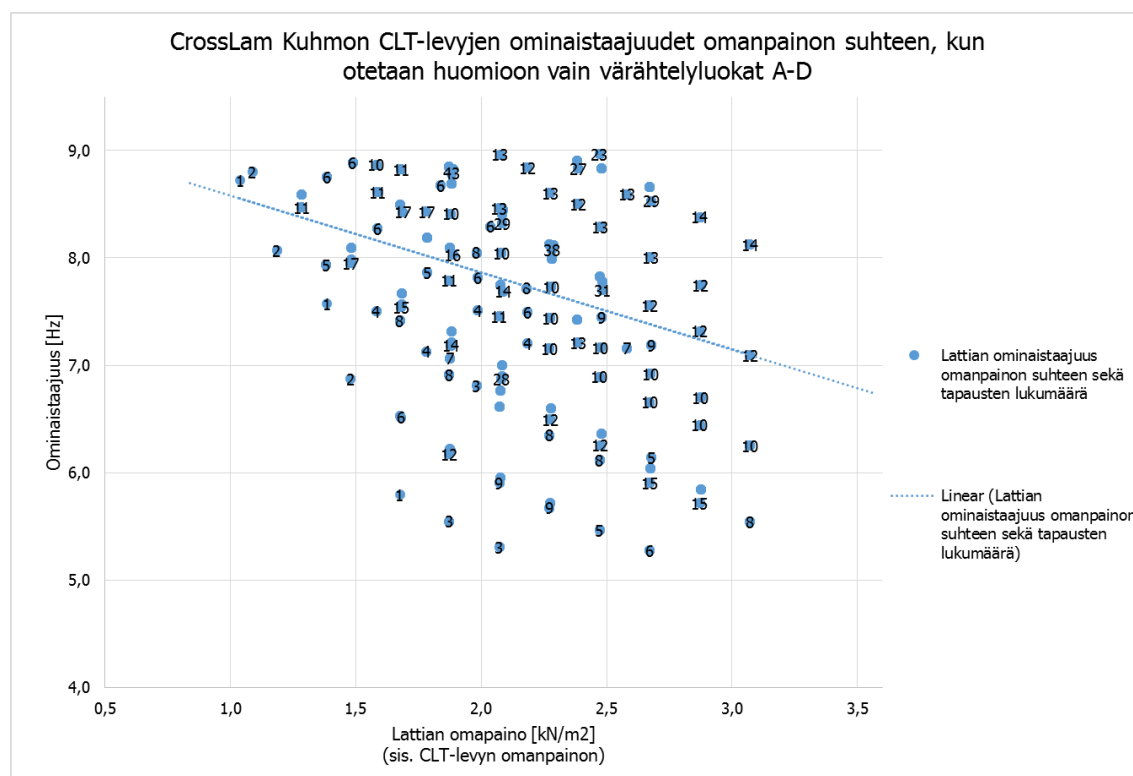
Kuvio 13. Kaikkien kahdelta reunalta tuettujen toimivien matalataajuuksisten lattioiden jännevälien ja leveyksien keskiarvot (Pentti 2016)

Kuviosta 4 voidaan nähdä, että mitä pidempi jänneväli, sitä herkemmin lattia on matalataajuuksinen ja toimiva. Kuvion 13 perusteella voidaan todeta, että tarkastelemani CLT-lattiat noudattavat juuri kyseistä periaatetta, jolloin pidemmät jännevälit johtavat parempiin värähtelyluokkiin. Pidempi jännevälisen lattian täytyy olla jäykempi, jotta se kestäisi lujuusteknisesti siihen kohdistuvan kuormituksen. Yleensä jäykempi lattia on myös raskaampi, joten nämä edellä mainitut seikat selittävät sen, miksi suurempi massa ja pidemmät jännevälit johtavat molemmat matalampiin ominaistajuuksiin.

Kaavasta 39,  $W = m * b_{eff} * l$ , voidaan havaita, että lattian pituus vaikuttaa lattian teholliseen massaan, jota käytetään kiihtyvyyden laskennassa. Mitä suurempi lattian pituus, sitä suurempi on lattian tehollinen massa. Kiihtyvyyden laskennassa käytetään kaavaa 38,  $a_{max} = \frac{R*P}{W*\zeta} * 0,83 * e^{-0,35*f_0}$ , josta havaitaan, että tehollinen massa on jakajana, jolloin suurempi tehollinen massa pienentää kiihtyvyyttä. Toisaalta kiihtyvyyden laskentakaavassa, 38, on myös terminä ominaistajuus, joka on potenssissa kerrottuna negatiivisella luvulla. Nopeasti pääteltynä tästä seuraisi se, että mitä pidempi jänneväli, sitä suurempi kiihtyvyys. Mutta, koska ominaistajuuden laskentakaavassa massa on rakenteelle vakio,  $m$  ja kiihtyvyyden laskentakaavassa lattian värähtelevän osan tehollinen massa,  $W$  on suoraan verrannollinen lattian pituuteen,  $l$ , niin pidempi jännevälisen lattian kiihtyvyys on pienempi jänneväliiltään lyhyempään lattiaan verrattuna.

## 11.5.4 Ominaistaajuuden esiintymisalue

Kaikkien skenaarioiden yhdistämisen jälkeen laadin kuvion, jonka pohjalta voidaan päätellä omanpainon suuruuden vaikutusta ominaistaajuuteen, kun kyseessä on CLT-lattia kelluvalla pintalaatalla. Kyseiseen kuvioon huomioin ainoastaan hyväksytysti värähtelyluokkien A–D läpäisseet tapaukset. Kuviossa näkyvät myös kutakin tapausta vastaavien, kaikki kriteerit läpäisseiden tapausten lukumäärät (kuvio 14).



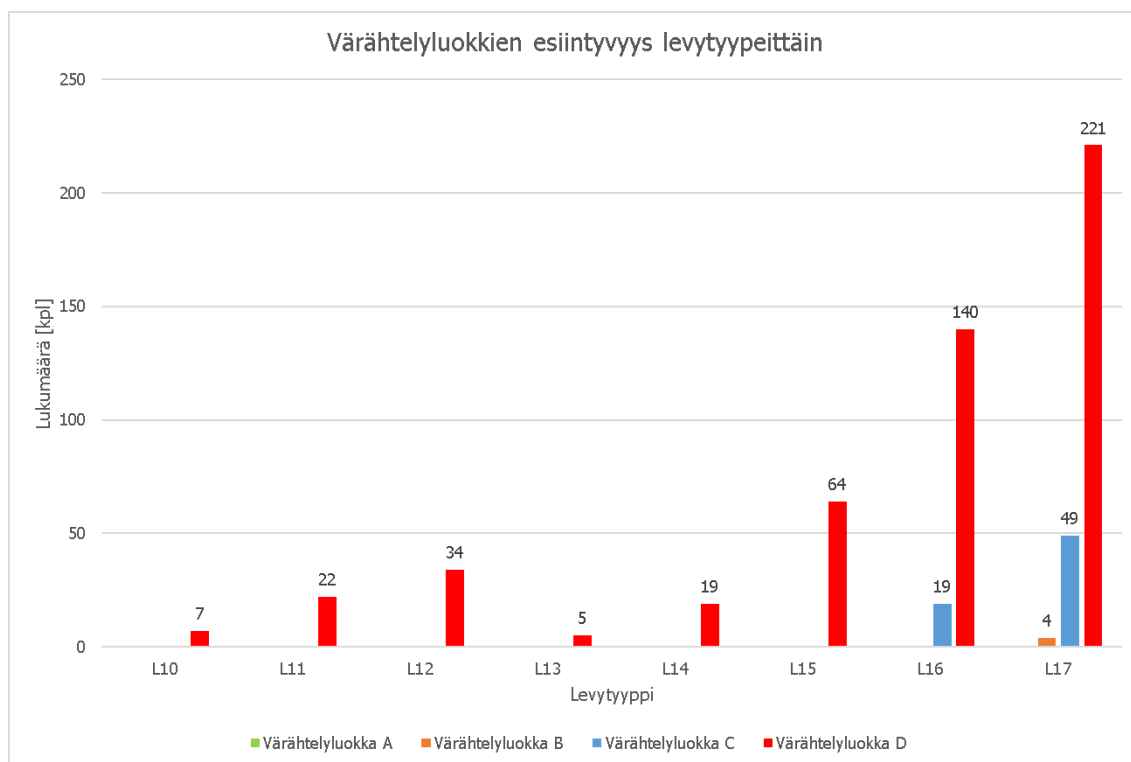
Kuvio 14. Ominaistaajuuden esiintymisalue omanpainon suhteen sekä tapausten lukumäärät kahdelta reunalta tuettujen lattioiden tapauksessa. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa omapainoltaan ja ominaistaajuudeltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuslattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)

Kuviosta 14 voidaan nähdä, että massan kasvaessa, lattian ominaistaajuus laskee ja päinvastoin. Sen voidaan todeta vahvistavan myös kuvion 4 periaatteen.

## 11.6 Neljältä reunalta tuetut lattiat

### 11.6.1 Levytyyppikohtaiset tulokset

Laadin kuvion, jossa näkyvät kaikkien niiden levytyyppien osalta hyväksytyt tapaukset erikseen, joiden osalta matalataajuuksisia, värähtelyluokaltaan A–D lattioita ilmeni. Kuviossa nähdään skenaarioissa ilmenneiden tapausten lukumääriä värähtelyluokkakohtaisesti (kuvio 15). Kuviossa 15 esiintyvien termien, L6, L7 jne. selitykset ovat nähtävillä alaluvun 10.1 taulukossa 6, mutta selvyden vuoksi kyseisten levytyyppien paksuudet on mainittu myös kuvion 15 kuvatekstissä.



Kuvio 15. Matalataajuuksisten lattioiden värähtelyluokkien lukumäärät levytyyppikohtaisesti lattian ollessa neljältä reunalta tuettu. Tässä kuviossa kaikkia mahdollisia eri kombinaatioita kullekin levytyypille kussakin värähtelyluokassa on yhteensä tarkastelussa olevilla lähtötiedoilla 1575 kappaletta. L6 = 120 mm, L7 = 160 mm, L8 = 100 mm, L9 = 130 mm, L10 = 160 mm, L11 = 180 mm, L12 = 200 mm, L13 = 140 mm, L14 = 180 mm, L15 = 220 mm, L16 = 260 mm, L17 = 300 mm. (Pentti 2016)

Kun verrataan kuvio 15 kuvioon 9, voidaan todeta, että lattian reunoille lisätyt kaksi tukea vähentävät CLT-rakenteisten toimivien matalataajuuksisten lattioiden lukumääriä. Kuviossa 9 todettiin olevan värähtelyluokan C tapauksia kahdelta reunalta tuetuissa lattioissa hyvin vähän, mutta kuitenkin enemmän, kuin kuvion 15, neljältä reunalta tuettujen lattioiden tapauksessa.

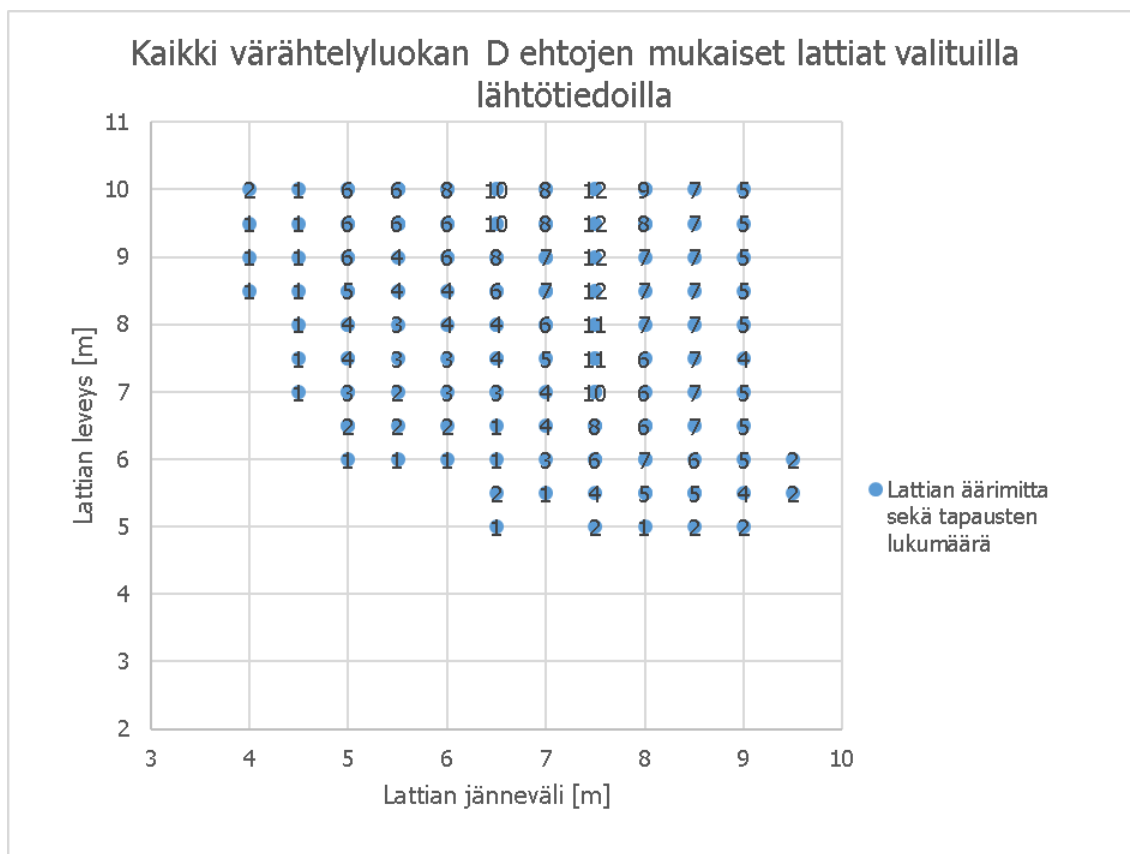
Neljältä reunalta tuetun lattian leveydestä saadaan enintään hyödyntää 2/3 lattian todellisesta leveydestä värähtelevää massaa laskiessa, mistä syystä lattian alin ominaistajuus on korkeampi (Talja & Toratti, 473). Lattian ominaistajuutta korottaa myös se, että CLT:n poikittainen jäykkyys voidaan

huomioida ominaistaajuutta laskiessa, kaava 41. Edellä mainitun perusteella voidaan todeta, että neljältä reunalta tuetun lattian tapauksessa ominaistaajuus kohoaa ja sen seurauksena matalataajuuksisten lattioiden esiintyminenkin vähenee. Siitä syystä luonnollisesti kaikkien värähtelyluokkien tapausten määrä putoaa.

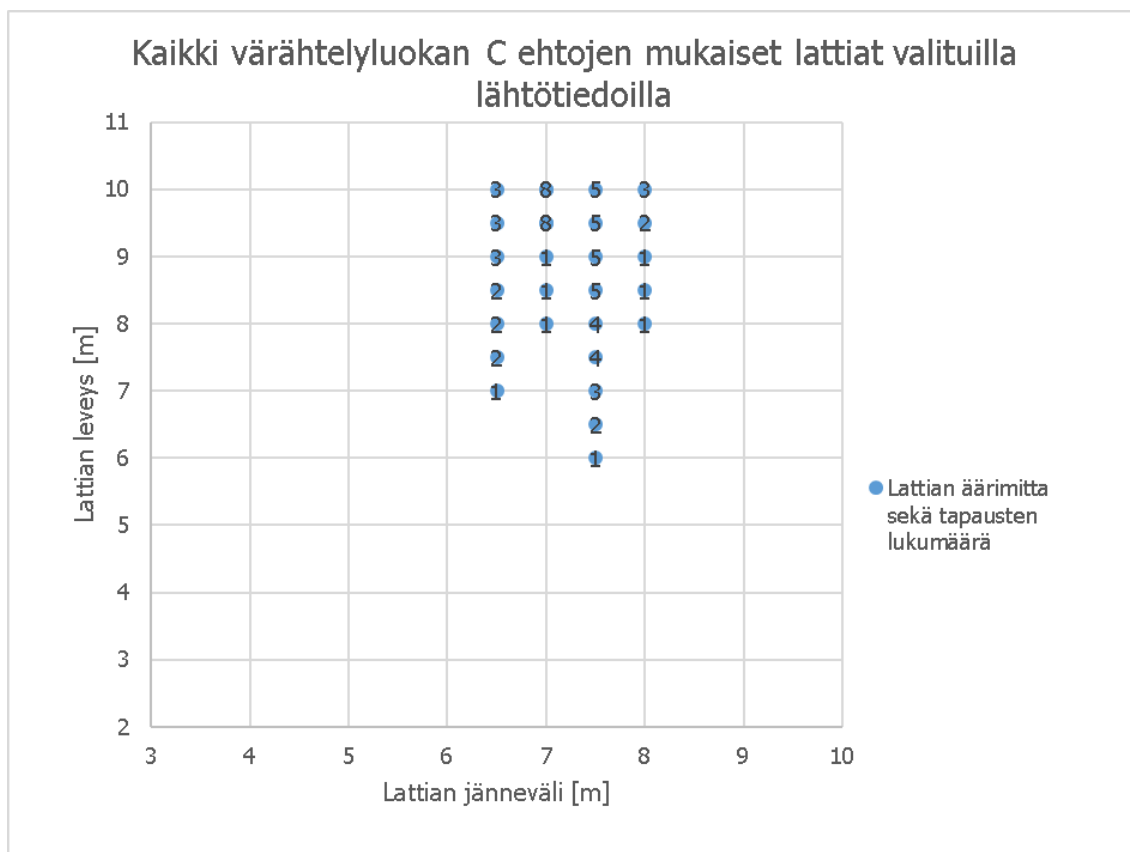
Jotta neljältä reunalta tuetun lattian ominaistaajuus saataisiin alemmas, täytyisi sen massaa kasvattaa ja mahdollisesti jänneväliä pidentää. Jänneväliä täytyisi kuitenkin pidentää kahdelta reunalta tuettuun lattiaan verrattuna suhteessa paljon enemmän, koska levyjen poikittainen jäykkyys voidaan ottaa laskennassa huomioon. Mutta CLT-levyn lujuustekninen kestävyys ylittyy jo paljon aiemmin, ennen kuin suotuisa paino- ja äärimitta-alue löytyy. Tämä asia osaltaan kyseenalaistaa entistä voimakkaammin puurakenteisten matalataajuuslattioiden tekemisen kannattavuuden Suomessa.

#### 11.6.2 Yhdistettyjen skenaarioiden tulokset

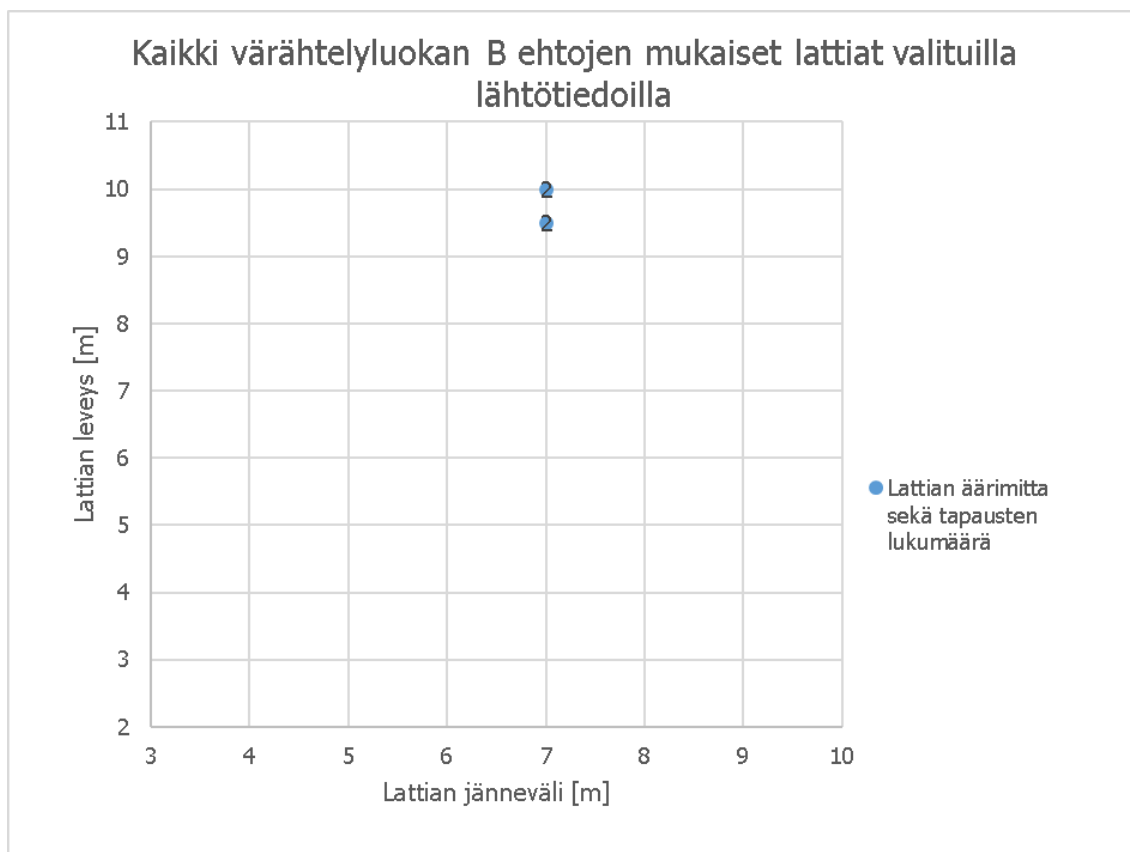
Kokonaiskuvan hahmottamisen helpottamiseksi, yhdistin myös neljältä reunalta tuettujen lattioiden kaikkien skenaarioiden yhteenvetoraportit yhdeksi kokonaisuutta kuvaavaksi kuvioksi, kuviot 16-18. Kyseiset kuviot kuvaavat sitä, kuinka monta matalataajuuksisen lattian tapausta täytti kyseessä olevan värähtelyluokan ehdot ja mitkä ovat niissä tilanteissa lattioiden äärimitat. Koska värähtelyluokkia ei ilmennyt A-luokassa, niin kuvioita muodostui kolme kappaletta, B–D värähtelyluokista. Kuvioista voidaan päätellä yleisimmät jänneväli-levyysuhteet, joilla matalataajuuksisia CLT-lattioita esiintyy (kuviot 16,17 ja 18).



Kuvio 16. Värähtelyluokan D ehtojen mukaisten matalataajuuksisten lattioiden lukumäärät sekä lattioiden äärimitat lattioiden ollessa neljältä reunalta tuettuja. Tässä kuviossa värähtelyluokkiin D kuuluvien eri lattioiden kombinaatioiden maksimilukumäärä kaikille L6–L17 levytyypeille yhteensä on 81900 kappaletta. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa äärimitoiltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuksisten värähtelyluokkaan D kuuluvien lattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)



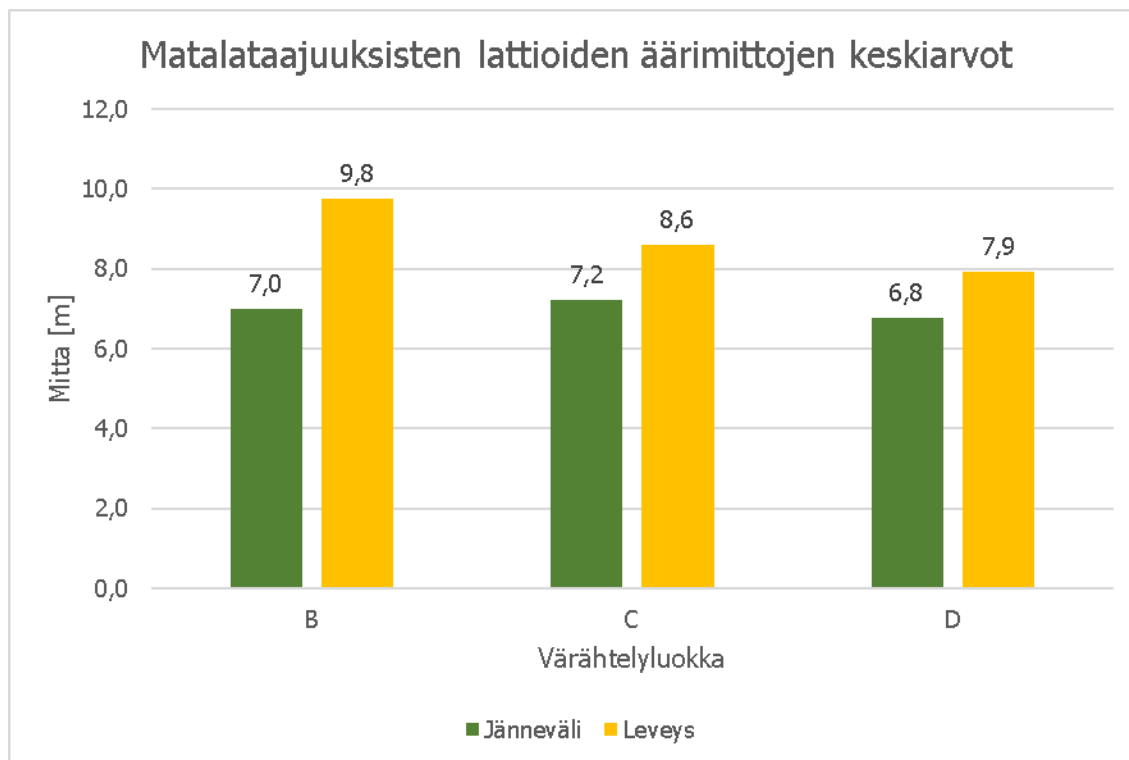
Kuvio 17. Värähtelyluokan C ehtojen mukaisten matalataajuuksisten lattioiden lukumäärät sekä lattioiden äärimitat lattioiden ollessa neljältä reunalta tuettuja. Tässä kuviossa värähtelyluokkaan C kuuluvien eri lattioiden kombinaatioiden maksimilukumäärä kaikille L6–L17 levytyypeille yhteensä on 61425 kappaletta. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa äärimitoiltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuksisten värähtelyluokkaan C kuuluvien lattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)



Kuvio 18. Värähtelyluokan B ehtojen mukaisten matalataajuuksisten lattioiden lukumäärät sekä lattioiden äärimitat lattioiden ollessa neljältä reunalta tuettuja. Tässä kuviossa värähtelyluokkaan B kuuluvien eri lattioiden kombinaatioiden maksimilukumäärä kaikille L6–L17 levytyypeille yhteensä on 40950 kappaletta. Selvennyksen vuoksi: kuvassa näkyvän sinisen pallon kohdalla oleva luku kuvaa äärimitoiltaan sen pisteen mukaisten matalataajuuksisten värähtelyluokkaan B kuuluvien lattioiden tapausten lukumäärää. (Pentti 2016)

### 11.6.3 Yhdistettyjen skenaarioiden keskiarvot

Laskin kaikkien toimivien matalataajuuslattioiden tapausten pohjalta sekä jännevälien että leveyksien keskiarvon. Keskiarvo osoittaa todennäköisimmät äärimitat lattioille värähtelyluokittain B:stä D:hen, joilla niiden ominaistajuudet täyttävät matalataajuuksisten lattioiden kriteeristön (kuvio 19).



Kuvio 19. Kaikkien neljältä reunalta tuettujen toimivien matalataajuuksisten lattioiden jännevälien ja leveyksien keskiarvot (Pentti 2016)

Niin ikään kuvio 19 vahvistaa myös kuvion 4 periaatteen, jonka mukaan pidemmät lattian äärimitat johtavat suuremmalla todennäköisyydellä matalataajuuksiseen lattiaan.

### 11.7 Johtopäätökset

Kombinaatioiden hyvin suuri lukumäärä suhteessa toimiviin matalataajuuksisiin lattioihin aiheutuu osittain siitä, että CLT-lattia on keveytensä takia hyvin herkästi korkeataajuuksinen ja osittain myös siitä, että CLT:n lujuustekninen kestävyys ei ole riittävä, jotta se kestäisi siihen kohdistuvat kuormat matalataajuuksisille lattoille tyypillisillä pitkillä jänneväleillä. Koska kombinaatioita on niin paljon enemmän suhteessa toimiviin matalataajuuksisiin lattioihin herää kysymys, että kannattaako CLT-lattioille jatkaa vastaavanlaisia tutkimuksia ja mahdollistaa matalataajuuksisten CLT-rakenteiden toteuttamista Suomessa. Kysymystä pohtiessa täytyy ottaa lisäksi huomioon se, että todellisuudessa asuinrakennuksissa on usein kohtuullisen tiheällä väliseiniä, jotka entisestään kohottavat lattian ominaistajuutta ja siten vähentävät matalataajuuksisten lattioiden määrää.

## 11.8 Pohdinta

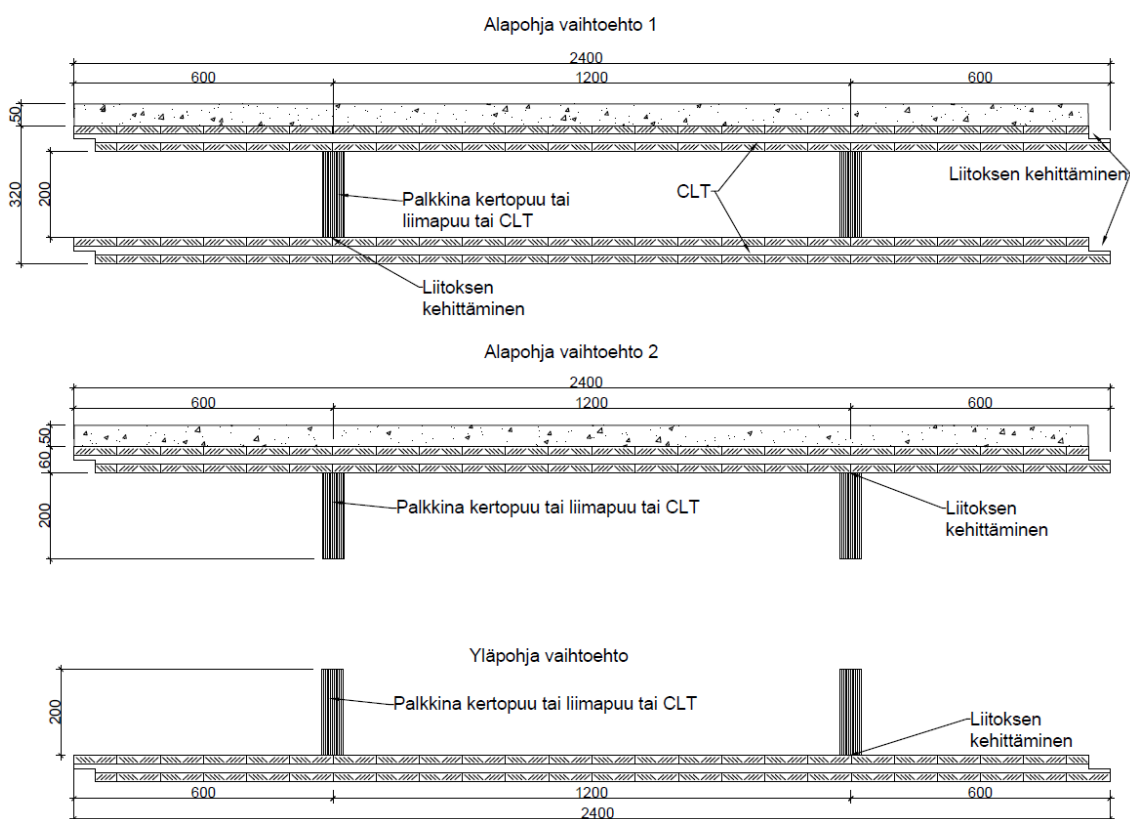
Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli saada johtopäätös siitä, että olisiko Suomessa järkevää mahdollistaa CLT-rakenteisten matalataajuuksisten lattioiden suunnittelu ja toteutus. Tämä tavoite täyttyi, koska tarvittavia johtopäätöksiä kyettiin tutkimuksen perusteella tekemään.

Tulevaisuudessa voisi tarkastella tämän työn mukaisia tapauksia käytännön kokeissa kuvan 28 mukaisella tavalla ja todeta niiden käyttäytymistä kävelyherätteen seurauksena. Erityyppisten lattioiden kiihtyvyyttä voisi mitata ja tehdä niiden pohjalta vertailua käsin laskuihin sekä saada sitä myöten kattavamman kuvan CLT-lattioiden värähtelyominaisuuksista.

Yksi vaihtoehto CLT-rakenteisen matalataajuuksisen lattian sijasta voisi olla matalataajuuksinen puu-betoni liittolaatta, jolle voisi tehdä vastaavanlaisen tutkimuksen. Liittorakenteessa voitaisiin mahdollisesti käyttää puupalkkeja, joiden päällä olisi CLT-laatta pintavalulla, jossa palkit, CLT (tai LVL) ja betoni muodostaisivat liittorakenteen. Silloin rakenteelle saataisiin lisää jäykkyyttä ja sitä myöten lisää pituutta. Pituuden lisäksi rakenteen massa kasvaisi, jotka molemmat osaltaan mahdollistaisivat toimivamman matalataajuuksisen lattian. Hahmottelemani tyyppiesimerkit liittorakenteista ovat nähtävillä kuvassa 29.

Vaikka tutkimuksessa saatiin kielteisiä johtopäätöksiä matalataajuuksisen CLT-rakenteen soveltuvuudesta asuinrakennuksen lattiaksi, voidaan olla tyytyväisiä siihen, että uusia tutkimussuuntia saatiin luotua ja joitakin tutkimussuuntia voitiin karsia.

(Kuvissa olevat mitat ovat ohjeellisia.)



Kuva 29. Tyyppiesimerkit uudenlaisten puu-betoni-liittorakenteiden vaihtoehtoista (Pentti 2016)

## LÄHTEET

- 3ds.com. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-15] Saatavissa <http://www.3ds.com/>  
Polku: Support. Kirjoita hakukenttään hakusanaksi: lamina. Valitse hakutuloksista: elastic options.
- CrossLam Kuhmo CLT lisäykset RIL 205-1-2009 ohjeeseen, 27.1.2014. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-10]. Saatavissa: <http://www.ril.fi/kirjakauppa/attachment/download/62634ec505da3e9fa853dcdaffed0f2d>
- CrossLam Kuhmo Oy. Tuoterakenteiden esittely [verkkoaineisto].2015[viitattu 2016-04-09]. Saatavissa: <http://www.crosslam.fi/media/pdf/crosslam-tuoterakenne-2015.pdf>
- ELO, Seppo. Geologian tutkimuskeskus. Espoo 2011. Esimerkki ABAQUS FEM -ohjelmiston käytöstä [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-10]. Saatavissa: [http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/6\\_2011.pdf](http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/6_2011.pdf)
- Eurokoodien tausta ja sovellukset. 2008. Eurokoodi 5. Euroopan Komissio: PO Yritys- ja Teollisuus-toiminta. Yhteinen tutkimuskeskus [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-19]. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi/1995/paasivu995/sahkoinen1995/EN%201995.pdf>
- GAGNON, S. & PIRVU C. Québec, QC 2011. FPInnovations. CLT Käsikirja – Kanadalainen painos. Ristiinliimattujen massiivipuulementtien rakennesuunnittelu [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-10]. Saatavissa: <https://fpinnovations.ca/Extranet/Pages/AssetDetails.aspx?item=/Extranet/Assets/ResearchReportsWP/E4842.pdf#>
- KOMULAINEN, Petri 2016-03-07. Olamentin rakennuskohteiden käytetyin lattiarakenne [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Pekka Pentti.
- LAHTELA, Tero 2014. Lattiat, värähtelymitoitus [verkkoaineisto]. Puuinfo. [viitattu 2016-02-18]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/moduuli-4/84lattianvarahtelymitoitus.pdf>
- LAHTELA, Tero 2015a. Puuinfo, moduuli 1. CLT-levyn suunnittelu yleisesti. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutus 2015. Materiaali. [viitattu 2016-03-10].
- LAHTELA, Tero 2015b. Puuinfo, moduuli 1. Materiaalit ja niiden jatkojalosteet. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutus 2015. Materiaali. [viitattu 2016-03-10].
- LAHTELA, Tero. 2015-10-8. Rakennusinsinööri, Insinööritoimisto Lahtela Oy. [suullinen tiedonanto, puhelinkeskustelu].
- MATILAINEN, Jussi-Pekka. 2016-12-03. ABAQUS-ohjelman käytön opastaminen. [sähköpostikeskustelu].

Olament.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-10]. Saatavissa: <http://www.olament.fi/>  
Polku: Olament.fi. CLT elementtiratkaisut.

PERÄLÄ, M. 2013. Jatkuvan systeemin värähtely [opetusmoniste]. [viitattu 2016-02-20]. Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

Puuinfo.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-05] Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/>  
Polku: Puuinfo.fi. Rakentaminen. Suunnitteluohjeet.

PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU. LYHENNETTY SUUNNITTELUOHJE. RIL 205-1-2009 B. (Koottu: EN 1995-1-1:2004+A1:2008, EN 1995-1-2:2004+AC:2009, RIL 205-1-2009, RIL 205-2-2009). 3. painos. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Storan Enson CLT lisäykset RIL 205-1-2009 ohjeeseen, 7.5.2014. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-10]. Saatavissa: <http://www.ril.fi/kirjakauppa/attachment/download/2656b4dddf8a0752ec8e3d392e1a9c6f>

TALJA, A. & TORNQVIST, J. 2014. VTT tutkimusraportti. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius [verkkoaineisto]. Valtion teknillinen tutkimuskeskus [viitattu 2016-02-18]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf>

TALJA, Asko 2013. Rungon värähtelymitoitus. Puurakentamisen asiantuntijaohjelma. Jakso 2. Puurakenteet ja rakennusfysiikka. Materiaali. [viitattu 2016-03-14]

TALJA, Asko 2016-27-01. CLT-lattian värähtelytutkimukset. [sähköpostikeskustelu].

TALJA, Asko. Espoo 1996. VTT tiedotteita. Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallinta [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-10]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1790.pdf>

TALJA, A., TORATTI, T. & JÄRVINEN, E. 2002. VTT tiedote. Lattioiden värähtelyt, suunnittelu ja koekellinen arviointi [verkkoaineisto]. Valtion teknillinen tutkimuskeskus [viitattu 2016-02-18]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf>

TALJA, A., TORATTI, T. VTT ohje. Lattioiden värähtelysuunnittelu [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-01]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK030302.pdf>

TORATTI, Tomi. Floor vibrations. Wood Product Industries. Finland. Materiaali. [Viitattu 2016-03-16]