



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Markku Hentonen

CLT-elementin mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

08.04.2021

Tekijä Otsikko	Markku Hentonen CLT-elementin mitoitus
Sivumäärä Aika	53 sivua + 4 liitettä 08.04.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Ohjaaja Kari Saarivirta Lehtori Mauri Konttila
<p>Tämän insinöörityön tilaajana toimii Vahanen Suunnittelupalvelut Oy. Yrityksellä oli kiinnostusta selvittää tämä työn kautta CLT-rakenteiden suunnittelua ja saada lisätietoa CLT-rakentamisesta sekä laskentapohjia rakennesuunnittelun avuksi.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää puumateriaalin ominaispiirteitä, CLT-rakenteen erityisiä ominaisuuksia sekä tuottaa Excel-laskentapohjia rakennesuunnittelun avuksi. Laskentapohjat toteutettiin yksiaukkoisesta laatasta, palkista sekä yksikerrospilarista. Laskentapohjat soveltuvat kolme- tai viisikerroksisen CLT-rakenteen laskemiseen.</p> <p>Rakennesuunnittelun haasteita tätä työtä tehdessä oli yhtenäisen ja harmonisoidun h-EN-standardin puute. CLT-rakenteen mitoittamiseen tarvitaan monista eri lähteistä kerättyjä tietoja. Eurokoodi 1995-1-1 -kirjalla ei yksistään pysty mitoittamaan CLT-rakenteita, vaan sen lisäksi on tutkittava tuotevalmistajan omia lisäohjeita, kansallisia liitteitä ja muita laskentaesimerkkejä.</p> <p>Laskentapohjien avulla tuotettiin esivalintataulukoita rakennesuunnittelun aloittamisen tueksi. Laattarakennetta analysoitiin laboratoriokokeella Metropolia Ammattikorkeakoulun Myllypuron campuksella sekä verrattiin kokeen tuloksia Stora Enson Calculatis -ohjelman tuloksiin.</p>	
Avainsanat	CLT, CLT-elementti, liimapuu,

Author Title	Markku Hentonen CLT-element calculations
Number of Pages Date	53 pages + 4 appendices 08 April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Project Manager Kari Saarivirta Principal Lecturer Mauri Konttila
<p>This thesis was commissioned by Vahanen Suunnittelupalvelut Oy. The company was interested in studying CLT structural designing and gaining more information about wood qualities and building with wood products.</p> <p>The Goal of this project was to gather information of the specific characteristics of wood and structural qualities of cross-laminated timber and produce an Excel spreadsheet to aid in the structural designing process. The calculation spreadsheets were produced for a single span beam, a slab, and a one-story column. The calculation spreadsheets can be used to calculate three-to-five-layer CLT element calculations.</p> <p>One of the challenges in this project was the lack of harmonized calculation standard h-EN. When writing this thesis and creating spreadsheets, it was necessary to research calculation rules and examples from a various source to create spreadsheet. This is currently one of the challenges in CLT structural designing, it is not harmonized yet.</p> <p>Pre-section tables were created from calculation spreadsheet to aid structural designing. A laboratory test was conducted at Metropolia University of Applied Sciences in Myllypuro campus. The test was made on Stora Enso CLT slab and Stora Enso's Calculatis program was used to compare laboratory test results to Calculatis program and spreadsheet results</p>	
Keywords	CLT, CLT-element, Glued timber

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Aihe ja tavoitteet	1
1.3	Rajaukset	2
1.4	Tutkimusmenetelmät	2
2	CLT	2
2.1	Käyttö ja kohteet Suomessa	2
2.2	Valmistus	3
2.2.1	Valmistusprosessi	3
2.2.2	Liimaus	5
2.3	Ekologisuus	5
2.4	Rakenneominaisuudet	7
2.5	Lämmönjohtavuus	8
2.6	Puunkäsittely	9
2.7	Puun homehtuminen ja lahoaminen	9
2.8	Puunsuojausmenetelmät	10
2.9	Muutokset palosuunnittelun määräyksissä ja paloluokat	11
2.10	Taulukkomitoitus	12
2.10.1	CLT:n palo-ominaisuudet	13
2.10.2	Liitokset palossa	15
2.11	Puun äänitekniset ominaisuudet	16
2.12	Ääneneristävyyksivaatimukset	17
2.13	Yksinkertainen rakenne	17
2.14	Massalaki	18
2.15	Kaksinkertainen rakenne	19
2.16	Jousi-massa-yhdistelmä	20
2.17	Välipohjien ääneneristys	21
3	Elementtien liitokset	21

3.1.1	Liitoskohta A	22
3.1.2	Liitoskohta B	23
3.1.3	Liitoskohta C	24
3.1.4	Liitoskohdat D ja E	24
4	Laboratoriokoe	25
4.1	Koetilanne	26
4.2	Lähtökohta	27
4.3	Tulokset	28
4.4	Laskelmat	29
5	Mitoitus	30
5.1	CLT:n mitoitus	30
5.2	Laatan mitoitus	30
5.2.1	Laatan taivutusmitoitus	31
5.2.2	Laatan tehollinen taivutusvastus	33
5.2.3	Staattiset momentit	33
5.2.4	Taivutuskestävyys	34
5.2.5	Leikkauskestävyys liimasaumassa	35
5.2.6	Leikkauskestävyys neutraaliakselilla	36
5.2.7	Taipuma	37
5.2.8	Tehollinen taivutusjäykkyys poikkitaissuunnassa	38
5.2.9	Ominaistaajuus	38
5.2.10	Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma	39
5.3	Palkin mitoitus	40
5.3.1	Tehollinen jäyhyysmomentti	41
5.3.2	Tehollinen taivutusvastus	41
5.3.3	Poikkileikkausala leikkausmitoituksessa	41
5.3.4	Taivutuskestävyys	42
5.3.5	Leikkauskestävyys	42
5.3.6	Kiepsahduskestävyys	43
5.3.7	Taipuma	46
5.3.8	Palkin tukireaktiot	46
5.4	Pilarin mitoitus	47
5.4.1	Taivutusvastus	47
5.4.2	Nurjahduskestävyys	47
5.4.3	Taivutus- ja puristuskestävyys	47

6	Esivalintataulukot	48
7	Yhteenveto	51
	Lähteet	53
	Liitteet	
	Liite 1. Stora Enso Calculatis -laskelmat	
	Liite 2. Laskuesimerkki	
	Liite 3. Laatan kantavuustaulukot	
	Liite 4. Laboratoriokokeen mittaustulokset	

Lyhenteet

CLT	Cross Laminated Timber, Ristiin liimattu sahatavara
CE	Conformité Européenne, eurooppalainen tekninen hyväksyntä
CNC	Computer Numerical Control, Tietokoneohjattu numeerinen menetelmä
EN	Eurooppalainen standardi
h-EN	Harmonisoitu eurooppalainen standardi
MRT	Murtorajatila
KRT	Käyttörajatila
PUR	Polyuretaaniliima
SFS	Suomen Standardisoimisliitto ry
W/mK	Wattia per metri Kelviniä, lämmönjohtavuuden yksikkö
U-Arvo	Lämmönläpäisykerroin

1 Johdanto

1.1 Tausta

Tämän insinööriyön tilaajana on Vahanen Suunnittelupalvelut Oy. Vahanen Suunnittelupalvelut Oy:llä on yli 100 eri alojen asiantuntijaa Espoon, Hämeenlinnan ja Tallinnan toimipisteissä. Vahanen Suunnittelupalvelut Oy:ssä tunnistetaan puurakentamisen kasvutrendi ja yrityksellä on halukkuutta selvittää CLT-suunnitteluun liittyviä haasteita.

Suomessa puurakentaminen on vahvassa kasvussa ja CLT:n käyttö runkomateriaalina on yleistynyt viime vuosina voimakkaasti. Tällä opinnäytetyöllä pyritään kartoittamaan CLT-rakenteiden mitoittamiseen liittyviä kysymyksiä sekä helpottamaan rakennesuunnitteluun liittyvien laskelmien tekemistä.

Opinnäytetyössä käydään läpi CLT-rakenteiden ominaisuuksia sekä suunnitteluun ja mitoittamiseen liittyviä erityiskysymyksiä. CLT-rakenteiden suunnittelussa on paljon haasteita verrattuna tavallisimpiin rakennusmateriaaleihin. EU-tasolla ei ole vielä sovittu yhtenäisestä h-EN-standardia, minkä vuoksi ei ole olemassa yhtenäisiä laskentakäytäntöjä. Laskennoissa pitää käyttää jokaisen tuoteosavalmistajan omia lisäohjeita CLT-elementtien mitoittamisessa. Laskentatapojen yhtenäistämisen jälkeen rakennesuunnittelu tulee siltä osin helpottumaan.

1.2 Aihe ja tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoite on mitoittaa CLT-rakenne sekä havainnoida CLT-elementin rasiuskäyttäytymistä laboratorio kokeilla. Rakenteiden mitoituksessa käytetään eurokoodi 5 EN 1995-1-1 ja SFS EN 205 1-1+A1 + A2 + AC standardeja sekä eri tuotevalmistajien lisäohjeita. Laskelmien vertailun ja laboratoriohavaintojen pohjalta voidaan tehdä yhteenveto CLT-elementin mitoituksesta, tuottaa laskentapohjat sekä koostaa esivalintataulukot rakennesuunnittelun avuksi.

1.3 Rajaukset

Insinööri työ rajataan koskemaan vain kolmesta viiteen kerrosta paksuihin CLT-elementteihin. Laskelmissa on käsitelty pilarin, palkin sekä yksi aukkoisen laatan mitoituslaskelmia. Tästä työstä pyritään rajamaan pois eri rakennusmateriaalien keskinäinen vertailu niin rakenteellisesti, taloudellisesti kuin ekologisesti sekä eri tuoteosavalmistajien omat ratkaisut ja innovaatiot.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Laskennat suoritetaan Excel taulukkolaskentaohjelmalla ja Stora Enson Calculatis -ohjelmalla. Laboratoriokokeet suoritetaan Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa Helsingin Myllypurossa.

2 CLT

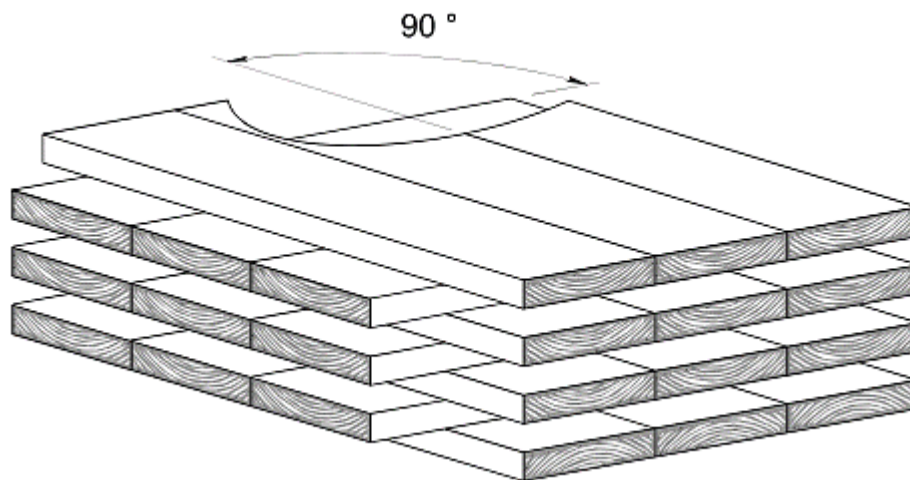
2.1 Käyttö ja kohteet Suomessa

Suomessa monikerroksinen puurakentaminen alkoi 1990-luvun puolessavälissä, jolloin monikerroksiset rakennukset valmistettiin pilaripalkkijärjestelmällä. Suomessa puurakentaminen on kehittynyt ja menetelmät päivittyneet. Viime vuosina on yleistynyt rakentaminen CLT-tilaelementeillä nopeuden ja tehokkuuden vuoksi. Tänä päivänä puurakentamisessa korkeampi kustannuserä tulee suunnitteluun käytetystä ajasta verrattuna muihin rakennusmateriaaleihin, mutta on edullisempi monessa muussa osa-alueessa kuten työmaalla asennuskustannuksissa. Puurakentamisen ammattitaito ja suunnittelukokemuksen lisääntyminen tulevat yhtenäistämään käytäntöjä ja tasoittamaan kustannuksia tulevaisuudessa. CLT-elementit työstetään millitarkalla CNC-koneistuksella, minkä vuoksi elementteihin pystytään valitsemaan monimuotoiset ratkaisut niin rakennesuunnittelussa kuin arkkitehtuurissa. Aukot ja talotekniikan varaukset ovat valmiina

elementeissä, kun ne saapuvat työmaalle. CLT on ominaisuuksiltaan hyvä rakennusmateriaali ekologisuuden, kantavuuden ja kosteus- ja lämpöteknisten ominaisuuksiensa ansiosta.

2.2 Valmistus

Mittatilaustyönä valmistettavat CLT-elementit (*Cross Laminated Timber*) on nimensä mukaisesti ristiin liimattua sahatavaraa ja valmistuksessa laminoituja kerroksia tulee kolmesta seitsemään kerrosta. Suomessa CLT:n valmistuksessa käytetään yleisesti joko kuusta tai mäntyä. Rakentamisessa CLT-elementtejä voidaan käyttää niin vaaka- kuin pystyrakenteissakin. CLT-levyn kokonaispaksuudet voivat olla 60–500 mm, leveys on 2,95–4.0 m välillä ja levyn maksimi pituudet ovat valmista riippuen 12–20 m. CLT-tuotteilla ei ole Euroopassa yhtenäistä tuotestandardia, mutta ne voidaan merkitä eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan CE-merkinnällä. [1.]



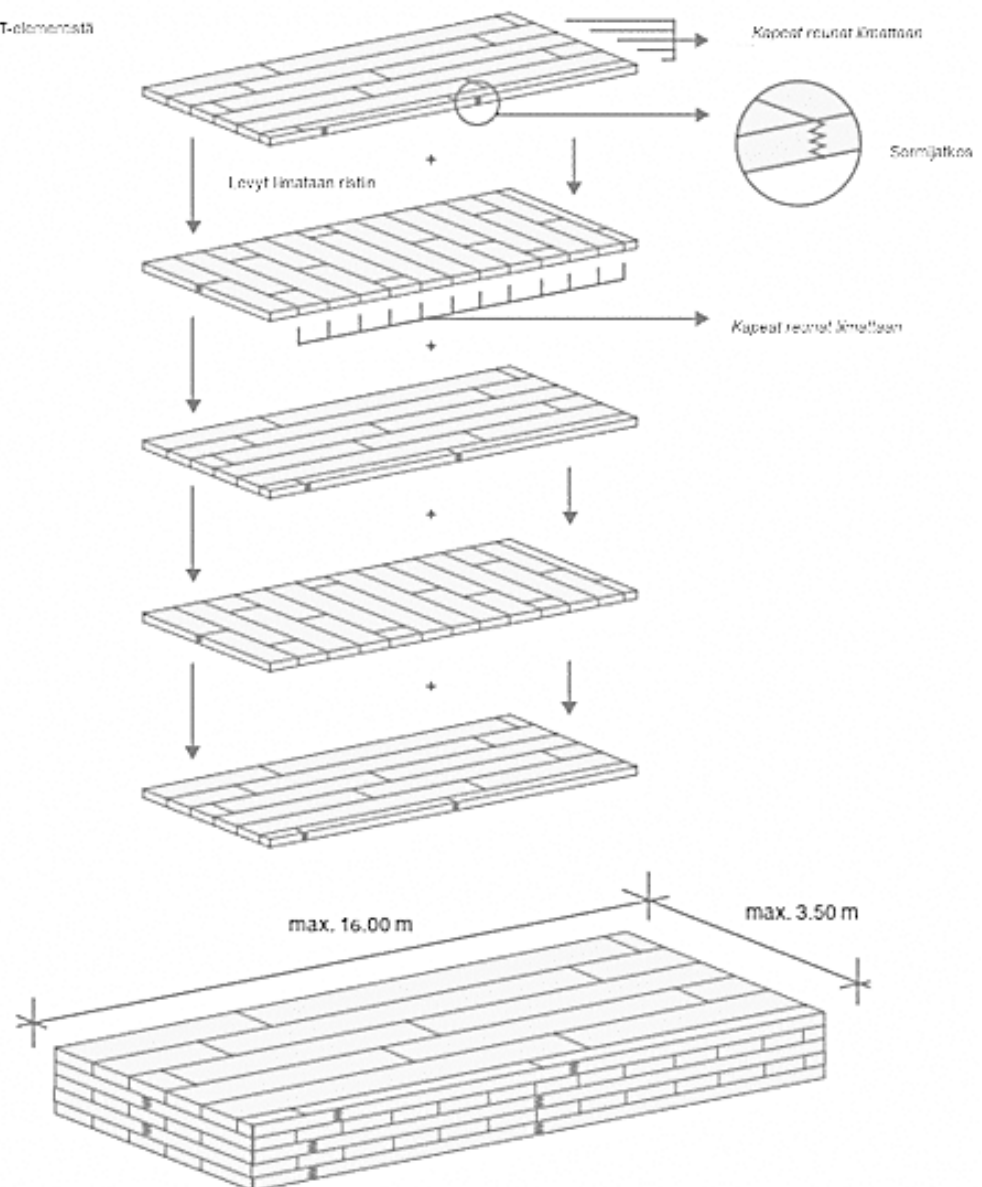
Kuva 1. CLT:n rakenne, havainnekuva [2.]

2.2.1 Valmistusprosessi

CLT-levyn valmistus alkaa oikean puun valinnalla, puun laadun varmistuksella ja kosteuden tarkkailulla. Kosteuspitoisuuden tavoitearvo on noin +12 % (+/- 2 %) kuivapainosta. Seuraavaksi laudat jaotellaan suunnitelman mukaisesti ja huomioidaan lujuus

kantavaan suuntaan sekä ulkonäkö uloimmille kerroksille. Levyt höylätään ohuesti, että liima tarttuu paremmin pintoihin, sahataan määrämittaan, liimataan ja ladotaan kerroksittain levyksi. Seuraavaksi levy puristetaan joko vakuumiliimauksella tai hydraulisella puristimella ja joskus levyä pitää myös puristaa sivuilta varmistamaan, ettei lautojen väliin jää liian isoa rakoja. Eurooppalainen tekninen hyväksyntä sallii enintään 6 mm rakoja lamellissa. Lopuksi tulee valmiin levyn laadun varmistus, hionta, loppukäsittely ja pakkaus. CLT-tuotteet tulisi varastoida oikealla tavalla, ettei ylimääräinen kosteus pääse imeytymään valmiiseen tuotteeseen. [3.]

Esimerkki
5 kerroksisesta CLT-elementistä



Kuva 2. Stora Enson CLT:n valmistuksen prosessikaavio [4]

2.2.2 Liimaus

CLT-levyn valmistuksessa käytettävät liimat ovat pääsääntöisesti ympäristöystävällisiä yksikomponenttisiä polyuretaani PUR-liimoja. Polyuretaaniliimat ovat hengittäviä ja M1-sisäilmaluokan vaatimukset täyttäviä liimoja. Liiman hengittävyyden ansiosta CLT-levyn kerrosten väliin ei muodostu tiivistä muovikalvoa, vaan levy hengittää molempiin suuntiin. Tyypillisesti liimapinnan paksuus on 0.1 mm + mikroskooppiset epätasaisuudet laudan pinnassa [1.]

CLT-levyn valmistuksessa on kaksi tapaa liimata. Syrjältä liimattu tai pelkästään lappeelta liimattu, molemmissa tavoissa on puolensa. Syrjäliimatulla tavalla laudat ensin liimataan syrjältään yhteen, jonka jälkeen ehyt levy liimataan lappeelta ja ladotaan. Toinen tapa on pelkästään lappeeltaan liimatulla tavalla missä laudat ladotaan ja liimataan. Syrjältä liimatulla tavalla CLT-levy on täysin ilmatiivis ja kosteuden haihtumisen aiheuttama halkeilu näkyy levyn pinnassa selkeämmin, kun lappeelta liimatun levyn halkeamat, jotka ovat pienempiä ja lautojen saumoissa. [1.]



Kuva 3. Vasemmanpuoleinen kuva on syrjä liimaamaton CLT:n pääty / oikeanpuoleinen kuva on syrjäliimattu CLT:n pääty [4]

2.3 Ekologisuus

Uusiutuvasta materiaalista valmistettu CLT-elementti on ekologinen rakennusmateriaali. Puun sitoo itseensä hiiltä noin 750 kg yhtä puu kuutiometriä kohden. Puu käyttää hiilidioksidissa olevan hiilen omaan kasvuun ja vapauttaa oksidit ilmaan happena. [6.]



Kuva 4. Puun hiilijalanjälki [7]

Helsingin kaupunki rakensi vuonna 2018–2020 identtiset asunnot Kuninkaantammen alueelle. Toinen taloista oli betonirunkoinen ja toinen puurunkoinen. Hankkeella pyrittiin vertailemaan rakennusmateriaalien elinkaaripäästöjä sadan vuoden aikajänteellä. Kaikissa mittauksissa puurunkoisen rakennuksen hiilijalanjälki oli betonirunkoista rakennusta pienempi. Asumisen energiakulutus tuottaa 80 % kaikista rakennushankkeen päästöistä. Sadan vuoden elinkaarella vertailussa oli puurakenteisen asunnon päästöt 6 prosenttia pienemmät. Tämä ero johtui lämmitysenergian kulutuksesta mistä tulee suurimmat päästöt. Energiatodistukset olivat lähes samat, joten ero jäi pieneksi. Rakennusmateriaalien elinkaaripäästöissä mihin kuuluu valmistus, kuljetus, uusiminen ja loppukäsittely olivat puurakennuksen päästöt noin 20% pienemmät kuin betonirakenteisen asuinrakennuksen. Tässä vertailussa ei otettu huomioon hiilen sitoutumista rakennusmateriaaleihin. [8.]

Ympäristöministeriön tavoitteena on ottaa rakennusmääräyksiin mukaan vähähiiliset rakentamisen kriteerit vuoteen 2025 mennessä. Tämä muutos tulee muuttamaan nykyistä ajattelutapaa rakentamisen alalla ja uudistamaan suunnittelua rakennusmateriaaleissa. [9.]

2.4 Rakenneominaisuudet

CLT:n käyttö rakennusteollisuudessa on noussut viime aikoina paljon. Ominaisuuksiltaan CLT on muotopysyvä, jäykkä, paloturvallinen ja ekologinen rakennustuote. Puu on tiivis ja pyrkii asettumaan ympäröivän tilan kosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen. Tämän vuoksi pientalorakentamisessa ei sisäpuolista höyrynsulkua tarvita, jos CLT rakenne on tehty syrjäliimattuna. Liittorakenteisena CLT-elementillä on mahdollista säästää pidemmät jännevälit rakentamisessa. Liittorakenteisena CLT-elementin massa kasvaa, ääneneristävyys paranee, palonkesto pitenee ja jäykkyys paranee.

CLT-rakenteen käyttösuositukset ulkoilmassa ovat valmistajakohtaista. Stora Enso suosittelee CLT-rakenteen käyttöluokiksi 1 ja 2. Puuta on käytetty ennenkin julkisivuissa, mutta kestääkö CLT-rakenne oletetun käyttöiän 50 vuotta jos se on ollut säälle alttiina? Tarkistettava valmistajakohtaisesti. [2.]

Käyttöluokka 1 vastaa lämmitettyjä sisätiloja tai vastaavia olosuhteita. Käyttöluokkaa 2 vastaava tilanne on katetut, tuulettuvat ja hyvin kuivuvat tilat esimerkiksi julkisivuverhouksen takana olevat CLT-rakenne. [11.]

Puun rakenneominaisuudet vaihtelevat paljon katsomissuunnan mukaan. Puu on kevyt ja taipuisa minkä vuoksi puurakenteiden suunnittelussa on omat haasteensa. Tarkastellaan C24 lujuuslaadun sahatavaraa ja sen ominaisuuksia. Puun vetolujuus on yleensä syiden vastaisessa (90°) tarkastelussa on 35 kertaa pienempi kuin syysuuntaisessa (0°) tilanteessa. Leikkauslujuus vaihtelee samanlailla ollen syyvastaisessa tarkastelussa puolet syysuuntaisesta leikkauslujuudesta. Puun kimmomoduuli on noin 30-kertainen syiden suunnassa tarkastelussa verrattuna syiden vastaiseen tarkastelusuuntaan. Taivutus- ja vetolujuudessa voidaan ottaa poikkileikkauksen koon mukaan huomioon k_n -kerroimen vaikutus. [10.]

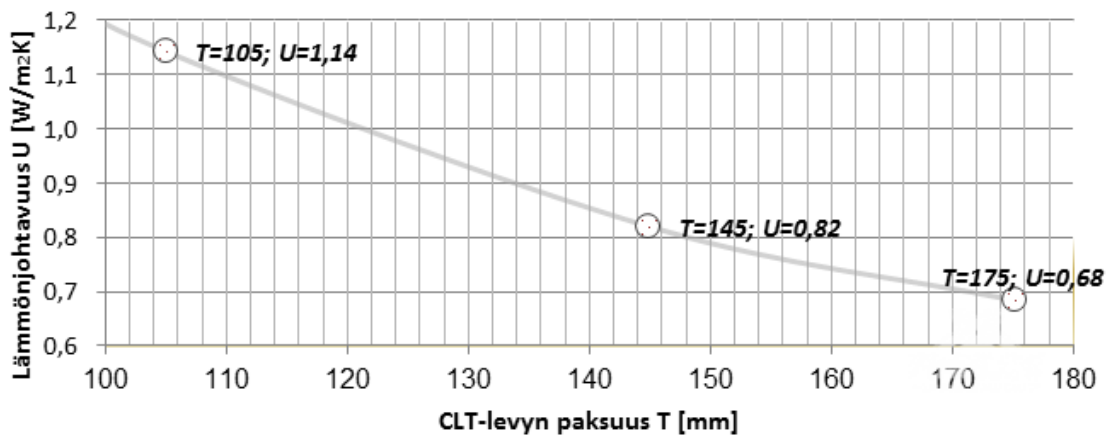
Taulukko 1, sahatavaran C24 ominaisuuksista [11]

Ominaislujuudet, sahatavara C24			
Taivutus	$f_{m,k}$	24	N/mm ²
Veto	$f_{t,0,k}$	14,5	N/mm ²
	$f_{t,90,k}$	0,4	N/mm ²
Puristus	$f_{c,0,k}$	21	N/mm ²
	$f_{c90,k}$	2,5	N/mm ²
Leikkaus	$f_{v,k}$	4	N/mm ²
	$f_{v,90,k}$	2	N/mm ²
Kimmo- moduuli	$E_{0,mean}$	11000	N/mm ²
	$E_{0,90,mean}$	370	N/mm ²

2.5 Lämmönjohtavuus

Puulla lämmönjohtavuus on puuaineksen huokoisuuden vuoksi vähäinen ja lämmönjohtavuus vähenee puun tiheyden vähetessä. Männyn lämmönjohtavuus syiden suuntaisesti on noin 0,22 W/mK ja syitä vastaan kohtisuorassa noin 0,14 W/mK. Lämmönvarauskyvyltään puu on tiileen verrattavissa oleva rakennusmateriaali, vaikka ominaispaino puulla on kolmasosa tiilestä. Hyvän lämmönvarauskyvyn vuoksi järeästä hirrestä on rakennettu asutuksia pitkään. Alla olevassa kuvassa 5 näytetään viitteellinen U-arvon kehitys ja sen muodostuminen CLT-rakenteen paksuuden vaikutuksesta. [10,12,13]

Lämmönjohtavuuden ja CLT-levyn paksuuden välinen seos



Kuva 5. Lämmönjohtavuus ja CLT-levyn paksuus [13]

2.6 Puunkäsittely

Liimapuu tuotteita on käytetty rakentamisessa jo lähes 100 vuotta ja silloiset rakenteet toimivat vieläkin. Uusimpia insinööripuutuotteita on CLT-rakenne, millä ei siis ole pitkäikäisyyden kanssa ongelmia. Liimapuissa liimansaumat eivät ole ongelmallisia säilyvyyden kannalta vaan puumateriaalina on altis esimerkiksi säärasitukselle. Puun ollessa ulkona alttiina sään vaihteluille missä toistuva kastuminen-kuivuminen kuluttaa puuta ja aiheuttaa halkeilua. Sisäilmassa suojaamaton puu kellastuu ja ulkoilmassa suojaamaton puu harmaantuu. Puun pinnat homehtuvat tai sinistyvät pitkällä aikavälillä, mikä ei rakenteellisesti ole ongelmallista vaan ennemminkin terveydellinen ja visuaalinen ongelma. Hometta voi torjua puurakenteissa monin eri tavoin. [11.]

2.7 Puun homehtuminen ja lahoaminen

Puussa homehtumista, lahoamista ja sinistymistä aiheuttavat lahottajasienet. Lahottajasienet tuhoavat selluloosaa ja ligniiniä, jotka muodostavat puun lujuuden. Puun pinnalla voi myös esiintyä myös home- ja sinistäjäsiementä, jotka käyttävät ravinnokseen puun vesiliukoisia ainesosia. Vesiliukoiset ainesosat eivät vaikuta puun rakenteelliseen lujuuteen,

mutta värivikojen ja terveysvaikutustensa vuoksi voivat aiheuttaa merkittävää taloudellista haittaa. Sinistäjät ja lahottajat sienet voidaan torjua samalla tavalla ja homesienet voidaan torjua pintakäsittelyllä missä on mukana homeenestoainetta. [11.]

Lahottajasienten esiintymiselle otollinen tilanne on, kun puun kosteuspitoisuus on yli 20 – 25 % eli märkä puu. Sienirihmastot voivat esiintyä kuivemmassakin puussa, mutta eivät pysty kasvavaa ja tuhoamaan puuainesta. Sienet tarvitsevat kasvaakseen happea sekä sopivan lämpötilan, joka on 0 - +50°C. Lajin mukaan sienien kasvu on nopeaa, kun lämpötila on +15 - +40 °C. Sienten rihmastot alkavat kuolemaan, kun kostean puun lämpötilan nousee +50°C - +60°C ja kuivan puun lämpötila nousee 100°C:een. [11.]

2.8 Puunsuojausmenetelmät

Eri suojausmenetelmillä voidaan puuta suojata ja käsitellä sekä puun ominaisuuksia voidaan muokata. Suojausmenetelmillä pyritään estämään ennen aikainen vioittuminen tai vaurioituminen. Suojausmenettelyitä ovat mm. rakenteellinen suojaus, puun modifiointi, teollinen kyllästys ja pintakäsittely.

Rakenteellinen puun suojaus on esimerkiksi julkisivuverhous, missä kostuminen on pyritty estämään ja puu pääsee hyvin kuivumaan. Tämä on otettu huomioon lukuisissa suunnittelun ohjeissa. [11.]

Puun modifioinnissa puun ominaisuuksia voidaan muuttaa kemiallisesti ja fysikaalisesti. Kemiallisessa puun modifioinnissa eli asetyloinnissa tapahtuu kemiallinen reaktio, jolloin puun soluseinässä olevat hydroksiiniryhmät muuttuvat asetyyliryhmiksi. Puusta tulee lujuusmitta pysyvä ja vettä hylkivä minkä vuoksi lahottajasieni ei siinä elä. Toinen kemiallinen puun modifiointi tapa on furfulointi. Tämä on norjalaisten kehittämä täysin ekologinen tapa käsitellä puun ominaisuuksia. Furfuloinnissa puu käsitellään furfuryl alkoholin kanssa sopivassa paineessa ja lämpötilassa. Tässä modifioinnissa puun ominaisuuksista lujuus paranee, säänkestävyys ja homeenkesto paranee EN350-standardien mukaan joko 1-luokkaan tai metsämännyn 1–2-luokkaan. [15,14.]

Yksi fysikaalinen puun modifioinnin tuote on lämpöpuu. Lämpöpuut tehdään luonnonmukaisesti vesihöyryn ja korkeiden lämpötilojen avulla. Lämpöpuista tulee pihkattomia, mitapysyvää. Puun lämpökäsittelyn lämpötilat vaihtelevat +185 °C - +212 °C välillä. Lämpökäsittelyt puu eivät ole lahoamattomia ja puun rakenteelliset ominaisuudet ovat alentuneet. Thermowood-tuotteilla lahonkesto on EN113-luokituksessa 2 ja 3 [15.]

Teollisesta kyllästämisestä tuttuja ovat kestopuutuotteet. Paineekyllästettyjä tuotteita voidaan käyttää erittäin haastavissa avomeritilanteissa kuin myös tavallisesti terassilaudoituksena. Paineekyllästetty tuote on mäntyä ja väriltään joko vihreää tai ruskeaa. Paineekyllästetyn tuotteen vihreä väri tulee suoja-aineena käytetystä kuparista ja ruskea tulee väriaineesta. Paineekyllästyksessä puuhun saatetaan suoja-aine kyllästyssylinterissä veden ja paineen avulla. Tavalliseen käyttöön tarkoitettu painekyllästetyn puun elinkaari ulkona on kolmesta viiteen kertaa tavallista puuta pitempi ja on jaettu maanvastaisiin (A), maan yläpuolisiin (AB) sekä erittäin vaativiin (M) luokkiin. [14,16,17.]

Pintakäsittely on yksi tapa suojata puuta. Pintakäsittelytuotteita ovat erilaiset öljyt, maalit ja kyllästeet. Pintakäsittelyn vaikutus on monesti lyhytikäistä, joten toistuva käsittely on suojaavuuden kannalta tarpeellista. Homeelta suojaavissa pintakäsittelyaineissa on fugisideja, jotka estävät homeen kasvun. Pigmenttiä sisältävät pintakäsittelyaineet suojaavat auringonvalon aiheuttamalta rasitukselta. Käytön aikana puun pinta alkaa halkeilemaan toistuvan käsittelyn myötä. Erilaisilla maaleilla uudelleenkäsittely aika on noin viidestä vuodesta aina 18 vuoteen asti. Dispersiomaaleilla, alkydiöljymaaleilla ja öljy- maaleilla uusintakäsittelyn tarve on 10–18 vuoden päässä. Pintakäsittely on antaa Suomen oloissa riittävän suoja käyttöluokille 2 ja 3. [10, 15, 18.]

2.9 Muutokset palosuunnittelun määräyksissä ja paloluokat

Suomessa ensimmäiset puukerrostalo kohteet valmistuivat 1990-luvulla eritysluvalla, kun lainsäädäntö ei vielä sallinut yli kaksikerroksisen puukerrostalon rakentamista. 1990-luvun puolella välissä alkanut säädösten purku edes auttoi puurakentamista siten, että puukerrostalon pystyi rakentamaan neljään kerrokseen asti, kun samaan aikaan tehtyjen Ruotsin palomääräysten päivityksessä ei enää ollut määritelty puukerrostalolle maksi korkeutta. [17 s.,2.] 2000-luvun ensimmäinen vuosikymmen oli hiljaista puurakentamisessa ja palomääräyksissä eurooppalaistettiin pintakerrosluokissa. Seuraava

merkittävä muutos palomääräyksissä tuli vuonna 2011, mikä mahdollisti kahdeksankerroksisen puurakentamisen ja lisärakentamisen. Uudistus mahdollisti myös puun käytön niin sisäpinnoissa kuin julkisivuissa. Vuonna 2011 tulleen määräyksen myötä myös puurakentaminen Suomessa vilkastui. Vuonna 2018 tuli seuraava isompi palomääräysten päivitys mikä mahdollisti palonsammutusjärjestelmällä varustetun puukerrostalon rakentamisen jopa 16. kerrokseen asti. Uudistetussa palomitoittamisessa tuli käytönmukaisen taulukkomitoituksen rinnalle laskennallinen palomitoitus eli palomitoitusluokka P0, millä voidaan mitoittaa kohde tai osa kohteesta oletetun palokehityksen mukaisesti. P0 paloluokka mahdollistaa paljaiden puupintojen jättämisen näkyviin, kunhan kantavan ja osastoivan rakenteen palon kestoaika on riittävällä tasolla. [19.]

Taulukko 2. Suojaamattoman kantavan rakenteen osuus osastoinnissa [19]

- R60** Jos enintään 20 % on suojaamatonta puupintaa
- R90** Jos 20-80% on suojaamatonta puupintaa
- R120** Jos yli 80 % on suojaamatonta puupintaa

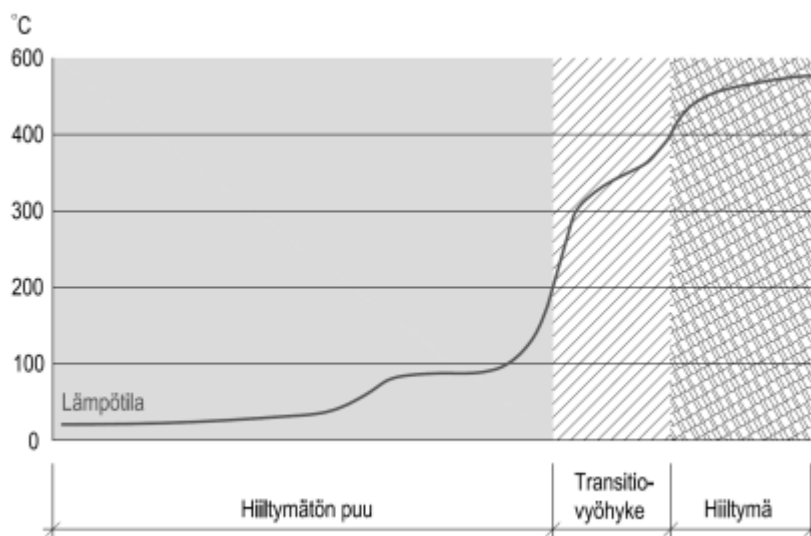
Tätä insinööriyötä kirjoittaessa astui voimaan uusi palomääräysten päivitys 1.1 2021, mikä toi monia puurakentamista helpottavia lievennyksiä. Yksi uudistus koskee enintään P2 paloluokan rakennusten sisäpintoja. Mikäli seinän materiaalit täyttävät puulle ominaisen palokäyttäytymislukun ja vähimmäistiheyden vaatimukset voidaan seinäpinnat jättää suojaamatta. Uudistuksessa helpotettiin edellisen lisäksi myös puujulkisivujen ja autosuojien suunnittelua sekä myymälätilan perustamista puurakenteiseen kerrostalon pohjakerrokseen. [20.]

2.10 Taulukkomitoitus

Ympäristöministeriön asetuksen 848/2017 mukaan rakennukset määritellään niiden käytön ja koon mukaisesti. Ympäristöministeriön asetus 848/2017 asetuksessa oleva taulukkomitoitus perustuu luokkiin ja lukuarvoihin. Siinä pyritään takaamaan asukasturvallisuus kuten myös pelastushenkilöstön palonaikainen turvallisuus ja toiminta. Rakennuksia suunniteltaessa pitää rakennukselle määritellä muun muassa paloluokka näitä ovat P0, P1, P2 ja P3. Paloluokka P0 on laskennallinen paloluokka ja muut paloluokat ovat taulukkomitoitusta. Paloluokkien määrittelyssä pitää ottaa huomioon myös Maakäyttö- ja rakennuslaki ja sen säädökset. [19, 23.]

2.10.1 CLT:n palo-ominaisuudet

Tulipalotilanteessa puu hiiltyy pinnalta ja syntynyt hiillos suojaa puuta palolta kuten myös puussa oleva kosteus suojaa palolta. Hiiltyessään puu ei menetä rakenteellista lujuutta kuten teräs- tai betonirakenteet, koska tulipalon ja paljaan puupinnan välissä on suojaava hiiltynyt kerros. Puusta alkaa kemiallisesti sitoutumaton vesi haihtumaan noin +100 °C :saa, puun terminen pehmentyminen alkaa noin +180 °C :saa ja puu syttyy palamaan noin +250 - +300 °C:ssa. Liimapuun palamisnopeus on 0.7 mm minuutissa. Tulipalotilanteessa CLT:n sisälämpötila 40 mm kohdalla on alle 100 °C kun hiiltyneen puukerroksen toisella puolen on yli 400°C:n tulipalo. [21.]



Kuva 6. CLT-rakenteen sisälämpötila tulipalossa [21]

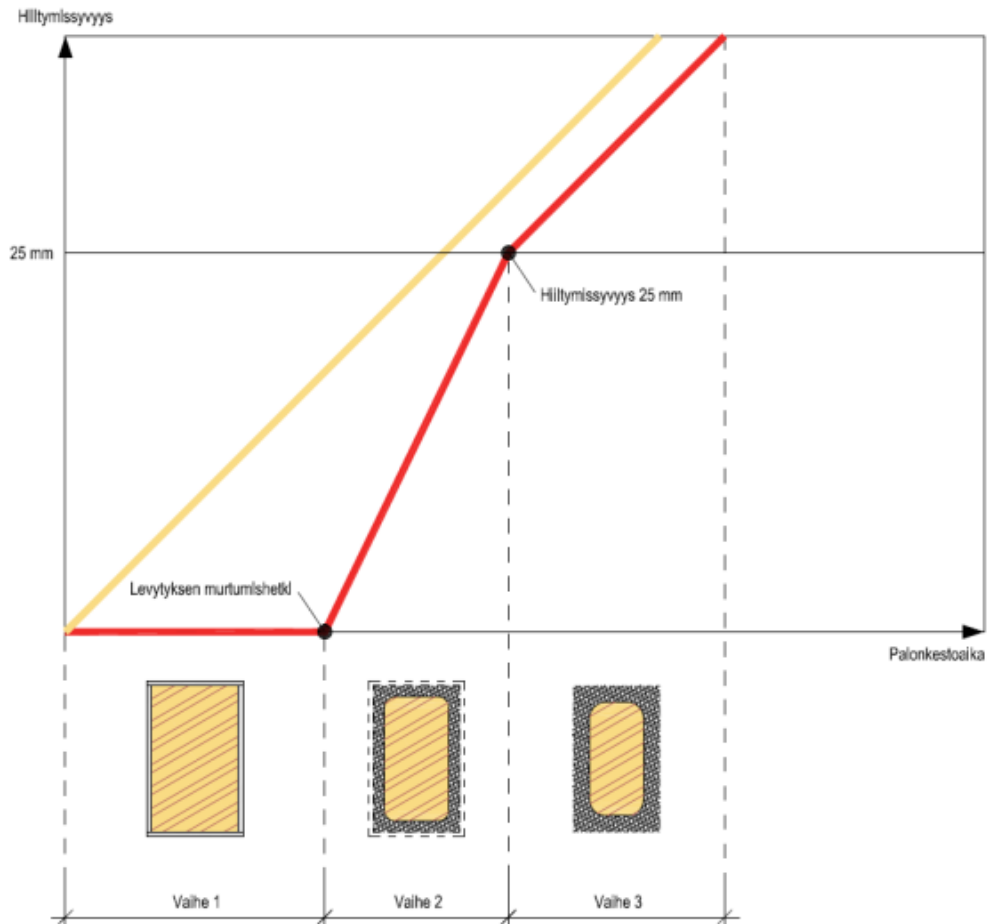
CLT-rakenteille ei ole vielä määritelty yleistä tapaa palomitoitukselle, vaan palomitoitus perustuu valmistajakohtaisiin lisäohjeisiin. Palonkesto lasketaan sahatavaran mukaisesti. CLT-rakenteet on tehty lamellikerroksista ja palotilanteissa joidenkin liimojen kanssa nämä lamellikerrokset delaminoituvat mikä aiheuttaa alta paljastuvan suojaamattoman puupinnan nopean hiiltymisen. Eurokoodi 1995 mukaan tällaisessa tilanteessa hiiltymissyvyys etenee rakenteessa nopeasti 25 mm asti. Hiiltymissyvyyden ollessa 25 mm rakenteen hiiltymisnopeus palautuu mitoitusarvojen mukaiseksi. Tulipalossa kolmi-kerroksinen CLT-rakenne menettää kantavuutensa, kun pintalamellikerros on palanut.

Viisikerroksisessa CLT-rakenteessa jää vielä kolmikerroksinen rakenne jäljelle. Delaminoitumisen vuoksi kolmikerros CLT-levy pitäisi mitoittaa siten että pintalamelli kestää vaaditun palonkeston.



Kuva 7. CLT:n delaminoituminen [23 s,7.]

Nopeaa hiiltymistä voi esiintyä, kun kipsilevystä alkaa haistumaan sidosaineena oleva vesi ja levy murenee, jonka jälkeen alta paljastuu suojaamaton puupinta. Kuvassa 8 on havainnollistettu, kuinka kipsilevyllä palosuojattu rakenne hiiltyy, kun sen palosuojaus häviää vaiheen 1 jälkeen. [22.]



Kuva 8. Hiilymissyvyyden kasvu ajan funktiona kipsilevyn kanssa [22.]

- Vaiheessa 1 on toimiva kipsilevyllä palosuojattu rakenne,
- vaiheessa 2 ei ole kunnollista palosuojausta ja 25 mm hiilymissyvyys saavutetaan kiihtyvällä nopeudella.
- Vaiheessa 3 hiilymissyvyys etenee mitoitusarvojen mukaisesti 0.7 mm/min

2.10.2 Liitokset palossa

Puurakentamisessa liitosten valinta on tärkeässä osassa palomitoittamisessa. Tavallisesti käytettyjä liitostyypppejä ovat puikko- tai teräsliitokset. Suunnittelemalla liitososat puurakenteiden sisään tai muuten näkymättömiin esimerkiksi palolevytyksen taakse, saadaan liitokset helposti palosuojattua. Puukerrostalojen rakentamisessa tämä on helpommin toteutettu kuin hallirakentamisessa. Hiilimyissä puurakenteissa teräsosien kestävyuden lisäksi joudutaan tarkastelemaan puikkoliitinten reuna- ja päätyetäisyyksiä

koska palotilanteessa nämä etäisyydet pienenevät. Suojaamattomalla puikkoliittimellä on enintään 20 minuutin palonkestävyys. Suuremman palokestoajan voi saavuttaa rakenteen dimensioita kasvattamalla kuitenkin siten, että naula- ruuvi- ja tappivaarnaliitosten palonkesto on enintään 30 minuuttia. Edellä mainitussa tilanteessa puikkoliittimissä ei saa olla ulkonevia kantoja. Puurakenteisten väliset liitokset voidaan toteuttaa myös kontaktiliitoksilla, jolloin ei tarvita teräs- tai puikkoliittimiä. Kuvassa 9 on esimerkki leikkaus- ja normaalivoiman välittävästä kontaktiliitoksesta. [22.]



Kuva 9. Massiivipuurakenteen hammastus siirtää tehokkaasti kuormia ilman teräsosia [22.]

2.11 Puun äänitekniset ominaisuudet

Puurakennusten riittävä ääneneristävyys saavutetaan monikerrosrakenteilla. Puu on materiaalina kevyt ja heikosti ääntä eristävä rakennusmateriaali, minkä vuoksi on rakennesuunnittelussa kiinnitettävä myös huomiota ääniteknisiin asioihin. Puurakenteisissa asuintaloissa on syytä kiinnittää huomiota erityisesti matalien taajuuksien äänen eristämiseen eli alle 100 hertsiä oleviin ääniin. Nämä taajuudet korostuvat erityisesti välipohjissa missä ilmaäänien lisäksi välittyy asumisesta johtuvia askelääniä (25-200 Hz). Suurin

osa asumiseen liittyvistä äänistä on korkeataajuisempaa äänitasoa aina 10000 hertsiin asti, mitä monikerrosrakenteiset rakenteet eristävät hyvin. [25.]

2.12 Ääneneristävyysvaatimukset

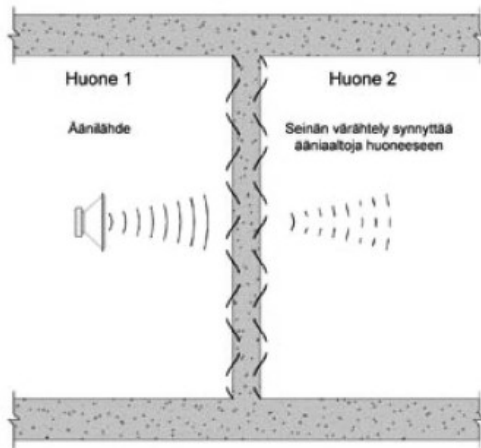
Rakennusmääräyskokoelma määrittelee askeläänitason eristykseksi uloskäytävältä huoneistoon 63 desibeliä. Rakennusten suunnittelussa on kuitenkin syytä suunnitella vaatimusta parempi askeläänitaso koska portaista kantautuvat äänet koetaan epämiellyttäväksi erityisesti yöaikaan. Rakennusten ulkovaipalle ei ole erikseen määritelty ääneneristävyysarvoja, vaan ne tulevat rakentamiseen kaavoituksen kautta silloin kun rakennetaan alueelle missä on normaalia voimakkaampi melu. Määritetyillä ääneneristävyysvaatimuksilla pyritään luomaan asukkaille riittävän hyvät ääniolosuhteet. Rakennuksen ääneneristävyttä voidaan parantaa rakenteellisesti materiaalivalinnoilla tai arkkitehtonisella suunnittelulla. [26.]

Huonetila	Pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ (dB)	Suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{I, 50-2500}$ (dB)
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Kuva 10. Ympäristöministeriön asettamat vaatimukset ääneneristävyydelle [29]

2.13 Yksinkertainen rakenne

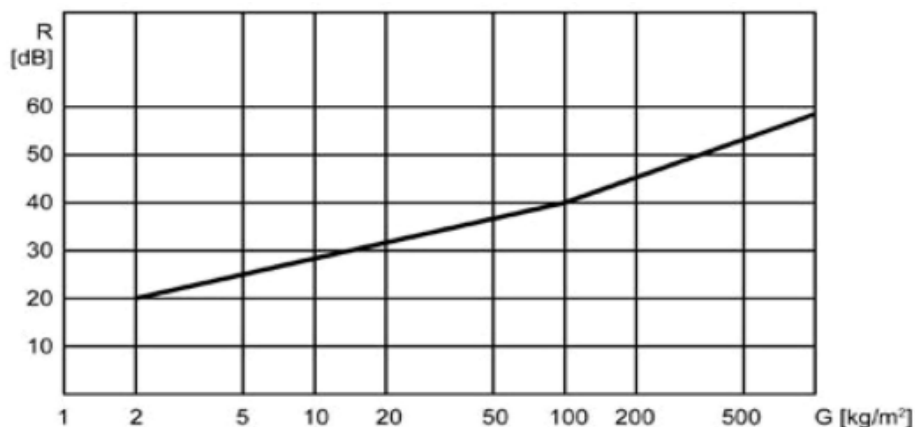
Perinteisen käsityksen mukaan ääniteknisesti paras rakenne on massiivirakenteinen luonnonkivi-, betoni- ja tiilirakenne. Tämä käsitys pitää paikkansa yksinkertaisissa seinärakenteissa, missä ääneneristävyys perustuu lähinnä rakenteen ilmatiiveyteen ja massaan. Ääniaalto kohtaa tiiviin seinän saa ilmanpaine seinän liikkeeseen ja mitä suurempi massa on seinällä, sitä vähemmän se heilahtelee äänen voimasta. Eristävyys noudattelee siis massalakia. [26.]



Kuva 11. Yksinkertaisen rakenteen äänitekniinen toiminta [26]

2.14 Massalaki

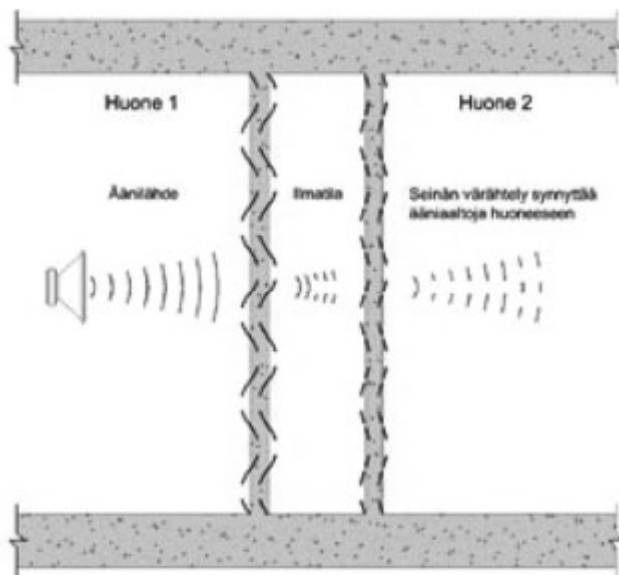
Massalain mukaan raskasrakenne eristää paremmin ääntä. Teoreettisesti laskien massiivisen seinän ääneneristävyyden paranee 6 desibeliä joko seinän massan tai äänen taajuuden kaksinkertaistuessa. Käytännönsäällä kaksinkertaistaminen parantaa seinän ääneneristävyyttä noin 4-6 desibeliä. Kevyen rakenteen massan lisääminen voi olla monella tavalla hyvä ratkaisu mutta ennestään raskaan betoniseinän paksuuden kaksinkertaistaminen ei välttämättä ole kovin taloudellinen ja käytännöllinen ratkaisu. Parhaita massiivisia seiniä ovat betoniseinät, täyteen muuratut tiiliseinät, pinnalta rapatut tiiliseinät, luonnonkiviseinät ja teräseinät. [26, 27.]



Kuva 12. Massan vaikutus yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyyteen [26.]

2.15 Kaksinkertainen rakenne

Kaksinkertainen seinä on jousi-massa-yhdistelmä, jonka ääneneristävyys perustuu levymäisten massojen välissä olevan ilmatilan yhteistoimintaan. Kerrosten välissä oleva ilmatila toimii 'jousena' rakenteen keskellä, joka välittää äänivärähtelyn toiselle levyille. Välittynyt värähtely on sitä pienempi mitä suurempi massa levyillä on ja ilmatilassa oleva mineraalivilla tai puukuituvilla parantaa ääneneristävyttä. Massalakiin perustuen kaksinkertaisen rakenteen levyjen paksuudella voidaan parantaa ääneneristävyttä seinissä tai välipohjissa. Laskelmat ja käytännön kokeet osoittavat, että kaksinkertaisella tai monikerroksisella rakenteella saavutetaan huomattavasti parempia ääneneristävyyslukuja kuin yksinkertaisella rakenteella. Nykyisten ääneneristävyysvaatimukset täyttävä kaksoisrunkoinen seinä vaatii huoneistojen välillä olevan seinän ilmatilan paksuudeksi 145 mm.



Kuva 13. Kaksinkertaisen rakenteen äänitekniinen toiminta [26]

Kaksinkertaisessa seinässä ilmatilaan syntyy seisovia aaltoja, jotka heikentävät ääneneristävyttä. Lisäämällä puukuituista eristettä tai mineraalivillaa saadaan vähennettyä seisovien aaltojen vaikutusta. Täyttämällä koko ilmatila ääntä absorboivalla materiaalilla voidaan ääneneristystä parantaa ja mitä pehmeämpää täytemateriaali sitä paremmin se eristää ääntä. Mineraalivillalla täytetty ilmatila parantaa 5–15 desibeliä ääneneristävyttä. Mikäli ilmatilaan tehdään, yhtenäisen eristelevyseinämä tulee seinärakenteesta

kolmikertainen, jolloin ääneneristävyys heikkenee syntyneiden värähtelyosajärjestelmien ja muuttuneen resonanssitaajuuden vuoksi. [25, 26.]

2.16 Jousi-massa-yhdistelmä

Puurakenteisten rakennusosien äänisuunnittelu perustuu niin sanottuun jousi-massa-yhdistelmään. Siinä esimerkiksi välipohja rakenteessa oleva tyhjä tila toimii ilmajousena ja pinnat massoina. Kevyessä puurakenteessa puun oma massa ei yksistään riitä vaadittuun äänieristävyyteen. Huoneistojen välinen ilmaääneneristävyys arvo on $R'_w = 55$ dB. Betoniseinällä ja massalailla laskettuna se saavutetaan, kun betoniseinän paksuus on 200 mm, jolloin seinän massa on 500 kg/m^2 . Liimapuurakenteinen 200 mm paksun väliseinän massa on vain 100 kg/m^2 , joten massalakiin perustuva äänisuunnittelu puurakentamisessa ei ole mahdollista ilman muita lisämateriaaleja. [28.]

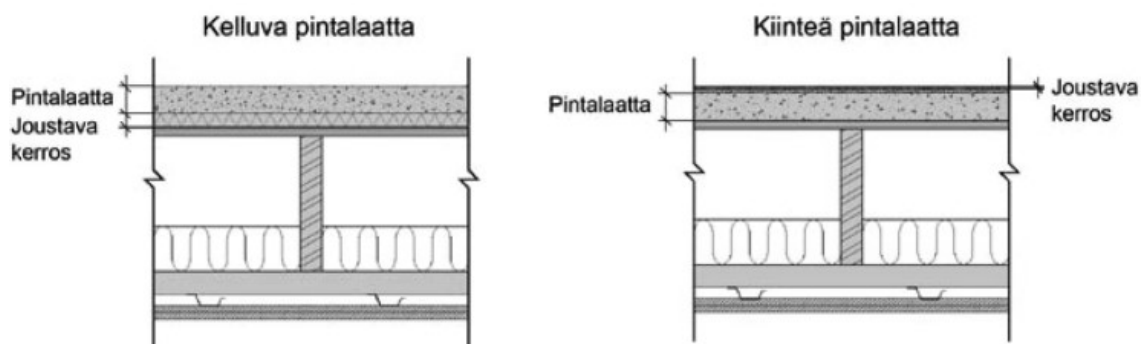


Kuva 14. Jousi-massa-yhdistelmä [27]

Puurakenteiset levyt ovat massaltaan melko pienet, mikä tekee äänisuunnittelusta haastavaa rakennuskohteissa. Kevyiden rakenteiden haaste tulee koinsidenssi-ilmiöstä. Koinsidenssi-ilmiössä ilmassa kulkevan äänen ja levyssä kulkevan äänen vaiheet ovat samanlaiset, jolloin levy ei muodosta ääneneristystä. Koinsidenssi-rajataajuuden ylityksen jälkeen alkaa ääneneristävyys paranemaan. Ohuen levyn massaa lisäämällä saadaan parannettua taivutusjäykkyyttä ja kasvatettua massaa, jolloin jäykempi levy ja sitä alempana on koinsidenssi rajataajuus. [29. 30 s, 46.]

2.17 Välipohjien ääneneristys

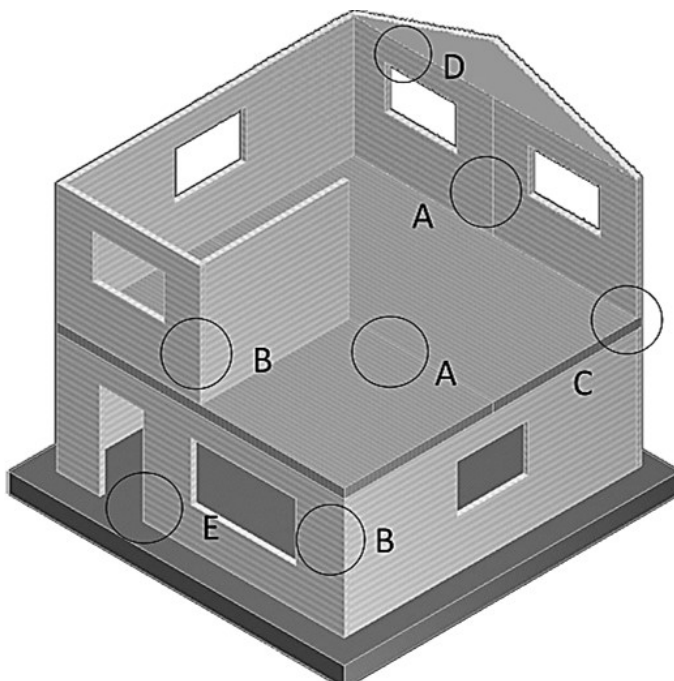
Puukerrostalojen välipohjat toimivat kaksinkertaisten seinien tavoin jousi-massa-systeemillä. Tyypillisesti puukerrostaloissa on välipohjarakenne toteutettu kelluvalla lattialla, missä alakaton levytys on asennettu akustisten jousien varaan ja pintarakenne on kelluvana välipohjapalkkien päällä. Kaksinkertaisessa välipohjarakenteessa pintalaatta voidaan toteuttaa joko kelluvana rakenteena tai kiinnitettynä välipohjaan. Suositeltavaa on toteuttaa kelluvarakenne betonisella pintavalulla, jolloin saadaan lisättyä kevyeen rakenteeseen massaa matalien äänien eristämiseksi. Kiinteä pintalaattaratkaisu tehdään aina betonisen pintavalun kanssa. [26.]



Kuva 15. Esimerkki kelluvasta ja kiinteästä lattiarakenteesta [26]

3 Elementtien liitokset

Liitos suunnittelussa on huomioitava teräslevyjien ja ruuvien kestävyys. Vinoon asennetut ruuvit kestävät vetoa paremmin kuin pystyyn ruuvatut ruuvit. On suositeltavaa ruuvata ruuvit 30 asteen kulmassa ja syysuuntaisesti elementtiin nähden. CLT-elementtien ruuvaamisessa pitää varmistaa, etteivät ruuvit osu lamellien saumoihin. [33.]



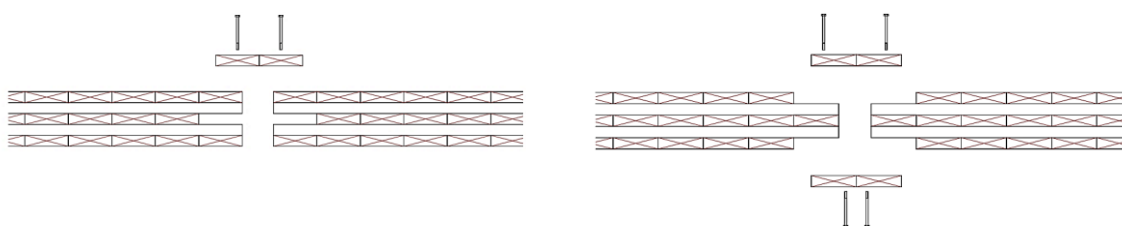
Kuva 16. Liitosten tarkastelukohdat [32]

Tarkastellaan yllä olevan kuvan 16 mukaisesti erilaisia liitosvaihtoehtoja. Tässä luvussa esitetään tyypillisimpiä CLT-elementtien välisiä liitosvaihtoehtoja eikä esitellä eri tuotesavalmistajien ratkaisuita ja innovaatioita. Teräsosaliitosten valmistajilla on monenlaisia ratkaisuita kuten piilokonsoleita, erilaisia vahvikkeita sekä monimuotoisia teräsosia mitä voi käyttää osana liitososasuunnittelua.

3.1.1 Liitoskohta A

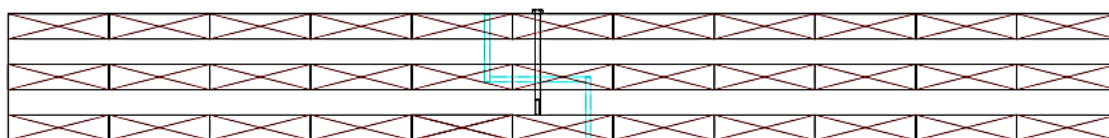
Liitoskohdassa A on kyseessä samansuuntaisten laattaelementtien välinen liitoskohta. Elementit voivat olla pystyssä seinämäisesti tai lappeeltaan lattiaelementteinä. Liitoskohdan pitäisi olla kestävä ja asentamisen jouduttamisen vuoksi helposti tehtävissä. Liitoksen kautta johdetaan seinän tai lattian voimat perustuksille. Alla olevassa kuvassa 17 on esitetty joitakin elementtien välisiä liitosvaihtoehtoja. [32.]

Liitoksia voidaan tehdä esimerkiksi irtoponttiliitoksella missä levyjen väliin tulee pontti mikä ruuvataan ulkopuolen kiinni. Liitokset voidaan tehdä myös peitelevyillä joko yhdeltä tai molemmilta puolin. [33.]



Kuva 17. Irtopontti ja peitelevyliitos [32.]

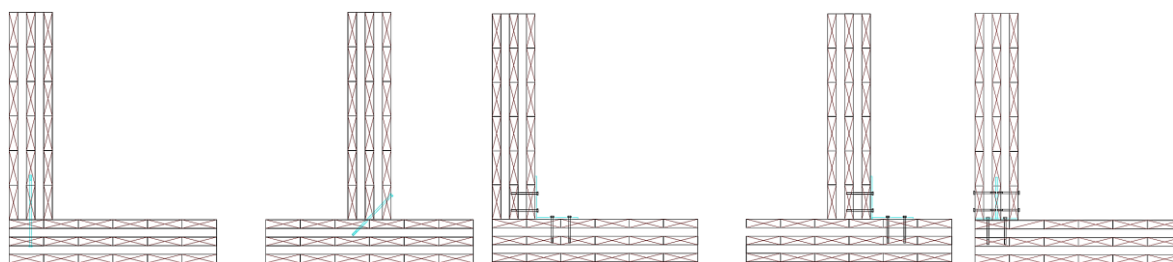
Lapaliitokset ja erilaiset teräsholkki-liitokset ovat myös mahdollisia. Lapaliitokset voidaan työstää tehtaalla valmiiksi elementtiin. Lapaliitokset kestävät leikkaus- ja normaalivoimia, mutta eivät välttämättä kestä taivuttavaa momenttia vaan saattaa hajjeta liitoskohdasta. [32, 33.]



Kuva 18. Lapaliitos [33.]

3.1.2 Liitoskohta B

Liitoskohdassa B on kyseessä kulmaliitokset. Nämä liitoskohdat tehdään itsekierteittäville ruuveilla, jotka voivat olla jopa 1000 mm pitkiä. Ruuvit voidaan ruuvata joko suorassa tai vinossa kulmassa, myös erilaiset kiinnityslevyratkaisut sopivat kulmaliitoksiin. [32.]

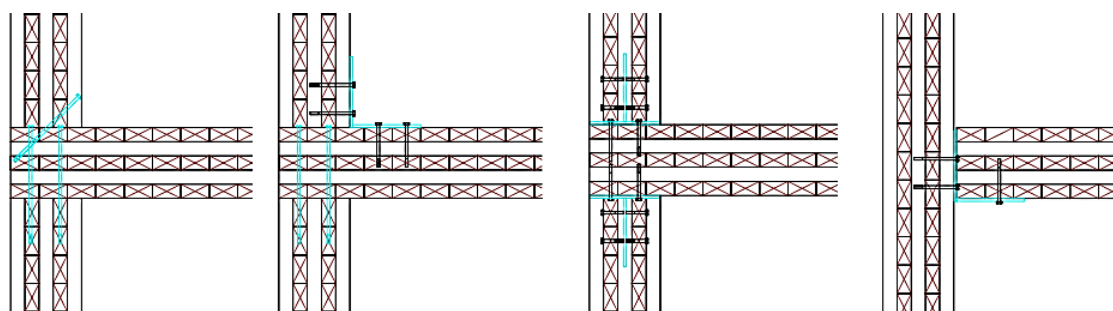


Kuva 19. Ruuviliitos, kulmalevyliitos ja teräslevyliitos.

Kulmaliitoksissa voidaan käyttää erillaisia teräslevyliitoksia. Teräslevy ruuvataan täyskierteisillä ruuveilla poikittain olevaan elementtiin kiinni, jonka jälkeen teräslevyyn kohdistetaan kohtisuoraan oleva elementti, missä on varaus teräslevylle ja se kiinnitetään sivusta ruuvaamalla. Tällä tavalla tehtynä liitos ei jää käyttäjälle näkyviin. [32, 33, 36.]

3.1.3 Liitoskohta C

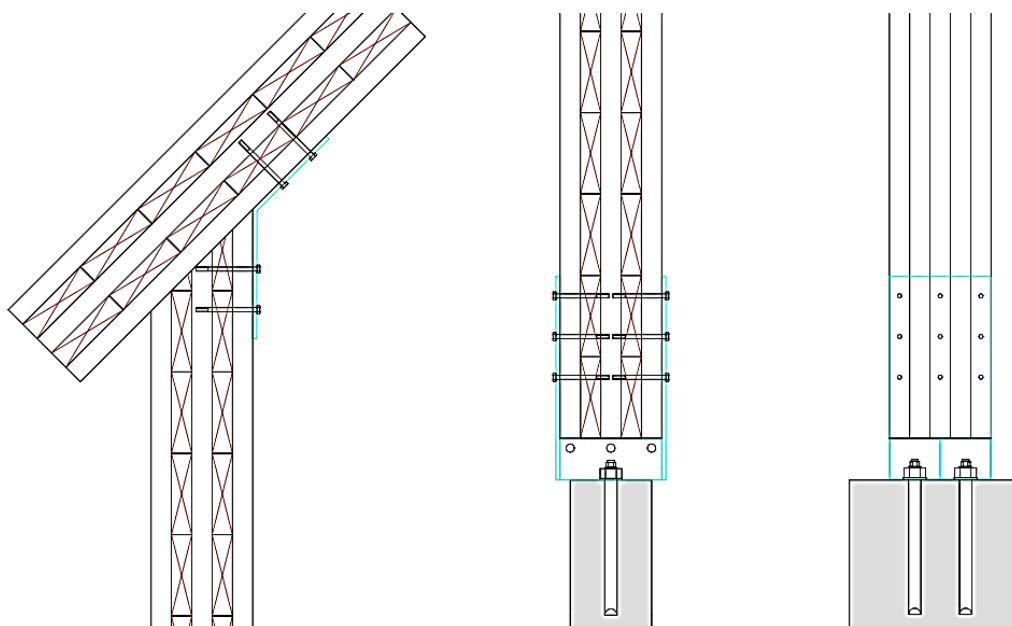
Kyseessä on seinän ja lattian välinen liitoskohta. Seinän ja lattian välinen liitos tehdään itsekierteittäville ruuveille vinoon ruuvaamalla. Liitos voidaan ruuvata myös suoraan, jolloin elementtien välissä on teräksisiä liitososia. Liitos voidaan toteuttaa ilman pitkiä ruuveja pelkkien L-mallisten teräslevyjen kanssa. Teräslevyt kestävät paremmin leikkausvoimia kuin pelkästään ruuvaamalla tehdyt liitokset. [32, 33.]



Kuva 20. Lattian ja seinän välinen liitos eri tavoilla toteutettuna [33.]

3.1.4 Liitoskohdat D ja E

Seinän ja katon välinen liitos (D) sekä seinän ja perustusten välinen liitos (E). Näiden kahden liitos kohdan kanssa tilanne on saman kaltainen kuin aiemmin mainittujen tilanteiden kanssa. Elementit voidaan liittää toisiinsa ruuvaamalla ja teräslevyillä vahvistamalla tai pilarin ja perustuksen tapauksessa seinäkengällä [32.]



Kuva 21. Katon ja seinän sekä seinän ja perustuksen välinen liitos [32.]

4 Laboratoriokoe

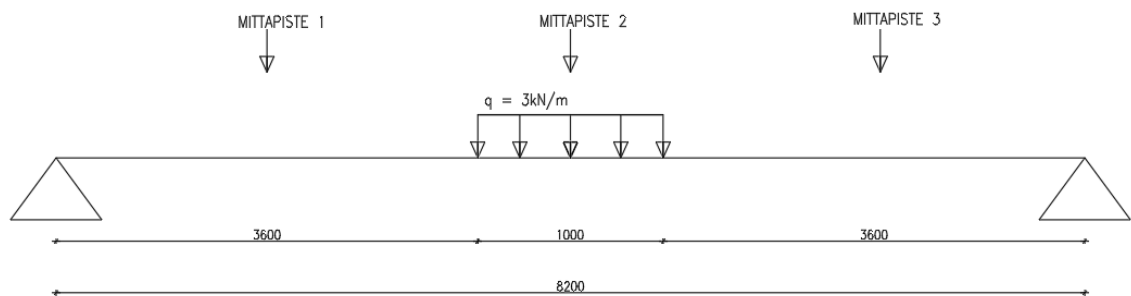
CLT-laatan laboratoriokoe suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Myllypuron kampuksella torstai 17.09.2020 – torstai 24.09.2020 välisenä aikana. Laboratoriotyöskentelyssä ohjaajana toimi projekti-insinööri Niko Lehikoinen Metropolia Ammattikorkeakoulusta sekä hyviä neuvoja kokeen toteuttamiseen antoi myös lehtori Matti Leppä.

Haasteita kokeiden suorittamiselle oli aamuisen opetusryhmän läsnäolo. Omien havaintojen perusteella opettaja huomautti hyvin oppilaita käynnissä olevasta kokeesta. Koealue oli osittain eristetty pahvisilla laatikoilla sekä pitkällä lautakasalla. Kokeen alussa jouduttiin aitauksesta huolimatta aloittamaan koe alusta ja odottelemaan rakenteen palautumista.



Kuva 22. Koetilanne, kun mittaukset ovat juuri alkaneet

4.1 Koetilanne



Koe suoritettiin perustamalla 3 mittauspistettä siten, että laatan keskellä 4,1 metrin kohdalla oli mittauspiste 2 ja mittauspisteet 1 ja 3 olivat neljänneksen päässä alku- ja loppupisteistä eli 1,8 m kohdalla. Mittauslaitteina oli käytössä Mitutoyo Digimatic Indicator -

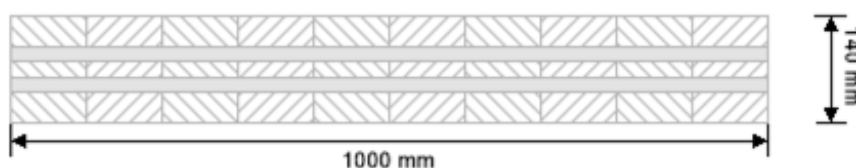
lineaarianturia. Tasainen kuorma tehtiin lastaamalla 25 kg betonisäkkejä, jotka ladottiin keskeisesti laatan puoliväliin metrin matkalle.

Mittaukset aloitettiin torstaina 17.09 ja mittaustuloksia seurattiin 10 minuutin välein ottamalla kuvat ja kirjaamalla tulokset muistiinpanoihin. Kokeen aloituspäivänä tulosten kehitystä seurattiin ensimmäiset kaksi tuntia. Seuraavana päivänä seuranta alkoi samaan aikaan ja kesti tunnin. Viimeinen kokeen seuranta kerta oli tasan viikon päästä kokeen aloittamisesta eli torstaina 24.09 jolloin tulosten kehittymistä seurattiin vielä tunti ja kymmenen minuuttia. Viimeisenä päivänä tuloskehitystä tapahtui 1/100 millimetriä laatan keskellä sekä kolmannessa mittauspisteessä.

4.2 Lähtökohta

Käytössä oli Stora Enson CLT -laattaelementti 140 L5S, joka oli 1,0 m leveä ja rakenteen jänneväli oli 8.2 m. Laatta oli tuettu molemmista päistä IPE-teräspalkeilla. Laattassa oli 300 kg tasainenkuorma 1,0 metrin matkalta keskeisesti laatan jännevälillä. Tätä laattarakennetta ei tällä profiililla ja jännevälillä ole tarkoitettu koetilannetta vastaavaan käyttöön esimerkiksi välipohjalaattana.

Tässä työssä haettiin käytännön kokeen, laskentaohjelmien ja käsin laskennan tulosten eroavaisuuksia. Tulokset osiossa on taulukoitu koetilanteen havainnot ja laskelmat osiossa on huomioitu laskentaohjelman ja käsinlaskennan eroavaisuudet.



Kuva 23. Stora Enso CLT 140 L5S, poikkileikkaus [30.]

4.3 Tulokset

Mittaustilanteen perustamisessa oli helppo havaita laatan nopea taipuma kokeen alkuvaiheessa. Mittauksen alkaessa, kun painot oli aseteltu laatalle, kahden ulomman mittauspisteen (1 ja 3) taipuman ero heti lähtötilanteessa oli lineaarianturalla mitattuna 0.03 millimetriä, mutta ero näiden mittauspisteiden välillä tasoittui kokeen aikana ollen lopussa 0.01 millimetriä.

Ensimmäisen päivän suurimmat muutokset ilmenivät oletetusti laatan keskellä mittauspisteessä 2. missä ensimmäisen päivän jälkeen kokonaistaipuma oli keskellä -13,76 mm sekä kokonaistaipumat laatan reunoilla -8,61 mm ja -8,58 mm.

Toisen päivän jälkeen kokonaistaipuma oli kehittynyt keskellä -14,25 mm asti sekä reunoilla -9,04 mm ja -8,99 mm asti.

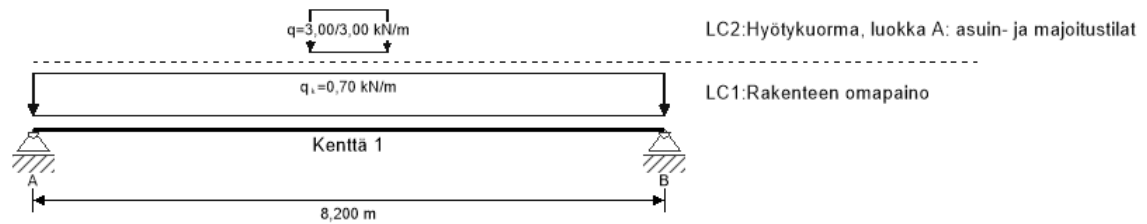
Viikon kohdalla kokonaistaipumat päättyivät keskellä -14,95 mm ja reunoilla -9,36 mm ja -9,35 mm. Alla olevassa taulukossa on ilmoitettu lähtötilanne, jossa rakenteeseen kohdistuva kuorma on juuri aseteltu paikoilleen.

Taulukko 3. CLT laatan kokonaistaipuma laboratorioskokeessa

	Kokonaistaipuma [mm]		
	MITTARI 1	MITTARI 2	MITTARI 3
Lähtötilanne	-8,44	-13,51	-8,41
1. päivä	-8,61	-13,76	-8,58
2. päivä	-9,04	-14,25	-8,99
7. päivä	-9,36	-14,95	-9,35

Lähtökohtaisesti 140 mm paksu, viisikerroksinen CLT-laatta on liian ohut 8,2 m jännevälille kantavana rakenteena. Stora Enson CLT-esivalintataulukoiden perusteella vastaava CLT-laattarakennetta voitaisiin käyttää esimerkiksi 2,0 kN/m hyötykuormalla asuintalon lattialaattana 5 metrin jännevälillä [28. s,28].

4.4 Laskelmat



Kuva 24. Calculatis-laskentaohjelmaan syötetty alkutilanne.

Koetilanteen ja Calculatis-ohjelman suurimmat taipumat olivat hyvin lähellä samaa ollen koetilanteessa 14,95 mm ja Calculatis-ohjelmassa 14,0 mm. Alla olevassa taulukossa on esitetty eroavaisuudet käsin laskennan, koetilanteen ja Calculatis-ohjelman välillä. Murtorajatilanteessa Calculatis-ohjelma ottaa huomioon kuorman lisäksi muita tekijöitä mitä ei perusstatiikan laskussa huomioida. Tämän laattarakenteen jänneväli oli 8,2 metriä ja rakenteen paksuus 140 mm mikä on hoikkarakenne. Calculatis-ohjelma antoi kokonaistaipuman arvoksi 37,6 mm. Suurin sallittu lopullinen taipuma on $L/300$ mikä on tässä tapauksessa 27,3 mm eli rakenne ylitti 38 % sallitun rajaa-arvon.

Taulukko 4. Vertailutaulukko tuloksista eri tavoilla laskettuna.

	Koetilanne	Calculatis Kuorma	Calculatis omapaino	Calculatis KRT
Tukireaktiot	-	1,5 kN	2,87 kN	5,54 kN
Momentti	-	5,78 kNm	5,88 kNm	15,41 kNm
Taipuma	14,95 mm	14,0 mm	16,80 mm	37,8 mm

5 Mitoitus

5.1 CLT:n mitoitus

CLT-elementin mitoituksessa on käytetty Rakennusinsinööriliiton julkaisua Puurakennuksen suunnitteluohjeet RIL 205-1-2017 EN 1995-1-1 sekä eri tuoteosatoimittajien valmistajakohtaisia lisäohjeita. Tätä työtä tehdessä EN 1995 -standardi oli vielä keskeneräinen eikä mitoitusta tehdessä Eurokoodi 5 esitä mitoitusratkaisuita CLT-rakenteille.

Elementit mitoitetaan yksiaukkoisena ja nivelellisesti tuettuna. Elementit mitoitetaan mekaanisen liitoksen mukaan, jolloin CLT-elementin suurin lamellikerrosten määrä on viisi kerrosta. Mitoittamisessa on huomioitava eri CLT-rakenteet katsomissuunnan mukaan, kun osa lamellikerroksista on suunnattu heikkoon suuntaan, jolloin niistä ei aina ole laskennallista hyötyä. Kerrosten välisen liimasauman aiheuttama liukuma on myös huomioitava.

5.2 Laatan mitoitus

Laatan mitoittamisessa käytettiin RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohjeita, täydentäviä kansallisia lisäohjeita sekä tuoteosavalmistajan omia lisäohjeita. CLT-laatassa kantavia rakenteita ovat pituussuuntaiset lamellikerrokset, rakenteen voi mieltää I-profiilin teräspalkiksi, jossa molemmat laipat ovat kantavia ja edullisia mitoittamisessa. Laatta mitoitetaan pituussuuntaisten kerrosten mukaan. Eurokoodin mukaan välipohjat tulee mitoittaa lujouden ja taipuman lisäksi värähtelylle. Heikkoon suuntaan olevia lamelleilta voi käyttää osana puristuskestävyyttä, jos laatta on tuettu molempiin suuntiin. Poikittaiset lamellit ovat hyödyksi värähtelymitoituksessa.

Tämän työn laskennassa ei ole huomioitu värähtelymitoituksessa heikon suunnan lamelleilta. Heikon suunnan lamellien huomioiminen edellyttäisi laattarakenteen tukemisen neljältä sivulta. Laskentapohjassa laatta on yksiaukkoisen ja rakenne on viisikerroksinen.

5.2.1 Laatan taivutusmitoitus

Laatan taivutusmitoituksessa lasketaan aluksi poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti. Taivutusmitoituksessa huomioidaan vain pituussuuntaiset lamellikerrokset, missä ylimmän ja alimman kerrosten lamelleihin otetaan huomioon poikittaisten lamellien liimasaumojen vaikutus. Keskimmäisen lamellikerroksen mukaan lasketun jäyhyyden arvo lisätään pituussuuntaisen tehollisen jäyhyyden arvoon. Tästä saadaan lamellien pituussuuntaisen kokonaisjäyhyyden arvo. [34.]

$$I_{ef,y,L} = 2 * I_{y,1} + I_{y,3} \quad (1)$$

Missä

$I_{y,1}$ Uloimpien lamellikerroksen jäyhyysmomentti

$I_{y,3}$ Kolmannen lamellikerroksen jäyhyysmomentti

Uloimpien lamellikerroksen jäyhyysmomentti lasketaan kaavalla 2

$$I_{y,1} = \frac{bh_1^3}{12} + \gamma_1 * A_1 * a_1^2 \quad (2)$$

Keskimmäisen lamellin jäyhyys lasketaan kaavalla 3

$$I_{y,3} = \frac{bh_2^3}{12} \quad (3)$$

Missä

b Laskennan tarkastelu leveys

h Lamellikerroksen korkeus

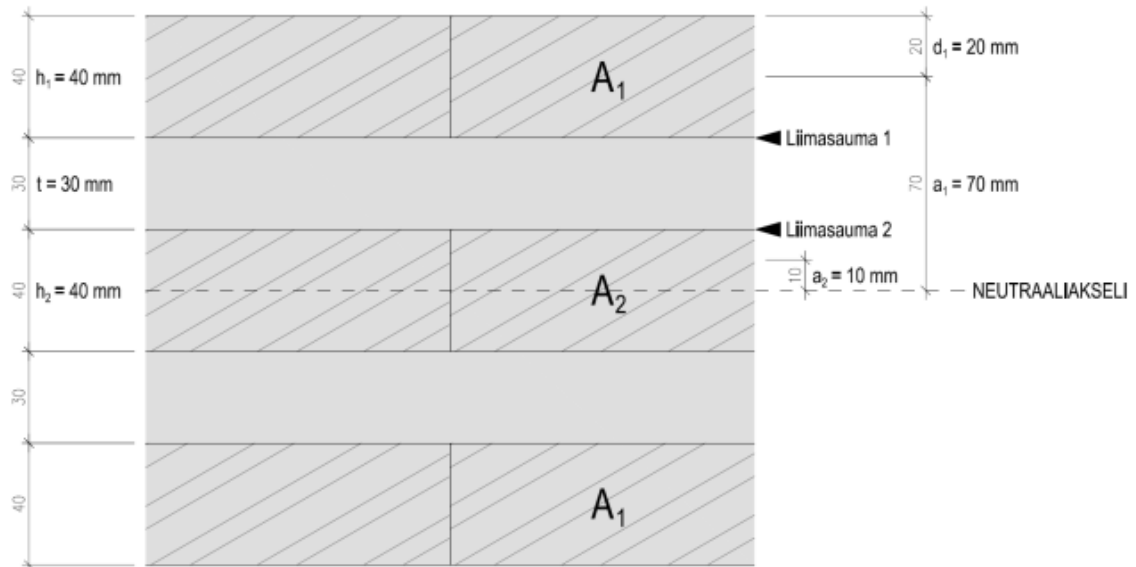
γ_1	Liitoshyötysuhdekerroin
A_1	Lamellin pinta-ala
a_1	Lamellien 1 ja 3 välinen etäisyys, puolestavälistä

Mekaanisesti kiinnitettyjen palkkien teho huomioidaan laskennassa liitoshyötysuhdekerroimella. Kertoimen arvo vaihtelee välillä 0–1 missä 0 tarkoittaa irtonaista kiinnitystä ja 1 täysin kiinnittynyttä tilannetta. Kertoimen laskussa huomioidaan valmistajan ilmoittamat kimmomoduuli, pinta-ala sekä poikkisuuntaisen lamellin paksuus. Liitoshyötysuhdekerroin lasketaan kaavalla 4 [34.]

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 * E_{0,mean} * A_1 * t}{L^2 * G_{R,mean} * b} \right)} \quad (4)$$

Missä

t	poikkisuuntaisen lamellin korkeus
$G_{R,mean}$	Liukumoduuli
$E_{0,mean}$	Kimmomoduuli
L	Kokonaispituus
b	Tarkastelu leveys



5.2.2 Laatan tehollinen taivutusvastus

$$W_{ef,y,L} = \frac{I_{ef,y,L}}{\gamma_1 a_1 + d_1} \quad (5)$$

Missä

$I_{ef,L}$ Pituussuuntainen tehollinen jäyhyys

γ_1 Liitoshyötysuhdekerroin

d_1 Pintalamellin korkeudesta puolet

a_1 Lamellien 1 ja 3 välinen etäisyys, puolestavälistä

5.2.3 Staattiset momentit

Käyttörajatilassa lasketaan staattiset momentit, joiden avulla selvitetään leikkauskestävyyttä niin liimasaumassa kuin neutraaliakselilla.

$$S_{ef,1} = \gamma_1 * A_1 * a_1 \quad (6)$$

$$S_{ef,2} = \gamma_1 * A_1 * a_1 + \frac{A_2}{2} * a_2 \quad (7)$$

5.2.4 Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoituksessa lasketaan momentti, momentin aiheuttama taivutusjännitys ja verrataan sitä taivutusvastukseen. Taivutusvastuksen suunnitteluarvoa laskettaessa käytetään lujuuden lisäämiseksi kuormajakolukua K_{sys} . Kuormajakoluvun laskeminen ilman tuotevalmistajan antamaa tarkempaa tietoa on mahdotonta, jolloin voi käyttää annettua vaihtoehtoista arvoa 1,2. [34.]

$$K_{sys} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,025 * n \\ 1,2 \end{array} \right. \quad (8)$$

Missä n lautojen määrä

$$\sigma_{m,y,z} = \frac{M_{y,z}}{W_{ef,L}} \quad (9)$$

Missä

$M_{y,d}$ Vaikuttava taivutusmomentti

$W_{ef,L}$ Pituussuuntainen taivutusvastus

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot f_{m,k} \cdot k_{sys} \quad (10)$$

Missä

$F_{m,d}$ Taivutuslujuuden mitoitusarvo

k_{mod}	Kuorman keston, kosteuden vaikutus lujuuteen
Y_m	Osavarmuuskerroin
$F_{m,k}$	Taivutuslujuuden ominaisarvo
K_{sys}	Kuormanjakoluku

5.2.5 Leikkauskestävyys liimasaumassa

Poikittaislamellin leikkausjännitys voidaan olettaa samaksi koko lamellin korkeudelta, joten liimasaumoissa 1 ja 2 on sama leikkausjännitys. Lasketaan statiikan avulla vaikuttava leikkausvoima V_d , minkä avulla saadaan laskettua leikkausjännitys, kaava 11 ja sitä verrataan tasoleikkauslujuuteen, kaava 12. [34.]

$$\tau_d = \frac{V_d * S_{ef,1}}{I_{ef,L} * b} \quad (11)$$

Missä

V_d	Leikkausvoima
$S_{ef,1}$	Staattinen momentti leikkaussaumassa
$I_{ef,L}$	Pituussuuntainen tehollinen jäyhyys
b	Tarkastelu leveys

$$f_{R,d,0} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * f_{R,k,0} \quad (12)$$

Missä

k_{mod}	Kuorman keston, kosteuden vaikutus lujuuteen
-----------	--

Y_m	Osavarmuuskerroin
$F_{R,k,o}$	Tasoleikkauslujuuden ominaisarvo

5.2.6 Leikkauskestävyys neutraaliakselilla

Neutraaliakselilla vaikuttaa sama leikkausvoiman arvo kuin liimasaumoissa. Taivutusjännitystä laskiessa käytetään toista staattisen momentin arvoa, kaava 7. Puun ominaisuuksiin liittyen lujuuksien suunnitteluarvoja laskiessa on huomioitava kuorman keston ja kosteuden vaikutus rakenteen lujuuteen. [34.]

$$\tau_d = \frac{V_d * S_{ef,2}}{I_{ef,L} * b} \quad (13)$$

Missä

V_d	Leikkausvoima
$S_{ef,2}$	Staattinen momentti leikkaussaumassa
$I_{ef,L}$	Pituussuuntainen tehollinen jäyhyys
b	Tarkastelu leveys

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * f_{v,k} \quad (14)$$

Missä

k_{mod}	Kuorman keston, kosteuden vaikutus lujuuteen
Y_m	Osavarmuuskerroin
$F_{V,k}$	Leikkauslujuuden ominaisarvo

5.2.7 Taipuma

Taipuman laskennassa käytetään puulle ominaista, k_{def} kerrointa, mikä on käyttöluokasta riippuva materiaalin virumaluku. Lasketaan omanpainon ja hyötykuormien aiheuttamat taipumat sekä niiden yhdistelty taipuma. [34.]

$$W_{inst,g} = \frac{5 * p_{g,k} * L^4}{384 * E_{mean} * I_{ef,L}} \quad (15)$$

Missä

g_k	Omapaino
L	Rakenteen kokonaispituus
$E_{o,mean}$	Kimmomoduuli
$I_{ef,L}$	Pituussuuntainen tehollinen jäyhyys

$$W_{inst,q} = \frac{5 * p_{q,k} * L^4}{384 * E_{mean} * I_{ef,L}} \quad (16)$$

q_k	Hyötykuorma
-------	-------------

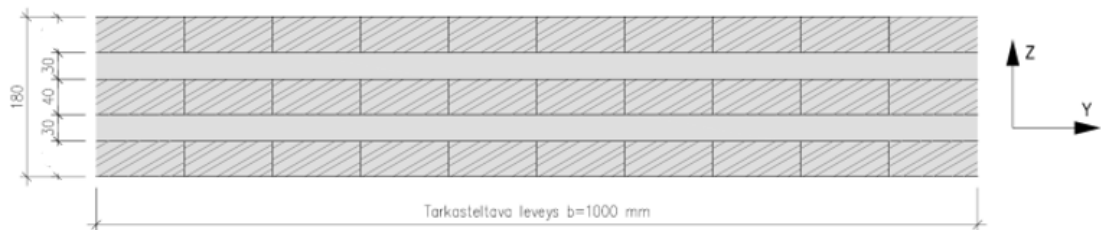
Lasketaan kuormien hetkellinen taipuma kaavalla 14 ja verrataan sitä sallittujen taipumien arvoihin. Lasketaan myös kokonaistaipumat.

$$\Sigma W_{inst} = W_{inst,g} + W_{inst,q} \quad (17)$$

$$W_{fin} = W_{inst,g} * (1 + k_{def}) + (1 + \psi_2 * k_{def}) * W_{inst,q} \quad (18)$$

5.2.8 Tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa

Tarkastellaan viisikerroksisen CLT-rakenteen keskimmäisiä lamelleja. Tässä laskussa A1 on tarkasteltavien lamellien pinta-ala. Ensin lasketaan keskilamellien tehollinen jäyhyys kaavojen 1, 2, 3 ja 4 mukaisesti kun tarkasteluleveys on 1 metri. [34.]



5.2.9 Ominaistaajuus

Lattiarakenteen alin ominaistaajuus lasketaan Kuhmon välipohjan lisäohjeiden mukaisesti. Mikäli lattia värähtelee matalammalla taajuudella kuin 9 hz, tuntuu se käyttäjissä epämiellyttävältä. [34.]

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * L^2} * \sqrt{\frac{(E I_{ef})_B}{m + 30kg}} \quad (19)$$

Missä

L Jänneväli

$E I_{ef,L}$ Pituussuuntainen teollinen jäyhyys

m oma paino pinta-alayksikköä kohden

30 kg hyötykuormasta lisättävä osuus

5.2.10 Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma

Lattiapalkin kohdalla sijaitsevan pistekuorman aiheuttama lattian painuma voidaan laskea yhteen suuntaan kantavien lattiarakenteiden tapauksessa. Laskemisessa käytetään lattiapalkkien etäisyydestä riippuvaa kerrointa k_s , mikä lasketaan kaavalla 20. Pistekuorman aiheuttaman taipuman pitäisi olla yhtä suuri tai alle 0.5 mm.

$$k_s = \sqrt[4]{\frac{(EI_{ef})_B}{(EI_{ef})_L}} \quad (20)$$

Missä

$(EI_{ef})_B$ Lattian poikittaiseen suuntaan oleva taivutusjäykkyys

$(EI_{ef})_L$ Lattian kantavaa suuntaan oleva taivutusjäykkyys

$$\min \begin{cases} \delta = \frac{F \cdot L^2}{42 \cdot k_s \cdot (EI_{ef})_L} \\ \delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot s \cdot (EI_{ef})_L} \end{cases} \quad (21)$$

Missä

F 1kN voima

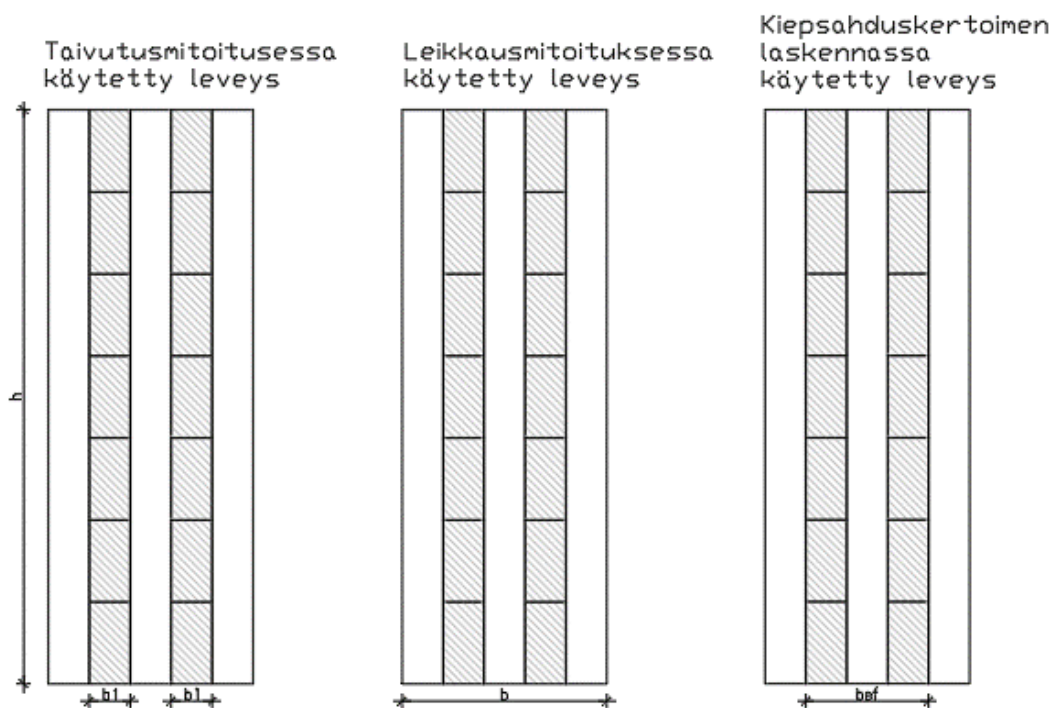
L Jänneväli

Ks Kaavalla 17 laskettu arvo

s Lattiapalkkien välinen etäisyys [m]

5.3 Palkin mitoitus

Palkin mitoittamisessa käytettiin RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohjeita sekä täydentäviä lisäohjeita. Palkin laskentapohjassa otettiin huomioon kiepsahdustuet. Tässä laskennassa on käsitelty viisi kerroksinen rakenne. Palkin mitoittamisessa uloimmat ja keskimmäinen lamellikerros on kantavaan suuntaan ja toinen ja neljäs kerros pituussuuntaista. Palkin mitoittaminen alkaa taivutusmitoittamisella ja jäyhyysmomentin laskennalla, missä on hyvä kiinnittää huomiota laskennalliseen paksuuteen, mikä tulee pituussuuntaisten lamellien yhteenlasketusta paksuudesta. Havainnollistettu kuvassa 25. [35.]



Kuva 25. Palkin mitoittamisessa käytetyt teholliset leveydet

5.3.1 Tehollinen jäyhyysmomentti

$$I_{ef,y} = \frac{b_{ef}h^3}{12} \quad (22)$$

Missä

b_{ef} pituussuuntaisten lamellien yhteen laskettu leveys

h Palkin korkeus

5.3.2 Tehollinen taivutusvastus

$$W_{ef,y} = \frac{b_{ef}h^2}{6} \quad (23)$$

Missä

b_{ef} pituussuuntaisten lamellien yhteen laskettu leveys

h Palkin korkeus

5.3.3 Poikkileikkausala leikkausmitoituksessa

Poikkileikkausala laskettaessa rakenteen kokonaisleveyden pinta-ala kerrotaan puulle ominaisella halkeilukertoimella k_{cr} , [35.]

$$A = k_{cr} * b * h \quad (24)$$

Missä

b Palkin kokonaisleveys

h Palkin korkeus

K_{cr} Halkeilukerroin

Halkeilukerroin K_{cr} määritellään seuraavalla tavalla

$k_{cr} = 0,67$ – Lämmitetyt sisätilat tai vastaavat kosteusolot

$k_{cr} = 1,00$ – Liimapuu

$k_{cr} = 1,00$ – Sahatavara pysyvästi KL 2 tai KL 3 vastaavat kosteusolot

$k_{cr} = 1,00$ – Standardien SFS – EN 13986 ja SFS – EN 14374 mukaiset puutuotteet

5.3.4 Taivutuskestävyys

Lasketaan momentti ja katsotaan momentin aiheuttama taivutusjännitys ja verrataan taivutusvastukseen. Laatta rakenteen taivutuskestävyydestä poiketen palkin taivutuskestävyyden laskennassa ei käytetä K_{sys} kuormanjakolukua lisäämään taivutuskestävyyttä. Taivutusjännitys lasketaan kaavalla 8 ja taivutusvastus kaavalla 25. [35.]

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * f_{m,k} \quad (25)$$

Missä

$F_{m,d}$ Taivutuslujuuden mitoitusarvo

k_{mod} Kuorman keston, kosteuden vaikutus lujuuteen

γ_M Osavarmuuskerroin

$F_{m,k}$ Taivutuslujuuden ominisarvo

5.3.5 Leikkauskestävyys

CrossLam Kuhmo CLT-palkin leikkausvoimaa ei saa pienentää tukien läheisyydessä. Leikkauskestävyyden ominisarvo lasketaan kaavalla 11. Leikkausvoiman aiheuttama leikkausjännitys lasketaan kaavalla 26. [35.]

$$\tau_d = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{A} \quad (26)$$

missä

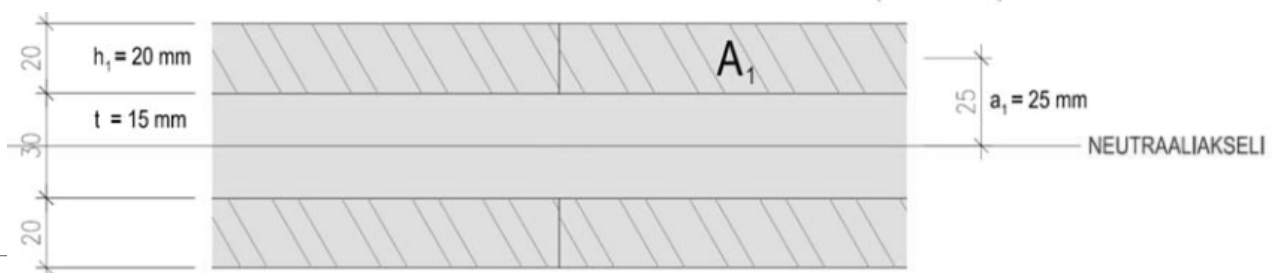
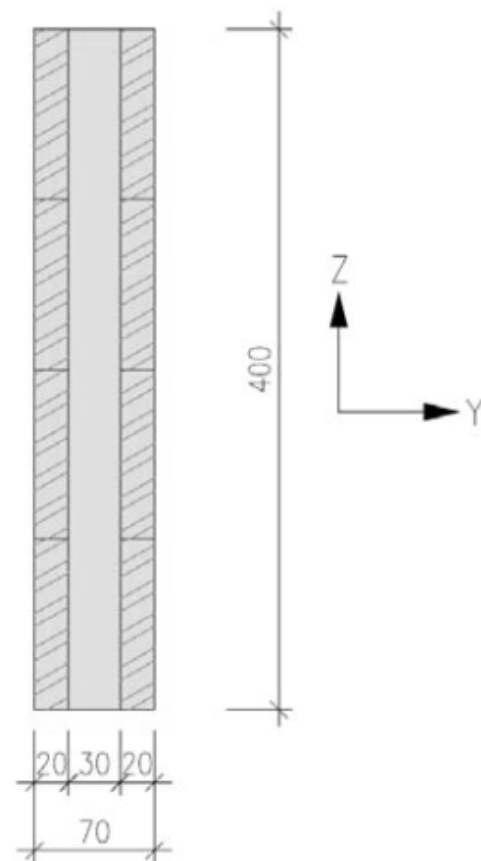
τ_d Leikkausjännityksen mitoitusarvo

V_d Leikkausvoiman mitoitusarvo

A Palkin poikkileikkauksen pinta-ala

5.3.6 Kiepsahduskestävyys

Kuorma tulee palkille kiepsahdustukien kautta ja tehollinen kiepsahduspituus on tukien väli. Tässä laskussa tarkastellaan viisikerroksisen CLT-palkin kolmea keskimmäistä kerrosta. Kiepsahduskestävyys Y-suuntaisen tehollisen jäyhyysmomentin ja Z-suuntaisen taivutusvastuksen avulla. Taivutusvastus W_y lasketaan huomioimalla vain pituussuuntaiset lamellit ja poikkisuuntaisen jäyhyysmomentti I_z lasketaan mitoitus lappeeltaan esimerkin mukaisesti, missä jännevälin on kiepsahdustukien väli l_{ef} . Vääntöjäyhyysmomentti lasketaan reunimmaisten lamellien poikkileikkaukselle. [35.]



$$A_1 = b \cdot h_1 \quad (27)$$

missä

A₁ Pintalamellin pinta-ala

b Pintalamellin leveys

h Palkin korkeus

Jäyhyysmomentin laskemiseen tarvittava liitoshyötysuhdekerroin γ_1 lasketaan kaavalla 4. Poikkisuuntainen jäyhyysmomentti I_z lasketaan kaavalla 28.

$$I_{z,1} = \frac{bh_1^3}{12} + \gamma_1 * A_1 * a_1^2 \quad (28)$$

Missä

b Palkin leveys

h Lamellin korkeus

γ_1 Liitoshyötysuhdekerroin

A₁ Lamellin pinta-ala

a₁ Lamellien etäisyys puolesta välistä

Tehollinen jäyhyysmomentti Z-akselin suuntaisesti.

$$I_{ef,z} = I_{z,1} * 2 \quad (29)$$

Taivutusvastus lasketaan pituussuuntaisten lamellien leveyden mukaan koko palkin korkeudelta [34].

$$W_{ef,y} = \frac{b_{ef}h^2}{6} \quad (30)$$

Missä

$W_{ef,y}$ Y-suuntainen tehollinen leikkausvastus

b Pituussuuntaisten lamellien yhteen laskettu leveys

h Palkin korkeus

Vääntöjäyhyysmomentti

$$I_{tor} = \frac{h * b_{ef}^3 * \left(1 - 0,63 * \frac{b_{ef}}{h}\right)}{3} \quad (31)$$

Missä

I_{tor} Vääntöjäyhyysmomentti

h Palkin korkeus

b Pituussuuntaisten lamellien yhteen laskettu leveys

$1-0,63$ Vakio

Momentin aiheuttama kriittinen jännitys

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_{ef,z} \cdot G_{0.05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_{ef,y}} \quad (32)$$

Missä

$I_{ef,z}$ Tehollinen jäyhyysmomentti Z-akselin suuntaisesti

I_{tor} Vääntöjäyhyysmomentti

$G_{0.05}$ Liukumoduuli vastakkaiseen suuntaan

$E_{0.05}$ Kimmomoduuli vastakkaiseen suuntaan

l_{ef} Kiepsahdustukien väli

$W_{ef,y}$ Y-suuntainen tehollinen leikkausvastus

5.3.7 Taipuma

Palkin taipuma mitoitetaan kuten laatan taipuma on mitoitettu eli kaavoilla 12–15. On huomioitava, että palkin taipumarajat ovat eri kuin laatan taipumatarkastelussa. Palkin tehollinen taivutusjäykkyys on pituussuuntaisten lamellin yhteen lasketun levyn mukaan, kun laatussa taivutusvastus lasketaan keskimmäisten lamellien yhteen lasketun paksuuden mukaan. [34.]

5.3.8 Palkin tukireaktiot

Palkin tukipaineet laskettiin käyttämällä Kuhmo CrossLam jäykistävän seinän tukipaineen kaavoja. Laskettaessa tukipaineita pitää huomioida pystysuuntaiset kantavat lamellit ja yksittäisen lamellin puristuslujuus. Ensin lasketaan tuen pituus, jonka jälkeen tulee tukipainekestävyys ja tuen ankkurointi. [36.]

5.4 Pilarin mitoitus

Pilarin mitoittaminen ei olennaisesti eroa seinän mitoittamisesta. Molemmissa tapauksissa tarkastellaan taivutus- ja nurjahdusvastukset tehollisen jäyhyysmomentin kautta. Tämän opinnäytetyön tuottamassa laskentapohjassa voi käyttää korkeintaan viisi kerroksista CLT-rakennetta [37.]

5.4.1 Taivutusvastus

Jäyhyysmomentit lasketaan kaavoilla 1–4. Heikomman suunnan tehollinen jäyhyysmomentti on heikonsuuntaisten lamellien yhteen laskettu jäyhyysmomentti. Taivutusvastus ja taivutuskestävyys lasketaan välipohjan laskuissa käytetyillä kaavoilla 5–10 [34.]

5.4.2 Nurjahduskestävyys

Pilarin nurjahduskestävyys lasketaan jäyhyysmomentin avulla. Lasketaan poikkileikkauksen avulla tehollinen jäyhyysmomentti, tehollinen taivutusvastus, staattinen momentti, tehollinen pinta-ala ja nurjahduskestävyys. Laskemissa tarkastellaan heikomman suunnan nurjahduskestävyys. [37.]

5.4.3 Taivutus- ja puristuskestävyys

Pilarin yhdistetyssä taivutus- ja puristuskestävyyden mitoitus lasketaan k_m -kertoimella. k_m -kerroin tulee poikkileikkauksen muodosta.

$$k_m \text{ kerroin } \begin{cases} 0,7 & \text{Suorakaidepoikkileikkaukset} \\ 1,0 & \text{Muut poikkileikkaukset} \end{cases}$$

Pilarin taivutuksen ja puristuksen yhdistelyt tehdään kaavoilla 33 ja 34

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m * \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} * f_{c,0,d}} + k_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

(33, 34)

Missä

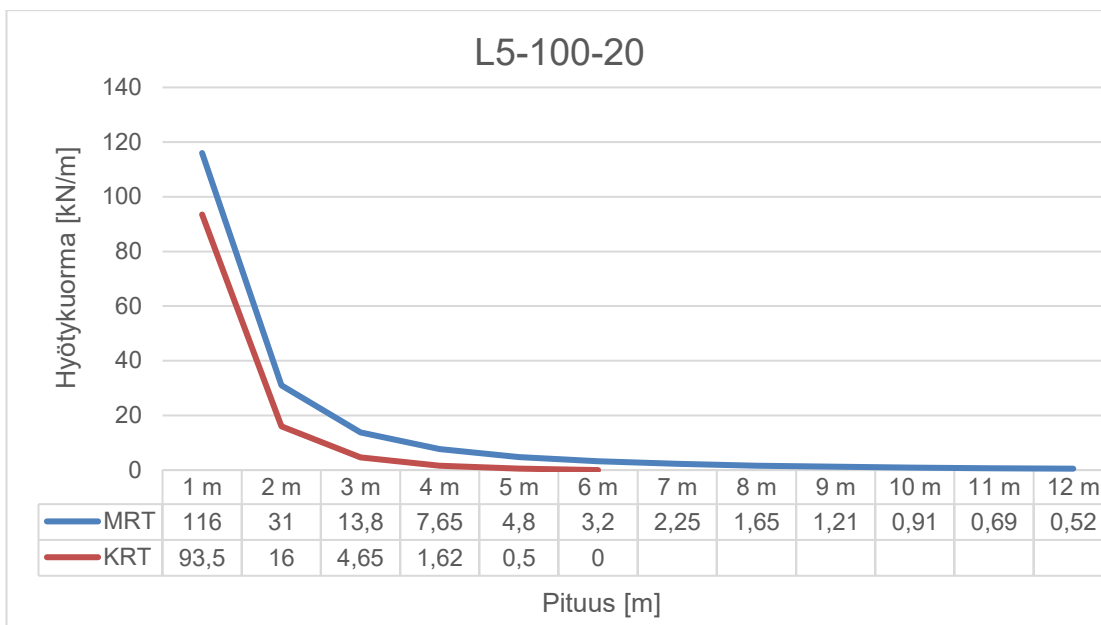
 $\sigma_{c,0,d}$ Puristuksen aiheuttama jännitys $f_{c,0,d}$ Laskennallinen puristuslujuus $\sigma_{m,z,d}, \sigma_{m,y,d}$ Jännityksen mitoitusarvot $f_{m,z,d}, f_{m,y,d}$ Laskennallinen taivutusvastus

6 Esivalintataulukot

Laatan laskentapohjan avulla tuotettiin esivalintataulukko rakennesuunnittelun avuksi. Taulukoitiin Kuhmon viisikerroksisen CLT-laatan L-profiilit. Kuhmon CLT-laattojen suurin ilmoitettu valmistuspituus on 12 metriä.

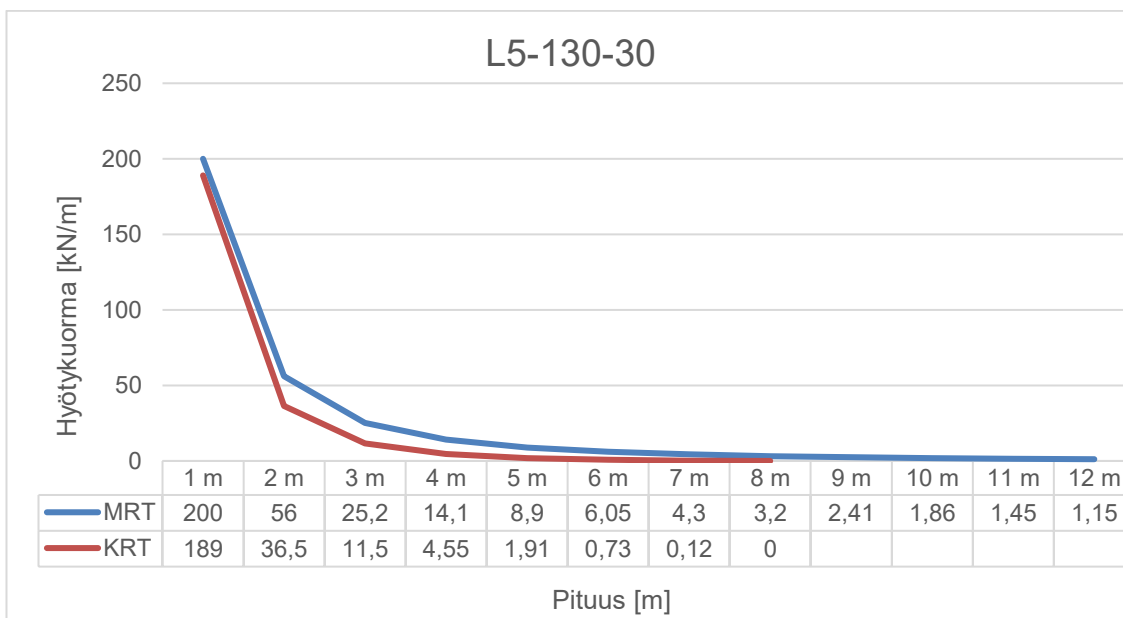
Tutkittiin taipumaa murtorajatilassa sekä käyttörajatilassa. Rakenteeseen vaikutti hyötykuorma sekä omapaino. Käyttörajatilan tarkastelussa suurin sallittu lopullinen taipuma on L/300 arvo. Murtorajatilanteessa tarkasteltiin taivutuskestävyyttä suhteessa taivutusjännitykseen.

Ensin taulukoitiin ohuin L5-100-20 profiilin laatta. Tällä 100 mm ohuella laatta profiililla tuli käyttörajan taipuman raja vastaan 5955 mm kohdalla, kun ei ollut yhtään hyötykuormaa.

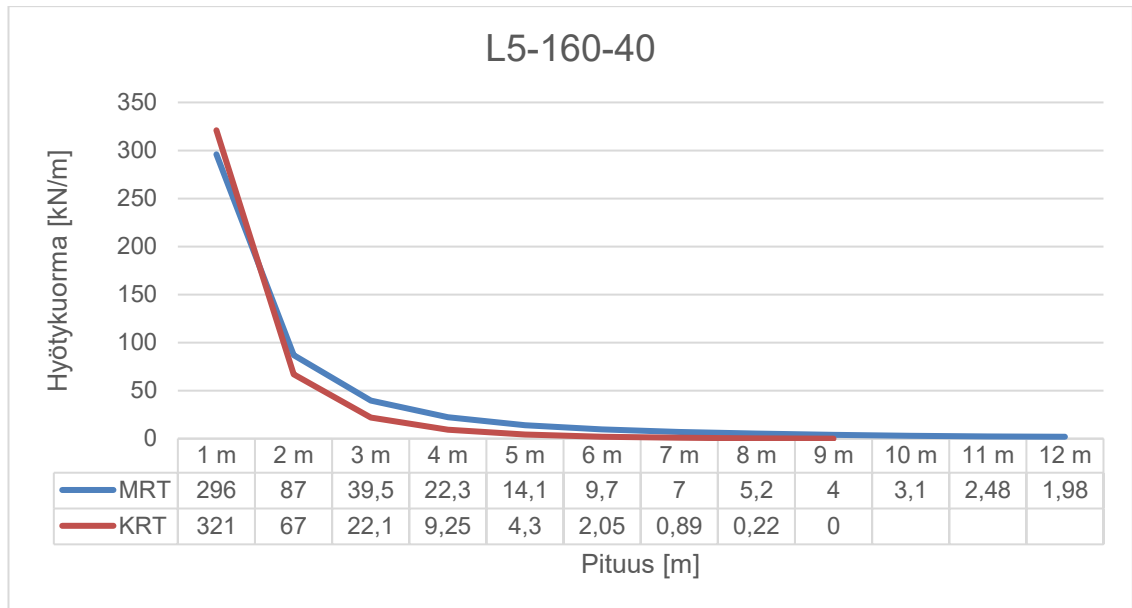


Kuva 26. Kuhmo L5-100-20 laatan taipuma.

Seuraavan laatan käyttörajatilan maksi nolla hyötykuormalla oli 7,3 m kohdalla. Käyttörajatilan suurin hyötykuorman paino oli laatan maksi pituudessa eli 12 m kohdalla 1.15 kN/m.

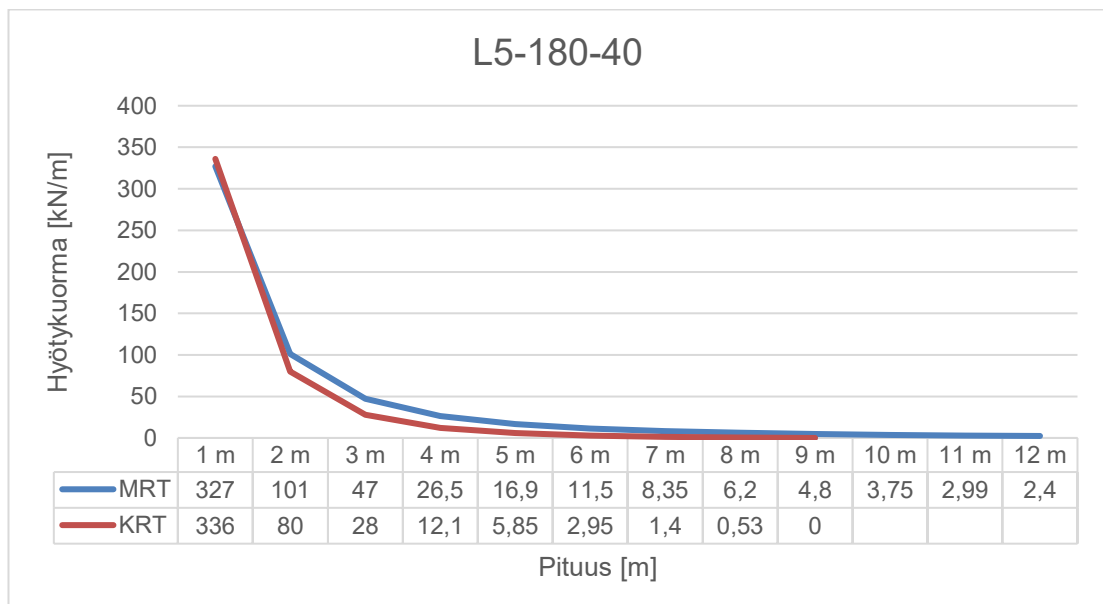


Kuva 27. Kuhmo L5-130-20 laatan taipuma.

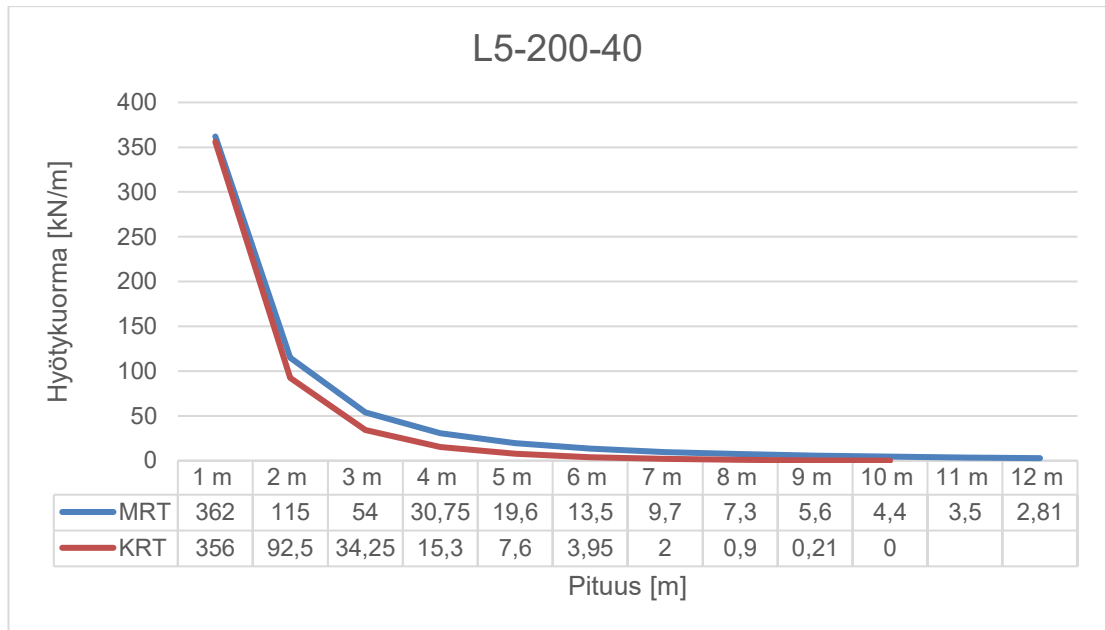


Kuva 28. Kuhmo L5-160-40 laatan taipuma.

Kahdesta suurimmasta viisikerroksisesta laattaprofiilista voi huomata, että metrin matkalla käyttörajatilanteen suurin sallittu kuorma on suurempi kuin murtorajatilanteen suurin kuorma. Käytännössä kuitenkin rakenteen kestävyys on se rajoittava tekijä eikä käytön mukaisen taipuman aiheuttama taipuma.



Kuva 29. Kuhmo L5-180-40 laatan taipuma.



Kuva 30. Kuhmo L5-200-40 Laatan taipuma.

7 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä luotiin laskentapohjat Vahanen Suunnittelupalvelut Oy:n käyttöön. Kerättiin tietopaketti laajoista aihealueista, joiden kautta lukija saa näkemystä puumateriaalista ja CLT-elementillä rakentamisesta.

Puu on rakentamisen materiaaleista se, mihin liitetään monesti käsitteet ympäristöystävällisyys, tulipalo, home, käyttäjä mukavuus, kallis, palosuojaus. Näiden ominaisuuksien avaamisen tämän työn kautta oli mielenkiintoista ja samalla haasteellista. Työtä tehdessä suomalaiset palomääräykset päivittyivät eikä Euroopan unionissa ehditty yhtenäistämään rakenteiden suunnittelustandardia.

Perehdyin mitoittamisessa palkin, pilarin ja laatan mitoittamiseen. Niistä luotujen laskentapohjien avulla voidaan toteuttaa laskelmia CLT-elementtirakentamisessa. Laskentapohjat toimivat maksimissaan viisikerroksisten CLT-rakenteiden kanssa. Laskentapohjien luominen opetti paljon CLT-suunnitteluun liittyvissä asioissa. Mitoitustilanteessa pitää huomioida tarkasteluleveys tai tilanteen mukaisten lamellikerrosten osuus, kun tehdään laskelmia.

Kehitysmahdollisuutena tähän työhön voisi olla jäykistävien ja mastorakenteisten CLT-rakenteiden tutkiminen sekä niiden laskentapohjien kehittäminen.

Lähteet

1. Puuinfo, verkkojulkaisu. Monikerroslevy (CLT) <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööriuotteet/monikerroslevy-clt/> viitattu 26.8.2020
2. Stora Enso CLT - ETA
3. Canadian CLT Handbook, FPInnovations, Sylvain Gagnon, Chapter 2, 2019 Edition.
4. Stora Enso, CLT by Stora Enso- technical brochure-EN
5. Oy CrossLam Kuhmo Ltd, Verkkoaineisto. Syrjäliimaamaton CLT - paras Suomen olosuhteisiin, julkaistu 13.11.2020. <https://www.crosslam.fi/uutiset/uutiset/syrjaliimaamaton-clt-paras-suomen-olosuhteisiin.html> Viitattu 27.11.2020
6. Puuinfo, verkkojulkaisu. Puutieto - puun käytön ympäristövaikutukset puuhun sitoutuu hiiltä. julkaistu 23.06.2020. <https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puuhun-sitoutuu-hiilta/> .Viitattu 27.11.2020
7. Stora Enso CLT Image brochure final 2016-04-25.
8. Helsingin kaupunki, verkkojulkaisu. Kehittyvä kerrostalo Hankkeet: Puu- ja betonirakentamisen vertailu. Julkaistu 17.07.2020. <https://www.hel.fi/kanslia/kehityva-kerrostalo-fi/hankkeet/puu-ja-betonirakentamisen-vertailu> Viitattu 30.11.2020
9. Ympäristöministeriö, verkkojulkaisu. Vähähiilinen rakentaminen https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Vahahiilinen_rakentaminen Viitattu 10.12.2020
10. Puurakentaminen, Unto Siikanen, Rakennustieto 2016, s 43-47
11. RIL 205-1-2017, Puurakenteiden suunnitteluohje Eurokoodi EN 1995-1-1

12. Puuinfo, verkkojulkaisu. Puutieto puun ominaisuudet, Lämpötekniisiä ominaisuuksia. Julkaistu 25.06.2020 <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lampoteknisia-ominaisuuksia/> Viitattu 10.12.2020
13. Finnlog, verkkojulkaisu. Lämmöneristävyys. <https://finnlog.fi/tekniset-tiedot/tieto-clt-talosta/lammoneristavyys/> Viitattu 27.11.2020
14. Puuinfo, verkkojulkaisu. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -täydennyskoulutus (Vaapu) luentoaineisto, luento 47. Julkaistu 29.06.2020 <https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-luentoaineistot/> Viitattu 14.10.2020
15. Lämpöpuu yhdistys ry, verkkojulkaisu. ThermoWood. <http://thermowood.palvelu.fi/1> Viitattu 14.10.2020
16. Puuinfo, verkkojulkaisu. Puutieto – sahatavara ja sen jalosteet. Paineekyllästetty sahatavara. Julkaistu 22.06.2020. <https://puuinfo.fi/puutieto/sahatavara-ja-sen-jalosteet/painekyllastetty-sahatavara/> viitattu 14.10.2020
17. Puuinfo, verkkojulkaisu. Puupinnat - pintakäsittely sisätiloissa. Julkaistu 23.04.2020. <https://puuinfo.fi/puupinnat/puun-pintakasittelyt/> Viitattu 14.10.2020
18. Loppuraportti rakennetaan puusta – 48928, Suomen metsäkeskus, Anu Nurkka, 2020
19. RT ohjekortti 103131, Rakennuksen paloluokan määrittäminen ja palotekniset vaatimukset, 2019.
20. Ympäristöministeriö, asetus rakennusten paloturvallisuudesta annetun YM asetuksen muuttamisesta. Viitattu 22.01.2021
21. Puuinfo, verkkojulkaisu. Suunnittelu – määräykset, Paloturvallisuus. Julkaistu 13.07.2020 <https://puuinfo.fi/suunnittelu/maaraykset/paloturvallisuus/> Viitattu 15.10.2021

22. Paloturvallinen puutalo, Tero Lahtela, puuinfo, 2018
23. Ympäristöministeriö, verkkojulkaisu. Rakentamismääräyskokoelma.
<https://www.ym.fi/rakentamismääräykset/> Viitattu 10.10.2020
24. Effect of adhesives and ply configuration on the fire performance of southern pine cross-laminated timber, Laura Hashburg & co.
25. Suomalainen puukerrostalo, Janne Tolppanen, 2013
26. Ääneneristys puutalossa, Mikko Viljakainen, Wood Focus Oy, 2004
27. Rakennusfysiikka, Unto Siikanen, 2014
28. Puuinfo, verkkojulkaisu. Rakenteet-massiivipuulevyrakenteet. Julkaistu 10.07.2020 <https://puuinfo.fi/rakenteet/massiivipuulevyrakenteet/aaneneristys/> Viitattu 21.01.2021
29. RIL 234-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu, akustiikan perusteet. Markku Hirvonen 2007.
30. YM, Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017
31. CLT-by-Stora-Enso-technical-brochure-EN
32. Canadian CLT Handbook, FPInnovations, Mohammad Mohammad, Chapter 5, 2019 Edition
33. The CLT handbook, Swedish wood, Eric Borgström & Johan Fröbel, 2019
34. Oy CrossLam Kuhmo Ltd, verkkojulkaisu. Crosslamin materiaalipankki.
<https://www.crosslam.fi/suunnittelijat/materiaalipankki.html> - välipohjan kestävyys. Viitattu 21.02.2021

35. Puuinfo, verkkojulkaisu. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -täydennyskoulutus (Vaapu), esimerkkilaskelmat. <https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-esimerkkilaskelmat/> Viitattu 21.02.2021
36. Oy CrossLam Kuhmo Ltd, verkkojulkaisu. Crosslamin materiaalipankki. <https://www.crosslam.fi/suunnittelijat/materiaalipankki.html> – jäykistävän seinän kestävyys. Viitattu 26.2.2021
37. Oy CrossLam Kuhmo Ltd, verkkojulkaisu. Crosslamin materiaalipankki. <https://www.crosslam.fi/suunnittelijat/materiaalipankki.html> – seinän nurjahduskestävyys. Viitattu 26.2.2021

CALCULATIS LASKELMAT

Stora Enson Calculatis ohjelman tuottamat tulokset CLT-laatan mitoittamisesta. Laboratoriokoetta vastaava rakenne.

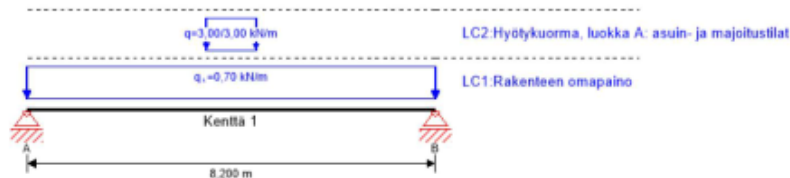
Markku Hentonen

Projekti
Elementti

CLT Laatan Mitoitus
-

Sivu 1
Päivämäärä 25.02.2021

Järjestelmä



Globaalikäyttöaste						150 %			
ULS	30 %	ULS Tuli	0 %	SLS	150 %	SLS Värähtely	0 %	Kannatus	-1 %

Poikkileikkaus: CLT 140 L5s

Kerros	Paksuus	Suuntautuminen	Materiaalit	
1	40,0 mm	0°	C24 kuusi	ETA (2019)
2	20,0 mm	90°	C24 kuusi	ETA (2019)
3	20,0 mm	0°	C24 kuusi	ETA (2019)
4	20,0 mm	90°	C24 kuusi	ETA (2019)
5	40,0 mm	0°	C24 kuusi	ETA (2019)
t_{CLT}	140,0 mm			

Materiaaliarvot

Materiaalit	$f_{m,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{r,k \min}$	$E_{0,mean}$	G_{mean}	$G_{r,mean}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
C24 kuusi ETA (2019)	24,00	14,00	0,12	21,00	2,50	4,00	1,25	12 000,00	690,00	50,00

Kuorma

Kuormitusryhmät

	Kuormaryhmä	Typ	Kesto aika	Kmod	γ_{ref}	γ_{sup}	ψ_0	ψ_1	ψ_2
LC1	Rakenteen omapaino	G	Pysyvä	0,6	1	1,35	1	1	1
LC2	Hyötykuorma, luokka A: asuin- ja majoitustilat	Q	Keskipitkä	0,8	0	1,5	0,7	0,5	0,3

LC1:Rakenteen omapaino

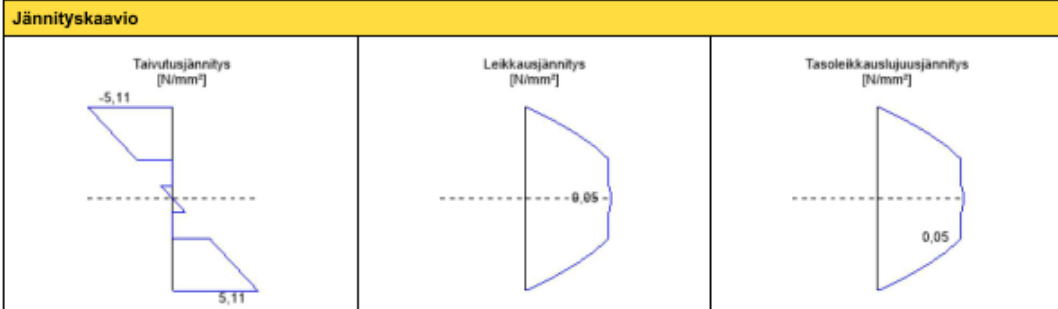
Jatkuva kuormitus	
Kenttä	Kuormitus aluksi
	[kN/m]
1	0,70

LC2:Hyötykuorma, luokka A: asuin- ja majoitustilat

Puolisuunnikkakuorma				
Kenttä	Etäisyys alkupisteestä	Kuormitus aluksi	Kuormitus loppuiksi	Kuormituksen pituus
	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[m]
1	3,600	3,00	3,00	1,000



© 2021 - Calculatis by Stora Enso - Version 3.45.0



Taivutusjännitysanalyysit

$M_{y,d} = 15,41$ kNm	$f_{m,k} = 24,00$ N/mm ²
$N_{i,d} = 0,00$ kN	$\gamma_m = 1,25$ -
	$k_{mod} = 0,80$ -
	$k_{sys,\gamma} = 1,10$ -
	$k_{hom} = 1,00$ -
	$k_u = 1,00$ -
$\sigma_{i,d} = 0,00$ N/mm ²	$f_{i,d} = 8,96$ N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} = -5,11$ N/mm ² <	$f_{m,y,d} = 16,90$ N/mm ² ✓

Käyttöaste 30 %

Leikkausjännitysanalyysi

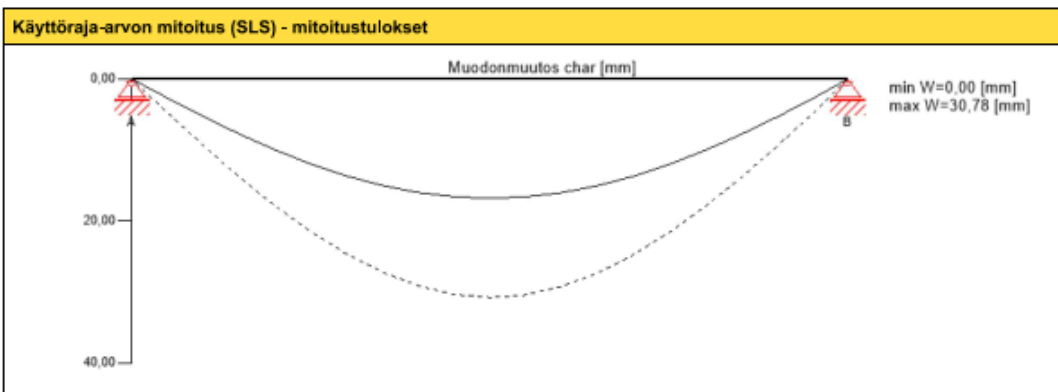
$V_d = 5,54$ kN	$f_{v,k} = 4,00$ N/mm ²
	$\gamma_m = 1,25$ -
	$k_{mod} = 0,80$ -
$\tau_{v,d} = 0,05$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2,56$ N/mm ² ✓

Käyttöaste 2 %

Leikkausjujuusanalyysi

$V_d = 5,54$ kN	$f_{r,k} = 1,25$ N/mm ²
	$\gamma_m = 1,25$ -
	$k_{mod} = 0,80$ -
$\tau_{v,d} = 0,05$ N/mm ² <	$f_{r,d} = 0,80$ N/mm ² ✓

Käyttöaste 7 %

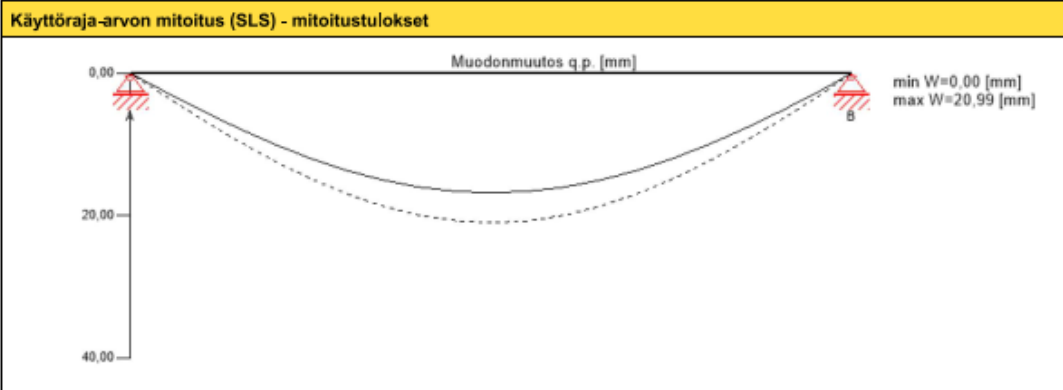


Markku Hentonen

Projekti
Elementti

CLT Laatan Mitoitus
-

Sivu 4
Päivämäärä 02.2021



$w_{inst} = w[char]$					
Kenttä	K_{def}	Raja	w_{inst}	$w_{okc.}$	Suhde
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0,8	L/400	20,5	30,8	150 %

$w_{lin} = w[char] + w[q.p.]*k_{def}$					
Kenttä	K_{def}	Raja	w_{inst}	$w_{okc.}$	Suhde
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0,8	L/200	41,0	47,6	116 %

$w_{net,fin} = w[q.p.] + w[q.p.]*k_{def}$					
Kenttä	K_{def}	Raja	w_{inst}	$w_{okc.}$	Suhde
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0,8	L/300	27,3	37,8	138 %

Kannatuksen vaikutus			
Kuormaryhmä	k_{mod}	A_v	B_v
		[kN]	
Rakenteen omapaino	0,6	2,87	2,87
		2,87	2,87
Hyötykuorma, luokka A: asuin- ja majoitustilat	0,8	1,50	1,50
		0,00	0,00

Viiteasiakirjat tätä analyysiä varten	
Arvonimi englanniksi	Kuvaus
EN 338	EN 338 - Kantavat puurakenteet — Lujisuusluokat
EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
ETA-14/0349	Eurooppalainen tekninen arviointi ETA-14/0349 of 02.10.2014
Expertise Rolling shear - no edge gluing, H.J. Blass	Asiantuntemus CLT:n tasoleikkauslujuuden ominaisarvolle
EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus
Technical expertise 122/2011/02: analysis of load bearing capacity and separation performance of CLT elements	Stora Enso CLT:n CLT-rakenteiden kantokyvyn ja eristemateriaalien kriteerien vahvistaminen
Technical expertise 2434/2012 - BB: failure time t_f of gypsum fire boards (GKF) according to ON B 3410	Asiantuntemus palokipsilevyjen murtuma-ajassa t_f ON B3410 mukaisesti ja kipsilevyjen DF-tyypin EN 520 mukaisesti
EN 1990	EN 1990 - Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet
SFS-EN 1995-1-1 NA	SFS EN 1995-1-1 - Suomi - Kansallinen liite - Kansallisesti määritetyt parametrit – Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu – Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
RIL 205-1-2009	CrossLam Kuhmo CLT lisäykset RIL 205-1-2009 ohjeeseen
Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe	Paloturvallisuus puurakennuksissa - tekninen ohje Eurooppaan; julkaisija SP Ruotsin tekninen tutkimuslaitos
National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12	ÖNORM EN 1995-1-2 - Kansalliset määritelmät liittyen ÖNORM EN 1995-1-2, kansalliset huomautukset ja kansalliset täydennykset luvussa 12



© 2021 - Calculatis by Stora Enso - Version 3.45.0

Laskuesimerkki CLT-laattarakenteesta

VÄLIPOHJA LAATTA

Seuraamusluokka

K_{fi}

1,0

Kuormitus

Hyötykuorma qk
Omapaino gk
CLT Paino

21 kN/m

0,90 kN/m

5 kN/m²

Kokonaispituus

L

2100 mm

Tarkastelu leveys

b

1000 mm

Pituussuiuntaisten lamellien pinta-ala

A1 40000 mm²

A2 40000 mm²

Lamellikerrokset

[mm]

[mm]

1 40

d1 20

2 30

t1 30

3 40

a1 70

4 30

a2 10

5 40

h1 40

h2 40

CLT:n korkeus

180 mm

Tehollinen jäyhyysmomentti

Liitoshyötysuhdekerroin	Y_1	0,678
Pituussuuntaisten lamellikerrosten jäyhyysmomentti	$I_{y,1}$	138201556,5 mm ⁴
	$I_{y,3}$	5333333,3 mm ⁴
	$I_{y,5}$	138201556,5 mm ⁴
	$I_{ef,L}$	281736446,3 mm ⁴

Pituussuuntaisten lamellien pintaala	A1	40000 mm ²
	A2	40000 mm ²

Tehollinen taivutusvastus

Poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastu $W_{ef,L}$	4176785,47 mm ³
---	----------------------------

Tehollinen staattinen momentti

$S_{ef,1}$	1898117,47 mm ³
$S_{ef,2}$	2098117,47 mm ³

Taivutuskestävyys

	K_{mod}	0,8
	γ_m	1,25
Lamellissa lautoja per metri	kpl	10
Kuormanjakoluku, min	K_{sys}	$\{min$ 1,25 1,2
Tasoleikkauslujuus, Kuhmo, pituussuuntainen	$F_{Rk,0}$	1,03
Taivutusmomentti	$M_{y,d}$	17,93 kNm
Taivutusjännityksen mitoitusarvo	$\sigma_{m,y,d}$	4,29 N/mm ²
Taivutuslujuuden mitoitusarvo	$f_{m,d}$	18,43 N/mm ²
	KA	23 %

Leikkauskestävyys liimasaumassa 1 ja 2

Poikittaislamellin leikkausjännitys voidaan olettaa samaksi koko lamellin korkeudella, joten liimasaumassa 1 on sama leikkausjännitys kuin liimasaumassa 2.

V_d	34,16 kN
T_d	0,23 N/mm ²
$F_{r,d,0}$	0,66
KA	35 %

Leikkauskestävyys neutraaliakselilla

Leikkausvoiman mitoitusarvo	V_d	34,16 kN
Tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo	T_d	0,25 N/mm ²
Leikkauslujuus mitoitusarvo	$f_{v,d}$	2,56 N/mm ²
	KA	10 %

Taipuma

Virumakerroin	K_{def}	0,8
Psii	Ψ_2	0,3
	$W_{inst,g}$	0,07 mm
	$W_{inst,q}$	1,64 mm
	ΣW_{inst}	1,71 mm
Sallittu hetkellinen taipuma	$L/400$	5,25 mm
	W_{fin}	2,16 mm
Sallittu lopullinen taipuma	$L/300$	7,0 mm
	KA	31 %

Tehollinen taivutusjäykkyys poikittaisuunnassa

Tarkastellaan lamellin keski-osaa, missä A1 on laatan poikittaisen lamellikerroksen pintaala.

Tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys	b	1000 mm
CLT-levyn leveys, kohtisuoraan jänneväliä vastaan	L	2400 mm

Lamellit	2	30 mm
	3	40 mm
	4	30 mm
	t	20 mm
	h ₁	30 mm
	a ₁	35 mm
	A ₁	30000 mm ²

Y₁ 0,846101178

I_{y,1} 3,33E+07 mm⁴

Lattian poikittaiseen suuntaan oleva taivutus EI_{ef,B} 6,67E+07 mm⁴

I_{ef,B} 6,67E-05 m⁴

(EI_{ef})_B 766917,02 Nm²

Värähtelymitoitus

E_{0,mean} 11500000000 N/m²

I_{ef,L} 0,000281736 m⁴



Lattian kantavaan suuntaan oleva taivutus (EI_{ef})_L 3,2E+06 Nm²

Ominaisaajuus

m 133 kg/m²

f₁ 50,22 Hz >9

Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma

	F		1 kN	
tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys	s		1 m	
huoneen suurin mitta (ks. RIL 205-1-2009 kuva 7.2-F1)			6 m	
Lattiarakenteen leveys	B		2,4 m	
Käytetään clt-levyn leveyttä, koska levyjen väliset saumat ovat nivelellisiä				
Välipohjan jänneväli	L		2,1 m	
	(E _{ef})L		3,24E+06 Nm ²	
Lattiapalkkien etäisyydestä riippuva kerroin K _s			0,70 > k _s	1,14
	min	$\left\{ \begin{array}{l} \delta = \\ \delta = \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 0,05 \text{ mm} \\ 0,06 \text{ mm} \end{array}$	
			< 0,5 mm = OK	

Laatan kantavuus taulukot

Profiili	Pituus	MRT	KRT
L5-100-20	1 m	116	93,5
20-20-20-20-20	2 m	31	16
	3 m	13,8	4,65
	4 m	7,65	1,62
	5 m	4,8	0,5
	6 m	3,2	5955 mm
	7 m	2,25	
	8 m	1,65	
	9 m	1,21	
	10 m	0,91	
	11 m	0,69	
	12 m	0,52	

Profiili	Pituus	MRT	KRT
L5-130-30	1 m	200	189
30-20-30-20-30	2 m	56	36,5
	3 m	25,2	11,5
	4 m	14,1	4,55
	5 m	8,9	1,91
	6 m	6,05	0,73
	7 m	4,3	0,12
	8 m	3,2	7300 mm
	9 m	2,41	
	10 m	1,86	
	11 m	1,45	
	12 m	1,15	

Profiili	Pituus	MRT	KRT
L5-160-40	1 m	296	321
40-20-40-20-40	2 m	87	67
	3 m	39,5	22,1
	4 m	22,3	9,25
	5 m	14,1	4,3
	6 m	9,7	2,05
	7 m	7	0,89
	8 m	5,2	0,22
	9 m	4	8470 mm
	10 m	3,1	
	11 m	2,48	
	12 m	1,98	

Profiili	Pituus	MRT	KRT
L5-180-40	1 m	327	336
40-30-40-30-40	2 m	101	80
	3 m	47	28
	4 m	26,5	12,1
	5 m	16,9	5,85
	6 m	11,5	2,95
	7 m	8,35	1,4
	8 m	6,2	0,53
	9 m	4,8	8965 mm
	10 m	3,75	
	11 m	2,99	
	12 m	2,4	

Profiili	Pituus	MRT	KRT
L5-200-40	1 m	362	356
40-40-40-40-40	2 m	115	92,5
	3 m	54	34,25
	4 m	30,75	15,3
	5 m	19,6	7,6
	6 m	13,5	3,95
	7 m	9,7	2
	8 m	7,3	0,9
	9 m	5,6	0,21
	10 m	4,4	9440 mm
	11 m	3,5	
	12 m	2,81	

Laboratoriokokeen mittau tulokset

CLT:n MITTAUSTULOKSET				
Pvm.	AIKA	MITTARI 1	MITTARI 2	MITTARI 3
17.syys	10:45	-8,44	-13,51	-8,41
	10:55	-8,49	-13,60	-8,47
	11:05	-8,52	-13,63	-8,49
	11:15	-8,53	-13,66	-8,50
	11:25	-8,55	-13,68	-8,52
	11:35	-8,56	-13,69	-8,53
	11:45	-8,57	-13,71	-8,54
	11:55	-8,58	-13,72	-8,54
	12:05	-8,58	-13,73	-8,55
	12:15	-8,59	-13,74	-8,56
	12:25	-8,60	-13,75	-8,57
	12:35	-8,61	-13,76	-8,57
12:45	-8,61	-13,76	-8,58	
18.syys	10:45	-9,03	-14,23	-8,98
	10:55	-9,03	-14,24	-8,98
	11:05	-9,03	-14,24	-8,98
	11:15	-9,03	-14,24	-8,98
	11:25	-9,04	-14,24	-8,98
	11:35	-9,04	-14,25	-8,98
	11:45	-9,04	-14,25	-8,99
24.syys	9:35	-9,36	-14,94	-9,34
	9:45	-9,36	-14,95	-9,35
	10:15	-9,36	-14,95	-9,35
	10:45	-9,36	-14,95	-9,35