Hannes Ojalehto

Laskentapohjien luonti CLT-rakenteiden mitoittamiseen

Insinööri (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Kevät 2019

KAMK • University of Applied Sciences

Tiivistelmä

Tekijä(t): Hannes Ojalehto

Työn nimi: Laskentapohjien luonti CLT-rakenteiden mitoittamiseen

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Asiasanat: CLT, CLT-rakenne, mitoitus, puurakenteet, laskentapohja

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli tehdä laskentapohjat CLT-rakenteisten seinien, pilareiden ja palkkien mitoittamiseen Mathcad-ohjelmistolle. Laskentapohjien mitoitus tulisi soveltua kaikille enintään 5-lamellisille CLT-levyille valmistajasta riippumatta. Laskentapohjat on toteutettu Suunnittelu Laukka Oy:n toimesta ja tarkoitettu ainoastaan yrityksen omaan käyttöön.

Mitoitus laskentapohjissa perustuu Suomen Rakennusinsinöörien liiton julkaisemiin RIL 205-1-2017 ja RIL 205-2-2007 puurakenteiden suunnitteluohjeisiin sekä yleisiä suunnitteluohjeita täydentäviin lisäohjeisiin koskien CLT-tuotteita. RIL 205-1-2017- ja RIL 205-2-2007 -julkaisujen mukainen mitoitus perustuu Eurokoodi 5:n suunnittelustandardin SFS-EN 1995 osiin 1-1 ja 1-2.

Laskentapohjia toteutettiin kolme, kullekin rakenneosalle oma mitoituspohja. Seinän ja pilarin laskentapohjassa tutkitaan rakenteen nurjahdus- ja leikkauskestävyyttä murtorajatilassa sekä onnettomuusrajatilassa, palkin laskentapohjassa rakenteen taivutus-, leikkaus- ja kiepahduskestävyyttä. Jokaiselle rakenneosalle tarkistetaan myös käyttörajatilan mukainen taipuma. Rakenteen kuormitukset syötetään laskentapohjiin valmiiksi yhdisteltyinä kuormitusyhdistelminä.

Tässä työssä toteutetut laskentapohjat soveltuvat kolmesta tai viidestä lamellikerroksesta koostuvan CLT-levyn rakenteelliseen mitoittamiseen seinä-, pilari- ja palkkirakenteissa.

Abstract

Author(s): Hannes Ojalehto

Title of the Publication: Structural Design of CLT Components: Calculation Templates

Degree Title: Bachelor of Engineering, Construction Engineering

Keywords: CLT, CLT structure, design, wood structures, calculation template

The aim of this thesis was to make calculation templates for the structural design of CLT structured walls, pillars and beams for Mathcad software. The design of the calculation templates should be suitable for all CLT discs up to 5 lamels, regardless of the manufacturer. The calculation templates have been implemented by Suunnittelu Laukka Oy and are intended for the company's own use only.

The design is based on the RIL 205-1-2017 and RIL 205-2-2007 wood structure design guidelines, published by the Finnish Association of Civil Engineers RIL and additional guidelines for CLT products for general design instructions. The design according to RIL 205-1-2017 and RIL 205-2-2007 is based on sections 1-1 and 1-2 of the design code SFS-EN 1995 of the Eurocode 5.

In this thesis, there are three calculation templates. The wall and pillar computation template examines the buckling resistance and shear resistance of the structure in the ultimate limit state and in the accident limit state, in the beam calculation template the bending, cutting and spin resistance of the structure. The deflection according to the serviceability limit state is also checked for each component. Loads of the structure are brought into the calculation templates as pre-combined load combinations.

The calculation templates used in this work are suitable for the structural dimensioning of a CLT board consisting of three or five lamellar layers in wall, pillar and beam structures.

Alkusanat

Tässä työssä käsitellään CLT-rakenteiden mitoitusta ja laaditaan laskentapohjat seinä-, pilari- ja palkkirakenneosille. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Suunnittelu Laukka Oy.

Tilaajan puolelta työtä ovat ohjanneet Heikki Ainasoja ja Pertti Heinonen. Ohjaavana opettajana toimi Kajaanin ammattikorkeakoulun rakennustekniikan opettaja Matti Tiainen.

Kiitokset mielenkiintoisesta ja opettavaisesta opinnäytetyön aiheesta ja työharjoittelusta Heikki Ainasojalle. Kiitos myös Pertti Heinoselle panoksesta opinnäytetyön ohjaamisessa.

Sisällys

1 Johdanto 1

2 CLT-rakenteet 2

3 CLT-elementtien valmistajat 4

4 Mitoituksen perusteet 6

5 CLT-seinärakenteen mitoitus 9

5.1 Tehokliset poikkileikkausarvot 10

5.2 Mitoitus taivutukselle murtorajatilassa 12

5.3 Mitoitus puristukselle murtorajatilassa 15

5.4 Mitoitus nurjahdukselle murtorajatilassa 18

5.5 Mitoitus leikkaukselle murtorajatilassa 19

5.6 Mitoitus taipumalle käyttörajatilassa 21

5.7 Mitoitus palotilanteessa 24

6 CLT-pilarirakenteen mitoitus 27

7 CLT-palkkirakenteen mitoitus 28

7.1 Tehokliset poikkileikkausarvot 29

7.2 Mitoitus taivutukselle murtorajatilassa 30

7.3 Mitoitus leikkaukselle murtorajatilassa 30

7.4 Kiepahduskestävyys 31

7.5 Mitoitus taipumalle käyttörajatilassa 34

7.6 Mitoitus palotilanteessa 37

8 Laskentapohjat 38

8.1 Toimintaperiaate 38

8.2 Toteutus 39

8.2.1 Rajaukset 40

8.2.2 Lähtöarvot 41

8.2.3 Tulokset 44

9 Analysointi 46

10 Yhteenveto 48

Lähteet 49

Symboliluettelo

Lyhenteet ja termit esitetään tekstissä kaavojen yhteydessä.

1 Johdanto

Tämän insinöörityön toimeksiantajana toimii Suunnittelu Laukka Oy, joka on rakenne- sekä elementtisuunnitteluun erikoistunut suunnittelutoimisto Pohjois-Pohjanmaalla Ylivieskassa. Suunnittelu Laukka Oy palvelee rakennusliikkeitä, julkisia rakentajia sekä teollisuusrakentajia. Asiakkaina on myös maatalouden toimijoita ja yksityisasiakkaita. Tässä työssä toteutetut laskentapohjat on räätälöity kyseisen yrityksen tarpeiden mukaan Mathcad 15 -laskentaohjelmistolle.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on luoda laskentapohjat CLT-rakenneosien mitoittamiseen kuormitusyhdistelmien avulla. Laskentapohjat toteutettiin seinä-, pilari- ja palkkirakenteille. Tässä työssä rakenteiden käyttöasteita tutkitaan kolmella kuormitusyhdistelmällä murtorajatilassa, käyttöasteita onnettomuusrajatilan mukaisella kuormitusyhdistelmällä palotilanteessa ja taipumaa käyttörajatilan mukaisella kuormitusyhdistelmällä.

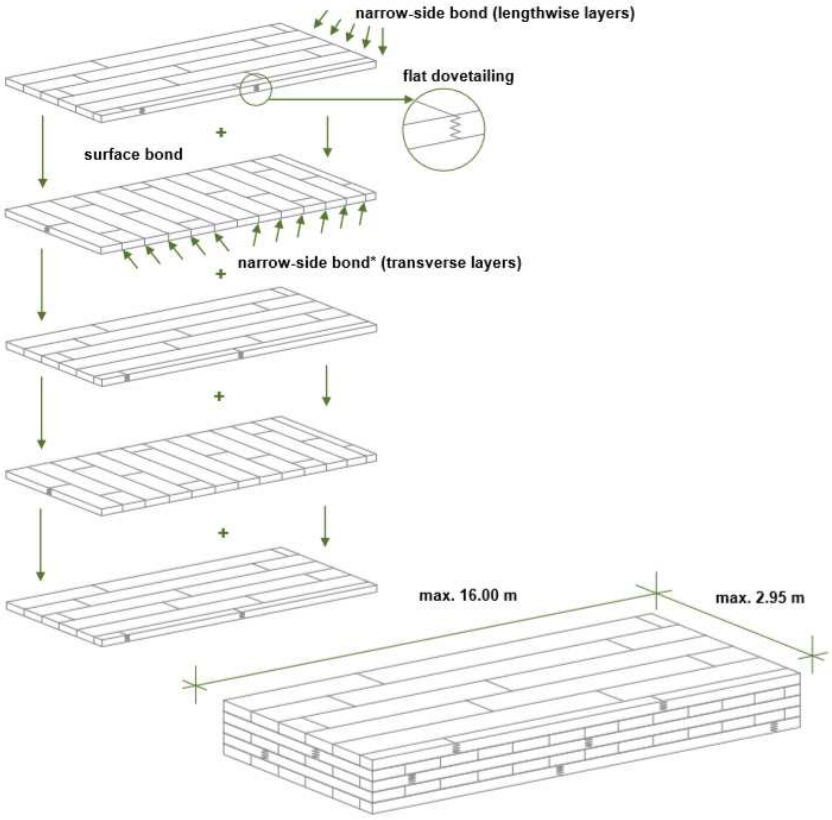
CLT on suhteellisen uusi massiivipuurakenteinen vaihtoehto puurakentamisessa, ja sitä voidaan pitää kilpailukykyisenä vaihtoehtona betonirakentamiselle. Puurakentamisella on tulevaisuudessa mahdollisuuksia kasvattaa asemaansa kerrostalorakentamisen sekä julkisten rakennusten rakentamisen markkinoilla Suomessa. CLT on lyhenne englannin kielen sanoista ”cross laminated timber”. Se tarkoittaa tuotetta, joka on valmistettu liimaamalla sahatavarasta muodostuvia lamellikerroksia ristiin toisiinsa nähden massiivipuulevyksi.

CLT-rakenneosien mitoittamiseen on olemassa valmistajien julkaisemia omia mitoitusohjelmia, mutta yhtenäistä mitoitusohjelmaa eri valmistajien välillä ei ollut saatavilla. Näin ollen opinnäytetyön toimeksiantajana toimivalle yritykselle ilmeni tarvetta kehittää CLT-rakenneosien mitoitukseen laskentapohjat yrityksen omaan käyttöön. Ohjeet CLT-rakenteiden mitoitukseen löytyvät Suomen Rakennusinsinöörien liiton julkaisemista RIL 205-2-2007 sekä RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohjeesta ja CLT-tuotteiden yleisiä suunnitteluohjeita täydentävistä lisäohjeista. Tässä työssä esitetty mitoitus on tehty joustavasti kootun kerrospalkin teoriaa soveltaen.

2 CLT-rakenteet

Ristiinliimatuista sahatavarakerroksista muodostuva massiivinen puulevy eli CLT-levy on suhteellisen uusi tuote Suomen markkinoilla. Keski-Euroopassa CLT rakentaminen on hyvin suosittua ja odotettavissa on CLT-tuotannon kasvua myös Suomessa kokemusten karttuessa ja kehityksen jatkuessa. CLT-levyjä on mahdollista käyttää monipuolisesti rakennuksen kantavissa, jäykistävissä ja ei-kantavissa rakenteissa, kuten ulko- ja väliseinissä sekä ylä-, väli- ja alapohjissa. CLT on rakennusmateriaalina luja, ilmatiivis ja vakaa ristikkäisen liimauksen ansiosta. [1.]

CLT-levyjä valmistetaan 3-, 5- ja 7-kerroksisena, valmistajasta riippuen jopa 8- ja 9-kerroksisena. Kuvassa 1 on havainnollistettu 5-kerroksisen CLT-levyn rakennetta. CLT-levyjen ja niissä käytettävän sahatavaran ominaisuudet voivat vaihdella eri valmistajien välillä. Levyssä käytettävän sahatavaran paksuus on yleensä 20–60 mm ja leveys 95–300 mm. Koko levyn paksuus voi vaihdella n. 42–350 mm välillä ja levyjä valmistetaan noin 3 metriä leveänä ja pituudeltaan jopa 16,5 metriä pitkänä. CLT-levyt valmistetaan sormijatketuista sekä lujuuslajitelluista sahatavarasta, jossa raaka-aineena yleensä käytetään kuusta tai mäntyä. [1; 2; 3; 4; 5.]



Kuva 1. 5-kerroksinen CLT-levy. [2, s. 6.]

CLT-levyjen valmistustekniikkana käytetään liimausta, jossa liimatut sahatavarakerrokset puristetaan prässien avulla yhtenäiseksi levyksi. Liimauksessa käytetään kahdenlaista tapaa: liimaa voidaan levittää sahatavaran syrjälle tai vaihtoehtoisesti jättää syrjäliimaus pois ja levittää liima vain lamellien lapeosalle. Syrjäliimauksesta käytetään myös nimitystä reunaliimaus. Kun kerroksia on saatu haluttu määrä, levykerrokset puristetaan yhteen tiiviiksi elementiksi. CLT-levyn työstöt oikeaan kokoon ja muotoon tehdään CNC-jyrsimellä. Mittatarkkuus työstössä, joka on CLT tuotteiden yksi eduista, on +/- 1 mm. Elementtiä voidaan tehtaalla työstää monipuolisesti. Esimerkiksi ikkuna- sekä oviaukot ja LVI- ja sähkövaraukset on helppo työstää tehtaan linjastolla. [1; 2; 3.]

Syrjäliimauksella CLT-levystä saadaan täysin ilmatiivis. Puu on hygroskooppinen materiaali, eli se luovuttaa ja sitoo itseensä kosteutta. Lämpö- ja kosteuselämisestä johtuen voi syrjäliimaus CLT-levyssä aiheuttaa lautojen halkeilua, joten CLT-elementtejä suunniteltaessa valmistustoleransseja tärkeämpää on huomioida CLT-rakenteen hygroskooppisuus. Tavallisessa CLT-elementissä mittamuutokset voivat olla useita millimetrejä. Pelkkää lapeliimausta käytettäessä puun lämpö- ja kosteuseläminen on vapaampaa. Jos lamelleissa ei käytetä reunaliimausta, levystä ei saada täysin ilmatiivistä. [1.]

CLT-levyn lämmönjohtavuus on verrattavissa hirren lämmönjohtavuuteen, koska sillä on normaali puun mukainen lämmönjohtavuusarvo. Massiivipuusta tehdylle ulkoseinälle energiatehokkuusvaatimukset ovat lievemmät kuin normaalille ulkoseinärakenteelle. Pelkän CLT-rakenteen käyttäminen ulkoseinissä ei kuitenkaan ole kustannustehokasta, joten energiatehokkuutta parannetaan lisäämällä lämmöneristys ulkoseinärakenteeseen. CLT-ulkoseinissä lämmöneristeet asennetaan levyn ulkopintaan, millä suojataan CLT-levyä ulkoisilta rasituksilta, esimerkiksi kosteudelta ja kylmyydeltä. CLT-rakenteiden heikkoutena voidaan pitää ääneneristystä, koska puu johtaa helposti ääntä. Äänenjohtuvuuden vuoksi suunnittelussa on syytä kiinnittää erityistä huomiota rakenteiden yksityiskohtiin ja ääneneristykseen. [1.]

3 CLT-elementtien valmistajat

Suomen markkinoilla CLT valmistajia on ollut pääosin kolme yritystä, ja niiden lisäksi loppuvuodesta 2018 toimitukset Suomen markkinoilla aloitti Kauhajoella toimiva CLT Plant Oy. Kainuussa vuonna 2014 perustettu Oy Crosslam Kuhmo Ltd on ollut ensimmäinen Suomessa CLT-levyjä valmistava yritys. Crosslamin panosta puurakentamisen saralla voidaankin pitää merkittävänä. Toinen CLT-levyjä valmistamaan aloittanut suomalainen yritys oli CLT Finland Oy, joka on perustettu 2015. CLT Finland Oy valmistaa CLT-elementtejä Hoiskossa, Alajärvellä. Kaikki edellä mainitut yritykset käyttävät kotimaista puuta CLT-levyjen valmistukseen. [6; 7; 8.]

Suomen markkinoilla toimii myös Stora Enso Oy, joka on erilaisten puusta valmistettavien materiaalien maailmanlaajuinen toimittaja. Pääkonttori sijaitsee Helsingissä, mutta CLT-levyt valmistetaan Itävallassa. Stora Enso pyrkii käyttämään puuta, joka on kotimaista ja hankittu paikallisesti. Raaka-aineen saatavuudesta riippuen Stora Enso ostaa tuontipuuta myös lähimaista. [9.]

Taulukossa 1 on esitetty CLT-levyjä valmistavien yritysten tuotteiden ominaisuuksia. CLT-levyjen ominaisuuksissa ei ole kovinkaan suuria eroja valmistajien välillä, koska CLT-levy saa ominaisuutensa sahatavaran lujuusluokan mukaan. Sahatavaran lujuusluokka valmistajilla on pääosin C24, mutta CLT Plant Oy ilmoittaa vakiorakenteissaan käyttävänsä ei-kantavassa kerroksessa lujuusluokan C14 sahatavaraa. Stora Enso käyttää männyn lisäksi myös kuusta raaka-aineena, ja sen CLT-tuotteita voidaan valmistaa kolmesta eri lujuusluokan sahatavarasta. Eri valmistajien tuotantolinjoista riippuen levyn ja käytettävän sahatavaran koko hiukan vaihtelee.

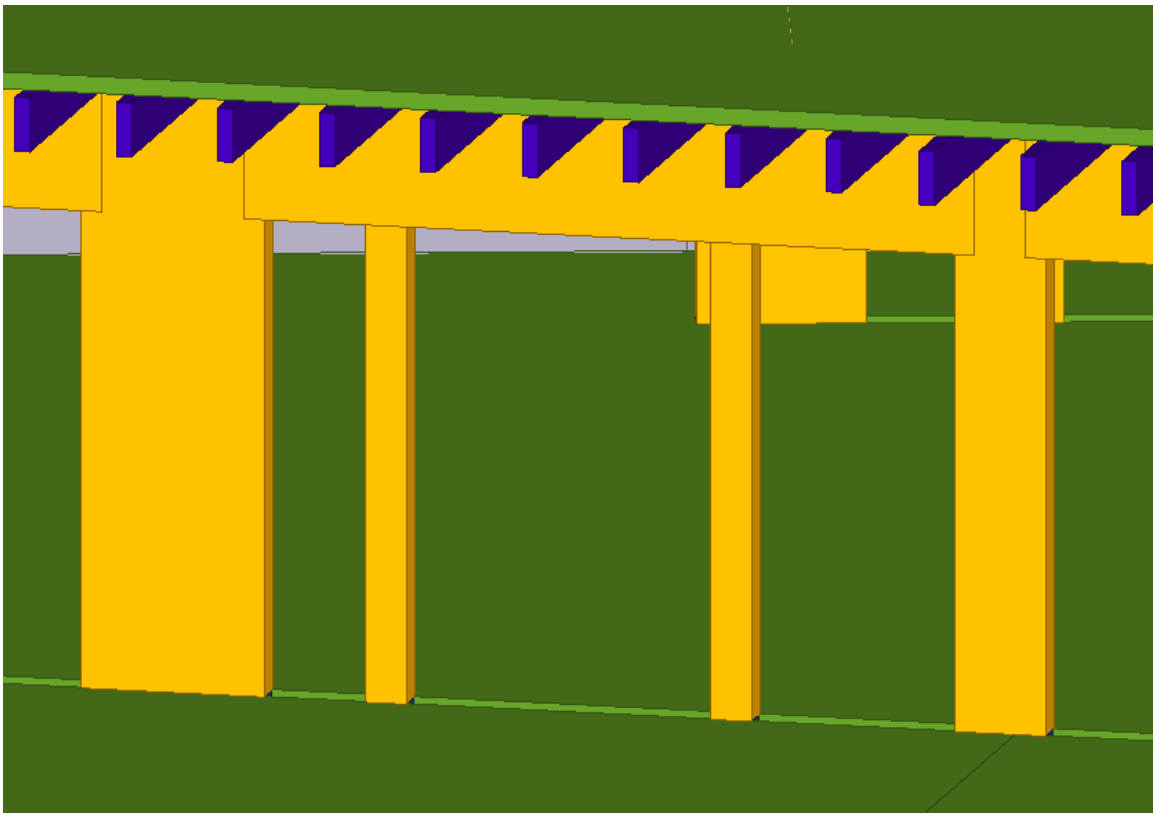
Suomessa valmistettavien CLT-levyjen hiiltymänopeuden arvoksi on määritelty yksi millimetri minuutissa. CLT Plant Oy ei ole erikseen ilmoittanut tuotteelleen kyseistä arvoa, jolloin tässä opinnäytetyössä ei oteta kantaa kyseisen yrityksen tuotteen hiiltymänopeuden arvoihin. Stora Enson CLT-levylle on määritetty hiiltymänopeuden arvot, jotka ovat hyvin lähellä Suomen Rakennusinsinöörien liiton RIL ry:n julkaisemassa RIL 205-2-2007 Puurakenteiden suunnitteluohjeessa [14] määritettyä havupuusta valmistetun sahatavaran hiiltymänopeuden arvoa.

Taulukko 1. Suomen markkinoille tuotettujen CLT-levyjen ominaisuudet [10; 11; 12; 13; 15, s. 1.; 16, s. 1.]

Ominaisuus	**Crosslam Kuhmo CLT**	**Stora Enso CLT**	**Hoisko CLT**	**CLT Plant**
Lujuusluokat	C24	C16, C24, C30	C24	C14, C24
Laudan leveys	min. 3 x paksuus	min. 4 x paksuus	–	–
Lamellin paksuus	20–60 mm	14–45 mm	20–60 mm	20–40 mm
Levyn paksuus	60–300 mm	42–350 mm	60–400 mm	60–400 mm
Levyn leveys	max. 3,2 m	max. 3,0 m	max. 3,4 m	max. 3,5 m
Levyn pituus	max. 12 m	max. 16,5 m	max. 11,9 m	max. 16 m
Hiiltymänopeus	β_0 = 1,00 mm/min β_n = 1,00 mm/min	β_0 = 0,63 mm/min β_n = 0,83 mm/min	β_0 = 1,00 mm/min β_n = 1,00 mm/min	–
Kimmomoduulit: $E_{0,mean}$ $E_{0,05}$	 11500 MPa 7400 MPa	 C24 = 12500 MPa C24 = 7400 MPa	 11000 MPa 7400 MPa	 C24 = 11000 MPa C24 = 7400 MPa
Liukumoduulit: $G_{R,mean}$	 65 MPa	 C24 = 50 MPa	 50 MPa	 C24 = 50 MPa

4 Mitoituksen perusteet

Tässä työssä toteutettava CLT-rakenneosien laskentapohjien mitoitus perustuu Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisuihin RIL 205-1-2017 [17] sekä RIL 205-2-2007 [14) puurakenteiden suunnitteluohjeisiin ja CLT-tuotteiden yleisiä suunnitteluohjeita täydentäviin lisäohjeisiin [15] [16]. Lisäohjeet koskevat enintään 5-kerroksisten CLT-rakenteiden käyttöä tavanomaisissa käyttöluokan 1 ja 2 puurakenteissa. Onnettomuusrajatilassa hiiltymäsyvyyden määritys perustuu Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisuun RIL 205-2-2007 Puurakenteiden suunnitteluohjeeseen, joka koskee puurakenteiden palomitoitusta. [14.] Kuvassa 2 on esitetty mitoitettavat seinä-, pilari- ja palkkirakenteet mallinnettuna Tekla Structures -ohjelmalla.



Kuva 2. Laskentapohjilla mitoitettuja väliseinän rakenneosia tietomallissa.

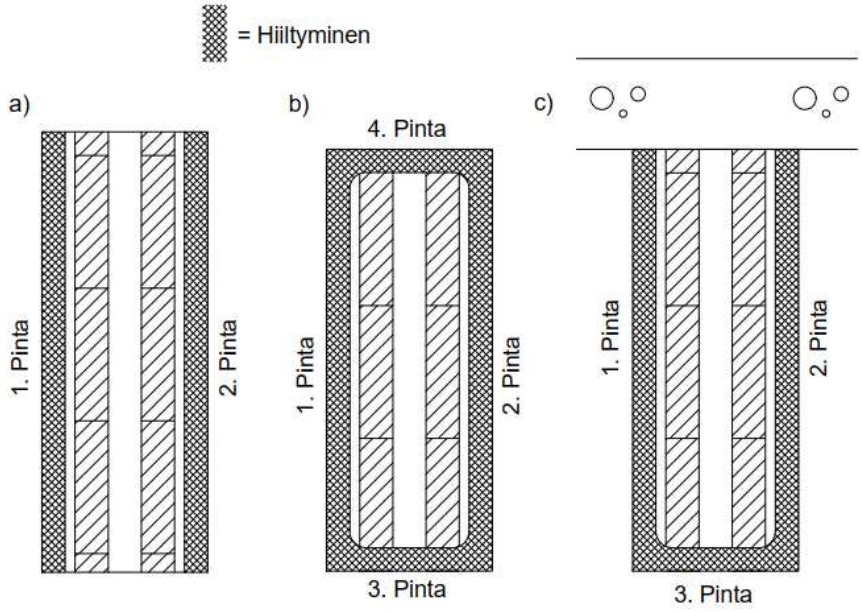
Laskentapohja mitoittaa CLT-rakenneosat murtorajatilassa kolmella kuormitusyhdistelmällä sekä onnettomuusrajatilan mukaisella kuormitusyhdistelmällä. Kuormitusyhdistelmät tuodaan laskentapohjaan valmiiksi yhdisteltyinä kuormituksina. Mitoitus perustuu rakenneosan sisäisten voimasuureiden eli puristus- ja leikkausvoiman sekä taivutusmomentin suuruuteen. Rakenneosat

mitoitetaan myös käyttörajatilan mukaisella kuormitusyhdistelmällä tasaisina viivakuormina. Rakenneosien sisäiset voimasuureet voidaan määrittää joko FEM-laskentamallista tai ”käsinlaskennalla”.

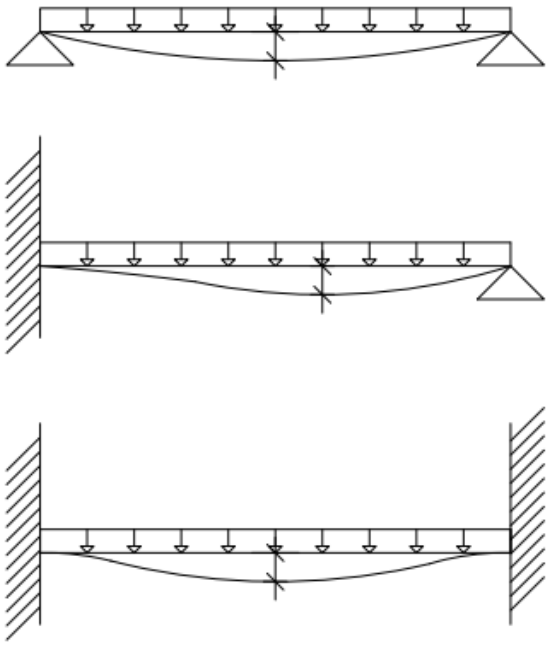
Seinän ja pilarin mitoituksen laskentapohjissa murtorajatilassa tarkastetaan nurjahdus- ja leikkauskestävyys ja käyttörajatilassa tarkastetaan taipuma. Palotilanteessa eli onnettomuustilanteessa tarkastetaan onnettomuusrajatilan mukainen nurjahdus- ja leikkauskestävyys. Tulokset tarkasteluista annetaan käyttöasteina. Seinä ja pilari mitoitetaan 1-aukkoisena ja nivelellisesti tuettuna rakenteena kuvan 3 mukaan. Palomitoituksessa hiiltymissyvyys seinärakenteessa voidaan huomioida palotilanteen mukaan molemmille puolille tai vain toiselle puolelle seinäpintaa. Pilareissa hiiltymissyvyys voidaan huomioida jokaiselle pilarin sivulle erikseen. Rakenneosien palotilanteet ja hiiltymäsyvyydet on esitetty kuvassa 4.

Kuva 3. Seinä- ja pilarirakenteessa tutkittava tuentatapa.

Palkin mitoituksen laskentapohjassa tarkastetaan taivutus-, leikkaus- sekä kiepahduskestävyys murtorajatilassa. Palkin käyttörajatilan mukainen taipuma myös tarkastetaan. Palkit tutkitaan myös 1-aukkoisena ja tuentatavoiltaan erilaisissa tilanteissa. Tässä työssä tutkitut palkin tuentatavat on esitetty kuvassa 5. Palkkien palotilanteen hiiltymissyvyys mitoitetaan joko kolme sivua tai kaikki sivut altistuen palolle kuvan 4 mukaisesti.



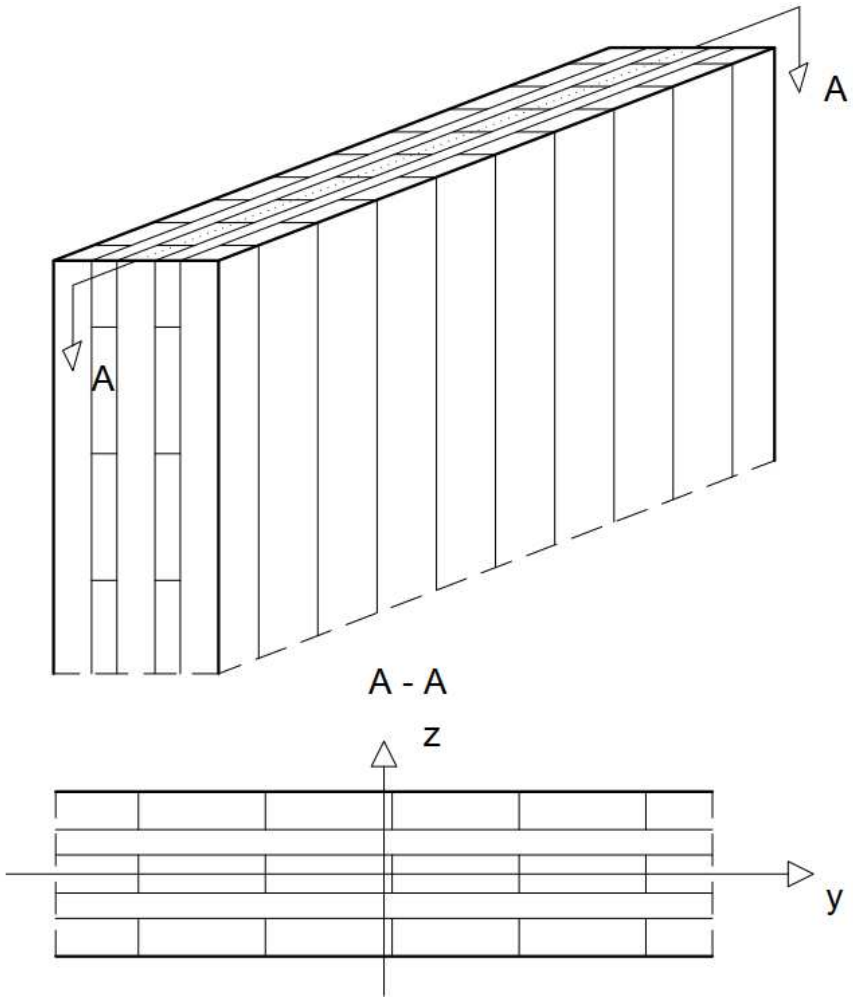
Kuva 4. a) Yksidimensionaalinen hiiltymäsyvyys molemmin puolin seinärakennetta. b) Nimellinen hiiltymäsvyvyys pilari- tai palkkirakenteen kaikilla pinnoilla. c) Nimellinen hiiltymäsyvyys palkkirakenteen kolmella pinnalla.



Kuva 5. Palkkirakenteessa tutkittavat tuentatavat.

5 CLT-seinärakenteen mitoitus

CLT-seinärakenteen murto- ja käyttörajatilan mukainen mitoitus suoritetaan RIL 205-1-2017:n ja CLT-tuotteiden yleisiä suunnitteluohjeita täydentävien lisäohjeiden mukaisesti. Taivutus-, puristus- ja leikkauskestävyyden mitoitus on tehty soveltaen joustavasti kootun kerrospalkin teoriaa. Taipuman mitoitus tehdään sahatavaran mitoitusohjeiden mukaan. Poikkileikkaukselle määritetään tehollliset poikkileikkausvakiot, koska poikittais- ja pystysuunnan välille syntyvä liukuma pienentää rakenteen taivutusjäykkyyttä. Liukuma aiheutuu poikittaisten lamellikerrosten kuormituksesta kohtisuoraan syysuuntaa vastaan, kun kantavat lamellikerrokset kuormittuvat syysuunnassa. Kuvassa 6 on esitetty CLT-seinärakenteen poikkileikkauksen akselit, joiden suunnassa seinärakenteen kestävyyksiä tarkastellaan. Pituussuunnassa on y-akseli ja poikittaissuunnassa z-akseli. Pystysuunnan x-akselia ei ole kuvassa 6 esitetty, koska seinärakennetta ei mitoiteta kyseisen akselin suhteen. [18, s. 1.]



Kuva 6. CLT-seinärakenteen poikkileikkauksen akselit.

5.1 Tehollliset poikkileikkausarvot

Poikkileikkausarvot määritetään CLT-seinärakenteen pituussuunnassa. Taivutusjännityksen mitoitusarvoa laskettaessa tarvitaan CLT-elementin poikkileikkauksen tehollisen taivutusvastuksen arvo, joka saadaan määritettyä tehollisen jäyhyysmomentin arvon avulla. Tehollisen jäyhyysmomentin arvo jaetaan arvolla, joka muodostuu etäisyydestä lamellikerroksen keskeltä koko levyn reunaan ensimmäisen ja toisen lamellikerroksen välinen liitoshyötysuhde huomioon otettuna. Tehollisen taivutusvastuksen arvo lasketaan kaavalla 1 [5, s. 2; 16, s. 2; 18, s. 2.]:

$$W_{ef} = \frac{I_{ef}}{\gamma_i \cdot a_i + \frac{h_1}{2}} \quad (1)$$

Missä

W_{ef} poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus

I_{ef} poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti

γ_i lamellikerroksen liitoshyötysuhde

a_i uloimman lamellikerroksen etäisyys keskeltä koko levyn keskelle

h_1 kantosuunnassa olevan ensimmäisen lamellikerroksen paksuus

Tehollisen jäyhyysmomentin arvo muodostuu kantosuunnassa olevien lamellikerrosten jäyhyysmomenteista ja niihin lisätyistä vaakasuuntaisten lamellien liitossiirtymien vaikutuksista. Tehollinen jäyhyysmomentti lasketaan kaavalla 2 [15, s. 2; 16, s. 2.]:

$$I_{ef} = \sum_1^3 \left(I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2\right) \quad (2)$$

Missä

I_{ef} poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti

I_i lamellikerroksen jäyhyysmomentti

γ_i lamellikerroksen liitoshyötysuhde

A_i lamellikerroksen poikkipinta-ala

a_i uloimman lamellikerroksen etäisyys keskeltä koko levyn keskelle

Mekaanisin liittimin kootun palkin teoriaa soveltaen jännitysjakauma voidaan laskea niin, että korvataan liitoksen siirtymäkertoimen ja liitinvälin arvosta muodostuva jäykkyyskerroin kaavan 3 mukaisella oletuksella [15, s. 2; 16, s. 1.]:

$$\frac{s_i}{K_i} = \frac{d_{ij}}{(G_{R,mean} \cdot b)} \tag{3}$$

Missä

s_i liitinväli

K_i liitoksen siirtymäkerroin

d_{ij} pituussuuntaisten kerrosten i ja j välissä oleva poikittaisen kerroksen paksuus

$G_{R,mean}$ tasoleikkauksen liukumoduuli

b poikkileikkauksen leveys

Mekaanisin liittimin koottujen palkkien teoriassa lasketaan kiinnityksen teho liitoshyötysuhdekertoimella, jonka arvo on nollan ja yhden välillä. Arvo 1 tarkoittaa täydellistä mekaanista kiinnitystä ja arvo 0 tarkoittaa, ettei mekaanista kiinnitystä ole lainkaan. Liitoshyötysuhteen arvo on laskettu kaavassa 4 [15, s. 2; 16, s. 2.]:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1+\left(\frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_i}{L^2} \cdot \frac{d_{ij}}{G_{R,mean} \cdot b}\right)} \tag{4}$$

Missä

$E_{0,mean}$ kimmomoduulin ominaisarvo syyn suuntaan

A_i lamellikerroksen poikkipinta-ala

L seinän korkeus tuelta tuelle

d_{ij} pituussuuntaisten kerrosten i ja j välissä oleva poikittaisen kerroksen paksuus

$G_{R,mean}$ tasoleikkauksen liukumoduuli

b poikkileikkauksen leveys

Puristusjännityksen mitoitusarvoa laskettaessa tarvitaan CLT-levyn tehollista pinta-alaa, joka saadaan laskemalla yhteen kantosuunnassa olevien lamellikerrosten pinta-alat.

CLT-levyn poikkileikkauksessa leikkausjännitys ei ole vakio, kun rakenteessa esiintyy leikkausvoima ja taivutusmomentti samaan aikaan. Leikkausjännityksen mitoitusarvoa laskettaessa kaavalla, joka huomioi taivutuksen leikkauksen yhteydessä, tarvitaan poikkileikkauksen tehollista staattista momenttia. Staattinen momentti määritellään poikkileikkauksen reunan ja tarkasteltavan kohdan, ensimmäisen ja toisen lamellikerroksen välisen liimasauman, pinnan osan ja painopisteakselin suhteen avulla. Staattisen momentin arvo on laskettu kaavalla 5 [15, s. 2; 16, s. 3.]:

$$S_{ef} = A_i \cdot \gamma_i \cdot a_i \tag{5}$$

Missä

S_{ef} tehollinen staattinen momentti

A_i lamellikerroksen poikkipinta-ala

γ_i lamellikerroksen liitoshyötysuhde

a_i uloimman lamellikerroksen etäisyys keskeltä koko levyn keskelle

5.2 Mitoitus taivutukselle murtorajatilassa

CLT-seinärakenteen poikkileikkaus mitoitetaan taivutukselle murtorajatilassa poikkileikkauksen y-akselin suuntaan. Nurjahdusmitoituksessa huomioidaan taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutus, joten tässä työssä ei esitetä erikseen taivutuksen ja puristuksen mitoitusehtoja. Taivutusjännitys poikkileikkauksessa aiheutuu poikkileikkausta kuormittavista vaakasuuntaisesta voimasta ja tämän kuorman aiheuttamasta taivutusmomentista. Taivutusmomenttia aiheuttavasta voimasta voidaan käyttää esimerkkinä tuulen aiheuttamaa taivutusta. Taivutusjännityksen suuruus riippuu voiman suuruuden lisäksi tehollisen taivutusvastuksen suuruudesta ja näin ollen poikkileikkauksen koosta ja sahatavaran ominaisuuksista. Taivutusjännityksen arvo lasketaan kaavalla 6:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_{ef}} \quad (6)$$

Missä

$\sigma_{m,d}$ taivutusjännityksen mitoitusarvo

M_d taivutusmomentti murtorajatilassa

W_{ef} poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus

Lujuusominaisuuksien mitoitusarvoja laskettaessa lujuusominaisuuden ominaisarvo kerrotaan kuorman keston ja kosteusvaikutuksen mukaisella muunnoskertoimella k_{mod} ja jaetaan materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluvulla $\gamma_{m.}$. Muunnoskertoimen arvon suuruus riippuu kuorman aikaluokasta ja rakenteen käyttöluokasta. Muunnoskertoimen arvot on esitetty taulukossa 2 ja osavarmuusluvun arvot taulukossa 3. [17, s. 47, s. 49.]

Taulukko 2. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskertoimen k_{mod} arvot. [17, s. 49.]

Materiaali	Käyttö-luokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkä-aikainen	Keski-pitkä	Lyhyt-aikainen	Hetkellinen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri, CLT	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lastulevy P4[1)] ja P5, OSB/2[1)], Kova kuitulevy	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Lastulevy P6[1)] ja P7, OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA[1)], MBH.HLS, MDF.LA[1)] ja MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,45	0,80

Taulukko 3. Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluvut γ_m. [17, s. 47.]

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara	1,3
Liimapuu, CLT	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy, kuitulevyt	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyliitoset: - tartuntalujuus	1,25
- levyn lujuus (teräs)	1,1
Onnettomuusyhdistelmät	1

Taivutusjännityksen mitoitusarvo ei saa ylittää taivutuslujuuden mitoitusarvoa. Pituussuunnassa oleva lamellikerros voidaan huomioida kertomalla taivutuslujuuden ominaisarvo kuormanjakoluvulla k_{sys}, joka korottaa rakenteen taivutuslujuutta. Taivutuslujuuden mitoitusarvon laskeminen on esitetty kaavassa 7 [15, s. 2; 16, s. 2; 17, s. 46, s. 82]:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \cdot k_{sys} \tag{7}$$

Missä

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

K_{mod} kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

$f_{m,k}$ taivutuslujuuden ominaisarvo

γ_m materiaalien osavarmuusluku

k_{sys} kuormanjakoluku

Kuormanjakolukuun huomioidaan rinnakkaisten lamellien lukumäärä. Kuormanjakoluvun arvon määrittäminen on esitetty kaavassa 8 [15, s. 2; 16, s. 2.]:

$$k_{sys} = min\begin{cases} 1 + 0{,}025 \cdot n \\ 1{,}2 \end{cases} \tag{8}$$

Missä

k_{sys} kuormanjakoluku

n pituussuuntaisten lamellien lukumäärä

5.3 Mitoitus puristukselle murtorajatilassa

Puristusjännitys aiheutuu pystykuormista aiheutuvasta normaalivoimasta poikkileikkauksessa. Puristusjännitys poikkileikkauksessa lasketaan niin, että pinta-alaan otetaan huomioon vain kantosuunnassa olevat lamellikerrokset. Puristusjännityksen arvo lasketaan kaavalla 9:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{ef}} \tag{9}$$

Missä

$\sigma_{c,d}$ puristusjännityksen mitoitusarvo

N_d normaalivoima murtorajatilassa

A_{ef} poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

Puristusjännityksen mitoitusarvo ei saa ylittää puristuslujuuden mitoitusarvoa. Puristuslujuuden mitoitusarvon laskeminen on esitetty kaavassa 10 [17, s. 46, s. 82]:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} \tag{10}$$

Missä

$f_{c,0,d}$ puristuslujuuden mitoitusarvo

K_{mod} kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

$f_{c,0,k}$ puristuslujuuden ominaisarvo

γ_m materiaalien osavarmuusluku

Puristuslujuutta pienennetään laskennallisella nurjahduskertoimella, joka ottaa huomioon puristetun sauvan nurjahduksen. Laskennallista nurjahduskerrointa laskettaessa rakenteelle määritetään muunnettu hoikkuus. Jotta muunnettu hoikkuus voidaan laskea, määritetään rakenteelle hoikkuusluku. Hoikkuusluvun arvon laskeminen on esitetty kaavassa 11 [17, s. 78–82]:

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \tag{11}$$

Missä

λ_y y-akselin suuntaan taivutusta vastaava hoikkuusluku

$L_{c,z}$ nurjahduspituus z-akselin suuntaisessa nurjahduksessa, taulukko 4

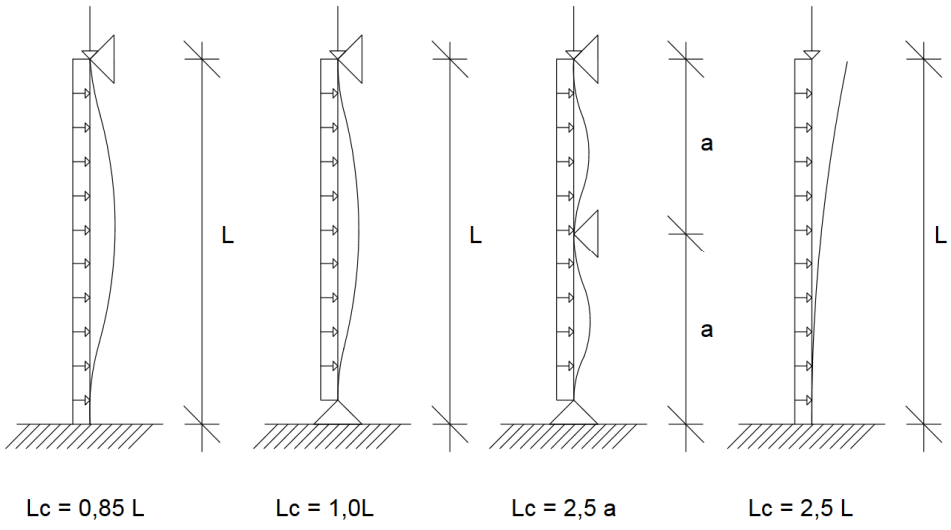
i_y poikkileikkauksen jäyhyyssäde y-akselin suhteen

Puristetun sauvan nurjahduspituus määritellään taulukon 4 avulla. Taulukossa 4 esitetyt tuentatavat on havainnollistettu kuvassa 7.

Taulukko 4. Puristussauvan nurjahduspituuksia Lc, kun sauvan pituus on L [17, s. 80.]

Tuentatapa	Nurjahduspituus $L_{c,z}$
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta ja nivelellisesti toisesta päästään sivusiirtymätön rakenne (esim. jäykkäkantainen hallin päädyn ”tuulipilari”).	0,85·L
Sauva on nivelöity molemmista päistään (normaali tapaus).	1,0·L
Sauva on poikittaistuettu nurjahduksen suuntaan välein a.	1,0·a
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta päästään ja on vapaa toisesta päästään (”mastopilari”).	2,5·L

- *) Liimaruuviliitoksilla kiinnitetyn mastopilarin nurjahduspituutena voidaan tietyin edellytyksin käyttää mittaa *2,2·L* (VTT-S-05679-14).



Kuva 7. Esimerkkejä puristussauvojen nurjahduspituuksista.

Hoikkuusluvun ratkaisemiseksi tarvitaan rakenteen jäyhyyssädettä, jonka arvo lasketaan kaavalla 12 [17, s. 79]:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} \tag{12}$$

Missä

i_y poikkileikkauksen jäyhyyssäde y-akselin suhteen

I_{ef} poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti

A_{ef} poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

Sauvan muunnettu hoikkuus, jota tarvitaan nurjahduskertoimen laskennallisessa määrityksessä, lasketaan kaavalla 13 [17, s. 80.]:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \tag{13}$$

Missä

$\lambda_{rel,y}$ taivutusta y-akselin suhteen (eli z-akselin suuntaan) vastaava hoikkuusluku ja siitä laskettu muunnettu hoikkuus

λ_y y-akselin suuntaan taivutusta vastaava hoikkuusluku

$f_{c,0,k}$ puristuslujuuden ominaisarvo

$E_{0,05}$ syynsuuntaista kuormitusta vastaavan kimmokertoimen ominaisarvo

Nurjahduskertoimen arvo y-akselin suhteen on laskettu kaavalla 14 [17, s. 82]:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{{k_y}^2 - {\lambda_{rel,y}}^2}} \quad (14)$$

Missä

$k_{c,y}$ nurjahduskertoimen arvo y-akselin suhteen

k_y kerroin, jonka arvo ratkaistaan kaavassa 15

$\lambda_{rel,y}$ taivutusta y-akselin suhteen (eli z-akselin suuntaan) vastaava hoikkuusluku ja siitä laskettu muunnettu hoikkuus

$$k_y = 0{,}5[1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0{,}3) + {\lambda_{rel,y}}^2] \quad (15)$$

Missä

β_c sauvan alkukäyryydestä riippuva kerroin, jonka arvo CLT-sauvalle on $\beta_c = 0{,}1$

$\lambda_{rel,y}$ taivutusta y-akselin suhteen (eli z-akselin suuntaan) vastaava hoikkuusluku ja siitä laskettu muunnettu hoikkuus

5.4 Mitoitus nurjahdukselle murtorajatilassa

Seinäelementti mitoitetaan nurjahdukselle, kun rakenteellinen taivutus ja puristus vaikuttaa poikkileikkauksessa samaan aikaan. Nurjahdusmitoituksessa tarkastellaan taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutusta, jolloin taivutuksen ja puristuksen mitoitusarvot lasketaan yhteen ja yhteenlaskettu arvo ei saa ylittää arvoa 1. Mitoitus taivutukselle suoritetaan laskemalla taivutusjännityksen suhde taivutuslujuuteen ja mitoitus puristukselle laskemalla puristusjännityksen suhde puristuslujuuteen. Puristuslujuutta pienennetään nurjahduskertoimella. Taivutusmitoituksen laskeminen on esitetty kappaleessa 5.2 ja puristuksen mitoitus kappaleessa 5.3. Mitoitusehto nurjahduskestävyydelle on esitetty kaavassa 16 [17, s. 82.]:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} < 1 \qquad (16)$$

Missä

$\sigma_{c,d}$ puristusjännityksen mitoitusarvo

$k_{c,y}$ nurjahduskertoimen arvo y-akselin suhteen

$f_{c,0,d}$ puristuslujuuden mitoitusarvo

$\sigma_{m,d}$ taivutusjännityksen mitoitusarvo

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

5.5 Mitoitus leikkaukselle murtorajatilassa

CLT-seinäelementti mitoitetaan leikkaukselle vaakasuuntaisesta voimasta aiheutuvasta kuormituksesta, esimerkiksi tuulen aiheuttamasta kuormasta. Tasoleikkausjännityksen arvo leikkausmitoituksessa lasketaan kimmoteorian mukaan, koska taivutusmomentti vaikuttaa samaan aikaan leikkausvoiman kanssa ja näin ollen koko poikkileikkauksen alalla leikkausjännityksen arvo ei ole vakio. CLT-seinäelementin tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo oletetaan samaksi koko poikkileikkauksessa, kun tasoleikkausjännityksen arvo lasketaan ensimmäisen liimasauman kohdalla. Tasoleikkausjännityksen arvo on sama neutraaliakselilla kuin ensimmäisessä liimasaumassa. Tasoleikkausjännityksen arvo lasketaan kaavan 17 mukaan [15, s. 2–3; 16, s. 2–3; 17, s. 74–76; 18, s. 4.; 19, s. 6.]:

$$\tau_{R,d} = \frac{V_d \cdot S_{ef}}{I_{ef} \cdot b} \quad (17)$$

Missä

$\tau_{R,d}$ tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo

V_d leikkausvoiman mitoitusarvo

S_{ef} tehollinen staattinen momentti

I_{ef} poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti

b poikkileikkauksen leveys

Leikkauskestävyyden mitoitus lasketaan pituussuuntaisten lamellien syysuuntaisen leikkauslujuuden mukaan. Tasoleikkauslujuuden mitoitusarvo laskennassa oletetaan tasoleikkauslujuuden ominaisarvoksi 1,3 N/mm² poikittaislamellin paksuuden ollessa enintään 40 mm. Jos lamellien paksuus on suurempi kuin 40 mm, lasketaan tasoleikkauslujuuden ominaisarvo kaavalla 18 [19, s. 6.]:

$$f_{R,k} = \left(2{,}1 - 0{,}02 \cdot d_{ij}\right) \frac{N}{mm^2} \quad (18)$$

Missä

$f_{R,k}$ tasoleikkauslujuuden ominaisarvo

d_{ij} pituussuuntaisten kerrosten i ja j välissä oleva poikittaisen kerroksen paksuus

Leikkausjännityksen mitoitusarvo ei saa ylittää leikkauslujuuden mitoitusarvoa. Leikkauslujuuden mitoitusarvon laskeminen on esitetty kaavassa 19 [15, s. 2; 16, s. 3; 17, s. 46]:

$$f_{R,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{R,k}}{\gamma_m} \quad (19)$$

Missä

$f_{R,d}$ tasoleikkauslujuuden mitoitusarvo

K_{mod} kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

$f_{R,k}$ tasoleikkauslujuuden ominaisarvo

γ_m materiaalien osavarmuusluku

Leikkauksen mitoitusehto on esitetty kaavassa 20 [15; s.2; 16; s.3; 17, s. 74]:

$$\tau_{R,d} \leq f_{R,d} \quad (20)$$

Missä

$\tau_{R,d}$ tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo

$f_{R,d}$ tasoleikkauslujuuden mitoitusarvo

5.6 Mitoitus taipumalle käyttörajatilassa

Taipumat rakenteessa lasketaan yhdistetyillä ominaiskuormilla, jotka yhdessä aiheuttavat rakenteessa taipumaa. CLT-seinän taipuman mitoituksessa tuulikuorma on ainoa kuorma, joka aiheuttaa seinärakenteeseen hetkellistä taipumaa aiheuttavaa kuormitusta. Tuulikuorman kuormitusyhdistelmän suuruus määritetään tuulen nopeuspaineen ominaisarvon, osapinnan nettotuulenpaineen painekertoimen sekä muuttuvan kuorman yhdistelykertoimen avulla. Tuulikuorman ominaisarvosta aiheutuvan hetkellisen taipuman arvo lasketaan kaavan 21 mukaan [17, s. 97; 21, s. 317.]:

$$W_{inst.Q} = \frac{5 \cdot b \cdot q_{w,k} \cdot L^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_{ef}} \quad (21)$$

Missä

$W_{inst,Q}$ hetkellinen taipuma

b poikkileikkauksen leveys

$q_{w,k}$ tuulikuorman ominaisarvo

L korkeus tuelta tuelle

$E_{0,mean}$ kimmomoduulin ominaisarvo syyn suuntaan

I_{ef} poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

Seinärakenteen taipumalle asetetaan raja-arvo, jota taipuman arvo ei saa ylittää. Rakenteiden taipumien raja-arvot on määritetty puurakenteiden suunnitteluohjeessa. Ne on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Taipumien ja rakennuksen vaakasiirtymien enimmäisarvot. Ulokkeiden taipuma jänneväli suhteen saa olla kaksinkertainen. L on jänneväli ja H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus. [17, s. 98.]

Rakenne	W_{inst} [1)]	$W_{net,fin}$ [2)]	W_{fin} [3)]
Pääkannattimet	L/400	L/300	L/200
Orret ja muut toisiokannattimet		L/200 [5)]	L/150
Rakennuksen vaakasiirtymät [4)]		H/300	

[1)] Koskee pelkästään lattioita.

[2)] Koskee suoria ja esikorotettuja rakenteita, mutta ei tukipisteiden välillä kaarevia tai taiteellisia kannattimia.

[3)] Koskee esikorotettuja sekä tukipisteiden välillä kaarevia tai taiteellisia rakenteita.
* esimerkiksi kaaret, mahapalkit, saksiristikot, bumerangipalkit.

[4)] Hallirakennuksissa vaakasiirtymästä ei ole yleensä haitta, jolloin sitä ei tarvitse tarkistaa.
* Kerrostaloissa suositellaan vaakasiirtymän rajoittamista enintään arvoon H/500 ylimmän kerroksen lattiatasolta.

[5)] Lattialevyn taipumaa laskettaessa kuormituksena on lyhytaikainen pistekuorma Q_k = 2 kN ja levyn omapaino.

Kuormista aiheutuvat taipumat aiheuttavat rakenteessa virumaa, jolloin rakenteen lopullista taipumaa laskettaessa huomioidaan viruman vaikutus rakenteessa puutuotteen mukaisella virumaluvun k_{def}-arvolla. Virumaluvun arvon suuruuteen vaikuttaa rakenteelle määritetty käyttöluokka. Taulukossa 6 on esitetty puulle ja puutuotteille annetut virumaluvun arvot. CLT-seinärakennetta taipumalle mitoitettaessa lasketaan lopputaipuma kaavassa 22 esitetyllä tavalla, kun hetkellinen kuormitus on ainoa kuormitustekijä [17, s. 50. ja s. 97.]:

$$W_{fin} = W_{inst,Q}(1 + k_{def}) \tag{22}$$

Missä

W_{fin} lopputaipuma

$W_{inst,Q}$ hetkellinen taipuma

k_{def} virumaluku

Taulukko 6. Virumaluvun k_{def} arvot puulle ja puutuotteille. [17, s. 50.]

Materiaali	Standardit	Käyttöluokka		
		1	2	3
Sahatavara, Pyöreä puu	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Liimapuu	EN 14080			
LVL, CLT, syrjällään	EN 14374			
Vaneri, Kerto-Q lappeellaan, CLT lappeellaan	EN 525, VTT 184/03	0,80	1,00	2,50
OSB-levy	EN 300: OSB/2	2,25	-	-
	EN 300: OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	-
Lastulevy	EN 312: P4 ja P5	2,25	3,00	-
	EN 312: P6 ja P7	1,50	2,25	-
Kova kuitulevy	EN 622-2: HB.LA, HB.HLA	2,25	3,00	-
Puolikova kuitulevy	EN 622-3: MBH.LA, MBH.HLS	3,00	4,00	-
MDF-levy	EN 622-5: MDF.LA, MDF.HLS	2,25	3,00	-

Lopputaipumaa verrataan sallittuun taipumaan, joka määritellään taulukon 4 avulla. Lopputaipuman arvo ei saa ylittää sallitun taipuman raja-arvoa. Seinärakenteessa vaakasiirtymälle on määritetty taulukossa 4 raja-arvo H/300, missä H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus. Taipuman mitoitusehto on esitetty kaavassa 23:

$$W_{fin} \leq W_{net,fin} \quad (23)$$

Missä

W_{fin} lopputaipuma

$W_{net,fin}$ lopputaipuman enimmäisarvo

5.7 Mitoitus palotilanteessa

Tässä opinnäytetyössä palotilanteen mitoitus perustuu Suomen Rakennusinsinöörien liiton julkaisemaan RIL 205-2-2007 puurakenteiden suunnitteluohjeisiin koskien puurakenteiden palomitoitusta. Puurakenne mitoitetaan palotilanteessa tulipalon aikaisille kuormille, joissa käytetään onnettomuustilanteen mukaista kuormitusyhdistelyä. Puurakenteelle, joka on suoraan tai palosuojauksen pettäessä palolle alttiina, huomioidaan pinnoissa tapahtuva hiiltyminen. Puurakenteiden palomitoituksessa puun syttymispisteenä eli lämpötilarajana, jolloin hiiltyminen alkaa, pidetään 300 asteen isotermiä. [14, s. 22.]

Hiiltymissyvyys määritetään rakenteelle määritetyn hiiltymisnopeuden ja palorasituksen keston avulla. Rakenteen hiiltymänopeuteen voidaan vaikuttaa suojaamalla palolle alttiina olevaa pintaa esimerkiksi levyverhouksella. Palosuojauksessa hiiltymisnopeuteen on huomioitava tilanteet, joissa hiiltyminen voi alkaa ennen suojauksen putoamista tai vasta suojauksen pudottua. Hiiltymissyvyyden huomioiminen pienentää rakenteen poikkileikkausta, jolloin onnettomuustilanteessa on rakenteelle laskettava onnettomuustilanteen mukaiset poikkileikkauksen arvot hiiltymissyvyydet huomioiden. Puurakenteesta riippuen määritetään hiiltymäsyvyys joko tasomaisille rakenteille yksidimensionaalisena hiiltymisenä tai suorakaidepoikkileikkausrakenteille, joille huomioidaan kulmapyöristyksen sekä halkeamien vaikutukset Tässä insinöörityössä käsitellään vain palolta suojaamattomia pintoja. [14, s. 22–23.]

CLT-seinärakenteessa käytetään yksidimensionaalista hiiltymänopeutta, koska palorasitus tapahtuu joko yhdessä pinnassa tai molemmilla seinäpinnoilla. CLT-rakenteessa käytetään materiaalin C24 sahatavaraa, jolloin yksidimensionaalisen hiiltymänopeuden mitoitusarvoksi on määritetty 0,65 millimetriä minuutissa. Palomitoituksessa rakenteelle määritetyn palon keston avulla määritetään hiiltymäsyvyys. Nimellisen hiiltymäsyvyyden mitoitusarvo lasketaan kaavassa 24 [14, s. 22.]:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (24)$$

Missä

$d_{char,0}$ yksidimensionaalisen hiiltymäsyvyyden mitoitusarvo

β_0 yksidimensionaalisen hiiltymänopeuden mitoitusarvo, CLT:lle β_0 = 0,65 mm/min

t palorasituksen kesto

Jotta hiiltymäsyvyys voidaan vähentää poikkileikkauksesta, määritetään tehollinen hiiltymäsyvyyden mitoitusarvo. Tehollisella hiiltymäsyvyydellä otetaan huomioon lähellä hiiltymärajaa olevan puukerroksen sekä hiiltyneen kerroksen kokonaan menetetyt lujuus- ja jäykkyysominaisuudet. Tehollisen hiiltymäsyvyyden mitoitusarvo määritetään kaavalla 25 [14, s. 31.]:

$$d_{ef} = d_{char,0} + k_0 \cdot d_0 \quad (25)$$

Missä

d_{ef} tehollinen hiiltymäsyvyyden mitoitusarvo

$d_{char,0}$ yksidimensionaalisen hiiltymäsyvyyden mitoitusarvo

k_0 $min\left\{\frac{t}{20}; 1\right\}$, missä t on palorasituksen kesto

d_0 7 mm

Palomitoituksessa lasketaan jäännöspoikkileikkauksen mukaiset mitoitusarvot onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmällä. CLT-seinärakenteessa tehollinen hiiltymäsyvyys vähennetään tulipalotilanteesta riippuen joko vain yhdeltä puolen seinää tai molemmilta seinäpinnoilta. Hiiltymäsyvyyden ulottuessa pintalamelleista toiseen lamellikerrokseen liitoshyötysuhde menetetään lamellikerrosten välillä. Jos pintalamellit hiiltyvät kokonaan, levyn keskelle jää vielä kantosuunnassa oleva lamellikerros. Kantosuunnassa olevien pintalamellikerrosten menettäessä kantokykynsä leikkausvoima vaikuttaa saman suuruisella voimalla koko jäljellä olevan poikkileikkauksen poikkipinta-alalla. Näin ollen leikkausjännityksen mitoitusarvo palotilanteessa voidaan laskea kaavalla 26:

$$\tau_{R,d,fi} = \frac{3 \cdot V_{d,fi}}{2 \cdot A_{ef,fi}} \quad (26)$$

Missä

$\tau_{R,d,fi}$ leikkausjännityksen mitoitusarvo palotilanteessa

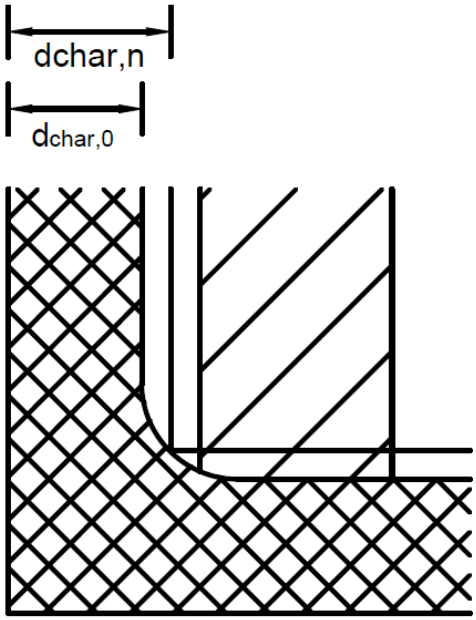
$V_{d,fi}$ leikkausvoima palotilanteessa

$A_{ef,fi}$ tehollinen pinta-ala palotilanteessa

6 CLT-pilarirakenteen mitoitus

CLT-pilarirakenne ei oleellisesti poikkea murto- ja käyttörajatilamitoituksen osalta CLT-seinärakenteen mitoituksesta. Poikkeuksena on poikkileikkauksen leveys; seinärakennetta mitoittaessa tutkitaan yhden metrin mittaista kaistaa seinästä, mutta pilarirakennetta mitoitettaessa poikkileikkaukselle määritetään tietty leveys. Pilarin mitoitus nurjahdukselle ja taivutukselle tehdään ainoastaan poikkileikkauksen heikommassa suunnassa, joka on sama kuin seinärakenteella. Mitoituksen kulku on esitetty luvussa 5.

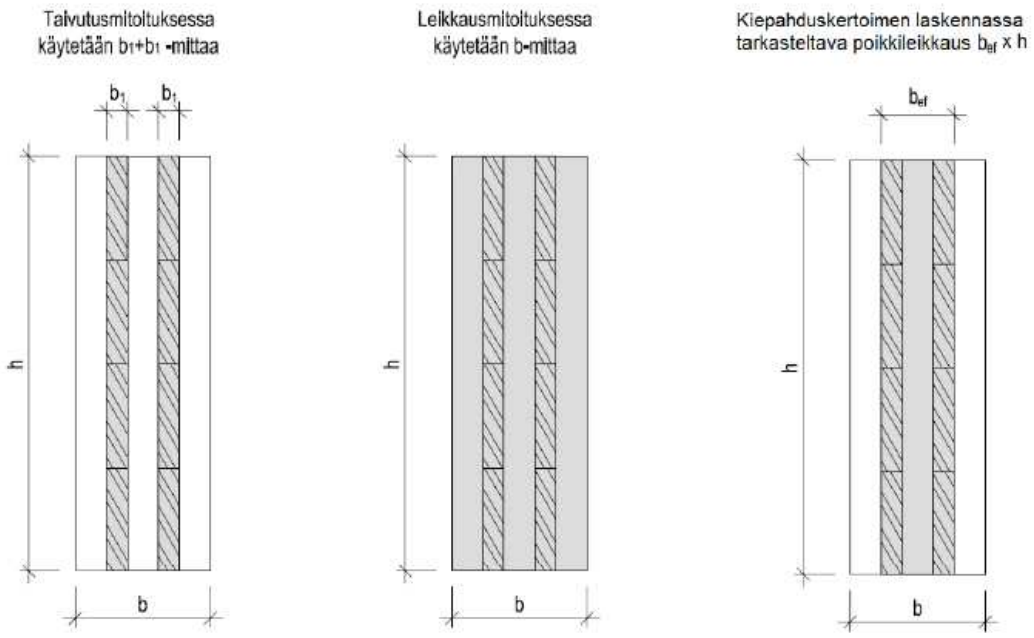
Olennaisin ero pilarirakenteen mitoituksessa seinärakenteen mitoitukseen on onnettomuustilanteen mitoitus. Seinärakenteessa paloa tutkitaan yksidimensionaalisesti yhdellä puolen tai molemmin puolin seinärakennetta. Sen sijaan pilarirakenne mitoitetaan palotilanteissa, joissa palo tapahtuu yhdessä, kahdessa, kolmessa tai kaikissa neljässä pinnassa. Kun hiiltymää tapahtuu kahdella vierekkäisellä pinnalla, hiiltymäsyvyyden arvona käytetään 0,8 millimetriä minuutissa. Kyseinen arvo on suurempi kuin yksidimensionaalisen hiiltymäsyvyyden arvo, koska pilarirakenteessa huomioidaan kulmapyöristyksen sekä halkeamien vaikutuksen palotilanteessa. Kuvassa 8 on havainnollistettu yksidimensionaalisen ja nimellisen hiiltymäsyvyyden ero. [14, s. 23.]



Kuva 8. Yksidimensionaalisen hiiltymäsyvyyden $d_{char,0}$ ja nimellisen hiiltymäsyvyyden $d_{char,n}$ välinen ero

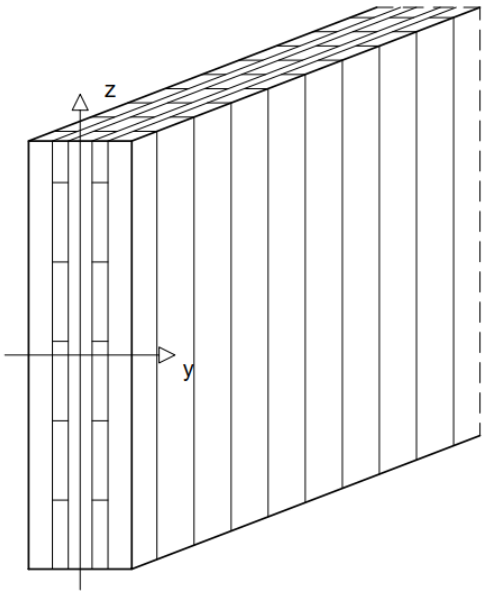
7 CLT-palkkirakenteen mitoitus

CLT-palkkirakenteen mitoitus suoritettiin RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohjeiden ja CLT-tuotteiden yleisiä suunnitteluohjeita täydentävien lisäohjeiden mukaisesti. Palkin taipumia määritettäessä mitoituksen kulku ei eroa sahatavaran mitoitusohjeista. Taivutuskestävyys mitoitetaan jännevälin suunnassa olevien lamellikerrosten, leikkauskestävyys palkin bruttopoikkileikkauksen ja kiepahduskestävyys jännevälinsuuntaisten lamellikerrosten rajoittaman poikkileikkauksen avulla. Kuvassa 9 on esitetty poikkileikkauksessa huomioitavat lamellikerrokset eri mitoitustilanteissa ja niiden avulla määritetään CLT-rakenteelle tehdolliset poikkileikkausvakiot.



Kuva 9. CLT-palkkirakenteen mitoitus tapauksissa huomioitavat poikkileikkauksen lamellikerrokset. [15, s. 5.]

Palkkirakenteen mitoituksessa huomioitava poikkileikkaus on CLT-levyn pystysuunnassa. Kuvassa 10 on esitetty palkkirakenteen poikkileikkauksen akselit, joiden suunnassa palkkirakenteen kestävyyksiä tarkastellaan. Poikkileikkauksen pystysuunnassa on z-akseli ja poikittaissuunnassa y-akseli. CLT-palkkirakenteen tehdolliset poikkileikkausarvot määritetään ja taivutuskestävyys mitoitetaan y-akselin suuntaan. Kiepahduskestävyyden mitoituksessa tehdollinen jäyhyysmomentti määritetään z-akselin ja taivutusvastus y-akselin suuntaan.



Kuva 10. CLT-palkkirakenteen poikkileikkauksen akselit

7.1 Tehollliset poikkileikkausarvot

Kiepahduskestävyyttä määritettäessä tarvitaan poikittaissuunnan tehollista jäyhyysmomenttia. Jäyhyysmomentin laskennan kulku on esitetty luvussa 5.1.

CLT-rakenteisen palkin taivutusjännityksen mitoitusarvoa laskettaessa tarvitaan poikkileikkauksen tehollista taivutusvastusta. Taivutusvastuksen arvo lasketaan huomioimalla ainoastaan vaakasuunnassa olevien lamellikerrosten muodostaman poikkileikkauksen taivutusvastus.

Mitoittavaa tehollista poikkileikkauksen pinta-alaa tarvitaan leikkausjännityksen mitoituksessa. Tehollliseen poikkileikkausalaan huomioidaan koko palkkirakenteen poikkileikkauksen pinta-ala, jota laskettaessa leveyssuunnassa on huomioitava halkeamien vaikutus. CLT rakenteille halkeamien vaikutuksen huomioiva kerroin on määritetty arvoon yksi, joten kertoimella ei ole vaikutusta poikkileikkauksen leveyteen. [17, s. 75.]

7.2 Mitoitus taivutukselle murtorajatilassa

CLT-palkkirakenteen poikkileikkaus mitoitetaan taivutukselle murtorajatilassa. Taivutusjännitys poikkileikkauksessa aiheutuu poikkileikkausta kuormittavasta tasaisesta pystykuormasta ja tämän kuorman aiheuttamasta taivutusmomentista. Taivutusjännityksen suuruus riippuu voiman suuruuden lisäksi tehollisen taivutusvastuksen suuruudesta ja näin ollen poikkileikkauksen koosta ja sahatavaran ominaisuuksista. Taivutusjännityksen arvo on laskettu kaavassa 6 ja taivutuslujuuden mitoitusarvo kaavassa 7, luvussa 5.3 [15, s. 5; 16, s. 3.].

Taivutusjännityksen arvo ei saa ylittää taivutuslujuuden arvoa. Taivutuksen mitoitusehto on esitetty kaavassa 27:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \tag{27}$$

Missä

$\sigma_{m,d}$ taivutusjännityksen mitoitusarvo

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

7.3 Mitoitus leikkaukselle murtorajatilassa

CLT-palkkielementti mitoitetaan leikkaukselle pystysuuntaisen tasaisen kuorman aiheuttamasta kuormituksesta. Leikkausvoiman arvo on suurimmillaan tuen lähellä, ja CLT-palkeissa se huomioidaan kokonaan ilman leikkausvoiman pienennystä. Leikkausjännityksen mitoitusarvo saadaan jakamalla leikkausvoiman arvo poikkileikkauksen pinta-alalla. Leikkausjännityksen arvo määritetään kaavalla 28 [15, s. 5; 16, s. 4; 21, s. 273.]:

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot A_{ef}} \tag{28}$$

Missä

τ_d leikkausjännityksen mitoitusarvo

V_d leikkausvoiman mitoitusarvo

A_{ef} poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

Leikkausjännityksen mitoitusarvo ei saa ylittää leikkauslujuuden mitoitusarvoa. Leikkauslujuuden mitoitusarvon laskeminen on esitetty kaavassa 29 [15, s. 2; 16, s. 3; 17, s. 46]:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \tag{29}$$

Missä

$f_{v,d}$ leikkauslujuuden mitoitusarvo

K_{mod} kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

$f_{v,k}$ leikkauslujuuden ominaisarvo

γ_m materiaalien osavarmuusluku

Leikkauksen mitoitusehto esitetään kaavassa 31 [17, s. 74]:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \tag{30}$$

Missä

$\tau_{v,d}$ leikkausjännityksen mitoitusarvo

$f_{v,d}$ leikkauslujuuden mitoitusarvo

7.4 Kiepahduskestävyys

Palkin kiepahduskestävyys tulee tarkistaa, jos palkkia ei ole kiepahdustuettu. Kiepahduskestävyys määritetään kriittisen taivutusjännityksen avulla. Taivutusjännityksen arvo ei saa ylittää kriittisen taivutusjännityksen arvoa kiepahdustuettomassa palkissa. Taivutusjännityksen ylittäessä kriittisen taivutusjännityksen arvon palkille on suunniteltava kiepahdustuenta.

Syrjällään taivutetun CLT-palkkirakenteen kriittinen taivutusjännitys lasketaan käyttäen tehollista taivutusvastusta ja -jäyhyysmomenttia sekä vääntöjäyhyysmomenttia. Vääntöjäyhyysmomentissa otetaan huomioon pituussuuntaisten lamellien rajoittama poikkileikkaus, jolloin huomioon otetaan myöskin keskellä oleva pystysuuntainen lamellikerros. Vääntöjäyhyysmomentin arvo lasketaan kaavalla 31 [15, s. 5; 16, s. 4; 22, s. 5.]:

$$I_{tor} = \frac{h \cdot (d_{ef} + h_2)^3 \cdot \left[1 - 0{,}63 \cdot \left(\frac{d_{ef} + h_2}{h}\right)\right]}{3} \quad (31)$$

Missä

I_{tor} vääntöjäyhyysmomentti

h palkin korkeus

d_{ef} tehollinen pituussuuntaisten lamellikerrosten paksuus

h_2 keskellä sijaitsevan pystysuuntaisen lamellikerroksen paksuus

Kriittinen taivutusjännitys kuvaa sitä rajaa, jossa palkin kuormitettava puoli eli puristuspuoli lähtee kääntymään sivulle taivutusjännityksestä taivutuskapasiteettia ylittämättä. Erityisen alttiita kiepahdukselle ovat palkkirakenteet, joiden poikkileikkauksessa korkeuden suhde leveyteen on suuri. Kriittinen taivutusjännitys CLT-palkkirakenteessa määritetään kaavan 32 avulla [17, s. 83.]:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_Z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_y} \quad (32)$$

Missä

$\sigma_{m,crit}$ kriittinen taivutusjännitys

$M_{y,crit}$ kriittinen taivutusmomentti

W_y vahvemman suunnan taivutusvastus

$E_{0,05}$ syynsuuntaista kuormitusta vastaava kimmokerroin

I_z heikomman suunnan jäyhyysmomentti

$G_{0,05}$ syynsuuntaisessa tasossa syntyvää leikkausmuodonmuutosta vastaava liukukerroin

I_{tor} vääntöjäyhyysmomentti

l_{ef} palkin tehollinen pituus, joka riippuu taulukon 7 mukaisesti tuentaehdosta ja kuorman jakautumisesta

Taulukko 7. Tehollisen pituuden suhde jänneväliin. [17, s. 85.]

Palkin tuenta	Kuormituksen tyyppi	l_{ef}/l *)
Vapaasti tuettu	Vakiomomentti	1
	Tasaisesti jakautunut kuorma	0,9
	Pistekuorma jänteen keskellä	0,8
Uloke	Tasaisesti jakautunut kuorma	0,5
	Pistekuorma vapaassa päässä	0,8
	Vakiomomentti	2

*) Esitetty tehollisen jännevälin l_{ef} ja todellisen jännevälin l suhde pätee palkille, joka ei tuillaan pääse kiertymään pituusakselin ympäri ja johon kuormitus vaikuttaa painopisteen korkeudella. Jos määräävä kuormitus vaikuttaa palkin puristetun reunan korkeudella, tehollisen pituuden l_{ef} arvoa suurennetaan mitan 2 h verran, ja sitä voidaan pienentää mitan 0,5 h verran, jos määräävä kuormitus vaikuttaa vedetyn reunan korkeudella.

Kiepahdukselle alttiina olevalle palkkirakenteelle määritetään laskennallisesti taivutuskestävyyttä pienentävä kerroin. Kyseisen kertoimen laskemista varten määritetään CLT-rakenteiselle palkille suhteellinen hoikkuus kaavassa 33 [17, s. 83.]:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \tag{33}$$

Missä

$\lambda_{rel,m}$ palkin suhteellinen hoikkuus

$f_{m,k}$ taivutuslujuuden ominaisarvo

$\sigma_{m,crit}$ kriittinen taivutusjännitys

Palkin ollessa kiepahdukselle alttiina rakenneosan taivutuskestävyys pienenee. Taivutuskestävyyttä pienennetään kertoimella, joka ottaa huomioon kiepahdusriskin. CLT-palkkirakenteen täyttäessä kirjan RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje [17] luvussa 10 esitetyt vaatimukset määritetään kiepahdusriskin huomioiva kerroin kaavan 34 avulla [17, s. 85.]:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel,m} \leq 0{,}75 \\ 1{,}56 - 0{,}75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{kun } 0{,}75 < \lambda_{rel,m} \leq 1{,}4 \\ \frac{1}{\lambda^2_{rel,m}} & \text{kun } 1{,}4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (34)$$

Missä

k_{crit} kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kiepahdusriskin takia pienentynyt taivutuskestävyys

$\lambda_{rel,m}$ palkin suhteellinen hoikkuus

Kriittisen taivutusjännityksen arvo ei saa ylittää taivutuslujuuden arvoa. Taivutuslujuutta pienennetään kiepahdusriskin huomioivalla kertoimella. Mitoitusehto kiepahduskestävyydelle on esitetty kaavassa 35 [17, s. 83.]:

$$\sigma_{m,crit} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (35)$$

Missä

$\sigma_{m,crit}$ kriittinen taivutusjännitys

k_{crit} kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kiepahdusriskin takia pienentynyt taivutuskestävyys

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

7.5 Mitoitus taipumalle käyttörajatilassa

Palkkirakenteissa kuormasta aiheutuvat taipumat lasketaan yhdistetyillä ominaiskuormilla, joiden yhteisvaikutus aiheuttaa rakenteeseen hetkellisen kokonaistaipuman. Hetkellistä taipumaa aiheuttavat sekä lyhytaikainen hyötykuorma että pysyvä kuormitus. Molempien kuormien aiheuttama taipuma lasketaan erikseen. Tässä työssä CLT-rakenteisen palkin taipumaa tutkitaan kolmella tuentatavalla, jotka on esitetty kuvassa 4. Taipumamitoituksen kulku on kokonaisuudessaan esitetty luvussa 5.6. Myös nivelellisesti tuetun palkin hetkellisen taipuman kaava on esitetty kyseisessä luvussa. Toisesta päästään nivelellisesti ja toisesta jäykästi kiinnitetyn palkin hetkellinen taipuma lasketaan kaavan 36 mukaisesti. Kaava on esitetty muuttuvan kuorman arvolle [21, s. 327.]:

$$W_{inst.Q} = \frac{q_k \cdot L^4}{185 \cdot E_{0,mean} \cdot I_{ef}} \quad (36)$$

Missä

$W_{inst,Q}$ hetkellinen taipuma muuttuvasta kuormasta

q_k muuttuvan kuorman ominaisarvo

L korkeus tuelta tuelle

$E_{0,mean}$ kimmomoduulin ominaisarvo syyn suuntaan

I_{ef} poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

Päistään jäykästi kiinnitetyn palkin hetkellinen taipuma lasketaan kaavan 37 mukaisesti. Kaava on esitetty muuttuvan kuorman arvolle [21, s. 323.]:

$$W_{inst.Q} = \frac{q_k \cdot L^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_{ef}} \quad (37)$$

Missä

$W_{inst,Q}$ hetkellinen taipuma muuttuvasta kuormasta

q_k muuttuvan kuorman ominaisarvo

L korkeus tuelta tuelle

$E_{0,mean}$ kimmomoduulin ominaisarvo syyn suuntaan

I_{ef} poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

CLT-seinärakenteen mitoituksesta poiketen palkkirakenteelle lasketaan lopputaipuma huomioiden pysyvän kuorman sekä lyhytaikaisen kuorman viruma. Lyhytaikaisen kuorman virumalukuun on huomioitava muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuutta kuvaava yhdistelykerroin. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet on esitetty taulukossa 8. Näin ollen CLT-palkkirakenteen lopputaipuman kaava muuttuu kaavassa 36 esitetyn mukaiseksi [17, s. 97.]:

$$W_{fin} = W_{inst,G}(1 + k_{def}) + W_{inst,Q}(1 + \psi \cdot k_{def}) \quad (38)$$

Missä

W_{fin} lopputaipuma

$W_{inst,G}$ hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta

k_{def} virumaluku

$W_{inst,Q}$ hetkellinen taipuma muuttuvasta kuormasta

ψ_2 muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuutta kuvaava kerroin

Taulukko 8. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet. ψ_0 on ominaisyhdistelyssä käytettävä kerroin. ψ_1 kuvaa tavallisesti toistuvan kuormituksen osuutta ja ψ_2 muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuutta. [20, s. 18.]

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6**)
Luokka G: liikennöitävät tilat, 30kN < ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3**)
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3)*) kun			
s_k < 2,75 kN/m^2	0,7	0,4	0,2
s_k ≥ 2,75 kN/m^2	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ***)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

*) Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä.
Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ-arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.
**) Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$
***) Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia

7.6 Mitoitus palotilanteessa

CLT-palkkirakenteen mitoitus ei poikkea luvussa 5 läpi käydyn seinärakenteen palomitoituksesta laskennallisesti. Palkkirakenteessa hiiltymäsyvyys määritetään joko kolmelle tai neljälle pinnalle riippuen palkin yläpuolisista rakenteista. Palon vaikuttaessa vierekkäisissä pinnoissa yhtä aikaa on otettava huomioon kulmapyöristyksen sekä halkeamien vaikutus palotilanteessa. Palotilanteet on esitetty kuvassa 4.

8 Laskentapohjat

Laskentapohjien toteutukseen on käytetty Mathcad-ohjelmistoa. Laskentapohjat koostuvat neljästä sivusta, joissa on lähtötiedot, laskentakaavat sekä laskennan tulokset. Kahdella ensimmäisellä sivulla on esitetty CLT-rakenteen lähtötiedot, joihin suunnittelija määrittää CLT-rakenneosan ominaisuudet sekä kuormitukset. Kaavat on piilotettu valikkojen taakse kolmannella sivulla. Viimeiselle eli neljännelle sivulle on koottu laskennan tulokset, jotka esitetään käyttöasteina. Käyttöaste osoittaa, kuinka paljon koko rakenneosan kantokyvystä on käytetty. Laskentapohjat on laadittu tulostettavaan muotoon.

8.1 Toimintaperiaate

Toimintaperiaatteena laskentapohjien laskennassa on ehtoyhtälöiden toteutuminen. Eurokoodeihin perustuvat mitoitusehdot on määritelty kaavoihin, joiden toteutuminen määräytyy annettujen lähtöarvojen perusteella. Rakenteelle määritetään sitä rasittavat yhdistellyt kuormitukset ja rakenteen kestävyysominaisuuksien arvot. Rasitusten ja kestävyysominaisuuksien suhteesta määräytyvät käyttöasteet. Käyttöaste kertoo prosentuaalisen osuuden rakenneosan käytetystä kapasiteetista. Kuvassa 11 esitetään ulkoasua laskennan tulokset -sivulta. Laskentapohjassa mitoitusehdot on määritelty kolmelle kuormitusyhdistelmälle, jolloin eri kuormitusyhdistelmillä toteutuvia käyttöasteita voidaan tarkastella ja valita pahin mahdollinen vaihtoehto.

$$MITOITUS_NURJAHDUKSELLE = \text{"OK"}$$

Käyttöaste kuormitusyhditelmä 1 murtorajatilassa

$$\frac{\sigma_{c.d.1}}{k_c \cdot f_{c.d.1}} + \frac{\sigma_{m.d.1}}{f_{m.d.1}} = 36.19 \cdot \%$$

Käyttöaste kuormitusyhditelmä 2 murtorajatilassa

$$\frac{\sigma_{c.d.2}}{k_c \cdot f_{c.d.2}} + \frac{\sigma_{m.d.2}}{f_{m.d.2}} = 31.01 \cdot \%$$

Käyttöaste kuormitusyhditelmä 3 murtorajatilassa

$$\frac{\sigma_{c.d.3}}{k_c \cdot f_{c.d.3}} + \frac{\sigma_{m.d.3}}{f_{m.d.3}} = 37.09 \cdot \%$$

Käyttöaste onnettomuusrajatilassa

$$\frac{\sigma_{c.d.fi}}{k_{c.fi} \cdot f_{c.d.fi}} + \frac{\sigma_{m.d.fi}}{f_{m.d.fi}} = 76.2 \cdot \%$$

Kuva 11. Nurjahdusmitoituksen mitoitusehdot ja käyttöasteet eri kuormitusyhdistelmille.

Laskentapohjissa lähtöarvot, jotka määritetään kahdella ensimmäisellä sivulla, syötetään keltaisen värisiin laatikoihin. Tulokset eli käyttöasteet ovat tarkastettavissa kuvassa 11 esitetyllä tavalla väriltään sinisistä laatikoista. Mitoitusehdon täyttyminen on esitetty ehtojen yläpuolella olevassa otsikossa. Käyttöasteen ollessa alle 85 % otsikkoon tulee ilmoitus ”OK”, käyttöasteen ollessa yli 85 % ”TARKISTA” ja käyttöasteen ylittyessä ”ERROR”.

Mitoitusehdot määritellään kaavojen avulla, jotka syötetään Mathcad-ohjelmistossa ratkaisujärjestyksessä. Tässä työssä ratkaisujärjestyksellä tarkoitetaan järjestystä, jossa kaavassa esiintyvät lähtöarvot on määritetty ja muuttujat ratkaistu ennen kaavaa, kaavan yläpuolella.

8.2 Toteutus

Laskentapohjaa lähdettiin toteuttamaan toimeksiantajan tarpeesta saada kaikille CLT-levyvalmistajille yhtenäinen mitoittava laskentapohja. Työn tekeminen alkoi tutustumalla Suomessa toimiviin CLT-levyvalmistajiin ja heidän tuotteisiinsa. CLT-levytuotteille ei ole tätä työtä kirjoitettaessa tarjolla eurooppalaista harmonisoitua tuotestandardia (hEN-tuotestandardi), joka helpottaisi eri valmistajien tuotteiden vertailua. Eurooppalainen standardisoimisjärjestö laatii tuotteille CE-merkinnät, joilla osoitetaan tuotteen ominaisuuksien täyttyminen harmonisoidun tuotestandardin mukaan. Näin ollen CLT:lle ei vielä vaadita CE-merkintää.

Laskentateoria perustuu Rakennusinsinöörien liiton julkaisemiin aineistoihin CLT-rakenteiden ja puurakenteiden mitoituksesta. Tässä työssä CLT-rakenteiden mitoittamisessa sovelletaan joustavasti kootun kerrospalkin teoriaa, jolla tarkoitetaan mekaanisin liittimin osista yhdistettyä rakenneosaa huomioiden liitossiirtymien vaikutus. Kahdelle ensimmäiselle sivulle koottiin lähtötiedot CLT-levyn ominaisuuksista, joita mitoittamisessa tarvitaan. Kun lähtötiedot oli koottu ensimmäisille sivuille, alettiin mitoituksen kaavat kirjoittamaan ohjelmaan siinä järjestyksessä kuin ne tässä työssä on esitetty. Laskennassa käytettävät kaavat on kätketty valikoihin selaamisen helpottamiseksi. Kaavat kätkevät valikot on jaoteltu niin, että valikko sisältää aina yhden mitoitusarvon ratkaisun. Kuormitusten ja kestävyyksien mitoitusarvojen suhteet ja käyttöasteet koottiin yhdelle sivulle, jotta tulosten tarkasteleminen olisi helpompaa. Tulosten tarkastelussa murtorajatilamitoituksissa suunnittelija valitsee kuormitusyhdistelmillä lasketuista käyttöasteista pahimman tapauksen. Käyttö- sekä onnettomuusrajatilan mitoituksissa suunnittelija valitsee pahimman kuormitusyhdistelmän, jolle käyttöasteet lasketaan.

8.2.1 Rajaukset

Laskentapohjat laadittiin erikseen seinä-, pilari- ja palkkirakenteelle. Vaaka- ja pystyrakenneosille päädyttiin tekemään omat laskentapohjat, koska niiden mitoitukset eroavat olennaisesti toisistaan. Pilarin ja seinän mitoitukseen toteutettiin myös omat laskentapohjat erilaisesta palomitoituksesta johtuen. Tämä helpottaa laskentapohjien käyttöä

Eurokoodeihin perustuvaa kuormitusyhdistelyä ei laskentapohjissa suoriteta, vaan murtorajatilan mitoituksissa tarvittavat kuormat tuodaan valmiiksi yhdisteltyinä mitoitusarvoina. Käyttörajatilan mitoitusta varten kuormitukset tuodaan laskentapohjaan ominaisarvoina. Murtorajatilassa tarvittavia mitoitusarvoja ovat:

- taivutusmomentin mitoitusarvo
- puristavan voiman mitoitusarvo
- leikkausvoiman mitoitusarvo.

CLT-palkin mitoituksessa ei esiinny puristusta. Taipumien mitoituksissa tarvitaan seuraavia kuormien ominaisarvoja:

- tuulikuorman ominaisarvo (seinän ja pilarin taipuman mitoitus)
- hyötykuorman ominaisarvo (palkin taipuman mitoitus)
- pysyvän kuorman ominaisarvo (palkin taipuman mitoitus).

Seinä- ja pilarirakenneosat mitoitetaan yksiaukkoisena ja nivelellisesti tuettuna. Palkit tarkastellaan myös 1-aukkoisena ja tarkasteltavat tuentatavat ovat:

- nivelellisesti tuettu molemmista päistään
- toinen pää on nivelellinen ja toinen jäykkä
- jäykästi tuettu molemmista päistään.

Laskentapohjat soveltuvat vain kolmesta tai viidestä lamellikerroksesta valmistettuihin CLT-rakenteisiin, koska tässä työssä käytetty mitoitusmenetelmä ei päde enää yli viidestä lamellikerroksesta koostuviin CLT-rakenteisiin. Useammasta kuin viidestä lamellikerroksesta koostuvan

CLT-rakenteen mitoituksen sisällyttäminen näihin laskentapohjiin olisi lisännyt työmäärää huomattavasti ja viidestä lamellikerroksesta koostuvalla CLT-rakenteella saavutetaan jo usein riittävä kantokyky tässä työssä käsiteltävissä rakenneosissa.

8.2.2 Lähtöarvot

Jokaisen tulostettavan sivun yläreunassa on kuvan 12 mukainen nimiö. Nimiöön syötetään suunnittelijan sekä kohteen tiedot ja päiväys.

SUUNNITTELU LAUKKA		Rakennelaskelma			
		Nimi:	-	Sivu	1 (3)
		Päiväys:	-		
Rakennuskohde:	Työ no:	Sisältö:			Sijainti:
-	-				-

Kuva 12. Rakennelaskelman nimiö

Laskennan lähtötiedot syötetään laskentapohjaan käsin keltaisiin laatikoihin. Suunnittelija syöttää CLT-valmistajan ilmoittaman materiaalin ominaisuusarvot, valitsee varmuusluvut ja -kertoimet käyttöluokka huomioiden. Kuvassa 13 on esitetty CLT-palkkirakenteen laskennan lähtötietoja. Ominaisuusarvot syötetään muodossa N/mm².

Laskennan lähtötiedot

Virumaluku

$k_{def} := 0.6$

Materiaalin osavarmuusluku

$\gamma_m := 1.25$

Materiaalin osavarmuusluku onnettomuustilanteessa (palo)

$\gamma_{m.fi} := 1.00$

Muuttuvan kuorman pitkäaikaisuus

$\psi_2 := 0.3$

Taivutuslujuuden ominaisarvo

$f_{m.k} := 24 \frac{N}{mm^2}$

puristuslujuuden ominaisarvo

$f_{v.k} := 2.5 \frac{N}{mm^2}$

Halkeamien vaikutuksen huomioiva kerroin

$k_{cr} := 1.0$

Kimmomoduuli

$E_{0.mean} := 12500 \frac{N}{mm^2}$

$E_{0.05} := 7400 \frac{N}{mm^2}$

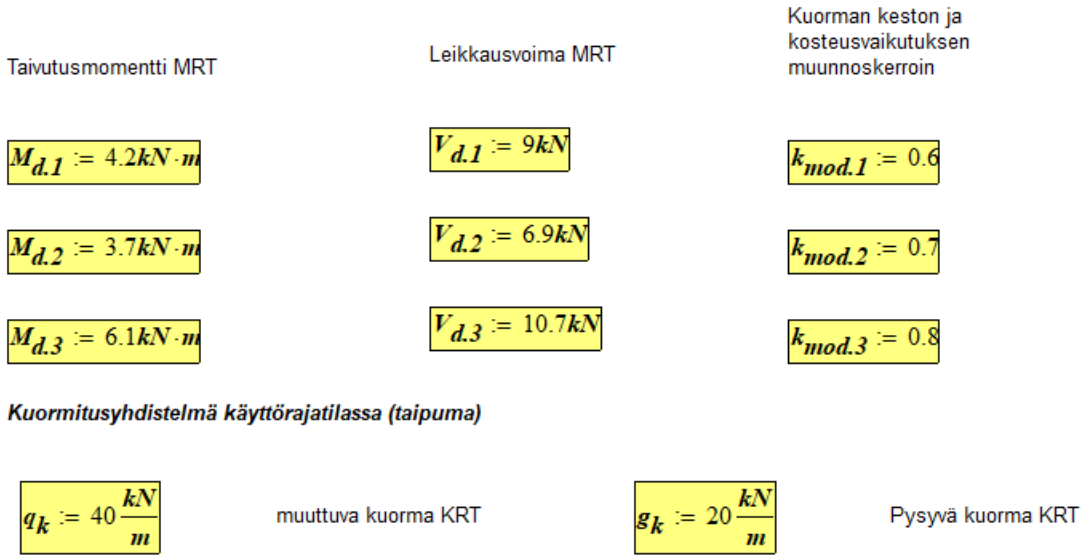
Liukumoduuli

$G_{0.05} := 460 \frac{N}{mm^2}$

$G_{R.mean} := 65 \frac{N}{mm^2}$

Kuva 13. CLT-palkkirakenteen mitoituksen lähtötiedot.

Kuormitusyhdistelyistä saadut taivutusmomenttien arvot syötetään laskentapohjiin käyttäen yksikkönä kNm, leikkausvoimalle ja puristavalle voimalle kN ja ominaiskuormitukselle kN/m. Kuormitusyhdistelmien aikaluokkien mukaan määritellään rakenteelle muunnoskerroin k_{mod}, joka ottaa huomioon kuorman keston ja kosteusvaikutukset rakenteessa. Kuvassa 14 esitetään CLT:stä valmistetulle palkille määritettyjä kuormituksia.



Kuva 14. CLT-palkkirakenteen kuormitukset.

CLT-levy mitoitetaan seinärakenteissa metrin pituiselle matkalle, jolloin seinärakenteen laskentapohjaan syötetään vain seinän korkeus ja lamellikerrosten paksuudet. Palkki- ja pilarirakenteissa laskentapohjiin syötetään sekä rakenteen korkeus että leveys kuvan 15 mukaisesti. Mitat syötetään laskentapohjiin millimetreinä.

CLT-palkkirakenteen koko

Palkin pituus	Palkin korkeus	
$L_1 := 2000mm$	$h := 500mm$	
$h_1 := 30mm$		Kantosuunnassa olevan 1. lamellikerroksen paksuus
$d_1 := 20mm$		Pituussuunnassa olevan 1. lamellikerroksen paksuus
$h_2 := 20mm$		Kantosuunnassa olevan 2. lamellikerroksen paksuus
$d_2 := 20mm$		pituussuunnassa olevan 2. lamellikerroksen paksuus
$h_3 := 30mm$		Kantosuunnassa olevan 3. lamellikerroksen paksuus

Kuva 15. CLT-levyn mitat sekä lamellien paksuudet.

Onnettomuusrajatilassa käytettävät kuormat syötetään laskentapohjaan samalla tavalla kuin murtorajatilan kuormitukset. Palonkestoajat voidaan syöttää jokaiselle palolle alttiina olevalle pinnalle erikseen minuutteina kuvassa 16 esitetyllä tavalla.

Palomitoitus

Kuormitusyhdistelmä onettomuusrajatilassa

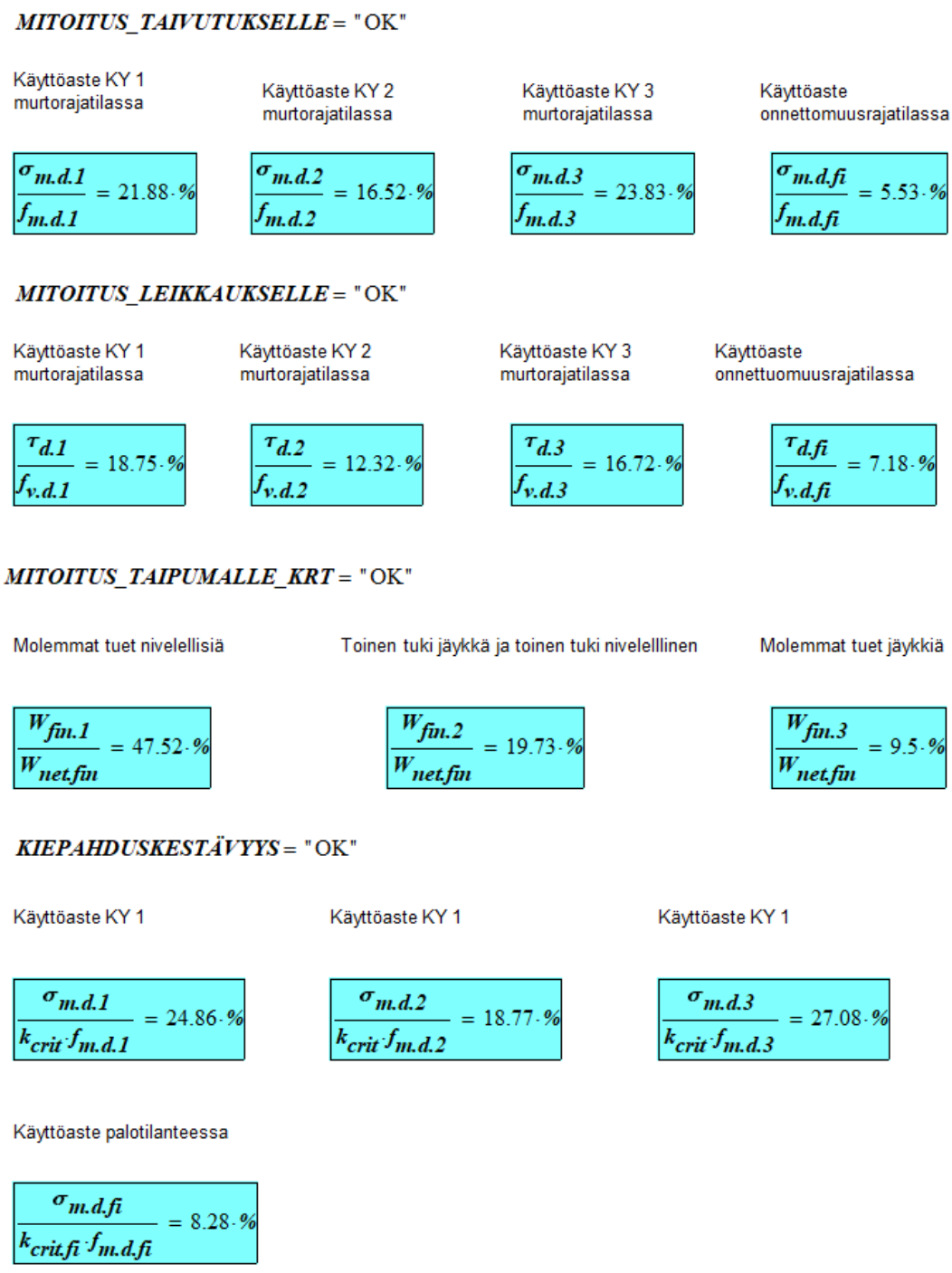
Taivutusmomentti	Pystykuorma	Leikkausvoima	Kuorman keston ja kosteus-vaikutuksen muunnoskerroin onettomuustilanteessa (palo)
$M_{d.fi} := 2kN \cdot m$	$N_{d.fi} := 80kN$	$V_{d.fi} := 4kN$	$k_{mod.fi} := 1.1$

$t_1 := 30min$	Palon kesto minuutteina 1. pinnassa
$t_2 := 30min$	Palon kesto minuutteina 2. pinnassa
$t_3 := 30min$	Palon kesto minuutteina 3. pinnassa
$t_4 := 20min$	Palon kesto minuutteina 4. pinnassa

Kuva 16. Kuormitukset sekä palonkestoajat palotilanteessa.

8.2.3 Tulokset

Kaikki laskennan tulokset on koottu yhdelle sivulle tulosten tarkastelun helpottamiseksi ja ne saadaan suoraan käyttöasteina. Kuvassa 17 esitetään laskennan tuloksia palkkirakenteen mitoituksesta.



Kuva 17. CLT-palkin mitoituksen tulokset.

Kun laskentapohjat oli tehty valmiiksi ja toimeksiantajan puolelta tarkastettu, vertailulaskelmat tehtiin paperille käsin oikeellisuuden tarkistamiseksi. Tarkistus toteutettiin vertailemalla käsinlaskennan ja laskentapohjien tuloksia, eikä tulosten välillä ollut merkittävää eroa. Pienten marginaalisten erojen voidaan olettaa johtuvan laskentamenetelmien välisistä pyöristyseroista, joten laskentapohjien rakenteille antamia käyttöasteita voidaan pitää luotettavina.

9 Analysointi

Tämän opinnäytetyön tuloksena tehdyt laskentapohjat soveltuvat enintään viisikerroksisesta CLT-levystä valmistettujen seinä-, pilari- ja palkkirakenteiden mitoitukseen. Laskentapohjat on toteutettu tiiviissä yhteistyössä toimeksiantajana toimivan yrityksen kanssa, joten laskentateoria on tarkastettu myös heidän osaltaan. Laskentapohjia on käytetty toimeksiantajan toimesta rakenneosien mitoittamiseen niiden valmistuttua.

Tässä työssä toteutetun laskennan oikeellisuudesta vastaa laskentapohjia käyttävä suunnittelija. Laskentapohjan laatija ei vastaa tulosten oikeellisuudesta, koska suunnittelijan on tapauskohtaisesti varmistettava laskentapohjien soveltuvuus mitoittamiseen. Laskentapohjaa käyttävän suunnittelijan tulee tietää, mitä kohtaa rakenteesta ollaan mitoittamassa ja näin ollen suunnittelija vastaa laskentapohjista saaduista tuloksista. Ennen laskentapohjien käyttöä suunnittelijan on syytä tarkistaa laskennan kulku varmistaakseen laskentapohjan soveltuvuuden rakenteen mitoittamiseen.

Laskentapohjia on mahdollista kehittää tulevaisuudessa mitoitustarpeiden mukaan. Esimerkiksi CLT-seinän laskentapohjaan voisi lisätä jäykistävän seinän kestävyyden mitoituksen. Laskentapohjat ovat helposti muotoiltavissa myös CLT-laattarakenteen mitoittamiseen. Myös palomitoitusta voisi kehittää, koska näissä laskentapohjissa CLT palotilanne määritetään altistuen välittömästi palolle. CLT-rakenteeseen voitaisiin lisätä palolta suojaavia rakennekerroksia, esimerkiksi kipsilevyverhous, jolloin CLT-levylle saataisiin paremmat kestävyysominaisuudet onnettomuusrajatilan mukaisissa tarkasteluissa.

Mathcad-ohjelmistosta, jolle laskentapohjat luotiin, minulla ei ollut aiempaa käyttökokemusta ennen opinnäytetyön tekemistä. Ohjelmiston käyttö on loogista, joten opin nopeasti käyttämään sen perustoimintoja. Tämän työn toimeksiantajana olleessa yrityksessä kyseisen ohjelmiston käytöstä on kokemusta, joten hyviä vinkkejä ja apua haastavissa tilanteissa on saatu yrityksen henkilöstöltä.

Työtä aloittaessa tarkoitus oli saada vakiolevyrakenteiden ominaisuudet ja lamellien paksuudet valittua valikosta valmistajakohtaisesti niin, ettei laskentapohjiin tarvitsi kyseisiä tietoja syöttää erikseen. Kyseisen ominaisuuteen perehtyminen ja sen toteuttaminen Mathcad-ohjelmistolle

olisi vienyt paljon aikaa, joten kyseistä tavoitetta ei saavutettu. Helpompi ratkaisu oli tehdä laskentapohjat niin, että suunnittelija itse määrittää käytettävän levyrakenteen lamellikerrosten paksuudet ja ominaisuudet.

Tätä työtä tehdessäni opin puurakenteiden mitoittamisesta paljon uusia asioita. CLT-rakenteiden mitoitukseen perehtyminen lisäsi tietämystäni Eurokoodien mukaisesta puurakenteiden mitoituksesta ja sen soveltamisesta CLT-rakenteisiin. Mekaanisin liittimin kootun kerrospalkin teoria ja sen soveltaminen tässä opinnäytetyössä vaativat erityisesti miettimistä ja sisäistämistä. Laskentapohjat onnistuivat hyvin ottaen huomioon ennestään tuntemattoman laskentaohjelmiston ja lähdemateriaalin niukkuuden. Laskentapohjat ovat selkeät ja soveltuvat hyvin tässä työssä käsiteltyjen CLT-rakenteiden mitoitukseen.

10 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tehdyt Mathcad-laskentapohjat CLT-rakenteisen seinän, pilarin sekä palkin mitoitukseen on tarkoitettu ainoastaan Suunnittelu Laukka Oy:n käyttöön ja Suunnittelu Laukka Oy omistaa käyttöoikeudet laskentapohjiin. Laskentapohjat laskevat rakenteille tulevat rasitukset ja kestävyydet murto-, käyttö- ja onnettomuusrajatilassa Eurokoodien SFS-EN 1995-1-1 ja SFS-EN 1995-1-2 mukaan.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda yrityksen käyttöön soveltuvat laskentapohjat, joilla saadaan mitoitettua CLT-rakenteisen rakennuksen rakenneosien materiaalivahvuudet. Laskentapohjan ulkoasu muotoiltiin tulostettavaan muotoon, jotta tulokset ja laskelmissa käytettävät lähtöarvot voidaan esittää selkeästi paperiversiona.

Tässä työssä CLT-rakenteiden mitoitus perustuu Rakennusinsinööriliiton julkaisemiin puurakenteiden suunnitteluohjeisiin ja niiden lisäksi julkaistuihin lisäohjeisiin, jotka perustuvat Eurokoodi 5 -suunnittelustandardiin EN 1995. Eurokoodissa olevat kaavat on syötetty Mathcadiin, ja niiden avulla lasketaan rakenteille kestävyyden ja rasitusten mitoitusarvot.

Laskentapohjien avulla pystytään CLT-levyrakenne mitoittamaan nurjahdusta, leikkausta ja taipumaa sekä kiepahdusta vastaan nopeasti, kun rakenteen kuormitukset ovat tiedossa. Mitoitus tehdään vertaamalla rasituksen suhdetta kestävyyteen ja näin saadaan rakenteelle prosentteina käyttöaste, joka ei saa ylittää täyttä sataa prosenttia. Käyttöaste ilmaisee, kuinka paljon rakenneosan kapasiteetista on käytössä.

Laskentapohjat soveltuvat enintään viisikerroksisten CLT-rakenteiden mitoitukseen seinä-, pilari- ja palkkirakenteille. Tulevaisuudessa laskentapohjia voidaan kehittää ja laajentaa useille osa-alueille, esimerkiksi CLT-laattarakenteiden mitoitukseen.

Lähteet

1. Puuinfo. Monikerroslevy (CLT) < https://www.puuinfo.fi/puutieto/insinööripuutuotteet/moni >

2. Stora Enso Oy. CLT info. Tekninen kansio. < http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Technical-folder-CLT-EN.pdf > Viitattu 20.2.2019

3. Hoisko CLT Finland Oy. Rakentaminen. Materiaalipankki. < http://www.hoisko.fi/fi/rakentaminen/materiaalipankki/ > Viitattu 20.2.2019

4. Oy CrossLam Kuhmo Ltd. Tuotteet. CLT-levyn ominaisuudet. < https://www.crosslam.fi/tuotteet/crosslam-levy-ja-sen-ominaisuudet.html > Viitattu 20.2.2019

5. CLT Plant Oy. Yritys. < http://www.cltplant.com/fi/yritys.link > Viitattu 20.2.2019

6. Hoisko CLT Finland Oy. Rakentaminen. CLT-rakentaminen. < http://www.hoisko.fi/fi/rakentaminen/clt-rakentaminen/ > Viitattu 20.2.2019

7. Oy CrossLam Kuhmo Ltd. < https://www.crosslam.fi/oy-crosslam-kuhmo-ltd.html > Viitattu 20.2.2019

8. Hoisko CLT Finland Oy. Viitattu 20.2.2019 < http://www.hoisko.fi/fi/hoisko-fi/ > Viitattu 20.2.2019

9. Stora Enso Oy. CLT info. Kysymyksiä ja vastauksia. < http://www.clt.info/fi/tuote/usein-kysytyt-kysymykset/ > Viitattu 20.2.2019

10. Stora Enso Oy. CLT info. Hyväksynnät ja sertifikaatit. Eurooppalainen tekninen arviointi (ETA). < http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/European-Technical-Assessment-ETA-EN.pdf > Viitattu 20.2.2019

11. Oy CrossLam Kuhmo Ltd. Media. Ladattavat. Tuoteominaisuudet. < https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/tuoteominaisuudet.pdf > Viitattu 20.2.2019

12. Hoisko CLT Finland Oy. Rakentaminen. Materiaalipankki. Hoisko CLT-levyn perustiedot. < http://www.hoisko.fi/wp-content/uploads/2018/07/Hoisko-CLT-levyn-perustiedot-6_18.jpg > Viitattu 20.2.2019

13. CLT Plant Oy. Yritys. Laskentataulukko. < http://www.cltplant.com/files/3/Laskentataulukko_CLT_Plant_Oy.pdf > Viitattu 20.2.2019

14. Kevarinmäki A, RIL 205-2-2007 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry; 2007, Viitattu 20.1.2019

15. Kevarinmäki A, RIL 205-1-2017 lisäohjeet: Crosslam Kuhmo CLT. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry; 2017, Viitattu 2.1.2019

16. Kevarinmäki A, RIL 205-1-2017 lisäohjeet: Stora Enso CLT. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry; 2017, Viitattu 2.1.2019

17. Kevarinmäki A, RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry; 2017, Viitattu 2.1.2019

18. Crosslam kuhmo CLT. Esimerkkilaskelma: Seinän nurjahduskestävyys, 2015 < https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-1-seinn-cc-83n-nurjahduskestn-cc-83vyys.pdf > Viitattu 2.1.2019

19. Kevarinmäki A, Asiantuntijalausunto: Lausunto nro VTT-S-05748-17. Espoo: VTT Expert Services Oy; 2017, Viitattu 26.1.2019

20. Ympäristöministeriö. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990 Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Helsinki; 2016. < http://www.ym.fi/download/noname/%7BC352472F-E7C4-4653-BF44-1AB47FB50CB0%7D/137127 >, Viitattu 9.3.2019

21. Valtanen Esko, Tekniikan taulukkokirja. Hyvinkää: Genesis-Kirjat Oy; 2013, Viitattu 9.3.2019

22. Crosslam kuhmo CLT. Esimerkkilaskelma: Aukkopalkin kestävyys, 2015 < https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-3-aukkopalkin-kestn-cc-83vyys.pdf > Viitattu 9.3.2019