

Maria Saraheimo

# CLT-RAKENTEIDEN SUUNNITTELU UU- DESSA EUROKOODI 5:N LUONNOK- SESSA

Kandidaatintyö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Sami Pajunen  
Toukokuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Maria Saraheimo: CLT-rakenteiden suunnittelu uudessa Eurokoodi 5:n luonnoksessa  
(Design of CLT structures in the new Eurocode 5 draft)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2023

---

Tämä kandidaatintyö käsittelee ristiinliimatun massiivipuulevyn (engl. Cross Laminated Timber, CLT) suunnitteluohjeita uudessa vielä julkaisemattomassa Eurokoodi 5:n luonnoksessa. Aiemmissa Eurokoodi-julkaisuissa CLT ei ole vielä ollut mukana. CLT-rakenteiden suunnittelu on perustunut kansallisiin oheisiin, kuten Suomessa Rakennus Insinöörien Liiton (RIL) julkaisuihin ja lisäohjeisiin. Työ on kirjallisuuskatsaus Eurokoodiluonnoksen sisältöön CLT:n osalta ja sen tarkoitus on tuoda esiin Eurokoodissa esitetyt CLT:n suunnitteluohjeet. Työssä on käytetty Eurokoodin luonnosversiota, joten sen sisältämä aineisto voi vielä muuttua ennen virallista julkaisua.

Eurokoodiluonnoksessa CLT:lle on ensimmäistä kertaa määritetty oma lujuusluokka ja siihen liittyvät parametrit, joita hyödynnetään mitoituslaskennassa. Mitoituslaskenta tapahtuu joko yleisillä mitoitus-ehdoilla tai CLT:lle annetuilla erillisillä mitoitus-ehdoilla. Yleisiä mitoitus-ehdoita käytettäessä CLT:lle on monesti annettu erityisohjeita, jotka ottavat huomioon sen erityispiirteet. Erilliset vain CLT:tä koskevat mitoitus-ehdot huomioivat paremmin CLT:n erityiskäyttäytymiset, joita ei ole voinut sisällyttää yleisiin mitoitus-ehdoin. Näiden lisäksi Eurokoodin liitteissä on esitetty CLT:lle käyttötarkoituksellisia ohjeita. Käyttötarkoitukselliset ohjeet koskevat esimerkiksi seiniä. Niissä kerrotaan nimenomaisen käytön kannalta olennaisia huomioitavia asioita ja mitoitus-ehdoita.

Uudet ohjeet ja mitoitus-ehdot antavat hyvän pohjan yhdenmukaiselle CLT-rakenteiden suunnittelulle uuden Eurokoodin tullessa voimaan. Samoihin kaavoihin perustuva mitoitus helpottaa tuotteiden vertailua keskenään, kun voidaan olla varmoja, että mitoitus tapahtuu samalla periaatteella. Eurokoodit päivittyvät ajan kuluessa ja uusia ohjeita saattaa tulla lisää. Tämä koskee varsinkin CLT:tä, joka on ensimmäistä kertaa mukana Eurokoodi-julkaisussa. CLT ei ole vielä vakiintunut vanhoihin perinteisiin pohjautuva rakennusmateriaali, josta olisi pitkä kokemus alalla. Myös tästä syystä ohjeet koskien CLT:tä saattavat päivittyä, kunhan CLT:n käyttö yleistyy ja tietämys kasvaa.

Avainsanat: CLT, Eurokoodi 5, Ristiinliimattu massiivipuulevy, Cross Laminated Timber

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. EUROKOODILUONNOS .....	3
2.1 Materiaaliominaisuudet .....	3
2.2 Analyysi ja mitoitus.....	6
2.2.1 Vetomitoitus .....	7
2.2.2 Puristusmitoitus .....	7
2.2.3 Taivutusmitoitus .....	10
2.2.4 Leikkausmitoitus .....	10
2.3 Keskitetty kuormitus .....	11
2.3.1 Tasoja vastaan kohtisuora kuormitus.....	11
2.3.2 Tason suuntainen kuormitus .....	16
2.3.3 CLT-valmisteinen ripalaatta .....	19
2.4 Lisäohjeet eri käyttötarkoituksiin.....	22
2.4.1 Seinät .....	22
2.4.2 Lattiat ja katot .....	24
2.5 CLT-liitokset.....	25
3. MITOITUSESIMERKKI .....	29
4. YHTEENVETO.....	32
LÄHTEET.....	33

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CLT	Ristiinliimattu massiivipuulevy (engl. Cross Laminated Timber)
GL	Liimapuu
GLVL	Kerrannaisliimattu viilupuu
LVL	Viilupuu
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto

## Latinalaiset isot kirjaimet

$A$	Pinta-ala
$A_{ef,x}$	Tehollinen nettopoikkileikkaus x-akselin suuntaan
$A_{ef,y}$	Tehollinen nettopoikkileikkaus y-akselin suuntaan
$(EA)_x$	Poikkileikkauksen aksiaalijäykkyys per leveysmetri, joka koostus x-akselin suuntaisista kerroksista
$E_{mean}$	Kimmomoduuli syiden suuntaan
$E_{90,mean}$	Kimmomoduuli syitä vastaan kohtisuorassa
$F_{ax,45,Rk}$	Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo 45° kulmassa syiden suuntaan
$(GA)_{xy}$	Poikkileikkauksen leikkausjäykkyys leveysmetriä kohden
$G_{mean}$	Liukumoduuli syiden suuntaan
$G_{r,mean}$	Tasoliukumoduuli (rolling shear)
$G_{v,xy,mean}$	Liukumoduuli syitä vastaan kohtisuorassa
$N_d$	Kuorman mitoitusarvo

## Latinalaiset pienet kirjaimet

$a_{ef,2}$	Tehollinen ruuvien välinen etäisyys
$a_1$	Kiinnikkeiden välinen etäisyys yhdensuuntaisesti syiden kanssa
$a_2$	Kiinnikkeiden välinen etäisyys kohtisuorassa syiden suhteen
$a_{3,c}$	Kuormittamaton päätyetäisyys yhdensuuntaisesti syiden suhteen

$a_{3,t}$	Kuormitettu päätyetäisyys yhdensuuntaisesti syiden suhteen
$a_{4,c}$	Kuormittamaton päätyetäisyys kohtisuorasti syiden suhteen
$a_{4,t}$	Kuormitettu päätyetäisyys kohtisuorasti syiden suhteen
$b$	Leveys
$b_{c,90}$	Kokoon puristettu leveys syitä vastaan kohtisuorassa
$b_{CLT}$	CLT:n leveys
$b_{ef}$	Tehollinen leveys
$b_{ef,x}$	Tehollinen leveys x-akselin suuntaan
$b_{ef,y}$	Tehollinen leveys y-akselin suuntaan
$b_f$	Kahden rivin välinen etäisyys
$b_{i,ef}$	Tehollinen leveys rivojen kummallakin puolella
$b_l$	Pienin yksittäisen laudan leveys poikkileikkauksessa
$b_{rib}$	Rivan leveys
$d$	Paksuus
$e$	Alkukäyryden huomioiva kerroin
$e$	Kiinnikkeiden suurin sallittu etäisyys
$f_{c,0,d}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo syiden suuntaan
$f_{c,0,k}$	Puristuslujuuden ominaisarvo syiden suuntaan
$f_{c,90,d}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo syitä vastaan kohtisuorassa
$f_{c,90,k}$	Puristuslujuuden ominaisarvo syitä vastaan kohtisuoraan
$f_{m,edge,k}$	Taivutuslujuus syrjällään
$f_{m,k}$	Taivutuslujuus lappeellaan
$f_{r,d}$	Tasoleikkauslujuuden (rolling shear) mitoitusarvo
$f_{r,k}$	Tasoleikkauslujuuden (rolling shear) ominaisarvo
$f_{tor,node,d}$	Vääntöleikkauslujuuden mitoitusarvo ristiinliimattujen lautojen välissä
$f_{tor,node,k}$	Vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo ristiinliimattujen lautojen välissä
$f_{t,0,k}$	Vetolujuuden ominaisarvo syiden suuntaan
$f_{t,90,k}$	Vetolujuuden ominaisarvo syitä vastaan kohtisuoraan

$f_{v,d}$	Leikkauslujuuden mitoitusarvo lapetaivutuksessa
$f_{v,k}$	Leikkauslujuuden ominaisarvo lapetaivutuksessa
$f_{v,xy,k}$	Leikkauslujuus syrjätaivutuksessa
$h$	Korkeus
$h_{CLT}$	CLT:n korkeus
$h_o$	Aukon suurin korkeus
$h_{rib}$	Rivan korkeus
$k_{c,90}$	Jännityksen leviämiskerroin
$k_{def}$	Virumaluku
$k_{mat}$	Kerroin, joka huomioi puristuksen muodonmuutokset ja materiaalin käyttäytymisen
$k_{mod}$	Muunnoskerroin
$k_{red}$	Todennäköisyyskerroin
$k_{red,b}$	Pienennyskerroin
$k_{r,pu}$	Epälineaarisen käyttäytymisen ja lujuusyhdistelmän huomioiva kerroin
$k_{sys}$	Kuormanjakoluku
$k_v$	Säätökerroin
$l$	Pituus/Jänneväli
$l_{a,1}$	Määräävän keskilinjan yläpuolinen ruuvin pituus
$l_{a,2}$	Määräävän keskilinjan alapuolinen ruuvin pituus
$l_{c,90}$	Kokoon puristettu pituus syiden suunnassa
$l_{ef}$	Tehollinen pituus/Ruuvin todellinen läpimenopituus
$l_g$	Ruuvin kierteisen osan pituus
$l_o$	Aukon suurin pituus
$l_{screw}$	Ruuvin pituus
$l_{w,1}$	Ruuvin tunkeutuma kannan puoleisessa päässä
$l_{w,2}$	Ruuvin tunkeutuma kärjen puoleisessa päässä
$n$	Kiinnikkeiden määrä

$n_{ef}$	Kiinnikkeiden tehollinen määrä
$n_{min}$	Kiinnikkeiden minimi määrä
$n_{perp}$	Ruuvilinjojen määrä kohtisuorassa suunnassa tarkasteltavan kuormansiir- ron suuntaan nähden
$t$	Paksuus/Teräslevyn paksuus
$t_{CLT}$	CLT:n paksuus
$t_i$	Suurin yksittäisen laudan paksuus poikkileikkauksessa
$t_{i,max}$	Suurin CLT:n yhden kerroksen paksuus
$t_{i,min}$	Pienin CLT:n yhden kerroksen paksuus
$t_x$	Yhteenlaskettu paksuus kerroksista, joiden syyt ovat kuorman kanssa yh- densuuntaiset
$t_{x,i}$	Kerroksen i paksuus, joissa syyt ovat x-akselin suunnassa
$t_{y,i}$	Kerroksen i paksuus, joissa syyt ovat y-akselin suunnassa

#### Kreikkalaiset pienet kirjaimet

$\alpha$	Kuormituksen kulma
$\gamma_M$	Osavarmuuskerroin
$\gamma_{M,conn}$	Ruuvin osittainen turvallisuustekijä
$\gamma_{M,tim}$	Puutavaran osittainen turvallisuustekijä
$\varepsilon$	Ruuvin porauskulma tasoon nähden
$\theta$	Nidontakulmansyiden suuntaan
$\rho_k$	Ominaistiheys
$\sigma_{c,90,d}$	Puristusjännityksen mitoitusarvo syitä vastaan kohtisuorassa
$\tau_{r,d}$	Tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{tor,node,d}$	Vääntöleikkausjännityksen mitoitusarvo ristiinliimattujen lautojen välissä
$\tau_{v,xy,d}$	Leikkausjännityksen arvo tehollisen nettopoikkileikkauksen tasossa

# 1. JOHDANTO

Ristiinliimattu massiivipuulevy (engl. Cross Laminated Timber, CLT) on suhteellisen uusi insinööripuutuote. Tämä ilmastoälykäs rakennusmateriaali kehitettiin 1990-luvun alussa Keski-Euroopassa (Mahamid et al. 2020, luku 1.0 ). CLT:n tuotanto on kasvanut Euroopassa heti alusta alkaen ja varsinkin 2010-luvulla nopeasti (Swedish Wood 2019, s. 11). Yksi syy tähän on tavoitteet hiilineutraalista yhteiskunnassa, jossa rakentaminen on merkittävässä roolissa, koska tuottaahan rakentaminen merkittävän osan päästöistä.

CLT-levyt soveltuvat hyvin nykyaikaiseen nopeaan elementtirakentamiseen, jossa tuotteiden esivalmistusaste tehtaissa on korkea. Levyjen kokoa rajoittavat tehtaiden valmistusmahdollisuudet sekä kuljetus- ja nostokapasiteetit. Ne soveltuvat kaiken tyyppisiin rakenteisiin taloissa, halleissa ja silloissa (Swedish Wood 2019, s. 11). Suurin käyttökohde on seinät ja lattiat (Swedish Wood 2019, s. 21).

Monilla mailla, kuten Kanadalla, Uudella-Seelannilla ja Ruotsilla, on omat kansalliset CLT-käsikirjat rakenteiden suunnitteluun. Suomella ei ole vastaavanlaista käsikirjaa, vaan suunnittelu perustuu Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL) julkaisuun puurakenteiden suunnittelusta sekä sitä täydentävistä lisäohjeista CLT-tuotteiden valmistajille (RIL 205-1-2017, s. 63). Lisäohjeet ovat valmistajakohtaisia, ja niissä annetaan tuote- tai valmistajakohtaiset materiaaliominaisuudet, CLT:n rakenne ja suunnittelua koskevat ohjeet (RIL 205-1-2017 lisäohjeet: CrossLam 2017; RIL 205-1-2017 lisäohjeet: Stora 2017). Lisäohjeet ovat olleet tarpeellisia, koska vanha Eurokoodi 5 ei sisällä suunnitteluohjeita CLT-rakenteille. Toisaalta Eurokoodiluonnoskaan ei ota kantaa kaikkiin lisäohjeissa käsiteltäviin asioihin.

Uuden Eurokoodin myötä CLT-rakenteet tulevat osaksi Euroopan yhtenäisiä suunnitteluperiaatteita, jotka ovat käytössä jo lähes kaikissa muissa rakenteiden suunnittelussa. Eurokoodiluonnos sisältää CLT-tuotteiden suunnitteluperusteet sekä antaa tarvittavat materiaaliparametrit laskentaa varten (Eurocode 5 2020). Suunnittelusta tulee yhdenmukaista, mikä mahdollistaa helpomman vertailun eri valmistajien kesken sekä varmuuden eri maissa valmistettujen tuotteiden samankaltaisuudesta.

Tämän työn tavoitteena on tuoda esiin Eurokoodiluonnoksen sisältämät suunnitteluohjeet CLT-rakenteille. Työ on kirjallisuuskatsaus. Aiheen rajaus kattaa vain yhden materiaalin, jottei aihe olisi liian laaja ja käsittely hankala. Työssä ei perehdytä CLT-rakenteiden



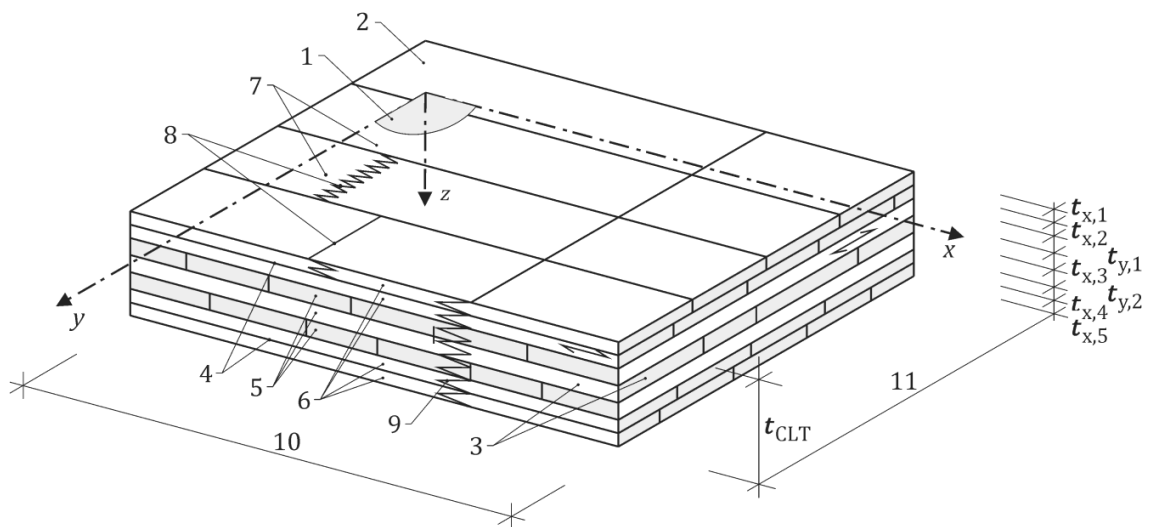
palomitoitukseen, joka sisältyy omaan palomitoitus-Eurokoodiin, josta on siitäkin tulossa uusittu versio. Työssä ei myöskään käsitellä akustista suunnittelua. Työn pääpaino on uudessa vasta voimaan tulevassa Eurokoodissa, joten sen sisältämä tieto, varsinkin CLT-rakenteista on alalla uutta, eikä sitä ole aiemmin julkaistu.

Työn käsittely painottuu pääpainon mukaisesti Eurokoodiluonnokseen, jota käsitellään luvussa 2, jossa perehdytään Eurokoodin antamiin mitoitusohjeisiin CLT-rakenteille. Kolmannessa luvussa esitetään esimerkki. Viimeinen luku 4 on kokoava yhteenveto aiheesta.

## 2. EUROKOODILUONNOS

### 2.1 Materiaaliominaisuudet

CLT määritellään Eurokoodi 5:n (2022, s. 17) mukaan ainakin kolmesta eri levykerroksesta koostuvaksi puurakenneseosaksi. Levykerrokset koostuvat lappeellaan olevista, toisiinsa liimatuista laudoista. Ainakin yhden levykerroksen on oltava toisia vasten kohtisuorassa. (Eurocode 5 2022, s. 17) Määritelmä ei ota kantaa syrjäliimauksiin. Tämä kokonaisuus muodostaa yhdessä CLT-levyn (kuva 1), jota voidaan käyttää rakentamisessa muun muassa lattia- tai seinäelementtinä.



#### Selitteet

1 Rakenteen taso

2 Lape

3 Syrjä

4 Ulompi levykerros

5 Sisempi levykerros

6 Rinnakkaiset uloimmat laudat

7 Lauta

8 Sormijatkos laudassa

9 Laaja sormijatkos

10 Yleensä pituus

11 Yleensä leveys  $b_{CLT}$  laatassa tai korkeus  $h_{CLT}$  palkissa

$t_{CLT}$  CLT levyn paksuus

$t_{x,i}$  Kerroksen  $i$  paksuus, jossa syyt ovat  $x$ -suuntaan

$t_{y,i}$  Kerroksen  $i$  paksuus, jossa syyt ovat  $y$ -suuntaan

**Kuva 1.** CLT:n rakenne, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 17)

Puu materiaalina sitoo ja luovuttaa kosteutta sitä ympäröivästä ilmasta. Kuivuessaan puu kutistuu ja saattaa halkeilla, kun taas kastuessaan puu turpoaa. Puun kosteuskäyttäytyminen täytyy ottaa huomioon CLT-rakenteita suunniteltaessa. Kosteuskäyttäytyminen vaikuttaa varsinkin liitosten käyttäytymiseen. Eurokoodi (2022, s. 65–66) antaa kertoimet eri puumateriaaleille kosteudesta johtuvien mittamuutosten laskemiseen vapaassa kutistumisessa ja turpoamisessa. Arvot annetaan prosentteina keskimääräisen kosteuspitoisuuden 1 %:n muutosta vastaan. CLT-levyn tasoa vastaan kohtisuorassa

suunnassa vapaan kutistumisen tai turpoamisen kerroin on 0,24 %. Levyn tason suunnassa kerroin on 0,02–0,04 %. Yleensä pienempi arvo viittaa x-suuntaan ja suurempi arvo y-suuntaan (kuva 1). (Eurocode 5 2022, s. 65–66) Keskimääräisen kosteuspitoisuuden muuttuessa 1 %:n kertoimilla saadaan siitä johtuvat mittamuutokset laskettua.

Puu itsessään ei ole homogeeninen materiaali, eikä sillä ole samoja mekaanisia ominaisuuksia kauttaaltaan. CLT:ssä voidaan kuitenkin yhtä lautaa käsitellä homogeenisena materiaalina mekaanisten ominaisuuksien osalta koko paksuudeltaan  $t$  (Eurocode 5 2022, s. 84).

Rakenteen kestävyuden tarkasteluun tarvittavat mitoituslujuudet lasketaan ominaislujuuksista osavarmuuskertoimella  $\gamma_M$  ja muunnoskertoimella  $k_{mod}$ . Kertoimille annetaan Eurokoodissa (2022, s. 59, 62) materiaaliikohtaiset arvot. CLT:lle osavarmuuskerroin  $\gamma_M = 1,25$ , kansalliset liitteet voivat määrittää eri kertoimen arvon (Eurocode 5 2022, s. 59). Muunnoskertoimelle  $k_{mod}$  täytyy valita käyttöluokan ja kuormituksen aikaluokan mukainen arvo (taulukko 1).

**Taulukko 1.** Muunnoskertoimen  $k_{mod}$  arvot, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 62)

Käyttöluokka	Kuormituksen aikaluokka				
	Pysyvä	Pitkä	Keskipitkä	Lyhyt	Hetkellinen
1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10

Kokonaistaipumien laskennassa virumisen vaikutuksen huomioiva kerroin  $k_{def}$  määritetään niin ikään käyttöluokan mukaan (taulukko 2). Taulukossa arvot on annettu vain käyttöluokille 1 ja 2. Käyttöluokan 3 kosteusolosuhteet voivat aiheuttaa paikallisia muodonmuutoksia, kutistumia tai turpoamista, jotka vaikuttavat CLT:n kantokykyyn, liitoksiin ja kiinnikkeisiin (Swedish Wood 2019, s. 35). Tämän takia CLT:tä ei saa käyttää käyttöluokassa 3.

**Taulukko 2.** Virumaluvun  $k_{def}$  arvot, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 64)

Käyttöluokka		
1	2	3
0,80	1,00	-

Eurokoodin liitteissä (Eurocode 5 2022, s. 373) annetaan CLT:lle yksi lujuusluokka CL24 (taulukko 3). Jotta tuote hyväksytään kyseiseen lujuusluokkaan, on sen täytettävä kaikki lujuusluokalle annetut arvot. Kyseisen liitteen käytön soveltamiseen ottaa kantaa kansalliset valinnat (Eurocode 5 2022, s. 373). Lujuusluokalle on määritetty kaikki tarvittavat materiaalilujuudet mitoituslaskentaa varten. Taulukosta 3 valitaan mitoituslaskentaan tarvittavat lujuudet kyseessä olevan CLT:n kerroksen syiden suunnan mukaisesti. Kuormanjakolukua  $k_{sys}$  ei käytetä CLT:n lujuusominaisuuksien kasvattamiseen, vaan se on sisällytetty jo annettuihin materiaalin lujuusominaisuuksiin (Eurocode 5 2022, s. 144). Jos CLT:n leveys  $b_{CLT}$  on paksuutta  $t_{CLT}$  pienempi, täytyy sen lujuusominaisuudet lappeellaan olettaa kaikissa tapauksissa nolaksi (Eurocode 5 2022, s. 68).

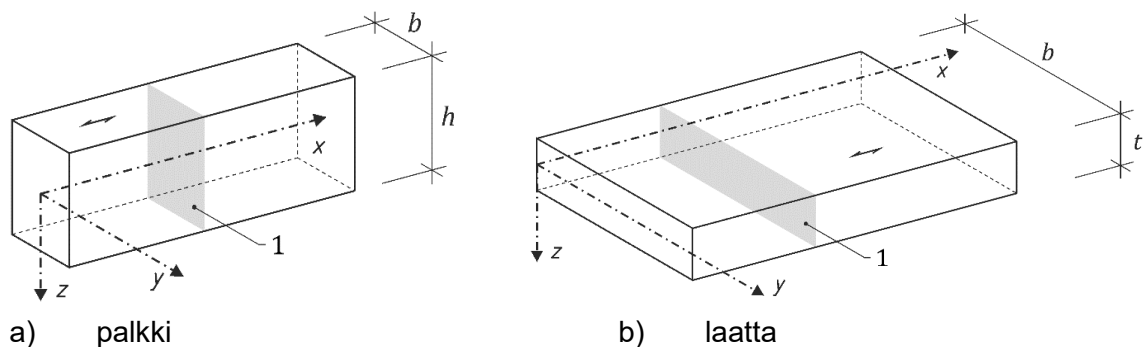
**Taulukko 3.** CLT:n lujuusluokka, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 373)

Ominaisuus		Symboli	Yksikkö	Lujuusluokka CL24
Taivutuslujuus	Lappeellaan	$f_{m,k}$	N/mm <sup>2</sup>	24
	Syrjällään	$f_{m,edge,k}$	N/mm <sup>2</sup>	20,5
Vetolujuus	Syiden suuntaan	$f_{t,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	14
	Syitä vastaan kohtisuoran	$f_{t,90,k}$	N/mm <sup>2</sup>	0,12
Puristuslujuus	Syiden suuntaan	$f_{c,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	21
	Syitä vastaan kohtisuoran	$f_{c,90,k}$	N/mm <sup>2</sup>	2,5
Leikkauslujuus	Lapetaivutuksessa	$f_{v,k}$	N/mm <sup>2</sup>	3,5
	Tasoleikkauslujuus (rolling shear)	$f_{r,k}$	N/mm <sup>2</sup>	0,7
	Syrjätaivutuksessa	$f_{v,xy,k}$	N/mm <sup>2</sup>	5,5
Kimmomoduuli	Syiden suuntaan	$E_{mean}$	N/mm <sup>2</sup>	11 000
	Syitä vastaan kohtisuoran	$E_{90,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	370
Liukumoduuli	Syiden suuntaan	$G_{mean}$	N/mm <sup>2</sup>	650
	Tasoliukumoduuli (rolling shear)	$G_{r,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	50
	Syitä vastaan kohtisuoran	$G_{v,xy,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	250
Ominaisihteys		$\rho_k$	kg/m <sup>3</sup>	385

## 2.2 Analyysi ja mitoitus

CLT:tä suunniteltaessa on otettava huomioon joitain sen erityispiirteitä. CLT:n ominaisuuksiin vaikuttavat erilaiset seikat, kuten kokoonpano, aukot, lautojen koko sekä urat. Kuormien jakautuminen ja staattinen systeemi vaikuttavat muodonmuutoksiin ja jännitysten poikkileikkausjakaumiin. Lisäksi täytyy ottaa huomioon leikkausmuodonmuutosten, paikallisten jännitysten ja sisäisten kuormansiirtojen vaikutukset. (Eurocode 5 2022, s. 84) Kaikilla näillä on vaikutusta CLT-rakenteiden ominaisuuksiin ja on tärkeää, että ne huomioidaan jo suunnitteluvaiheessa.

Murtorajatilamitoituksessa jokaista jännitystä koskee oma mitoitusehtonsa. Eurokoodissa (2022) on erikseen annettu tietyille jännitystapauksille vain CLT:tä koskevia mitoitusehtoja, jotka ottavat huomioon CLT:n erityispiirteet. Kaikissa mitoitusohjeissa on kuitenkin sama periaate. Kyseisen jännityssuureen täytyy olla pienempi tai yhtä suuri kuin kyseisen jännityssuureen mitoituslujuus. Murtorajatilatarkastelussa täytyy tarkastella kaikki jännitykset sekä niiden mahdolliset yhteisvaikutukset. Mitoituksessa käytetyt akselien suunnat on esitetty alla (kuva 2).



**Kuva 2.** Mitoituksessa käytettävien akselien suunnat, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 94)

Idealisetkaan rakenteet tai rakennukset eivät ole täysin suoria, vaikka siihen pyritään. Rakenteen alkukäyryyden huomioiva kerroin on  $e$ , joka lasketaan CLT-rakenteille seuraavasti (Eurocode 5 2022, s. 87):

$$\pm e = \frac{l}{1000}, \quad (1)$$

jossa  $l$  on jännevälän pituus. CLT:n kanssa samaan alkukäyryysluokkaan kuuluvat muun muassa liima- ja viilupuu (Eurocode 5 2022, s. 87).

Leikkausmuodonmuutokset voidaan jättää CLT:ssä huomioimatta yksittäisten jänneväliden osalta, jos jännevälän pituuden  $l$  välinen suhde paksuuteen  $t_{CLT}$  tai korkeuteen  $h_{CLT}$  on suurempi tai yhtä suuri kuin 30,  $l/t_{CLT} \geq 30$  tai  $l/h_{CLT} \geq 30$ . Tätä voidaan käyttää sekä

murtorajatila että käyttörajatila tarkasteluissa. (Eurocode 5 2022, s. 84) Leikkausmuodonmuutosten huomioita jättäminen on mahdollista hyvin pitkille ja kapeille tai pitkille ja matalille rakenteille.

CLT:n paksuutta  $t_{CLT}$  ja leveyttä  $b_{CLT}$  koskevan ehdon  $t_{CLT} \leq b_{CLT} \leq 600 \text{ mm}$  täytyessä, täytyy ominaislujuuksia taivutuksessa, syiden suuntaisessa puristuksessa sekä syiden suuntaisessa vedossa pienentää pienennyskerroimella  $k_{red,b}$ . Pienennyskerroin lasketaan seuraavasti:

$$k_{red,b} = \frac{b_{CLT}}{1200} + 0,5, \quad (2)$$

jossa  $b_{CLT}$  on CLT:n leveys. (Eurocode 5 2022, s. 68–69) Samaa pienennyskerrointa voidaan käyttää lujuusvähennyksen laskemiseen pistekuormituksessa. Tällöin CLT:n leveys  $b_{CLT}$  korvataan tehollisella leveydellä  $b_{ef}$ . (Eurocode 5 2022, s. 69)

CLT:n kestävyden tarkistukset on tehtävä nettopoikkileikkaukselle eli niiden kerrosten poikkileikkauksen pinta-alalle, joissa syyt ovat samaan suuntaan kuin tarkastelun vaikutukset (Eurocode 5 2022, s. 84). Tästä esimerkkinä tason suuntaisessa puristuksessa nettopoikkileikkaus kattaa vain kerrokset, joissa syyt ovat kuormituksen kanssa yhden-suuntaiset. CLT:n yhden kerroksen lautojen välisiä uria ei pidetä poikkileikkausvähennyksinä, kun tarkastellaan tasossa olevia jännityksiä tai elementin muodonmuutoksia (Eurocode 5 2022, s. 83).

### 2.2.1 Vetomitoitus

CLT:n vetomitoituksessa ei ole mitään poikkeavaa verrattuna muihin materiaaleihin. Syiden suuntaisen vedon mitoitus tehdään Eurokoodissa (2022, s. 94) annetun kaavan mukaan. Syitä vastaan kohtisuoralle vedolle Eurokoodi ei anna mitoitusehtoa ollenkaan. Siellä mainitaan vain, että rakenteen koon vaikutus täytyy huomioida sekä kohtisuoran vetojännityksen jakautumisen vaikutus voidaan ottaa huomioon kestävyudessa (Eurocode 5 2022, s. 94). Vetolujuus syitä vastaan kohtisuoraan on CLT:ssä kuten muissakin puumateriaaleissa todella pieni ja sitä tulee välttää.

### 2.2.2 Puristusmitoitus

Puristusjännitysten osalta Eurokoodi antaa CLT:lle oman mitoitusehdon koskien syitä vastaan kohtisuoraa puristusta. Syiden suuntaisen puristuksen mitoitusehto ei poikkea muista puumateriaaleista. (Eurocode 5 2022, s. 95) Erona kuitenkin muihin puumateriaaleihin on, että CLT:n puristustarkastelu syiden suunnassa huomioi vain kerrokset, joissa syyt ovat puristuksen suuntaan. (Swedish Wood, s. 54) Puristusta ei mitoituksessa

täten oteta vastaa koko poikkileikkauksella, vaan vain vahvemman suunnan kerroksilla eli nettopoikkileikkauksessa. Syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen  $\sigma_{c,90,d}$  mitoitusehto on

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{mat} k_{c,90} f_{c,90,d}, \quad (3)$$

jossa

$k_{mat}$  on kerroin, joka huomion puristuksen muodonmuutokset ja materiaalin käyttäytymisen

$k_{c,90}$  on jännityksen leviämiskerroin

$f_{c,90,d}$  on kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo (Eurocode 5 2022, s. 98).

Syitä vastaan kohtisuorassa puristuksessa mitoitusehtoon tulee mukaan kaksi kerrointa. Kerroin  $k_{mat}$  voidaan katsoa (taulukosta 4) ja  $k_{c,90}$  voidaan tietyissä tapauksissa laskea kaavalla (4). Vaihtoehtoisesti Eurokoodin (2022, s. 98) mukaan molemmille voidaan antaa arvo 1,0. Jos rakenne kestää kerrointen arvolla 1,0 ei kerrointen kasvattaminen ole tarpeellista. Kerrointen kasvattaminen arvoa 1,0 suuremmaksi kasvattaa rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo eli rakenteen puristuskestävyys teoriassa paranee.

Leviämiskerroin  $k_{c,90}$  ottaa huomioon puristavan voiman jakautumisen rakenteen läpi suuremmalle pinta-alalle, johon voima todellisuudessa kohdistuu (kuva 2). Eurokoodissa (2022, s. 98) oletetaan, että jännitys leviää CLT:ssä 35° kulmassa. Tämä eroaa muista materiaaleista, joissa kulman oletetaan olevan 45° (Eurocode 5 2022, s. 96). Kaavaa (4) voidaan käyttää  $k_{c,90}$  laskemiseen, kun  $1 \leq t_{l,max}/t_{l,min} \leq 2$ , jossa  $t_{l,max}$  on suurin CLT:n yhden kerroksen paksuus ja  $t_{l,min}$  pienin (Eurocode 5 2022, s. 98). Edellä mainitun ehdon täytyttyä jännityksen leviämiskerroin  $k_{c,90}$  lasketaan seuraavasti:

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{b_{ef} l_{ef}}{b_{c,90} l_{c,90}}} \leq 4,0, \quad (4)$$

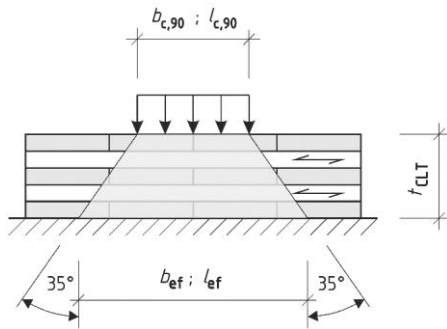
jossa

$b_{ef}$  on tehollinen leveys syitä vastaan kohtisuorassa

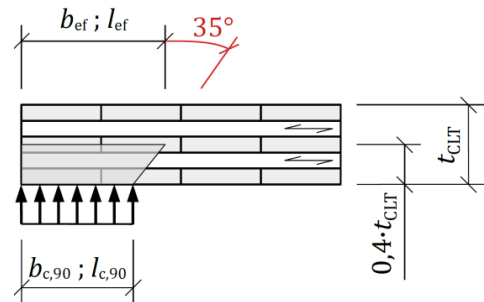
$l_{ef}$  on tehollinen pituus syiden suunnassa

$b_{c,90}$  on kokoon puristettu leveys syitä vastaan kohtisuorassa

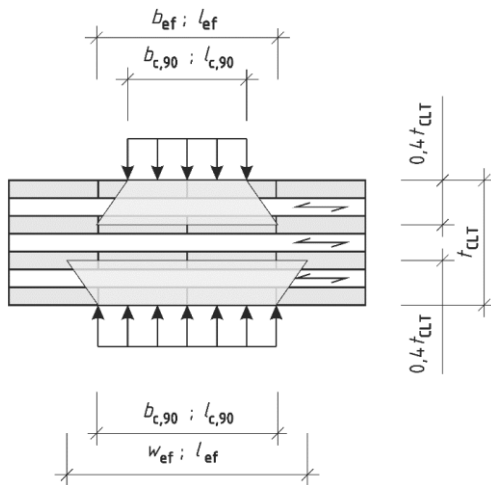
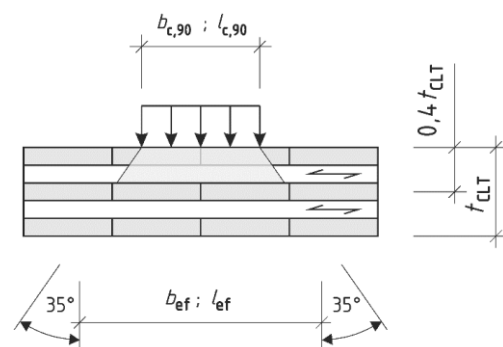
$l_{c,90}$  on kokoon puristettu pituus syiden suunnassa (Eurocode 5 2022, s. 98–99).



a) Jatkuva tuki



b) Paikallinen tuki

c) Tuet molemmilla puolilla,  
ovat eri kokoisia ja eri kohdissa

d) Paikallisesti kuormitettu

**Kuva 2.** Puristusjännityksen jakautuminen CLT-levyn paksuudessa, mukattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 99)

Kertoimen  $k_{mat}$  arvo katsotaan tapauskohtaisesti muodonmuutosten vaikutusten perusteella. Mitä pienemmät ovat muodonmuutosten vaikutukset sitä suurempi on kertoimen arvo. Tapauksia on kolme ja Eurokoodi (2022, s. 96) antaa jokaiselle oman määritelmän. Tapauksessa A muodonmuutokset aiheuttavat järjestelmän tai osan epävakautta tai toisille komponenteille vaurioita, joita ei voi hyväksyä. Tapaus B kattaa tapaukset, joissa muodonmuutokset eivät vaikuta suuresti osan tai järjestelmän vakauteen. Tapausta C sovelletaan, kun muodonmuutosten vaikutuksesta sortuneet osat eivät johda koko rakenteen sortumiseen, eikä niillä ole suurta vaikutusta vakauteen. Näistä tapauksista A on yleisin. (Eurocode 5, s. 96)



**Taulukko 4.** Kertoimen  $k_{mat}$  arvot tapauskohtaisesti, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 96)

Tapaus	A	B	C
$k_{mat}$	1,4	2,1	2,7

Puristuksen yhteydessä on huomioitava nurjahduksen mahdollisuus. Eurokoodi (Eurocode 5 2022, s. 112) ei anna erillisiä ohjeita nurjahduksen tarkasteluun CLT:ssä, vaan käytössä on samat kaavat kuin muillakin materiaaleilla. Huomiona se, että CLT:n kokoonpano ja leikkausjännitysten vaikutukset on otettava huomioon (Eurocode 5 2022, s. 112).

### 2.2.3 Taivutusmitoitus

Taivutusmitoituksen mitoitusehdot eivät poikkea CLT:lle muista materiaaleista. Mitoitusehdoissa esiintyvä todennäköisyyskerroin  $k_{red}$  saa CLT:n tapauksessa arvon 1,0. Kerroin ottaa huomioon todennäköisyyden, että pienimmän lujuuden kohdassa vallitsee suurin jännitys. (Eurocode 5 2022, s. 104–105) Todennäköisyydellä ei täten oleteta olevan vaikutusta lujuuteen, koska kerroin ei muuta mitoitusehdossa mitään.

Taivutuksesta aiheutuvat syiden suuntaiset vetojännityksen kerrosten keskellä voidaan jättää huomioimatta kaikissa tapauksissa lapetaivutuksessa. Niitä ei tarvitse myöskään huomioida syrjätaivutuksessa, jos ehto  $l/h_{CLT} \geq 5$  täyttyy. Ehdossa  $l$  on jänneväli ja  $h_{CLT}$  korkeus. (Eurocode 5 2022, s. 105)

Taivutuksen ja puristuksen esiintyessä yhtä aikaa on mahdollista, että rakenne kiepahtaa. Kuten nurjahduksen tapauksessa ei kiepahduksellekaan ole mitään erillisiä ohjeita (Eurocode 5 2022, s. 113–115). Myös kiepahduksen yhteydessä on huomioita CLT:n kokoonpano ja leikkausjännitysten vaikutukset (Eurocode 5 2022, s. 112).

### 2.2.4 Leikkausmitoitus

Leikkausmitoituksessa CLT-rakenteilla on erityisvaatimuksia, jotka täytyy huomioida mitoituksessa. Lappeellaan kuormitetussa CLT-levyssä on leikkausjännitykset tarkastettava jokaisen ratkaisevan kerroksen kohdalla. Leikkausmitoituksessa lappeellaan käytetään leikkauslujuuden ominaisarvona lapetaivutuksen leikkauslujuutta  $f_{v,d}$  tai tasoleikkauslujuutta  $f_{r,d}$ . (Eurocode 5 2022, s. 108) Lapetaivutuksen leikkauslujuutta  $f_{v,d}$  käytetään pitkittäisille kerroksille ja tasoleikkauslujuutta  $f_{r,d}$  käytetään poikittäisille kerroksille (Swedish Wood 2019, s. 57). Näistä kahdesta tasoleikkauslujuus  $f_{r,d}$  on huomattavasti

pienempi kuin lapetaivutuksen leikkauslujuus  $f_{v,d}$  (taulukko 3). CLT:n murtumisen kannalta tasoleikkauslujuus on yleensä ratkaiseva (Swedish Wood 2019, s. 19). Murtorajatilatarkastelussa leikkauskestävyydestä tuleen yleensä mitoittavin tekijä, vaikka rakenne voisi kestää taivutuksen tai puristuksen kannalta enemmän kuormaa. CLT-levyn leikkausjännitykset lapetaivutuksesta ja syrjätaivutuksesta, mukaan lukien vääntöleikkausjännitykset, lasketaan lineaarisesti yhteen (Eurocode 5 2022, s. 109).

Mitoitusehdot sekä yksi- että kaksiaksoalisessa leikkauksessa ovat CLT:lle samat kuin muillakin puumateriaaleille. Eurokoodi määrittelee leikkauslujuuden säätökertoimen  $k_v$  arvoksi CLT:lle 1,0. (Eurocode 5 2022, s.106) Myöskään leikkauksen ja samanaikaisen puristuksen tai vedon mitoitusehdot eivät eroa CLT:tä mitoittaessa (Eurocode 5 2022, s. 109–110). Mitoitusehdoissa leikkausjännitystä vertaillaan pitkittäisissä kerroksissa lapetaivutuksen leikkauslujuuteen  $f_{v,d}$  ja poikittaisissa kerroksissa tasoleikkauslujuuteen  $f_{r,d}$  (Swedish Wood 2019, s. 57).

## 2.3 Keskitetty kuormitus

CLT-levyyn voi kohdistua keskitettyä kuormitusta, niin sanottua pistekuormitusta. Eurokoodi (2022, s. 333) määrittelee erityisohjeita keskitetyille kuormitukselle tasoa vastaan kohtisuorassa ja tason suunnassa sekä CLT-valmisteiselle ripalaatalle. Tason suuntainen kuormitus koskee lähinnä seinärakenteita ja tasoa vastaan kohtisuora kuormitus laattarakenteita.

### 2.3.1 Tasoa vastaan kohtisuora kuormitus

Kuormituksen ollessa tasoa vastaan kohtisuorassa erityisohjeet koskevat leikkausjännitystä. Tasoa vastaan kohtisuorassa kuormituksessa on kaksi eri mitoituskaavaa. Näistä ensimmäinen on tapauksille, joissa CLT-levyä ei ole vahvistettu (kuva 4). Toinen on tapauksille, joissa levy on vahvistettu täysikierteisillä ruuveilla paremman leikkauskestävyyden saavuttamiseksi (kuva 6). (Eurocode 5 2022, s. 333)

Vahvistamattoman rakenteen leikkauskestävyyden mitoitusehto on

$$\tau_{r,d} \leq k_{r,pu} f_{r,d}, \quad (5)$$

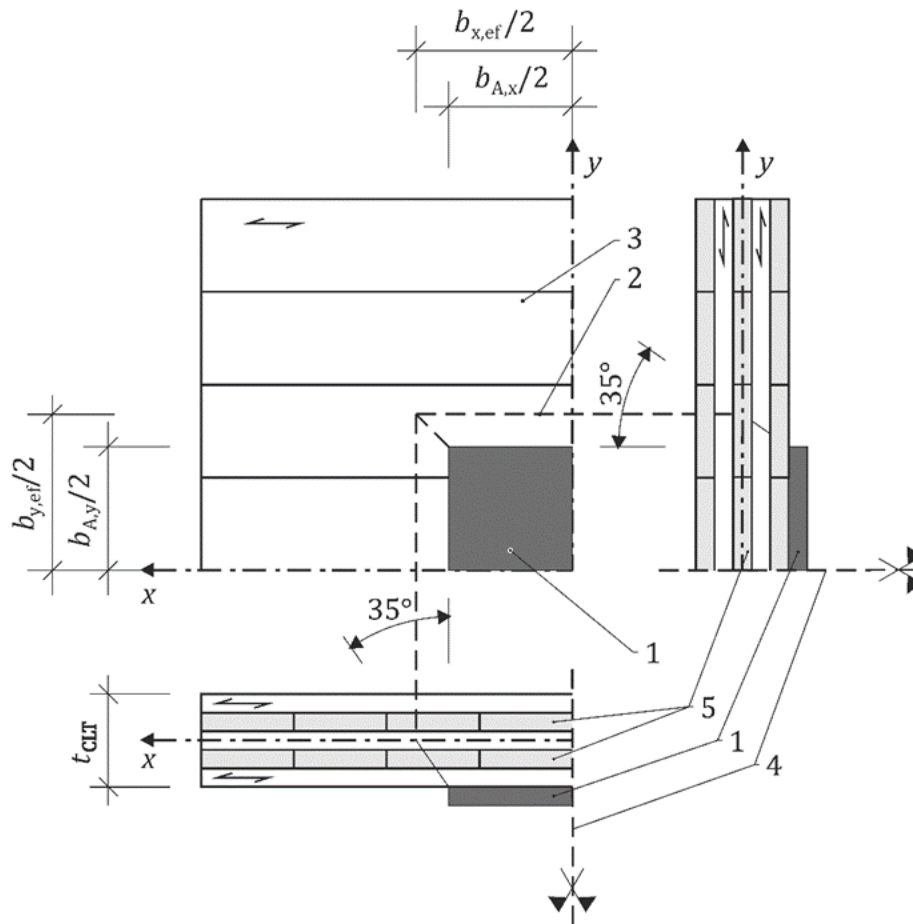
jossa

$\tau_{r,d}$  on tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo

$k_{r,pu}$  on epälineaarisen käyttäytymisen ja lujuusyhdistelmien huomioiva kerroin

$f_{r,d}$  on tasoleikkauslujuuden mitoitusarvo (Eurocode 5, s. 333).

Leikkauskestävyyštarkastelu tehdään käyttäen tasoleikkausjännitystä  $\tau_{r,d}$  ja tasoleikkauslujuutta  $f_{r,d}$ . Tasoleikkausjännitys  $\tau_{r,d}$  lasketaan vaikuttamaan tehollisten leveyksien  $b_{ef,x}$  ja  $b_{ef,y}$  rajaamalle alueelle (kuva 4) (Eurocode 5 2022, s. 333). Eurokoodi (2022, s. 333) määrittää mitoitusvedon kertoimelle  $k_{r,pu}$  vakio arvon, joka on 1,60.



#### Selitteet

- |   |                      |   |                                  |
|---|----------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Kuorman vaikutusalue | 2 | Jännityksen varmennusalue        |
| 3 | CLT-levy             | 4 | Levyn reuna tai symmetria akseli |
| 5 | Määrävä kerros       |   |                                  |

**Kuva 4.** Vahvistamaton CLT-levy keskitetyssä kuormituksessa kohtisuoraan tasoa vasten, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 334).

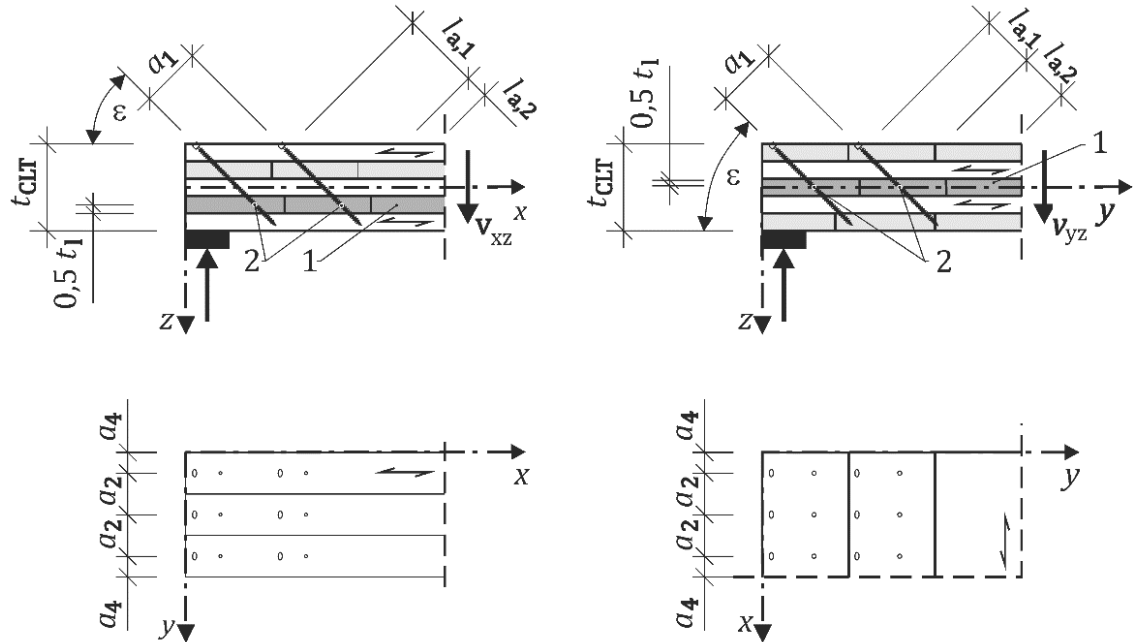
Täysikierteisillä ruuveilla vahvistetun rakenteen täytyy täyttää rajoite-ehdot ennen kuin sen leikkauskestävyyttä voidaan tarkastella kaavalla (9). Eurokoodissa (Eurocode 5 2022, s. 335) määritetyt rajoite-ehdot koskevat ruuvien välisiä pienimpiä ja suurimpia etäisyyksiä sekä porauskulmaa. Ne ovat seuraavat:

$$0,25t_{CLT} \leq a_1 \leq 0,7t_{CLT}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{3}t_{CLT} \leq a_2 \leq 1,5t_{CLT}, \quad (7)$$

$$\varepsilon = 45^\circ, \quad (8)$$

joissa  $a_1$  ja  $a_2$  ovat ruuvien väliset etäisyydet ja  $\varepsilon$  on ruuvien porauskulma tasoon nähden (kuva 5). (Eurocode 5 2022, s. 335)



### Selitteet

- 1 Määrävä kerros
- 2 Ruuvien painopiste määrävän kerroksen sisällä

**Kuva 5.** Täysikierteisillä ruuveilla tuettu CLT-levy ja lineaarinen kuormitus tasoa vastaan kohtisuoraan, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 335)

Ruuvit parantavat rakenteen leikkauskestävyyttä ja saavat leikkausjännityksen leviämään suuremmalle alueelle. Täten leikkauskestävyys onkin syytä tarkastella kahden eri suuruisen alueen sisällä. Eurokoodi (Eurocode 5 2022, s. 336) määrittelee sisemmän ja ulomman jännityksenvarmennusalueen. Sisemmän jännityksenvarmennusalueen (kuva 6) osalta leikkausjännityksen tarkasteluun käytetään kaavaa (9). Ulomman jännityksenvarmennusalueen (kuva 6) osalta leikkausjännitysten tarkastelu on tehtävä kuten tukemattomalle rakenteelle käyttäen kaava (5). (Eurocode 5 2022, s. 336) Sisemmällä varmennusalueella rakenne kestää suuremman leikkauskestävyyden kuin ulommalla alueella.

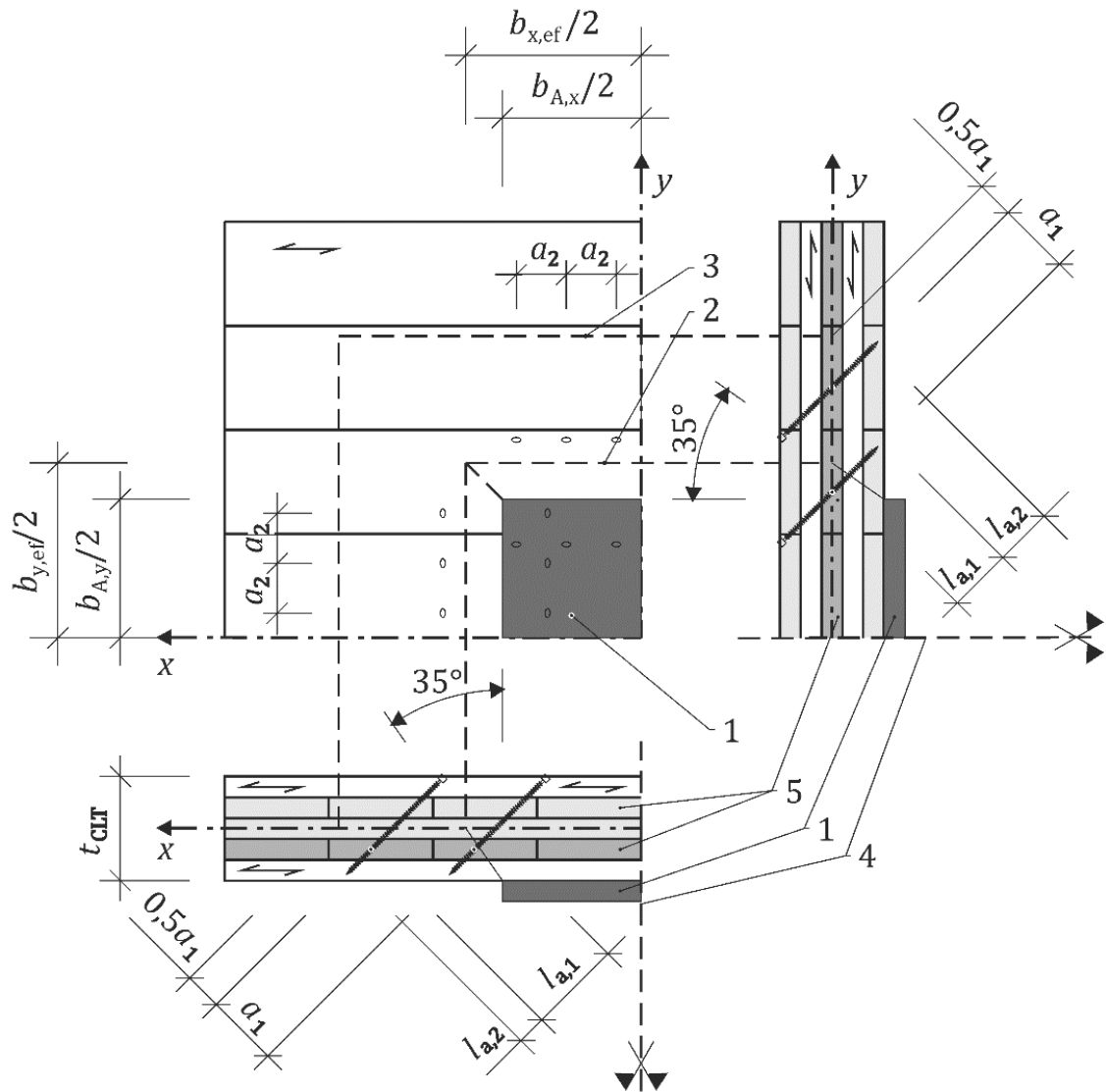
Täysikierteisillä ruuveilla vahvistetun rakenteen leikkauskestävyyden mitoitusehto sisemmällä jännityksenvarmennusalueella on

$$\tau_{r,d} \leq k_{r,pu} \frac{f_{r,k} k_{mod}}{\gamma_{M,tim}} + \frac{1}{2a_1 a_{ef,2}} \frac{F_{ax,45,Rk} k_{mod}}{\gamma_{M,conn}}, \quad (9)$$

jossa

$\tau_{r,d}$	on tasoleikkausjännityksen mitoitusarvo
$k_{r,pu}$	on epälineaarisen käyttäytymisen ja lujuusyhdistelmien huomioiva kerroin
$f_{r,d}$	on tasoleikkauslujuuden ominaisarvo
$k_{mod}$	on muunnoskerroin käyttöluokan ja kuormituksen aikaluokan mukaan
$\gamma_{M,tim}$	on puutavaran osittainen turvallisuustekijä
$a_1$	on ruuvien välinen etäisyys (kuva 6)
$a_{ef,2}$	on tehollinen ruuvien välinen etäisyys (kaava 11)
$F_{ax,45,Rk}$	on ruuvin ulosvetokestävyyden ominaisarvo 45° kulmassa syiden suuntaan
$\gamma_{M,conn}$	on ruuvin osittainen turvallisuustekijä (Eurocode 5 2022, s. 333–334).

Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvon  $F_{ax,45,Rk}$  määrittämiseen tarvittava ruuvien kierteisen osan todellinen läpimenopituus  $l_{ef} = \min\{l_{a,1}, l_{a,2}\}$  lasketaan määräävän kerroksen keskilinjan perusteella (kuva 5). Todellinen läpimenopituus on lyhyempi pituus määräävän keskilinjan yläpuolisesta ruuvien pituudesta  $l_{a,1}$  tai alapuolisesta  $l_{a,2}$ . (Eurocode 5 2022, s. 335).



### Selitteet

- 1 Kuorman vaikutusalue
- 2 Jännityksen varmennusalue, lasketaan kaavan (9) mukaan
- 3 Jännityksen varmennusalue, lasketaan kaavan (5) mukaan (ulkokehä)
- 4 Levyn reuna tai symmetria akseli
- 5 Määrävän kerroksen akseli

**Kuva 6.** Täysikierteisillä ruuveilla tuettu CLT-levy tasoa vastaan kohtisuorassa keskitetyssä kuormituksessa, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 336).

Ruuveilla vahvistetun tapauksen leikkauskestävyyden mitoitusehdossa (kaava 9) on mukana kertoimia. Kertoimelle  $k_{r,pu}$  annetaan arvo 1,6, kun kyse on keskitetystä kuormituksesta aiheutuva leikkauskestävyydestä (Eurocode 5 2022, s. 334). Jos kyseessä on jatkuvasta tuesta tai lineaarisesta kuormasta johtuva kuormitus (kuva 5), täytyy kertoimen  $k_{r,pu}$  arvo laskea seuraavasti:

$$k_{r,pu} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,35 \frac{F_{ax,A5,Rk}}{2a_1 a_{ef,2}}, \\ 1,20 \end{array} \right. \quad (10)$$

jossa

- $F_{ax,45,Rk}$  on ruuvien kuormankestävyyden ominaisarvo  $45^\circ$  kulmassa syiden suuntaan
- $a_1$  on ruuvien välinen etäisyys (kuva 5)
- $a_{ef,2}$  on tehollinen ruuvien välinen etäisyys (kaava 11) (Eurocode 5 2022, s. 334).

Tehollinen ruuvien välinen etäisyys  $a_{ef,2}$  lasketaan tapauskohtaisesti kaavalla (11). Keskitetylle ja lineaariselle kuormitukselle on eri laskutavat. Tehollinen ruuviväli  $a_{ef,2}$  määritetään seuraavasti:

$$a_{ef,2} = \begin{cases} \frac{a_2}{n_{perp}} & \text{jatkuvan tuen ja kuorman siirron yhteydessä} \\ \frac{b_{ef,x/y}}{n_{perp}} & \text{keskitetyn kuorman, tuen tai kuorman siirron yhteydessä} \end{cases}, \quad (11)$$

jossa

- $a_2$  on ruuvien välinen etäisyys (kuva 6)
- $b$  on levyn leveys
- $n_{perp}$  on ruuvilinjojen määrä kohtisuorassa suunnassa tarkasteltavan kuorman-siirron suuntaan nähden (kuva 5 ja 6)
- $b_{ef,x/y}$  on tehollinen leveys (kuva 5) (Eurocode 5 2022, s. 334–333).

### 2.3.2 Tason suuntainen kuormitus

Tason suuntaisessa kuormituksessa erityisohjeet koskevat keskitetyn kuorman jakaantumista elementissä. Niissä otetaan kantaa kuorman jakaantumislevyden  $b_{ef}$  pituuteen. Ohjetta ei voida soveltaa kaikille tapauksille, vaan vain rajoite-ehdot täyttävälle. (Eurocode 5 2022, s. 336) Aukottomassa (kuva 7) ja aukollisessa (kuva 8) elementissä kuormat jakaantuvat tietyissä tapauksissa eri tavalla.

Jotta voidaan käyttää kuorman jakaantumislevyettä  $b_{ef}$ , täytyy seuraavat rajoite-ehto täytyä. Rajoite-ehdot ovat (Eurocode 5 2022, s. 336):

$$t_x/t_{CLT} \leq 0,75, \quad (12)$$

$$b/h \leq 0,15, \quad (13)$$

joissa

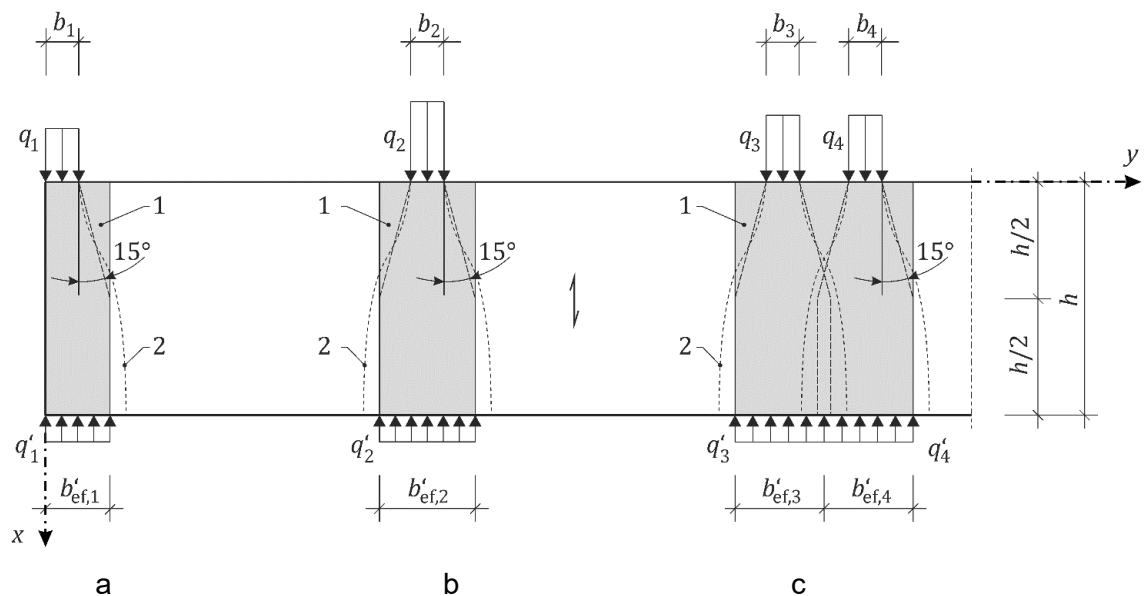
$t_x$  on yhteenlaskettu paksuus kerroksista, joiden syytä ovat kuorman kanssa yhden-suuntaiset (kuva 7)

$t_{CLT}$  on CLT-elementin paksuus

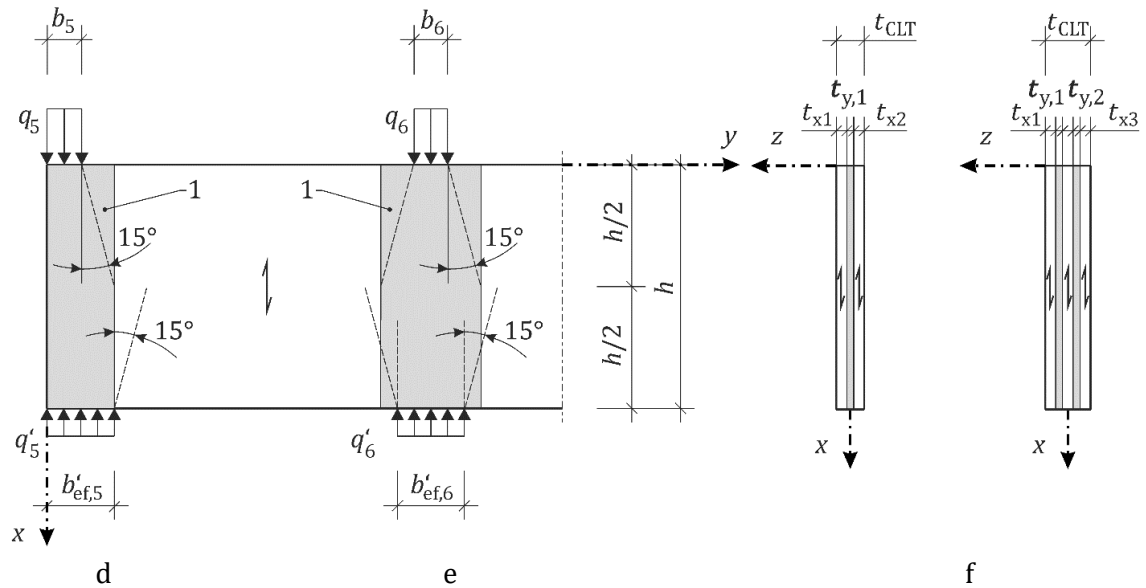
$b$  on kuorman vaikutusleveys

$h$  on CLT-elementin korkeus.

Yllä mainittujen ehtojen täytyttyä, voidaan kuorman jakaantumisleveys  $b_{ef}$  määrittää Eurokoodissa annetun ohjeen mukaan. Eurokoodin (2022, s. 337) mukaan kuorman vaikutus jakaantuu  $15^\circ$  kulmassa ja kuorma jakaantuu siinä kulmassa korkeuden puolikkaaseen  $h/2$  asti (kuva 7). Kuorman oletetaan jakaantuvan todellista kuorman vaikutusaluetta suuremmalle alueelle, mikä pienentää rakenteessa vaikuttavia jännityksiä. Jos kuorman vaikutusleveys  $b$  muuttuu, käytetään jakaantumisleveyden  $b_{ef}$  määrittämiseen pienintä leveyttä (Eurocode 5 2022, s. 337). Kuorman jakaantuminen leveydelle  $b_{ef}$  voidaan olettaa myös stabiiliteetilaskennassa eli nurjahdusta ja kiepahdusta tarkasteltaessa (Eurocode 5 2022, s. 336).







### Selitteet

- 1 yksinkertaistettu kuorman jakautumisalue
- 2 kuorman jakautuminen analyttisen ratkaisun mukaan
- a yksisuuntainen keskitetty kuormitus seinän lopussa
- b symmetrisen yksisuuntaisen kuorman jakaantuminen
- c päällekkäinen yksisuuntaisten kuormien jakaantuminen
- d kuorman siirto seinän lopussa
- e kuorman siirto
- f poikkileikkaus 3 ja 5 kerroksisena

**Kuva 7.** Esimerkki keskitettyjen kuormien jakaantumisesta CLT-elementissä, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 339–338)

Jos CLT:ssä on aukko, täytyy niiden vaikutus huomioida keskitettyjen kuormien jakaantumisessa kuvan 8 mukaisesti. Aukkoa ei Eurokoodin (2022, s. 337) mukaan tarvitse huomioida, jos aukon leveys ja korkeus täyttävät niille asetetut ehdot. Aukkoja koskevat ehdot ovat

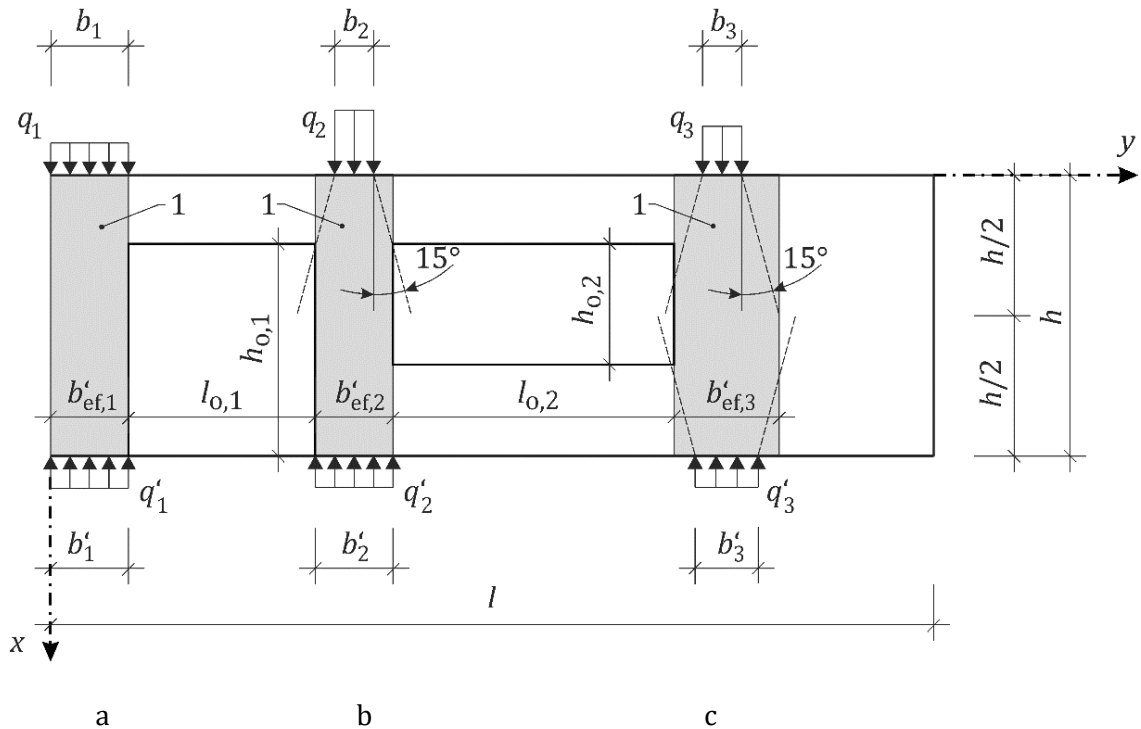
$$l_o \leq \frac{1}{10} l, \quad (14)$$

$$h_o \leq 1/10 h, \quad (15)$$

$$l_o h_o \leq 1/100 l h, \quad (16)$$

joissa  $l_o$  on aukon suurin pituus,  $l$  on koko CLT elementin pituus,  $h_o$  on aukon suurin korkeus ja  $h$  on koko CLT-elementin korkeus (Eurocode 5 2022, s. 337).

Kaikkien edellä mainittujen ehtojen täytyessä voidaan kuormien olettaa jakautuvan kuten aukottomassa tapauksessa, eikä siihen tarvitse kiinnittää erityishuomiota. Tällaisia tapauksia ovat vain hyvin pienet reiät, kuten ilmastointiputket tai vastaavat. Ovien ja ikkunoiden koko on harvoin tarpeeksi pieni, jotta niiden vaikutukset voitaisiin jättää huomiotta.



### Selitteet

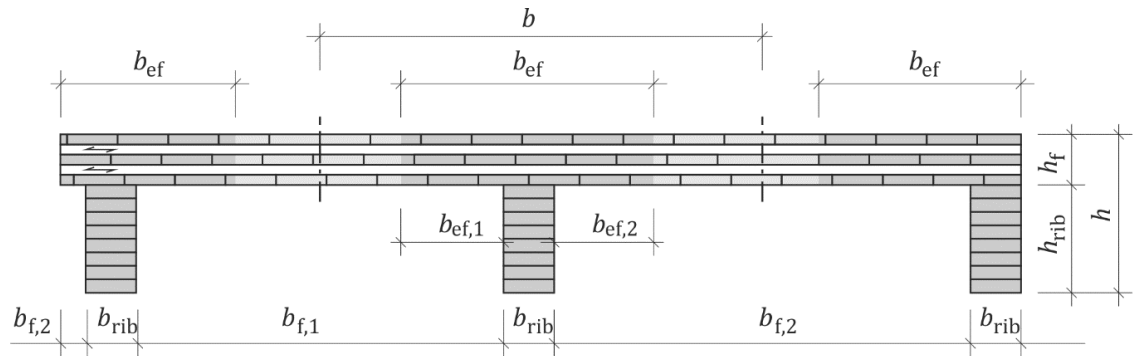
- 1 yksinkertaistettu kuorman jakautumisalue
- a yksisuuntainen keskitetty kuormitus seinän lopussa
- b yksisuuntainen keskitetty kuormitus aukkojen välissä
- c yksisuuntainen keskitetty kuormitus aukon lopussa

**Kuva 8.** Esimerkki kuormien jakautumisesta aukkoja sisältävässä CLT-elementissä, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 338)

Lähtökohtaisesti kuormien vaikutus CLT-elementissä otetaan huomioon vain niillä kerroksilla, joissa syyt ovat yhden suuntaiset kuormituksen kanssa. Jos on tarvis tarkastella jännitysten jakaantumista puristuksessa kerroksille, joissa syyt ovat kohtisuorassa kuormitusta vastaan, voidaan myös siihen soveltaa yllä mainittuja ohjeita (Eurocode 5 2022, s. 336).

### 2.3.3 CLT-valmisteinen ripalaatta

CLT-paneeleista voidaan tehdä myös ripalaattarakenne, jossa CLT on laattana ripojen päällä. Tälle rakenteelle annetaan Eurokoodissa omat ohjeet tehollisten leveyksien laskemiseen. Kuten edellisissäkin tehollisten leveyksien laskemisessa, täytyy rakenteen täyttää tiettyjä rajoite-ehtoja. (Eurocode 5 2022, s. 339)



**Kuva 9.** CLT-ripalaatta rakenne (Eurocode 5 2022, s. 339)

Eurokoodissa (2022, s. 339) annettu ensimmäinen ehto koskee kahden rivin välisen etäisyyden  $b_f$  ja jännevälän pituuden  $l$  välistä suhdetta  $b_f/l$ . Jos se on alle 0,02 voidaan CLT-laatan tehollinen leveys  $b_{ef}$  katsoa olevan saman kuin laatan leveys  $b$ ,  $b_{ef} = b$  (kuva 9). Jännevälän pituuden  $l$  katsotaan olevan etäisyys taivutusmomenttien nollakohtien välillä. (Eurocode 5 2022, s. 339)

Tapauksille, joissa kahden rivin välisen etäisyyden  $b_f$  ja jännevälän pituuden  $l$  välinen suhde on suurempi tai yhtä suuri kuin 0,02 on annettu eri menetelmä tehollisen leveyden  $b_{ef}$  määrittämiseen. Tätä menetelmää koskee myös kaksi muuta rajoite-ehtoa, joiden tulee täyttyä. Eurokoodissa määritetyt rajoite-ehdot ovat:

- Kahden rivin välisen etäisyyden  $b_f$  ja jännevälän pituuden  $l$  välinen suhde täytyy olla  $0,02 \leq b_f/l \leq 0,25$ .
- Jännevälän pituuden  $l$  ja koko ripalaattarakenteen korkeuden  $h$  suhde täytyy olla  $14 \leq l/h \leq 22$ .
- Poikkileikkauksen aksiaalijäykkyyden  $(EA)_x$  ja poikkileikkauksen leikkajäykkyyden  $(GA)_{xy}$  välinen suhde täytyy olla  $5 \leq (EA)_x/(GA)_{xy} \leq 22$ . (Eurocode 5 2022, s. 339)

Kaikkien yllä mainittujen ehtojen täyttyä, tehollinen leveys lasketaan seuraavasti:

$$b_{ef} = b_{rib} + \sum b_{i,ef}, \quad (17)$$

jossa  $b_{ef}$  on tehollinen leveys,  $b_{rib}$  on rivin leveys ja  $b_{i,ef}$  on tehollinen leveys rivin kummallakin puolella (Eurocode 5 2022, s. 339).

Tehollisen leveyden kaavassa (kaava 17) summatermiin lasketaan yhteen rivin kummallekin puolelle laskettu tehollinen leveys. Tämän laskemiseen Eurokoodissa (Eurocode 5 2022, s. 340) on omat ohjeet eri kuormitustyypeille. Jos tehollista leveyttä käytetään yksittäisten kuormien aiheuttamien jännitysten laskemiseen, lasketaan tehollinen leveys rivin kummallekin puolelle seuraavasti:

$$\text{kun } \frac{h_{rib}}{t_{CLT}} \leq 2 \quad b_{i,ef} = b_f \left( 0,5 - 0,4 \left( \frac{b_f}{l} \right)^{0,25} \left( \frac{(EA)_x}{(GA)_{xy}} \right)^{0,1} \right), \quad (18)$$

$$\text{kun } \frac{h_{rib}}{t_{CLT}} > 2 \quad b_{i,ef} = b_f \left( 0,5 - 0,28 \left( \frac{b_f}{l} \right)^{0,3} \left( \frac{(EA)_x}{(GA)_{xy}} \right)^{0,3} \right), \quad (19)$$

joissa

$h_{rib}$  on rivan korkeus

$t_{CLT}$  on CLT-levyn paksuus

$b_{i,ef}$  on tehollinen leveys rivan kummallakin puolella

$b_f$  on kahden rivan välinen etäisyys

$l$  on jännevälin pituus

$(EA)_x$  on poikkileikkauksen aksiaalijäykkyys per leveysmetri, joka koostuu x-akselin suuntaisista kerroksista

$(GA)_{xy}$  on poikkileikkauksen leikkausjäykkyys per leveysmetri (Eurocode 5 2022, s. 340).

Yksittäisiä kuormia koskee myös ehto, jonka nojalla tehollinen leveys ripojen kummallakin puolella täytyy olettaa nolllaksi. Jos yksittäisten kuormien etäisyys taivutusmomentin nolllakohtaan on enintään  $b$  tai yksittäinen kuorma vaikuttaa pienemmällä pituudella kuin  $0,05l$ , tällöin  $b_{i,ef} = 0$  (Eurocode 5 2022, s. 340).

Jännitysten laskentaan yhdensuuntaisista jakaantuneista kuormista tai käyttörajatila mitoitusta varten, joko yhdensuuntaisista jakaantuneista kuormista tai yksittäisistä kuormista on Eurokoodissa (Eurocode 5 2022, s. 339–340) määritetty oma efektiivisen leveyden laskentakaava. Kyseinen kaava (20) eroaa edellisistä kaavoista (18 ja 19) vain potenssien ja vakioiden suuruudessa. Tehollinen leveys  $b_{i,ef}$  lasketaan näille tapauksille seuraavasti:

$$b_{i,ef} = b_f \left( 0,5 - 0,35 \left( \frac{b_f}{l} \right)^{0,9} \left( \frac{(EA)_x}{(GA)_{xy}} \right)^{0,45} \right), \quad (20)$$

jossa

$b_{i,ef}$  on tehollinen leveys rivan kummallakin puolella

$b_f$  on kahden rivan välinen etäisyys

$l$  on jännevälin pituus

- $(EA)_x$  on poikkileikkauksen aksiaalijäykkyys per leveysmetri, joka koostus x-akselin suuntaisista kerroksista
- $(GA)_{xy}$  on poikkileikkauksen leikkausjäykkyys per leveys metri (Eurocode 5 2022, s. 339–340).

## 2.4 Lisäohjeet eri käyttötarkoituksiin

CLT:stä voidaan valmistaa niin lattia-, katto- kuin seinäelementtejäkin. Näille eri käyttötarkoituksille Eurokoodi (Eurocode 5 2022, s. 284–286) antaa omia erityisohjeita, joita täytyy käyttää suunnittelussa. Erityisohjeet sisältävät kyseistä rakennetta koskevia määryksiä ja suunnitteluperiaatteita. Ne koskevat CLT:stä valmistettuja rakenteita sekä muutamaa muuta materiaalia (LVL ja GLVL), joita emme käsittele tässä työssä. (Eurocode 5 2022, s. 284–286)

### 2.4.1 Seinät

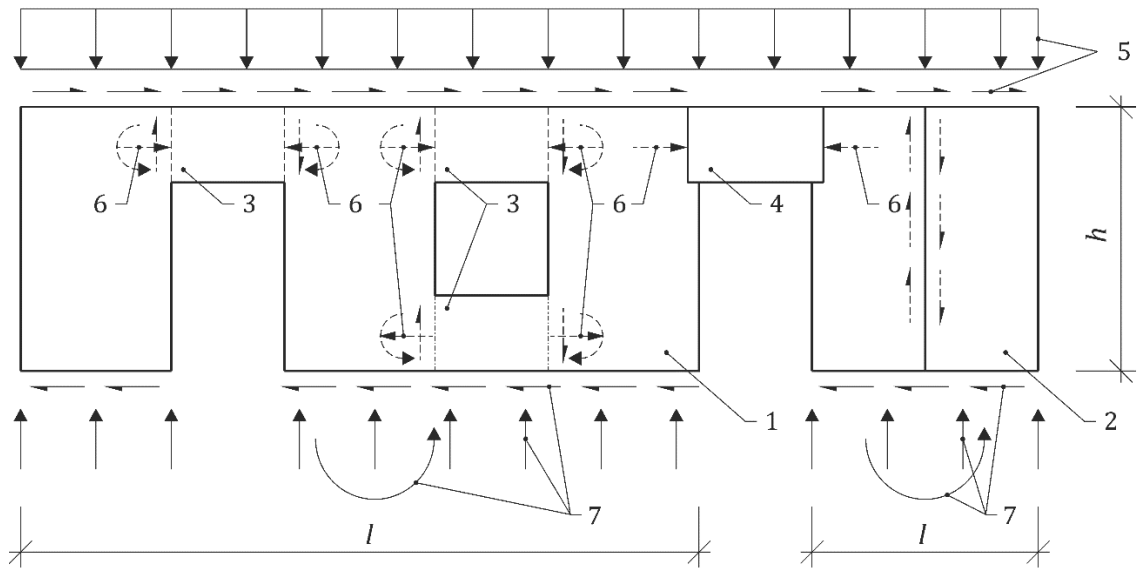
Seiniä koskevia ohjeita sovelletaan rakenteille, jotka määritetään Eurokoodin mukaan seinäksi. Jotta rakenne määritetään seinäksi, täytyy sen pituuden  $l$  olla ainakin neljä kertaa sen korkeuden  $h$  verran eli ehdon  $h/l \leq 4$  on täyttyvä (Eurocode 5 2022, s. 284). Jos ehto ei täyty, mielletään rakenne pilariksi eikä näitä erityisohjeita tarvitse soveltaa.

Suunnittelussa on huomioita seinäelementtien toisistaan poikkeavat kestävyysominaisuudet ja muodonmuutoksen toisiinsa nähden sekä liitoksen, jotka estävät seinien pysty- ja vaakasiirtymät. Myös elementtien koko ja rakenteen kokoonpano on syytä ottaa huomioon. (Eurocode 5 2022, s. 284)

Seinät voivat koostua yhdestä tai useammasta CLT-elementistä. Yhdestä elementistä koostuva seinä on yhtenäinen, kun useammasta elementistä koostuvassa jaetussa seinässä eri elementit ovat kiinnitettynä toisiinsa mekaanisesti (kuva 4). (Eurocode 5 2022, s. 284) Mekaanisesti toisiinsa kiinnitetyistä elementeistä koostuvan seinän elementtien väliset liitokset voidaan suunnitella vakioleikkausvoimalle (Eurocode 5 2022, s. 285).

Seinäelementteihin tulevien aukkojen suunnittelussa on otettava huomioon muutamia erityispiirteitä. Jos aukon vierekkäisiä pystysuuntaisia siirtymiä ei ole estetty, täytyy aukkopalkkeissa ja kaidemuureissa huomioida vaakasuuntaisista voimista aiheutuvat leikkausvoimien ja lisätaivutuksen vaikutukset (kuva 4) (Eurocode 5 2022, s. 284). Toinen asia koskee kuorman siirtoa aukon yli. Jos ei voida olla varmoja kuormansiirrosta aukon

yli aukkopalkin ja/tai kaidemuurin kautta, täytyy seinät aukon eri puolilla mitoittaa erillisinä (Eurocode 5 2022, s. 285). Tällöin yhdestä elementistä koostuva seinä muuttuu mitoituksessa usean elementin seinäksi.



#### Selitteet

- 1 Yhtenäinen seinäelementti
- 2 Jaettu seinäelementti
- 3 Aukkopalkki tai kaidemuuri, joka pystyy siirtämään taivutusmomenttia, aksiaalisia voimia sekä leikkausvoimia
- 4 Aukkopalkki, jota voidaan pitää saranoituna aksiaalisesti jäykkänä palkkina
- 5 Ulkoiset kuormat
- 6 Siirrettävät sisäiset voimat ja momentit
- 7 Tukireaktiot

**Kuva 4.** Esimerkki seinäelementistä, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 285)

Eurokoodissa (2022, s. 108–109) on annettu erillinen ehto koskemaan CLT-seinille aiheutuvaa leikkausjännitystä ristiinliimattujen lautojen välissä syrjätaivutuksessa. Tarkastelu tehdään efektiiviselle nettopoikkileikkaukselle  $A_{ef,x}$  tai  $A_{ef,y}$ . Jos efektiivinen nettopoikkileikkaus koostuu vain CLT:n uloimmista kerroksista, joissa syyt ovat kyseisen akselin suunnassa, täytyy kerrosten paksuutta vähentää 20 %. Ehdon  $b_l/t_l \leq 4$  täytyttyä, käytetään leikkausjännitysten tarkastamiseen ristiinliimattujen lautojen välissä mitoitusehto

$$\tau_{tor,node,d} = \frac{3}{2} \tau_{v,xy,d} \left( \frac{t_l}{b_l} \right) \leq f_{tor,node,d}, \quad (21)$$

jossa

$\tau_{tor,node,d}$  on vääntöleikkausjännityksen mitoitusarvo ristiinliimattujen lautojen välissä

$\tau_{v,xy,d}$  on leikkausjännityksen arvo tehollisen nettopoikkileikkauksen tasossa

$t_l$  on suurin yksittäisen laudan paksuus poikkileikkauksessa

- $b_l$  on pienin yksittäisen laudan leveys poikkileikkauksessa
- $f_{tor,node,d}$  on vääntöleikkauslujuuden mitoitusarvo ristiinliimattujen lautojen välissä. (Eurocode 5 2022, s. 108–109)

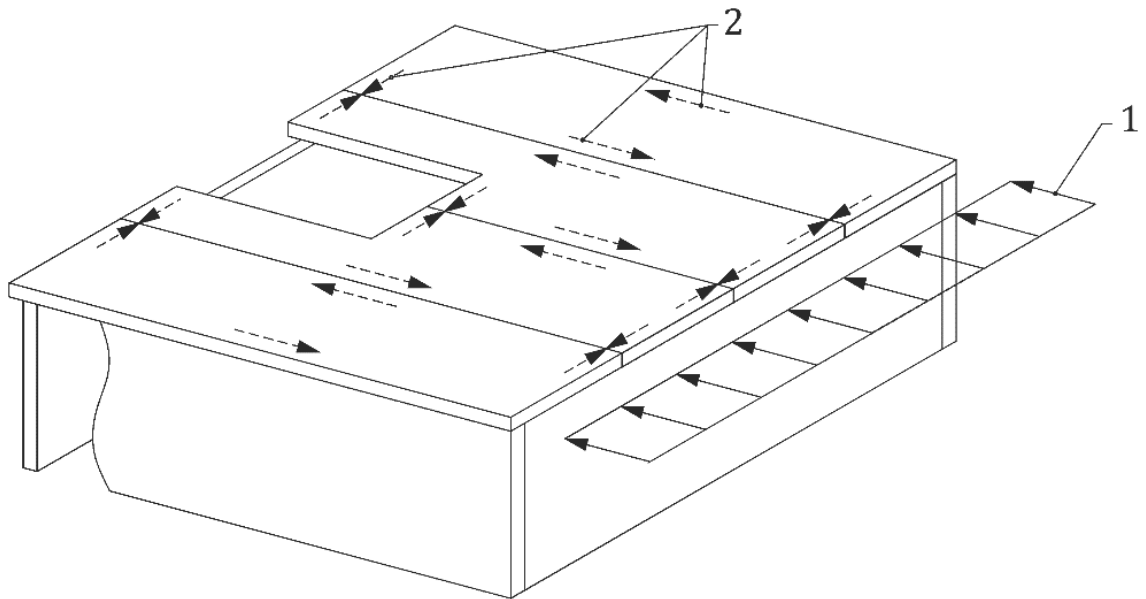
Pienimmällä yksittäisen laudan leveydellä tarkoitetaan CLT-levyn reunasta uraan tai urasta uraan olevaa etäisyyttä, jos tämä ei ole tiedossa voidaan käyttää arvoa 80 mm (Eurocode 5 2022, s. 108–109). Vääntöleikkauslujuuden mitoitusarvon  $f_{tor,node,d}$  laskeamiseen tarvittava vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo  $f_{tor,node,k}$  on CLT:lle  $2,5 \text{ kN/mm}^2$  (Eurocode 5 2022, s. 68). Mitoitusedossa (kaava 21) leikkausjännityksen arvo  $\tau_{v,xy,d}$  täytyy korvata toisen pääsuunnan leikkausjännityksellä  $\tau_{v,yx,d}$ , kun tarkastelu tehdään kyseiseen suuntaa (Eurocode 5 2022, s. 108).

## 2.4.2 Lattiat ja katot

Seuraava erityisohje koskee mekaanisesti jatketuista CLT-elementeistä valmistettuja lattioita ja kattoja, joihin kohdistuu tasaisesti jakautunut kuorma (kuva 5). Eurokoodissa annetaan kolme ehtoa, jotka tulee täyttää ennen kuin erityisohjetta voidaan soveltaa. Ehdot ovat seuraavat:

- rakenne täytyy olettaa jäykäksi
- rakenteessa olevien huomattavien aukkojen vaikutus on otettu huomioon
- CLT-elementeissä puikkotyypisten liittimien enimmäisetäisyys nauloilla on 150 mm ja ruuveilla 500 mm. (Eurocode 5 2022, s. 285)

Edellä mainittujen ehtojen täytyttyä voidaan leikkausvoimat olettaa tasaisesti jakautuneiksi lattian tai katon leveydeltä (Eurocode 5 2022, s. 286). Kyseinen olettamus helpottaa rakenteen tarkastelua mitoituksen näkökulmasta.



Selitteet:

- 1 Ulkoinen kuorma
- 2 Siirrettävät sisäiset voimat

**Kuva 5.** Voimien jakautuminen lattiassa, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 286)

## 2.5 CLT-liitokset

Liittimet ja niistä koostuvat liitokset ovat tärkeässä osassa rakennuksen pystyssä pysymisen kannalta. Niiden tehtävänä on pitää rakenteet paikoillaan ja siirtää kuormia. Uudessa Eurokoodissa (2022, luku 11 liitokset) ei ole määritetty CLT:lle liittimien tai liitosten osalta omia mitoitusohjeita, vaan niiden mitoitus lasketaan puikkoliitosteorian mukaan, kuten muillekin puumateriaaleille. Liittimet ja liitokset murtuvat samalla tavalla kaikissa materiaaleissa joko puun reunapuristuslujuuden tai liittimen kestävyuden ylittyessä. Eurokoodissa (2022, s. 198) otetaan kuitenkin kantaa liittimien vähimmäismääriin, enimmäisetäisyyksiin, halkaisijaan sekä vähimmäisvetopituuksiin. Taulukossa (5) on esitetty nämä vaatimukset.

**Taulukko 5.** Suurimmat liittimien etäisyydet, pienimmät vetopituudet, halkaisijat ja kiinnikkeiden lukumäärät CLT:ssä, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 198)

	Poikittainen kuormitus	Aksiaalinen kuormitus	Syiden päädyssä
Suurin etäisyys	$e \leq 500 \text{ mm}$ ruuveille CLT-CLT ja CLT-GL $e \leq 750 \text{ mm}$ ruuveille teräs-CLT		



	$e \leq 1000 \text{ mm}$ kulmaraudat CLT-betoni tai CLT-muuraus $l_{screw} \geq 1,5l_{w,1}$ yleisesti ja $l_{screw} \geq 0,8t_{CLT}$ limiliitos ja $d \geq 6 \text{ mm}$ Limitetyt laudat: ruuvit $d \geq 6 \text{ mm}$ ; pyöreä varrelliset naulat $d \geq 3 \text{ mm}$ ja $e \leq 150 \text{ mm}$		
Naulat	Syrjällään $t \geq 10d, l_{w,2} \geq 10d$	Lappeellaan $l_{w,2} \geq 4d, d \geq 4 \text{ mm}$ Syrjällään täytyy välttää $n_{min} = 6$	
Ruuvit		Lappeellaan $l_{w,2} \geq 4d, d \geq 4 \text{ mm}$ Syrjällään $d \geq 8 \text{ mm}$ $n_{min} = 4$	$d \geq 8 \text{ mm}$ $l_{w,2} \geq 3d + l_g$
Pultit	$n = n_{ef}$	-	
Leikkausliittimet	-		

Taulukon (5) selitteet ovat seuraavat:  $e$  liittimien suurin sallittu etäisyys,  $l_{screw}$  ruuvin pituus,  $l_{w,1}$  ruuvin tunkeutuma kannan puoleisessa osassa ja  $l_{w,2}$  kärjen puoleisessa osassa,  $t_{CLT}$  CLT:n paksuus,  $t$  teräslevyn paksuus,  $d$  liittimen paksuus,  $l_g$  ruuvin kierteisen osan pituus,  $n$  liittimien määrä,  $n_{ef}$  liittimien tehollinen määrä ja  $n_{min}$  liittimien minimimäärä.

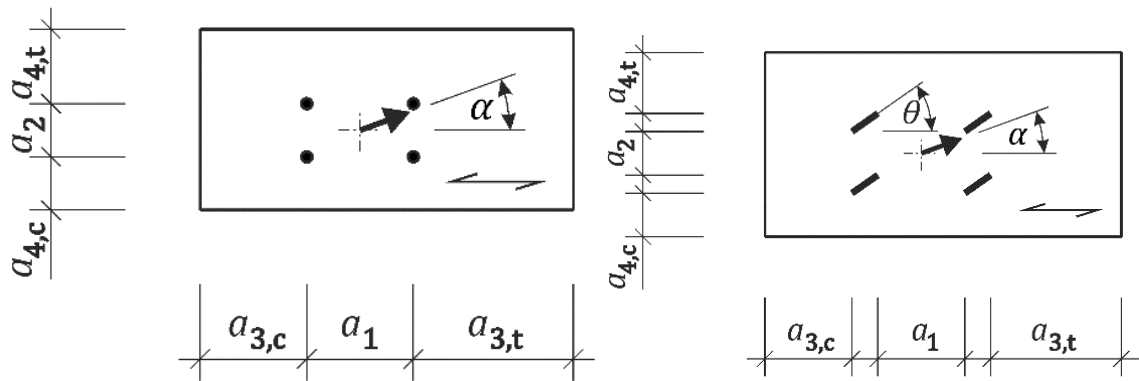
Jos liittimien määriä ei ole mainittu taulukossa (5), täytyy niitä olla ainakin kaksi jokaisessa liitoksessa, koskien nauloja, niittejä, ruuveja ja sauvoja puuruuvikierteellä. (Eurocode 5 2022, s. 197) Poikkeuksena naula-, niitti- ja ruuviliitokset levyjen päissä, lauta- muoteissa, kattolistoissa ja tuuliristikoiden väliliitoksissa, jossa voidaan käyttää yhtä liittintä, mutta liittimiä on oltava kokonaisuudessaan kuitenkin ainakin kaksi (Eurocode 5 2022, s.198).

Pultti- ja vaarnatappiliitoksissa liittimiä täytyy olla ainakin neljä, kun niitä kuormitetaan yhdessä leikkaustasossa. Kuormituksen tapahtuessa kahdessa tai useammassa leikkaustasossa täytyy pultteja ja vaarnatappeja olla ainakin kaksi. Yhden pultin liitoksessa täytyy kuorman kestävyys kapasiteettia pienentää puoleen. (Eurocode 5 2022, s. 197)

Eurokoodissa annetaan myös vähimmäisvaatimukset liittimien ja reunan sekä liittimien ja päädyn väliin jäävälle osalle kuin myös kahden liittimen välille. Liittimien välisiä etäisyyksiä koskevat vähimmäisvaatimukset ovat riippuvaisia liittimien asettelusta sekä kuormituksen laadusta, sivuttainen vai aksiaalinen kuormitus. (Eurocode 5 2022) Taulukossa (6) on annettu reuna- ja päätyetäisyyksien vähimmäisvaatimukset, jotka ovat voimassa kaikissa tapauksissa. Taulukossa (6) esitetyt liittimien väliset etäisyydet  $a_1$  ja  $a_2$  ovat voimassa sivuttain kuormitetuissa tapauksissa, joissa liittimien asettelu ei ole porastettua (kuva 6). Liittimien välisten etäisyyksien määrittämiseen muissa tapauksissa annetaan Eurokoodissa (2022, s. 207–211) omat ohjeet, jotka ovat voimassa kaikille puumateriaaleille.

**Taulukko 6.** Pienimmät liittimien etäisyydet CLT:n reunasta ja lopusta, muokattu lähteestä (Eurocode 5 2022, s. 206)

Väli/etäisyys		$a_1$	$a_2$	$a_{3,t}$ (Kuormitettu pääty)	$a_{3,c}$ (Kuormittamaton pääty)	$a_{4,t}$ (kuormitettu reuna)	$a_{4,c}$ (kuormittamaton reuna)
Tyyppi	Kriteeri						
Naulat ja niittijalat	Lappeellaan	5d	3d	10d	6d	7d	3d
	Syrjällään	10d	3d	12d	7d	5d	5d
Niitit	Lappeellaan	15d	5d	15d	10d	7d	5d
Pultit	Lappeellaan	5d	4d	5d	4d	3d	3d
Vaaratapit	Lappeellaan	5d	3d	5d	4d	3d	3d
Ruuvit ja sauvat puuruuvikierteellä	Lappeellaan	4d	2,5d	6d	6d	6d	2,5d
	Syrjällään	10d	3d	12d	7d	5d	5d



a) Naulat, ruuvit, sauvat puu ruuvikierteellä,  
vaarnatapat, pultit

b) Niitit

### Selitykset

- $a_1$  Vaarnatyypisten liittimien välinen etäisyys yhdensuuntaisesti syiden kanssa
- $a_2$  Vaarnatyypisten liittimien välinen etäisyys kohtisuorassa syiden suhteen
- $a_{3,t/c}$  Kuormitettu tai kuormittamaton päätyetäisyys yhdensuuntaisesti syiden suhteen
- $a_{4,t/c}$  Kuormitettu tai kuormittamaton päätyetäisyys kohtisuorasti syiden suhteen
- $\alpha$  Kuormituksen kulma
- $\theta$  Nidontakulma syiden suuntaan

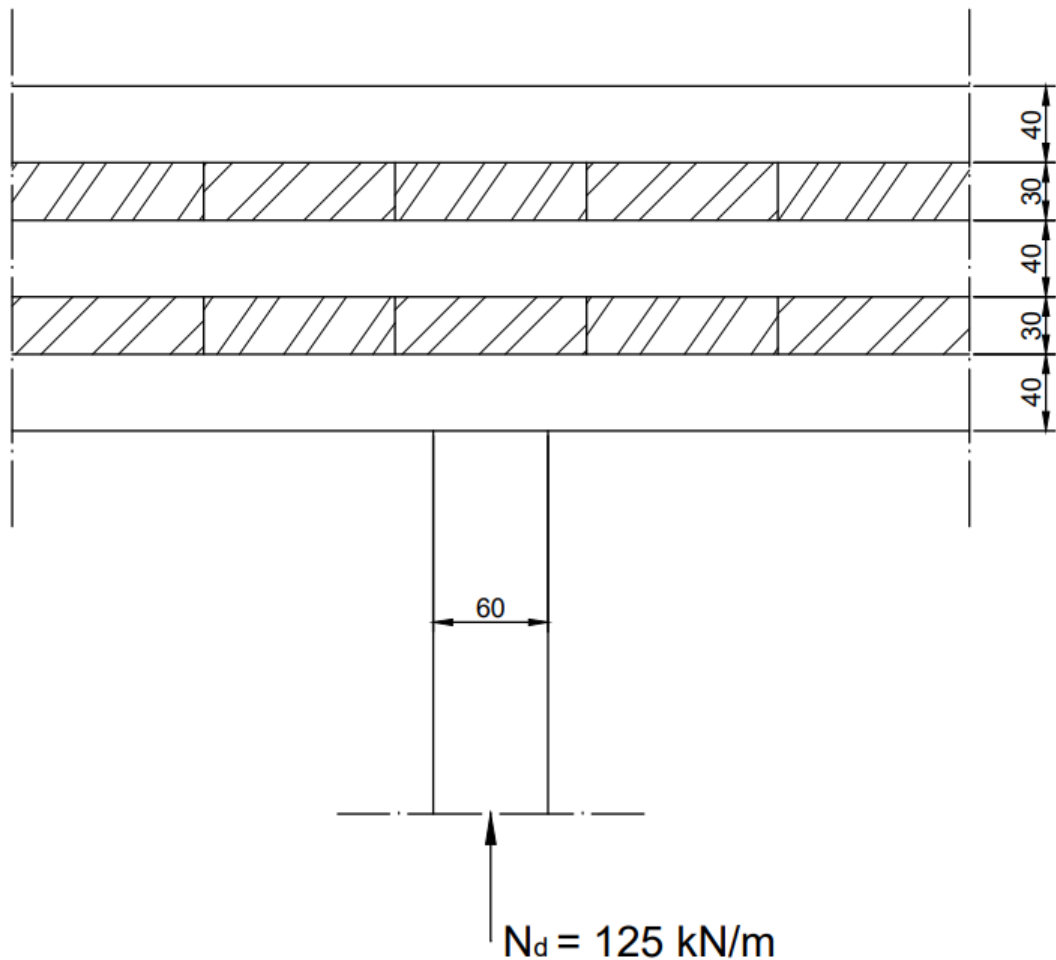
**Kuva 6.** liittimien reuna-, pääty- ja välietäisyydet porrastamattomassa tapauksessa kuormituksen kohdistuttaessa liitoksen painopisteeseen, muokattu lähteestä (Eurocode 5 s. 203)

Jos CLT:lle käytetään Eurokoodin mukaista tarkastelua liitoksen hauraasta murtumisesta, antaa se konservatiivisen tuloksen. Hauraalla murtumisella tarkoitetaan puun pala- tai läpi lohkeamista, puun halkeamista liitoksen kohdalta joka syiden suuntaan tai syitä vastaan kohtisuoraan tai koko liitosrivin leikkaantumista syiden suunnassa. (Eurocode 5 2022, s. 212)

Perinteisten liittimien lisäksi, kuten naulat ja ruuvit CLT:ssä voidaan käyttää myös liimatanko kiinnityksissä. Ne voivat olla joko kierteisiä tai ilman kierteitä. Tankokiinnityksiä käytetään eri elementtien tai materiaalien (teräs tai betoni) välisiin liitoksiin. Eurokoodin luku 11.10 käsittelee näiden liittimien ja liitosten mitoittamista. (Eurocode 5 2022, s. 233–241)

### 3. MITOITUSESIMERKKI

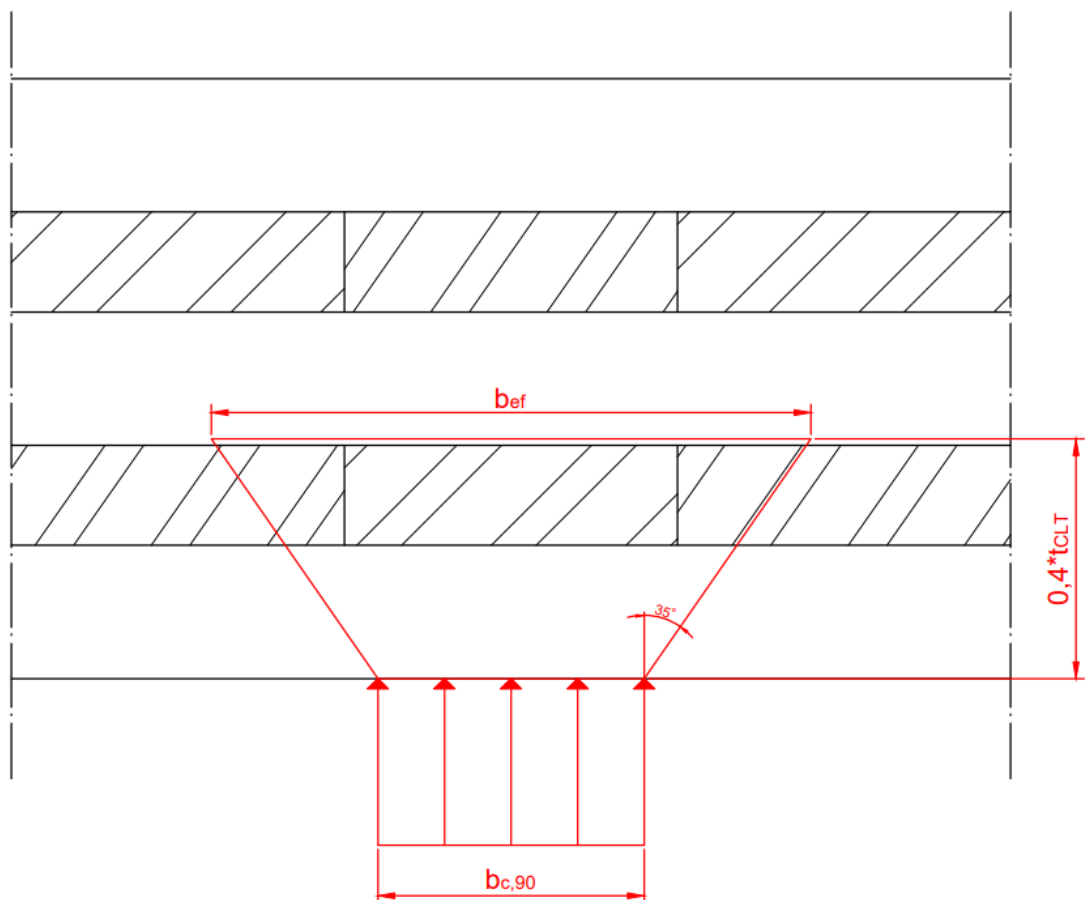
Tässä mitoitus esimerkissä tehdään tukipainetarkastelu CLT-laatalle, johon tukeutuu seinä alapuolelta. CLT-laatta on rakenteeltaan viisikerroksinen 40-30-40-30-40 levy. Rakenteen ja kuormat on esitetty kuvassa (7). Rakenteen käyttöluokka on 1. Seinän pituus on 1 metri. Laskuesimerkissä hyödynnetään kuorman jakaantumista syitä vastaan kohtisuorassa puristuksessa  $35^\circ$  kulmassa teholliselle pinta-alalle, kuva (8). Oletetaan rakenteen kuuluvan tapaus A luokkaan, jolloin kerroin  $k_{mat}$  saa arvon 1,4.



**Kuva 7.** Laskuesimerkin rakenne ja kuormat

Lähtötiedot:

Kuorma $N_d$	= 125 kN/m
Puristuslujuuden ominaisarvo $f_{c,90,k}$	= 2,5 N/mm <sup>2</sup>
Muunnoskerroimen $k_{mod}$	= 0,6
Osavarmuuskerroin $\gamma_M$	= 1,25
Kerroin $k_{mat}$	= 1,4
Leveys $b_{c,90}$	= 60 mm
Pituus $l_{c,90}$	= 1000 mm



**Kuva 8.** Havainnollistava kuva kuorman jakaantumisesta rakenteen leveydessä

Lasketaan tehollinen leveys ja pituus kuvan 8 mukaisesti.

$$b_{ef} = b_{c,90} + 2 * \tan 35^\circ * 0,4 * t_{CLT} = 60 \text{ mm} + 2 * \tan 35^\circ * 0,4 * 180 \text{ mm} = 160,8 \text{ mm}$$

$$l_{ef} = l_{c,90} + 2 * \tan 35^\circ * 0,4 * t_{CLT} = 1000 \text{ mm} + 2 * \tan 35^\circ * 0,4 * 18 \text{ mm} = 1100,8 \text{ mm}$$

Lasketaan rakenteen puristusjäännitys. Kuormittava voima  $N_d$  on annettu suoraan ominaisarvona, joten sitä ei erikseen tarvitse enää muuttaa.

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{125\,000\text{ N}}{60\text{ mm} * 1000\text{ mm}} = 2,09\text{ N/mm}^2$$

Määritetään rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo muunnoskerroimen  $k_{mod}$  ja osavarmuuskertoimen  $\gamma_M$  avulla.

$$f_{c,90,d} = k_{mod} \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 0,6 \frac{2,5\text{ N/mm}^2}{1,25} = 1,2\text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehdon jännityksen leviämiskerroin  $k_{c,90}$  voitaisiin olettaa ykköseksi, mutta määritetään suoraan keroimelle arvo kaavalla (4). Ensiksi täytyy tarkastaa täyttääkö CLT:n kerrosten paksuudet leviämiskertoimen kaavan käytön rajoite-ehdon  $1 \leq t_{CLT,max} / t_{CLT,min} < 2$ .

$$1 \leq 1,33 \leq 2 \quad \text{OK!}$$

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{b_{ef} l_{ef}}{b_{c,90} l_{c,90}}} = \sqrt{\frac{160,8\text{ mm} * 1100,8\text{ mm}}{60\text{ mm} * 1000\text{ mm}}} = 1,71 \leq 4,0$$

Tarkastetaan kohtisuoran puristuksen mitoitusehdon (kaava 3) voimassaolo.

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{mat} k_{c,90} f_{c,90,d}$$

$$k_{mat} k_{c,90} f_{c,90,d} = 1,4 * 1,57 * 1,2\text{ N/mm}^2 = 2,57\text{ N/mm}^2$$

$$2,09\text{ N/mm}^2 \leq 2,57\text{ N/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

Käyttöasteeksi saadaan 73 %, joten rakenne kestää siihen tulevan kuormituksen ongelmitta.

## 4. YHTEENVETO

Uusi Eurokoodi 5 tuo CLT:n mitoituksen osaksi Euroopan yhteisiä standardoituja suunnitteluperusteita. Mitoitusohjeet, joita Eurokoodissa esitetään, ovat osaltaan yleispäteviä kaikille puumateriaaleille ja osaltaan eritelty tuotekohtaisiksi. Kaikki uudessa Eurokoodiluonnoksessa esitetyt asiat liittyen CLT:hen ovat uusia, koska vanhassa Eurokoodissa CLT:stä ei ole mainintoja.

Kaikkeen mitoitukseen ei ole annettu eriteltyjä vain CLT:tä koskevia mitoitusohjeita, vaan monesti sovelletaan yleisiä mitoitusohjeita CLT:n erityisohjeet huomioon ottaen, kuten taiputus- ja leikkausmitoituksessa. Erityisohjeet koskevat useasti kuormien jakaantumista CLT-levyssä. Erillisissä mitoitusohjeissa otetaan huomioon paremmin CLT:n ominaispiirteet, joita ei ole voinut sisällyttää yleispäteviin mitoitusohjeisiin. Erilliset mitoitusohjeet koskevat muun muassa puristusta kohtisuorassa tasoa vasten sekä vahvistetun laatan leikkausta. Kaikessa mitoittamisessa täytyy huomioida, että tarkastelu on tehtävä vain nettopoikkileikkaukselle, joka määritetään kuormitustapauksen mukaan.

Eurokoodissa määritetään CLT:lle materiaaliparametrejä, kuten lujuusluokka ja siihen kuuluvat ominaislujuudet. Yhtenäiseen lujuusluokkaan kuuluvilla tuotteilla täytyy olla samat lujuusominaisuudet, mikä helpottaa niiden vertailua. Lujuusluokkia on annettu vain yksi, joka toisaalta pakottaa valmistajia tekemään kaikki tuotteet saman lujuusluokan saatavaraista. Tulevaisuudessa CLT:lle tuleekin varmaan useampi lujuusluokka, kuten on muillakin puutuotteilla.

Täysin uusissa Eurokoodin liitteissä esitetyt CLT:n erityisohjeet keskitettyjen kuormien jakaantumiseen ja eri käyttötarkoituksiin ovat tärkeitä, koska tällaisia ei ole aiemmin esitetty missään. Näissä esitetyt mitoitusohjeet voivat olla rakenteen mitoituksen kannalta olennaisia. Liitoksien osalta CLT ei ole poikkeava materiaalia, vaan mitoitus tapahtuu yleisillä puikkoliitosteorian mukaisilla kaavoilla CLT:lle annettujen liitosten etäisyydet huomioiden.

# LÄHTEET

Eurocode 5 (2022). Eurocode 5 Design of timber structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. The European Committee for Standardization. 461 p.

Mahamid, M., Barber, D., Blount, D., Bowyer, J.L., Closen, M., Fernholz, K., Mahon, M., Muszyński, L., Porte, K., Riggio, M. & Yeh, B. (2020). Cross-Laminated Timber Design: Structural Properties, Standards, and Safety, 1st Edition. McGraw-Hill Education. Saatavissa (viitattu 6.2.2023):

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260117998?implicit-login=true>

RIL 205-1-2017 (2017). Puurakenteiden suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 231 s.

RIL 205-1-2017 lisäohjeet: CrossLam Kuhmo CLT (2017). Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 9 s.

RIL 205-1-2017 lisäohjeet: Stora Enso CLT (2017). Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 5 s.

Swedish Wood (2019). The CLT handbook. Föreningen Sveriges Skogsindustrier. Stockholm. 188 p. Saatavissa: <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/CLT-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019-2022.pdf>