



Rakennesuunnittelu – CLT-rakenteiden suunnittelu 23.9.2022

Sami Pajunen

Muutos sisällöissä

- 30.9. TP1 osallistuu TP2 koulutukseen:
 - Puurakennusten vahingot, korjaaminen ja puulla korjaaminen (Henri Käpynen, Henri Salonen)
 - Lähetän zoom-linkin s-postilla ennen ko. ajankohtaa
- 7.10 TP1 koulutus jatkuu Hybridirakenteilla (A. Aspila)
- 14.10 TP1 koulutuksessa Marko Saikkonen kertoo elinkaarianalyysistä ja moderneista rakennusfysiikan suunnittelutyökaluista

CLT-rakenteiden suunnittelu

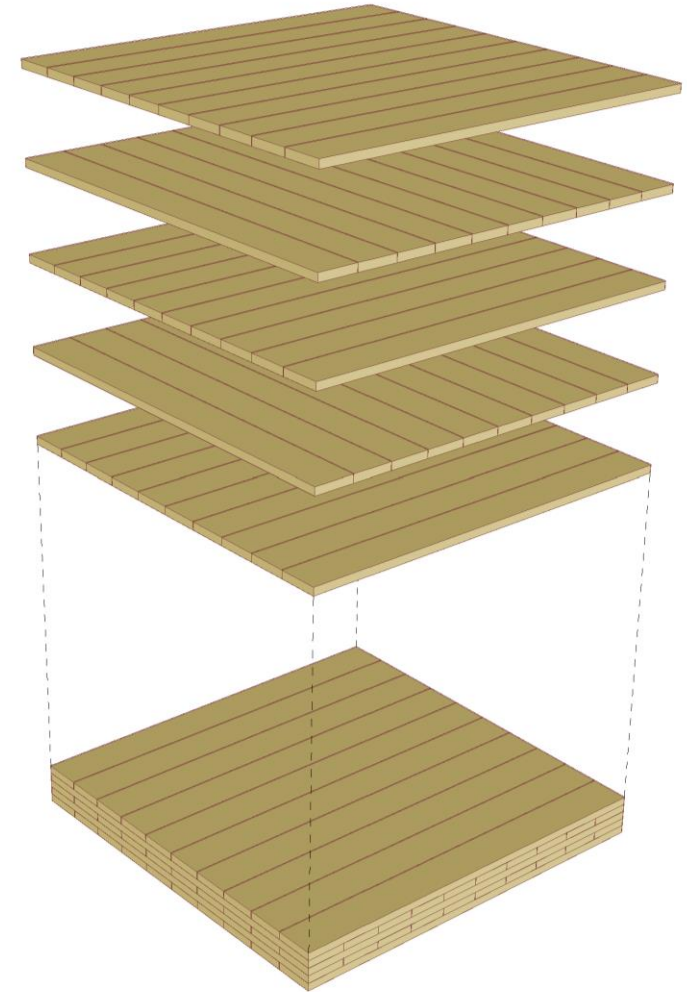
Suunnitteluohjeita:

- The CLT Handbook (Swedish Wood)
- Canadian CLT Handbook
- RIL 205-1-2017 Lisäohjeet (tuotekohtaisia)

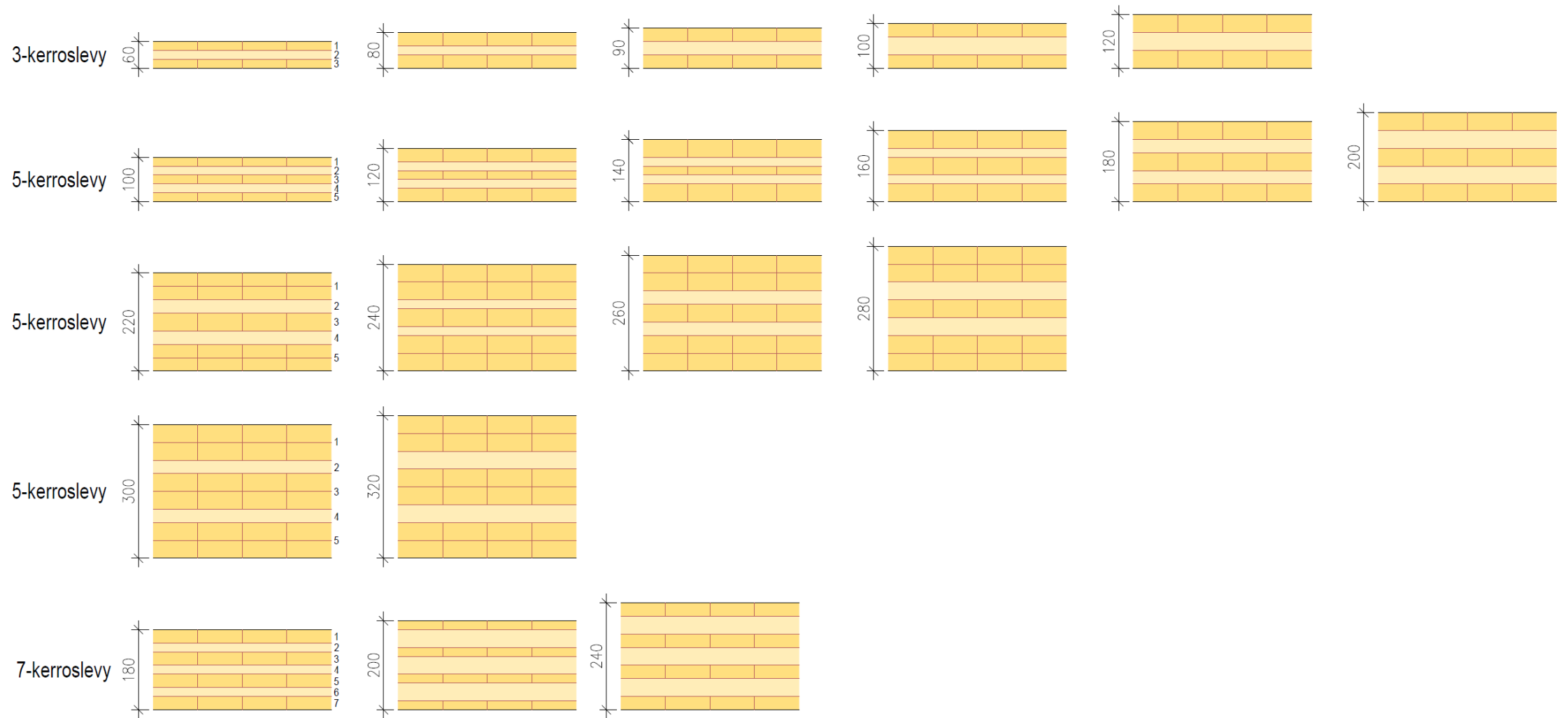


CLT (Cross Laminated Timber)

- Rakenteelliseen käyttöön tarkoitettu CLT valmistetaan havupuu-lamelleista
- Lamellit liimataan tavallisesti polyuretaanipohjaisella liimalla siten, että CLT-tuotteessa
 - Lamellien suunta vaihtuu kerroksittain
 - Samassa lamellikerroksessa on kaksi lamellikerrosta samansuuntaisesti
- Vakiolamellipaksuudet ovat 20 mm, 30 mm, 40 mm

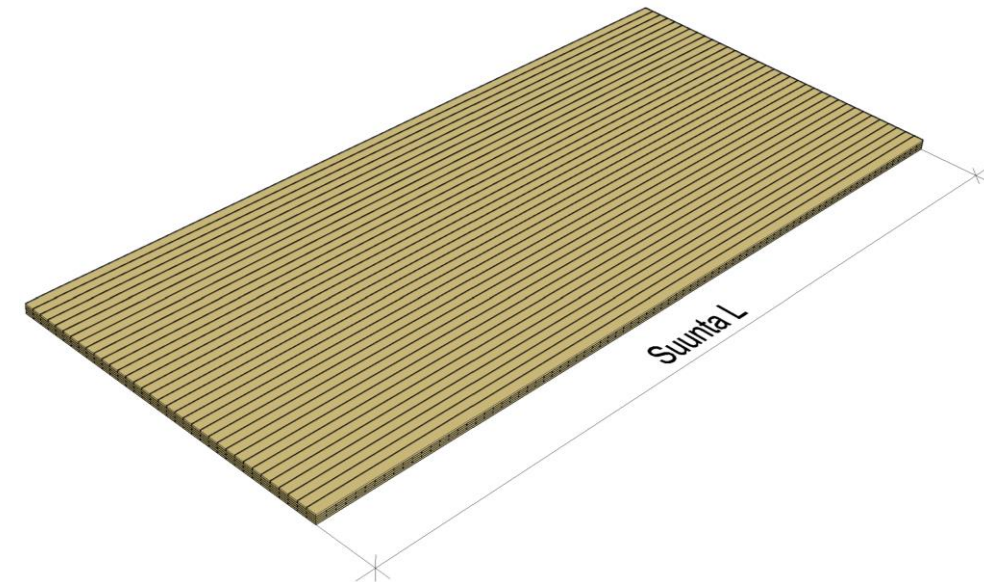
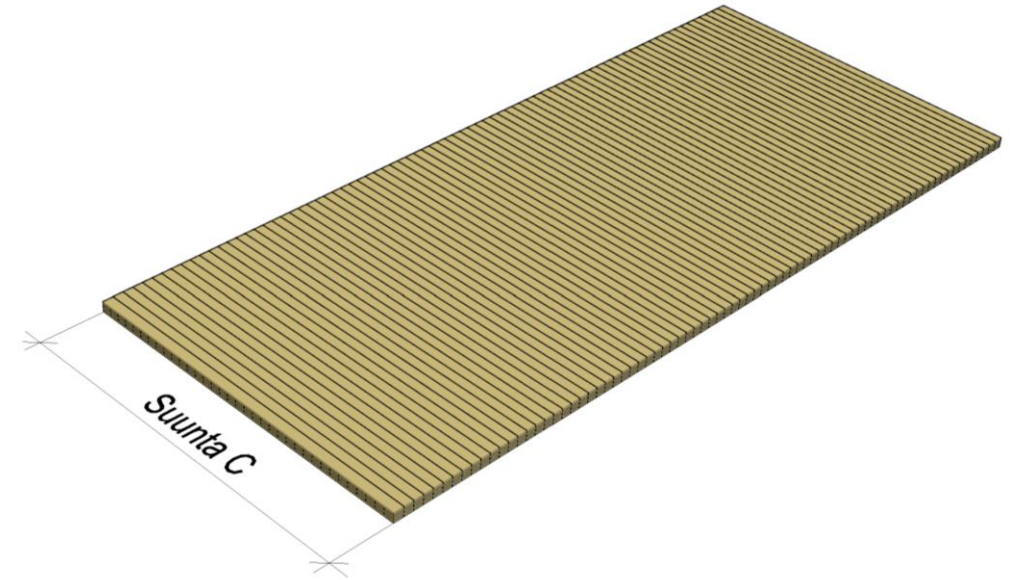


Esimerkkejä CLT:n vakiopaksumuksista



CLT-levyn pääkantosuunta

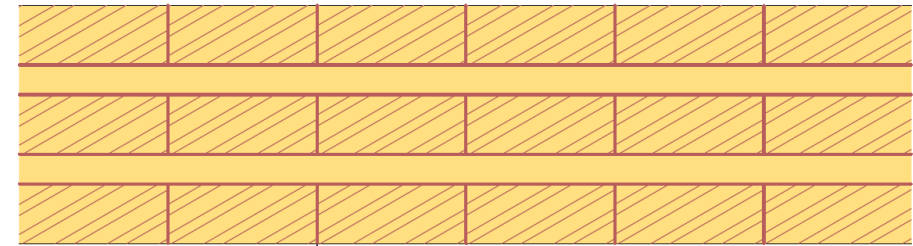
- Ilmoitetaan merkinnöillä C ja L
- C-levy on tarkoitettu pystyrakenteisiin
 - Pintalamellit kuormituksen suunnassa (nurjahduskestävyys)
- L-levy on tarkoitettu vaakarakenteisiin
 - Pintalamellit jännevälän suunnassa (taivutuskestävyys)
- C-levyä voidaan käyttää vaakarakenteissa, kun jänneväli on C-suuntaan
- L-levyä voidaan käyttää pystyrakenteissa, kun kuormitus on L-suuntaan



Syrjaliimattu ja syrjaliimaamaton CLT

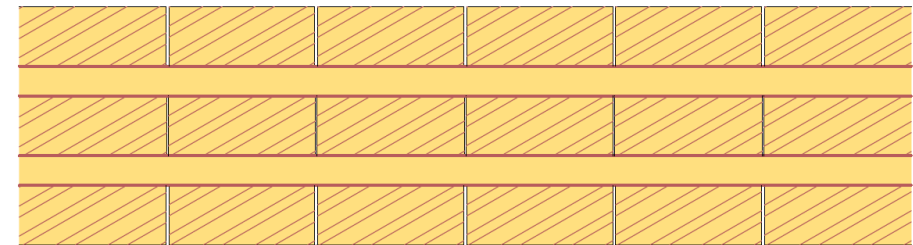
- CLT-levyä valmistetaan
 - Syrjaliimattuna
 - Syrjaliimaamattomana
- Syrjaliimaus on CLT-levyn ulkonäköön liittyvä seikka
 - Syrjaliimaus estää lamellien väliin mahdollisesti syntyvät raot (kosteuseläminen)
- Syrjaliimauksia ei yleensä huomioida lujuusmitoituksessa
 - Leikkausjännitystarkasteluissa syrjaliimaus voidaan huomioida

Syrjaliimattu CLT-levy



Lamellien syrjät liimattu

Syrjaliimaamaton CLT-levy



Lamellien syrjät liimaamatta

Syrjäliimattu ja syrjäliimaamaton CLT

- Syrjäliimatussa CLT:ssä saattaa esiintyä pintalamellien halkeilua lamellien kuivumisen seurauksena
- Syrjäliimaamattomassa CLT:ssä lamellien kuivumisen aiheuttama kutistuma näkyy lamellien välisissä saumoissa
 - Myös lamelleissa saattaa esiintyä hiushalkeamia
- Halkeamat eivät vaikuta lujuuteen

Syrjäliimattu CLT

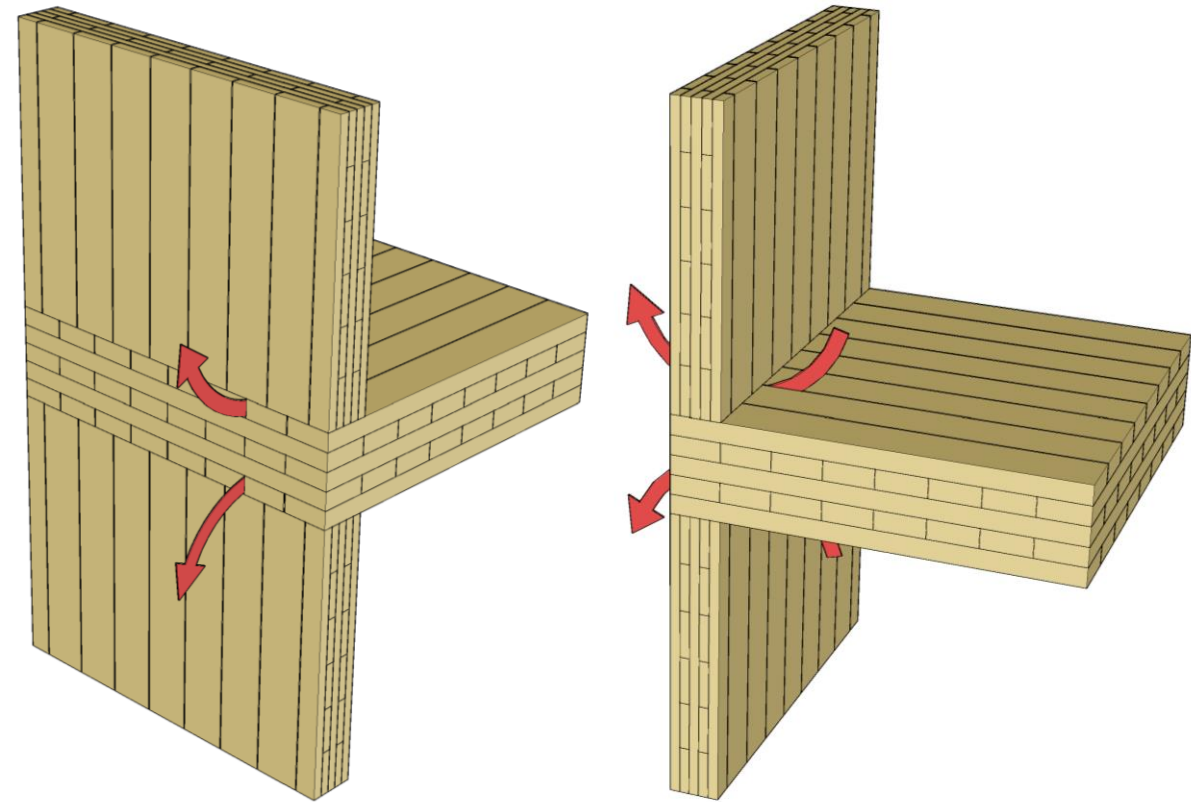


Syrjäliimaamaton CLT



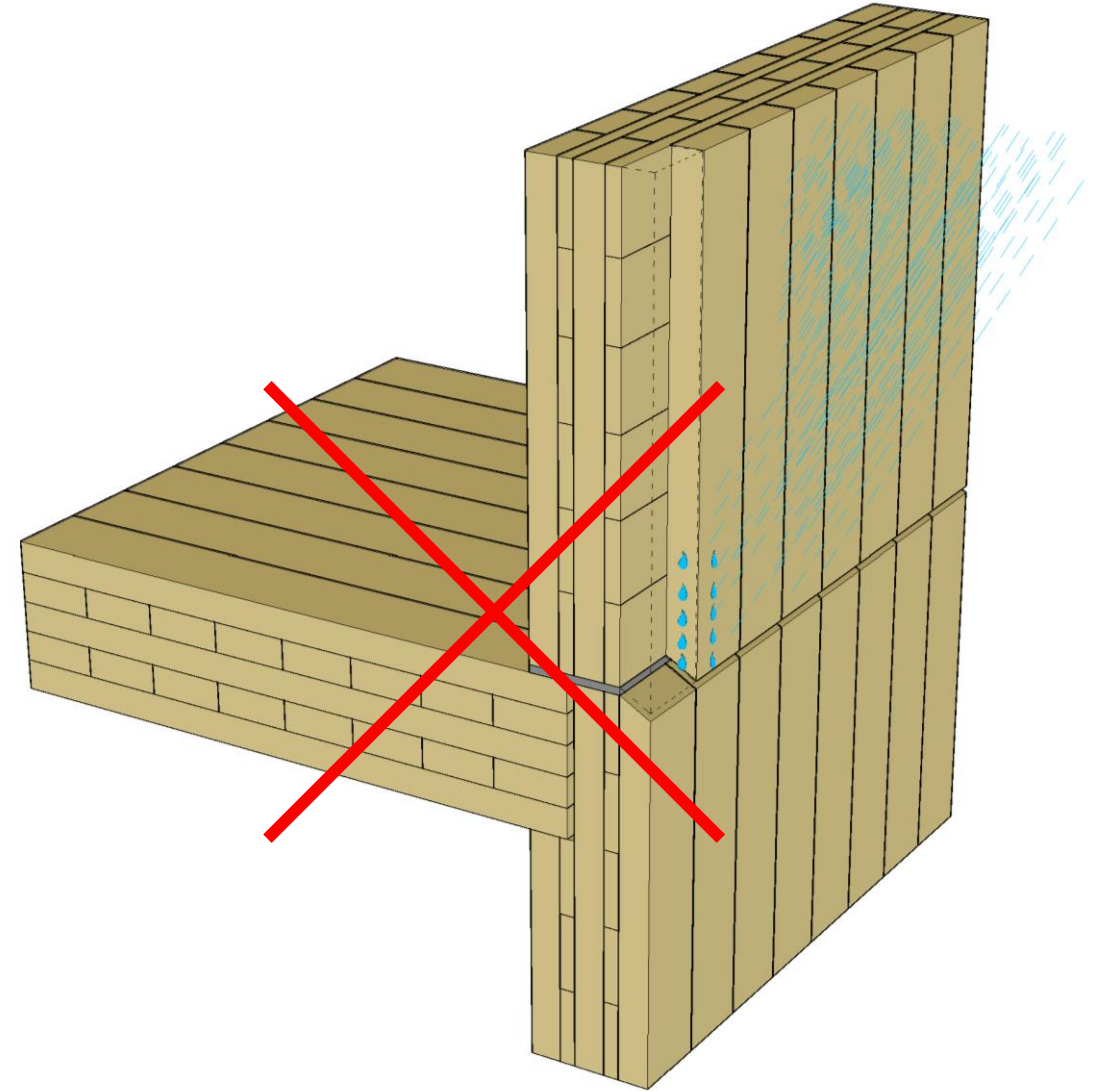
Lamellien halkeamat ja raot

- CLT-levyn yhteydessä liittymien ilmatiiviydessä tulee huomioida pintalamellien väliin mahdollisesti syntyvät raot ja mahdolliset pintalamellien halkeamat
- Erityisesti syrjäliimaamattoman CLT-levyn yhteydessä tulee tarkastella lamellien väliin mahdollisesti syntyviä rakoja
- Erillisen ilmansulkukerroksen käyttö on suositeltavaa



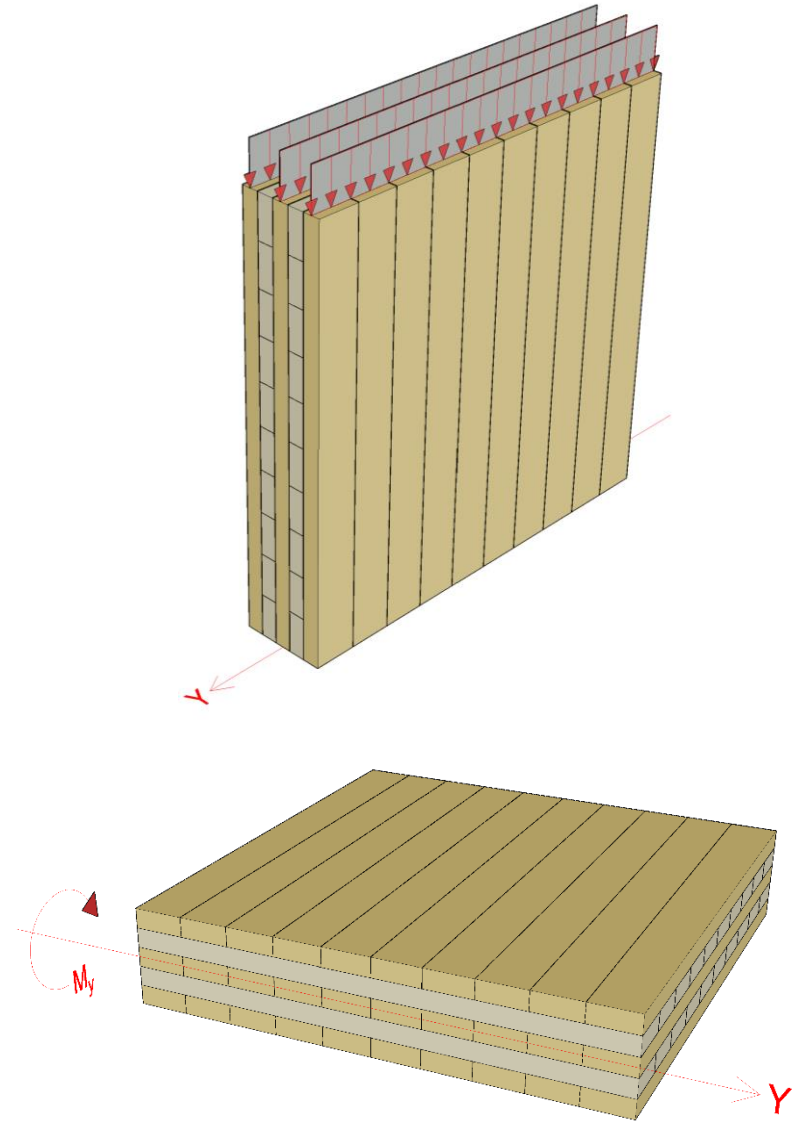
CLT-levyn käyttöluokka

- CLT-levy on tarkoitettu käytettäväksi käyttöluokissa 1 ja 2
 - Sallitut käyttöluokat esitetään CLT:n dokumenteissa (esim. ETA)
- CLT-levyn käyttö julkisivuna (käyttöluokka 3) sisältää riskejä
 - Elementtisaumojen vesitiiviys haasteellista toteuttaa
 - Vesi saattaa valua pystylamellien rakojen/halkeamien kautta liittymä-deteljin sisään



CLT-levyn toimivat lamellit

- Pystyrakenteessa pystysuuntaista kuormitusta vastaanottavat vain kuormituksen suuntaiset lamellit
- Vaakarakenteessa jännevälin suuntaista taivutusta vastaanottavat vain jännevälin suuntaiset lamellit
- Valmistajasta riippuen levyn lamellien lujuusluokka on
 - Sama kaikissa lamellikerroksissa
 - Eri pinta- ja ydinlamellikerroksissa



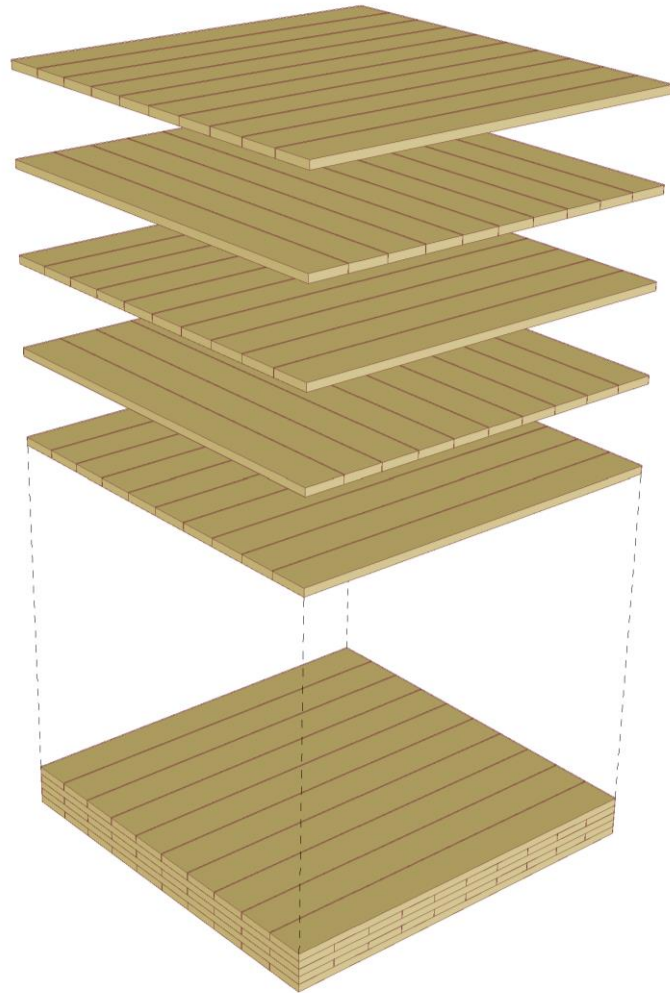
CLT-levyn pinnan laatuluokka

- CLT-levyvalmistajilla on omat laatuluokitukset levyn pinnalla
 - Laatuluokkien määrittelyt vaihtelevat valmistajakohtaisesti
- Tyypillisiä CLT-pinnan laatuluokkia
 - Ei-näkyvä laatu
 - Näkyvä teollinen laatu
 - Näkyvä laatu
- Joiltakin valmistajilta on saatavilla myös CLT-levyä, jossa pintalamellit ovat jalopuuta



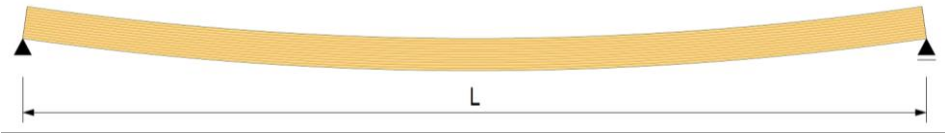
Kuva: Tero Lahtela

CLT-rakenteiden suunnittelu



- Ristiinliimatut kerrokset →
 - Rakenne voidaan suunnitella joko laataksi tai palkiksi
 - Taivutus- ja leikkausjännitykset jakautuvat eri tavalla kuin tavallisissa puurakenteissa
 - Kuormituksesta ja tuennoista riippuen vain tietyt kerrokset kantavat kuormaa
 - Poikkileikkaussuureiden laskenta eroaa tavanomaisesta

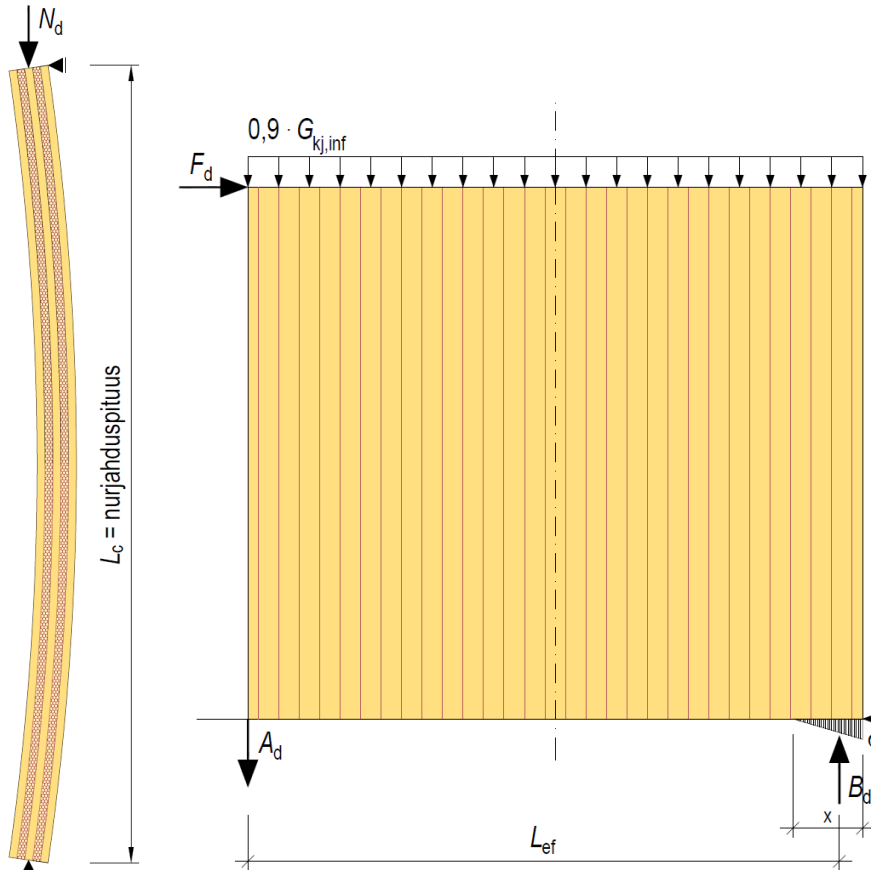
Mitoitus käyttökohteen mukaan



Lattia

- Yhteen suuntaan kantava palkki tai kahteen suuntaan kantava laatta
 - Palkille ”käsinelaskukaavoja”
 - Laatalle rasitukset usein FEM-ohjelmalla ja jännitysmitoitus ”käsini”
- Perussääntönä: Reunimmaisheet lamellit ovat pidemmän jännevälin suuntaisesti

Mitoitus käyttökohteen mukaan



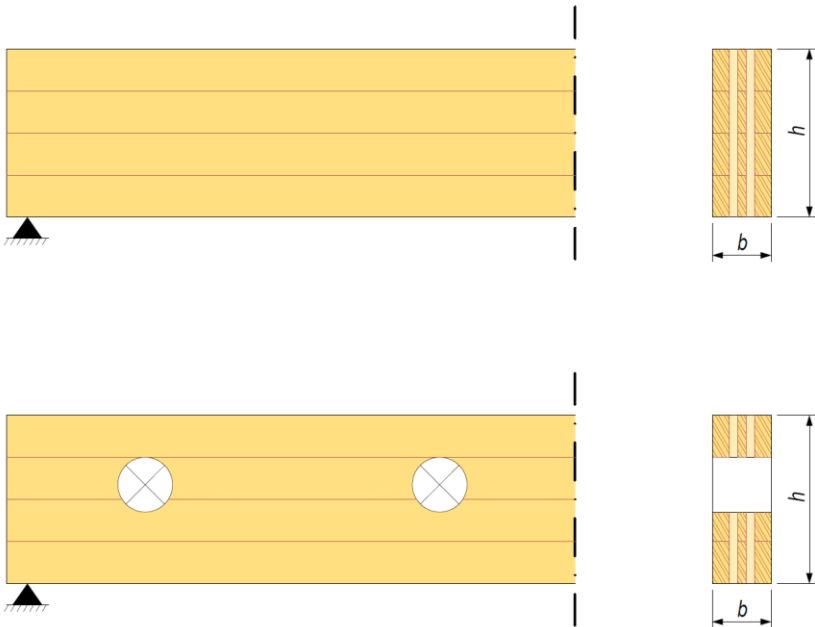
Seinä

- Pystykuormia kantava rakenne
- Jäykistävä seinä (leikkausvoimaa kantava rakenne)
- Taivutusta myös mukana?
 - Vaakakuorma
 - Alkukäyryys / epäkeskisyys
- Perussääntönä: Uloimmat lamellit pystysuoraan.

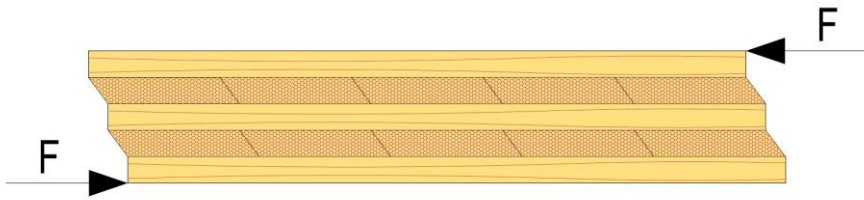
Mitoitus käyttökohteen mukaan

”Ovipalkki” (Lintel, beam)

- Vaakasuuntaiset lamellit ottavat vastaan taivutusmomentin
- Leikkausvoimasta aiheutuva leikkausjännitys jakauma voi vaurioittaa rakennetta usealla eri vauriomuodolla
- Pystysuorat lamellit parantavat tukipainekestävyyttä

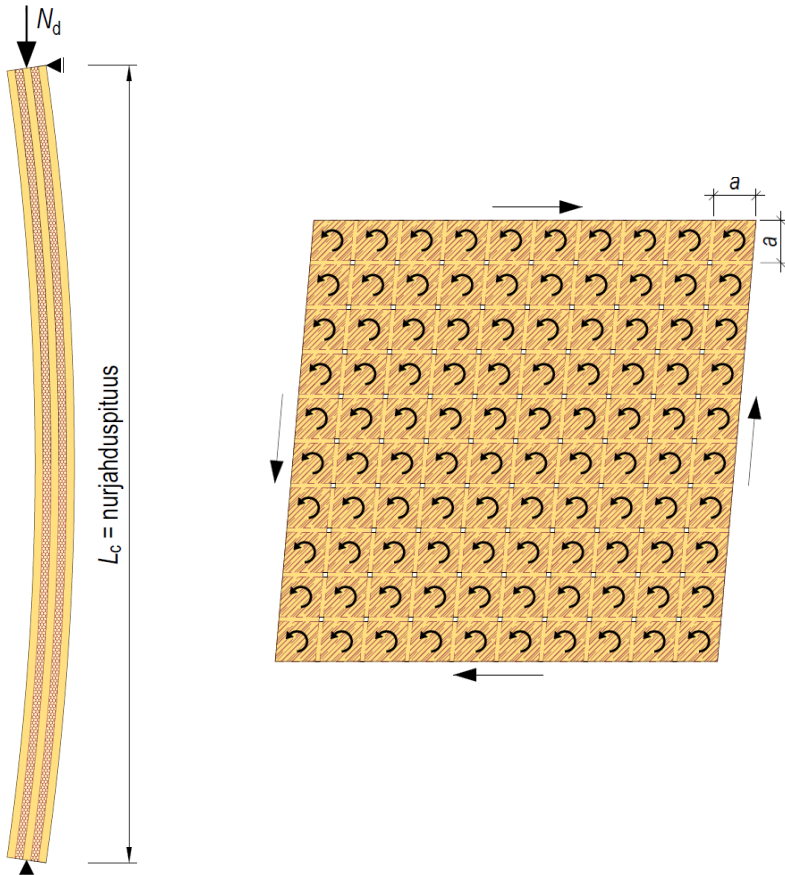


Murtorajatila vs. käyttörajatila, lattiat



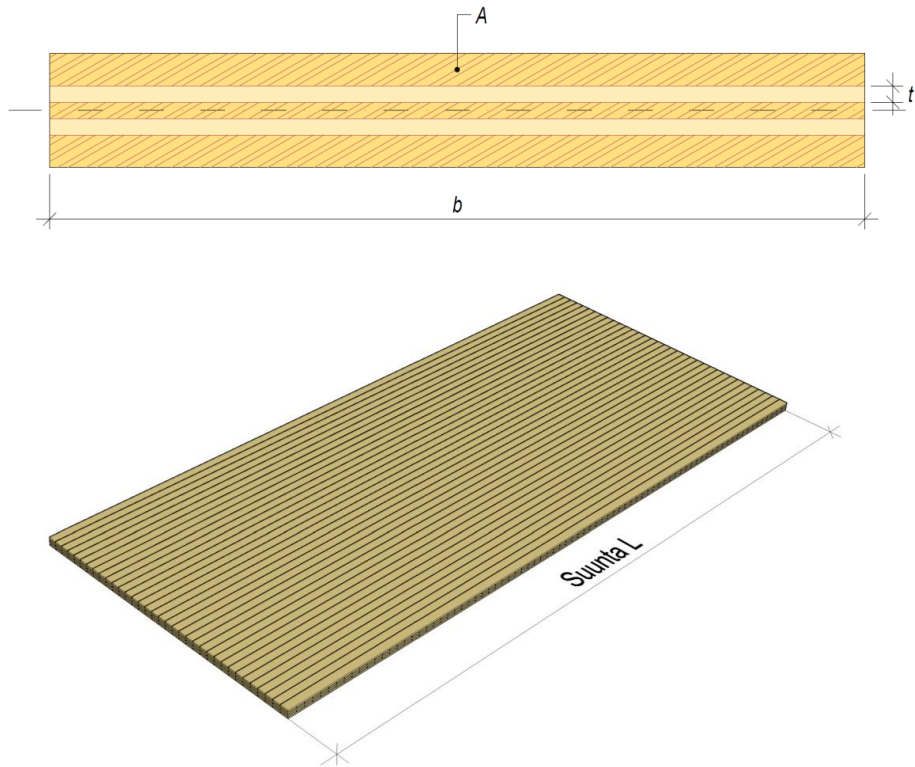
- Murtorajatilassa mitoittavaksi tulee usein ns. ”rolling shear” eli leikkauslujuus syitä vastaan kohtisuorassa tasossa
- Käyttörajatilassa mitoittavana kriteerinä on usein lattian taipuma tai värähtely

Murtorajatila vs. käyttörajatila, seinät



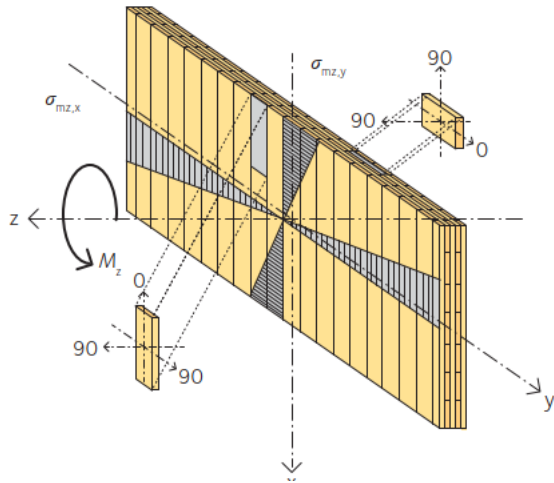
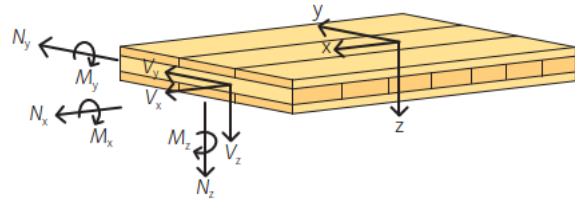
- Murtorajatilassa mitoitettavat tekijät:
 - Aksiaalisesti kuormitettu seinä: reunimmaisten lamellien veto- tai puristuslujuus
 - Jäykistysseinä: lapeliimauksen leikkauskestävyys
- Käyttörajatilassa
 - Jäykistysseinän vaakasiirtymä

CLT-rakenteen mitoitus palkkiteorialla



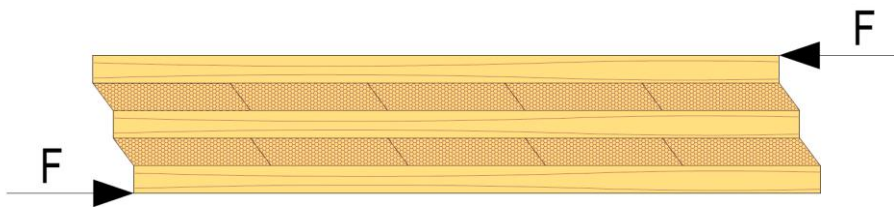
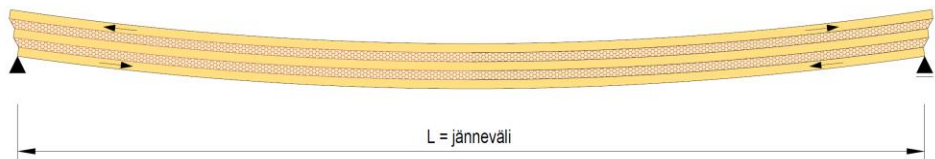
- Mikäli taivutettu CLT-rakenne on tuettu kahdelta vastakkaiselta reunalta, mitoitus voidaan perustaa palkkiteoriaan
- Palkkiteorian pitää ottaa huomioon, että poikkileikkaus koostuu osioista, joilla on eri kimmokertoimet
- Tyypillisesti poikkileikkaus on symmetrinen, jolloin kaavat yksinkertaistuvat

CLT-rakenteen mitoitus palkkiteorialla



- Palkkiteorialla lasketaan poikkileikkaukselle:
 - Neliömomentti I
 - Taivutusvastus W
 - Osan staattinen momentti $S(y)$
 - Vääntöneliömomentti I_v ja vääntövastus W_v
 - Neliösäde i
- Lapetaivutuksessa ja ovipalkkina termit lasketaan luonnollisesti eri akselien suhteen

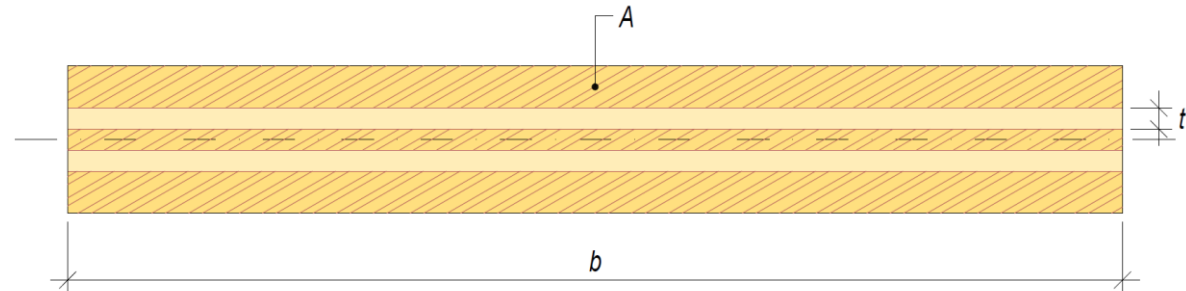
CLT-rakenteen mitoitus palkkiteorialla



- ”Tavallinen” palkkiteoria perustuu oletukseen, että poikkileikkaus säilyy tasona taivutettunakin.
- Alhaisen rolling shear –leikkausjäykkyyden vuoksi tämä oletus ei CLT:ssä täyty, joten palkkiteorian neliömomentin lauseketta pitää korjata esimerkiksi Gamma-menetelmällä
- Gamma-menetelmässä pitkittäisten lamellien Steinerin termiä pienennetään poikittaisten lamellien liukuman vuoksi kertoimella γ

CLT:n tehollinen jäyhyysmomentti

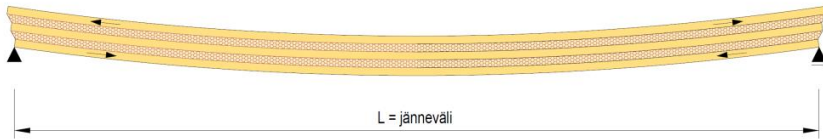
- Taivutetussa CLT-levyssä poikkileikkauksen poikittaiset lamellikerrokset aiheuttavat liukumaa lamellikerrosten välille
 - Taivutusjäykkyys alenee (EI_{ef})
- Mitä paksumpi poikkileikkauksen poikittainen lamellikerros on, sitä enemmän se alentaa CLT-levyn taivutusjäykkyyttä
- Liukuma otetaan huomioon γ -kertoimella



$$\gamma = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_{0,mean} A}{L^2} \frac{t}{G_{R,mean} b} \right)}$$

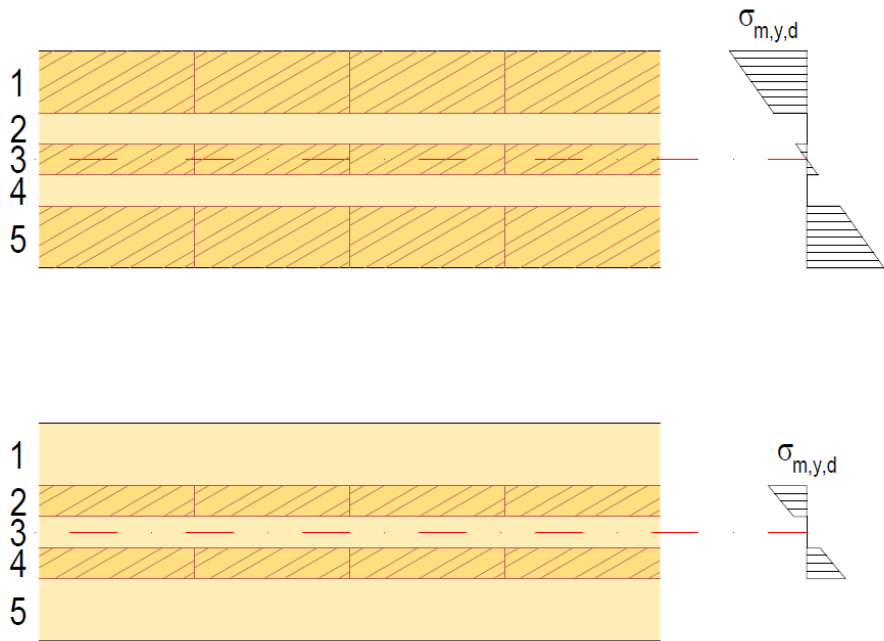
| | |
|--------------|--|
| $E_{0,mean}$ | lamellin kimmomoduuli |
| A | lamellikerroksen pinta-ala tarkasteltavalla poikkileikkauksen leveydellä |
| L | CLT-levyn jänneväli |
| t | poikittaisen lamellikerroksen paksuus |
| $G_{R,mean}$ | poikittaisen lamellikerroksen liukumoduuli |
| b | tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys |

CLT-rakenteen mitoitus palkkiteorialla



- Käyttörajatilamitoituksessa palkin taipumia laskettaessa voi käyttää joko
 - Gamma-menetelmää (max. 5 kerrosta)
 - Timoshenkon palkkiteoriaa (leikkauskorjauskertoimia on taulukoitu valmiiksi)
 - Shear Analogy –menetelmää (toiselta nimeltä Kreuzingerin menetelmä)
 - Kerrospalkkiteoriaa (kaikista yleisin, tarkkuus hyvä monikerroksisessa ja jopa epäsymmetrisessä rakenteessa)

CLT-rakenteen mitoitus palkkiteorialla



- Murtorajatilassa kestävyystarkastelut tehdään lamelleittain vertaamalla laskettuja jännityksiä mitoituslujuuksiin

- Esimerkiksi:
$$\frac{M_{y,d}}{W_{y,d}} \leq f_{m,d}$$

- Erityisesti on huomattavaa, missä lamelleissa ko. jännityskomponentti esiintyy!

- HUOM! Systemitason vaikutus otetaan huomioon k_{sys} -kertoimella

Lapetaivutetun CLT:n murtotapoja

Taivutusmurto



Poikittaisten lamellien leikkausmurto ("Rolling shear")



Pituussuuntaisten lamellien leikkausmurto

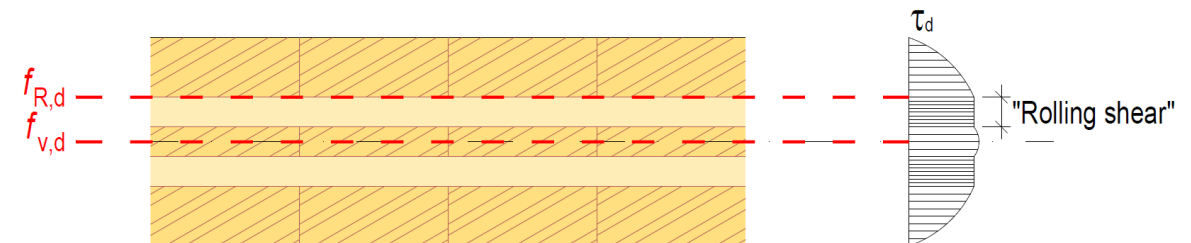
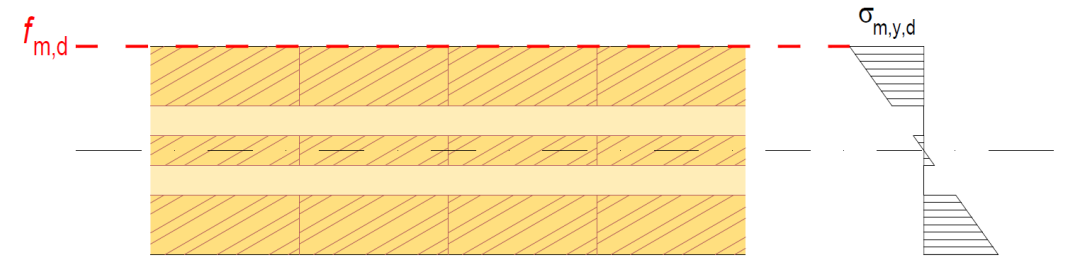


Pituus- ja poikittaissuuntaisten lamellien leikkausmurto



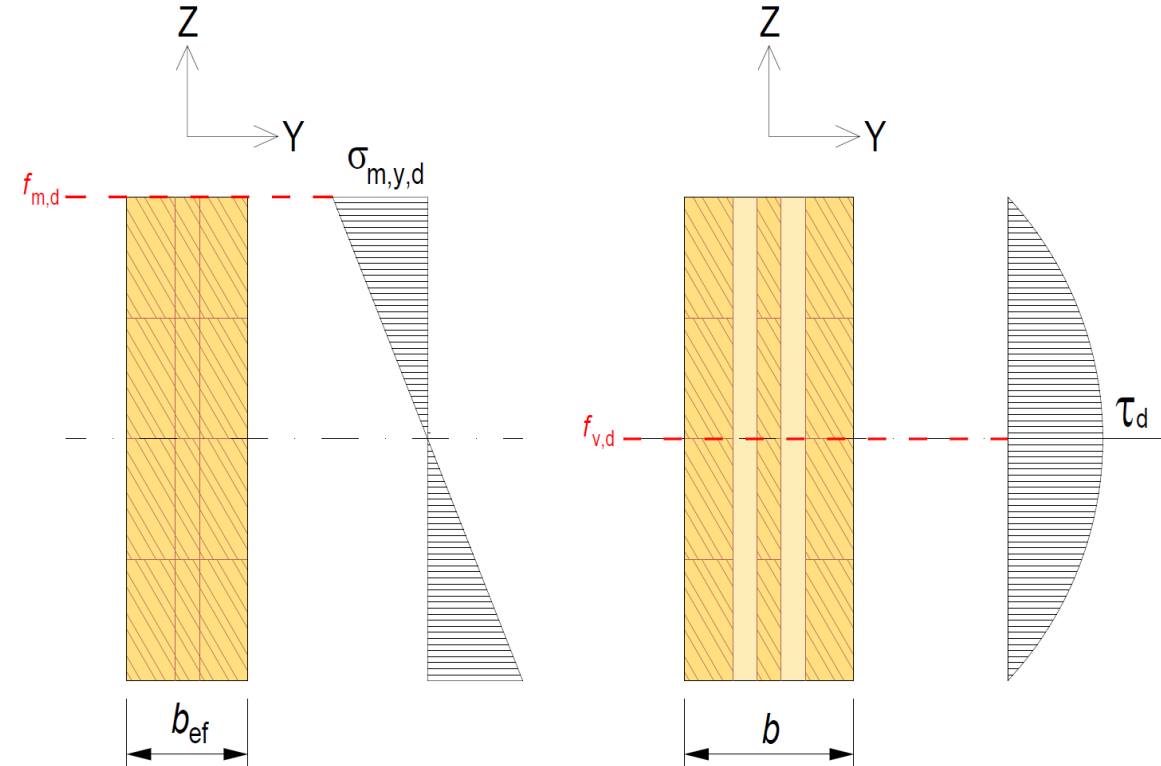
Jännitystarkastelut lapetaivutuksessa

- Taivutuskestävyys
 - Tehollinen taivutusvastus W_{ef}
 - Lamellin taivutusjännitystarkastelu
 $\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,d}$
- Leikkauskestävyys "Rolling shear"
 - Tehollinen staattinen momentti S_{ef}
 - Lamellin leikkausjännitystarkastelu
 $\tau_d \leq f_{R,d}$
- Leikkauskestävyys
 - Tehollinen staattinen momentti S_{ef}
 - Lamellin leikkausjännitystarkastelu
 $\tau_d \leq f_{v,d}$



Jännitystarkastelut ovipalkissa

- Taivutuskestävyys
 - Tehollinen leveys b_{ef} (vain pitkittäiset lamellit huomioidaan)
 - Lamellin taivutusjännitystarkastelu $\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,d}$
- Leikkauskestävyys
 - Koko poikkileikkaus A
 - Lamellin leikkausjännitystarkastelu $\tau_d \leq f_{v,d}$
 - Tarkemmin: Canadian CLT Handbook Ch. 3.8.2!



Jännitystarkastelut CLT-seinässä

- Taivutuskestävyys

- $\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,d}$

- Nurjahduskestävyys

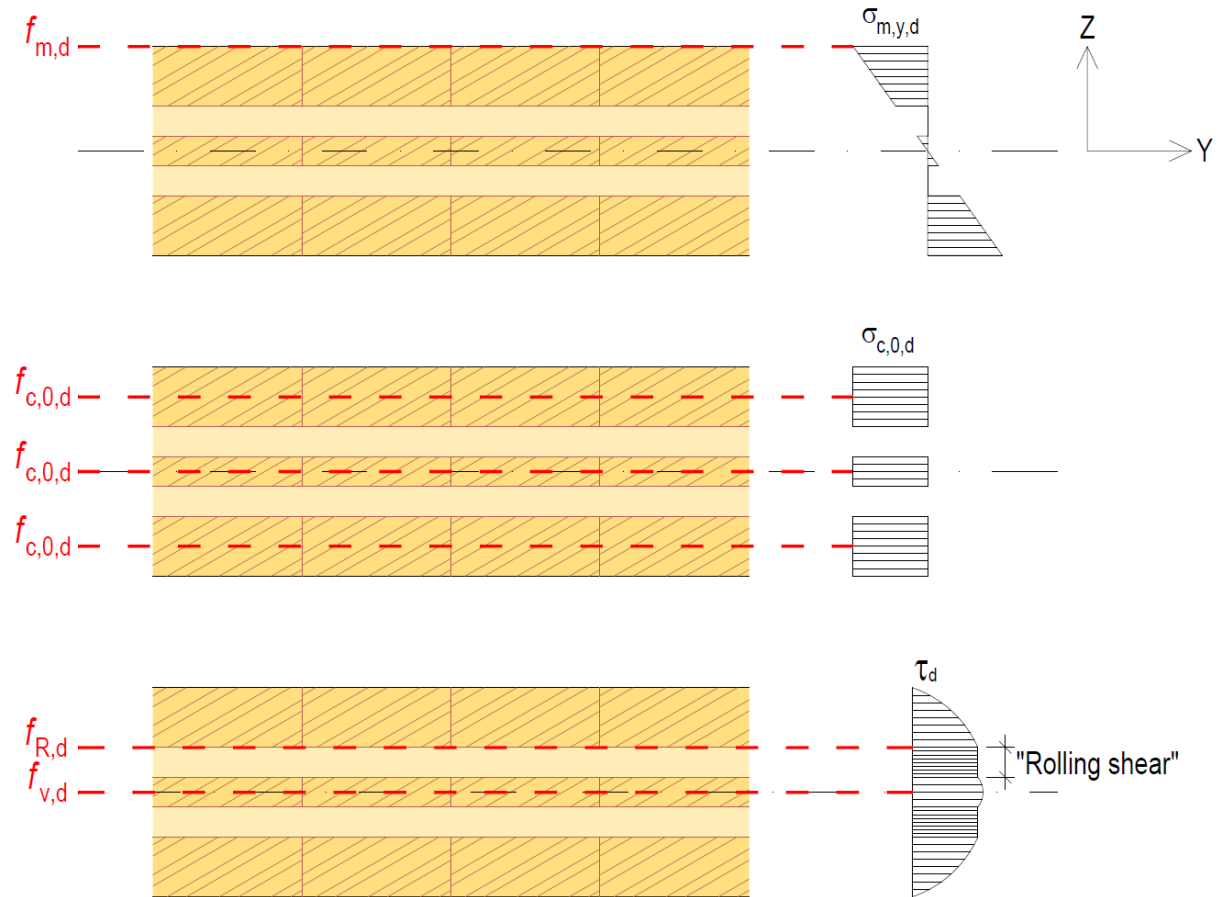
- $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$

- Leikkauskestävyys "Rolling shear"

- $\tau_d \leq f_{R,d}$

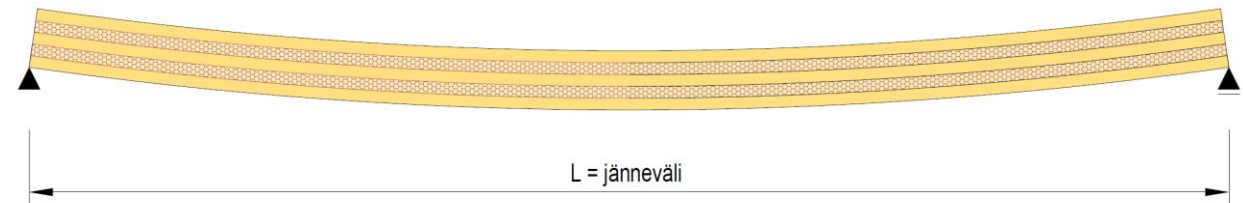
- Leikkauskestävyys

- $\tau_d \leq f_{V,d}$



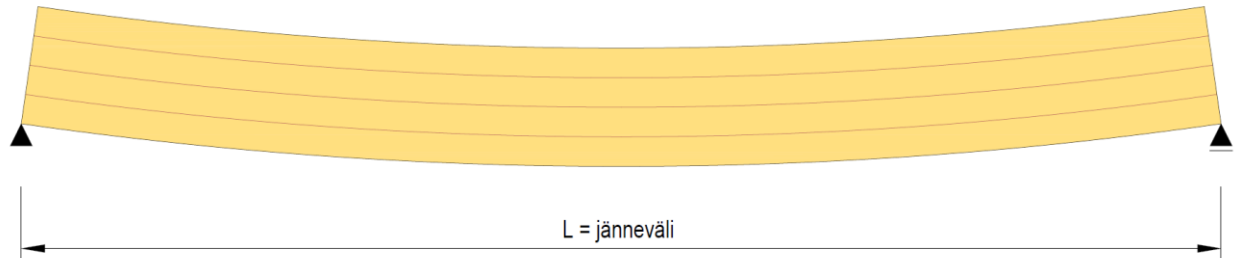
Taipuma CLT:n lapetaivutuksessa

- Taivutusmomentin aiheuttama taipuma määritetään käyttämällä poikkileikkauksen tehollista taivutusjäykkyyttä EI_{ef}
- Kimmomoduulina käytetään lamellin syysuuntaista arvoa
- Viruma otetaan huomioon virumaluvun k_{def} avulla
- Tarvittaessa huomioidaan leikkausvoiman aiheuttama taipuma (Timoshenkon palkkiteoria)



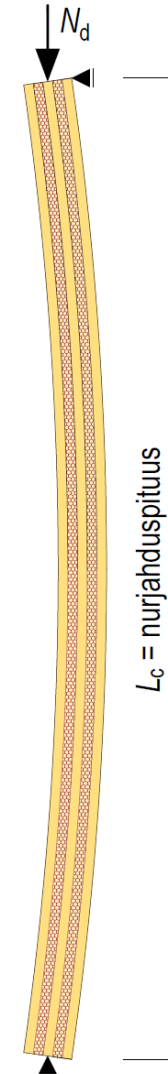
Ovipalkin taipuma

- Taivutusmomentin aiheuttama taipuma määritetään teholliselle poikkileikkaukselle (b_{ef})
- Kimmomoduulina käytetään lamellin syysuuntaista arvoa
- Viruma otetaan huomioon virumaluvun k_{def} avulla
- Tarvittaessa huomioidaan leikkausvoiman aiheuttama taipuma (Timoshenkon palkkiteoria)



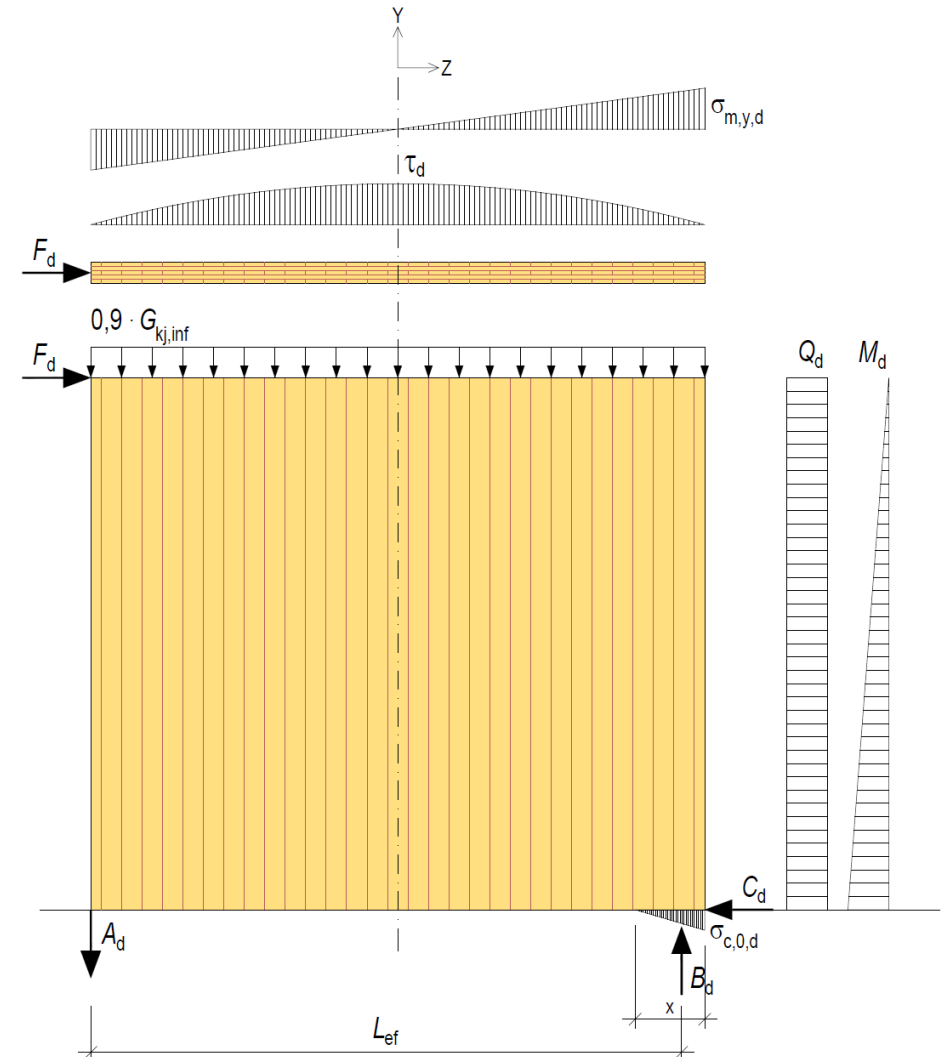
Taipuma CLT-seinässä

- Taivutusmomentin aiheuttama taipuma määritetään käyttämällä poikkileikkauksen tehollista taivutusjäykkyyttä EI_{ef}
- Kimmomoduulina käytetään lamellin syysuuntaista arvoa
- Viruma otetaan huomioon virumaluvun k_{def} avulla
- Tarvittaessa huomioidaan leikkausvoiman aiheuttama taipuma (Timoshenkon palkkiteoria)



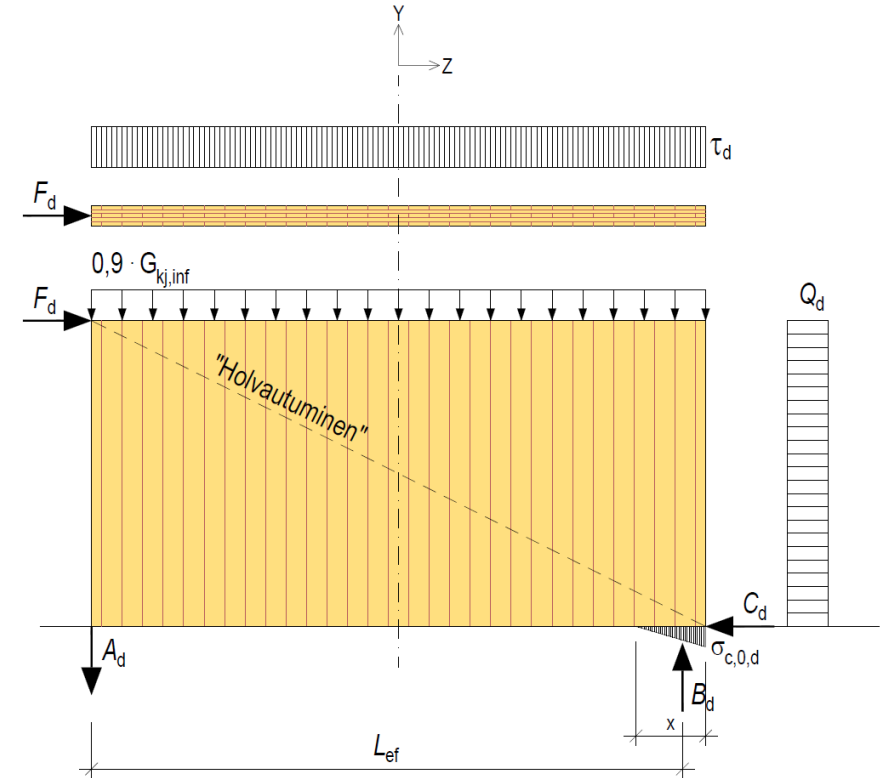
Jäykistävän CLT-seinän toiminta

- Jäykistävä CLT-seinä toimii tavallisesti ulokepalkkina, jossa on leikkausta ja taivutusta
- Jäykistävässä seinässä yleensä leikkauskestävyys ja vaakasiirtymä ovat mitoittavia (pois lukien kapeat jäykistävät seinät)
- Seinän päihin syntyy pistemäiset tukireaktio A_d ja B_d
 - Puristuspuolen tukireaktio vastaanotetaan CLT-levyn pystysuuntaisilla lamellikerroksilla



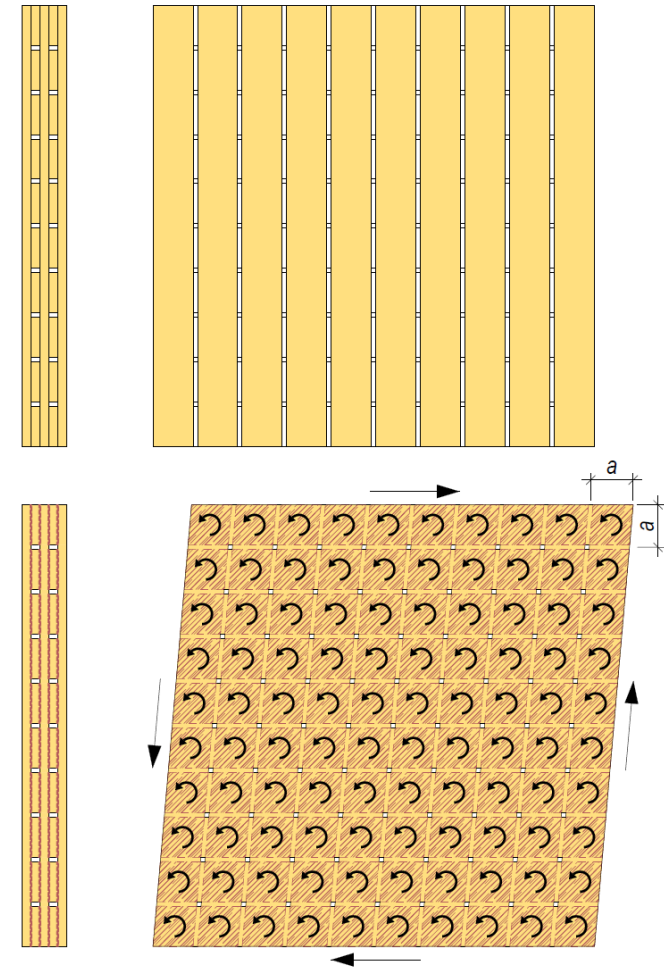
Jäykistävän CLT-seinän toiminta

- Jäykistävän CLT-seinän pituuden ja korkeuden suhteesta riippuen seinään saattaa syntyä vain pelkkää leikkausta
- CLT-seinän leikkausvoimakestävyyden mitoitus tehdään kuitenkin samalla tavalla kuin ulokepalkkina toimivassa seinässä



Jäykistävän CLT-seinän toiminta

- CLT-levyn leikkauskestävyys perustuu pääasiassa lamellikerrosten välisen lapeliimauksen vääntöleikkauskestävyyteen
 - Lamellien välistä syrjäliimausta ei huomioida leikkauskestävyydessä
- Vääntöleikkauskestävyys tarkastellaan päällekkäisten lamellien kosketuspinnan ($a \times a$) perusteella
- Myös vauriomuodot I ja II Pitää tarkistaa (Canadian CLT Handbook 3.8.2)
- Joillakin CLT-valmistajilla on valmiita leikkauslujuusarvoja vakio-poikkileikkauksille



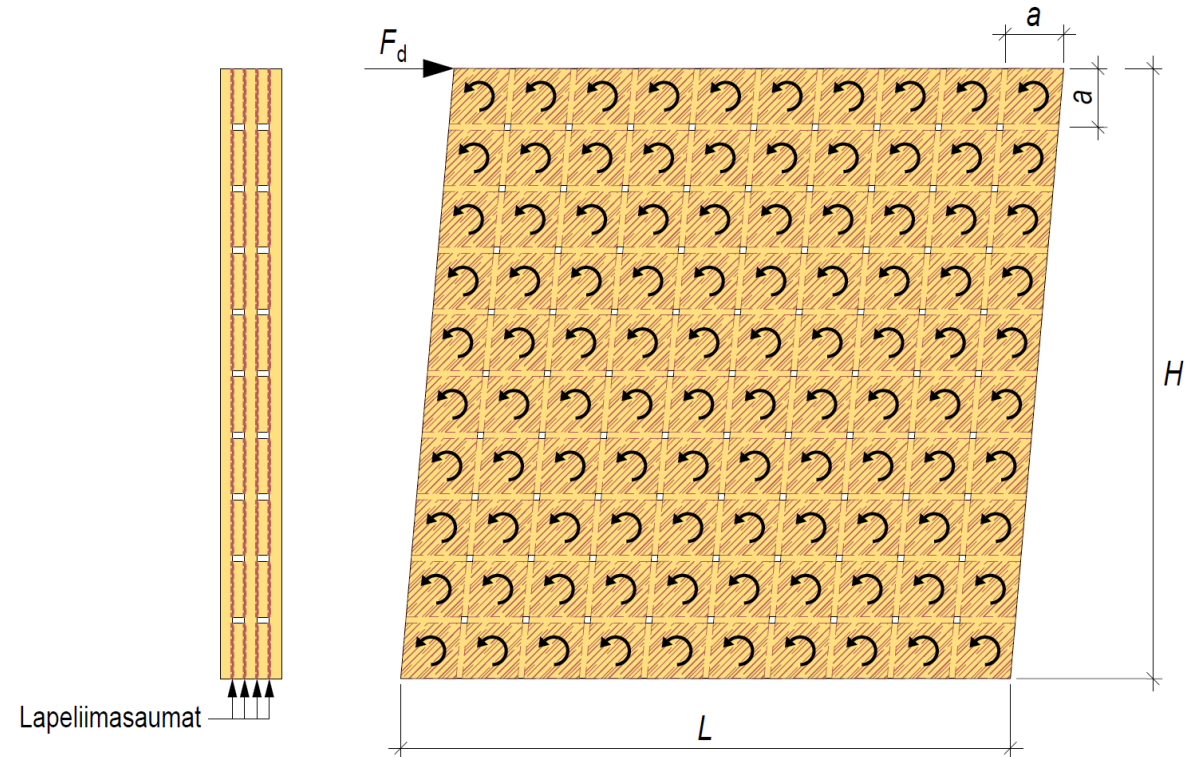
Jäykistävän CLT-seinän toiminta

$$\tau_{t,d} = \frac{aM_{\tau,d}}{2I_p} \leq f_{tv,d}$$

$$M_{\tau,d} = \frac{F_d H}{\sum n}$$

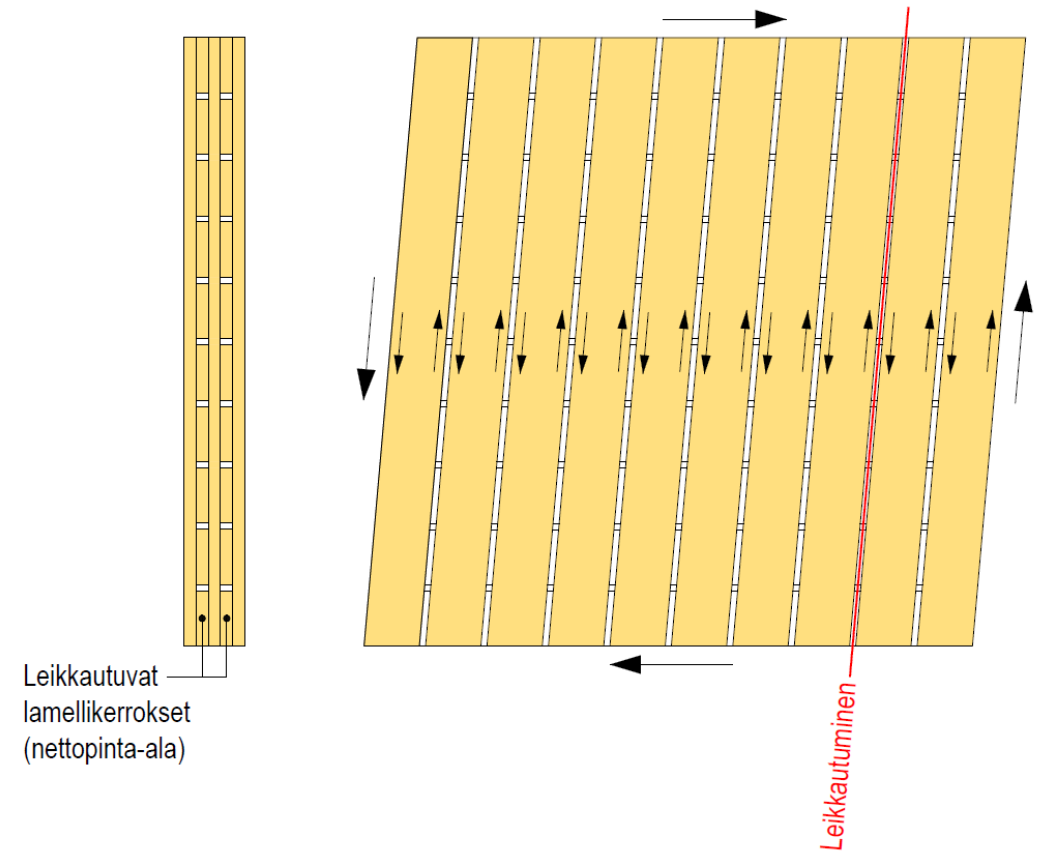
$$I_p = \frac{a^4}{6}$$

- $\tau_{t,d}$ lapeliitoksen vääntöleikkausjännitys
- a lapeliitoksen sivumitta
- $M_{\tau,d}$ lapeliitoksen vääntömomentti
- I_p lapeliitoksen polaarinen jäyhyysmomentti
- $f_{tv,d}$ vääntöleikkauslujuus (CLT-valmistajalta)
- F_d jäykistävään seinään vaikuttava voima
- H jäykistävän seinän korkeus
- L jäykistävän seinän pituus
- n lapeliitosten määrä jäykistävässä seinässä



Jäykistävän CLT-seinän toiminta

- CLT-levy voi leikkautua myös paneelileikkautumalla, kuten rakennuslevy
- CLT-levyn leikkautuva pinta-ala määräytyy poikkileikkauksen nettopinta-alaan perusteella
- Joillakin CLT-valmistajilla on valmiita leikkauslujuusarvoja vakio-poikkileikkauksille

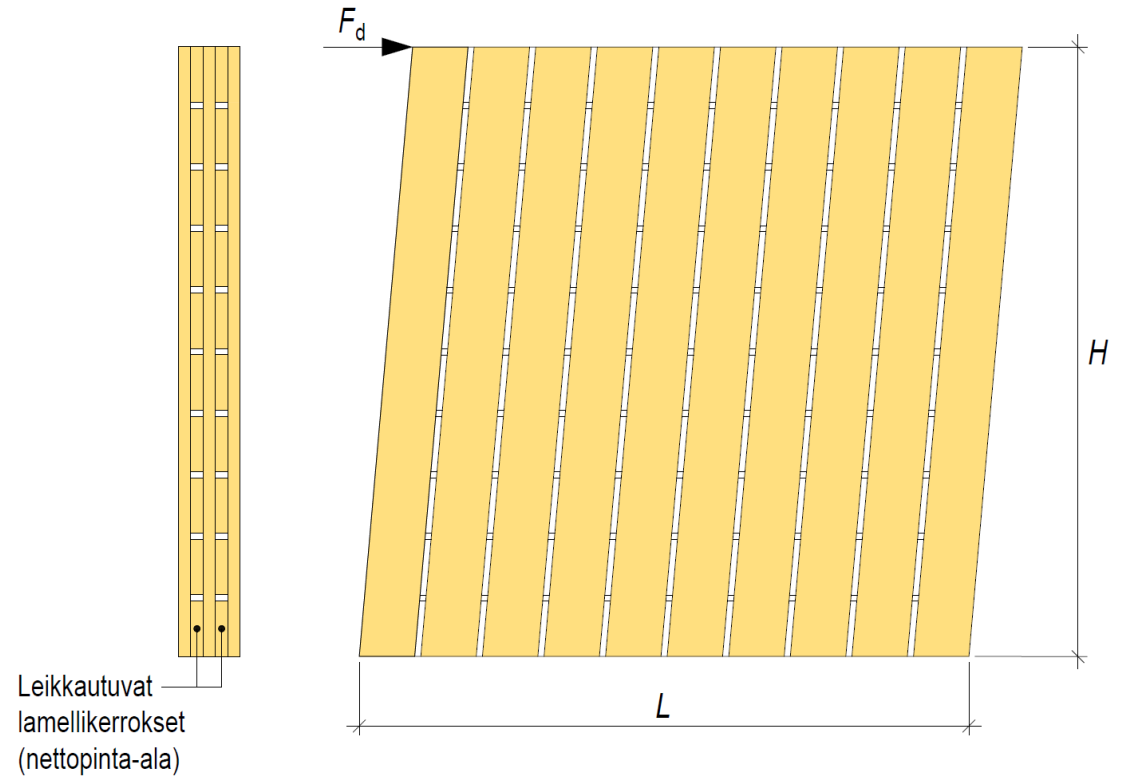


Jäykistävän CLT-seinän toiminta

$$\tau_d = \frac{V_d}{A_{netto}} \leq f_{v,net,d}$$

$$V_d = \frac{F_d}{L}$$

- τ_d leikkajännitys
- V_d leikkausvoima seinässä pituusyksikköä kohden
- A_{netto} leikkautuvien lamellien pinta-ala
- $f_{v,net,d}$ paneelileikkauslujuus (CLT-valmistajalta)
- F_d jäykistävään seinään vaikuttava voima
- L jäykistävän seinän pituus



Jäykistävän CLT-seinän toiminta

- Jäykistävän CLT-seinän vaakasiirtymä voidaan määrittää leikkausjäykkyyden perusteella

$$C_v = \frac{1}{\frac{H}{LtG_{mean}}} \quad u_{inst} = \frac{Q_k}{C_v}$$

C_v leikkausjäykkyys

H jäykistävän seinän korkeus

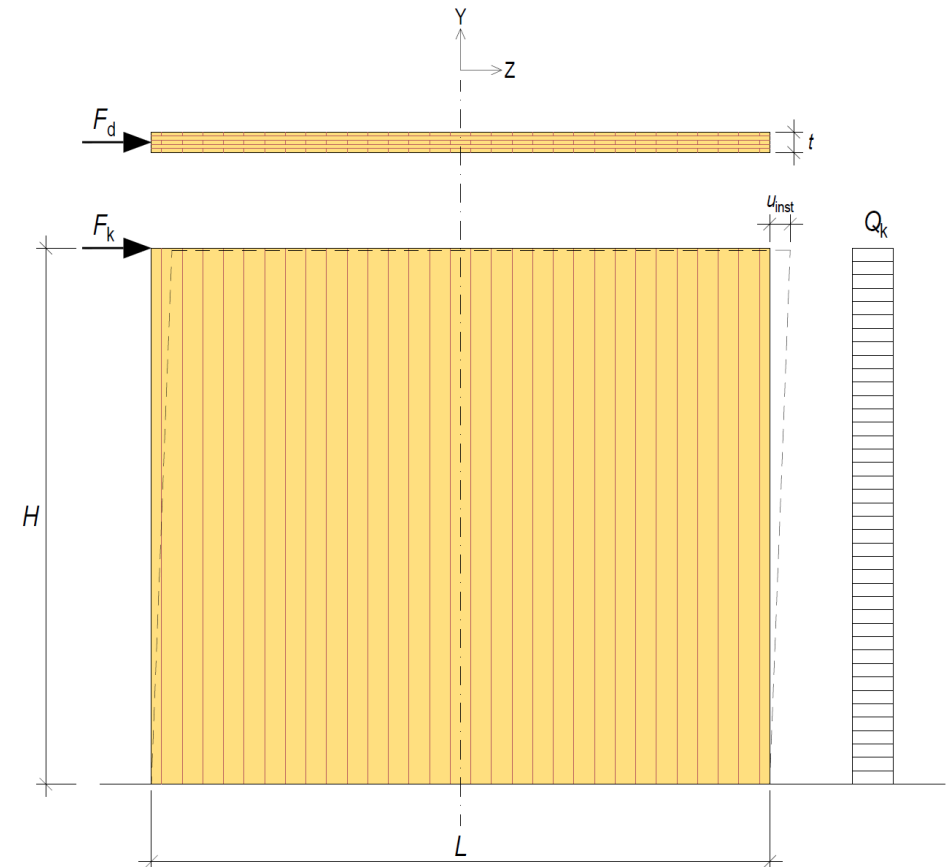
L jäykistävän seinän pituus

t CLT-levyn paksuus

G_{mean} CLT-levyn lamellin liukumoduuli

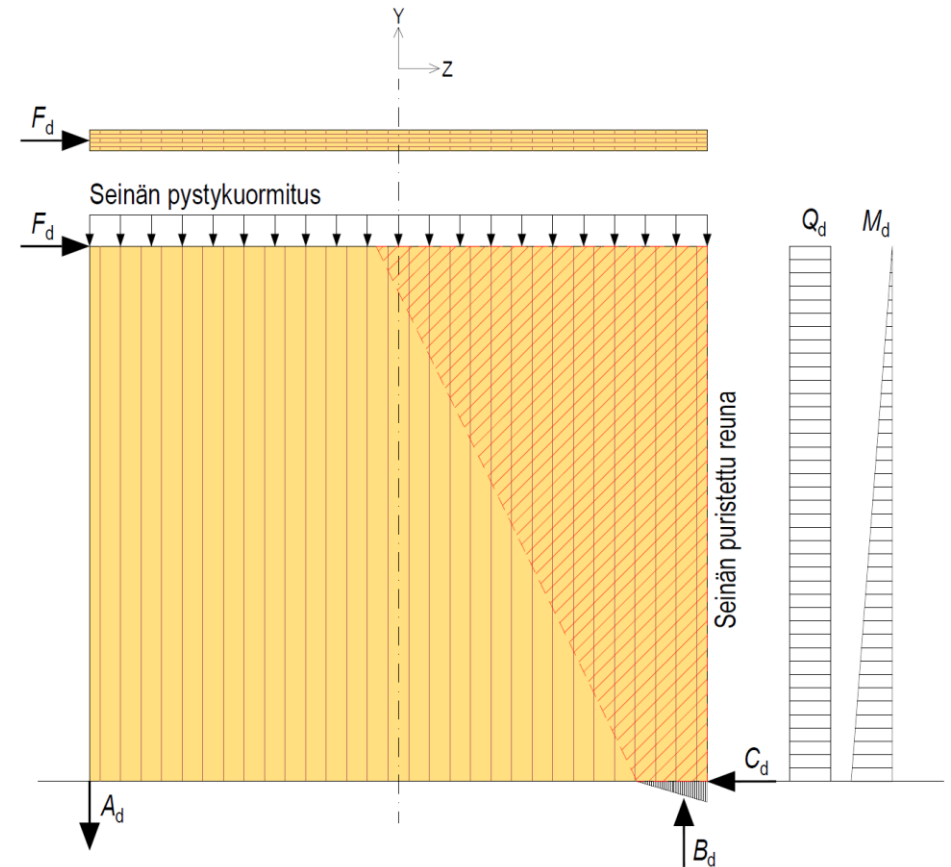
u_{inst} jäykistävän seinän leikkaussiirtymä

Q_k jäykistävän seinän leikkausvoima



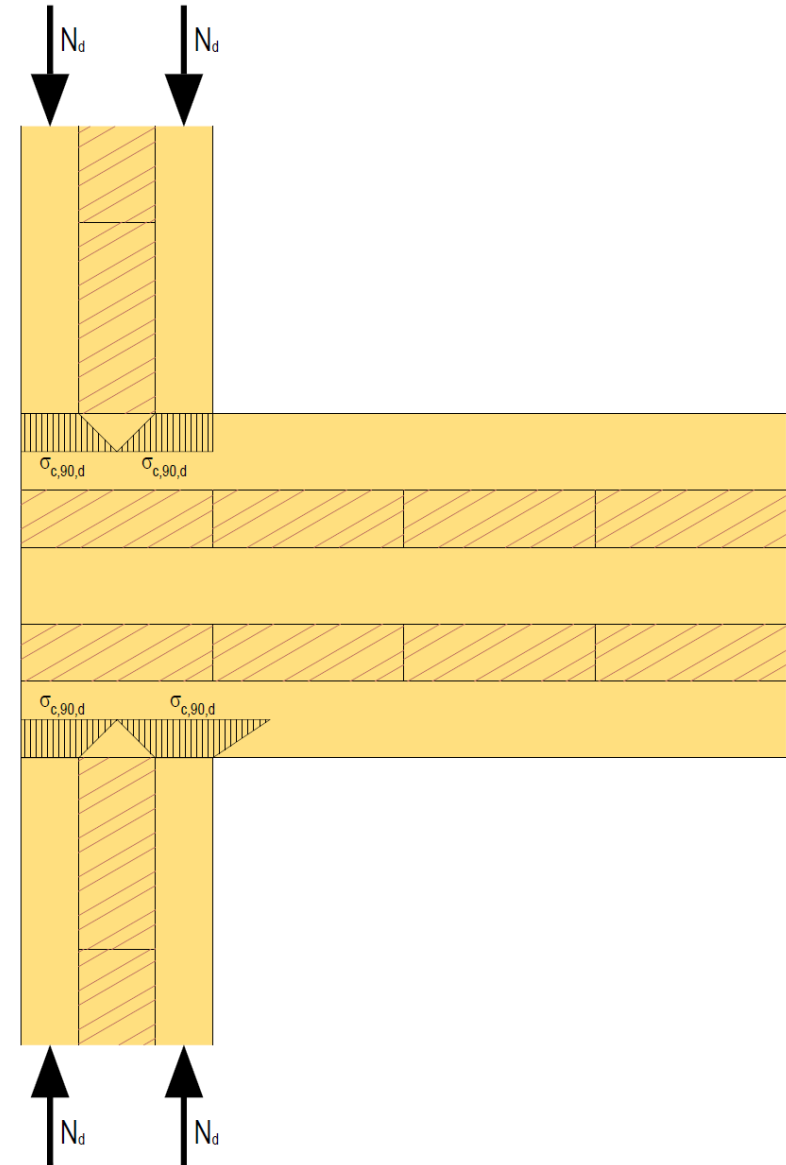
Jäykistävän CLT-seinän toiminta

- Jäykistävän CLT-seinän puristettu reuna voi nurjahtaa ja kiepahtaa pystykuormituksen vaikutuksesta
- Puristetun reunan pystykuormitus muodostuu seinän pystykuormituksesta ja vaakavoiman aiheuttamasta pystytukireaktiosta
- Tavallisesti jäykistävän seinän reunat liittyvät poikittaisiin seiniin, jolloin puristettu reuna saadaan sivuttaistuettua



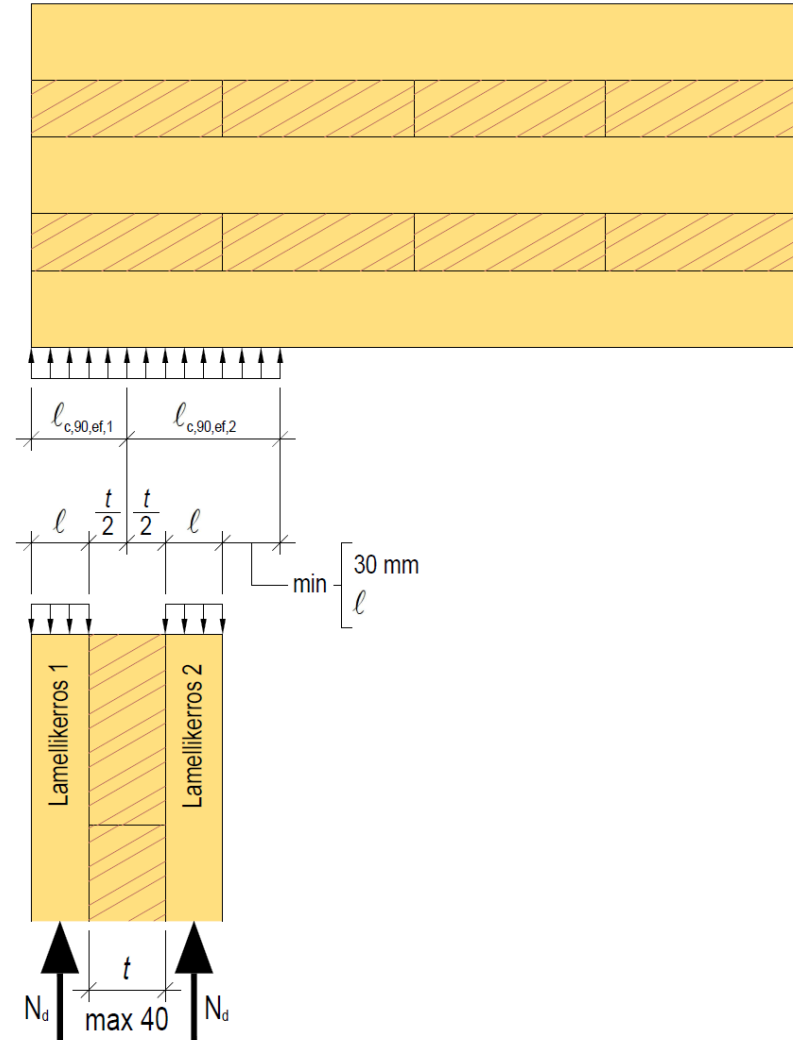
CLT:n tukipainekestävyys

- CLT-levyn tukipainemitoituksessa voidaan huomioida vain kuormituksen suuntaiset lamellikerrokset
- Tukipainekestävyyden mitoitus tehdään samoilla periaatteilla kuin sahatavaran yhteydessä
- CLT-levyn lapepinnalla kerroin $k_{c,90} = 1,25$ (kuten sahatavaralla)



CLT:n tukipainekestävyys

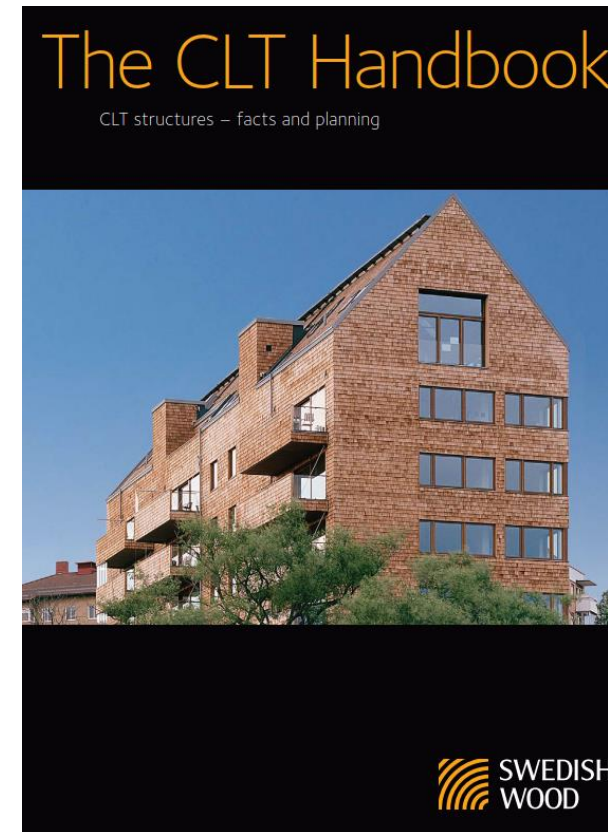
- Tehollisen kosketuspinnan pituus määritetään samoilla periaatteilla kuin rankarakenteisessa seinässä
- $I_{c,90,ef}$ määritetään jokaiselle kuormituksen suuntaiselle lamellikerrokselle
- Tukipainekestävyys tarkastetaan jokaisen kuormituksen suuntaisen lamellikerroksen kohdalla käyttäen lamellikerroksen $I_{c,90,ef}$ -mittaa



Mitoitustarkastelut, yhteenveto

The CLT Handbook

- MRT-tarkastelut
 - Kappale 3.3.5
- KRT-tarkastelut
 - Taipuman laskenta: Kappale 3.3.6
 - Värähtely: Kappale 5.3



Esimerkkejä mitoituslaskuista

tPUUr (Puuinfo)

- Välipohja (laatta, joka lasketaan palkkina)
- Ovipalkki
- Seinä

