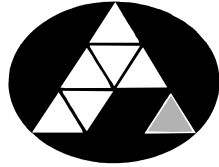


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Jussi Kakkonen

SOVELLUSLASKELMAT JÄYKISTÄVÄÄN CLT-  
ELEMENTTISEINÄÄN TOTEUTETTAVASTA  
TAPPIVAARNALIITOKSESTA JA RUUVILIITOKSESTA

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2012



POHJOIS-KARJALAN  
AMMATTIKORKEAKOULU

**OPINNÄYTETYÖ**  
**Huhtikuu 2012**  
**Rakennustekniikan**  
**koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU

**Tekijä**  
Jussi Kakkonen

**Nimeke**  
Sovelluslaskelmat jäykistävään CLT-elementtiseinään toteutettavasta tappivaarnaliitoksesta ja ruuviliitoksesta

**Toimeksiantajat**  
Insinööritoimisto Tanskanen Oy ja Stora Enso Oyj

**Tiivistelmä**

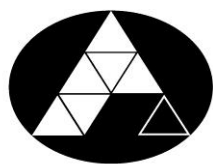
Opinnäytetyössä on tuotettu eurokoodin mukaiset sovelluslaskelmat jäykistävän CLT-elementtiseinän ankkuroivasta tappivaarnaliitoksesta ja seinäelementtien välisestä ruuviliitoksesta. Ongelmaksi muodostuu eurokoodi standardien puutteet, kun niissä ei ole mainintoja CLT-rakenteista. Sovelluslaskelmien mitoitus onkin suoritettu ensisijaisesti käyttäen Stora Ensolta saatujen ETA:n ja VTT:n antamien lausuntojen suunnitteluarvoja ja mitoitusperusteita. Nämä lausunnot antavat tarvittavat tiedot luotettavien mitoituksien suorittamiseen, mutta monin paikoin suunnitteluohjeet eivät ole yksiselitteisiä ja niitä joudutaan soveltamaan.

Mallilaskelmat on tehty Excel-taulukkolaskentaohjelmalla, jotta niitä voidaan käyttää tulevaisuudessa rakennesuunnittelun ja suunnitteluohjeiden kehitystyön apuvälineinä. Opinnäytetyön tuloksissa on vertailtu mallilaskelmissa saatavia kapasiteetteja liitoksen lopulliseen kokonaiskestävyyteen ja lisäksi on myös tuotu esille mitoituskohdat, joihin minun mielestä tarvitsisi vielä lisäohjeistusta suunnitteluohjeisiin. Mielestäni CLT-elementtirakenteiden suunnitteluohjeissa on vielä kehitettävää, mutta kuitenkin näillä nykyisillä tiedoilla ja taidoilla voidaan toteuttaa turvallisia ja toimivia rakennusratkaisuja.

**Kieli**  
suomi

Sivuja 48  
Liitteet 14  
Liitesivumäärä 15

**Asiasanat**  
CLT-elementti, CLT-levy, jäykistäminen, tappivaarnaliitos, ruuviliitos, mitoittaminen



NORTH KARELIA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**THESIS**  
**April 2012**  
**Degree Programme in Civil Engineering**  
Karjalankatu 3  
FIN 80200 JOENSUU  
FINLAND

Author  
Jussi Kakkonen

Title  
Dimensioning Calculations of Dowel Joint and Screw Joint for a Stiffening Wall made of Cross Laminated Timber

Commissioned by  
Engineering office Tanskanen Oy and Stora Enso Oyj

#### Abstract

In this thesis, joint dimensioning calculations were produced for a stiffening and load-bearing prefabricated wall made of cross laminated timber known as CLT. Dimensioning calculations include wall anchoring dowel joint and a screw joint between walls. The problem is that Eurocode standard has no mention of CLT structures. The calculations are based on experts' reports which are approved by the Technical Research Centre of Finland and The European Organisation for Technical Approvals. The reports are made according to Eurocode regulations. These reports give the information needed to perform reliable dimensions but in many parts the design guidelines are unclear and they have to be applied.

Dimensioning calculations were made with the Excel spreadsheet program so they can be used as a tool for design guidelines in structure planning and development in the future. In the results of this the design points which need further guidance in the design guidelines have been highlighted. Single parts of joints were also compared to the final overall capacity of the connection. Design guidelines for CLT structures have to be developed but nowadays we can already carry out safe and functional constructions.

Language  
Finnish

Pages 48  
Appendices 14  
Pages of Appendices 15

Keywords  
cross laminated timber, dimensioning, dowelled connections, screw connections, stiffening structures

## Sisällysluettelo

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Johdanto.....  | 8  |
| 2     | CLT-elementtitekniikka .....                               | 9  |
| 3     | Rakennuksen jäykistäminen .....                            | 10 |
| 3.1   | Puurunkoisen rakennuksen jäykistäminen .....               | 11 |
| 3.2   | CLT-elementin ankkurointi.....                             | 12 |
| 4     | Puurakenteiden liitokset .....                             | 12 |
| 4.1   | Puikkoliitosteoria .....                                   | 13 |
| 4.2   | Tappivaarnaliitos.....                                     | 13 |
| 4.3   | Massiivipuorakenteiden ruuviliitostekniikka.....           | 14 |
| 5     | Mitoitus .....   | 16 |
| 5.1   | Liitoksen statiikka .....                                  | 18 |
| 5.1.1 | Leikkausvoiman määrittäminen .....                         | 20 |
| 5.1.2 | SFS-EN 1995-1-1:n mukainen laskentamalli .....             | 20 |
| 5.1.3 | Jäykkienlevyjen laskentamalli .....                        | 22 |
| 5.2   | CLT-elementiseinän tappivaarnaliitoksen mitoittaminen..... | 23 |
| 5.2.1 | Vaarnatapin mitoittaminen.....                             | 23 |
| 5.2.2 | Murtorajatilamitoitus.....                                 | 25 |
| 5.2.3 | Moniliitinliitoksen mitoittaminen .....                    | 28 |
| 5.2.4 | Liitoksen lopullinen kapasiteetti .....                    | 28 |
| 5.2.5 | Puun lohkeamismurtuminen.....                              | 29 |
| 5.3   | Elementtien välinen ruuviliitos .....                      | 32 |
| 5.3.1 | Ruuvin mitoittaminen .....                                 | 34 |
| 5.3.2 | Ruviliitoksen lopullinen kapasiteetti.....                 | 37 |
| 5.4   | Teräslevyn mitoitus .....                                  | 38 |
| 5.4.1 | Vetokestävyys .....  | 39 |
| 5.4.2 | Reunapuristuskestävyys .....                               | 41 |
| 5.4.3 | Teräslevyn palamurtuminen.....                             | 41 |
| 6     | Tulokset ja johtopäätökset.....                            | 43 |
| 6.1   | Ankkurointivoima .....                                     | 43 |
| 6.2   | Elementtien pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima .....   | 44 |
| 6.3   | Tappivaarnaliitoksen mitoitus .....                        | 44 |
| 6.4   | Ruviliitoksen mitoitus .....                               | 45 |
| 6.4   | Teräslevyn mitoitus .....                                  | 46 |
| 7     | Pohdinta.....  | 47 |
|       | Lähteet.....   | 48 |

### Liitteet

|         |  |
|---------|--|
| Liite 1 | CLT-elementtien standardikoot  |
| Liite 2 | CLT-elementin ankkurointi detaljeja  |
| Liite 3 | CLT-elementtien välisen pystyliitoksen detaljeja                                       |
| Liite 4 | Tappivaarnojen minimietäisyydet  |
| Liite 5 | Mallilaskelman mitoitusmalli   |
| Liite 6 | Teräslevyissä olevien reikien keskiövälit, reuna- ja päätyetäisyydet                   |
| Liite 7 | Teräslevyn reikien reuna- ja päätyetäisyyksien sekä keskivälissä käytettävät merkinnät |
| Liite 8 | CLT-elementiseinän ankkurointivoiman ja sauman leikkausvoimanmitoitus                  |
| Liite 9 | Tappivaarnaliitoksen mitoitus  |

|          |  |
|----------|--|
| Liite 10 | Puun lohkeamismurtomitoitus                      |
| Liite 11 | Elementtien ruuvikiinnityksen mitoitus           |
| Liite 12 | Teräslevyn mitoitus                              |
| Liite 13 | Tappivaarnaliitoksen teräsosat                   |
| Liite 14 | Puun lohkeamismurtumiskestävyyden mitoituskaavat |

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

|              |   |
|--------------|---|
| $\alpha$     | Voiman suunnan ja pintakerroksen syynsuunnan välinen kulma  |
| $a_1$        | Liitinväli syysuunnassa samassa rivissä   |
| $a_2$        | Liitinrivien keskinäinen väli kohtisuoraan syysuuntaa vastaan   |
| $a_{3,c}$    | Liittimen ja kuormittamattoman pään välinen etäisyys  |
| $a_{3,t}$    | Liittimen ja kuormitetun pään välinen etäisyys  |
| $a_{4,c}$    | Liittimen ja kuormittamattoman reunan välinen etäisyys  |
| $a_{4,t}$    | Liittimen ja kuormitetun reunan välinen etäisyys  |
| $A$          | Poikkileikkauksen bruttopinta-ala   |
| $A_{nt}$     | Vedon rasittama nettopinta-ala  |
| $A_{net}$    | Poikkileikkauksen nettopinta-ala  |
| $A_{net,t}$  | Syysuuntaa vastaan kohtisuora nettopoikkileikkausala  |
| $A_{net,v}$  | Syysuuntainen nettoleikkautumisala  |
| $A_{nv}$     | Leikkauksen rasittama nettopinta-ala  |
| $B_{elem}$   | Seinän paksuus  |
| $b_i$        | Seinälohkonleveys   |
| $\beta$      | Sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde  |
| $d$          | Liittimen halkaisija  |
| $d_{ef}$     | Ruuvien tehollinen halkaisija   |
| $d_i$        | Ruuvien sydänhalkaisija   |
| $d_0$        | Liittimen reiän halkaisija  |
| $e_1$        | Kiinnittimen reiän keskiön ja viereisen rakenneosan päädyn välinen pääty-etäisyys mitattuna siirrettävän voiman suunnassa, ks. liite 7                        |
| $e_2$        | Kiinnittimen reiän keskiön ja viereisen rakenneosan reunan välinen reuna-etäisyys mitattuna kohtisuorassa suunnassa siirrettävään voimaan nähden, ks. liite 7 |
| $F_{ax,Rk}$  | Liittimen ulosvetokestävyyden ominaisarvo   |
| $F_{bs,Rk}$  | Lohkeamismurtumis- tai palamurtumiskestävyyden ominaisarvo  |
| $F_{b,Rd}$   | Liittimen reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo liitintä kohti  |
| $f_{h,i,k}$  | Puusauvan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo   |
| $F_{i,v,Ed}$ | Seinän yläreunaan vaikuttava vaakavoima   |
| $F_{t,Rd}$   | Yksittäisen liittimen poikittaiskuormakestävyyden mitoitusarvo  |
| $f_{t,0,k}$  | Puusauvan vetolujuuden ominaisarvo  |
| $f_u$        | Vetomurtolujuus   |

|                |  |
|----------------|--|
| $f_{ub}$       | Liittimen vetomurtolujuuden nimellisarvo   |
| $f_{u,k}$      | Pultin vetolujuuden ominaisarvo  |
| $F_{v,Rk}$     | Kestävyyden ominaisarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti  |
| $f_{v,k}$      | Puusauvan leikkauslujuuden ominaisarvo   |
| $f_y$          | Myötöraja  |
| $H$            | Seinän korkeus   |
| $k_{mod}$      | Muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman keston ja kosteuden vaikutus   |
| $L_{elem}$     | Sauman etäisyys seinän reunasta  |
| $L_{kok}$      | Kokoseinän pituus  |
| $L_{net,t}$    | Syysuuntaa vastaan kohtisuoran poikkileikkauksen nettoleveys   |
| $L_{net,v}$    | Leikkausmurtumisalueen nettopituuksien summa   |
| $M_{y,Rk}$     | Liittimen myötömomentin ominaisarvo  |
| $N_{Ed}$       | Normaalivoiman mitoitusarvo  |
| $n_{ef}$       | Tehollisten liittimien lukumäärä   |
| $N_{pl,Rd}$    | Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo   |
| $N_{t,Rd}$     | Vetokestävyyden mitoitusarvo   |
| $N_{u,Rd}$     | Nettopoikkileikkauksen kestävyyden mitoitusarvo aksiaaliselle voimalle kiinnittimien reikien kohdalla                        |
| $p_1$          | Kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys siirrettävän voiman suunnassa, ks. liite 7   |
| $p_2$          | Viereisten kiinnitinrivien välinen keskiöetäisyys mitattuna siirrettävää voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa, ks. liite 7 |
| $R_d$          | Yksittäisen liittimen leikkauskestävyys mitoitusarvo   |
| $R_k$          | Yksittäisen liittimen kestävyyden ominaisarvo  |
| $s$            | Liitinväli   |
| $t$            | Teräslevyn paksuus   |
| $t_{ef}$       | Liittimen murtumistavasta riippuva tehollinen syvyys   |
| $t_i$          | Puuosan tai levyn paksuus tai tunkeuma   |
| $\gamma_M$     | Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku  |
| $V_{ed}$       | Saumassa vaikuttava leikkausvoima  |
| $V_{eff,1,Rd}$ | Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo   |

## 1 Johdanto

Puurakentamisen hyvät tulevaisuuden näkymät Suomessa on tuonut markkinoille eri valmistajien rakenneratkaisuja. Stora Enson on tuomassa Suomen markkinoille CLT-elementtitekniikkaa, joka koostuu ristiinliimatuista massiivipuu-elementeistä. CLT-rakennuksia on jo rakennettu ympäri Eurooppaa, mutta Suomessa on vasta rakennettu muutama kohde. Toimeksiantajieni Insinööritoimisto Tanskasen ja Stora Enson yhteisessä CLT-rakenteisessa projektissa muodostui haasteita suunnitteluohjeiden niukkuuden johdosta, joten tuli tarve lisätutkimukselle. Näin ollen toimeksiantajan ehdotuksesta ja minun mielenkiintoni kyseistä materiaalia kohtaan minulle rajattiin tämä opinnäytetyönaihe, jota tein toimeksiantajien kanssa tiiviissä yhteistyössä.

Opinnäytetyössä tulen tuottamaan eurokoodin mukaiset laskelmat jäykistävän CLT-elementtiseinän ankkuroivasta tappivaarnaliitoksesta ja elementtien välisestä pystyliitoksesta ruuviliitoksesta. Opinnäytetyön tuloksina tulen esitetään eurokoodista poikkeavat sovelluslaskelmat ja niihin vielä tarvittavat lisäohjeistukset. Ja lisäksi tuottaa Excel-muotoiset mallilaskelmat, joita voidaan tulevaisuudessa hyödyntää rakennesuunnittelun apuvälineenä. Mallilaskelmat tulen selittämään tarkemmin kohta kohdalta työn teoriaosuudessa, jotta lukija voisi helposti tarkastaa, millä kaavoilla mallilaskelmien arvot ovat saatu ja mitä ne tarkoittavat.

Opinnäytetyössä ei ole mitoitettu itse CLT-levyn kestävyyttä vaan aihe on rajattu tappivaarnaliitoksen ja ruuviliitoksen mitoittamiseen. Mallilaskelmassa ei mitoiteta jäykistysseinään vaikuttavia kuormituksia vaan siihen syötetään manuaalisesti lopulliset erikseen lasketut mitoituskuormat.

CLT-rakenteiden suunnitteluohjeiden niukkuuden vuoksi tulen soveltamaan osittain eurokoodien mukaisia laskentaohjeita ja etsimään ulkomaalaisia suunnitteluohjeita ja tutkimuksia. Työssä ulkomaalaisina lähteinä on käytetty Ruotsissa julkaistua massiivipuukäsikirjaa, Itävallassa ja Italiassa tehtyjä CLT-rakenteisiin liittyviä tutkimuksia ja FP-Innovationin Kanadaan julkaisemaa massiivipuukäsikirjaa [6; 9; 14; 18]. Mallilaskelmat on toteutettu eurokoodin ja Stora Ensolta saaduilla ETA:n ja VTT:n lausuntojen

mukaisesti [5; 15]. VTT:n lausunnossa määritellään suunnitteluarvot Suomeen toteutettavaan CLT-rakenteisiin, mihin ETA:n lausunto ei ota kantaa.

## 2 CLT-elementtitekniikka

CLT eli cross laminated timber tarkoittaa massiivipuusta tehtyä rakennuslevyä (Kuva 1), joka koostuu ristikkäin liimatuista puulevy- eli lamellikerroksista. Ristiinlaminointi takaa levyn kantavuuden molempiin suuntiin, mikä mahdollistaa monimuotoisien rakenteiden käytön. CLT-levyistä valmistettuja tuotteita voidaankin käyttää muun muassa kantavina rakenteina ulko- ja väliseinissä sekä yläpohjissa että välipohjissa. [1.] Keski-Euroopassa levyistä on valmistettu myös sääälle alttiina olevia rakenteita kuten siltoja ja parvekkeita ja Englannissa on valmistettu CLT-rakenteinen kahdeksankerroksinen kerrostalo [9].



Kuva 1. CLT-levy. [13.]

Puurakenteille ominainen kosteuseläminen on todella pientä CLT-levyissä. Massiivisten rakenteiden edut kuten lämmön ja kosteuden tasaaminen toteutuvat näitä levyjä käytettäessä. Massiivisuus ja muotopysyvyys takaavat levyissä ilman ja tuulen pitävyyden, joten CLT-levyillä toteutetuissa rakenteissa ei tarvitse välttämättä käyttää erillistä ilmansulkua. CLT-levyillä toteutetuissa rakenteissa ei tarvitse myöskään käyttää höyrnsulkua. [1; 23.]

CLT-levyn valmistusprosessi alkaa 20–40 millimetriä paksujen kuusilautojen liimauksesta kerroksittain. CLT-levyt valmistetaan yleisimmin kuusesta, mutta muitakin puulajeja voidaan käyttää. Levy koostuu vähintään kolmesta lautakerroksesta, joiden paksuus voi vaihdella. Stora Enson valmistamien levyjen standardipaksuudet vaihtelevat 60 millimetristä aina 320 millimetriin. Ristiinlaminoitujen lautakerroksien liimauksessa käytetään ympäristöystävällistä formaldehydittömiä liimoja, jotka ovat polymeeripohjaisia. Liimauksen jälkeen levyt työstetään haluttuun muotoon CNC-koneella. Koneella työstöt eli aukotukset ja varaukset saadaan tehtyä todella tehokkaasti ja mittatarkasti. Enson valmistamat elementit voivat olla jopa 2,95 metriä korkeita ja 16 metriä pitkiä. [1; 23.]

CLT-elementit eli esivalmistetut suurelementit ovat tilaajan toiveiden mukaan varusteltuja CLT-levyjä. Levyihin voidaan kiinnittää tehtaalla valmiiksi esimerkiksi ulkoverho-us, eristeet, ikkunat ja ovet. Elementtivarustelun avulla säästetään rakennusaikaa, koska työmaan työvaiheita on vähemmän. CLT-elementin asennus on nopeaa, koska elementit vain yksinkertaisesti nostetaan paikalleen ja ruuvataan kiinni toisiinsa. Seinäelementtien asennuksen jälkeen seinäelementteihin voidaan heti kiinnittää välipohjalevyt. Näin saadaan tehokkaasti nostettua rakennuksen runkoa ilman kuivumisajoista johtuvia seisokkeja, jotka taas hidastavat betonirunkoista rakennusta. Tästä on hyötyä etenkin talvella tehtävissä asennustöissä, kun kuivumisiseisokkien aikaan pitää olla lämmitys päällä rakennuksessa. Puusta valmistettujen elementtien keveyden ansiosta kuljetuksessa ei tule painorajat rajoittavaksi tekijäksi ja työmaalla ei tarvita niin raskasta nostokalustoa. [1; 23.]

### **3 Rakennuksen jäykistäminen**

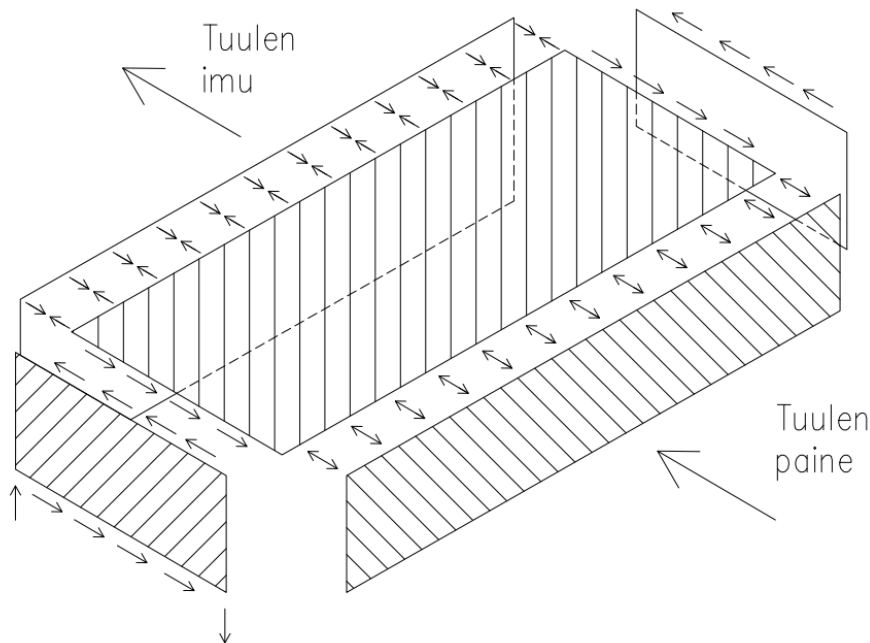
Rakennuksen rungon tehtävänä on kantaa sille tulevat pystykuormat riittävällä vakavuudella ja siirtää ne rakennuksen perustusten kautta maahan. Rungon vakavuudella eli stabiliteetilla tarkoitetaan sitä, että rakennus ottaa sille tulevat vaakakuormat, rakennuksella on riittävä varmuus kaatumista vastaan, rakennuksen rungolla on riittävä varmuus katastrofitilanteita varten ja rakennuksen runkoa on rajoitettava liiallisia hetkellisiä muodonmuutoksia kuten taipumia ja heilahtelua vastaan. Näiden kaikkien vaatimusten

lisäksi on huomioitava myös asennusaikainen vakavuus, etenkin elementtirakenteisissa rakennuksissa. Vaakakuormiin kuuluvat esimerkiksi tuulikuormat, pystykuormien epäkeskisyydestä aiheutuvat lisävaakakuormat ja siltanosturien jarrukuormat. Rungon vakavuudesta voi huolehtia runko kokonaisuudessaan tai siihen tarkoitukseen suunnitellut rungon osat, jolloin vakavuutta rasittavat kuormat siirretään jäykistäville rakenneosille. [16.]

### 3.1 Puurunkoisen rakennuksen jäykistäminen

Puurakennukset on yleisesti jäykistetty rakennuslevyjä tai vinolaudoitusta käyttäen. Tällaista jäykistyssysteemiä voidaan kutsua levyjäykistykseksi. Levyjäykistyksessä puurankaseinästä on saatu jäykistäväksi kiinnittämällä siihen jäykistävät rakennuslevyt. Kuvassa 2 on yksinkertainen esimerkki ulkoseinillä jäykistetyn talon vaakakuormien siirtymisestä perustuksille. Levyjäykistyksessä sivuseinälle tuleva tuulikuorma siirtyy jäykistäville päätyseinille välipohjan välityksellä. Välipohja toimii jäykkänä levynä ja se mitoitetaan palkkirakenteena. [27.]

Päätyseinän yläreunassa vaikuttava kuorma on nähtävissä liitteessä 5 voimana  $F_{1,v,Ed}$ . Jäykistysseinän ottaman voiman suuruus riippuu sen jäykkyyden ja sijainnin suhteesta muihin jäykistäviin seiniin verrattuna. Jäykistysseinien suunnittelussa on pyrittävä sijoitteluun jäykistysseinät symmetrisesti ja mahdollisimman kauaksi toisistaan, jotta ulkoisten kuormien aiheuttama kiertymä jäisi mahdollisimman pieneksi [16]. Jäykkänä levynä toimivan päätyseinän yläreunaan vaikuttava voima aiheuttaa sen kiertymään kulmansa ympäri, jos sitä ei ole ankkuroitu perustuksiin. Seinä voi myös ankkuroitua siihen vaikuttavalla, tarpeeksi suurella pystykuormalla. [27, s. 4-5.] Yleensä pystykuorman suuruus on vähäinen puun ominaisen keveyden ja puurakennusten mataluuden vuoksi. Tästä johtuen puurunkoisten rakennuksien jäykistysseinät voidaan joutua ankkuroimaan suurillekin vetovoimille.



Kuva 2. Vaakakuormien siirtyminen perustuksille. [27, s.1.]

### 3.2 CLT-elementin ankkurointi

CLT-elementtien ankkurointiin on monia eri liitostapoja puun ollessa helposti työstettävä materiaali. Ristiinlaminoidujen CLT-levyjen ankkurointiin voidaan soveltaa joitakin yleisesti käytettävissä olevia perinteisen puurakentamisen liitostapoja. Suomessa jäykistävänä toimivan massiivipuuseinän ankkuroinnin ongelmaksi muodostuvat vielä vähäiset suunnitteluohjeet ja vähäiset kokemukset uuden materiaalin käytössä. Korkeissa puurakennuksissa, joissa ominaisesti esiintyy suuria ankkurointivoimia, massiivipuun liittäminen perustukseen tuottaa haasteita. Liitteessä 2 on esitetty erilaisia CLT-elementin ankkurointitapoja perustuksiin [9; 17].

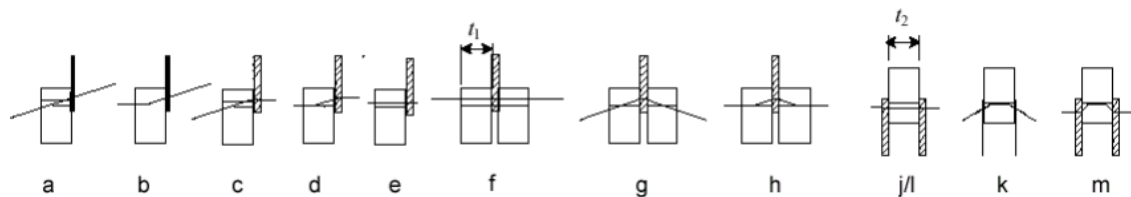
## 4 Puurakenteiden liitokset

Rakenteiden lujuus on niin suuri kuin on rakenteen heikoimman kohdan lujuus. Yleensä rakenteiden mitoitus onkin liitoksien mitoitusta. Puun epähomogeeninen rakenne ja helppo muokattavuus asettavat liitosten suunnittelulle paljon erilaisia mahdollisuuksia

kuin haasteitakin. [12, s. 7.] Nämä suunnittelun haasteet ja mahdollisuudet korostuvat CLT-rakenteiden massiivisuuden ja ristiinlaminoinnin ansiosta.

#### 4.1 Puikkoliitosteoria

Eurokoodin mukaiset metalliliittimillä tehtyjen liitoksien mitoituskaavat perustuvat K. W. Johansenin vuonna 1949 kehittämään puikkoliitosteoriaan, jota myöhemmin on kokeellisesti testaamalla tarkenneltu. Puikkoteoriassa liitinpuikko ajatellaan täysin jäykäksi niiltä osin, joissa se ei ole saavuttanut myötömomenttia. Liittimen myötömomentsaavutetaan, kun taivutusjännityksen vuoksi koko liitin on täysin plastisoitunut. Liitinpuikko aiheuttaa ympäröivään materiaaliin reunapuristuslujuuden suuruisen jännityksen, kun liitoksessa on tapahtunut siirtymää. Reunapuristuslujuus on liittimen aiheuttama paine, kun puu on murtunut tai ylittänyt määrätyn muodonmuutosrajan. Puikkoliitosteorian ja kokeellisten testauksien pohjalta on luotu kaavat metalliliittimen ja puun välisen liitoksen murtumistavoille. Teräslevyllisen puuliitoksen murtumistavat näkyvät Kuvassa 3. [10, s. 54; 8, C3; 12, s. 11-14.]



Kuva 3. Teräslevyllisen puuliitoksen murtumistavat. [10.]

#### 4.2 Tappivaarnaliitos

Eurokoodin määritelmän mukaan tappivaarnaliitoksessa vaarnatapit sovitetaan tiukasti niille esiporattuihin reikiin ja liitoksessa kuormat siirtyvät vaarnatapin akselia vastaan kohtisuorassa suunnassa [10, s. 13]. Yleisesti tappivaarnaliitoksissa käytetään teräslevyjä vahvikkeena, mutta se on myös mahdollista toteuttaa pelkästään puuliitoksena. Tappivaarnaliitoksen käytettävä vaarnatappi on tavallisesti suora, pinnaltaan uritettu tai siileä teräksestä valmistettu pyöröteräspuikko. [12, s. 32.] Teräslevyllisissä tappivaarnaliitoksissa voidaan käyttää myös WS-T-itseporautuvia ruuveja (kuva 4) [7].



Kuva 4. SFS Intecin WS-T-ruuvi. [7.]

Ruuvit porataan suoraan puun ja teräslevyn lävitse eikä rakenteen toinen puoli rikkoonnu. Ruuvit eivät vaadi esiporausta. Kapeakantainen WS-T-ruuvi voidaan upottaa puun sisään. [7.] Vaarnatappien halkaisijan edellytetään olevan vähintään 6 mm ja enintään 30 mm ja vaarnatapeille teräslevyyn porattava reikä saa olla halkaisijaltaan enintään yhden millin suurempi. Tappivaarna liitoksessa on käytettävä vähintään yhtä sidepulttia. [4, s. 118; 10, s. 66.] Sidepultti on vaarnatappi, jonka molemmissa päissä on kierteet muttereille. Sidepultti auttaa liitoksen koossa pysyvyyteen ja niitä on tarvittaessa kiristettävä puun saavutettua tasapainokosteutensa. [8, C6.]

Puurakenteissa tappivaarnaliitoksilla pystytään siirtämään suuria voimia ja liitoksella on paremmat jäykkyyssominaisuudet kuin pulttiliitoksissa. Liitoksen etuina ovat myös sen helppo valmistaminen ja palolta suojaaminen. Liitteessä 2 on nähtävissä kaksileikkeinen teräslevyllä vahvistettu tappivaarnaliitos CLT-elementissä ja mallilaskelma on tehty samalle liitostyypille. Liitteestä nähdään, että vaarnatappi ja sidepultti voidaan upottaa puun sisään. Tämä antaa liitokselle esteettisemmän ulkonäön ja parantaa liitoksen palonkestävyyttä.

### 4.3 Massiivipuorakenteiden ruuviliitostekniikka

Uusien tutkimuksien ansiosta nykyisin voidaan ruuviliitoksien mitoittamisessa hyödyntää täysimääräisesti liittimien normaalivoimaefekti ja kitkavaikutus. Tämä liittimen köysivaikutus korottaa liittimen mitoituslujuutta hoikissa ruuviliitoksissa ja etenkin vinoruuviliitoksissa. Hoikilla liittimillä toteutetut liitokset ovat edullisia vähäisen materiaalimenekin ansiosta, mutta työkustannukset voivat olla korkeat. Käytettäessä itseporautuvia ruuveja kuten WS-T ja WT-T voidaan kuitenkin välttyä liiallisilta työkustannuksilta. [24.]

WT-T-ruuvi (kuva 5) on tarkoitettu etenkin kahden puun väliseen vinoruuviliitoksiin. Vinoruuviliitoksessa itseporautuvat ruuvit ovat 30 – 60 asteen kulmassa. Vinoruuviliitoksella voidaan saavuttaa helposti kaksinkertainen lujuus ja viisinkertainen jäykkyys normaaliin ruuviliitokseen verrattuna. Liitteessä 2 on esimerkkikuva vinoruuviliitoksesta kohdassa ruuviliitos. [24.] Ruuvien valmistaja SFS intec on julkaissut suunnitteluohjeet WT-T- ja WS-T-vinoruuviliitoksien mitoittamiseen ja toteuttamiseen [7].



Kuva 5. SFS Intecin WT-T-ruuvi. [7]

Itseporautuvat pitkät WT-T- ja WS-T-ruuvit ovat omiaan massiivisissa CLT-rakenteissa korkean liitoskapasiteettinsa ja pituutensa ansiosta. Ruuvien pienen kannan ansiosta voidaan ruuvit upottaa CLT-elementin sisään. Tämä tekee liitoksista huomaamattomia ja parantaa liitoksien palonkestävyyttä. [7.]

World Conference On Timber Engineering (WCTE) on julkaissut tutkimuksen CLT-levyjen välisestä ruuveilla tai nauloilla toteutettavasta pystyliitoksesta. Siinä tutkitaan ja vertaillaan kolmea eri saumamallia. Tutkimuksessa käytetään kahta erilaista 100 mm paksua CLT-levyä ja kuutta erilaista liitintä. Saumamallit näkyvät liitteessä 3 vaihtoehtoina 1-3. Liittiminä tutkimuksessa on käytetty kahta erilaista naulaa ja kahta erilaista ruuvia aluslaatan kanssa ja ilman. Tutkimuksissa vertaillaan saumavaihtoehtoja liitoksen kestävyuden, liitoksen siirtymien ja liitoksen tekemisen viemän ajan suhteessa. Liitoksista saatuja tutkimustuloksia verrataan eurokoodien teorioiden mukaisiin laskelmiin. [6, s.1-6.]

Tutkimustuloksista huomataan, että liitoksen kestävyuden tulokset ovat keskimäärin puolitoistakertaiset eurokoodin laskennallisiin tuloksiin verrattuna, mutta taas siirtymät ovat jopa alle lasketun eurokoodin mukaisista. Liitoksen kestävyys on siis mitoitettu varmallalla puolella jopa vähän liikaakin, kun esimerkiksi 6 mm itseporautuvalla ruuvilla tehty liitteessä 3 olevan toisen vaihtoehdon liitoksen kapasiteetti on todellisuudessa kaksi kertaa niin suuri kuin teoriassa. Samaan lopputulokseen on myös päässyt Uibel ja Blaß (2006) [6]. Tutkimuksessa saatua liitoksen siirtymän suurta eroavaisuutta käytännön ja teorian välillä selitetään eurokoodin ympäröivällä laskentatavalla. Laskentata-

vassa ei oteta huomioon tarpeeksi monta muuttujaa kuten puu elementin paksuutta ja liittimessä käytettävän teräksen lujuutta. Liitoksen tekemiseen kuluvasta ajasta naulaliitokset olivat tutkimuksessa nopeampia kuin ruuvilla tehdyt eikä naulaliitoksien tekemisen kestoon paljoakaan vaikuttanut eri liitostyypit. Tutkimusta ei voida pitää täysin luotettavana, koska siinä ei ollut tarpeeksi toisintoja kokeissa. CLT-rakenteista on julkaistu vain vähän tutkimuksia, joten tätä tutkimusta voidaan pitää kuitenkin suuntaa antavana varsinkin, kun siinä osittain päästään samaan lopputulokseen kuin toisessa jo olemassa olevassa CLT-rakenteiden tutkimuksessa. [6, s.1-6.]

Mallilaskelmissa olen käyttänyt WT-T-ruuvia elementtien väliseen pystysaumaan. Liitteessä 3 on muutamia CLT-elementtien pystysaumamalleja ja mallilaskelmissa on mitoitettu pystysauma VE1:n mukaiselle liitokselle. Päädyin toteuttamaan mallilaskelmien elementtien välisen WT-T-ruuviliitoksen perinteisesti eli ruuvi on kohtisuoraan liitettävää CLT-elementtiä vasten, koska se on työtekniisesti helpompi toteuttaa kuin vinoruuviliitos ja kuormitukset eivät kasvaneet liian suuriksi sille.

## 5 Mitoitus

Kantavien puurakenteiden suunnittelustandardista SFS-EN 1995 on julkaistu Suomessa tähän mennessä kolme osaa, joista ensimmäinen SFS-EN 1995-1-1 sisältää yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt ja toinen osa SFS-EN 1995-1-2 sisältää puurakenteiden palomitoituksen. Näiden lisäksi on myös julkaistu SFS-EN 1995-2, joka sisältää puurakenteiset sillat. Ympäristöministeriö on julkaisut puurakenteiden eurokoodin Suomen kansalliset liitteet 16 ja 32, joissa on annettu tarkennettuja määräyksiä Suomeen toteuttavien kohteiden suunnitteluun. [20.]

Eurokoodit on laatinut eurooppalainen standardisointijärjestö CEN (European Committee for Standardization) [2]. Eurokoodin tarkoituksena on yhdistää Euroopan unionin jäsenmaiden rakentamisen suunnitteluohjeet. Tämä takaa jäsenmaille yhteisen luotettavuustason rakentamisessa ja muodostaa perustan maiden väliselle rakennusalaan liittyvään kaupankäyntiin. Eurokoodien yhteinen käyttö laajentaa eri materiaalien ja rakenteiden käyttömahdollisuuksia, kun näiden maahantuonti helpottuu. [19.]

Kantavien rakenteiden suunnittelussa eurokoodia saadaan käyttää vielä rinnakkain Suomen rakentamismääräyskokoelman osien B1–B10 kanssa 1.7.2013 asti. Tämän jälkeen eurokoodin on määrä tulla ainoaksi sallituksi kantavien rakenteiden suunnittelu-standardiksi. [4.] Suunnittelussa on käytettävä joko eurokoodia tai B10:n puurakenteet osiota, mutta suunnittelussa ei saa sekoittaa näitä keskenään [20].

VTT:n lausunto VTT-S-08104-11 käsittelee CLT-rakenteiden suunnittelussa käytettäviä suunnitteluarvoja, ominaisuuksia ja mitoitusperusteita. Lausunto käsittää tavanomaiset kantavat ja jäykistävät 1. ja 2. käyttöluokan CLT-rakenteet, mutta lausunto ei koske rakenteiden palonkestävyyttä eikä paloteknisiä ominaisuuksia. Lausunnon mukaan CLT-rakenteiden mitoittamisessa Suomessa voi käyttää eurooppalaisen teknisen hyväksynnän lausuntoa ETA-08/0271. VTT:n lausunnossa käydään läpi CLT-rakenteiden suunnitteluarvot ja mitoitusperusteet myös niiltä osin, johon ETA-08/0271-lausunto ei ota kantaa. Näitä ovat esimerkiksi maakohtaiset suunnitteluarvot, materiaalin osavarmuusluku 1,25 ja leikkausmitoituksen halkeilukerroin 1,0. VTT:n lausunto on toistaiseksi voimassa 30.11.2016 asti. Lausunnon lopussa todetaan, että CLT-rakenteiden mitoittamisessa ei saa käyttää mitään eurokoodista sovellettua ohjetta kuten RIL 205-1-2009 ilman erillisselvityksiä. RIL-205-1-2009 puurakenteiden suunnitteluohjeen tarkoituksena on yksinkertaistaa eurokoodi standardien kantavien puurakenteiden suunnittelumääräyksiä ja tehdä niistä enemmän käyttäjävälisempiä. [5, s. 1-3; 4; 15.] Yleisesti olisi suositeltavaa käyttää RIL:n puurakenteiden suunnitteluohjetta, koska se selkeydellään voi vähentää suunnitteluvirheitä ja siinä on jopa tarkennuksia joihinkin eurokoodin kaavoihin.

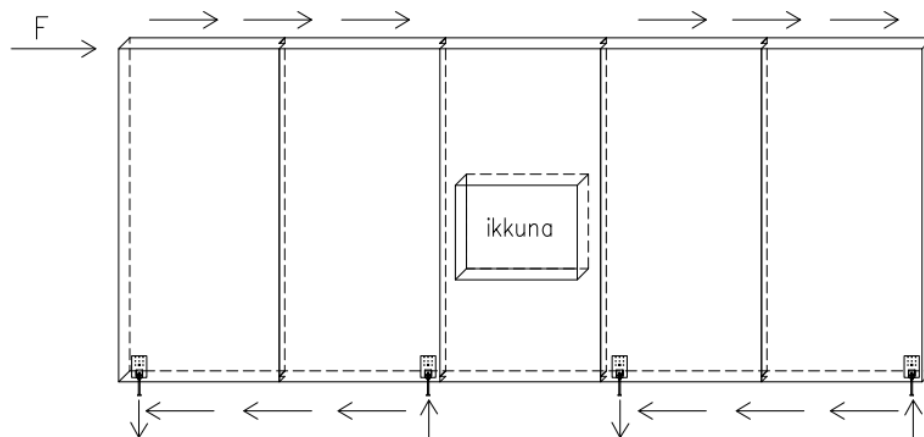
Olen luonut mallilaskelmat Excel-taulukkolaskentaohjelmalla, jotka ovat myös liitteinä 8-12 opinnäytetyön lopussa. Laskelmat sisältävät CLT-elementtirakenteisen jäykistysseinän yksinkertaisen staattisen ratkaisumallin, tappivaarnaliitoksen ja elementtien sauman ruuviliitoksen. Laskelmissa ei mitoiteta CLT-elementtien kestäväyyttä eikä seinän alaosan leikkauksen aiheuttamaa mitoitusta esimerkiksi ruuviliitoksella. Mallilaskelmat on tehty eurokoodin kantavien puurakenteiden suunnittelumääräyksiä mukaillen. Tässä opinnäytetyön kirjallisessa osuudessa olen käyttänyt RIL-205-1-2009 lähteenä vain mitoitusteorioiden selittämiseen enkä ole käyttänyt sen mitoituskaavoja. Mitoittamisen ongelmaksi muodostuu ohjeiden ja standardien puutteet, kun niissä ei ole mainintoja

CLT-rakenteista. Puutteiden vuoksi osa laskelmista on suoritettu Stora Ensolta saaduilla Valtion Teknillinen Tutkimuskeskuksen ja EOTA:n hyväksymällä ETA-08/0271-lausunnolla, joka käsittelee massiivipuulevyjen käyttöä rakennusten rakennelementteinä.

## 5.1 Liitoksen statiikka

Jäykistysseinän tulee kestää sille tulevat vaakasuuntaisen ja pystysuuntaiset kuormat ja siirtää nämä voimat perustuksille [27, s. 4]. Mallilaskelmien jäykistysseinän mitoituspaus näkyy liitteessä 5 ja laskelmat liitteessä 8. Laskelman jäykistysseinän elementit ovat identtisiä toisiinsa nähden ja ne lepäävät koko pituudeltaan tuen päällä. Jäykistysseinässä ei ole myöskään aukkoja niin seinä voidaan ajatella yhdeksi toimivaksi jäykistyselementiksi.

SFS-EN 1995-1-1:n mukaan seinän vaakaleikkausvoiman kestävyys ei katsota lisääntyvän ovi- tai ikkuna-aukollisista seinälohkoista [10, s. 87]. Aukollinen CLT-elementtirakenteinen jäykistysseinä on jaettava jäykistyslohkoihin, jotka kaikki on erikseen ankkuroitava perustuksiin [14, s. 55]. Aukollisesta CLT-elementtiseinästä ja sen voimien siirtymisestä on esimerkki kuvassa 6.



Kuva 6. Aukon vaikutus jäykistävän seinän voimien siirtymiseen.

Vaakasuuntaiset voimat on mallilaskelmassa muutettu pistemäiseksi kuormaksi  $F_{i,v,Ed}$  seinän ylänurkkaan. Vaakavoimien yksinkertaistamisesta on hyvät esimerkkilaskelmat Puufon internetsivuilla ladattavassa eurokoodin mukaisissa asuinrakennuksen sovel-

luskelmissa. Seinän kiertyminen itsensä ympäri aiheuttaa tappivaarnalle vetovoiman, joka on mallilaskelmassa yksinkertaistettu pistemäiseksi vetovoimaksi  $F_{i,c,Ed}$ , jonka suurus lasketaan kaavalla 1 [27]. Vetovoiman suurus riippuu seinän korkeuden ja leveyden suhteesta [27].

$$|F_{i,c,Ed}| = |F_{i,t,Ed}| = \frac{F_{i,v,Ed} * H}{L_{kok}} \quad (1)$$

missä

|              |  |
|--------------|--|
| H            | on korkeus                                 |
| $L_{kok}$    | on koko seinän pituus                      |
| $F_{i,v,Ed}$ | on seinän yläreunaan vaikuttava vaakavoima |

Tappivaarnaliitokseen vaikuttavan vetovoiman suuruus voidaan myös laskea Stora Enson omalla CLT-elementtien statiikan laskentaohjelmalla, joka on ladattavissa CLT-infon internetsivuilta. Seinän alareunaan vaikuttavaa leikkausvoimaa ei oteta huomioon tappivaarnalaskelmassa, joten se on hoidettava jollain muulla rakenteella esimerkiksi tiheällä ruuvauksella elementin alareunassa.

Pystykuormat siirtyvät suoraan perustuksille, kun elementtiseinä lepää koko pituudeltaan tuella. Mallilaskelmassa pystykuormana on tasainen kuormitus  $P_d$ , jota voidaan hyödyntää stabiloivana voimana laskettaessa vetovoimaa tappivaarnalle. Stabiloivana pystykuormana voidaan yleisesti hyödyntää rakenteiden pysyviä kuormia eikä siihen esimerkiksi oteta huomioon muuttuvia kuormia. En löytänyt mitoitusohjetta pystykuorman hyödyntämisestä ankkurointivoimaa stabiloivana voimana jäykistävässä CLT-elementtiseinäissä. Mallilaskelmassa olen kuitenkin hyödyntänyt pystykuorman ensimmäisen elementin matkalta, mikä on mielestäni ainakin varmallalla puolella mitoittamista ja parempi vaihtoehto kuin jättää pystykuorma kokonaan hyödyntämättä. Ajateltaessa murtotilannetta kuvan 9 mukaisesti, jokaisella elementillä on yhtä suuri siirtymä ja jokainen levy kiertyy itsensä ympäri. Mallilaskelmien mukainen pistemäisen vaakavoiman aiheuttama kiertymä on mielestäni rajoitettava ensimmäisen elementin matkalla, jonka matkalta olen hyödyntänyt pystykuorman stabiloiva vaikutuksen. Todellisuudessa yleensä väli- tai yläpohjalta tulevat vaakakuormat kuitenkin jakaantuvat tasaisesti jäykistysseinän yläpintaan niin kuin kuvassa 2 on havaittavissa ja elementit on kiinnitetty toisiinsa ruuveilla, että seinä toimisi yhtenä levynä. Mallilaskelman ajatusmalli on aina-

kin varmallalla puolella verrattuna esimerkiksi jos pystykuormat otettaisiin koko seinän alueelta.

### 5.1.1 Leikkausvoiman määrittäminen

Jäykistysseinässä olevien elementtien välissä vaikuttavan leikkausvoiman laskentaan tässä opinnäytetyössä on kaksi eri vaihtoehtoa, koska Suomessa ei ole julkaistu mitään ohjetta CLT-elementtien sauman leikkausvoiman määrittämiseen. Ensimmäinen näistä teorioista on sovellus SFS-EN 1995-1-1:n mukaisesta levyjäykisteisen puurankaseinän mitoittamisesta A-menetelmällä ja toinen on otettu ruotsalaisyhtiö Martinssonin ruotsiksi julkaisemasta massiivipuukäsikirjasta. Näiden teorioiden mukaiset laskelmat näkyvät liitteessä 11.

### 5.1.2 SFS-EN 1995-1-1:n mukainen laskentamalli

Eurokoodin levyjäykisteisen puurankaseinän menetelmä A:ta voidaan käyttää, kun seinä on ankkuroitu päistään eli se ei pääse nousemaan paikaltaan. Tässä menetelmässä seinän vaakaleikkausvoiman kestävyden mitoitusarvo  $F_{v,Rd}$  määritetään kaavan 2 mukaisesti, mikäli seinän jokaisen levyn leveys on vähintään  $h/4$  ja liitinväli on vakio pitkin jokaisen levyn reunoja. [10, s.86.] CLT-elementeissä ei ole ruuvausta ympäri elementin, mutta puurankaseinässä sen tarkoitus on muodostaa jäykistyslevy ja puurunko yhdeksi jäykistyslohkoksi, jota CLT-elementti on jo massiivipuuna itsessään. Kaavan 2 mukaan seinän vaakaleikkausvoimankestävyys on kaikkien seinälohkojen vaakaleikkausvoimienkestävyyden summa. Seinälohkon vaakaleikkausvoimankestävyyden mitoitusarvo  $F_{i,v,Rd}$  saadaan kaavalla 3. [10, s.86.] Jäykistävään seinälohkoon vaikuttavat voimat näkyvät kuvassa 7. Tämä vaatii seinän liittimien olevan tyypiltään ja mitoiltaan samanlaiset, muuten joudutaan seinälohkojen vaakaleikkausvoiman kestävyttä vähentämään eurokoodin mukaisesti [10, s.87].

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad (2)$$

$$F_{L,Rd} = \frac{F_{t,Rd} b_1 c_1}{s}$$

missä

$F_{t,Rd}$  on yksittäisen liittimen poikittaiskuormakestävyyden mitoitusarvo

$b_1$  on seinälohkon leveys

$s$  on liitinväli

ja

$$c_1 = \begin{cases} 1 & \text{kun } b_1 \geq b_0 \\ \frac{b_1}{b_0} & \text{kun } b_1 < b_0 \end{cases}$$

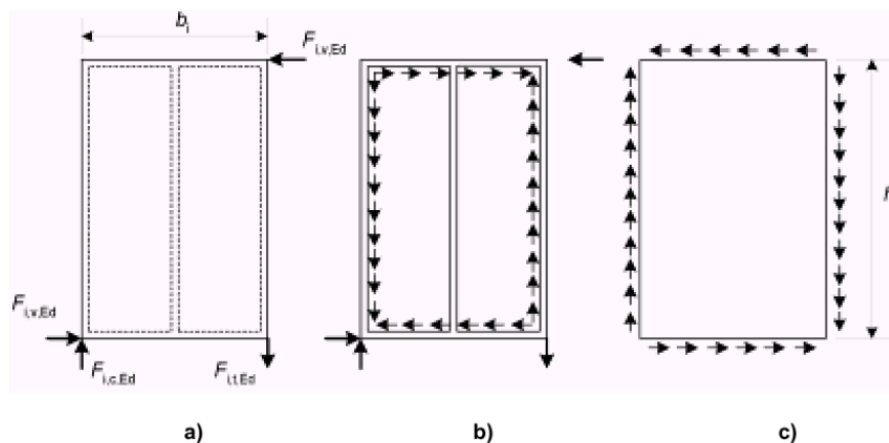
missä

$$b_0 = h/2$$

$h$  on seinän korkeus.

(3)

Eurokoodin mukaan A-menetelmässä ei katsota vaakaleikkausvoiman lisääntyvän seinälohkoilta, joissa on ikkuna- tai oviaukkoja [10, s.87]. Mallilaskelman seinässä ei ole aukkoja niin kaikki seinälohkot voidaan hyödyntää jäykistävinä. Seinän ankkurointi on suoritettava jäykin liittimin. Eurokoodi antaa ohjeita jäykistyslevyille ja puurankarungon mitoittamiseen, mutta koska ne eivät ole ominaisia CLT-rakenteiselle seinälle, joten niiden käsittely sivuutetaan tässä työssä.



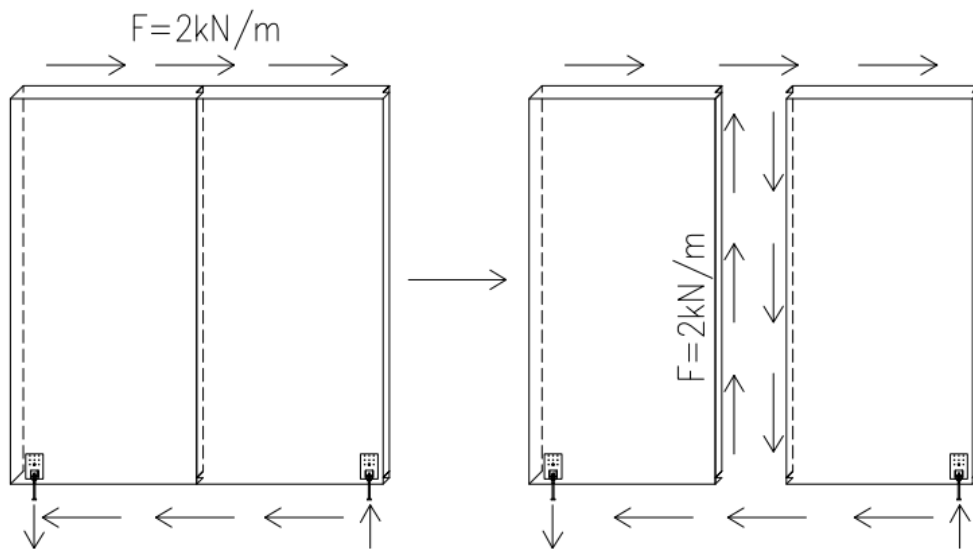
Kuva 9.5 Voimat, jotka vaikuttavat:

- seinälohkoon
- rankaan
- levyyn

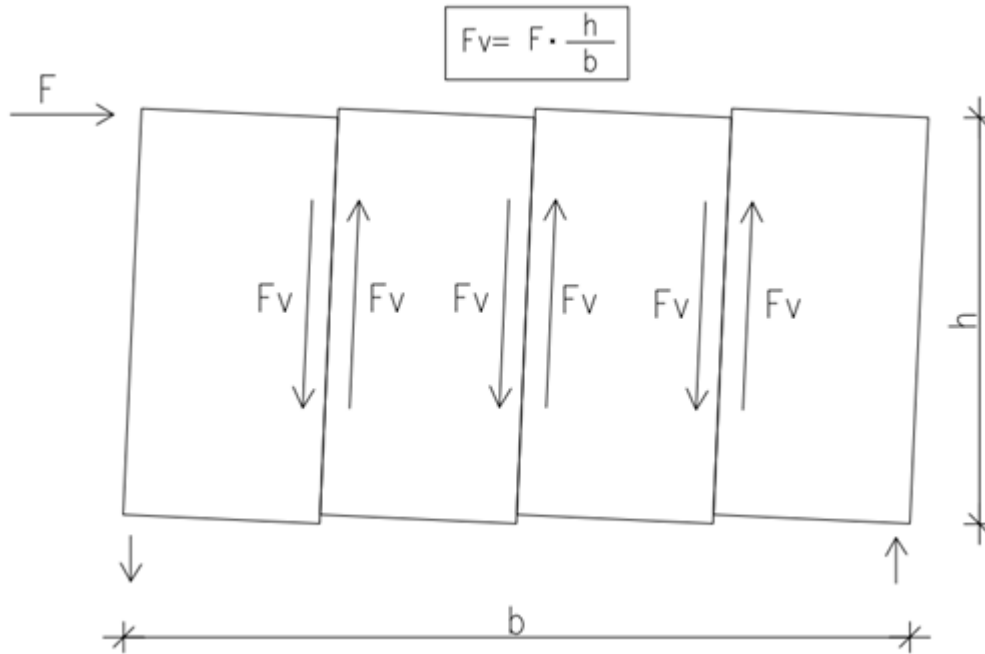
Kuva 7. Vaakavoimien siirtyminen puurankaseinässä. [10.]

### 5.1.3 Jäykkienlevyjen laskentamalli

Martinsonssin massiivipuukäsikirjan mukaan jäykistysseinälle tuleva vaakakuorma jaetaan tasaisesti koko seinän jäykistyslohkoille. Käsikirjan mukaan seinän ylä- ja alareunassa vaikuttava vaakasuuntainen kuormitus on samansuuruinen kuin saumassa vaikuttava pystysuora kuormitus niin kuin kuvasta 8 voidaan huomata. Lopullinen saumassa vaikuttava leikkausvoima saadaan kertomalla pystykuorma seinän korkeudella. Elementtien välisessä saumassa vaikuttava leikkausvoiman suuruus on jokaisessa saumassa yhtä suuri, jos elementit ovat identtisiä niin kuin mallilaskelmassa ja kuvassa 9 on havaittavissa. Saumassa vaikuttavan leikkausvoiman suuruus saadaan jäykistysseinän korkeuden ja pituuden suhteen mukaan ja leikkausvoiman kaava on nähtävissä kuvassa 9. [14, s.74.]



Kuva 8. Vaaka- ja pystyvoimat ovat samansuuruiset.



Kuva 9. Leikkausvoiman suuruus on sama jokaisessa saumassa. [14.]

## 5.2 CLT-elementiseinän tappivaarnaliitoksen mitoittaminen

Metallisten puikkoliitosten leikkauskestävyyden mitoituksessa on otettava huomioon liittimen reunapuristuslujuus, myötölujuus ja ulosvetolujuus [10, s. 51]. ETA-08/0271-lausunnon mukaan CLT-rakenteissa pultti- ja tappivaarnaliitokset mitoitetaan standardin EN 1995-1-1 mukaisesti [15].

### 5.2.1 Vaarnatapin mitoittaminen

Vaarnatapin mitoituksessa ratkaisevinta on ETA-lausunnon mukainen reunapuristuslujuuden ominaisarvo  $F_{h,\alpha,k}$ , joka on kokeellisesti todistettu tutkimuksessa ”Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels; T Uibel, H J Blaß; 2006” [15; 6]. Reunapuristuslujuuden kaava koskee ristiinlaminoiduille kuusi- tai pihtakerroksista valmistetuille massiivipuulevyille. Reunapuristuslujuuden mitoituskaava on näkyvässä kaavassa 4. Kulman  $\alpha$  määrittämisessä on hyvä huomioida, jos vaarnatappi joudutaan upottamaan elementin sisään niin tapin päässä oleva syysuunta voi muuttua. [15.]

$$f_{t\alpha,k} = \frac{32 \cdot (1 - 0,015 \cdot d)}{1,1 \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \text{ in N/mm}^2$$

jossa

$d$  on kiinnittimen halkaisija mm:nä

$\alpha$  on voiman suunnan ja pintakerroksen syynsuunnan välinen kulma.

(4)

Vaarnatapin myötömomentin mitoituksessa käytetään pultin mitoituskaavaa, joka on näkyvissä kaavassa 5. [10.]

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6}$$

missä

$M_{y,Rk}$  on myötömomentin ominaisarvo [Nmm]

$f_{u,k}$  on vetolujuuden ominaisarvo [N/mm<sup>2</sup>]

$d$  on pultin halkaisija [mm].

(5)

Vaarnatapin leikkauskestävyyden ominaisarvo  $F_{v,Rk}$  yhtä tappia kohden saadaan murtotapojen mukaan, jotka näkyvät kuvassa 3. Kuvassa esitetyt murtotavat ovat teräslevyn ja puun välisistä liitoksista. Mitoituskaavojen valinta riippuu teräslevyn paksuudesta. Teräslevyn paksuuden ollessa enintään puolet vaarnatapin paksuudesta luokitellaan se ohueksi teräslevyksi. Vähintään vaarnatapin paksuinen teräslevy luokitellaan paksuksi teräslevyksi. Mallilaskelman mitoitus on toteutettu eurokoodin mukaisilla kaavoilla, jotka ovat kaavassa 6. Kaavojen perässä oleva kirjain viittaa kuvassa 3 näkyviin murtumistapoihin. Kaavoissa puun paksuuden ominaisarvona  $t_1$  tappivaarna liitoksissa käytetään tappivaarnan tunkeutumaa, jos tappivaarna upotetaan puun sisään. [10, s. 50-66.]

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(f)} \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(g)} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(h)} \end{cases} \quad (6)$$

jossa

|             |   |
|-------------|---|
| $F_{v,Rk}$  | on kestävyuden ominaisarvo leikkaustasoa ja liittintä kohti                 |
| $f_{h,i,k}$ | on puusauvan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo                            |
| $t_1$       | on puisen sivukappaleen paksuus tai tunkeuma, sen mukaan, kumpi on pienempi |
| $d$         | on liittimen halkaisija   |
| $M_{y,Rk}$  | on liittimen myötömomentin ominaisarvo                                      |
| $F_{ax,Rk}$ | on liittimen ulosvetokestävyuden ominaisarvo                                |

Mitoituskaavojen (kaava 6) vasemmanpuolinen termi on Johanssenin myötäteoriaan perustuvaa liittimen kapasiteetti. Oikeinpuolinen termi  $F_{ax,rk}/4$  tarkoittaa liittimessä tapahtuvaa köysivaikutus-ilmiötä. Köysivaikutus on liittimessä vaikuttavan aksiaalisen voiman vaikutuksen osuus kapasiteettiin. [25, s. 48-49.] Eurokoodin mukaan tappivaar-naliitoksen mitoituksessa ei saa käyttää köysivaikutusta, koska vaarnatapit katsotaan sileäpintaisiksi liittimiksi, joihin ei pääse muodostumaan aksiaalista voimaa [10, s. 53].

### 5.2.2 Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilamitoitus tarkoittaa, että kaavoista saadut kestävyyksien ominaisarvot jaetaan osavarmuusluvulla. Eurokoodin mukaan liitoksen mitoituskestävyys  $R_d$  murtorajatilassa lasketaan kaavalla 7. [10.]

$$R_d = k_{\text{mod}} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (7)$$

jossa

|                  |   |
|------------------|---|
| $R_k$            | on yksittäisen liittimen kestävyuden ominaisarvo                                      |
| $\gamma_M$       | on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku  |
| $k_{\text{mod}}$ | on muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman keston ja kosteuden vaikutus |

Eurokoodeilla laskettaessa on käytettävä Suomen eurokoodin kansallisen liitteen osavarmuuslukuja, jotka näkyvät taulukossa 1 [11]. CLT-rakenteille ei ole määritelty eurokoodien standarteissa osavarmuuslukua tai aikavaikutuskerrointa  $k_{\text{mod}}$ . Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen lausunnossa VTT-S-08104-11 määritellään CLT-rakenteiden osavarmuusluvuksi 1,25, jota on myös käytetty mallilaskelmissa. Lausunnossa ei ole määritelty erikseen, mitä aikavaikutuskerrointa tulisi käyttää CLT-rakenteissa. Lausunnon mukaan CLT-rakenteissa tulee käyttää sahatavaran suunnitteluarvoja, jos siinä tai ETA:n lausunnossa ei ole muuta määritelty. [5.] Mallilaskelmassa on käytetty sahatavaran aikavaikutuskerrointa.

Taulukko 1. Eurokoodin Suomen kansallisen liitteen mukaisia osavarmuuskertoimia. [11.]

|   |      |
|---|------|
| Perusyhdistelmät:                             |      |
| Sahatavara ja pyöreä puutavara yleensä        | 1,4  |
| Havusahatavara, jonka lujuusluokka $\geq$ C35 | 1,25 |
| Liimapuu, LVL                                 | 1,2  |
| Puulevyt                                      | 1,25 |
| Liitokset                                     | *)   |
| Naulalevyliitokset: - tartuntalujuus          | 1,25 |
| - levyn lujuus (teräs)                        | 1,1  |
| Onnettomuusyhdistelmät                        | 1,0  |

Murtorajatilamitoituksessa on huomioitava ympäristöolosuhteiden ja kuorman keston vaikutus aikavaikutuskertoimella  $k_{\text{mod}}$ . Aikavaikutuskertoimen suunnitteluarvo saadaan taulukosta 2. Mallilaskelmassa käyttöluokaksi on valittu käyttöluokka yksi ja kuorman aikalokaksi hetkellinen kuorma. [11.]

Taulukko 2. Aikavaikutuskertoimen suunnitteluarvoja. [11.]

| Materiaali | Standardi          | Käyttöluokka | Kuorman aikaluokka |                      |                   |                      |                    |
|------------|--------------------|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
|            |                    |              | Pysyvä kuorma      | Pitkäaikainen kuorma | Keskipitkä kuorma | Lyhytaikainen kuorma | Hetkellinen kuorma |
| Sahatavara | EN 14081-1         | 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               |
| Liimapuu   | EN 14080           | 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               |
| LVL        | EN 14374, EN 14279 | 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               |

Ympäristöolosuhteiden vaikutus otetaan huomioon määrittäessä rakenteen käyttöluokka. Käyttöluokkia on kolme ja ne voidaan karkeasti jakaa seuraavasti. Ensimmäiseen käyttöluokkaan kuuluvat lämpimissä sisätiloissa tai vastaavissa olosuhteissa olevat rakenteet. Toiseen käyttöluokkaan kuuluvat ulkoilmassa olevat kuivana pysyvät rakenteet ja kolmanteen käyttöluokkaan kuuluvat ulkona säälle alttiina tai veden välittömän vaikutuksenalaisena olevat rakenteet. [4.] CLT-levyä saa käyttää 1. ja 2. käyttöluokan rakenteissa [5].

Aikavaikutuskertoimen määrittämiseen tarvitaan myös kuorman aikaluokka. Kuorman aikaluokan määrittämiseen on arvioitava kuorman vaikutuksen kesto-aika. Taulukossa 3 on Suomen Eurokoodin kansallisen liitteen mukaisia esimerkkejä kuormien jaottelusta aikaluokkiin. [11.]

Taulukko 3. Eurokoodin mukaisia esimerkkejä kuormien jaottelusta aikaluokkiin. [11.]

| Kuorman aikaluokka | Kuormitukset   |
|--------------------|--|
| Pysyvä             | Oma paino<br>Pysyvästi rakenteeseen kiinnitetyt koneet, laitteet ja kevyet väliseinät<br>Maanpaine   |
| Pitkäaikainen      | Varastotilojen tavarakuormat (luokka E), vesisäiliökuorma  |
| Keskipitkä         | Lumi<br>Lattioiden ja parvekkeiden hyötykuorman pintakuormat luokissa A - D<br>Autotallien ja liikennöintialueiden hyötykuormat (luokat F ja G)<br>Kosteuden vaihtelun aiheuttamat kuormitukset                                      |
| Lyhytaikainen      | Portaiden hyötykuormat<br>Hyötykuorman pistekuorma ( $Q_k$ )<br>Väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat<br>Kunnossapito- tai henkilökuorma katolla (luokka H)<br>Ajoneuvokuormat luokassa E<br>Kuljetusvälinekuormat<br>Asennuskuormat |
| Hetkellinen        | Tuuli<br>Onnettomuuskuorma   |

### 5.2.3 Moniliitinliitoksen mitoittaminen

Mallilaskelmassa tappivaarnaliitokseen vaikuttaa vain vetävä voima kohtisuoraan vaarnatapin akselin suhteen. Vaarnatapin ollessa malliltaan ja kooltaan identtisiä voidaan olettaa, että jokaiselle vaarnatapille jakaantuu yhtä suuri rasitus. [10.] Sidepulttia voidaan käyttää hyödyksi siirtämään leikkausvoimaa, jos se on liitosalueella kierteetön täsmäpultti, jonka lujuusluokka ja paksuus vastaavat vaarnatappia [4]. Mallilaskelmassa ei ole hyödynnetty sidepulttia.

Tappivaarnaliitoksessa liitinten pienet keskinäiset tai reunaetäisyydet voivat aiheuttaa liitoksen ennen aikaisen murtumisen [8]. Tämän välttämiseksi on noudatettava liittimien minimivälimatka vaatimuksia kuin myös liittimien minimi reuna- ja päätyetäisyyksiä, jotka näkyvät liitteessä 4 [10, s. 67].

### 5.2.4 Liitoksen lopullinen kapasiteetti

Eurokoodi vaatii laskennallisesti vähentämään syiden suuntaisesti sijoitettujen liittimien määrää vedetyissä sauvanpäälliitoksissa [10, s. 50]. Tämä tarkoittaa, että todellisten liittimien määrää vähennetään laskennallisesti tehollisten liittimien määräksi. CLT-rakenteille ei ole määritelty omaa laskentakaavaa tehollisten liittimien laskentaan. Mallilaskelmassa on sovellettu eurokoodin mukaisia kaavoja. Puun syysuuntaiseen riviin sijoitettujen tehollisten liittimien kapasiteettikaava on nähtävissä kaavassa 8 [10, s. 65]. Mallilaskelman CLT-elementin tappivaarnaliitos voitaneen olettaa vedetyksi sauvanpäälliitokseksi, mutta tämä ei ole niin yksiselitteistä, koska seinä on jatkuva rakenne eikä sauvanpää. Ristiinlaminoidussa massiivipuu-elementissä on myös lautakerroksia kohtisuoraan vetoa vastaan. Näin ollen eurokoodin ohjeiden kanssa muodostuu ristiriita.

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right.$$

missä

$a_1$  on syysuuntainen pulttiväli

$d$  on pultin halkaisija

$n$  on samassa rivissä olevien pulttien määrä.

(8)

Liitoksen lopullinen laskennallinen liittimien määrä  $F_{ef,d}$  saadaan kertomalla tehollinen syysuuntaisen rivin liittimien määrä syysuuntaa kohtisuoraan vastaan olevien liittimien määrällä. Lopullinen liitoksen kapasiteetti saadaan kertomalla tehollisten liittimien määrä yhden liittimen kapasiteetilla niin kuin on nähtävissä kaavassa 9. Liitoksen kapasiteetin pitää olla suurempi kuin liitoksessa vaikuttava vetovoima, jotta liitos kestäisi. Liitoksille ja rakenteille yleensä lasketaan rakenteen käyttöaste, joka kuvaa selkeästi liitoksen kapasiteettiasteen prosentuaalisesti. Käyttöaste lasketaan jakamalla liitoksessa vaikuttava vetovoima liitoksen kapasiteetilla. [10, s. 50.]

$$F_{ef,d} = n_{ef} * R_d$$

(9)

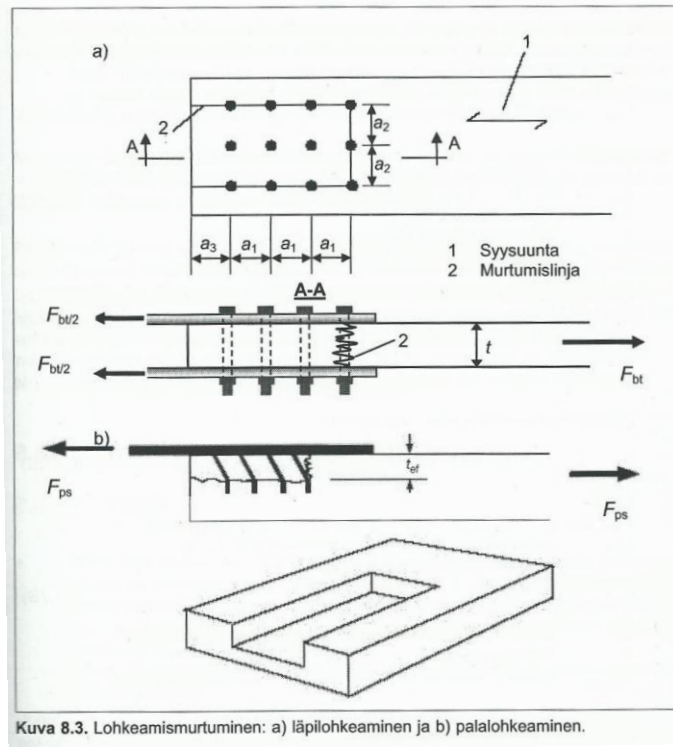
jossa

$n_{ef}$  on tehollisten liittimien lukumäärä

$R_d$  on yksittäisen liittimen leikkauskestävyys

### 5.2.5 Puun lohkeamismurtuminen

Vedetyissä tappivaarnaliitoksissa on otettava huomioon liitoksen uloimpia liittimiä pitkien tapahtuva puun lohkeamismurto. Lohkeamismurtotapoja ovat palalohkeaminen ja läpilohkeaminen [4, s. 99]. Lohkeamismurtotavat näkyvät kuvassa 10. Palalohkeaminen on kyseessä vain pintaliittimien yhteydessä esimerkiksi naulalevyjä käytettäessä. Läpilohkeamismurto on tarkastettava tappivaarna- ja pulttiliitoksissa.



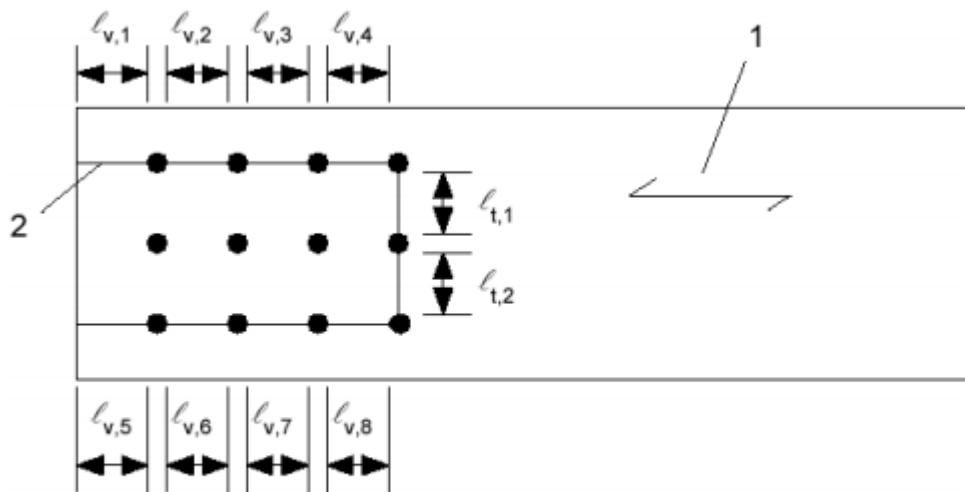
Kuva 8.3. Lohkeamismurtuminen: a) läpilohkeaminen ja b) palalohkeaminen.

Kuva 10. Puun lohkeamismurtotavat. [4.]

Mallilaskelmissa lohkeamismurtokestävyyden mitoittaminen on sovellus eurokoodin SFS-EN 1995-1-1:n mukaisesta mitoituksesta, koska CLT-levyn lohkeamismurtoon ei ole annettu erillisiä laskentaohjeita. CLT-rakenteiden mitoittamisessa ei saa käyttää RIL-suunnitteluohjeita, joiden mukaan lohkeamismurtomitoitusta tälle kyseiselle tapaukselle ei olisi tarvinnut suorittaa, koska puun syysuuntaisten vaarnatappien määrä on enintään neljä kappaletta ja näiden välinen poikittainen etäisyys on enemmän kuin neljä kertaa tapin halkaisija [4, s. 99]. CLT-rakenteiden mitoittamisessa on käytettävä sahatavaran suunnitteluarvoja, jos niitä ei ole VTT- tai ETA-lausunnossa määritetty [5]. Päädyin mitoittamaan lohkeamismurron vain CLT-levyn pystylamelleja käyttäen eli laskelmissa on otettu huomioon lamellit, jotka ovat murtumissuunnan mukaiset. Lohkeamismurtomitoituksen mallilaskelma on liitteessä 10. Mallilaskelmissa on käytetty 200 mm paksua CLT-levyä, jossa kaikki lamellit ovat 40 mm paksuja. Tarkemmat tiedot käytetystä CLT-levystä löytyvät liitteestä 1, jossa on Stora Enson CLT-levyjen vaariokoot. Mitoittaminen pelkästään pystylamelleja käyttäen on varmallalla puolella, koska pystylamellien paksuuden arvona käytetään 80 mm vaikka koko levyn paksuus on 200 mm. Tähän 80 mm paksuuteen olen ottanut huomioon vaarnatappien mahdollisen upotuksen ja tappivaarnaliittimessä olevan metallilevyn paksuuden.

”Lohkeamismurron mitoituskaavassa (A.1) leikkauslujuutena  $f_{v,k}$  käytetään CLT:n tasoleikkauslujuutta  $f_{R,k}$  (vastaavasti kuin LVL:llä)” [5, s. 2]. CLT:n tasoleikkauslujuuden viiden prosentin fraktaaloin ominaislujuusarvoa 1,25 N/mm<sup>2</sup> on esitetty ETA:n lausunnossa, jota olen käyttänyt mallilaskelmassa. Lohkeamismurron mitoitukseen tarvittava toinen ominaislujuus on puun vetolujuuden arvo. CLT-levyn vetolujuuden arvona laskemassa on käytetty C14-lujuusluokan mukaista sahatavaran arvoa, koska en ole löytänyt ohjetta CLT-levyjen vetolujuuden määrittämiseen. Päädyin C14-lujuusluokkaan, koska ETA-lausunnon mukaan CLT-levyissä käytetään vähintään C16-lujuusluokan puutavaraa. [15.]

Eurokoodin liitteen A-1 mukaan lohkeamismurtokestävyyden arvo  $F_{bs,Rk}$  mitoitetaan liitteessä 14 olevien kaavojen mukaisesti. Lohkeamismurtokestävyyden kaavoihin vaikuttaa liitoksen murtotapa, joka on määritelty tappivaarnaliitoksen mallilaskelmassa. Mitoituksessa käytetään kahta puun leikkauksen poikkipinta-alaa, jotka on määritelty liitteessä 14. Näiden poikkileikkauspinta-alojen laskemiseen tarvittavat  $L_{net,t}$  ja  $L_{net,v}$  saadaan kuvan 11 mukaisesti. [10, s. 99-100.]



**Selite:**

- 1 Syysuunta
- 2 Murtumislinja

Kuva 11. Palamurtumisen murtolinja. [10.]

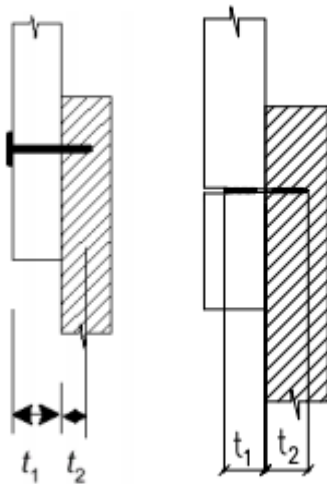
Tappivaarnaliitoksen mallilaskelmassa määräävä murtotapa on g, joka johtaa liitteessä 14 olevien  $A_{net,v}$  mitoituskaavoista alempana olevaan. Tässä kaavassa tarvitaan vaarnatappin murtumistavasta riippuvaa tehollista syvyyttä, joka kaavoissa on merkitty kirjaimilla  $t_{ef}$ . Tämän tehollisen syvyyden mitoituskaava on myös riippuvainen tappivaarna-

liitoksen murtotavasta, jotka näkyvät  $t_{ef}$ :n kaavojen oikealla puolella. Tehollisen syvyyden mitoituskaava on liitteessä 14. [10, s. 99-100.]

### 5.3 Elementtien välinen ruuviliitos

CLT-elementtien välisen ruuviliitoksen mitoittaminen menee eurokoodia soveltaen niin kuin tappivaarnaliitoksessa. Ruuviliitoksessa voidaan tappivaarnaliitoksen verrattuna hyödyntää köysivaikutusta, joka kasvattaa liitoksen kapasiteettia. Ruuviliitoksen mitoittamisessa käytetään ETA-lausunnon suunnittelu ja mitoitusarvoja ja laskennassa sovelletaan eurokoodia SFS-EN 1995-1-1. [5.] Mitoituksessa on otettava huomioon samat lujuudet, mitkä on mainittu tappivaarnaliitoksen mitoitusosiossa. ETA-lausunto mukaan, että CLT-rakenteissa pitää käyttää vähintään 6 mm halkaisijaltaan olevaa ruuvia [15]. Esiporaamattoman ruuviliitoksen mallilaskelma on näkyvässä liitteessä 11. Liitoksessa ruuvina on käytetty WT-T-6,5-160 itseporautuvaa ruuvia.

SFS-EN 1995-1-1 ei määrittele yksiselitteisesti itseporautuvaa ruuvia kohtisuoraan ruuvin akselia vastaan leikkauskuormituksessa, joten olen soveltanut sen mitoittamiseen kahden puuosan metalliliittimin tehtyjen naulaliitoksien ohjeita ja ruuvin valmistajan omia suunnitteluohjeita. Mitoittaessa ruuviliitosta tulee käyttää ruuvin tehollista halkaisijaa  $d_{ef}$ , joka on 1,1 kertaa ruuvin sydänmitta [10, s. 67]. Ruuveista puhuttaessa käytetään yleisesti ruuvin ulkokierteen ulkohalkaisijan mitta  $d$  niin kuin mallilaskelmassa on käytetty 6,5 mm paksua ruuvia. Tämän ruuvin sydänmitan  $d_i$  ollessa 3,95 mm mitoituksessa käytetään ruuvin tehollista halkaisijana 4,4 mm. Eurokoodin poikittain kuormittuvien naulojen mitoituksessa on käytettävä kuvan 12 mukaisia liittimen kannan ja kärjen puoleisia tunkeuman arvoja [10, s. 55-56]. Mallilaskelmissa käytetyn itseporautuvan ruuvin molempien  $t_1$  ja  $t_2$  arvoina olen käyttänyt 80 mm, koska ruuvi keskitetään CLT-elementtien saamaan kuvan 12 oikean puolen mukaisesti. Koska puun sisälle porattujen ruuvien tunkeuman pituuden määrittämiseen en ole löytänyt ohjeita, olen soveltanut ne kuvan 12 mukaisesti.



Kuva 12. Ruuvien tunkeumien  $t_1$  ja  $t_2$  määrittely. [10 s.56.]

Poikittain kuormitettujen yli 6 mm halkaisijaltaan oleville osakierteisille ruuveilla tulee soveltaa eurokoodin pulttiliitoksien määräyksiä ja ohuemmilla ruuveilla sovelletaan naulojen määräyksiä. Osakierteisten ruuvien ulkokierteen halkaisija on yhtä paksu kuin ruuvien sydänhalkaisija. [10, s. 57.] Mallilaskelmassa päädyin käyttämään naulaliitoksen määräyksiä, koska itseporautuvan ruuvien sydänhalkaisija on alle 6 mm, vaikka ruuvien ulkokierteen halkaisija on yli 6 mm. Ruuviliitoksilla noudatetaan eurokoodin mukaisia naulaliitoksen miniminaulaväliä, reuna- ja päätyetäisyyksiä, ettei liitoksessa tapahtuisi ennen aikaista murtumista. Nämä minimietäisyydet näkyvät taulukossa 4, jossa muuttuja  $d$ :nä on käytetty ruuvien tehollista halkaisijaa  $d_{ef}$  [10, s. 58].

Taulukko 4. Ruuvien minimietäisyydet. [10.]

| Väli tai etäisyys<br>(ks. kuvaa 8.7)                       | Kulma<br>$\alpha$                      | Naulavälin tai pääty- tai reunaetäisyyden vähimmäisarvo   |   |   |
|--|--|---|---|---|
|  |  | ei reikien esiporausta  |   | reikien esiporaus   |
|  |  | $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$  | $420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$   |   |
| Naulaväli $a_1$<br>(syysuunnassa)                          | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $d < 5 \text{ mm}$ :<br>$(5+5  \cos \alpha ) d$<br>$d \geq 5 \text{ mm}$ :<br>$(5+7  \cos \alpha ) d$ | $(7+8  \cos \alpha ) d$   | $(4+  \cos \alpha ) d$  |
| Naulaväli $a_2$<br>(syysuuntaa<br>vastaan<br>kohtisuoraan) | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $5d$  | $7d$  | $(3+  \sin \alpha ) d$  |
| Etäisyys $a_{3,1}$<br>(kuormitettuun<br>päähän)            | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  | $(10+5\cos \alpha) d$   | $(15+5\cos \alpha) d$   | $(7+5\cos \alpha) d$  |
| Etäisyys $a_{3,e}$<br>(kuormittamat-<br>tomaan päähän)     | $90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$  | $10d$   | $15d$   | $7d$  |
| Etäisyys $a_{4,1}$<br>(kuormitettuun<br>reunaan)           | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   | $d < 5 \text{ mm}$ :<br>$(5+2 \sin \alpha) d$<br>$d \geq 5 \text{ mm}$ :<br>$(5+5 \sin \alpha) d$     | $d < 5 \text{ mm}$ :<br>$(7+2 \sin \alpha) d$<br>$d \geq 5 \text{ mm}$ :<br>$(7+5 \sin \alpha) d$ | $d < 5 \text{ mm}$ :<br>$(3+2 \sin \alpha) d$<br>$d \geq 5 \text{ mm}$ :<br>$(3+4 \sin \alpha) d$ |
| Etäisyys $a_{4,e}$<br>(kuormittamat-<br>tomaan<br>reunaan) | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $5d$  | $7d$  | $3d$  |

### 5.3.1 Ruuvien mitoittaminen

”Määritettäessä metallisilla puikkotyypisillä liittimillä tehtävien liitosten kestävyys ominaisarvoa otetaan huomioon liittimen myötölujuus, reunapuristuslujuus ja ulosvetolujuus” [10, s. 51]. Ratkaisevinta CLT-rakententeissa ruuviliitoksen mitoittamisessa on sen reunapuristuslujuuden kaava, joka saadaan ETA-lausunnosta. CLT-levyn sivupintaan kohtisuoraan porattavan ruuvien reunapuristuslujuuden kaava on esitetty kaavassa 10. [15.]

$$f_{h,k} = 60 \cdot d^{-0,5} \text{ in N/mm}^2$$

jossa

$$d \text{ on ruuvien halkaisija mm:nä} \quad (10)$$

Ruuvien myötömomentin mitoituskaava on sama kuin vaarnatapilla, mikä näkyy kaavassa 5 [10 s.55]. Myötömomentin mitoituskaavasta saatavaa arvoa käytetään, jos ruuville ei ole erillisissä tutkimuksissa määritelty myötömomenttia [10 s.53]. SFS Intecin ruu-

viesitteen mukaan mallilaskelmassa käytetyn WT-T-6,5 ruuvien myötömomentin arvona tulee käyttää 10,9 Nm. Kuvassa 13 näkyy ruuvien ominaiset suunnitteluarvot [7].

## KIINNIKKEET

### WT-T-6,5xL

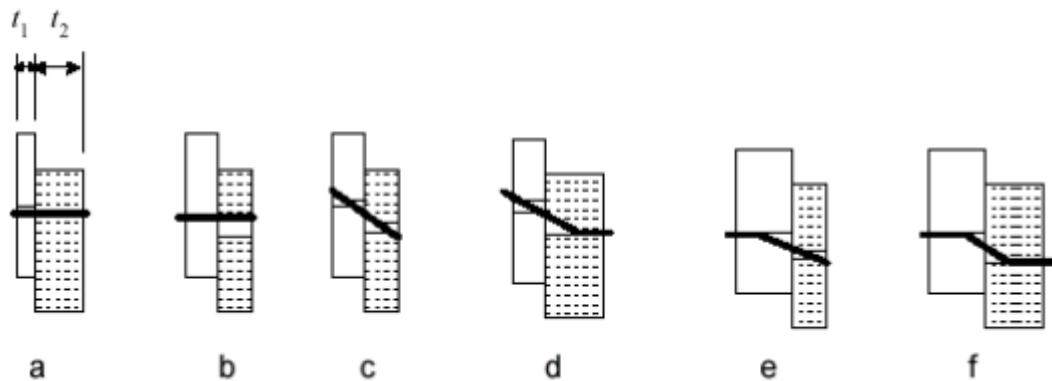
materiaali: hiiliteräs  
 vetolujuus:  $f_{tk} = 900 \text{ N/mm}^2$   
 myötömomenti:  $M_{yk} = 10,9 \text{ Nm} \cdot$   
 pinnoite: Durocoat® S  
 pinnoite Indoor: Delta  
 sydän ø: 3,95 mm  
 kierre ø: 6,5 mm  
 kanta ø: 8,0 mm



| WT-T-6,5xL |                |            |        |       |            |
|------------|----------------|------------|--------|-------|------------|
| tyyppi     | materiaali     | halkaisija | pituus | kanta | kärki      |
|            | T = hiiliteräs | $d_s$ (mm) | L (mm) | (mm)  | $s_s$ (mm) |
| WT         | T              | 6,5        | 65     | 28    | 28         |
| WT         | T              | 6,5        | 90     | 40    | 40         |
| WT         | T              | 6,5        | 130    | 40    | 40         |
| WT         | T              | 6,5        | 160    | 65    | 65         |

Kuva 13. WT-T-6,5 suunnitteluarvot. [7.]

CLT-elementtien välisen ruuviliitoksen yhden ruuvien leikkauskestävyyden ominaisarvon  $F_{v,Rk}$  mitoituskaavat ovat näkyvissä kaavassa 11. Mitoituskaavojen perässä oleva kirjain viittaa liitoksen murtumistapaan. Eri murtumistavat ovat nähtävissä kuvassa 14. [10 s.52-53.]



Kuva 14. Metalliliittimellä toteutettavan kahden erillisen puu-osan liitoksen murtumistavat. [10.]

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{n,1,k} t_1 d \quad (a) \\ f_{n,2,k} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{n,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{n,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{n,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{n,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{n,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{n,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right.$$

missä

$$\beta = \frac{f_{n,2,k}}{f_{n,1,k}}$$

- $F_{v,Rk}$  on kestävyuden ominaisarvo leikkaustasoa ja liittintä kohti  
 $t_i$  on puuosan tai levyn paksuus tai tunkeuma,  
 $f_{n,i,k}$  on puusauvan  $i$  reunapuristuslujuuden ominaisarvo  
 $d$  on liittimen paksuus tai halkaisija  
 $M_{y,Rk}$  on liittimen myötömomentin ominaisarvo  
 $\beta$  on sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde  
 $F_{ax,Rk}$  on liittimen ulosvetokestävyuden ominaisarvo.

(11)

Ruuvien mitoituskaavoissa on samalla tavalla kuin vaarnatapinkin mitoituskaavoissa oikeanpuolinen termi  $F_{ax,Rk}/4$ , joka tarkoittaa köysivaikutusilmiötä. Köysivaikutusilmiön saa ottaa huomioon ruuvien mitoituksessa täysimääräisesti, mutta sen suuruus saa olla korkeintaan yhtä suuri kuin puikkoliitosteorian mukainen osuus kapasiteetista. Mallilaskelmassa köysivaikutus on laskettu eurokoodin pitkittäin kuormitettujen ruuvien osion mukaisilla kaavoilla, jotka näkyvät kaavassa 12. Käytin eurokoodin mukaista laskentaohjetta, kun en löytänyt erillistä ohjetta koskien CLT-rakenteita. Mallilaskelmaan on käytetty ulosvetolujuuden ominaisarvona  $f_{ax,k}$  minimiarvoa kaavan 12 mukaisesta arvosta ja ruuvien valmistajan esitteen mukaisesta ominaisarvosta. [10 s.52-53; 7.]

$$F_{ax,k,Rk} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d \ell_{ef} k_d}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}$$

missä

$$f_{ax,k} = 0,52 d^{-0,5} \ell_{ef}^{-0,1} \rho_k^{0,8}$$

$$k_d = \min \left\{ \frac{d}{8}, 1 \right\}$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$  on ulosvetokestävyyden ominaisarvo [N], kun liitos on kulmassa  $\alpha$  syysuuntaan nähden

$f_{ax,k}$  on ulosvetolujuuden ominaisarvo [N/mm<sup>2</sup>], kun ruuvi on kohtisuorassa syysuuntaa vastaan

$n_{ef}$  on ruuvien tehollinen lukumäärä

$\ell_{ef}$  on kierreosan tunkeuma [mm]

$\rho_k$  on tiheyden ominaisarvo [kg/m<sup>3</sup>]

$\alpha$  on ruuvin akselin ja syysuunnan välinen kulma, kun  $\alpha \geq 30^\circ$ .

(12)

### 5.3.2 Ruuviliitoksen lopullinen kapasiteetti

Tehollisten eli laskennallisten ruuvien määrän laskentaan CLT-rakenteissa ei ole julkaistu erillistä laskentaohjetta, joten päädyin soveltamaan eurokoodin mukaista laskentaohjetta. Ruuvien tehollinen määrä voidaan laskea samalla kaavalla kuin on laskettu tappivaarvojen tehollinen määrä [10 s.56]. Eurokoodi antaa kuitenkin myönnytyksen ruuvien käyttöön, jos voima vaikuttaa syysuuntaisesti ja ruuvit sijoitetaan kuvan 15 mukaisesti. Kuvassa 15 peräkkäiset ruuvit eivät sijaitse syysuuntaisesti samassa linjassa vaan vähintään ruuvin sydänmitan verran toisistaan sivussa [10 s.56]. Tässä tapauksessa voidaan tehollisten ruuvien määrä laskea kaavalla, joka näkyy kaavassa 13. Kaavaan tarvittava  $k_{ef}$ -kerroin saadaan taulukosta 5 [10 s.56]. Jos ruuvien välinen etäisyys toisistaan on yli 14 kertaa ruuvin sydänmitta, niin ruuvien määrä ei tarvitse laskennallisesti vähentää [10]. Mallilaskelmassa ruuvien välinen etäisyys täyttää nämä ehdot, niin ruuvien tehollista määrää ei tarvitse laskea. Liitoksen lopullinen kokonaiskapasiteetti saadaan kertomalla ruuvien kokonaislukumäärä yhden ruuvin leikkauskapasiteetilla.

$$n_{ef} = n^{k_{ef}}$$

missä:

$n_{ef}$  on riviin kuuluvien naulojen tehollinen määrä

$n$  on riviin kuuluvien naulojen määrä

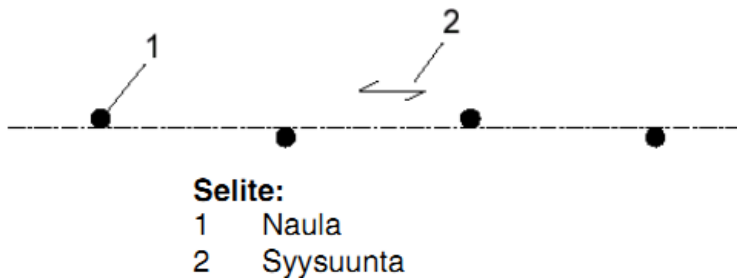
$k_{ef}$  esitetään taulukossa

(13)

Taulukko 5.  $K_{ef}$ -kertoimen määrittäminen. [10.]

| Naulaväli <sup>a</sup> | $K_{ef}$       |           |
|------------------------|----------------|-----------|
|                        | Ei esiporausta | Esiporaus |
| $a_1 \geq 14d$         | 1,0            | 1,0       |
| $a_1 = 10d$            | 0,85           | 0,85      |
| $a_1 = 7d$             | 0,7            | 0,7       |
| $a_1 = 4d$             | –              | 0,5       |

<sup>a</sup> Naulavälin väliarvoilla eksponentin  $K_{ef}$  arvo saadaan lineaarisesti interpoloimalla



Kuva 15. Ruuviliitoksen ruuvien sijoittelu. [10.]

#### 5.4 Teräslevyn mitoitus

Tappivaarnaliitoksessa olevan teräslevyn kestävyys pitää tarkastaa [10 s.53]. Tappivaarnalle aiheutuva vetovoima välittyy teräslevyn kautta vaarnatapeille ja siitä edelleen puulle. Tappivaarnaliitoksen teräsosat näkyvät liitteessä 13. Teräslevy siis välittää kokonaisuudessaan tappivaarnalle tulevan vetovoiman. Teräslevyn mitoitus lasketaan käyttäen standardeja SFS-EN 1993-1-1 ja SFS-EN 1993-1-8. Mitoituksessa oletetaan, että teräslevy ei nurjahda, kiepahda tai lommahda, koska se sijaitsee CLT-levyn välissä [4]. Liitteessä 2 näkyy teräslevyn sijainti tappivaarnaliitoksessa. Sidepultilla vielä varmistetaan teräslevyn hyvä kiinnitys.

Jäykistävän CLT-elementtiseinän mallilaskelmissa mitoitetaan teräslevyn vetokestävyys, reunapuristuskestävyys ja palalohkeamiskestävyys. Teräslevylle ei aiheudu puristusvoimia muuta kuin asennusaikaisesti, koska lopullinen seinä lepää koko pituudeltaan tuen päällä. Mallilaskelmassa ei ole huomioitu liitokselle aiheutuvia asennusaikaisia

rasituksia. Tappivaarnaliitoksen teräsosista pitäisi mitoittaa mallilaskelmien lisäksi pultin kestävyys ja tartunta pituus betoniin sekä hitsausliitos pultin alusteräsosan ja lattateräslevyn välille. Teräslevyn mitoituksen mallilaskelma näkyy liitteessä 12. Laskelmassa on teräslevylle käytetty standardin EN 10025-2 mukaista S355 teräslajia. Laskelman teräslevy on 6 mm paksu ja leveydeltään 280 mm. Kuumavalssatun teräslajin S355 vetomurtolujuuden suunnittelu-arvo on 510 N/mm ja myötörajan suunnittelu-arvo on 355 N/mm alle 40 mm rakennepaksuuksissa. Teräslevyn suunnittelussa on huomioitava siinä olevien reikien minimi keskiövälit, reuna- ja päätyetäisyydet ettei levyssä tapahdu enenaikaista murtumista. Liitteessä 6 on kerrottu nämä minimietäisyydet ja liitteessä seitsemän on kerrottu siihen käytetyt merkinnät. Liitteissä 6 ja 7 olevat reikien etäisyydet ja niiden määritelmät ovat SFS-EN 1993-1-8:n ruuveille ja niiteille tarkoitettujen reikien mukaiset. Teräslevyn murtorajatilamitoituksessa on käytetty eurokoodien mukaisia kuvassa 16 olevia osavarmuuslukuja. [21, s. 24-25; 22, s. 48 ja 26.]

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

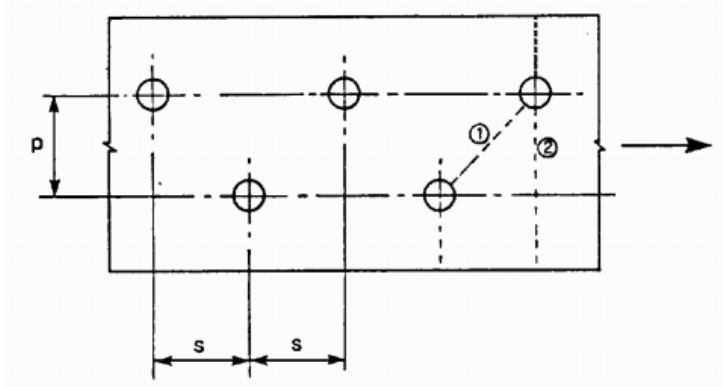
$$\gamma_{M1} = 1,00$$

$$\gamma_{M2} = 1,25.$$

Kuva 16. SFS-EN 1993-1-1 mukaiset osavarmuusluvut. [22.]

#### 5.4.1 Vetokestävyys

Teräslevyn vetokestävyuden mitoitusarvo on laskettava sen poikkileikkauksen brutto- ja nettopinta-alan mukaan. Poikkileikkauksen bruttopinta-ala on teräslevyn poikkileikkauuspinta-ala levyn ehjältä osuudelta ja nettopinta-ala on reikien kohdalta laskettava poikkileikkauuspinta-ala. Laskelmassa bruttopinta-ala merkitään kirjaimella  $A$  ja nettopinta-ala kirjaimella  $A_{\text{net}}$ . Jos teräslevyissä olevat reiät ovat useassa tasossa, on tarpeen laskea poikkileikkauksen nettopinta-alalle useita arvoja, kuten kuvassa 17 on kaksi mahdollista murtolinjaa. Eurokoodin mukaan tappivaarnaliitoksen ottaman vetovoiman mitoitusarvo  $N_{\text{ed}}$  pitää täyttää kaavassa 14 oleva ehto [22, s. 52]. Reiällisissä poikkileikkauksissa  $N_{\text{t,Rd}}$  on pienempi arvoista  $N_{\text{pl,Rd}}$  ja  $N_{\text{u,Rd}}$ , jotka ovat brutto- ja nettopoikkileikkauksen kestävyuden mitoitusarvot. Bruttopoikkileikkauksen kestävyuden kaava on 15 ja nettopoikkileikkauksen kestävyuden kaava on 16. [22, s. 49-50 ja 52.]



Kuva 17. Teräslevyssä olevat kaksi murtolinjaa (murtolinjat ympyröity). [22, s. 49.]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (14)$$

jossa

$N_{Ed}$  on normaalivoiman mitoitusarvo

$N_{t,Rd}$  on vetokestävyyden mitoitusarvo

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

jossa

$N_{pl,Rd}$  on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen normaali  
on voimakestävyyden mitoitusarvo

$f_y$  on myötöraja

$A$  on poikkileikkauksen bruttopinta-ala

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (16)$$

jossa

$A_{net}$  on poikkileikkauksen nettopinta-ala

$f_u$  on vetomurtolujuus

$N_{u,Rd}$  on nettopoikkileikkauksen kestävyden mitoitusarvo aksiaalille voimalle kiinnittimien reikien kohdalla

### 5.4.2 Reunapuristuskestävyys

Teräslevyn reunapuristuskestävyys tarkastetaan kaavalla 17 [21, s. 28], jossa  $F_{v,Ed}$  on yhden vaarnatapin suurin liitosta rasittava vetovoima ja  $F_{b,Rd}$  on vaarnatapin reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo. [21, s. 23.]

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (17)$$

jossa

$F_{v,Ed}$  on yhden vaarnatapin suurin liitosta rasittava vetovoima  
 $F_{b,Rd}$  on vaarnatapin reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo

Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavoilla, jotka näkyvät kuvassa 18. Kaavan merkinnät ovat selitetty liitteessä 7 ja mallilaskelmassa liitteessä 12.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$$

missä  $\alpha_b$  on pienin arvoista  $\alpha_d$ ;  $\frac{f_{ub}}{f_u}$  ja 1,0;  
 siirrettävän voiman suunnassa:

- levyn pään ruuveille:  $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$  ;
- muille kuin pään ruuveille:  $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$

kohtisuorassa suunnassa siirrettävään voimaan nähden:

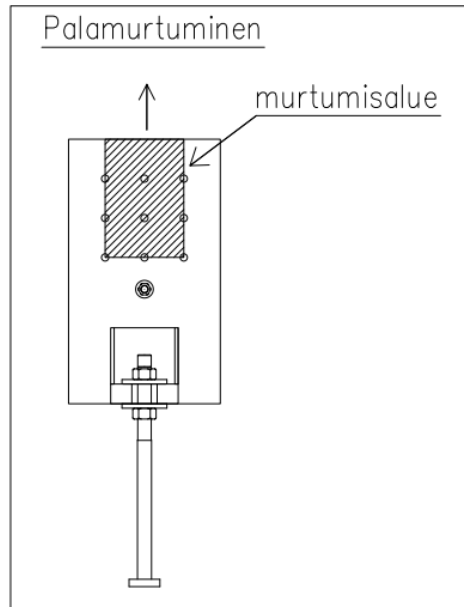
- reunarivin ruuveille :  $k_1$  on pienin arvoista  $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$  ja 2,5
- muille kuin pään ruuveille:  $k_1$  on pienin arvoista  $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$  ja 2,5

Kuva 18. Vaarnatapin reunapuristuskestävyys. [21, s. 28.]

### 5.4.3 Teräslevyn palamurtuminen

Palamurtumisessa teräslevyn murtuminen tapahtuu reikien keskilinjoja myöten. Murtuminen mitoitetaan laskemalla murtolinjan leikkauspinta-ala ja vetomurtumisen pinta-ala. Leikkaus- ja vetomurtokestävyyksien ollessa erisuuria erilaisia murtolinjoja voi olla

monia. Mitoituksessa on tutkittava näistä murtolinjoista heikoin, josta palamurtuminen voi tapahtua. Mallilaskelmassa palamurtumiskestävyys on mitoitettu täydelle vetovoimalle, joten murtolinja kulkee uloimpia tappivaarvoja pitkin, kuten kuvasta 19 on havaittavissa. Palamurtokestävyys mitoitetaan kaavalla 18. [21, s. 34.]



Kuva 19. Teräslevyn palamurtuminen. [21.]

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = f_u A_{\text{nt}} / \gamma_{\text{M}2} + (1 / \sqrt{3}) f_y A_{\text{nv}} / \gamma_{\text{M}0} \quad (18)$$

jossa

|                              |  |
|------------------------------|--|
| $A_{\text{nt}}$              | on vedon rasittama nettopinta-ala        |
| $A_{\text{nv}}$              | on leikkauksen rasittama nettopinta-ala  |
| $V_{\text{eff},1,\text{Rd}}$ | on palamurtumiskestävyuden mitoitussarvo |
| $f_y$                        | on myötöraja                             |
| $f_u$                        | on vetomurtolujuus                       |

## 6 Tulokset ja johtopäätökset

Opinnäytetyön tuloksina esittelen mallilaskelmassa tulleet eurokoodista sovelletut laskelmat ja vertailut mallilaskelmista saatavia kapasiteetteja liitoksien lopulliseen kestävyteen. Olen pyrkinyt tuomaan esille mitoituskohtia, joihin minun mielestä tarvitsisi vielä lisäselvitykset suunnitteluohjeistukseen. Mallilaskelmat on tehty Exceltaulukkolaskentaohjelmalla, mitkä ovat myös liitteinä 8-12 opinnäytetyön lopussa. Laskelmat sisältävät sovelluslaskelmat CLT-elementtirakenteisen jäykistysseinän yksinkertaisen staattisen ratkaisumallin, tappivaarnaliitoksen ja elementtien pystysauman ruuvi-liitoksen.

Mallilaskelmat on tehty eurokoodin kantavien puurakenteiden suunnittelumääräyksiä mukaillen [10]. CLT-rakenteiden mitoittamisessa ei saa käyttää mitään eurokoodista sovellettua ohjetta, kuten RIL 205-1-2009 [5]. Yleisen mielipiteen mukaan puurakenteiden suunnittelussa on suositeltavaa käyttää RIL 205-1-2009. Ongelmaksi muodostuu ohjeiden ja standardien puutteet, kun niissä ei ole mainintoja CLT-rakenteista. Puutteiden vuoksi osa laskelmista on suoritettu Stora Ensolta saaduilla ETA-08/0271-1- ja VTT-S-08104-11-lausunnoilla [15; 5]. Laskenta suoritetaan ensisijaisesti mukaillen ETA:n lausuntoa ja VTT:n lausunnon suunnitteluarvoja ja mitoitusperusteita käytetään niiltä osin, johon ETA-08/0271-lausunto ei ota kantaa.

### 6.1 Ankkurointivoima

Suomessa jäykistävänä toimivan massiivipuuseinän ankkuroinnin ongelmaksi muodostuvat vielä vähäiset suunnitteluohjeet ja kokemukset uuden materiaalin käytössä. CLT-elementtiseinän mitoitusmalli näkyy liitteessä 5 ja sen mallilaskelmat ovat liitteessä 8. Tappivaarnalle aiheutuvaa vetovoiman laskeminen menee eurokoodin mukaisesti, mutta haasteeksi muodostuu pystykuorman stabiloiva vaikutus vetovoiman laskennassa. Tähän pystykuorman hyödyntämiseen CLT-elementtiseinässä olisi hyvä saada lisää suunnitteluohjeita. Mallilaskelmassa olen hyödyntänyt pystykuorman vain ensimmäisen CLT-elementin matkalta, mikä on mielestäni ainakin varmalla puolella mitoittamista verrattuna, jos pystykuorma olisi hyödynnetty koko seinän matkalta. Yhdenkin elemen-

tin matkalta pystykuorman hyödyntäminen pienentää tappivaarnan vetovoimaa huomattavasti, mikä on huomattavissa mallilaskelmasta.

## 6.2 Elementtien pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima

CLT-elementtiseinän pystysaumoissa vaikuttavan leikkausvoiman laskentaan ei ole Suomessa annettu ohjeistusta, joten opinnäytetyössä on sovellettu kahta eri laskentamallia. Ensimmäinen laskentamalli on Martinssonin massiivipuukäsikirjan mukainen ja toinen eurokoodin levyjäykisteisen puurankaseinän A-menetelmän mukainen [10; 14]. Massiivipuukäsikirjan mitoitusteorian mukainen elementtiseinän murtotilanne näkyy kuvassa 9, mikä mielestä kuvastaa todellista murtotilannetta. Mallilaskelmissa nämä laskentamallit antavat lähes saman lopputuloksen, joten voidaan olettaa tuloksen olevan lähellä todellista pystysaumassa vaikuttavaa leikkausvoimaa. Saumanleikkausvoiman määrittämiseen olisi kuitenkin hyvä saada lisää suunnitteluohjeita, koska nämä ohjeet eivät ole yksiselitteisesti Suomeen toteutettaviin CLT-rakenteisiin tarkoitettuja.

## 6.3 Tappivaarnaliitoksen mitoitus

Tappivaarnaliitoksen mitoittamisessa sovelletaan eurokoodia niiltä osin, joihin ETA:n tai VTT:n lausunto ei ota kantaa [15; 5]. Mitoituksessa on haasteena CLT-elementin ristiinlaminointi, johon eurokoodi ei ote kantaa [10]. Vaarnatapin mitoituksessa ristiinlaminointi ei muodosta ongelmaa lausuntojen antaessa niihin tarvittavat suunnitteluarvot, mutta liitoksen lohkeamismurto mitoittaminen ja liittimien tehollisen määrän laskentaan ei ole yksiselitteisiä ohjeita.

Tappivaarnaliitoksen lohkeamismurron mallilaskelmassa on sovellettu eurokoodin [10] mukaisia laskentaohjeita, mutta siinä on hyödynnetty vain CLT-elementin syysuuntaan olevia lamelleja. Tämä sovelluslaskelma jättää kokonaan huomioimatta elementissä olevat vaakalamellit. Sovelluslaskelma antoi tarvittavan kapasiteetin tässä mitoitussmallissa, mutta olisi hyvä saada lisäohjeistusta CLT-elementin lohkeamismurron mitoitukseen. CLT-elementtien mitoittamiseen ei saa käyttää RIL:n suunnitteluohjeita, mutta sen mukaan näin pienelle liitokselle ei olisi tarvinnut suorittaa lohkeamismurtotarkastelua

[16]. Minustakin käyttöasteen jäädessä noin pieneksi pelkästään pystylamelleita käyttäen lohkeamismurtotarkastelu on tarpeeton.

Eurokoodi vaatii vähentämään liittimien laskennallista määrää vedetyissä sauvanpäälitoksissa ja niin on myös tehty mallilaskelmassa [10]. Tämä tehollisten liittimien mitoitus vähentää koko liitoksen kapasiteettia melkein kolmasosan. Minusta ristiinlaminoidussa massiivipuu-elementissä olevaa tappivaaranliitosta ei voi yksiselitteisesti ajatella sauvanpäälitokseksi, jossa voima vaikuttaa syiden suunnassa. Tämän ristiriidan vuoksi olisi hyvä saada lisää suunnitteluohjeita CLT-elementtiin toteutettaviin puikko-liitoksien mitoittamiseen.

Mallilaskelmassa tappivaarnaliitoksen käyttöaste on lähes yhtä suuri kuin ruuviliitoksen, mutta tappivaarnaliitoksen kokoa voisi vielä kasvattaa. Tappivaarnaliitoksen mitoituksessa ei otettu huomioon itse CLT-levyn kestävyyttä, joka voi tulla kuitenkin rajoittavaksi tekijäksi suuremman luokan tappivaarnaliitoksissa.

#### **6.4 Ruuviliitoksen mitoitus**

Mallilaskelman mukainen ruuviliitos on toteutettu liitteessä 3 olevalle VE1:n mukaiselle WT-T-ruuviliitokselle, jossa ruuveja ei ole esiporattu [7]. Elementtien välinen ruuviliitos on toteutettu perinteisesti eli ruuvi on kohtisuoraan liitettävää CLT-elementtiä vasten. Mallilaskelmassa olen soveltanut eurokoodin naulaliitoksen suunnitteluohjeita niiltä osin mihin ETA:n, VTT:n tai ruuvin valmistajan lausunto ei ota kantaa [5; 7; 10; 15]. Ruuviliitoksen mitoittaminen onnistui näillä ohjeilla yksiselitteisesti lukuun ottamatta itseporautuvan ruuvin tunkeumien määrittämistä. Mallilaskelmassa sovelsin ruuvin tunkeumien määrittämisen kuvan 12 mukaisesti. Eurokoodi ei määrittele yksiselitteisesti itseporautuvaa ruuvia leikkauskuormituksessa kohtisuoraan ruuvin akselia vastaan. RIL:n suunnitteluohje erottelee itseporautuvien ruuvien suunnitteluohjeet, mutta SFS-EN 1995-1-1 ei tunne tällaista ruuvityyppiä [16]. Itseporautuvilla ruuveilla toteuttavan liitoksen mitoittamiseen CLT-rakenteissa olisikin hyvä tulla yksiselitteiset suunnitteluohjeet, kun RIL:n ohjeita ei saa käyttää.

Ruuviliitoksen mitoituksessa voidaan hyödyntää liittimen köysivaikutus-ilmiötä, jota ei saa ottaa huomioon tappivaarnaliitoksen mitoituksessa. Köysivaikutuksen laskentaan mallilaskelmassa on käytetty eurokoodin pitkittäin kuormitettujen ruuvien mitoitusohjeita. [10.] Mallilaskelmassa ruuviliitoksen kestävydestä köysivaikutuksen osuus on noin kymmenesosa. Tämä johtuu ruuvin valmistajan antamasta ulosvetoparametrin arvosta  $f_{ax,k}$ , joka on neljä kertaa pienempi eurokoodin laskentaohjeiden mukaisesta arvosta [7]. Mallilaskelmassa köysivaikutus ei nostanut liitoksen kokonaiskapasiteettia paljoa tässä tapauksessa, mutta ihmetyttää noinkin suuri ero eurokoodin ja ruuvin valmistajan antaman arvojen välillä.

CLT-elementtiseinän mallilaskelmissa elementtien välinen ruuviliitos tuli mitoittavaksi eli sen käyttöaste on suurin. Ruuvien jaon ollessa 150 mm ja sallitun minimijaon ollessa 100 mm oletan, että pystyliitos tulisi mitoittavaksi kaikissa CLT-elementtien jäykistysseinissä käytettäessä mallilaskelmien mukaisia liitoksia. Ruuviliitoksen kapasiteettia olisi voinut vielä kasvattaa tekemällä se vinoruuvaustekniikalla, mutta se ei ollut tarpeen näillä kuormituksilla [25]. Todellista ruuviliitoksen kapasiteettia kuvastaa siitä julkaistu tutkimus [18], jossa itseporautuvilla toteutetun samantyyppisen liitoksen todellinen kestävyys on kaksi kertaa suurempi kuin laskennallinen. Tästä voidaan päätellä, että mitoitus on reilusti varmallalla puolella. Ruuviliitoksien suunnittelu- ja toteutusohjeissa on vielä kehitettävää ja tutkittavaa, mutta kuitenkin näillä tiedoilla ja taidoilla voidaan toteuttaa turvallisia ja toimivia rakenneratkaisuja.

#### 6.4 Teräslevyn mitoitus

Mallilaskelmassa mitoitetaan tappivaarnaliitoksen teräslevyn vetokestävyys, reunapuristuskestävyys ja palamurtuminen eurokoodien SFS-EN 1993-1-8:n ja SFS-EN 1993-1-1:n mukaisesti. Teräslevyn ei oleteta nurjahtavan, kiepahtavan tai lommahtavan, koska se sijaitsee CLT-levyn välissä ja sidepultilla vielä varmistetaan sen kiinnitys. Teräslevyn sijainti näkyy liitteessä 2 ja tappivaarnaliitoksen teräsosat liitteessä 13. Mallilaskelmassa teräslevyn mitoituksen käyttöasteet jäivät todella pieneksi vaarnatappien ollessa tarpeeksi kaukana toisistaan jo tappivaarnaliitoksen mitoituksesta saatavien tappien minimietäisyyksien ansiosta. Liitoksen teräsosista pitäisi mitoittaa tämän teräslevyn lisäksi levyn hitsausliitokset, pultin kestävyys ja kaikki teräsosat asennusaikaisille rasiuksille.

## 7 Pohdinta

Opinnäytetyössä mielestäni onnistuin luomaan luotettavat ja varmallalla puolella olevat eurokoodin mukaiset sovelluslaskelmat vaikka suunnitteluohjeissa on vielä aukkoja ja ohjeet eivät ole kaikin puolin yksiselitteisiä. Mallilaskelmien lisäksi pyrin tuomaan esille mitoituskohdat, joihin minun mielestä tarvitsisi vielä lisäohjeistusta. Tulevaisuudessa Excel-mallilaskelmia voidaan käyttää rakennesuunnittelun ja suunnitteluohjeiden kehityksen apuvälineinä.

Opinnäytetyöprosessi ja työnaiheen rajaus onnistui hyvin ja ehdin perehtyä aiheeseen tarpeeksi syvällisesti vaikka lähdeaineistojen etsimiseen ja mallilaskelmien luomiseen meni oletettua enemmän aikaa. RIL:n ja muiden eurokoodien lyhennettyjen suunnitteluohjeiden käyttökielto teki mallilaskelmien toteuttamisesta paljon työläämpää kuin oletin. Opinnäytetyöprosessin aikana opin paljon rakennusten jäykistämisestä ja liitoksien suunnittelusta. Mielestäni näitä osa-alueita ei opeteta koulussa tarpeeksi, vaikka ne ovat yksiä tärkeimmistä osioista rakennesuunnittelussa. Opinnäytetyöprosessissa perehdyin syvällisemmin puurakentamiseen ja tulevaisuudessa tavoitteeni on myös olla mukana tällä rakentamisen sektorilla.

Opinnäytetyöni tuloksista käy ilmi, että kehitettävää aiheen parissa vielä on. Opinnäytetyötä voidaan käyttää tulevaisuudessa pohjana tutkimushankkeille ja yhdistää se mahdollisiin muihin rakennuksen jäykistyslaskelmiin. Olisikin hyvä saada sovelluslaskelmat kokonaisen kerrostalon jäykistämisestä CLT-rakenteilla niin kuin on esimerkiksi ruotsinkielisessä massiivipuukäsikirjassa. Hyvä olisi myös saada suomenkielisiä tutkimuksia, joko toteuttamalla niitä itse tai käännettämällä jo muualla Euroopassa tehtyjä CLT-rakenteisiin liittyviä tutkimuksia ja käsikirjoja. RIL:n ja muiden eurokoodien lyhennettyn suunnitteluohjeiden käyttöoikeus helpottaisi todella paljon rakennesuunnittelua, koska tällä hetkellä vaadittava eurokoodin mukainen mitoittaminen on työläämpää. Kaiken kaikkiaan mielestäni CLT-elementtitekniikan suunnitteluohjeissa on vielä kehitettävää, mutta kuitenkin näillä nykyisillä tiedoilla ja taidoilla voidaan toteuttaa turvallisia ja toimivia rakenneratkaisuja.

## Lähteet

1. Stora Enso. clt-info, CLT-elementtien yleiskuvaus. 17.1.2012  
<http://www.clt.info/index.php?id=8&L=2>
2. Puuinfo. Eurokoodin selitysosio. 24.3.2012  
<http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/eurokoodit/eurokoodit>
3. Ympäristöministeriö. Tiedote eurokoodien käyttöönotosta. 24.3.2012  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=350390&lan=fi&clan=fi>
4. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 205-1-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki. 2009. ISBN 978-951-758-510-1
5. VTT Expert Services Oy, Ari Kevarinmäki. Lausunto CLT-rakenteiden suunnittelussa käytettävistä ominaisuuksista, suunnitteluarvoista ja mitoitusperusteista, NRO VTT-S-08014-11. Espoo. Julk. 15.11.2011.
6. Follessa, M. Brunetti, M. Cornacchini, R. & Grasso, S. Mechanical in-plane joints between cross laminated timber panels. WCTE (World Conference on Timber Engineering). 2010.
7. SFS intec Oy. Puukiinnikkeiden esite ja suunnitteluohje. Lohja. 24.3.2012.
8. Valtion teknillinen tutkimuskeskus ja Rakennustieto Oy. Step 1, puurakenteet. Tampere. 1996.
9. FPinnovations. CLT-handbook: cross-laminated timber. Québec. 2011. ISBN 978-0-86488-547-0
10. SFS-EN 1995-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu, Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2.painos, vahvistettu 13.10.2008. Helsinki. 2008.
11. Ympäristöministeriö. Eurokoodi SFS-EN 1995-1-1 + A1 + AC Suomen kansalliset liitteet 16 ja 32. Helsinki. 2009.
12. Kangas, J. Puurakenteet 3, Liitokset. Jyväskylä. 1982. ISBN 951-676-089-9
13. Puuinfo. CLT-levy. 24.3.2012.  
<http://www.puuinfo.fi/tuotteet/clt-levy-cross-laminated-timber-ristiinliimattumassiivipuulevy-runko-valipohja-ja-kattorakentamiseen>
14. Martinsons Byggsystem AB. Massivträ Handboken 2006. Byggsiljum, Sweden 2006.
15. DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik). Eurooppalainen tekninen hyväksynnän lausunto ETA-08/0271: Massiivipuulevyt, jotka on tarkoitettu käytettäväksi rakennusten rakenne-elementteinä. Berlin, Saksa. 2009.
16. RIL & RKL. Suunnittelijoiden mekaniikkamoduuli, rakennusrungon stabiliteetti. Helsinki. 2005.
17. KLH UK. Component catalogue for cross laminated timber. 7.4.2012.  
[http://www.klhuk.com/media/30351/klh\\_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures\\_version%2001\\_2011.pdf](http://www.klhuk.com/media/30351/klh_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures_version%2001_2011.pdf)
18. T. Uibel & H. J. Blaß. Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels, CIB-W18/39-7-5. Karlsruhe Yliopisto, Saksa. 2006.
19. Eurocodes-online. Eurokoodien tarkoitus. 24.3.2012  
[http://www.eurocodes-online.com/index.php/fi\\_FI/fi/about-the-eurocodes-2/principles-of-the-eurocode](http://www.eurocodes-online.com/index.php/fi_FI/fi/about-the-eurocodes-2/principles-of-the-eurocode)
20. Eurokoodi Help Desk. Tiedote B-sarjan soveltamisesta eurokoodimitoituksessa. 24.3.2012  
<http://www.eurocodes.fi/Eurokoodien%20tilanne%20nyt/eurokoodien%20kayttoonotto.tiedote.pdf>
21. SFS-EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu, liitosten mitoitus, vahvistettu 15.08.2005. Helsinki. 2006.

22. SFS-EN 1993-1-1. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu, yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, vahvistettu 15.8.2005. Helsinki. 2006.
23. Rakennustaito. Järeät puulevyt tulossa myös suomalaiseen kerrostalorakentamiseen. Julkaistu rakennustaitolehdestä 2/2011 s.40 ja internetissä.  
<http://www.rakennustieto.fi/lehdet/rakennustaito/index/lehti/5z6piFivE.html>
24. Kevarinmäki, A. VTT-tiedote, Puurakenteiden uusia liitostekniikoita, Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 38, No. 2. 2005
25. Yli-Koski, R. & Kevarinmäki A. Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet puurakenteiden liitoksissa, VTT-tiedote 2279. Espoo. 2005
26. Kähkönen, L. Kantavat puurakenteet. Helsinki. 1985. ISBN 951-676-324-3
27. Lehtinen, T. Huuhtanen, J. Järvelä, R. Kalamies, U. Nurro, P. & Tuominen, T. Puurakenteiden jäykistysuunnittelu ohje, VTT. 2006

## CLT-levyjien standardikoot

## Standardaufbauten

CLT – CROSS LAMINATED TIMBER

Aufbau C-Platten (Die Faserrichtung der Decklagen verläuft immer parallel zu unseren Plattenbreiten.)

| Nennstärke<br>[mm] | Bezeichnung | Schichten<br>[-] | Lamellenaufbau |    |    |    |    | Plattenbreiten<br>Standard<br>[cm] | Plattenlänge<br>Maximal<br>[cm] |
|--------------------|-------------|------------------|----------------|----|----|----|----|------------------------------------|---------------------------------|
|                    |             |                  | C              | L  | C  | L  | C  |                                    |                                 |
| 80                 | C3s         | 3                | 20             | 20 | 20 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 80                 | C3s         | 3                | 30             | 20 | 30 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 90                 | C3s         | 3                | 30             | 30 | 30 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 100                | C3s         | 3                | 30             | 40 | 30 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 120                | C3s         | 3                | 40             | 40 | 40 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 100                | C5s         | 5                | 20             | 20 | 20 | 20 | 20 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 120                | C5s         | 5                | 30             | 20 | 20 | 20 | 30 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 140                | C5s         | 5                | 40             | 20 | 20 | 20 | 40 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 160                | C5s         | 5                | 40             | 20 | 40 | 20 | 40 | 245; 275; 295                      | 1600                            |



Aufbau L-Platten (Die Faserrichtung der Decklagen verläuft immer rechtwinklig zu unseren Plattenbreiten.)

| Nennstärke<br>[mm] | Bezeichnung | Schichten<br>[-] | Lamellenaufbau |    |    |    |    | Plattenbreiten<br>Standard<br>[cm] | Plattenlänge<br>Maximal<br>[cm] |
|--------------------|-------------|------------------|----------------|----|----|----|----|------------------------------------|---------------------------------|
|                    |             |                  | L              | C  | L  | C  | L  |                                    |                                 |
| 80                 | L3s         | 3                | 20             | 20 | 20 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 90                 | L3s         | 3                | 30             | 30 | 30 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 80                 | L3s         | 3                | 30             | 20 | 30 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 100                | L3s         | 3                | 30             | 40 | 30 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 120                | L3s         | 3                | 40             | 40 | 40 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 100                | L5s         | 5                | 20             | 20 | 20 | 20 | 20 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 120                | L5s         | 5                | 30             | 20 | 20 | 20 | 30 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 140                | L5s         | 5                | 40             | 20 | 20 | 20 | 40 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 160                | L5s         | 5                | 40             | 20 | 40 | 20 | 40 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 180                | L5s         | 5                | 40             | 30 | 40 | 30 | 40 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 200                | L5s         | 5                | 40             | 40 | 40 | 40 | 40 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 160                | L5s-2*      | 5                | 60             | 40 | 60 |    |    | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 180                | L7s         | 7                | 30             | 20 | 30 | 20 | 30 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 200                | L7s         | 7                | 20             | 40 | 20 | 40 | 20 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 240                | L7s         | 7                | 30             | 40 | 30 | 40 | 30 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 220                | L7s-2*      | 7                | 60             | 30 | 40 | 30 | 60 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 240                | L7s-2*      | 7                | 80             | 20 | 40 | 20 | 80 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 260                | L7s-2*      | 7                | 80             | 30 | 40 | 30 | 80 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 280                | L7s-2*      | 7                | 80             | 40 | 40 | 40 | 80 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 300                | L8s-2**     | 8                | 80             | 30 | 80 | 30 | 80 | 245; 275; 295                      | 1600                            |
| 320                | L8s-2**     | 8                | 80             | 40 | 80 | 40 | 80 | 245; 275; 295                      | 1600                            |



\* 5- bzw. 7-schichtig; äußere Lagen bestehend aus 2 Längslagen

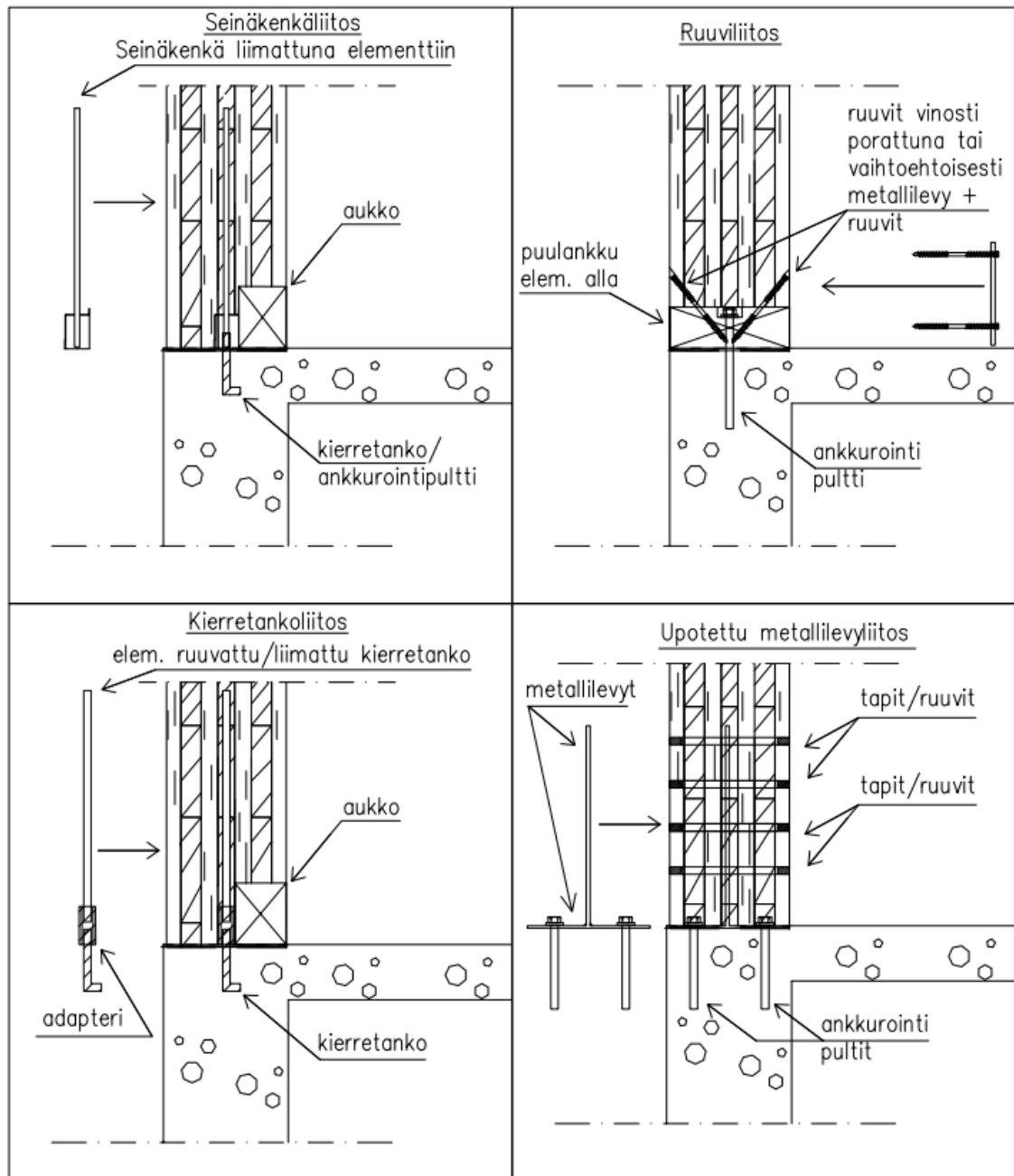
\*\* 8-schichtig; äußere Lagen sowie die innere Lage bestehend aus 2 Längslagen

Bezeichnung der Platten: z.B.: CLT 100 C3s oder CLT 260 L7s-2 (L: Decklage längs, C: Decklage quer)

Status: 09/2011



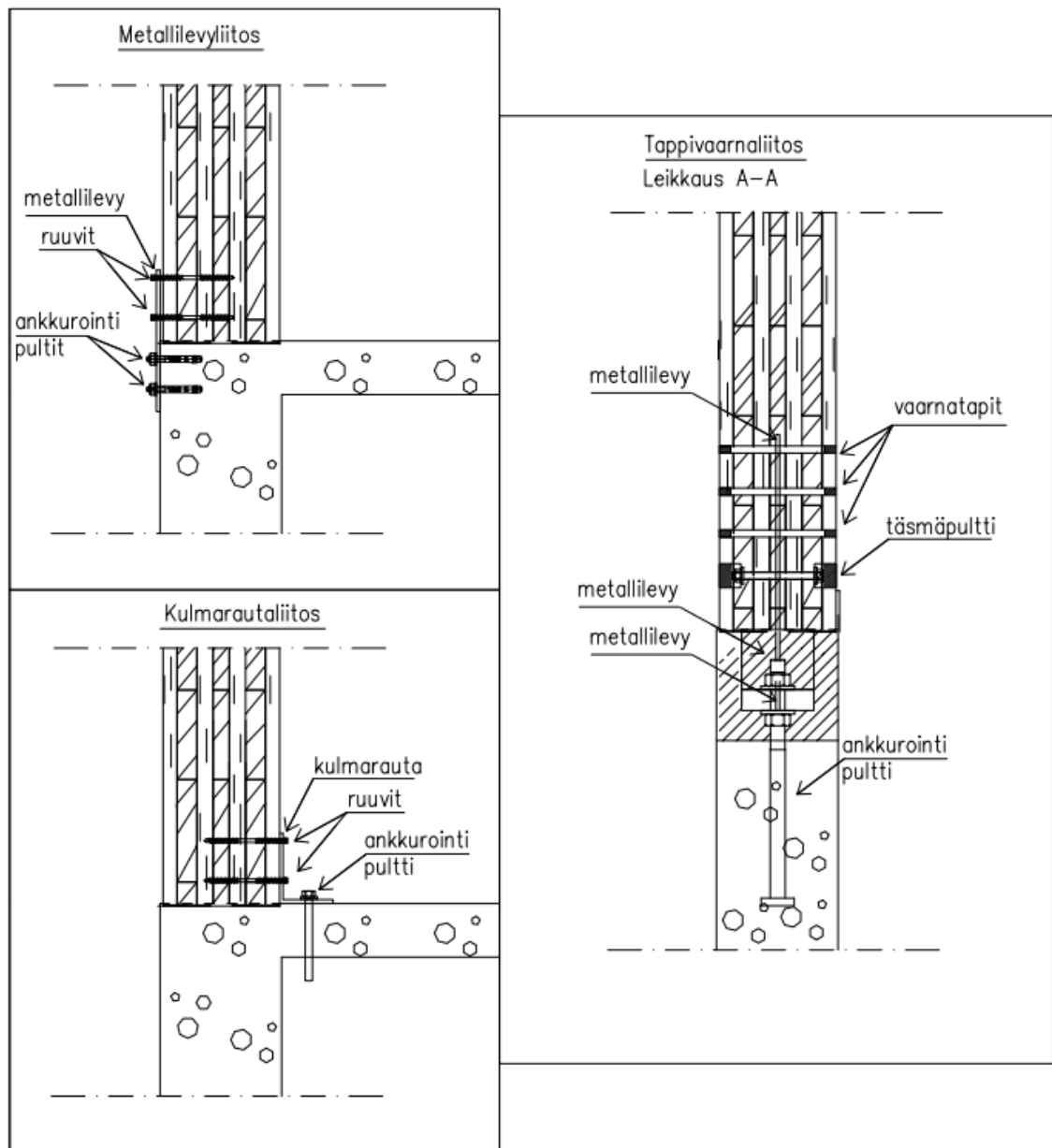
## CLT-elementin ankkurointiliitoksia



Lähde: FPinnovations. CLT-handbook: cross-laminated timber. Québec. 2011. ISBN 978-0-86488-547-0 ja KHL UK. Component catalogue for cross laminated timber. 7.4.2012.

[http://www.klhuk.com/media/30351/klh\\_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures\\_version%2001\\_2011.pdf](http://www.klhuk.com/media/30351/klh_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures_version%2001_2011.pdf)

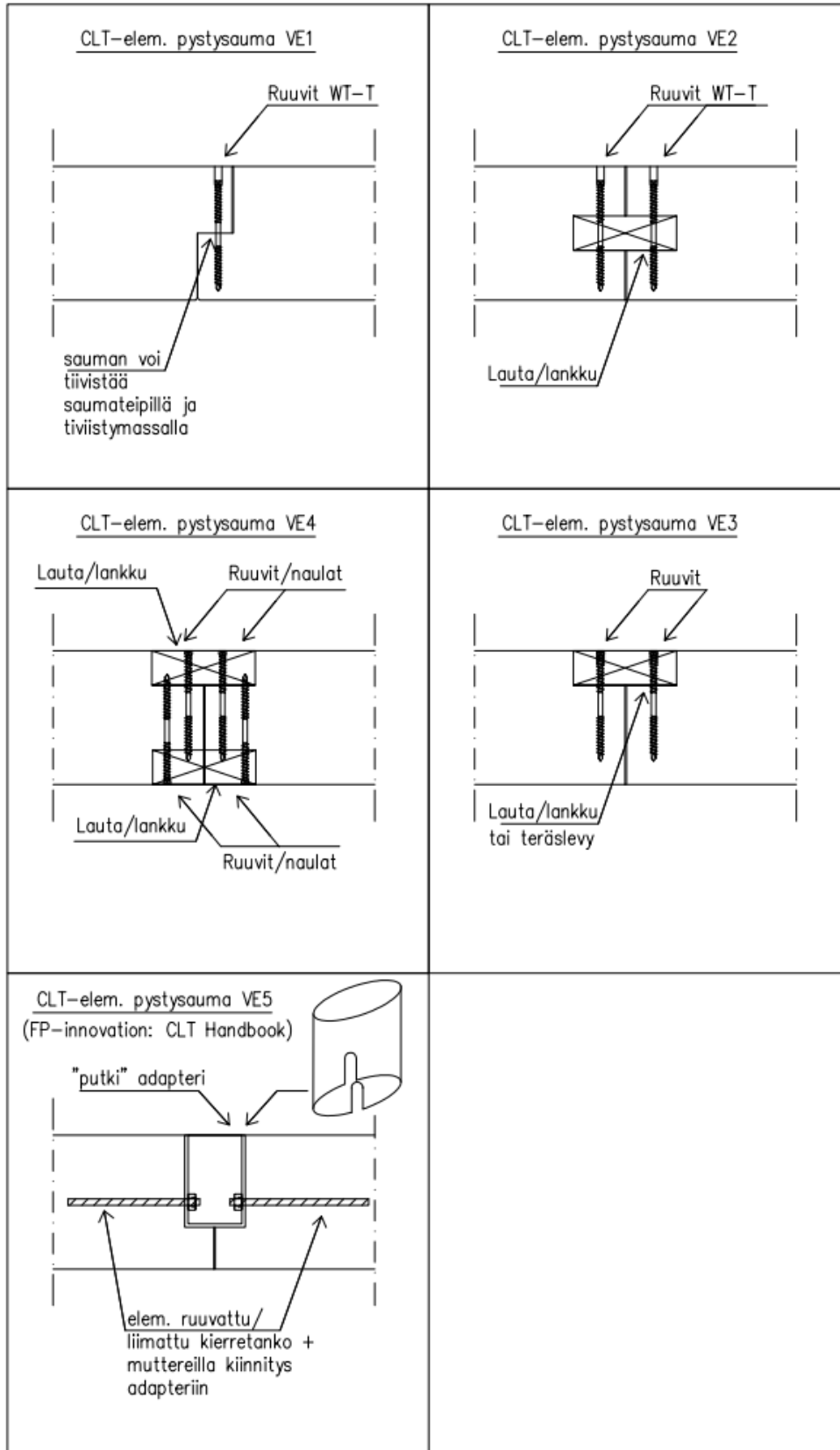
## CLT-elementin ankkurointiliitoksia



Lähde: FPInnovations. CLT-handbook: cross-laminated timber. Québec. 2011. ISBN 978-0-86488-547-0 ja KHL UK. Component catalogue for cross laminated timber. 7.4.2012.

[http://www.klhuk.com/media/30351/klh\\_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures\\_version%2001\\_2011.pdf](http://www.klhuk.com/media/30351/klh_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures_version%2001_2011.pdf)

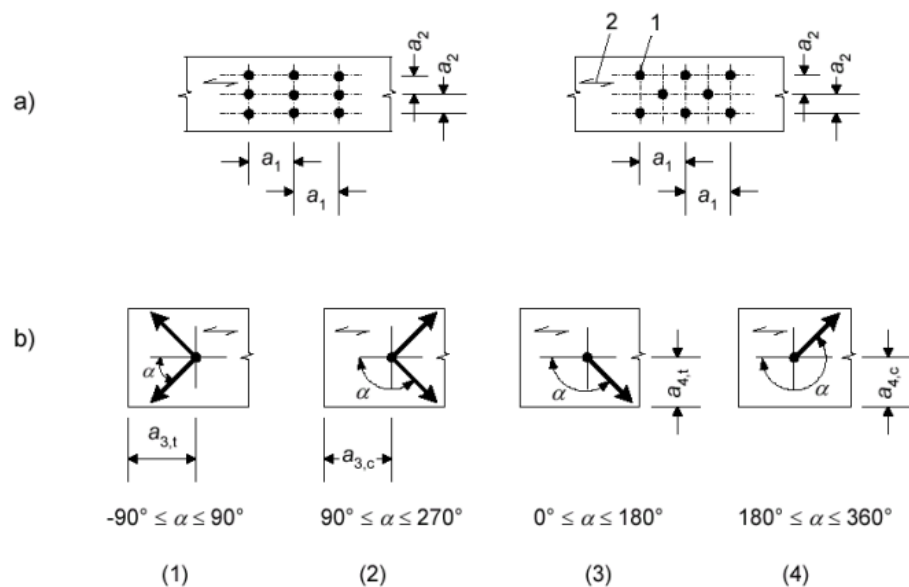
CLT-elementtien välisiä pystyliitoksia



Lähde: FPinnovations. CLT-handbook: cross-laminated timber. Québec. 2011. ISBN 978-0-86488-547-0

## Tappivaarujen minimietäisyydet

| Tappivaarujen liitinvälit sekä reuna- ja päätyetäisyydet (ks. kuvaa 8.7) | Kulma   | Tappivaarujen liitinvälien tai reuna- tai päätyetäisyyksien vähimmäisarvot                  |
|--|---|---|
| $a_1$ (syysuuntaan)  | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  | $(3 + 2  \cos \alpha ) d$   |
| $a_2$ (syysuuntaa vastaan kohtisuoraan)                                  | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  | $3 d$   |
| $a_{3,t}$ (kuormitettu pää)  | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$   | $\max \{7 d; 80 \text{ mm}\}$   |
| $a_{3,c}$ (kuormittamaton pää)   | $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$<br>$150^\circ < \alpha \leq 210^\circ$<br>$210^\circ < \alpha \leq 270^\circ$ | $\max \{a_{3,t}  \sin \alpha  d; 3 d\}$<br>$3 d$<br>$\max \{a_{3,t}  \sin \alpha  d; 3 d\}$ |
| $a_{4,t}$ (kuormitettu reuna)  | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  | $\max \{(2 + 2 \sin \alpha) d; 3 d\}$   |
| $a_{4,c}$ (kuormittamaton reuna)   | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  | $3 d$   |

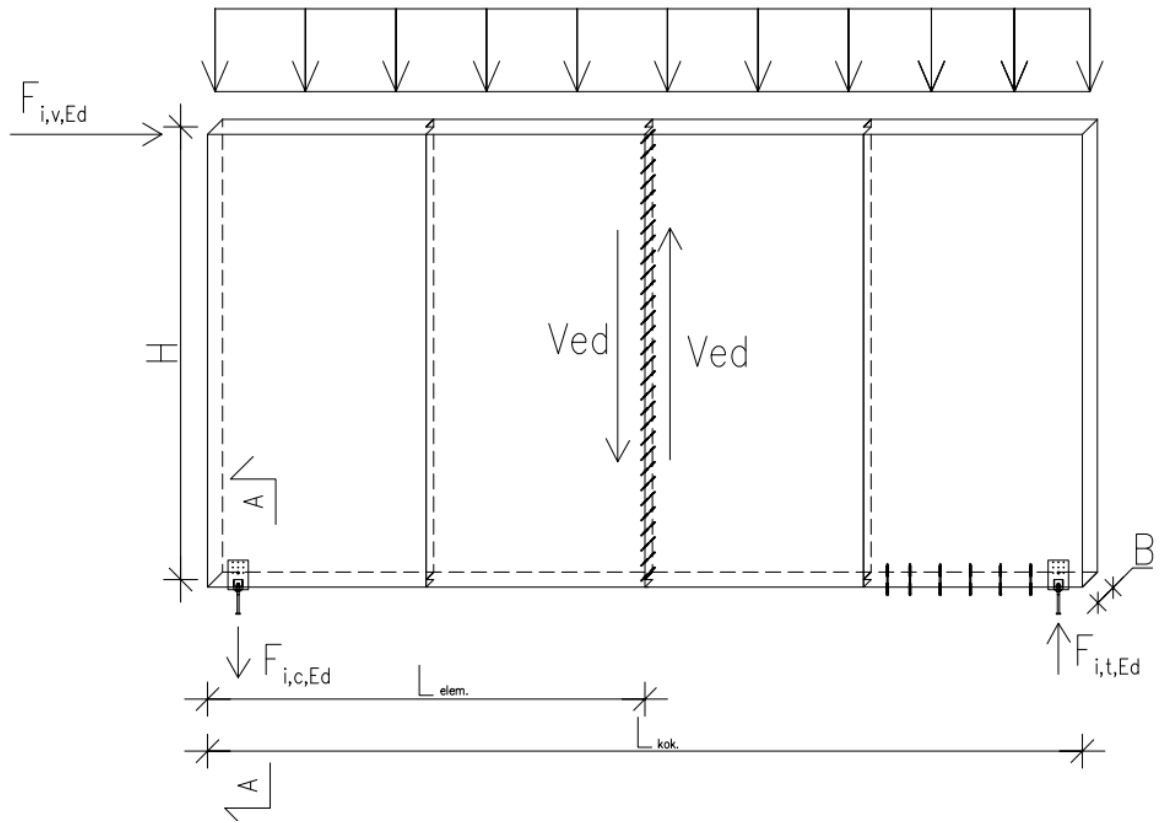
**Selite:**

- (1) kuormitettu pää
- (2) kuormittamaton pää
- (3) kuormitettu reuna
- (4) kuormittamaton reuna
- 1 naula
- 2 syysuunta

Kuva 8.7 Liitinvälit sekä liitinten pääty- ja reunaetäisyydet: (a) syysuuntainen liitinväli ja syysuuntaa vastaan kohtisuora liitinväli, (b) liittimien reuna- ja päätyetäisyydet

Lähde: SFS-EN 1995-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu, Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2.painos, vahvistettu 13.10.2008. Helsinki. 2008.

Mallilaskelman mitoitusmalli



## Teräslevyssä olevien reikien keskiöväli, reuna- ja päätyetäisyydet

| Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli, ks. kuva 3.1 | Minimiarvo             | Maksimiarvo <sup>1) 2) 3)</sup>   |  |   |
|---|------------------------|---|--|---|
|   |                        | EN 10025 mukaisista teräksistä (paitsi EN 10025-5:n mukaiset teräkset) tehdyt rakenteet |  | EN 10025-5 mukaisista teräksistä tehdyt rakenteet |
|   |                        | Säälle tai muille korroosiorasituksille altis rakenne                                   | Rakenne, joka ei ole altis säälle tai muille korroosiorasituksille | Suojaamaton rakenne                               |
| Päätyetäisyys $e_1$                                     | $1,2d_0$               | $4t + 40$ mm  |  | Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm                  |
| Reunaetäisyys $e_2$                                     | $1,2d_0$               | $4t + 40$ mm  |  | Suurempi arvoista $8t$ or 125 mm                  |
| Etäisyys $e_3$<br>Pidennetyissä rei'issä                | $1,5d_0$ <sup>4)</sup> |   |  |   |
| Etäisyys $e_4$<br>Pidennetyissä rei'issä                | $1,5d_0$ <sup>4)</sup> |   |  |   |
| Keskiöväli $p_1$  | $2,2d_0$               | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm   | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm                                  | Pienempi arvoista $14t_{\min}$ ja 175 mm          |
| Keskiöväli $p_{1,0}$                                    |                        | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm   |  |   |
| Keskiöväli $p_{1,l}$                                    |                        | Pienempi arvoista $28t$ ja 400 mm   |  |   |
| Keskiöväli $p_2$ <sup>5)</sup>                          | $2,4d_0$               | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm   | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm                                  | Pienempi arvoista $14t_{\min}$ ja 175 mm          |

1) Keskiöväleillä, pääty- ja reunaetäisyyksillä ei ole ylärajaa paitsi seuraavissa tapauksissa:

- puristetussa rakenneosissa paikallisen lommahduksen ja korroosion välttämiseksi korroosiorasituksen alaisena ja;
- korroosiorasitukselle alttiit vedetyt rakenneosat korroosion välttämiseksi.

2) Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallinen lommahdus lasketaan standardin EN 1993-1-1 mukaan olettamalla levy pilariksi ja käyttämällä nurjahduspituutena arvoa  $0,6p_1$ . Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallista lommahdusta ei tarvitse tarkistaa, jos  $p_1/t$  on pienempi kuin 9ε. Reunaetäisyys saa olla enintään ulokkeelliselle puristetulle taso-osalle esitetyn arvon suurin paikallisen lommahduksen estämiseksi, ks. standardi EN 1993-1-1. Tämä vaatimus ei koske päätyetäisyyttä.

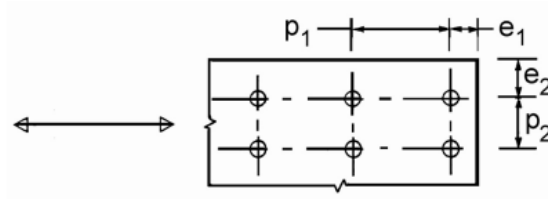
3)  $t$  on uloimman liitettävän osan pienempi paksuus.

4) Pidennettyjen reikien raja-arvot esitetään kohdan 1.2.7 mukaisessa viitestandardiryhmässä 7.

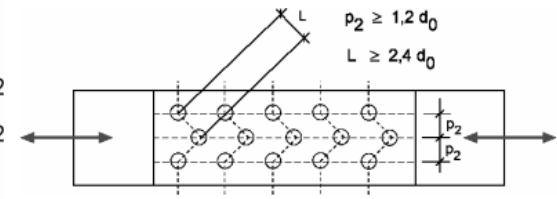
5) Limitetyille kiinnitinriveille voidaan käyttää minimiarvoa  $p_2 = 1,2d_0$ , jos kahden limityksessä olevan kiinnittimen välinen minimietäisyys  $L \geq 2,4d_0$ , ks. kuva 3.1b).

Lähde: SFS-EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu, liitosten mitoitus, vahvistettu 15.08.2005. Helsinki. 2006.

**Teräslevyn reikien reuna- ja päätyetäisyyksien sekä keskivälissä käytettävät merkinnät**

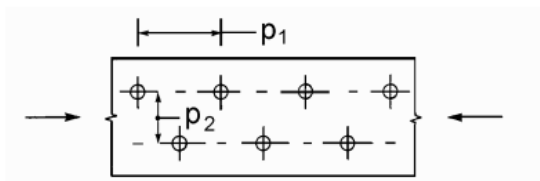


a) Kiinnittimien etäisyyksien merkinnät



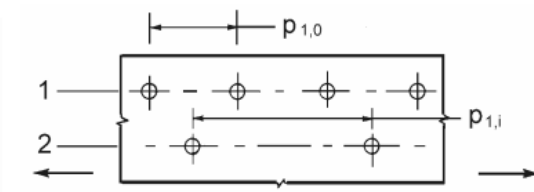
*Limitetyt kiinnittimien reiät*

b) Limitettyjen kiinnittimien reikien merkinnät



$p_1 \leq 14 t$  ja  $\leq 200$  mm       $p_2 \leq 14 t$  ja  $\leq 200$  mm

c) Limitetyt keskivälit – puristetut rakenneosat

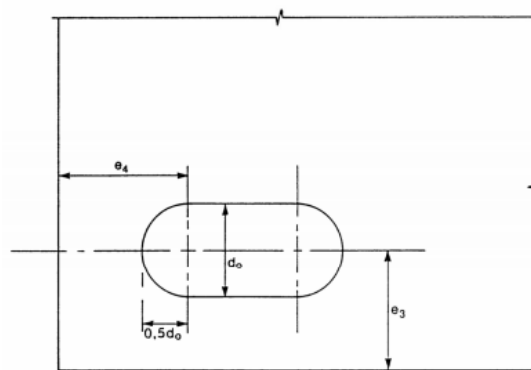


$p_{1,0} \leq 14 t$  ja  $\leq 200$  mm       $p_{1,i} \leq 28 t$  ja  $\leq 400$  mm

1 uloin rivi

2 sisempi rivi

d) Limitetyt keskivälit – vedetyt rakenneosat



e) Pidennettyjen reikien pääty- ja reunaetäisyydet

Lähde: SFS-EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu, liitosten mitoitus, vahvistettu 15.08.2005. Helsinki. 2006.

## CLT-elementtiseinän ankkurointivoiman ja sauman leikkausvoiman mitoitus

| CLT-elementtiseinän sauman leikkausvoima ja tappivaarujen vetovoima:                            |                      |             |
|---|----------------------|-------------|
| Levyn yläreunaan vaikuttava vaakavoima:   |                      |             |
|   | $F_{i,v,Ed}$         | 95 kN       |
| Pystykuorma   | $P_d$                | 5 kN/m      |
| Yhdelle CLT-elementille tuleva pystykuorman aiheuttama vähennys vetovoimaan                     |                      |             |
|   |                      | 14,75 kN    |
| Elementtien mitat:  |                      |             |
| Korkeus   | $H$                  | 6000 mm     |
| Leveys  |                      | 2950 mm     |
| Paksuus   | $B$                  | 200 mm      |
| Elementtien kpl määrä:  |                      |             |
|   |                      | 4 kpl       |
| Elementtiseinän leveys:   | $L_{kok}$            | 11800       |
| Tappivaarunan ottama vetovoiman maksimiarvo:  |                      |             |
|   | $F_{i,c,Ed}$         | 33,56 kN    |
| Tämän vetovoiman voi myös ottaa CLT:n mitoitusohjelmasta Bemessung CLT.                         |                      |             |
| <b>Sauman leikkausvoima VE1, Eurokoodi rankaseinän levyjäykistysmitoitus:</b>                   |                      |             |
| Levyteoriassa oletetaan että ruuvaus ympäri elementin. CLT-elementissä ei ole välttämättä.      |                      |             |
| Jokaisen levyn leveys tulisi olla vähintään $h/4$ tässä laskussa minimi:                        |                      | 1500 mm --> |
| Jokaisen seinälohkon vakkaleikkausvoiman kestävyys:   |                      | ok          |
|   | $F_{i,v,Rd}$         | 35968,93 N  |
|   | $c_i$                | 0,98        |
| Koko seinän leikkausvoiman kestävyys:   |                      |             |
|   | $F_{v,Rd}$           | 143,88 kN   |
| Seinän leikkausvoiman kestävyys tulee olla suurempi kuin seinän nurkassa vaikuttava vaakavoima: |                      |             |
| $F_{i,v,Ed} \leq F_{v,Rd} \rightarrow$  | <b>Käyttöaste:</b>   | 66,03 %     |
| <b>Sauman leikkausvoima VE2,</b>  |                      |             |
| <b>Massivträ handbokenin mukainen sauman leikkausvoiman laskenta:</b>                           |                      |             |
| Pystysuora voima on yhtäsuuri kuin seinän yläosassa vaikuttava vaakavoima:                      |                      |             |
|   | $F_{i,v,Ed}/L_{kok}$ | 8,05 kN/m   |
| Saumassa vaikuttava leikk.voima:  | $F_v$                | 48,31 kN    |
|   | <b>Käyttöaste:</b>   | 66,59 %     |

## Tappivaarnaliitoksen mitoitus

| TAPPIVAARNA PUU-TERÄS-PUU EC-5  |   |
|---|---|
| <b>HUOM!</b>  |   |
| Tappivaarnassa ei huomioida köysivaikusta. (Eurokoodi 5)  |   |
| Kaksileikkeinen liitos, keskimmäinen teräs ohut teräs ( $t \leq 0,5d$ ) (Eurokoodi 5)                               |   |
| Tappivaarnassa on käytettävä sidepultteja vähintään 1/10 liitinryhmän tappivaarnojen lukumäärästä. (RIL 205-1-2009) |   |
| Pultin halkaisija   | $d = 12$ mm   |
| Voiman suunta CLT:n pintakerroksessa  | (Huom. Tähän voi vaikuttaa tapin upotus.)   |
| Kulma syysuuntaan nähden (asteina)  | $\alpha = 90$   |
| Pultin ominaisvetomurtolujuus   | $f_{u,k} = 800$ N/mm <sup>2</sup>   |
| Puun paksuus  | $t = 80$ mm   |
| Materiaalin osavarmuuskerroin (CLT)   | $Y_m = 1,25$ CLT:lle ominainen arvo   |
| Aikavaikutuskerroin   | $k_{mod} = 1,1$   |
|   | $f_{h,0,k} = 26,24$ N/mm <sup>2</sup>   |
|   | $k_{90} = 1,1$ CLT:lle ominainen arvo   |
| Reunapuristuslujuus   | $f_{h,k} = 23,85$ N/mm <sup>2</sup>   |
| Pultin myötömomentti  | $M_y = 153490,85$ Nmm   |
| Liittimen kestävyuden ominaisarvo   | $R_k = \min \begin{cases} 22900,36 \text{ N} \\ 12093,97 \text{ N} \\ 15245,63 \text{ N} \end{cases}$ |
|   | Murtotavat:<br>Kaava F<br>Kaava G<br>Kaava H  |
| Liittimen kestävyuden mitoitusarvo  | $R_k = 12,09$ kN/leike<br>$R_d = 10,64$ kN/leike $R_d = k_{mod} \cdot R_k / \gamma$                   |
| <b>Teholliset tappivaarnat (syysuunnassa, Eurokoodi 5:n mukaan):</b>  |   |
| Liittimien määrä syysuunnassa   | $n_i = 3$   |
| Liittimien etäisyys syysuunnassa  | $a_1 = 70$ mm   |
| teholliset tappivaarnat (syyn suunnassa)  | $n_{ef} = 2,20$   |
|   | $n_{ef} = 2,20$   |
| Liittimiä rivissä:  | 3   |
| Laskennallisesti tehollisten liittimien määrä:  | 6,60  |
| <b>Liitoksen kapasiteetti:</b>  | 70,24 kN  |
| <b>Liitoksessa vaikuttava vetovoima:</b>  | 33,56 kN  |
| <b>Käyttöaste:</b>  | 47,77 %   |

## Puun lohkeamismurtomitoitus

**Lohkeamismurtuminen:****Huom!**

Laskennan kulku tarkemmin selitetty teoria osuudessa

Mitoitettu murtumistapaus g:lle.

Käytetty vain syysuuntaisten lamellien arvoja. Lamelleita 80mm, kun koko levyn paksuus on 200mm.

Käytän sahatavaran arvoja paitsi leikkauslujuutena VTT-lausunnon määräyksen mukaisesti

ETA-lausunnon tasoleikkauslujuusarvoa:

$$f_{v,k} = f_{R,k} \text{ (ETA)} \quad f_{R,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{(Sahatavara} \leq 16) = C14 \quad f_{t,0,k} = 8,0 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan vaan lamellit, jotka on syysuunnassa:

(200mm paksu levy, 40mm lamelleilla)  $t_1 = 80,0 \text{ mm}$

(~vähennetään 20mm upotus molemminpuolin)

Alimpien tappien välimatka levyn alareunaan:

$$l_{v1} = 70,0 \text{ mm}$$

Syysuuntaan vastaan kohtisuora nettopoikkileikkausala:

Ks. Kuva, laskettava aina tapaus  $A_{net,t} = 11200,0 \text{ mm}^2$

kohtaisesti:  $L_{net,t} = 140,0 \text{ mm}$

Syysuuntainen nettoleikkausala:

Ks. Kuva, laskettava aina tapaus

kohtaisesti:

$$A_{net,v} = \begin{cases} 33600,0 & \text{Murtumistavat: } c, f, j / l, k, m \\ 44302,6 & \text{kaikki muut murtumistavat} \end{cases}$$

$$L_{net,v} = 420$$

Lasketaan paksujen teräslevyjen mukaan vaikka kyseessä ei ole paksuteräslevy, koska murtumistapa on g.

Momenttia ei ole niin kaavoista se on

tef:n kaavoista se on jätetty pois.

$$tef = \begin{cases} 46,3 & \text{Murtumistavat: } e \text{ ja } h \\ 35,5 & d \text{ ja } g \end{cases}$$

$$F_{bs,Rk} = \max \begin{cases} 134,4 & \text{kN} \\ 38,8 & \text{kN} \end{cases}$$

(Käytetty vain syysuuntaisten lamellien arvoja)

Lohkeamismurtumiskestävyys:

$$F_{bs,Rk} = 134,4 \text{ kN}$$

$$\text{Käyttöaste: } 24,97 \%$$

## Elementtien ruuvikiinnityksen mitoitus

| <b>Elementtien pystysauman kiinnitys WT-T-ruuveilla</b>  |              |  |            |
|--|--------------|--|------------|
| Puuruuvien WT-T-6,5-160 leikkauskapasiteetti pystysaumassa (ltseporautuvat ruuvit)   |              |  |            |
| Mitoitus EC-5 ja ETA-08/0271   |              |  |            |
| <b>Huom!</b>   |              |  |            |
| Ruuvien jako on yli d*14 niin ei tehollista ruuvien määrää ei tarvitse vähentää, muuten EC:n kaava 8.17.                                       |              |  |            |
| Reunapuristuslujuus on molemmissa kappaleissa sama -> B = 1  |              |  |            |
| Köysivaikutuksen osuus saa olla maksimissaan saman verran kuin liittimen ottama osuus ilman köysivaikutusta. --> Fax,rk/4 ≤ yhtälön vasenpuoli |              |  |            |
| Ruuvien ulkokierteen halkaisija  | d=           | 6,5 mm   |            |
| Ruuvien sydänmitta   | di=          | 3,95 mm  |            |
| Ruuvien tehollinen halkaisija  | def=         | 4,4 mm   |            |
| Ruuvien jako k/k   |              | 150 k/k mm                                     | ≥91mm D*14 |
| Kannanpuoleinen paksuus  | t1           | 80 mm  | ≥52mm D*8  |
| Kärjenpuoleinen tunkeuma   | t2           | 80 mm  |            |
| Ilman esiporausta  |              |  |            |
| Reunapuristuslujuus  | fh,k=        | 60*d <sup>-0,5</sup> = 28,75 N/mm <sup>2</sup> |            |
| Puun tiheys  | rk=          | 350 kg/m <sup>3</sup>                          |            |
| Aikavaikutuskerroin  | kmod=        | 1,10   |            |
| Ruuvien vetomurtolujuus  | fu,k=        | 900 N/mm <sup>2</sup>                          |            |
| <b>Huom!</b>   |              |  |            |
| (def= Ruuvien ulkokierteen halkaisija ruuvinsijoitus osuudessa)  |              |  |            |
| Ruuvien sijoitukset:   |              |  |            |
| Ilman esiporausta  |              |  |            |
| Minimit:   |              |  |            |
| Ruuvinväli:  | a1=          | 43,6 mm  | d>5mm      |
| syysuuntaisesti  | a2=          | 21,8 mm  |            |
| syysuuntaa vastaan kohtisuoraan  | a3,t=        | 65,3 mm  |            |
| kuormitettuun päähän   | a3,c=        | 43,6 mm  |            |
| kuormittamattomaan päähän  | a4,t=        | 43,6 mm  | d>5mm      |
| kuormitettuun reunaan  | a4,c=        | 21,8 mm  |            |
| kuormittamattomaan reunaan   | Ym           | 1,25 CLT                                       |            |
| Varmuuskerroin   |              |  |            |
| Reunaleikkeiden kapasiteetti=  |              |  |            |
| Ruuvien myötömomenti   | Myk=         | 10900 Nmm                                      |            |
| Ruuvien käyttöohje SFS intec   | Myk=         | 10900 Nmm                                      |            |
| Ruuvien myötömomenti laskennallinen  | Myk=         | 12388 Nmm                                      |            |
| Murtumistavat:   | a=           | 10,02 kN/leike/ruuvi                           |            |
|  | b=           | 10,02 kN/leike/ruuvi                           |            |
|  | c=           | 4,36 kN/leike/ruuvi                            |            |
|  | d=           | 3,86 kN/leike/ruuvi                            |            |
|  | e=           | 3,86 kN/leike/ruuvi                            |            |
|  | f=           | 2,11 kN/leike/ruuvi                            |            |
| Yhden ruuvien leikkauskestävyys  | Rdmit=       | 1,86 kN  |            |
|  | Rd=kmod*Rk/γ |  |            |
| Ulosvetokestävyys pituussuunnassa kuormitettujen ruuvien SFS-EN 1995:n mukaan:   |              |  |            |
| Köysivaikutuksen osuus mitoituksessa?  |              | 100,00 %                                       |            |
| Eurokoodi 5:n mukaan   | Fax,k=       | 17,43 N/mm <sup>2</sup>                        |            |
| SFS Intecin ruuviesitteen mukaan   | Fax,k=       | 4,50 N/mm <sup>2</sup>                         |            |
| Minimiarvo Fax,k arvoista  | Fax,k=       | 4,50   |            |
|  | kd=          | 0,54   |            |
| Ulosvetokestävyys  | Fax,k,Rk=    | 853,86 N                                       |            |
|  | Fax,k,Rk/4=  | 213,47 N                                       |            |
| Pitää tarkastaa onko Fax,k,Rk/4 ≤ johansenin myötäteorian osuus.   |              |  |            |
| <b>Ruuvien leikkauskestävyys:</b>  |              | <b>72,54 kN</b>                                |            |



## Teräslevyn mitoitus

| Teräslevyn mitoitus:  |                 |   |
|---|-----------------|---|
| <b>Huom!</b>  |                 |   |
| Teräslevy on puiden välissä niin oletetaan, että se ei nurjahda, kiepahda tai lommahda.   |                 |   |
| Teräs S355  |                 |   |
| Levyn vaikuttava veto voima   | $F_{i,c,Ed} =$  | 33,56 kN                                |
| Tappivaarvoja rivissä   |                 | 3                                       |
| Tappivaarvoja jonossa   |                 | 3                                       |
| Myötöraja   | $f_y =$         | 355 N/mm                                |
| Vetomurtolujuus   | $f_u =$         | 510 N/mm                                |
| Levynpaksuus  | $t_{tot} =$     | 6 mm                                    |
| Pultin paksuus +1mm   | $d_0 =$         | 13 mm                                   |
| Levyn leveys  | $h =$           | 320 mm                                  |
| Poikk. Leikk. Brutto Pinta-ala  | $A =$           | 1920 mm <sup>2</sup>                    |
| Poikk. Leikk. Netto Pinta-ala   | $A_{net} =$     | 1686 mm <sup>2</sup>                    |
|   | $\gamma_{M0} =$ | 1                                       |
|   | $\gamma_{M1} =$ | 1                                       |
|   | $\gamma_{M2} =$ | 1,25                                    |
| <b>Reunaetäisyyksien minimi:</b>  |                 |   |
| Päätyetäisyys   | $e_1 =$         | 15,6 mm                                 |
| Reunaetäisyys   | $e_2 =$         | 15,6 mm                                 |
| Keskiöväli  | $p_1 =$         | 28,6 mm                                 |
| Keskiöväli  | $p_2 =$         | 31,2 mm                                 |
| <b>Vetokestävyys:</b>   |                 |   |
| $N_{t,Rd} = \min$   |                 | 681,60 kN                               |
|   |                 | 619,10 kN                               |
| $N_{t,Rd} =$  |                 | 619,10 kN                               |
| Käyttöaste:   |                 | 5,42 %                                  |
| <b>Liitokselle teoriassa ei tule kuin asennusaikainen puristusvoima ja teräslevyn puristuskapasiteetti on mitoitettava sille.</b> |                 |   |
| <b>Reunapuristuslujuuden tarkastelu:</b>  |                 |   |
| Yhden liittimen ottama voima  | $F_{ed} =$      | $F_{b,Rd} \geq F_{ed}$<br>8,51 kN/Leike |
| $ab = \min$   |                 | 1,54                                    |
|   |                 | 1,57                                    |
|   |                 | 1,00                                    |
| $ab =$  |                 | 1                                       |
| $ad = \min$   |                 | 1,79                                    |
|   |                 | 1,54                                    |
| $ad =$  |                 | 1,54                                    |
|   |                 | 2,50                                    |
| $k_1 = \min$  |                 | 2,50                                    |
|   |                 | 2,50                                    |
| $k_1 =$   |                 | 2,5                                     |
| $F_{b,Rd} =$  |                 | 113,46 kN/Leike                         |
| Käyttöaste:   |                 | 7,50 %                                  |
| <b>Palamurtuminen on mitoitettava tapauskohtaisesti. Ks. 1993-1-8 3.10.2</b>  |                 |   |
| Teräslevyn leikkauksen ottama poikkipinta-ala:  |                 | 1680 mm <sup>2</sup>                    |
| Teräslevyn vedon ottama poikkipinta-ala:  |                 | 840 mm <sup>2</sup>                     |
| $V_{eff,1,Rd} =$  |                 | 687,05 kN                               |
| Käyttöaste:   |                 | 4,88 %                                  |

## Todelliset arvot:

|  |       |
|--|-------|
|  | 70 mm |
|  | 70 mm |
|  | 70 mm |
|  | 70 mm |



## Puun lohkeamismurtumiskestävyyden mitoituskaavat

$$F_{bs,Rk} = \max \begin{cases} 1,5 A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0,7 A_{net,v} f_{v,k} \end{cases}$$

missä

$$A_{net,t} = L_{net,t} t_1$$

$$|A1> A_{net,v} = \begin{cases} L_{net,v} t_1 & \text{murtumistavoissa (c, f, j/l, k, m)} \\ \frac{L_{net,v}}{2} (L_{net,t} + 2 t_{ef}) & \text{kaikissa muissa murtumistavoissa} \end{cases}$$

ja

$$L_{net,v} = \sum_i \ell_{v,i}$$

$$L_{net,t} = \sum_i \ell_{t,i}$$

missä:

$F_{bs,Rk}$  on lohkeamismurtumis- tai palamurtumiskestävyyden ominaisarvo

$A_{net,t}$  on syysuuntaa vastaan kohtisuora nettopoikkileikkausala

$A_{net,v}$  on syysuuntainen nettoleikkautumisala

$L_{net,t}$  on syysuuntaa vastaan kohtisuoran poikkileikkauksen nettoleveys

$L_{net,v}$  on leikkausmurtumisalueen nettopituuksien summa

$t_{ef}$  on liittimen murtumistavasta riippuva tehollinen syvyys

$t_1$  on puusauvan paksuus tai liittimen tunkeuma

$f_{t,0,k}$  on puusauvan vetolujuuden ominaisarvo

$f_{v,k}$  on puusauvan leikkauslujuuden ominaisarvo

$$|A1> t_{ef} = \begin{cases} 2 \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,k} d}} & \text{(e)(h)} \\ t_1 \left[ \sqrt{2 + \frac{M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] & \text{(d)(g)} \end{cases}$$

missä:

$t_{ef}$  on liittimen murtumistavasta riippuva tehollinen syvyys

$t_1$  on puusauvan paksuus tai liittimen tunkeuma

$M_{y,Rk}$  on liittimen myötömomentin ominaisarvo

$d$  on liittimen halkaisija

$f_{h,k}$  on puusauvan reunapuristuslujuuden ominaisarvo.