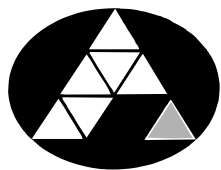


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Joni Rytönen

LASKENTAOHJE CLT-SEINÄELEMENTIN JA CLT-
VÄLIPOHJAELEMENTIN MITOITTAMISEKSI

Opinnäytetyö
Joulukuu 2012



POHJOIS-KARJALAN
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2012
Rakennustekniikan
koulutusohjelma
Karjalankatu 3
80200 JOENSUU

Tekijä(t)
Joni Rytönen

Nimeke
Laskentaohje CLT-seinäelementin ja CLT-välipohjajaelementin mitoittamiseksi

Toimeksiantaja
Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä on tehty laskentaohjeet CLT -seinäelementin ja CLT-välipohjajaelementin tärkeimpien ominaisuuksien mitoittamiseksi. Lisäksi molemmat edellä mainitut elementit on palomitoitettu. Eurokoodissa ei ole tarkkaa tietoa CLT-elementtien mitoittamisesta ja suurin osa tiedoista onkin saatu muista lähteistä. Suunnitteluohjeet eivät olleet kauttaaltaan yksiselitteiset ja joissain kohdin niitä jouduttiinkin soveltamaan. Myös CLT:n historiasta ja ominaisuuksista on kerrottu hieman.

CLT-elementtien laskentaohjeita voidaan tulevaisuudessa hyödyntää esimerkiksi puurakentamisen opetuksessa tai CLT-elementtien mitoituksessa. Laskentaohjeissa on myös kommentoitu kaavoja sekä kirjoitettu muutamia parannusehdotuksia niihin kohtiin, jotka kaipaavat täydentämistä. CLT-elementtirakenteiden suunnitteluohjeet ovat kuitenkin riittävät, mutta kaipaavat silti täsmennyksiä ja lisää esimerkkilaskelmia.

Kieli
suomi

Sivuja 42
Liitteet 0
Liitesivumäärä 0

Asiasanat
CLT, laskentaohje, CLT-seinäelementti, CLT-välipohjajaelementti



POHJOIS-KARJALAN
AMMATIKORKEAKOULU

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

Author(s)
Joni Rytönen

Title
Calculation Instructions for Cross Laminated Timber Wall - and Floor Panel Design

Commissioned by
North Karelia University of Applied Sciences

Abstract

This study was aimed at determining calculation instructions for CLT (cross laminated timber) wall- and floor panel design. These panels were also measured for fire protection. The Eurocode does not provide much information on the calculation of CLT panels and thus most of the information had to be collected from other sources. As the design instructions were not entirely univocal, they had to be partly applied. The study also includes information about the history and properties of CLT.

These instructions can be utilized in teaching or in CLT panel designing in the future. In addition, the calculation instructions include comments regarding the formulas and improvement proposals for the calculation instructions. On the basis of the study it can be concluded that the instructions for CLT panel design are sufficient but they could still be more specified and include more calculation examples as CLT panel construction becomes more popular in the future.

Language
Finnish

Pages 42
Appendices 0
Pages of Appendices 0

Keywords
CLT, calculation instruction, CLT wallpanel, CLT floorpanel

Sisällys

1 Johdanto	5
2 CLT-elementit	6
2.1 CLT -elementtirakentamisen historia	10
2.2 CLT -elementtien ympäristöystävällisyys	11
2.3 CLT -elementtien seisminen käyttäytyminen.....	12
3 CLT -elementtien mitoittamistavat Euroopassa.....	13
3.1 Mekaanisesti liitettyjen palkkien teoria	15
3.2 Vierintäleikkauskerroin	17
3.3 CLT -välipohjaelementin mallintaminen	19
3.4 CLT -elementtiseinän mallintaminen.....	20
3.5 CLT -välipohjaelementin mitoitus	21
3.6 CLT -seinäelementin mitoitus.....	29
4 CLT-elementtien palomitoittaminen	32
4.1 Palon osastoiva yhtälö	33
4.2 Rakenteellinen palonkestävyys.....	34
4.3 Tasomaisen CLT-elementin palomitoitus.....	35
5 CLT-elementtien liitosten mitoittaminen	36
5.1.1 Itseporautuvat ruuvit ja puuruuvit	37
5.1.2 Naulat ja liimapuuniitit	38
5.1.3 Pultit ja vaarnat	38
5.1.4 Kantavat kiinnikkeet	39
5.1.5 Uudentyyppiset kiinnikkeet.....	40
6 Pohdinta.....	40
Lähteet.....	42

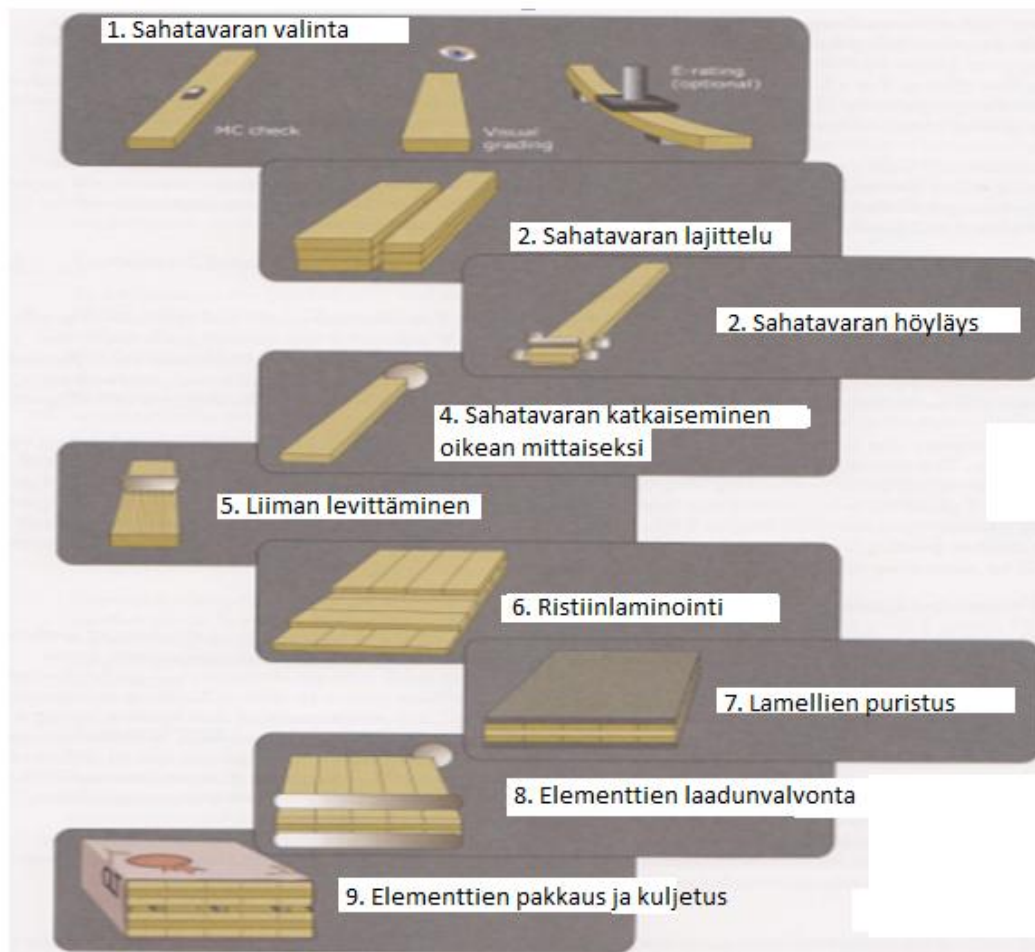
1 Johdanto

CLT-elementtirakentaminen on Stora Enson mukaan yleistynyt Suomessa viime vuosina muun puurakentamisen ohella. On huomattu, että esimerkiksi kerrostalon rakentaminen CLT-elementeistä on paitsi nopeaa, myös kustannus- ja energiatehokasta. CLT-elementeillä saavutetaan tiiveysvaatimukset ja palovaatimukset helposti johtuen elementtien massiivisuudesta, saadaan hyvä sisäilma puun ”hengittämisen” ansiosta sekä säästetään rahaa ja aikaa. Tästä johtuen Suomessa onkin vireillä useita CLT-elementeillä toteutettavia rakennuskohteita. Kuitenkaan kattavaa ja yleistä mitoitusohjetta näille elementeille ei Suomesta löydy. Tämä ja oma kiinnostukseni puurakentamiseen saivatkin minut ryhtymään sellaisen ohjeen tekoon.

Opinnäytetyön tarkoituksena on saada aikaan laskentaohje CLT-elementtien tärkeimpien ominaisuuksien mitoittamista varten. Tarkoituksena on myös kertoa itse CLT-elementeistä ja niiden välisistä liitostyypeistä, CLT:n valmistusprosessista sekä CLT:n mitoituksen teoriaa. Lisäksi kerron hieman CLT-elementtien ympäristöystävällisyydestä sekä seismisestä toiminnasta, koska ne voivat olla tärkeitä tekijöitä CLT:n suosion kasvamisessa. CLT:n laskentaohje tehdään CLT-seinäelementille sekä CLT-välipohjaelementille. Seinäelementille tehdään ohje taivutusvoiman laskemiseksi. Välipohjaelementin laskentaohje sisältää tehollisen taivutusjäykkyyden ja -voiman, taivutuskestävyyden sekä leikkauskestävyyden laskemisen. Lisäksi näille molemmille elementeille laaditaan palomitoitusohje. Myös CLT-elementtien välisen ruuviliitoksen mitoittamisesta on tarkoitus laatia yksikertainen ohje.

2 CLT-elementit

CLT (Cross Laminated Timber eli ristiin laminoitu puutavara) -elementit (Kuva 2) ovat massiivipuisia rakennuselementtejä, joita käytetään tällä hetkellä enimmäkseen kerrostalorakentamisessa, mutta myös muussa rakentamisessa jossain määrin. Ne koostuvat ristiin liimatuista puulevy (lamelli) kerroksista, jotka takaavat elementtien lujuuden sekä muotopysyvyyden. Lamellikerroksia on yleensä 4...7 ja niiden paksuus vaihtelee 19...43 millimetriin ja leveys 80...240 millimetriin riippuen valmistajasta. CLT-elementtien koko puolestaan voi enimmillään olla 18 m x 3,2 m, mutta kaikki valmistajat eivät tee aivan näin suuria elementtejä. CLT-elementin valmistusprosessi on esitetty kuvassa 1. Eri valmistajat käyttävät erilaisia liimoja lamellien kiinnittämiseen toisiinsa. Yleisimmin käytetyt liimat ovat formaldehydittömiä ja täten ympäristöystävällisiä. (Puuinfo 5/2011.)



Kuva 1. CLT-elementin valmistusprosessi (FPInnovations 2011a)



Kuva 2. Viisilamellisesta CLT-elementistä leikattu pala (Jaakkola, H. 2/2012. Rakennustaito)

CLT-elementtejä käytetään yleisesti rakennusten välipohjissa, katoissa sekä väli- ja ulkoseinissä. Kaikkiin elementteihin tehdään tarvittavat ikkuna-, ovi- ja muut aukot tehtaalla sekä lisäksi ulkoseinä- ja kattoelementteihin (kuvat 3 ja 4) asennetaan tarvittavat eristeet ja tiivisteet. CLT-elementeillä rakennettaessa rakennuksista saadaan energiatehokkaampia ja tiiviimpiä verrattuna useisiin muihin rakennusmateriaaleihin. Lisäksi niillä rakennettaessa saadaan rakennuksen sisäilman kosteuden ja lämpötilan vaihteluita tasattua, johtuen siitä, että CLT-elementit ovat massiivisia ja hengittäviä puurakenteita. (Puuinfo 5/2011.)



Kuva 3. CLT-ulkoseinäelementti (Eridomic Oy)



Kuva 4. CLT-kattoelementti, johon on kiinnitetty kaksi betonielementtiä passiivista lämmöntalteenottoa varten (Milner Associates)

Rakennettaessa erilaisia rakennuksia, mutta erityisesti pientalorakentamisessa (Kuva 5), on tärkeää varsinkin talviaikaan saada rakennus nopeasti pystytettyä. CLT-elementeillä rakennettaessa rakennuksen runko saadaankin pystytettyä parhaimmillaan päivässä ja lisäksi elementtien liitoksista saadaan tiiviit ja näin

ollen parannetaan rakennuksen energiatehokkuutta. CLT-elementtejä on myös tarvittaessa helppo työstää työmaalla ja ne ovat suhteellisen kevyitä, mikä helpottaa niiden asentamista. Näistä lähtökohdista katsottuna CLT-elementit tarjoavatkin valtavat mahdollisuudet rakennuksen arkkitehtuurille ja tyyliille. Ne voidaan kaiken lisäksi yhdistää muihin rakennusmateriaaleihin, mikä lisää mahdollisuuksia entisestään. Massiivisuutensa ansiosta CLT-elementit ovat myös paloturvallisia ja kestäviä, mikä lisää tulevien käyttäjien turvallisuutta. Lisäksi CLT-elementit tarjoavat hyvän ja terveellisen sisäilmaston sekä miellyttävän äänimaiseman. (Puuinfo 5/2011.)



Kuva 5. Keskenräinen CLT-elementeistä valmistettava omakotitalo Australiasa (WoodSolutions 5/2012)

2.1 CLT -elementtirakentamisen historia

CLT on innovatiivinen puutuote, joka kehitettiin ensimmäiseksi Sveitsissä 1970-luvulla ja se on siitä lähtien tullut yhä suosittumaksi rakennustavaksi Euroopassa, jossa on tätä nykyä useita CLT-valmistajia. (FPInnovations 2011b.)

1990-luvun puolivälissä Itävalta aloitti teollisuusakatemioiden avustuksella tutkimushankkeen, jonka tuloksena kehitettiin nykyinen CLT. Usean vuoden ajan tuotteen kehitys oli hidasta, mutta 2000-luvun alussa CLT-rakentaminen kasvoi merkittävästi taloudellisuuden, tuotehyväksyntöjen, markkinoinnin, jakelukanavien sekä osittain myös ympäristöystävällisemmän rakentamisen kehittämisen myötä. Rakentamisen kasvun kannalta tärkeä tekijä oli myös havainto, että CLT-tekniikka on massiivirakentamista, kuten betonirakentaminenkin, jota on käytetty yleisesti asuinrakennuksissa monessa Euroopan maassa. Nämä edellä mainitut asiat saivat aikaan sen, että CLT-rakentaminen alkoi vähitellen levitä myös sellaisiin maihin, joissa sitä ei ollut vielä aiemmin käytetty, kuten Suomeen. (FPInnovations 2011b.)

CLT-elementtien käyttö rakennuksissa on kasvanut viime vuosina Euroopassa. Lukemattomia näyttäviä kerrostaloja (Kuva 7) ja muun tyyppisiä rakennuksia on rakennettu ympäri maailmaa käyttäen CLT-tekniikkaa ja niistä on tullut hyvä todiste CLT-rakentamisen tarjoamista eduista, joita ovat mm. helppo käsiteltävyys työmaalla ja elementtien suuri viimeistelyn aste. Lisäksi CLT-tekniikalla saadaan hyvä lämmön- ja ääneneristävyys sekä kestävyys palotilanteissa. Nämä edellä mainitut asiat alkavat hiljalleen tulla myös rakennuttajien ja käyttäjien tietoon, mikä tulee entisestään lisäämään CLT-rakentamisen määrää tulevaisuudessa. (FPInnovations 2011b.)



Kuva 6. CLT -elementeillä tehty 8-kerroksinen The Stadhaus Building Englannissa (Podesto, L. 2012. STRUCTURE)

2.2 CLT -elementtien ympäristöystävällisyys

CLT-elementtien on usein katsottu olevan ympäristöystävällisempiä verrattuna toiminnaltaan samanlaisiin betonirakenteisiin. Tästä ei kuitenkaan ole tehty mitään julkaisua, joka vertailisi CLT:n ympäristökäyttäytymistä muihin rakennusratkaisuihin verrattuna. Puun ja monien muiden rakennusmateriaalien ympäristöystävällisyydestä on tehty useita vertailuja, jotka ovat pääasiassa olleet puun kannalta hyviä. Nämä vertailut ovat kuitenkin keskittyneet kevyisiin puukehikoihin sekä liimapuusta tehtyihin pieliin ja palkkeihin, joista mikään ei ole CLT:n kaltainen. CLT on enemmänkin massiivinen seinä tai laattarakenne kuin kehikorakenne, siinä on ainakin kolme kertaa enemmän puuta ja lisäksi siitä aiheutuu vielä prosessointi- ja lisämateriaaleja, kuten kerrosten kiinnittämiseen käytetty liima. Toisin sanoen CLT-rakennuksen ympäristöjalanjälki ei ole sama kuin kevytrunkoisen rakennuksen ja näin ollen ei voida olettaa, että CLT olisi niin paljon ympäristöystävällisempi kuin betoni, kuten aikaisemmat tutkimukset perinteisistä puurakenteista ovat osoittaneet. (FPInnovations 2011c.)

2.3 CLT -elementtien seisminen käyttäytyminen

Maailmalla tehtyyn tutkimustyöhön sekä CLT-elementeillä suoritettuihin useisiin kvasistaattisiin testeihin perustuen, CLT-elementtejä voidaan käyttää tehokkaana vaakakuormia vastaanottavana systeeminä. Tulokset ovat tähän päivään mennessä osoittaneet, että nauloilla tai ohuilla ruuveilla teräskannattimin välipohjaan kiinnitetyt CLT-seinäelementit omaavat hyvän seisminen eli maanjäristyskäyttäytymisen. Seinäelementtien kiinnittäminen päädyistä toisiinsa kiinni nauloilla parantaa tätä seismistä käyttäytymistä entisestään. Kuitenkaan seinäelementtien kiinnittämistä välipohjaan pitkillä diakonaalisilla ruuveilla ei suositella, koska se jäykistää systeemiä liikaa ja saattaa aiheuttaa ns. haurasmurtumia maanjäristyksen sattuessa. Pitkissä seinissä kannattaa kuitenkin käyttää porrasliitoksia elementtien kiinnittämiseen, koska ne vähentävät seinän jäykkyyttä ja parantavat näin ollen sen seismistä kestävyttä. (FPIinnovations 2011b.)

Suurin osa CLT-elementeillä tehdyistä rakennuksista on tasannetyyppisiä rakennesysteemejä, jotka ovat vähemmän alttiita ns. Soft Storey –mekanismille, eli rakennuksen kerrosten jäykkyys pysyy suhteellisen samana pystysuunnassa ja tämä tekee siitä kestävämmän maanjäristyksessä kuin monista muista samantyyppisistä rakennesysteemeistä. Maanjäristyksessä CLT-elementtirakennuksissa muodonmuutokset syntyvät elementtien liitoksiin ja pystykuorman kantavat seinäelementit pysyvät näin ollen periaatteessa paikallaan ja hyvin kiinnitettynä välipohjaelementteihin, jopa todella kovassakin järjestyksessä. Lisäksi kaikki yhden kerroksen seinät osallistuvat sekä sivuttaisten että pystysuorienkin kuormien vastaanottamiseen ja tarjoavat näin ollen paremman kokonaiskestävyyden. CLT-elementeistä rakennettavilla rakennuksilla voisikin niiden hyvän seisminen käyttäytymisen vuoksi olla tulevaisuudessa kysyntää järistysherkillä alueilla, kuten esimerkiksi Japanissa. Kuvassa 7 on esitetty CLT-elementtikerrostalon seisminen testaus. (FPIinnovations 2011b.)



Kuva 7. Seitsemänkerroksisen CLT -kerrostalon seisminen testaus E-Defense laboratoriossa Japanin Miki:ssä. (Ceccotti, A. FPInnovations)

3 CLT -elementtien mitoittamistavat Euroopassa

Euroopassa on käytössä useita eri tapoja CLT-elementtien mitoitusominaisuuksien määrittämiseksi. Jotkut näistä laskentatavoista perustuvat kokeellisuuteen, kun taas toiset ovat analyyttisiä. Muut laskentatavat sisältävät sekä kokeellisia että analyyttisiä lähestymistapoja mallitestaukseen perustuen. Kokeellinen arviointi sisältää taipumisominaisuuksien määrittämistä tietyn nurjahduspituuden omaavista täysikokoisista elementeistä tai elementtien osista. Kokeellisen menetelmän ongelmana on se, että joka kerta kun testausolosuhteet, materiaali tai mikä tahansa valmistusparametri muuttuu, tarvitaan taas lisää testausta, jotta voidaan arvioida elementtien taipumisominaisuudet. Analyttinen lähestymistapa antaa paljon yleispätevämmän ja halvemmän vaihtoehdon, kunhan sen paikkansapitävyys vain on varmistettu testeillä. Analyttisellä lähestymistavalla

voidaan yleispätevästi määrittää CLT-elementin kestävyys ja jäykkyys riippuen paneelikerroksien ominaisuuksista. (FPInnovations 2011d.)

Euroopan CLT-valmistajat ja -suunnittelijat eivät ole vielä hyväksyneet mitään analyttistä laskentamenetelmää kansainvälisesti käytettäväksi. Kaikkein eniten käytetty analyttinen laskentamenetelmä Euroopassa perustuu mekaanisesti liitettyjen palkkien teoriaan, joka on saatavilla Eurokoodi 5:n (EN 1995: 2004) liitteessä B. Tämä teoria esittelee tehollisen jäykkyyden konseptin ja liitoshyötysuhdekertoimen (γ_i), jota käytetään ottamaan huomioon pystysuoran kerroksen leikkausmuodonmuutos. Jos tämä kerroin $\gamma = 1$ tarkoittaa se kokonaan liimattua lamellien välistä liitosta ja kun $\gamma = 0$, ettei tätä liitosta ole kiinnitetty millään lailla. Tämä lähestymistapa tarjoaa ratkaisun vain sinimuotoisesti kuormitettujen ja yksinkertaisesti tuettujen palkkien/paneelien ratkaisemiseksi tarkoitettuun differentiaaliyhtälöön. Kuitenkin ero tarkan ratkaisun (sinimuotoisten kuormien) ja pistekuormien tai tasaisesti jakautuneen kuorman välillä on minimaalinen ja hyväksyttävä insinöörin laskentojen kannalta. (FPInnovations 2011d.)

Blass ja Fellmoser (2004) ovat soveltaneet ”yhdistelmäteoriaa” (tunnetaan myös nimellä k-metodi) CLT-elementtien taivutusominaisuuksien määrittämiseen. Heidän työnsä ei kuitenkaan ottanut huomioon yksittäisten kerrosten leikkausmuodonmuutosta. (FPInnovations 2011d.)

Viime aikoina uusi laskentatapa ”leikkausanalogia” (Kreutzinger, 1999) on kehitetty Euroopassa ja se näyttäisi soveltuvan hyvin kiinteille elementeille, joissa on ristikkäiskerroksia. Se ottaa huomioon leikkausmuodonmuutoksen pitkittäisissä sekä ristikkäiskerroksissa, eikä sitä rajoita elementin paneelikerrosten määrä. Tämä laskentatapa näyttääkin olevan tarkka ja hyvin soveltuva jäykkyysominaisuuksien määrittämiseen CLT-elementeistä. (FPInnovations 2011d.)

Melkein kaikki Euroopassa tähän mennessä suoritettut tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa määrittämään CLT-elementtien jäykkyysominaisuuksia kestävysominaisuuksien sijaan. Tietoa on saatavilla vähän koskien myös CLT-elementtien viruma- ja värinäkäyttäytymistä. CLT-elementtien taivutusjäykkyys on usein suuremman kiinnostuksen kohteena kuin kestävyys, koska käyttövaa-

timukset ohjaavat rakennesuunnittelua suuressa määrin. Tuotekehittelyn näkökulmasta katsottuna olisi tarve määrittää myös kestävyysominaisuudet, jotta voidaan taata CLT-elementtien minimikesto käyttötilanteessa. Pitäisi omaksua suunnittelumetodologia CLT-elementtien jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien määrittämiseen taivutuksessa tutkimalla lisää leikkausanalogista lähestymistapaa. On odotettavissa, että edellä mainittu analyyttinen lähestymistapa hyväksytään tulevaan CLT-tuotestandardiin. Suunnitteluominaisuuksien laskemisen tulisi pohjautua puun materiaaliominaisuuksista julkaistuun standardiin ja sen tulisi lisäksi olla yhtenevä Suomen standardeihin ja normeihin verrattuna. Näiden tärkeiden piirteiden vuoksi kehitetty analyyttinen laskentatapa tuleekin varmistaa tarkasti erinäisillä testeillä. (FPInnovations 2011d.)



Kuva 8. CLT-elementin mitoittamisessa käytettävät symbolit (FPInnovations 2011d.)

3.1 Mekaanisesti liitettyjen palkkien teoria

Monet CLT-elementtivalmistajat käyttävät elementtien mitoittamisessa mekaanisesti liitettyjen palkkien teoriaa eli Gamma-menetelmää, joka löytyy Eurokoodi 5:n liitteestä B (EN 1995: 2004). Kuten nimikin kertoo, tämä menetelmä kehitettiin alkujaan palkeille, jotka on liitetty matkan s päässä toisistaan olevilla ja tietyn jäykkyyden omaavilla mekaanisilla kiinnikkeillä koko palkin pituudelta. Tämän menetelmän kehitti professori Karl Möhler vuonna 1955. Gamma-

menetelmän mukaan mekaanisesti liitettyjen palkkien jäykkyysominaisuudet on määritetty käyttämällä termiä tehollinen taivutusjäykkyys (EI_{eff}), joka riippuu palkkien leikkausominaisuuksista ja liitoshyötysuhdekertoimesta γ . Tämä liitoshyötysuhdekerroin γ taas on riippuvainen kiinnikkeiden liukumisominaisuudesta (s/K suhteesta). Liitoshyötysuhdekertoimen ollessa 0 ei palkkien välillä ole mekaanista liitosta ja sen ollessa 1 palkit on kiinnitetty jäykästi (liimaamalla). (FPInnovations 2011d.)

Koska CLT -elementit ovat liimattuja tuotteita, joissa ei ole mekaanisia liitoksia, täytyi teoriaan tehdä joitakin muutoksia, jotta se olisi soveltuva niiden mitoittamiseen. Jos oletetaan, että vain pitkittäiset lamellikerrokset ottavat kuormaa vastaan, voidaan ottaa huomioon poikittaisten kerrosten vierintäleikkausjäykkyys, jonka aiheuttavat pitkittäistä kerrosta kiinnipitävät ”kuvitellut kiinnikkeet”. Toisin sanoen CLT-elementin pitkittäiset kerrokset oletetaan mekaanisilla kiinnikkeillä liitetyiksi palkeiksi, joilla on poikittaisten kerrosten leikkausmuodonmuutokseen suhteessa oleva jäykkyys. (FPInnovations 2011d)

Mekaanisesti liitettyjen palkkien teoria johdetaan käyttäen yksinkertaista taipumateoriaa; tästä johtuen kaikki sen perusoletukset ovat pitäviä. Leikkausmuodonmuutokset on jätetty huomiotta ”palkeissa” ja ne on laskettu ainoastaan poikittaisissa kerroksissa määrittämällä vierintäleikkausjäykkyys. Tämä lähestymistapa tarjoaakin ratkaisun vain sinimuotoisesti kuormitettujen ja yksinkertaisesti tuettujen palkkien/elementtien ratkaisemiseksi tarkoitettuun differentiaaliyhtälöön. Kuitenkin ero tarkan ratkaisun (sinimuotoisten kuormien) ja pistekuormien tai tasaisesti jakautuneen kuorman välillä on minimaalinen (noin 3 prosenttia) ja täysin hyväksyttävä insinöörin laskentojen kannalta. Tämä on esitetty taulukossa 1. (FPInnovations 2011d.)

Taulukko 1. Täysin jäykällä kiinnikkeillä ja joustavilla kiinnikkeillä kiinnitetyn T-palkin taipumien suhde eri kuormitustyypeillä. (FPInnovations 2011c.)

Kuormitustyyppi	2,5 metrin jännevälillä oleva palkki	10 metrin jännevälillä oleva palkki
Keskellä oleva kuorma	1,9313	1,3492
Kolmannespisteissä oleva kuorma	1,9060	1,3266
Tasainen kuorma	1,9039	1,3258
Sinimuotoinen kuorma	1,9021	1,3190

Mekaanisesti liitettyjen palkkien teoria olettaa, että CLT-elementit ovat yksinkertaisesti tuettuja ja että niiden jänneväli on ” l ”. Ulukkeellisille CLT-elementeille on suositeltavaa käyttää laskennassa l :n arvona vähintään kaksi kertaa elementin leveyttä l_c . Tehollisen taivutusjäykkyyden (EI_{eff}) määrittämiseksi jatkuvassa usealta kohdalta tuetussa palkissa voidaan käyttää joko yksinkertaistettua tai iteroivaa menetelmää. Koska kertoimen γ arvo riippuu kahden momentin nollakohdan välissä olevan palkin pituudesta, voidaan jännevälinä laskelmissa käyttää $0,8 \times$ palkin pituus l . Iteroivassa menetelmässä voidaan taivutusjäykkyys (EI_{eff}) laskea palkin koko pituudelle käyttämällä tiettyä jänneväliä (esim. $0,8 \times l$) ja sitten käyttää yksinkertaista tietokoneohjelmaa määrittämään taitekohdat kyseiselle palkille. Tämän jälkeen saadaan taivutusjäykkyys (EI_{eff}) laskettua uudelleen käyttäen taitekohtien välimatkaa ja voidaan laskea tietokoneohjelmalla uudet taitekohdat. Yleensä muutaman iteroinnin jälkeen saadaan tarkka arvo taivutusjäykkyydelle. (FPInnovations 2011d.)

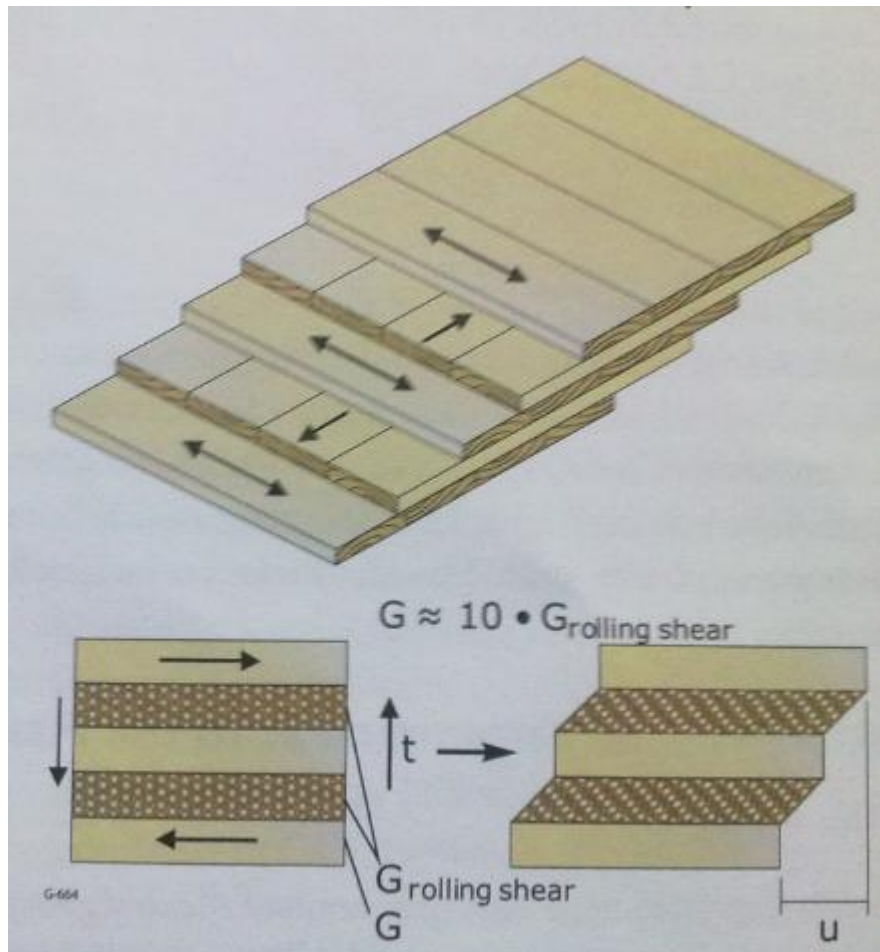
3.2 Vierintäleikkauskerroin

Vierintäleikkausvoiman ja –jäykkyyden on havaittu olevan avaintekijä CLT-elementtien mitoittamisessa ja suunnittelussa. CLT-elementtien valmistusprosessin seurauksena esim. poikittain asennettujen lamellikerrosten kuormituskäyttäytymiseen vaikuttavat elementin materiaali sekä anisotrooppisuus eli erilainen huokoisuus eri suuntiin. Brittiläisessä Kolumbiassa tehty tutkimus CLT-

elementeillä vahvistaa tämän asian. CLT-elementin tehollisen taivutusjäykkyyden (EI_{eff}) suuruus ja kuormituksen jakautuminen kerroksissa riippuu suurelta osin poikittaisten kerrosten vierintäleikkauskertoimesta. Ikävä kyllä CLT-elementtien vierintäleikkausominaisuuksista ei ole paljoa tietoa saatavilla. (FPInnovations 2011d.)

Vierintäleikkauskerroin riippuu monesta eri tekijästä, kuten puulajista, ristikkäisten kerrosten tiheydestä, laminoinnin paksuudesta sekä kosteuspitoisuudesta. Vierintäleikkauskertoimen määrittämiseen on Euroopassa kehitetty useita dynaamisia ja numeraalisia metodeja. Näillä edellä mainituilla tavoilla vierintäleikkauskertoimen arvoksi saadaan keskimäärin 1/12 ...1/20 todellisesta kimmoduulista. Vielä ei kuitenkaan ole yksimielisyyttä siitä, mitä näistä metodeista tulisi käyttää vierintäleikkauskertoimen ja -voiman määrittämiseen. (FPInnovations 2011d.)

Itse CLT-elementtien vierintäleikkausominaisuuksien määrittämiseen sopivista laskelmista ja testimeteodeista on pulaa. Elementtityyppisten tuotteiden standardisoiduista leikkaustesteistä mukautettujen testimetodien ei ole todettu olevan tyydyttäviä, koska ne on tehty elementeille, joissa on ohuet kerrokset toisin kuin CLT-elementeissä. Vierintäleikkauskertoimen ja -voiman määrittämiseen pitäisi-kin kehittää oma testaustapa ja laskentamenetelmä CLT-elementeille. (FPInnovations 2011d.)

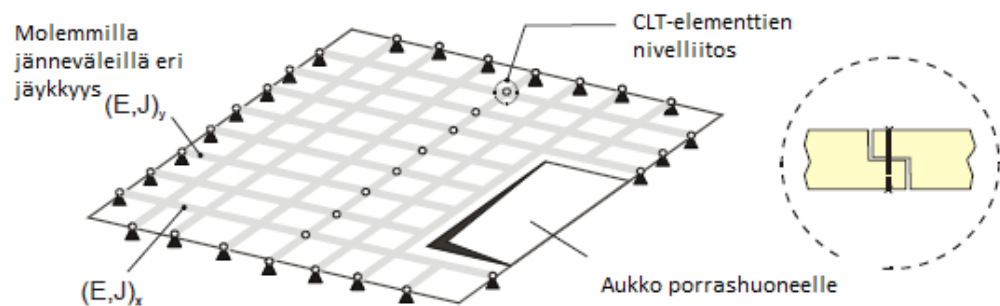


Kuva 9. 5-kerroksisen CLT-elementin vierintäleikkausmuodonmuutos (FPInnovations 2011d)

3.3 CLT -välipohjaelementin mallintaminen

Poikkileikkauksen rakenteesta, pituuden ja leveyden suhteesta sekä tuentatyyppistä riippuen elementille tulevat kuormat voidaan siirtää joko kahdelle tai kaikille neljälle reunalle, eli elementti on joko yhteen tai kahteen suuntaan kantava. CLT-välipohjaelementit suunnitellaan yleensä yksi- tai moniaukkoisiksi ja yhteen suuntaan kantaviksi, riippuen tietenkin tuentatavasta ja -olosuhteista. Jos elementti kuitenkin suunnitellaan kahteen suuntaan kantavaksi, täytyy elementin rajapinnoilla olevia liitostyyppejä samoin kuin koloja harkita tarkkaan. Massiivisten CLT-välipohjaelementtien oletetaan usein olevan jäykkiä ja ne on suunniteltu vaakakuormien (tuuli, maanjäristys) siirtämiseen. Näistä vaakavoimista aiheutuneita kuormituksia ei kuitenkaan tarvitse välttämättä laskea elementille, ellei rakennusmääräyksissä sitä erikseen mainita. Jotta välttyttäisiin ei-toivotuilta

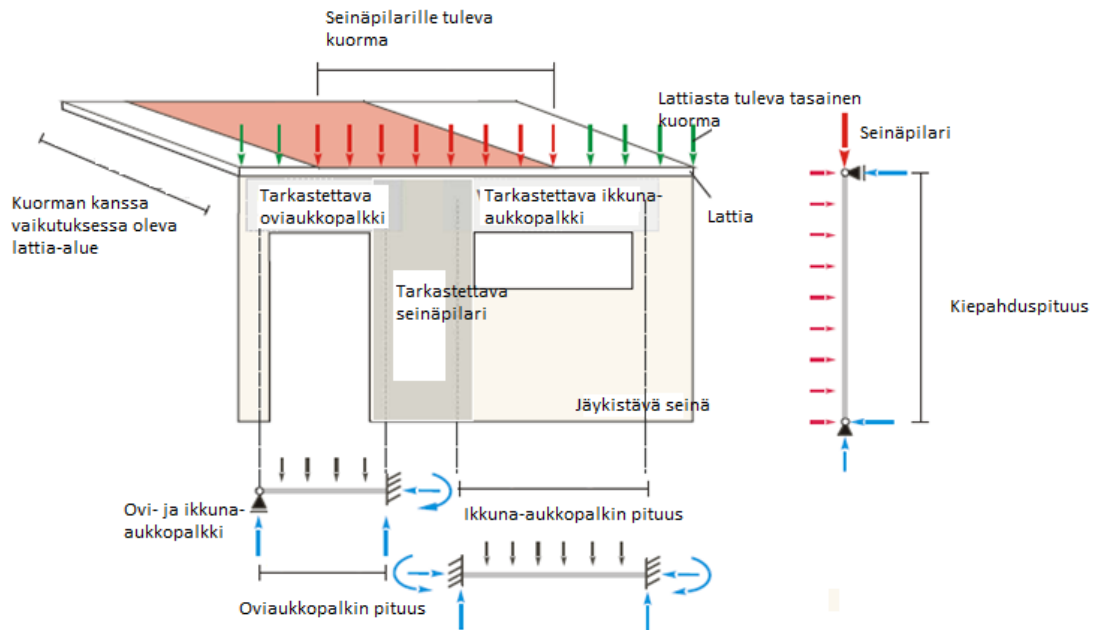
dynaamisilta vaikutuksilta elementeissä, täytyy pysyvien kuormien aiheuttamat muodonmuutokset rajoittaa 5 millimetriin. Jos tätä ei kuitenkaan pystytä takaamaan, on asia varmistettava yksityiskohtaisilla ja tarkoilla mittauksilla. (HANDBOOK 1 Timber structures 2008. 82-82.)



Kuva 10. Kahteen suuntaan kantavan välipohjaelementin kuormien siirtyminen tuille (HANDBOOK 1 Timber structures. 2008. 82)

3.4 CLT -elementtiseinän mallintaminen

CLT-seinäelementeistä rakennetun jäykistävän seinän mallintamisessa voidaan käyttää apuna ristikko- ja kehikkomalleja. Myös FEM -malleja voidaan käyttää, varsinkin seinäelementin toiminnan tarkemmassa tutkimisessa. Elementissä olevien ikkuna- ja oviaukkopalkkien tarkistamiseen täytyy kuitenkin kehittää sopivat mallit, koska sellaisia ei ole vielä olemassa. Jäykästi tuettujen ja niveltuetujen seinien yksinkertainen mallintaminen on esitetty kuvassa 4. (HANDBOOK 1 Timber structures. 2008. 83-84.)



Kuva 11. Jäykästi tuetun sekä niveltuetun seinän yksinkertainen mallintaminen (HANDBOOK 1 Timber structures. 2008. 84)

Seinien kiepahduskäyttäytyminen riippuu hoikkuusluvun lisäksi puristusvoiman sijainnista eli siitä, onko kuorma keskeinen vai epäkeskeinen. Kerrostaloissa seinäelementit täytyy ottaa huomioon yksittäisinä kokonaisuuksina vaikka tarkastellaan koko seinää. Koko seinän kiepahduskäyttäytyminen voidaan täten ottaa huomioon vain yhden kerroksen korkeudelle välipohjan suuren jäykkyyden vuoksi. Lisäksi poikittaisten jäykistävien seinien kitkalukitut liitokset johtavat suurempiin kiepahdusta aiheuttaviin voimiin seinää tarkasteltaessa. (HANDBOOK 1 Timber structures 2008. 83-84.)

3.5 CLT -välipohjaelementin mitoitus

CLT-välipohjaelementin laskentaohjeessa on käytetty FPInnovationin CLT-Handbook:ssa olleita laskentakaavoja. Edellä mainittu kirja kannatta lukea, mikäli haluaa paneutua kaavoihin syvällisemmin. CLT-välipohjaelementin mitoitus alkaa tehollisen taivutusjäykkyyden laskemisella, johon vaikuttavat muun muassa lamellikerrosten kimmomoduuli, jäykkyys sekä liitoshyötysuhdekerroin. Muut

mitoitettavat asiat ovat elementin taivutuskestävyys, taivutusvoima sekä leikkauskestävyys.

Tehollisen taivutusjäykkyyden laskeminen

Tehollinen taivutusjäykkyys saadaan laskettua kaavalla 1

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (1)$$

$$EI_{eff} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2) + (E_3 I_3 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2) \quad (1)$$

jossa E_i = lamellikerroksen kimmomoduuli [MPa]

I_i = lamellikerroksen jäykkyyysluku [mm⁴]

γ_i = liitoshyötysuhdekerroin

A_i = lamellikerroksen pinta-ala [mm²]

a_i = matka reunimmaisen lamellikerroksen keskeltä keskimmäisen lamellikerroksen keskelle [mm]

Tässä tapauksessa voidaan todeta seuraavat asiat

$$A_1 = A_3$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{b_1 h_1^3}{12}$$

$$a_2 = 0$$

$$a_1 = a_3 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

$$\gamma_1 = \gamma_3 \text{ ja } \gamma_2 = 1$$

Kaava 1 saadaan täten muutettua yksinkertaisempaan muotoon

$$EI_{eff} = E[(I_1 + \gamma_1 A_1 a_1^2) + (I_2) + (I_3 + \gamma_3 A_3 a_3^2)] \quad (1)$$

$$EI_{eff} = EI \left[\left(1 + \frac{\gamma A a^2}{I} \right) + (1) + \left(1 + \frac{\gamma A a^2}{I} \right) \right] \quad (1)$$

$$EI_{eff} = EI \left[3 + \frac{2 * \gamma A a^2}{I} \right] \quad (1)$$

Edellä olevassa kaavassa 1 olevat tuntemattomat lukuarvot (γ_1, A, a sekä I) saadaan laskettua seuraavilla kaavoilla

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EA \bar{h}}{I^2 * G_r * b}}$$

$$A = b * h$$

$$a = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Alussa mainittu tehollinen taivutusjäykkyys saadaan lopulta laskettua kaavalla 1

$$EI_{eff} = EI \left[3 + \frac{2 * \gamma A a^2}{I} \right] \quad (1)$$

Tämä edellä oleva tehollisen taivutusjäykkyyden ratkaisutapa toimii vain, jos elementissä on viisi lamellikerrosta tai vähemmän. Seitsenlamellisen elementin tehollisen taivutusjäykkyyden ratkaiseminen etenisi seuraavalla tavalla.

Seitsenlamellisen elementin tehollinen taivutusjäykkyys saadaan ratkaistua kaavalla 2

$$E_{eff} = EI(1) - EI(2) + EI(3) \quad (2)$$

jossa $EI(1)$ on viiden kerroksen poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys (poikittaissuunta)

El(2) on kolmen keskimmäisen kerroksen taivutusjäykkyys (nämä kaikki kolme kerrosta lasketaan toimivan pitkittäisinä)

El(3) on kolmen keskimmäisen kerroksen taivutusjäykkyys (poikittaissuunta)

a) El(1):n laskeminen käyttäen viiden kerroksen poikkileikkausta tapahtuu kaavalla 3

$$EI(1) = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2) + (E_3 I_3 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2) \quad (3)$$

jossa
$$a = \frac{h_i}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_i}{2}$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i}$$

$$E_1 = E_3$$

$$A_1 = A_3$$

$$h_1 + h_2 = h_2 + h_3$$

$$\gamma_1 = \gamma_3$$

Edellä olevasta seuraa, että $a_2 = 0$. Myös seuraavat asiat voidaan todeta

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i}{I^2} * \frac{\bar{h}_i}{G_r * b}} \quad i = 1 \text{ ja } i = 3$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

$$I_1 = I_3 = \frac{b_1 h_1^3}{12}$$

$$I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}$$

$$\gamma_1 = \gamma_3 \text{ ja } \gamma_2 = 1$$

Sekä γ_1 ja γ_3 saadaan laskettua kaavalla 4

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EA}{l^2} * \frac{\bar{h}}{G_r * b}}$$

Kaava 3 $EI(1)$:n laskemiseksi voidaan ilmaista myös seuraavassa muodossa

$$EI(1) = E[(I_1 + \gamma_1 A_1 a_1^2) + (I_2) + (I_3 + \gamma_3 A_3 a_3^2)] \quad (3)$$

jossa $A_1 = A_3$

$$a_1 = a_3$$

$$\gamma_1 = \gamma_3$$

$$I_1 = I_3 = \frac{b_1 h_1^3}{12}$$

$$I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}$$

Täten $EI(1)$ saadaan laskettua kaavalla 3, joka saadaan sievennettyä seuraavaan muotoon

$$EI(1) = E[(I_1 + \gamma_1 A_1 a_1^2) + (I_2) + (I_3 + \gamma_3 A_3 a_3^2)] \quad (3)$$

$$EI(1) = E[2(I_1 + \gamma_1 A_1 a_1^2) + (I_2)] \quad (3)$$

b) $EI(2)$:n laskeminen on melko yksinkertaista ja tapahtuu kaavalla 4

$$EI(2) = E * I_2 = E * \frac{b_2 h_2^3}{12} \quad (4)$$

c) $EI(3)$:n laskeminen tapahtuu käyttäen apuna kolmen kerroksen poikkeikkausta ja se voidaan laskea kaavalla 5

$$EI(3) = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (5)$$

$$EI(3) = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2) \quad (5)$$

jossa $A_1 = A_2$

$$a_1 = a_2$$

$$I_1 = I_2$$

Edellä oleva kaava 5 saadaan sievennettyä seuraavaan muotoon

$$EI(3) = 2E(I + \gamma A a^2)$$

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i \cdot h_1'}{I^2 G_r \cdot b}}$$

Nyt, kun tiedetään kaikkien muuttujien arvot, voidaan $EI(3)$ laskea kaavalla 5

$$EI(3) = 2E(I + \gamma A a^2) \quad (5)$$

Lopuksi koko elementin tehollinen taivutusjäykkyys $E_{eff} final$ saadaan laskettua yhdistämällä edellä lasketut $EI(n)$:t kaavalla 6

$$E_{eff} final = EI(1) - EI(2) + EI(3) \quad (6)$$

Taivutuskestävyyden laskeminen

Elementin taivutuskestävyys saadaan laskettua kaavalla 7

$$M_r = \phi * F_b * \frac{I_{eff}}{(\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1)} \quad (E_1 = E_2 = E_3) \quad (7)$$

Taivutuskestävyys voidaan myös laskea käyttämällä yksinkertaistettua tapaa, jolloin edellä oleva kaava 7 saadaan seuraavaan muotoon

$$M_r = \phi * F_b * \frac{I_{eff}}{0,5 h_{tot}} \quad (7)$$

Taivutusvoiman laskeminen

Elementille tuleva maksimi taivutusvoima saadaan kaavasta 8

$$\sigma_{max} = \sigma_{global} + \sigma_{local} \quad (8)$$

Missä σ_{local} on kuormitus ulkokerroksessa seurauksena ulkokerroksen taipumisesta ja σ_{global} on taipumisesta syntynyt pitkittäinen kuormitus ulkokerroksessa. Ne saadaan laskettua kaavoilla 9 ja 10

$$\sigma_{global} = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M}{(EI_{eff})} \quad (9)$$

$$\sigma_{local} = \frac{0,5 E_1 h_1 M}{(EI_{eff})} \quad (10)$$

Termi a_1 on matka ensimmäisen kerroksen keskeltä poikkileikkauksen keskelle ja h_1 on uloimmaisen kerroksen paksuus. Maksimi taivutusvoima saadaan täten laskettua kaavalla 11

$$\sigma_{max} = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M}{(EI_{eff})} + \frac{0,5 E_1 h_1 M}{(EI_{eff})} \quad (11)$$

Sama edellä oleva kaava 11 voidaan ilmaista myös seuraavasti

$$\sigma_{max} = \frac{ME_1}{(EI_{eff})} * (\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1) \quad (11)$$

Kun kimmomoduuli on sama kaikille pitkittäisille kerroksille, voidaan maksimi taivutusvoima laskea kaavalla 12

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I_{eff}} * (\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1) \quad (12)$$

Ehto taivutusvoimalle

$$\sigma_{max} \leq \emptyset * F_b$$

Jos siis maksimi taivutusvoima on pienempi kuin $\emptyset * F_b$ elementti kestää.

Leikkauskestävyyden laskeminen

Leikkauskestävyyden τ suuruus saadaan laskettua kaavalla 12

$$\tau = \frac{1,5 * V}{A_{brutto}} \quad (13)$$

jossa τ = maksimi leikkauskestävyys (MPa)

V = maksimi leikkausvoima (MN)

A_{brutto} = poikkileikkauksen pinta-ala = $b * h_{tot}$ (mm²)

Yksinkertaisen taipumisteorian (ja mekaanisesti liitettyjen palkkien -teorian) mukaan, maksimileikkausvoimat ilmenevät kun normaalivoimat ovat nolla. Leikkausvoima saadaan täten laskettua kaavalla 14

$$\tau = \frac{V * (EQ)}{(EI)_{eff} * b} \quad (14)$$

jossa τ = leikkausrasitus (MPa)

V = maksimi leikkausvoima (MN)

EQ = poikkileikkausalueen staattinen momentti (mm³)

b = poikkileikkausalueen leveys poikittaissuunnassa leikkausmuodonmuutokseen

Viisilamellisen CLT -elementin staattinen momentti voidaan laskea kaavalla 15

$$(EQ) = \gamma_1 * E_1 * A_1 * a_1 + E'_1 * A'_1 * a'_1 + \gamma_2 * E_2 * \frac{A_2}{2} * \frac{h_2}{4} \quad (15)$$

$$\tau \leq \emptyset * F_v$$

Elementin leikkausrasituksen τ tulee olla pienempi kuin sen leikkauskestävyys $\emptyset * F_v$.

Pitkittäinen leikkauskestävyys saadaan laskettua kaavalla 16

$$V_{rL} = \frac{\emptyset * F_v * (EI_{eff}) * b}{\gamma_1 * E_1 * A_1 * a_1 + E'_1 * A'_1 * a'_1 + \gamma_2 * E_2 * \frac{A_2}{2} * \frac{h_2}{4}} \quad (16)$$

Samankaltaisella tavalla soveltuvin muutoksin saadaan laskettua myös kolmi- tai seitsenlamellisen CLT -elementin leikkauskestävyys.

CLT -elementeissä, joissa on viisi kerrosta lamelleja, taikka enemmän, pitäisi tarkistaa leikkausvoima myös poikittaiskerroksissa (vierintäleikkauskestävyys). Elementin staattinen momentti saadaan laskettua kaavalla 17

$$(EQ) = \gamma_1 E_1 A_1 \left(a_1 - \frac{h_2}{2} \right) + E'_1 A'_1 \left(a'_1 - \frac{h_2}{2} \right) \quad (17)$$

Itse vierintäleikkauskestävyys saadaan sitten laskettua kaavan 18 avulla:

$$V_{rR} = \frac{\emptyset * F_v * (EI_{eff}) * b}{\gamma_1 E_1 A_1 \left(a_1 - \frac{h_2}{2} \right) + E'_1 A'_1 \left(a'_1 - \frac{h_2}{2} \right)} \quad (18)$$

Leikkauskestävyydeksi valitaan pienempi näistä kahdesta edellä lasketusta arvosta, eli

$$V_r = \min(V_{rL} \text{ tai } V_{rR})$$

3.6 CLT -seinäelementin mitoitus

CLT-välipohjaelementin laskentaohjeessa on käytetty myös FPInnovationin CLT-Handbook:ssa olleita laskentakaavoja. Edellä mainittu kirja kannatta lukea, mikäli haluaa paneutua näihin kaavoihin syvällisemmin.

1) Yksinkertaistettu tapa

M_r saadaan laskettua kaavalla 19

$$M_r = \emptyset * F_b * \frac{I_{eff}}{0,5H} \quad (19)$$

ja I_{eff} voidaan laskea kaavalla 20

$$I_{eff} = \frac{h_{eff} * H^3}{12} = \frac{H^3}{12} * \sum_i h_i \quad (20)$$

missä H on lamellin syvyys ja h_i on lamellien paksuus poikittaissuunnassa pitkittäiseen kuormaan nähden.

Kaavassa käytettävät arvot

Lopuksi saadaan laskettua itse leikkausvoima kaavalla 21

$$M_r = \emptyset * F_b * \frac{I_{eff}}{0,5H} \quad (21)$$

Hoikkuusluku C_c voidaan laskea kaavalla 22

$$C_c = \frac{H}{d} = \frac{H}{2\sqrt{3} * r_{eff}} \quad (22)$$

,josta r_{eff} saadaan laskettua kaavalla 23

$$r_{eff} = \sqrt{\frac{I_{eff}}{A_{eff}}} \quad (23)$$

ja I_{eff} saadaan kaavalla 24

$$I_{eff} = \frac{h_{eff} * H^3}{12} = \frac{H^3}{12} * \sum_i h_i \quad (24)$$

,jossa h_i on kuormituksen suuntaisten lamellien paksuus ja b on normaalisti 1000 mm.

A_{eff} saadaan seuraavalla kaavalla 25

$$A_{eff} = b * h_{eff} = b * \sum_i h_i \quad (25)$$

Kun tiedetään A_{eff} ja I_{eff} , r_{eff} saadaan sitten laskettua edellä mainitulla kaavalla 26

$$r_{eff} = \sqrt{\frac{I_{eff}}{A_{eff}}} \quad (26)$$

2) CSA 086-09 ja Gamma-teorian mukainen lähestymistapa

Tapauksissa, joissa $P - \Delta$ vaikutukset täytyy ottaa huomioon, tulisi laskelmiin sisällyttää momentti, joka ottaa tämän $P - \Delta$ vaikutuksen huomioon. Seuraavalla kaavalla 27 saadaan huomioitua edellä mainittu $P - \Delta$ vaikutus

$$\left(\frac{P_f}{P_r}\right)^2 + \frac{M_{f,P-\Delta}}{M_r} \leq 1 \quad (27)$$

jossa P_f on pitkittäinen puristuskuorma, M_r on taivutusmomenttikestävyys ja $M_{f,P-\Delta}$ on taivutusmomentti, joka sisältää $P - \Delta$ vaikutuksen

$M_{f,P-\Delta}$ saadaan ratkaistua kaavalla 28

$$M_{f,P-\Delta} = M_f = \frac{P_f * (\Delta_f + e_0 + \Delta_0)}{1 - \frac{P_f}{P_E}} \quad (28)$$

jossa e_0 = elementin taipuma johtuen pitkittäisen kuorman epäkeskeisyydestä. Epäkeskeisyyden arvoksi tulisi ottaa 1/6 elementin paksuudesta

Δ_0 =elementin epäkeskeisyys, johtuen valmistuksesta ja asennuksesta. Sen arvona käytetään yleensä 1/500 elementin korkeudesta

Δ_f =epäkeskeisen kuormituksen aiheuttaman taipuma

P_E =Eulerin kiepahduskuorma

Eulerin kiepahduskuorma saadaan laskettua kaavalla 29

$$P_E = \frac{\pi^2 E_{05} I_{eff}}{(K_e * L)^2} \quad (29)$$

jossa K_e = seinän tehollinen pituuskerroin

L = seinän korkeus

Koska leikkausmuodonmuutokset ovat tärkeässä roolissa CLT-elementtien ominaisuuksia määritettäessä, on tärkeää sisällyttää ne seinän pitkittäisen kuormituskapasiteetin laskelmiin. Tavallista kiepahduksen laskentakaavaa, joka

ottaa huomioon leikkausmuodonmuutokset, käyttämällä ja sijoittamalla GA_{eff} kaavaan, saadaan pitkittäinen kuormituskapasiteetti laskettua kaavalla 30

$$P_E = \frac{P_E}{1 + \frac{\kappa * P_E}{GA_{eff}}} \quad (30)$$

jossa κ on leikkausvakiokerroin

4 CLT-elementtien palomitoittaminen

CLT-elementeillä on potentiaalia tarjota erinomainen palosuoja verrattuna muihin massiivisiin palamattomiin rakenteisiin. Paksujen puurakenteiden luontaisen hitaan ja tasaisen hiiltymisen vuoksi massiivipuurakenteet säilyttävät merkittävän osan rakennekestävyydestään jopa pitkäkestoisissakin palotilanteissa. (FPInnovations 2011d.)

Rakennusmääräykset velvoittavat, että kantavat rakenteet omaavat riittävän palonkeston, jotta asukkailla olisi aikaa paeta ja jotta omaisuusvahingot voitaisiin minimoida. Tarkoitus on osastoida rakennus palon leviämisen estämiseksi ja varmistaa rakenteiden soveltuvuus romahduksen välttämiseksi tai ainakin sen viivästyttämiseksi. Rakenneyhdistelmien palonkestoluokka on perinteisesti määriteltä rakentamalla niistä kopio ja altistamalla se standardoituun (ISO 834) palonkestokokeeseen. Kokeessa seinä tai lattia altistetaan ankaralle tulipalolle ja seurataan palokaasujen lämpötilojen nousua. Standardit vaativat myös, että testikohde on kuormitettu samalla lailla, kuten oikeissakin olosuhteissa. Tämä takaa sen, että tietylle rakenneyhdistelmälle saatu palonkestoluokka on soveltuva käytettäväksi myös missä tahansa yksittäisessä rakennuksessa. (FPInnovations 2011e.)

Standardoidulla palonkestokokeella on kolme kriteeriä:

- 1 Ensinnäkin rakennekriteerit tulee saavuttaa: rakennelman täytyy kestää määrätty kuorma koko kokeen ajan
- 2 Toiseksi eristämiskriteerien tulee täytyä: rakennelman täytyy estää palolta suojassa olevan pinnan lämpötilaa nousemasta mistään yksittäisestä kohden yli 180 asteen tai monesta kohden mitatun keskiarvon on oltava alle 140 astetta.
- 3 Kolmanneksi tiiveyskriteerin tulee täytyä: rakennelman tulee estää tulta ja palokaasuja sytyttämästä palamattomalla puolella olevaa puuvillan palaa.

Aika, joka kuluu siihen, että rakennelma ei enää täytä näitä kolmea kriteeriä, määrittää sen palonkestoluokan. (FPInnovations 2011e.)

Suunniteltaessa CLT-elementeistä tehtäviä rakennuksia, on usein tarpeellista määrittää rakennelman palonkestoluokka, jotta voidaan varmistaa, että se täyttää rakennusmääräykset. Joissain tapauksissa, esimerkiksi ei kantavissa seinärakennelmissa, on tarpeen määrittää vain rakenteen eristämiskyky ja tiiveys eli kohdat 2 ja 3. Kantavan rakenteen ollessa kyseessä, täytyy kaikkien kolmen kohdan vaatimusten täytyä. Koska laskentatapa on insinööripohjainen, ei ole tarvetta rajoittaa laskettavan palonkeston aikaa. Itse asiassa yli tunnin paloaltituksissa oikea hiiltymäsyvyys on pienempi kuin laskelmissa, jonka vuoksi rakenteet tulee mitoitettua hieman varman puolelle. (FPInnovations 2011e.)

4.1 Palon osastoiva yhtälö

Palon osastoiva yhtälö CLT-elementtirakennelmissa saadaan helposti laskettua, kunhan vain varmistetaan muutama asia. Tärkeintä on, että CLT-elementit sekä niiden liitokset ovat tiiviitä, estäen kuuman ilman tai palokaasujen läpipääsemisen palon aikana. Tämä voidaan varmistaa useilla eri tavoilla, kuten reunaliimaamalla ainakin yksi elementin sisäkerros, käyttämällä liimaa, joka laajenee tukkien elementin eri kerrosten väliset raot tai käyttämällä kipsilevyä.

Toinen tärkeä seikka palon osastoivan yhtälön kannalta on elementtien välisten liitosten yhtenäisyys. Palotarkastajan tulee varmistaa, että elementtien väliset liitosdetaljit ovat riittävät, jottei rakennelman palonkesto huonone. On myös tär-

keää, etteivät ilma tai kuumat kaasut pääse läpäisemään liitoksia. Tiiviisti asennetut kiilat, ponttiliitokset tai limiliitokset takaavat riittävän palonkeston. Limiliitoksen ollessa kyseessä on suositeltavaa käyttää rakennusliimaa tai tiivistettä liitoksen tiiveyden varmistamiseksi. (FPInnovations 2011e.)

Ei-kantaville seinärakenteille palonkestoluokka voidaan laskea hiiltymäsyvyyteen perustuen. Varman päälle oleva oletus olisi hiiltymän pitäminen ainakin 25 millimetrin päässä palolta suojassa olevalta puolelta. Tämä vastaa alle 50 asteen lämpötilaa suojassa olevalla puolella perustuen Janssenin ja Whiten (1994) julkaisemaan tutkimukseen. Tämä syvyys varmistaa myös, että seinärakenne säilyy rakenteellisesti kestäväenä samoin kuin itsekantavana. (FPInnovations 2011e.)

Edellä olevien paloerottelukriteerien (eristävyys ja tiiveys) täyttyessä, palonkestoluokka kaikille kuormitetuille rakennelmille palotilanteessa saadaan rakennekestävyyden menetyksen kautta. (FPInnovations 2011e.)

4.2 Rakenteellinen palonkestävyys

CLT-elementin palonkestävyysluokka voidaan laskea käyttäen samaa laskentatapaa, kuin käytetään liimapuun ja massiivipuun palonkestävyysluokan määrittämiseen. Tämä laskentatapa on nimeltään tehollinen poikkileikkaus ja siinä voidaan käyttää puusuunnittelustandardin tarjoamia mitoitusarvoja. (FPInnovations 2011e.)

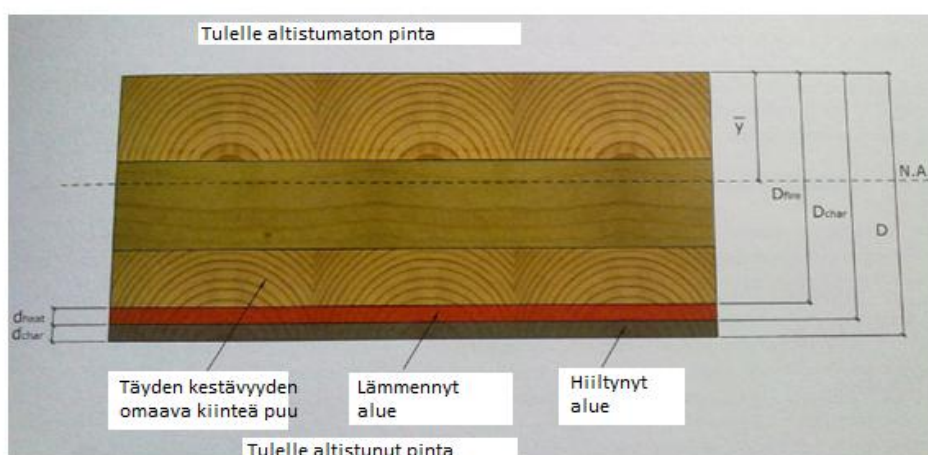
Tämä tehollisen poikkileikkauksen laskentatapa sopii ainoastaan sellaisiin CLT-elementtiasennuksiin, jotka on testattu aikaisemmin mainitulla standardoidulla palonkestotestillä. Jos valitaan jokin tästä testistä poikkeava paloaltistus, saataan hiiltymänopeus joutua määrittämään uudestaan lämmönsiirtymisanalyysillä. Standardoidusta palonkestotestistä poikkeavalle paloaltistukselle joutuvien CLT-elementtiasennuksien tutkimus on meneillään Carletonin yliopistossa Kanadassa. (FPInnovations 2011e)

CLT-seinä- tai CLT-välipohjaelementtiasennuksen palonkestoluokan laskeminen voidaan jakaa viiteen eri kohtaan, jotka ovat

1. hiiltymäsyvyyden laskeminen
2. tehollisen jäännöspoikkileikkauksen määrittäminen
3. jäännöspoikkileikkauksen neutraaliakselin ja inertiaomentin määrittäminen
4. rakenteellisen kestävyuden laskeminen
5. jäännöskestävyyden vertaaminen laskettuun kuormaan. (FPInnovations 2011e.)

4.3 Tasomaisen CLT-elementin palomitoitus

CLT-elementin palomitoitus menee yksidimensionaalisenä mitoituksena, eli niin sanottua reunapyöritystä ei tarvitse ottaa huomioon. Lasketaan vain palon aiheuttama hiiltymäsyvyys D_{char} ja vähennetään se elementin poikkileikkauksesta. Elementin kestävyys saadaan sitten laskettua edellä olevissa kappaleissa 3.5 ja 3.6 olevien kaavojen avulla. Hiiltymäsyvyyden laskemisessa voidaan käyttää Eurocode 1995-1-2:ssa olevia ohjeita. Jokaisella CLT-elementtivalmistajalla on kuitenkin oma hiiltymäsyvyyskertoimensa β_0 . CLT-elementin palomitoitusta tehdessä on lisäksi otettava huomioon se, onko CLT-elementti suojaamaton vai onko sen pinnassa esimerkiksi kipsilevy. Kuvassa 12 näkyy palonkestoluokan laskennassa käytettävää termistöä.



Kuva 12. CLT-elementin palonkestoluokan laskennassa käytettävät termit (FPInnovations 2011e)

5 CLT-elementtien liitosten mitoittaminen

Liitokset massiivipuorakentamisessa, kuten CLT-elementtirakentamisessa ovat tärkeässä roolissa kestävyys-, jäykkyyden ja rakennuksen vakauden varmistamisessa. Suunnittelijoiden pitääkin ottaa ne tarkasti huomioon. Onnettomuuksien jälkeisissä tutkimuksissa on huomattu, että muiden syiden lisäksi rakennusten romahtamiset johtuvat usein alimitoitetuista tai väärinvalmistetuista liitoksista. Elementtien väliset liitokset saattavat lisäksi heikentää rakenteen kokonaiskestävyyttä ja jäykkyyttä. (FPInnovations 2011f)

Kun rakenne-elementit on liitetty toisiinsa kiinnikkeillä tai joillain muilla metallisilla liittimillä, kutsutaan liitoksia ”mekaanisiksi liitoksiksi”. Tyypillisesti suuri kiinnikkeiden välinen etäisyys toisistaan sekä reunoista on tarpeen suurimmassa osassa mekaanisista liitoksista, jotta voidaan välttää halkeilu ja leikkausmurtumat. Riittävän tarkka liitosten suunnittelu ja valmistus määrittelee usein puurakenteiden menestyksen kilpailtaessa muiden rakenneratkaisujen, kuten teräksen tai betonin, kanssa. Tämä on erityisen tärkeää monikerroksisissa puurakennuksissa, jotka on rakennettu kokonaan CLT-elementtejä käyttäen. (FPInnovations 2011f)

CLT-elementtien välisissä liitoksissa on otettava huomioon syiden erisuuntaisuus. Tästä johtuen niitä ei voi mitoittaa suoraan nykyisillä Eurokoodissa olevilla ohjeilla.

5.1 CLT -elementtien liitoksissa eniten käytetyt liitostyypit

Nykyään on tarjolla suuri valikoima kiinnikkeitä ja erityyppisiä liitosdetaljeja, joita voidaan käyttää CLT-elementtien välisissä liitoksissa tai liitettäessä niitä muihin rakennetyyppeihin. CLT-valmistajat suosittelevat käytettäväksi pitkiä itseporautuvia ruuveja ja niitä käytetäänkin usein seinän ja lattian välisissä liitoksissa. Myös perinteisiä kiinnitystyyppisiä, kuten tavallisia ruuveja, nauloja, niittejä, pultteja sekä tappeja voi käyttää elementtien liitoksissa. Toisentyypisillä perinteisil-

lä kiinnikkeillä, mukaan luettuna kantavat kiinniketyypit kuten rengaslaippa, murtuva levy ja hammaslevy voi olla jotain käyttöä. Niiden käyttö tulee kuitenkin rajoittaa vain suuresti kuormitettuihin rakennelmiin. Markkinoille on tulossa myös muutamia uusia mielenkiintoisia liitossysteemejä, kuten KNAPP -systeemi ja Geka-kiinnikkeet. Näille edellä mainituille uusille liitostyypeille mahdollisia käyttökohteita ovat esimerkiksi sellaiset rakennukset, joissa tarvitaan todella korkealaatuista esivalmistusta käyttäen CNC (computerized numeral control) -koneistusta. Onneksi suurin osa CLT:n ja liimapuun valmistajista käyttävät CNC-teknologiaa, joka varmasti auttaa näiden uusien liitostyyppien omaksumista. Liitostyyppin valinta riippuu kuitenkin suurelta osin liitettävistä elementeistä sekä käytetyistä rakennetyypeistä. (FPInnovations 2011f)

5.1.1 Itseporautuvat ruuvit ja puuruuvit

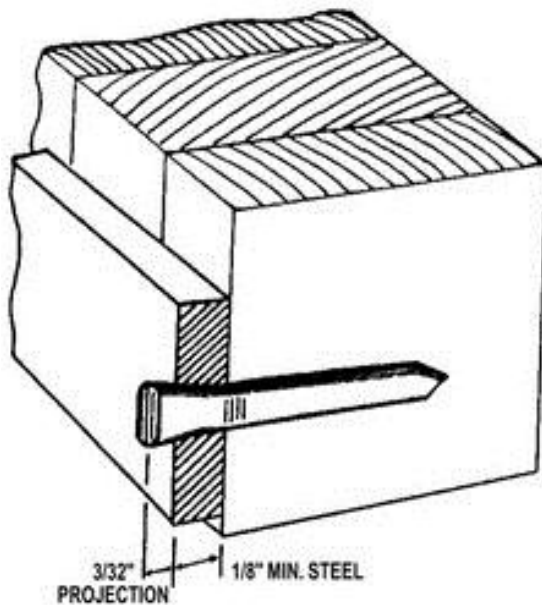
Itseporautuvat ruuvit (Kuva 11) ja puuruuvit (Kuva 12) ovat laajalti käytettyjä Euroopassa CLT-elementtien asentamiseen. Asennuksen helppous sekä ruuvien suuri sivuttais- ja pitkittäissuuntainen kapasiteetti tekevät niistä paljon käytettyjä CLT-elementtien asennuksissa. Ne voivat lisäksi ottaa vastaan yhdistettyjä pysty- ja vaakakuormia. Puuruuveja ja itseporautuvat ruuveja saa myös useina eri kokoina (halkaisija 4...12 millimetriin ja pituus aina 600 millimetriin saakka) sekä erikoisominaisuuksilla varustettuina. Itseporautuvat ruuvit eivät myöskään yleensä vaadi esiporausta, toisin kuin perinteiset puu- tai ankkuriruuvit. (FPInnovations 2011f)



Kuva 13. Itseporautuva ruuvi (Oy Nymix Ab)

5.1.2 Naulat ja liimapuuniitit

Naulat ja liimapuuniitit (Kuva 7) eivät ole niin yleisesti käytettyjä CLT-elementtien asennuksissa kuin ruuvit. Erikoisnaulat, kuten rihlatut ja kierrekäsittelyt naulat sekä liimapuuniitit ovat eniten käytettyjä rei'itettyjen metallilevyjen ja konsolien kanssa asennettuina. Niitä ei kuitenkaan voi asentaa puun päittäispinnoille ulosvetovoiman vuoksi. (FPInnovations 2011f)



Kuva 15. Liimapuuniittiliitos (ClevelandSteel)

5.1.3 Pultit ja vaarnat

Pultit ja vaarnat ovat yleisesti käytettyjä massiivipuurakentamisessa. Niitä voidaan myös käyttää CLT-elementtien asennuksissa, erityisesti ottamaan vastaan sivuttaiskuormitusta.. Jos ne kuitenkin asennetaan aivan reunalle, täytyy suunnittelussa olla huolellinen tai voidaan menettää sivuttaistuenta, etenkin CLT-elementeissä, joissa yksittäisiä lamelleja ei ole liimattu reunoilta. (FPInnovations 2011f)



Kuva 16. Vaarnaliitos [<http://www.examiner.com/article/wood-entry-doors-part-ii-selecting-joinery-to-hold-it-all-together>]

5.1.4 Kantavat kiinnikkeet

Kantavia kiinnikkeitä kuten rengasliittimiä ja murtuvia levyjä käytetään yleisesti liimapuuliitoksissa, mutta ne eivät ole levinneet kovinkaan laajalti CLT-liitosten asennuksiin. Kantavia kiinnikkeitä voidaan käyttää tietyissä kohteissa, mutta niiden sijainti suhteessa CLT-elementtien kerrokseen pitää määritellä suhteellisen tarkasti. Tämä vain vaatii, että elementit pitää profiloida tehtaalla ennen toimitusta. Myös kuormitustyypillä on merkitystä tämänkaltaisille kiinnikkeille. (FPInnovations 2011f)



Kuva 17. Murtuvalla levyllä tehty liitos (Portland Bolt and Manufacturing Company)

5.1.5 Uudentyyppiset kiinnikkeet

Uuden sukupolven kiinnikkeet, kuten Geka-liittimet sekä KNAPP -systeemi ovat tulossa koko ajan suosittumaksi massiivipuuasennuksissa. Tämä on tulosta viime aikojen kehityksestä CNC (Computerized Numerical Control) -teknologiassa, puumateriaaleissa sekä halusta korkeatasoiseen esivalmistukseen, jotta voitaisiin vähentää asennusaikaa ja kuluja. (FPInnovations 2011f)

6 Pohdinta

Kokonaisuutena opinnäytetyöprosessi sujui suunnitelmieni mukaan ja aiheen rajaaminenkin onnistui hyvin, siitä huolimatta, että se alussa tuotti hieman ongelmia. CLT:stä oli harmillisen vähän aineistoa ja julkaisuja saatavilla, johtuen CLT-rakentamisen vähyydestä ja kyseisen tuotteen uutuudesta markkinoilla. Teoriatiedon etsimiseen ja mitoitusohjeen tekemiseen kuluikin tästä johtuen suunniteltua enemmän aikaa. Mitoitusohjeesta tuli kuitenkin luotettava ja teoria-tietokin on peräisin tunnetuista julkaisuista ja CLT-valmistajilta. Opinnäytetyön aikana opin paljon uutta CLT-elementtirakentamisesta, mutta myös puurakentamisesta yleensä. Tästä on varmasti hyötyä tulevaisuudessa ja toivonkin vielä olevani tekemisissä puurakentamisen kanssa.

Tietoa laskelmien tekoon joutui hakemaan monesta eri paikasta, kuten internetistä, alan kirjallisuudesta sekä julkaisuista. Tämä kuitenkin lisää laskelmien luotettavuutta, varsinkin kun suurin osa julkaisuista oli tunnettujen ja vankan kokemuksen omaavien tahojen tekemiä. Näistä lähteistä saatua tietoa joutui soveltamaan joissain kohden laskelmia mitoitusohjeiden ja -esimerkkien puutteellisuuden vuoksi. Tästä ei kuitenkaan ole mitään haittaa, johtuen ylimitoituksen vähäisestä määrästä. Tätä opinnäytetyötä voi tulevaisuudessa käyttää esimerkiksi opetusmateriaalina puurakenteiden kursseilla ja sen avulla pystyy myös mitoittamaan tärkeimmät tekijät CLT-elementeistä. Laskelmia voisi lisäksi lähteä kehittämään entistä tarkemmiksi ja ehkä tehdä niiden pohjalta jonkinlaisen mitoitusohjelman CLT:lle.

CLT-elementtirakentaminen yleistyy koko ajan Suomessa. Yleistymisen myötä on odotettavissa lisää suomenkielistä materiaalia koskien CLT-rakenteiden mitoittamista ja teoriaa. Kaikkein parastahan olisi, jos jossain vaiheessa tulisi kattavat yleiset ohjeet kaikkien CLT-rakenteiden mitoittamiseen Euroopassa. Sitä kuitenkin saadaan varmasti odottaa vielä vuosia ja tällä hetkellä on pärjättävä sillä mitä on tarjolla. Kuitenkin näillä nykyisilläkin materiaaleilla saadaan onneksi mitoitettua CLT-rakenteita turvallisesti ja luotettavasti.

Lähteet

- 1 FPIinnovations. 2011b. CLT-handbook chapter 1: Introduction to cross-laminated timber. Quebec, QC: Special Publication SP-528E.
- 2 FPIinnovations. 2011a. CLT-handbook chapter 2: Cross-laminated timber manufacturing . Quebec, QC: Special Publication SP-528E.
- 3 FPIinnovations 2011d. CLT-handbook chapter 3: Structural design of cross-laminated timber elements. Quebec, QC: Special Publication SP-528E.
- 4 FPIinnovations. 2011f. CLT-handbook chapter 5: Connections in cross-laminated timber building. Quebec, QC: Special Publication SP-528E.
5. FPIinnovations. 2011e. CLT-handbook chapter 8: Fire performance of cross-laminated timber assemblies. Quebec, QC: Special Publication SP-528E.
6. FPIinnovations. 2011c. CLT-handbook chapter 8: Environmental performance of cross-laminated timber. Quebec, QC: Special Publication SP-528E.
- 7 HANDBOOK 1 Timber structures. 2008.
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf
- 4 HANDBOOK 2 Design of timber structures according to EC5. 2008.
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/Handbook_2_Final_version.pdf
- 8 Puuinfo. 5/2011. CLT-levy (cross laminated timber) / ristiinliimattu massiivipuulevy runko-, välipohja- ja kattorakentamiseen.
<http://www.puuinfo.fi/tuotteet/clt-levy-cross-laminated-timber-ristiinliimattu-massiivipuulevy-runko-valipohja-ja-kattorakentamiseen/>
- 9 Jaakkola, H. 2/2012. Järeät puulevyt tulossa myös suomalaiseen kerrostalorakentamiseen. Rakennustaito.
<http://www.rakennustieto.fi/lehdet/rakennustaito/index/lehti/5z6piFivE.html>
- 10 Milner Associates. http://www.milnerassociates.co.uk/Inspireme_CLT.html
- 11 Eridomic Oy. <http://www.eridomic.fi/clt-elementit.html>
- 12 News Team. 2012. Frame Australia 2012 - EARLY BIRD OFFER. WoodSolutions. <http://www.woodsolutions.com.au/Blog/Frame-Australia-2012>
- 13 Podesto, L. 2012. Is North America Ready For Wood High-Rises?. STRUCTURE. <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=1474>
- 14 Ceccotti, A. Cross Laminated Timber Introduction to Seismic Performance FPIinnovations.
http://www.forintek.ca/public/pdf/Public_Information/presentations/CLT_Symposium_Feb_2011/CLT-Seismic%20Performance%20European.pdf
- 15 Oy Nymix Ab. <http://www.nymix.fi/wingtex-ruuvi-porakarjella-p-2713.html>
- 16 ClevelandSteel. <http://clevelandsteel.thomasnet.com/viewitems/nails/glulam-rivet>
- 17 Getts, D. 2012. Wood entry doors part II; selecting joinery to hold it all together. Examiner. <http://www.examiner.com/article/wood-entry-doors-part-ii-selecting-joinery-to-hold-it-all-together>
- 18 Portland Bolt and Manufacturing Company. <http://www.shearplates.com/>