



CLT-tilaelementtien liitostekniikka

Patrik Kaukojärvi

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonstrakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

KAUKOJÄRVI, PATRIK:
CLT-tilaelementtien liitostekniikka

Opinnäytetyö 126 sivua, joista liitteitä 23 sivua
Huhtikuu 2021

Tämä opinnäytetyö tehtiin A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n toimeksiannosta. Tavoitteena oli laatia tiivistetty tietopaketti CLT-tilaelementtirakenteisen asuinrakennuksen rakennejärjestelmän toiminnasta ja liitosten suunnittelun periaatteista. Työhön on kerätty tietoa kirjallisuuslähteistä ja tutkimuksista sekä yrityksen kokoneiden rakennesuunnittelijoiden haastatteluista. Lisäksi työssä käsitellään tilaelementtien sisäisten ruuviliitosten mitoitusta sekä luodaan esimerkin mukaisesti kuusikerroksinen CLT-tilaelementtitorni RFEM-laskentaohjelmalla. Työ toimii toimeksiantajayrityksen apuna CLT-tilaelementtikohteiden jäykistyksen ja liitosten suunnittelussa.

Työn tuloksena syntyi CLT-tilaelementtikohteiden suunnittelua edesauttava tietolähde. Työhön on koottu tärkeitä liitoksilta vaadittuja ominaisuuksia ja suunnitteluperiaatteita. Lisäksi työssä esitellään tilaelementtien välisten ja sisäisten liitosten esimerkkidetalleja. Työssä on myös laadittu mitoitusohje CLT-tilaelementtien sisäisten ruuviliitosten mitoitukseen ja kolme laskentapohjaa niiden laskemiseen. Työn loppuosassa on mallinnettu esimerkin mukaisesti kuusikerroksinen CLT-tilaelementtitorni liitoksineen RFEM-mitoitusohjelmalla. Esimerkki toimii suunnittelijoiden apuna CLT-tilaelementtien FEM-mallinnuksessa ja laskennassa.

Työ osoitti CLT-elementti- ja tilaelementtirakentamisen olevan vielä betonielementtirakentamista jäljessä tyyppiratkaisujen ja -liitosten osalta. Erityisesti tilaelementtien välisiin väliaineellisiin liitoksiin kaivataan lisää tutkimusta ja kehitystä. Liitosten suunnittelua vaikeuttaa etenkin se, ettei CLT:lle ole olemassa yhtenäisiä mitoitusohjeita, vaan CLT-valmistajan valmistajakohtaisia ohjeita käytetään yhdessä erilaisten liittimien ETA-ohjeistuksien kanssa. Työn tutkimushetkellä standardia EN 1995-1-1 ollaan kuitenkin päivittämässä, minkä jälkeen saadaan toivottavasti yhtenevät CLT:tä koskevat mitoitusohjeet.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building construction

KAUKOJÄRVI, PATRIK:
Connection Technology of CLT Modular Elements

Bachelor's thesis 126 pages, appendices 23 pages
April 2021

This thesis was commissioned by A-Insinöörit Suunnittelu Oy. The aim was to compile a condensed information package on the operation of the structural system in CLT-modular element residential building and on the principles of connection design. The information for this work was collected from various literature sources and a research, as well as from the interviews with experienced structural designers of the company. Dimensioning of the internal screw connections of the modular elements is also discussed and a six-storey CLT-modular element tower is created as an example with the RFEM calculation program. This work will assist the client company in the design of stiffening and joints for CLT-modular element buildings.

The result of this work was a source of information that facilitates the design of CLT-modular element buildings. This work has compiled important properties and design principles required for joint design. In addition, the work presents detailed examples of connections between and within CLT-modular elements. The work also includes a guide for dimensioning the internal screw connections of CLT-modular elements and three calculation bases for their calculation. At the end of the work, a six-storey CLT-modular element tower with its joints has been modeled as an example using the RFEM calculation program. The example serves as an aid to designers in FEM modeling and calculation of CLT modular element buildings.

The work proves that CLT prefabricated and modular element construction still lags behind precast concrete construction in terms of type solutions and joints. In particular, further research and development is needed for the slotted joints between the modular elements. The design of the joints is hampered in particular by the fact that there are no uniform calculation guidelines for CLT. Instead guidelines by the CLT manufacturer must be used together with various connectors ETA-guidelines. During the making of this thesis, the standard EN 1995-1-1 was being updated and hopefully it will contain uniform design guidelines for CLT when it is published.

Key words: CLT, module, joint

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta	9
1.2	Työn tavoitteet ja rajausta	9
2	Yleistä CLT-tilaelementeistä	11
2.1	CLT rakennusmateriaalina	11
2.2	CLT-tilaelementit	12
2.2.1	Yleisesti CLT-tilaelementeistä	12
2.2.2	CLT-tilaelementtien valmistus.....	13
2.2.3	CLT-tilaelementtien työmaateknikka.....	16
3	CLT-tilaelementtikerrostalon kokonaisjäykistys.....	19
3.1	Rakennuksen jäykistys.....	19
3.2	Jäykistysjärjestelmä	19
3.2.1	Vaakalevykentän toiminta.....	20
3.2.2	Jäykistävien seinien toiminta	23
3.2.3	Tilaelementtitekniikan haasteet	26
4	Liitosten suunnitteluperiaatteet	28
4.1	Määräykset ja ohjeet	28
4.2	Kiinnikkeet.....	29
4.2.1	Itseporautuvat ruuvit	29
4.2.2	Latta- ja kulmateräsosat	30
4.2.3	Muut kiinnikkeet.....	31
4.3	Palonkestävyys	34
4.3.1	Palomääräykset ja paloluokat.....	34
4.3.2	CLT palotilanteessa	36
4.3.3	Liitokset palotilanteessa	37
4.4	Akustiikka	38
4.4.1	Säädökset ja ohjeet.....	38
4.4.2	Liitosten suunnittelu	40
4.4.3	Tärinäeristimet.....	41
4.5	CLT:n muodonmuutokset ja halkeilu	41
4.6	Jatkuvan sortuman rajoittaminen	43
4.7	Asennettavuus	44
5	Tilaelementtien väliset liitokset.....	46
5.1	Tilaelementin ankkurointiliitos	46
5.2	Tilaelementtien liitos huoneistojen välillä.....	48
5.3	Tilaelementtien liitos huoneiston sisällä	50

6	Tilaelementtien sisäiset liitokset.....	52
6.1	Sisäisten liitosten periaatteet.....	52
6.2	Tilaelementin lattiarakenteen liitokset	53
6.3	Tilaelementin Seinien liitokset.....	53
6.4	Tilaelementin aukkojen liitokset.....	54
6.5	Tilaelementin kattolevyn liitokset.....	56
7	CLT-tilaelementin sisäisten ruuviliitosten mitoitus	58
7.1	CLT:n ruuviliitoksille asetettuja reunaehtoja	58
7.1.1	Leikkauskuormitetut ruuvit.....	58
7.1.2	Pituussuunnassa kuormitetut ruuvit.....	60
7.2	Liitoksen mitoituskestävyys	61
7.3	Ruuviliitoksen leikkauskestävyys EC5 mukaisen puikkoliitosteorian mukaan	62
7.4	Ruuviliitoksen leikkauskestävyys RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen mukaan	68
7.5	Vino- ja ristiruuviliitos	71
7.5.1	Vinoruuviliitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo.....	72
7.5.2	Ristiruuviliitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo	73
7.6	Liitoksen jäykkyys	74
8	FEM-laskenta.....	78
8.1	Elementtimenetelmä	78
8.2	Mallin geometrian luonti	79
8.3	Kuormien lisääminen.....	81
8.4	CLT-materiaaliominaisuuksien lisääminen	81
8.5	Liitosten mallinnus.....	86
8.6	Tulosten tarkastelu.....	90
9	Pohdinta.....	95
10	Jatkotutkimustarpeet.....	97
	LÄHTEET	99
	LIITTEET.....	103
	Liite 1. Syrjäliimaamattoman CLT-levyn jäykkyyden kertoimet	103
	Liite 2. Seinä-kattoliitoksen leikkauskapasiteetti	103
	Liite 3. Tilaelementin katon puoliponttiliitoksen leikkauskapasiteetti .	103
	Liite 4. Seinä-seinä ristiruuviliitoksen leikkauskapasiteetti	103
	Liite 5. Esimerkkimallin liitosten jäykkyydet Eurokoodin mukaan	103
	Liite 6. Teräslevyliitosten mallinnus.....	103
	Liite 7. Ruuviliitosten laskentapohjat, ei julkaista	103

LYHENTEET JA TERMIT

a	lamellikerroksissa käytettyjen lautojen leveys
d	ruuvien nimellishalkaisija
d_{ef}	ruuvien tehollinen halkaisija
d_h	ruuvien kannan halkaisija
d_{max}	CLT-levyn paksuimman lamellikerroksen paksuus
$f_{ax,i,k}$	ruuvien ulosvetolujuuden ominaisarvo lujuusluokan C24 sahatavaran mukaan, riippuen ruuvien akselin ja puun syysuunnan välisestä lamellikerroksesta i
$f_{ax,k}$	ulosvetolujuuden ominaisarvo, kun ruuvi on kohtisuorassa syysuuntaa vastaan
$F_{ax,Rk}$	liittimen ulosvetokestävyyden ominaisarvo
$f_{ax,\alpha,1,k}$	ruuvien ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kannan puoleisessa puussa kulmassa α puun syysuuntaan nähden
$f_{ax,\alpha,2,k}$	ruuvien ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kärjen puoleisessa puussa kulmassa α puun syysuuntaan nähden
f_h	liitoksen reunapuristuslujuuksien minimiarvo
$f_{h,i,k}$	puusauvan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo
$f_{h,s,k}$	liitoksen keskiosan ominaisreunapuristuslujuus kaksileikkeisessä liitoksessa
$f_{h,0,k}$	reunapuristuslujuuden ominaisarvo liitoksen kuormittuessa syysuuntaisesta voimasta
$f_{head,k}$	ruuvien kannan läpivetolujuusparametrin ominaisarvo
$F_{t,Rk}$	vetokestävyyden ominaisarvo
$f_{tens,k}$	ruuvien vetomurtokestävyyden ominaisarvo
$f_{u,k}$	pultin vetomurtolujuuden ominaisarvo
$F_{V,Rk}$	kestävyyden ominaisarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti
h	CLT-levyn paksuus
h_e	kauimmaisen ruuvien etäisyys kuormitetulta reunalta
k_d	kerroin
k_e	naulan leikkauskestävyyden kerroin
k_{mod}	kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin
K_{ser}	liitoksessa käytetyn puikkoliittimen siirtymäkerroin

$K_{ser,ax,1}$	ruuvin kannan puoleisen kierteen tunkeumasyvyyden mukainen ulosvetojäykkyyssparametri ruuvin kannan puoleisessa puuosassa
$K_{ser,ax,2}$	ruuvin kärjen puoleisen kierteen tunkeumasyvyyden mukainen ulosvetojäykkyyssparametri ruuvin kärjen puoleisessa puuosassa
k_t	naulan leikkauskestävyyden kerroin
K_{tot}	puikkoliittimistä koostuvan leikkausliitoksen kokonaisjäykkyys
K_u	liitoksen keskimääräinen siirtymäkerroin murtorajatilassa
k_{90}	kerroin
k_p	naulan leikkauskestävyyden kerroin
$K_{\perp}$	puikkoliittimen leikkaustasoa kohti laskettu siirtymäkertoimen arvo
$K_{\parallel}$	puikkoliittimen siirtymäkertoimen arvo aksiaalisessa kuormituksessa
L	liitospinnan pituus
I	liitostyyppin mukainen kerroin
l_{ef}	ruuvin kierteisen osan tartuntapituus
$l_{ef,i}$	ruuvin kierteisen osan tartuntapituus lamellikerroksessa i
$l_{g,1}$	ruuvin kierteisen osan pituus kannan puoleisessa puussa
$l_{g,2}$	ruuvin kierteisen osan pituus kärjen puoleisessa puussa
$M_{y,Rk}$	ruuvin myötömomentin ominaisarvo
n	liitoksessa yhdessä toimivien ruuvien lukumäärä
n_{ef}	ruuvien tehollinen lukumäärä liitoksessa
n_{leik}	leikkaustasojen lukumäärä liitoksessa
n_p	ruuviparien lukumäärä ristiruuviliitoksessa
p_D	jäykkyyssmatriisin vääntöjäykkyyden parametri
p_S	jäykkyyssmatriisin leikkausjäykkyyden parametri
q_D	jäykkyyssmatriisin vääntöjäykkyyden parametri
q_S	jäykkyyssmatriisin leikkausjäykkyyden parametri
$R_{c,k}$	ruuvin puristuskestävyyden ominaisarvo
R_d	leikkauskestävyyden mitoitusarvo leikettä kohden
R_k	leikkauskestävyyden ominaisarvo leikettä kohden
$R_{T,k}$	ruuvin vetokestävyyden ominaisarvo
s	liitinväli
t_i	puuosan tai levyn paksuus tai tunkeuma liitoksessa
α	ruuvin pituussuunnan ja puun syysuunnan välinen kulma
β	sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde
γ_M	materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluku

μ	kitkakerroin
ρ_a	puun tiheys, jolle lujuusparametrit on ilmoitettu
ρ_k	puun tiheyden ominaisarvo
ρ_m	liitoksessa käytettyjen puuosien keskimääräinen tiheys

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Puukerrostalorakentaminen on Suomessa kovassa nousussa ja etenkin tilaelementtirakentamisessa nähdään runsaasti potentiaalia. CLT:n käyttö tilaelementtien runkomateriaalina on mahdollistanut entistä korkeampien ja innovatiivisempien tilaelementtihankkeiden toteuttamisen. Puuelementti- ja tilaelementtirakentaminen on kuitenkin vielä kaukana betonielementtirakentamisen standardisoiduista liitos- ja rakennerratkaisuista. Etenkin tilaelementtirakentamisessa, liitostekniikan toteutukseen kaivataan lisää kehitystä ja tutkimustyötä. CLT:lle ei myöskään ole olemassa yhtenäistä määräävää mitoitusohjetta, jonka vuoksi suunnittelussa joudutaan käyttämään valmistajakohtaisia ohjeita yhdessä eri kiinnikevalmistajien omien ohjeiden kanssa.

Tämä opinnäytetyö on tehty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n toimeksiannosta. Työn taustalla on TOAS Hippos rakennusallianssi hanke, jossa A-Insinöörit ovat mukana rakennesuunnittelun ja rakennuttamisen asiantuntijana. Hankkeessa rakentuu noin 35 000 neliömetrin kortteli, joista noin 29 000 neliömetriä on asuntorakentamista ja loput liiketilaa. Suurin osa rakennuksista tullaan toteuttamaan CLT runkoisista tilaelementeistä. Massiivisen hankkeen ja melko uuden rakennustekniikan käytön takia, syntyi tarve kyseiselle opinnäytetyölle.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteet voidaan jakaa kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa tavoitteena on kerätä tietoa CLT tilaelementtikohteiden suunnittelusta pääpainona rakennejärjestelmän toiminta ja liitostekniikka. Osiossa on tarkoitus selvittää miten kuormat jakaantuvat tilaelementtien välillä, sekä mitä liitosten suunnittelussa ja niiden toteutuksessa tulee huomioida. Lisäksi työssä on tarkoitus tutkia erilaisia liitostekniikoita ja kiinniketyyppejä. Osion alussa perehdytään

myös lyhyesti CLT-rakennusmateriaaliin ja tilaelementtien valmistukseen. Tietoa tullaan keräämään kirjallisuuslähteistä ja kokeneiden rakennesuunnittelijoiden haastatteluista.

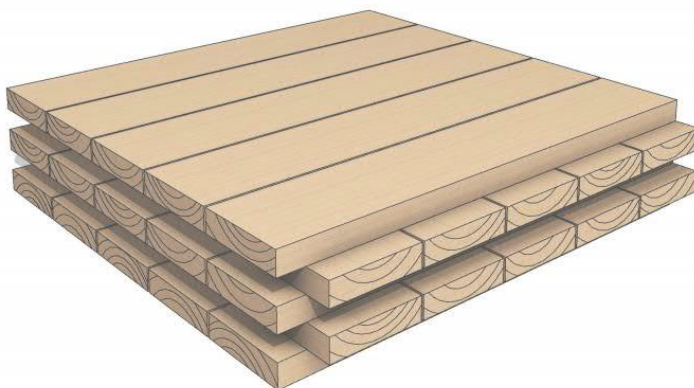
Toisen osion tavoitteena on tuottaa A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n käyttöön mitoitusohje sekä laskentapohjat CLT-tilaelementin sisäisten ruuviliitosten mitoittamiseen. Osiossa on myös tarkoitus perehtyä Dlubal Softwares GmbH:n RFEM mitoitusohjelmaan. Tavoitteena on luoda CLT-rakenteisista tilaelementeistä koostuva laskentamalli esimerkin omaisesti. Esimerkissä keskitytään pääasiassa mitoitusohjelman lisämoduulin RF-LAMINATE:n käyttöön ja puikkoliittimin toteutettujen liitosten mallinnukseen. Esimerkin on tarkoitus toimia apuna aloitteleville CLT-tilaelementtikohteiden suunnittelijoille.

Työ on rajattu käsittelemään ainoastaan CrossLam Kuhmo Ltd:n valmistamaa CLT-levyä. Työn toisessa osiossa liitosten kestävyysmitoitus on rajattu ainoastaan tilaelementtien sisäisiin liitoksiin. Tilaelementtien väliset liitokset ovat yleensä väliaineellisia liitoksia, jotka eivät kuulu Eurokoodi 5 liitosmitoitusohjeisiin. Näin ollen kyseisten liitosten kestävyysmitoitus on rajattu pois tästä työstä.

2 Yleistä CLT-tilaelementeistä

2.1 CLT rakennusmateriaalina

CLT (englanniksi Cross Laminated Timber) eli ristiinliimattu massiivipuulevy on insinööripuutuote, joka on valmistettu liimaamalla lautoja tai lankkuja kohtisuoraan toisiinsa nähden (Kuvio 1). CLT levyt koostuvat vähintään kolmesta lujuusluokitellusta puulevykerroksesta. Vakiokokoisissa levyissä on tavallisesti lamellikerroksia 3, 5, 7 tai 9. Lamellit voivat olla syrjäliimattuja tai syrjäliimaamattomia, riippuen tuotevalmistajasta. Levyjen poikkileikkaus on aina symmetrinen, jossa uloin sahatavarakerros asetetaan levyn kantosuunnan mukaan. Levykerrosten materiaalina käytetään tyypillisesti kuusta tai mäntyä. CLT:tä käytetään pääasiassa rakennusten kantavina ja jäykistävinä rakenteina. (CLT-Suunnittelun ohje 2019, 3; The CLT Handbook 2019, 16; Puuinfo 2020a.)



KUVIO 1. Ristiinliimattu massiivipuulevy (Sorri 2017a, 4)

Ristiinliimauksen ansiosta saadaan muodostettua hyvin paloa kestävä, luja ja jäykkä rakennuslevy, joka on ominaisuuksiinsa nähden suhteellisen kevyt. Keveytensä ja lujuutensa ansiosta CLT pystyy kilpailemaan muiden tavanomaisten rakennusmateriaalien kanssa, etenkin korkeiden rakennusten rakentamisessa. Ristiin liimauksen, lautojen sormijatkosten ja keveytensä takia CLT:stä voidaan valmistaa hyvin suuria ja lujia rakennuslevyjä. Jäykkyytensä vuoksi CLT sopii erinomaisesti esimerkiksi tilaelementtien runkorakenteeksi. (Stora Enso CLT 2017, 6; The CLT Handbook 2019, 11; Puuinfo 2020a.)

CLT toimii myös tiiviin ristiin liimauksen ansiosta rakenteiden höyrynsulkuna eikä erilliselle höyrynsulkumuoville ole tarvetta. Massiivipuurakenteena CLT toimii myös osana rakennuksen lämmöneristävyyttä. Elementtien ulkovaippaan on useimmiten kuitenkin asennettava erillinen lämmöneriste, jotta vaaditut energiamääräykset täyttyvät. Alhaisen lämmönjohtavuutensa ansiosta puu tuntuu miellyttävältä pinnalta koskea verrattuna esimerkiksi betoniin tai teräkseen. CLT vaikuttaa myös rakennuksen sisäilmastoon, koska puu tasaa rakennuksen sisäilman kosteutta ja parantaa samalla tutkitusti sisäilman laatua. (CLT-suunnittelun ohje 2019, 3; The CLT Handbook 2019, 157.)

Hyvien rakenneteknisten ominaisuuksien lisäksi CLT on erittäin ekologinen rakennusmateriaali. Puu on uusiutuva raaka-aine, jota kasvaa metsissä jatkuvasti lisää. CLT:n valmistus on hyvin energiatehokasta ja levyjen valmistuksessa syntynyt hukka voidaan uusiokäyttää energiana, jolloin fossiilisten energiamuotojen käytön tarve vähenee. Puuelementit toimivat hiilivarastoina koko elinkaarensa ajan ja rakennuksen elinkaaren tullessa päätökseen voidaan rakennuksessa käytetty CLT hyödyntää energiana. (The CLT Handbook 2019, 12.) Rakentamisessa on myös alettu kiinnittää entistä tarkempaa huomiota rakentamisen hiilidioksidipäästöihin. Rakennusten päästövaatimusten kiristyessä on CLT yhä varteenotettavampi kilpailija perinteisten rakennusmateriaalien kuten betonin rinnalle.

2.2 CLT-tilaelementit

2.2.1 Yleisesti CLT-tilaelementeistä

CLT-tilaelementit ovat esivalmistettuja tilakomponentteja, jotka sisältävät kokonaisen asuntolohkon tai huoneiston. Tilaelementit muodostuvat tehdasolosuhteissa rakennetusta lattiasta, seinistä ja katosta. Elementit ovat siis nimensä mukaisesti niiden rajaavien pintojen muodostama tila. Elementit ovat itsessään jämäkkiä rakennusosia, joiden tulee kestää kuljetuksen ja elementtien noston aiheuttamat rasitukset. (Puuinfo 2020b.)

Tilaelementtien esivalmistus pyritään viemään tehdasolosuhteissa niin pitkälle kuin vain kuljetusten ja asennusten kannalta on mahdollista. Elementit ovat käytännössä muuttovalmiita asuntoja tai asuntolohkoja, joissa talotekniikka vain yhdistetään elementtien rajapinnoissa ja kytketään päälle työmaalla asennuksen jälkeen. Tämä lyhentää rakentamisaikaa työmaalla huomattavasti ja moni rakennusvaihe pystytään toteuttamaan tehdasolosuhteissa, jossa laadunvalvonta on helpompi toteuttaa. (Puuinfo 2020b.) Korkean esivalmistusasteen ansiosta rakenteiden kastuminen ja kosteusriskit pystytään myös minimoimaan.

Tilaelementit soveltuvat erinomaisesti esimerkiksi pienasuntokohteisiin ja asuntoloihin, joissa asunnot ovat hyvin samankaltaisia ja toistoa on paljon. Tilaelementtitekniikalla rakennettaessa elementtien välisistä rakenteista tulee kaksoisrakenteita, jonka ansiosta saavutetaan erinomainen ääneneristävyys. Rakennusjärjestelmä asettaa kuitenkin tiettyjä rajoituksia rakennussuunnitteluun ja suunnittelu tulee toteuttaa rakennusjärjestelmän ehdoilla. Tilaelementtitekniikka on hyvin yleinen rakennusjärjestelmä puukerrostalojen rakentamisessa esimerkiksi Ruotsissa. (Puuinfo 2020c.)

2.2.2 CLT-tilaelementtien valmistus

CLT-tilaelementit ovat yleensä malliltaan suorakulmaisia särmiöitä. Elementin pidemmän sivun seinät ovat kantavia, sillä elementin yläpohjan levyrakenteet asennetaan lyhyemmän kantosuunnan mukaan. Tilaelementin runkorakenne muodostuu lattia-, seinä, ja kattoelementeistä, jotka kiinnitetään toisiinsa mekaanisin kiinnikkein, muodostaen laatikkomaisen rakenteen. Tilaelementin kukin seinä pyritään lähtökohtaisesti tekemään yhdestä kokonaisesta CLT-levystä. Elementin lattia ja katto joudutaan useimmiten kokoamaan useasta rinnakkain asennetusta levystä. CLT-levyjen toimiessa höyrynsulkuna on elementin vaipan tiiviys varmistettava etenkin levyelementtien välisten saumojen kohdalta. Saumojen tiivistykseen käytetään esimerkiksi höyrynsulkuteippiä, saumanauhaa tai saumausmassaa. (Sorri 2017b, 14-15.)

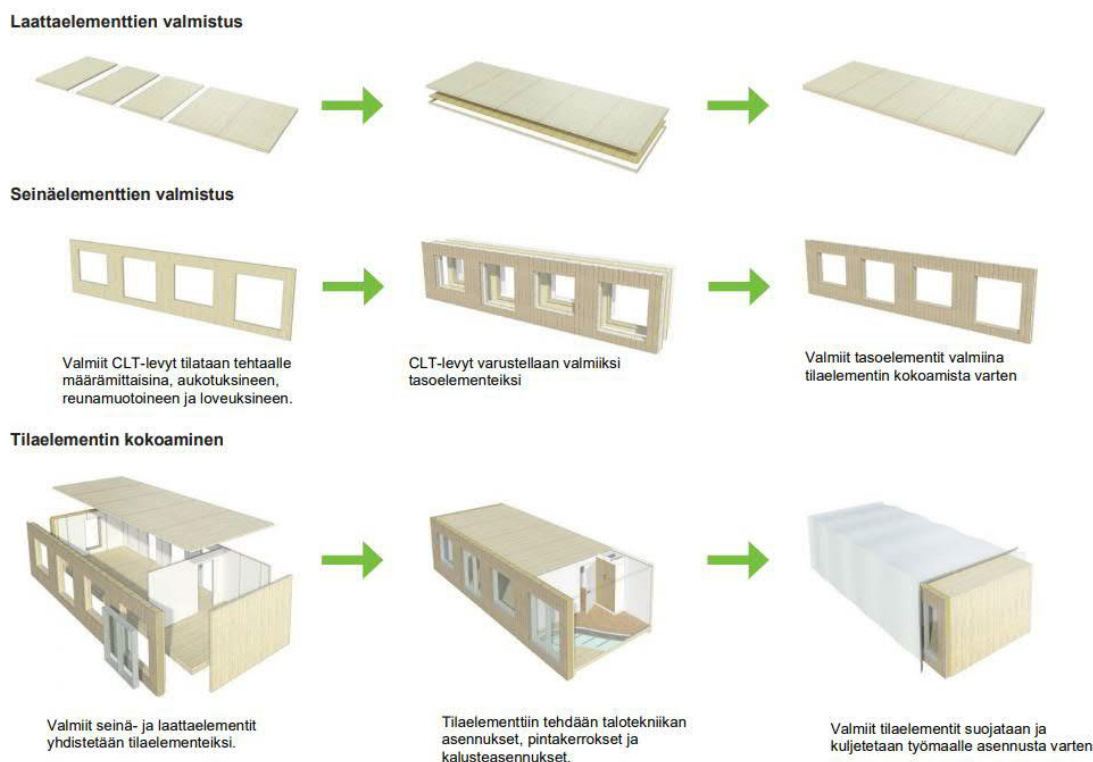
Tilaelementtitekniikalla rakennettaessa elementtien lattiarakenne kantaa välipohjan hyötykuorman. Tilaelementin kattorakenteelle kohdistuu vain sen oma

paino ja rakennusaikainen hyötykuorma. Kattorakenne toimii kuitenkin osana rakennuksen rungon jäykistysjärjestelmää ja välittää vaakakuormia jäykistäville seinille. Näin ollen lattialevyt ovat paksumpia rakenteeltaan kuin kattolevyt. Lattiarakenteet kannatetaan elementin seiniin kiinnitettyjen juoksujen varaan ja kiinnitetään mekaanisin kiinnikkein jokaiselta sivulta. Kantosuunta valitaan elementin lyhyemmän sivun suuntaiseksi. (Sorri 2017b, 14-15.)

Asuntojen märkätiloissa käytetään yleensä erillistä märkätilaelementtiä, joka asennetaan CLT-tilaelementin sisään, kun tasoelementit yhdistetään tilaelementiksi. Märkätilat voidaan kuitenkin myös toteuttaa alusta alkaen tilaelementtitehtaalla, tämä on kuitenkin vähemmän käytetty menetelmä. (Stora Enso 2016, 18; Sorri 2017, 15.)

CLT-levyihin tehdään tarvittavat aukotukset, loveukset ja reunamuodot valmiiksi jo CLT-tehtaalla ennen levyjen saapumista tilaelementtitehtaalle. Lähtökohtana on, ettei CLT-levyjä tarvitse enää työstää elementtitehtaalla, vaan CLT-levyt päästään varustelemaan suoraan tasoelementeiksi tilaelementtejä varten. (Sorri 2017, 14.)

Tilaelementtitehtaalla tilaelementtien valmistus alkaa tasoelementtien varustelulla, seinäelementteihin lisätään mm. lämmöneristeet, levytykset, koolaukset ja mahdollisesti jopa ulkoverhoukset. Kevyissä väliseinissä ei yleensä käytetä CLT:tä vaan suositaan perinteistä väliseinärankarakennetta. Kevyet väliseinät tehdään myös valmiiksi elementeiksi ennen tilaelementin kokoamista. Valmiit laatta- ja seinäelementit yhdistetään tilaelementiksi, jonka jälkeen tilaelementtiin tehdään talotekniikan asennukset. Lopuksi tilaelementti viimeistellään viimeistelytyöillä, joita ovat mm. lattian päälle tulevat pintakerrokset ja lattiavalut, pintamateriaalien asennukset, käsittelyt ja verhoukset, sekä ovien, ikkunoiden ja listojen asennukset. Kiintokalusteet pyritään myös asentamaan mahdollisuuksien mukaan jo tehtaalla. Valmiit tilaelementit suojataan huolellisesti työmaalle kuljettusta varten. (Stora Enso 2016, 19; Sorri 2017b, 16.) Tilaelementtien valmistusprosessia on havainnollistettu kuviossa 2.



KUVIO 2. CLT-tilaelementtien valmistusprosessi (Muokattu kohteesta Stora Enso 2016, 19)

CLT-tilaelementtien äärimitat määräytyvät CLT-toimittajien maksimilevykokojen, elementin painon ja sallittujen kuljetusmääräysten mukaan. Tilaelementtien äärimitat vaihtelevat hieman tilaelementti toimittajien mukaan. Äärimitoilleen suunnitellut tilaelementit eivät kuitenkaan yleensä ole kuljetuksen kannalta taloudellisin vaihtoehto. Märkätilaelementti painaa neliötä kohden huomattavasti enemmän kuin ns. kuivatila, tämä tulee huomioida elementtejä suunniteltaessa. Elementit olisi hyvä suunnitella keskenään suunnilleen saman painoisiksi, jotta kaikki elementit pystytään nostamaan käyttäen samaa nostokalustoa. Tilaelementtien koon määrittämisessä usein suurin vaikuttava tekijä on elementtien maantiekuljetus, joka luokitellaan elementtien suuren koon takia yleensä erityiskuljetukseksi. Elementtien pituus ja korkeus vaativat harvoin erityistoimenpiteitä, joten tilaelementtien leveys määrää usein kuljetuksen vaatimat varoitustoimenpiteet ja näin ollen kuljetuksen kustannukset. (Stora Enso 2016, 18; Sorri 2017b, 61-62.) Taulukossa 1 on esitetty varoitusautojen vähimmäismäärä erityiskuljetuksen pituuden ja leveyden mukaan. Erikoiskuljetuksessa tulee lisäksi noudattaa muita erikoiskuljetuksen merkitsemisestä ja varoitustoimenpiteistä annettuja määräyksiä.

TAULUKKO 1. Varoitusautojen vähimmäismäärä erikoiskuljetuksen pituuden ja leveyden mukaan (Traficom 2020, 24)

Varoitusautojen vähimmäismäärä erikoiskuljetuksessa						
	Leveys (m)					
Pituus (m)	enintään 3,00	yli 3,00	yli 3,50	yli 4,00	yli 5,00	yli 7,00
enintään 30,00			1	2	3	4
yli 30,00	*)	1	1	2	3	4
yli 35,00	1	2	2	3	3	4
yli 40,00	2	2	3	3	3	4
yli 45,00	2	3	3	3	3	4
yli 50,00	3	3	3	3	3	4

2.2.3 CLT-tilaelementtien työmaatekniikka

CLT-tilaelementtikohteen rakentaminen työmaalla ei juuri poikkea ns. perinteisestä suurelementtitekniikasta rakentamisvaiheen alussa. Pohjatyöt, anturat ja väestönsuojatilat rakennetaan ennen tilaelementtien vastaanottoa. Tilaelementtien kokorajoitusten vuoksi perustuslinjoja tulee tavallista enemmän koska kantavia seinälinjoja on enemmän kuin suurelementeillä rakennettaessa. Anturoiden päälle rakennetaan sokkelit tai ensimmäisen kerroksen betoniseinät ja -holvi rakennustavan mukaan.

Ennen tilaelementtien asennustyön aloittamista laaditaan asennussuunnitelma ja sovitaan työn toteutukseen liittyvät asiat aloituspalaverissa työntekijöiden, työryhmän johtajan ja työnjohtajan kesken. Erityisesti Liitosdetaljeihin tulee kiinnittää huomiota. (Ratu 0425 2014, 4.) Tilaelementtien asennusalustan suoruus ja toleranssien täytyminen tulee myös tarkastaa ennen tilaelementtien asennustyön aloittamista.

Työmaalle saapuessaan tilaelementit pyritään asentamaan suoraan kuormasta välttämällä välivarastoinnin tarpeen. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ja tilaelementtejä joudutaan välivarastoimaan työmaalla. Välivarastoinnissa tulee kiinnittää erityistä huomioita varastointipohjan riittävään kantavuuteen, kokoon ja elementtien asennusjärjestykseen, jotta elementtejä siirreltäisiin mahdollisimman vähän. Tilaelementit tulee myös suojata työmaalla huolellisesti sateelta, lumelta ja jäältä. (Ratu 0425 2014, 9.)

Elementeistä poistetaan suojamuovit, jotka ovat nosto- ja asennustyön edessä, samalla tarkistetaan silmämääräisesti, että elementti täyttää siltä vaaditut laatuvaatimukset. Tilaelementtien nostoissa käytetään nostoliinoja tai muita nostoapulaitteita, jotka kiinnitetään valmistajan osoittamiin nostokohtiin. Tilaelementit nostetaan tyypillisesti 4:ää nostopistettä käyttäen mutta 6:en tai 8:an nostopisteen käyttö on myös mahdollista. (Stora Enso 2016, 87.) Noston alussa varmistetaan osoitettujen nostokohtien oikeellisuus ja nostoapulaiteiden kunto, ja niiden toimintaa tulee seurata koko nostotyön ajan. Noston loppuvaiheessa tilaelementtiä ohjataan asennuskangilla. Elementti lasketaan ja asennetaan ennalta merkittyjen ja mitattujen asennuspaikkojen ja merkintöjen mukaan. Asennuksessa voidaan käyttää teräksisiä ohjausosia helpottamaan elementin asennusta ja kohdistamista. (Ratu 0425 2014, 10.)

Ennen tilaelementin lopullista kiinnitystä varmistetaan, että elementti on kohdistettu mahdollisimman tarkasti, liitostyöt ovat toteutettavissa ja elementin suoruus, sekä sijainti ovat suunnitelmien mukaiset. Tilaelementti kiinnitetään aluspuuhun tai toisiin elementteihin käyttäen erilaisia ruuveja ja teräslevyliittimiä. Elementtien saumat tulee tiivistää suunnitelmien mukaisesti, esimerkiksi elastisella polyuretaanivaahdolla. Seinissä elementtisauma suojataan julkisivulaudalla. Kattorakenteiden saumojen kohdalla on kiinnitettävä erityistä tarkkuutta kermien päällekkäin limityksiin. Avoimiin saumoihin ei saa missään rakentamiskuvassa päästä vettä. (Ratu 0425 2014, 11.) Kun kaikki yhden kerroksen tilaelementit on asennettu onnistuneesti, voidaan muut sellaiset kyseisen kerroksen rakenteet kuten palkit, erilliset seinät ja tasoelementit asentaa paikoilleen, jotka eivät sisältyneet elementtimoduuleihin. Rakennus on jäykistettävä huolellisesti ennen seuraavan kerroksen tilaelementtien asennusten aloittamista.

Puurakentamisessa työnaikainen kosteudenhallinta on erittäin tärkeässä roolissa rakennushankkeen onnistumisessa. Vaikka tilaelementit valmistetaan kuivissa tehdasolosuhteissa voivat ne silti kastua työmaalla asennusvaiheessa. Siksi on tärkeää, että työmaalla noudatetaan laadittua kosteudenhallintasuunnitelmaa, elementit suojataan huolellisesti ja asennus toteutetaan hyvien sääolosuhteiden aikana tai erilaisten sääsuojien suojissa. Tilaelementtirakentamisessa käytetään yleensä sääsuojaelementtejä, jotka asennetaan asennettujen tilaele-

menttien päälle ja joita nostetaan rakennuksen noustessa. Sääsuojaelementteinä voidaan myös käyttää tilaelementtikerrostalon lopullista vesikattoa tai -lohkoa. Tällöin Vesikattoelementti rakennetaan esimerkiksi rakennuksen perustusten päälle ja elementtiä tai elementtilohkoja nostetaan asennettavien tilaelementtien päälle kerros kerrokselta.

Suurin etu tilaelementtijärjestelmää käytettäessä on runkovaiheen nopeus työmaalla, joka myös lyhentää rakenteiden kastumisriskiä merkittävästi. Parhaimmillaan tilaelementtitekniikalla toteutettu kuusikerroksisen asuinkerrostalon läpimenoaika on vain kaksi kuukautta. Nopeutensa ansiosta järjestelmä soveltuu erinomaisesti täydennysrakentamiseen tai esimerkiksi lisäkerrosten tekemiseen. (Puuinfo 2020d.)

3 CLT-tilaelementtikerrostalon kokonaisjäykistys

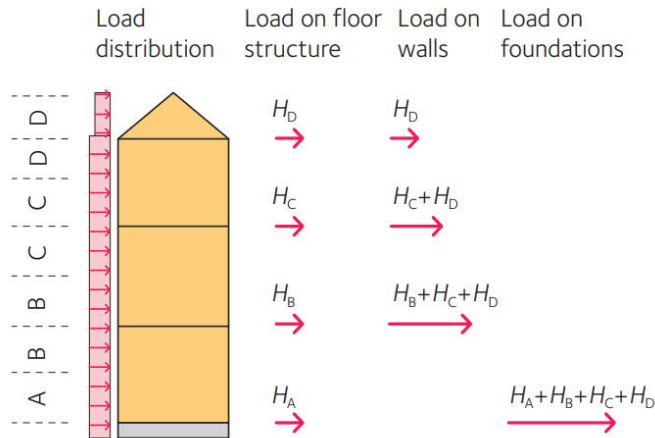
3.1 Rakennuksen jäykistys

Rakennusjärjestelmän tulee kestää siihen kohdistuvat ulkoisista vaakakuormista ja ulkoisista pystykuormista johtuvat rasitukset, sekä pystyä viemään ne rakennuksen perustuksille. Rakenteisiin syntyy myös rasituksia rakenteen sisäisistä voimista, joita syntyy rakenteiden geometrian poiketessa geometrisesti tai fysikaalisilta ominaisuuksiltaan ideaalisesti virheettömästä rakenteesta. Sisäisiä voimia ei tarvitse viedä perustuksille, vaan riittää, että ne otetaan vastaan rakennesysteemin sisällä. Sisäisten voimien mitoittamista kutsutaan usein stabiilisuusmitoitukseksi. Rakennuksen jäykistyksessä huomioidaan siis koko rakennuksen jäykistykseen lisäksi yksittäisten rakenneosien muodostaman kokonaisuuden sisäinen jäykistys. (RIL 244 2007, 10.)

Rakennuksen korkeus ja dimensiot vaikuttavat olennaisesti jäykistykseen haasteellisuuteen. Rakennuksen jäykistävien rakenteiden ja niiden välisten liitosten voimat kasvavat huomattavasti, kun rakennus on yli kaksikerroksinen. Rakennuksen runkosyvyys vaikuttaa myös oleellisesti jäykistykseen mitoittamiseen, mitä hoikempi rakennus on, sitä alttiimpi rakennuksen runko on muodonmuutoksille. (Puuinfo 2020e.)

3.2 Jäykistysjärjestelmä

CLT-tilaelementtirunkoisessa kerrostalossa rakennuksen jäykistys toteutetaan usein jäykistävien seinien avulla. Tilaelementtien välipohjarakenteet muodostavat tason, joka siirtää vaakakuormat tilaelementtien jäykistäville CLT-seinille ja niiden kautta perustuksille. Kuviossa 3 on havainnollistettu tuulikuorman jakautumista jäykistäville rakenteille ja perustuksille. Tuulikuorma jakautuu tasaisesti välipohjakenttien kautta jäykistäville seinille. Kuvioista nähdään, että jäykistävät seinät siirtävät leikkausrasitukset ylemmältä kerrokselta alemmalle. Leikkausrasitus siis kasvaa jäykistävissä seinissä kerros kerrokselta ylhäältä alaspäin tarkasteltaessa.



KUVIO 3. Tuulikuormasta aiheutuvat rasitukset rakennuksen levyrakenteille (The CLT Handbook 2019, 118)

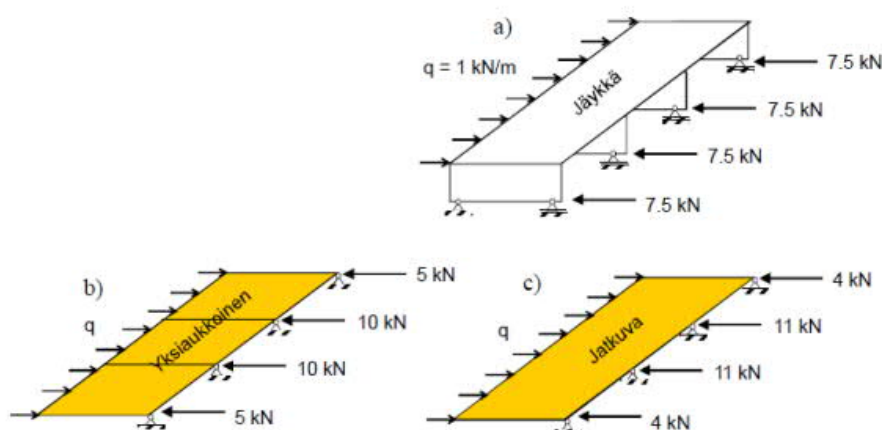
Jäykistys voidaan myös toteuttaa erillisellä jäykistävällä rakenteella, kuten esimerkiksi betonirakenteisella jäykistystornilla (Stora Enso 2016, 26). Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin vain CLT-levyjen ja niiden välisten liitosten muodostamiin jäykistäviin levykenttiin perustuvaa jäykistysjärjestelmää.

3.2.1 Vaakalevykentän toiminta

Kuten kuviossa 3 osoitetaan, tilaelementtien välipohjarakenteiden yhdessä muodostama tasorakenne on välttämätön vaakakuormien johtamista varten. Kuormien jakaantumiseen jäykistäville seinille vaikuttaa olennaisesti vaakakentän jäykkyys. Puinen välipohja eroaa jäykkyysarvoltaan merkittävästi betonirakenteisesta välipohjarakenteesta, joka toimii täysin jäykkänä ja usein tukien yli jatkuvana tasorakenteena. Puukerrostaloissa välipohja joudutaan tavallisesti katkaisemaan asuntojen välillä ääneneristävyyden takia. CLT rakenteista välipohjarakennetta tulee siis tarkastella joustavana ja jatkumattomana rakenteena. Koska välipohjataso katkeaa tilaelementtien välillä, CLT levyjen välisten liitosten suunnittelulla on suuri merkitys koko vaakalevykentän toimintaan ja jäykkyyteen. Liitoksissa tapahtuu aina jonkin asteen liitossiirtymiä mutta oikealla suunnittelutavalla ja menetelmillä ne pystytään hallitsemaan. Etenkin eri huoneistojen välisten tilaelementtien vaakarakenteiden liitosten jäykistysjärjestelmän suunnittelu

on haastavaa ääniteknisistä syistä. Kahden eri huoneiston välisen elementin suoria liitoksia tulisi välttää runkoäänien vuoksi ja niitä käytettäessä joudutaan usein lisäämään liittimen ja elementin väliin joustavia ääntä vaimentavia kerroksia.

Luntta (2013, 19-20) esittää omassa diplomityössään kuormien jakautumista tuille jäykän ja joustavan levykentän välillä alla olevan kuvion 4 mukaan. Tuilla oletetaan olevan sama jäykkyysarvo ja tukien välinen etäisyys on 10 metriä. Tapauksessa a levykenttä on täysin jäykkä ja jatkuva, jolloin kuormat siirtyvät tasaisesti tukirakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa. Tapauksessa b levykenttä on joustava ja katkeaa tukien kohdalla, jolloin kuormat jakautuvat tukirakenteille yksiaukkoisen palkin tavoin. Tapauksessa c levykenttä on joustava ja jatkuva, jolloin kuormat jakautuvat tukirakenteille moniaukkoisen palkin tavoin.



KUVIO 4. Kuormien jakautuminen tukirakenteille erilaisilla vaakalevyrakenteilla (Luntta 2013, 20)

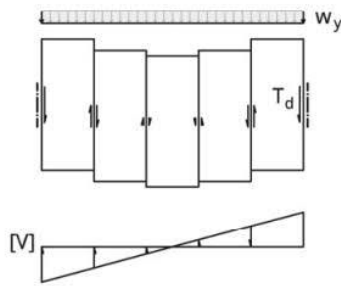
Kuviossa 4 on havainnollistettu levykentän jäykkyyden merkitystä kuormien jakautumiseen jäykistäville seinille. Kuvion tapauksessa levykentän jäykkyyden yliarviointi johtaa keskimmäisten tukirakenteiden liian alhaisiin leikkausrasituksiin. Levykentän jäykkyyden aliarviointi puolestaan johtaa liian pieniin leikkausrasituksiin reunimmaisissa tukirakenteissa. Useamman kerroksen kerrostaloissa kuormat voivat olla suuria ja levykenttien virheellinen jäykkyyden arviointi voi johtaa vakavaan jäykisteseinän leikkauskapasiteetin alimitoitukseen. (Luntta

2013, 20.) Suunnittelijan tulee kiinnittää erityistä tarkkuutta levykentän jäykkyyssarvoon etenkin erilaisia mitoitusohjelmia käytettäessä, joissa tulosten virheellisyyttä voi usein olla vaikea havaita.

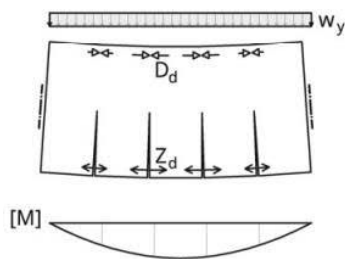
CLT levyjen jäykkyyssominaisuudet on saatavilla levyvalmistajilta ja levyjen mitoituksessa tulisikin aina käyttää valmistajakohtaisia arvoja. Levykentän kokonaisjäykkyyden kannalta suurin vaikutus on kuitenkin massiivipuulevyjen välisten liitosten toteutuksella. Rakennesuunnittelija määrittää liitosten jäykkyyssasteen liitostavasta ja liitoksessa käytettyjen kiinnikkeiden perusteella.

Vaakalevykentän liitoksiin kohdistuvia rasituksia, joille liitokset tulee suunnitella, on havainnollistettu kuviossa 5. Vaakavoimien kohdistuessa saumojen pitkittäissuunnassa syntyy levykenttään a leikkausvoimia saumojen välille ja b momenttia, joka vaikuttaa levykenttään voimaparina, josta syntyy puristusta ja vetoa saumojen päätyihin. CLT-levyrakenteisessa levykentässä saumoihin syntyvä leikkausvoima vastaanotetaan tyypillisesti erilaisilla ruuviliitoksilla. Levysaumojen päätyjen vetovoimat puolestaan vastaanotetaan tavallisesti erilaisten levyliitosten avulla. Vaakavoimien kohdistuessa saumojen poikittaissuunnassa c käytäytyy levykenttä rinnakkaisten palkkien tavoin, joille kuormitus jakautuu levyjen jäykkyyksien suhteessa. Normaalisti tämä tapaus ei ole mitoituksen kannalta mitoittava tekijä, levykentän ja sen liitosten suunnittelussa. (Proholz 2014, 129.)

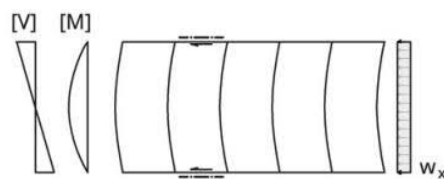
a) Shear along the joints



b) Flange forces at the plate edge



c) Stress on the plate as a horizontal girder



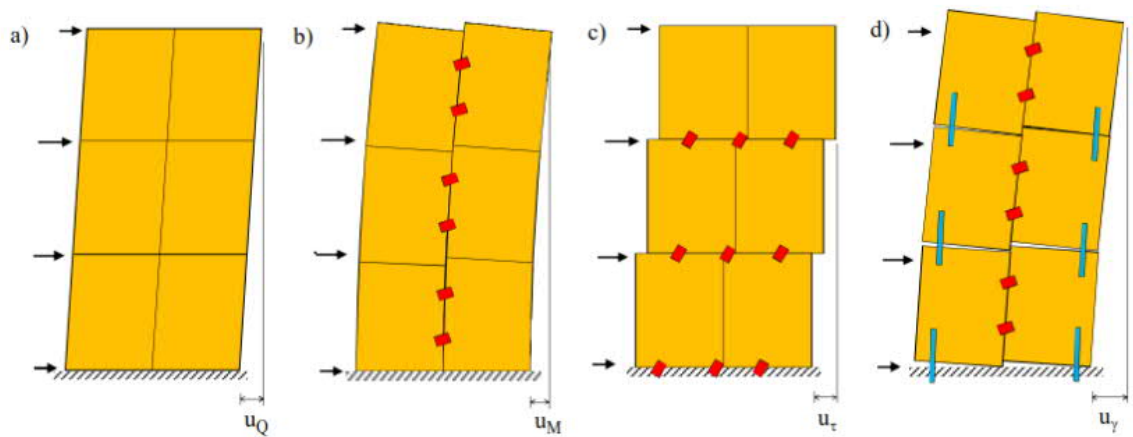
KUVIO 5. Vaakalevykenttään vaikuttavat rasitukset vaakavoimista (Proholz 2014, 130)

3.2.2 Jäykistävien seinien toiminta

Tilaelementtien jäykistävät seinät vastaanottavat vaakavoimista johtuvat voimat välipohjarakenteiden kautta, kuten kuviossa 3 on esitetty. CLT seinän yläpäähän kohdistuu leikkausvoimaa yläpohjarakenteen välittävistä vaakavoimista, jotka jakautuvat jäykistäville seinille jäykistävien rakenteiden jäykkyyksien suhteessa. CLT levyjen itsessään ollessa hyvin jäykkiä tulee jäykistävien seinien jäykkyyttä tarkasteltaessa huomioida myös levysaumojen ja seinälevyn ylä- ja alapään liitosten jäykkyydet. Useat eri tutkimukset ovatkin osoittaneet, että CLT rakenteisten jäykistävien seinien alapuoleiset liitokset ja levyjen väliset pystysaumojen liitokset ovat suurimmat tekijät jäykistävien seinien muodonmuutoksissa. Näin ollen jäykistävien seinien leikkauskestävyys riippuu pitkälti jäykistävien seinien alapuolisista ja seinien välisistä liitoksista. (FPInnovations 2019a, 6.)

Tilaelementtitekniikkaa käytettäessä jäykistävät seinät katkeavat jokaisen kerroksen kohdalla ja kerrosten välisissä liitoksissa joudutaan usein käyttämään erilai-

sia joustavia kerroksia ääniteknisistä syistä, jotka vaikuttavat merkittävästi seinien vaakasuuntaisten liitosten jäykkyyteen. Näin ollen jäykistävät seinät eivät pysty toimimaan jäykkänä mastona, vaan liitoksissa tapahtuvat liitossiirtymät vaikuttavat rakenteen muodonmuutoksiin, jotka voivat olla hyvinkin merkittäviä korkeissa rakennuksissa. Rakennusrungon heikosta jäykkyydestä ja helposti suuriksi kasvavien siirtymien takia saattaa korkeissa rakennuksissa käyttörajatilatarastelu osoittautua mitoittavaksi tekijäksi rakennuksen jäykistystä mitoittaessa. (Sorri 2016, 49.) Kuviossa 6 on esitetty esimerkkejä vaakakuorman aiheuttamista muodonmuutoksista erilaisilla liitostyypeillä. a leikkausmuodonmuutos, b taivutusmuodonmuutos, c Leikkausliukumasta johtuva muodonmuutos ja d ankkurointiliitoksen ja pystysauman liitossiirtymistä johtuva kiertymä (Luntta 2013, 76).

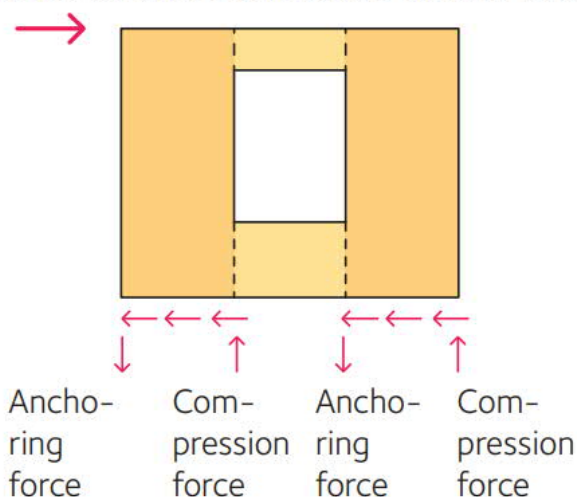


KUVIO 6. Vaakakuormasta syntyvät muodonmuutostapaukset (Luntta 2013, 76.)

CLT runkoisissa kerrostaloissa kuvion 6 mukainen d kohdan ankkurointiliitoksen ja pystysauman liitossiirtymistä johtuva kiertymä on tarkasteltava huolellisesti. CLT:n ollessa noin viisi kertaa kevyempää kuin betoni, eivät rakennuksen omasta painosta johtuvat kuormat usein riitä kumoamaan vaakavoimista johtuvaa nostetta. Tällöin joudutaan käyttämään erilaisia ankkurointiliitoksia, joilla jäykistävät seinät sidotaan alapäistään kiinni aina perustuksille saakka. Ankkurointiliitos mitoitetaan kestäämään vaakavoimista aiheutuvan nosteen vetovoima. Ankkurointiliitoksia suunniteltaessa tulisi huomioida myös rakennuksen pitkäaikaisen painuman ja kutistuman vaikutus, jolloin ankkurointien tulisi olla jälkijännitettyjä tai liitoksia tulisi päästä kiristämään rakennuksen elinkaaren aikana.

Jäykistävien seinien aukotukset voidaan suunnitella joko yksinkertaista tai tarkkaa analyysiä käyttäen. Yksinkertaistetussa menetelmässä seinän aukon molempien puoleiset täyskorkeat seinänosat mitoitetaan ja ankkuroidaan erillisinä jäykistävinä seininä. Tarkassa mitoitusmenetelmässä seinää tarkastellaan kokonaisuutena huomioiden myös aukon ylä- ja alapuoliset seinäosuudet. Yksinkertaistettu analyysi tarkoittaa usein, että myös aukon kohdalla joudutaan käyttämään ankkurointiliitosta. Tarkkaa analyysiä käyttäen pystytään hyödyntämään aukon ylä- ja alapuoleiset seinäosuudet ja jos osuuksien taivutus- ja leikkauskestävyydet riittävät, voidaan ankkurointi jättää pois aukon kohdalta. (The CLT handbook 2019, 119.) Yksinkertaistetun analyysin käyttö on yksinkertaisempi menetelmä ja sillä jäykistävien seinien mitoitus on varmalla puolella. Ankkurointiliitosten määrä saattaa kuitenkin kasvaa tarpeettoman suureksi, mikä nostaa kustannuksia ja heikentää rakennuksen akustisia ominaisuuksia. Tarkempi analyysi puolestaan vaatii usein raskaampia ja monimutkaisia laskutoimituksia, mutta sillä saadaan usein ankkurointipisteitä vähennettyä ja aukotettujen seinien tarkastelu kokonaisina seinäkokonaisuuksina johtaa myös pienempiin rakennuksen siirtymämuodonmuutoksiin. Etenkin korkeissa rakennuksissa on usein välttämätöntä käyttää tarkkaa analyysiä.

Horizontal wind load transferred via floor structure



KUVIO 7. Voimien jakaantuminen jäykistäville seinille yksinkertaista analyysiä käyttäen (The CLT handbook 2019, 119)

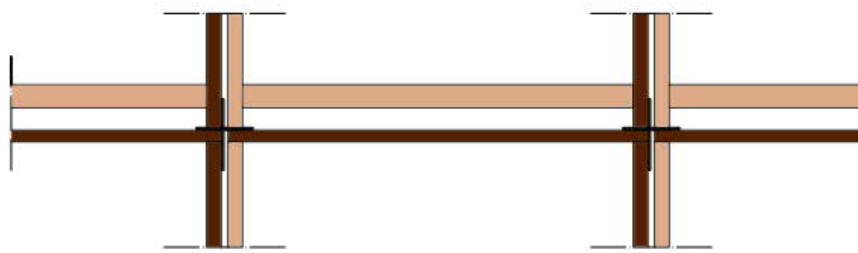
Jäykistävät seinät tulisi pyrkiä sijoittamaan mahdollisimman symmetrisesti rakennuksen molempien pääsuuntien keskilinjojen molemmiin puolin. Seinien epäsymmetrinen sijoittelu tai jäykkyysuhteet johtavat rakennuksen tai jonkun sen

osan kiertymiseen ja altistaa rakennuksen vääntöväärähtelyille. Jäykistyksen symmetriaa suunniteltaessa on huomioitava myös jäykistävien seinien aukotukset, jotka heikentävät seinän jäykkyyttä ja saattavat johtaa rakennejärjestelmän epäsymmetrisiin jäykkyyssuhteisiin. Seinien symmetrisellä sijoittelulla saadaan rakennejärjestelmän vääntökeskiö osumaan lähelle tuulikuorman resultanttia, joka johtaa hyvin pieniin vääntörasituksiin ja -väärähtelyihin. Tämä on erityisen tärkeää tilaelementtitekniikalla rakennettaessa, jolloin elementtien asennusjärjestys ja rakennuksen pohjaratkaisut vaikuttavat oleellisesti jäykistysseinien sijoitteluun.

3.2.3 Tilaelementtitekniikan haasteet

Tilaelementeillä rakennettaessa jäykistysjärjestelmän geometria määräytyy hyvin pitkälti arkkitehtisuunnitelman mukaan. Rakennesuunnittelijan on tärkeää osata sovittaa rakenne- ja arkkitehtisuunnitelmat toisiinsa ja löytää yhdessä arkkitehdin kanssa toimiva pohjaratkaisu, joka mahdollistaa riittävän jäykistävien seinien määrän ja symmetrisen sijoittelun.

Tilaelementtitekniikan takia voidaan rakennuksen jäykistyksessä yleensä käyttää vain toista huoneistojen välisistä seinistä täydellä kapasiteetilla. Tämä johtuu siitä, että vierekkäin asennetuista tilaelementeistä vain toinen pystytään kiinnittämään siten, että liitos pystyy välittämään leikkaus- ja normaalivoimia liitososan välityksellä. Koska kyseinen liitos pystytään toteuttamaan vain ensimmäiseksi asennettuun tilaelementtiin, on asennusjärjestys huomioitava suunnittelussa. Kun kitkan ja värähtelimen muodonmuutokset otetaan huomioon, voidaan myös toista huoneistojen välisistä seinistä hyödyntää jäykistyksessä. Liitosteknisistä syistä myös välipohjarakenteista ainoastaan tilaelementtien katto huomioidaan jäykistäväksi rakenteeksi. Rakennejärjestelmän jäykistävät rakenteet on esitetty tummennettuna kuviossa 8.



KUVIO 8. Jäykistyksessä huomioidut tilaelementin rakenteet, kun kitkan ja täri-
näeristimen muodonmuutoksia ei ole otettu huomioon (Laakkonen 2016, 9)

Sorriin diplomityössä (Sorri 2016, 53-60) tehdyissä haastatteluissa CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistykseen haasteiksi mainittiin pienet pystykuormat ja akustisista vaatimuksista johtuvat liitosten joustavuudet ja rakenteiden epäjatkuvuudet, jotka heikentävät rakennusrungon jäykkyyttä. Tilaelementtien kokorajoitusten vuoksi välipohjan jännevälit ovat yleensä noin neljän metrin luokkaa, jolloin kantaville seinille kohdistuvat pystykuormat ovat melko pieniä. Rakennejärjestelmän takia huoneistojen väliset seinät ovat kaksoisrakenteita, jolloin kullekin seinälle kohdistuu vain puolet jännevälin kuormasta ja liitostekniikan takia vain toisen seinän pystykuormat pystytään huomioimaan stabiloivana pystykuormana. Pienten pystykuormien takia joudutaan seinät usein ankkuroimaan perustuksiin seiniin kohdistuvaa nostetta vastaan. Kevyen rakenteensa vuoksi joudutaan puukerrostaloissa käyttämään pitkiä jäykistäviä seiniä tiheämmin kuin betonikerrostaloissa. Liitosten joustavuuden ja niissä tapahtuvien siirtymien vuoksi jäykistykseen suunnittelussa joudutaan yleensä käyttämään kehittyneitä laskentaohjelmia ja raskaita rakennemalleja. CLT:n monikerrosrakenne lisää laskentaohjelmien ja rakennemallien raskautta entisestään.

4 Liitosten suunnitteluperiaatteet

Rakennuksen liitoksilla ja niiden suunnittelulla on suuri vaikutus koko rakennuksen toimintaan ja ominaisuuksiin. Rakennuksen heikoin kohta löytyy usein juuri liitoksista. Kantavien rakenteiden väliset liitokset vaikuttavat oleellisesti rakennuksen kuormankantokykyyn, jäykkyyteen, palotilanteen kuormankantokykyyn ja äänitekniisiin ominaisuuksiin. Liitosten suunnittelulla pystytään myös varmistamaan liitosten sitkeä murtuminen ja jatkuvan sortuman rajoittaminen onnettomuustilanteessa. Rakennesuunnittelijan tulee ymmärtää miten kuormat siirtyvät erilaisissa liitoksissa ja mahdollistaa kuormien siirtyminen rakenneosalta toiselle liitoksen välityksellä. Puurakenteiden suunnittelussa on myös huomioitava kuormien suunta puun syysuuntaan nähden. CLT:n koostuessa useasta päällekkäisestä ristiin liimatusta lamellikerroksesta, on kuorman ja syysuuntien huomiointi erityisen tärkeää. Puun epähomogeeninen rakenne ja hygroskooppiset ominaisuudet asettavat myös liitosten suunnittelulle omat haasteensa.

Tässä luvussa käsitellään liitosten suunnitteluperiaatteita CLT runkoisten tilaelementtirakennusten suunnittelun kannalta. CLT tilaelementtien liitoksissa ja liittymissä tarvitaan kehitystä ja liitososien, sekä liitostapojen standardisointia. Erilaisia liitososia, sekä menetelmiä kehitetään ja tutkitaan jatkuvasti, mutta työtä on vielä paljon tehtävänä verrattuna esimerkiksi betonielementtirakentamiseen.

4.1 Määräykset ja ohjeet

Liitosten mitoituksessa sovelletaan eurokoodi 5:n mukaisia ohjeita. Eurooppalaisen teknisen hyväksynnän (ETA) ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) julkaisemat valmistajakohtaiset ohjeet on kuitenkin huomioitava CLT-levyjen, sekä liitoksissa käytettyjen kiinnikkeiden mitoituksessa ja suunnittelussa.

Rakennustuotteen CE-merkintä voidaan toteuttaa valmistajan hakeman ETA:n perusteella, mikäli tuotteella ei ole harmonisoitua tuotestandardia. ETA on aina valmistajakohtainen, jossa esitetään tuotteen kuvauksen ja käyttötarkoituksen

lisäksi sen ominaisuudet ja/tai ominaisuusluokat tuotetta koskevien olennaisten vaatimusten osalta. (Eurofins n.d.)

4.2 Kiinnikkeet

Tilaelementtien liitoksissa voidaan käyttää useita erilaisia kiinnikkeitä, riippuen liitoksilta vaadituilta ominaisuuksilta. Käytettäessä erilaisia liittimiä tai kiinnitysosia puhutaan mekaanisista liitoksista. Puurakenteissa vaaditaan tyypillisesti melko pitkiä mekaanisten liittimien liitinvälejä puun halkeilun ja erilaisten leikkausmurtovaurioiden takia, jotka johtavat vaaralliseen hauraaseen murtumiseen.

Rakennushankkeessa tulee sopia käytettävät liitintyyppit ja pysyttäytyä niissä koko rakennushankkeen ajan. Monilla liittimillä on valmistajakohtaisia ETA- hyväksytyjä mitoitusohjeita, jotka perustuvat kokeellisesti testattuihin lujuuksiin ja tuloksiin. Näin ollen käytettävällä liitintyyppillä on suuri vaikutus rakennesuunnittelun ja mitoituksen kulkuun.

4.2.1 Itseporautuvat ruuvit

Itseporautuvat ruuvit ovat käytetyin voimia siirtävä liitintyyppi CLT:n välisissä liitoksissa. Ruuvit ovat pitkälti syrjäyttäneet naula- ja pulttiliitosten käytön puurakenteissa. Ruuviliitosten suosio perustuu ruuvien kykyyn siirtää veto- ja leikkausvoimia rakenneosalta toiselle. Etenkin pitkillä ruuveilla saavutetaan hyvä leikkausvoimakkestävyys. Ruuvien käyttö on myös nopeaa ja helppoa niin elementti-tehtaalla kuin työmaallakin, eikä esiporausta tarvita itseporautuvilla ruuveilla. Itseporautuvia puuruuveja on saatavilla halkaisijaltaan 4:stä-13:a mm:iin ja jopa 1000 mm pitkinä. (The CLT Handbook 2019, 74.)

Mitoituksessa käytettävillä ruuveilla tulee olla EN 14592 standardin mukaan määritettynä seuraavat lujuusominaisuudet: vääntökestävyys $f_{tor,k}$, myötömomentti $M_{y,k}$, tai vetomurtolujuus $f_{u,k}$, ulosvetolujuusparametri $f_{ax,k}$, kannan läpiveto-
lujuusparametri $f_{head,k}$, ja vetomurtokestävyys $f_{tens,k}$. (RIL 205-1-2017, 127.)

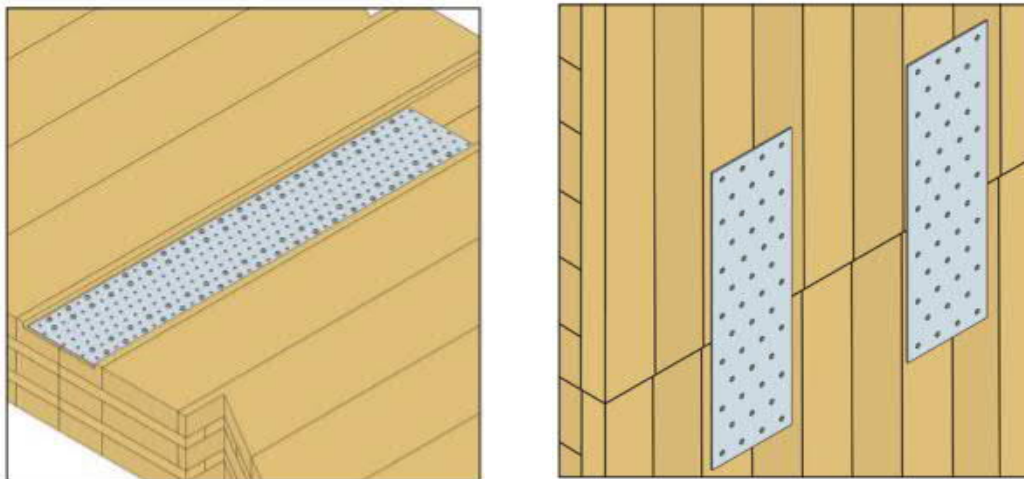
RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohjeessa itseporautuvilla ruuveilla tarkoitetaan täyskierteisiä ruuveja ja sellaisia osakierteisiä ruuveja, joiden sileän varren paksuus on enintään 80% nimellispaksuudesta d , mutta vähintään $1,1d_i$. Nimellispaksuudella d tarkoitetaan ruuvin kierteen ulkohalkaisijaa ja d_i on ruuvin kierteisen osan sisähalkaisija eli sydänmitta. Mikäli itseporautuvan ruuvin CE-merkinnässä tai ruuvin mitoitus koskevassa VTT:n lausunnossa ei ole annettu erillisiä ohjeita noudatetaan mitoituksessa standardin EN 1995-1-1 suunnitteluohjeen mitoitusohjeita. (RIL 205-1-2017, 129.) Usein kuitenkin CLT rakenteissa käytettävillä porakärkiruuveilla on omat valmistajakohtaiset ETA-hyväksytyt ja testatut mitoitusohjeet, joita tulisi aina noudattaa.

Käytetyimpiin ja suurimpiin ruuvivalmistajiin kuuluu mm. Spax International Oy, SFS Intec Oy, Würth Oy ja Rothoblaas. Näillä valmistajilla on omia ruuvikohtaisia suunnitteluohjeita sekä kattavia ohjelmia oikean ruuvityypin valitsemiseen ja osalla jopa ilmaisia suunnitteluohjelmia ruuvien mitoittamiseksi.

4.2.2 Latta- ja kulmateräsosat

Erilaisten latta- ja kulmateräsosien käyttö on hyvin yleistä ja suosittua CLT-rakentamisessa. Teräsosilla pystytään saavuttamaan lujempia ja jäykempiä liitoksia pelkkiin puikkoliitoksiin verrattuna. Teräslevyliitoksen lujuus määräytyy liittimien myötölujuuden ja puun lujuuden mukaan. Teräsosia käytetään tyypillisesti CLT-tilaelementtien välisissä liitoksissa sekä elementtien ankkuroinnissa perustuksiin tai alapuolisiin kantaviin betonirakenteisiin. Kuten porakärkiruuveilla, myös monilla latta- ja kulmateräsosilla on omia ETA-kohtaisia mitoitus- ja asennusohjeita.

Teräsosilla voidaan saavuttaa suuriakin leikkaus-, veto- ja taivutuskestävyyksiä mutta teräsosien kiinnityksiin käytettävät ruuvi- tai naulamäärät voivat kasvaa todella suuriksi yksittäisten puikkoliittimien pienten kapasiteettien takia. Etenkin kerrostalorakentamisessa kohdistuu liitoksiin suuria kuormia, jolloin joudutaan käyttämään järeitä teräsosia yhdessä suurien puikkoliitinryhmien kanssa. Käytettäessä suuria puikkoliitinryhmiä suurien voimien siirtämiseen CLT-levyn reunassa, tulee CLT-levyn lohkeamismurto ottaa suunnittelussa huomioon.



KUVIO 9. CLT-liitoksissa käytettäviä lattateräksiä (Simpson strong tie 2020, 63)

4.2.3 Muut kiinnikkeet

Uudenlaisia innovatiivisia kiinnikkeitä on kehitetty erityisesti CLT:n välisiä liitoksia varten, etenkin eurooppalaisten valmistajien toimesta. CLT:n valmistuksessa käytetty CNC teknologia mahdollistaa kiinnikkeiden lisäämisen CLT elementteihin jo tehtaalla mittatarkasti ja hallitusti. Kiinnitysosien lisääminen elementteihin tehtaalla lyhentää elementtien asennusaikaa ja kustannuksia työmaalla. Elementtirakentamisessa pyritään korkeaan esivalmistusasteeseen ja esimerkiksi betonielementtirakenteissa on jo pitkään ollut käytössä harmonisoituja liitososia, jotka lisätään elementteihin tehtaalla elementin valmistuksen aikana. Tähän pyritään myös CLT rakentamisessa, jonka takia kiinnikevalmistajat kehittävät omia tuotteitaan ja liitosratkaisujaan jatkuvasti.

Erilaisia liimattuja kierretankoliitoksia voidaan käyttää, kun liitokseen kohdistuu suuria aksiaalisia voimia ja sauman suuntaisia leikkausvoimia CLT:n halkeamiskin pienentämiseksi. Kierretankoliitoksessa voidaan CLT-levyjen välissä käyttää putkiliitintä, joka asennetaan esiporattuihin reikiin levyn reunoilla niin, että levyihin asennetut kierretangot sovitetaan putkiliittimen loveuksiin. Liitos kiristetään muttereiden avulla. Kuviossa 10 on esitetty putkiliittimen avulla toteutettu liitos. (FPInnovations 2019b, 5, 11.)

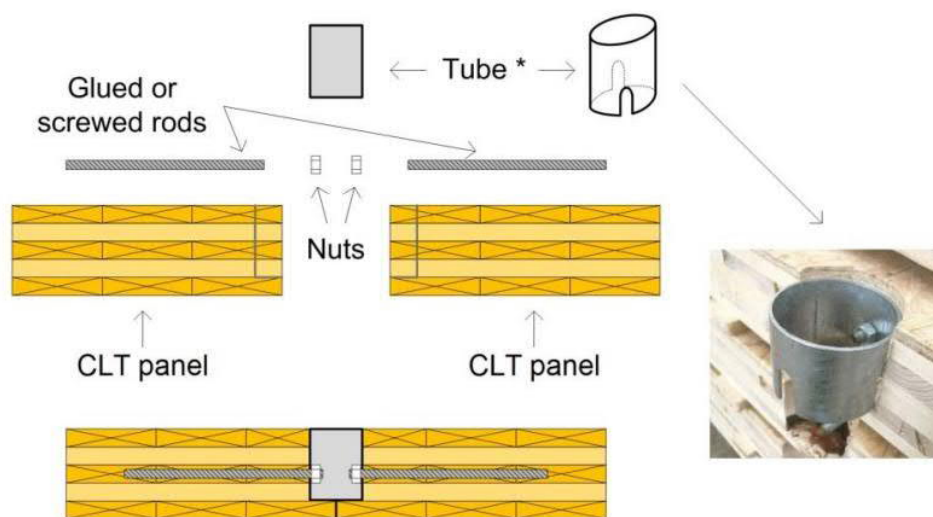
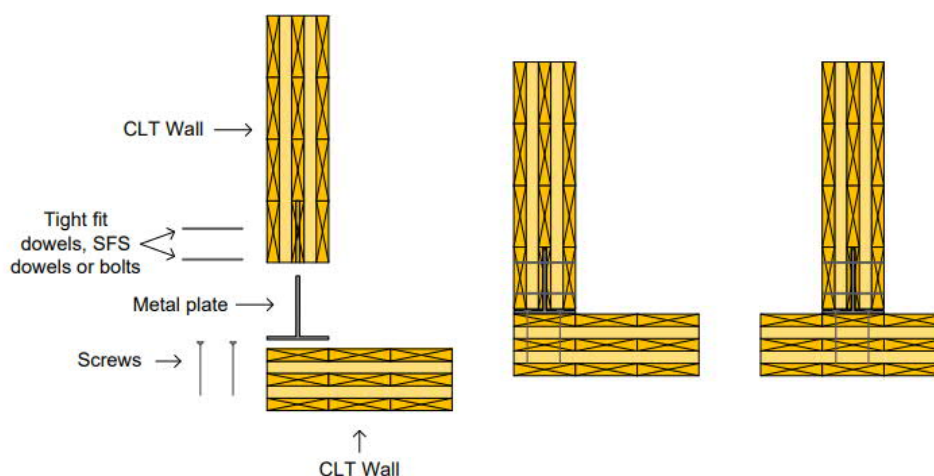


Figure 8 Tube connector

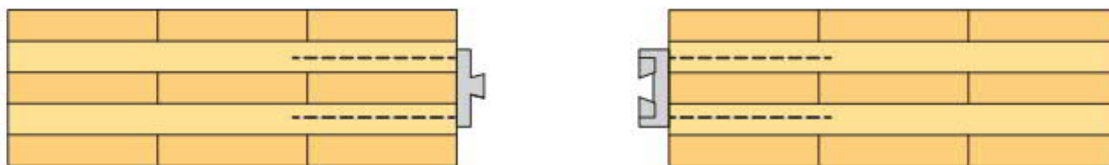
KUVIO 10. Kierretankoliitos teräsisellä putkiliittimellä (FPInnovations 2019b, 11)

CLT-levyihin upotettuja teräslevyjä voidaan käyttää CLT-levyjen välisissä kulmaliitoksissa. Liitoksessa CLT-levyyn tehdään tehtaalla valmiiksi teräslevyn kokoinen mittatarkka loveus CNC koneella. Teräslevynä käytetään tavallisesti T-mallista teräslevyä, jonka ainepaksuus on yleensä 6-12 mm. Teräslevy kiinnitetään CLT-levyyn ruuvaamalla ja lovettu CLT-levy asennetaan siten, että teräslevy uppoaa loveukseen. CLT-levy kiinnitetään tyypillisesti teräsvaarnoilla CLT:n ja teräslevyn läpi. (FPInnovations 2019b, 18.) Liitosta voidaan käyttää seinien nurkkaliitoksissa, sekä seinä- lattialiitoksissa tai seinä- kattoliitoksissa. Kuviossa 11 on havainnollistettu seinäliitosta upotettua teräslevyä käyttäen.



KUVIO 11. Upotettu teräslevy seinäliitoksessa (FPInnovations 2019b, 18)

Piilotettuina teräskiinnikkeinä voidaan myös käyttää erilaisia koukkujärjestelmiä. CLT-levyihin kiinnitetään kiinnikeosat ruuvaamalla jo tehtaalla. Levyt liitetään toisiinsa valmiiksi kiinnitetyn liitinosaan ja toisessa levyssä olevan vastakappaleen avulla. Kiinnitykseen ei tarvita muita mekaanisia kiinnikkeitä. Liittimien lukumäärä ja koko määrää liitoksen kokonaiskapasiteetin. Liitoksen sauma joudutaan usein palosuojaamaan erilaisin menetelmin. (The CLT Handbook 2019, 76.) Kuviossa 12 on esitetty CLT-levyjen välinen liitos koukkuliittimiä käyttäen.



KUVIO 12. CLT-levyjen liitos teräksisiä koukkuliittimiä käyttäen (The CLT Handbook 2019, 76)

Italialainen puurakenteiden rakenneratkaisuihin erikoistunut yritys Rothoblaas on kehittänyt oman patentoidun liitosjärjestelmän nimeltä X-RAD. Liitoksissa käytetty kompakti kiinnike koostuu useasta teräsosasta, joiden avulla liitetään usea CLT-levy toisiinsa. Osa teräsosista kiinnitetään elementteihin jo tehtaalla elementtien valmistuksen yhteydessä. Työmaalla elementit liitetään toisiinsa käyttäen teräksisiä välikappaleita. Kiinnikkeissä ja välikappaleissa on esiporatut reiät ja elementit liitetään toisiinsa teräspulteihin, muodostaen teräслиitoksen. Liitosta voidaan myös käyttää elementtien ja betonin välisiin liitoksiin esimerkiksi perustuksiin tai betoniseiniin kiinnitettyjen kiinnikkeiden avulla. Liitososaa voidaan myös käyttää elementtien nostamiseen työmaalla, eikä erillisiä nostokiinnikkeitä tarvita. Järjestelmä mahdollistaa nopean elementtien välisen kiinnityksen työmaalla. (X-RAD n.d, 10-21.) Rothoblaas X-RAD kiinnike on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Rothoblaas X-RAD liitinosa (FPInnovations 2019b, 16).

Liitososien ja kiinnikkeiden lisääminen jo CLT tehtaalla vaatii hyvin mittatarkkaa suunnittelua ja tarkkoja asennustoleransseja työmaalla. Teräksisten kiinnikkeiden upottamisella CLT-elementteihin saavutetaan parempi palonkestokapasiteetti ja visuaalisesti näyttävämpi liitos verrattuna pinta-asennettuihin osiin.

CLT-tilaelementtirakentamisessa käytetään yleisesti melko yksinkertaisia ruuvi- ja lattateräслиitoksia mutta tilaelementtirakentaminenkin kehittyy jatkuvasti. Kehitystyöllä pyritään samantapaisiin tyypiliitoksiin ja vakiokiinnikeosiin kuten betonielementtirakentamisessa.

4.3 Palonkestävyys

4.3.1 Palomääräykset ja paloluokat

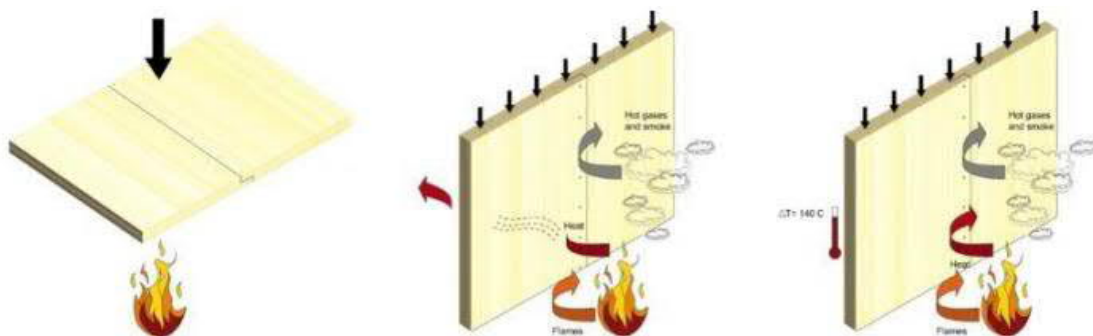
Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta sallii rakennusten paloturvallisuuden osoittamiseen kaksi vaihtoehtoista menettelytapaa, jotka ovat:

1. Luokka- ja lukuarvoihin perustuva mitoitus (taulukkomitoitus)
2. Tapauskohtainen oletettuun palonkehitykseen perustuva toiminnallinen palomitoitus

Rakennukset jaetaan neljään eri paloluokkaan: P1, P2, P3 ja vuonna 2018 voimaan tulleeseen toiminnalliseen mitoitukseen perustuvaan paloluokkaan P0. Paloluokkia P1, P2 ja P3 käytetään, kun rakennus suunnitellaan taulukkomitoitusta käyttäen. Taulukkomitoituksella tarkoitetaan rakennuksen suunnittelua, joka perustuu palomääräysten paloluokkiin ja lukuarvoihin. Rakennuksen katsotaan täyttävän olennaiset vaatimukset paloturvallisuuden kannalta, kun rakennuksen asetuksessa annetut luokka- ja lukuarvot täyttyvät. (Lahtela 2018a, 10.)

Toiminnallisella mitoituksella tarkoitetaan, kun rakennuksen suunnittelu perustuu osin tai kokonaan oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät palotilanteet. Mikäli rakennuksen poistumisturvallisuus tai rakenteiden palonkestävyys perustuu toiminnalliseen palomitoitukseen, kuuluu rakennus paloluokkaan P0. Kun kokonaisuuden kannalta vähäisiä poikkeamia taulukkomitoituksen luokista tai lukuarvoista perustellaan toiminnallisen palomitoituksen avulla, ei rakennus vielä kuulu paloluokkaan P0. Vaikka rakennus olisi mahdollista toteuttaa taulukkomitoitukseen perustuen, voidaan silti käyttää tapauskohtaista toiminnallista palomitoitusta. Saman rakennuksen eri osat voivat kuulua eri paloluokkiin, mikäli palon leviäminen estetään osasta toiseen palomuurin avulla. (Lahtela 2018a, 10.) Korkeissa puurakennuksissa käytetään lähes poikkeuksetta toiminnallista palomitoitusta.

Rakenteille asetettuja palonkestovaatimuksia ilmaistaan REI-luokkina, jossa R tarkoittaa rakenteen kantavuutta (kuviossa 13 vasemmalla), E tiiviyyttä (kuviossa 13 keskellä) ja I eristävyyttä (kuviossa 13 oikealla). Rakenteen vaadittu palonkesto aika ilmaistaan numeroin vaatimuksen perässä. Esimerkiksi merkintä REI 60 tarkoittaa, että rakenteen tulee säilyttää kantokykynsä, tiiviytensä ja eristävyytensä palotilanteessa 60 minuutin ajan. Kun taas esimerkiksi merkintä EI 30 tarkoittaa, että rakenteen tulee säilyttää eristävyytensä ja tiiviytensä palotilanteessa 30 minuutin ajan. (Lahtela 2018a, 12.)



KUVIO 13. Rakenteiden palonkestovaatimukset havainnollistettuna (FPInnovations 2019c, 18)

Tärkeimpinä tekijöinä rakennuksen rungon paloteknisessä suunnittelussa on kantavan rungon ja osastoivien rakennusosien palonkestävyys. Kyseiset tekijät määrittelevät hyvin pitkälle minkälaisia rakennetyyppejä ja liittymädetaljeja rakennuksessa käytetään.

4.3.2 CLT palotilanteessa

CLT-levyt suoriutuvat palotilanteessa hyvin massiivipuulle olennaisen hitaan hiiltymisen takia. Eurooppalaisten tutkimusten mukaan useat eri tekijät vaikuttavat CLT:n palonkestävyyteen, joita ovat mm. levyn valmistuksessa käytetyt puulajit, lamellikerrosten väliset liimat, CLT-levyn kokonaispaksuus, lamellien lukumäärä, lamellien paksuus, miten CLT-levy on altistunut palotilanteessa, levyjen välisten saumojen toteutus ja käytetyt palosuojausmenetelmät. (FPInnovations 2019c, 4.)

Tällä hetkellä CLT-levylle ei ole olemassa yleisiä palomitoitusohjeita, joten palomitoitus perustuu valmistajakohtaisiin ohjeisiin. CLT levyn ristiinliimatun rakenteen takia hiiltyminen ei ole lineaarista, vaan se tapahtuu useammalla eri hiiltymisnopeudella. Kun palo saavuttaa levyn ensimmäisen lamellikerroksen liimamassan tapahtuu lamellin delaminoituminen, jolloin hiiltyneen lamellikerroksen oletetaan kuoriutuvan pois. Tämän jälkeen hiiltyminen alkaa ikään kuin alusta seuraavassa lamellikerroksessa suuremmalla nopeudella esilämenneen lamellikerroksen takia. Kun hiiltymissyvyys on saavuttanut 25 mm:n syvyyden, palaa hiiltymisnopeus alkuperäiseen arvoon. Jos lamellikerros on ohuempi kuin 25 mm

ei hiiltymisnopeuden palautumista alkuperäiseen arvoon tapahdu, vaan liimasauma saavutetaan tätä ennen ja delaminoituminen tapahtuu uudelleen, jolloin nopeutettu hiiltyminen jatkuu. Näin ollen lamellikerrosten lukumäärällä ja paksuudella on merkittävä vaikutus CLT-levyn palonkestävyyteen. Palomitoituksessa on tärkeä tarkastaa mitkä lamellikerrokset toimivat palotilanteessa taivutuksessa, sekä vedossa ja puristuksessa. 3-kerroksisessa CLT-levyissä pintalamellien delaminoituessa menettää koko CLT-levy kantavuutensa, toisin kuin esimerkiksi 5-kerroksisessa CLT-levyissä jää usein vielä 3-kerroksinen levy jäljelle. 3-kerroksiset levyt tulisikin suunnitella siten, ettei hiiltymissyvyys saavuta vaaditun palonkestoajan sisällä liimasaumaa. Tämä voidaan toteuttaa tarpeeksi paksuilla pintalamelleilla tai levyjen palosuojauksella esimerkiksi levyttämällä. (Lahtela 2018a, 92.)

4.3.3 Liitokset palotilanteessa

Liitosten suunnittelulla ja toteutuksella on merkittävä vaikutus koko rakennuksen palonkestävyyteen. CLT-tilaelementtien liitoksissa käytetään pääasiassa mekaanisia kiinnikkeitä, joiden palonkestävyys on hyvin rajallinen. Suunnittelijan on varmistettava, että liitoksen lujuus ja ominaisuudet säilyvät myös palotilanteessa. Suojaamattomilla puikkoliittimillä voidaan tavallisesti saavuttaa enintään 15...20 minuutin palonkestävyys. Suurentamalla liitettävien puurakenteiden dimensioita ja puikkoliittimien pääty- ja reunaetäisyyksiä voidaan palonkestävyyttä kasvattaa enintään 30 minuuttiin. Yli R30 palovaatimuksen liitokset joudutaan siis aina palosuojaamaan. Liitokset voidaan palosuojata esimerkiksi sijoittamalla liitososat puun sisään tai siten, että ne jäävät palosuojalevytyksen taakse. Puukerrostalo-kohteissa liitososat ovat tavallisesti jo ulkonäkösyistä palolevytyksen takana, jolloin liitosten palosuojaus ei ole yhtä iso haaste kuin esimerkiksi hallirakentamisessa. (Lahtela 2018a, 93.)

CLT-tilaelementtirakentamisessa elementtien väliset liitokset jäävät kahden massiivipuukerroksen väliin, jotka ovat usein vielä palosuojattu esimerkiksi palosuojalevytyksellä. Liitokset ovat siis lähtökohtaisesti hyvin suojassa palotilanteessa CLT-levyjen hyvän palonkeston ansiosta. Täysin palolta suojattujen liitosten mitoituksiksi riittää murtorajatilan mitoitus palomitoitukseksi.

4.4 Akustiikka

Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki toteavat vuonna 2017 tehdyssä asiantuntijaselvityksessään, asuinrakennushankkeen akustiikan kattavan yleensä neljä osa-aluetta (Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki 2017, 9):

- **Huoneakustiikka** käsittää äänen heijastumista, vaimenemista, etenemistä ja käyttäytymistä huonetilan sisällä. Tarkoituksena on suunnitella tila siten, että tilassa oleva äänilähde saadaan kuulostamaan siltä, mitä tilan käyttötarkoitus siltä edellyttää.
- **Rakennusakustiikka** käsittää äänen siirtymistä eri tiloista toiseen rakenteiden tai muiden äänen kulkureittien kautta. Äänilähteen mukaan puhutaan ilmaaääneneristyksestä ja askel- tai runkoääneneristyksestä.
- **Meluntorjunnalla** tarkoitetaan rakennuksen ulkopuolisen melun vähentämistä vaikuttamalla melun syntymiseen tai estämällä sen leviämistä erilaisilla ääntä eristävillä rakenteilla, äänenvaimentimilla tai huoneakustiikan keinoin.
- **Tärinäeristyksellä** tarkoitetaan laitteiden aiheuttaman värähtelyn siirtymisen rajoittamista rakennuksen runkoon, esimerkiksi rautateiden tai raitio-ten läheisyyteen rakennettaessa. Laite eristetään rakennuksen rungosta joustavilla rakenneosilla.

4.4.1 Säädökset ja ohjeet

Suomen lainsäädäntö määrittelee melun äänenä, joka on ”terveydelle haitallista, ympäristön viihtyisyyttä merkityksellisesti vähentävää tai työntekoa merkityksellisesti haittaavaa ääntä taikka siihen rinnastettavaa tärinää”.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1-1998 on esitetty asuinrakennuksen ääniolosuhteita koskevat määräykset. Osassa esitetään, että rakennus on suunniteltava ja toteutettava siten, etteivät rakennuksessa tai sen läheisyydessä olevat altistu voimakkaalle melulle, joka vaarantaisi henkilöiden terveyttä tai häiritsisi nukkumista, lepäämistä ja työskentelyä. Rakentamismääräyskokoel-

man osassa C1 edellytetään myös, että kaikki rakennuksen ääniolosuhteisiin vaikuttavat tekijät, kuten esimerkiksi melulähteiden voimakkuus ja tilojen keskinäinen sijoittelu otetaan huomioon rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa. Rakentamismääräyskokoelman osassa on annettu teknisinä mittalukuina määryksiä asuinhuoneistoille, sekä ääniolosuhteiden toteuttamista koskevia ohjeita selventäviä erilaisia selostuksia. (Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki 2017, 13.)

Valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 määritetään asuinrakennuksen ja sen oleskelualueiden melutason ohjearvoja. Vaikka päätöksessä esitetään ohjearvoja, muuttuvat ne asemakaavaprosessin kautta määräyksiksi. Ulkoalueiden meluntorjuntaa ja rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskevat kaavamääräykset melualueille rakennettaessa perustuvat valtioneuvoston päätöksen mukaisiin ohjearvoihin, jolloin lainvoimaisen kaavan määräyksiä on noudatettava. (Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki 2017, 13.)

Standardi SFS 5907 on Suomen standardisoimisliitto SFS ry:n vuonna 2004 julkaiseva asiakirja, joka jakaa rakennukset neljään eri akustiseen luokkaan A...D. Kun rakennuksessa on tehty standardin määrittelemä määrä akustisia mittauksia, voidaan se jakaa johonkin edellä mainittuun luokkaan teknisten mittalukujen perusteella. Suunnittelussa voidaan kuitenkin käyttää standardissa esitettyjen luokkien vaatimuksia ohjearvoina, vaikka standardissa määriteltyjä mittauksia ei tehtäisikään. Rakennus voidaan kuitenkin todeta johonkin luokkaan kuuluvaksi vain standardin mukaisten mittausten perusteella. Uudisrakentamisessa on aina noudatettava vähintään luokan C vaatimuksia, luokka D on tarkoitettu vanhojen rakennusten akustisten ominaisuuksien toteamiseen. Luokkiin A ja B kuuluvat rakennukset ovat ääniolosuhteiltaan luokkiin C kuuluvia rakennuksia parempia. Standardi on luonteeltaan suositus ja tarkoitettu rakentamista ohjaavaksi asiakirjaksi. (Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki 2017, 13.)

4.4.2 Liitosten suunnittelu

Puukerrostalorakentaminen asettaa tiettyjä haasteita rakennuksen ääneneristävyyden suunnitteluun. Puu on noin viisi kertaa kevyempää kuin betoni, josta seuraa, että levymäinen puukerros on ilmaääneneristävyydeltään noin 15 dB heikompi kuin paksuudeltaan vastaava betonikerros. Betonirakenteissa huoneistojen välinen ääneneristävyys perustuu siis betonin suureen massaansa ja liitosten jäykkyyteen, kun taas puurakenteisissa asuinkerrostaloissa ääneneristävyys joudutaan toteuttamaan kerroksellisin rakentein ja huoneistojen väliset rakenteet erotetaan toisistaan väliseinien ja välipohjien kohdalla. Tilaelementtirakenteissa asuinkerrostalossa elementtien välisten pysty- ja vaakaliitosten suunnittelulla ja toteutuksella on merkittävä vaikutus riittävän ääneneristävyyden saavuttamiseen. (Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki, 2017, 8, 49.)

Liitosten suunnittelu on ääneneristävyyden ja jäykistyksen kannalta hyvin ristiriitaista. Jäykistyksen kannalta liitokset tulisi suunnitella niin jäykästi kuin mahdollista, kun taas ääniteknisesti liitoksen tulisi olla joustava. Tämä asettaa suuria haasteita rakennuksen jäykistyksen suunnitteluun, etenkin korkeissa asuinrakennuksissa, joissa elementiltä toiselle välitettävät vaakakuormat voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. (Kylliäinen, Latvanne, Kuusinen & Kekki, 49.)

Ääneneristävyyden takia joudutaan tilaelementtien välisissä liitoksissa käyttämään erilaisia tärinäeristimiä, mikä johtaa väliaineellisiin liitoksiin. Rakennusta jäykistävät leikkaus- ja ankkurointivoimat on siis vietävä eristeen läpi erilaisten liittimien avulla. Ristiruuviliitosta voidaan käyttää leikkausvoimalle myös väliaineellisenä liitoksena, mutta vetoruuviliitos ei kykene välittämään leikkausvoimia raollisena. Ankkurointivoimat voidaan välittää aksiaalisesti kuormitetuilla ruuveilla tai pulteilla. Väliaineellinen puikkoliitos ei kuulu eurokoodi 5:n mukaisiin liitosmitoitushjeisiin. EN 1995-1-1 kohdan 8.1.1 mukaan määritetään kestävyys ominaisarvo ja liitoksen jäykkyys kokeellisesti standardin EN 1075, EN 1380, EN 26891 tai EN 28970 mukaan. Raollisen puikkoliitoksen leikkauskestävyydelle on mahdollista johtaa mitoituskaavat puikkoliitosteorian avulla mutta sen toimivuus on kuitenkin varmennettava kokeellisesti. Liitoksen todellinen jäykkyys, vaihtuvien kuormitussuuntien vaikutus ja köysivoimaefektin riippuvuus väliaineen jäykkyydestä ja kitkasta on myös selvitettävä kokeellisesti. (Kevarinmäki 2019a, 16-

17.) Lisäksi tärinäeristimen vaakakuormituksesta aiheutuvat pystysuuntaiset koonpuristumat ja vaakasuuntaiset leikkausmuodonmuutokset vaikuttavat merkittävästi rakennuksen sivusiirtymiin.

4.4.3 Tärinäeristimet

Tilaelementtien välisissä liitoksissa käytetään tyypillisesti sylomer- tai sylodyn-eristekaistoja runkoäänien eristämiseksi. Eristeet on valmistettu solumaisesta polyuretaanista, jolla epäorgaanisena materiaalina on todella hyvä pitkäaikaiskestävyys ja sen elinkaari voi olla jopa 100 vuotta kun mitoitus tehdään oikein. Eristeen käyttölämpötila-alue on $-30\text{ °C} - 70\text{ °C}$, joten se soveltuu hyvin erilaisiin ja vaihteleviin ilmasto-olosuhteisiin. Lisäksi eristeiden viruma on hyvin pientä, mikä mahdollistaa sen käytön puun välisissä puikkoliitoksissa. (Laitinen 2019, 5.)

Liitosten välisten tärinäeristekaistojen toimintaperiaate perustuu niiden painumaan kuormituksen vaikutuksesta. Tärinäeristimet tulee mitoittaa jokaiselle kantavalle seinälle tulevalle viivakuormalle jokaisessa kerroksessa. Mitoittamista varten tulee tietää viivakuorma rakenteiden omasta painosta ja hyötykuorman pysyvistä osasta, sekä viivakuorma rakenteiden omasta painosta ja hyötykuorman täydestä arvosta sekä lumikuormasta. Tärinäeristin valitaan näiden kuormien perusteella eristintoimittajan ilmoittamien sallittujen jännitysten perusteella. Toimittajat ilmoittavat yleensä jännityksen, jolla eristin toimii optimaalisesti sekä suurimman sallitun jännityksen, jonka eristin kestää hetkellisesti sen ominaisuuksien muuttumatta. (Kylliäinen, n.d.) Väärän lujuusominaisuuksien omaavan tärinäeristimen käyttö johtaa usein puutteelliseen ääneneristykseen.

4.5 CLT:n muodonmuutokset ja halkeilu

Liitosten suunnittelussa on huomioitava puulle ominaisena olevat muodonmuutokset ja halkeamat. Muodonmuutoksia aiheutuu CLT-levyjen kosteuspitoisuuden muutoksista, virumasta ja painumasta. Yleisimmät syyt CLT-levyjen halkeamiselle johtuvat kontrolloimattomasta levyjen kuivumisesta työmaalla. Puun nopea kuivuminen saattaa aiheuttaa suuria vetorasituksia syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, jolloin CLT-levyjen pintalamellit ovat alttiina halkeamille. (Stora

Enso 2016, 24.) Puun kosteuspitoisuudet vaihtelevat Suomessa esimerkiksi vuodenaikojen ilmasto-olosuhteiden mukaan.

CLT:n toimituskosteudeksi ilmoitetaan 10-14 % ja käytössä sen kosteuspitoisuus vaihtelee 7 ja 13 % välillä. Kosteuspitoisuuden tulee kuitenkin pysyä alle 18 % sieni- ja homevaurioiden välttämiseksi. CLT-levyn kosteusmuodonmuutos levyn tason suunnassa on noin 0,016 – 0,023 % jokaista levyn kosteuspitoisuuden prosenttiyksikön muutosta kohden. (The CLT Handbook 2019, 160.) Muodonmuutokset tulee huomioida liitosten suunnittelussa ja liitosten tulee sallia CLT:n kosteuseläminen. Kuvassa 2 on esitetty nurjahtanut lattateräs CLT-levyjen välisessä liitoksessa. CLT-levyissä on tapahtunut pystysuuntaisia muodonmuutoksia ja lattateräs on alkanut kantaa seinälle kohdistuvia kuormia, jolloin teräksen kuormankantokapasiteetti on ylittynyt.



KUVA 2. Nurjahtanut lattateräs CLT-levyjen välisessä liitoksessa (Lahtela 2018b)

Kosteuseläminen ja painuminen on huomioitava myös ankkurointiliitosten suunnittelussa. Tilaelementtien välisissä vaakaliitoksissa käytetyt värähtäjäeristimet lisäävät rakennuksen kokonaispainumaa. Esimerkiksi erilaisia kierretankoja ja kiristysmuttereita käytettäessä saattaa CLT-levyjen kutistuminen aiheuttaa liitoksen löystymisen, jolloin ankkurointiliitos ei enää toimi suunnitellusti. Liitos tulee suunnitella siten, että sen jälkikiristys on mahdollista painumien syntyessä, tai siten, että se kykenee toimimaan suunnitellusti rakennuksen painumisesta ja muodonmuutoksista huolimatta.

4.6 Jatkuvan sortuman rajoittaminen

Jatkuvalla sortumalla tarkoitetaan tilannetta, jossa erityyppisten määrittelemättömien onnettomuuskuormien vaikutuksesta johtuva paikallinen sortuma etenee laajaksi, jopa koko rakennuksen laajuiseksi sortumaksi. Ympäristöministeriön asetuksen mukaan rakennesuunnittelijan on suunniteltava rakenne siten, että yksittäisen rakenneosan vaurio ei aiheuta koko rakennuksen tai sen merkittävän osan sortumaa onnettomuustilanteessa. Jatkuvan sortuman rajoittamiseksi voidaan käyttää, joko sidejärjestelmään tai vaihtoehtoiseen kuormansiirtoreittiin perustuvaa järjestelmää.

Sidejärjestelmä on yleinen menetelmä betonirakenteisissa kerrostaloissa. Järjestelmässä kantavat rakenteet sidotaan toisiinsa eri menetelmin vaaka- ja/tai pystysuunnassa. Onnettomuustilanteessa vaurioitunut rakenneosa kannatetaan ympäröivillä rakenteilla sidejärjestelmän siteiden avulla. Betonirakenteissa käytetään tyypillisesti harjaterästä siteenä rakenneosien saumakohdissa. Puurakenteissa sidejärjestelmän käyttö on huomattavasti vaikeampaa, jonka vuoksi usein suositetaan vaihtoehtoisen kuormansiirtoreitin käyttämistä. (Lahtela, 2018c.)

Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti on helpommin toteutettava ja usein kustannustehokkaampi menetelmä puurakenteisissa kerrostaloissa. Menetelmässä suunnitellaan valmiiksi nimensä mukaisesti toinen kuormansiirtoreitti ympäröiville rakenteille rakenneosan vaurion sattuessa. Liitokset tulee myös suunnitella siten, että ne mahdollistavat kuorman siirtymisen ympäröiville kantaville rakenteille vaurion sattuessa. Esimerkiksi CLT-rakenteissa seinät voidaan mitoittaa kantamaan yläpuolisia kuormia seinämäisen palkin tavoin seinän alapuolisen rakenteen vaurioituessa. (Lahtela, 2018c.)

Haapasalmi on vuonna 2015 omassa diplomityössään tutkinut jatkuvan sortuman rajoittamista CLT-tilaelementtikohhteissa. Tutkimuksessa havaittiin CLT-tilaelementtijärjestelmän olevan melko turvallinen ratkaisu jatkuvan sortuman kannalta. Massiivipuiset tilaelementit pystyvät jakamaan kuormia vaurioituneiden rakenneosien viereisille rakenteille tehokkaasti onnettomuustilanteissa. Ongelmia saat-
taa kuitenkin syntyä erilaisissa poikkeustapauksissa, kuten ulokkeellisissa tilaelementeissä, jolloin rakenteiden ja liitosten mitoitus tulee kiinnittää erityistä

huomiota jatkuvan sortuman osalta. CLT-tilaelementtien liitokset on myös suunniteltava, siten että ne kestävät onnettomuuskuorman aiheuttamat tukireaktiot ja sallivat kuormien siirtymisen viereisille rakenteille. (Haapasalmi 2015, 102.)

4.7 Asennettavuus

Tilaelementtien liitokset voidaan jakaa elementtien sisäisiin ja elementtien välisiin liitoksiin. Elementtien sisäiset liitokset toteutetaan tehdasolosuhteissa, jolloin ne voidaan toteuttaa mittatarkasti ja haasteellisempienkin liitosten toteutus on mahdollista. Elementtien väliset liitokset puolestaan toteutetaan työmaalla, jolloin liitosten suunnittelussa on huomioitava suuremmat toleranssit ja mittapoikkeamat toteutuksessa. Taulukossa 2 on esitetty Suomen standardisoimisliiton SFS määrittelemät puurakenteiden liitoksia koskevat toleranssit. Väljempien toleranssien käyttö edellyttää niiden vaikutuksen huomioimista rakenteiden suunnittelussa ja liitoskestävyyksien mitoituksessa.

TAULUKKO 2. Puurakenteiden liitoksille asetetut toleranssit (SFS 5978 2014, 25)

Liitostekniikka	Toleranssi	Erittely/ohjearvo	Sallittu poikkeama tai rako
Naulaliitos puu-puu Ruuviliitos puu-puu	Liittimen sijoitus	Liitinvälit a_1, a_2 ¹⁾	$\pm \max(10\%; d)$
		Päätyetäisyys a_3	$-0/+10$ mm
		Reunaetäisyys a_4	$-d/+10$ mm
	Kannan upotus	Kanta puun pintaan	$-0/+3$ mm
Naulauslevyliitos (myös ruuvattavat)	Reiän sijainti	Reiät metallilevyssä	± 3 mm
	Naulauslevyn sijoitus	Molemmissa suunnissa	± 5 mm
Muotolevy-kiinnikeliitos	Kiinnikkeen sijoitus	Yleensä	± 5 mm
		Kontaktipinnasta	± 2 mm ⁹⁾
	Liittimien etäisyys puun reunasta ja päädyistä		$-d$
	Rako puupintaan	Kiinnike kontaktissa	vino rako max 3 mm
Pulttiliitos	Pultin sijainti	Samanaikainen poraus ²⁾	± 5 mm ⁵⁾
	Reiän sijainti	Erikseen poraus	$\pm 1,5$ mm ³⁾
	Kiristys	Osat kontaktiin	Vino rako max 3 mm
Tappivaarnaliitos	Liittimen sijainti ⁴⁾	Samanaikainen poraus	± 3 mm
	Reiän sijainti ⁴⁾	Erikseen poraus	± 1 mm ⁶⁾
	Tappivaarnan sileän osan pituus puulamellissa t		$-\max(2 \text{ mm}; 0,05 t)$ ⁷⁾
	Rako liitosleikkeissä	Urat tai listoitettut sauvat	$\leq \min(3 \text{ mm}; 0,25 t_t)$ ⁸⁾
Vinoruuviliitos	Ruuvauskulma		$\pm 5^\circ$
Liimatankoliitos	Tangon sijainti	Asema ulostulon kohdalla	± 5 mm
Liimaruuviliitos	Reiän vinous	Porauspituudella L_a	$\pm L_a/50$
Kontaktiliitokset/ tukipituudet	Rako	Kontakti vaaditaan	Vino rako max 3 mm
	Tukipituus	Tukipinnan pituus	-10%
	Loveuspituus	Puun syiden suunnassa	$+10\%$
	Loven/viisteen syvyys	Poikittain syitä vastaan	± 5 mm

1) Puun syysuunnassa peräkkäisten naulojen on kuitenkin oltava vähintään d verran limittäin toisiinsa nähden, jos $a_1 < 14 d$.

2) Poraus kaikkien osien läpi kerralla tai pitäen esiporattua osaa sapluunana.

3) Edellyttäen, että puuosissa on 1 mm väljät reiät ja metalliosissa 1,5–2 mm väljät reiät.

4) Liitoksen leikepinnoilla kaikissa osissa.

5) Puun syiden suuntaisessa rivissä liittimet saavat poiketa toisiinsa nähden poikittaissuunnassa kuitenkin enintään 5 mm.

6) Edellyttäen, että puu-teräслиitoksien metalliosissa on 1 mm väljät reiät.

7) t on suunniteltu liittimen sileän osan pituus liitoslamellissa.

8) Rako puupinnan ja metallilevyn välillä teräslevyllisessä liitoksessa, kun t_t on teräslevyn paksuus.

9) Esimerkiksi kulmakiinnikkeen etäisyys puuosien liitossaumasta (mm. esiasennus ristikkoon).

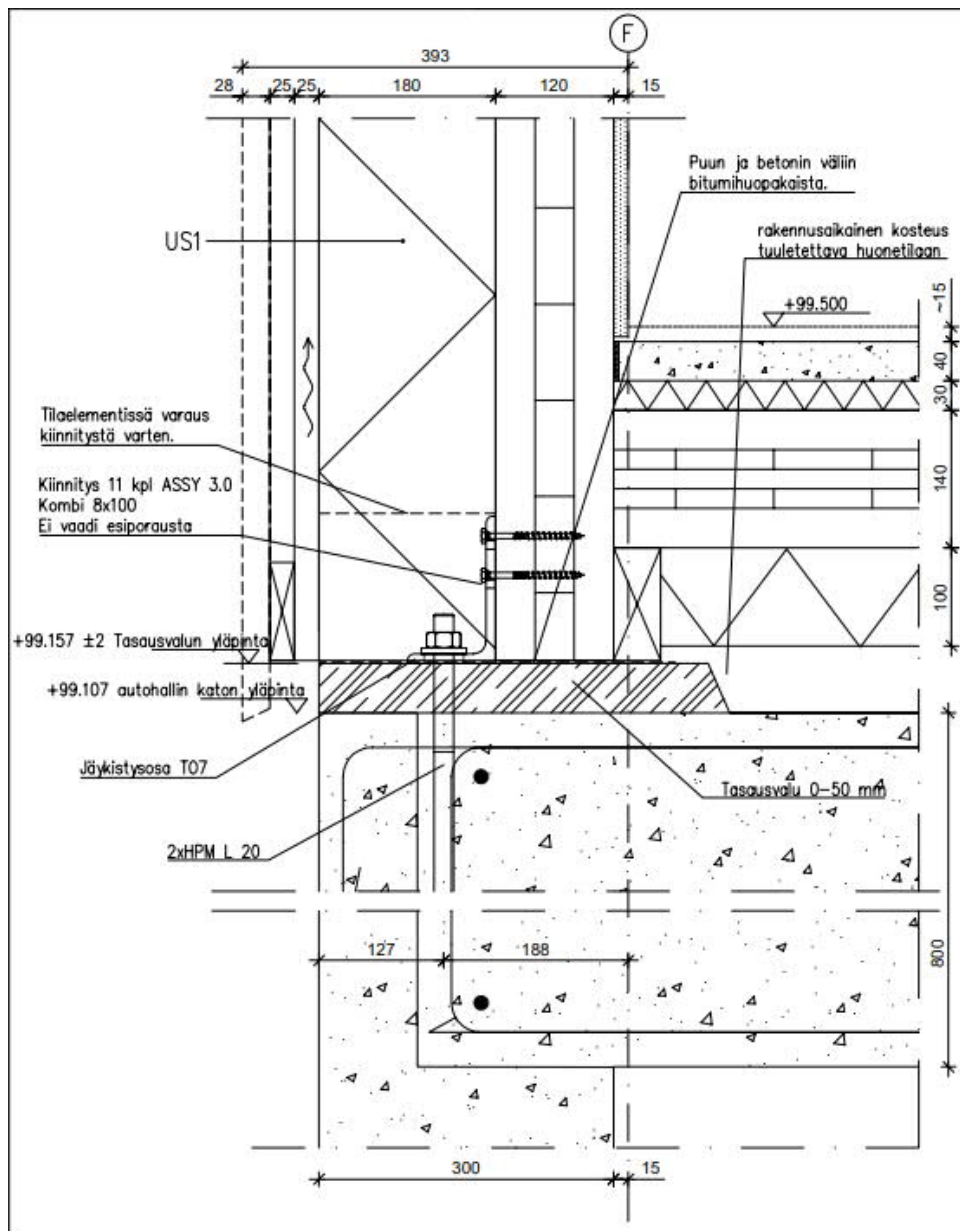
Tilaelementtien väliset liitokset tulisi suunnitella mahdollisimman yksinkertaisiksi, jotta niiden toteutus olisi nopeaa työmaalla. Tilaelementtitekniikka perustuu nopeaan työmaavaiheeseen ja kustannustehokkaaseen rakennuksen pystytykseen, jolloin liitostekniikan tulee myös olla sen mukaista. Elementtien asennusjärjestys on myös suunniteltava huolellisesti, jotta kaikki liitokset pystytään toteuttamaan ja liitososat asentamaan.

5 Tilaelementtien väliset liitokset

Tässä luvussa käsitellään CLT-rakenteisten tilaelementtien välisiä liitoksia. Liitostekniikkaa on havainnollistettu esimerkkiliitosdetaljein.

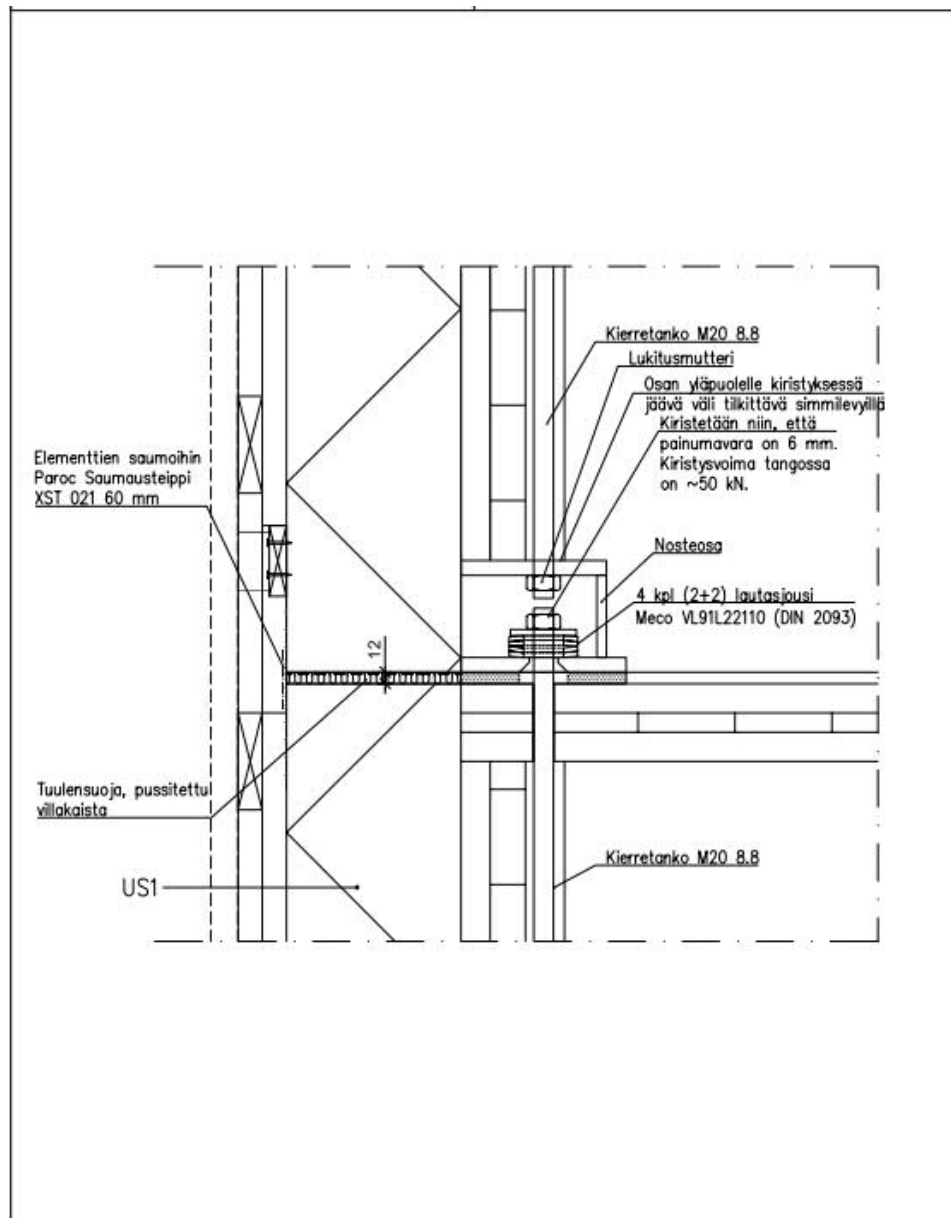
5.1 Tilaelementin ankkurointiliitos

Kuten alaluvussa 3.2.2 on esitetty, syntyy puurunkoiseen kerrostaloon helposti nostetta vaakavoimista rakennuksen keveyden takia. Nosteen aiheuttama veto-voima joudutaan sitomaan perustuksiin erilaisten ankkurointiliitosten avulla. CLT-tilaelementin ankkurointiin perustuksiin tai alapuolisiin betonirakenteisiin on monia eri vaihtoehtoja. Ankkurointiin voidaan esimerkiksi käyttää peruspultteja, erilaisia kierretankoja tai teräslevyjä. Kuvion 14 esimerkkiliitoksessa tilaelementin ankkurointi on toteutettu 20 mm:n vahvaisilla peruspulteilla ja tilaelementtiin ruuvattavalla kulmateräsosalla. Esimerkin mukaisessa liitoksessa on myös otettava huomioon CLT-levyn lohkeamismurto. Tilaelementtiin jätetään tehtaalla varaukset kiinnitystä varten, jotka peitetään asennuksen jälkeen. Peruspulttien tasausvalun ja tilaelementtien puurakenteiden väliin asennetaan bitumihuopakaista kosteuden nousun estämiseksi puurakenteisiin.



KUVIO 14. Ankkurointiliitos alapuoliseen betonirakenteeseen (KPM-Engineering Oy 2014)

Ankkurointiliitoksen toteutus tilaelementtien välillä on haastavampaa puun muodonmuutosten takia. Kuvion 15 esimerkkiliitoksessa ankkurointiliitos on toteutettu 20 mm:n vahvaisilla kierretangoilla, jotka liitetään toisiinsa teräksisen nosteosan ja lukitusmuttereiden avulla. CLT:n muodonmuutokset on huomioitu alempaan kierretankoon asennettavilla lautasjousilla, jotka pitävät liitoksen jännitettynä elementtien muodonmuutoksista huolimatta. Tilaelementtien välissä on 12 mm:n ääneneristyskumi, joka ulotetaan myös liitinosan alle.

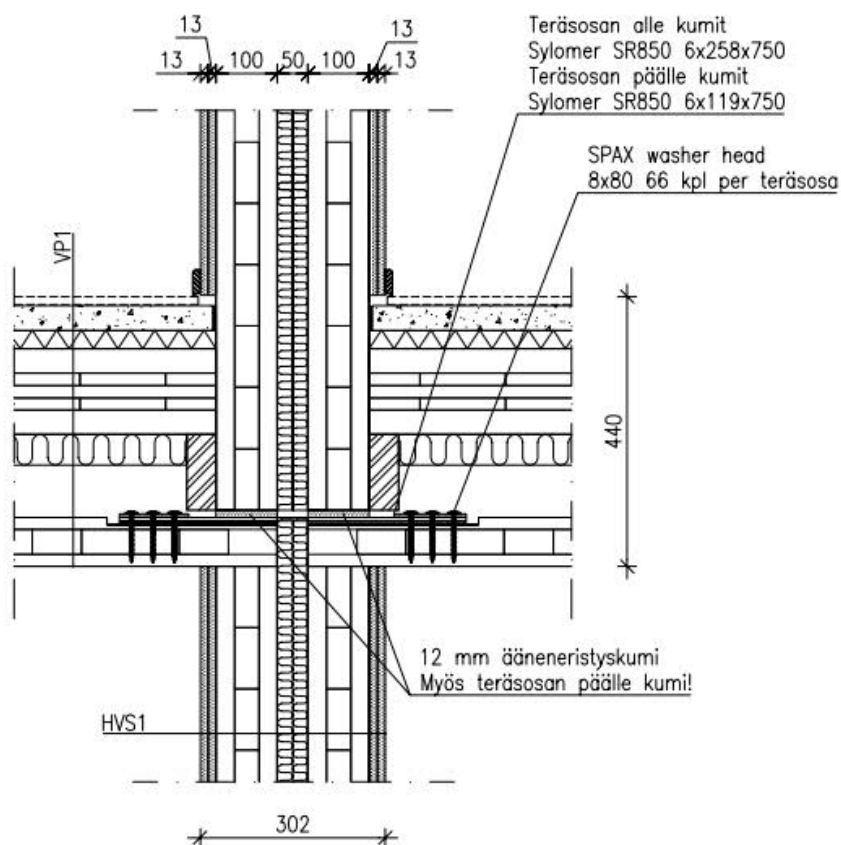


KUVIO 15. Ankkurointiliitos tilaelementtien välillä rakennuksen ulkoreunassa (KPM-Engineering Oy 2014)

5.2 Tilaelementtien liitos huoneistojen välillä

Tilaelementtien huoneistojen välinen liitos on toteutettava ääneneristävyyden takia raollisena, jolloin vaakakuormien siirto elementiltä toiselle joudutaan toteuttamaan erilaisin levykiinnikkein. Korkeissa rakennuksissa vaakakuormien kasvaessa suuriksi joudutaan usein turvautumaan suuriin ja melko järeisiin teräslevyihin, jotka johtavat ääntä erittäin tehokkaasti huoneistosta toiseen. Tämä on hyvin ongelmallista huoneistojen välisten liitosten suunnittelun kannalta. Kuvion 16 tilaelementtien huoneistojen välisessä kattotason esimerkkiiliitoksessa elementit

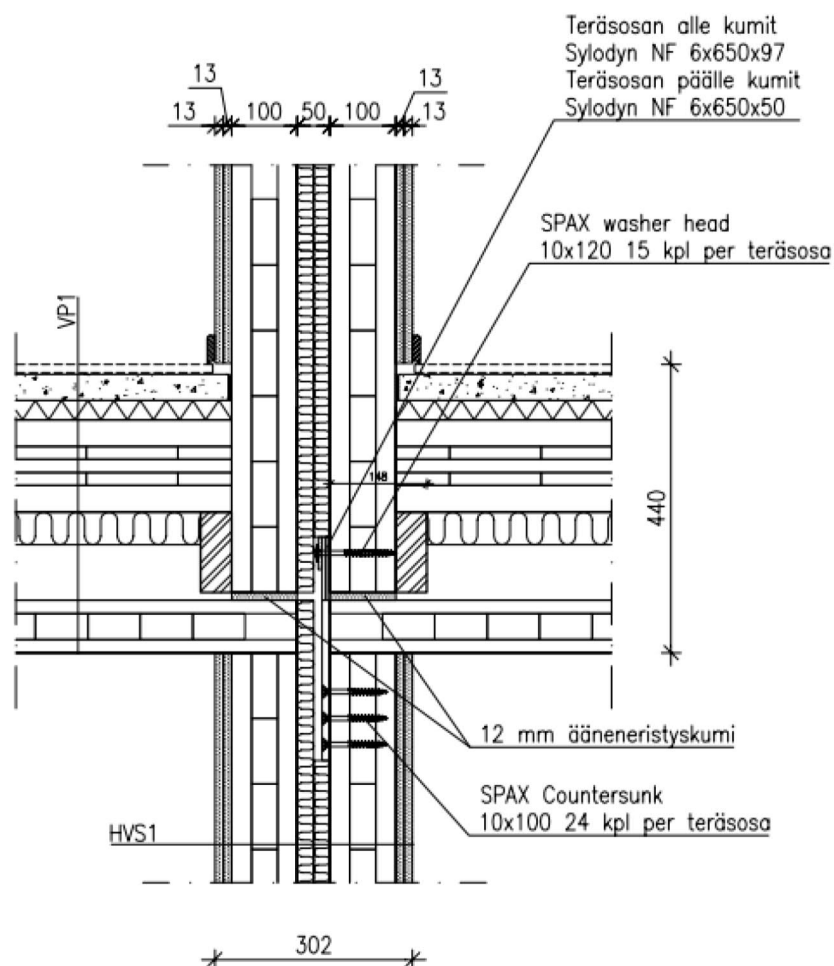
on kiinnitetty toisiinsa ruuvattavien teräslevyjen avulla. Teräslevyn alle ja päälle asennetaan 6 mm:n vahvuiset sylomer eristekumit eristämään teräsosan kautta kulkevaa runkoääntä huoneistosta toiseen. Ylä- ja alapuolisen tilaelementin väliin asennetaan myös 12 mm:n vahvuiset ääneneristyskumit, jotka ulotetaan myös teräsosan päälle. Kattotason liitoksessa tulee myös huomioida alaluvussa 3.2.1 esitetyn kuvion 5 b-kohdan mukaiset levykenttään syntyvät paarrevoimat, jotka toteutetaan usein myös teräslevyliitoksin mitoitetuna vedolle.



KUVIO 16. Tilaelementtien huoneistojen välinen kattotason jäykistysliitos (KPM-Engineering Oy 2014)

Tilaelementtien huoneistojen välinen liitos kerrosten välissä toteutetaan usein myös erilaisten lattaterästen avulla. Liitoksessa tulee huomioida, että liitos pystytään toteuttamaan vain toiseen elementin seinään asennusjärjestyksen mukaan. Seinä, johon liitosta ei pystytä asentamaan pystyy kuitenkin välittämään leikkausvoimia, kun kitkan ja värinäeristimen muodonmuutokset otetaan huomioon. Kuvion 17 kerrosten välisessä tilaelementtien leikkausliitoksessa teräslevyn molem-

min puolin asennetaan 6 mm:n vahvuiset sylodyn -eristekumit eristämään runko-äänten kulkeutumista teräslevyä pitkin huoneistosta toiseen. Myös tilaelementtien väliseen saumaan asennetaan 12 mm:n vahvuiset eristekumit.

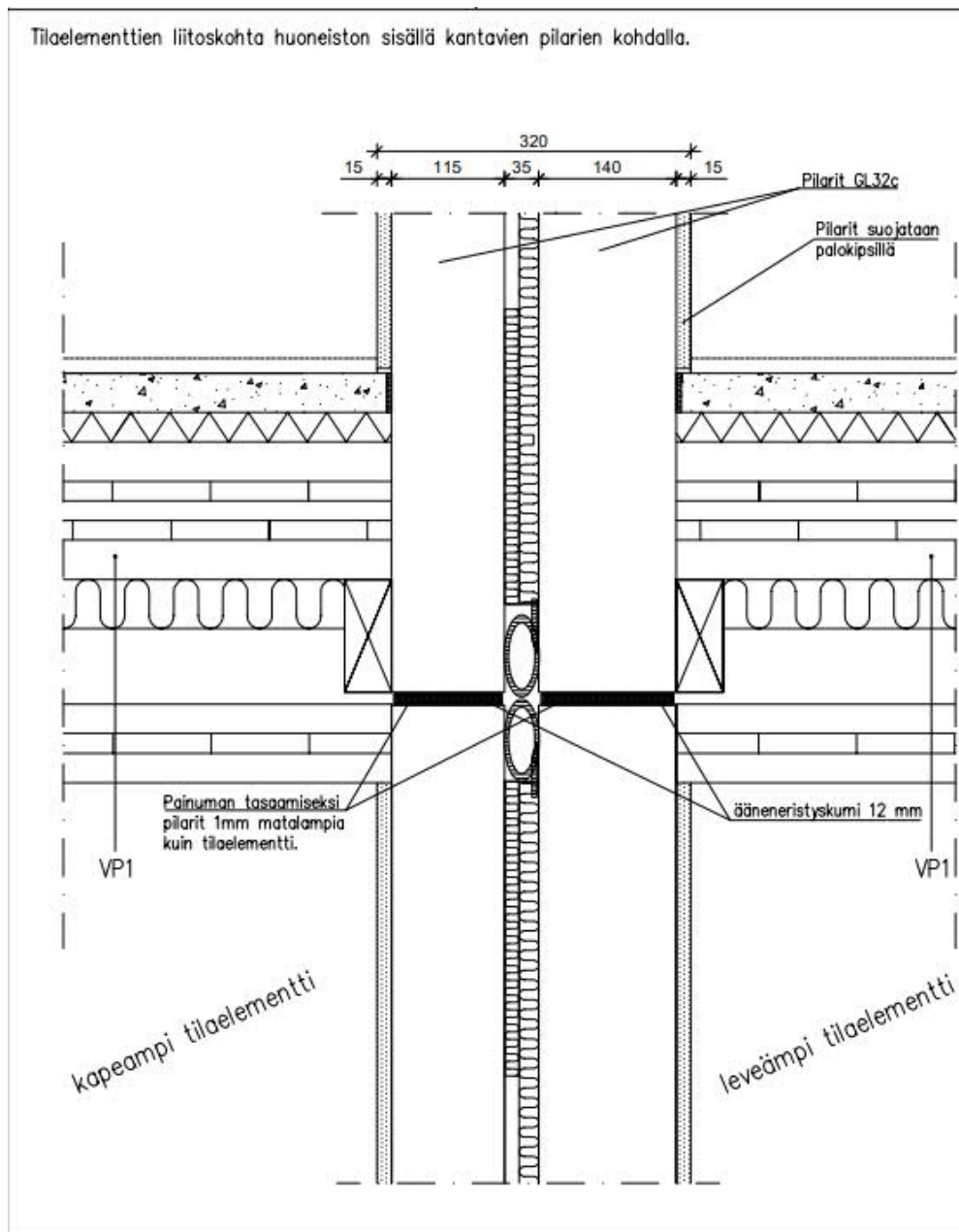


KUVIO 17. Tilaelementtien leikkausliitos kerrosten välillä (KPM-Engineering Oy 2014)

5.3 Tilaelementtien liitos huoneiston sisällä

Tilaelementtien huoneiston sisäisissä liitoksissa liitettävän puolen sivun suuremmat aukotukset tehdään usein pilari-palkkirakentein. Tilaelementin liitettävä sivu voi myös olla kokonaan avonainen, jolloin elementin kuljetuksen ja noston jäykistys on suunniteltava huolellisesti. Kuvion 18 esimerkkiliitoksessa tilaelementtien aukko on toteutettu liimapuupilarein ja -palkein. Pilarit on suunniteltu millimetrin matalammiksi kuin tilaelementin rakenteet painumien tasaamiseksi. Kuten sisäpuoliset CLT-rakenteet myös pilari-palkkirakenteet, jotka ovat palolle alttiita tulee

palosuojata. Ääneneristävyyden vuoksi myös pilarien väliin asennetaan ääneneristyskumit.



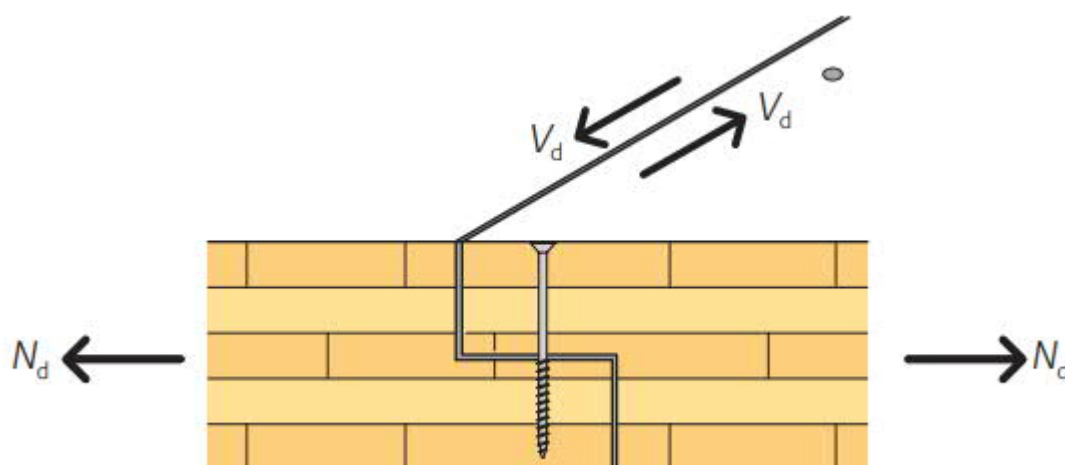
KUVIO 18. Tilaelementtien liitos huoneiston sisällä kantavien liimapuupilarien kohdalla (KPM-Engineering Oy 2014)

6 Tilaelementtien sisäiset liitokset

Tässä luvussa käsitellään CLT-rakenteisten tilaelementtien sisäisiä liitoksia. Liitostekniikkaa on havainnollistettu esimerkkiliitosdetaljein.

6.1 Sisäisten liitosten periaatteet

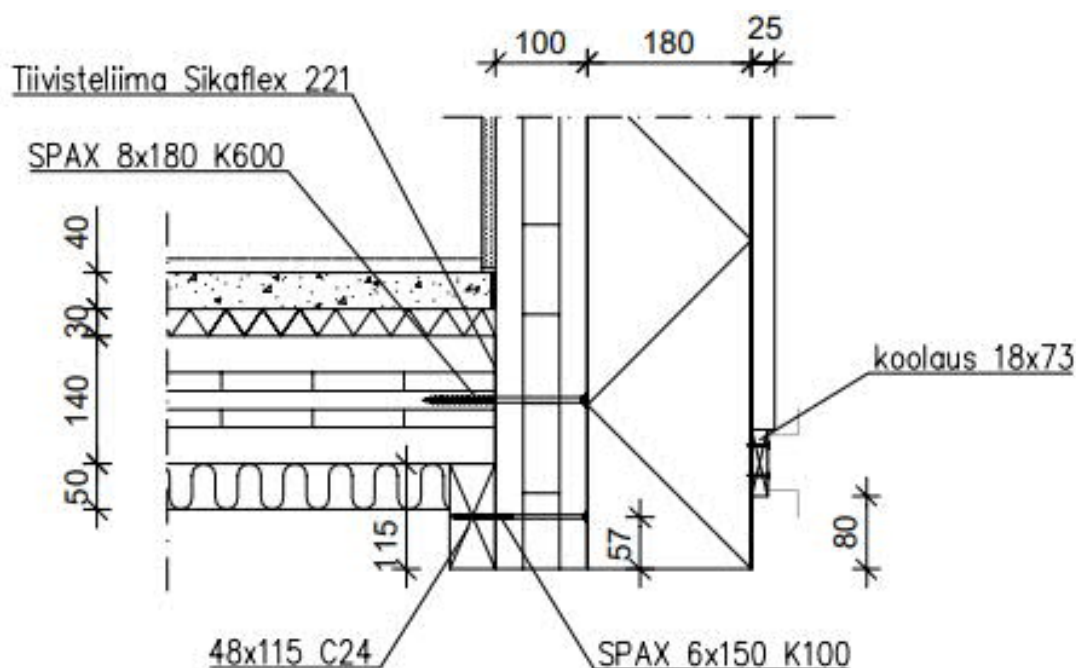
Tilaelementtien sisäiset liitokset toteutetaan tehdasolosuhteissa, jolloin liitokset pystytään toteuttamaan tarkemmin ja laadunvalvonta on hallitumpaa työmaaolosuhteisiin verrattuna. CLT-levyjen kiinnityksessä käytetään yleensä itseporautuvia ruuveja. Tilaelementin seinät pyritään tekemään yhtenäisistä CLT-levyistä, jolloin ainoastaan seinien nurkkakohtiin syntyy liitossaumat. Lattia- ja kattotasot muodostuvat useammasta rinnakkaisesta CLT-levystä, jotka kantavat elementin lyhyempään suuntaan. Lattia- ja kattolevyjen väliset saumat toteutetaan usein kuvion 19 mukaisilla puoliponttiliitoksilla, joka on yksinkertainen ja toimivaksi todettu liitostyyppi. Levyjen kiinnityksessä käytetään tavallisesti yksinkertaista suoraruuvausta tai paremman jäykkyyden ja lujuuden aikaansaamiseksi vino- tai ristiruuvausta.



KUVIO 19. CLT-levyjen välinen puoliponttiliitos (The CLT handbook 2019, 76)

6.2 Tilaelementin lattiarakenteen liitokset

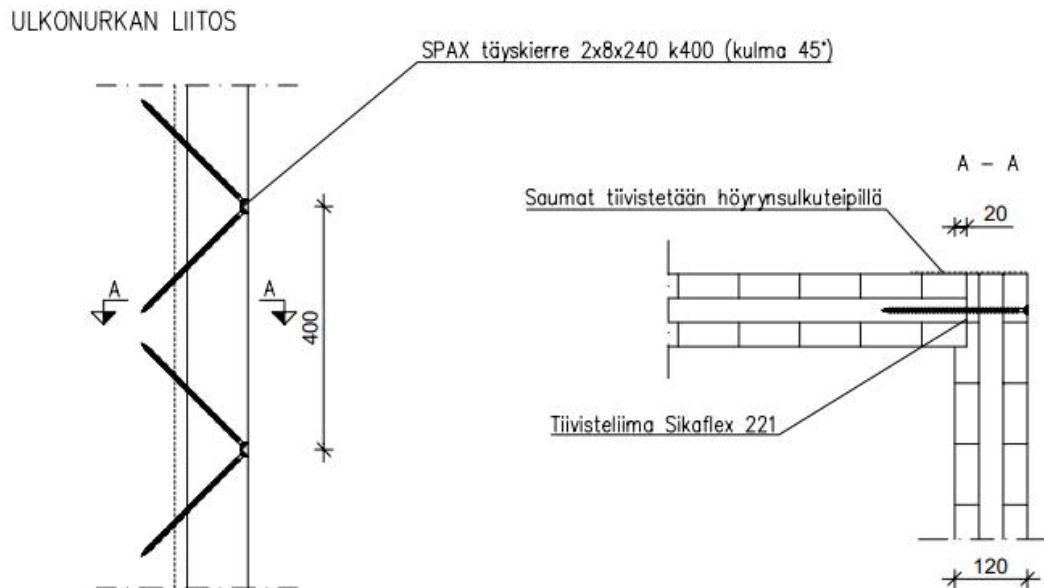
Tilaelementin lattian CLT-levyt kantavat välipohjan pintarakenteiden painon ja tilan hyötykuorman. Lattian CLT-levyt kannatetaan usein tilaelementin seinärakenteisiin kiinnitettyjen juoksujen varaan ja kiinnitetään ruuvaamalla. Kuvion 20 esimerkkiliitoksessa lattian CLT-levyt on kannateltu C24 lujuusluokan sahatavaruoksun päältä. Juoksu on kiinnitetty tilaelementin seinään itseporautuvilla ruuveilla tiheällä ruuvausvälillä. CLT-levyjen kiinnitys on toteutettu seinälevyn läpi itseporautuvien ruuvein 600 mm:n välein.



KUVIO 20. Tilaelementin lattialevyn liitos seinään (KPM-Engineering Oy 2014)

6.3 Tilaelementin Seinien liitokset

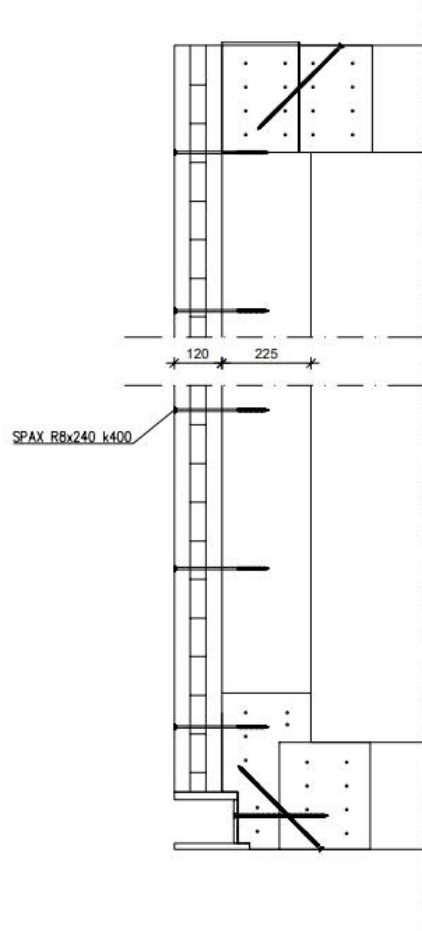
Tilaelementin seinien liitoksessa voidaan käyttää ristiruuvausta suoran ruuvauksen sijaan, paremman liitoskapasiteetin ja -jäykkyyden saavuttamiseksi. Kuvion 21 esimerkkiliitoksessa seinien nurkkaliitos on toteutettu ristiruuvauksen tapaan, jolloin toinen ruuveista toimii vedettynä ja toinen puristettuna kuormituksessa syntyvää sauman suuntaista leikkausvoimaa vastaan. Toisessa CLT-levyssä on 20 mm:n kavennus liitoskohdassa paremman tiiviiden ja siistimmän liitoksen saavuttamiseksi.



KUVIO 21. Tilaelementin seinien nurkkaliitos (KPM-Engineering Oy 2014)

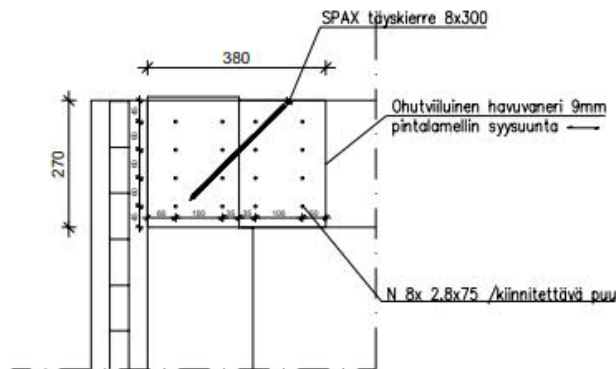
6.4 Tilaelementin aukkojen liitokset

Tilaelementin pienemmät aukotukset sahataan CLT-levyihin valmiiksi jo CLT-tehtaalla. Pienempiä aukotuksia ovat tyypillisesti ovi- ja ikkuna aukot. Suurempia aukkoja tilaelementteihin tarvitaan tavallisesti, kun useampi tilaelementti muodostaa yhden asuinhuoneiston. Tällöin aukot tai tilaelementin kokonaan auki oleva sivu toteutetaan usein pilari- palkkirakentein. Kuvioiden 22 ja 23 mukaisessa esimerkkiliitoksessa liimapuupilarit on kiinnitetty tilaelementin seinään ruuvaamalla ja aukon ylä- ja alapuolisten liimapuupalkkien liitoksessa on käytetty vinoruuviliitosta. Liitosta on vahvistettu havuvanerien avulla.

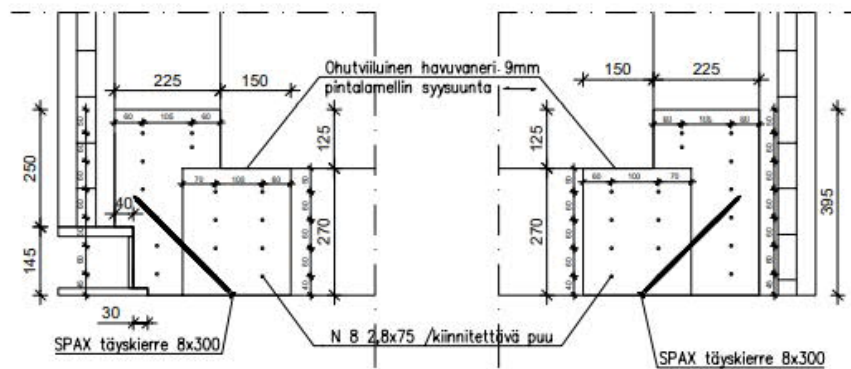


KUVIO 22. Tilaelementin aukon pilarien liitos seinään (KPM-Engineering Oy 2014)

YLÄPALKIN LIITOS
(vaneri moduulivälisiin)



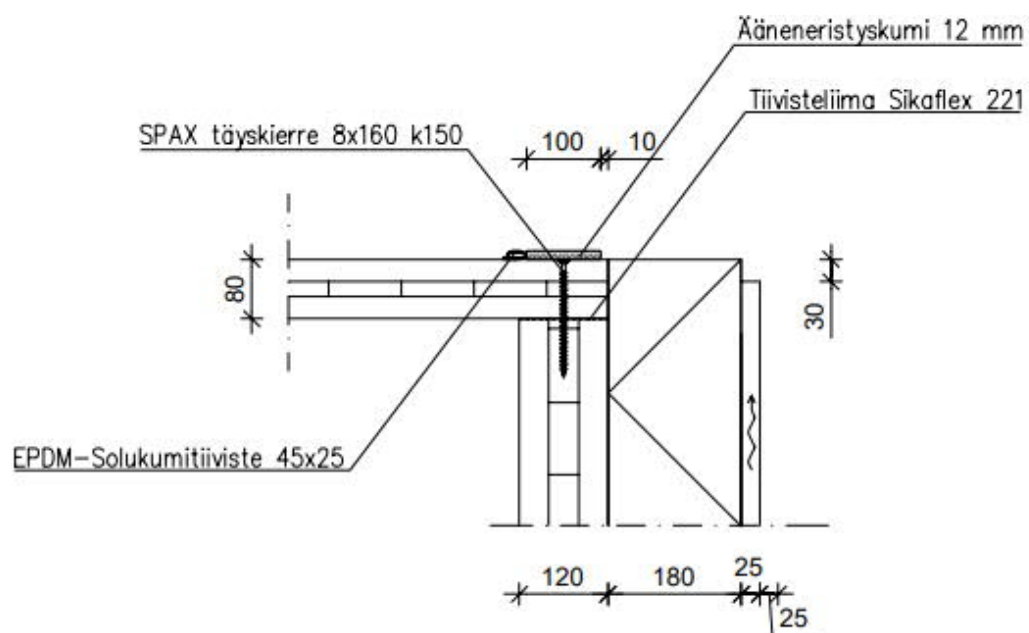
ALAPALKIN LIITOS
(vaneri moduulivälisiin)



KUVIO 23. Tilaelementin aukon palkkien liitos pilareihin (KPM-Engineering Oy 2014)

6.5 Tilaelementin kattolevyn liitokset

Tilaelementtien katon toimiessa rakennuksen vaakavoimia siirtävänä levykenttänä, mitoitetaan levyjen väliset saumat leikkaus- ja vetorasituksille. Katon CLT-levyt kantavat tilaelementin lyhyemmän sivun suuntaan ja kannatetaan tilaelementin seinien päältä. Kattolevyt kiinnitetään tilaelementin seiniin tavallisesti ruuvamalla rakennesuunnittelijan määrittelemän ruuvijaon mukaan. Kuvion 24 esimerkkiliitoksessa on esitetty tyypillinen tilaelementin kattolaatan liitos tilaelementin seinään.



KUVIO 24. Tilaelementin kattolevyn liitos seinään (KPM-Engineering Oy 2014)

7 CLT-tilaelementin sisäisten ruuviliitosten mitoitus

7.1 CLT:n ruuviliitoksille asetettuja reunaehtoja

CLT-levyjen ja niiden liitosten mitoitukseen tulee käyttää Eurokoodien lisäksi valmistajakohtaisia koestettuja lisäohjeita. Tässä työssä on tarkasteltu ainoastaan CrossLam Kuhmo Oy:n valmistamaa CLT-levyä ja noudatettu kyseisen valmistajan tuotesertifikaatissa VTT-C-11272-14 julkaistuja ohjeita. CLT liitoksissa käytetään yleensä itseporautuvia ruuveja, joiden valmistajakohtaiset ETA-ohjeet tulee myös huomioida liitoksia suunniteltaessa.

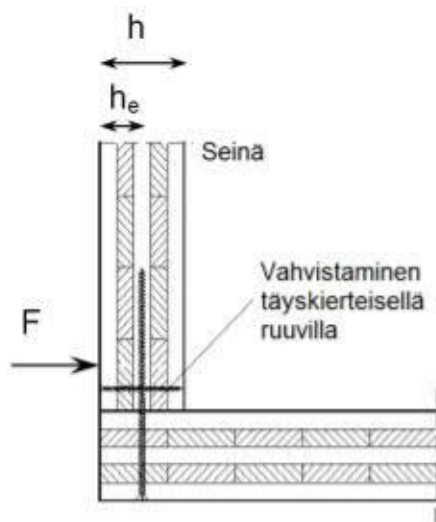
7.1.1 Leikkauskuormitetut ruuvit

Syrjäpinnan päätylautojen kohdalla leikkausvoimaa välittävinä ruuveina voidaan käyttää ainoastaan esiporaamattomia itseporautuvia ruuveja, joiden halkaisija $d = 8 \dots 10$ mm ja tunkeuma CLT:ssä on vähintään $12d$. Taulukossa 5 on esitetty vaadittavat CLT:n ja lamellien vähimmäispaksuudet, sekä vaadittava ruuvien tunkeumasyyvyys. (RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet, 8.)

TAULUKKO 3. CrossLam Kuhmo CLT minimipaksuudet ja ruuvien vähimmäistunkeumat syrjäliitoksille (RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet, 8)

Liitin	Lamellin minimipaksuus h_i (mm)	CLT:n minimipaksuus h (mm)	Liitimen vähimmäistunkeuma t_{pen} (mm)
Itseporautuvat ruuvit	$d > 8$ mm: $3d$ $d = 8$ mm: 20	$10d$	$10d$

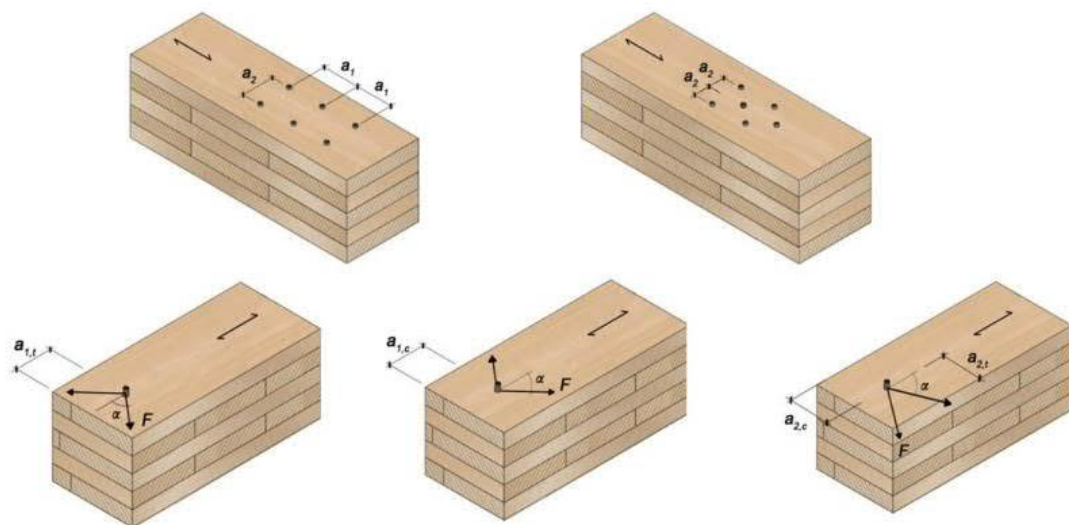
Kun CLT levyyn kohdistuu levyn tasoon nähden kohtisuoria liitosrasituksia, on poikittaisen vedon aiheuttama halkeamisherkkyyys otettava huomioon. Syrjäliitokset on vahvistettava täyskierteisillä ruuveilla kuvion 25 mukaisesti, kun liitimen etäisyys $h_e < 0,7h$, jossa h on CLT-levyn paksuus ja h_e on kauimmaisen ruuvien etäisyys kuormitetulta reunalta. (RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet, 8.)



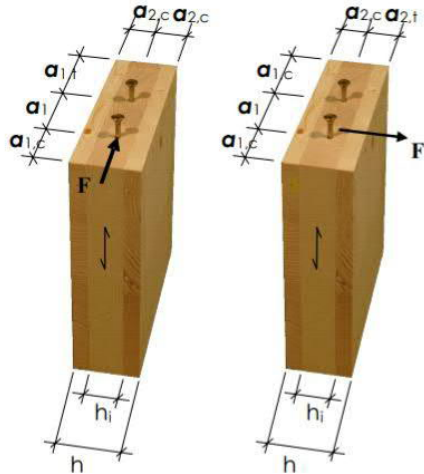
KUVIO 25. Syrjäliitoksen vahvistaminen täyskierteisellä ruuvilla (RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet, 8)

Syrjäliitoksen vahvistamiseksi ei ole annettu tarkempia ohjeita kyseisessä lisäohjeessa. Kevarinmäen mukaan yksi vahvisteruuvi minimireunaetäisyydellä CLT-levyn reunasta jokaisen leikkauskuormitetun ruuvin kohdalle pitäisi olla riittävä vahvistus poikittaista vetorasitusta vastaan. (Kevarinmäki 2019b.)

Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty leikkauskuormitettujen puikkoliittimien liitinvälien, sekä reuna- ja päätyetäisyyksien vähimmäisarvot. α on taulukoissa kuorman ja pintalamellin syysuunnan välinen kulma. Etäisyyksien merkintöjä on havainnollistettu kuvioissa 26 ja 27.



KUVIO 26. Etäisyyksien ja liitinvälien määritelmät CLT:n lapepinnan leikkausliitoksille (RIL 205-1-1-2017 CLT lisäohjeet, 6)



KUVIO 27. Etäisyyksien ja liitinvälien määritelmät syrjäpinnan leikkausliitoksille (RIL 205-1-1-2017 CLT lisäohjeet, 6)

TAULUKKO 4. Liitinvälien sekä reuna- ja päätyetäisyyksien minimiarvot CLT:n leikkauskuormitetuille lapeliitoksille (RIL 205-1-1-2017 CLT lisäohjeet, 7)

Liitin	a_1	$a_{1,t}$	$a_{1,c}$	a_2	$a_{2,t}$	$a_{2,c}$
Naulat	$(3+3\cos\alpha)d$	$(7+3\cos\alpha)d$	$6d$	$3d$	$(3+4\sin\alpha)d$	$3d$
Ruuvit	$4d$	$6d$	$6d$	$2,5d$	$6d$	$2,5d$
Tappivaarnat	$(3+2\cos\alpha)d$	$5d$	$\max\left\{\begin{matrix} 4d \cdot \sin\alpha \\ 3d \end{matrix}\right.$	$3d$	$3d$	$3d$
Pultit	$\max\left\{\begin{matrix} (3+2\cos\alpha)d \\ 4d \end{matrix}\right.$	$4d$	$4d$	$3d$	$3d$	$3d$

TAULUKKO 5. Liitinvälien sekä reuna- ja päätyetäisyyksien minimiarvot CLT:n leikkauskuormitetuille syrjäliitoksille (RIL 205-1-1-2017 CLT lisäohjeet, 7)

Liitin	a_1	$a_{1,t}$	$a_{1,c}$	a_2	$a_{2,t}$	$a_{2,c}$
Itseporautuvat ruuvit	$10d$	$12d$	$7d$	$3d$	$6d$	$3d$

7.1.2 Pituussuunnassa kuormitetut ruuvit

Pituussuunnassa kuormitettujen ruuvien tulee olla itseporautuvia ja ruuvien halkaisijan d on lapeliitoksissa oltava vähintään 6 mm ja syrjäliitoksissa vähintään 8 mm. Ruuvien kierteisen osan vähimmäistartuntapituus lamellikerroksessa on $4d$. Ruuvien pituussuunnan ja puun syysuunnan välisen kulman on oltava vähintään

$\alpha \geq 30^\circ$. Syrjäliitoksissa ruuvit on sijoitettava siten, etteivät ne osu lamellikerrosten saumaan vaan ne tulee aina sijoittaa kokonaan yhteen lamellikerrokseen. Ruuvien kannan läpivetolujuutena voidaan käyttää lujuusluokan C24 sahatavaran mukaista arvoa. (RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet, 8.)

7.2 Liitoksen mitoituskestävyys

Eurokoodin mukaan lujuusominaisuuden mitoitusarvo X_d lasketaan kaavalla 1.

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (1)$$

missä X_k on lujuusominaisuuden ominaisarvo

k_{mod} on taulukon 6 mukainen kerroin, jossa huomioidaan kuorman keston ja kosteuden vaikutus

γ_M on taulukon 7 mukainen liitoksen materiaaliosavarmuusluku

TAULUKKO 6. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroimen k_{mod} arvot (RIL 205-1-2017, 49)

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkelinen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri, CLT	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lastulevy P4 ¹⁾ ja P5, OSB/2 ¹⁾ , Kova kuitulevy	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Lastulevy P6 ¹⁾ ja P7, OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA ¹⁾ , MBH.HLS, MDF.LA ¹⁾ ja MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,45	0,80

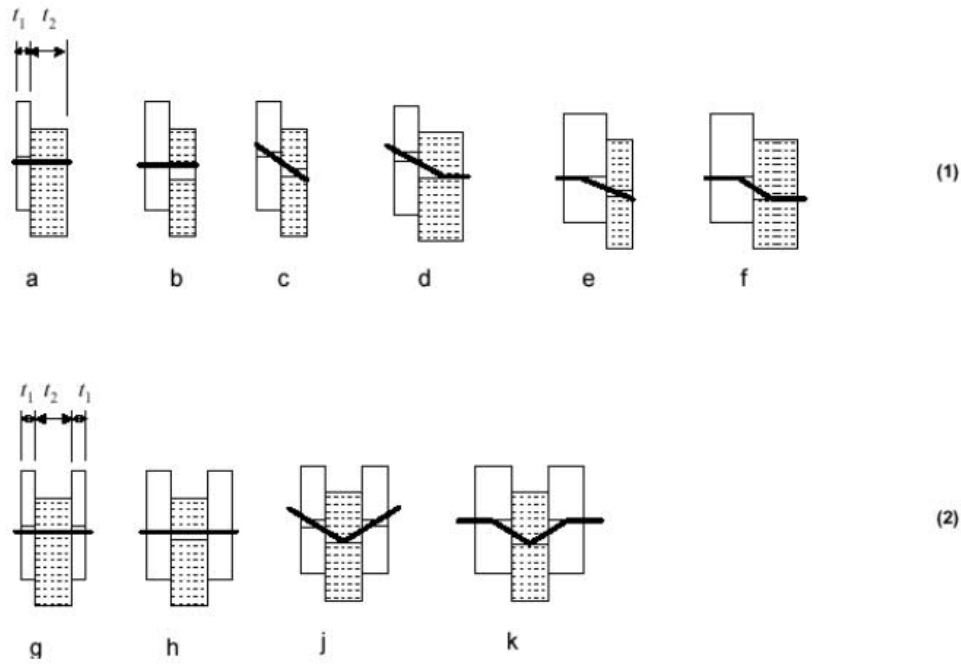
¹⁾ Saadaan käyttää vain käyttöluokassa 1.

TAULUKKO 7. Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluvut γ_M (RIL 205-1-2017, 47)

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara	1,3
Liimapuu, CLT	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy, kuitulevyt	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyliitokset: - tartuntalujuus	1,25
- levyn lujuus (teräs)	1,1
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

7.3 Ruuviliitoksen leikkauskestävyys EC5 mukaisen puikkoliitosteorian mukaan

Eurokoodi 5:n mukaiset puikkoliittimillä tehtyjen liitosten mitoituskaavat perustuvat tanskalaisen K. W. Johansenin 1940-luvulla esittämään menetelmään. Johansenin esittämän teorian mukaan liitoksen lujuus riippuu liittimen plastisoitumisesta ja/tai puun reunapuristuslujuudesta. (Johansen 1949, 249.) Liitoksen kestävyden määrittämisessä on tarkistettava kaikki kuvion 28 murtumistavat. Eurokoodissa esitettyjen tarkkojen puikkoliitosteorian mukaisten kaavojen käyttö mahdollistaa liitosten laskennallisen tuotekehityksen. Kuten alaluvussa 4.4.2 todettiin, voidaan puikkoliitosteorian avulla johtaa laskentakaavat esimerkiksi raollisen puikkoliittimen leikkauskestävyydelle. Liittimien toiminta raollisessa liitoksessa on kuitenkin aina varmistettava kokeellisesti. Puikkoliittimien kestävyden ominaisarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti määritetään yksileikkeisille liittimille kaavalla 2 ja kaksileikkeisille liittimille kaavalla 3. Kaavalla 4 määritetään puuosien reunapuristuslujuuksien suhde.



KUVIO 28. Yksi- ja kaksileikkeisten puuosien, sekä puulevyjen välisten liitosten murtumistavat (SFS-EN 1995-1-1, 56)

$$F_{V,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k}t_1d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,RK}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k}t_1d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,RK}}{f_{h,1,k}dt_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,RK}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k}t_2d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,RK}}{f_{h,1,k}dt_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,RK}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,RK}f_{h,1,k}d} + \frac{F_{ax,RK}}{4} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$F_{V,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k}t_1d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,RK}}{f_{h,1,k}dt_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,RK}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,RK}f_{h,1,k}d} + \frac{F_{ax,RK}}{4} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (4)$$

missä $F_{V,Rk}$ on kestävyiden ominaisarvo leikkaustasoa ja liittintä kohti [N]
 t_i on puuosan tai levyn paksuus tai tunkeuma [mm]
 $f_{h,i,k}$ on puusauvan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo [N/mm²]
 d on liittimen paksuus tai halkaisija [mm]
 $M_{y,RK}$ on liittimen myötömomentin ominaisarvo [Nmm]
 β on sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde
 $F_{ax,RK}$ on liittimen ulosvetokestävyiden ominaisarvo [N]

CrossLam Kuhmo tuotesertifikaatin VTT C-11272-14 mukaan CLT-levyillä voidaan käyttää lamellien lujuusluokan mukaista sahatavaran reunapuristuslujuutta lapeliitoksissa. Kuormitussuunta α otetaan pintakerroksen syysuunnan mukaan.

Puuosan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo sahatavaralle ilman esiporausta voidaan laskea kaavan 5 mukaan kun ruuvien tehollinen halkaisija $d_{ef} \leq 6\text{mm}$. Reikien ollessa esiporattuja lasketaan reunapuristuslujuuden ominaisarvo kaavalla 6. Itseporautuvilla ruuveilla d_{ef} arvona käytetään luvulla 1,1 kerrottua kierteen sisähalkaisijaa.

$$f_{h,k} = 0,082\rho_k d_{ef}^{-0.3} \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

missä ρ_k on puun tiheyden ominaisarvo [kg/m³]

Kun ruuvien tehollinen halkaisija $d_{ef} > 6\text{mm}$ lasketaan puuosan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo sahatavaralle kaavan 7 mukaan.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}\sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \quad (7)$$

$$f_{h.0,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k \quad (8)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d_{ef} \quad (9)$$

missä $f_{h.0,k}$ on reunapuristuslujuuden ominaisarvo liitoksen kuormittuessa syysuuntaisesta voimasta [N/mm²]
 α on kuorman ja syysuunnan välinen kulma

CLT:n syrjäliitoksissa itseporautuvan ruuvin reunapuristuslujuus lasketaan kaavalla 10 (RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet, 8).

$$f_{h,k} = 20d^{-0,5} [N/mm^2] \quad (10)$$

missä d on ruuvin nimellishalkaisija

Kaavojen 2 ja 3 ensimmäinen osa on puikkoliitosteorian mukainen kestävyys. Eurokoodi 5:n mukaan liittimen myötäämisestä johtuva köysivaikutus voidaan myös huomioida leikkauskestävyyden ominaisarvoa määrittäessä. Kaavoissa esiintyvä viimeinen termi $F_{ax,Rk} / 4$ on köysivaikutuksesta tuleva osuus. Yksinkertaistettuna termi kuvastaa liittimen ulosvetokestävyyden ominaisarvoa kerrottuna puuosien välisellä kitkakertoimella, joka on noin 0,25. Ruuveilla toteutetussa liitoksessa köysivoimavaikutuksen lisäkestävyys saadaan huomioida enintään 100% puikkoliitosteorian mukaisesta kestävydestä. Mikäli liittimen ulosvetokestävyyden arvoa ei tunneta, tulee köysivoiman vaikutus jättää huomioimatta mitoituksessa. Yksileikkeisissä liitoksissa ulosvetokestävyyden ominaisarvona käytetään heikomman puuosan ulosvetokestävyyden arvoa. Ruuveilla köysivaikutuksen mitoitusarvo on pienin seuraavista: ruuvien kierteisen osan ulosvetomurtuminen, ruuvien kannan läpivetomurtuminen tai ruuvien vetomurtuminen. (SFS EN 1995, 57, 70.)

Ulosvetokestävyyden ominaisarvo [N] voidaan ruuveilla laskea kaavan 11 mukaan kun ruuvien akseli on kulmassa α syysuuntaan nähden.

$$F_{ax,Rk} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d l_{ef} k_d}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (11)$$

$$f_{ax,k} = 0,52d^{-0,5}l_{ef}^{-0,1}\rho_k^{0,8} \quad (12)$$

$$k_d = \min \left\{ \frac{d}{8} \right. \quad (13)$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (14)$$

missä $f_{ax,k}$ on ulosvetolujuuden ominaisarvo [N/mm²], kun ruuvi on kohtisuorassa syysuuntaa vastaan
 n_{ef} on ruuvien tehollinen lukumäärä
 n on liitoksessa yhdessä toimivien ruuvien lukumäärä
 l_{ef} on ruuvin kierreosan tunkeuma [mm]
 ρ_k on tiheyden ominaisarvo [kg/m³]
 α on ruuvin akselin ja syysuunnan välinen kulma
 d on ruuvin nimellishalkaisija [mm]

CrossLam Kuhmo tuotesertifikaatin VTT C-11272-14 mukaan ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo voidaan laskea lape- ja syrjäliitoksissa kaavalla 15, kun seuraavat ehdot toteutuvat:

- Ruuvien halkaisija on lapeliitoksissa vähintään 6 mm ja syrjäliitoksissa vähintään 8 mm
- Ruuvien tartuntapituus lamellikerroksessa $l_{ef,i} \geq 4d$
- Ruuvien akselin ja syysuunnan välinen kulma $\alpha \geq 30^\circ$
- Syrjäliitoksissa ruuvit tulee asentaa siten, että ne ovat kokonaan yhdessä lamellikerroksessa (ruuvi ei saa tunkeutua lamellikerrosten saumaan)

$$R_{ax,k} = \sum_{i=1}^n f_{ax,i,k} \cdot l_{ef,i} \cdot d \quad [\text{N}] \quad (15)$$

missä d on ruuvien nimellishalkaisija
 $l_{ef,i}$ on ruuvien kierteisen osan tartuntapituus [mm] lamellikerroksessa i
 n on ruuvien kierteisellä osalla olevien lamellikerrosten lukumäärä

$f_{ax,i,k}$ on kaavan 12 tai 30 (ks. alaluku 7.5.1) mukainen ruuvin ulosvetolujuuden ominaisarvo [N/mm²] lujuusluokan C24 sahatavaran mukaan riippuen ruuvin akselin ja puun syysuunnan välisestä kulmasta lamellikerroksessa i

CrossLam Kuhmo tuotesertifikaatin VTT C-11272-14 mukaan ruuvin kannan läpivetolujuutena voidaan käyttää lujuusluokan C24 sahatavaran mukaista arvoa. Läpivetokestävyyden ominaisarvo [N] voidaan laskea kaavalla 16.

$$F_{ax.\alpha.Rk} = n_{ef} f_{head.k} d_h^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (16)$$

missä $f_{head.k}$ on ruuvin läpivetoparametrin ominaisarvo [N/mm²] määritettynä standardin EN 14592 mukaisesti siihen liittyvää tiheyttä ρ_a käyttäen
 d_h on ruuvin kannan halkaisija [mm]

Vetokestävyyden ominaisarvo [N] saadaan kaavalla 17.

$$F_{t.Rk} = n_{ef} f_{tens.k} \quad (17)$$

missä $f_{tens.k}$ on ruuvin vetokestävyyden ominaisarvo määritettynä standardin EN 14592 mukaan

Usein ruuvien ominaiskestävyydet, on saatavilla ruuvitoimittajan ilmoittamana tai itseporautuvien ruuvien tapauksessa erillisistä ETA-ohjeista. Mitoituksessa tulisi aina käyttää ruuvitoimittajan ilmoittamia ominaiskestävyyksiä ja parametreja, mikäli ne on ilmoitettu. Lisäksi etenkin itseporautuvien ruuvien tapauksessa mitoituksessa on huomioitava ruuvikohtaiset mitoitusohjeet.

7.4 Ruuviliitoksen leikkauskestävyys RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen mukaan

RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohjeessa on yksinkertaistettu eurokoodin mukaisia puikkoliittimien leikkauskestävyyden kaavoja. Esimerkiksi hoikkien liittimien leikkauskestävyydet voidaan laskea yhdellä kaavalla, perustuen liittimen riittävään tunkeumasyvyyteen puuosassa ja liittimen halkaisijan kokoon. Kestävyyttä voidaan lisäksi, joko korottaa tai pienentää riippuen puutavaran tiheydestä ja liittimen tartuntapituudesta. Paksummille liittimille kuten pulteille, tappivaarnoille ja kansiruuveille on yksinkertaistettu puikkoliitosteorian mukaista kaavaa, perustuen riittävän paksuihin liitoksessa käytettäviin puuosiin. Kun liitettävät puuosat ovat riittävän paksuja voidaan puikkoliitosteorian mukaiset murtoavat rajata kahteen. (Kevarinmäki 2019c.) RIL-205-1-2017 mukaisia yksinkertaistuksia voidaan käyttää ja soveltaa myös CLT:n välisiin liitoksiin. CLT:n valmistajakohtaiset ohjeet on kuitenkin huomioitava suunnittelussa ja CrossLam Kuhmon, sekä Stora Enson levyille on olemassa julkaistut RIL-205-1-2017 valmistajakohtaiset CLT lisäohjeet. Esimerkiksi Puuinfon järjestämässä vaativien puurakenteiden suunnittelu koulutuksessa on käytetty CLT liitosten mitoittamiseen kyseisen ohjeen yksinkertaistuksia luentomateriaaleissa ja laskentaesimerkeissä (Puuinfo 2020f).

Itseporautuvilla ruuveilla toteutetun leikkausliitoksen mitoituksessa käytetään ruuvien tehollista halkaisijaa $d_{ef} = 1,1d_i$, kun d_i on ruuvien kierteisen osan sisähalkaisija (sydänmitta). Kun $d_{ef} \leq 6 \text{ mm}$, käytetään itseporautuvien ruuvien mitoituksessa profiloituille pyöreille nauloille annettuja naulaliitoksen ohjeita. Kun taas $d_{ef} > 6 \text{ mm}$, käytetään mitoituksessa pulttiliitoksen ohjeita. (RIL 205-1-2017, 129.)

Profiloitujen pyöreiden naulojen leikkauskestävyyden mitoitusarvo leikettä kohden voidaan laskea kaavalla 18, jossa huomioidaan puutavaran tiheyden ja liittimen tunkeumapituuksien vaikutukset.

$$R_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_\rho \cdot \begin{cases} k_t \\ k_e \end{cases} \cdot R_k \quad (18)$$

missä k_{mod} on taulukon 6 mukainen liitospuun aikavaikutuskerroin
 γ_M on taulukon 7 mukainen liitoksen materiaaliosavarmuusluku
 k_p, k_t ja k_e ovat naulan leikkauskestävyyden kertoimia
 R_k on naulan ominaisleikkauskestävyys [N]

Mikäli liitoksessa käytetyn puutavaran ominaistiheys ρ_k on suurempi kuin 350 kg/m³, voidaan naulan leikkauskestävyyttä korottaa kaavan 19 mukaisella kertoimella. Mikäli liitoksen puutavaraosien ominaistiheydet eroavat toisistaan, käytetään kaavassa niistä pienempää arvoa.

$$k_p = \sqrt{\frac{\rho_k}{350}} \quad (19)$$

Jos kuvion 28 mukaiset naulan tunkeumasyvyydet $t_1 \geq 8d$ ja $t_2 \geq 12d$, saadaan naulan leikkauskestävyyttä korottaa kaavan 20 mukaisella kertoimella:

$$k_t = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,3 \cdot \frac{t_1 - 8d}{8d} \\ 1 + 0,3 \cdot \frac{t_2 - 12d}{6d} \end{array} \right. \quad (20)$$

missä, $k_t \leq \sqrt{\frac{M_y}{160d^{2,6}}}$, käytettäessä ruuveja.

M_y on ruuvien myötömomentin ominaisarvo [Nmm].

Mikäli naulan tunkeuma $t_1 < 8d$ tai $t_2 < 12d$, pienennetään naulan leikkauskestävyyttä kaavan 21 mukaisella kertoimella.

$$k_e = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1}{8d} \\ \frac{t_2}{12d} \end{array} \right. \quad (21)$$

Naulan ominaisleikkauskestävyys leikettä kohden saadaan esiporaamattomana kaavasta 22 ja esiporattuna kaavasta 23 kun naulan tunkeumasyvyydet $t_1 \geq 8d$ ja $t_2 \geq 12d$.

$$R_k = 120d^{1,7} [N] \quad (22)$$

$$R_k = 130d^{1,8} [N] \quad (23)$$

Puuosien välisen pulttiliitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo saadaan kaavalla 24.

$$R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 \cdot f_h \cdot t_u \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{3 \cdot M_y}{f_h \cdot d \cdot t_u^2}} \\ 2 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d} \end{array} \right. \quad (24)$$

$$t_u = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1 \cdot f_{h,1,k}}{f_h} \\ \frac{t_2 \cdot f_{h,2,k}}{f_h} \end{array} \right. \quad (25)$$

$$f_h = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \\ f_{h,2,k} \\ f_{h,s,k} \end{array} \right. \quad (26)$$

missä t_1 ja t_2 ovat kuvion 28 mukaiset liitoksen reunaosien puun paksuudet [mm]

$f_{h,1,k}$ ja $f_{h,2,k}$ ovat liitoksen reunaosien reunapuristuslujuuksien ominaisarvot [N/mm²]

$f_{h,s,k}$ on liitoksen keskiosan reunapuristuslujuuden ominaisarvo kaksileikkeisessä liitoksessa [N/mm²]

Puuosien reunapuristuslujuudet lasketaan alaluvussa 7.3 esitettyjen kaavojen mukaan. CLT:n syrjäliitoksessa noudatetaan alaluvun 7.3 kaavaa 10.

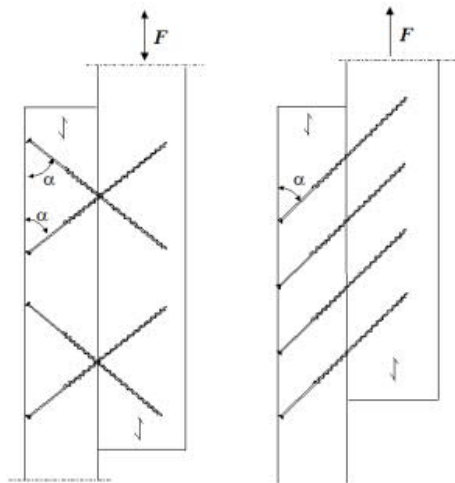
Pultin myötömomentti saadaan kaavasta 27, itseporautuvilla ruuveilla käytetään ruuvivalmistajan ilmoittamaa arvoa.

$$M_y = 0,3f_{u,k}d^{2,6} [Nmm] \quad (27)$$

missä $f_{u,k}$ on pultin vetomurtolujuuden ominaisarvo [N/mm²]

7.5 Vino- ja ristiruuviliitos

Vino- ja ristiruuviliitoksissa liitoskapasiteetti ja -jäykkyys voidaan laskea ruuvien aksiaalivoimamallilla, kun ruuvi muodostaa $\alpha = 30^\circ \dots 60^\circ$ suuntakulman kuormitussuunnan ja puun syysuunnan kanssa. Vino- ja ristiruuviliitoksilla saavutetaan yli 5-kertainen jäykkyys ja yli 50 % parempi liitoskapasiteetti suoraruuvaukseen verrattuna. (Kevarinmäki 2019a.) Vino- ja ristiruuviliitosten mitoittamiseen voidaan myös käyttää erilaisia vinoruuviliitostyyppikohtaisia tai ruuvikohtaisia suunniteluohjeita, jotka ovat varmennustodistuksella, VTT:n lausunnolla tai ETA-hyväksynnällä vahvistettuja (RIL-205-1-2017, 133). Kuviossa 29 on esitetty symmetrisistä ruuvipareista muodostuva ristiruuviliitos ja vedetyistä vinoruuveista muodostuva vinoruuviliitos.



KUVIO 29. Ristiruuviliitos ja vedetty vinoruuviliitos (Kevarinmäki 2019d)

Vinoruuviliitoksessa kaikkien ruuvien tulee olla samanlaisia, kokoisia ja asennettuna samaan suuntakulmaan α . Ruuvit asennetaan liitosvoimaan nähden keskeisesti ja ruuvataan niin syväälle, että ruuvin kanta vastaa koko pohjapinnaltaan puuhun tai tulee teräslevyllisessä liitoksessa kontaktiin teräslevyn kanssa. Liitoksessa liitettävien puuosien tulee puristua yhteen tiiviisti siten, ettei niiden väliin jää rakoa. (RIL-205-1-2017, 135.) Puuosien puristuessa toisiaan vasten syntyy puuosien välille kitkavoima, jota voidaan hyödyntää vedetyssä vinoruuviliitoksessa. Vinoruuviliitosta ei voida käyttää pelkästään puristetuista vinoruuveista

koostuvassa liitoksessa, jolloin liitettävät puuosat pyrkisivät irtaantumaan toisistaan muodostaen raollisen liitoksen.

Ristiruuviliitoksessa toinen vinoruuveista toimii vedettynä ja toinen puristettuna, jolloin ruuvien puristus- ja vetovoiman komponentit kohtisuoraa liitossaumaa vasten kumoavat toisensa. Ristiruuviliitosta voidaan tämän takia käyttää myös raollisissa liitoksissa esimerkiksi tärinäeristimien kanssa. Ristiruuviliitoksessa ruuvien tulee olla samanlaisia, kokoisia ja asennettuna samaan suuntakulmaan α . Ristiruuviliitoksia voidaan esimerkiksi käyttää CLT-tilaelementin seinälevyjen liitoksissa vaihtuvien kuormitussuuntien takia ja paremman liitoskapasiteetin ja -jäykkyyden saavuttamiseksi verrattuna suoraruuvaukseen.

7.5.1 Vinoruuvi-liitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo

Vedetyistä vinoruuveista koostuvan vetoruuviliitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo saadaan kaavasta 28.

$$R_k = n^{0,9} R_{T,k} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (28)$$

missä n on ruuvien lukumäärä liitoksessa
 μ on liitososien välinen liikekitkakerroin, yleensä puu-puuliitoksissa 0,26
 $R_{T,k}$ on ruuvin vetokestävyyden ominaisarvo [N], joka saadaan kaavalla 29

$$R_{T,k} = \min \begin{cases} f_{ax,\alpha,1,k} dl_{g,1} + f_{head,k} d_h^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \\ f_{ax,\alpha,2,k} dl_{g,2} \\ f_{tens,k} \end{cases} \quad (29)$$

missä $f_{ax,\alpha,1,k}$ on ruuvin ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kannan puoleisessa puussa kulmassa α syysuuntaan nähden [N/mm²]
 $f_{ax,\alpha,2,k}$ on ruuvin ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kärjen puoleisessa puussa kulmassa α syysuuntaan nähden [N/mm²]

d on ruuvien kierreosan ulkohalkaisija (nimellispaksuus) [mm]

$l_{g,1}$ on ruuvien kierteisen osan pituus kannan puoleisessa puussa [mm]

$l_{g,2}$ on ruuvien kierteisen osan pituus kärjen puoleisessa puussa [mm]

$f_{tens,k}$ on ruuvien vetomurtokestävyyden ominaisarvo [N]

$f_{head,k}$ on ruuvien kannan läpivetoalalujuusparametrin ominaisarvo [N/mm²]

d_h on ruuvien kannan halkaisija [mm]

ρ_k on kannan puoleisen puun ominaistiheys [kg/m³]

ρ_a on puun tiheys, jolle $f_{head,k}$ on ilmoitettu [kg/m³]

Ulosvetolajuusparametri $f_{ax,\alpha,i,k}$ suuntakulmassa α puun syysuuntaan nähden voidaan laskea kaavalla 30.

$$f_{ax,\alpha,i,k} = \frac{f_{ax,k}}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (30)$$

missä α on ruuvien kulma syysuuntaan nähden

ρ_k on puun ominaistiheys [kg/m³]

ρ_a on puun tiheys [kg/m³], jolle $f_{ax,k}$ on ilmoitettu tai jolla se on laskettu

$f_{ax,k}$ on ruuvien ulosvetolajuusparametrin ominaisarvo kohtisuorassa syysuuntaa vastaan (ks. alaluku 7.3 kaava 12)

Vino- ja ristiruuvauksessa tulee myös noudattaa alaluvussa 7.3 esitettyjä Cross-Lam Kuhmon tuotesertifikaatissa esitettyjä ruuvien ulosvetokestävyyden määrittämisen ohjeita. Ruuvien ulosvetokestävyys lasketaan CrossLam Kuhmon CLT levyillä alaluvussa 7.3 esitetyn kaavan 15 mukaan lape- ja syrjäliitoksissa, kun vaaditut ehdot toteutuvat.

7.5.2 Ristiruuviliitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo

Ristiruuviliitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvo saadaan kaavasta 31.

$$R_k = n_p^{0,9} (R_{c,k} + R_{T,k}) \cos \alpha \quad (31)$$

missä n_p on ruuviparien lukumäärä liitoksessa
 α on kuvion 29 mukainen ruuvauskulma
 $R_{c,k}$ on ruuvin puristuskestävyys, joka saadaan kaavasta 32

$$R_{c,k} = \min \begin{cases} f_{ax,\alpha,1,k} dl_{g,1} \\ f_{ax,\alpha,2,k} dl_{g,2} \\ 0,8 f_{tens,k} \end{cases} \quad (32)$$

7.6 Liitoksen jäykkyys

Kuten luvussa 3 todettiin, joudutaan rakenteet usein katkaisemaan huoneistojen välillä. Epäjatkuvuudet heikentävät rakennuksen kokonaisjäykkyyttä ja liitostekniikka korostuu entisestään. Puuosien välillä liitoksia ei voida toteuttaa täysin jäykästi kuten esimerkiksi betonirakenteissa, jolloin liitossiirtymät tulee ottaa huomioon rakenneanalyysiä ja rakennuksen kokonaisjäykistystä tarkasteltaessa. Standardissa EN-1995-1-1 liitoksen jäykkyys perustuu ainoastaan puun tiheyteen ρ_m ja liittimen halkaisijaan d . Liittimen tunkeumapituutta, tunkeumakulmaa tai kitkan vaikutuksia ei siis oteta ollenkaan huomioon. Alla olevassa taulukossa 8 on esitetty EN-1995-1-1 mukaiset kahden puuosan tai puulevyn välisessä liitoksessa käytettävien liittimien siirtymäkertoimien K_{ser} arvot [N/mm] leikkaustasoa ja liitintä kohti käyttörajatilan tarkastelussa. Murtorajatilan tarkastelussa liitoksen keskimääräiselle siirtymäkertoimelle K_u käytetään kaavan 33 mukaista arvoa.

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (33)$$

TAULUKKO 8. Puikkoliittimillä toteutetun puuliitoksen siirtymäkertoimien arvot [N/mm] (SFS-EN 1995, 50)

Liitintyyppi	K_{ser}
Tappivaarnat Välykselliset tai välyksettömät pultit ^a Ruuvit Naulat (reikä esiporattuna)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Naulat (ilman esiporausta)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$

Jos liitettävien puurakenneosien tiheydet $\rho_{m,1}$ ja $\rho_{m,2}$ eroavat toisistaan, käytetään keskimääräistä tiheyttä kaavan 34 mukaisesti.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1}\rho_{m,2}} \quad (34)$$

Puikkoliittimistä koostuvan leikkausliitoksen kokonaisjäykkyys saadaan kaavasta 35, jossa huomioidaan myös liitostyyppin vaikutus (Lunta 2013, 49).

$$K_{tot} = K_{ser} \cdot \frac{n_{leik}}{l} \cdot \frac{L}{s} \quad (35)$$

missä, n_{leik} on leikkaustasojen lukumäärä liitoksessa
 l on liitostyyppin mukainen kerroin, puoliponttiliitoksella $l = 1$, soiroliitoksella $l = 2$
 L on liitospinnan pituus [mm]
 s on liitinväli [mm]

R.Tomasi on vuonna 2010 tehdyssä tutkimuksessa esittänyt laskentakaavat vedetyssä vinoruuviliitoksessa ja ristiruuviliitoksessa käytettävien liittimien siirtymäkertoimien määrittämiseksi. Laskentakaavat perustuvat tutkimuksessa tehtyihin koekuormituksiin. Tomasin esittämien laskentakaavojen avulla saavutetaan huomattavasti parempi liitosjäykkyys verrattuna eurokoodin hyvin pelkistettyihin määritelmiin. Tomasin teorian mukaisen vinoruuviliitoksen liittimien siirtymäkerroin saadaan kaavalla 36, jossa liitoksen puuosien välinen kitkan vaikutus on huomioitu. Ristiruuviliitoksen liittimien siirtymäkerroin voidaan puolestaan määrittää kaavalla 37. (Tomasi 2010, 6.)

$$K_{ser} = K_{\perp} \cdot \cos\alpha \cdot (\cos\alpha - \mu \cdot \sin\alpha) + K_{\parallel} \cdot \sin\alpha \cdot (\sin\alpha + \mu \cdot \cos\alpha) \quad (36)$$

$$K_{ser} = K_{\perp} \cdot \cos^2\alpha + K_{\parallel} \cdot \sin^2\alpha \quad (37)$$

missä α on puikkoliittimen kulma syysuuntaan nähden
 μ on liitososien välinen liikekitkakerroin, yleensä puu-puuliitoksissa 0,25
 $K_{\perp}$ on taulukon 8 mukainen puikkoliittimen leikkaustasoa kohti laskettu siirtymäkertoimen arvo
 $K_{\parallel}$ on puikkoliittimen siirtymäkertoimen arvo aksiaalisessa kuormituksessa, joka saadaan kaavasta 38.

$$K_{\parallel} = \frac{1}{\frac{1}{K_{ser,ax,1}} + \frac{1}{K_{ser,ax,2}}} \quad (38)$$

missä $K_{ser,ax,1}$ on ruuvin kannan puoleisen kierteen tunkeumasyvyyden mukainen ulosvetojäykkyyssparametri ruuvin kannan puoleisessa puuosassa
 $K_{ser,ax,2}$ on ruuvin kärjen puoleisen kierteen tunkeumasyvyyden mukainen ulosvetojäykkyyssparametri ruuvin kärjen puoleisessa puuosassa

Ulosvetojäykkyyssparametrin $K_{ser,ax,i}$ laskemiseen ei ole olemassa standardien mukaista ja hyväksymää laskentakaavaa, joten parametri on määritettävä kokeellisesti. Itseporautuvilla ruuveilla arvo tai kaavat sen laskemiseen on usein ilmoitettu ruuvin ETA-lausunnossa.

Käytettäessä ruuvattavia latta- tai kulmateräsosia määräytyy liitoksen kokonaisjäykkyys puikkoliittimien määrän ja niiden jäykkyyden K_{ser} mukaan. Eurokoodin mukaan teräksen ja puun välisissä liitoksissa voidaan taulukon 8 siirtymäkertoimen arvot kertoa kahdella ja kaavoissa käytetään puuosan tiheydettä $\rho_m = \rho_a$ (SFS-EN 1995-1-1, 50). Liitoksen keskimääräinen kokonaisjäykkyys saadaan siten kaavalla 39 (Seismic behaviour 2012, 51). On kuitenkin huomioitava, että

liitososan kiertymä leikkausrasituksessa vaikuttaa myös liitoksen kokonaissiirtymään. Liitososan kiertymään vaikuttaa osan geometria ja puikkoliitin ryhmien sijoittelu.

$$K_{liitos} = \frac{1}{\frac{1}{K_{ser,1}} + \frac{1}{K_{ser,2}}} \quad (39)$$

missä $K_{ser,1}$ on levyliitoksen liitinryhmän jäykkyys osassa 1

$K_{ser,2}$ on levyliitoksen liitinryhmän jäykkyys osassa 2

8 FEM-laskenta

Tässä luvussa käsitellään ohjelmistotoimittaja Dlubal Softwares GmbH:n RFEM-ohjelmiston ja siihen kuuluvan lisämoduulin RF-Laminaten käyttöä CLT-tilaelementtien ja niiden välisten liitosten mallinnuksessa sekä laskemisessa. Koska CLT on ortotrooppinen materiaali ja sen väliset liitokset ovat joustavia, joudutaan CLT-runkoisten rakennusten rakenneanalyysissä ja analysoinnissa usein turvautumaan erilaisiin FEM-malleihin. Esimerkissä mallinnetaan kuusikerroksinen kahdesta rinnakkaisesta CLT-tilaelementistä koostuva torni. Mallissa tarkastellaan tilaelementtitornin kokonaisvaakasiirtymää käyttörajatilassa, sekä tilaelementtien sisäisiin liitoksiin kohdistuvia leikkausvoimia murtorajatilassa.

8.1 Elementtimenetelmä

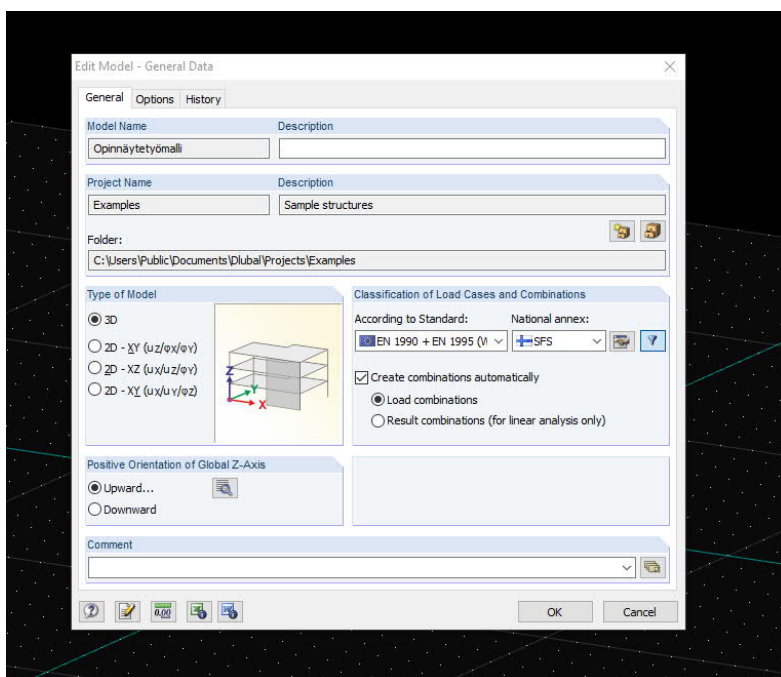
Elementtimenetelmästä käytetään usein lyhennettä FEM, joka muodostuu englanninkielisestä nimestä Finite Element Method. Menetelmässä monimutkainen rakenne tai kohde jaetaan useisiin mutta kuitenkin rajallisiin yksittäisiin komponentteihin, joita kutsutaan elementeiksi. Yksittäiset elementit yhdistyvät toisiinsa solmupisteistään muodostaen elementtiverkon. Tiheämmällä elementtiverkolla saadaan lähtökohtaisesti tarkempia tuloksia, mutta suuri elementtimäärä johtaa usein pitkiin laskenta-aikoihin, sekä suuriin ja raskaisiin laskentamalleihin.

Elementtien siirtymät, venymät ja jännitykset, sekä solmupisteissä vaikuttavat voimat voidaan laskea muotofunktioiden ja niiden derivaattojen avulla. Elementtien solmupisteiden siirtymiä ja reaktioita voidaan tarkentaa rajallisella määrällä parametrejä ja muotofunktioita käyttäen. Rakenteen kokonaisratkaisu saadaan kaikkien yksittäisten elementtien koonnilla. Elementtien jäykkyyssmatriisit summataan globaaliin jäykkyyssmatriisiin, jonka avulla tuntemattomien solmupisteiden siirtymät voidaan laskea. Päällimmäisenä tarkoituksena on löytää muotofunktio, jolla voidaan arvioida riittävän tarkasti rakenne-elementin käyttäytymistä ja joka samanaikaisesti täyttää vaaditut reunaehdot. Yhteenvetona voidaan siis todeta, että elementtimenetelmä perustuu solmupisteissä vaikuttaviin voimiin ja niiden siirtymiin. Elementin siirtymät, venymät ja rasitukset lasketaan muotofunktioiden

avulla. Solmupisteissä vaikuttavat voimat lasketaan myös muotofunktioilla tasapainoehtojen sijaan. (Rombach 2011, 5-6.)

8.2 Mallin geometrian luonti

Uuden mallin luonti aloitetaan määrittämällä mallin perustiedot ”General Data” valikossa. Valikossa määritetään mm. mallin nimi, projektikansio johon malli tallennetaan sekä luodaanko kolme- vai kaksiulotteinen malli. Valikossa määritellään myös globaalin ja rakenteiden lokaalin koordinaatiston suunta. Lisäksi valikosta valitaan projektiin sopivat standardit sekä, halutaanko ohjelman tekemän kuormitusyhdistelmät valittujen standardien mukaan automaattisesti. Kaikkia valikon asetuksia pystyy muokkaamaan myös myöhemmässä vaiheessa.

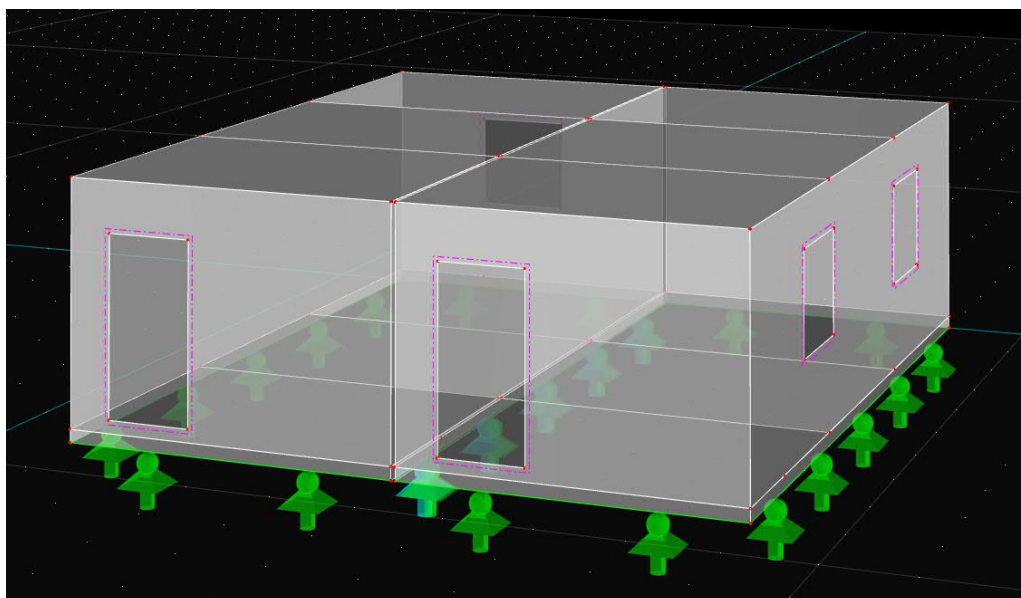


KUVA 3. Mallin lähtöarvojen ja asetusten syöttö.

Mallin geometria voidaan luoda RFEM-ohjelman sisällä erilaisten pisteiden, viivojen ja pintojen avulla tai vaihtoehtoisesti geometriatiedot voidaan tuoda toisesta mallinnusohjelmasta, kuten esimerkiksi Tekla Structuresista. Esimerkissä malli on koottu RFEM-ohjelman sisäisillä työkaluilla. Tilaelementtitori koostuu kahdesta vierekkäisestä tilaelementistä. Kukin tilaelementti muodostaa oman asuinhuoneiston, jonka takia tilaelementtien väliin on mallinnettu 50 mm rako.

Tilaelementit ovat 9 metriä pitkiä, 4 metriä leveitä ja 3 metriä korkeita. Tilaelementtien seinät koostuvat kokonaisista CLT-levyistä, joihin aukotukset on tehty leikkaamalla CLT-levyä. Lattia ja katto koostuvat kolmesta rinnakkaisesta CLT-levystä, jotka kantavat tilaelementin lyhyempään suuntaan. Lattialevyt kannatetaan tilaelementin seiniin kiinnitettyjen 150x50 sahatavarajuoksujen päältä, jolloin lattiapintaa on mallissa nostettu 150mm tilaelementin alapinnasta ylöspäin.

Rakenteiden materiaalilla ja paksuudella ei vielä tässä vaiheessa ole merkitystä sillä pinnoille annetaan materiaalitiedot myöhemmin RF-Laminate lisämoduulin avulla. Esimerkissä pinnat on tässä vaiheessa mallinnettu käyttämällä betonin materiaalitietoja. Alimpien tilaelementtien tuentaa on esimerkissä yksinkertaistettu ja tuenta on mallinnettu viivatuella nivelellisesti. Koska esimerkissä ei huomioida kitkan ja värinäeristimien muodonmuutosten vaikutuksia, tilaelementtien välisistä seinistä vain toinen toimii jäykistävänä asennusjärjestyksen ja liitostekniikan takia. Jäykistävän seinän alle on mallinnettu nivelellinen viivatuki kuten ulkoseinissäkin. Ei-jäykistävän seinän alle on mallinnettu epälineaarinen nivelellinen viivatuki, joka toimii tuentana ainoastaan puristukselle.



KUVA 4. Tilaelementtitornin ensimmäinen kerros tuettuna nivelellisesti

Monikerroksisissa rakennuksissa ensimmäisen kerroksen mallinnus ja läpilasenta on usein järkevää ennen kerrosten kopiointia ylöspäin. Näin voidaan varmistua mallin, rakenteiden välisten liitosten ja tukien toimivuudesta ja oikeellisuudesta ennen kopiointia.

8.3 Kuormien lisääminen

Ennen kuormien lisäämistä malliin on luotava halutut kuormitustapaukset. Kuormitustapaukset jaetaan niiden tyypin ja aikaluokan mukaan. Kuormat määritetään mallin yhteydessä asetettujen standardien mukaan. Ohjelma luo kuormitustapauksista standardin mukaiset kuormitusyhdistelmät osavarmuuskertoimineen automaattisesti, mikäli automaattisten kuormitusyhdistelmien luonti on valittuna ”General Data” valikossa. Mikäli kuormitustapauksia on paljon, voi automaattisesti luotujen kuormitusyhdistelmien määrä kasvaa satoihin, jolloin laskenta-aika kasvaa tarpeettoman pitkäksi. Tällöin on usein viisainta luoda tarkastelun kannalta määräävät kuormitusyhdistelmät itse tai valita automaattisesti generoiduista yhdistelmistä vain tarkastelun kannalta määräävät yhdistelmät laskentaa varten.

Esimerkissä käytetyt kuormitustapaukset ovat materiaalin omapaino, pintarakenteet, huoneiston hyötykuorma, tuulikuorma X- ja Y- suunnassa sekä lumikuorma. Ohjelma laskee itse mallinnettujen rakenteiden omat painot materiaalitietojen perusteella. Pintarakenteilla tarkoitetaan huoneistojen lattioiden pintakerroksia sekä vesikaton rakenteita. Kuormat lisättiin malliin pintakuormina taulukon 9 mukaisilla kuorman ominaisarvoilla. Lumikuorma lisätään vasta kaikkien kerrosten kopioinnin jälkeen, kun ensimmäisen kerroksen materiaalitiedot ja liitokset on saatu mallinnettua ja koelaskenta suoritettua onnistuneesti.

TAULUKKO 9. Esimerkissä käytettyjen kuormitustapausten ominaisarvot

Pintarakenteet	1,0 kN/m ²
Hyötykuorma	2,0 kN/m ²
Tuulikuorma X-suunta	1,0 kN/m ²
Tuulikuorma Y-Suunta	1,0 kN/m ²
Lumikuorma	2,5 kN/m ²

8.4 CLT-materiaaliominaisuuksien lisääminen

RF-Laminate on RFEM-ohjelmaan tehty lisämoduuli, joka on tarkoitettu erilaisten kerroksellisten materiaalien mitoittamiseen ja analyysiin. Kuten muutkin lisämoduulit, ei myöskään RF-Laminate kuulu RFEM-ohjelmiston perustoimintoihin ja on

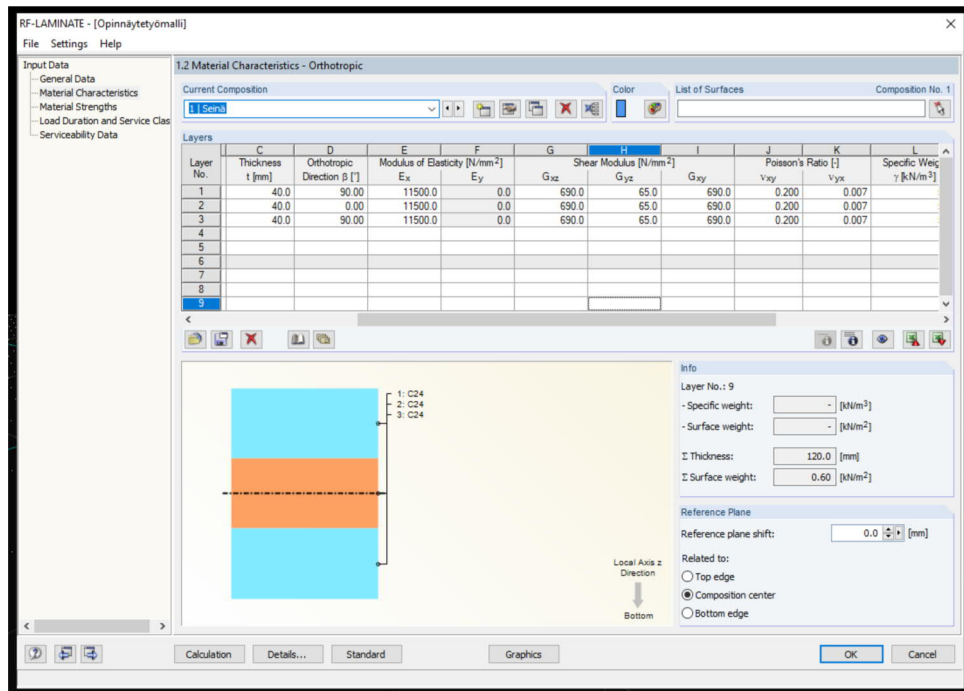
näin ollen ostettava erikseen. Lisämoduulit näkyvät projektinavigaattorissa, joka sijaitsee mallinnusikkunan vasemmassa reunassa.

RF-Laminate lisämoduulin käynnistettäessä avautuu näytölle ensimmäiseksi ”General Data” ikkuna. Kuten mallin luontivaiheessa myös lisämoduulissa on valittava minkä standardien mukaan mitoitus tehdään. Moduulissa valitaan, analysoidaanko kaikki mallinnetut pinnat vai valitaanko mallista vain tietyt pinnat, joita tarkastellaan. Ikkunan vasemmassa sarakkeessa on näkyvissä kaikki luodut kuormitusyhdistelmät, joista valitaan halutut tarkasteltavat yhdistelmät murtorajatilán tarkastelua varten. ”Serviceability Limit State” välilehden takana on samanlainen sarake käyttörajatilan tarkastelua varten. ”Material Model” kohdassa valitaan, onko mallinnettava materiaali Ortotrooppinen, Isotrooppinen vai näiden kahden yhdistelmä. Materiaaliksi voidaan myös valita ”user defined”, jolloin voidaan manuaalisesti määrittää kunkin materiaalikerroksen jäykkyysmatriisielementit. Koska esimerkissä käytetään materiaalina CLT-levyä, valitaan materiaalityypiksi ortotrooppinen materiaali.

”Material Characteristics” välilehdellä määritetään haluttu pintojen materiaali ja paksuus. Moduulissa on valmis materiaalikirjasto, josta on saatavilla laaja valikoima erilaisia materiaaleja lujuusarvoineen. Esimerkiksi CLT-levyistä on valmiiksi valittavissa Stora Enso CLT-toimittajan levyt ja tiedot. Levyjen tyyppiä määritettäessä valitaan, onko kyseessä lattialevy vai seinälevy. Valinta vaikuttaa pinnan lokaalin koordinaatiston suuntaan. Materiaalin kantosuunta β on lokaalin X-akselin suuntainen. Asetuksista voidaan määrittää, onko kantosuunta yhden-suuntainen vai kohtisuorassa akseliin nähden. Lisäksi voidaan valita, onko CLT-levyn materiaalina käytetty kuusta vai mäntyä. Lopuksi valitaan CLT-levyn paksuus ja lamellikerrosten lukumäärä. Moduulissa voidaan luoda useita eri kokoonpanoja erilaisilla materiaaleilla ja ominaisuuksilla. Kun halutun kokoonpanon materiaalitiedot on määritetty, voidaan mallista valita mallinnetut pinnat, jonka jälkeen moduuli lisää kokoonpanon materiaalitiedot valittuihin pintoihin.

Esimerkissä luotiin kolme eri kokoonpanoa: Seinälevyt, lattialevyt ja kattolevyt. Seinälevyinä käytettiin 3-kerroksista 120 mm paksua CLT-levyä, jonka lamellipaksuudet kaikissa kerroksissa olivat 40 mm. Lattialevyinä käytettiin 3-kerroksista 140 mm paksua CLT-levyä, jonka lamellipaksuudet olivat 50, 40 ja 50 mm.

Kattolevyynä käytettiin 3-kerroksista 80 mm paksua CLT-levyä, jonka lamellipaksuudet olivat 30, 20 ja 30 mm. Materiaalina käytettiin CrossLam Kuhmo Ltd valmistajan CLT-levyjä, joiden materiaalitietoja ei löydy suoraan moduulin kirjastosta. Niinpä kirjastosta valittiin kokoonpanoiksi CLT-valmistaja Stora Enso:n kuusesta valmistetut levyt, joihin muutettiin manuaalisesti Crosslam Kuhmo Ltd levyvalmistajan VTT sertifikaatin ilmoittamat materiaaliarvot.



KUVA 5. Esimerkkimallin seinissä käytetyn CLT-levyn materiaalitiedot

Ikkunan yläreunan "Edit Composition Details" painikkeesta avautuu välilehti, jonka kautta voidaan määrittää ovatko lamellit syrjäliimattuja vai eivät. Crosslam Kuhmo Ltd:n valmistamat CLT-levyt ovat syrjäliimaamattomia, joten valitaan kaikkiin kokoonpanoihin syrjäliimaamattomat lamellit. Valikossa voidaan myös määrittää erilaisia kertoimia pienentämään jäykkyyssmatriisin alkioita. Kuviossa 30 on esitetty symmetrisen kokoonpanon jäykkyyssmatriisi k_i kertomineen.

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_{33}D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_{44}D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & k_{55}D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & k_{88}D_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

KUVIO 30. Symmetrisen kokoonpanon jäykkyydsmatriisi ja k_i kertoimet (RF-LAMINATE 2016, 29)

Kun käytetään syrjäliimaamatonta CLT-levyä, levy ei pysty välittämään leikkausjännityksiä lamellien syrjäpintojen välillä. Tämän takia jäykkyyden pienennyskertoimet k_{33} ja k_{88} tulee määrittää jäykkyyden pienentämiseksi. k_{33} on vääntöjäykkyyden pienennyskerroin ja k_{88} tasojäykkyyden pienennyskerroin. Eurokoodi 5:n Itävallan liitteessä ÖNORM B 1995-1-1:2015 on annettu kaavat kyseisten pienennyskertoimien määrittämiseen. Vääntöjäykkyyden pienennyskerroin k_{33} voidaan määrittää kaavalla 40 ja tasojäykkyyden pienennyskerroin k_{88} kaavalla 41. (Proholz 2018, 107-108.)

$$k_{33} = \frac{1}{1 + 6 \cdot p_D \left(\frac{d_{max}}{a} \right)^{q_D}} \quad (40)$$

$$k_{88} = \frac{1}{1 + 6 \cdot p_S \left(\frac{d_{max}}{a} \right)^{q_S}} \quad (41)$$

missä p_D, q_D ovat taulukon 10 mukaiset vääntöjäykkyyden parametrit
 p_S, q_S ovat taulukon 11 mukaiset leikkausjäykkyyden parametrit
 d_{max} on kokoonpanon paksuimman lamellikerroksen paksuus [mm]
 a on lamellikerroksissa käytettyjen lautojen leveys [mm]

TAULUKKO 10. Vääntöjäykkyyden parametrit lamellikerrosten lukumäärän mukaan (Proholz 2018, 108)

Parameters for torsional stiffness	Number of layers		
	3	5	7 and more
p_D	0.89	0.67	0.55
q_D	1.33	1.26	1.23

TAULUKKO 11. Leikkausjäykkyyden parametrit lamellikerrosten lukumäärän mukaan (Proholz 2018, 108)

Parameters for shear stiffness	Number of layers	
	3	5, 7 and more
p_s	0.53	0.43
q_s	1.21	

"Material Strengths" ikkunassa voidaan tarkastella yksittäisten materiaalikerrosten lujuusominaisuuksia. CLT-levyn koostuessa C24 lujuusluokan sahatavaralamelleista, ovat lujuusominaisuudet myös sen mukaiset. "Load Duration and Service Class" ikkunassa voidaan tarkastella valittuja kuormitustapauksia ja yhdistelmiä, sekä valitun standardin mukaisia kuormakertoimia. Lisäksi sarakkeesta käy ilmi kuormituksen tyyppi ja sen kesto. Ikkunassa voidaan myös valita rakenteen käyttöluokka, joka esimerkissä valittiin käyttöluokaksi 1.

"Serviceability Data" ikkunassa voidaan valita pinnat, joiden muodonmuutoksia halutaan tarkastella. Ikkunan asetusten määrittäminen on tärkeää oikeiden muodonmuutosten raja-arvojen käyttämiseksi. Asetusten avulla määritetään esimerkiksi jännevälit, joihin taipumia vertaillaan ja mihin raja-arvoihin tasojen muodonmuutoksia verrataan.

"Standard" painikkeen avulla voidaan tarkastella valittujen standardien mukaisia mitoitus parametreja, sekä muokata käyttörajatilan sallittuja taipumien lukuarvoja. "Details" osiossa voidaan määrittää mitä jännityksiä laskennassa tarkastellaan, sekä missä kokoonpanon rakennekerroksissa niitä halutaan tarkastella. Valitta-

vina on kaksi eri taivutusteoriaa: Mindlin ja Kirchhoff teoriat. Melko suurissa levyissä on suositeltavaa käyttää Mindlinin teoriaa, kun taas ohuissa levyrakenteissa suositellaan käytettäväksi Kirchhoffin teoriaa (RF-LAMINATE 2016, 42).

Kun kaikki asetukset ja parametrit on määritetty RF-Laminaten puolella sekä halutut materiaalitiedot lisätty mallin pintoihin, on hyvä vielä varmistaa, että kaikki pintojen kantosuunnat ovat mallissa oikein päin. RF-Laminaten käyttöön löytyy kattavia oppaita Dlubal Softwares GmbH:n verkkosivuilta, joihin tulisi perehtyä huolellisesti ennen lisämoduulin käyttöä.

8.5 Liitosten mallinnus

Mallin geometria, materiaalitiedot ja tuennat on nyt määritelty. CLT-levyjen väliset saumat ovat kuitenkin jäykästi kiinnitettyinä toisiinsa, mikä ei vastaa todellista tilannetta. Liitosten oikean jäykkyyksasteen mallinnus puurakenteissa on erittäin tärkeää oikeiden tulosten aikaansaamiseksi. Puurakenteissa liitoksissa tapahtuu poikkeuksetta liitossiirtymiä, jotka vaikuttavat koko rakennuksen kokonaisjäykkyyteen, muodonmuutoksiin ja kuormien jakautumiseen. Kuten luvussa 7 todettiin eurokoodi antaa hyvin pelkistetyn ohjeen liitoksen jäykkyyden määrittämiseen. Esimerkissä on noudatettu eurokoodin ohjeita liitosjäykkyyksien määrittämiseen ja liitokset on mallinnettu lineaarisen jousimallin mukaisesti. Tilaelementtien välisissä pysty- ja vaakaliitoksissa värinäeristimien vaikutus on huomioitu hyvin yksinkertaistettuna jakamalla liitosjäykkyyden ja liitoskapasiteetin ominaisarvot kahdella. Todellisuudessa värinäeristimen ja liitostyyppin jäykkyys sekä lujuus tulisi koestaa. Esimerkissä ei myöskään huomioida kitkan vaikutusta liitoskohdissa, jolloin huoneistojen välisistä seinistä vain toinen toimii jäykistävänä.

Tilaelementin lattialevyt on kiinnitetty tilaelementin seiniin kiinnitettyjen sahatavara-ruoksuksen varaan, jolloin lattialevyt välittävät mallissa ainoastaan pystykuormia pidemmän sivun seinille. Kattolevyt kantavat tilaelementin lyhyempään suuntaan ja välittävät vaakavoimia tornin jäykistäville seinille sekä tilaelementiltä toiselle teräslevyliitosten avulla. Lattia- ja kattolevyjen väliset rinnakkaiset saumat on toteutettu kuvion 19 mukaisin puoliponttiliitoksien suoraruuvauksella 200 mm:n välein. Seinälevyt on kiinnitetty toisiinsa kuvion 21 mukaisesti ristiruuvauksella 400

mm:n välein. Kattolevyt on kiinnitetty seinälevyihin kuvion 24 mukaisesti suoraruuvauksella 200 mm:n välein.

Tilaelementtien välisissä liitoksissa on käytetty teräslevyjä, jotka kiinnitetään itseporautuvien ruuvein. Kerrosten välisissä liitoksissa teräslevyt on asennettu 1000 mm:n välein tilaelementin ympäri. Teräslevyt kiinnitetään alempaan tilaelementtiin 36 ruuvilla ja ylempään tilaelementtiin 24 ruuvilla. Teräslevyt toimivat esimerkiksi myös ankkurointiliitoksina välittäen leikkausvoiman lisäksi vetovoimaa. Kuten alimpien tilaelementtien liitoksissa vain toinen tilaelementtien vierekkäisistä seinistä toimii jäykistävänä asennusjärjestyksen ja liitostekniikan vuoksi.

Tilaelementtien vierekkäinen liitos on myös toteutettu teräslevyin ja itseporautuvien ruuvein. Tilaelementit on kytketty toisiinsa kattolevypinnoista teräslevyin 1000 mm:n välein, jotka kiinnitetään kumpaankin tilaelementtiin 33 ruuvilla / elementti.

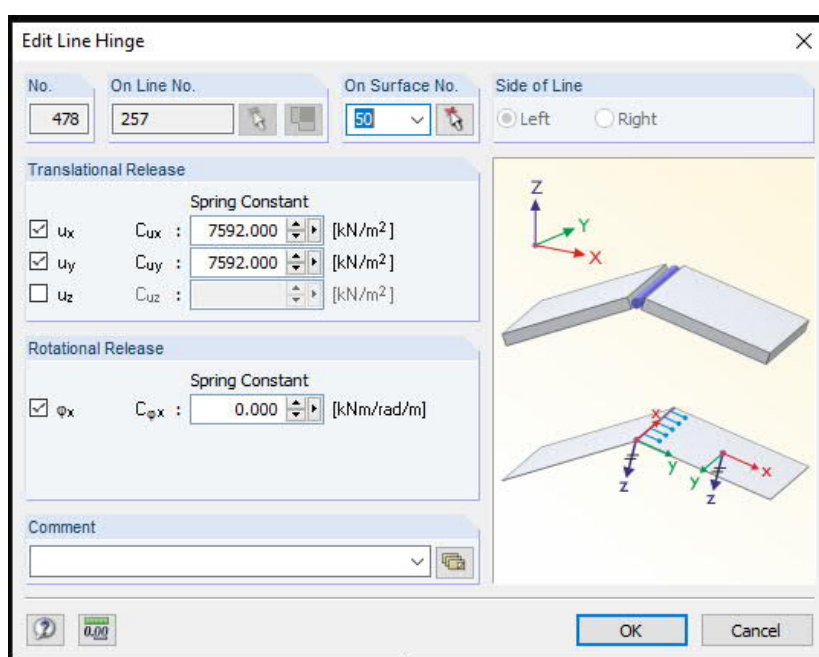
Teräslevyliitoksissa liitoksen jäykkyyteen vaikuttaa oleellisesti myös teräslevyn ja ruuviryhmien geometria. Liitososan leikkausrasituksessa aiheutuma kiertymä tulee siis myös huomioida teräslevyliitoksen liitossiirtymiä määritettäessä. Esimerkissä on käytetty liitteessä 5 esitettyjen mukaisia teräslevyjä, joiden geometria ja ruuviryhmien sijainti on mallinnettu malliin. Näin liitososan kiertymän vaikutus liitossiirtymiin tulee myös huomioitua.

Taulukossa 12 on esitetty liitoksissa käytettyjen ruuvien tyypit, koot ja siirtymäkertoimien arvot murtorajatilán tarkastelussa. Taulukossa on myös esitetty koko liitoksen liitosjäykkyys murtorajatilassa. Teräslevyliitosten liitoksen kokonaisjäykkyyteen vaikuttaa myös teräslevyn geometriatiedot, jotka vaikuttavat liitososan kiertymään leikkausrasituksessa. Tämä on otettu mallinnuksessa huomioon. Esimerkin tarkastelussa käytettiin murtorajatilán siirtymäkertoimia myös käyttörajatilassa, jolloin liitossiirtymät ovat varmalla puolella.

TAULUKKO 12. Liitosten ruuvityypit ja liitosjäykkyydet murtorajatilan tarkastelussa

Liitos	Ruuvi (Rothoblaas)	Ruuvin siirtymäkerroin [kN/m]	Liitoksen liitos- jäykkyys [kN/m ²]
Seinä-seinäliitos	VGZ 9x300 k400	1708	8541
Seinä-kattoliitos	HBS 8x200 k200	1518	7592
Levyjen puoliponttiliitokset katto ja lattia	HBS 6x80 k200 HBS 6x120 k200	1139	5694
Kerrosten välinen liitos	HBSP 10x100 36+24 kpl/liitos	1898	-
Vierekkäinen liitos	HBSP 10x80 33+33 kpl/liitos	1898	-

Tilaelementtien sisäiset liitokset mallinnetaan malliin ”Line Hinge” toiminnolla, jolla pystytään määrittämään pintojen saumakohtiin erilaisia vapautuksia valittuihin suuntiin. Näin pystytään määrittämään, toimiiko sauma nivelellisesti vai jäykänä sekä mihin suuntaan se pystyy siirtämään kuormaa. Saumaan pystytään myös määrittämään jousivakio ja sen arvo haluttuun suuntaan. Esimerkissä liitossaumoihin määritetään liitosten jäykkyyden mukaiset jousivakioiden arvot.

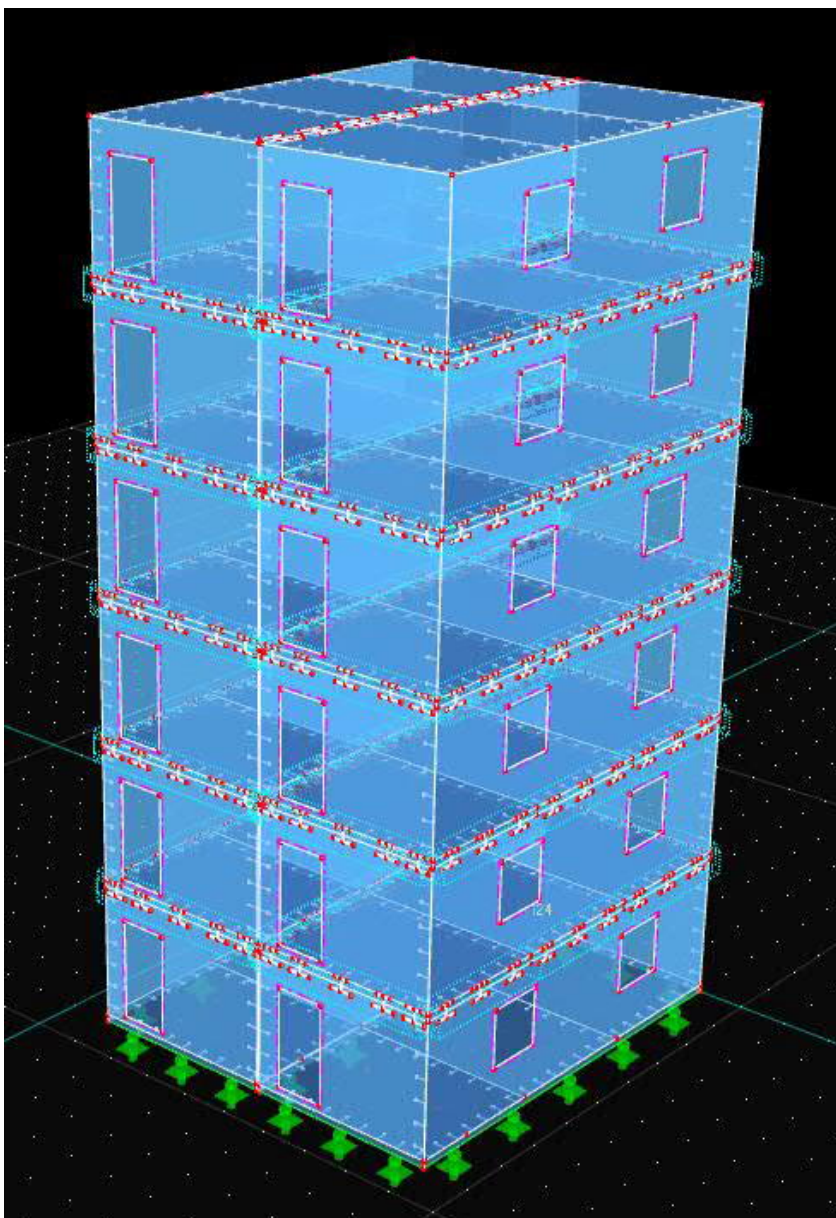


KUVA 6. Seinä-kattolevyn liitos mallinnettuna ”Line Hinge” toiminnon avulla

Tilaelementtien kerrosten välisissä liitoksissa ylemmän tilaelementin liitos alempaan tilaelementtiin on mallinnettu ”Line Release” toiminnolla, jolla pystytään mallintamaan epälineaarinen tuenta. Tuenta mallinnetaan siten, että se pystyy välittämään ainoastaan puristusta. Tilaelementtien sidontaan käytetyt teräslevyt mallinnetaan tietyin yksinkertaistuksin, joita ei kuitenkaan tässä työssä tarkemmin kuvata koska menetelmä halutaan pitää toimeksiantajayrityksen sisäisenä tietona. Yksinkertaistukset on kuitenkin testattu ja niillä on saavutettu samat liitossiirtymät kuin ns. täydellisillä teräslevyjen ja ruuvien mallinnuksella. Yksinkertaistuksissa on siis otettu huomioon teräslevyn geometria, ruuviryhmien voimaresultantin sijainti levyn taivutuksessa ja käytettyjen ruuvien siirtymäkertoimet. Näin liitososan kiertymän vaikutus tulee huomioitua liitossiirtymissä. Myös tilaelementtien huoneistojen väliset teräslevyliitokset on mallinnettu samaa menetelmää käyttäen.

Kun kaikki liitokset on mallinnettu oikeilla vapautus- ja jäykkyysasteilla, voidaan mallin ensimmäisestä kerroksesta ajaa testilaskenta. Näin nähdään, ettei mallissa ole virheitä, joiden vuoksi laskentaa ei pystytä suorittamaan. Toinen vaihtoehto on käyttää ”Plausibility Check” työkalua, jonka avulla pystytään tarkistamaan malli virheiden ja muiden laskentaa estävien tietojen varalta. Läpilaskeminen on kuitenkin suositeltava vaihtoehto, sillä esimerkiksi väärin liitosjäykkyyksien syöttö ei välttämättä ilmene työkalun tarkistuksessa. Kun läpilaskenta on tehty ja syötettyjen mallitietojen oikeellisuus todettu, voidaan ensimmäistä kerrosta kopioida ylöspäin.

Kopioituihin kerroksiin on vielä lisättävä RF-Laminate lisämoduulilla materiaalitiedot aivan kuten ensimmäisessä kerroksessa. Kuudennen kerroksen kattolevyiksi mallinnettiin samat CLT-levyt kuin moduulien lattioissa, vesikattorakenteiden ja lumikuorman kantamiseksi. Yläpuolisiin kerroksiin lisättiin myös pintakuormat kuten ensimmäisessä kerroksessa, poikkeuksena lumikuorma, joka lisättiin kuudennen kerroksen kattolevyjen pintaan. Kuvassa 7 on esitetty valmis esimerkin mukainen kuusikerroksinen tilaelementtitorni.

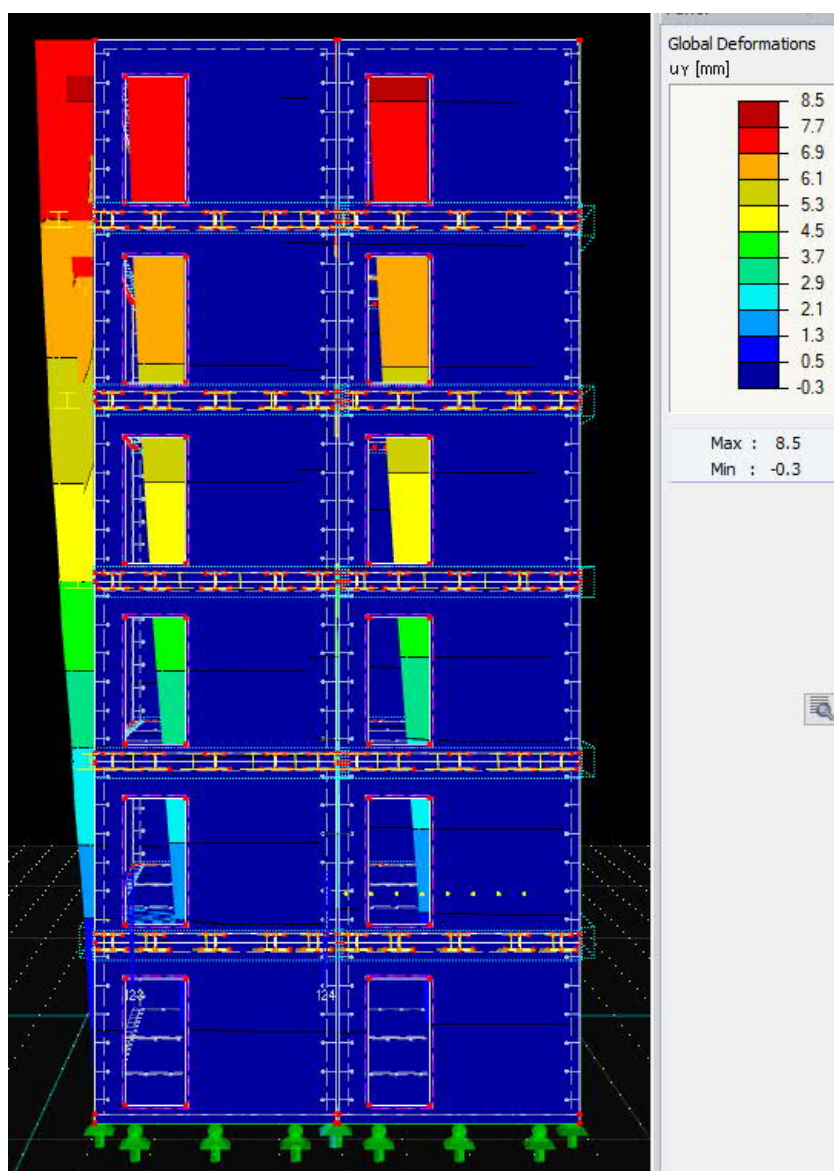


KUVA 7. Esimerkin mukainen kuusikerroksinen CLT-tilaelementtitorni

8.6 Tulosten tarkastelu

Kun malli on valmis ja liitosten vapausasteet lisätty voidaan mallin laskenta aloittaa. Laskenta aloitetaan käynnistämällä lisämoduuli RF-Laminate. Ennen laskentaa voidaan vielä määrittää "Details" välilehden kohdalta mitä CLT-levyjen jännityksiä halutaan tarkastella. Laskenta käynnistyy "Calculation" painikkeesta ja laskenta-aika riippuu mm. mallin koosta, kuormitusyhdistelmien määrästä ja elementtiverkon tiheydestä. Esimerkissä käytettiin 0.1 m pituisia neliön ja kolmion mallisia elementtejä.

Kun laskenta on suoritettu, voidaan tuloksia tarkastella lisämoduulin taulukkoikkunassa, mallinnusnäkymässä, perusohjelman taulukkoikkunassa tai erilaisista tulosdiagrammeista. Ennen laskentaa määritettyjen asetusten ja valintojen perusteella voidaan tarkastella yksittäisten CLT-levyjen jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tulosten avulla voidaan myös tarkastella koko rakennuksen vaakasiirtymää. Esimerkin CLT-tilaelementtitornin suurimmaksi vaakasiirtymäksi käyttörajatilassa osoittautui 8,5 mm Y-akselin suuntaan. Esimerkiksi RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeessa suositellaan kerrostaloissa vaakasiirtymän rajoittamista enintään arvoon $H/500$ ylimmän kerroksen lattiatasolla, jossa H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus (RIL-205-1-2017, 98). Näin ollen tilaelementtitornin vaakasiirtymän arvo on täysin hyväksytyissä rajoissa. Kuvassa 8 on havainnollistettu vaakasiirtymää graafisesti. Siirtymän kuvaaja ei ole mittakaavassa.



KUVA 8. Esimerkin tilaelementtitornin vaakasiirtymä Y-suuntaan

Tulosten avulla voidaan myös tarkastella CLT-levyjen saumoissa vaikuttavia voimia. Projekti navigaattorista voidaan valita tarkasteltavaksi ”Line Releases”, jolloin mallissa pystytään tarkastelemaan liitossaumoissa vaikuttavia voimia. Tässä työssä tarkasteltiin tilaelementtien sisäisiä liitoksia ja moduulien välisten liitosten kapasiteettia ei tutkittu. Moduulien väliset liitokset ovat väliaineellisia liitoksia, joiden mitoitus ei kuulu Eurokoodi 5:n liitosmitoitushjeisiin. Lisäksi CLT:n lohkeamismurtumiselle ei ole hyväksyttyjä Eurokoodi 5:n mukaisia mitoitusohjeita.

Tilaelementtien sisäisissä ruuviliitoksissa vaikuttavat leikkausvoimat jäivät melko pieniksi eikä liitosten kapasiteetti ylittynyt missään liitoskohdassa. Liitosten leikkauskestävyyden määrittämiseksi käytettiin Rothoblaas ruuvivalmistajan ilmoittamia koestettuja ruuvien leikkauskestävyyden ominaisarvoja leikettä kohden (Rothoblaas 2021, 36). Kokeissa oli tarkasteltu erikseen CLT:n syrjä- ja lapeliitosta, sekä ristiruuviliitosta. Ruuvivalmistajan ilmoittamilla kestävyiden ominaisarvoilla laskettuja kestävyksiä verrattiin Eurokoodi 5:n puikkoliitosteoriaan pohjautuvien laskentakaavojen, sekä RIL-205-1-2017 suunnitteluohjeen yksinkertaistettujen laskentakaavojen mukaisiin arvoihin. Taulukossa 13 on esitetty laskentaesimerkin kattolevyjen liitoksissa vaikuttavien leikkausvoimien ääriarvot murtorajatilassa. Lisäksi taulukossa on esitetty liitoksen leikkausvoimakestävyys laskettuna ruuvitoimittajan ilmoittamien ominaiskestävyyksien, Eurokoodi 5:n puikkoliitosteorian sekä RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen mukaan.

TAULUKKO 13. Kattolevyjen liitoksissa vaikuttavien sauman suuntaisten leikkausvoimien ääriarvot ja liitosten leikkausvoimakestävydet murtorajatilassa

Liitokset	Seinä-kattoliitos	Katon puoliponttiliitos
Leikkausvoiman ääriarvo	4.23 kN/m	1.04 kN/m
Ruuvitoimittajan mukainen leikkausvoimakestävyys	10.92 kN/m	8.34 kN/m
EC5:n mukainen leikkausvoimakestävyys	9.84 kN/m	7.23 kN/m
RIL 205-1-2017 mukainen leikkausvoimakestävyys	11.61 kN/m	4.73 kN/m

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että Eurokoodi 5:n mukaisella puikkoliitosteoriantaan pohjautuvalla mitoituksella päästään melko lähelle ruuvivalmistajan ilmoittamia arvoja. Mitoituksessa on hyödynnetty köysivoimasta saatava vaikutus, jossa osakierteisen ruuvin tapauksessa ruuvin ulosvetokestävyyden ominaisarvoksi määräytyi ruuvin kannan läpivetokestävyys.

RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen yksinkertaistukset puolestaan johtavat suurempaan kestävyysasteeseen seinä- kattolevyjen syrjäliitoksessa ja huomattavasti heikompaan kestävyysasteeseen kattolevyjen lapeliitoksessa verrattuna ruuvitoimittajan ilmoittaman ominaiskestävyysasteen avulla laskettuun mitoituskestävyysasteeseen. Tämä selittyy osittain suunnitteluohjeessa käytettyjen korotus- ja pienennyskertoimien käytöllä. Ruuvin tunkeumasyvyydestä riippuen leikkausvoimakestävyysaste, joko korotetaan tai pienennetään kun ruuvin mitoituksessa käytetään profiloitujen pyöreiden naulojen mitoitusohjetta. Ilman kertoimien vaikutusta tulokset olivat melko lähellä puikkoliitosteoriantalla saatuja arvoja. Profiloitujen pyöreiden naulojen ohjeessa ei myös lainkaan oteta huomioon CLT-levyn heikkoa reunapuristuslujuutta syrjäpinnan leikkausliitoksissa. Tämä johtaa suureen leikkauskestävyyden mitoitusarvoon, joka saattaa olla riski tiukoille mitoitettaessa.

Tämän esimerkin ja ruuvityypin perusteella tulisi CLT:n välisissä ruuviliitoksissa käyttää Eurokoodissa esitettyjä puikkoliitosteoriantaan pohjautuvia mitoitusohjeita, RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen yksinkertaistuksien sijaan. On kuitenkin huomioitava, ettei edellä mainittu toteamus välttämättä päde kaikkiin tapauksiin ja mitoituksessa tulisi aina käyttää ruuvivalmistajan ilmoittamia koestettuja arvoja.

Taulukossa 14 on esitetty esimerkkimallin tilaelementtien seinälevyjen välisessä ristiruuviliitoksessa vaikuttavan leikkausvoiman ääriarvo murtorajatilassa. Taulukossa on myös esitetty ruuvitoimittajan ilmoittama leikkausvoimakestävyysasteen ominaisarvoon pohjautuva liitoksen kestävyys verrattuna laskettuun liitoskestävyysasteeseen (Rothblaas 2021, 157). Laskennassa on sovellettu RIL 205-1-2017 suunnitteluohjetta ja siihen lisättyä CrossLam Kuhmo CLT lisäohjetta. Ruuvin ulosvetokestävyyden laskenta on tehty sekä CrossLam tuotesertifikaatissa, että ruuvin ETA-11/0030-ohjeessa esitetyn laskentakaavan mukaan.

TAULUKKO 14. Seinien ristiruuviliitoksessa vaikuttavan sauman suuntaisen leikkausvoiman ääriarvo ja liitoksen leikkausvoimakestävyys murtorajatilassa

Leikkausvoiman ääriarvo	5.66 kN/m
Ruuvitoimittajan mukainen leikkausvoimakestävyys	26.25 kN/m
Leikkausvoimakestävyys CrossLam ohjeen mukaan	34.05 kN/m
Leikkausvoimakestävyys ruuvien ETA-ohjeen mukaan	25.35 kN/m

Tilaelementin seinien välisen sauman leikkausvoima osoittautui melko pieneksi esimerkin mallissa. Tarvittava leikkausvoimakapasiteetti saavutettaisiin myös suoraruuvauksella samalla ruuvijaolla. Tilaelementtien sisäisissä liitoksissa on kuitenkin huomioitava myös elementin kuljetuksessa ja nostoissa aiheutuvat rasitukset, jolloin liitoksilta vaaditaan hyviä jäykkyyssominaisuuksia. Ristiruuvauksella saavutetaan moninkertainen jäykkyys suoraruuvaukseen verrattuna.

Kun ristiruuviliitoksen mitoituksessa käytettiin ruuvitoimittajan ETA-ohjeen mukaista ruuvien ulosvetolujuuden mitoituskaavaa, päästiin hyvin lähelle toimittajan ilmoittamaa leikkausvoiman kestävyysarvoa. Kun taas mitoituksessa käytettiin CrossLam tuotesertifikaatin mukaista ruuvien ulosvetolujuuden laskentakaavaa, päästiin huomattavasti suurempaan liitoksen leikkausvoimakapasiteettiin, ruuvitoimittajan ilmoittamaan arvoon verrattuna. Tämä on hyvä esimerkki siitä, kuinka suuri vaikutus eri materiaalien ja kiinnikkeiden valmistajakohtaisilla ohjeilla on mitoitukseseen ja liitosten suunnitteluun. Kuten jo aikaisemmin todettiin, tulisi mitoituksessa kuitenkin käyttää ruuvitoimittajan mukaisia ilmoitettuja koestettuja arvoja.

9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteet jaettiin kahteen osioon: Ensimmäisen osion tavoitteena oli tuottaa toimeksiantajayritykselle tiivis tietopaketti CLT-tilaelementtirakenteisen asuinrakennuksen rakennejärjestelmän toiminnasta sekä liitosten suunnitteluperiaatteista. Lisäksi osiossa esitettiin tilaelementtien välisiä ja sisäisiä liitosesimerkkejä. Tietoa koottiin useista kirjallisuuslähteistä ja tutkimuksista, jonka lisäksi työssä haastateltiin kolmea kokenutta rakennesuunnittelijaa A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n Kuopion yksiköstä. Suurin osa haastattelussa saaduista tiedoista haluttiin pitää toimeksiantajayrityksen sisäisenä tietona. Haastattelusta saatuihin tietoihin ei erikseen viitattu tässä opinnäytetyössä, vaan haastattelu toimi kirjallisuuslähteiden tukena.

Ensimmäisen osion haasteiksi osoittautui luotettavien kirjallisuuslähteiden löytäminen. Suurin osa lähdemateriaaleista oli englanninkielisiä ja suomenkielisiä lähdemateriaaleja oli tarjolla hyvin vähän. Työtä tehdessä kävi myös ilmi, että CLT-tilaelementtien liitostekniikkaa on tutkittu melko vähän tai sitä ei ole julkaistu. Mielestäni ensimmäiseen osioon saatiin koottua tarkoituksenmukainen ja tiivis tietopaketti. Työtä varten tehty haastattelu tuki lähteistä saatua tietoa hyvin, jonka takia koen osiossa esitettyjen tietojen olevan luotettavia ja paikkaansa pitäviä.

Toisen osion tavoitteena oli tuottaa mitoitusohje CLT-tilaelementtien sisäisten ruuviliitosten mitoitusta varten sekä laatia mitoitusohjat CLT:n välisille ruuviliitoksille. Lisäksi tarkoituksena oli perehtyä RFEM-mitoitusohjelman käyttöön ja CLT-tilaelementtien ja niiden liitosten mallintamiseen.

Haasteeksi osoittautui yhtenäisten mitoitusohjeiden puuttuminen. Mitoituksessa tarkasteltiin EC5:n puikkoliitosteorian mukaista mitoitusta sekä RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohjeen yksinkertaistettuja mitoituskaavoja. Näiden lisäksi työssä noudatettiin CrossLam Kuhmo Ltd:n valmistaman CLT-levyn tuotesertifikaatissa esitettyjä ohjeita. RFEM-ohjelma tuotti myös haasteita, etenkin joustavien liitosten mallinnus osoittautui odotettua työläämmäksi. Mallin suuri koko ja pitkät laskenta-ajat lisäsivät myös omat haasteensa työn tekemiseen.

CLT:n välisten ruuviliitosten mitoitus EC5:n puikkoliitosteorian mukaan osoittautui tarkemmaksi mitoistavaksi verrattuna RIL 205-1-2017 yksinkertaistettuihin kaavoihin. RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen mukaiset profiloidun naulan leikkauskestävyyden kaavoissa käytetyt korotus- ja pienennyskertoimet, johtivat joko liian suuriin tai huomattavasti alhaisempiin leikkausvoimakestävyysarvoihin. CLT:n syrjäliitoksessa saatiin suurempi leikkauskestävyys käytettäessä RIL-suunnitteluohjeen yksinkertaistuksia kuin ruuvitoimittajan ilmoitetuilla leikkauskestävyyksillä laskettaessa. Suunnitteluohjeen yksinkertaistus ei ota huomioon CLT-levyn heikkoa reunapuristuslujuutta syrjäliitoksessa, kun käytetään hoikkia ruuveja ja mitoitus tehdään profiloitujen nauhojen ohjeiden mukaan. Tämän tutkimuksen perusteella RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeen yksinkertaistukset saattavat johtaa liian korkeaan leikkausvoimakestävyyteen CLT:n syrjäliitoksissa, kun käytetään itseporautuvia ruuveja, joiden tehollinen halkaisija $d_{ef} \leq 6$ mm.

On kuitenkin huomioitava, että työssä kestävyysarvoja verrattiin Rothoblaas ruuvi valmistajan koekuormitettuihin arvoihin. Ilmoitetuista arvoista ei käy ilmi onko ilmoitettuihin ominaiskestävyysarvoihin otettu lisävarmuutta pienentämällä leikkausvoimakapasiteettia. Näin ollen työssä esitettyjä johtopäätöksiä ei voida pitää pätevänä muiden ruuvivalmistajien tai materiaalitoyttajien tapauksessa ennen lisätutkimuksia. Lisäksi työssä sovellettiin CLT-valmistajakohtaisia mitoitusohjeita, jotka vaikuttivat saatuihin tuloksiin.

Mielestäni työssä onnistuttiin hyvin. Työn alkuvaiheessa laajan aiheen rajauksen kanssa oli ongelmia mutta olen kuitenkin tyytyväinen lopputulokseen. Ennen tämän työn aloittamista CLT oli minulle materiaalina melko tuntematon, kuten myös tilaelementtirakentaminen. Koen oppineeni CLT- ja tilaelementtirakentamisesta todella paljon tämän opinnäytetyön ansiosta ja uskon myös CLT-rakenteiden tilaelementtikohteiden yleistyvän entisestään lähivuosina. Tämän työn perusteella potentiaalia on ainakin runsaasti ja vielä kun Eurokoodiin saadaan päivitettyä yhtenäiset mitoitusohjeet CLT:lle, helpottuu rakenteiden liitostekniikan ja -tuotteiden kehitys huomattavasti.

10 Jatkotutkimustarpeet

Suurimpana jatkotutkimustarpeena on CLT-tilaelementtien välisten liitosten tutkiminen. Liitoksissa käytetyt tärinäeristimet johtavat raollisiin puikkoliitoksiin, jotka eivät kuulu eurokoodin mukaisiin liitosmitoitushjeisiin. Tutkimuksessa olisi hyvä selvittää miten tärinäeristimet vaikuttavat puikkoliittimien kestävyys- ja liitosjäykkyys- ja myös pitkän aikavälin vaikutukset tulisi huomioida tutkimuksessa, pääsevätkö puikkoliittimet esimerkiksi löystymään joustavan ainekerroksen ja vaihtuvien kuormitussuuntien takia. Lisäksi kitkan ja tärinäeristimen yhteisvaikutusta tulisi tutkia.

Toinen CLT-tilaelementtien välisten liitosten haaste on CLT-levyn lohkeamismurto. Tilaelementtien välisissä liitoksissa yleisesti käytetyt teräslevyliitokset johtavat suuriin puikkoliittinryhmiin, jolloin CLT-levyn lohkeamismurto tulisi tarkistaa. CLT:n lohkeamismurrolle ei kuitenkaan ole olemassa yhtenäistä mitoitushjetta, eikä CLT:n valmistajakohtaisissa ohjeissa ole yleensä otettu asiaan kantaa. Lohkeamismurtoa olisi syytä tutkia esimerkiksi laboratoriokokein.

Eurokoodissa esitetty puuliitoksissa käytettyjen puikkoliittimien siirtymäkertoimien määrittäminen on hyvin pelkistetty, jossa huomioidaan ainoastaan puuosien tiheys ja puikkoliittimien halkaisija. Standardissa ei esimerkiksi huomioida puuosien kitkaa, puikkoliittimien tunkeumapituutta tai kulmaa puun syysuuntaan nähden ollenkaan. Tarkempia laskentakaavoja on esitetty useiden erilaisten koe-kuormitusten perusteella, joissa huomioidaan esimerkiksi liittimen tunkeumapituus tai kulma puun syysuuntaan nähden. Tässä työssä esitettiin myös R. Tomasin tekemien kuormituskokeiden perusteella johdettujen kaavojen mukainen vinoruuviliitoksissa toimivien puikkoliittimien siirtymäkertoimien määrittäminen. Vaikka koestettuja laskentakaavoja on olemassa, tulisi eurokoodin mukainen puikkoliittimen siirtymäkertoimen määrittäminen päivittää, jotta saadaan yhtenäiset tehokkaamat keinot puikkoliittimien siirtymäkertoimien määrittämiseksi.

Tätä työtä tehdessä Eurokoodeja ollaan päivittämässä ja seuraavaan julkaisuun saadaan toivottavasti yhtenäiset ohjeet CLT:n mitoitus- ja liitoksiin. Toivottavasti myös

muihin tässä työssä esitettyihin jatkotutkimustarpeisiin saadaan viimeistään standardin päivityksen myötä yhteneviä ohjeistuksia.

LÄHTEET

CLT-Suunnittelun ohje. 2019. OY CrossLam Kuhmo Ltd. Luettu 8.1.2021
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/clt-suunnittelun-ohje.pdf>

Eurofins n.d. Rakennustuotteiden ETA-arviointi. Luettu 6.2.2021.
[Rakennustuotteid https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/sertifiointi-ja-tuotehyvaeksyntae/rakennustuotteet/rakennustuotteiden-eta-arviointi/en-ETA-arviointi - Eurofins Suomi](https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/sertifiointi-ja-tuotehyvaeksyntae/rakennustuotteet/rakennustuotteiden-eta-arviointi/en-ETA-arviointi-Eurofins-Suomi)

FPInnovations 2019a. Canadian CLT Handbook chapter 4: Lateral Design of cross laminated timber buildings. PointeClaire, QC: Special Publication SP-532E.

FPInnovations 2019b. Canadian CLT Handbook chapter 5: Connections in cross-laminated timber buildings. PointeClaire, QC: Special Publication SP-532E.

FPInnovations 2019c. Canadian CLT Handbook chapter 8: Fire performance of cross-laminated timber assemblies. PointeClaire, QC: Special Publication SP-532E.

Haapasalmi, A. 2015. Jatkuvan sortuman estäminen massiivipuorakenteisessa tilaelementtikohteessa. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Johansen, K.W. 1949. Theory of Timber Connections. Copenhagen.
<https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bse-me-001:1949:9::18>

Kevarinmäki, A. 2019a. CLT levyjen väliset ruuviliitokset ja tärinäeristimien vaikutus. Eurofins Expert Services Oy. [CLT lev https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/27_CLT-levyjen-v%C3%A4liset-ruuviliitokset.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/27_CLT-levyjen-v%C3%A4liset-ruuviliitokset.pdf) yjen väliset ruuviliitokset 2019 (puuinfo.fi)

Kevarinmäki, A. 2019b. CLT-levyjen väliset ruuviliitokset. Moduuli 3. Videoluento. Vaapu-vaativien puorakenteiden suunnittelu -täydennyskoulutus.
<https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-videoluennot/>

Kevarinmäki, A. 2019c. Puikkoliitosteoria- ja vinoruuviliitos. Moduuli 3. Videoluento. Vaapu-vaativien puorakenteiden suunnittelu -täydennyskoulutus.
<https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-videoluennot/>

Kevarinmäki, A. 2019d. Puikkoliitosteoria- ja vinoruuviliitos. Eurofins Expert Services Oy. https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/23_Puikkoliitosteoria-ja-vinoruuviliitos.pdf

KPM Engineering Oy. 2014

Kylliäinen, M. n.d. Puukerrostalojen akustiikkasuunnittelu. Vaapu-luentoaineistot. [Rakenneshttps://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/39_Puukerrostalojen-akustiikkasuunnittelu.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/39_Puukerrostalojen-akustiikkasuunnittelu.pdf) (puuinfo.fi)

Kylliäinen, M., Latvanne, P., Kuusinen, A. & Kekki, T. 2017. Puukerrostalojen ääneneristys. Asiantuntijaselvitys. Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu

Lahtela, T. 2018a. Paloturvallinen puutalo. Asuin- ja toimitilarakentaminen. Helsinki: Puuinfo Oy. [Palokirj https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Palokirja_LOW_p%C3%A4ivitetty-21.2.20.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Palokirja_LOW_p%C3%A4ivitetty-21.2.20.pdf) [LOW_päivitetty-21.2.20.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Palokirja_LOW_p%C3%A4ivitetty-21.2.20.pdf) (puuinfo.fi)

Lahtela, T. 2018b. Levyjäykistys puukerrostalossa. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutus 2018. Moduuli 3. [Microsoft Power https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/21_Levyj%C3%A4ykistys-puukerrostalossa.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/21_Levyj%C3%A4ykistys-puukerrostalossa.pdf) [Point - 21_Levyjäykistys puukerrostalossa](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/21_Levyj%C3%A4ykistys-puukerrostalossa.pdf) (puuinfo.fi)

Lahtela, T. 2018c. Jatkuvan sortuman estäminen. Videoluento. Puuinfo vaativien puurakenteiden suunnittelu täydennys -koulutus 2018. Moduuli 2. <https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-videoluennot/>

Laitinen, T. Tuotepäällikkö. 2019. Tärinäeristimet puurakentamisessa. Christian Berner. [Powhttps://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/40_T%C3%A4rin%C3%A4eristimet-puurakentamisessa.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/40_T%C3%A4rin%C3%A4eristimet-puurakentamisessa.pdf) [Point-esitys](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/40_T%C3%A4rin%C3%A4eristimet-puurakentamisessa.pdf) (puuinfo.fi)

Luntta, J. 2013. Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Rakennustekniikan laitos. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Laakkonen, P. 2016. 4-Kerroksisen CLT-tilaelementtitornin jäykistyskapasiteetti. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

ProHolz. 2018. Cross-Laminated Timber. Structural Design. Volume 2. Applications. proHolz Austria.

ProHolz. 2014. Cross-Laminated Timber. Structural Design. Basic design and engineering principles according to Eurocode. proHolz Austria.

Puuinfo. 2020a. Monikerroslevy (CLT). Luettu 8.1.2021 <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööri tuotteet/monikerroslevy-clt/>

Puuinfo. 2020b. Elementti Sampo Tilaelementit. Luettu 8.1.2021 <https://puuinfo.fi/tuotteet/elementit-rakennusosat/elementti-sampo-tilaelementit/>

Puuinfo. 2020c. Yleisimmät rakennejärjestelmät. Luettu 13.1.2021 <https://puuinfo.fi/puutieto/kayttokohteet/yleisimmat-rakennejarjestelmat/>

Puuinfo. 2020d. Runkojärjestelmät. Luettu 18.1.2021 <https://puuinfo.fi/rakenteet/yhdistelmarakenteet/puukerrostalon-runkojarjestelmat/>

Puuinfo. 2020e. Rakennuksen jäykistys. Luettu 20.1.2021 <https://puuinfo.fi/rakenteet/massiivipuulevyrakenteet/rakennuksen-jaykistys/>

Puuinfo. 2020f. Paloturvallisuus. Luettu 18.2.2021 [Paloturvallisuus - Puuinfo](https://puuinfo.fi/suunnittelu/maaraykset/paloturvallisuus/lisuus)

Ratu 0425. 2014. Puuelementtirakentaminen, Tilaelementit. Luettu 18.1.2021

RF-LAMINATE. 2016. Design of Laminate Surfaces. Program Description. Dlubal Software GmbH 2016. <https://www.dlubal.com/-/media/Files/web-site/documents/manuals/rfem-and-rstab-add-on-modules/others/rf-laminate/rf-laminate-manual-en.pdf?mliid=A1793038DDBA4F60A129F84FD9B33209>

RIL 205-1-2017. 2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 244-2007. 2007. Puurakenteiden jäykistykseen ja halkeilun hallinta. Suunnittelu- ja valmistusohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Rombach, G.A. 2011. Finite element Design of Concrete Structures. Practical problems and their solutions. 2. Painos. Lontoo: ICE Publishing.

Rothoblaas 2021. Screws and connectors for wood. Carpentry, Structures and Outdoor. <https://issuu.com/rothoblaas/docs/screws-and-connectors-for-timber-2021-en?mode=embed>

SFS 5978. 2014. Puurakenteiden toteuttaminen. Rakennuksien kantavia rakennosia koskevat säännöt. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1995-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 3.painos. Vahvistettu 16.06.2014. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Sorri, S. 2017a. CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnitteluohje. Luettu 12.1.2021

Sorri, S. 2017b. CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnitteluohjeistus. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Stora Enso Wood Products GmbH. 2017. Stora Enso CLT. Puu-maailman vanhin ja myös modernein rakennusmateriaali. Stora Enso Building and Living. Luettu 12.1.2021. <https://docplayer.fi/63068170-Stora-enso-clt-puu-maailman-vanhin-ja-myo-modernein-rakennusmateriaali.html>

Stora Enso. 2016. Building Systems by Stora Enso. 3-8 Storey Modular Element Buildings. Version 4.0. Luettu 13.1.2021 <https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/Design-Manual-A4-Modular-element-buildings20161227finalversion-40EN.pdf>

The CLT Handbook. 2019. 1. Painos. CLT Structures – facts and planning. Stockholm: Skogsindustrierna Svenskt trä.

Tomasi, R. 2010. Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. Construction and Building materials. 9 julkaisu. Elsevier Ltd.

Traficom. 2020. Erikoiskuljetukset ja erikoiskuljetusajoneuvot. Luettu 16.1.2021
https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Erikoiskuljetusm%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys_FI.pdf

X-RAD n.d. Rothoblaas. Luettu 2.3.2021
<https://issuu.com/rothoblaas/docs/x-rad-en?e=18207635/31724874>

LIITTEET

Liite 1. Syrjäliimaamattoman CLT-levyn jäykkyyden kertoimet

Liite 2. Seinä-kattoliitoksen leikkauskapasiteetti

Liite 3. Tilaelementin katon puoliponttiliitoksen leikkauskapasiteetti

Liite 4. Seinä-seinä ristiruuviliitoksen leikkauskapasiteetti

Liite 5. Esimerkkimallin liitosten jäykkyydet Eurokoodin mukaan

Liite 6. Teräslevyliitosten mallinnus

Liite 7. Ruuviliitosten laskentapohjat, ei julkaista

LIITE 1. Syrjäliimaamattoman CLT-levyn jäykkyyden kertoimet

Vääntöjäykkyyden pienennyskerroin

$$k_{33} = \frac{1}{1 + 6 \cdot p_D \cdot \left(\frac{d_{max}}{a} \right)^{q_D}}$$

Tasojäykkyyden pienennyskerroin

$$k_{88} = \frac{1}{1 + 6 \cdot p_S \cdot \left(\frac{d_{max}}{a} \right)^{q_S}}$$

Vääntöjäykkyyden parametrit lamellikerrosten mukaan

Parameters for torsional stiffness	Number of layers		
	3	5	7 and more
p_D	0.89	0.67	0.55
q_D	1.33	1.26	1.23

Parameters for shear stiffness	Number of layers	
	3	5, 7 and more
p_S	0.53	0.43
q_S	1.21	

Lamellikerroksia 3 kpl kaikissa esimerkin CLT-levyissä:

$$p_D := 0.89 \quad q_D := 1.33 \quad p_S := 0.53 \quad q_S := 1.21$$

CLT:n paksuimman lamellikerroksen paksuus d_{max}

$$\text{Seinälevy: } d_{max.seinä} := 40 \text{ mm}$$

$$\text{Lattialevy: } d_{max.lattia} := 50 \text{ mm}$$

$$\text{Kattolevy: } d_{max.katto} := 30 \text{ mm}$$

Lamellikerroksissa käytettyjen lautojen leveys a

Seinälevy: $a_{seinä} := 120 \text{ mm}$

Lattialevy: $a_{lattia} := 120 \text{ mm}$

Kattolevy: $a_{katto} := 80 \text{ mm}$

CLT-levyjen vääntöjäykkyyden pienennyskertoimet k_{33}

Seinälevy: $k_{33.seinä} := \frac{1}{1 + 6 \cdot p_D \cdot \left(\frac{d_{max.seinä}}{a_{seinä}} \right)^{q_D}} = 0.447$

Lattialevy: $k_{33.lattia} := \frac{1}{1 + 6 \cdot p_D \cdot \left(\frac{d_{max.lattia}}{a_{lattia}} \right)^{q_D}} = 0.375$

Kattolevy: $k_{33.katto} := \frac{1}{1 + 6 \cdot p_D \cdot \left(\frac{d_{max.katto}}{a_{katto}} \right)^{q_D}} = 0.408$

CLT-levyjen tasojäykkyyden pienennyskertoimet k_{88}

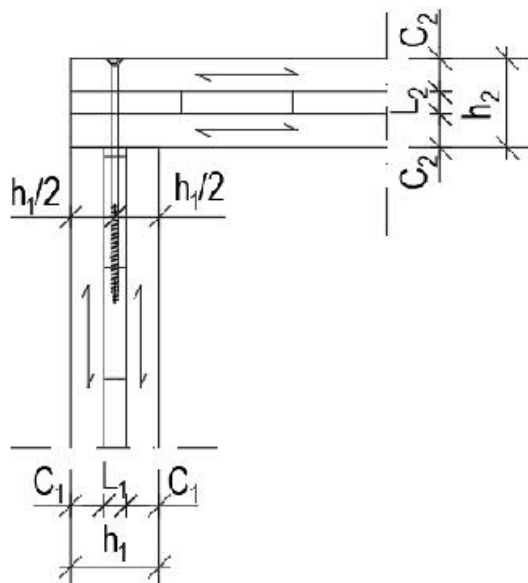
Seinälevy: $k_{88.seinä} := \frac{1}{1 + 6 \cdot p_S \cdot \left(\frac{d_{max.seinä}}{a_{seinä}} \right)^{q_S}} = 0.543$

Lattialevy: $k_{88.lattia} := \frac{1}{1 + 6 \cdot p_S \cdot \left(\frac{d_{max.lattia}}{a_{lattia}} \right)^{q_S}} = 0.476$

Kattolevy: $k_{88.katto} := \frac{1}{1 + 6 \cdot p_S \cdot \left(\frac{d_{max.katto}}{a_{katto}} \right)^{q_S}} = 0.507$

LIITE 2. Seinä-kattoliitoksen leikkauskapasiteetti:

1.0 Lähtötiedot



Käyttöluokka: 1 $k_{mod} := 1.1$ $\gamma_M := 1.3$

Aikaluokka: Hetkellinen

CLT-levytoimittaja: CrossLam Kuhmo Ltd.

Seinälevy: $h_1 := 120 \text{ mm}$ $C_1 := 40 \text{ mm}$ $L_1 := 40 \text{ mm}$

Kattolevy: $h_2 := 80 \text{ mm}$ $C_2 := 30 \text{ mm}$ $L_2 := 20 \text{ mm}$

C24 lamellien tiheyden ominaisarvo: $\rho_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvit: Rothoblaas HBS 8x200 k200

Ruuvin pituus: $L := 200 \text{ mm}$

Ruuvin nimellishalkaisija: $d := 8 \text{ mm}$

Ruuvin kierteen sisähalkaisija: $d_i := 5.4 \text{ mm}$

Ruuvin tehollinen halkaisija: $d_{ef} := 1.1 \cdot d_i = 5.94 \text{ mm}$

Ruuvin myötömomentti: $M_{y,Rk} := 20.1 \text{ N} \cdot \text{m}$

Liitinväli syrjäliitoksessa:	$a_1 := 200 \text{ mm}$
Ruuvien kierteen pituus:	$b := 80 \text{ mm}$
Ruuvien kannan halkaisija:	$d_h := 14.5 \text{ mm}$
Ruuvien läpivetoparametrin ominaisarvo:	$f_{head.k} := 10.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Ruuvien vetokestävyyden ominaisarvo:	$f_{tens.k} := 20.1 \text{ kN}$
Ruuvien tunkeuma CLT:n syrjään:	$t_{pen} := L - h_2 = 120 \text{ mm}$

2.0 Mitta- ja etäisyys ehdot

Ruuvien minimihalkaisija syrjäliitoksessa:	$d_{min} := 8 \text{ mm}$	
	$d = 8 \text{ mm}$	=> OK
Minimi liitinväli syrjäliitoksessa:	$a_{1.min} := 10 \cdot d = 80 \text{ mm}$	
	$a_1 = 200 \text{ mm}$	=> OK
Minimi reunaetäisyys syrjäliitoksessa:	$a_{2.c} := 3 \cdot d = 24 \text{ mm}$	
	$a_{2.c} := \frac{h_1}{2} = 60 \text{ mm}$	=> OK
Ruuvien lamellin minimipaksuus syrjäliitoksessa:	$L_{1.min} := 20 \text{ mm}$ (kun $d = 8 \text{ mm}$)	
	$L_1 = 40 \text{ mm}$	=> OK
CLT:n minimipaksuus syrjäliitoksessa:	$h_{min} := 10 \cdot d = 80 \text{ mm}$	
	$h_1 = 120 \text{ mm}$	=> OK
Ruuvien vähimmäistunkeuma:	$t_{pen.min} := 10 \cdot d = 80 \text{ mm}$	
	$t_{pen} = 120 \text{ mm}$	=> OK

3.0 Leikkausliitoksen kestävyys EC 5. puikkoliitostestioian mukaan:

Ruuvien kannan puoleisen CLT-levyn paksuus $t_1 := h_2 = 80 \text{ mm}$

Ruuvien tunkeuma kärjen puoleisessa CLT-levyssä: $t_2 := L - h_2 = 120 \text{ mm}$

Reunapuristuslujuuden ominaisarvo kannan puoleisessa CLT-levyssä:

$$f_{h.1.k} := 0.082 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{-0.3} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 16.817 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Reunapuristuslujuuden ominaisarvo CLT-levyn syrjässä:

$$f_{h.2.k} := 20 \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)^{-0.5} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 7.071 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Reunapuristuslujuuksien suhde:

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 0.42$$

Ruuvien ulosvetolujuuden ominaisarvo:

$$f_{ax.k} := 11.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{tiheydelle} \quad \rho_a := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ruuvien kierteisen osan tunkeuma:

$$l_{ef.1} := 80 \text{ mm} \quad l_{ef.2} := 0 \text{ mm}$$

Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo:

$$k_d := \min \left(\frac{d}{8 \text{ mm}}, 1 \right) = 1$$

$$F_{ax.Rk} := \min (f_{ax.k} \cdot l_{ef.1} \cdot d \cdot k_d, f_{head.k} \cdot d_h^2 \cdot 1^{0.8}, f_{tens.k}) = 2.208 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin ominaiskestävyys leikkaustasoa kohti saadaan kaavoista:
(Ruuveilla köysivaikutuksen osuus rajoitettava 100% puikkoliitosteorian osuudesta)

$$F_{v.Rk.1} := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d_{ef} = 7.991 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.2} := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d_{ef} = 5.04 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.3} := \frac{(f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d_{ef})}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt{\beta + 2 \beta^2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 3.109 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.4} := 1.05 \cdot \frac{(f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d_{ef})}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d_{ef} \cdot t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 3.081 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.5} := 1.05 \cdot \frac{(f_{h.1.k} \cdot t_2 \cdot d_{ef})}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d_{ef} \cdot t_2^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 2.727 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.6} := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d_{ef}} + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 2.325 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk} := \min(F_{v.Rk.1}, F_{v.Rk.2}, F_{v.Rk.3}, F_{v.Rk.4}, F_{v.Rk.5}, F_{v.Rk.6}) = 2.325 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin leikkausvoimakestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot F_{v.Rk} = 1.967 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoimakestävyys:

$$V_{Rd} := \frac{R_d}{a_1} = 9.837 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4.0 Leikkausliitoksen kestävyys soveltaen RIL 205-1-2017 suunnitteluohjetta:

$d_{ef} = 5.94 \text{ mm} < 6 \text{ mm}$ => Sovelletaan profiloiduille pyöreille nauloille annettuja ohjeita, käyttäen liittimen halkaisijana tehollista paksuutta

Voidaan käyttää korotuserrointa k_t koska:

$$t_1 = 80 \text{ mm} > 8 \cdot d_{ef} = 47.52 \text{ mm} \quad \text{ja} \quad t_2 = 120 \text{ mm} > 12 \cdot d_{ef} = 71.28 \text{ mm}$$

$$k_t := \max \left(1 + 0.3 \cdot \frac{t_1 - 8 \cdot d_{ef}}{8 \cdot d_{ef}}, 1 + 0.3 \cdot \frac{t_2 - 12 \cdot d_{ef}}{6 \cdot d_{ef}} \right) = 1.41$$

Kuitenkin

$$k_t \leq \sqrt{\frac{\left(\frac{M_{y.Rk}}{N \cdot \text{mm}} \right)}{160 \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{2.6}}}$$

$$\sqrt{\frac{\left(\frac{M_{y.Rk}}{N \cdot \text{mm}} \right)}{160 \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{2.6}}} = 1.106 \quad \Rightarrow \quad k_t := 1.106$$

Liittimen ominaisleikkauskestävyys leikettä kohden:

$$R_k := 120 \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{1.7} \cdot N = 2.481 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin leikkausvoimakestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_t \cdot R_k = 2.322 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoimakestävyys:

$$V_{Rd} := \frac{R_d}{a_1} = 11.609 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

5.0 Leikkausliitoksen kestävyys ruuvivalmistajan ilmoittaman ominaisleikkauskestävyyden mukaan:

$$R_{v.k} := 2.58 \text{ kN} \quad (\text{HBS ruuvien ominaisleikkauskestävyys CLT:n syrjässä})$$

Yhden ruuvin leikkausvoimakestävyys:

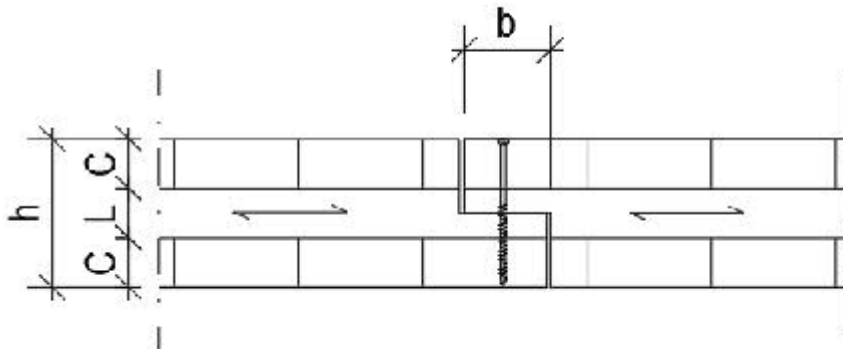
$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot R_{v.k} = 2.183 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoimakestävyys:

$$V_{Rd} := \frac{R_d}{a_1} = 10.915 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

LIITE 3. Tilaelementin katon puoliponttiliitoksen leikkauskapasiteetti:

1.0 Lähtötiedot



Käyttöluokka: 1 $k_{mod} := 1.1$ $\gamma_M := 1.3$

Aikaluokka: Hetkellinen

CLT-levytoimittaja: CrossLam Kuhmo Ltd.

CLT-levyt: $h := 80 \text{ mm}$ $C := 30 \text{ mm}$ $L := 20 \text{ mm}$

Pontin syvyys: $b := 50 \text{ mm}$

C24 lamellien tiheyden ominaisarvo: $\rho_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvit: Rothoblaas HBS 6x80 k200

Ruuvien pituus: $L_{ruuvi} := 80 \text{ mm}$

Ruuvien nimellishalkaisija: $d := 6 \text{ mm}$

Ruuvien kierteen sisähalkaisija: $d_i := 3.95 \text{ mm}$

Ruuvien tehollinen halkaisija: $d_{ef} := 1.1 \cdot d_i = 4.345 \text{ mm}$

Ruuvien myötömomentti: $M_{y,Rk} := 9.5 \text{ N} \cdot \text{m}$

Liitinväli lapeliitoksessa: $a_1 := 200 \text{ mm}$

Ruuvien kierteen pituus: $b_k := 40 \text{ mm}$

Ruuvien kannan halkaisija: $d_h := 12 \text{ mm}$

Ruuvien läpivetoparametrin ominaisarvo:

$$f_{head.k} := 10.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ruuvien vetokestävyyden ominaisarvo:

$$f_{tens.k} := 11.3 \text{ kN}$$

2.0 Mitta- ja etäisyys ehdot

Ruuvien minimihalkaisia lapeliitoksessa: $d_{min} := 6 \text{ mm}$

$$d = 6 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{OK}$$

Minimi liitinväli lapeliitoksessa:

$$a_{1.min} := 4 \cdot d = 24 \text{ mm}$$

$$a_1 = 200 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{OK}$$

Minimi reunaetäisyys lapeliitoksessa:

$$a_{2.c.min} := 2.5 \cdot d = 15 \text{ mm}$$

$$a_{2.c} := \frac{b}{2} = 25 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{OK}$$

3.0 Leikkausliitoksen kestävyys Puikkoliitostestioian mukaan:

Ruuvien kannan puoleisen CLT-levyn paksuus $t_1 := \frac{h}{2} = 40 \text{ mm}$

Ruuvien tunkeuma kärjen puoleisessa CLT-levyssä: $t_2 := 40 \text{ mm}$

Reunapuristuslujuuden ominaisarvo kannan puoleisessa CLT-levyssä:

$$f_{h.1.k} := 0.082 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{-0.3} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 18.471 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Reunapuristuslujuuden ominaisarvo kärjen puoleisessa CLT-levyssä:

$$f_{h.2.k} := 0.082 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}} \right)^{-0.3} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 18.471 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Reunapuristuslujuuksien suhde:

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 1$$

Ruuvien ulosvetolujuuden ominaisarvo:

$$f_{ax.k} := 11.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{tiheydelle} \quad \rho_a := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ruuvien kierteisen osan tunkeuma:

$$l_{ef.1} := 0 \text{ mm} \quad l_{ef.2} := 40 \text{ mm}$$

Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo:

$$k_d := \min\left(\frac{d}{8 \text{ mm}}, 1\right) = 0.75$$

$$F_{ax.Rk} := \min(f_{ax.k} \cdot l_{ef.2} \cdot d \cdot k_d, f_{head.k} \cdot d_h^2 \cdot 1^{0.8}, f_{tens.k}) = 1.512 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin ominaiskestävyys leikkaustasoa kohti saadaan kaavoista:
(Ruuveilla köysivaikutuksen osuus rajoitettava 100% puikkoliitosteorian osuudesta)

$$F_{v.Rk.1} := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d_{ef} = 3.21 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.2} := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d_{ef} = 3.21 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.3} := \frac{(f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d_{ef})}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt{\beta + 2 \beta^2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right)} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 1.708 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.4} := 1.05 \cdot \frac{(f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d_{ef})}{2 + \beta} \cdot \left(\left(\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d_{ef} \cdot t_1^2}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 1.738 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.5} := 1.05 \cdot \frac{(f_{h.1.k} \cdot t_2 \cdot d_{ef})}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left(\left(\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d_{ef} \cdot t_2^2}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 1.738 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.6} := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d_{ef}} + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 1.798 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk} := \min(F_{v.Rk.1}, F_{v.Rk.2}, F_{v.Rk.3}, F_{v.Rk.4}, F_{v.Rk.5}, F_{v.Rk.6}) = 1.708 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin leikkausvoimakestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot F_{v.Rk} = 1.445 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoimakestävyys:

$$V_{Rd} := \frac{R_d}{a_1} = 7.225 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4.0 Leikkausliitoksen kestävyys soveltaen RIL 205-1-2017 suunnitteluohjetta:

$d_{ef} = 4.345 \text{ mm} < 6 \text{ mm} \Rightarrow$ Sovelletaan profiloiduille pyöreille nauloille annettuja ohjeita, käyttäen liittimen halkaisijana tehollista paksuutta

Käytetään pienennyskerrointa k_e koska:

$$t_1 = 40 \text{ mm} > 8 \cdot d_{ef} = 34.76 \text{ mm} \text{ mutta } t_2 = 40 \text{ mm} < 12 \cdot d_{ef} = 52.14 \text{ mm}$$

$$k_e := \min\left(\frac{t_1}{8 \cdot d_{ef}}, \frac{t_2}{12 \cdot d_{ef}}\right) = 0.767$$

Liittimen ominaisleikkauskestävyys leikettä kohden:

$$R_k := 120 \cdot \left(\frac{d_{ef}}{\text{mm}}\right)^{1.7} \cdot \text{N} = 1.458 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin leikkausvoimakestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_e \cdot R_k = 0.946 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoimakestävyys:

$$V_{Rd} := \frac{R_d}{a_1} = 4.732 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

5.0 Leikkausliitoksen kestävyys ruuvivalmistajan ilmoittaman ominaisleikkauskestävyyden mukaan:

$$R_{v.k} := 1.97 \text{ kN} \quad (\text{HBS ruuvin ominaisleikkauskestävyys CLT:n lapeliitoksessa})$$

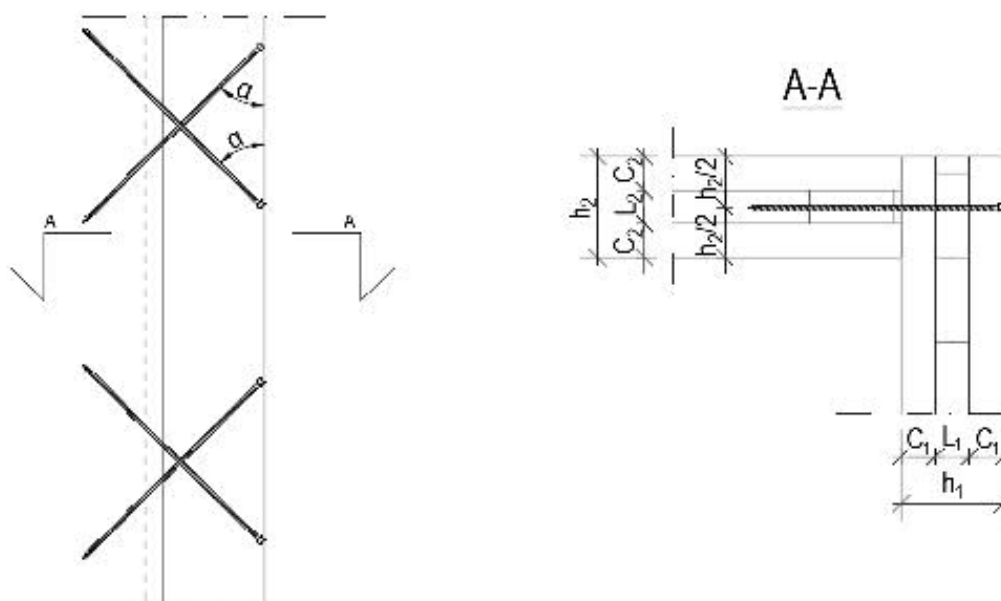
Yhden ruuvien leikkausvoimakestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot R_{v,k} = 1.667 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoimakestävyys:

$$V_{Rd} := \frac{R_d}{a_1} = 8.335 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

LIITE 4. Seinä-seinä ristiruuviliitoksen leikkauskapasiteetti:



1.0 Lähtötiedot

Käyttöluokka: 1 $k_{mod} := 1.1$ $\gamma_M := 1.3$

Aikaluokka: Hetkellinen

CLT-levytoimittaja: CrossLam Kuhmo Ltd.

Seinälevy: $h := 120 \text{ mm}$ $C := 40 \text{ mm}$ $L := 40 \text{ mm}$

C24 lamellien tiheyden ominaisarvo: $\rho_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvit: Rothoblaas VGZ 9x300 k400 Ruuvauskulmassa $\alpha := 45 \text{ deg}$

Ruuvin pituus: $L_{ruuvi} := 300 \text{ mm}$

Ruuvin nimellishalkaisija: $d := 9 \text{ mm}$

Ruuvin kierteen sisähalkaisija: $d_i := 5.9 \text{ mm}$

Ruuvin tehollinen halkaisija: $d_{ef} := 1.1 \cdot d_i = 6.49 \text{ mm}$

Ruuvin myötömomentti: $M_{y.Rk} := 27.2 \text{ N} \cdot \text{m}$

Liitinväli syrjäliitoksessa: $a_1 := 400 \text{ mm}$

Ruuvin kierteen pituus: $b := 290 \text{ mm}$

Ruuvin kannan halkaisija:	$d_h := 11.5 \text{ mm}$
Ruuvin läpivetoparametrin ominaisarvo:	$f_{head.k} := 10.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Ruuvin vetokestävyys ominaisarvo:	$f_{tens.k} := 25.4 \text{ kN}$
Ruuvin kierteisen osan pituus kannan puoleisessa CLT-levyssä:	$l_{g.1} := \frac{h}{\sin(\alpha)} - 10 \text{ mm} = 159.706 \text{ mm}$
Ruuvin kierteisen osan pituus kärjen puoleisessa CLT-levyssä:	$l_{g.2} := L_{ruuvi} - \frac{h}{\sin(\alpha)} = 130.294 \text{ mm}$

2.0 Mitta- ja etäisyys ehdot

Ruuvin minimihalkaisia syrjäliitoksessa:	$d_{min} := 8 \text{ mm}$
	$d = 9 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$
Minimi liitinväli syrjäliitoksessa:	$a_{1.min} := 10 \cdot d = 90 \text{ mm}$
	$a_1 = 400 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$
Minimi reunaetäisyys syrjäliitoksessa:	$a_{2.c.min} := 3 \cdot d = 27 \text{ mm}$
	$a_{2.c} := \frac{h}{2} = 60 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$
Ruuvaukslamellin minimipaksuus syrjäliitoksessa:	$L_{1.min} := 3 \cdot d = 27 \text{ mm} \text{ (kun } d > 8 \text{ mm)}$
	$L = 40 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$
CLT:n minimipaksuus syrjäliitoksessa:	$h_{min} := 10 \cdot d = 90 \text{ mm}$
	$h = 120 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$
Ruuvin vähimmäistunkeuma:	$t_{pen.min} := 10 \cdot d = 90 \text{ mm}$
	$t_{pen} := l_{g.2} = 130.294 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$

3.0 Liitoksen leikkauskestävyys:

Ruuvien ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kohtisuorassa syysuuntaa vastaan:

$$f_{ax,k} := 11.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{tiheydelle} \quad \rho_a := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ruuvien ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kannan puoleisissa lamelleissa kulmassa α syysuuntaan nähden:

$$f_{ax,a,k,1} := \frac{f_{ax,k}}{1.2 \cdot (\cos(\alpha))^2 + (\sin(\alpha))^2} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0.8} = 10.636 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{ax,a,k,2} := \frac{f_{ax,k}}{1.2 \cdot (\cos(90 \text{ deg}))^2 + (\sin(90 \text{ deg}))^2} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0.8} = 11.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{ax,a,k,3} := \frac{f_{ax,k}}{1.2 \cdot (\cos(\alpha))^2 + (\sin(\alpha))^2} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0.8} = 10.636 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo kannan puoleisessa CLT-levyssä RIL CrossLam Kuhmo lisäohjeiden mukaan:

$$R_{ax,k,1} := \left(f_{ax,a,k,1} \cdot d \cdot \left(\frac{C}{\sin(\alpha)} - 10 \text{ mm} \right) + f_{ax,a,k,2} \cdot d \cdot \frac{L}{\sin(\alpha)} + f_{ax,a,k,3} \cdot d \cdot \frac{C}{\sin(\alpha)} \right) = 15.83 \text{ kN}$$

Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo kärjen puoleisessa CLT-levyssä RIL CrossLam Kuhmo lisäohjeiden mukaan:

$$R_{ax,k,RIL} := \frac{f_{ax,k}}{1.2 \cdot (\cos(\alpha))^2 + (\sin(\alpha))^2} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0.8} \cdot l_{g,2} \cdot d = 12.473 \text{ kN}$$

Ruuvien ulosvetokestävyyden ominaisarvo kärjen puoleisessa CLT-levyssä Rothoblaas ETA-11/0030 ohjeen mukaan :

$$R_{ax,k,ETA} := 20 \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{l_{g,2}}{\text{mm}} \right)^{0.9} \cdot \text{N} = 9.287 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkauskestävyys RIL-lisäohjeen mukaisella ulosvetokestävyyden arvolla:

Ruuvien puristuskestävyys:

$$R_{C,k} := \min(R_{ax,k.1}, R_{ax,k.RIL}, 0.8 \cdot f_{tens,k}) = 12.473 \text{ kN}$$

Ruuvien ulosvetokestävyys:

$$R_{T,k} := \min\left(R_{ax,k.1} + f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0.8}, R_{ax,k.RIL}, f_{tens,k}\right) = 12.473 \text{ kN}$$

Ristiruuviparin ominaisleikkauskestävyys:

$$R_k := (R_{C,k} + R_{T,k}) \cdot \cos(\alpha) = 17.639 \text{ kN}$$

Ristiruuviparin leikkauskestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot R_k = 14.925 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkauskestävyys:

$$V_{Rd} := R_d \cdot \left(\frac{1 \text{ m}}{a_1}\right)^{0.9} = 34.046 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkauskestävyys Rothoblaas ETA-11/0030 ohjeen mukaisella ulosvetokestävyyden arvolla:

Ruuvien puristuskestävyys:

$$R_{C,k} := \min(R_{ax,k.1}, R_{ax,k.ETA}, 0.8 \cdot f_{tens,k}) = 9.287 \text{ kN}$$

Ruuvien ulosvetokestävyys:

$$R_{T,k} := \min\left(R_{ax,k.1} + f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0.8}, R_{ax,k.ETA}, f_{tens,k}\right) = 9.287 \text{ kN}$$

Ristiruuviparin ominaisleikkauskestävyys:

$$R_k := (R_{C,k} + R_{T,k}) \cdot \cos(\alpha) = 13.133 \text{ kN}$$

Ristiruuviparin leikkauskestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot R_k = 11.113 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkauskestävyys:

$$V_{Rd} := R_d \cdot \left(\frac{1 \text{ m}}{a_1} \right)^{0.9} = 25.349 \text{ kN}$$

4.0 Liitoksen leikkauskestävyys ruuvitoimittajan ilmoittaman leikkauskestävyyden ominaisarvon mukaan:

Ristiruuviparin leikkauskestävyyden ominaisarvo:

$$R_k := 13.6 \text{ kN}$$

Ristiruuviparin leikkauskestävyys:

$$R_d := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot R_k = 11.508 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkauskestävyys:

$$V_{Rd} := R_d \cdot \left(\frac{1 \text{ m}}{a_1} \right)^{0.9} = 26.25 \text{ kN}$$

LIITE 5. Esimerkkimallin liitosten jäykkyydet Eurokoodin mukaan

1.0 Seinä-seinä ristiruuviliitos:

CLT lamellien ominaistiheys: $\rho_m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvien halkaisija: $d := 9 \text{ mm}$

Ruuvien siirtymäkerroin:

$$K_{ser} := \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = (2.562 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Murtorajatilan siirtymäkerroin:

$$K_u := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = (1.708 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Liitoksen liitosjäykkyys murtorajatilan tarkastelussa:

$$K_{tot} := \frac{2 \cdot K_u}{400 \text{ mm}} = (8.541 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

2.0 Seinä-kattoliitos:

CLT lamellien ominaistiheys: $\rho_m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvien halkaisija: $d := 8 \text{ mm}$

Ruuvien siirtymäkerroin:

$$K_{ser} := \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = (2.278 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Murtorajatilan siirtymäkerroin:

$$K_u := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = (1.518 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Liitoksen liitosjäykkyys murtorajatilan tarkastelussa:

$$K_{tot} := \frac{2 \cdot K_u}{400 \text{ mm}} = (7.592 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

3.0 Levyjen puoliponttiliitokset:

CLT lamellien ominaistiheys: $\rho_m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvien halkaisija: $d := 6 \text{ mm}$

Ruuvien siirtymäkerroin:

$$K_{ser} := \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = (1.708 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Murtorajatilan siirtymäkerroin:

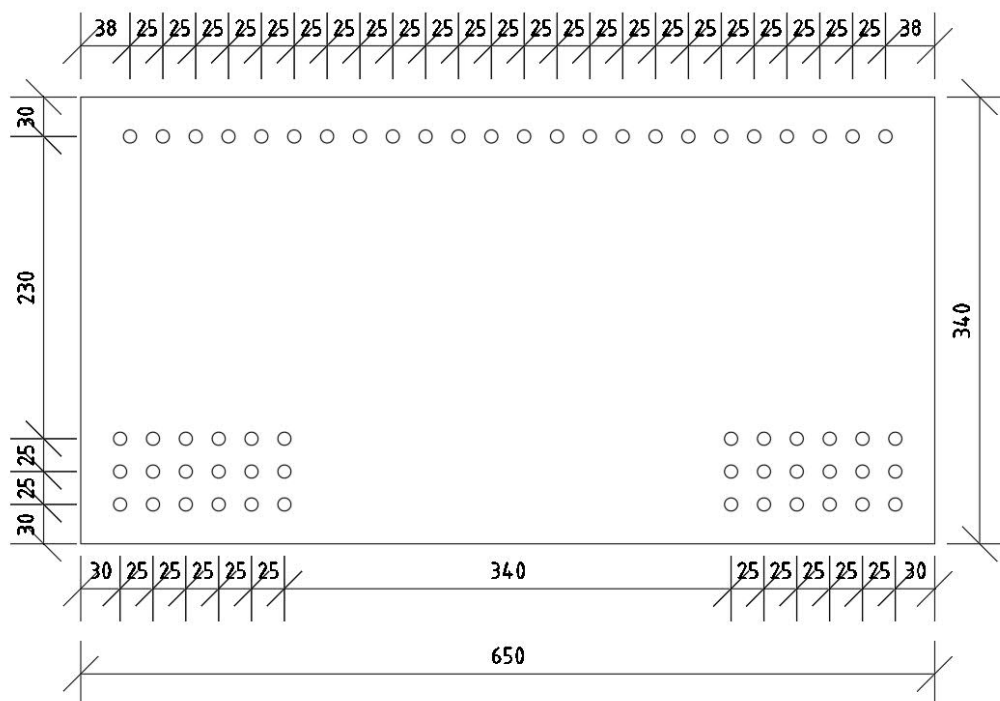
$$K_u := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = (1.139 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Liitoksen liitosjäykkyys murtorajatilan tarkastelussa:

$$K_{tot} := \frac{2 \cdot K_u}{400 \text{ mm}} = (5.694 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

4.0 Moduulien kerrosten välinen teräslevyin toteutettu liitos:

KERROSTEN VÄLINEN TERÄSLEVY

CLT lamellien ominaistiheys: $\rho_m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvien halkaisija: $d := 10 \text{ mm}$

Ruuvien siirtymäkerroin:

$$K_{ser} := 2 \cdot \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = (5.694 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{Kerrotaan 2, koska teräksen ja puun välinen liitos})$$

Murtorajatilan siirtymäkerroin:

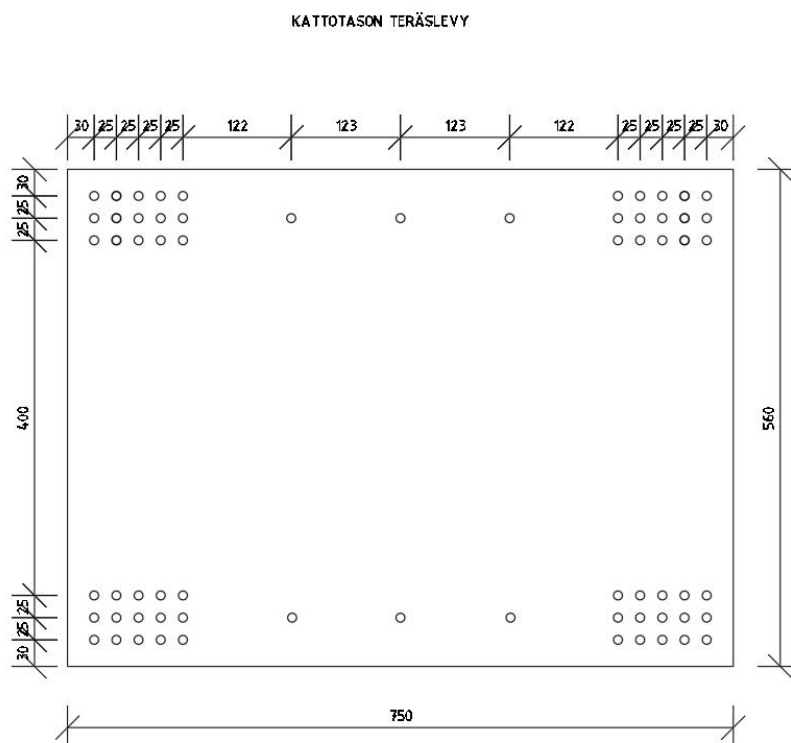
$$K_u := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = (3.796 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Yksinkertaistetaan tärinäeristimien vaikutusta ja jaetaan ruuvien siirtymäkerotimen arvo kahdella:

$$K_u := \frac{K_u}{2} = (1.898 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Liitoksen kokonaisjäykkyyteen vaikuttaa oleellisesti teräslevyn geometria, jolloin levyn kiertymä tulee huomioitua. Tämä on otettu huomioon FEM mallissa mallintamalla liitososan geometria ja ruuvien sijainti oikein.

5.0 Moduulien vierekkäinen teräslevyinen toteutettu liitos:



CLT lamellien ominaistiheys: $\rho_m := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ruuvien halkaisija: $d := 10 \text{ mm}$

Ruuvien siirtymäkerroin:

$$K_{ser} := 2 \cdot \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = (5.694 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Murtorajatilan siirtymäkerroin:

$$K_u := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = (3.796 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Yksinkertaistetaan värinäeristimien vaikutusta ja jaetaan ruuvien siirtymäkerotimen arvo kahdella:

$$K_u := \frac{K_u}{2} = (1.898 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Liitoksen kokonaisjäykkyyteen vaikuttaa oleellisesti teräslevyn geometria, jolloin levyn kiertymä tulee huomioitua. Tämä on otettu huomioon FEM mallissa mallintamalla liitososan geometria ja ruuvien sijainti oikein.

LIITE 6. Teräslevyliitosten mallinnus

Yksinkertaistuksella saavutettu sama liitossiirtymä, kuin täydellisellä liitoksen mallinnuksella.

