



Hanna Partanen

CLT-betoni-liittolaatan mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

25.04.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Hanna Partanen
Otsikko:	CLT-betoni-liittolaatan mitoitus
Sivumäärä:	85 sivua + 1 liite
Aika:	25.04.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Jenni Pellinen Kehityspäällikkö Antti Haapasalmi

Opinnäytetyön aiheena on CLT-betoni-liittolaatan mitoitus ja työn tarkoituksena oli tuottaa kyseisen rakenteen mitoittamiseen selkeä ohje, joka nojautuu nykyiseen ja tulevaan Eurokoodi 5 puurakenteiden suunnitteluohjeeseen sekä puu-betoni-liittorakenne osioon.

Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena ja toiminnallisena opinnäytetyönä. Opinnäytetyöraportin lisäksi tehtiin laskentapohja CLT-betoni-liittolaatan mitoittamiseen.

Opinnäytetyön alussa tarkasteltiin puun käytön ekologisuutta ja miksi sen käyttöä pyritään lisäämään rakentamisessa muun muassa hybridirakenteilla. Lisäksi käytiin läpi puun, CLT:n ja betonin ominaisuudet rakennusmateriaalina. Seuraavaksi keskityttiin opinnäytetyön pääaiheen CLT-betoni-liittolaatan toimintaan ja mitä etuja sen käytöllä saavutetaan. Käydään läpi käyttökohteita, joissa liittolaattaa on käytetty.

Opinnäytetyön loppuosa keskittyi liittolaatan rasituksiin ja mitoittamiseen. Rasitukset-osiossa käytiin läpi rakentamisesta aiheutuvat kuormat, valunaikaiset kuormat, lämpö- ja kosteusliikkeistä aiheutuvat kuormat, hyötykuormat ja pysyvät kuormat. Mitoitus-osiossa käytiin läpi materiaaliominaisuudet ja mitoitusarvot, leikkausliitos kolmella eri tavalla, poikkileikkauksen taivutusjäykkyys ja -jännitykset, murtorajatilamitoitus, käyttörajatilamitoitus sekä palomitoitus.

Keskeistä CLT-betoni-liittorakenteen mitoittamisessa on leikkausliitoksen toimivuus. Leikkausliitoksen tulisi olla mahdollisimman jäykkä, jotta rakenne saadaan toimimaan yhdessä. Tällöin suuremman taivutusjäykkyyden ansiosta voidaan toteuttaa liittolaatalla suurempia jännevälejä. Loviliitos on opinnäytetyössä tarkastelluista leikkausliitoksista jäykin.

Avainsanat: Hybridirakenne, CLT-betoni-liittolaatta, leikkausliitos

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Hanna Partanen
Title: Design of CLT-Concrete Composite Slabs
Number of Pages: 85 pages + 1 appendice
Date: 25 April 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Civil Engineering
Professional Major: Structural Engineering
Supervisors: Jenni Pellinen, Senior Lecturer
Antti Haapasalmi, Development Manager

The subject of the thesis is the dimensioning of the CLT-concrete composite floor and the purpose of the work was to produce a clear guideline for dimensioning the structure which is based on the existing and upcoming Eurocode 5 design guideline for wood structures and the wood-concrete composite structure section.

The thesis was carried out as literary research and as a functional thesis. In addition to the thesis report, a calculation basis was made for the dimensioning of the CLT concrete composite floor.

At the beginning of the thesis, the ecological nature of the use of wood was examined and why efforts are being made to increase its use in construction, for example with hybrid structures. In addition, the properties of wood, CLT and concrete as building material were reviewed. Next, the focus was on the operation of the CLT concrete composite floor and the benefits of its use and where the structure has been used.

The rest of the thesis focused on the stresses and dimensioning of the composite floor. The stresses section covered construction loads, run-off loads, loads from heat and moisture movements, payloads and permanent loads.

The dimensioning section covered material properties and dimensioning values, cutting jointing in three different ways, cross section bending stiffness and stresses, ultimate limit state dimensioning, serviceability limit state dimensioning, and fire dimensioning.

Essential to the dimensioning of the CLT-concrete-composite structure is the functionality of the cutting joint which should be as rigid as possible to make the structure work together. In this case, the higher bending stiffness makes it possible to implement larger spans on the composite slab. The notch joint is the stiffest of the cutting joints examined in the thesis.

Keywords: Hybrid structure, CLT-concrete-composite floor, shear connection

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön taustaa	1
1.2	Tutkimuskysymykset ja rajaus	2
2	Puun käytön ekologisuus	3
3	Hybridirakentaminen – puun käytön lisääminen rakentamisessa	4
3.1	Hybridirakenne CLT-betoni-liittolaatan hyödyt	4
3.2	CLT-betoni-liittolaatan käyttökohteita	6
4	CLT-betoni-liittolaatta	8
4.1	Puu ja CLT	8
4.1.1	Puun ominaisuudet	8
4.1.2	CLT:n ominaisuudet	9
4.2	Betonin ominaisuudet / rakennusmateriaalina	10
4.3	Toiminta liittorakenteena	11
4.3.1	Leikkausliitos	12
4.3.2	Liitostapoja	13
5	Laatan rasitukset	17
5.1	Rakentamisesta aiheutuvat kuormat	17
5.2	Valunaikaiset kuormat ja valutuet	18
5.3	Lämpö- ja kosteusliikkeiden sekä betonin kutistuman aiheuttamat sisäiset rasitukset	19
5.3.1	Lämpöliikkeet	19
5.3.2	Kosteusliikkeet	21
5.3.3	Betonin kutistuma	23
5.4	Hyötykuormat	24
5.5	Pysyvät kuormat	26
5.6	Kuormitusyhdistelmät	26
6	Laatan mitoitus	28
6.1	Materiaaliominaisuudet ja mitoitusarvot	28

6.1.1	CLT:n ja betonin välinen leikkausliitos	34
6.1.2	Liittimiin vaikuttavat voimat	36
6.1.3	Loviliitos	38
6.1.4	VB-ristiruuvausjärjestelmä	41
6.1.5	Kohtisuoraan leikkauspintaan nähden kiinnitetyt puikkoliittimet 44	
6.2	Poikkileikkauksen taivutusjäykkyys ja jännitykset	49
6.2.1	Taivutusjäykkyys laajennetulla gammamenetelmällä	50
6.2.2	Normaali- ja taivutusjännitykset	54
6.2.3	Leikkausjännitykset	55
6.3	Murtorajatilamitoitus	57
6.3.1	CLT:n taivutuskestävyys	57
6.3.2	CLT:n yhdistetty veto- ja taivutuskestävyys	57
6.3.3	CLT:n tukipainekestävyys	58
6.3.4	CLT:n leikkauskestävyys	60
6.3.5	Betonin puristuslujuus	61
6.3.6	Betonin vetolujuus	62
6.3.7	Betonin tasonsuuntainen leikkauslujuus	62
6.3.8	Betonin kartiomurto vedetyn liittimen kohdalla	66
6.3.9	Liittimen ulosvetokestävyys betonista	67
6.4	Käyttöraajatilamitoitus	69
6.4.1	Taipuma	69
6.4.2	Värähtely	71
6.5	Palomitoitus	78
6.5.1	Leikkausliitos palossa	79
6.5.2	Teräsbetoni palossa	79
6.5.3	CLT palossa	80
6.5.4	Palosuojaus	83
7	Yhteenveto	83
	Lähteet	86
	Liitteet	
	Liite 1: Kuva laskentapohjan aloitussivusta	

Lyhenteet

- CLT: *Cross Laminated Timber*. CLT-levy, joka koostuu yksittäisistä ristiin liimatuista puulevyistä.
- HYBRITUT: *Vähähiiliset rakentamisen hybridiratkaisut*. Tutkimushanke, joka edistää rakennetun ympäristön vähähiilisyttä. Hankkeessa tutkitaan hybridiratkaisuja ja niiden vaikutuksia ympäristöön.
- GCWood: *Green Construction Through Wood*. Kanadan päästövähennyksiin tähtäävä ohjelma, joka kannustaa innovatiivisten puupohjaisten rakennustekniikoiden käyttöön ottamista rakennushankkeissa.

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön taustaa

Kansallinen ilmasto- ja energiastrategia linjaa toimia, joilla Suomi saa toteutettua EU:n vuoden 2030 ilmastovelvoitteet ja saavutetaan kasvihuonekaasujen vähentäminen 60 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. Suomi on sitoutunut vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteen ja esimerkiksi Helsingin tavoite on olla hiilineutraali jo vuoteen 2030 mennessä. (1; 2.)

Jotta Suomi pystyisi saavuttamaan kansalliset ja kansainväliset ilmastotavoitteet, rakennussektorin hiilidioksidipäästöjä on vähennettävä. Rakentaminen ja rakennukset tuottavat nykyisellään Suomen kasvihuonekaasupäästöistä noin kolmanneksen. Puurakentaminen on tärkeä osa ilmastotavoitteeseen pääsemistä, sillä rakennusmateriaalina puu sitoo hiiltä. Tavoitteisiin pääseminen edellyttää puun käytön laajentamista sekä puurakenteiden ja -tuotteiden kehittämistä. Puurakentamisen ohjelma oli vuonna 2016–2023 toteutettu ympäristöministeriön ja valtioneuvoston yhteinen ohjelma, jonka tavoitteena oli monipuolistaa ja kasvattaa puun käyttöä ja sen jalostusarvoa sekä edistää kansainvälisesti kilpailukykyistä puurakentamisen osaamista ja teollisen valmistuksen yritystoimintaa Suomessa. Myös vuoden 2019 hallitusohjelmassa tavoitteena oli kaksinkertaistaa puun käyttö rakentamisessa hallituskauden aikana. (2; 3; 4.)

Uusi maankäyttö- ja rakennuslaki astuisi lakiesityksen mukaan voimaan

1.1.2025. Lain uudistuksessa on vastattu päästötavoitteisiin edellyttämällä rakentamisen vähähiilisyttä ja uusiutuvan energian käyttöä. Rakentamislupaa hakiessa tulee tehdä ilmastaselvitys, jossa raportoidaan rakennuksen hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki koko rakennuksen elinkaaren ajalta tai laajamittaisesti korjattavan rakennuksen korjauksen ja sen jälkeisen elinkaaren vaiheet. Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan rakennuksen elinkaaren aikana syntyvien kasvihuonekaasujen kokonaismäärää ja hiilikädenjäljellä ilmastomuutosta hidastavia tekijöitä, joita ei syntyisi ilman hanketta. (5.)

Kaavoituksella pyritään ohjaamaan puurakentamisen lisäämistä Suomessa. Puurakentamisen edistämisen ja ohjauksen keinot kaavoituksessa -oppaan mukaan yleisesti käytössä olevassa kaavamääräyksessä ”pääosin puuta” keskeistä on, että asuinkerrosten kantava rakennejärjestelmä on puuta ja rakennus on olennaisilta osin puurakenteinen. Tämän tarkoituksena on antaa joustava toteutusmahdollisuus erilaisille puurakentamisjärjestelmille ja edistää puurakentamisen kehittymistä eikä rajata pois hybridirakenteita, kuten puuta ja betonia yhdistäviä rakenteita. (4.)

Puurakenteiden käyttöä pyritään kasvattamaan erilaisilla hybridirakenteilla. CLT-betoni-liittolaatan käyttämisellä päästään pidempiin jänneväleihin kuin pelkällä CLT:llä, joka on hyödyksi etenkin julkisessa rakentamisessa. CLT-betoni-liittolaatan mitoitukseen ei ole kuitenkaan Suomessa vielä voimassa olevaa Eurokoodia tai muuta mitoitusohjetta. Uusien seuraavan sukupolven eurokoodien käyttöönotto on arviolta vuosina 2025 ja näissä CLT ja puu-betoni-liittorakenteet huomioidaan. (6.) Koska CLT-betoni-liittorakenteen kysyntä on Suomessa kasvussa, tarvitaan rakenteen mitoittamista helpottava työkalu.

1.2 Tutkimuskysymykset ja rajaus

Opinnäytetyön tilaajana on suunnittelu- ja konsulttiyritys AFRY Buildings Finland Oy. Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä CLT-betoni-liittolaatan mitoittamiseen selkeä laskentapohja sekä käsitellä rakenteen ominaisuuksia ja mitoittamisen kulkua. Tavoitteena on tuottaa laskentapohja, jota voidaan käyttää helpottamaan liittolaatan mitoitusta. Opinnäytetyössä tarkastellaan myös kyseisen rakenteen käyttökohteita.

Opinnäytetyössä käsitellään liittolaatan leikkausliitos useammalla eri liitostavalla ja mitoitus murtorajatilassa, käyttörajatilassa sekä rakenteen palomitoitus. Opinnäytetyö rajataan käsittelemään laattoja yksiaukkoisina ja yhteen suuntaan kantavina liittorakennevaiheessa ja valun aikana moniaukkoisina, jos käytetään valutukia.

2 Puun käytön ekologisuus

Suomalainen puu on sekä uusiutuva että karttuva luonnonvara. Metsien vuosittainen kasvu on suurempaa kuin poistuma. (7.)

Suomen metsissä kasvaa vuosittain noin 110 miljoonaa kuutiometriä runkopuuta. Kasvaessaan yksi kuutiometri (m^3) sitoo itseensä noin tonnin hiilidioksidia ilmakehästä ja samalla fotosynteesissä ilmakehään vapautuu happea noin 700 kg. Puun sitoma hiilidioksidi säilyy rakenteissa pitkään hiilivarastona, vähintään rakennuksen elinkaaren ajan. Rakennusten elinkaari on samaa mittaluokkaa kuin metsien kiertoaika Suomessa, joten puurakentamisen raaka-aineiden hankinta on pitkällä tähtäimellä kestävä. Kasvaessaan metsät ovat hiilinieluja ja puurakennukset ja -tuotteet ovat hiilivarastoja. Puun käyttö rakennusmateriaalina muiden rakennusmateriaalien sijasta vähentää keskimäärin hiilidioksidipäästöjä 1,1 tonnia. Puun käyttö rakentamisessa vähentää merkittävästi rakentamisen hiilijalanjälkeä, sillä sen avulla säästetään keskimäärin kaksi tonnia hiilidioksidipäästöjä per kuutiometri (m^3) puuta, kun huomioidaan sekä puumateriaaliin sitoutunut hiilidioksidi että rakennusmateriaalivalinnalla säästynyt hiilidioksidi. (3; 6; 8; 9; 10.)

Puutuotteiden ja -rakenteiden valmistus kuluttaa vähän energiaa. Suuri osa tarvittavasta energiasta perustuu uusiutuviin energialähteisiin ja saadaan valmistuksessa saatavista sivutuotteista, kuten puun kuoresta. Elinkaarensa lopuksi puutuotteet voidaan kierrättää tai muuttaa energiaksi. Puutuotteiden valmistuksessa syntyy suhteellisen vähän hiilidioksidipäästöjä. Puuhun sitoutunut hiilidioksidin määrä on moninkertainen verrattuna valmistuksen aiheuttamiin päästöihin. (7.)

3 Hybridirakentaminen – puun käytön lisääminen rakentamisessa

Hybridirakentaminen on kansainvälisesti kasvamassa ja kehittymässä vähähiilisenä rakentamisen tapana. Hybridirakentamisessa yhdistetään puuta, terästä ja betonia niin, että jokaisen rakennusmateriaalin ominaisuudet hyödynnetään parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Puun käyttö hybridirakentamisessa on keskeisessä roolissa sen vähähiilisyyden ansiosta. (11.)

Hybridirakentaminen on vielä suhteellisen uutta, joten se edellyttää merkittävää tutkimustyötä uusien ratkaisujen kehittämiseksi, vakioimiseksi ja käyttöönottamiseksi. Hämeen ammattikorkeakoulu on vetävänä osapuolena HYBRITUT-tutkimushankkeessa, jossa edistetään vähähiilistä hybridirakentamista, hybridirakenteisiin liittyvän ekosysteemin muodostumista sekä alan yritysten kansainvälistä vientiä. Mukana hankkeessa on useita hybridirakentamisen suomalaisia yrityksiä, kuten AFRY Buildings Finland Oy, sekä portugalilainen Coimbra yliopisto. (11.) HYBRITUT-hankkeella halutaan alentaa rakentamisen hiilijalanjälkeä kehittämällä myös muun muassa purettavia, uudelleenkäytettäviä ja paloturvallisia liittämISRatkaisuja. Näin saadaan pidennettyä rakenteiden elinkaarta, kun ne voidaan tarvittaessa purkaa ja käyttää uudelleen. (12.)

Kanadassa uusiutuvien rakennusmateriaalien lisääntynyt kysyntä on muuttanut suunnittelun ja arkkitehtuurin suuntaa. Kysynnän kasvu on synnyttänyt ympäristöystävällisempiä innovaatioita, kuten muun muassa CLT:n ja jälkijännitetyn betonin yhdistelmä. Hanketta rahoitetaan Green Construction Through Wood (GCWood) -ohjelmalla, joka kannustaa puun laajempaan käyttöön rakentamisessa ja tukee Kanadan siirtymistä vähähiiliseen talouteen. (13.)

3.1 Hybridirakenne CLT-betoni-liittolaatan hyödyt

CLT-betoni-liittolaattaa voidaan käyttää rakennuksen välipohjaan eli lattiarakenteena. Lattiarakenteen on täytettävä samanaikaisesti useita vaatimuksia, kuten

kantavuus, palonkestävyys ja ääneneristys. Puurakenteiset välipohjat ovat yksi teknisesti haastavimmista rakennusosista puurakentamisessa. (14 s. 151).

Pelkän CLT-välipohjan ongelmana on, että matalataajuisista ääntä on vaikea eristää. Keveytensä takia se on herkkä värähtelylle erityisesti matalilla taajuuksilla. Askeläänien matalien taajuuksien korkeat äänenpainetasot aiheuttavat rakenteessa värähtelyä ja heikentävät näin rakenteen askelääneneristävyttä. Lisäämällä puurakenteiseen välipohjaan, kuten CLT-välipohjaan, massaa saadaan parannettua rakenteen askelääneneristävyttä. Massaa lisätään yleisesti betoni- tai tasoitevaluilla ja se voidaan toteuttaa kelluvana esimerkiksi askeläänieristeen päälle tai liittorakenteena. (15.)

CLT-betoni-liittolaatassa käytetään leikkausliitintä puuosan liittämiseen betoni-osaan, jolloin saadaan lisättyä rakenteen taivutusjäykkyyttä. Liittorakenteella on huomattavasti suurempi taivutusjäykkyys kuin vastaavan korkuisella puulattiarakenteella. Liittorakenteella voidaan toteuttaa suurempia jännevälejä suuremman taivutusjäykkyyden ja betonimassan värähtelyjä vaimentavan vaikutuksen ansiosta. (14 s. 92.)

Liittorakenteesta on hyötyä myös betonilaatan jäykkyydestä lattiarakenteen tasossa, jolloin esimerkiksi tuulen aiheuttama vaakasuuntainen kuormitus voidaan jakaa tasaisesti pystysuorille kantaville osille. (14 s. 92.) Omanpainon kasvu stabiloi ja vähentää jäykistävien seinien vetorasituksia, etenkin korkeassa rakentamisessa.

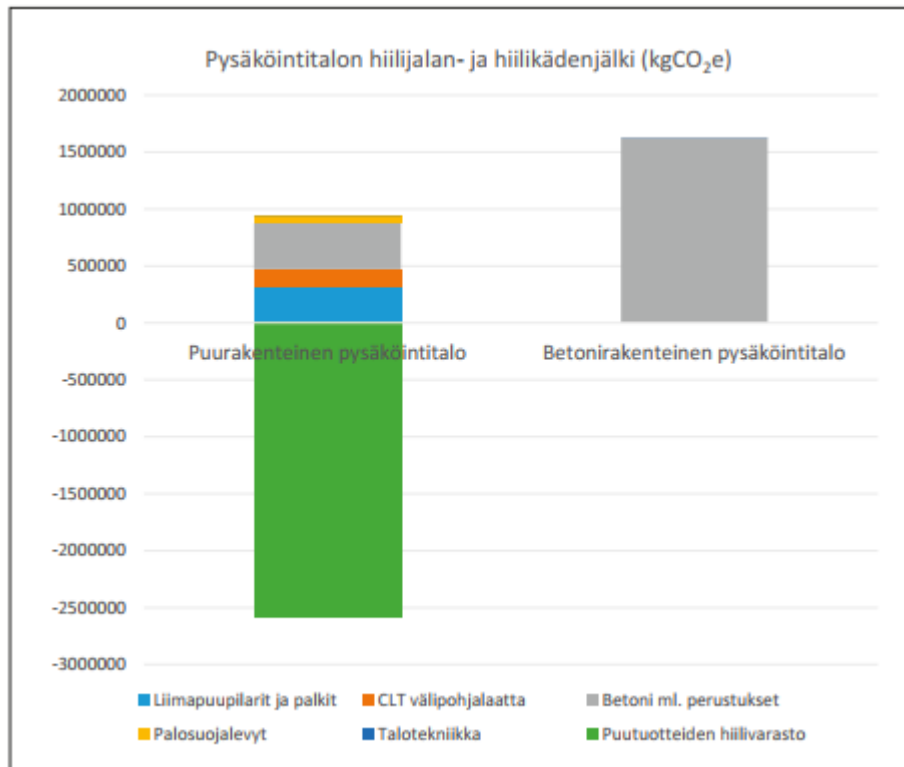
CLT-betoni-liittolaatan hyötyjä on sen pienempi hiilijalanjälki verrattuna saman jännevälin saavuttavaan massiivibetonilaattaan. Liittolaattaa käyttämällä vähennetään betonin käyttöä ja lisätään puun käyttöä, jotka molemmat toimet vähentävät hiilidioksidipäästöjä.

3.2 CLT-betoni-liittolaatan käyttökohteita

CLT-betoni-liittorakennetta on hyödynnetty Suomessa viime vuosina julkisessa rakentamisessa.

Useissa suomalaisissa puurakenteisissa koulu- ja päiväkotirakennuksissa on viime vuosina käytetty CLT-betoni-liittolaattaa. Hopealaakson päiväkotit valmistui vuonna 2021 Helsingin Kruunuvuorenrantaan. Päiväkodissa on käytetty välipohjana teräspalkkien varaan asennettuja CLT-betoni-liittorakennetta, jossa on 140 mm betonia ja 140 mm CLT:tä. Oletettavasti tämä rakenneratkaisu oli ensimmäisen kerran käytössä Suomessa. Päiväkotit voitti vuoden 2021 Puupalkinon. (16; 17.) Inkooseen valmistui vuonna 2023 Kirkkolahden koulu (Kyrkfjärdens skola), joka on yhdistelmä CLT-massiivipuuta ja huolella valittuja betonirakenteita. Koulun välipohjat on toteutettu teräspalkkien varaan asennetulla CLT-betoni-liittorakenteella. (18.) Helsingin Verkkosaaren asuinalueelle valmistui alkuvuodesta 2023 Verkkosaaren päiväkotit, jossa on myös käytetty välipohjarakenteena teräspalkkien varaan asennettua CLT-betoni-liittorakennetta. (19.) Helsingin luonnontiedelukio Kumpulassa valmistui vuonna 2023. Rakennuksen välipohjat on toteutettu CLT-betoni-liittolaatoilla ja delta- ja liimapuupalkeilla. (20.)

Helsingin kaupungilla on konseptisuunnittelu puurakenteiselle pysäköintilaitokselle, jossa pysäköintilaitoksen välipohjana toimii CLT-betoni-liittolaatta. Hankkeen parkkitalot suunniteltiin Helsingin Kuninkaantammeen sekä Vantaan Kivistöön. Näillä asuinalueilla on painotettu puurakentamista ja muita ympäristöystävällisiä rakennusratkaisuja. (2.) Ruotsissa on toteutettu Skellefteån puurakenteinen pysäköintitalo, jonka välipohja on hybridirakenteinen. Rakenne ei ole täysin vastaava CLT-betoni-liittolaattaa, mutta rakenteessa on käytetty liimapuupalkkien ohella CLT:tä ja kulutuskerroksena betonia. Pysäköintitalosta on laskettu hiilijalan- ja kädenjälki ja kuvasta 1 nähdään vertailu betonirakenteiseen pysäköintitaloon. (21 s. 58–62.)



Kuva 1. Puu- ja betonirakenteisen pysäköintihallin hiilijalan- ja hiilijalanjäljen vertailu (21 s. 62).

CLT-betoni-liittolaattaa voidaan käyttää myös lisärakentamisessa palosuojauksena, kuten Joensuun KOY Kirkkokatu 18-hankkeessa. Hankkeessa päädyttiin ratkaisuun, jossa kaksi lisäkerrosta on P2-luokan rakennusta P1-luokan rakennuksen päällä. Eri paloluokissa olevat rakennukset tulee erottaa toisistaan palomuurilla. Rakentamismääräyskokoelma ei nykyisellään tunne vaakasuuntaista palomuuria, mutta se on mahdollista suunnitella vanhan ja uuden osan väliin toiminnallisella palomitoituksella. CLT-laatoista ja betonipintavalusta suunniteltiin liittolaatta, palopermanto, joka muodostaa EI-M 120-luokan rakenteen uuden ja vanhan osan väliin. CLT-osa on 150 mm paksu, ja vinoruuvikiinnitteinen betoniosa 80 mm paksu. (22.)

CLT-betoni-liittorakennetta on käytetty Suomen ulkopuolella jo aiemmin. Vuonna 2005 Englannissa Cambridgeshiressä suunniteltiin ja toteutettiin Thomas Clarkson kouluun tanssilattia, joka toteutettiin CLT-betoni-liittolaatalla. Lattian

jänneväli oli 10 metriä. Liittorakenteessa käytettiin 300 mm CLT-kerrosta ja 100 mm betonikerrosta. Leikkausliitos toteutettiin 105 mm syvillä HBV-verkkoteräslevy liittimillä 200 mm välein. Rakenteella saavutettiin noin 3,5 kertaa suurempi jäykkyys kuin pelkällä CLT:llä rakennetulla lattialla. (23.)

CLT-betoni-liittolaattaa tullaan tulevaisuudessakin käyttämään julkisessa puurakentamisessa. Esimerkiksi päiväkotit Tuulin hankesuunnitelmassa marraskuulta 2023 on kirjattu välipohjarakenteeksi CLT-betoni-liittolaatta. (24.)

4 CLT-betoni-liittolaatta

4.1 Puu ja CLT

4.1.1 Puun ominaisuudet

Rakennuspuulajeina yleisimmin käytettyjä on mänty ja kuusi. Ne ovat ominaisuuksiltaan melko lähellä toisiaan. Lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiltaan ne ovat samanlaisia, mutta niiden kosteuskäyttäytymisessä on eroja (25; 26.)

Puun lujuus on verrannollinen puun tiheyteen. Puun lujuuteen vaikuttaa oleellisesti myös se, missä suunnassa syitä vastaan kuormitusta tulee. Puu on anisotrooppinen materiaali eli sen ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Puun syiden suuntainen vetolujuus on yleensä 10–20 kertainen verrattuna lujuuteen kohtisuoraan syitä vastaan. (25)

Puu on hygroskooppinen materiaali eli sillä on kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta ilman suhteellisen kosteuden vaihteluiden mukaan asettuen aina tasapainokosteuteen ympäristönsä kanssa. Kosteuden vaihteluiden takia puu kutistuu, turpoaa tai muuttaa muotoaan. Anisotrooppisuuden vuoksi puun pitkittäissuuntainen kosteuseläminen on vähäisempää kuin poikittaissuuntainen. (26.)

Puu on kevyt materiaali, joten sen ääneneristyskyky ei ole kovin hyvä. Puu johdattaa ääntä paremmin syiden pituussuunnassa kuin syitä vastaan kohtisuorassa. (27.)

4.1.2 CLT:n ominaisuudet

CLT (*Cross Laminated Timber*) on teollisesti valmistettava puutavaratuote, joka koostuu ristiin liimatuista sahatavarakerroksista. CLT on insinööripuutuote, jonka on kehittänyt professori Gerhard Schickhofer 1990-luvulla. (23.) Puutavarana käytetään tavallisimmin kuusta tai mäntyä. Kerroksia on useita, tavallisesti kolme tai viisi, mutta tarvittaessa enemmän ja kerroksia on yleensä pariton määrä, jolloin poikkileikkaus on symmetrinen. Ristikkäisen rakenteensa vuoksi ristiin laminoidut puuelementit ovat hyvin mittapysyviä ja voivat myös siirtää kuormia sekä pituussuunnassa että poikittain pääkantavaan suuntaan. Pääsääntöisesti eri levykerroksilla on sama paksuus, mutta sisäkerrokset voivat olla myös paksumpia tai ohuempia, tarkemmat tiedot levyjen poikkileikkauksista löytyvät valmistajakohtaisista hyväksynnöistä. (14; 28; 29.)

Ristiin liimatulla puutavaralla on erinomaiset lujuus- ja jäykkyysominaisuudet. Eri suuntiin liimatuilla kerroksilla on vaikutuksia levyn kantavuuteen eri suunnissa. (14.) Omaan painoonsa nähden CLT-levyillä on suurempi kantavuus kuin useimmilla muilla rakennusmateriaaleilla, minkä vuoksi siitä voidaan rakentaa suuria rakenteita kestäväksi suurilla kuormilla. CLT:llä voidaan toteuttaa minkälaisia muotoja tahansa, jonka vuoksi on laajat mahdollisuudet käyttää puuta monella tavalla, kuten kerrostaloissa, halleissa ja urheiluareenoilla. (14.)

CLT:llä on lujuusominaisuuksiltaan yhtäläisyyksiä muiden puutuotteiden kanssa, lujuus vaihtelee jännitys- ja syysuunnan välisen kulman mukaan, lujuus laskee kosteuspitoisuuden noustessa ja kuormituksen ajan kasvaessa. CLT:n lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti on käytännössä sama kuin massiivipuulla. CLT:n rakenne ristiin liimatuilla kerroksilla tasoittaa puun variaatioita ja pienentää ominaisuuseroja eli saadaan vähennettyä puun anisotrooppista käyttäytymistä ja vähennettyä muun muassa kosteuteen liittyviä muodonmuutoksia.

Ristiin liimatut kerrokset vähentävät syysuunnassa tapahtuvaa laajenemista ja kutistumista verrattuna massiivipuuhun. (14; 23.)

CLT-levyjen suuri puumäärä vaikuttaa sisäilmastoon tasoittamalla ilmastovaihteluita. (8; 14).

4.2 Betonin ominaisuudet

Betoni on sementistä, runkoaineksista ja vedestä valmistettu kovettuva massa. Betonin tärkein ominaisuus on sen kyky kestää suuria puristusrasituksia. Puristuslujuutta voidaan säädellä sementin ja veden suhteellista määrää muuttamalla. Peruseriaatteena on, että mitä enemmän sementtiä ja näin ollen vähemmän vettä, saavutetaan korkeampi lujuus. (30.) Ljuuutta voidaan säädellä myös useilla lisäaineilla. Betoni luokitellaan puristuslujuuden perusteella lujuusluokkiin ja muut mekaaniset ominaisuudet saadaan lujuusluokan perusteella. (31.)

Betoni kestää huonosti vetolujuuksia, suuruus on vain noin 5–8 % puristuslujuudesta, jonka vuoksi vetorasituksia varten betoniin asennetaan raudoitusta, joka voi olla harjaterästä, jännepunoksia tai erilaisia kuituja. Teräsbetoni eli betonin ja raudoituksen yhdistelmämateriali hyödyntää molempien materiaalien ominaisuuksia. Betoni antaa teräsbetonille hyvän puristuskestävyyden ja rauditus veto- ja taivutuskestävyyttä. Betoni suojaa raudoitusta korroosiolta ja hidastaa tulipalotilanteessa raudoituksen lämpenemistä ja pehmenemistä. Betonin ja raudoituksen yhteistoiminta vaatii, että muodonmuutokset ja jännitykset siirtyvät raudoituksen ja betonin välisen tartunnan vaikutuksesta betonista raudoitukselle ja raudoitukselta betonille. (30; 31.)

Betonin kuivuessa ja kovettuessa se myös kutistuu. Kutistuminen johtuu sekä kuivumisen että hydrataatioreaktion aiheuttamasta tilavuuden muutoksesta. Näitä kutsutaan kuivumiskutistumaksi ja sisäiseksi kutistumaksi, kokonaiskutistuma on näiden summa. Kosteassa ympäristössä betoni kuivuu vähemmän ja kuivumiskutistuma jää pieneksi. Kutistuman takia betonille muodostuu halkeilu-

riski. Halkeiluriskiä voidaan pienentää ja rajoittaa huolellisella suunnittelulla, betonin jälkihoidolla tai käyttämällä liikuntasauvoja. (31.)

Betonin ominaisuutena on ajan kuluessa tapahtuma viruma. Viruma näkyy rakenteissa vähitellen lisääntyvänä taipumana. Viruman suuruuteen vaikuttavat betonin ikä kuormitushetkellä, lujuusluokka, ympäristön kosteus, rakenteen mitat, kuormituksen aiheuttama jännitystaso ja kuormituksen kesto. (31 s. 43.)

Betonilla on lujuutensa, jäykkyytensä ja massan vuoksi kyky vaimentaa värähtelyä ja eristää ääntä (30; 31).

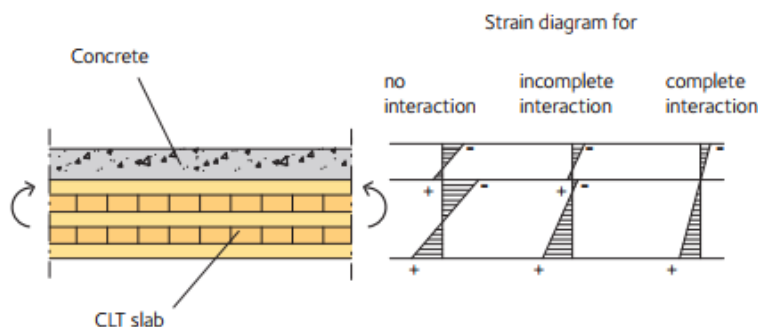
Betonissa käytettävän sementin valmistuksessa käytetään runsaasti energiaa. Lisäksi kalkkikivestä irtoaa huomattava määrä hiilidioksidia sitä kuumennettaessa. (32.)

4.3 Toiminta liittorakenteena

Liittolattiarakenteet puusta ja betonista ovat olleet käytössä jo pitkään. CLT-betoni-liittorakenne on tutkimusten perusteella osoittautunut keskimäärin 3–5 kertaa lujemmaksi kuin perinteiset puu- tai betonirakenteet. (14; 23.) CLT-betoni-liittorakenteella saavutetaan parannettu jäykkyys, suuri taivutus- ja taipumakestävyys, suuri kantavuus, hyvä dynaaminen käyttäytyminen ja erinomainen ääni- ja lämmöneristys. Liittorakenteella voidaan tehdä 7–15 metriä pitkiä lattiarakenteita. (23.)

Perusajatuksena liittorakenteen käytössä on eri materiaalien hyödyntäminen siellä, missä niille tyypillisiä ominaisuuksia pystytään hyödyntämään parhaiten. CLT-betoni-liittorakenteessa hyödynnetään betonin korkeaa puristuslujuutta ja CLT:n vetolujuutta. Jotta rakenne toimisi tehokkaasti, liittorakenteen neutraaliakselin tulisi sijaita lähellä puun ja betonin rajapintaa, jotta varmistetaan molempien materiaalien ominaisuuksien optimaalinen hyödyntäminen, kun betoni altistuu pääosin puristukselle ja puu on vetorasitettuna. Jos puu ja betoni ovat jäykästi kiinni toisissaan, poikkileikkauksella on vain yksi neutraaliakseli ja rasi-

tus on vakio koko poikkileikkaukseltaan. Jos puun ja betonin välillä ei siirry leikkausvoimia, katsotaan lattiarakenteen koostuvan kahdesta erillisestä osasta. (14; 34 s. 9.) Kuvasta 2 nähdään, kuinka taivutusjännitys jakauma on lineaarinen betonin ja CLT:n välillä, kun osat ovat jäykästi kiinni toisissaan (oikea reuna) ja kuinka jännitys jakaumat ovat erilliset betonilla ja CLT:llä, kun liitos ei siirrä leikkausvoimia (vasen reuna).



Kuva 2. Liittolattiarakenteen poikkileikkauksen taivutusjännitys jakauma leikkausliitoksen eri jäykkyyksillä (14 s. 93).

4.3.1 Leikkausliitos

Jotta liittorakenne toimisi kunnolla yhdessä, leikkausliitoksen tulee olla mahdollisimman jäykkä. Leikkausliittimet pitävät yllä voimatasapainoa liittorakenteen puristusrasitetun yläosan ja vetorasitetun alaosan välillä ja vastustavat liittorakenteen taivutuksessa rakenteeseen syntyvää liukumaa. Mitä jäykempi leikkausliitos on, sitä pienempi liukuma, jonka myötä rakenteella on suurempi taivutusjäykkyys. (34 s. 9–10.)

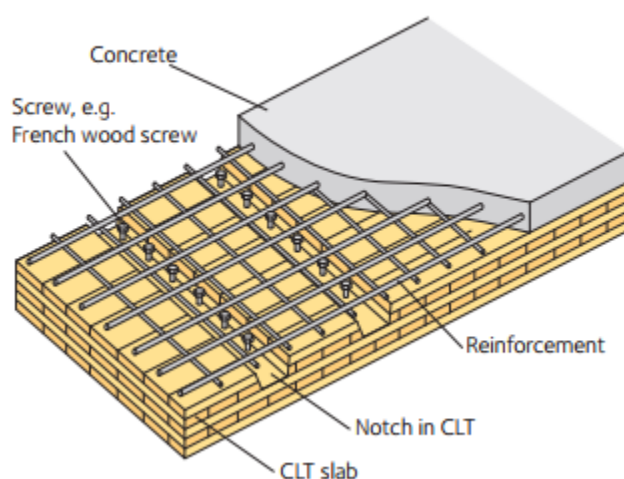
Leikkausliittimillä on suuri vaikutus lattiarakenteen toimintaan. Leikkausliittimien valintaan tulee kiinnittää huomiota, niiden tulee olla mahdollisimman jäykät ja samalla myös nopeat ja helpot asentaa. (14 s. 93.)

4.3.2 Liitostapoja

Liittorakenteen leikkausliitoksen toteuttamiseen on useita eri tapoja.

Kohtisuoraan leikkauspintaan nähden kiinnitetyt puikkoliittimet, naulat, pultit ja ruuvit eivät ole kovin jäykkiä eivätkä yhtä kestäviä verrattuna vaihtoehtoihin liitoksiin. Näitä voidaan käyttää kuitenkin suhteellisen pienillä jänneväleillä. Raudoitusterästeilla saadaan liitoksesta jäykempi. Raudoitusteräksestä tehty tappiliitos asennetaan kohtisuoraan syytä vasten puuhun käyttäen epoksia. (34 s. 29.)

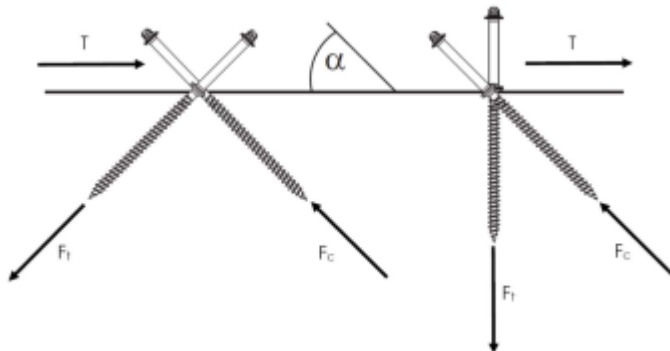
Loviliitos on suhteellisen jäykkä ja kestävä liitos CLT:n ja betonin välillä. CLT:n ja betonin hyvä vuorovaikutus varmistetaan leikkaamalla lovi CLT-laatan yläpinnasta, joka tapahtuu jo tehtaalla. Leikkausvoiman ja loven epäkeskisyys huomioidaan ristikkomallin mukaisesti käyttämällä pystysuoraa ruuvia vetotankona lovessa ja betonia puristussauvana. (14 s. 93; 34 s. 31.)



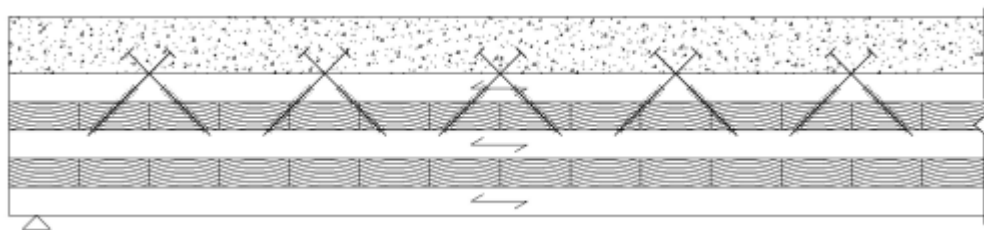
Kuva 3. CLT-betoni-liittorakenteen loviliitos (14 s. 94).

SFS Intecin VB-ristiruuvajärjestelmä muodostuu ruuvipareista, jotka ovat vierekkäin 20 mm:n etäisyydellä toisistaan syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Toinen ruuveista on vedetty ja toinen puristettu ristikkomallin mukaan. Ruuviparin mahdolliset kulmat syysuuntaan ovat $\alpha = \pm 45^\circ$ tai $\alpha = 45^\circ / 90^\circ$ ja nämä on esitetty kuvassa 4. (35 s. 9)



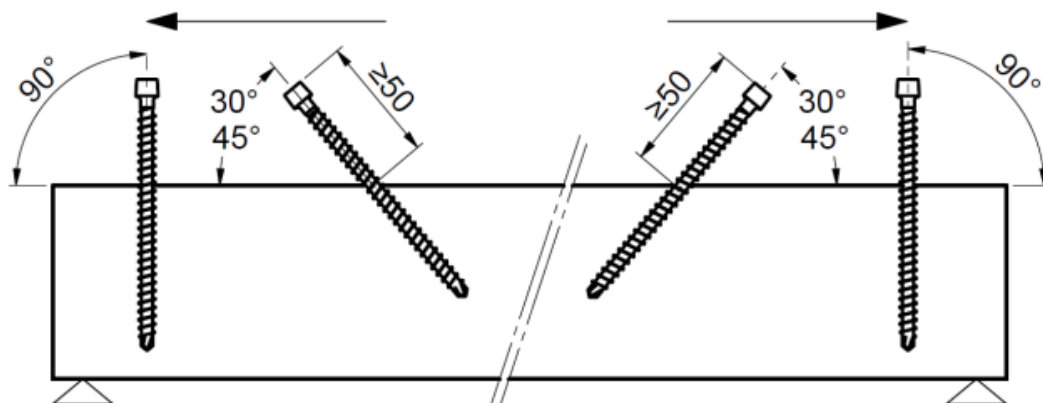
Kuva 4. VB-ristiruuviparin asennusjärjestelmä (35 s. 9).



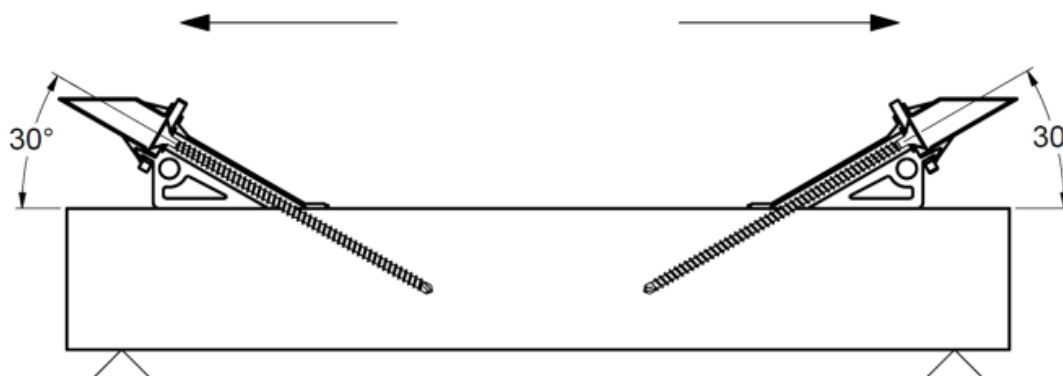
Kuva 5. Ristiruuvauusjärjestelmän periaate kuva CLT-betoniliittorakenteessa (41 s. 16).

Würth ASSY plus VG-ruuveilla ja vastaavilla uudemmilla Assy plus VG CS tai -CH -täyskierreruuveilla on eurooppalainen hyväksyntä käytettäväksi puu-betoni-liittorakenteissa leikkausliittimenä. Ruuvit voidaan laittaa joko 90° -, 45° - tai 30° -kulmassa CLT:n pinnasta. Vinoruuvit ovat vedettyinä. FT-liitintä käytetään halkaisijaltaan 10 mm ruuveilla, jotka ovat $\alpha = 30^\circ$:n kulmassa. FT-liitintä ei kuitenkaan kannata käyttää paikallavaluissa, koska ne ovat vähemmän jäykkiä kuin pienemmät ruuvit ilman FT-liitintä. Niitä voidaan käyttää esivalmistettuun teräs-

betonilaattaan, joka asennetaan vasta kovettumisen ja osittain kutistumisen jälkeen CLT:n päälle. (36.)

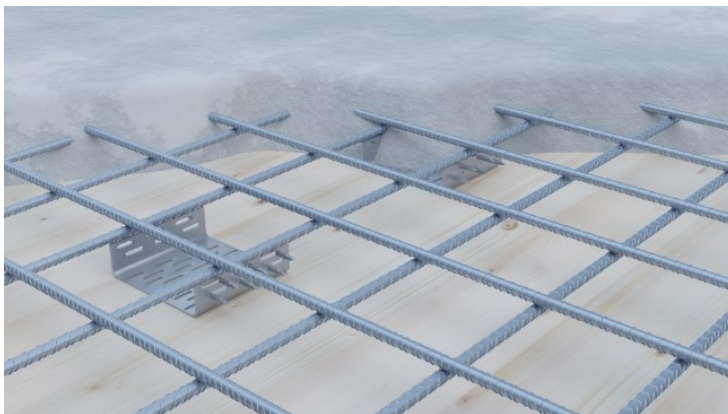


Kuva 6. Würth ASSY plus VG-ruuveja (36 s. 8).



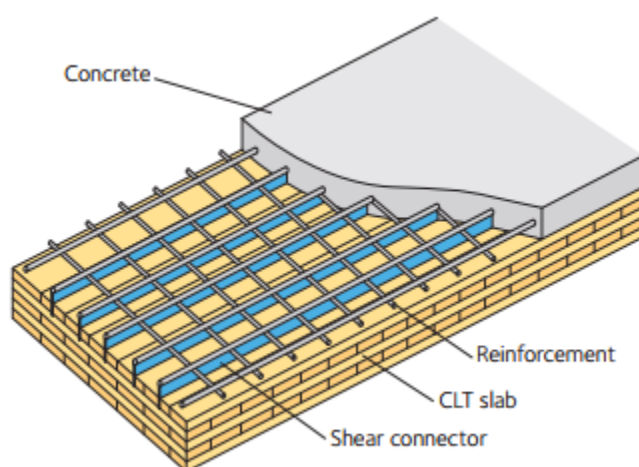
Kuva 7. FT-liitin (36 s. 7).

NILCO-liittolaattavaarna on Peikko Finlandin tuote. Kiinnikkeet asennetaan CLT-laattaan ja ne siirtävät leikkausvoimat naulalevyissä olevien ankkurien kautta sekä vaaka- että pystysuunnassa puun ja betonin välillä. Kiinnikkeiden määrä riippuu hyötykuormien vaatimuksesta, jänneväliden pituudesta sekä laatan paksuudesta. Kiinnikkeitä tarvitaan vähemmän kuin ruuveja tai nauloja saman tai suurempien leikkausvoimien siirtämiseksi. Rauditusverkkoa varten ei tarvita erillisiä rauditusvälitteitä, sillä NILCO toimii myös välikkeenä. (37.)

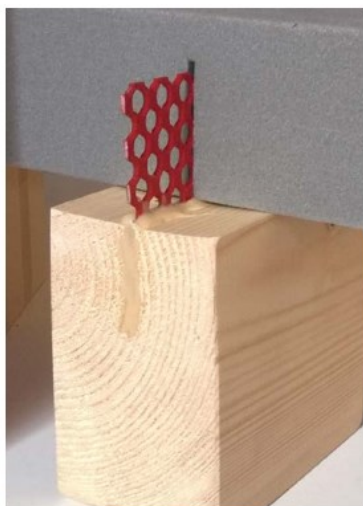


Kuva 8. NILCO-liittovaarnalaatta (37).

HBV-typin (*Holz-Beton-Verbund*) leikkausliitin on erityinen venytetty verkkoteräslevy, joka työnnetään pituussuunnassa puukomponentin yläpintaan. Yleisin tapa on saada rei'itetyt teräslevyt liimattua CLT-laattaan polyuretaani- tai epok-siliimalla. (14 s. 93.)



Kuva 9. Leikkausliitos HBV-verkkoteräslevyllä (14 s. 93).



Kuva 10. HBV-liitin (14 s. 93).

5 Laatan rasitukset

Tässä työssä CLT-betoni-liittolaattoja käsitellään liittorakennevaiheessa yksiaukkoisina ja yhteen suuntaan kantavina. Valun aikana CLT käsitellään moniaukkoisena, jos käytetään valutukia.

5.1 Rakentamisesta aiheutuvat kuormat

CLT-laatta täytyy mitoittaa rakentamisesta aiheutuville kuormille sekä valun aikaisille kuormille. Rakentamisen aikaiset kuormat eivät ole pysyviä eivätkä vaikuta samaan aikaan hyötykuorman kanssa. Mitoitus rakennusaikaiselle kuormalle ennen valua tehdään ilman valutukia, mikäli ei ole tiedossa, onko valutuet paikoillaan ennen CLT:n asennusta. Mikäli valutukia ei asenneta ollenkaan tai ne on asennettu paikoilleen ennen CLT:n asennusta, riittää pelkästään valun aikaisille kuormille mitoitus, koska ne ovat tuoreen teräsbetonin painon takia aina suurempia kuin ennen valua olevat rakentamisen kuormat. (34.)

5.2 Valunaikaiset kuormat ja valutuet

Valutuentaa voidaan pitää tehokkaana silloin, kun tuoreen betonin painosta aiheutuva taivutusjännitys CLT:ssä on enintään 10 % sen taivutuskestävyydestä. Kun tuenta on ollut tehokasta valun aikana ja kun betoni saavuttaa vaaditun puristuslujuuden, voidaan myöhemmissä vaiheissa jättää huomiotta CLT:n valunaikaiset jännitykset ja taipuma. Jos tukemista ei voida pitää tehokkaana tai valutuentaa ei ole käytetty, betonilaatan lisääntynyt paino CLT:n taipuman vuoksi on otettava huomioon. Valutuen jännitysjaumat johtuen betonin kutistumisen vaikutuksista ennen tuen poistamista voivat aiheuttaa betonilaatan halkeilua, ja se on otettava huomioon suunnittelussa. Tämä voidaan saavuttaa jättämättä huomiotta betonin vetolujuus. (38 s. 28.)

Valunaikaiset kuormat näkyvät alla olevassa kuvassa 11. Kuormien arvot (1) ja (2) ovat $0,75 \text{ kN/m}^2$

Kuorma	Kuormitusalue	Kuorma [kN/m^2]
(1)	Työskentelyalueen ulkopuolella	$0,75$, johon sisältyy kuorma Q_{ca}
(2)	Neliön muotoisella työskentelyalueella, jonka sivumitta on 3 m (tai jännemitta, jos se on pienempi)	10% betonin omasta painosta, mutta vähintään $0,75$ ja enintään $1,5$ Sisältää kuormat Q_{ca} ja Q_{cf}
(3)	Tarkasteltava alue	Muotin ja kuormaa kantavan rakenneosan oma paino (Q_{cc}) sekä mitoituspaksuuden mukainen tuoreen betonin paino (Q_{cf})

(2) Tuoreen betonin aiheuttamat vaakakuormat otetaan huomioon.

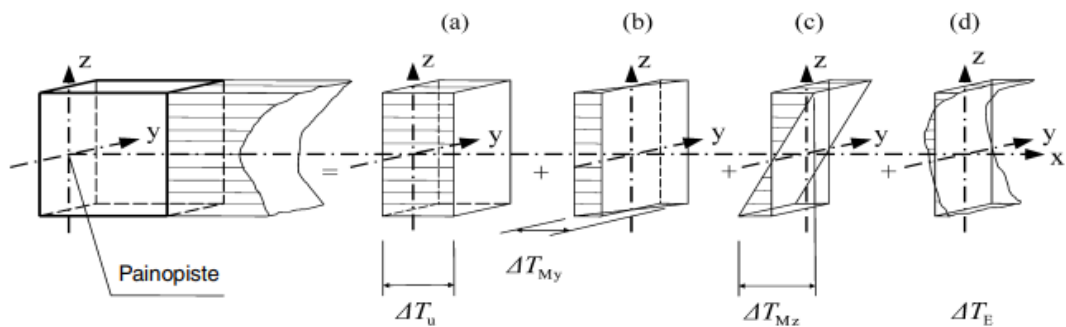
Kuva 11. Valunaikaiset kuormat (39 s. 40).

5.3 Lämpö- ja kosteusliikkeiden sekä betonin kutistuman aiheuttamat sisäiset rasitukset

Koska liittorakenteessa betonin poikkileikkaus on yhdistetty CLT:n poikkileikkaukseen, jokainen suhteellinen muutos poikkileikkauksen mitoissa, erityisesti jännesuunnassa, johtaa pakkojännityksiin. Koska puutavara on enemmän tai vähemmän haurasta jännitystilassa, nämä pakkojännitteet voivat vaikuttaa koko rakenteen kantavuuteen. Pakkojännitteet johtuvat lämpötilan vaihtelusta, puun kosteusvaihtelusta ja betonin kutistumisesta. (40 s. 28.)

5.3.1 Lämpöliikkeet

Liittolaatan lämpötilaeron jakauma koostuu neljästä eri komponentista. ΔT_u on keskilämpötilan muutos, ΔT_{My} on lineaarisesti jakautunut lämpötilaero z-akselin suhteen, ΔT_{Mz} on lineaarisesti jakautunut lämpötilaero y-akselin suhteen ja ΔT_E on epälineaarinen lämpötilan muutos. Näistä aiheutuu järjestelmään keskenään tasapainossa olevien jännitysten kokonaisuus, josta ei aiheudu rakenneosaan voimana tai momenttina kohdistuvaa kuormaa. (41 s. 24.)



Kuva 12. Lämpötilajakauman peruskomponenttien kaavioesitys (41 s. 24).

Puun ja betonin erilaisten lineaaristen laajenemiskertoimien vuoksi lämpötilaerot on otettava huomioon sekä murto- että käyttörajatila suunnittelussa, useimmissa tapauksissa on otettava huomioon vain keskilämpötilan muutokset betonissa

ja puutavarassa. Lineaarinen ja epälineaarinen lämpötilaero voidaan jättää huomiotta. (38 s. 17.)

CLT:n ja teräsbetonin suhteellinen laajeneminen tai kokoon puristuma pääsuunnassa lämpötilamuutoksesta saadaan laskettua kaavalla,

$$\varepsilon_i = \alpha_{i,T} \cdot \Delta T_{u,i,calc} \quad (1)$$

jossa

- betonin lämpölaajenemiskertoimena voidaan käyttää $\alpha_{c,T} = 10 \times 10^{-6} K^{-1}$
- CLT:n puun syynsuuntaisena lämpölaajenemiskertoimena $\alpha_{t,T} = 5 \times 10^{-6} K^{-1}$, ellei CLT-toimittaja määritä arvoa toisin. (41 liite C.)

Betonin lämpötilanmuutos betonin jälkihoidon lopettamisen ajanhetkestä t_c suurimpaan arvoonsa $\Delta T_{u,conc^+}$ lasketaan kaavalla (2),

$$\Delta T_{u,conc^+} = T_{max,conc} - T_{0,conc} \quad (2)$$

jossa betonin lämpötilan arvona ajanhetkellä t_c käytetään $T_{0,conc} = 10$ astetta, jos tarkempaa arvoa ei tiedetä. (41 liite A.)

CLT:n lämpötilanmuutos ajanhetkestä t_c suurimpaan arvoonsa $\Delta T_{u,tim^+}$ lasketaan kaavalla

$$\Delta T_{u,tim^+} = T_{max,tim} - T_{0,tim} \quad (3)$$

jossa CLT:n lämpötilan arvona ajanhetkellä t_c käytetään $T_{0,tim} = 10$ astetta, jos tarkempaa arvoa ei tiedetä. (41 liite A)

Lämpötilanmuutokset ajanhetkestä t_c vastaavasti pienimpiin arvoihin $\Delta T_{u,conc^-}$ ja $\Delta T_{u,tim^-}$ saadaan korvaamalla kaavoista max-arvot min-arvoilla. (38 s. 17.)

5.3.2 Kosteusliikkeet

Kosteuden vaihtelu on määritelty käyttöluokissa Eurokoodi 5:n mukaan. Käyttöluokat edustavat kuitenkin vain tasapainokosteuspitoisuuksien vaihteluväliä, joten kosteuden vaihtelua esimerkiksi vuoden sisällä ei voida johtaa näistä arvoista. Köppen-Geiger-ilmastokartassa kosteuspitoisuutta arvioidaan eri ilmas-
toille Euroopassa. (40 s. 28.)

Puun kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenajan mukaan vaihtuvan ilmankosteuden mukaan, sillä puu asettuu tasapainokosteuteen ympäristön kanssa. Tästä aiheutuu rasitus, joka kuuluu keskipitkään aikaluokkaan. (34 s. 11; 43 s. 30.)

CLT:n pysyvä kosteusmuutos asentamisen jälkeen on pysyvää aikaluokkaa. CLT tulisi asentaa lähelle lopullista kosteuspitoisuuttaan, jolloin tätä muutosta ei huomioida. CLT:n valunaikaista kostumista tulee välttää, mutta CLT:n kosteuspitoisuuden nousu valun takia voidaan jättää huomiotta laskuissa. (38 s. 16)

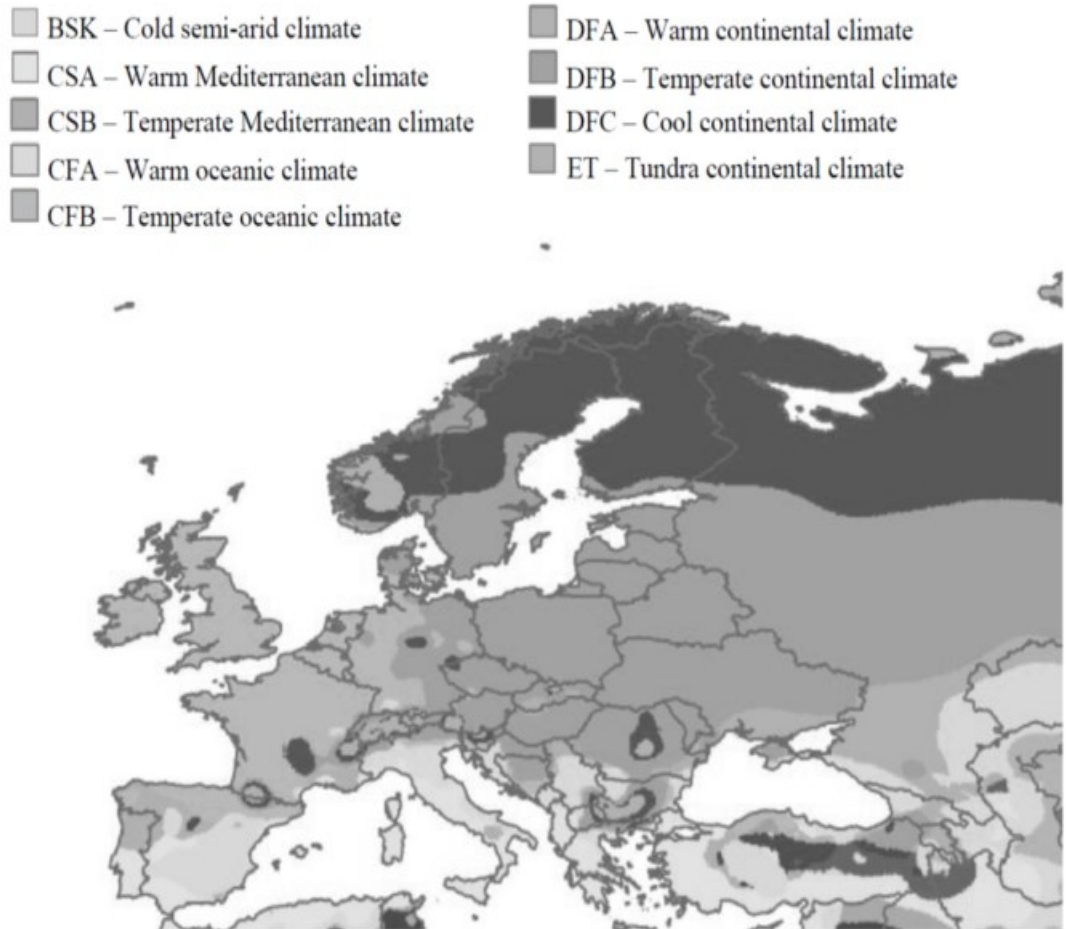
Puun suhteellinen laajeneminen tai kokoon puristuma pääsuunnassaan kosteusmuutoksesta lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{tim} = \alpha_{mc} \cdot \Delta mc_{calc} \quad (4)$$

jossa

- Δmc_{calc} on puun kosteuspitoisuuden muutos keskiarvosta eli joko Δmc^+ tai Δmc^- tai murtorajatilassa Δmc_d (38 s. 17, 43).

Puun kosteusliikkeen osavarmuuslukuna käytetään murtorajatilassa $\gamma = 1,35$. Havupuinen sahatavara laajenee noin 2,5 kertaisesti syytä vastaan kohtisuorassa syysuuntaan nähden.



Kuva 13. Köppen-Geiger-ilmastokartta. (40 s. 28).

Kuvassa 13 esitettyjen Köppen-Geiger-ilmastokartan ilmastojen perusteella on arvioitu puutavaran ja betonikomposiittien poikkileikkausten eri mittasuhteita, mikä johtaa puutavaran poikkileikkauksen kosteusvaihteluihin ulkoilmastossa, jotka löytyvät taulukosta 1 (38).

Taulukko 1. Puun kosteuspitoisuuden muutoksen keskiarvo vuosittain (38).

Climatic region			Minimum of the width, or twice the depth of the timber cross-section (mm) ^a		
Initials	Climate	Cities (examples)	38	125	≥300
BSK	Cold semi-arid	Madrid, Salamanca, Albacete	13,0	7,5	2,5
CSA	Warm Mediterranean	Lisbon, Cagliari, Palermo, Athens	8,0	4,0	1,0
CSB	Temperate Mediterranean	Potenza, Marsilia, Coruna, Porto	9,0	6,0	2,5
CFA	Warm oceanic	Zagreb, Milan, Bologna, Foggia	11,5	7,0	2,5
CFB	Temperate oceanic	Stuttgart, Paris, London	15,0	9,0	3,0
DFA	Warm continental	Kosice, Odessa, Zaporozhe	9,0	6,0	2,0
DFB.1	Temperate continental Northern region	- Moscow, Minsk, Vilnius, Kiev	12,0	6,0	2,0
DFB.2	Temperate continental Southern region	- Warsaw, Berlin, Munich, Prague	15,5	9,0	3,5
DFB.3	Temperate continental Maritime region	- Helsinki, Stockholm, Gothenburg, Saint Petersburg, Riga	13,5	7,5	2,5
DFC.1	Cool continental Northern region	- Rovaniemi, Inari, Luleå, Tromsø	17,5	11,5	4,0
DFC.2	Cool continental Southern region	- Tampere, Kuopio, Östersund, Ringsaker	17,5	12,0	4,0
ET	Tundra continental	Chambery, Zurich, Sofia, Gloppen	17,5	5,0	2,5
NOTE For timber cross-sections exposed to indoor, unheated conditions, the value of Δmc in Table A.1 may be reduced. The value depends on the type of building and the type of use. For typical situations, a 40 % reduction may be applied.					
^a Linear interpolation may be used for timber cross-sections of different widths.					

5.3.3 Betonin kutistuma

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon betonin kutistuminen sekä murto- että käyttörajatilassa. Puu-betoni-liittorakenteissa, jossa on paikallavalettu betoni, betonin kutistuminen tulisi laskea betonin kovettumishetkestä t_c , riippumatta siitä onko CLT tuettu vai ei. (38 s. 16.) Paikallavaletun betonin käyttöön liittyy herkempi riski betonin kutistumisesta johtuville epäedullisille vaikutuksille. (41 s. 17)

Betonin kutistuminen aiheuttaa puu-betoni-liittorakenteessa puutavaraan rasi-
tuksia. Betonin kutistuminen johtaa komponenttien normaalivoiman vähenemi-
seen sekä kasvattaa taivutusmomenttia sekä puuosiossa että betonissa. (40 s.
31.)

5.4 Hyötykuormat

Hyötykuorma on muuttuvaa ja liikkuvaa kuormaa, joka aiheutuu rakennusten
käytön takia. Rakentamisen aikaiset kuormat eivät vaikuta samaan aikaan hyö-
tykuorman kanssa. Hyötykuorma oletetaan liikkuvaksi kuormaksi, joka vaikuttaa
tarkasteltavan rakenteen kannalta epäedullisimmassa kohdassa. (43 s. 34)

Hyötykuorman suositeltu ominaisarvo g_k ja hyötykuorman yhdistelykerroin ψ_i
riippuvat tilan käyttöluokasta.

Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimissa ψ_0 on ominaisyhdistelyssä käytettävä
kerroin. ψ_1 kuvaa tavallisesti toistuvan kuormituksen osuutta ja ψ_2 muuttuvan
kuorman pitkäaikaisuutta.

Taulukko 2. Suomen kansalliset hyötykuormien ominaisarvot (43 s. 34).

Kuormitettujen tilojen luokat	q_k [kN/m ²]			Q_k [kN] (portaat suluisissa)
	Väliportaat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A: Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0*)
Luokka B: Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C: Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua				
C1 Pöytäalueet	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
C2 Kiinteiden istuimien alueet	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
C3 Esteettömät alueet	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
C4 Liikuntatilat ja näyttämöt	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
C5 Tungokselle alttiit alueet	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
Luokka D: Myymälätilat				
D1 Tavalliset vähittäiskaupat	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
D2 Tavaratalot	5,0	6,0	5,0	7,0 (2,0)
Luokka E: Varastotilat				
E1 Tavarain säilytys ja vastaanottotilat	7,5	3,0		7 (2,0)
Luokka H: Vesikatot ilman hyötykäyttöä		0,4		1,0

¹⁾ Asunnon sisäiset portaat $Q_k = 1,5$ kN

Taulukko 3. Suomen kansalliset muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet (45 liite A1).

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{**)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä.
Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.
^{**)} Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.

5.5 Pysyvät kuormat

Kantavien ja ei-kantavien rakennusosien oma kokonaispaino otetaan huomioon kuormia yhdistettäessä yksittäisenä kuormituksena. Pysyvää kuormaa ovat muun muassa rakenteen omapaino, kiinteät laitteet ja ripustukset. (44 s. 20, 24.) Rakenteen pysyvä kuorma vaihtelee tarkasteluajankohdan mukaan.

Lopullisessa tilassa rakenteen pysyvään kuormaan huomioidaan ainakin CLT (5 kN/m³), kovettunut teräsbetoni (25 kN/m³), rakenteisiin kiinnitetyt kantamattomat keveät väliseinät ($\geq 0,30$ kN/m³), teräsosat, kelluva laatta, askeläänieriste, palonsuojalevytys, tasoitteet ja ripustuskuorma (esim. LVI-laitteet, ripustettu alakatto)

CLT:n valunaikaisen taipuman aiheuttama lisääntynyt betonimäärä huomioidaan kovettuneen raudoittamattoman betonin tilavuuspainolla 24 kN/m³ (34 s.16).

Pysyvä kuorma tulee laskea mahdollisimman tarkasti, eikä sitä tule arvioida liikaa yläkanttiin, koska se voi olla hyödyllistä värähtelymitoituksessa tai stabi-loivaa koko rakennuksen jäykistyksen kannalta. (34 s. 16.)

5.6 Kuormitusyhdistelmät

Kuorman F mitoitusarvo F_d saadaan kaavasta

$$F_d = \gamma_f \psi F_k \quad (5)$$

jossa

- F_k on kuorman ominaisarvo
- ψ on muuttuvan kuorman yhdistelykerroin joko ψ_0 , ψ_1 , ψ_2 tai 1,0
- γ_f on kuorman osavarmuusluku, joka huomioi mahdollisen kuorman arvon epäedullisen poikkeaman

Murtorajatilassa rakenteen kestävyyttä tarkasteltaessa mitoituskuorma laske-
taan aikaluokittain kuormitusyhdistelyllä (45).

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,15K_{FI}G_{k,j} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \Psi_{0,i}Q_{k,i} \\ 1,35K_{FI}G_{k,j} \end{array} \right| \begin{array}{l} \text{muuttuvien kuormien aikaluokat} \\ \text{pysyvä aikaluokka} \end{array} \quad (6)$$

jossa

- $G_{k,j}$ on pysyvien kuormien ominaisarvo
- $Q_{k,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $Q_{k,i}$ on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo

Osa kuormasta voi olla myös osalle liittorakennetta edullista valutuennan yhtey-
dessä, esimerkiksi CLT:n ja tuoreen betonin paino, jos keskellä on valutuki ja
tarkastellaan palkin keskellä liittorakennevaiheessa CLT:n veto- ja taivutusjänni-
tystä. Tälle painolle käytetään pienennettyä osavarmuuslukua $\gamma_{G,j,inf} = 0,9$.

(34.) Mikäli pysyvien kuormien yhteisvaikutus lisää rakenteen kestävyyttä, py-
syvien kuormien ominaisarvo $G_{k,j}$ kerrotaan kertoimen 1,15 sijasta luvulla 0,9.
(43 s. 25.)

Taulukko 4. Kuormakertoimen K_{FI} -arvot Suomessa (45 s. 6 liite B).

Seuraamusluokka	Luotettavuusluokka	Kuormakerroin K_{FI}
CC3	RC3	1,1
CC2	RC2	1,0
CC1	RC1	0,9

Käyttörajatilan ominaiskuormitusyhdistelmää käytetään tyypillisesti taipumien laskemisessa, kun huomioidaan käyttäjien mukavuus ja rakenteen toiminta. Käyttörajatilan ominaisyhdistelmän kaava on

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,1} \quad (7)$$

Käyttö- ja murtorajatilan pitkäaikaisyhdistelmän kaava on

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 0} \psi_{2,i} Q_{k,1} \quad (8)$$

Pitkäaikaisyhdistelmää käytetään taipuman laskemisessa, kun tarkastellaan laatan alapinnan ulkonäkövaatimuksia, jos niitä on asetettu.

Käyttörajatila tulee tarkistaa alku- ja lopputiloissa. Värähtely mitoitetaan vain alkutilassa. Murtorajatilassa huomioidaan alku- ja lopputilojen lisäksi niiden välinen aika, koska puun viruma kehittyy betonia hitaammin loppuarvoonsa, jonka vuoksi puulle aiheutuu suurempi jännitys alku- ja lopputilojen välillä, suurimmillaan 3–7 vuoden kohdalla valusta. Tämä mitoitus voidaan jättää tekemättä, mikäli puu kestää sekä alku- että lopputilassa, kun pitkäaikaisten kuormien kaava kerrotaan luvulla 1,25. (34; 40 s. 152)

6 Laatan mitoitus

6.1 Materiaaliominaisuudet ja mitoitusarvot

CLT-levyn ominaislujuuksien arvot saadaan tuotevalmistajien ETA-hyväksynnöistä. Betoniteräksen ominaislujuuksien arvot saadaan lujuusluokan mukaan.

CLT:n lopullinen kimmokertoimen arvo syysuunnassa $E_{tim,fin}$ lasketaan kaavalla (46 s. 20).

$$E_{tim,fin} = \frac{E_{tim}}{1 + \psi_{tim} \cdot k_{def}} \quad (9)$$

jossa

- $E_{tim} = E_{0,mean}$ on puun kimmokertoimen keskiarvo syysuunnassa
- ψ_{tim} -kerroin huomioi liittorakennevaikutuksen vaikutuksen puun viirumaan ajanhetkellä t .

Liukumoduulin $G_{tim,fin}$ laskentatapaa ei ole kerrottu puu-betoni-eurokoodissa, mutta uuden puurakenteiden eurokoodin luonnoksessa arvo lasketaan kaavalla

$$G_{SLS,mean} = \frac{G_{mean}}{1 + k_{def}} \quad (10)$$

Koska kaava ei ole liittorakenteiden mukainen, siinä ei ole huomioitu ψ_{tim} -kerrointa, mutta lopputilassa sen lopullinen arvo olisi joka tapauksessa 1,0.

3–7 vuoden jälkeisen liukukertoimen arvona voidaan käyttää $\psi_{tim} = 0,65$ -kerrointa

Taulukko 5. CLT:n aikavaikutuskertoimen k_{mod} arvot käyttöluokan ja kuorman aikaluokan mukaan tulevan Eurokoodi 5:n mukaan (46 s. 58).

Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
	Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkellinen

KL1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
KL2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
KL3	-	-	-	-	-

Taulukko 6. CLT:n virumaluvun k_{def} arvot eri käyttöluokissa tulevan Eurokoodi 5:n mukaan (46 s. 59).

Käyttöluokka	KL1	KL2	KL3
k_{def}	0,80	1,00	-

Tulevassa Eurokoodi 5:ssa ei ole annettu CLT:lle käyttöluokassa 3 k_{mod} - ja k_{def} -arvoja. Tällä hetkellä, kun tuleva Eurokoodi ei ole vielä voimassa CLT:n k_{mod} -arvot käyttöluokassa 3 ovat: pysyvä 0,5, keskipitkä 0,65 ja hetkellinen 0,9. Käyttöluokassa 3 käytetään tällä hetkellä k_{def} -arvona 2,5. Käyttöluokka 1 ja 2 pysyvät samoina tulevassa Eurokoodi 5:ssa kuin nykyisin. (47 s. 17.)

Betonin kimmokertoimena käytetään betonin kovettumisen jälkeen murto- ja käyttörajatilassa sekanttikerrointa E_{cm} (51 s. 31). Ennen lopullista kovettumista eli 28 vuorokauden ikää sekanttikertoimen arvo riippuu ajankohdasta t . $E_{cm}(t)$ arvo lasketaan kaavalla

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (11)$$

jossa

- $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa on betonin lieriölujuuden keskiarvo 28 vuorokauden ikäisenä
- $f_{cm}(t)$ on lieriölujuuden keskiarvo t vuorokauden ikäisenä, mikä lasketaan kaavalla

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (12)$$

jossa kerroin $\beta_{cc}(t)$ lasketaan kaavalla

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (13)$$

jossa

s on sementin tyypistä johtuva kerroin

Betonin lopullisen kimmokertoimen arvo lasketaan kaavalla

$$E_{conc,fin} = \frac{E_{conc,t0}}{1 + \psi_{conc} \cdot \varphi(\infty, t_0)} \quad (14)$$

jossa

- ψ_{conc} -kerroin huomioi liittorakennevaikutuksen vaikutuksen betonin virumaan ajanhetkellä t , ja se saadaan taulukosta 7, jossa γ_1 on teräsbetonikerroksen liittovaikutuskerroin esimerkiksi ajanhetkellä t_0 (38 s. 20).

Taulukko 7. Viruman kehittyminen liittorakenteessa, jossa $b_{tim} = b_{conc}$ ja $\frac{1}{5} < \frac{A_{conc,ef}}{A_{tim}} \leq 1$ (46 s. 26).

	for $t = \infty$	for $t = 3$ to 7 years
Concrete, $\varphi = 3.5$:		
and $k_{def} = 0,6$	$\psi_{conc} = 2,6 - 0,8 \gamma_1^{2,2}$	$\psi_{conc} = 2,5 - \gamma_1^{1,1}$
and $k_{def} = 0,8$	$\psi_{conc} = 2,3 - 0,5 \gamma_1^{2,6}$	$\psi_{conc} = 2,2 - 0,8 \gamma_1^{1,2}$
Concrete, $\varphi = 2.5$:		
and $k_{def} = 0,6$	$\psi_{conc} = 2,0 - 0,5 \gamma_1^{1,9}$	$\psi_{conc} = 1,9 - 0,6 \gamma_1^{1,1}$
and $k_{def} = 0,8$	$\psi_{conc} = 1,8 - 0,3 \gamma_1^{2,5}$	$\psi_{conc} = 1,7 - 0,5 \gamma_1^{1,1}$
Timber:		
all cases	$\psi_{tim} = 1,0$	$\psi_{tim} = 0,5$
Connection:		
all cases	$\psi_{conn} = 1,0$	$\psi_{conn} = 0,65$
NOTE For $t = 0$, the values of ψ_{conc} , ψ_{tim} and ψ_{conn} are 0.		
^a Linear interpolation may be used for different creep coefficients of timber and concrete.		

Betonin virumaluvun laskemiseen lopputilassa $\varphi(\infty, t_0)$ on eri tapoja. Alla on esitetty Eurokoodi 2 liite B ohjeellinen tapa.

Virumaluku lasketaan kaavalla

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (15)$$

jossa φ_0 on nimellinen virumaluku, joka lasketaan kaavalla

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (16)$$

jossa suhteellisen ilmankosteuden RH huomioidaan ottava kerroin φ_{RH} (ei yksikköä) lasketaan kaavalla 18. Betonin kovettumisen ajankohdan t (vuorokausina) vaikutuksen huomioiva kerroin $\beta(t_0)$ lasketaan kaavalla

$$\beta(t_0) = \frac{1}{1 + t_0^{0,20}} \quad (17)$$

jossa t_0 :n arvona voidaan käyttää myös sementin tyyppistä ja betonin kovettumisen aikaisesta lämpötilasta riippuvaa muunnettua betonin ikää (50 liite B).

Suhteellisen ilmankosteuden huomioiva kerroin lasketaan kaavalla

$$\varphi_{RH} = \begin{cases} 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100} \%}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} & \text{kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ \left(1 + \frac{1 - \frac{RH}{100} \%}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right) \cdot \alpha_2 & \text{kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \end{cases} \quad (18)$$

jossa RH on ympäristön suhteellinen ilmankosteus (%). Yhteen suuntaan kuivuvan laatan tehollisena paksuutena h_0 voidaan käyttää teräsbetonilaatan paksuutta kerrottuna luvulla 2 eli $h_0 = 2 \cdot h_c$.

28 päivän ikäisen betonin keskimääräisestä puristuslujuudesta f_{cm} riippuvat kertoimet $\beta_c(t, t_0)$ (ei yksikköä) likiarvo lasketaan kaavalla

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{0,3} \quad (19)$$

jossa $t - t_0$ on kuormituksen kesto vuorokausina ja β_H (ei yksikköä) on kuivumisnopeudesta riippuva kerroin, jonka likiarvo lasketaan kaavalla

$$\beta_H = \begin{cases} 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] h_0 + 250 \leq 1500 & \text{kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3 & \text{kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \end{cases} \quad (20)$$

6.1.1 CLT:n ja betonin välinen leikkausliitos

Tässä ohjeessa leikkausliitoksen mitoitus on käyty tarkemmin läpi loviliitoksella, VB-ristiruvauksella ja kohtisuoraan leikkauspintaan nähden kiinnitetyillä puikoliittimillä.

Leikkausliitoksen CLT:n ja betonin välillä tulee täyttää mitoitusehto

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (21)$$

Leikkausvoiman $F_{v,Ed}$ suuruus lasketaan olettamalla liitos täysin jäykäksi, koska se johtaa suurimpiin leikkausvoimiin liitoksissa ja mitoitus on varman puolella. Muiden osien mitoituksessa liittorakenteessa käytetään kuitenkin leikkausliitoksen laskennallista jäykkyyttä K . (38 s. 23.)

Yksiaukkoisilla laatoilla leikkausliitosten etäisyyden toisistaan s ollessa palkin suunnassa alle 5 % jännevälillä, voidaan liitokset jakaa tasaisesti koko jännevälille. Jos liitosten etäisyys toisistaan s on yli 5 % jännevälillä, liitokset tulisi jakaa leikkausvoiman jakautumisen mukaan jännevälille. Yhtä jäykät liittimet jaetaan yksiaukkoisen laatan jännevälille niin, että niissä vaikuttaa yhtä paljon leikkausvoimaa. Liittimiä on oltava parillinen määrä, jos kuormitus on tasainen tai symmetrinen. (34 s. 24)

Liitoksia tulee olla vähintään 4 kappaletta laatan pääsuunnassa sekä palkin leveydellä $b = 1000 \text{ mm}$ (38 s.42) Näin ollen liitinten poikittaisen suunnan keskietäisyyksien tulee olla $s_f \leq 250 \text{ mm}$. Jos liitosten etäisyydet s ja/tai liitosten siirtymäkertoimet K vaihtelevat siten, että liitoksien ottama leikkausvoima on likimäärin sama, liitosten tehollinen etäisyys toisistaan s_{ef} pääsuunnassa laskeaan kaavalla

$$s_{ef} = 0,75s_{min} \frac{K_{ref}}{K_{max}} + 0,25s_{max} \frac{K_{ref}}{K_{min}} \quad (22)$$

jossa K_{ref} on sen liitoksen siirtymäkerroin, jolle s_{ef} lasketaan ja K_{min} on liitosten pienin ja K_{max} suurin etäisyys toisistaan. (38 s. 23)

Liittimien kannat tai ankkurointi tulee olla betonin puristetussa osassa (38 s. 43)

Jos liittimien kannan tai ankkuroinnin päällä tulee olla betonia liitoksen kestävyden vuoksi, betonipeitteen nimellisarvo c_{nom} lasketaan kuten raudoitukselle.

Eri liitosten leikkauskestävyyksien ominaisarvot $F_{v,Rk}$ lasketaan tai otetaan suoraan hyväksytyjen materiaalitoimittajien tuotestandardien mukaan. Loviliitoksen mitoituskestävyys lasketaan kappaleen 6.1.3 mukaan ja muiden leikkausliitosten mitoituskestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{v,Rd} = k_{mod}' \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_v} \quad (23)$$

jossa

- $\gamma_v = 1,25$ on osavarmuusluku leikkausliitokselle, ellei kansallinen liite anna toista arvoa

k_{mod}' on liitoksen kosteuspiitoisuuden ja voiman keston huomioiva muutoskerroin kestävyydelle, joka lasketaan betonin ja puun kestävyyspitkääikaistekijöiden geometrisenä keskiarvona kaavalla

$$k_{mod}' = \sqrt{k_{tc} k_{mod}} \quad (24)$$

jossa

- k_{tc} on betonin kuorman huomioiva kerroin sen puristuskestävyyteen, jonka arvona käytetään betonirakenteiden EN 1992:n mukaisista α_{cc} :n arvoa, jonka suositusarvo on 1,0 ja Suomen kansallinen arvo on $k_{tc} = \alpha_{cc} = 0,85$ (38 s. 18; 51 s.15).
- CLT:n k_{mod} -arvot löytyvät taulukosta 2 (38 s. 18, 20).

Ellei liitostoimittaja anna omaa tutkittua arvoa, liitoksen kosteuspitoisuuden ja voiman keston huomioiva muutoskerroin muodonmuutoksille k_{def}' lasketaan kaavalla

$$k_{def}' = 2k_{def} \quad (25)$$

CLT:n virumaluvun k_{def} -arvot löytyvät taulukosta 6 (38 s. 18).

Liitoksen lopullisen käyttörajatilan siirtymäkertoimen $K_{ser,fin}$ -arvo lasketaan kaavalla

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{1 + \psi_{conn} \cdot k_{def}'} \quad (26)$$

jossa ψ_{conn} saadaan taulukosta 7. Liitoksen lopullisen murtorajatilan siirtymäkertoimen $K_{u,fin}$ -arvo lasketaan vastaavasti kaavalla

$$K_{u,fin} = \frac{K_u}{1 + \psi_{conn} \cdot k_{def}'} \quad (27)$$

6.1.2 Liittimiin vaikuttavat voimat

CLT:n ja betonin välisen liitoksen liittimiin aiheutuva leikkausvoima, jossa huomioidaan betonilaatan kutistuminen sekä ulkoisista voimista johtuva leikkausvoima, lasketaan kaavalla (38 liite B s. 51).

$$F_{v,Ed} = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_{1 \leftrightarrow c} S_{ef}}{(EI)_{eff}} \cdot V_{max} \quad [\text{kN}] \quad (28)$$

ja

$$V_{max} = -\pi E_2 A_2 \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{(\gamma_1 E_1 A_1 + E_2 A_2) L a_{1 \leftrightarrow C}} \Delta \varepsilon + V(q_d) \quad (29)$$

joissa

- γ_1 on liittorakennevaikutuksen arvo betonissa, joka lasketaan kaavalla

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 E_i A_i S_i}{K_i l^2} \right]^{-1} \quad (30)$$

- $F_{v,Ed}$ on leikkausvoima liitoksessa
- E_1 on betonin kimmomoduuli
- A_1 on betonin poikkipinta-ala
- I_1 on betonin jäyhyysmomentti
- $a_{1 \leftrightarrow C}$ on betonin keskikohdan etäisyys liittorakenteen tehokkaasta poikkileikkauksesta
- s_{ef} on tehokas liitinjako palkin kantavassa suunnassa
- $(EI)_{ef,sls}$ on tehollinen taivutusjäykkyys tulevan Eurokoodi 5, puu-betoni-liittorakenne osion kaavan B.6 mukaan
- V_{max} on standardin EN 1995-1-1:2004 liitteen B kaavan B.10 mukainen voimien määrittämisessä käytettävä tehokas suurin leikkausvoima
- E_2 on puun kimmomoduuli
- A_2 on CLT:n poikkipinta-ala
- I_2 on CLT:n jäyhyysmomentti
- L on laatan jänneväli
- $\Delta \varepsilon$ on erotus betonin ja CLT:n epäelastisissa jännityksissä
- $V(q_d)$ on ulkoisesta voimasta johtuva leikkausvoima

Yllä olevat lasketaan tulevan Eurokoodi puu-betoni-liittorakenne liitteen B (38 liite B s. 51) mukaisesti.

6.1.3 Loviliitos

Tulevan Eurokoodi 5:n puu-betoni-liittorakenne osiossa on määritelty loviliitoksen mitoitus liittorakennevaiheessa.

Seuraavien ehtojen ja vaatimusten täytyessä liukumoduuli ja kuormankantokyky loviliitoksille voidaan määrittää, kuten ehtojen jälkeisessä osiossa on määritelty

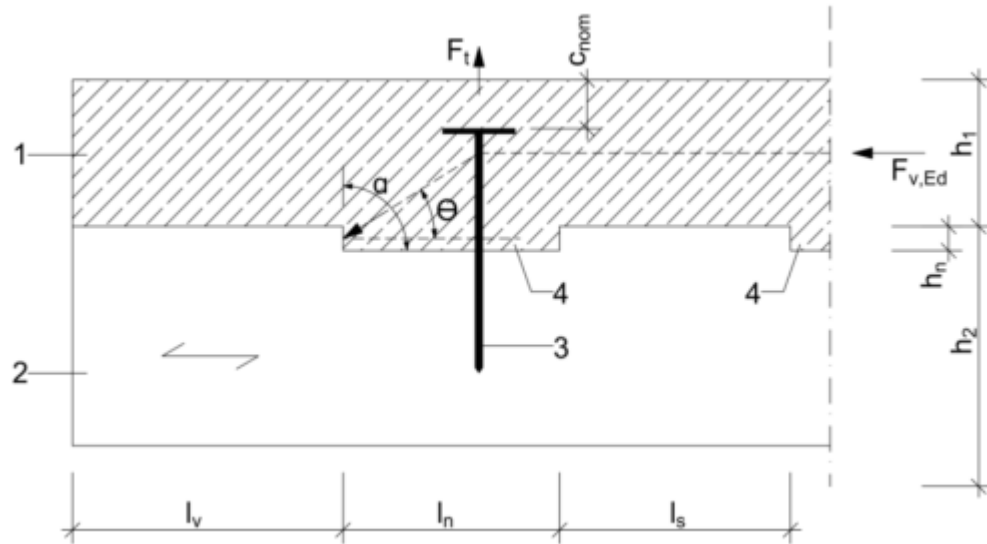
- loven syvyys $h_n \geq \begin{cases} 20 \text{ mm} & \text{pienillä kuormilla, kuten asuintaloissa} \\ 30 \text{ mm} & \text{suurilla kuormilla, kuten varastoissa} \end{cases}$
- loven leveys $l_n \geq 150 \text{ mm}$
- puutavaran pituus loven edessä $l_v \geq 12,5h_n$
- lovien etäisyys toisistaan $l_s \geq 12,5h_n$
- liittimen halkaisija $d \geq 6 \text{ mm}$
- loven reunan kulma $80^\circ \leq \alpha \leq \min\{115^\circ; 90^\circ + \theta\}$

Teräsbetonille määritettyjä vaatimuksia on

- lujuusluokka vähintään C20/25
- maksimi raekoko $d_g \leq 16 \text{ mm}$

Puutavaralle määritettyjä vaatimuksia on

- lamellin lujuusluokka vähintään C24



Kuva 14. Loviliitos (38 s. 42).

- 1 = betoni
- 2 = CLT
- 3 = aksiaalisesti kuormitettu liitin
- 4 = lovi

Betonin puristussauvan kulman θ minimiarvo lasketaan kaavalla

$$\theta = \max \begin{cases} \arctan \left(\frac{0,5 \cdot (h_n + h_1)}{(l_n + l_s)} \right) \\ \arctan \left(\frac{h_n}{l_n} \right) \end{cases} \quad (31)$$

Loviliitoksilla loven siirtymäkertoimet murtorajatilassa K_u ja käyttörajatilassa K_{ser} voidaan olettaa olevan yhtä suuria ja ne lasketaan kaavalla

$$K_u = K_{ser} = \begin{cases} 1\,000 \frac{\text{N/mm}}{\text{mm}} & \text{kun } h_n = 20 \text{ mm} \\ 1\,500 \frac{\text{N/mm}}{\text{mm}} & \text{kun } h_n \geq 30 \text{ mm} \end{cases} \quad (32)$$

Kun loven korkeus h_n on 20 ja 30 mm välissä, käytetään lineaarista interpolointia.

Loven leikkauskestävyyden arvo F_{Rd} lasketaan kaavalla

$$F_{Rd} = \min \begin{cases} f_{vcd} b_n l_n & \text{betonin leikkaantuminen} \\ f_{cd} b_n h_n & \text{betonin puristuminen} \\ k_{cr} f_{v,t,d} b_n l_{min} & \text{puun leikkaantuminen} \\ f_{c,0,d} b_n h_n & \text{puun puristuminen} \end{cases} \quad (33)$$

jossa

- f_{vcd} on betoniosan mitoitusleikkauslujuus

$$f_{vcd} = \frac{v \cdot f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (34)$$

- b_n on loven leveys
- f_{cd} on betoniosan mitoituspuristuslujuus
- k_{cr} on halkeilukerroin ja saadaan standardista EN 1995-1-1
- $f_{v,t,d}$ on puuosan mitoitusleikkauslujuus
- l_{min} on puun vähimmäisleikkauspituus, joka lasketaan kaavalla

$$l_{min} = 8h_n \quad (35)$$

- $f_{c,0,d}$ on puun mitoituspuristuslujuus syiden suunnassa
- v on lujuuden vähennyskerroin leikkauksessa halkeilevalle betonille

$$v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (36)$$

- h_c on betoniosan korkeus ilman lovea

Loven vetoruuvi mitoitetaan pystysuoralla voimalla $F_{t,Ed}$ kaavalla

$$F_{t,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed} \cdot \tan \theta \\ F_{v,Ed} \cdot 0,1 \end{cases} \quad (37)$$

jossa

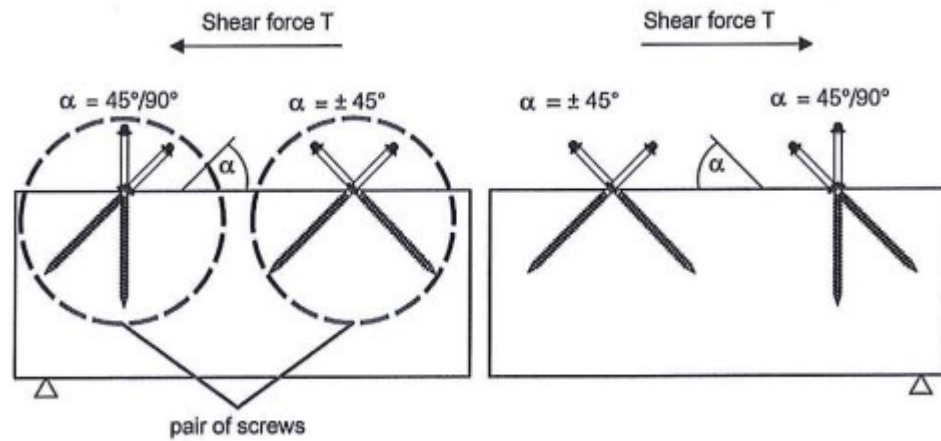
- $F_{t,Ed}$ on puun ja betonin poikkileikkauksen välinen mitoitusvetovoima
- $F_{v,Ed}$ on puun ja betonin poikkileikkauksen välinen mitoitusleikkausvoima

Liittolaatan eri osien irtoamisen toisistaan estämiseksi liitokset tulee suunnitella kestämään vetorasitusta vähintään

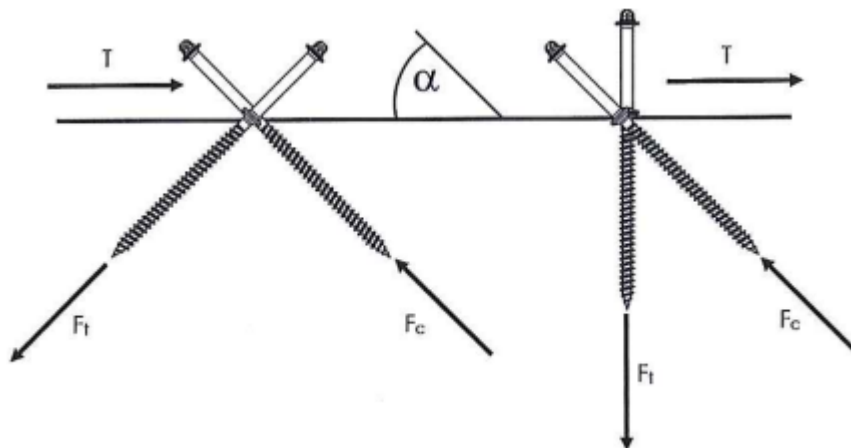
$$F_{t,Ed} = F_{v,Ed} \cdot 0,1 \quad (38)$$

6.1.4 VB-ristiruuvausjärjestelmä

SFS VB-ristiruuvausjärjestelmällä leikkausliitos toteutetaan ruuvipareilla, joista toinen on vedetty ja toinen puristettu ristikkomallin mukaan. Ruuvien etäisyys toisistaan syitä vastaan poikittaisessa suunnassa on 20 mm ja syiden suunnassa 80 mm. Ruuvit voivat olla syysuuntaan kulmassa joko $\alpha = \pm 45^\circ$ tai $\alpha = 45^\circ/90^\circ$. Käytettäessä kulmia $\alpha = 45^\circ/90^\circ$, tämä tulee ottaa leikkausvoiman suunnassa huomioon kuvan 15 mukaisesti. (35 s. 8–9.)



Kuva 15. VB-riistruuviparien mahdolliset suunnat leikkausvoiman suunta huomioiden (35 s. 9).



Kuva 16. VB-riistruuviparin vedetty (F_t) ja puristettu (F_c) ruuvi (35 s. 13).

Taulukossa 8 on esitetty minimietäisyydet SFS VB-ruuveille.

Taulukko 8. SFS VB-ruuvien minimietäisyydet (35 s. 9).

SFS VB 7.5 x λ	Etäisyys (mm)
Syyn suunnassa toisistaan a_1	80
Syytä vastaan kohtisuorassa toisistaan a_2	20
Puun päästä $a_{3,c}$	80
Puun reunasta $a_{4,c}$	20

Siirtymäkertoimet K_{ser} lasketaan kaavalla (yhdelle ruuviparille)

$$K_{ser} = \frac{3}{2}K_u = \begin{cases} 240 \cdot l_{ef} & \text{kun } \alpha = \pm 45^\circ \\ 100 \cdot l_{ef} & \text{kun } \alpha = 45^\circ/90^\circ \end{cases} \quad (39)$$

jossa

- l_{ef} on ruuvin tunkeutumissyvyys puussa ($45^\circ/90^\circ$ tapauksessa tunkeutumissyvyys on 90° :ssa olevan ruuvin)

Ruuviparin kestävyys vaakavoimalle F_{Rk} lasketaan kaavalla

$$F_{Rk} = k_a \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} F_{ax,\alpha,Rk} \\ 13000 \text{ N} \end{array} \right. \quad (40)$$

jossa

- F_{Rk} on ruuviparin ominaiskestävyys
- k_a on kerroin, joka ottaa huomioon ruuvien suunnan

$$k_a = \begin{cases} 1,414 & \text{kun } \alpha = \pm 45^\circ \\ 1,0 & \text{kun } \alpha = 45^\circ/90^\circ \end{cases} \quad (41)$$

Ruuviparin ominaisvetolujuus $F_{ax,\alpha,Rk}$ CLT:hen (ilman esiporausta) lasketaan kaavalla

$$F_{ax,\alpha,Rk} = 90 \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \quad (42)$$

6.1.5 Kohtisuoraan leikkauspintaan nähden kiinnitetyt puikkoliittimet

Siirtymäkertoimet K_{ser} ja K_u [N/mm] lasketaan puu-betoni-liittorakenteisessa ruuveille, pulteille ja esiporatuille nauloille kaavalla (38 s. 36).

$$K_{ser} = \frac{3}{2} K_u = 2 \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad (43)$$

jossa

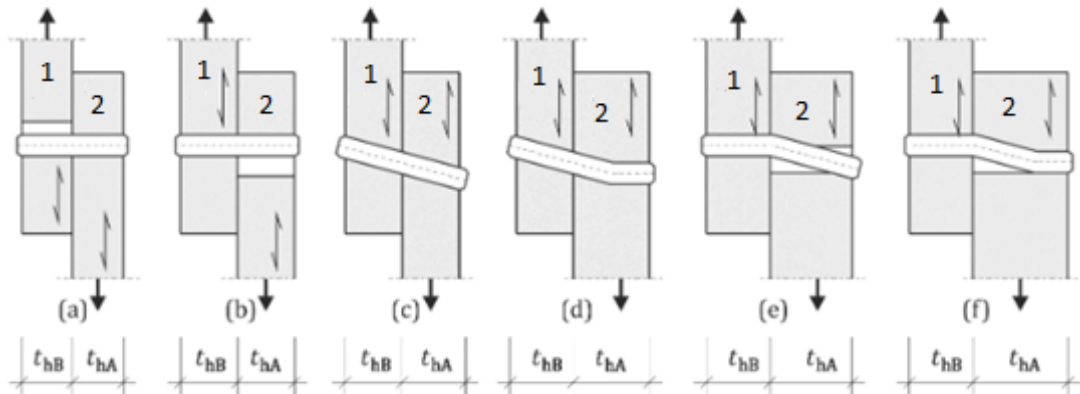
- $\rho_m = \rho_{mean}$ on CLT:n ylimmän lamellin keskimääräinen tiheys
- d on liittimen halkaisija (ruuvilla d_{ef}) Naulat on esiporattava, kun $d \geq 6$ mm tai puun tiheyden ominaisarvo $\rho_k \geq 500$ kg/m³ (ei koske ruuveja)

Esiporaamattomille nauloille siirtymäkertoimet lasketaan kaavalla (38 s. 36).

$$K_{ser} = \frac{3}{2}K_u = 2 \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30} \quad (44)$$

Kohtisuoraan liitetyllä leikkausliittimellä on kuusi mahdollista murtotapaa, jotka on esitetty kuvassa 17. Liittimen kannan tulee olla betonissa vähintään $3d$:n korkeudella, jolloin liittimen ominaiskestävyys $F_{v,Rk}$ lasketaan kaavalla

$$F_{v,Rk} = \min(F_{v,Rk,a}, F_{v,Rk,b}, F_{v,Rk,c}, F_{v,Rk,d}, F_{v,Rk,e}, F_{v,Rk,f}) \quad (45)$$



Kuva 17. Kohtisuoran leikkausliittimen mahdolliset murtotavat. 1 on betoni ja 2 on CLT. (48 s. 18.)

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_{h,1} 1,1d_1 \quad (\text{a}) \\ f_{h,2,k} t_{h,2} 1,1d_1 \quad (\text{b}) \\ \frac{f_{h,2,k} t_{h,1} 1,1d_1}{1 + \beta} \left[\sqrt{\frac{1}{\beta} + 2 \left[1 + \frac{t_{h,2}}{t_{h,1}} + \left(\frac{t_{h,2}}{t_{h,1}} \right)^2 \right]} + \beta \left(\frac{t_{h,2}}{t_{h,1}} \right)^2 - \left(1 + \frac{t_{h,2}}{t_{h,1}} \right) \right] \quad (\text{c}) \\ 1,05 \frac{f_{h,2,k} t_{h,1} 1,1d_1}{2 + \beta} \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{4(2 + \beta)M_{y,d}}{f_{h,2,k} d_h t_{h,1}^2} - 1} \right] \quad (\text{d}) \quad (46) \\ 1,05 \frac{f_{h,2,k} t_{h,1} 1,1d_1}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{4(1 + 2\beta)M_{y,d}}{f_{h,2,k} d_h t_{h,1}^2} - 1} \right] \quad (\text{e}) \\ 2,3 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} \sqrt{M_{y,d} f_{h,2,k} 1,1d_1} \quad (\text{f}) \end{array} \right.$$

jossa

- 1 on teräsbetoni ja 2 CLT
 - t_i on liittimen tunkeuma kerrokseen i
 - $M_{y,Rk}$ vai $M_{y,d}$ on myötömomentin ---
 - $\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$ on kerrosten reunapuristuslujuuksien ominaisarvojen suhde
- (48 s. 17.)

Betonin reunapuristuslujuutena voidaan käyttää $f_{c,h,1,k} = 3f_{ck}$, jossa f_{ck} on betonin puristuslujuuden ominaisarvo betonirakenteiden Eurokoodin 2 mukaan. (34 s. 27) Edellyttäen, että kiinnittimen upotuspituus betonissa on vähintään kolme kertaa kiinnittimen halkaisija, ominaisupotuslujuuden Johansen-malleihin perustuvan kuormankantokyvyn arviointiin käytettävän betonijäsenen tulisi olla kaavan 47 mukaan (38 s. 37.)

$$f_{c,h,1,k} = 3f_{ck} \quad (47)$$

jossa

- f_{ck} on betonin ominaispuristuskestävyys

Puun reunapuristuslujuus ominaisarvo lasketaan kaavalla

$$f_{h,A,k} = \begin{cases} 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \frac{\rho_k}{k_{90}} & \text{pulteille} \\ 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-3} & \text{esiporaamattomille nauloille} \\ 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k & \text{esiporatuille nauloille} \end{cases} \quad (48)$$

jossa

- ρ_k on puun ominaistiheys
- $k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d$ havupuusta valmistetulle CLT:lle

Mitoitusmurtolujuus lasketaan kaavalla (48 s. 18)

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad (49)$$

jossa

$$\gamma_M = \sqrt{\gamma_{M,1} \gamma_{M,2}} \quad (50)$$

Ruuvien myötömomentin ominaisarvo $M_{y,Rk}$ lasketaan standardin EN 14592 mukaan. Muun liittimen kuin ruuvien myötömomentin ominaisarvo $M_{y,Rk}$ lasketaan kaavalla

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} & \text{pulteille} \\ 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{pyöreille nauloille, } f_u \geq 600 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ 0,45 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{neliskulmaisille nauloille ja uranauloille, } f_u \geq 600 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{cases} \quad (51)$$

jossa

- f_u on naulan vetolujuus
- $f_{u,k}$ on pulttien vetolujuuden ominaisarvo

Naulojen ulosvetokestävyyden ominaisarvo $F_{ax,Rk}$ lasketaan kaavalla

$$F_{ax,Rk} = f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \quad (52)$$

jossa

- t_{pen} on kärjenpuoleisen osan tunkeuma tai mahdollisen kierteen tai kamman pituus ilman kärkeä

Sileillä nauloilla tai raudoitusterästapeilla, joiden $t_{pen} \geq 12d f_{ax,k}$ lasketaan kaavalla

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (53)$$

Ruuviliitoksen ulosvetokestävyyden ominaisarvo $F_{ax,Rk}$ lasketaan kaavalla

$$F_{ax,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{k_{\beta}} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (54)$$

jossa

- n_{ef} on ruuvien tehollinen lukumäärä
- d on ruuvin kierteen ulkohalkaisija
- $l_{ef} = 6d$ pystysuoralle ruuville
- $k_{\beta} = 1$ CLT:lle
- ρ_k on kerroksen ominaistiheys

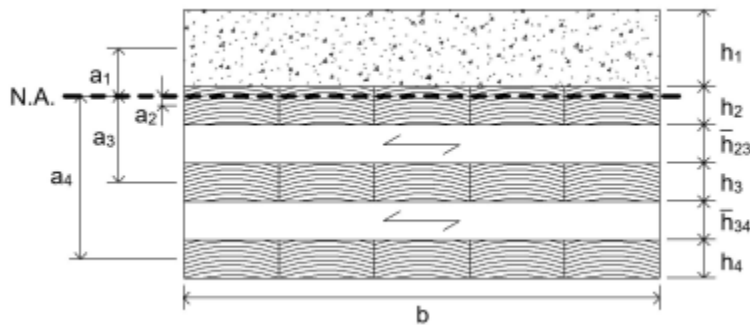
- ρ_a on ulosvetokestävyyden määrittämisen yhteydessä käytetty ominaistiheys
- $k_{ax} = 1$, kun ruuvien kulma syyhyn nähden on 45-90°
- $f_{ax,90,k} = 10 \text{ N/mm}^2$, kärjenpuoleisen ulosvetolujuuden ominaisarvoksi CLT:ssä pystysuoraan voidaan olettaa tämä arvo, kun ruuvien halkaisija on $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ ja puun ominaistiheydeksi oletetaan $\rho_a = 350 \text{ kg/m}^3$.

6.2 Poikkileikkauksen taivutusjäykkyys ja jännitykset

Liittorakenteen taivutusjäykkyyden laskemiseen voidaan käyttää useita menetelmiä. Yleisesti käytetty on gammamenetelmä. Ekvivalentti gammamenetelmä ja laajennettu gammamenetelmä ovat modifioidut versiot perinteisestä gammamenetelmästä. Nämä pätevät puu-betoni-liittolaattoihin, joissa on 5-kerroksinen CLT-osio ja näillä saadaan määritettyä tehokas taivutusjäykkyys tarkasti verrattuna FE-mallinnukseen ja laboratoriotestituloksiin. (42 s. 20–25.) Muita menetelmiä on esimerkiksi Timoshenkon palkkiteoria, jota voidaan käyttää, kun betoni ja CLT ovat liimattuja toisiinsa. (49 s. 16).

Farbäckin ja Forsbergin (42) tutkimuksen mukaan laajennetulla gammamenetelmällä on kiinteämpi teoreettinen pohja kuin vastaavalla ekvivalentilla gammamenetelmällä, ja sitä pidetään suositeltavana suunnittelumenetelmänä. Ekvivalentin gammamenetelmän käyttö on suositeltu vain alustavia laskelmia varten. (42 s. 79) Tämän vuoksi tässä ohjeessa käydään läpi vain laajennettu gammamenetelmä sen suositeltavuuden vuoksi.

6.2.1 Taivutusjäykkyys laajennetulla gammamenetelmällä



Kuva 18. Laajennetun gammamenetelmän mukainen CLT-betoni-liittorakenteen poikkileikkaus. (42 s. 29).

Liittorakenteen efektiivinen taivutusjäykkyys $(EI)_{eff}$ lasketaan käyttäen laajennetun gammamenetelmän kaavaa (42 s. 29).

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad [\text{MNm}^2] \quad (55)$$

jossa

- E_i on kerroksen kimmokerroin
- I_i on kerroksen jäyhyysmomentti, joka lasketaan kaavalla

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12} \quad [\text{m}^4] \quad (56)$$

- γ_i on kerroksen liittovaikutusta kuvaava kerroin eli gamma-arvo
- A_i on kerroksen poikkipinta-ala, lasketaan kaavalla

$$A_i = b_i h_i \quad [\text{m}^2] \quad (57)$$

- a_i on kerroksen geometrisen keskikohdan etäisyys poikkileikkauksen neutraaliakselista

Neutraaliakselin sijainti liittorakenteen yläpinnasta lasketaan kaavalla

$$z_s = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i A_i o_i)}{\sum_{i=1}^n (E_i A_i)} \quad [\text{m}] \quad (58)$$

jossa

- E_i on kerroksen kimmomoduuli
- A_i on kerroksen poikkipinta-ala, perusarvona $b_i = 1000 \text{ mm}$

$$A_i = b_i h_i \quad [\text{m}^2] \quad (59)$$

- o_i on etäisyys kerroksen keskipisteestä liittorakenteen yläreunaan

Kantavien kerrosten i keskipisteen etäisyys neutraaliakselista a_i lasketaan kaavalla (positiivinen suunta alaspäin)

$$a_i = o_i - z_s \quad (60)$$

Kerrosten liittovaikutusta kuvaavat γ_i -kertoimet eli gamma-arvot saadaan ratkaistua vektorista

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & v_{3,2} & v_{3,3} & v_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & v_{n,n-1} & v_{n,n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} \quad (61)$$

s_i :t lasketaan kaavalla

$$s_i = -C_{i,i+1} \cdot (a_{i+1} - a_i) + C_{i-1,i} \cdot (a_i - a_{i-1}) \quad (62)$$

v_i :n arvot saadaan laskettua kaavoilla

$$v_{i,i-1} = -C_{i-1,i} \cdot a_{i-1} \quad (63)$$

$$v_{i,i} = (C_i + C_{i,i+1} + D_i) \cdot a_i \quad (64)$$

$$v_{i,i+1} = -C_{i,i+1} \cdot a_{i+1} \quad (65)$$

D_i :n arvo ottaa huomioon pitkittäin kantavien kerrosten jäykkyyden ja se lasketaan kaavalla.

$$D_i = \frac{\pi^2 E_i b_i h_i}{L_{ref}^2} \quad (66)$$

jossa

- $L_{ref} = L$ yksiaukkoisille palkeille
 $L_{ref} = 0,8L$ moniaukkoisille, kuten valutuetulle palkeille
(49 s. 35, 182)
- h_i on pitkittäisen kantavan kerroksen korkeus
- b_i on liittolaatan leveys
- E_i on kerroksen kimmomoduuli

$C_{j,k}$ [N/mm²] on kerrosten j ja k välissä olevaa liukuman vastustuksen suure, joka kuvaa kerroksen, jota voi ajatella myös jousena, siirtymäkerrointa pituusyksikköä kohden. Poikittaislamellille arvo saadaan kaavasta

$$C_{j,k,transverse} = \frac{b_i G_{R,j,k}}{h_{hattu,j,k}} \quad (67)$$

jossa

- $G_{R,j,k}$ on viereisen poikittaiskerroksen liukumoduuli
- $h_{hattu,j,k}$ on viereisen poikittaiskerroksen korkeus

ja mikäli kerrokset on kytketty toisiinsa mekaanisilla liitoksilla $C_{j,k,connector}$ -arvo saadaan kaavasta.

$$C_{j,k,connector} = \frac{K_i}{s_{ef}} \quad (68)$$

jossa

- K_i on leikkausliitosten jäykkyys
- s_{ef} on leikkausliitosten tehollinen välistys

Jos betoni ja CLT ovat liimattuja toisiinsa, käytetään liimakerrokselle materiaali-toimittajan antamaa $C_{j,k,connector}$ -arvoa. Jos liimakerros oletetaan jäykäksi, käytetään äärettömän korkeaa lukuarvoa.

Vaihtoehtoisesti jousivaikutuksen huomioiminen voidaan laskea Eurokoodi 5 puu-betoni-liittorakenne osion mukaan efektiiviseen taivutusjäykkyyteen kaavalla (38 B: B.3)

$$(EI)_{ef,sls} = C_{J,sls} (EI)_{eff} \quad [\text{MNm}^2] \quad (69)$$

$C_{J,sls}$ on kerroin, joka liittyy vuorovaikutukseen pystysuuntaisen kuormituksen ja joustamattomien kantojen välillä

$$C_{J,sls} = \frac{p_{sls} + q_d}{\frac{E_1 A_1 + E_2 A_2}{\gamma_1 E_1 A_1 + E_2 A_2} p_{sls} + q_d} \quad (70)$$

jossa

- p_{sls} on kuvitteellinen pystysuuntainen kuormitus, joka edustaa joustamattomien kantojen vaikutuksia rakenteessa
- q_d on ulkoisten kuormien mitoitusarvo
- E_1 on betonin kimmokerroin
- A_1 on betonin poikkileikkauksen pinta-ala
- E_2 on CLT:n kimmokerroin
- A_2 on CLT:n poikkileikkauksen pinta-ala
- γ_1 on betonin liittovaikutuskerroin

6.2.2 Normaali- ja taivutusjännitykset

Normaalijännitysten eli puristus- ja vetojännitysten jakaantuminen betonikerrokselle ja pitkittäisille CLT-kerroksille lasketaan jokaiselle kerrokselle ylä- ja alaosassa kerrosta. Kokonaisnormaalijännitys lasketaan kahden kaavan avulla, joista σ_i ottaa huomioon kytkentävaikutuksen ja $\sigma_{m,i}$ ottaa huomioon jännityksen jakaantumisen kerroksen korkeuden/paksuuden mukaan. Jännitykset ja jännitysten jakaantuminen havainnollistetaan kuvassa 2. (42 s. 33.)

Normaalijännitykset lasketaan Eurokoodi 5:n liitteen B mukaisesti kaavalla

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M_d}{(EI)_{eff}} \quad [\text{MPa}] \quad (71)$$

ja taivutusjännitykset kaavalla

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M_d}{(EI)_{eff}} \quad [\text{MPa}] \quad (72)$$

joissa

- γ_i on kerroksen liittovaikutuskerroin
- E_i on kerroksen kimmomoduuli
- h_i on kerroksen korkeus
- a_i on kerroksen geometrisen keskikohdan etäisyys poikkileikkauksen neutraaliakselista
- M_d on maksimi taivutusmomentti yksiaukkoiselle tasaisesti kuormitetulle laatalle

$$M_d = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (73)$$

- $(EI)_{eff}$ on liittorakenteen tehokas taivutusjäykkyys

Normaalijännitykset kunkin kerroksen ylä- ja alaosassa lasketaan kahden jännityksen summana. Kerroksen yläpinnassa vaikuttava yhdistetty normaali- ja taivutusjännitys lasketaan kaavalla $\sigma_i - \sigma_{m,i}$ ja kerroksen alapinnassa kaavalla $\sigma_i + \sigma_{m,i}$. (42 s. 147)

σ_i -jännityksen etumerkki summatessa riippuu siitä, onko laskettava kerros puristus- vai vetojännityksessä. Kerrokset, jotka sijaitsevat liittorakenteen neutraaliakselin yläpuolella, ovat yleensä puristusjännityksessä ja neutraaliakselin alapuolella sijaitsevat vetojännityksessä.

$\sigma_{m,i}$ -jännityksen etumerkki summatessa riippuu kiinnostuksen kohteena olevan kerroksen jännityksen sijainnista. Etumerkki on negatiivinen jännityksille kerroksen yläosassa ja positiivinen kerroksen alaosassa. (42 s. 34.)

6.2.3 Leikkausjännitykset

Leikkausjännityksen määrittäminen on merkityksellistä vain CLT-osiossa. Leikkausjännityksessä määritetään pitkittäiset leikkausjännitykset τ_i ja vääntöjänni-

tykset $\tau_{R,i}$. Suurin leikkausjännitys esiintyy CLT-osiossa, kun normaalivoima on nolla, mikä toteutuu neutraaliakselin kohdalla. Tämän takia leikkausjännityksen määrittämisessä mielenkiinnon kohteena ovat pitkittäiset ja poikittaiset kerrokset neutraaliakselin kohdalla tai vieressä. (42 s. 34)

Epäsymmetristen poikkileikkausten leikkausjännitys, joissa on erilainen leikkausjäykkyys, määritetään kyseisen kerroksen kimmomoduulin ja tehokkaan taivutusjäykkyyden suhteella.

Leikkausjännitys lasketaan kaavalla

$$\tau_i = \frac{E_i S_{net} V_d}{(EI)_{eff} b} \quad [\text{MPa}] \quad (74)$$

ja vääntöjännitys kaavalla

$$\tau_{R,i} = \frac{E_i S_{R,net} V_d}{(EI)_{eff} b} \quad [\text{MPa}] \quad (75)$$

joissa

- E_i on kerroksen kimmomoduuli
- s_{net} on staattinen momentti pituusleikkaukselle leikatun alueen suhteen poikkileikkauksen neutraaliakseliin nähden
- $s_{R,net}$ on staattinen momentti leikkausvoiman aiheuttamalle muodonmuutokselle (*rolling shear*) leikatun alueen suhteen poikkileikkauksen neutraaliakseliin nähden
- V_d on maksimi mitoitus leikkausvoima yksiaukkoisella tasaisesti kuormitetulla laatalla

$$V_d = \frac{q \cdot L}{2} \quad (76)$$

- $(EI)_{eff}$ on liittolaatan tehokas taivutusjäykkyys
- b on liittolaatan leveys

6.3 Murtorajatilamitoitus

Tässä työssä murtorajatilamitoitus käydään suppeasti läpi keskittyen lähinnä mitoituskaavoihin, joita mitoituksessa tarvitaan. Työssä on keskitytty syvällisemmin liittorakenteen asioihin.

6.3.1 CLT:n taivutuskestävyys

Ennen liittorakennevaihetta CLT:n tulee kestää sille aiheutuvat taivutusjännitykset mitoitusehdon mukaan (52 s. 38)

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0 \quad (77)$$

CLT:n mitoituslujuus $f_{m,d}$ lasketaan kaavalla

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (78)$$

jossa

- k_{mod} -arvot saadaan taulukosta 2
- $f_{m,k}$ saadaan CLT:n materiaalitoimittajalta
- γ_M on CLT:n materiaaliosavarmuuskerroin 1,25

6.3.2 CLT:n yhdistetty veto- ja taivutuskestävyys

CLT:n lamellikerrosten katsotaan ottavan vastaan taivutus- ja normaalijännitystä vain syiden suunnassa. Nämä molemmat suunnat tarkastellaan erikseen, jolloin taivutusta ei tarvitse tarkastella kahteen suuntaan kerrallaan, jos CLT:hen kohdistuu vain tasoa vastaan kohtisuoria kuormia. (34 s. 57)

Yhdistetyn taivutuksen ja vedon täytyy toteuttaa mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (79)$$

jossa

- $\sigma_{t,0,d}$ on lamellin vetojännitys
- $\sigma_{m,d}$ on lamellin taivutusjännitys

CLT:n mitoitusvetolujuus $f_{t,0,d}$ lasketaan kaavalla

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (80)$$

6.3.3 CLT:n tukipainekestävyys

CLT:n puristusjännityksen kohtisuoraan syiden suuntaan tukipinnalla $\sigma_{c,z,d}$ tulee täyttää ehto (46 s. 96)

$$\sigma_{c,90,d} = k_{mat} \cdot k_{c,90,CLT} \cdot f_{c,90,d} \quad (81)$$

jossa

- $\sigma_{c,90,d}$ on CLT:n puristuslujuus syytä vastaan kohtisuoraan
- k_{mat} on kerroin, joka huomioi materiaaliominaisuudet ja hyväksyttävän kokoonpuristumisen syiden suuntaan kohtisuorassa.

CLT:illä

$$k_{mat} = \begin{cases} 1,4, & \text{jos sallitaan 2,5 \%: n kokoonpuristuma} \\ 2,1, & \text{jos sallitaan 10 \%: n kokoonpuristuma} \\ 2,7, & \text{jos sallitaan 20 \%: n kokoonpuristuma} \end{cases} \quad (82)$$

Kerroin $k_{c,90,CLT}$ ottaa huomioon jännityksen jakaantumisen ja lasketaan kaavalla

$$k_{c,90,CLT} = \sqrt{\frac{b_{ef} \cdot l_{ef}}{b_{c,90} \cdot l_{c,90}}} \leq 4 \quad (83)$$

jossa

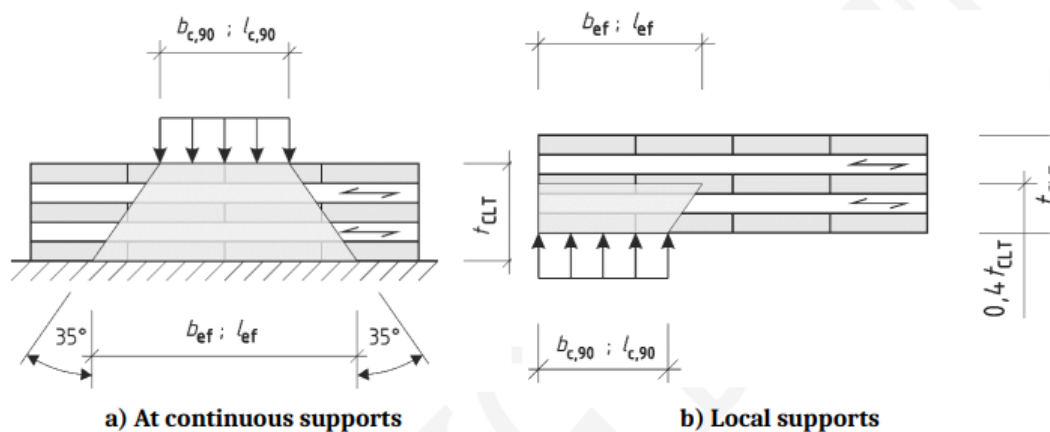
- b_{ef} on tehollinen puristuspinnan leveys kohtisuorassa syitä vastaan
- l_{ef} on tehollinen puristuspinnan pituus alueen leveys syiden suunnassa
- $b_{c,90}$ on puristuspinnan leveys kohtisuorassa syitä vastaan
- $l_{c,90}$ on puristuspinnan pituus syiden suunnassa

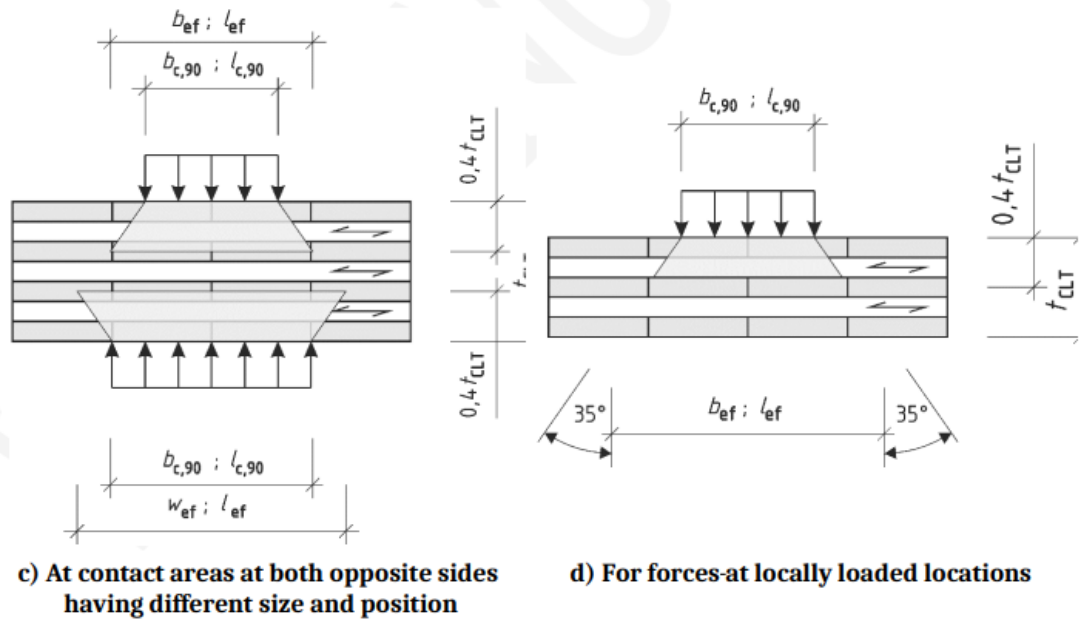
Tehollinen puristuspinnan pituus l_{ef} lasketaan kaavalla

$$l_{ef} = \begin{cases} l + \tan 35^\circ \cdot 0,4 \cdot t_{CL} & \text{päättyillä} \\ l + 2 \cdot \tan 35^\circ \cdot 0,4 \cdot t_{CL} & \text{keskituilla} \end{cases} \quad (84)$$

jossa

- t_{CL} on CLT:n paksuus





Kuva 19. Kuorman jakaantumisleveys ja rasituksen leviämispituus CLT:ssä, johon kohdistuu puristus kohtisuorassa tasoon nähden (46 s. 97).

6.3.4 CLT:n leikkauskestävyys

CLT:n kantavissa kerroksissa leikkausjännityksen tulee toteuttaa mitoitusehto (46 s. 104)

$$\tau_d \leq k_v f_{v,d} \quad (85)$$

jossa

- k_v on 1,0 CLT:lle

Kantavan lamellin leikkauslujuus $f_{v,d}$ lasketaan kaavalla

$$f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (86)$$

CLT:n poikittaislamellin sekä niiden liimasauvojen leikkausjännityksen tulee täyttää ehto (34 s. 59)

$$\tau_d \leq f_{r,d} \quad (87)$$

jossa

- $f_{r,d}$ on poikittaiskerroksen tai sen liimakerroksen tasoleikkauslujuus, joka lasketaan kaavalla

$$f_{r,d} = k_{mod} \frac{f_{r,k}}{\gamma_M} \quad (88)$$

jossa

- $f_{r,k}$ on liimasauman tai poikittaiskerroksen tasoleikkauslujuuden ominaisarvo materiaalitoimittajan voimassa olevan ohjeen tai hyväksynnän mukaan.

6.3.5 Betonin puristuslujuus

Betonin yhdistetyn puristus- ja taivutusjännityksen mitoitusarvon $\sigma_{conc,c,d}$ tulee täyttää mitoitusehto (38 s. 28)

$$\sigma_{conc,c,d} \leq f_{cd} \quad (89)$$

Betonin mitoituspuristuslujuus f_{cd} lasketaan kaavalla

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (90)$$

jossa

- f_{ck} on betonin ominaispuristuskestävyys lujuusluokan mukaan
- γ_c on betonin osavarmuusluku 1,5

- α_{cc} on betonin puristuslujuuskerroin, suositusarvo 1,0 ja Suomen kansallinen arvo 0,85

6.3.6 Betonin vetolujuus

Betonin ei katsota ottavan vastaan lainkaan vetojännitystä, mikäli betonin oletetaan halkeilevan kutistumisen takia ennen kuin valutuenta poistetaan. Mikäli betonin vetolujuus halutaan hyödyntää, tulee betonin täyttää ehto (38 s. 28)

$$\sigma_{conc,t,d} \leq f_{ctd} \quad (91)$$

jossa betonin vetolujuus lasketaan kaavalla

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (92)$$

jossa

- α_{ct} on betonin vetolujuuskerroin, Suomen kansallinen arvo 1,0
- $f_{ctk,0,05}$ on betonin vetolujuuden 5 %:n alaraja-arvo
- γ_c on betonin osavarmuusluku

Mikäli mitoitusehto ei toteudu, betoni halkeaa sen lujuuden ylittävältä syvyydeltä. Poikkileikkauksen jännitykset on laskettava uudelleen jättämällä huomiotta haljenneen osan vetolujuus. Tämä on iteroitava prosessi ja tulee toistaa niin monta kertaa, kunnes mitoitusehto toteutuu. (34 s. 61)

6.3.7 Betonin tasonsuuntainen leikkauslujuus

Teräsbetonilaatassa tulee olla vähintään minimirauditus. Betonin kantavan suunnan tasonsuuntainen leikkausjännitys τ_{Ed} lasketaan kaavalla (38 s. 29)

$$\tau_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f \cdot \Delta x} \quad (93)$$

jossa

- h_f on betonin korkeus
- ΔF_d on leikkausvoiman muutos matkalla Δx
- Δx arvona käytetään usein 1 000 mm (tai enintään taivutusmomentin nollakohdan ja huippukohdan etäisyys tai mahdollisten liittolaatan pistekuormien etäisyys toisistaan)

Betonin puristussauvan jännityksen $\sigma_{c,d}$ tulee täyttää ehto (38 s. 32)

$$\sigma_{c,d} = \tau_{Ed} \cdot (\cot \theta + \tan \theta) < v \cdot f_{cd} \quad (94)$$

jossa

- τ_{Ed} on kaavan 93 mukainen leikkausjännitys
- v on v on lujuusvähennyskerroin halkeillelle betonille EN 1992-1-1:2004, 6.2.5
- θ on betonin puristussauvan kulma, joka voidaan valita väliltä $45^\circ \geq \theta \geq 26,5^\circ$

Leikkausliittimien ympäri kulkevaa leikkauspintaa varten betonilaatan tasonsuuntaisen leikkausjännityksen τ_{Ed} tulisi täyttää mitoitusehto (38 s. 32)

$$\sigma_{c,d} = \tau_{Ed} < v \cdot f_{cd} \quad (95)$$

jossa

- $\sigma_{c,d}$ on mitoituspuristusjännitys betonin puristussauvassa
- f_{cd} on betonin mitoituspuristuslujuus

Lujuusvähennyskerroin v lasketaan kaavalla

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ N/mm}^2}\right) \quad (96)$$

Leikkausliittimien ympäri kulkevaa leikkauspintaa varten betonilaatan tasonsuuntaisen leikkausjännitys τ_{Ed} lasketaan kaavalla

$$\tau_{Ed} = \frac{2 \cdot \Delta F_d}{l_{shear} \cdot \Delta x} \quad (97)$$

jossa

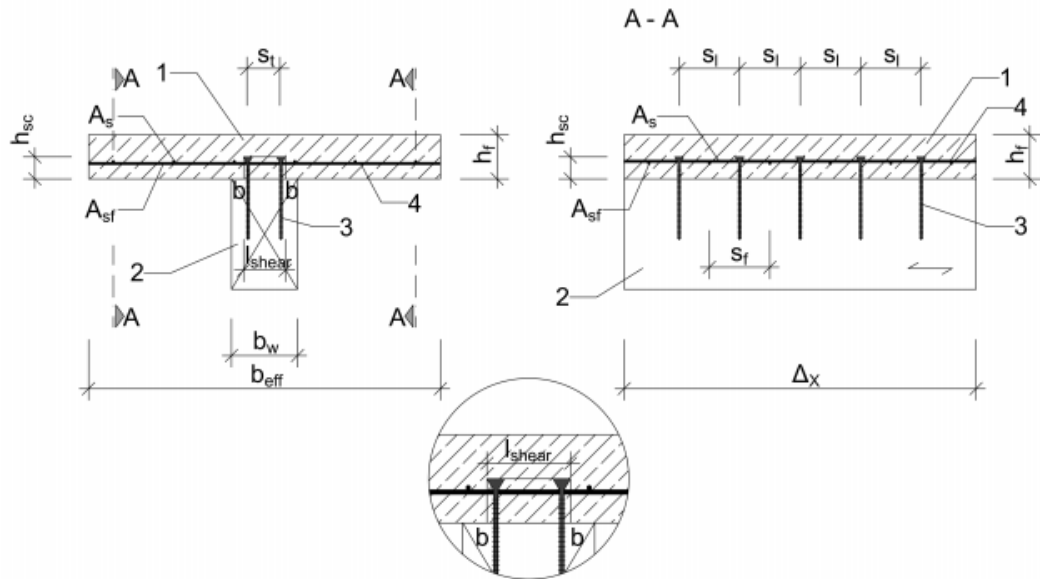
- l_{shear} on leikkauspinnan pituus leikkausliittimien ympärillä

Pituus lasketaan kaavoilla

$$l_{shear} = \begin{cases} 2h_{sc} + d_{sc} & \text{yhdelle tai porrastetulle liitinriville} \\ 2h_{sc} + s_t + d_{sc} & \text{liitinpareista koostuvalle riville} \end{cases} \quad (98)$$

jossa

- h_{sc} on liittimen korkeus betonissa
- d_{sc} on liittimen halkaisija betonissa
- s_t on liittinten poikittainen keskeltä-keskelle välitys



Kuva 20. Betonin ja CLT:n välinen leikkausliitos (38 s. 31).

- 1 = betoni
- 2 = CLT
- 3 = liitin
- 4 = raudoitusteräs

Betonin mitoitusleikkauslujuus tulee olla määritelty EN 1992-1-1:2004, 6.2.4 mukaisesti, jossa betonin leikkauslujuus voi olla laskettuna tarkastelemalla laat-
 taan puristuvien tukien järjestelmänä yhdistettynä vetositeisiin. Poikittaisraudoit-
 tuksen pinta-ala A_{sf} tankovälillä $s_f \leq 150$ mm lasketaan kaavalla (38 s. 30)

$$\frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x f_{yd} \cot \theta} \quad (99)$$

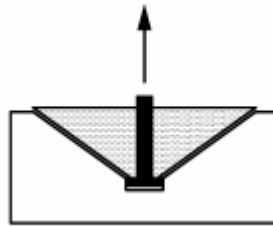
jossa

- A_{sf} on laatan poikittaisraudoituksen poikkipinta-ala pituusyksikköä kohden
- s_f on betonilaatassa olevien poikittaisten raudoitustankojen väli
- ΔF_d on mitoitusleikkauslujuus tietyn pituuden yli
- Δx on tarkasteltavana oleva pituus

- f_{yd} on poikittaisraudoitteen myötölujuuden mitoitusarvo
- θ on betonin puristussauvan kulma

6.3.8 Betonin kartiomurto vedetyn liittimen kohdalla

Liittimen kestävyys lisäksi vedettyjen liittimien yhteydessä tulee tarkistaa betonin kartiomurtokestävyys sekä ulosvetokestävyys (52 s. 46).



Kuva 21. Betonin kartiomurto. (52 s. 46).

Yksittäisen tai kuormitetuimman kiinnikkeen alaisen betonin kartiomurron kestävyys tulee täyttää mitoitusehto

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \quad (100)$$

jossa

- $N_{Rk,c}$ on betonin kartiomurtokestävyys ominaisarvo
- γ_{Mc} on betonin kartiomurron osavarmuusluku, lasketaan kaavalla

$$\gamma_{Mc} = \gamma_c \cdot \gamma_{inst} \quad (101)$$

jossa

- γ_c on betonin osavarmuusluku murtorajatilassa
- $\gamma_{inst} = 1,0$

Betonin kartiomurtokestävyys $N_{Rk,c}$ lasketaan kaavalla

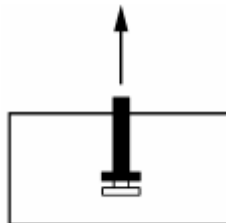
$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} \quad (102)$$

jossa

- $N_{Rk,c}^0$ on yksittäisen betonissa olevan kiinnikkeen ominaiskestävyys
- $A_{c,N}$ on ideaalisen betonimurtokartion todellinen pinta-ala
- $A_{c,N}^0$ on betonin murtokartion referenssiprojektioala
- $\psi_{s,N}$ -kertoimella otetaan huomioon betonirakenteosan reunan läheisyyden aiheuttamat häiriöt betonin jännitysjaakamaan
- $\psi_{re,N}$ on betonipinnan lohkeamiskerroin, jota käytetään, kun
- $h_{ef} < 100$ mm
- $\psi_{ec,N}$ -kertoimella otetaan huomioon ryhmävaikutus, kun kiinnikeryhmän yksittäisiin kiinnikkeisiin vaikuttaa erisuuruinen vetovoima
- $\psi_{M,N}$ -kertoimella otetaan huomioon kiinnitysosan ja betonin välisen puristusvoiman vaikutus, kun liitokseen kohdistuu taivutusmomentteja normaalivoiman kanssa tai ilman

Yllä olevat arvot lasketaan SFS-EN 1992-4:2018 7.2.1.4 mukaisesti (52 s. 49–54).

6.3.9 Liittimen ulosvetokestävyys betonista



Kuva 22. Ulosvetomurto. (52 s. 46)

Kiinnikkeen ulosvetokestävyyden betonista tulee täyttää mitoitusehto

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,p} = \frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{Mp}} \quad (103)$$

jossa

- $\gamma_{Mp} = \gamma_{Mc}$

Kannallisen kiinnikkeen ominaisulosvetomurtokestävyys betonista $N_{Rk,p}$ lasketaan kaavalla (52 s. 54).

$$N_{Rk,p} = k_2 \cdot A_h \cdot f_{ck} \quad (104)$$

jossa

- A_h on kannan kuormia kantava pinta-ala

$$k_2 = \begin{cases} 7,5 & \text{halkeilleessa betonissa oleville kiinnikkeille} \\ 10,5 & \text{halkelemattomassa betonissa oleville kiinnikkeille} \end{cases} \quad (105)$$

- f_{ck} on betonin ominaispuristuslujuus

Ympyränmuotoisille kannoille kuormia kantava pinta-ala A_h lasketaan kaavalla

$$A_h = \frac{\pi}{4} (d_h^2 - d_a^2) \quad (106)$$

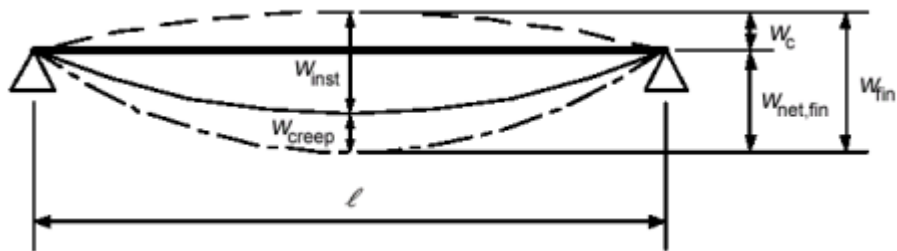
jossa

- d_h on kannan pinta-ala
- d_a on varren pinta-ala

6.4 Käyttörajatilamitoitus

6.4.1 Taipuma

Nykyisen voimassa olevan Eurokoodi 5:n mukaisen taipuma muodostuu kuvan 23 mukaisista osista.



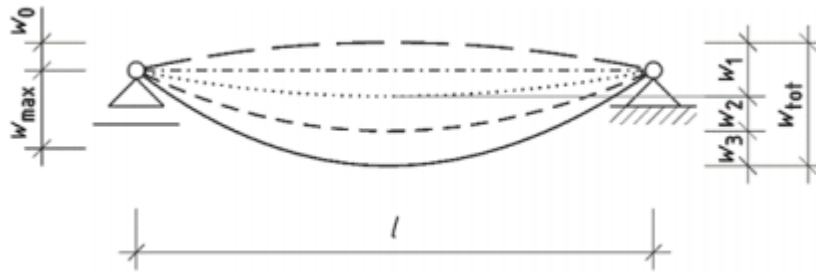
Kuva 23. Taipuman muodostuminen. (53 s. 50)

- w_c on esikorotus
- w_{inst} on hetkellinen taipuma
- w_{creep} on virumasta syntyvä lisätaipuma
- w_{fin} on kokonaistaipuma
- $w_{net,fin}$ on lopputaipuma

Lopputaipuma $w_{net,fin}$ lasketaan kaavalla

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (107)$$

Uuden Eurokoodi 5:n luonnoksen mukaan taipuma muodostuu kuvan 24 perusteella



Kuva 24. Uuden Eurokoodi 5 luonnoksen taipumakuvaajat (46 s. 148)

- w_0 on esikorotus kuormittamattomassa rakenneosassa
- w_1 on taipuma pysyvistä kuormista heti kuorman vaikutuksen alkamisen jälkeen
- w_2 on pitkäaikaistaipuma pysyvistä kuormista
- w_3 on hetkellinen taipuma muuttuvista kuormista
- w_{tot} on kokonaismuodonmuutos, joka on w_1 :n, w_2 :n ja w_3 :n summa

$$w_{tot} = w_1 + w_2 + w_3 \quad (108)$$

- w_{max} on jäljelle jäävä kokonaistaipuma, joka ottaa huomioon esikorotuksen

$$w_{max} = w_{tot} - w_0 \quad (109)$$

Taulukko 9. Liittorakenteen taipumien enimmäisarvot Ympäristöministeriön kansallisen liitteen mukaisesti (45 s. 73).

Suosittelava taipumaraaja	w_{max}	$w_2 + w_3$
Väliopohjat yleensä	$L/250$	$L/300$

Taipuma w_p tasaisesta kuormasta q yksiaukkoiselle, vapaasti päistään tuetulle painumattomalle palkille pisteessä x lasketaan kaavalla

$$w_p(x) = \frac{q \cdot L^4}{24 \cdot (EI)_{eff}} \cdot \left[\frac{x}{L} - 2 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^3 + \left(\frac{x}{L}\right)^4 \right] \quad (110)$$

6.4.2 Värähtely

Värähtely on toistuvaa jaksollista liikettä, joka tapahtuu kappaleen tasapaino-
aseman ympärillä. Ihmisen keho ja monet esineet ovat herkkiä lattioiden väräh-
telyille, keho voi aistia pienetkin värähtelyt epämiellyttävinä. Tyypillisiä värähte-
lyn aiheuttajia välipohjalle ovat kävely, pyykinpesukone ja liikennetärinä. (54.)

CLT-betoni-liittolaatta on massansa ja pitkän jännevälin vuoksi matalataajuus-
lattia ja näiden värähtelymitoituksessa tarkastellaan lattian tärinää eli resonans-
sia ja kiihtyvyyttä (54).

On varmistettava, että osaan, komponenttiin tai rakenteeseen kohdistuvat koh-
tuudella ennakoitavissa olevat vaikutukset eivät aiheuta tärinää, joka voi heiken-
tää rakenteen toimintaa tai aiheuttaa liiallista epämukavuutta käyttäjille (46 s.
151).

Taulukko 10. Värähtelyvaatimukset uuden Eurokoodi 5 luonnoksen mukaan (46
s. 160).

Ehto	Lattian vaatimustaso					
Taso	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>

Vastekerroin R	4	8	12	24	36	48
Taipumaraja $w_{lim,max}$ mm	0,25	0,25	0,50	1,0	1,5	2,0
Jäykkyyskriteeri	$w_{1kN} \leq w_{lim}$ mm					
Taajuus	$f_1 \geq 4,5$ Hz					
Kiihtyvyys (jos $f_1 < 8$ Hz)	$a_{rms} \leq 0,005 R$ m/s ²					
Nopeus (jos $f_1 \geq 8$ Hz)	$v_{rms} \leq 0,0001 R$ m/s ²					

Taulukko 11. Suositellut lattioiden vaatimustasot (46 s. 160–161).

Käyttötarkoitus	Laadukas	Perus	Taloudellinen
A (asuinrakennus)			
-kerrostalo	Tasot 1, 2, 3	Taso 4	Taso 5
-omakotitalo	Tasot 1, 2, 3, 4	Taso 5	Taso 6

B (toimisto)	Tasot 1, 2, 3	Taso 4	Taso 5
---------------------	---------------	--------	--------

Tulevan Eurokoodi 5:n mukaan yhteen tai kahteen suuntaan kantaville lattioille, jotka ovat suunnilleen suorakaiteen muotoisia, ovat painumattomilla tuilla ja ensisijaisesti yhtenäisen kuormituksen alaisia, voidaan laskea alin ominaistajuus f_1 kaavalla (46 s.153).

$$f_1 = k_{e,1}k_{e,2} \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \sqrt{\frac{(EI)_{L,app}}{m}} \quad (111)$$

ja

$$k_{e,2} = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{L}{E}\right)^4 \cdot (EI)_T}{(EI)_{L,app}}} & \text{kahteen suuntaan kantavalla lattialla} \\ 1 & \text{yhteen suuntaan kantavalla lattialla} \end{cases} \quad (112)$$

joissa

- $k_{e,1}$ on palkin moniaukkoisuuden huomioiva kerroin, jonka arvo yksiaukkoisilla lattioilla on $k_{e,1} = 1,0$. Kaksiaukkoisen lattian $k_{e,1}$ -kerroin saadaan uuden Eurokoodi 5 taulukosta 09.1. (46 s. 154)
- $k_{e,2}$ on lattian kantosuunnat ja poikittaisen jäykkyyden huomioiva kerroin
- $(EI)_{L,app}$ on lattian taivutusjäykkyys metrin leveydellä kantavassa suunnassa
- $(EI)_T$ on lattian taivutusjäykkyys metrin leveydellä poikittaisessa suunnassa
- m on lattian laskennallinen värähtelevä massa neliometriä kohti, mikä koostuu pysyvien ominaiskuormien summasta $\sum G_k$ sekä 10 %:n osuudesta täyden hyötykuorman ominaisarvosta (46 s. 152)
- L on lattian jänneväli kantavassa suunnassa

Alin ominaistajuus voidaan myös laskea kaavalla 113, jolloin saadaan otettua useampia muuttujia mukaan värähtelytarkasteluun (46 s. 154).

$$f_1 = k_{e,1}k_{e,2} \frac{18}{\sqrt{w_{sys}}} \quad (113)$$

jossa

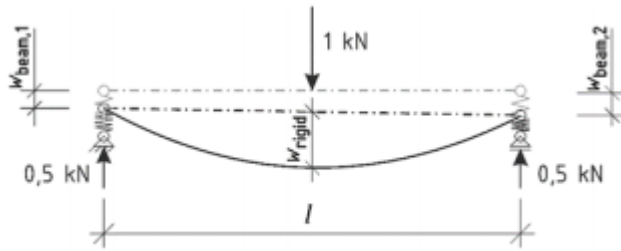
- w_{sys} on yksiaukkoisen lattian taipuma (mukaan lukien vaikutukset mahdollisista tukien taipua, leikkausmuutoksista ja liitoksista liittorakenteissa)

Yksiaukkoisen lattian tukeutuessa pääsuunnastaan joko toisessa tai molemmissa päissä taipuvaan tukeen, tämä tulee ottaa huomioon koko lattiarakenteen alimmassa ominaistajuudessa f_1 kaavalla 114 (46 s. 154).

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,rigid}^2} + \frac{1}{3f_{1,beam,1}^2} + \frac{1}{3f_{1,beam,2}^2}}} \quad (114)$$

jossa

- $f_{1,rigid}$ on lattiarakenteen ominaistajuus painumattomilla tuilla (kaava 111)
- $f_{1,beam,1}$ on lattiarakenteen yhden puolen tuen ominaistajuus
- $f_{1,beam,2}$ on lattiarakenteen toisen puolen tuen ominaistajuus



Kuva 25. Lattian suurin taipuma, kun lattia on tuettu taipuvilla tuilla (46 s. 156).

Suurin taipuma lattialle taipuvilla tuilla w_{1kN} lasketaan käyttäen 1 kN pistekuormaa laatan puolivälissä kaavalla

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_L b_{ef}} \quad (115)$$

Lattian tehollinen leveys b_{ef} lasketaan kaavalla, kun poikittaisjäykkyys $(EI)_T$ on vakio koko jännevälillä

$$b_{ef} = \min \left\{ 0,95 \cdot L \cdot \left(\frac{(EI)_T}{(EI)_L} \right)^{0,25}, b \right\} \quad (116)$$

jossa

- L on lattian jänneväli
- $(EI)_L$ on taivutusjäykkyys kantavaan suuntaan
- $(EI)_T$ on taivutusjäykkyys poikittain kantavaa suuntaa nähden
- b on lattian leveys

Kun yksiaukkoisen lattian toinen tai kumpikin tuki on taipuva, lattian suurin taipuma 1 kN pistekuormat lasketaan kaavalla

$$w_{1kN} = 0,5 \cdot w_{beam,1} + 0,5 \cdot w_{beam,2} + w_{rigid} \quad (117)$$

jossa

- $w_{beam,1}$ on tuen 1 taipuma 0,5 kN kuormasta
- $w_{beam,2}$ on tuen 2 taipuma 0,5 kN kuormasta
- w_{rigid} on lattian taipuma taipumattomilla tuilla 1 kN kuormasta

Matalataajuuslattioiden neliöllinen kiihtyvyyssamplitudi a_{rms} tulee tarkastaa, jos $f_1 < 8$ Hz ja se lasketaan kaavalla 118 (46 s. 157)

$$a_{rms} = \frac{k_{res} \cdot \mu \cdot F_{dyn}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M^*} \quad (118)$$

jossa

- k_{res} on tekijä, joka ottaa huomioon korkeammat värähtelytilat

$$k_{res} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,192 \cdot \left(\frac{b}{l}\right) \cdot \left[\frac{(EI)_L}{(EI)_T}\right]^{0,25} \\ 1,0 \end{array} \right. \quad (119)$$

- $(EI)_L$ on taivutusjäykkyys kantavaan suuntaan
- $(EI)_T$ on taivutusjäykkyys poikittain kantavaa suuntaa nähden
- μ on resonanssin kertymiskerroin, jona voidaan käyttää $\mu = 0,4$
- F_{dyn} on kävelevän henkilön oletetun painon aiheuttama pystysuora dynaaminen voima, joka oletetaan $F_{dyn} = 50$ N
- ζ on modaalinen vaimennussuhde (puu-betoni-liittolattialle $\zeta = 0,025$)
- M^* on modaalinen massa, joka lasketaan kaavalla (m on lattian massa per alue, l on lattian jännevälin pituus ja b on lattian leveys)

$$M^* = \frac{m \cdot l \cdot b}{4} \quad (120)$$

Korkeataajuuslattioiden neliöllinen nopeusvaste v_{rms} tulee tarkastaa, jos $f_1 \geq 8$ Hz, ja tarkastellaan kaavoilla (46 s. 158–159)

$$v_{rms} = v_{tot,peak} \cdot (0,65 \text{ Hz} - 0,01 \cdot f_1)(1,22 - 11,0 \cdot \zeta) \cdot \eta \quad (121)$$

jossa

- ζ on modaalinen vaimennussuhde (puu-betoni-liittolattialle $\zeta = 0,025$)
- Kerroin η lasketaan kaavalla

$$\eta = \begin{cases} 1,35 - 0,4 \cdot k_{imp} & \text{kun } 1,0 \leq k_{imp} \leq 1,9, & \text{muuten } \eta = 0,59 \text{ (palkkilattioille)} \\ 1,35 - 0,4 \cdot k_{imp} & \text{kun } 1,0 \leq k_{imp} \leq 1,7, & \text{muuten } \eta = 0,67 \text{ (kaikille muille)} \end{cases} \quad (122)$$

Lattian suurin nopeusvaste lasketaan kaavalla

$$v_{tot,peak} = k_{imp} \cdot v_{1,peak} \quad (123)$$

jossa

- k_{imp} -kerroin huomioi alinta ominaistaajuutta korkeampien ominaistaajuuksien vaikutusta nopeusvasteeseen

Lattian suurin nopeus alimmassa ominaistaajuudessa $v_{1,peak}$ lasketaan kaavalla

$$v_{1,peak} = k_{red} \cdot \frac{I_m}{M^* + 70 \text{ kg}} \quad (124)$$

jossa

- k_{red} on vähennystekijä, joka voidaan ottaa $k_{red} = 0,7$
- I_m on lattialle aiheutuva keskimääräinen impulssi

$$I_m = \frac{42 \cdot f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}} \quad (125)$$

jossa

- f_w on kävelyn taajuus, joka voidaan olettaa hyötykuorman luokassa A $f_w = 1,5$ Hz ja muissa hyötykuorman luokissa $f_w = 2,0$ Hz. Jos kävelijä voi kävellä yli 10 metriä esteettömästi, kaikissa hyötykuorman luokissa oletetaan $f_w = 2,5$ Hz. (46 s. 152)

Alinta ominaistaajuutta korkeampien ominaistaajuuksien vaikutusta nopeusvasteeseen huomioidaan kertoimella k_{imp} ja se lasketaan kaavalla

$$k_{imp} = \max \left\{ 0,48 \cdot \left(\frac{b}{l} \right) \cdot \left[\frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right]^{0,25}, 1,0 \right\} \quad (126)$$

6.5 Palomitoitus

Palotilanteen kuormitusyhdistelmä lasketaan kaavalla (55 s.18)

$$E_{d,fi} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \begin{cases} \psi_{2,1} \\ \psi_{1,1} \end{cases} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i=1}^n \psi_{2,1} Q_{k,i} \quad (127)$$

jossa

- G_k on pysyvän kuorman ominaisarvo
- ψ ovat palotilanteen kuormien yhdistelykertoimia
- $Q_{k,1}$ on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

- $Q_{k,i}$ on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo

6.5.1 Leikkausliitos palossa

Leikkausliitoksen ominaiskestävyys palossa lasketaan kaavalla (34 s. 67)

$$R_{k,fi} = \eta_{R,fi} R_k \quad (128)$$

jossa

- R_k on liitososan ominaiskestävyys normaalilämpötilassa
- $\eta_{R,fi}$ on kestävyuden heikennyskerroin

Liitososan jäykkyys palotilanteessa K_{fi} lasketaan kaavalla (34 s. 67–68; 56 s. 52–53)

$$K_{fi} = \eta_{K,fi} \cdot K \quad (129)$$

jossa

- K on liittimen jäykkyys normaalilämpötilassa, $K = K_u$ paitsi palonai-
kaista taipumaa laskettaessa voidaan käyttää $K = K_{ser}$
- $\eta_{K,fi}$ on heikennyskerroin, joka huomioi liittimen lämpiämisen vaiku-
tuksen

$$\eta_{K,fi} = \begin{cases} 1,0 & \text{loviilitoksella} \\ 0,2 & \text{kohtisuoraan asennetuilla nauloilla sekä ruuveilla} \\ 0,67 & \text{kohtisuoraan asennetuilla pulteilla, puikoilla ja muilla liittimillä} \end{cases} \quad (130)$$

6.5.2 Teräsbetoni palossa

Betonin mekaaniset materiaaliominaisuudet palossa $X_{d,fi}$ lasketaan kaavalla (57 s. 14)

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (131)$$

jossa

- k_{θ} on lujuus- tai muodonmuutosominaisuuden pienennyskerroin, jonka arvona käytetään lukua 1,0 ja jäännöspoikkileikkaukselle 500 °C isotermimenetelmällä
- $\gamma_{M,fi} = 1,0$ ellei kansallinen liite anna toista arvoa

Alapuolisessa palossa betonin vetolujuuden ominaisarvon pieneneminen voidaan ottaa huomioon käyttämällä kerrointa $k_{c,t}(\theta)$ (57 s. 19)

$$k_{c,t}(\theta) = \begin{cases} 1,0 & \text{kun } 20 \text{ °C} \leq \theta \leq 100 \text{ °C} \\ 1,0 - \frac{1,0(\theta - 100 \text{ °C})}{500} & \text{kun } 100 \text{ °C} < \theta \leq 600 \text{ °C} \end{cases} \quad (132)$$

6.5.3 CLT palossa

CLT on puutavaraa, joten kun se altistuu tulelle ja siten kohonneelle energiansyötölle, sen lämpötila nousee ja puumateriaalin sitoutumattomat vesimolekyylit alkavat haihtua n. 100 celsiusasteessa. 200–300 celsiusasteessa pitkäketjuiset ligniini-, selluloosa- ja hemiselluloosamolekyylit alkavat hajota, jolloin muodostuu kaasumaisia ja syttyviä yhdisteitä. Kun kaasu pääsee puun pintaan, se reagoi ilman hapen kanssa ja palaa. Nämä kemialliset yhdisteet hajoavat prosessissa, joka tunnetaan nimellä ”pyrolyysi”, joka etenee vähitellen puuta pitkin jättäen hiiltymisen alueen taakseen. Pyrolyysin jäännöshiilloskerros toimii lämmöneristeenä ja suojaa alla olevaa vahingoittumatonta puuta. Puu hiiltyy n. 0,8 mm minuutissa. (58 s.3.)

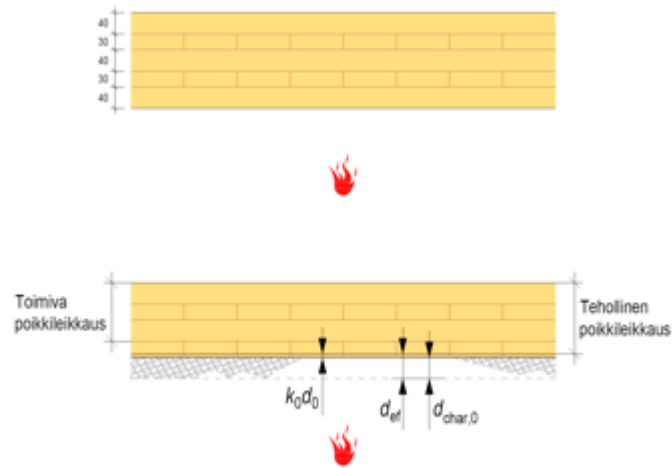
CLT:ssä saattaa esiintyä hiiltymisen yhteydessä delaminoitumista eli kerrosten liimaukset irtoavat toisistaan. Tämä johtuu siitä, että CLT:n liimasaumat eivät kestä palorasitusta ja tätä esiintyy polyuretaaniliimalla valmistetuissa CLT-

levyissä. Delaminoitumisesta johtuen CLT-levyn hiiltymisen ei ole lineaarista, vaan hiiltymisen tapahtuu useammalla hiiltymisnopeudella. Valmistukseen kehitellään uudenlaisia liimoja, jotta delaminoituminen voidaan estää. Delaminoitumisessa oletetaan, että hiiltynyt lamellikerros irtoaa, jolloin suojaava hiilikerros menetetään. Hiiltymisen alkaa seuraavassa lamellikerroksessa normaalia suuremmalla nopeudella, koska lamellikerros on jo lämmennyt. Hiiltymisnopeuden oletetaan palautuvan normaaliksi, kun hiiltymissyvyys on 25 mm. Palomitoituksen näkökulmasta olisi edullista, että CLT-levyn lamellit olisivat paksuja. Mikäli pintalamellikerros on niin paksu, että hiiltymisen ei pääse palonkestoajaksi liimasaumaan saakka, ei delaminoitumista pääse tapahtumaan. Vaakarakenteiden delaminoituminen on voimakkaampaa kuin pystyrakenteiden. (59; 60 s. 83.)

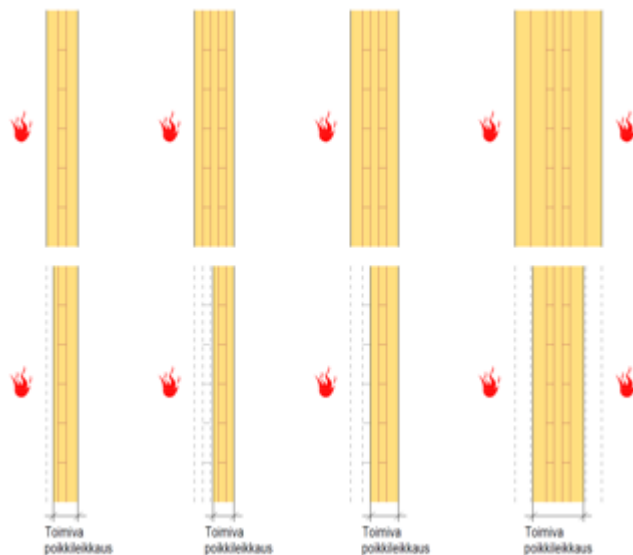


Kuva 26. CLT-levyn delaminoituminen polttokokeessa. (60 s. 84)

Toimivassa poikkileikkauksessa tulee aina olla molemmissa pinnoissa taivutuksen suuntaiset lamellikerrokset. Taivutussuuntaan nähden poikittaiset lamellikerrokset tulee vähentää toimivasta poikkileikkauksesta. (59.) CLT-levy voidaan palosuojata levytyksellä koko vaaditulle palonkestoajalle, etenkin jos käytössä on 3-kerroksinen levy, jonka kantavuus menetetään, jos pintalamellikerros palaa pois (60 s. 83–84).



Kuva 27. CLT-levyn hiiltyminen (59 s.9)



Kuva 28. CLT-levyn toimiva poikkileikkaus (59 s. 10)

Leikkausliittimien ja CLT:n jäännöspoikkileikkauksen lujuusominaisuuden mitoitussarvo saadaan kaavasta (56 s. 23)

$$X_{d,fi} = k_{\theta} k_{fi} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (133)$$

jossa

- k_{θ} on hiiltymismenetelmässä lämpötilasta riippuva lujuus- tai muodonmuutosominaisuuden pienennyskerroin
- $\gamma_{M,fi} = 1,0$ ellei kansallinen liite anna toista arvoa
- k_{fi} muuttaa ominaisuuksien 5 %:n fraktiilin arvot 20 %:n fraktiilin arvoksi (34 s. 72–73; 56 s. 25)

$$k_{fi} = \begin{cases} 1,15 & \text{CLT:lle} \\ 1,15 & \text{leikkausrasitetuille liittimille} \\ 1,05 & \text{pituussuunnassa rasitetuille liittimille} \end{cases} \quad (134)$$

6.5.4 Palosuojaus

CLT-betoni-liittolaatassa teräsbetoni toimii CLT:n yläpuolisena palosuojana.

CLT:n alaosa voidaan jättää ainakin vähäisissä määrin näkyviin, sille se kuuluu paloluokkaan D-s2, d0, mutta yleensä ainakin osa CLT:stä suojattu esimerkiksi kipsilevyillä. Jos CLT jätetään näkyviin, hiiltymisen alkamishetki on $t_{ch} = 0$ min ja tämä vaatii yleensä toiminnallisen palomitoituksen (paloluokka P1 ja P2 yli 2 krs) (34 s. 70.)

7 Yhteenveto

Tässä työssä perehdyttiin CLT-betoni-liittolaatan mitoittamiseen, rakenteen hyötyihin ja lyhyesti kohteisiin, joihin rakennetta on käytetty ja suunniteltu käytettävän.

Tämän hetken suunta on ympäristöystävällisemmät ratkaisut, jotta päästään Suomen ilmastotavoitteisiin. Rakennusalan on otettava myös käyttöön ympäristöystävällisiä ratkaisuja, sillä sektori tuottaa noin kolmanneksen Suomen ilmastopäästöistä. CLT-betoni-liittolaatta vastaa tähän tarpeeseen, sillä rakenteella saadaan rakennettua pidempiä jännevälejä, joita käytetään esimerkiksi julkisis-

sa tiloissa ja päiväkodeissa, mutta hiilijalanjälki ei ole yhtä korkea kuin massiivibetonilla. CLT pelkällään välipohjarakenteena olisi tietysti vähähiilisempi ratkaisu, mutta sen ollessa keveytensä vuoksi herkkä värähtelylle siitä ei voida rakentaa kovin pitkiä jännevälejä.

CLT-betoni-liittolaatan mitoittamiseen oli tarve saada selkeä ohjeistus ja laskentapohja, jotta rakenteen mitoittaminen olisi sujuvampaa.

Rakennetta on jo käytetty Suomessa koulu- ja päiväkotirakennuksissa. Ensimmäisen kerran rakennetta hyödynnettiin tiettävästi Kruunuvuoren Hopealaakson päiväkodissa, joka valmistui vuonna 2021. Rakenne on siis uusi Suomessa, joten selkeät ohjeistukset rakenteen mitoittamiseen ovat tarpeen.

Opinnäytetyötä tehdessään opiskelija syvensi omaa tietämystään sekä puu- että betonirakentamisesta ja näiden yhdistelmästä hybridirakenteena. Suuri osa lähdetiedosta löytyi englanninkielisistä tutkimuksista ja artikkeleista. Haastavinta aineiston etsimisessä oli löytää etenkin ulkomailta rakennuskohteita, joissa CLT-betoni-liittolaattaa on käytetty tai tullaan käyttämään.

CLT-betoni-liittolaatan mitoittamisessa tulee ottaa huomioon liittovaikutus ja materiaalien käyttäytyminen toistensa kanssa. CLT-betoni-liittolaatan suunnittelussa ja mitoittamisessa keskeisintä on leikkausliitoksen toimivuus, jotta rakenne toimii kunnolla yhdessä. Mahdollisimman jäykällä leikkausliitoksella saavutetaan korkea taivutusjäykkyys poikkileikkaukselle. Neutraaliakselin tulisi sijaita lähellä betonin ja CLT:n rajapintaa, jotta hyödynnetään molempien materiaalien ominaisuuksia tehokkaasti. Leikkausliitoksista loviliiotos on Saastamoisen diplomi-työn mukaan hyvä ratkaisu, sillä se on suhteellisen jäykkä ja työmaalla vähätöinen.

CLT-betoni-liittolaatta mitoitetetaan eri ajanjaksoille. CLT:n tulee kestää rakentamisesta aiheutuvat kuormat ennen betoniosan liittämistä. Betonin valussa voidaan käyttää valutukia CLT:lle. Valutuet tai niiden puuttuminen vaikuttavat rakenteen mitoittamiseen jatkossa. Betonin ja puun erilainen kosteus- ja lämpöeläminen aiheuttavat rakenteen mitoittamiselle omat haasteensa. Huolellisella

suunnittelulla rakenne saadaan toimimaan kunnolla ja saavutetaan pidempiä jännevälejä ympäristöystävällisemmin.

Lähteet

- 1 Hiilineutraali Suomi 35 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. 2022. Työ- ja elinkeinoministeriö.
<<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321>>
- 2 Puurakentaminen. Puinen pysäköintitalo. Verkkoaineisto.
<<https://www.hel.fi/fi/kaupunkiymparisto-ja-liikenne/kaupunkisuunnittelu-ja-rakentaminen/suunnittelun-ja-rakentamisen-tavoitteet/puurakentaminen>>
Luettu 18.12.2023
- 3 Puurakentamisen toimenpideohjelma. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/puurakentaminen>> Luettu 15.1.2024
- 4 Puurakentamisen edistämisen ja ohjauksen keinot kaavoituksessa-opas. <<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/puurakentamisen-edistamisen-ja-ohjauksen-keinot-kaavoituksessa-opas.pdf>>
- 5 Finlex. Rakentamislaki 751/2023.
<<https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230751>>
- 6 Puurakenteiden eurokoodiuudistus lausuntovaiheessa. Puuinfo. Verkkoaineisto. <<https://puuinfo.fi/2023/10/11/puurakenteiden-eurokoodiuudistus-lausuntovaiheessa/>> Luettu 14.1.2024
- 7 Puun käytön ympäristövaikutukset. Puuinfo. Verkkoaineisto.
<<https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/>> Luettu 15.1.2024
- 8 The Solid Timber Manual 2.0. 3. painos. 2023. Binderholz GmbH, Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH
- 9 Karjalainen, Markku. 2020. Puurakentamisen näkymät ja haasteet Suomessa. <<https://www.slideshare.net/Metsakeskus/puurakentamisen-nakymat-ja-haasteet-suomessa-markku-karjalainen>>

- 10 Vähähiilisen puurakentamisen tiekartta. 2020. Puutuoteteollisuus ry.
<https://puutuoteteollisuus.fi/images/puufaktaa/ymparisto-kiertotalous-yms/V%C3%A4h%C3%A4hiilisen%20puurakentamisen%20tiekartta_loppuraportti_final.pdf>
- 11 HAMK Techille ennätysrahoitus – tutkimusaiheena suositaan lisäävä hybridirakentaminen. 2023. HAMK ammattikorkeakoulu. Tiedote.
<<https://www.hamk.fi/2023/hamk-techille-ennatysrahoitus-tutkimusaiheena-suositaan-lisaava-hybridirakentaminen/>>
- 12 Laaksonen, Päivi. Hybridirakentamisen tutkimus lisää rakennusteollisuuden vähähiilisyyttä. <<https://gsdnordic.fi/hybridirakentamisen-tutkimus-lisaa-rakennusteollisuuden-vahahiilisyytta/>> Luettu 15.1.2024
- 13 The Government of Canada Supports Innovative Hybrid Timber Floor Systems. 2022. Natural Resources Canada.
<<https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2022/07/the-government-of-canada-supports-innovative-hybrid-timber-floor-systems.html>>
- 14 The CLT Handbook. CLT structures – facts and planning. 2019. Swedish Wood.
- 15 Mertanen, Ville. Matveinen Mikko. Puu-lehti 1/19. Kiviainestäytteinen CLT-välipohja ja uudet vaatimukset rakennuksen ääniympäristölle. Helsinki: Puuinfo Oy.
- 16 Hopealaakson päiväkotit. Puuinfo Oy.
<<https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/paivakodit-ja-koulut/hopealaakson-paivakoti/>>
- 17 Päätös. Päiväkotit Koirasaarentie 31:n uudisrakennuksen yleissuunnitelmien hyväksyminen. Helsinki: Helsingin kaupunki.
<<https://dev.hel.fi/paatokset/asia/hel-2019-005733/>>

- 18 Kirkkolahden koulu. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/paivakodit-ja-koulut/kyrkfjardens-skola/>>
- 19 Verkkosaaren päiväkoti. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/paivakodit-ja-koulut/verkkosaaren-paivakoti/>>
- 20 Helsingin luonnontiedelukio. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/paivakodit-ja-koulut/helsingin-luonnontiedelukio/>>
- 21 Viljakainen, Mikko. Puu-lehti 3/19. Puinen pysäköintitalo. Helsinki: Puuinfo Oy.
- 22 Pettersson, Petri. 2014. KOY Kirkkokatu 18, Joensuu: kiinteistön korjauksen ja lisärakentamisen suunnittelu esivalmisteisia puuelementtejä käyttäen. Oulun yliopisto. <<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201410041920.pdf>>
- 23 Siddika, Ayesha. Mamun, Md. Abdullah Al. Aslani, Farhad. Zhuge, Yan. Alyousef, Rayed. Hajimohammadi, Ailar. 2021. Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. Elsevier. The Engineering Failure Analysis journal. European Structural Integrity Society.
- 24 Hankesuunnitelma. Lpk Tuuli, uudisrakennus. Helsinki: Helsingin kaupunki. <<https://dev.hel.fi/paatokset/media/att/c9/c9a973b7e9db728c789e370e40bc674500c06563.pdf>>
- 25 Puutieto. Puun ominaisuudet. Lujuusteknisiä ominaisuuksia. Verkkodokumentti. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>> Luettu 14.1.2024

- 26 Puutieto. Puun ominaisuudet. Puun kosteustekniset ominaisuudet. Verkkodokumentti. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>> Luettu 14.1.2024
- 27 Puutieto. Puun ominaisuudet. Äänitekniisiä ominaisuuksia. Verkkodokumentti. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>> Luettu 14.1.2024
- 28 Puutieto. Insinööripuutuotteet. Monikerroslevy (CLT) Verkkodokumentti. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/monikerroslevy-clt/>> Luettu 14.1.2024
- 29 Environment product declaration. Cross-laminated timber (X-lam). Institut Bauen und Umwelt (IBU)
- 30 Betoni rakennusmateriaalina. Betonin ominaisuudet ja käyttö. Verkkodokumentti. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/betonirakennusmateriaalina/betonin-ominaisuudet-ja-kaytto/>> Luettu 16.1.2024
- 31 BY 211. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. 2013. Helsinki: BY – Koulutus Oy.
- 32 Betoni rakennusmateriaalina. Sementti ja kasvihuonepäästöt. Verkkodokumentti. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/betonirakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>> Luettu 16.1.2024
- 33 Poikajärvi, Miika. 2017. CLT-betoniliittorakenteen lujuusominaisuudet. Rovaniemi: Lapin ammattikorkeakoulu. <<https://www.lapinamk.fi/loader.aspx?id=68cd90fb-4b3b-4a37-afc9-d26295c0517f>> s. 9
- 34 Saastamoinen, Tatu. 2021. CLT-betoni-liittolaatan mitoitus ja poikkileikkauksen valitseminen. Diplomityö. Tampere: Tampereen yliopisto.

- 35 SFS VB Srews. European Technical Assessment ETA-13/0699 of 14/06/2018. Deutsches Institut für Bautechnik.
- 36 ASSY plus VG screw. European Technical Assessment ETA-13/0029 of 11/07/2017. ETA-Danmark A/S.
- 37 NILCO® -liittolaattavaarna mahdollistaa hybridirakenteet, joiden jänneväli on entistä pidempi. Peikko Group. Verkkodokumentti.
<<https://www.peikko.fi/blogi/nilco-r-liittolaattavaarna-mahdollistaa-pitkien-jannevalien-hybridirakenteet/>> Luettu 20.1.2024
- 38 Eurocode 5: Design of Timber Structures. Structural design of timber-concrete composite structures. Common rules and rules for buildings. CEN/TS 19103:2021:en. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 39 Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-6. Yleiset kuormat. Toteuttamisen aikaiset kuormat. SFS EN 1991-1-6. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 40 Dias, Alfredo. Schänzlin, Jörg. Dietsch, Philipp. 2018. Design of timber-concrete composite structures. COST (European Cooperation in Science and Technology).
- 41 Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–5. Yleiset kuormat. Lämpötilakuormat. SFS-EM 1991-1-5 + AC. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 42 Forsberg, Albin. Farbäck Filip. 2020. Timber Concrete Composite floor with Cross Laminated Timber - Structural behavior & Design. Master's Thesis. Lund: Lund University, Lund Institute of Technology.
- 43 RIL 205-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

- 44 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–1. Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. SFS-EN 1991-1-1 + AC:2011. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 45 Kansallinen liite Eurokoodi standardeihin SFS-EN 1990-1997. Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 46 CEN/TC 250/SC 5 N 1615 - prEN 1995-1-1 FOR ENQ (working draft) 2022-09-11. Eurocode 5: Design of timber structures — Common rules and rules for buildings - Part 1–1: General.
- 47 Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. Neljäs painos. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-31.8.-web.pdf>>
- 48 ISO/TC 165/WG 7. Connections and assemblies. Timber structures – Screws – Part 2: Design. European Standard.
- 49 Bajzecerová, Viktória. 2017. Bending Stiffness of CLT-Concrete Composite Members - Comparison of Simplified Calculation Methods. Elsevier Ltd.
- 50 Wallner-Novak, Markus. Koppelhuber, Josef. Pock Kurt. 2014. Cross-Laminated Timber Structural Design. Basic design and engineering principles according to Eurocode. Austria: proHolz Austria.
- 51 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 52 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 4. Betonirakenteissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu. SFS-EN 1992-4:2008. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

- 53 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1–1. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 54 Lahtela, Tero. 2018. Puuvälipohjan värähtelymitoitus. Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutus 2018. Puuinfo Oy.
- 55 RIL 205-2-2019. Puurakenteiden palomitoitus. Eurokoodi EN 1995-1-2. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 56 CEN/TC 250. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1–2: Structural fire design. prEN 1995-1-2:2023. 10th version.
- 57 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu osa 1–2. Palomitoitus. SFS EN 1992-1-2. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 58 CLT – Cross Laminated Timber, Fire protection. Stora Enso.
- 59 Teollinen puurakentaminen. Opetusmateriaalia teollisen puurakentamisen koulutukseen. 2022. Puuinfo Oy.
- 60 Paloturvallinen puutalo. Asuin- ja toimitilarakentaminen. 2021. Helsinki: Puuinfo Oy.

Kuva laskentapohjasta

Kuvassa näkyy laskentapohjan aloitussivu, jossa on lähtötiedot ja kuormitukset sekä valitaan CLT-betoni-liittolaatan poikkileikkausmitat. Eri mitoitusvaiheet ovat omilla välilehdilläään. Aloitussivulle päivittyy mitoituksen valmiustila, jotta voidaan seurata missä vaiheessa mitoitus on.

CLT-betoni-liittolaatta	
Lähtötiedot	
Jänneväli L	8000 mm
Lattian leveys B	8000 mm
Liittopalkin mitoitusleveys	1000 mm
Puupalkin leveys D_{pm}	1000 mm
Puupalkin jako s	1000 mm
Tukileveys A	100 mm
Tukileveys B	100 mm
Valutentalinjat	1 kpl Keskeellä laattaa
Esikorotus w_p , ylös +, alas -	0 mm
Seuraamusluokka	CC2
Kuormakerroin K_{F1}	1,0
Toteutusluokka	2
Toleranssiluokka	1
Rasitusluokka	XC1
Käyttöluokka	KL1
Ympäristön ilmankosteus RH	40 %
Köppenin ilmastoluokitus	DFC.1
Puun kosteusvaihtelu Δmc	1,6 % < 6 % ei huomioida
KUORMAT	
Rakentamiskuorma $q_{co,k}$	1 kN/m ²
Valunaikainen kuorma $q_{co2,k}$	0,75 kN/m ²
Lumikuorma maassa s_k	0 kN/m ²
Kuormakerroin μ	0
Lumikuorma laatalta $q_{s,k}$	0 kN/m ²
Hyötykuorma q_k	2 kN/m ²

Mitoituksen valmiustila	
Jokaisen osion alareunassa on laatikko, josta valitaan "Valmis", kun osio on kokonaan valmis. Leikkausliitoksen kohdalle voidaan valita "Ei käytetä" muille kuin käytössä olevalle liitostavalle.	
Taivutusjäykkyys	Valmis
1. Mitoitus ennen valua	Valmis
2. Valun aikana	Kesken
3. Betoni kovettunut, valutuet poistetaan	Kesken
4. Käyttöiän loppu, kutistuma ja viruma huippuarvoisansa	Kesken
Värähtely	Kesken
Loviliitos	Kesken
Vinoruuviliitos	Ei käytetä
Ruuviliitos (pystysuorat)	Ei käytetä
Palomitoitus	Kesken

Kuva 1. Laskentapohjan aloitussivu.