

CLT-betoniliittorakenteen lujuusominaisuudet

Future possibilities for CLT



CLT-betoniliittorakenteen lujuusominaisuudet

Miika Poikajärvi

CLT-betoniliittorakenteen lujuusominaisuudet

Future possibilities for CLT

Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 19/2017

© Lapin ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-316-193-1 (pdf)

ISSN 2489-2637 (verkkajulkaisu)

Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset
19/2017

Rahoittajat: Interreg Pohjoinen Euroopan aluekehitysraha-
sahasto, Lapin ammattikorkeakoulu

Kirjoittaja: Miika Poikajärvi
Taitto: Lapin AMK, viestintäyksikkö

Lapin ammattikorkeakoulu
Jokiväylä 11 C
96300 Rovaniemi

Puh. 020 798 6000
www.lapinamk.fi/julkaisut

Lapin korkeakoulukonserni



Lapin korkeakoulukonserni LUC on yliopiston ja ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä. Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto ja Lapin ammattikorkeakoulu.
www.luc.fi

Sisällys

1 JOHDANTO	7
2 PUU-BETONILIITTORAKENTEET	9
3 PUU-BETONILIITTORAKENTEIDEN TUTKIMUKSIA	13
4 MEKAANISESTI LIITETYT PALKIT	17
5 TESTATTAVAT RAKENTEET JA TAIVUTUSKOKEEN VALMISTELU	21
5.1 CLT-levy	23
5.2 CLT-betoniliittorakenteen prototyypin valmistus	24
5.3 Koekuutioiden puristaminen ja taivutuskoe	26
6 TULOKSET	29
6.1 Betonin puristuslujuus	31
6.2 Taivutuskokeet, CLT-levy	32
6.3 Taivutuskokeet, liittorakenne	33
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	35
LÄHTEET	39

1 JOHDANTO

Lapin AMKissa suoritettiin taivutuskokeet CLT-betoniliittorakenteen prototyypille osana Future possibilities for CLT-hanketta. Hankkeessa Lapin AMK yhdessä Kemlin Digipolis Oy:n kanssa pyrkivät Lapin alueen toimijoina lisäämään tietoa CLT-rakentamisesta ja tunnistamaan, sekä poistamaan mahdollisia esteitä CLT-rakentamisen osaamiseen liittyen alueen liike-elämän kanssa. Hanke on käynnistynyt syyskuussa 2015 ja se päättyi toukokuussa 2018. (Vatanen 2015, 232.)

Pyrkimykset kestäväan kehitykseen ovat herättäneet uudenlaista kiinnostusta puurakentamista kohtaan ja monenlaisia vaativia puurakennuskohteita on aloitettu viime vuosina Suomessa sekä myös muualla maailmassa, joista jo valmistuneita kohteita on mm. Pudasjärven hirsikoulu (Mainio 2016). Nykyaikaiset insinööripuutuotteet, kuten CLT (Cross laminated timber), mahdollistavat puun hyödyntämisen rakentamisessa uudella tavalla, johon ei ole aikaisemmin pystytty. Markkinoilla CLT:tä on ollut jo 1990-luvulta lähtien mutta sen käyttö alkoi yleistyä vasta 2000-luvulla Keski-Euroopassa, jossa ollaan totuttu massiivirakenteiden käyttöön. (CLT Handbook 2011, Chapter 1, 12.)

CLT-levy koostuu vähintään kolmesta ristikkäisestä lamellikerroksesta, jotka liimataan toisiinsa korkeassa paineessa. Tämän ristiinlaminoinnin ansiosta CLT-levylle saadaan kuormankantokyky kahteen eri suuntaan. Ominaisuus joka on aiemmin ollut ainoastaan teräsbetonirakenteilla. CLT-levyn hyödyntämismahdollisuudet ovat laajat. Sitä voidaan käyttää kantavana rakenteena lattia-, katto- ja välipohjarakenteissa sekä palkkina. Ulko- ja sisäpuoleiset rakenteet on myös mahdollista toteuttaa CLT:llä. Levyn suuren jäykkyyden ansiosta rakennuksen kokonaisjäykistyksen tarve vähenee, joka mahdollistaa CLT-rakenteiden rakennusten käytön myös maanjäristysalueilla.

Puisten välipohjien ongelmana yleisesti ovat pitkällä jänneväleillä haitallisen suuriksi kasvavat lattianrakenteiden värinä ja taipuma. Taipuman osalta oleellisista ratkaisu ongelmaan on käyttää pienempiä jännevälejä tai lisätä välitukien määrää. Myös pääkannattajien dimensioiden kasvattaminen on yksi mahdollisuus, jolla voidaan vaikuttaa saavutettavaan jänneväliin mutta haitalliseen värinään se ei tuo ratkaisua. Näiden asioiden myötä on herännyt ajatuksia puun ja betonin yhdistämisestä liittorakenteen tapaan.

Taipuman suuruuteen voidaan vaikuttaa käyttämällä betonia yhdessä puun kanssa liittorakenteena. Voidaan myös puhua puu-betonihybridirakenteesta. Puu-betoniliittorakenteessa betoni ja puu voidaan yhdistää erilaisten liittimien avulla liittorakenteeksi, jossa molemmille materiaalityypeille ominaisia piirteitä pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Tässä tapauksessa pyritään hyödyntämään betonin suurta puristuslujuutta rakenteen puristusrasitetulla osalla, kun taas puun suurta vetolujuutta hyödynnetään rakenteen vetorasitetulla osalla. Rakenteeseen käytetyn betonin tuomalla lisämassalla pystytään myös vaikuttamaan lattiarakenteen akustisiin ominaisuuksiin mutta niihin perehtyminen ei ole tämän tutkimuksen tavoitteena.

Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus suorittaa yksinkertaiset taivutuskokeet CLT-levylle ja CLT-betoniliittorakenteiselle levyllä, joiden tulosten perusteella voitaisiin vertailla betonikerroksen vaikutusta CLT-levyn taivutuslujuuteen ja -jäykkyyteen.

Raportin alussa käsitellään puu-betoniliittorakenteiden teoriaa. Tämän jälkeen esitellään taivutuskokeessa käytetyt rakenteet ja materiaalit. Myös rakenteiden lujuuslaskentaan käytetyt menetelmät esitellään lyhyesti. Raportin kahdessa viimeisessä osiossa käydään läpi taivutuskokeiden tulokset ja niiden perusteella esitellään johtopäätökset.

2 PUU-BETONILIITTO- RAKENTEET

Perusajatuksena liittorakenteen käytössä on eri materiaalien hyödyntäminen juuri siellä, missä materiaaleille tyypillisiä ominaisuuksia pystytään parhaiten hyödyntämään. Liittorakenne käsitteenä on monille hyvin vieras, vaikka niiden käyttö on hyvin yleistä asuin- ja teollisuusrakentamisessa.

Yleisimmin käytetyissä liittorakenteissa, betoniset tai teräksiset valmisosat yhdistetään työmaalla valettavan betonin kanssa. Valmisosat voivat olla levyjä tai palkkeja, joiden päälle valetaan betonikerros. Myös onttoja palkkeja ja pilareita voidaan käyttää liittorakenteessa. Liittorakenteen myötä rakenteelta vaaditut ominaisuudet ovat paremmat verrattuna siihen, kun jos oltaisiin käytetty yksittäisiä materiaaleja tai valmisosia.

Puu-betoniliittorakenteet ovat huomattavasti harvinaisempia mutta onnistuneita toteutuksia löytyy sekä meiltä Suomesta, että maailmalta. Tähän päivään mennessä puu-betoniliittorakenteisia lattia- ja välipohjia on toteutettu erilaisin liitoksin jo tuhansien neli-öiden alalta saneeraus- sekä uudisrakennuskohteissa Euroopassa ja myös näyttäviä siltarakenteita on toteutettu kyseisen rakennetekniikan avulla. Yksi näyttävä esimerkki Suomessa on v.1999 valmistunut Vihantasalmen valtatie silta, jossa hyödynnettiin liima-puupalkkien ja betonin muodostavaa liittorakennetta. Etenkin Keski- ja Etelä-Euroopassa on ollut suosittua käyttää puun ja betonin liittorakennetta jo olemassa olevien lattiarakenteiden ominaisuuksien parantamisessa. (Lukaszewska 2009, 9; Van der Linden 1999, 1-2.)

Jotta puu-betoniliittorakenne toimisi tehokkaasti, sen tulee täyttää kolme kriteeriä: (1) liittorakenteen neutraaliakselin tulisi sijaita lähellä puun ja betonin rajapintaa. Näin varmistetaan molempien materiaalien ominaisuuksien optimaalinen hyödyntäminen, kun betoni altistuu pääosin puristukselle ja puu on vetorasitettuna, (2) leikkausliittimien, jotka muodostavat liitoksen materiaalien välille, tulee olla tarpeeksi kestäviä ja jäykkiä, jotta ne kestäisivät niille suunnitellut leikkauskuormat ja näin mahdollistavat tarpeeksi tehokkaan yhteistoiminnan materiaalien välillä ja (3) rakenteessa käytettävän puun tulee kestää sille suunnitellut vetorasitukset ja jännitykset. (Yeoh 2010, 10.)

Olennessa ja tärkein osa liittorakenteen toiminnan kannalta ovat materiaalien välillä olevat leikkausliittimet, jotka pitävät yllä voimatasapainoa liittorakenteen puristusrasitetun yläosan ja vetorasitetun alaosan välillä. Liittorakennetta taivutettaessa rakenteeseen ilmaantuu liukumaa johtuen materiaalien keskinäisistä siirtymäeroista. Leikkausliitoksen tehtävänä on vastustaa näitä liukumia ja liukuman suuruus on riippu-

vainen leikkausliitoksen jäykkyydestä. Mitä jäykempi liitos, sitä pienempi liukuma ja sen myötä suurempi taivutusjäykkyys rakenteella. Liitoksen jäykkyyden kasvaessa, kasvavat kuitenkin myös liitosta kuormittavat leikkausvoimat, jotka liitoksen tulee kestää murtumatta. Pahimmassa tapauksessa liittorakenne voi romahtaa, jos rakenteen yksittäisiä osia ei ole suunniteltu kestävään suunniteltuja kuormituksia ilman liittorakenteen yhteistoimintaa.

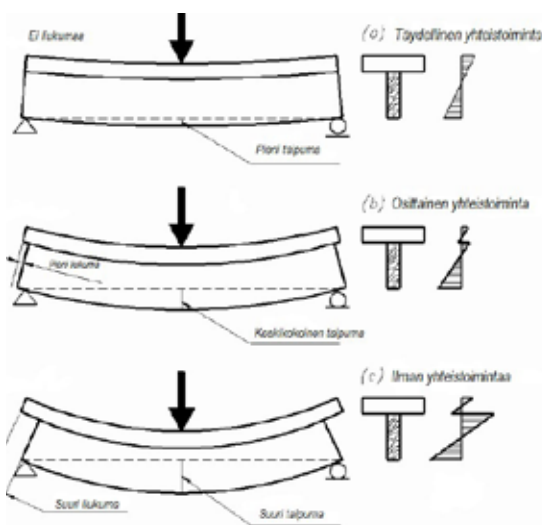
Liitoksen jäykkyyden ja rakenteella saavutetun jännevälin suhde ei ole suoraviivainen vaan liitoksen jäykkyyden kasvattaminen tietyn rajan yli ei enää vaikuta saavutettavaan jänneväliin. Liitoksella tulee kuitenkin olla tietyn asteista jäykkyyttä, jotta liittorakenteen käyttö olisi perusteltua. Tämä tuleekin ottaa huomioon leikkausliitosta suunniteltaessa. (Dias 2009, 29.)

Jäykkyys ja lujuus eivät kuitenkaan ole ainoita tärkeitä asioita leikkausliitosta suunniteltaessa. Kun murtoraja saavutetaan liitoksessa, liitoksen murtuminen ei saisi olla haurasta, vaan sillä tulisi myös olla plastista muodonmuutoskykyä. Tartuntaan perustuvat liitokset lovet, liimaukset yms. ovat hyvin jäykkiä liitoksia jotka kestävät suuria kuormituksia mutta niiltä puuttuu plastisuus, kun taas ruuvi yms. mekaaniset kiinnikkeet ovat joustavia ja osoittavat hyvin suurta plastista muodonmuutoskykyä mutta niillä saavutettava taivutuslujuus jää noin puoleen jäykkien liitosten taivutuslujuudesta. (Ceccotti 2000, 3–4.)

Plastisen muodonmuutoskyvyn omaavien liittimien käyttö ei kuitenkaan välttämättä takaa liitoksen muodonmuutoskykyä, jos leikkausliitos on ylimitoitettu. Tällöin murtuma pääsee tapahtumaan joko puussa tai betonissa, ilman liitoksessa ilmeneviä muodonmuutoksia. Puun ja betonin murtotapa voidaan luokitella hauraaksi ja tästä syystä on parempi, että rakenne alkaa myödetä liitoksesta ennen kuin murtolujuus ylittyy betonissa tai puussa.

Leikkausliitoksen toimintaa voidaan kuvailla joko osittaiseksi tai täydelliseksi. Jäykällä liitoksella saadaan aikaan täydellinen yhteistoiminta (Kuvio 1a), jolloin rakenteessa ei ilmene liukumaa ja materiaaleille muodostuu yhteinen neutraaliakseli. Tämä tarkoittaa, että betonilaatta altistuu ainoastaan puristukselle ja puu ottaa vastaan vetorasitusta. Joustavalla liitoksella (Kuvio 1b) toteutetun rakenteen yhteistoiminta on ainoastaan osittaista,

jolloin rakenteen sisäisten rasitusten jakauma ei ole enää suoraviivaista. Liitoksen joustamisen myötä, molemmilla materiaaleilla on omat neutraaliakselinsa, mutta taipuma ei kuitenkaan ole suuri. Tavankomaisessa tilanteessa, jossa betonikerros on toteutettu kelluvana laattana ilman leikkausliitosta (Kuvio 1c) rakenteessa ei ole yhteistoimintaa materiaalien välillä ja rakenne pääsee taipumaan huomattavan paljon enemmän, kuin jos materiaalien välillä olisi käytetty leikkausliittimiä.



Kuvio 1. Liittorakenteen yhteistoiminta (Lukaszewska 2009, 38)

3 PUU-BETONILIITTO- RAKENTEIDEN TUTKIMUKSIA

Ensimmäinen puu-betoniliittorakenteisiin liittyvä patentti on peräisin 1920-luvulta, jossa käytettiin yksinkertaisia naula- ja teräslevyliitoksia materiaalien välillä (Yeoh 2010, 11) ja ensimmäisiä taivutuskokeita puu-betoniliittopalkeille tehtiin jo vuosina 1938-1942 Illinoisin Yliopistossa USA:ssa. Taivutuskokeita tehtiin erilaisilla liitoksilla toteutetuille rakenteille ja myös pidemmän ajan toimintaa tutkittiin 2,5 vuoden aikana. Testit osoittivat, että lyhyen ja pitkän aikavälin taivutuskokeiden tulosten välillä ei ollut merkittäviä eroja ja liittorakenteisen palkin rakenteellisessa toiminnassa ei havaittu muutoksia pidemmällä aikavälillä. (Lukaszewska 2009, 7–8.)

Košicen teknillisessä yliopistossa Slovakiassa suoritettiin v.2015 lyhyen ja pitkän aikavälin taivutuskokeita CLT-betoni liittorakenteelle, jonka leikkausliittimenä toimi liima. Liimaamalla on mahdollista luoda jäykkä liitos materiaalien välille ja näin ollen saada aikaan täydellinen yhteistoiminta, jossa ei ilmenee liukumaa materiaalien välillä. Kokeessa myös tutkittiin kevytbetonin käytön mahdollisuutta osana liittorakennetta, jolla saataisiin rakenteen omapainoa pienennettyä. Jokaisen testatun rakenteen murtuma tapahtui ensin puussa olevien epätäydellisyyksien kohdalla, jonka jälkeen rakenne taipui siihen pisteeseen, että rakenteen keskiosan betonin murtolujuus saavutettiin ja rakenne romahti täydellisesti. Liimasaumassa ei todettu minikäänlaista murtumaa. (Kanócz 2015.)

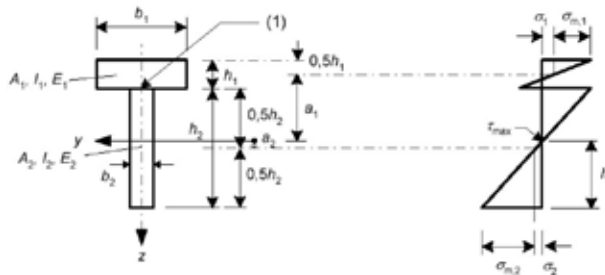
Oregonin teknillisessä yliopistossa USA:ssa suoritettiin puristuskokeita CLT-betoniliittorakenteelle v.2016. CLT-betoniliittorakennetta oli suunniteltu käytettävän 42-kerroksisessa puu-betonihybridirunkoisessa tornitalossa välipohjarakenteena. Rakenne koostui viisikerroksisesta CLT-levystä ja ohuesta betonikerroksesta, joka yleensä toimii ainoastaan akustiikkaa parantavana rakenneosana mutta tässä tapauksessa siitä tehtiin rakenteellisesti kantava leikkausliittimien avulla. Rakennetta mitattiin 48 sensorin avulla yli kaksi tuntia kestäneen puristuskokeen ajan, jonka aikana rakenne kesti noin kahdeksankertaisesti sen kuormituksen, mitä vaaditaan Yhdysvaltalaisissa rakennusmääräyksissä – lähes 365 kN

Brittiläisen Kolumbian yliopisto v.2015 suoritettiin taivutuskokeita kolmelle eri insinööri-puutuotteelle, CLT-, LSL (Laminated strand lumber) - ja LVL (Laminated veneer lumber) -levyille. Levyistä muodostettiin puu-betoniliittorakenteita käyttämällä erilaisia kiinnitystapoja puun ja betonin välillä. Yksi käytetyistä liitostavoista oli sama kuin tämän raportin kohteena olevan prototyypin valmistamisessa käytetty

liitos, eli yksittäisiä ruuveja asennettiin kolmeen riviin 30° asteen kulmassa koko le-
vyn mitalle. Muut käytetyt liitostavat olivat eristeen läpi ruuvatut ruuviparit 45° as-
teen kulmassa riveittäin ja puuhun sahattuihin uriin liimatut teräsverkot, joita käy-
tettiin myös eristeen kanssa. Saavutetut murtolujuudet ja rakenteiden murtotavat
vaihtelivat käytettyjen levytyyppien sekä liitostapojen mukaan. Taivutuskokeiden
perusteella voitiin kuitenkin todeta, että kaikilla testatuilla liitostavoilla ja levytyy-
peillä pystytään toteuttamaan tehokkaasti toimiva puu-betoniliittorakenne. (Gerber
2015, 2.)

4 MEKAANISESTI LIITETYT PALKIT

CLT-levyn ja taivutuskokeessa käytettävän liittorakenteen prototyypin lujuuslaskenta on suoritettu käyttämällä Eurokoodi 5, liite B:stä löytyvää mekaanisesti liitettyjen palkkien lujuuslaskentaan tarkoitettua ”Gamma” menetelmää (Kuvio 2). Kyseistä menetelmää käytetään yleisesti CLT-levyn mitoittamiseen, jonka tapauksessa levyn poikkittaisen lamellikerrokset kuvitellaan rakenteen mekaanisina liittiminä, joiden lujuus määritellään käytetyn puun vierintäleikkauslujuuden mukaan. Gamma menetelmää voidaan käyttää myös puu-betoniliittorakenteen mitoittamiseen, käyttäen leikkausliittimien todellisia lujuusarvoja.



Kuvio 2. Mekaanisesti liitetyt palkit. (Eurokoodi 5, liite B)

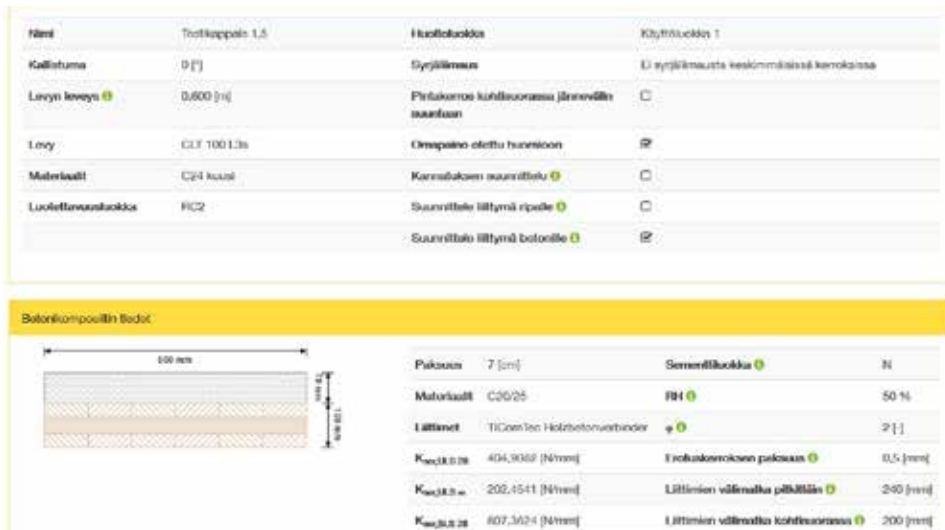
Gamma menetelmän mukainen tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} määritellään kaavan 1 mukaan: (1)

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

jossa

EI_{eff}	tehollinen taivutusjäykkyys
E_i	materiaalin i kimmomoduuli
γ_i	kerroksen i liitoshyötysuhdekerroin
I_i	kerroksen i neliömomentti
A_i	kerroksen i poikkileikkauksen ala
a_i	kerroksen i painopisteen etäisyys neutraaliakselista

Rakenteiden lujuuslaskenta suoritettiin käyttämällä Stora Enson Calculatis-suunnitteluohjelmalla. Ohjelmalla pystytään suorittamaan alustavia laskelmia, liittyen CLT rakenteiden suunnitteluun. Ohjelman käyttö edellyttää tietämystä rakennetekniikasta, CLT-levyn ominaisuuksista, CLT-rakenteiden suunnitteluun liittyvistä käsitteistä sekä ohjelman syötettävistä tiedoista. Ohjelmalla voidaan suorittaa alustavat mitoitukset CLT-levylle, puu- ja teräspalkkeille, CLT-ruodepalkistolle, CLT-betoniliittolaa- talle sekä ulokelaatalle. Muita mahdollisia mitoitukskohteita ovat pilarianalyysit, seinäelementtien suunnittelu, liittymien suunnittelu, rakennusfysikaaliset analyysit



Kuvio 3. Calculatis-suunnitteluohjelma mitoitettaessa CLT-betoniliittorakennetta (Stora Enso)

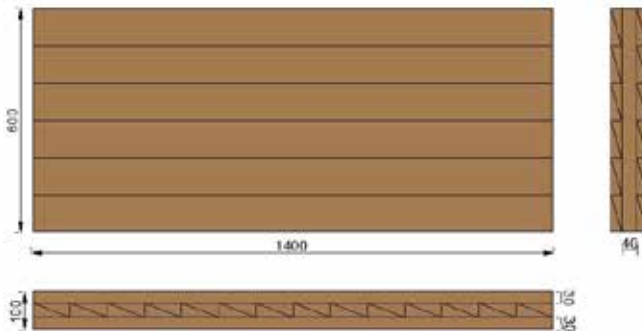
sekä palomitoitus. Ohjelma suorittaa laskelmat perustuen Gamma-menetelmään mitoitettaessa CLT-levyä ja liittorakennetta.

Pelkän CLT-levyn murtokuormaksi saatiin 30 kN. CLT-betoniliittorakenteiselle levylle saatiin murtokuormaksi laskelmien perusteella lähes saman suuruinen kuorma 31 kN. Saman suuruiset murtokuormat herättivät epäilyksiä laskentaprosessin sisältämiin virheisiin, mutta uudelleen tarkasteluista huolimatta, virheitä ei huomattu.

5 TESTATTAVAT RAKENTEET JA TAIVUTUSKOKEEN VALMISTELU

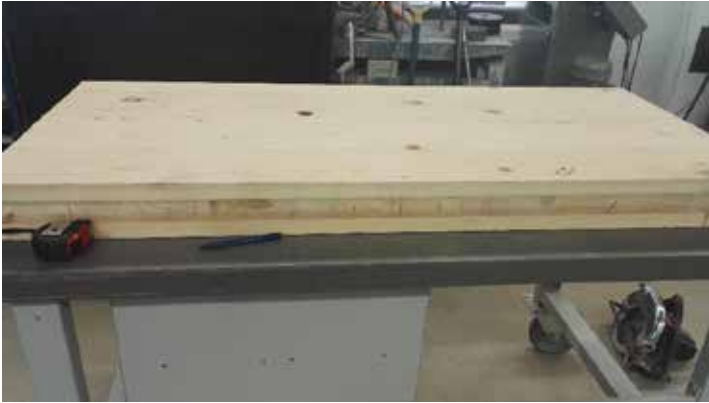
5.1 CLT-LEVY

Taivutuskokeessa käytettiin Lapin AMKin aiemmissa hankkeissa käytettyä CLT-levyä. Tästä levystä leikattiin kaksi testikappaletta koossa 600 mm x 1400 mm, joista toisen päälle valettiin myöhemmässä vaiheessa liittorakenteinen betonikerros. Liittorakenteen rakennetta käydään tarkemmin läpi myöhemmin tässä raportissa. Taivutuskokeessa käytetty CLT-levy koostui kolmesta lamellikerroksesta (kuvio 4), joista uloimmat olivat paksuudeltaan 30 mm ja keskimäinen 40 mm, muodostaen kokonaispaksuudeksi 100 mm



Kuvio 4. CLT-levy ylhäältä kuvattuna, sekä sivu- ja päätyprofiilit

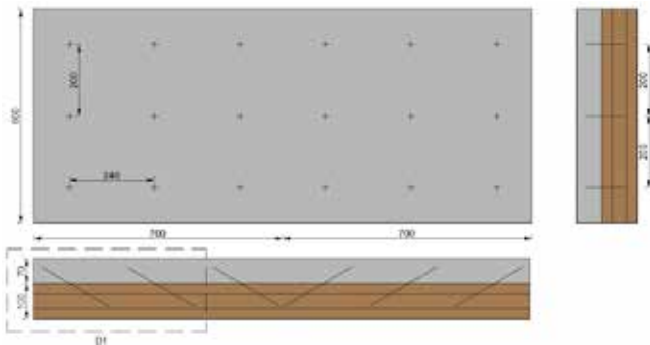
Taivutuskokeeseen valittu CLT-levy oli altistunut huomattaville lämpö- ja kosteusvaihteluille, jonka johdosta siihen oli ilmestynyt näkyviä halkeamia lamellien syiden suunnassa ja lamellien päät olivat haljenneet (Kuvio 5). Näiden halkeamien arvioitiin olevan ainoastaan pinnallisia, joilla ei arveltu olevan merkittävää vaikutusta CLT-levyn lujuusominaisuuksiin.



Kuvio 5. CLT-levyn poikittaisten lamellien päässä esiintyviä halkeamia

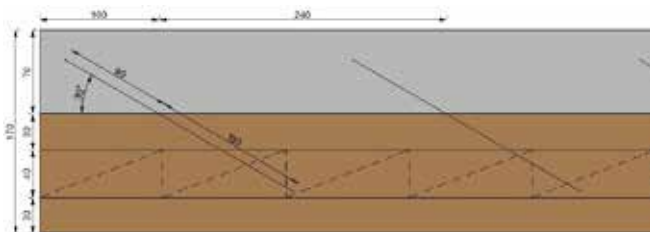
5.2 CLT-BETONILIITTORAKENTEEN PROTOTYYPIN VALMISTUS

Liittorakenteen betonikerros ei sisältänyt muuta rakenteellista raudoitusta, kuin ainoastaan 4#150 lattiaverkon, joka asennettiin ainoastaan betonin kutistumishalkeilua vastaan. Leikkausliittiminä toimivat Assy Plus VG 8x220 ruuvit, joita oli yhteensä 18kpl. Ruuvit asennettiin kolmeen riviin kuvion 6 mukaisesti.



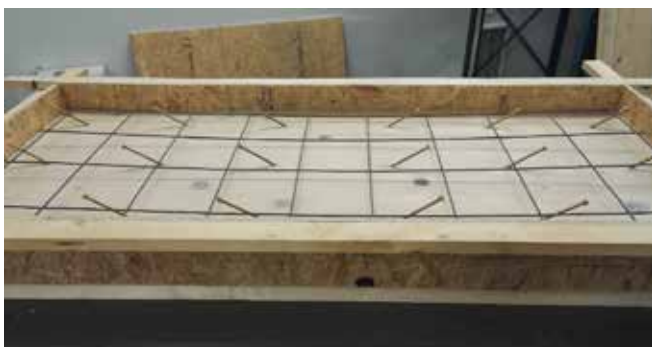
Kuvio 6. CLT-betoniliittorakenne kuvattuna ylhäältä, sivusta ja pädystä

Käytetyt ruuvit olivat täyskierteisiä, pituudeltaan 220 mm ja paksuudeltaan 8 mm. Ne ruuvattiin kuvion 7 mukaisesti 30° asteen kulmaan niin, että 90 mm jäi betonin sisään ja 130 mm upposi CLT-levyyn.



Kuvio 7. Detalji D1, liittorakenteen prototyypin leikkauskuva.

Ennen ruuvien asennusta, CLT-levyn päälle asennettiin rakennusmuovi, jolla pyrittiin eliminoimaan kitka materiaalien välillä. Tällä keinolla pystyttiin varmistamaan, ettei materiaalien välisellä kitkalla ole vaikutusta rakenteen toimintaan ja tässä tapauksessa ainoastaan käytetyt ruuviliittimet mahdollistavat rakenteen yhteistoiminnan. Muovin asentamisen jälkeen, ruuvit ruuvattiin muovin läpi levyyn kiinni. Kuviossa 8 näkyy CLT-levyn ympärille rakennetut muotit ja asennetut ruuviliittimet.



Kuvio 8. Liittorakenteen leikkausliittimet

Liittorakenteen betonina käytettiin S100 kuivabetonia, jota käytettiin yhteensä seitsemän (7) säkillistä. Kuivabetoniin sekoitettiin 19,5 litraa vettä ja valmistetusta massasta tehtiin 6 kpl 15 cm koekuutioita standardin SFS-EN 12390-1 mukaan. Koekuutioiden avulla mitattiin kovettuneen betonin todellinen lujuus ennen varsinaisia taivutuskokeita. Valun jälkeen liittorakenne ja koekuutiot peitettiin rakennusmuovilla ja säilytettiin n. 21°C asteisessa hallissa. Niitä kasteltiin viiden (5) päivän ajan valun jälkeen, jonka jälkeen muovin annettiin olla paikallaan muottien purkamiseen saakka. Muotit purettiin n. kuukausi valun suorittamisesta. Kuviossa 9 on liittorakenne ja koekuutiot kuvattuna heti muottien purkamisen jälkeen.



Kuvio 9. CLT-betoniliittorakenne ja koekuutiot

5.3 KOEKUUTIOIDEN PURISTAMINEN JA TAIVUTUSKOE

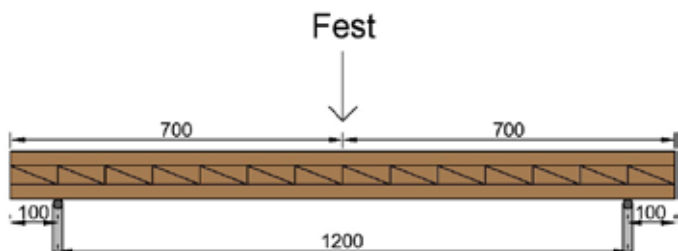


Kuvio 10. Betonikuutioiden koestuslaitteisto

Valmistetun betonimassan todellinen puristuslujuus määriteltiin puristuskokeilla käyttämällä Controls C11/0 betonipuristinta, jossa on koekuutioiden koestukseen tarkoitettu puristuskammio (kuvio 10). Puristimessa on myös erillinen palkkitaiutuslaitteisto, jolla suoritettiin taivutuskokeet CLT- ja CLT-betoniliittorakenteille levylle. Käytetty betonipuristin on sen verran vanha, ettei sitä saa kytkettyä tietokoneeseen datan siirtämiseksi tietokoneelle. Betonikuutioiden puristaminen suoritettiin standardin SFS-EN 12390-3 mukaan.

Taivutuskoe suoritettiin betonipuristimen erillisellä palkkitaivutuslaitteistolla, jonka kalibroitu maksimivoima on 150kN. Taivutuslaitteessa on yksinkertaiset tuet, joiden päässä laakereilla varustetut putket. Tukien maksimietäisyys toisistaan on 1200 mm ja taivutettavan kappaleen maksimileveys on 600 mm. Laitteessa on yksi hydraulitoiminen mäntä, jossa on 600 mm leveä vaste. Vaste sijaitsee tukien keskellä ja kuormittaa taivutettavaa rakennetta koko leveydeltä.

Taipumaa mitattiin rakenteen keskeltä magneettijalkaan kiinnitetyn sylinterin avulla, jossa oli jousitoiminen piikki. Rakenteen taipuessa, jousi työntää piikkiä ulospäin, näin ollen antaen taipumalle arvon millimetreinä. Taivutuskokeet suoritettiin standardin SFS-EN 26891:en mukaan. Kuviossa 11 on havainnollistettu taivutuskokeen asetelma.



Kuvio 11. Taivutuskokeen asetelma

6 TULOKSET

6.1 BETONIN PURISTUSLUJUUS

Betonin oletettu laskentalujuus oli 20 MPa, josta puristuskokeiden perusteella saavutettiin ainoastaan puolet, kuutioiden keskiarvon ollessa ainoastaan 10,4 MPa (Taulukko 1). Kaikkien kuutioiden murtumatapa oli hyväksyttävä ja samankaltainen (Kuvio 12).



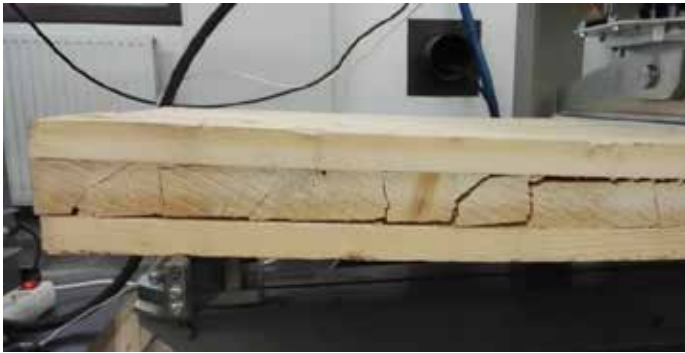
Kuutio	Lujuus Mpa
1	10,9
2	10,6
3	10,4
4	8,5
5	9,9
6	12,3
Keskiarvo	10,4

Taulukko 1. Koekuutioiden puristuskokeiden tulokset

6.2 TAIVUTUSKOKEET, CLT-LEVY

CLT-levyn lopullinen murtokuormitus oli 79 kN ja lopputaipuma 14,21 mm. Saavutettu murtokuorma oli 163% suurempi kuin laskennan perusteella saatu 30 kN.

Levyn murtuminen alkoi poikittaisen levyn vierintäleikkauslujuuden ylittymisellä tuen läheisyydessä. Tämän jälkeen sisäiset rasiukset siirtyivät poikittaisessa lamelli-kerroksessa kohti levyn keskikohtaa sitä mukaa, kun vierintäleikkauslujuus ylittyi. Poikittaisten lamellien murtuessa, siirtyi kuormitus lähes kokonaisuudessaan pituussuuntaisten lamellien kannettavaksi, jotka taipuivat rasiuksen alla, kunnes taivutusmurto saavutettiin. Poikittaiset lamellit olivat levyn toisesta päästä irronneet pitkitäisistä lamelleista (Kuvio 13).



Kuvio 13. CLT levy taivutuskokeen lopussa

Huomioitavaa on, että levyn murtuminen sijoittui kokonaisuudessaan levyn toiseen päähän. Toisessa päässä ei ollut merkkejä vierintäleikkausmurtumasta eikä levyssä ollut rakenteellisia muutoksia (kuvio 14). Ainoastaan kuivumisesta johtuvat lamellien päiden halkeamat olivat näkyvissä.



Kuvio 14. CLT-levyn toinen pää taivutuskokeen jälkeen

6.3 TAIVUTUSKOKEET, LIITTORAKENNE

CLT-betoniliittorakenteen lopullinen murtolujuus oli 139 kN ja lopputaipuma 16,36 mm. Saavutettu murtolujuus oli 348 % suurempi, kuin laskennan perusteella saatu murtolujuus.

Rakenteen murtuminen alkoi betonin leikkauslujuuden ylittymisessä ja halkeamisella tuen läheisyydessä. Tämän jälkeen alkoivat CLT-levyn poikittaisen lamellikerroksen vierintäleikkausmurtumat. Lamellien murtuminen johti rakenteen taipuman kasvamiseen. Taipuman kasvaessa betonin vetolujuus ylittyi ja betonikerros halkeili myös keskiosalta (kuvio 15). Levyn taipuessa, ruuvikiinnikkeet vetäytyivät puusta ulos (kuvio 16). Murtumapään kiinnikkeet vetäytyivät 30 mm ulos CLT-levystä. CLT-levyn ja betonin välinen lopullinen liukuma 25 mm.



Kuvio 15. CLT-betoniliittorakenne taivutuskokeen päätyttyä

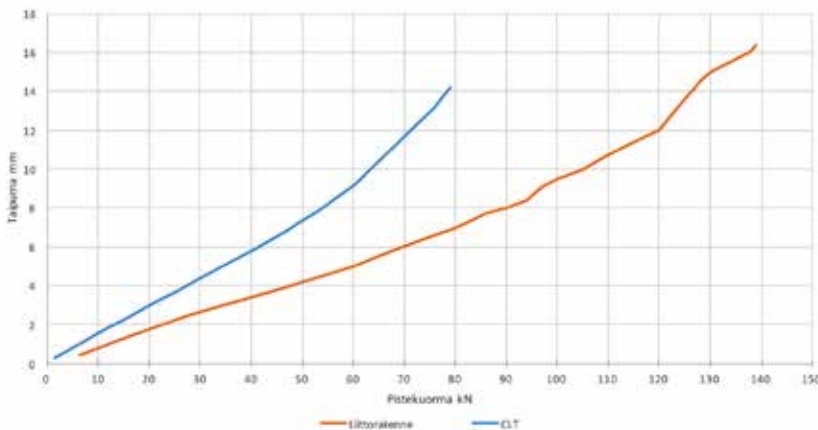


Kuvio 16. Ruuviliittimet vetäytyneet irti puusta

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Taivutuskokeiden tulosten perusteella voidaan todeta liittorakenteisen betonikerroksen vaikuttavan CLT-levyn toimintaan myönteisesti. Taulukossa 2 on esiteltyä CLT-levyn ja CLT-betoniliittorakenteen taivutuskokeen mittaustulokset. Liittorakenteisen betonikerroksen lisääminen CLT-levyn päälle lähes kaksinkertaisti CLT-levyn taivutuslujuuden, murtokuorman ollessa 139 kN verrattuna pelkän CLT-levyn 79 kN. Liittorakenteisen levyn taivutusjäykkyys kasvoi myös verrattuna pelkkään CLT-levyyn. CLT-levyn murtokuormituksen ollessa 79 kN ja taipuman 14,21 mm, oli liittorakenteisen levyn taipuma samalla kuormalla ainoastaan noin puolet siitä, eli 7 mm.

Taulukko 2. Taivutuskokeen aikaiset taipumat ja kuormitukset



Betonin puristuslujuuden jääminen ainoastaan puoleen tavoitellusta voi johtua monesta eri tekijästä. Käytetyssä kuivabetonissa on voinut olla jotain vikaa tai todennäköisin syy on se, että vesi/sementti suhteet ovat olleet väärät massanvalmistuksen aikana. Vettä käytettiin yhteensä 19,5 litraa per 7 säkkiä kuivabetonia ja vettä olisi voinut lisätä vielä 1,5 litraa valmistusohjeen mukaan. Veden määrä pyrittiin kuitenkin pitämään mahdollisimman vähäisenä massan kutistumisen minimoimiseksi. Kutistumista olisi voitu ehkäistä erilaisilla lisäaineilla, kuten myös massan notkeutta, jos massa olisi tilattu valmisbetoniasemalta. Betonimassaa kuitenkin tarvittiin ainoas-

taan 70 litraa, joka on niin pieni määrä, että se päädyttiin valmistamaan Lapin AM-Kin rakennuslabran betonimyllyllä.

Taivutuskoeita valmistellessa, taipuman mittaaminen osoittautui haasteeksi. Taipumaanturille ei meinannut löytyä paikkaa palkkitaivutuslaitteistosta mutta pitkälisen tuotekehityksen päätteeksi, anturille valmistettiin teline, joka magneettijalan avulla kiinnitettiin palkkitaivuttimeen. Taivutuskokeen aikana taipuma-anturin toiminta täytti lopulta kaikki odotukset.

Lujuuslaskelmien perusteella saadut murtolujuudet aliarvoivat huomattavasti molempien levyrakenteiden kestävyys. Laskelmien tulosten perusteella molempien levyrakenteiden taivutuslujuuden olisivat olleet yhtä suuret. Kuitenkin aiempien puu-betoniliittorakenteiden tutkimuksien tuloksiin perehtymisen myötä heräsi epäilyksiä sen suhteen, että voiko CLT-betoniliittorakenteen taivutuslujuus olla yhtä suuri kuin pelkällä CLT-levyllä. Taivutuskokeen myötä pystyttiin toteamaan, että liittorakenteen käyttö paransi merkittävästi CLT-levyn taivutuslujuutta. Levyjen lujuuslaskentaprosessissa on vielä tarkasteltavaa, jos halutaan saada tuloksia, jotka kuvaavat liittorakenteen ja CLT-levyn kestävyyttä mahdollisimman todenmukaisesti.

LÄHTEET

- Ceccotti, A. 2002. Composite concrete-timber structures. Progress in Structural Engineering. John Wiley & Sons Ltd. Viitattu 17.2.2017 https://www.researchgate.net/publication/229964540_Composite_concrete-timber_structures?ev=prf_pub.
- Dias, A. 2005. Mechanical behaviour of timber-concrete joints. Research study. University of Coimbra.
- Gagnon, S; Pirvu, C. 2011. CLT Handbook. FPInnovations. Special Publication.
- Gerber, A. 2015. Full Scale Testing of Timber-Concrete Composite Floor Systems. The University of British Columbia.
- Kanócz, J. & Bajzecerová, V. 2015. Various Composite Connections Part 3: Adhesive Connection. Technical University of Košice.
- Lukaszewska, E. 2009. Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite floors. Ph.D thesis. Luleå University of Technology.
- Stora Enso. Calculatis by Stora Enso. Viitattu 19.6.2017 <https://calculatis.clt.info/>.
- Van der Linden, M. 1999. Timber-concrete composite beams. Research study. Delft University of Technology.
- Vatanen, M. 2015. Future possibilities for CLT. Teollisuus ja luonnonvarat – T&K toiminta ja palvelut. Lapin AMK:n julkaisuja Sarja B 30/2015. Viitattu 13.2.2017 <http://www.lapinamk.fi/loader.aspx?id=21559c62-42e6-47fb-83c8-fdccfoef382a>.
- Yeoh, D. 2010. Behaviour and design of timber-concrete composite floor system. Ph.D Thesis. University of Canterbury.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli suorittaa yksinkertaiset taivutuskokeet CLT-levylle ja CLT-betoniliittorakenteelle ja vertailla kokeista saatuja tuloksia keskenään. Lopullisena tuloksena oli tarkoitus saada tietoa siitä, miten CLT-betoniliittorakenteen käyttö vaikuttaa CLT-levyn taivutuslujuuteen ja jäykkyyteen.

Työ aloitettiin kirjallisuuskatsauksella, jossa käytiin läpi aiempia puu-betoniliittorakenteeseen liittyviä tutkimuksia ja niiden tuloksia. Tämän jälkeen suoritettiin rakenteiden lujuuslaskelmat Calculatis-suunnitteluohjelmalla. Lujuuslaskelmien jälkeen aloitettiin taivutuskokeen käytännön valmistelut, joihin sisältyivät taivutuslaitteiston testaus, liittorakenteen valmistukseen liittyvät muotti- ja valutyöt, sekä taivutusanturin pidikkeen valmistaminen.

Taivutuskokeiden toteutus meni suunnitelmien mukaan ja kokeiden avulla saatiin vertailukelpoisia tuloksia. Tulosten perusteella pystyttiin arvioimaan liittorakenteen vaikutusta CLT-levyn taivutuslujuuteen ja jäykkyyteen. Taivutuskokeiden tulosten perusteella voidaan todeta, että liittorakenteella oli positiivinen vaikutus CLT-levyn taivutuslujuuteen ja jäykkyyteen, jotka olivat liittorakenteella lähes kaksinkertaiset pelkkään CLT-levyyn verrattuna.



LAPIN AMK⁷
Lapland University of Applied Sciences

www.lapinamk.fi

ISBN 978-952-316-193-1