



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Petri Nurkki

CLT-betoniliittorakenteen tekninen vertailu ruuviliitoksilla ja betonivaarnoilla

Rakennustekniikka

Rakennetekniikka

Insinööriyö

13.5.2021

Tekijä Otsikko	Petri Nurkki CLT-betoniliittorakenteen tekninen vertailu ruuviliitoksella ja betonivaarnoilla
Sivumäärä Aika	54 sivua 13.5.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka AMK
Ohjaajat	Lehtori Mauri Konttila Projektipäällikkö Martta Mähönen
<p>Tässä insinöörityössä vertailtiin yksiaukkoista CLT-betoniliittorakenteista välipohjalaattaa kahdella eri liitostavalla toteutettuna. Toisessa liitovaikutus on toteutettu ruuviliitoksella, ja toisessa betonivaarnoilla, rakenteiden ollessa muuten samanlaiset.</p> <p>Vertailussa käytetään laskentaan ohjeina Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnitteluohjetta ja Eurokoodiryöryhmän kehittämää, lausuntokierroksella olevaa CEN/ TC 250/ SC 5 ohjetta, puu-betoniliittorakenteelle. Näiden lisäksi ohjeina hyödynnetään myös CLT toimittajan ETA-14/ 0349 hyväksyntää, sekä ruuvinvalmistajan SFS Intec ETA-13/ 0699 hyväksyntää puu-betoniliittorakenteelle.</p> <p>Opinnäytetyö tehdään Ideestructura Oy:lle tarkoituksena selvittää käsin laskennalla eroja murto- ja käyttörajatiloissa näiden kahden eri liitostavalla toteutetun CLT betoniliittorakenteen välillä. Lopputuloksena tuotetaan laskelmat, joiden pohjalta voidaan suorittaa vertailua näiden liitostapojen välillä. Tulosten pohjalta saadaan lisätietoa mahdollisuudesta korvata tulevaisuudessa ruuviliitoksin toteutettu rakenne, betonivaaroin toteutetulla rakenteella. Insinöörityössä suoritettavat käsin laskennat toimivat myös tukena Metropolia Ammattikorkeakoulussa suoritettaville fyysisille kokeille sekä jatkotutkimuksille. Opinnäytetyön laskelmat perustuvat Metropoliaan toimitettujen materiaalien mittoja ja suoritusarvoja käyttäen.</p> <p>Liittorakenteissa pyritään hyödyntämään kahden tai useamman materiaalin hyviä ominaisuuksia liittämällä ne toimimaan yhdessä yhtenäisenä rakenteena leikkausliittimiä käyttämällä. CLT-betoniliittorakenteisessa välipohjassa tarkoituksena on hyödyntää puun suurta vetolujuutta sekä betonin suurta puristuslujuutta. Toimiakseen liittorakenteena eikä kahtena erillisenä rakenteena materiaalien välillä tulee vaikuttaa leikkausliitos.</p> <p>Vertailulaskelmien pohjalta voidaan todeta betonivaarnaliitoksen olevan erittäin varteenotettava vaihtoehto leikkausliittimeksi CLT-betoniliittorakenteisissa välipohjissa.</p>	
Avainsanat	CLT, Betonivaarnaliitos, Leikkausliitos

Author Title	Petri Nurkki Technical Comparison of CLT Concrete Composite with Screw Connection and Notched Connection System
Number of Pages Date	54 pages 13 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Mauri Konttila, Senior Lecturer Martta Mähönen, Project Manager
<p>This Bachelor's thesis was made to compare CLT-concrete composite structures, which were implemented with two different connection systems and where the structures were both simply supported. One of these structures was made with a screw connection system, and another with a notched connection system, the structures being otherwise similar to each other. In the comparison phase, two guidelines were used in the calculation: Design for timber structures, i.e., Eurocode 5 and instruction for the timber-concrete composite structure, i.e., CEN/TC 250/ SC 5, which is a guideline developed by the Eurocode Working Group. In addition to these, the approval of the CLT supplier ETA-14/0349 and the approval of the screw manufacturer SFS Intec ETA-13/0699 for the timber-concrete composite structure were also used as guidelines.</p> <p>The thesis was made for Ideastruttura Oy. The aim was to determine by manual calculation the ultimate and serviceability limit states differences between these two CLT-concrete composite structures. The comparison of the two connection systems was made based on the results obtained in the calculation. The results provided additional information on the possibility of replacing the structure made of screw connection systems with notched connection systems in the future. The manual calculations also serve as a support for the physical experiments performed at Metropolia University of Applied Sciences as well as for further research. The calculations were based on the dimensions and performance values of the materials delivered to Metropolia.</p> <p>The good properties of two or more materials are sought to be utilized in composite structures. They are connected to work together and function as a single structure using shear connectors. The purpose of the CLT- concrete composite subfloor is to utilize the high tensile strength of the wood as well as the high compressive strength of the concrete. In order to function as a composite structure and not as a two separate structures, the shear connection must act between the materials.</p> <p>Based on the comparative calculations, it can be concluded that the notched connection system is a very viable alternative as a shear connector in CLT-concrete composite subfloors.</p>	
Keywords	CLT, notched connection, shear connection

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Alkusanat	1
1.2	Opinnäytetyön tausta	1
1.3	Tavoite ja rajaukset	3
2	CLT-betoniliittorakenne	4
2.1	CLT-betoniliittorakenne yleisesti	4
2.2	Leikkausliitos	5
3	Tarkasteltavat liittorakenteet	7
3.1	Tarkasteltavien koerakenteiden perustiedot ja mitat	7
3.2	Tarkasteltavat liitostavat ja niiden ominaisuudet	10
3.2.1	Ruuviliitos	10
3.2.2	Betonivaarnaliitos	11
4	Vertailulaskelmat ruuvi- ja vaarnaliitoksella	12
4.1	Mitoituksen perusteet	12
4.2	Kuormitus ja voimasuureet	13
4.3	Materiaalien ominais- ja suunnittelulujuudet	14
4.4	Vaarna ja ruuviliitosten kapasiteetit	17
4.4.1	Vaarnaliitoksen kapasiteetti	17
4.4.2	Ruuviliitoksen kapasiteetti	20
4.5	Tehollinen taivutusjäykkyys alkutilanteessa KRT	21
4.5.1	Vaarnaliitosrakenne KRT	22
4.5.2	Ruuviliitosrakenne KRT	23
4.6	Tehollinen taivutusjäykkyys alkutilanteessa MRT	24
4.6.1	Vaarnaliitosrakenne MRT	24
4.6.2	Ruuviliitosrakenne	25
4.7	Tehollinen taivutusjäykkyys lopputilanteessa KRT	26
4.7.1	Vaarnaliitos KRT	26

4.7.2	Ruuviliitosrakenne KRT	29
4.8	Tehollinen taivutusjäykkyys lopputilanteessa MRT	31
4.8.1	Vaarnaliitosrakenne MRT	31
4.8.2	Ruuviliitosrakenne MRT	32
5	Mitoitus MRT	33
5.1	Poikkileikkausten jännitykset alkutilanteessa	33
5.1.1	Jännitykset vaarnaliitosrakenteelle alkutilanteessa	33
5.1.2	Jännitykset ruuviliitorakenteelle alkutilanteessa	36
5.2	Poikkileikkausten jännitykset lopputilanteessa	38
5.2.1	Jännitykset vaarnaliitosrakenteelle lopputilanteessa	38
5.2.2	Jännitykset ruuviliitosrakenteelle lopputilanteessa	39
5.3	Liittimissä vaikuttavat voimat	42
6	Mitoitus KRT	43
6.1	Taipumamitoitus	43
6.1.1	Hetkellinen taipuma vaarnaliitosrakenne	43
6.1.2	Hetkellinen taipuma ruuviliitosrakenne	43
6.1.3	Lopullinen taipuma vaarnaliitosrakenne	44
6.1.4	Lopullinen taipuma ruuviliitosrakenteelle	44
7	Ruuvausohje vaarnaliitosrakenteelle	45
8	Johtopäätökset	47
9	Vertailutaulukko	49
10	Yhteenveto	50
	Lähteet	53

Lyhenteet

CLT Cross Laminated Timber. Ristiin liimattu massiivipuulevy

1 Johdanto

1.1 Alkusanat

Alkuun tahdon kiittää opinnäytetyöni ohjaajia. Lehtori Mauri Konttilaa, jonka asiantuntemus, ja joustava ohjaaminen ovat olleet suureksi avuksi tätä opinnäytetyötä tehdessä. Kiitän myös Ideestructura Oy:n projektipäällikköä Martta Mähöstä, joka on ollut valmis pohtimaan ja auttamaan opinnäytetyöhön liittyvien haasteiden kanssa. Kiitos lisäksi vaimolle, perheelle ja läheisille, jotka ovat olleet tukena tämän tutkinnon suorittamisessa.

1.2 Opinnäytetyön tausta

Puurakentamisen yleistyessä ja päästövähennyksiä tavoiteltaessa, ovat CLT-massiivipuurakenteet kasvattaneet suosiotaan nykypäivän rakentamisessa. Varsinkin kouluja ja päiväkoteja rakennetaan entistä enemmän hyödyntäen massiivipuisia CLT-elementtejä. Jännevälien kuitenkin kasvaessa suuremmiksi, pelkkää CLT-elementtiä käytettäessä, nousee vastaan usein erilaisia rajoitteita, kuten värähtelyn hallinta ja taipumat. Yhdistettäessä CLT-elementti ja betonilaatta liittorakenteeksi, saadaan jännevälejä kasvatettua suuremmiksi, lisättyä huomattavasti rakenteen taivutusjäykkyyttä sekä hallittua paremmin värähtelyä ja taipumia. Rakenteen liittovaikutuksen aikaansaamiseksi täytyy kuitenkin näiden kahden materiaalin rajapinnan välillä vaikuttaa leikkausliitos. Leikkausliitos saadaan aikaan käyttämällä materiaalien välillä sopivia leikkausliittimiä.

Tässä insinööriyössä vertaillaan laskennallisia eroja ruuviliitoksella sekä betoni-vaarnoilla aikaansaatuun liitoksien välillä CLT-betoniliittorakenteisissa välipohjissa. Ruuviliitoksella aikaansaatua liittovaikutusta on varsin usein käytetty ja toimivakin ratkaisu liittovaikutuksen toteutuksessa. Ruuvit joudutaan kuitenkin sijoittamaan liittorakenteessa hyvinkin tiheästi, jolloin suuremmissa kohteissa niiden ruuvaamiseen kuluu aikaa, sekä toisaalta tarkoitukseen soveltuvien ruuvien ollessa melko arvokkaita, tähän kuluu myös rahaa. Edellä mainituista syistä johtuen, on havaittu tarve tutkia millaisiin laskennallisiin tuloksiin päästäisiin CLT-betoniliittorakenteisessa välipohjassa, jossa leikkausliitos

toteutetaan betonivaarnojen avulla. Betonivaarnoin toteutetusta liitoksesta käytetään myös nimitystä loviliitos, joka varsinkin englanninkielisessä kirjallisuudessa kuvaa liitostapaa paremmin. Tässä opinnäytetyössä käytetään kuitenkin loviliitoksesta nimitystä betonivaarnaliitos. Betonivaarnoilla toteutetussa liitoksessa CLT-elementtiin on jo tehtaalla valmiiksi leikattu lovet, jolloin valettaessa betonilaatta kosteuseristetyyn CLT-elementin päälle, lovet täyttyvät betonista. Betonin kuivuttua loviin valetut vaarnat alkavat toimia rakenteen leikkausliittiminä. Betonivaarnoin toteutetulla välipohjarakenteella on mahdollisuus saavuttaa aika- ja kustannussäästöjä sekä ennen kaikkea helpottaa työmaavaihetta.

Tämä insinöörityö tehdään kirjoittajan työpaikalle Ideestructura Oy:lle, joka on suomalainen, laaja-alaisesti suunnittelupalveluja tarjoava rakennusalan suunnittelutoimisto. Ideestructuralla on viime vuosina ollut useampia CLT-rakenteisia kohteita, joista muutamina esimerkkeinä mainittakoon Lapinmäen päiväkotikoti sekä paraikaa rakenteilla oleva Martta Wendelinin päiväkotikoti. Tulevaisuudessa Ideestructuralla on aikomus panostaa CLT-osaamiseen entistä vahvemmin. Tämän johdosta on helppo arvioida myös CLT-betoniliittorakenteiden tulevan aiempaa useammin eteen tulevaisuudessa.

Aihe tähän insinöörityöhön on tullut Puurakentajat Group Oy:ltä. Kyseisen yrityksen käynnissä olevassa Hopealaakson päiväkotikohteessa välipohjat toteutettiin CLT-betoniliittorakenteisina, ruuviliitosten toimiessa leikkausliittiminä. Tämä lisää työn konkretiaa sekä laskennan mielenkiintoa selvittäessä mahdollisuutta ruuviliitoksin toteutetun CLT-betoniliittolaatan korvaamiseen betonivaarnoin toteutella liitoksella.

Tämän lisäksi Metropolia Ammattikorkeakoulun rakennusfysiikan laboratoriossa on tehty koerakenteet kummallakin liitostavalla liitetystä välipohjarakenteesta. Käsien suoritettavat laskennat perustuvat näihin koerakenteisiin ja toimivat tukena ja vertailukohtana näille koerakenteille tehtäville jatkotutkimuksille ja mittauksille.

1.3 Tavoite ja rajaukset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa käsin laskennalla laskelmat, joiden avulla voidaan tehdä vertailua näiden kahden eri liitostavalla liitetyn yksiaukkoisen CLT-betoniliittorakenteisen välipohjan teknisistä ominaisuuksista murto- ja käyttörajatilassa. Murto- ja käyttörajatilavertailu sisältää tässä opinnäytetyössä laskelmat, jännitysten, taivutuksen sekä leikkauksen osalta. Käyttörajatilavertailussa lasketaan rakenteiden taipumat. Näiden lisäksi laaditaan vaarnaliitoksella toteutetulle rakenteelle ruuvausohje, jossa lasketaan tarvittava ruuvimäärä, joka tarvitaan vastaanottamaan loven kohdalla ylöspäin nostavaa voimaa. Lopuksi laaditaan myös vertailutaulukko, josta voidaan helposti tehdä vertailua näiden eri liitostavoilla liitettyjen rakenteiden ominaisuuksista. Laskentaa on joltain osin yksinkertaistettu sekä suoraviivaistettu, sillä nimenomainen tarkoitus on liitostapojen välinen vertailu, joka tulee laskennan perusteella hyvin ilmi. Erityisesti taivutusjäykkyyksien sekä sitä kautta taipumien vertailu näiden kahden liittorakenteen välillä on erityisen mielenkiinnon kohteena.

Opinnäytetyön suuren laajuuden vuoksi tästä rajataan pois käyttörajatilassa vaikuttava värähtely, josta jo itsessään saisi laajan opinnäytetyön aiheen. Tämän lisäksi tässä opinnäytetyössä ei tutkita paloon liittyviä asioita, eikä sen laajemmin myöskään kustannuksia näiden eri liitostapojen välillä.

2 CLT-betoniliittorakenne

2.1 CLT-betoniliittorakenne yleisesti

Puu-betoniliittorakenteita ja sen mahdollisuuksia on tutkittu jo lähes 90 vuoden ajan. Onnistuneita esimerkkejä puu-betoniliittorakenteen käytöstä löytyy jo 1940-luvun alkupuolelta lähtien, muun muassa moottoritiesiltojen, satamalaitureiden, laitureiden ja erilaisten lavarakenteiden käytössä. Yhä enenevässä määrin etenkin monissa Euroopan maissa, puu-betoniliittorakenteita käytetään uudisrakennuksissa ja siltarakenteissa sekä näiden lisäksi myös, jo olemassa olevien puulattioiden jälkivahvistamiseen ja parantamiseen niin toimisto kuin asuinrakennuksissakin. [1. s.1.]

Ristiin laminoitun insinööripuutuotteen (CLT) kehitys on avannut paljon uusia mahdollisuuksia arkkitehtuuristen sekä rakenteellisten ratkaisujen osalta. Rakennettaessa monikerroksisia toimisto- ja asuinkerrostaloja, voidaan puuta käyttää rakenteissa pääasiallisena rakennemateriaalina. CLT-rakenteiden kiinnostusta suunnittelijoiden keskuudessa ovat lisänneet etenkin kosteus- ja lämpötekniset ominaisuudet, sekä asennusnopeus. Kuitenkin jännevälien kasvaessa suuremmiksi, nousee pelkkää CLT-elementtiä käytettäessä ongelmaksi etenkin käyttörajatilan puolelta taipumien sekä värähtelyn hallinta. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi ilmeisiä vaihtoehtoja ovat rakenteen massan sekä jäykkyyden lisääminen. Hyvin tunnettuna ratkaisuna edellä mainittuihin ongelmiin on CLT-betoniliittorakenne, jossa betonikerros lisätään CLT-elementin päälle. [2. s.1.]

CLT-betoniliittorakenteessa rakenteen yläosan betonin tarkoituksena on vastustaa rakenteeseen kohdistuvaa puristusrasitusta, ja alapuolen CLT-laatan tarkoituksena on vastustaa kuormituksen aiheuttamaa vetorasitusta sekä taivutusta. Verrattaessa CLT-betoniliittorakenteen hyötyjä pelkän CLT-elementin käyttöön, nousee esiin etenkin liittorakenteen suurempi taivutusjäykkyys, parempi kantokyky, korkeampi palonkestävyys sekä parantuneet lämpötekniset ominaisuudet. Lisäksi suuremman taivutusjäykkyyden myötä rakenteen taipumat sekä värähtely jäävät huomattavasti pienemmiksi, ja ovat näin ollen paremmin hallittavissa. Tämän lisäksi myös vertailussa pelkän normaalin raudoitetun betonin käyttöön voidaan nostaa esiin muutamia huomattavia etuja. Raudoitetun betonilaatan alaosaan, eli vetojännityspuolelle saattaa syntyä usein halkeamia, jonka

myötä mahdollinen kosteus pääsee tunkeutumaan rakenteeseen ja ruostuttamaan raudoitteita. Halkeilun seurauksena betonilaatan alaosa, tarkemmin ottaen noin 40–60 % laatan syvyydestä, toimii useimmiten tehottomasti ja on siten kestävätkä. Korvattaessa vetorasitettua puoli rakenteesta CLT-elementillä saadaan pienennettyä betonilaatan paksuutta huomattavasti, jopa 50 %, ja siten vähennettyä tuntuvasti rakenteen omapainoa. [1. s.2.]

2.2 Leikkausliitos

Materiaalien välillä vaikuttavan leikkausliittimen valinta on kriittisen tärkeä osa puu-betoniliittorakenteiden suunnittelua. Tämänkaltaisten rakenteiden määrittelemättömyyden takia, leikkausliittimen valinta vaikuttaa oleellisesti rakenteen jännitysjakaumiin, muodonmuutoksiin, ja näin ollen koko rakenteen suunnitteluun. Rakenteen ihanteellista suorituskykyä tavoiteltaessa tulisi leikkausliittimen valinnassa huomioida kolme asiaa:

- Liittimen tulee olla riittävän vahva välittääkseen leikkausvoimat materiaalien rajapintojen välillä.
- Liittimen tulee olla riittävän jäykkä, jotta kuormituksesta aiheutuva liukuma rajapintojen välillä pysyisi riittävän pienenä.
- Liittimen tulee olla riittävän sitkeä, kestääkseen rakenteeseen kohdistuvan täyden kuormituksen jakaantumisen, ilman liittimessä tapahtuvaa pettämistä.

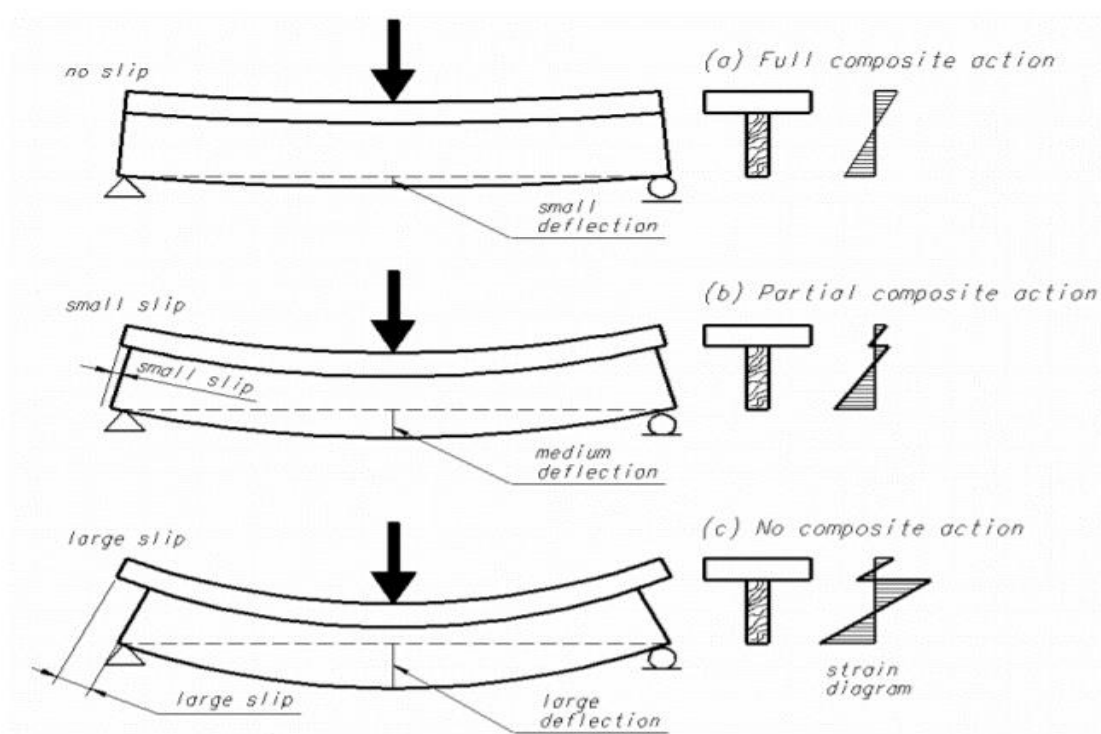
Muita merkittäviä liitoksen valintaan vaikuttavia asioita ovat liitostavasta aiheutuvat kustannukset, sekä käytännön toteutuksen helppous tai monimutkaisuus. [3. s.33.]

Puu-betoniliittorakenteen lujuus sekä jäykkyys ovat riippuvaisia sen liittimien lujuudesta ja jäykkyydestä. Leikkausliittimiltä puuttuvia lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia voidaan kompensoida kasvattamalla liittimien määrää mutta tämä lisää rakenteen kustannuksia sekä toisaalta vaatii myös enemmän asennusaikaa työmaalla.

Jäykkyyden ja lujuuden lisäksi liittimen tärkeäksi ominaisuudeksi lukeutuu myös plastinen muodonmuutoskyky. Tämä voidaan määritellä liittimen käyttäytymisenä kuormitettuna, vaurion ilmenemisen jälkeen. Hyvän plastisen muodonmuutoskyvyn omaavaa liittintä pidetään yleisesti ottaen sitkeänä. Tämä liittimen ominaisuus, varoittaa

rakennuksen käyttäjiä rakenteen mahdollisen romahtamisen vaarasta. Puun ja betonin vaurioitumisen seurauksena niiden käyttäytyminen on haurasta. Tämän takia leikkausliittimellä tulisi olla myötäämiskykyä, jonka ansiosta rakenteella olisi mahdollisuus hitaaseen taipumaan ennen sen lopullista romahtamista. [4. s.13.]

Kuvassa 1 nähdään liittorakenteen toimintaa eri jäykkyyksasteen omaavilla liitoksilla.



Kuva 1. Kuva havainnollistaa liittorakenteen toimintaa. Ylimmässä kuvassa jäykkä liitos ja täysi liittovaikutus. Keskimmaisessä kuvassa pienen liukuman salliva liitos, ja osittainen liittovaikutus, ja alin kuva täysin ilman liitosta sekä liittovaikutusta. [1. s.38]

Yllä olevasta kuvasta 1 voidaan todeta, että liitoksen jäykkyydellä ja liittovaikutuksen aikaansaamisella on merkittävän suuri vaikutus rakenteen taivutusjäykkyyteen ja sitä kautta myös taipumien suuruuteen.

3 Tarkasteltavat liittorakenteet

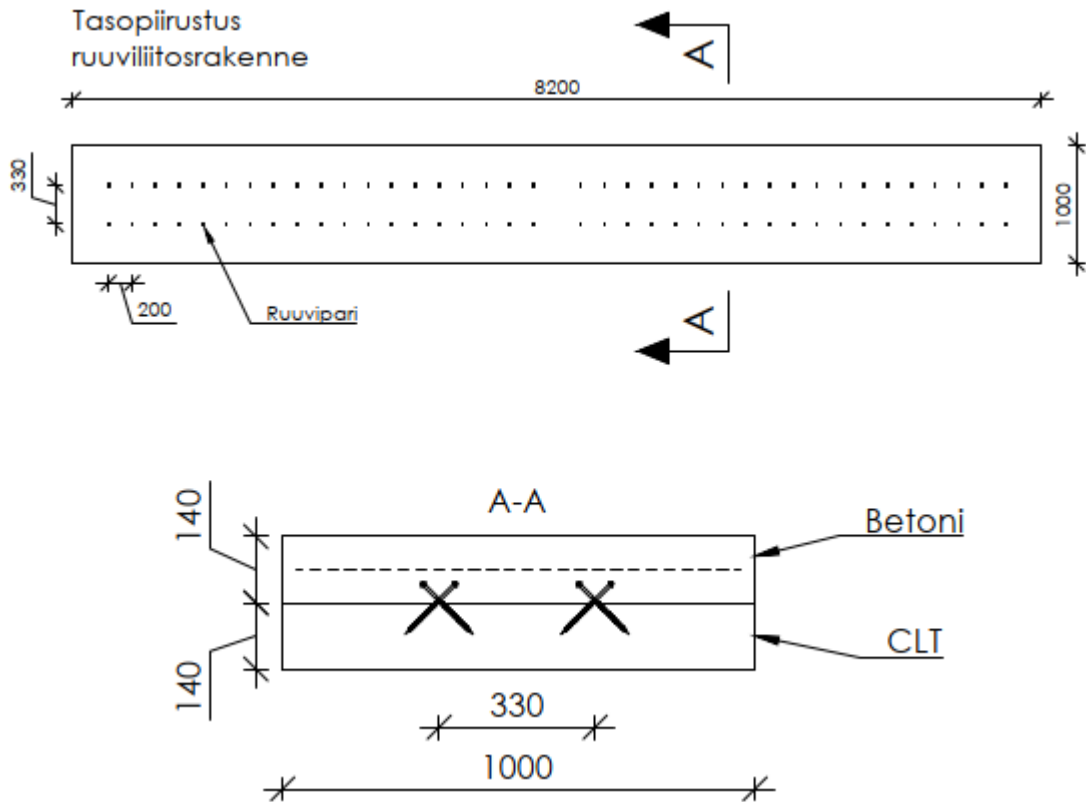
3.1 Tarkasteltavien koerakenteiden perustiedot ja mitat

Vertailulaskelmien kohteena olevien CLT-betoniliittorakenteisten välipohjien mitat ja materiaalit perustuvat Metropolia Ammattikorkeakoulussa valmistettuihin koerakenteisiin ja niissä käytettyihin mittoihin ja materiaaleihin. Metropoliaassa valmistetut yksiaukkoiset CLT-betoniliittorakenteiset välipohjat koostuvat rakenteen alaosassa sijaitsevasta kosteuseristetystä CLT-elementistä, sekä yläpuolen paikallavaletusta betonilaatasta. Materiaalien välillä vaikuttaa leikkausliitos, joka toteutetaan toisessa koerakenteessa ruuviliitoksella ja toisessa betonivaarnojen avulla.

Taulukko 1. Koerakenteiden mitat ja perustiedot taulukkomuodossa.

Koerakenteiden mitat ja tiedot	Betoni	CLT Stora Enso
Laatan paksuus h	140 mm	140 mm
Laatan leveys b	1000 mm	1000 mm
Laatan pituus L	8200 mm	8200 mm
Lujuusluokka	C30/37	C24
Maksimi raekoko	16 mm	
Notkeusluokka	S3	
Rauditusverkko	# 6–150 mm keskeisesti	
Kosteussulku		Weber MS
Leikkausliitin ruuviliitosrakenteessa	Leikkausliitin vaarnaliitosrakenteessa	
Puu-betoniliittoruuvi SFS Intec-VB-48-7,5x100 ristiin ruuvattuna $\pm 45^\circ$	Betonivaarnat, lovien syvyys h= 20 mm, pituus L= 200 mm, leveys b= 1000 mm	

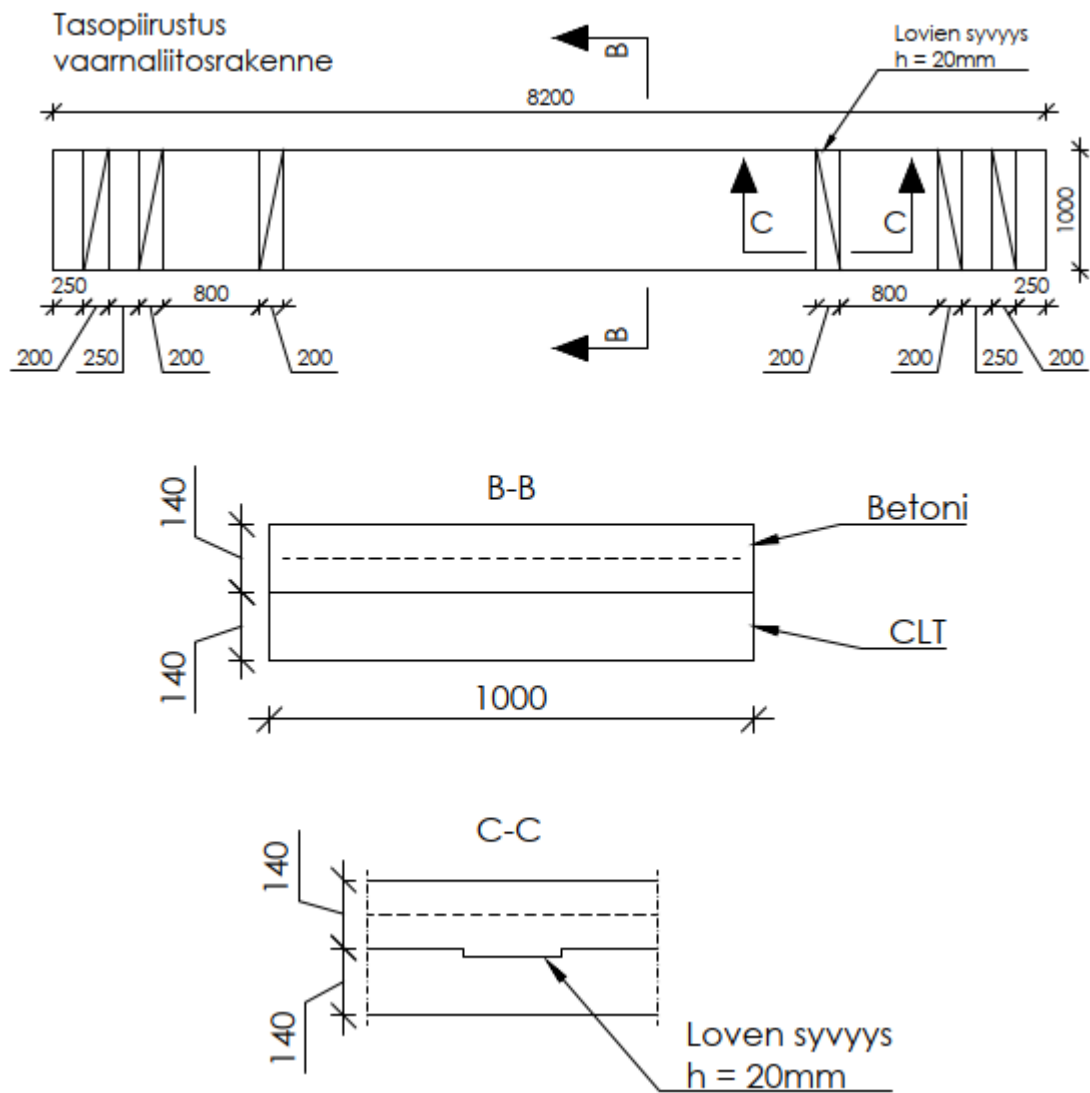
Betonivaarnaliitoksella toteutettu koerakenne on mitoiltaan ja materiaaleiltaan liitostapaa lukuun ottamatta täysin vastaava, kuin ruuviliitoksella toteutettu rakenne. Kuva 2 havainnollistaa ruuviliitoksella toteutetun koerakenteen liitosten sijoittelua ja mittoja.



Kuva 2. Ruuviliitoksella toteutetun koerakenteen taso- ja leikkauskuva, josta selviää rakenteen mitat, ja liitinten sijoittelu rakenteessa. Katkoviiva kuvaa rauditusverkkoa betonissa.

Yllä olevasta kuvasta voidaan helposti laskemalla todeta, että koerakenteen kokoiseen CLT-betoniliittovälipohjaan tarvitaan 152 kappaletta ruuveja. Tähän perustuen on helppo arvioida, että etenkin hieman isommissa kohteissa ruuvimäärän tarve kasvaa erittäin suureksi ja lisää näin ollen selvästi työn määrää työmaalla.

Seuraavalla sivulla kuvassa 3 on esitetty betonivaarnaliitoksien toteutetun koerakenteen taso- ja leikkauskuvat. Kuvista selviää lovien sijoittelu CLT-laatassa. Lovet on pyritty sijoittamaan leikkausvoiman suhteessa siten, että kaikille vaarnoille tulisi likimain yhtä suuret leikkausjännityksen aiheuttamat rasitukset.



Kuva 3. Vaarnaliitoksella toteutetun koerakenteen taso- ja leikkauskuvat, josta selviää vaarnojen koko ja sijoittelu rakenteessa.

Betonivaarnoin toteutetun koerakenteen CLT-laattaan jyrtsittiin jo tehtaalla valmiiksi kuusi kappaletta lovia. Valettaessa betonilaatta kosteuseristetyin CLT-elementin päälle, lovet täyttyvät betonista, ja alkavat betonin kuivuttua toimia rakenteen leikkausliittiminä.

On kuitenkin huomioitava, että myös betonivaarnaliitos vaatii ennen betonin valamista ruuveja ruuvattavaksi lovien kohdalle. Näiden ruuvien tehtävänä on vastaanottaa poikki-leikkauksen leikkausvoimasta aiheutuvaa pystysuuntaista vetojännitystä. Ruuvimäärän tarve voidaan määrittellä laskennallisesti ohjeen mukaisesti. [CEN/TC 250/SC 5. s.43.]

Tässä opinnäytetyössä betonivaarnaliitoksin toteutetun koerakenteen lovien ruuvitarve on määritetty laskennallisesti kohdassa 7.

3.2 Tarkasteltavat liitostavat ja niiden ominaisuudet

3.2.1 Ruuviliitos

Puikkoliittimet, joihin ruuvitkin luetaan, ovat suosituimpia liitostapoja puurakenteissa, joten on luonnollista, että niiden käyttö myös puu-betoniliittorakenteissa on hyvin suosittua. [3. s.35.]

Ruuviliittimien etuna puu-betoniliittorakenteissa voidaan pitää niiden sitkeää käyttäytymistä, yksinkertaista asentamista sekä mahdollisuutta ääneneristyksen käyttöön puun ja betonin välissä. [2. s.1.]

Opinnäytetyössä tarkasteltavan ruuviliitoksella toteutetun välipohjarakenteen leikkausliittiminä toimivat SFS Intec VB 7,5x100 puu-betoniliittoruuvit. Ruuvit on ruuvattu ruuvivalmistajan teknisessä hyväksynnässä kuvatulla tavalla, $\pm 45^\circ$ kulmassa. [ETA13/0699 s. 9.] Taulukossa 2 on esitetty reunaehtoja ruuvien sijoittelun suhteen. Ylimmällä rivillä taulukossa ruuvien minimietäisyys syiden suunnassa. Toisella rivillä ruuvien minimietäisyys syitä vastaan kohtisuorassa. Kolmannella rivillä minimietäisyys laatan reunasta syiden suunnassa. Alimmalla rivillä minimireunaetäisyys laatan reunasta syitä vastaan kohtisuorassa.

Taulukko 2.

SFS VB screw	$7.5 \times \lambda$
Spacing parallel to grain a_1	80
Spacing perpendicular to grain a_2	20
End distance (end of end-grain) $a_{3,c}$	80
Edge distance $a_{4,c}$	30

SFS Intec VB 7,5x100 puu-betoniliittoruuvit valmistetaan karkaistusta teräksestä ja ruostesuojataan sinkkipinnoitteella tai ruskealla patinalla. [8. s.9.]

Kuvassa 4 Metropolian rakennusfysiikan laboratoriossa ruuviliitoksin toteutettavaa koerakennetta.



Kuva 4. Metropoliaassa rakennusfysiikan laboratoriossa valmistusvaiheessa oleva koerakenne. Liittoruuvit ruuvattuna ja CLT-laatta kosteuseristettynä, ennen betonin valamista.

3.2.2 Betonivaarnaliitos

Betonivaarnaliitokset toteutetaan useimmiten, joko poraamalla tai leikkaamalla lovia puumateriaaliin tai vaihtoehtoisesti puumateriaaliin liimattujen lohkojen avulla. Kustannustehokkuudesta ja yksinkertaisemmasta toteutustavasta johtuen, useimmiten käytetty ratkaisu on puumateriaaliin leikatut tai poratut lovet. [3. s.35.] Vertailussa mekaanisiin liittimiin, kuten esimerkiksi ruuveihin, voidaan betonivaarnaliitoksen eduiksi katsoa suurempi liitoksen jäykkyys, rakenteen suurempi saavutettavissa oleva kapasiteetti sekä kustannustehokkuus. [5. s.1.]

Tässä opinnäytetyössä koerakenteiden betonivaarnaliitokset on toteutettu tehtaalla laattoihin leikattujen lovien avulla. Tarkemmat tiedot lovista ja niiden sijoittelusta esitettiin kuvassa 3. Kuvassa 5 betonivaarnaliitoksin toteutettavaa koerakennetta, betonilaatan valamisen ja muottien poiston jälkeen.



Kuva 5. Betonivaarnat rakenteen leikkausliittiminä.

4 Vertailulaskelmat ruuvi- ja vaarnaliitoksella

4.1 Mitoituksen perusteet

Opinnäytetyön vertailulaskelmien perustana ovat alla luetelamamuodossa esitetyt normit, ohjeet ja tekniset hyväksynnät.

- **Kuormat:** RIL 201-1-2017, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1.

- **Puurakenteet:** 205–1–2017, SFS EN 1995-1-1, CEN/TC 250/SC 5, ETA 13/0699, ETA-14/0349.
- **Betonirakenteet:** SFS EN 1992-1-1.

Laskennassa on käytetty rinnakkain [RIL-201-1-2017] puurakenteiden suunnitteluohjetta sekä puu-betoniliittorakenteen suunnitteluohjetta [CEN/TC 250/SC 5]. CEN-ohjeesta on saatu laskennassa, etenkin betonivaaroin toteutettua liitosta varten tarvittavia suoritusarvoja ja liitoksen kestävyysarvoja. On kuitenkin huomioitava, että CEN ohje on tois- taiseksi luonnos eikä vielä lopullisesti hyväksytty ohje. CEN ohje on mukana lasken- nassa vain, jotta saadaan vertailulaskelmat suoritettua. Puu-betoniliittoruuveille on saatu laskentaan tarvittavat suoritusarvot liitinvalmistajan teknisestä hyväksynnästä [ETA- 13/ 0699], ja näitä valmistajan ilmoittamia suoritusarvoja on käytetty, mikäli eroavaisuutta puurakenteiden suunnitteluohjeen [RIL-201-1-2017] antamiin kaavoihin opinnäytetyössä ilmeni. CLT-valmistajan teknisestä hyväksynnästä [ETA-14/ 0349] on saatu tarvittavat suoritusarvot CLT-laatalle.

4.2 Kuormitus ja voimasuureet

Seuraamusluokka ja välipohjan hyötykuormaluokka noudattavat laskennassa Ho- pealaakson päiväkotikohteen mukaisia luokkia. Alla laskettuna liittolaatan omanpainon aiheuttama kuormitus. Kuormitukset on laskettu yleisten statiikan oppien mukaan.

$$\text{Betonin omapaino } G_{k \text{ betoni}} \quad 25 \text{ kN/m}^3 * 0,14 \text{ m} * 1 \text{ m} = 3,5 \text{ kN/m}$$

$$\text{CLT omapaino } G_{k \text{ CLT}} \quad 5 \text{ kN/m}^3 * 0,14 \text{ m} * 1 \text{ m} = 0,7 \text{ kN/m}$$

$$\text{Välipohjan hyötykuormaluokka B} \quad 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Seuraamusluokka CC2} \quad K_{fi} = 1,0$$

Murtorajatilan kuormitusyhdistely lasketaan standardin [SFS EN 1990] kansallisen liit- teen kuormitusyhdistelyn mukaisesti. Kuormitusyhdistely saadaan lasketuksi kaavalla

4.1, joka on määritetty puurakenteiden suunnitteluohjeessa. [RIL 205-1-2017, s.27.] Maksimi leikkausvoiman ja taivutusmomentin arvot saadaan laskettua yksinkertaisesti tuetun ja tasaisesti kuormitetun yksiaukkoisen palkin tapauksessa kaavoilla 4.2 ja 4.3.

MRT Kuormitus:

$$1,15 * G_k + 1,5 * Q_k = 1,15 * 4,2kN/m + 1,5 * 2,5kN/m = 8,58kN/m \quad 4.1$$

Maksimi leikkausvoima:

$$\frac{qL}{2} = \frac{8,58kN/m * 8,2m}{2} = 35,18kNm \quad 4.2$$

Maksimi taivutusmomentti:

$$\frac{qL^2}{8} = \frac{8,58kN/m * (8,2m)^2}{8} = 72,12kNm \quad 4.3$$

4.3 Materiaalien ominais- ja suunnittelulujuudet

Taulukossa 3 on esitetty koerakenteen CLT laatan ominais- ja suunnittelulujuudet. Taulukon materiaalin ominaislujuudet on saatu CLT-materiaalivalmistajan teknisestä hyväksynnästä. [ETA-14/0349, s.15–17.] Materiaaliominaisuuden mitoitusarvon, eli suunnittelulujuuden laskentakaava sekä materiaalin osavarmuusluku γ_M määritetään [RIL 205-1-2017] kohdassa 2.4.1. Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroimen k_{mod} arvo, sekä virumaluku k_{def} määritetään [RIL 205-1-2017] kohdassa 3.1. Materiaaliominaisuuden mitoitusarvo X_d saadaan laskettua kaavalla 4.4:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad 4.4$$

missä:

- X_k = lujuusominaisuuden ominaisarvo
- γ_M = materiaaliominaisuuden osavarmuusluku (CLT:llä 1,25)
- k_{mod} = muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman keston ja kosteuden vaikutus

Taulukko 3. CLT-laatan lujuus- ja jäykkyysominaisuudet taulukkomuodossa

CLT C24		
Käyttöluokka 1		
Kuorman aikaluokka: Keskipitkä		
Virumaluku $k_{def} = 0,80$		Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin $k_{mod} = 0,80$
Materiaalin lujuus- ja jäykkyysominaisuudet	Ominaislujuudet	Suunnittelulujuudet
Taivutuslujuus	$f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$	$f_{m,d} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 15,4 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus	$f_{v,090,k} = 4,0 \text{ MPa}$	$f_{v,090,d} = k_{mod} * \frac{f_{v,090,k}}{\gamma_M} = 2,6 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus (90°)	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ MPa}$	$f_{c,90,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,090,k}}{\gamma_M} = 1,6 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus	$f_{c,0,k} = 21 \text{ MPa}$	$f_{c,0,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 13,4 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus	$f_{t,0,k} = 14,5 \text{ MPa}$	$f_{t,0,d} = k_{mod} * \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 9,3 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus (90°)	$f_{t,90,k} = 0,12 \text{ MPa}$	$f_{t,90,d} = k_{mod} * \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} = 0,077 \text{ N/mm}^2$
Kimmomoduuli	$E_{0, mean} = 12000 \text{ N/mm}^2$	$E_{0,05} = \frac{E_{0, mean}}{\gamma_M} = 9600 \text{ N/mm}^2$

Betonin lujuus- ja jäykkyysominaisuudet esitetään taulukossa 4, sivulla 17. Viruma-aste betonille esitetään puu-betoniliittoruuvien valmistajan teknisessä hyväksynnässä. [ETA-13/0699 s.14.] Betonirakenteiden standardissa [SFS EN 1992-1-1] on määritetty seuraavat betonia koskevat tiedot. Varmuuskerroin γ_C määritetään kohdassa 2.4.2.4. Betonin sekanttimoduuli E_{cm} , puristuslujuus f_{ck} sekä vetolujuus $f_{ctk, 0,05}$ kohdassa 3.1.3. Lisäksi puristuslujuuden sekä vetolujuuden mitoitusarvon laskentakaavat sekä laskentaan tarvittavat kertoimet määritetään kohdassa 3.1.6.

Puristuslujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 4.5:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad 4.5$$

missä:

- α_{cc} = Puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät (0,85)
- f_{ck} = Betonin puristuslujuuden ominaisarvo
- γ_C = Betonin osavarmuusluku (1,5)

Vetolujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 4.6:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_C} \quad 4.6$$

missä:

- $f_{ctk,0,05}$ = betonin vetolujuuden ominaisarvo
- α_{ct} = puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät (arvo= 1)

Taulukko 4. Betonin lujuus- ja jäykkyysominaisuudet taulukkomuodossa

Betoni C30/37		
Viruma-aste $\varphi_{ef} = 2,5$		Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin $\psi_2 = 0,3$
Materiaalin lujuus- ja jäykkyysominaisuudet	Ominaislujuudet	Suunnittelulujuudet
Puristuslujuus	$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 17 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus	$f_{ctk} = 2,0 \text{ MPa}$	$f_{ctd} = \alpha_{ct} * \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_M} = 1,33 \text{ N/mm}^2$
Sekanttimoduuli	$E_{cm} = 33000 \text{ MPa}$	

Edeltävissä taulukoissa laskettujen suunnittelulujuuksien avulla saadaan laskettua käyttöasteet koerakenteiden jännityksille. Käyttöasteet on esitetty taulukossa 5, sivulla 49.

4.4 Vaarna ja ruuviliitosten kapasiteetit

4.4.1 Vaarnaliitoksen kapasiteetti

Vaarnaliitoksen kapasiteetti saadaan laskettua puu-betoniliittorakenteen suunnitteluohjeella [CEN/TC 250/SC 5] kohdan 10.3.4.3 mukaan. Kuvassa 6 seuraavalla sivulla esitetään kaavat ja kaavojen selitteet laskentaa varten. Vaarnaliitoksen kapasiteetin suunnitteluarvoksi valitaan pienin ohjeen mukaan lasketuista kaavojen arvoista *a-d*.

$F_{R,d}$ is the design load-carrying capacity for the notched connection.

(2) The load-carrying capacity values $F_{R,d}$ for notched connections should be taken as the minimum value found from the capacities determined for the various failure modes shown in Formula 10.4 – 10.17:

$$F_{R,d} = \min \begin{cases} f_{v,c,d} b_n l_n & \text{a) shear of concrete} \\ f_{c,d} b_n h_n & \text{b) crushing of concrete} \\ k_{cr} f_{v,t,d} b_n l_{\min} & \text{c) shear of timber} \\ f_{c,o,d} b_n h_n & \text{d) crushing of timber} \end{cases} \quad (10.14)$$

with

$$l_{\min} = 8 h_n \quad (10.15)$$

$$f_{v,c,d} = \frac{v f_{c,d}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (10.16)$$

$$v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{c,k}}{250} \right) \quad (10.17)$$

where

$f_{v,c,d}$ is the effective design shear strength of the concrete member;

b_n is the notch width;

l_n is the notch length, see Figure 10.2;

$f_{c,d}$ is the design compressive strength of the concrete member;

h_n is the notch depth, see Figure 10.2;

k_{cr} is the crack factor and may be obtained from EN 1995-1-1;

$f_{v,t,d}$ is the design shear strength of the timber member;

l_{\min} is the minimal shear length of the timber;

$f_{c,o,d}$ is the design compression strength of the timber member parallel to the grain;

l_v is the length of timber in front of the end notch, see Figure 10.2;

l_s is the distance between notches, see Figure 10.2;

v is a strength reduction factor for concrete cracked in shear;

θ is the angle of the concrete strut between the maximum values given in EN 1992 and the minimum value of Formula 10.18:

$$\theta = \max \left\{ \arctan \frac{0,5 (h_c + h_n)}{(l_n + l_s)}; \arctan \frac{h_n}{l_n} \right\} \quad (10.18)$$

$f_{c,k}$ is the characteristic compressive strength of the concrete member;

h_c is the height of the concrete without the depth of the notch, see Figure 10.2.

Kuva 6. Kuvassa vaarnaliitoksen kapasiteetin laskentakaava ja selitteet kaavoille. Vaarnaliitoksen kapasiteetin suunnittelu-arvo on pienin lasketuista kaavojen arvoista (a-d).

Seuraavassa esitetään laskenta vaarnaliitoksen kapasiteetin suunnitteluarvolle, yllä olevan ohjeen mukaisesti.

Halkeilleen betonin pienennyskerroin v kaavalla 4.7:

$$v = 0,6 \left(1 - \frac{\frac{30 N}{mm^2}}{250} \right) = 0,53 \quad 4.7$$

Kulma θ kaavalla 4.8:

$$\theta = \max \left\{ \arctan \frac{0,5 * (140mm + 20mm)}{(200mm + 250mm)} = 10,08 ; \arctan \frac{20mm}{200mm} = 5,71 \right. \quad 4.8$$

$$\theta = 10,08$$

Betonin tehollinen leikkauslujuuden suunnitteluarvo $f_{v,c,d}$ kaavalla 4.9:

$$f_{v,c,d} = 0,53 * \frac{\frac{17N}{mm^2}}{(5,63 + 0,177)} = \frac{1,55 N}{mm^2} \quad 4.9$$

Betonin leikkautuminen, a):

$$\frac{1,55 N}{mm^2} * 1000mm * 200mm = 310000 N \quad 4.10$$

Betonin puristuminen, b):

$$\frac{17 N}{mm^2} * 1000mm * 20mm = 340000 N \quad 4.11$$

Puun leikkautuminen, c):

$$1,0 * \frac{2,6N}{mm^2} * 1000mm * (8 * 20mm) = 416000 N \quad 4.12$$

Puun puristuminen, d):

$$\frac{13,4N}{mm^2} * 1000mm * 20mm = 268000 N \quad 4.13$$

Vaarnaliitoksen kapasiteetiksi määräytyy ohjeen mukaisesti pienin yllä lasketuista arvoista. Suunnitteluarvon kapasiteetin määrää kohdan (d) puun puristuminen ja kapasiteetiksi saadaan arvo 268000 N.

4.4.2 Ruuviliitoksen kapasiteetti

Ruuviliitoksen kapasiteetti saadaan laskettua ruuvinvalmistajan teknisen hyväksynnän mukaisesti. [ETA-13/ 0699, s.15.] Kuvassa 7 laskentaohje ruuviliitoksen kapasiteetin ominaisarvon laskentaan.

Table A.5.3 – Values of F_{Rk} for timber-concrete-joints with SFS VB screws

F_{Rk} in N	
$F_{Rk} = k_{\alpha} \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} F_{ax,\alpha,Rk} \\ 13000 \end{array} \right.$	
where:	
F_{Rk}	is the characteristic load-carrying capacity per pair of SFS VB screw in N;
k_{α}	is a factor taking into account the screw arrangement; $k_{\alpha} = 1,414$ for $\alpha = \pm 45^{\circ}$ $k_{\alpha} = 1,0$ for $\alpha = 45^{\circ}/90^{\circ}$
$F_{ax,\alpha,Rk}$	is the characteristic withdrawal capacity in N;
	$F_{ax,\alpha,Rk} = 90 \cdot \ell_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8}$ for SFS VB screws in softwood
	$F_{ax,\alpha,Rk} = 180 \cdot \ell_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{530} \right)^{0,8}$ for SFS VB screws in pre-drilled hardwood
ℓ_{ef}	is the penetration depth of the SFS VB screw in the timber member in mm, for screw arrangement $45^{\circ}/90^{\circ}$ is ℓ_{ef} the penetration depth of the 90° screw;
ρ_k	is the characteristic timber member density in kg/m^3 ;
α	is the angle between screw axis and grain direction.

Kuva 7. Ruuvinvalmistajan laskentaohje ruuviparin kapasiteetin ominaisarvolle F_{Rk} .

Alla luetelmamuodossa tarvittavat tiedot laskennan suorittamiseen.

- Liittimen tunkeutumissyvyys l_{ef}
- Liittimet ruuvattu $\pm 45^\circ$
- Puun tiheyden ominaisarvo $\rho_k = 470 \text{ kg/m}^3$ [10, s.4.]
- kerroin $k_a = 1,414$, kun liittimet on ruuvattu $\pm 45^\circ$

Lasketaan ruuviliitoksen ulosvetokapasiteetti $F_{ax,a,Rk}$ kaavalla 4.14:

$$F_{ax,a,Rk} = 90 * 95mm * \left(\frac{470kg}{350} \right)^{0,8} = 10824 \text{ N} \quad 4.14$$

Ruuviliitoksen kapasiteetti F_{Rk} kaavalla 4.15:

$$F_{Rk} = 1,414 * \min \left\{ \begin{array}{l} 10824N \\ 13000N \end{array} \right\} = 15305 \text{ N} \quad 4.15$$

Ruuviliitoksen kapasiteetin mitoitusarvo F_{Rd} lasketaan [RIL 205-1-2017] kohdan 8.1.1 mukaan kaavalla 4.16.

$$F_{Rd} = 0.80 * \frac{15305 \text{ N}}{1,25} = 9795 \text{ N} \quad 4.16$$

4.5 Tehollinen taivutusjäykkyys alkutilanteessa KRT

Lasketaan ensin vaarnaliitosrakenteen poikkileikkaussuureet alkutilanteessa. Laskennat etenevät puurakenteiden suunnitteluohjeen [RIL 205-1-2017] kohdan 9.1.3 *Mekaanisin liittimin kootut palkit* mukaisesti. Vaarnaliitoksen liitossiirtymäkertoimen K_{ser} arvo saadaan puu-betoniliittorakenteen [CEN/TC 250/SC 5] ohjeesta, kohdasta 10.3.4.2. CEN-

ohjeessa määritetyt joustamattomien rasiusten vaikutukset on rajattu pois tämän opin-
näytetyön sisällöstä.

4.5.1 Vaarnaliitosrakenne KRT

Jäyhyysmomentti CLT ja betonilaatalle lasketaan kaavalla 4.17:

$$I = \frac{b_i h_i^3}{12} = 1000 \text{ mm} * \frac{(140 \text{ mm})^3}{12} = 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4 \quad 4.17$$

Liitoksen hyötysuhteen kerroin γ_1 kaavalla 4.18:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i L^2}} \quad 4.18$$

$$\frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * 1025 \text{ mm}}{1000 \text{ mm} * \frac{1000 \text{ N}}{\text{mm}} / \text{mm} * (8200 \text{ mm})^2}} = 0,59$$

Liitoksen hyötysuhteen kerroin γ_2 :

$$\gamma_2 = 1$$

Osan 2 eli CLT-laatan painopisteen etäisyys a_2 neutraaliakselista lasketaan kaavalla 4.19:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} = \quad 4.19$$

$$a_2 = \frac{0,59 * \frac{33000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (140 \text{ mm} + 140 \text{ mm}) - 0}{2 * (0,59 * \frac{33000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 + 1 * \frac{12000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2)} = 86,6 \text{ mm}$$

Osan 1 eli betonilaatan painopisteen etäisyys a_1 neutraaliakselista lasketaan kaavalla 4.20:

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 = \frac{140\text{mm}}{2} + \frac{140\text{mm}}{2} - 86,6\text{mm} = 53,4\text{mm} \quad 4.20$$

Lasketaan seuraavaksi tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} vaarnaliitosrakenteelle käyttörajatilassa [RIL 205-1-2017] mukaisesti kaavalla 4.21:

$$(EI_{ef}) = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad 4.21$$

$$\left(\frac{33000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4 + 0,59 * \frac{33000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (53,4\text{mm})^2 \right) + \left(\frac{12000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4 + 1 * \frac{12000 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (86,6\text{mm})^2 \right) = 30,68\text{MNm}^2$$

4.5.2 Ruuviliitosrakenne KRT

Poikkileikkaussuureet ruuviliitosrakenteelle. Liitoksen siirtymäkerroin K_i kerrotaan kahdella johtuen rinnakkaisten ruuviparien määrästä.

Liitoksen hyötysuhteen kerroin γ_1 :

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * 200\text{mm}}{2 * 22800 \text{ N/mm} * (8200\text{mm})^2}} = 0,252$$

Liitoksen hyötysuhteen kerroin γ_2 :

$$\gamma_2 = 1$$

Osan 2 eli CLT-laatan painopisteen etäisyys a_2 neutraaliakselista:

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

$$a_2 = \frac{0,252 * \frac{33000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (140mm + 140mm) - 0}{2 * (0,252 * \frac{33000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 + 1 * \frac{12000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2)} = 57,3mm$$

Osan 1 eli betonilaatan painopisteen etäisyys a_1 neutraaliakselista:

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 = \frac{140mm}{2} + \frac{140mm}{2} - 57,3mm = 82,7mm$$

Tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} ruuviliitosrakenteelle käyttörajatilassa:

$$\left(\frac{33000 N}{mm^2} * 2,29 * 10^8 mm^4 + 0,252 * \frac{33000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (82,7mm)^2 \right) +$$

$$\left(\frac{12000 N}{mm^2} * 2,29 * 10^8 mm^4 + 1 * \frac{12000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (57,3mm)^2 \right) = 23,78MNm^2$$

4.6 Tehollinen taivutusjäykkyys alkutilanteessa MRT

4.6.1 Vaarnaliitosrakenteen MRT

Vaarnaliitosrakenteelle alkutilanteen taivutusjäykkyudet murtorajatilassa sekä käyttörajatilassa ovat yhtä suuret. Tämä johtuu liitoksen siirtymäkertoimen K_{ser} arvosta, joka voidaan puu-betoniliittorakenteen suunnitteluohjeen [CEN/TC 250/SC 5] kohdan 10.3.4.2 mukaisesti olettaa olevan yhtä suuri vaarnaliitoksella murto- ja käyttörajatilassa. Seuraavalla sivulla kuvassa 8 CEN ohjeen mukaiset arvot liitoksen siirtymäkertoimille.

10.3.4.2 Slip modulus

(1) For notched connections, the mean slip modulus for ultimate limit states K_u may be assumed to be equal to the slip modulus for serviceability limit states K_{ser} .

$$K_{ser} = \begin{cases} 1000 \frac{N/mm}{mm} & \text{for } h_n = 20 \text{ mm} \\ 1500 \frac{N/mm}{mm} & \text{for } h_n \geq 30 \text{ mm} \end{cases} \quad (10.12)$$

Kuva 8. Liitossiirtymäkertoimen arvot betonivaarnaliitosrakenteelle CEN ohjeen mukaisesti.

4.6.2 Ruuviliitosrakenne

Ruuviliitosrakenteen poikkileikkaussuureet alkutilanteessa murtorajatilassa.

Ruuviliitoksen siirtymäkerroin K_u murtorajatilassa lasketaan [RIL-205-1-2017] kohdan 2.2.2 mukaisesti kaavalla 4.22:

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad 4.22$$

missä:

- K_{ser} = liitoksen käyttörajatilan siirtymäkerroin

$$K_u = \frac{2}{3} * \frac{22800 \text{ N}}{\text{mm}} = \frac{15200 \text{ N}}{\text{mm}}$$

Jäyhyysmomentti CLT ja betonilaatalle:

$$I = 1000\text{mm} * \frac{(140\text{mm})^3}{12} = 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4$$

Liitoksen hyötysuhteen kerroin γ_1 :

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * 200 \text{ mm}}{2 * 15200 \text{ N/mm} * (8200 \text{ mm})^2}} = 0,183$$

Liitoksen hyötysuhteen kerroin γ_2 :

$$\gamma_2 = 1$$

Osan 2 eli CLT-laatan painopisteen etäisyys a_2 neutraaliakselista:

$$a_2 = \frac{0,183 * \frac{33000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (140mm + 140mm) - 0}{2 * (0,183 * \frac{33000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 + 1 * \frac{12000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2)} = 47mm$$

Osan 1 eli betonilaatan painopisteen etäisyys a_1 neutraaliakselista:

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 = \frac{140mm}{2} + \frac{140mm}{2} - 47mm = 93mm$$

Tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} ruuviliitosrakenteelle murtorajatilassa:

$$\left(\frac{33000 N}{mm^2} * 2,29 * 10^8 mm^4 + 0,183 * \frac{33000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (93mm)^2 \right) + \left(\frac{12000 N}{mm^2} * 2,29 * 10^8 mm^4 + 1 * \frac{12000 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (47mm)^2 \right) = 21,33MNm^2$$

4.7 Tehollinen taivutusjäykkyys lopputilanteessa KRT

Kimmokertoimet lopputilassa lasketaan ohjeen [CEN/TC 250/SC 5] kohdan 4.3.2 mukaisesti.

4.7.1 Vaarnaliitos KRT

Betonin kimmokerroin taivutuksessa lopputilanteessa kaavalla 4.23:

$$E_{conc,fin} = \frac{E_{conc,t0}}{1 + \psi_{conc}\varphi} \quad 4.23$$

missä:

- $E_{conc,t0}$ = betonin kimmokerroin ajanhetkellä t_0
- ψ_{conc} = kerroin, joka huomio liittorakenteen vaikutukset betonin virumaker-
toimeen
- $\varphi(\infty, t_0)$ = betonin virumakerroin ajanhetkestä t_0 , käyttöään loppuun

Kerroin ψ_{conc} saadaan laskettua ohjeen [CEN/TC 250/SC 5], kohdan 7.1.2 mukaisesti kaavalla 4.24:

$$\psi_{conc} = 1,8 - 0,3\gamma_1^{2,5} \quad 4.24$$

$$\psi_{conc} = 1,8 - 0,3 * 0,59^{2,5} = 1,72$$

Betonin kimmokerroin vaarnaliitosrakenteessa lopputilan taivutuksessa:

$$E_{conc,fin} = \frac{33000N/mm^2}{1 + 1,72 * 2,5} = 6226,4 N/mm^2$$

CLT-laatan kimmokerroin lopputilan taivutuksessa kaavalla 4.25:

$$E_{tim,fin} = \frac{E_{tim}}{(1 + \psi_{tim}k_{def})} \quad 4.25$$

$$E_{tim,fin} = \frac{12000N/mm^2}{(1 + 1 * 0,80)} = 6666,67 N/mm^2$$

Vaarnaliittimen siirtymäkerroin lopputilassa käyttörajatilassa, saadaan laskettua kaavalla 4.26:

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + \psi_{conn}k_{def})} \quad 4.26$$

missä:

- K_{ser} = liitoksen siirtymäkerroin käyttörajatilassa
- ψ_{conn} = kerroin joka huomio liittorakenteen vaikutukset liitoksen virumaker-toimeen
- k_{def} = puun ja betonin välillä vaikuttava liitoksen virumaluku

Ellei virumalukua k_{def} määritellä tuotekohtaisessa spesifikaatiossa, se voidaan laskea kaavalla 4.27:

$$k_{def} = 2k_{def} \quad 4.27$$

missä:

- k_{def} = puumateriaalin virumaluku

$$k_{def} = 2 * 0,80$$

Vaarnaliittimen siirtymäkerroin $K_{ser,fin}$ lopputilassa:

$$K_{ser,fin} = \frac{1000mm * \frac{1000N}{mm} / mm}{(1 + 1 * 1,6)} = 384615,38 N/mm$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_1 lopputilanteessa KRT:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 6226,4 N/mm^2 * 1,4 * 10^5 mm^2 * 1025mm}{384615,38 N/mm * (8200mm)^2}} = 0,75$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_2 lopputilanteessa KRT:

$$\gamma_2 = 1$$

Osan 2 eli CLT-laatan painopisteen etäisyys a_2 neutraaliakselista lopputilanteessa KRT:

$$a_2 = \frac{0,75 * 6226,4 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (140\text{mm} + 140\text{mm}) - 0}{2 * (0,75 * 6226,4 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 + 1 * 6666,67 \text{ N/m}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2)}$$

$$= 57,7\text{mm}$$

Osan 1 eli betonilaatan painopisteen etäisyys a_1 neutraaliakselista lopputilanteessa KRT:

$$\alpha_1 = \frac{140\text{mm}}{2} + \frac{140\text{mm}}{2} - 57,7\text{mm} = 82,3\text{mm}$$

Tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} vaarnaliitosrakenteelle lopputilanteessa KRT:

$$\left(\frac{6226,4 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4 + 0,75 * \frac{6226,4 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (82,3\text{mm})^2 \right) +$$

$$\left(\frac{6666,67 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4 + 1 * \frac{6666,67 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (57,7\text{mm})^2 \right)$$

$$= 10,49\text{MNm}^2$$

4.7.2 Ruuviliitosrakenne KRT

Määritetään betonin kimmokerroin ruuviliitosrakenteessa lopputilassa. Arvo on eriävä vaarnaliitosrakenteen kimmokertoimen kanssa, johtuen eri γ_1 arvosta:

$$E_{conc,fin} = \frac{E_{conc,t0}}{1 + \psi_{conc}\varphi}$$

$$\psi_{conc} = 1,8 - 0,3\gamma_1^{2,5}$$

$$\psi_{conc} = 1,8 - 0,3 * 0,252^{2,5} = 1,79$$

$$E_{conc,fin} = \frac{33000 \text{ N/mm}^2}{1 + 1,79 * 2,5} = 6027,4 \text{ N/mm}^2$$

Ruuviliittimen siirtymäkerroin lopputilassa lasketaan samalla kaavalla kuten vaarnaliittimen. Liittimen virumaluku k_{def} saadaan liitinvalmistajan teknisestä hyväksynnästä [ETA13/0699, liite 5].

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

$$K_{ser,fin} = \frac{22800 N/mm}{(1 + 1 * 0,6)} = 14250 N/mm$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_1 lopputilanteessa KRT:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 6027,4 N/mm^2 * 1,4 * 10^5 mm^2 * 200 mm}{2 * 14250 N/mm * (8200 mm)^2}} = 0,535$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_2

$$\gamma_2 = 1$$

Osan 2 eli CLT-laatan painopisteen etäisyys a_2 neutraaliakselista lopputilanteessa, KRT:

$$a_2 = \frac{0,535 * \frac{6027,4 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (140 mm + 140 mm) - 0}{2 * (0,535 * \frac{6027,4 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 + 1 * \frac{6666,67 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2)} = 45,64 mm$$

Osan 1 eli betonilaatan painopisteen etäisyys a_1 neutraaliakselista lopputilanteessa, KRT:

$$\alpha_1 = \frac{140 mm}{2} + \frac{140 mm}{2} - 45,64 mm = 94,36 mm$$

Tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} ruuviliitosrakenteelle lopputilanteessa KRT:

$$\left(\frac{6027,4 N}{mm^2} * 2,29 * 10^8 mm^4 + 0,535 * \frac{6027,4 N}{mm^2} * 1,4 * 10^5 mm^2 * (94,36 mm)^2 \right) +$$

$$\left(\frac{6666,67 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 2,29 * 10^8 \text{ mm}^4 + 1 * \frac{6666,67 \text{ N}}{\text{m}^2} * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (45,64 \text{ mm})^2 \right) \\ = 8,87 \text{ MNm}^2$$

4.8 Tehollinen taivutusjäykkyys lopputilanteessa MRT

4.8.1 Vaarnaliitosrakenne MRT

Liittimen siirtymäkerroin lopputilassa murtorajatilassa ohjeen [CEN/TC 250/SC 5], kohta 4.3.2, lasketaan kaavalla 4.28:

$$K_{u,fin} = \frac{K_u}{(1 + \psi_{conn} k_{def})} \quad 4.28$$

missä:

- K_u = liittimen siirtymäkerroin murtorajatilassa

Vaarnaliittimen siirtymäkertoimen osoitettiin olevan yhtä suuri murto- ja käyttörajatilassa, opinnäytetyön kohdassa 4.6.1:

$$K_{u,fin} = 384615,38 \text{ N/mm}$$

Koska kimmokertoimien arvot ja liittimen siirtymäkertoimen arvo on lopputilan murtorajatilatarkasteluissa sama, kuin lopputilan käyttörajatilatarkasteluissa, saadaan myös sama tehollinen taivutusjäykkyys.

$$EI_{ef} = 10,49 \text{ MNm}^2$$

4.8.2 Ruuviliitosrakenne MRT

Määritetään siirtymäkerroin ruuviliitinparille lopputilassa murtorajatilassa. Arvo on eriävä lopputilan käyttörajatilan arvon kanssa. Tästä seuraa myös eriävä tehollinen taivutusjäykkyys.

Ruuviliittimen siirtymäkerroin lopputilanteessa MRT:

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

$$K_{u,fin} = \frac{15200 \text{ N/mm}}{(1 + 1 * 0,6)} = 9500 \text{ N/mm}$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_1 lopputilanteessa MRT:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 6027,4 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * 200 \text{ mm}}{2 * 9500 \text{ N/mm} * (8200 \text{ mm})^2}} = 0,434$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_2 lopputilanteessa MRT:

$$\gamma_2 = 1$$

Osan 2 eli CLT-laatan painopisteen etäisyys a_2 neutraaliakselista lopputilanteessa, MRT:

$$a_2 = \frac{0,434 * 6027,4 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * (140 \text{ mm} + 140 \text{ mm}) - 0}{2 * (0,434 * 6027,4 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 + 1 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2)}$$

$$= 39,45 \text{ mm}$$

Osan 1 eli betonilaatan painopisteen etäisyys a_1 neutraaliakselista lopputilanteessa, MRT:

$$\alpha_1 = \frac{140\text{mm}}{2} + \frac{140\text{mm}}{2} - 39,45\text{ mm} = 100,55\text{ mm}$$

Tehollinen taivutusjäykkyys EI_{ef} ruuviliitosrakenteelle lopputilanteessa MRT:

$$\begin{aligned} & (6027,4\text{ N/mm}^2 * 2,29 * 10^8\text{ mm}^4 + 0,434 * 6027,4\text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5\text{mm}^2 \\ & \quad * (100,55\text{ mm})^2) + \\ & (6666,67\text{ N/mm}^2 * 2,29 * 10^8\text{ mm}^4 + 1 * 6666,67\text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5\text{mm}^2 \\ & \quad * (39,45\text{ mm})^2) = 8,06\text{ MNm}^2 \end{aligned}$$

5 Mitoitus MRT

5.1 Poikkileikkausten jännitykset alkutilanteessa

Jännitykset lasketaan ohjeen [RIL 205-1-2017] kohdan 9.1.3 mukaisesti. Lasketaan ensin alkutilanteen jännitykset molemmille rakenteille.

5.1.1 Jännitykset vaarnaliitosrakenteelle alkutilanteessa

Normaalijännitys, eli keskimääräinen puristusjännitys betonilaatalle lasketaan kaavalla 5.1:

$$\sigma_{c,comp} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(E_i)_{ef}} \quad 5.1$$

missä:

- γ_i = liitoksen hyötysuhdekerroin alkutilanteessa murtorajatilassa
- E_i = betonin kimmokerroin alkutilanteessa
- a_i = betonilaatan painopisteen etäisyys neutraaliakselista alkutilanteessa murtorajatilassa
- M = taivutusmomentin maksimiarvo

- $(EI)_{ef}$ = tehollinen taivutusjäykkyys alkutilanteessa murtorajatilassa

$$\sigma_{c,comp} = \frac{0,59 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 53,4 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{3,07 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 2,44 \text{ N/mm}^2$$

Taivutusjännitys betonilaatalle saadaan laskettua kaavalla 5.2:

$$\sigma_{c,bend} = \frac{0,5E_i h_i M}{(E_i)_{ef}} \quad 5.2$$

missä:

- h_i = betonilaatan poikkileikkauksen korkeus

$$\sigma_{c,bend} = \frac{0,5 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 140 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{3,07 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 5,43 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan yläpinnan puristusjännitys lasketaan kaavalla 5.3:

$$\sigma_{c,comp,yp} = \sigma_{c,bend} + \sigma_{c,comp} \quad 5.3$$

$$\sigma_{c,comp,yp} = 5,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 2,44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 7,87 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Betonilaatan alapinnan vetojännitys lasketaan kaavalla 5.4:

$$\sigma_{c,tens} = \sigma_{c,bend} - \sigma_{c,comp} \quad 5.4$$

$$\sigma_{c,tens.} = 5,43 \frac{N}{mm^2} - 2,44 \frac{N}{mm^2} = 2,99 \frac{N}{mm^2}$$

CLT-laatan taivutusjännitys:

$$\sigma_{clt,bend} = \frac{0,5E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

missä:

- h_i = CLT-laatan poikkileikkauksen korkeus

$$\sigma_{clt,bend} = \frac{0,5 * 12000 \text{ N/mm}^2 * 140\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{3,07 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 1,97 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan keskimääräinen vetojännitys:

$$\sigma_{c,tens} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,tens} = \frac{1 * 12000 \text{ N/mm}^2 * 86,6\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{3,07 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 2,44 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan leikkausjännitys lasketaan kaavalla 5.5:

$$\tau_2 = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (E_i)_{ef}} * V \quad 5.5$$

missä:

- E_2 = CLT-laatan kimmokerroin alkutilassa

- b_2 = CLT-laatan poikkileikkauksen leveys
- h = etäisyys CLT-laatan alapinnasta neutraaliakselille alkutilanteessa

$$\tau_2 = \frac{0 + 0,5 * 12000 \text{ N/mm}^2 * 1000\text{mm} * (157\text{mm})^2}{1000\text{mm} * 3,07 * 10^{13}\text{Nmm}^2} * 35200 \text{ N} = 0,17 \text{ N/mm}^2$$

5.1.2 Jännitykset ruuviliitorakenteelle alkutilanteessa

Normaalijännitys betonilaatalle:

$$\sigma_{c,comp} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,comp} = \frac{0,183 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 93 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{2,13 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 1,9 \text{ N/mm}^2$$

Taivutusjännitys betonilaatalle:

$$\sigma_{c,bend} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,bend} = \frac{0,5 * 33000 \text{ N/mm}^2 * 140\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{2,13 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 7,82 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan yläpinnan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,comp,yp} = \sigma_{c,bend} + \sigma_{c,comp}$$

$$\sigma_{c,comp,yp} = 7,82 \frac{N}{mm^2} + 1,9 \frac{N}{mm^2} = 9,72 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan alapinnan vetojännitys:

$$\sigma_{c,tens} = \sigma_{c,bend} - \sigma_{c,comp}$$

$$\sigma_{c,tens} = 7,82 \frac{N}{mm^2} - 1,9 \frac{N}{mm^2} = 5,92 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan taivutusjännitys:

$$\sigma_{clt,bend} = \frac{0,5E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{clt,bend} = \frac{0,5 * 12000 \text{ N/mm}^2 * 140\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{2,13 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 2,84 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan keskimääräinen vetojännitys:

$$\sigma_{c,tens} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,tens} = \frac{1 * 12000 \text{ N/mm}^2 * 47\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{2,13 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 1,9 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan leikkausjännitys:

$$\tau_2 = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (E_i)_{ef}} * V$$

$$\frac{0 + 0,5 * 12000 \text{ N/mm}^2 * 1000\text{mm} * (117\text{mm})^2}{1000\text{mm} * 2,13 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} * 35200 \text{ N} = 0,136 \text{ N/mm}^2$$

5.2 Poikkileikkausten jännitykset lopputilanteessa

Seuraavassa tarkastellaan molempien koerakenteiden poikkileikkausten jännitykset lopputilassa.

5.2.1 Jännitykset vaarnaliitosrakenteelle lopputilanteessa

Normaalijännitys betonilaatalle:

$$\sigma_{c,comp,fin} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,comp,fin} = \frac{0,75 * 6226,4 \text{ N/mm}^2 * 82,33 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{1,049 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 2,64 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan taivutusjännitys:

$$\sigma_{c,bend,fin} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,bend,fin} = \frac{0,5 * 6226,4 \text{ N/mm}^2 * 140 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{1,049 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 3 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan yläpinnan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,comp,yp,fin} = \sigma_{c,bend,fin} + \sigma_{c,comp,fin}$$

$$\sigma_{c,comp,yp,fin} = 3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 2,64 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 5,64 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan alapinnan vetojännitys:

$$\sigma_{c,tens,fin} = \sigma_{c,bend,fin} - \sigma_{c,comp,fin}$$

$$\sigma_{c,tens,fin} = 3 \frac{N}{mm^2} - 2,64 \frac{N}{mm^2} = 0,36 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan taivutusjännitys:

$$\sigma_{clt,bend,fin} = \frac{0,5E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{clt,bend,fin} = \frac{0,5 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 140\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{1,049 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 3,21 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan keskimääräinen vetojännitys:

$$\sigma_{c,tens,clt,fin} = \frac{1 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 57,67\text{mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{1,049 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} = 2,64 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan leikkausjännitys:

$$\tau_{2,fin} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (E_i)_{ef}} * V$$

$$\tau_{2,fin} = \frac{0 + 0,5 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 1000\text{mm} * (127,67\text{mm})^2}{1000\text{mm} * 1,049 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} * 35200 \text{ N} = 0,182 \text{ N/mm}^2$$

5.2.2 Jännitykset ruuviliitosrakenteelle lopputilanteessa

Normaalijännitys, eli keskimääräinen puristusjännitys betonilaatalle:

$$\sigma_{c,comp} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,comp,fin} = \frac{0,434 * 6027,4 \text{ N/mm}^2 * 100,55 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{8,062 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 2,35 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan taivutusjännitys:

$$\sigma_{c,bend,fin} = \frac{0,5E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{c,bend,fin} = \frac{0,5 * 6027,4 \text{ N/mm}^2 * 140 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{8,062 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 3,77 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan yläpinnan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,comp,yp,fin} = \sigma_{c,bend,fin} + \sigma_{c,comp,fin}$$

$$\sigma_{c,comp,yp,fin} = 3,77 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 2,35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 6,12 \text{ N/mm}^2$$

Betonilaatan alapinnan vetojännitys:

$$\sigma_{c,tens,fin} = \sigma_{c,bend,fin} - \sigma_{c,comp,fin}$$

$$\sigma_{c,tens,fin} = 3,77 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - 2,35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1,42 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan taivutusjännitys:

$$\sigma_{clt,bend,fin} = \frac{0,5E_i h_i M}{(E_i)_{ef}}$$

$$\sigma_{clt,bend,fin} = \frac{0,5 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 140 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{8,062 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 4,17 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan keskimääräinen vetojännitys:

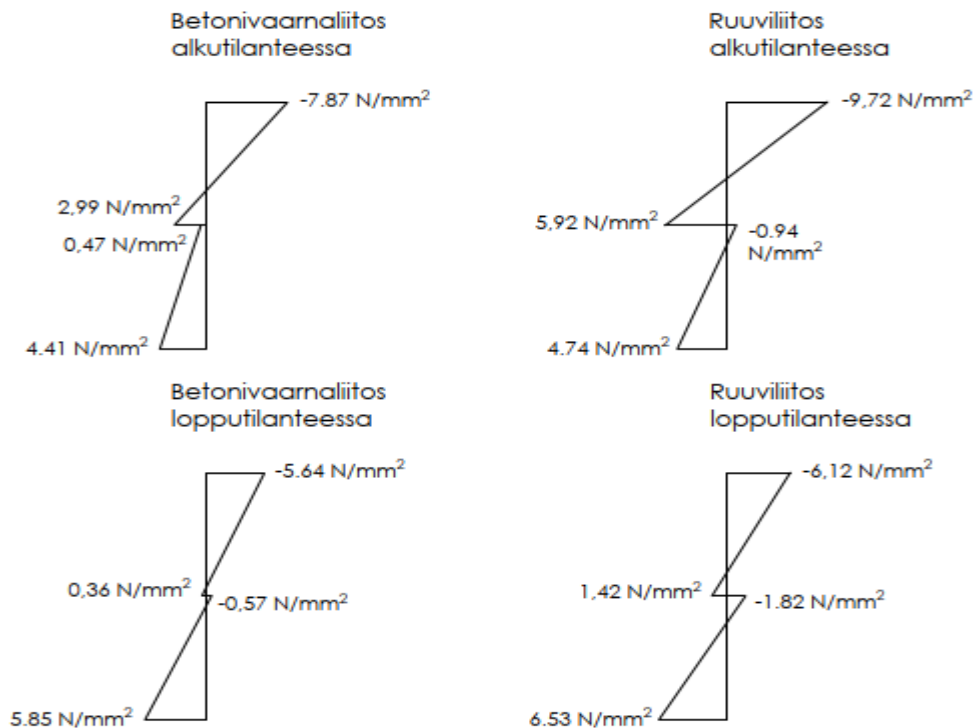
$$\sigma_{c,tens,clt,fin} = \frac{1 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 39,45 \text{ mm} * 72,1 * 10^6 \text{ Nmm}}{8,062 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 2,35 \text{ N/mm}^2$$

CLT-laatan leikkausjännitys:

$$\tau_{2,fin} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (E_i)_{ef}} * V$$

$$\tau_{2,fin} = \frac{0 + 0,5 * 6666,67 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm} * (109,45 \text{ mm})^2}{1000 \text{ mm} * 8,062 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} * 35200 \text{ N} = 0,174 \text{ N/mm}^2$$

Kuvassa 9 on esitetty molempien rakenteiden jännityskuvaajat alku- ja lopputilanteen osalta. Kuvaajista voidaan todeta, että alkutilassa molemmissa koerakenteissa ja lopputilassa ruuviliitosrakenteessa, betonilaatta altistuu liialliselle vetojännitykselle. On kuitenkin huomioitava, ettei laskelmissa ole huomioitu työnaikaista tuentaa, joka todellisuudessa pienentää taivutusrasitusta alkutilassa oleellisesti.



Kuva 9. Kuvassa molempien koerakenteiden jännityskuvaajat alku- ja lopputilassa.

5.3 Liittimissä vaikuttavat voimat

Liittimiin kohdistuvat voimat on laskettu puurakenteiden suunnitteluohjeen [RIL 205-1-2017, s.148.] mukaisesti kaavalla 5.6:

Ruuviliittimeen vaikuttava voima MRT alkutila.

$$F_{vd} = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s_1}{E I_{ef}} * V \quad 5.6$$

$$F_{vd} = \frac{0,183 * 33000 N/mm^2 * 1,4 * 10^5 mm^2 * 93 mm * 200 mm}{2,13 * 10^{13} Nmm^2} * 35200 N = 25,99 kN$$

Ruuviliittimeen vaikuttava voima MRT lopputila.

$$\begin{aligned} F_{vd,fin} &= \frac{0,434 * 6027,4 N/mm^2 * 1,4 * 10^5 mm^2 * 100,55 mm * 200 mm}{8,06 * 10^{12} Nmm^2} * 35200 N \\ &= 32,16 kN \end{aligned}$$

Betonivaarnaliitokselle annetaan puu-betoniliittorakenteiden suunnitteluohjeessa [CEN/TC 250/SC 5] kaava, liittimessä vaikuttavalle voimalle $F_{v,Ed}$. Johtuen kuitenkin tässä opinnäytetyössä alun perin tehdyistä rajauksista, jotka poissulkevat joustamattomien rasiusten tarkastelun, tätä ei saada lasketuksi kyseisellä kaavalla. Lasketaan liittimessä vaikuttava voima puurakenteiden suunnitteluohjeen mukaisesti [RIL 205-1-2017, s.148.]

Liittimeen vaikuttava voima MRT alkutila.

$$\begin{aligned} F_{v,Ed} &= \frac{0,59 * 33000 N/mm^2 * 1,4 * 10^5 mm^2 * 53,4 mm * 1025 mm}{3,07 * 10^{13} Nmm^2} * 35200 N \\ &= 171,07 kN \end{aligned}$$

Liittimeen vaikuttava voima MRT lopputila.

$$F_{v,Ed,fin} = \frac{0,75 * 6226,4 \text{ N/mm}^2 * 1,4 * 10^5 \text{ mm}^2 * 82,33 \text{ mm} * 1025 \text{ mm}}{1,049 * 10^{13} \text{ Nmm}^2} * 35200 \text{ N}$$

$$= 185,13 \text{ kN}$$

6 Mitoitus KRT

6.1 Taipumamitoitus

Taipumamitoitus lasketaan ohjeen [RIL 205-1-2017] kohdan 2.2.3 mukaisesti.

6.1.1 Hetkellinen taipuma vaarnaliitosrakenne

Koerakenteiden hetkelliset taipumat saadaan laskettua kaavalla 6.1:

$$w_{inst} = \frac{5}{384} * \frac{ql^4}{(EI)_{ef}} \quad 6.1$$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} * \frac{(4,2 \text{ kN/m} + 2,5 \text{ kN/m}) * (8,2 \text{ m})^4}{30,68 \text{ MN} * \text{m}^2} = 12,85 \text{ mm}$$

6.1.2 Hetkellinen taipuma ruuviliitosrakenne

$$w_{inst} = \frac{5}{384} * \frac{ql^4}{(EI)_{ef}}$$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} * \frac{(4,2 \text{ kN/m} + 2,5 \text{ kN/m}) * (8,2 \text{ m})^4}{23,78 \text{ MNm}^2} = 16,59 \text{ mm}$$

6.1.3 Lopullinen taipuma vaarnaliitosrakenne

Lyhytaikaisen kuorman osuus koerakenteiden kuormituksilla lasketaan kaavalla 6.2:

$$q_{inst} = (1 - \psi_2)Q_k \quad 6.2$$

missä:

- ψ_2 = muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuutta kuvaava kerroin [RIL-205-1-2017, taulukko 2.2.]

$$q_{inst} = (1 - 0,3) * 2,5 \frac{kN}{m} = 1,75 \frac{kN}{m}$$

Pitkäaikaisen kuorman osuus lasketaan kaavalla 6.3:

$$q_{fin} = G_k + \psi_2 Q_k \quad 6.3$$

$$q_{fin} = \frac{4,2kN}{m} + 0,3 * \frac{2,5kN}{m} = 4,95 \frac{kN}{m}$$

Lopullinen taipuma vaarnaliitosrakenteelle kaavalla 6.4:

$$w_{fin} = \frac{5}{384} * \left(\frac{q_{inst}}{(EI)_{ef}} + \frac{q_{fin}}{(EI)_{ef,fin}} \right) * l^4 \quad 6.4$$

$$w_{fin} = \frac{5}{384} * \left(\frac{1,75 \frac{kN}{m}}{30,68 MNm^2} + \frac{4,95 \frac{kN}{m}}{10,49 MNm^2} \right) * (8,2m)^4 = 31,1 mm$$

6.1.4 Lopullinen taipuma ruuviliitosrakenteelle

$$w_{fin} = \frac{5}{384} * \left(\frac{q_{inst}}{(EI)_{ef}} + \frac{q_{fin}}{(EI)_{ef,fin}} \right) * l^4$$

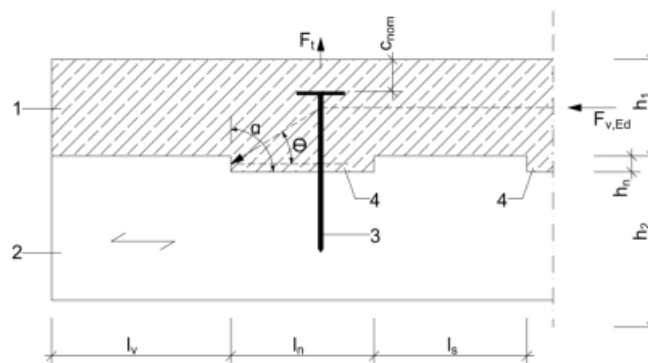
$$w_{fin} = \frac{5}{384} * \left(\frac{1.75 \frac{kN}{m}}{23.78 MNm^2} + \frac{4.95 \frac{kN}{m}}{8.87 MNm^2} \right) * (8,2m)^4 = 37,2 mm$$

7 Ruuvausohje vaarnaliitosrakenteelle

Betonivaarnaliitoksin toteutetussa puu-betoniliittorakenteessa tulee ohjeen [CEN/TC 250/SC 5, s.43] mukaisesti huomioida leikkausjännityksestä aiheutuva voiman pystysuuntainen komponentti, joka otetaan vastaan vetoruuveilla.

Vetoruuveina Metropolian koerakenteessa on SFS Intec VB-7,5x100 liittoruuvit. Kuvassa 10 CEN-ohjeen kaava pystysuuntaisen voiman laskemiseen.

Figure 10.1 - Notched connection failure modes



Key

- 1 timber
- 2 concrete
- 3 fastener loaded axially
- 4 notch

Figure 10.2 - Notched connection dimensions

(3) Notched connections should be designed for a minimum vertical component F_t in Figure 10.2, given by Formula 10.19.

$$F_{t,Ed} = \max(F_{v,Ed} \tan \theta ; 0,1 F_{v,Ed}) \quad (10.19)$$

where

$F_{t,Ed}$ is the design tensile force between the timber and the concrete cross-section;

Kuva 10. Kuvassa CEN-ohjeen kaava pystysuuntaisen voiman laskemiseksi.

Määritetään tarvittava ruuvimäärä vaarnaliitosrakenteelle. Lasketaan ylöspäin nostava vetovoima lovessa, kuvassa 10 esitetyn CEN-ohjeen mukaisesti, kaavalla 7.1:

$$F_{t,Ed} = \max(F_{v,Ed} \tan \theta ; 0,1F_{v,Ed}) \quad 7.1$$

Lasketaan kaavan mukaisesti suurempi voimista:

$$0,1F_{v,Ed} = 0,1 * 185,13 \text{ kN} = 18,51 \text{ kN}$$

Kulma θ määritettiin opinnäytetyön kohdassa 4.4.1:

$$\theta = 10,08$$

$$F_{v,Ed} \tan \theta = 185,13 \text{ kN} * \tan(10,08^\circ) = 32,89 \text{ kN}$$

Määrävä pystysuuntainen voima vaarnassa = 32,89 kN

Liittoruuvien SFS Intec VB-7,5x100 ulosvetokestävyyden ominaisarvo määritettiin opinnäytetyön kohdassa 4.4.2, ja ominaisarvoksi saatiin 10824 N. Liitoksen mitoituskestävyys murtorajatilassa [RIL 205-1-2017] kohdan 8.1.1 mukaisesti.

$$0,80 * \frac{10824 \text{ N}}{1,3} = 6661 \text{ N}$$

Määritetään liitintarve loven vetojännitykselle:

$$\frac{32,89 \text{ kN}}{6,6 \text{ kN}} = 4,98 \approx 5 \text{ ruuvia}$$

Liittimien ulosvetokestävyyteen vaikuttaa oleellisesti liitinvalmistajan teknisessä hyväksynnässä [ETA 13/0699, s.15] esitetyn kaavan mukaisesti, puumateriaalin tiheys. Stora Enson ohjeessa todetaan CLT-laatan tiheydeksi $4,7 \text{ kN/m}^3$ ja sitä on näissä laskelmissa käytetty.

Lovien kohdalle ruuvattavien ruuvien lisäksi betonivaarnaliitosrakenne vaatii ruuveja lovien välille estämään laattojen irtoamisen toisistaan. Tämä määritetään puubetoniliittorakenteiden suunnitteluohjeessa. [CEN/TC 250/SC 5, s.44.] Vaikka betonivaarnaliitos vaatii ruuveja lovien kohdalle vetojännitystä vastaanottamaan, sekä ruuveja estämään laattojen irtoamisen niin ruuvimäärät ovat kuitenkin verrattain melko pieniä suhteessa ruuviliitosrakenteen vaatimaan ruuvimäärään.

8 Johtopäätökset

Käytössä olleiden puu-betoniliittorakenteen suunnitteluohjeen luonnoksen [CEN/TC 250/SC 5] sekä puurakenteiden suunnitteluohjeen [RIL 205-1-2017] mukaisesti suoritettujen vertailulaskelmien perusteella, voidaan todeta betonivaarnaliitoksen olevan erittäin kilpailukykyinen ja varteenotettava vaihtoehto, vertailussa ruuviliitoksin toteutettuun rakenteeseen.

Betonivaarnaliitoksin toteutetulla rakenteella saavutetaan suuremmat taivutusjäykkyydet sekä sitä kautta myös pienemmät taipumat välipohjarakenteessa, vertailussa ruuviliitoksin toteutettuun välipohjarakenteeseen. Suuremman taivutusjäykkyyden avulla, voidaan hallita myös ongelmallista värähtelyä paremmin.

Alkutilan käyttörajatilatarkasteluissa, betonivaarnaliitoksella saavutettiin 29 % suurempi taivutusjäykkyys ja 23 % pienempi taipuma, hetkellisen taipuman tarkasteluissa. Lopputaipuman osalta betonivaarnaliitoksella saavutettiin laskelmissa 16 % pienempi taipuma.

Murtorajatilavertailussa betonivaarnaliitoksen hyöty, suhteessa ruuviliitokseen kasvaa entisestään. Tämän osoitettiin opinnäytetyön kohdassa 4.6.1 johtuvan siitä, että liitoksen siirtymäkerroin K_u voidaan olettaa betonivaarnaliitoksella olevan yhtä suuri murto- ja käyttörajatilatarkasteluissa. Tämä johtaa muun muassa siihen, että alkutilassa murto- ja käyttörajatilatarkasteluissa saadaan yhtä suuri taivutusjäykkyys betonivaarnaliitosrakenteelle, kun taas ruuviliitosrakenteella tämä pienenee 10,4 %. Näin ollen alkutilan murto-rajatilatarkasteluissa, betonivaarnaliitoksella saavutettiin jopa 44 % suurempi taivutusjäykkyys vertailussa ruuviliitoksin toteutettuun rakenteeseen. Lopputilan

murtorajatilavertailussa betonivaarnaliitoksen taivutusjäykkyys oli 30 % suurempi verrattuna ruuviliitosrakenteeseen.

Vertailulaskelmissa kävi myös ilmi, että näillä koerakenteiden mitoilla, jossa betonilaatta, ja CLT-laatta ovat yhtä paksuja, ei saavuteta kaikilta osin liittorakenteen optimaalisimpia hyötyjä. Näillä koerakenteiden mitoilla ja kuormituksilla, betonilaatta altistuu etenkin alkutilassa aivan liian suurelle vetorasitukselle. Vaikka laskelmissa ei ole huomioitu työaikaista tuentaa, joka pienentää merkittävästi alkutilan taivutusrasitusta, ja sitä myöten myös betonin vetojännitystä, niin ruuviliitosrakenteella betonin vetojännitykset ylittyvät myös lopputilassa. Tämä voi johtaa betonilaatan halkeiluun vetopuolelta, etenkin tilanteessa, jossa vetopuolen rasitusta ei ole huomioitu erikseen vetoraudoituksella. Tähän on kiinnitettävä tämänkaltaisia rakenteita suunniteltaessa erityistä huomiota, tyypillisten ongelmakohtien kuten värähtelyn ja taipumien lisäksi.

Olisi mielenkiintoinen aihe selvittää optimaalinen betonilaatan ja CLT-laatan paksuuksien suhde, jossa olisi myös huomioitu mahdollisimman hyvä kustannustehokkuus. Tässä opinnäytetyössä tehtiin myös laskennallinen Mathcad tarkastelu betonivaarnaliitoksen toteutetulle rakenteelle, jossa välipohjan paksuus olisi sama 280 mm, mutta jossa CLT-laatan paksuus olisi 200 mm ja betonilaatan 80 mm. Tämän lisäksi CLT-laattaan jyrskityt lovet olisivat 30 mm syvät. Tällaisella rakenteella välttäisiin betonin liialliselta vetorasitukselta alku- sekä lopputilassa. Lisäksi 30 mm syvillä lovilla saavutetaan suurempi taivutusjäykkyys rakenteelle. Tällaisella rakenteella myös omapaino pieneneisi selvästi. Lopputulemana tälle tarkastukselle saatiin, että kaikki tässä opinnäytetyössä lasketut jännitykset sekä taipumat pysyisivät sallituissa rajoissa, niin alku kuin lopputilanteessakin.

Lopun johtopäätöksenä opinnäytetyöstä voidaan todeta, että betonivaarnaliitoksella toteutetulla välipohjarakenteella on parempien suoritusarvojen lisäksi, mahdollisuus myös varsin oleellisesti helpottaa työmaavaihetta sekä mahdollisesti saavuttaa kustannussäästöjä vertailussa ruuviliitoksen toteutettuun rakenteeseen.

9 Vertailutaulukko

Molempien koerakenteiden laskennalliset taivutusjäykkyudet, taipumat, jännitykset ja käyttöasteet on esitetty alla taulukossa 5.

Taulukko 5. Vertailutaulukossa koerakenteiden laskennalliset tulokset.

Ominaisuudet	Vaarnaliitosrakenne	Ruuviliitosrakenne
Taivutusjäykkyys KRT alkutila	30,68 MN * m ²	23,78 MN * m ²
Taivutusjäykkyys KRT lopputila	10,49 MN * m ²	8,87 MN * m ²
Taivutusjäykkyys MRT alkutila	30,68 MN * m ²	21,3 MN * m ²
Taivutusjäykkyys MRT lopputila	10,49 MN * m ²	8,06 MN * m ²
Hetkellinen taipuma	12,85 mm l/400 (63 %)	16,57 mm l/400 (81 %)
Lopullinen taipuma	31,14 mm l/300 (114 %)	37,18 mm l/300 (136 %)
Betonin puristuskestävyys, alkutila	$\sigma_{c.comp,yp}/f_{cd} = 46 \%$	$\sigma_{c.comp,yp}/f_{cd} = 57 \%$
Betonin puristuskestävyys, lopputila	$\sigma_{c.comp,yp,fin}/f_{cd} = 33 \%$	$\sigma_{c.comp,yp,fin}/f_{cd} = 36 \%$
Betonin vetokestävyys, alkutila	$\sigma_{c.tens.}/f_{ctd} = 225 \%$ (ei huomioitu työnaikaista tuentaa)	$\sigma_{c.tens.}/f_{ctd} = 445 \%$ (ei huomioitu työnaikaista tuentaa)
Betonin vetokestävyys, lopputila	$\sigma_{c.tens.fin}/f_{ctd} = 27 \%$	$\sigma_{c.tens.fin}/f_{ctd} = 107 \%$
CLT laatan taivutuskestävyys, alkutila	$\frac{\sigma_{clt,bend}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{c,tens}}{f_{t,0,d}} = 39 \%$	$\frac{\sigma_{clt,bend}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{c,tens}}{f_{t,0,d}} = 39 \%$
CLT laatan taivutuskestävyys, lopputila	$\frac{\sigma_{clt,bend,fin}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{c,tens,fin}}{f_{t,0,d}} = 49 \%$	$\frac{\sigma_{clt,bend,fin}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{c,tens,fin}}{f_{t,0,d}} = 52 \%$
CLT laatan leikkauskestävyys, alkutila	$\frac{\tau_2}{f_{vd}} = 6,5 \%$	$\frac{\tau_2}{f_{vd}} = 5,2 \%$
CLT laatan leikkauskestävyys, lopputila	$\frac{\tau_{2,fin}}{f_{vd}} = 7 \%$	$\frac{\tau_{2,fin}}{f_{vd}} = 6,7 \%$

10 Yhteenveto

Nykypäivänä puurakentamisen trendi on alati kasvava. Syynä tähän ovat erityisesti ympäristötekijät, etenkin päästövähennysten tavoittelu. Puu toimii erinomaisena hiilinieluna ja on rakennusmateriaalina monipuolinen ja oikein rakennettuna myös käyttäjäystävällinen. Kuitenkin muiden rakennusmateriaalien tapaan, myös puulla on heikot ominaisuuksensa ja etsittäessä nykypäivänä parhaita ja kustannustehokkaimpia ratkaisuja, saadaan usein erinomainen lopputulos aikaiseksi liittorakenteilla.

Liittämällä puu- ja betoni toimimaan liittorakenteena, voidaan hyödyntää molempien materiaalien hyviä ominaisuuksia, ja saada aikaan ominaisuuksiltaan toimiva ja kustannustehokas ratkaisu.

Tässä opinnäytetyössä vertailtiin käsin laskemalla teknisiä ominaisuuksia kahdelle CLT-betoniliittorakenteiselle välipohjalaatalle, joiden leikkausliitokset toteutettiin eri tavoin. Toisessa leikkausliitos toteutettiin ruuviliitoksin, ja toisessa betonivaarujen avulla. Käsin suoritettujen laskennat perustuivat Metropoliaassa valmistettuihin koerakenteisiin välipohjalaattoihin.

Ruuviliitoksin toteutettu leikkausliitos on tunnettu ja usein käytetty ratkaisu puu-betoniliittorakenteissa. Ruuviliitoksella saadaan leikkausliittimelle sitkeyttä, jonka lisäksi puun ja betonin välissä voidaan vaivattomasti käyttää ääntä eristävää kerrosta. Ruuviliitoksin toteutettuun CLT-betoniliittorakenteeseen joudutaan kuitenkin ruuvaamaan erittäin suuri määrä ruuveja, jotta liitokselle saadaan tarvittavaa jäykkyyttä liittovaikutuksen toteutukseen. Tämä lisää työn määrää työmaalla sekä kustannuksia, etenkin kohteissa, joissa välipohjilla on paljon pinta-alaa.

Betonivaarunoilla toteutetulla leikkausliitoksella saadaan aikaan melko jäykkä liitos, jonka eduksi voidaan laskea myös yksinkertainen ja kustannustehokas toteutustapa. CLT-laataan leikataan tehtaalla valmiiksi mittatarkat lovet, jotka betonilaatan valun yhteydessä täyttyvät betonilla ja toimivat sen jälkeen kuivuttuaan rakenteen leikkausliittiminä. Betonivaarunaliitos vaatii myös ruuveja ruuvattavaksi lovien kohdalle, mutta määrä jää melko pieneksi, verrattuna ruuviliitoksin toteutetun rakenteen ruuvimääriin.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin rakenteiden murto- ja käyttörajatilan ominaisuuksia tietyin rajauksin. Laskentojen perusteella saatiin suoritusarvoja vertailtaessa selville, että betonivaarnaliitoksella saadaan käyttörajatilatarkasteluissa aikaan parempi taivutusjäykkyys sekä pienemmät taipumat. Murtorajatilassa suoritettujen laskennat osoittivat, että jännitys-tarkasteluiden osalta, saavutettiin betonivaarnaliitoksella parempia suoritusarvoja suhteessa ruuviliitosrakenteeseen. Lisäksi murtorajatilan taivutusjäykkyyksien vertailussa, betonivaarnaliitoksella osoitettiin saavutettavan jopa merkittävästi suurempi taivutusjäykkyys.

Betonivaarnaliitoksen voidaankin todeta tämän opinnäytetyön tarkasteluihin pohjautuen, olevan parempi vaihtoehto leikkausliitoksen toteutukseen CLT-betoniliittorakenteisissa välipohjissa. Tämä arvio perustuu parempiin laskennallisiin tuloksiin murto- ja käyttörajatilojen osalta sekä myös yksinkertaisempaan toteutustapaan. Vaikka tässä opinnäytetyössä ei kustannuksia tutkittukaan, lienee selvää, että betonivaarnaliitos on myös kustannustehokas ratkaisu vertailussa ruuviliitoksiin toteutettuun rakenteeseen.

Jotta saavutetaan mahdollisimman tehokkaasti puun ja betonin hyviä ominaisuuksia hyödyntävä liittorakenne, jossa materiaalien heikot ominaisuudet eivät joudu liialliselle rasitukselle, olisi aiheellista miettiä minkälaisilla materiaalien paksuuksilla ja ratkaisuilla saavutettaisiin mahdollisimman toimiva rakenne. Tämä olisi allekirjoittaneen mielestä loistava jatkotutkimuksen aihe.

Opinnäytetyö on ollut kaiken kaikkiaan haastava ja aikaa vievä kokonaisuus. Alkuun pääseminen asiassa tuntui hieman hankalalta, ja ohjeiden yhteensovitus sekä tulkitseminen aiheutti välillä pientä turhautumista. Lisäksi pitkissä käsin suoritetuissa laskennoissa virheen mahdollisuus kasvaa helposti, joten laskentojen huolellinen tarkastaminen on ollut tärkeää, jotta saadaan aikaan vertailukelpoisia tuloksia. Opinnäytetyö on ollut kuitenkin myös erittäin opettavainen kokemus, ja aiheeseen perehtyminen on lisännyt allekirjoittaneen tietoa asiasta merkittävästi. Tämä osaltaan innostaa hankkimaan ja oppimaan aiheesta lisää myös tulevaisuudessa.

Laskennat suoritettiin alkuperäisen suunnitelman mukaisesti, tietyin rajauksin, joitain yksinkertaistuksia tehden eikä tarkoituksena ollut pureutua mikroskooppisen tarkalle

tasolle. Laskennan edetessä huomattiin, että aihe alkaa helposti kasvamaan, joten alun rajausten kanssa täytyi olla tarkkana.

Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin mielestäni melko hyvin, ja laskentojen avulla saatiin vertailukelpoista tietoa näiden liitostapojen välillä. Tämä toivottavasti edesauttaa osaltaan jatkotutkimusten tekemistä aiheen parissa, sekä myös rohkaisee jatkossa betoni-vaarnaliitosten käyttöön CLT-betoniliittorakenteisissa välipohjissa.

Lähteet

- 1 Lukaszewska, E. 2009. Development of Prefabricated Timber Concrete Composite Floors. <http://tu.diva-portal.org/smash/get/diva2:991048/FULLTEXT01> (luettu 21.1.2021)
- 2 Jorge, L; Habenbacher, J; Dujic, B. 2010. TIMBER-CONCRETE COMPOSITE SYSTEMS WITH CROSS LAMINATED TIMBER. http://support.sbcindustry.com/Archive/2010/june/Paper_255.pdf (luettu 3.2.2021)
- 3 Dias, A; Schänzlin, J; Dietsch, P. 2018. Design of Timber-concrete composite floors. https://webarchiv.typo3.tum.de/TUM/costfp1402/fileadmin/w00bt/www/All_Members/Dias_A_Schaenzlin_J_Dietsch_P_Design_of_Timber-Concrete_Composite_Structures.pdf (luettu 27.3.2021)
- 4 Manaridis, A. 2010. Evaluation of timber-concrete composite floors. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.903.7899&rep=rep1&type=pdf> (luettu 3.4.2021)
- 5 Fragiacommo, M. 2014. Long-Term Behaviour of Wood-Concrete Composite Beams with Notched Connection Detail <https://core.ac.uk/download/pdf/35457304.pdf> (luettu 8.4.2021)
- 6 RIL 205-1-2017. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnitteluohje. (luettu 13.4.2021)
- 7 CEN/TC 250/SC 5. Eurocode 5. Design of Timber Structures – Structural design of timber-concrete composite structures. (luettu 7.4.2021)
- 8 European Technical Assessment. ETA-13/0699. 2018. SFS VB screws as fasteners in wood-concrete composite slab kits. https://www.dibt.de/pdf_storage/2018/ETA-13%210699%288.03.03-19%2118%29e.pdf. (luettu 11.3.2021)
- 9 European Technical Assessment. ETA-14/0349. 2020. CLT Cross Laminated Timber. https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/certificates/wood-products-approvals-and-certificates/eta/clt_eta-14-0349_en.pdf (luettu 22.1.2021)
- 10 Stora Enso CLT. 2016. Puu maailman vanhin rakennusmateriaali. https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/CLT-Imagebrochure_final-2016-04-25_FI-WEB.pdf (luettu 5.2.2021)
- 11 SFS EN 1992-1-1. 2004. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja säännöt rakennuksille.

- 12 SFS EN 1990 +A1 +AC. 2002. Eurokoodi 0. Rakenteiden suunnitteluperusteet.
- 13 SFS EN 1991-1 -1. 2002. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.

