DELTABEAM® COMPOSITE BEAM

CLT-Betoniliittolaatta – käyttö- ja murtorajatilatestaus

Savonlinna Puurakentamisen laboratorio 4/2026

PuuHyVä project

Peikko Finland Oy

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Tämä testausselostus käsittelee PuuHyVä-hankkeessa toteutettua täysimittaista puu–betoni–teräs-hybridirakenteista välipohjakoetta. Tässä selostuksessa kuvataan testin rakentaminen, mittausten valmistelu, mittausten toteutus ja päähavainnot murtotestauksessa. Testiä koskevat analyysit julkaistaan muissa raporteissa samoin kuin testiä koskeva mittausdata tulee vapaasti käytettäväksi.

Hankkeen tavoitteena oli kehittää ja optimoida puu- ja hybridirakenteisia välipohjaratkaisuja sekä tuottaa tutkimustietoa rakenteiden suunnittelun, mallinnuksen ja tuotekehityksen tueksi. Testattava rakenne oli noin 50 m²:n kokoinen liittolaattalattia, jossa yhdistyivät CLT-elementit, teräspalkit, DELTABEAM®-palkki, juotosvalu ja CLT-elementtien päälle toteutettu betoninen liittovalu.

Raportissa kuvataan välipohjarakenteen rakentamisen vaiheet sekä niihin liittyvät mittaukset. Rakentaminen alkoi teräsosien, pilarien ja palkkien asentamisella. DELTABEAM®-palkkiin kiinnitettiin venymäliuskat, joilla seurattiin paikallisia venymiä kriittisissä kohdissa. CLT-elementit sijoitettiin teräspalkkien ja DELTABEAM®-palkin varaan, minkä jälkeen elementit liitettiin toisiinsa vinoruuveilla. DELTABEAM®-palkin ja CLT-elementtien välinen yhteistoiminta muodostettiin juotosvalulla, johon asennettiin myös harjateräksiä. Lopullinen liittorakenne toteutettiin asentamalla CLT-elementtien pintaan tartuntaruuvit, raudoitusverkot ja betoninen liittovalu.

Rakenteen käyttäytymistä seurattiin eri rakennusvaiheissa taipuma- ja ominaistaajuusmittauksilla. Mittauksilla saatiin tietoa siitä, miten välipohjan jäykkyys ja dynaamiset ominaisuudet muuttuivat, kun rakenne täydentyi vaiheittain. Lisäksi valmiille rakenteelle tehtiin laserkeilaus, jonka avulla voitiin tuottaa tarkka kolmiulotteinen pistepilvimalli. Koekuormituksen aikana rakenteesta mitattiin pysty- ja vaakasiirtymiä siirtymäantureiden avulla. Mittausjärjestelyjen avulla saatiin kattavaa tietoa rakenteen toiminnasta sekä yksittäisten liitosten ja koko välipohjan käyttäytymisestä.

Täysimittaisessa kuormituskokeessa välipohjarakennetta kuormitettiin Load Framella lineaarisesti kasvavalla kuormalla, rakenteen murtumiseen saakka. Kuormituksessa tarkasteltiin rakenteen kantokykyä, jäykkyyttä, halkeilua, muodonmuutoksia ja lopullista murtumismekanismia. Rakenne kesti 950 kN kokonaiskuorman ja saavutti 19 kN/m² kuormitustason, mikä vastasi kymmenkertaista mitoituskuormaa. Koetulokset osoittivat, että puun, betonin ja teräksen yhteistoiminnalla voidaan saavuttaa erittäin suuri kantokyky suhteessa rakenteen kokoon ja käyttötarkoitukseen. Lisäksi rakenteen suuri muodonmuutoskyky ennen lopullista murtoa on merkittävä havainto.

Kokeen aikana havaittiin hallittua halkeilua, kasvavia taipumia ja sitkeää käyttäytymistä ennen lopullista murtumista. Tulokset vahvistavat hybridirakenteisten välipohjien mahdollisuuksia tulevaisuuden puurakentamisessa, erityisesti silloin, kun tavoitteena ovat pitkät jännevälit, materiaalitehokkuus ja hyvä kantokyky. Tutkimuksen perusteella täysimittaiset kuormituskokeet tarjoavat arvokasta tietoa laskentamallien kehittämiseen, suunnittelumenetelmien varmentamiseen ja uusien välipohjatuotteiden optimointiin.

Asiasanat: hybridirakenne, CLT, DELTABEAM®-palkki, liittolaatta ja murtorajatilakuormitus

1 KOOSTE

PuuHyVä-hankkeessa toteutettu täysimittainen puu–betoni–teräs-hybridirakenteisen välipohjan koe tuotti laaja-alaista tietoa liittorakenteisen lattiaratkaisun rakentamisesta, mittaamisesta ja kuormituskäyttäytymisestä. Hankkeen tavoitteena oli kehittää ja optimoida puu- ja hybridirakenteisia välipohjia sekä tuottaa tutkimusaineistoa, jota voidaan hyödyntää suunnittelumenetelmien, laskentamallien ja uusien rakennustuotteiden kehittämisessä. Testattava rakenne oli noin 50 m²:n kokoinen liittolaattalattia, jossa yhdistyivät CLT-elementit, teräspalkit, DELTABEAM®-palkki, juotosvalu sekä CLT-elementtien päälle tehty betoninen liittovalu. Täysimittainen toteutus mahdollisti rakenteen toiminnan tarkastelun olosuhteissa, jotka vastaavat pienoiskokeita paremmin todellista rakennetta ja sen kuormitustilannetta.

Rakentaminen eteni vaiheittain. Ensin asennettiin Peikko Finland Oy:n toimittamat teräsosat, kuten pilarit, päätypalkit ja rakenteen keskelle sijoitettu DELTABEAM®-palkki, jonka profiili on D20-200. Palkkeihin ja harjateräksiin asennettiin venymäliuskoja, joiden avulla voitiin seurata paikallisia venymiä kriittisissä mittauskohdissa. Anturit nollattiin ennen kuormituksia, jotta mittausdata kuvaisi mahdollisimman luotettavasti rakenteen myöhempiä muutoksia. Teräsrungon päälle asennettiin neljä Oy Crosslam Kuhmo Ltd:n toimittamaa CLT-elementtiä. Elementit olivat C24-lujuusluokan puumateriaalia, kokonaispaksuudeltaan 140 mm ja poikkileikkaukseltaan 40–20–20–20–40. Elementit sijoitettiin teräspalkkien ja DELTABEAM®-palkin varaan, minkä jälkeen rakenteelle tehtiin ensimmäisiä taipuma- ja ominaistaajuusmittauksia.

CLT-elementtien välinen yhteistoiminta toteutettiin vinoruuvauksella. Elementteihin porattiin esireiät, minkä jälkeen ne liitettiin toisiinsa 45 asteen kulmassa asennetuilla täyskierteisillä ruuveilla. Ruuvien nimellishalkaisija oli 10 mm ja kokonaispituus 180 mm, ja ne asennettiin 300 mm:n välein. Tämän jälkeen tehtiin uusi mittausvaihe, jossa tarkasteltiin rakenteen taipumaa ja dynaamisia ominaisuuksia. Rakenteen keskialueella havaittiin suurimmat taipumat, mikä oli tärkeä havainto liitosalueen käyttäytymisen kannalta.

Seuraavaksi muodostettiin CLT-elementtien ja DELTABEAM®-palkin välinen liitos juotosvalulla. Ennen valua CLT-elementtien varauskoloihin asennettiin T8 k300 L1230 -harjateräkset, joista osa oli varustettu venymäliuskoilla. Harjateräkset vietiin DELTABEAM®-palkin läpi ja palkin päädyt muotitettiin valua varten. Juotosvalussa

käytettiin DELTABEAM®-palkkien valuun soveltuvaa betonimassaa, jonka lujuusluokka oli C35/45 ja vesi-sementtisuhde 0,4. Valu tiivistettiin betonitäryttimellä, minkä jälkeen sen annettiin kovettua 14 vuorokautta. Juotosvalun kovettumisen jälkeen tehtiin jälleen taipuma- ja ominaistaajuusmittaukset sekä kevyempi kuormitusvaihe arvioidun maksimikuorman suhteessa.

Rakenteen lopullinen liittovaikutus toteutettiin asentamalla CLT-elementtien pintaan betonin tartuntaa parantavat ruuvit, raudoitusverkot ja betoninen pintavalu. Tartuntaruuvit olivat 12 mm:n nimellishalkaisijalla ja 80 mm:n pituudella varustettuja osakierteisiä ruuveja, joita asennettiin ruuvauskaavion mukaisesti kolmen ruuvin ryhmissä ja 300 mm:n välein. Ruuvit upotettiin 50 mm CLT-elementtiin, jolloin tartuntapituutta betonivaluun jäi 30 mm. Tämän jälkeen asennettiin 10 mm:n raudoitusverkot 150 mm:n jakovälillä ja 600 mm:n limityksellä. Liittolaatan viimeinen vaihe toteutettiin valamalla betoni raudoitetun CLT-elementtirakenteen päälle ja tiivistys suoritettiin betonitäryllä. Betonin lujuusluokka oli C35/45,ja koekappaleiden perusteella betonin puristuslujuus kehittyi tasaisesti ja nousi 18 vuorokauden kohdalla 43 MPa:iin.

Rakenteen käyttäytymistä seurattiin koko rakentamisen ajan useilla mittausmenetelmillä. Taipumamittauksissa käytettiin muun muassa mittakelloja ja 1 kN:n kuormia, joiden avulla vertailtiin rakenteen jäykkyyttä eri rakennusvaiheissa. Ominaistaajuusmittauksia tehtiin sekä kumivasaralla tuotetulla herätteellä että Heel-Drop-menetelmällä, jossa heräte syntyi kantapäille pudottautumalla. Lisäksi valmiiseen rakenteeseen kiinnitettiin kahdeksan Arduino-kiihtyvyysanturia, joiden avulla tallennettiin värähtelydataa ominaistaajuusmittausten ja kävelytestien aikana. Kävelytestejä tehtiin yhteensä 12 kappaletta taajuuksilla 2,0 ja 2,7 Hz. Mittaustulokset muodostavat tärkeän aineiston myöhempää värähtelyanalyysiä ja mallinnusta varten.

Valmiille välipohjarakenteelle tehtiin myös laserkeilaus, jonka tavoitteena oli tuottaa tarkka kolmiulotteinen pistepilvimalli. Laserkeilauksessa käytettiin kohdistuspisteitä, joiden avulla eri mittausasemista saadut keilaukset voitiin yhdistää samaan koordinaatistoon. Ennen murtorajatilakuormitusta rakenteen alapuolelle asennettiin lisäksi LVDT-siirtymäantureita mittaamaan pysty- ja vaakasuuntaisia liikkeitä. Anturit yhdistettiin Load Framen tiedonkeruujärjestelmään, joka mittasi myös hydraulisylinterien voimaa ja siirtymää. Venymäliuskat ja tukivoima-anturit liitettiin erilliseen tiedonkeruujärjestelmään, jolloin kokeesta saatiin monipuolinen mittausaineisto sekä paikallisista että koko rakenteen muutoksista.

Täysimittainen murtorajatilakoe tehtiin Load Framella. Välipohjaa kuormitettiin lineaarisesti kasvavalla kuormalla aina murtumiseen asti. Kuormitus jaettiin teräspalkkiasetelman avulla, jolloin kuorma kohdistui mahdollisimman tasaisena viivakuormana rakenteelle. Testissä seurattiin kantokykyä, taipumia, halkeilua, muodonmuutoksia, kuorman jakautumista ja lopullista murtumismekanismia. Rakenteen käyttäytyminen oli kokeen perusteella sitkeää: kuormituksen kasvaessa syntyi hallittua halkeilua ja muodonmuutoksia, mutta rakenne ei menettänyt kantokykyään äkillisesti ensimmäisten vaurioiden jälkeen. Tämä on turvallisuuden kannalta merkittävä ominaisuus, koska sitkeä rakenne antaa varoituksia ennen lopullista vaurioitumista.

Kokeen keskeinen tulos oli, että noin 50 m²:n kokoinen puu–betoni–teräs-hybridirakenne saavutti noin 950–953 kN:n kokonaiskantokyvyn ja se tarkoittaa tasaisesti lattian pinta-alalle jaettuna 19 kN/m² kuormitustasoa. Tämä vastasi noin kymmenkertaista mitoituskuormaa. Tulos osoittaa, että puun, betonin ja teräksen yhteistoiminnalla voidaan saavuttaa erittäin suuri kantokyky suhteessa rakenteen kokoon ja käyttötarkoitukseen. Puu toimi kevyenä ja vetorasitusta vastaan tehokkaana materiaalina, betoni lisäsi jäykkyyttä ja puristuskapasiteettia, ja teräs paransi kantokykyä erityisesti pitkien jännevälien ja suurten kuormien kannalta.

Raportin perusteella täysimittaiset kokeet ovat erittäin arvokkaita, koska ne paljastavat rakenteen kokonaiskäyttäytymisen, liitosten toiminnan ja kuorman jakautumisen tavalla, jota pienoiskokeilla ei aina voida saavuttaa. PuuHyVä-hankkeen koe osoitti, että hybridirakenteiset välipohjat tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia tulevaisuuden puurakentamisessa. Niiden avulla voidaan tavoitella pidempiä jännevälejä, parempaa materiaalitehokkuutta ja suurta kantokykyä. Samalla kokeen tuottama mittausdata tukee laskentamallien kehittämistä, suunnitteluratkaisujen varmentamista ja uusien välipohjatuotteiden optimointia. Kokonaisuutena koe vahvistaa käsitystä siitä, että puu-, betoni- ja teräsrakenteiden yhdistäminen voi olla teknisesti toimiva ja rakennusteknisesti kilpailukykyinen ratkaisu vaativiin välipohjasovelluksiin.

SISÄLLYS

1 KOOSTE 1

2 JOHDANTO 5

3 TESTIRAKENTEEN VALMISTUS 6

3.1 Teräsrungon asennus 7

3.2 CLT-elementtien asennus 10

3.3 CLT-elementtien vinoruuviliitokset 14

3.4 CLT-elementtien ja deltapalkin juotosvalu 14

3.5 Liittolaatan viimeistely 19

4 MITTAUSTULOKSET 30

4.1 Rakennusvaiheen mittaustulokset 30

4.2 Kuormituskokoeiden tulokset 44

4.2.1 Kantokyky ja kuormituskäyttäytyminen 46

4.2.2 Vauriot ja murtumismekanismi 51

4.2.3 Tulosten yhteenveto 56

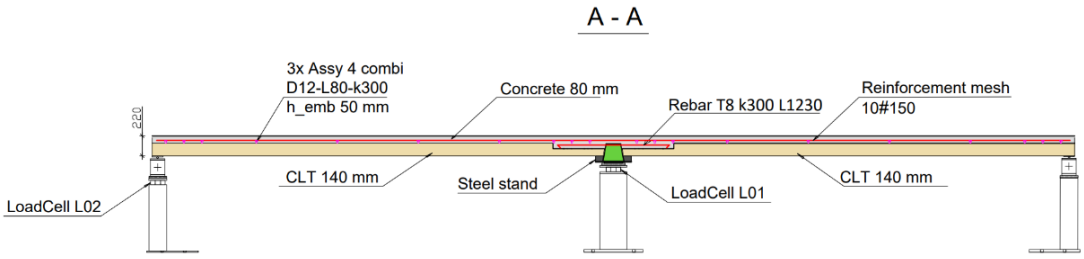
KUVALUETTELO ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

TAULUKKOLUETTELO ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

2 JOHDANTO

PuuHyVä-hankkeen tavoitteena on optimoida ja kehittää puu- ja hybridirakenteisia välipohjia. Hankkeen tavoitteena on tuottaa tutkimustietoa, jonka avulla voidaan suunnitella aiempaa tehokkaampia, turvallisempia ja materiaaleiltaan optimoituja hybridirakenteita. Tuloksia voidaan hyödyntää sekä suunnittelussa, että uusien tuotteiden kehittämisessä. PuuHyVä-hankkeessa toteutettiin hybridirakenteinen välipohjaratkaisu, jossa yhdistettiin tutkimusorganisaatioiden ja yritysten osaamista. Keskeiset yhteistyökumppanit toteutuksessa olivat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Peikko Finland Oy, Tampereen yliopisto sekä Karelia-ammattikorkeakoulu.

Testattava rakenne oli puu–betoni–teräs -hybridirakenne, jossa yhdistyivät CLT-levyt ja teräspalkit. Testin toteutuksena rakennettiin täysikokoinen noin 50 m²:n välipohjarakenne laboratoriossa. Testin tavoitteena oli selvittää välipohjarakenteen todellinen käyttäytyminen erittäin suurilla kuormilla. Tarkoituksena oli kerätä mittausdataa rakenteiden suunnittelun, mallinnuksen ja optimoinnin kehittämiseksi. Lisäksi tavoitteena oli vahvistaa laboratoriotestien ja laskentamallien luotettavuutta.



Kuva 1. Hybridirakenteinen välipohja

Välipohjarakennetta kuormitettiin lineaarisesti kasvavilla kuormilla. Kuormituksen aikana seurattiin taipumia, halkeamien syntymistä ja lopullista murtumiskäyttäytymistä. Kuormitusta kasvatettiin rakenteen murtumaan asti. PuuHyVä-hankkeen täysimittainen kuormituskoe osoitti, että noin 50 m²:n puu–betoni–teräs-hybridirakenne kykenee kestämään erittäin suuria kuormia ennen murtumistaan. Rakenne saavutti 19 kN/m² kuormitustason, mikä vastasi noin kymmenkertaista mitoituskuormaa. Testissä havaittiin hallittua halkeilua, kasvavia muodonmuutoksia ja selkeästi sitkeää käyttäytymistä ennen lopullista murtumista. Tulokset vahvistavat hybridirakenteiden potentiaalia tulevaisuuden puurakentamisessa sekä tarjoavat arvokasta tutkimustietoa välipohjarakenteiden kehittämiseen, optimointiin ja suunnitteluun.

Taulukko 1. Välipohjan rakennusvaiheet

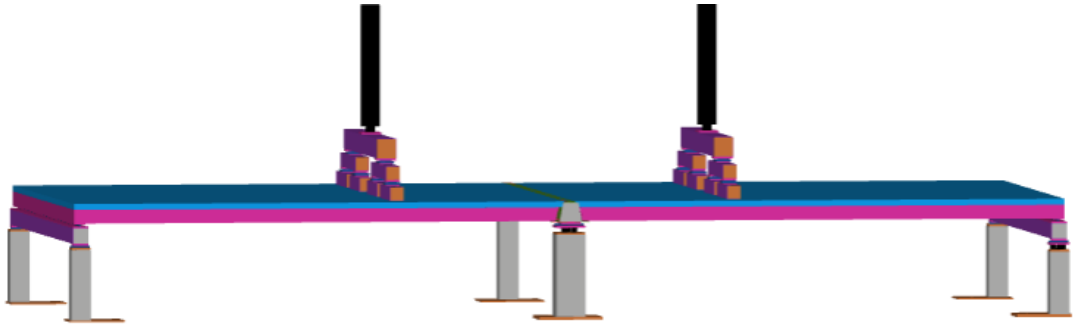
Work phase	Start	End	Duration [days]
PuuHyVä - Peikko Oy Composite slab setup	**23.2.2026**	**27.4.2026**	**73**
Installation of Peikko steel components	23.2.2026	2.3.2026	8
Installation of strain gauges	3.3.2026	3.3.2026	1
CLT installation	4.3.2026	4.3.2026	1
Installation of other footings	5.3.2026	5.3.2026	1
1st measurement day	6.3.2026	6.3.2026	1
2nd measurement day + fastening CLT panels together	9.3.2026	9.3.2026	1
Reinforcement + temporary support during casting	10.3.2026	10.3.2026	1
Delta grout casting	16.3.2026	16.3.2026	1
Grout curing	17.3.2026	30.3.2026	14
3rd measurement day	31.3.2026	31.3.2026	1
Installation of screws	1.4.2026	1.4.2026	1
Composite slab formwork + temporary support during casting	2.4.2026	2.4.2026	1
Composite slab casting	10.4.2026	10.4.2026	1
Composite slab curing	13.4.2026	24.4.2026	12
4th measurement day	23.4.2026	23.4.2026	1
Installation of remaining sensors / laser scanning	23.4.2026	24.4.2026	2
Loading the setup with 1000 kN	27.4.2026	27.4.2026	1

Liittolaatan työvaiheet ajoittuivat ajanjaksolle 23.2.2026-27.4.2026. Liittolaatan rakentamisen kokonaiskesto oli 73 päivää. Liittolaatan rakentamisessa oli 17 työvaihetta ja ensimmäinen työvaihe oli helmikuun lopulla aloitettu 8 päivää kestänyt teräsosien asennus. Maaliskuun alussa tehtiin venymäliuskojen, CLT-elementtien ja anturoiden asennukset. Ensimmäiset mittaukset toteutettiin maaliskuun alkupuolella. Maaliskuun puolivälissä työvaiheina oli raudoitus, valunaikainen tuenta ja juotosvalu.

Juotosvalun kovettumisen jälkeen tehtiin seuraavat mittaukset taipuman ja ominaistaajuuden osalta. Huhtikuun alussa tehtiin ruuvien asennukset, liittovalun muotitus ja valun aikainen tuenta. Liittovaikutukseen tarvittavat ruuvit(noin 1000 kpl) ruuvattiin ja jraudoitus asennettiin. Liittolaattaan tehtiin liittovalu, minkä annettiin kovettua 12 päivää ennen viimeisiä mittauksia. Liittolaattaan asennettiin loput anturit ja tehtiin laserkeilaus ja testin viimeisenä vaiheena tehtiin kuormitus murtoon asti. Testirakenteen valmistus

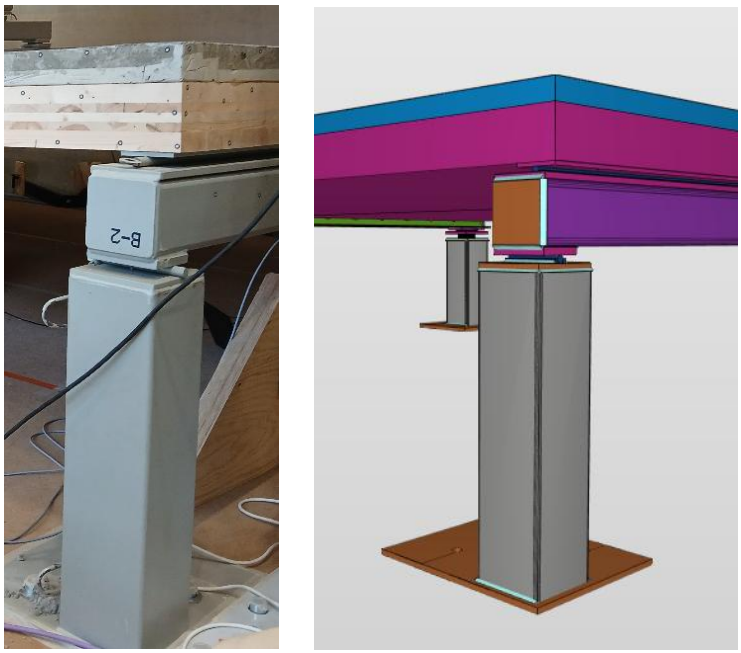
2.1 Teräsrungon asennus

Peikko Finland Oy toimitti liittolaattalattiaan tarkoitetut teräsosat, kuten pilarit ja palkit. Liittolaattalattiaan tuli yhteensä kuusi pilaria. Molempiin päätyihin tuli kahdet pilarit, joiden poikkileikkaus oli 200x200x5. Keskelle tuli kaksi pilaria: voima-anturin alapuolella oleva pilari oli poikkileikkaukseltaan 300x300x10 ja ilman anturia oleva pilari oli poikkileikkaukseltaan 200x200x5. Asetelman molempiin päätyihin asennettiin putkipalkit, joiden poikkileikkaus oli 160x160x8.



Kuva 2. Liittolaattalattia

Liittolaattalattian kokoaminen alkoi teräsosien asennuksella. Teräspilarit kiinnitettiin Load Framen T-uralattiaan ja pilarien päälle laakeroitiin päätypalkit.



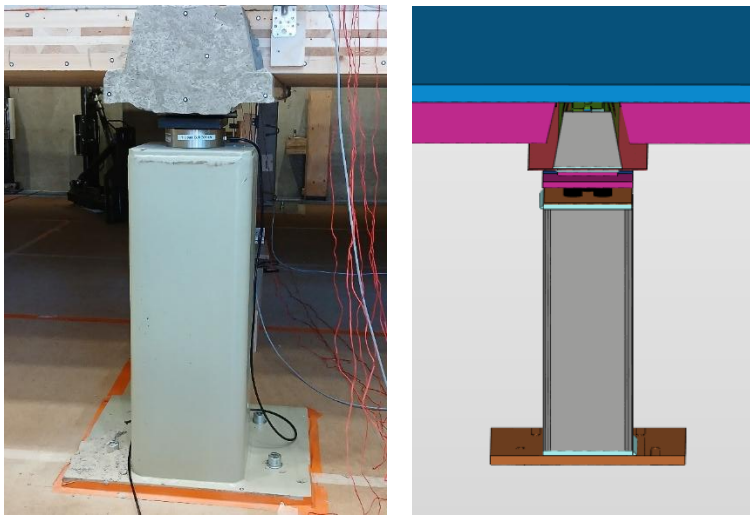
Kuva 3. Teräksinen päätypilari ja -palkki

Liittolaattalattian keskelle asennettiin pilarien päälle DELTABEAM®-palkki, jonka profiili oli D20-200.



Kuva 4. Deltabeam® D20-200

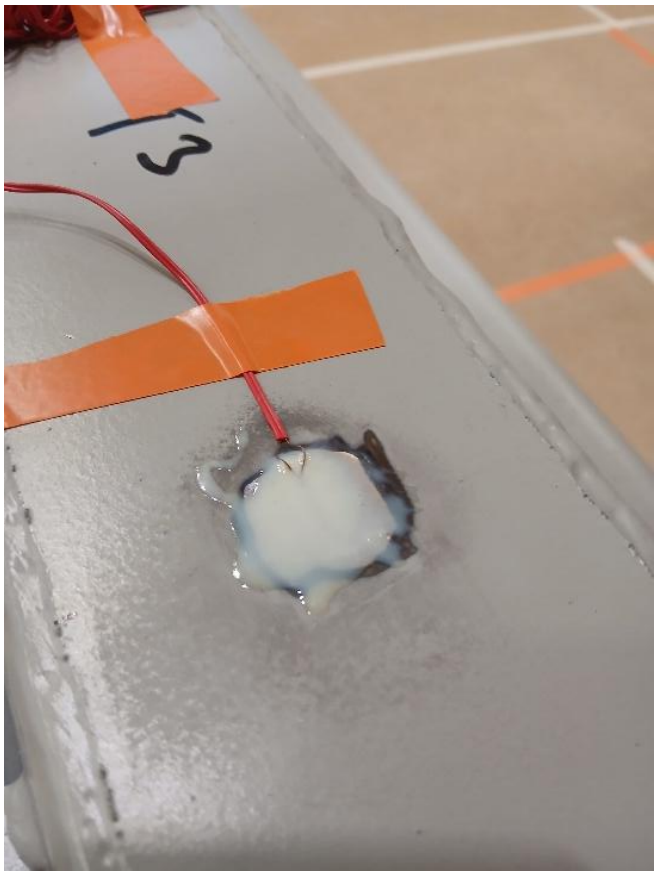
Rakenteeseen asennettiin kaksi kuormitusanturia, DELTABEAM®-palkin ja päätypalkin hallin puoleiseen päähän. Anturit nollattiin ennen palkkien asennusta, ja seuraavan kerran anturit nollattiin ennen murtorajatilakuormituksen toteutusta.



Kuva 5. Voima-anturi DELTABEAM®-palkin ja pilarin välissä

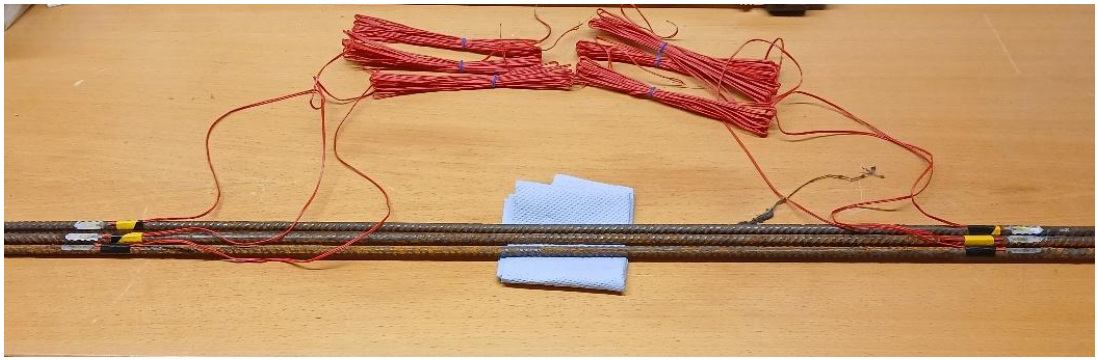
Venymäliuskat asennettiin DELTABEAM®-palkkiin ja venymäliuskat nollattiin ennen palkin asennusta pilarien päälle, jotta palkkiin ei kohdistunut yhtään jännitystä ennen anturien nollausta. Venymäliuskat asennettiin rakenteen kriittisiin mittauskohtiin ennen kuormituskokeiden aloittamista. Venymäliuskat mittaavat paikallista venymää. Venymäliuskoja asennettiin DELTABEAM®-palkin ylä- ja alapinnoille sekä harjateräksiin palkin ja liitoskohdan venymien seuraamiseksi. Mittauskohteiden pinnat puh-

distettiin ja valmisteltiin huolellisesti, minkä jälkeen venymäliuskat liimattiin valmistajan ohjeiden mukaisesti. Asennuksen jälkeen liuskat kytkettiin tiedonkeruujärjestelmään ja niiden toiminta varmistettiin.

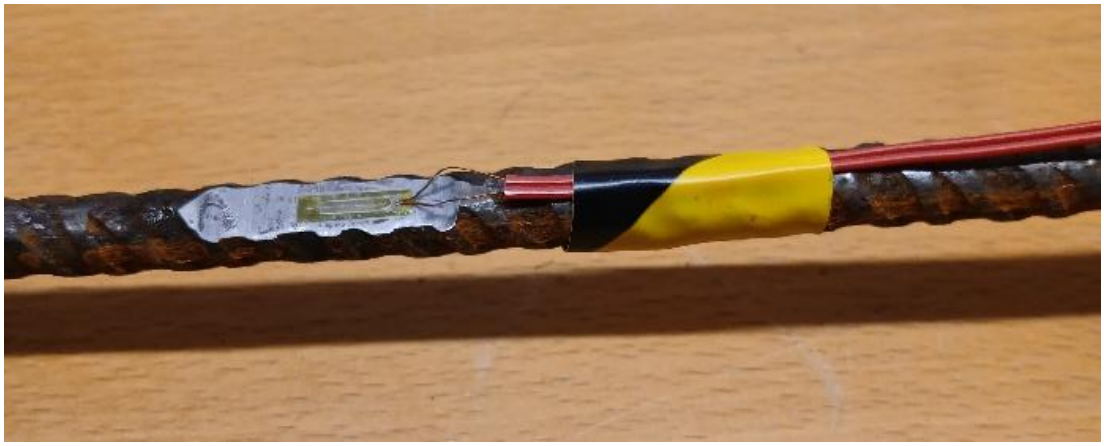


Kuva 6. Venymäliuskan kiinnitys liimalla DELTABEAM®-palkin yläpintaan

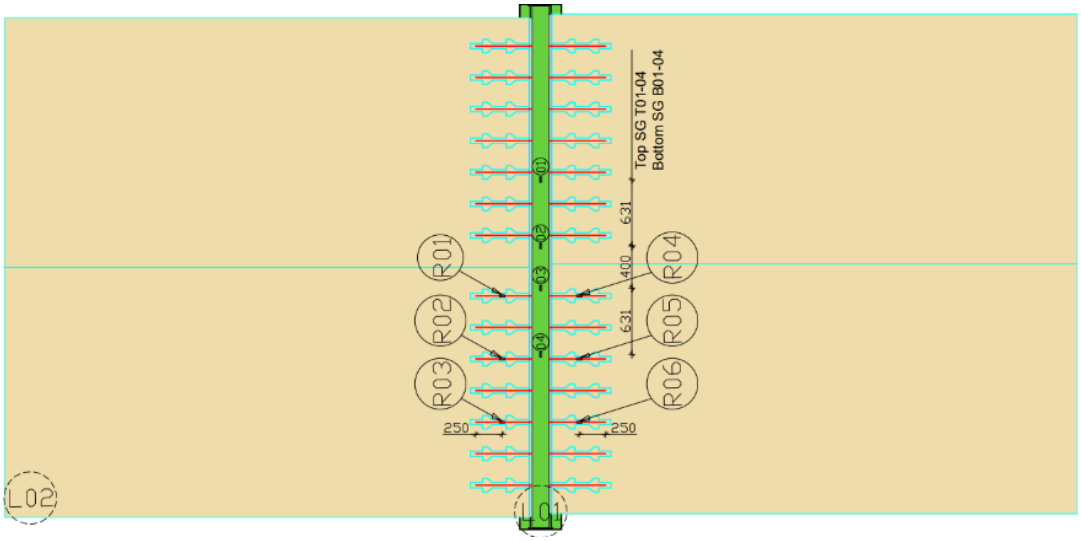
Kolmeen harjateräkseen asennettiin venymäliuskat molempiin päihin, 250 mm etäisyydelle teräksen päästä.



Kuva 5. Venymäliuskojen kiinnitys kolmeen harjateräkseen, molempiin päihin.



Kuva 6. Venymäliuskan kiinnitys harjateräkseen



Kuva 9. Venymäliuskojen sijainnit DELTABEAM®-palkissa ja harjateräksissä

2.2 CLT-elementtien asennus

Seuraavassa vaiheessa Oy Crosslam Kuhmo Ltd:n toimittamat CLT-elementit asennettiin teräspalkkien päälle. Elementit asennettiin vapaasti, eli niitä ei kiinnitetty teräspalkkeihin.



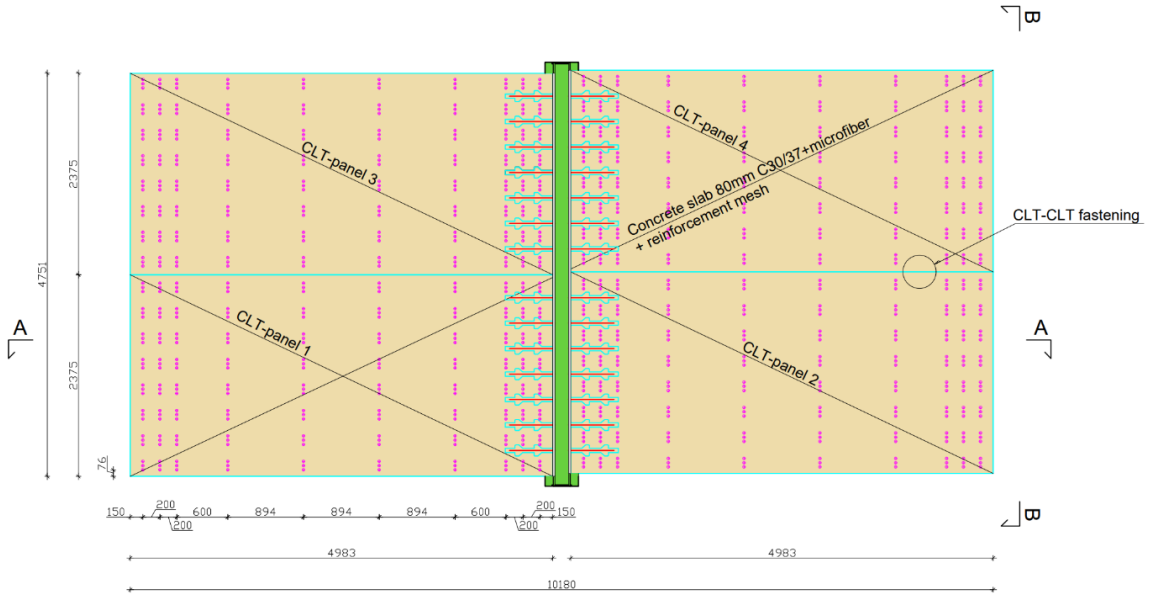
Kuva 10. CLT-elementtien asennus päätyteräspalkkien päälle



Kuva 11. CLT-elementtien asennus DELTABEAM®-palkin leukojen päälle, elementtejä ei kiinnitetty DELTABEAM®-palkkiin

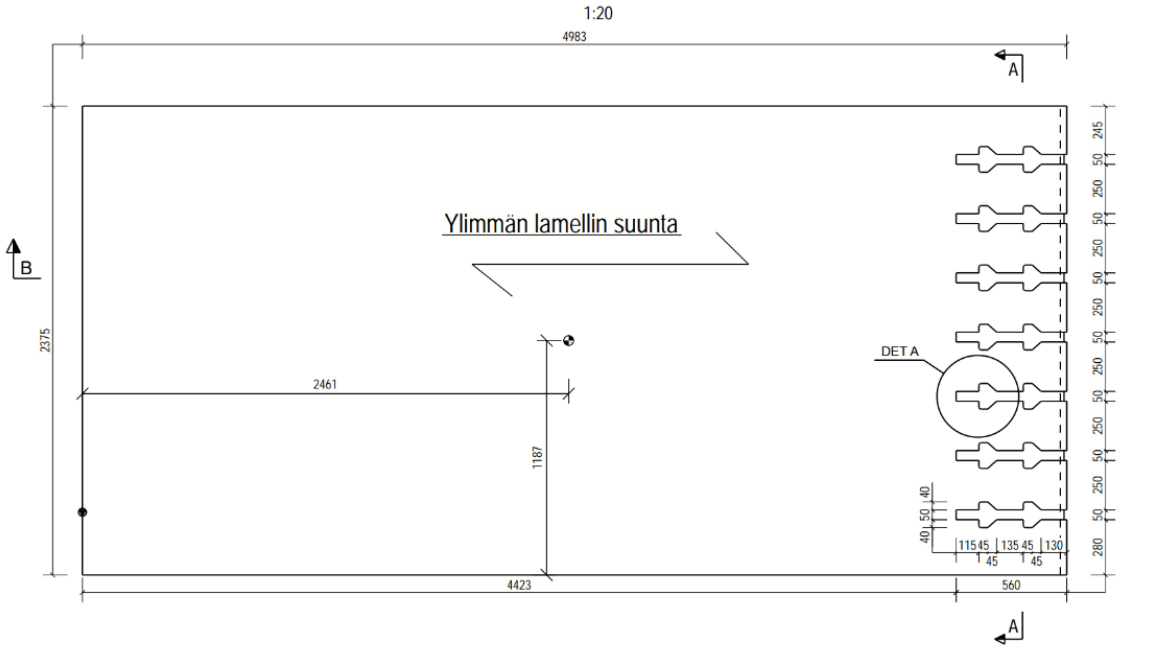
CLT-elementtien puumateriaali oli lujuusluokaltaan C24. Elementtien kokonaispaksuus oli 140 mm ja lamellirakenne oli 40-20-20-20-40. Kaikkien elementin pituus oli

4983 mm ja leveys oli 2375 mm. Liittolaattalattiassa koostui 4:stä CLT-elementistä.



Kuva 12. CLT-elementtien järjestys liittolaattalattiassa

CLT-elementtien toiseen päähän oli jyrsitty koloukset, joiden kulmat oli pyöristetty R20 mukaisesti. Kolousten syvyys oli 60 mm ja pituus oli 560 mm. Jokaisessa elementissä oli 7 kolousta.



Kuva 13. CLT-elementtikuva, jossa on toisessa päässä koloukset juotosvalua varten



Kuva 14. CLT-elementtien koloukset, jotka olivat DELTABEAM®-palkkia kohti

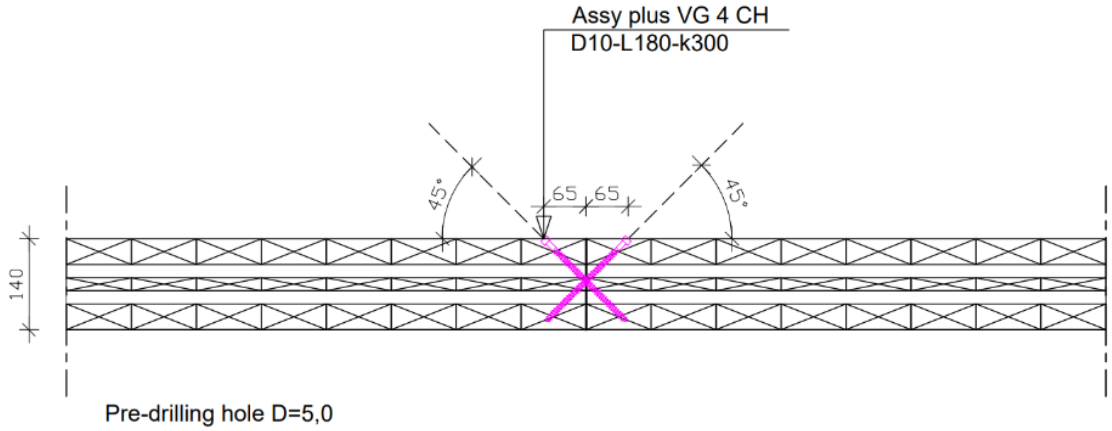
CLT-elementtien alapuolelle asennettiin mittakellot mustiin terästolppiin, jotka mittasivat taipuman suuruutta.



Kuva 15. Lattian alapuolelle asennettiin mustat terästolpat, jotka mittasivat taipumaa mittakellojen avulla

2.3 CLT-elementtien vinoruuviliitokset

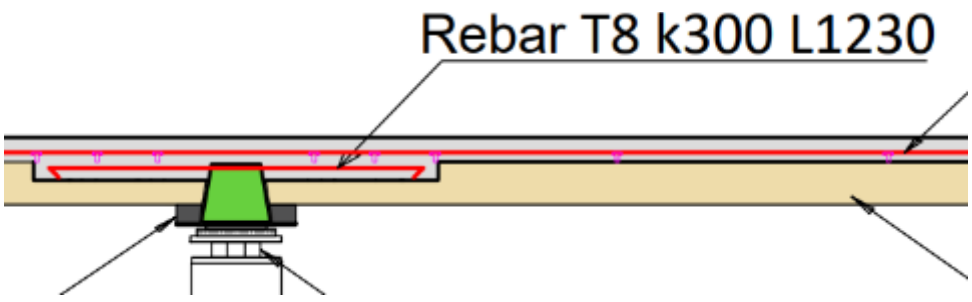
CLT-elementit kiinnitettiin toisiinsa vinoruuvauksella. Ruuveille porattiin esiporausreiät 5 mm, jonka jälkeen ruuvit ruuvattiin elementteihin 45° kulmassa. Ruuvityyppi oli Wurth Assy® Plus VG 4 CH, joka on täyskierteinen ja sinkittyä terästä oleva ruuvi. Ruuvin nimellishalkaisija on 10 mm ja kokonaispituus on 180 mm. Ruuvit asennettiin 300 mm:n välein elementteihin. Ruuvit sopivat hyvin puu-puuliitoksiin, joihin kohdistuu suuria kuormia.



Kuva 16. CLT-elementtien kiinnitys vinoruuveilla

2.3.1.1.1 2.4 CLT-elementtien ja DELTABEAM®-palkin juotosvalu

Seuraavana rakentamisen vaiheena oli juotosvalu, jolla CLT-elementit saatiin kiinnitettyä toisiinsa DELTABEAM®-palkin molemmin puolin. Ennen juotosvalua, CLT-elementtien varauskoloihin asennettiin harjateräkset T8 k300 L1230.

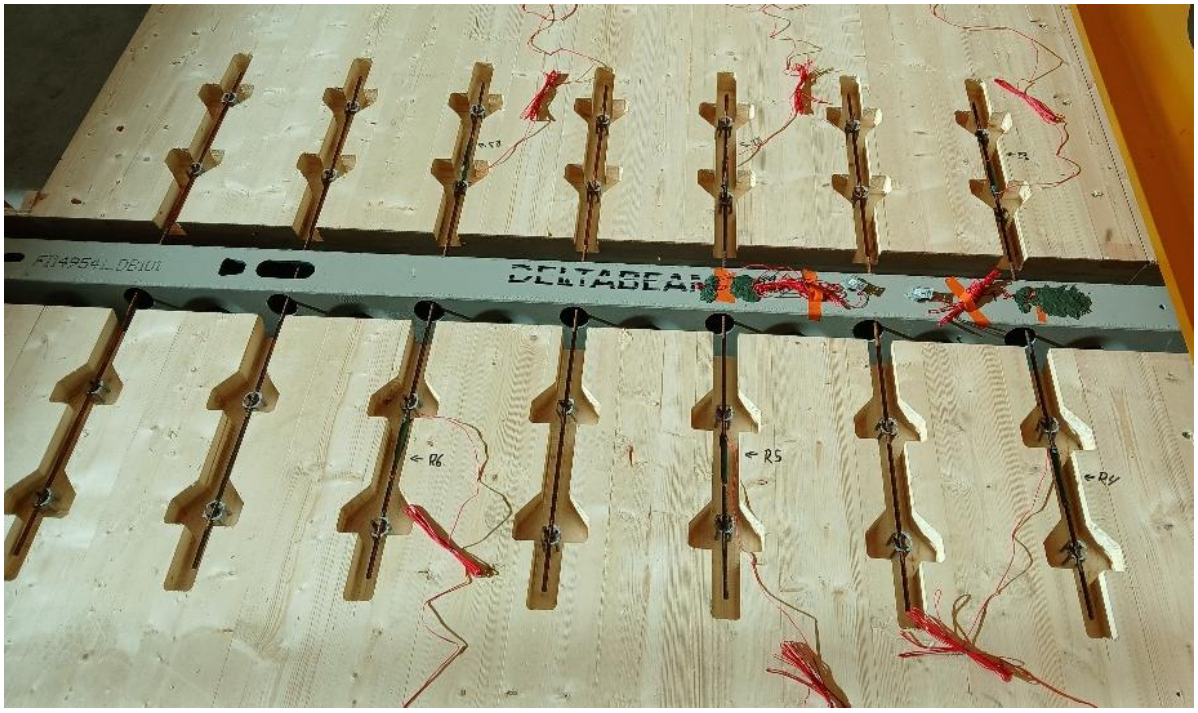


Kuva 17. Harjaterästen T8 k300 L1230 sijainti CLT-elementtien varauskoloissa

Harjateräkset pujotettiin DELTABEAM®-palkin läpi, teräksille varatuista rei'istä. DELTABEAM®-palkin päädyt muotitettiin betonivalua varten.



Kuva 18. Harjateräs asennettuna CLT-elementtien varauskoloihin



Kuva 19. Harjaterästen asennus varauskoloihin, venymäliuskat kolmessa harjateräksessä

Ennen juotosvalua, DELTABEAM®-palkin alle asennettiin valunaikainen tuenta. Juotosvalun kovetuttua tuet otettiin pois.



Kuva 20. Tuennat DELTABEAM®-palkin alle juotosvalun ajaksi

Juotosvalu tehtiin CLT-elementtien kolouksiin ja DELTABEAM®-palkin sekä CLT-elementtien välisiin saumoihin. Valussa käytettiin tavanomaista DELTABEAM®-palkkien valuun tarkoitettua betonimassaa. Betonin lujuusluokka oli C35/45#8, S4, ja rasitusluokka oli XC1-XC4, huokostin oli XF3 ja vesi-sementtisuhde oli 0,4. Juotosvalun betoni tiivistettiin betonitäryllä.



Kuva 21. Juotosbetonivalu ja tiivistys betonitäryllä

Juotosvalun jälkeen betonin annettiin kovettua 14 vuorokautta ennen mittauksia.



Kuva 22. Valmis juotosvalu kovettunut 14 vuorokautta

Harjateräksissä kiinni olevat venymäliuskat jäivät juotosvalun sisään, mutta venymäliuskojen johdot jäivät ulkopuolelle, jotta ne saatiin myöhemmin kytkettyä tiedonkeruulaitteeseen.



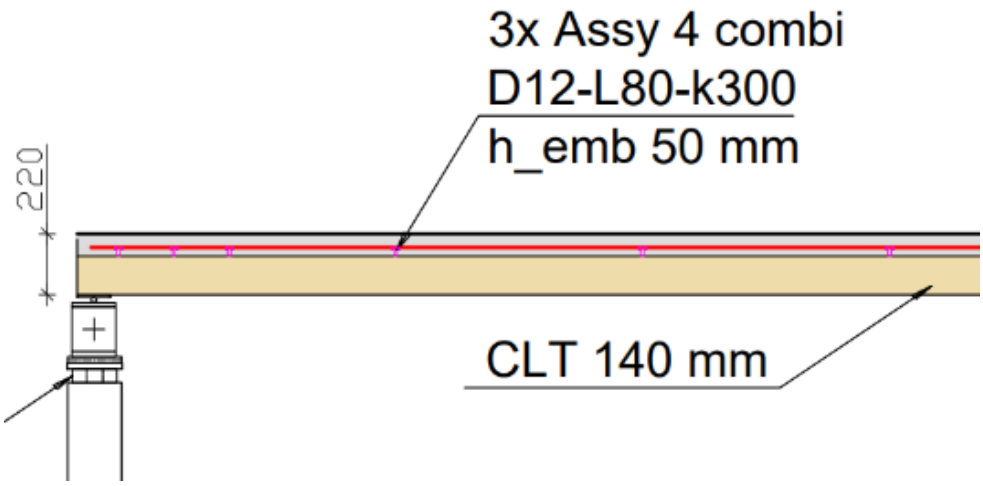
Kuva 23. Valmis juotosvalu ja venymäliuskojen johdot



Kuva 24. Juotosvalun kovetuttua, DELTABEAM®-palkin päädyn muotti purettiin pois

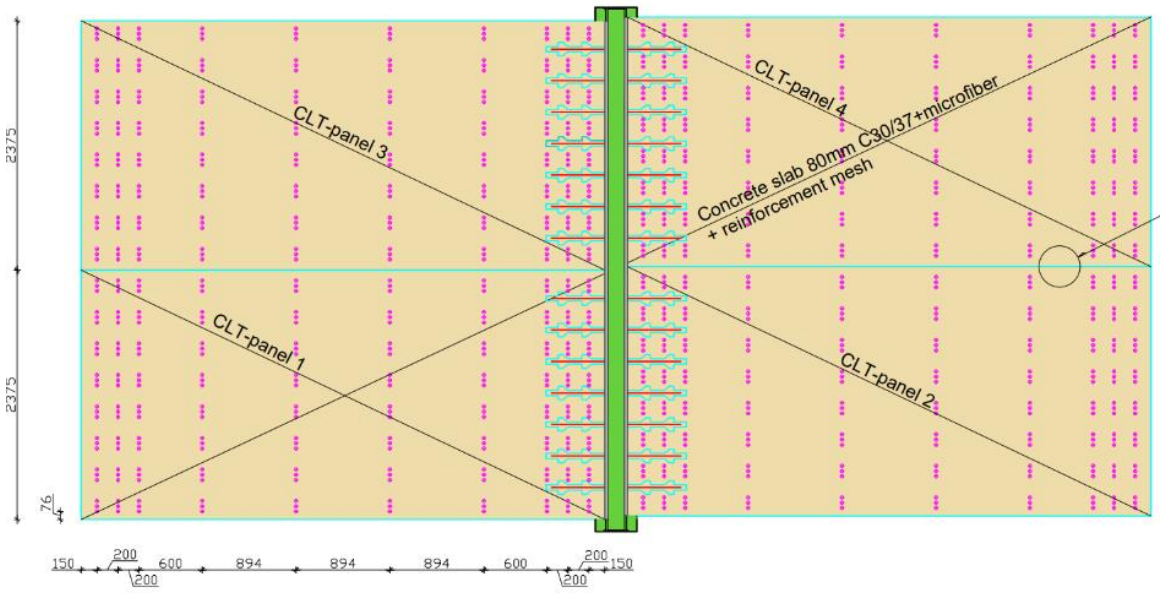
2.4 Liittolaatan viimeistely

Seuraavassa vaiheessa CLT-elementtien pintaan asennettiin ruuvit ruuvauskaavion mukaisesti. Ruuvityyppinä käytettiin Wurth Assy 4 combi ruuvia, joka on sinkittyä terästä ja osakierteinen. Ruuvien nimellishalkaisija oli 12 mm ja pituus oli 80 mm. Ruuvit ruuvattiin 50 mm verran CLT-elementtien sisään. Loput 30 mm ruuvista jäi elementin pintaan betonin tartuntaa varten.



Kuva 25. Ruuvityyppi

Ruuvit asennettiin ruuvauskaavion mukaisesti CLT-elementteihin. Ruuvit asennettiin 3 kappaleen ryhmissä, 300 mm:n välein.



Kuva 26. Ruuvauskaavio



Kuva 27. CLT-elementteihin asennetut ruuvit 3 kappaleen ryhmissä



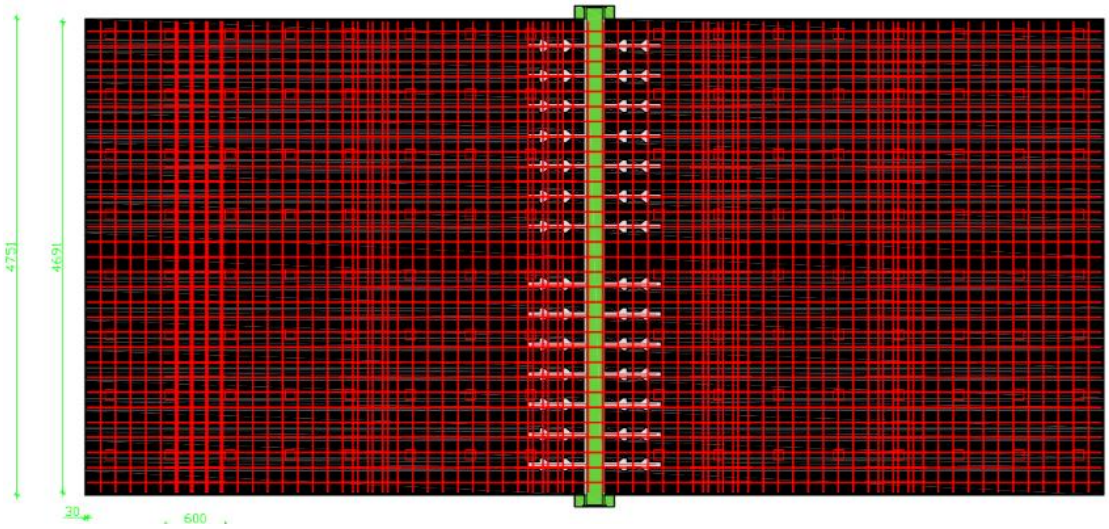
Kuva 28. CLT-elementteihin asennetut ruuvit ruuvauslinjojen mukaisesti

Ruuvien asennuksen jälkeen lattialle tehtiin Load Framella kuormitustestaus $F_{max,est}$: 0,4 x arvioitu maksimikuorma. Kuorma välitettiin lattia-asetelmalle teräspalkiston avulla, joka jakoi kuormituksen viivakuormamaisesti(1677 mm DELTABEAM®-palkista) ja tasaisesti koko asetelmalle.

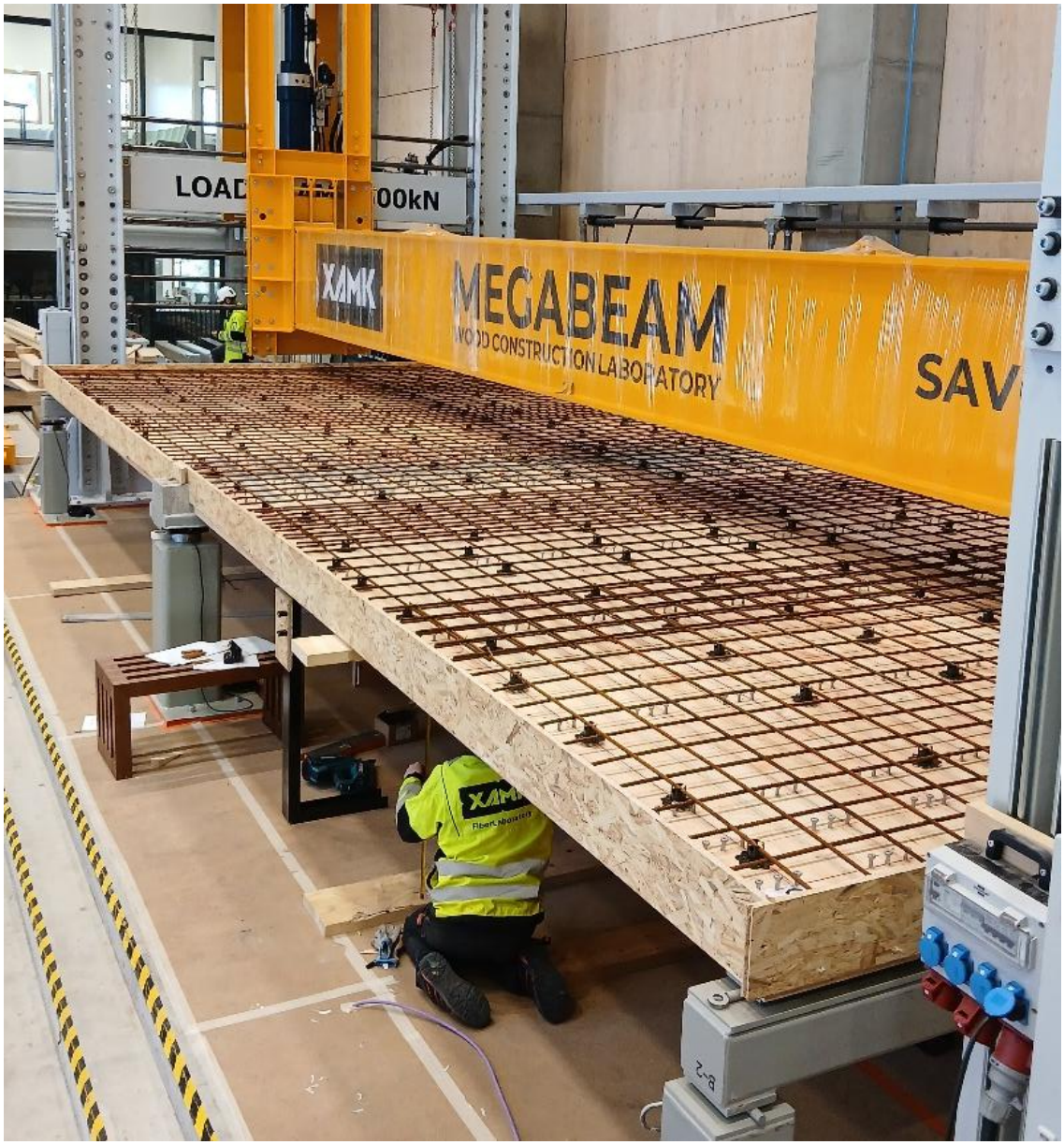


Kuva 29. Kuormitustestauspalkiston asettelua ennen kuormitusta Load Framella

Tämän jälkeen CLT-elementtien päälle asennettiin raudoitusverkot, jotka olivat 10 mm paksua ja verkon jakoväli oli 150 mm. Asennuksessa käytettiin 30 mm korkeita raudoituskorokkeita. Verkkojen latominen aloitettiin täydellä raudoitusverkolla (leveys 2350) mittapisteen 5 päädystä (kuva 45). Raudoitusverkot limitettiin 600 mm verran päällekkäin. Asetelman toiseen päähän jäi vajaa verkko, jonka leveys oli 1370 mm. Raudoitusverkon reunaetäisyydeksi asetettiin 30 mm.



Kuva 30. Raudoituskaavio

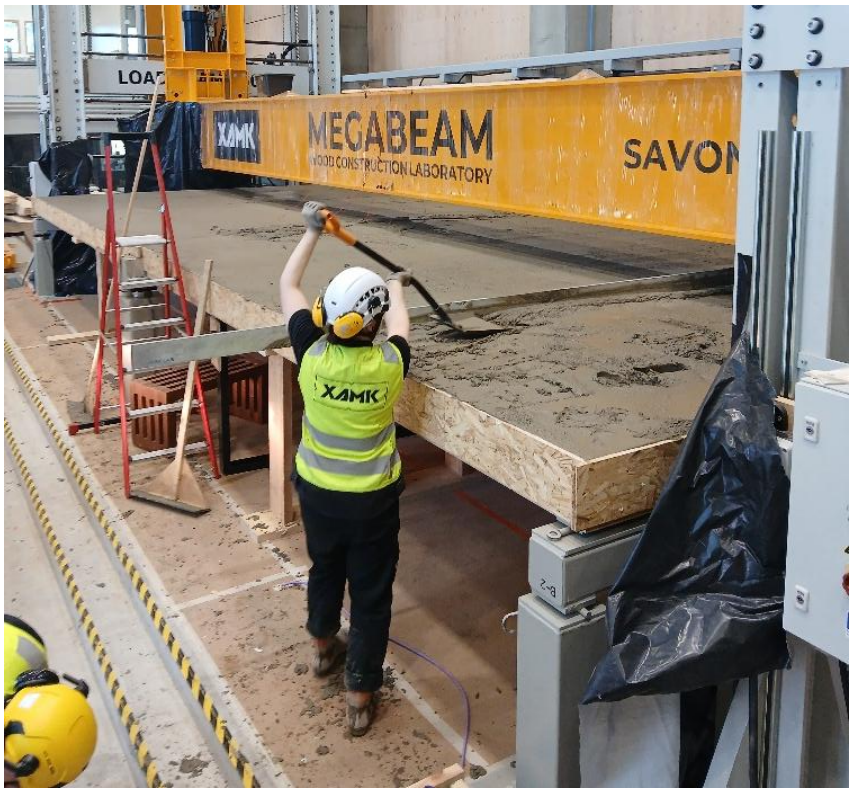


Kuva 31. CLT-elementtien päälle asennetut raudoitusverkot, limitys 600 mm.

Raudoitusverkon asennuksen jälkeen, asetelman päälle valettiin pumppuautolla 80 mm:n vahvuinen liittovalu. Liittovalun tarkoituksena oli saada betonivalu ja CLT-elementit yhtenäiseksi kantavaksi rakenteeksi, betonin kovettuessa. Valussa käytetyn betonin lujuusluokka oli C35/45#8, S3 ja rasitusluokka oli XC1-XC4, huokostin oli XF3 ja vesi-sementtisuhde oli 0,4. Liittovalun betoni tiivistettiin betonitäryllä.



Kuva 32. Liittovalu tehtiin pumppuauton avulla ja tiivistys betonitäryllä



Kuva 33. Betonivalun pinnan tasoitus

Betonin pinta hierrettiin kevyesti hiertimellä.



Kuva 34. Betonipinnan hiertäminen



Kuva 35. Valmis liittovalu

Kun liittovalu oli kovettunut 12 vuorokautta, irrotettiin reunoilla olevat valumuotit.



Kuva 36. Valumuotit irrotettuina



Kuva 37. Lattiarakenteen poikittaissuuntainen käyristyminen, tuen kohdalla kulmissa havaittavissa oleva rako

Mittausten jälkeen suoritettiin myös laserkeilaus, jonka tarkoituksena oli mitata laserkeilaimella erittäin tarkka kolmiulotteinen pistepilvimalli lattiarakenteesta. Liittolaattalattian sivuille laitettiin laserkeilauksen kohdistuspisteet, jotta eri mittausasemista tehdyt keilaukset voitiin yhdistää tarkasti samaan koordinaatistoon.

Laserkeilauksessa laite lähettää lasersäteitä ja mittaa niiden heijastumisen perusteella pinnan tarkan sijainnin.



Kuva 38. Laserkeilauksen kohdistuspisteet

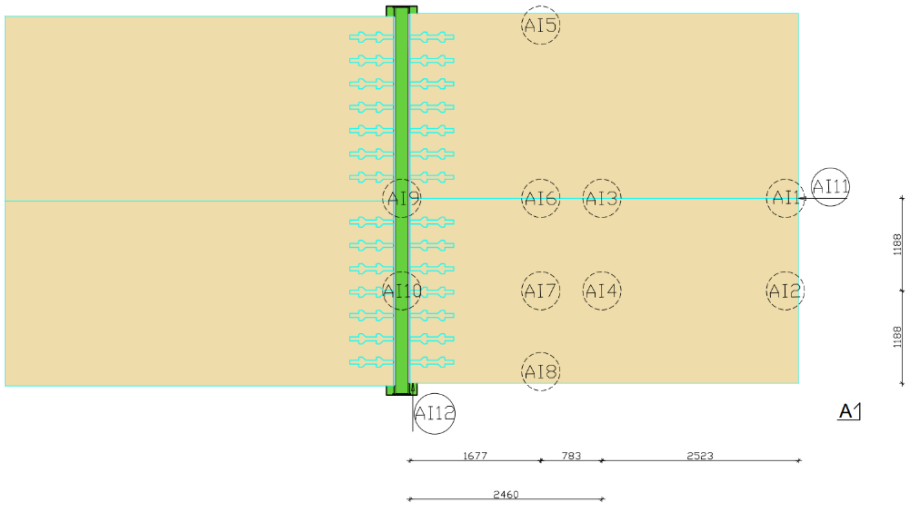
Laserkeilauksen jälkeen kiinnitettiin kuormitustestausta varten siirtymäanturit liitto-laattalattian alapuolelle. Anturien runko kiinnitettiin tukirakenteisiin ja anturin mitta-kärki tukeutui CLT-elementtiin alhaalta päin. Lisäksi kaksi siirtymäanturia asennettiin mittaamaan horisontaalisesti CLT-levyn ja betonin välistä mahdollista liukumaa. Toinen näistä antureista asennettiin asetelman lyhyen sivun puoliväliin ja toinen pitkän sivun puoliväliin, DELTABEAM®-palkin tuen lähelle. Siirtymäanturien tyyppi oli LVDT-anturi (Linear Variable Differential Transformer). Siirtymäanturi mittaa tarkasti lineaarista liikettä.



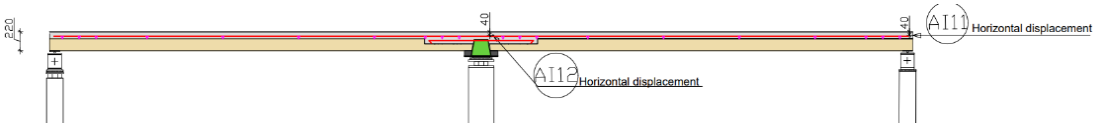
Kuva 39. Siirtymäanturit valmiina lattian alapuolella mittaamaan murtorajatilakuormituksen lineaarista liikettä



Kuva 40. Siirtymäanturit asennettuna lattian alapuolella



Kuva 41. Siirtymäantureiden sijainnit



Kuva 42. Horisontaalisten siirtymäanturien paikat

Siirtymäantureiden johdot yhdistettiin Load Framen tiedonkeruujärjestelmään, joka mittasi myös hydraulisylintereiden voimaa ja siirtymää. Venymäliuskojen ja tukivoima-antureiden johdot yhdistettiin ulkopuoliseen tiedonkeruujärjestelmään.



Kuva 43. Siirtymäanturien johdot kiinnitettynä tiedonkeruujärjestelmään

Ennen murtorajatilakuormitusta liittolaattalattian päälle asennettiin jälleen teräspalkisto, jolla kuormitus saatiin jaettua viivakuomamaisesti.

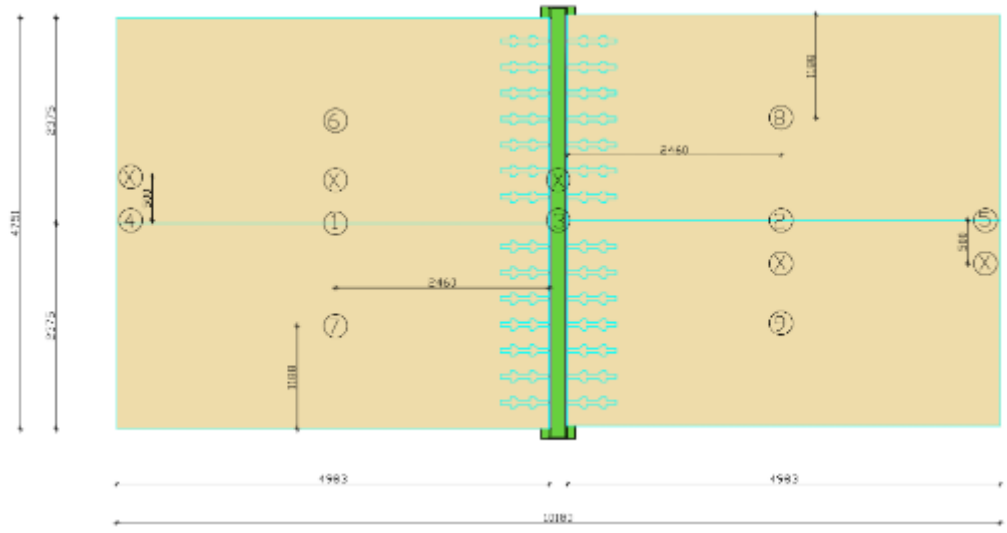


Kuva 44. Murtorajatilakuormituksen valmistelu

3 MITTAUSTULOKSET

3.1 Rakennusvaiheen mittaustulokset

Pilarien ja palkkien asennuksen jälkeen tehtiin ensimmäiset mittaukset taipuman (1kN kuorma) ja ominaistaajuuden osalta teräspalkkien päältä, mittapisteistä 3, 4 ja 5.

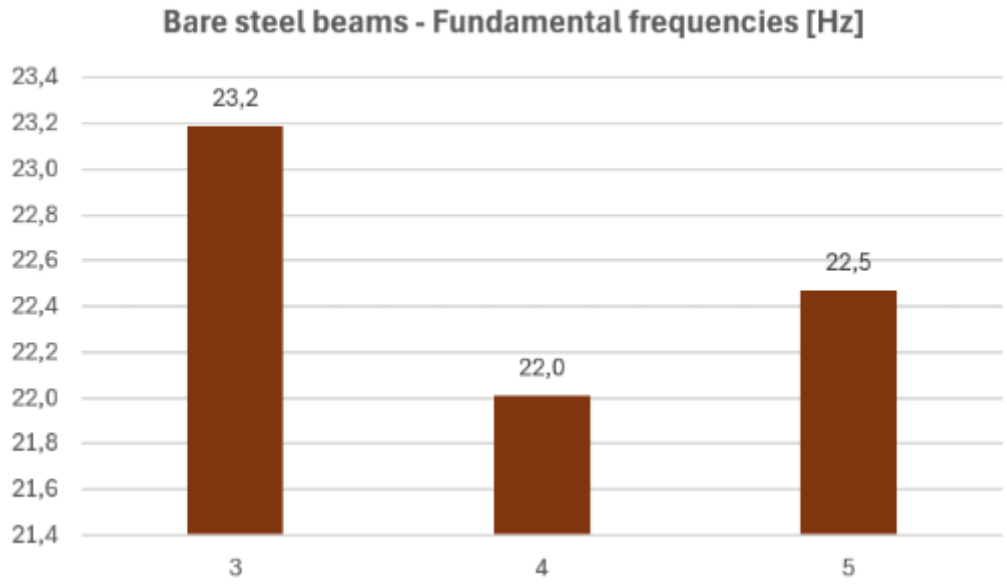


Kuva 45. Heel Drop ja taipumamittauskohdat



Kuva 46. Teräspalkkien taipumamittaukset, 1 kN kuorma

Ominaistaajuusmittaukset toteutettiin 3D-mittalaitteella ja herätteenä teräspalkeille toimi kumivasara.

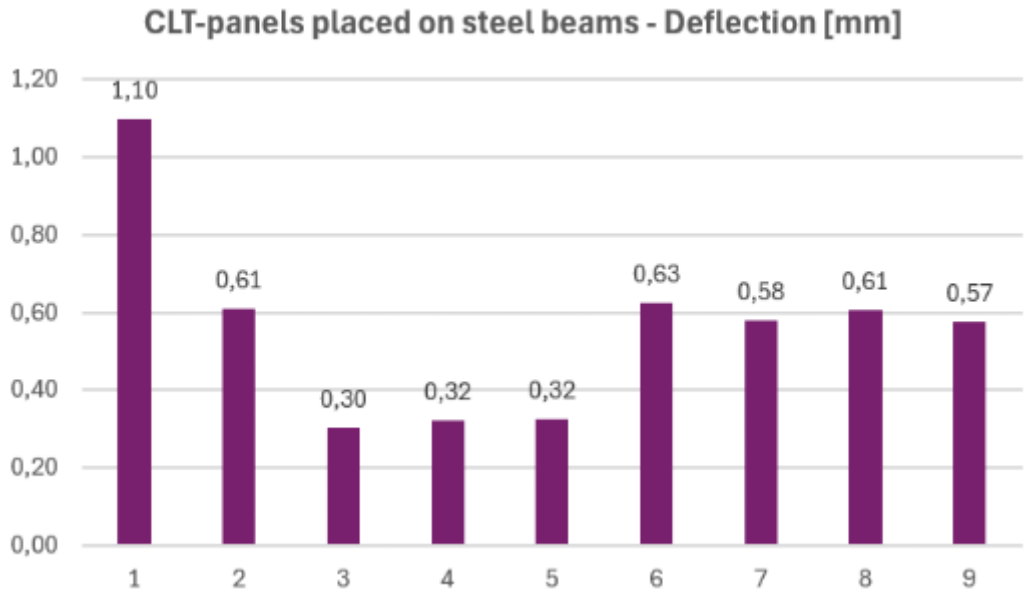


Kuva 47. Teräspalkkien ominaistaajuumittaukset

CLT-elementeille ja teräspalkeille tehtiin mittaukset taipuman ja ominaistaajuuden osalta.

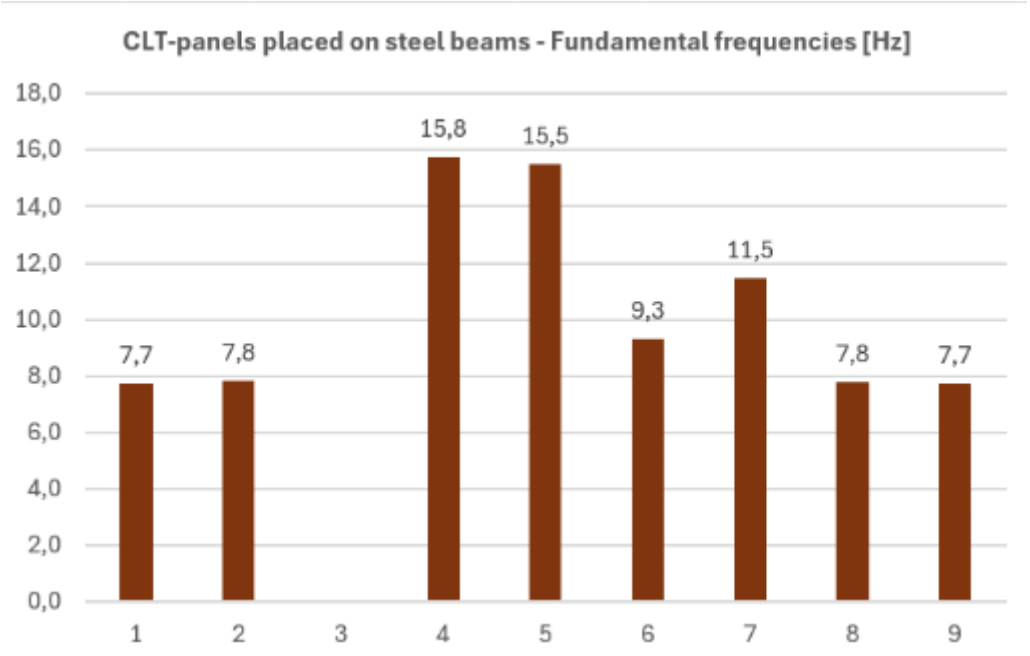


Kuva 48. Taipumamittaus 1 kN painolla CLT-elementtien asennuksen jälkeen



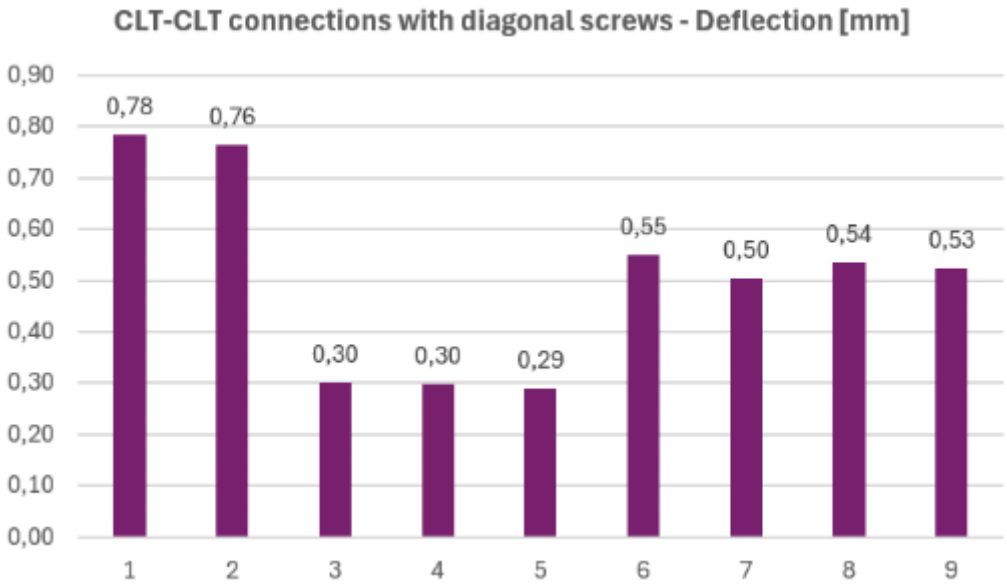
Kuva 49. Taipumamittaustulokset CLT-elementtien asennuksen jälkeen, 1 kN kuorma

Ominaistaajuusmittaukset toteutettiin Heel-Drop-menetelmällä, jossa välipohjarakenteeseen tuotettiin heräte kantapäille pudottautumalla.



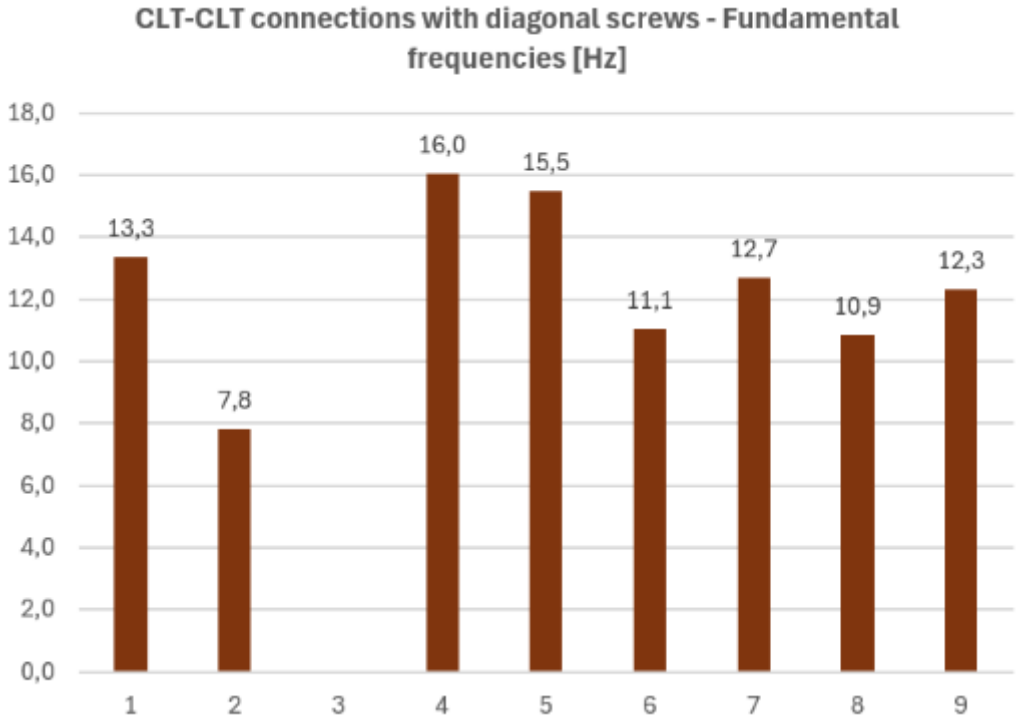
Kuva 50. Ominaistaajuusmittaustulokset CLT-elementtien asennuksen jälkeen

Vinoruuvauksen jälkeen asetelmalle tehtiin mittaukset taipuman ja ominaistaajuuden osalta.



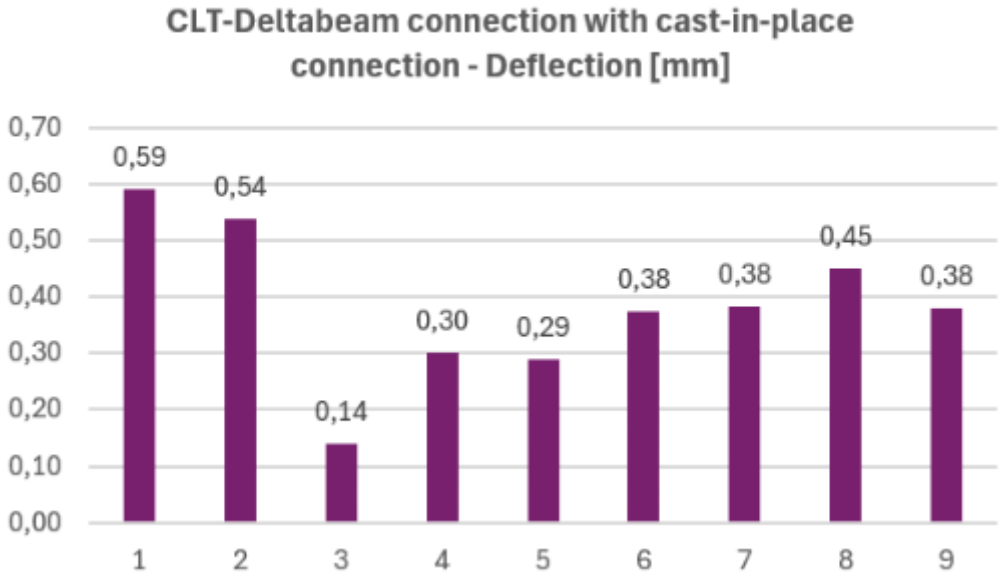
Kuva 51. Taipumamittaustulokset vinoruuvauksen jälkeen, 1 kN kuorma

CLT-elementtien liitoskohdassa keskellä oli suurimmat taipumat.

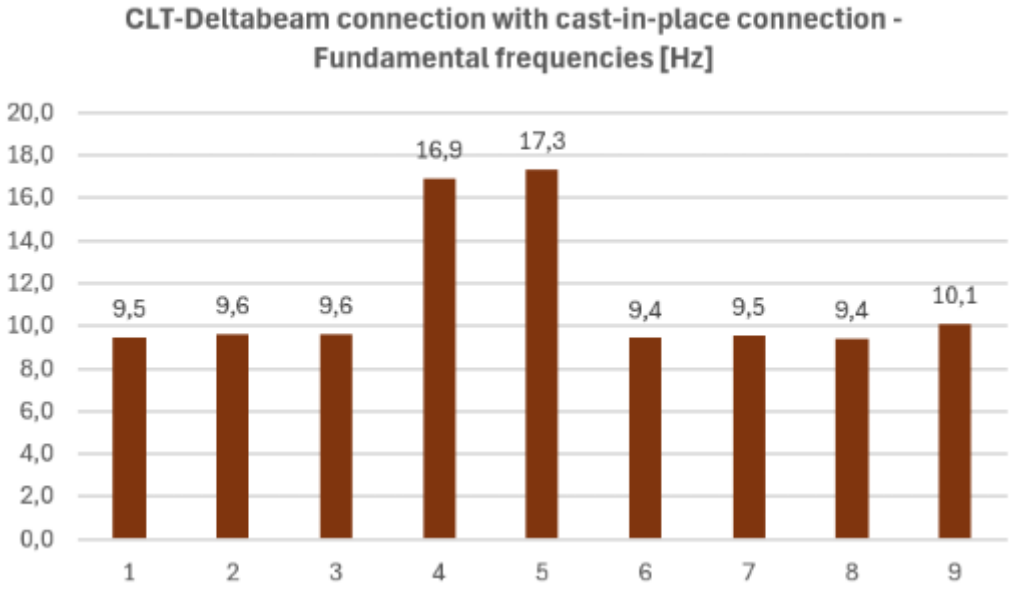


Kuva 52. Ominaistaajuusmittaukset vinoruuvauksen jälkeen

Juotosvalun kovettua 14 vuorokautta, tehtiin taipuma- ja ominaistaajuusmittaukset.

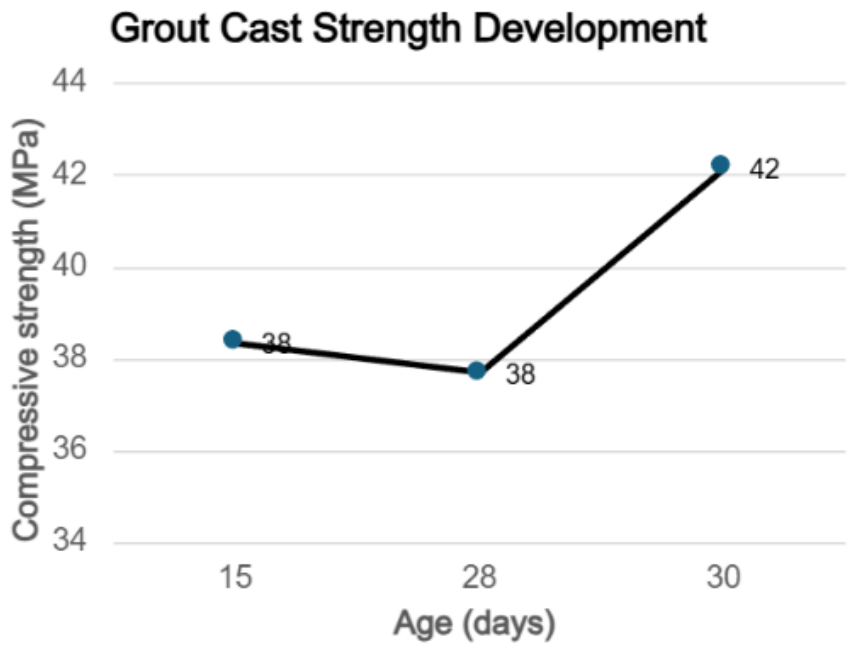


Kuva 53. Taipumamittaukset juotosvalun jälkeen, 1 kN kuorma



Kuva 54. Ominaistaajuusmittaukset juotosvalun jälkeen

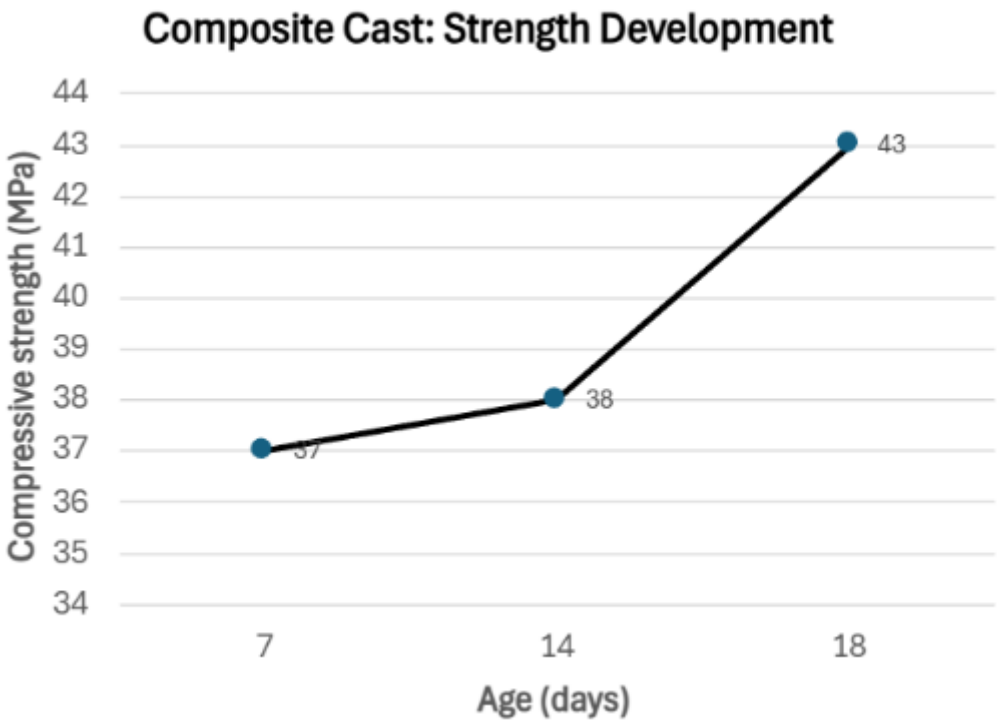
Ominaistaajuudet olivat korkeammat mittapisteissä 4 ja 5 eli päätypalkkien kohdalla. Muut mittaustulokset olivat keskenään samankaltaisia.



Kuva 55. Juotosbetonin lujuuden kehitys koekappaleissa

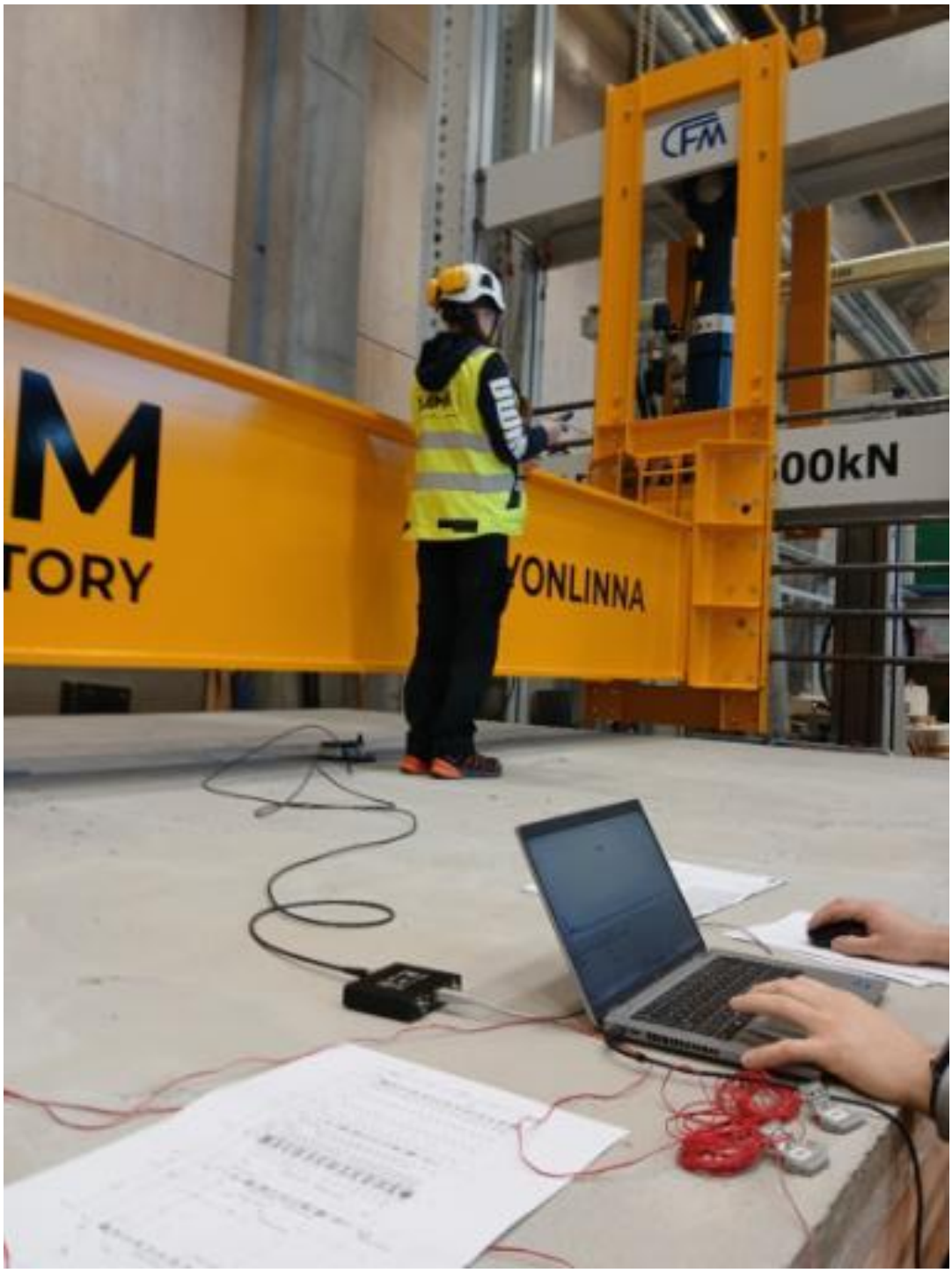
Valettujen näytteiden puristuslujuus kasvoi kovettumisen edetessä tutkittuna ajanjaksona. Betoni saavutti mitoituslujuutensa 15 vuorokauden jälkeen.

Myös liittovalun betonista otettiin koekuutiot ja niiden avulla tarkkailtiin puristuslujuuden kehitystä.



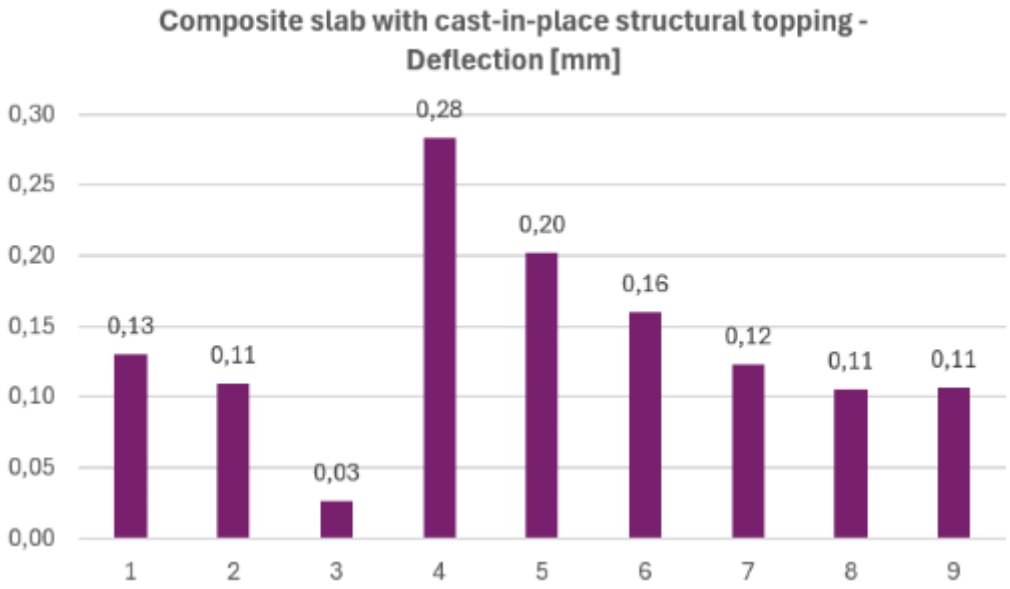
Kuva 56. Liittovalun betonin koekappaleiden lujuuden kehitys

Kun valu oli kovettunut 14 vuorokautta, suoritettiin koko asetelmalle taas värähtely- ja taipuma mittaukset.



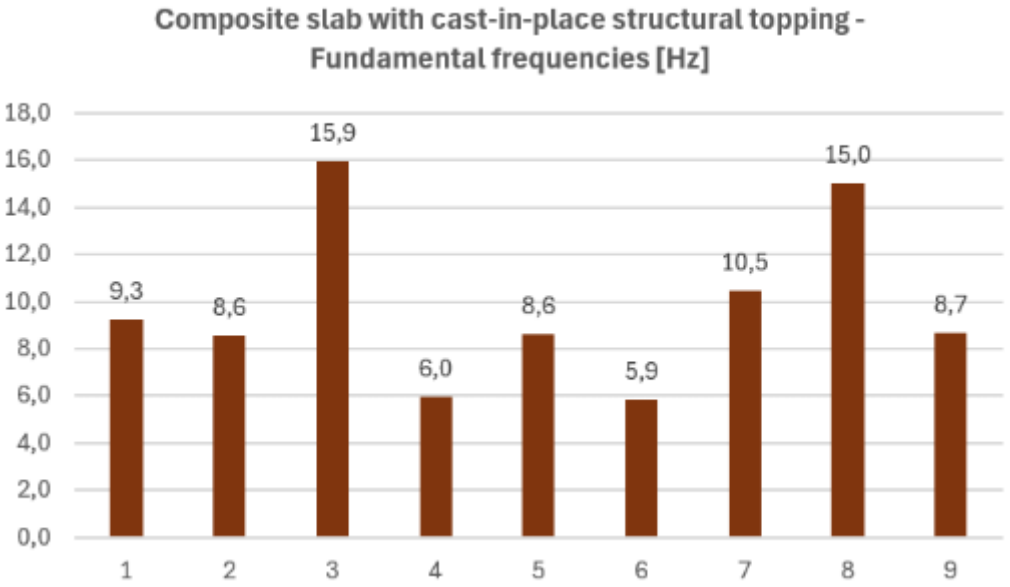
Kuva 57. Ominaistaajuusmittaukset liittolaattalattialle Heel-Drop-menetelmällä

Valmiin asetelman suurimmat taipumat olivat mittapisteissä 4 ja 5 eli päätypalkkien kohdalla.



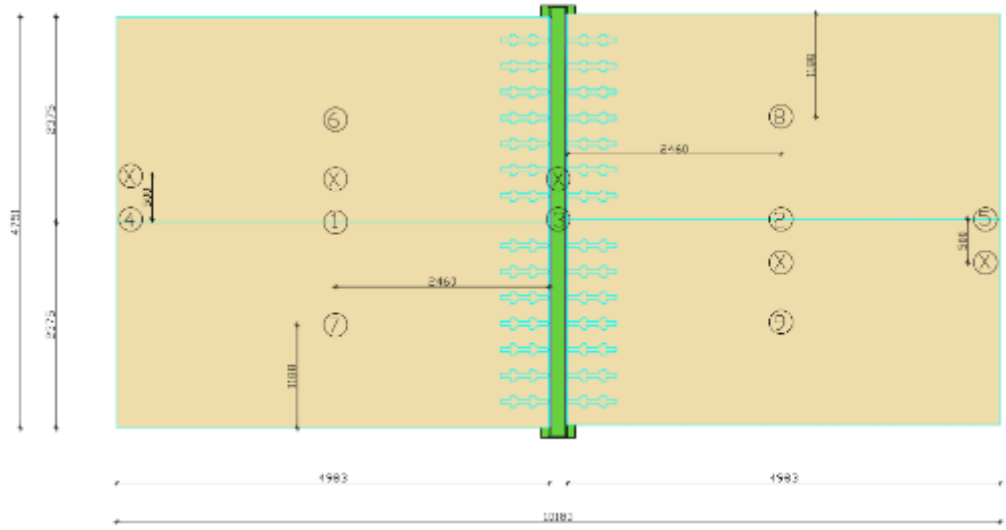
Kuva 56. Liittovalun betonin koekappaleiden lujuuden kehitys

Matalimmat ominaistaajuudet olivat mittapisteissä 4 ja 6.



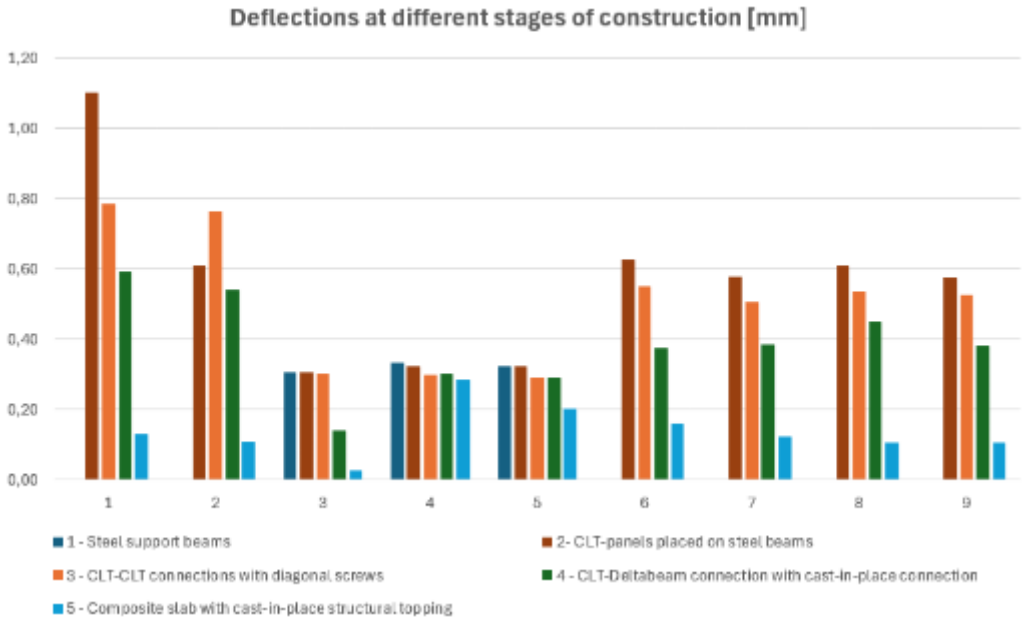
Kuva 59. Valmiin liittolaattalattian ominaistaajuusmittaustulokset

Kaikkien mittausten tulokset ovat koottuna kuviin 61 ja 62, joista nähdään miten taipumat ja ominaistaajuudet muuttuivat rakennusvaiheittain eri mittapisteissä. Kuvassa 60 on esitetty välipohjan mittapisteiden paikat.

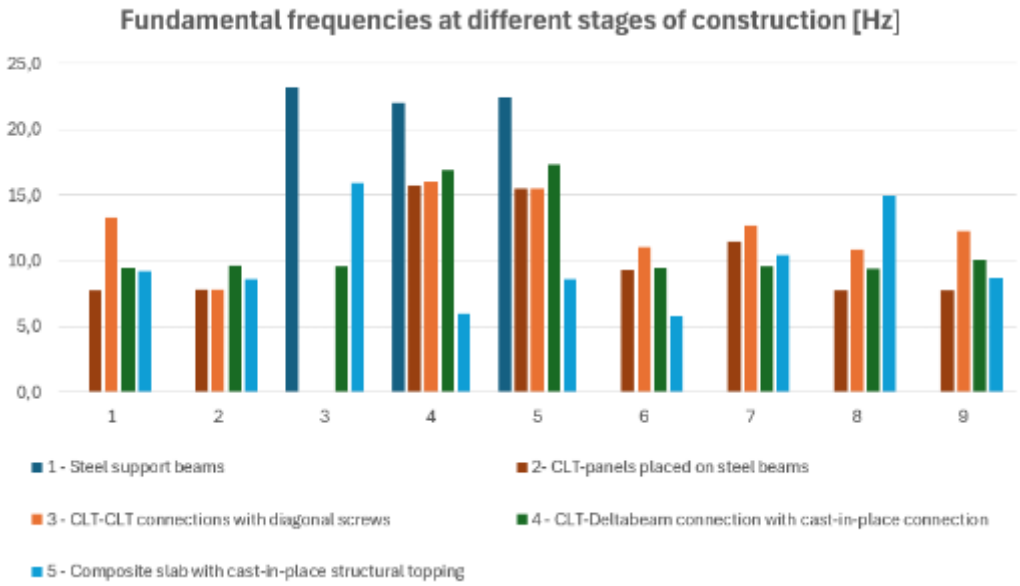


Kuva 60. Taipuma- ja ominaistaajuusmittausten mittapisteiden paikat

Kuvassa 61 taipumamittaustulos mittapisteessä 2 nousi toiseen mittaukseen verrattuna, koska CLT-levyjen saumat eivät olleet täysin tasan. Ensimmäisessä mittauksessa mittakelloa eikä painoa saatu asemoitua niin, että kuormitus olisi kohdistunut tasan molemmille CLT-levyille.

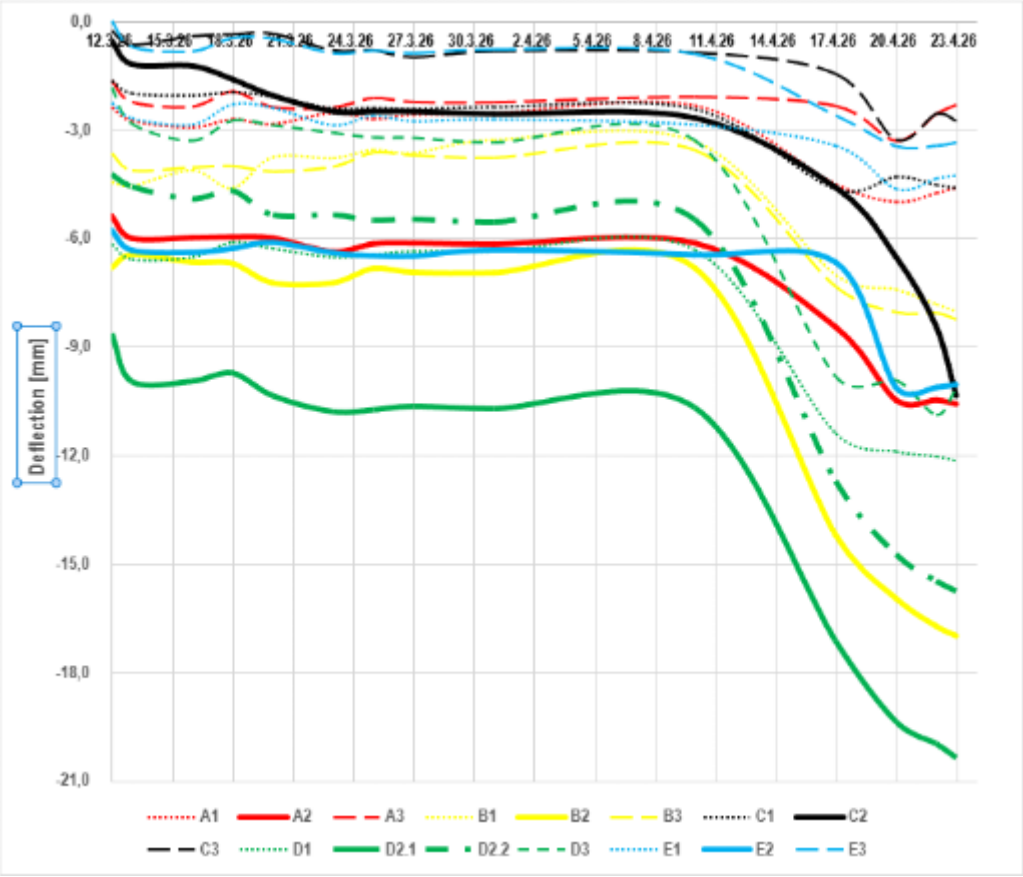


Kuva 61. Taipumamittaustulokset eri rakennusvaiheissa, 1 kN kuormasta



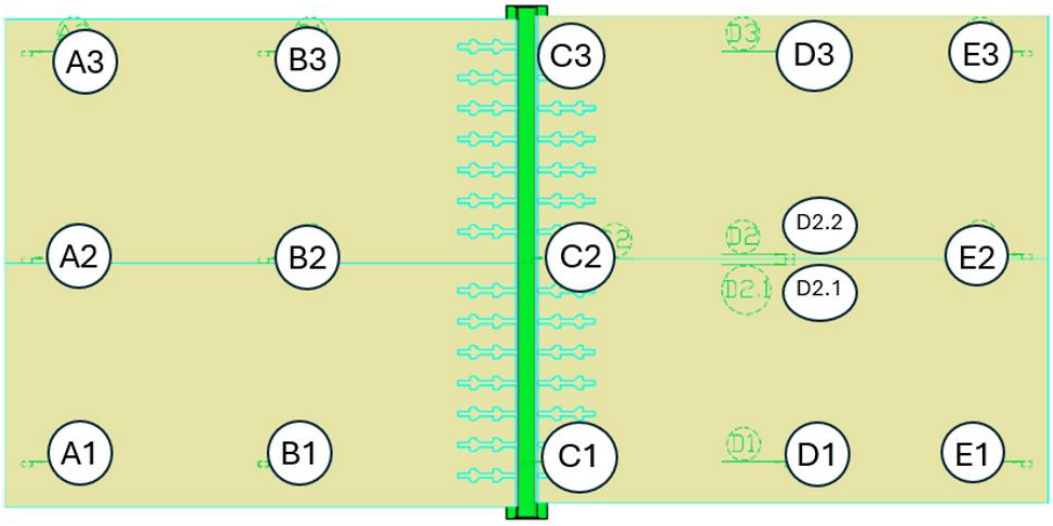
Kuva 62. Ominaistaajuusmittaustulokset eri rakennusvaiheissa

Asetelman eri rakennusvaiheiden aikana mitattiin rakenteen paikallisia 16:sta eri kohdasta pitkäaikaismittauksena.



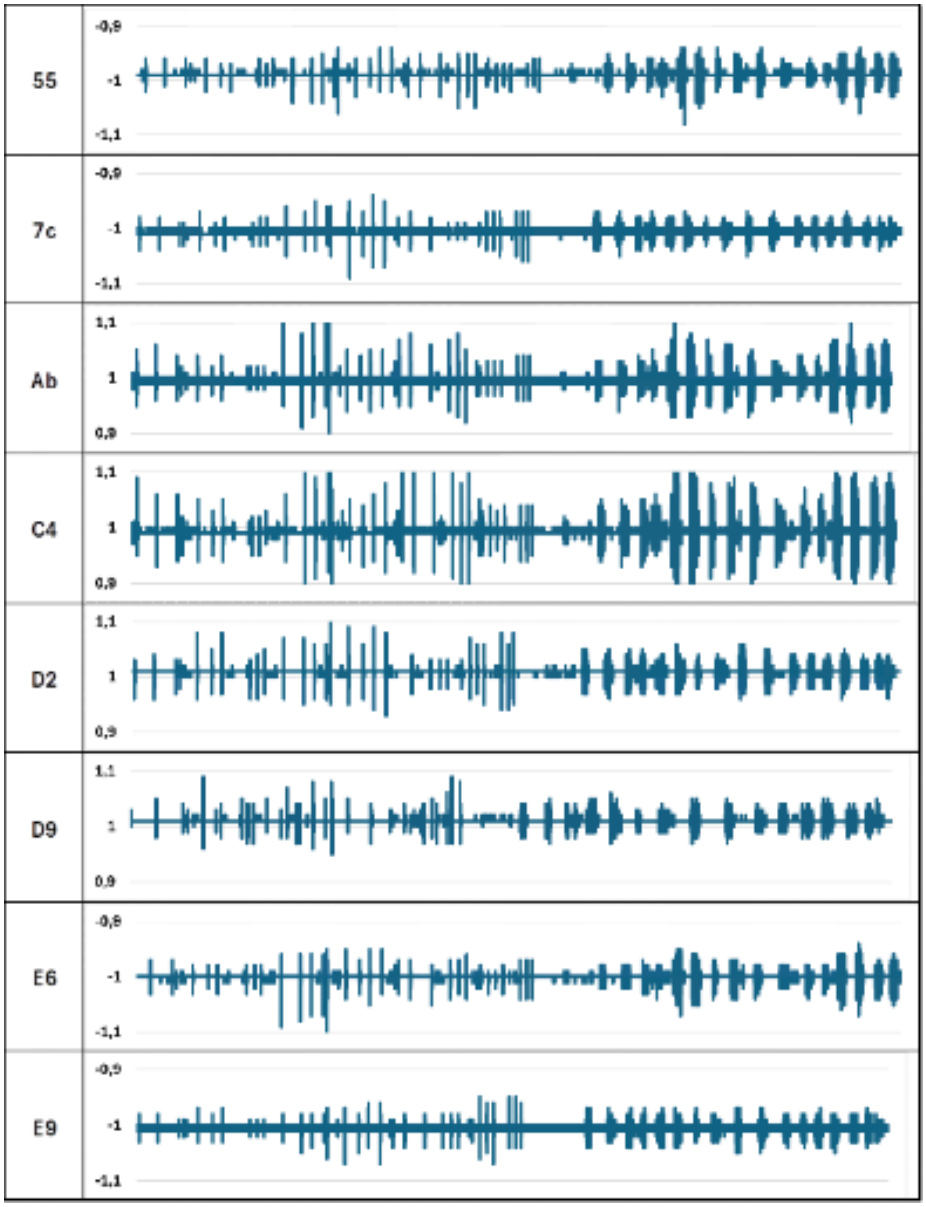
Kuva 63. Testirakenteen taipuma rakennusvaiheen aikana

Mittaukset suoritettiin mittaamalla TSLOT-lattian ja CLT-levyjen alapinnan välistä muutosta. Huomioitavaa on, että mittaukset D2.1 ja D2.2 on tehty erikseen kummallakin CLT-levyllä, koska levyt porrastivat.

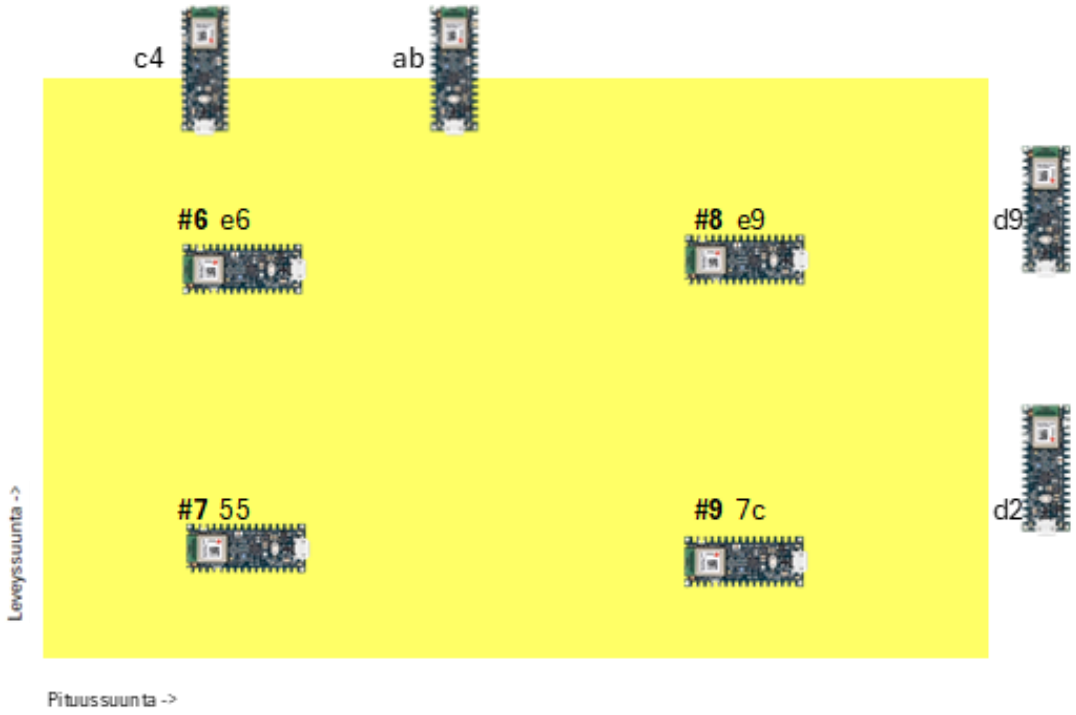


Kuva 64. Mittauskohdat testijärjestelyssä

Valmiille asetelmalle suoritettiin myös kokeellisia värähtelymittauksia, joita varten testilattiaan kiinnitettiin 8 kappaletta Arduino kiihtyvyysantureita. Näiden tuottamaa informaatiota tallennettiin myös viimeisen vaiheen ominaistaajuusmittausten aikana. Lisäksi lattian päällä tehtiin yhteensä 12 kappaletta kävelytestejä, missä käveltiin 2,0 ja 2,7 Hz taajuudella noin 40 sekuntia kerrallaan. Tätä informaatiota ei ole analysoitu, vaan se luovutetaan asiantuntijoiden käyttöön erillisen julkaisun mukana. Kävelytestit on myös videoitu.



Kuva 65. Värähtelyantureiden tuottama data 23.4. tehtyjen ominaistaajuusmittausten ja kävelytestien aikana, tallenteen kesto noin 2 tuntia. Pystysuuntaiset kiihtyvyysmuutokset eri mittapisteissä, skaala 1G±0.1G. Ominaistaajuusmittauksissa värähtelyä oli mitattavissa noin 5 sekuntia kaikilla antureilla Heel-drop impulssin suorittamisen jälkeen.



Kuva 66. Arduino kiihtyvyysantureiden sijainnit, asetelman alapuolella ja kyljissä.

Mittauksia suoritettaessa havaittiin, että CLT-panel 1:n kulma ei asettunut tiiviisti tukea vasten, vaan CLT-levyn ja teräslevyn väliin jäi silminnähtävä rako.

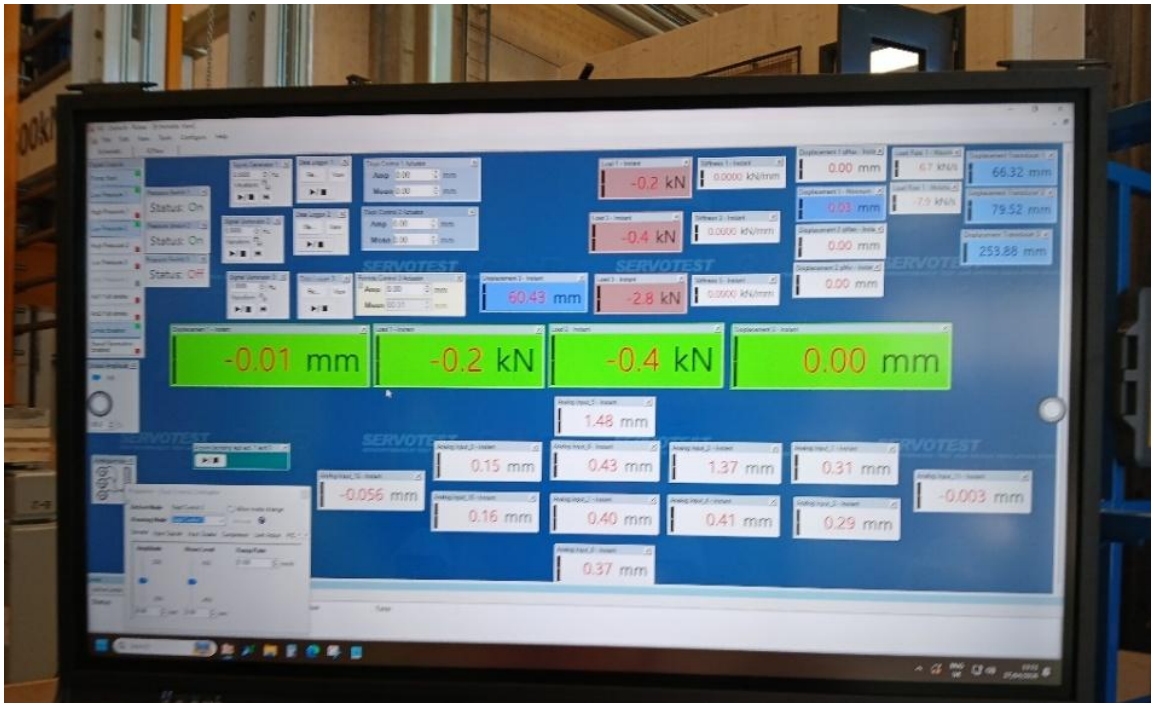
3.2 Kuormituskokeiden tulokset

Liittolaattalattialle toteutettiin täysimittainen kuormituskoe Load Frame -testauslaitteistolla, jossa tutkittiin puu–betoni–teräs-liittorakenteisen hybridiratkaisun käyttäytymistä erittäin suurilla kuormituksilla. Koe suoritettiin todellisessa mittakaavassa, mikä mahdollisti rakenteen toiminnan arvioinnin huomattavasti luotettavammin kuin pienoismittakaavan laboratoriokokeissa. Testauksen tavoitteena oli selvittää rakenteen kantokykyä, jäykkyyttä, murtumiskäyttäytymistä ja turvallisuusmarginaaleja sekä tuottaa tutkimustietoa tulevaisuuden puisten välipohjaratkaisujen kehittämisen tueksi.

Kuormituskokeessa noin 50 m²:n kokoinen puu–betoni–teräs-liittovälipohja kuormitettiin murtumaan asti. Rakenteessa yhdistyivät kolmen materiaalin parhaat ominaisuudet, minkä vuoksi sitä voidaan kutsua hybridirakenteeksi. Tarkoituksena oli arvioida

rakenteen toimintaa kuormitustasoilla, jotka ylittivät selvästi tavanomaiset käyttökuormat. Tulokset osoittivat materiaalien tehokkaan yhteistoiminnan: puu vastasi erityisesti vetorasitusten kantamisesta mahdollistaen kevyen rakenteen, betoni paransi puristuskapasiteettia ja lisäsi jäykkyyttä, kun taas teräs kasvatti kantokykyä erityisesti suurilla jänneväleillä. Näiden materiaalien yhdistelmä mahdollistaa verrattain ohuen mutta samalla erittäin lujan välipohjarakenteen, mikä näkyi myös testin tuloksissa.

Täysimittaisen testauksen etuna oli mahdollisuus havainnoida ilmiöitä, joita pienemmän mittakaavan kokeissa ei aina kyetä luotettavasti arvioimaan. Esimerkiksi kuormien jakautuminen, liitosten toiminta, halkeamien muodostuminen sekä koko rakenteen muodonmuutokset vastasivat paremmin todellisen rakennuksen käyttäytymistä. Näin saatiin arvokasta tietoa rakenteen toiminnasta käytännön olosuhteita vastaavissa tilanteissa.



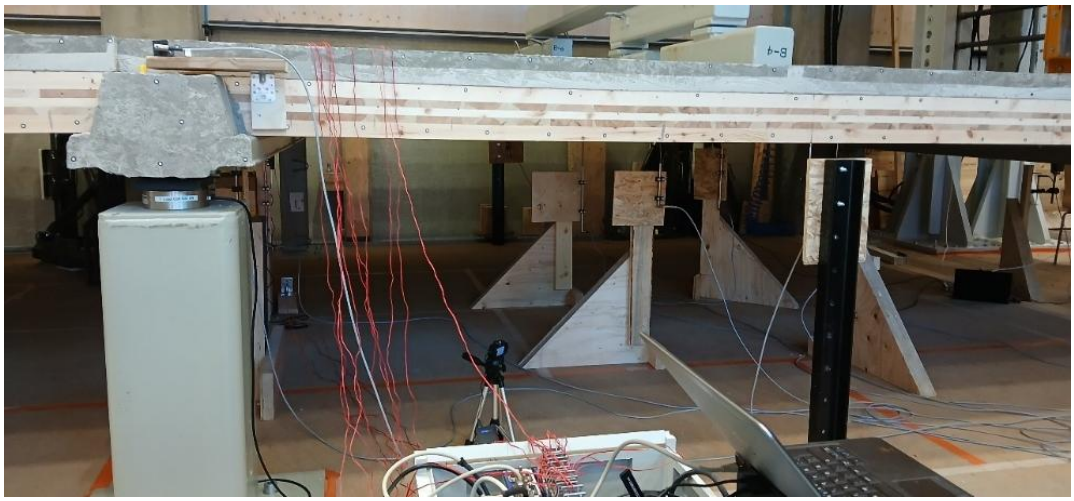
Kuva 67. Kuormituskokeen aloitus

Kuormituskokeessa välipohjaan kohdistettiin lineaarisesti kasvavaa kuormitusta. Kuormituksen lisäämistä jatkettiin siihen asti, kunnes rakenne saavutti maksimi kuormankantokykynsä. Kuormituskokeen toteutuspäivänä liittovalun betoni oli kovettunut 17 vuorokautta.



Kuva 68. Kuormituskokeessa käytettiin teräspalkistoa, joka jakoi kuorman viivakuormana tasaisesti välipohjarakenteelle – palkiston etäisyys 1677 DELTABEAM®-palkin reunasta.

Testin aikana havainnoitiin muun muassa rakenteen taipumaa, kuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia, halkeamien syntymistä, kuormituksen jakautumista, rakenteen kokonaiskäyttäytymistä ja lopullista murtumismekanismia.



Kuva 69. Välipohjarakenteen muutosten seuraaminen antureiden avulla

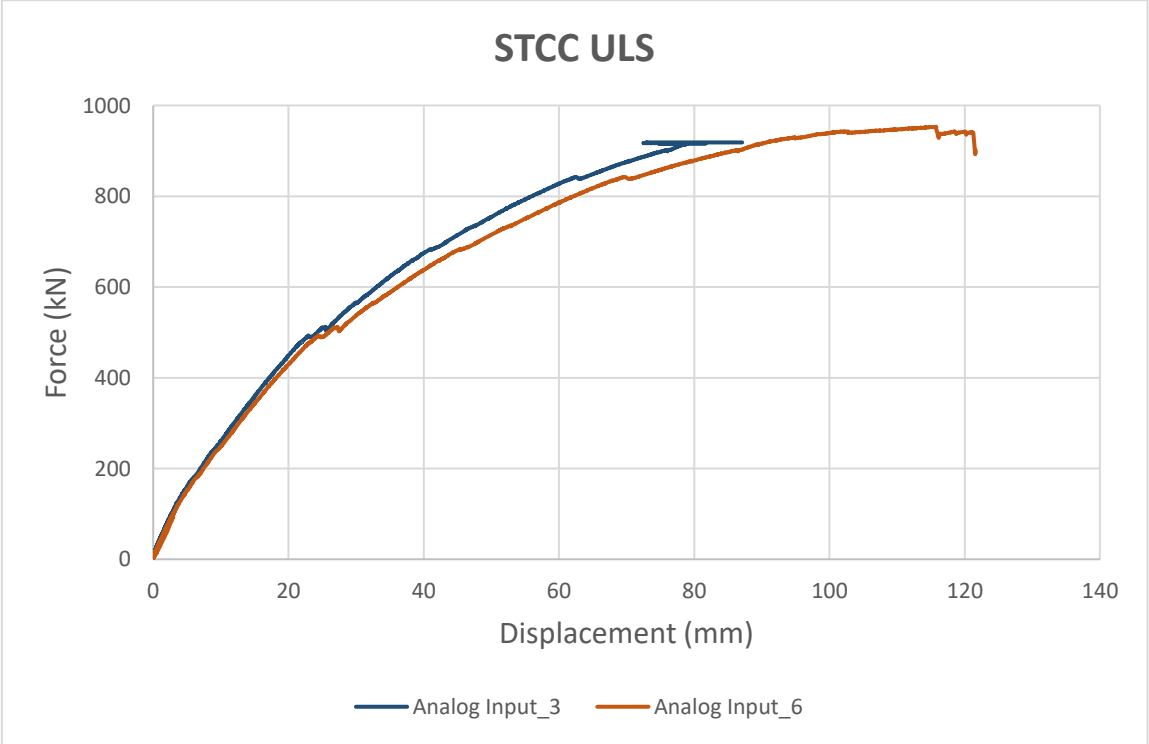
3.2.1 Kantokyky ja kuormituskäyttäytyminen

Kuormituksen kasvettua rakenteeseen syntyi hitaasti näkyviä muodonmuutoksia. Tämä on tyypillistä rakenteille, joiden käyttäytyminen on duktiilia eli sitkeää. Tällöin rakenne ei menetä kantokykyään välittömästi ensimmäisen vaurion syntyessä, vaan

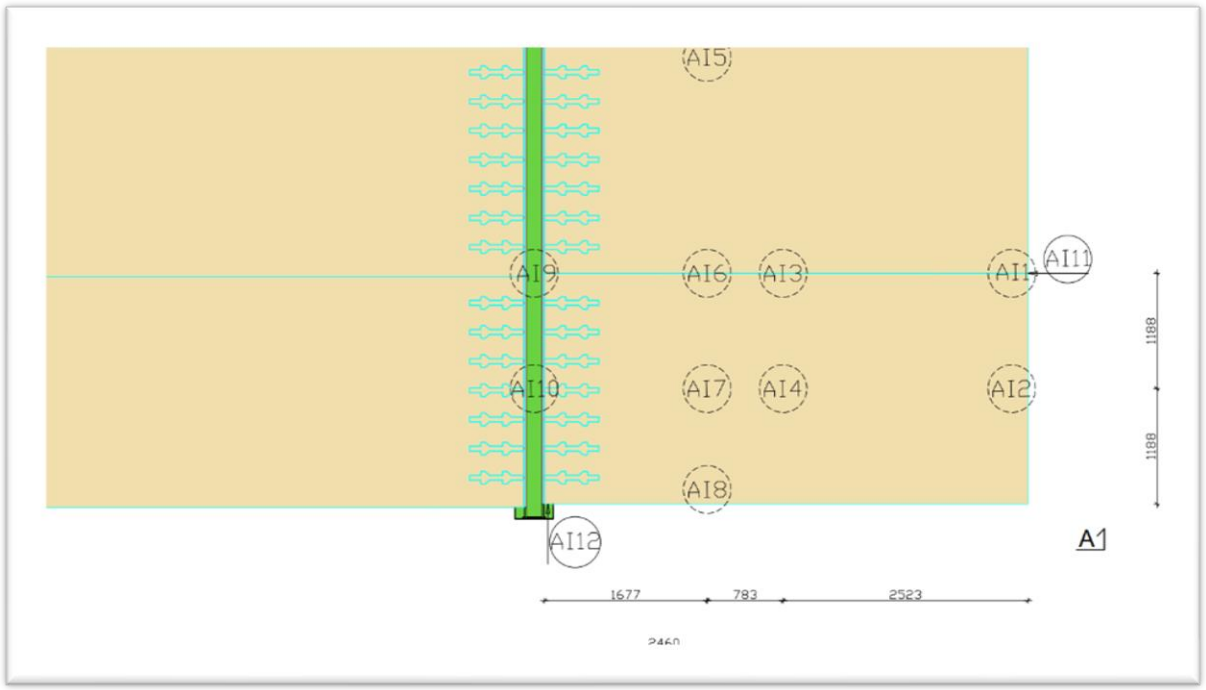
kykenee edelleen vastaanottamaan kuormitusta ja antaa näin varoituksen mahdollisesta vauriosta ennen lopullista murtumista. Tätä kuvastaa jännevälin keskellä taipuman kasvaminen 120 mm:n asti ennen rakenteen lopullista murtumista.



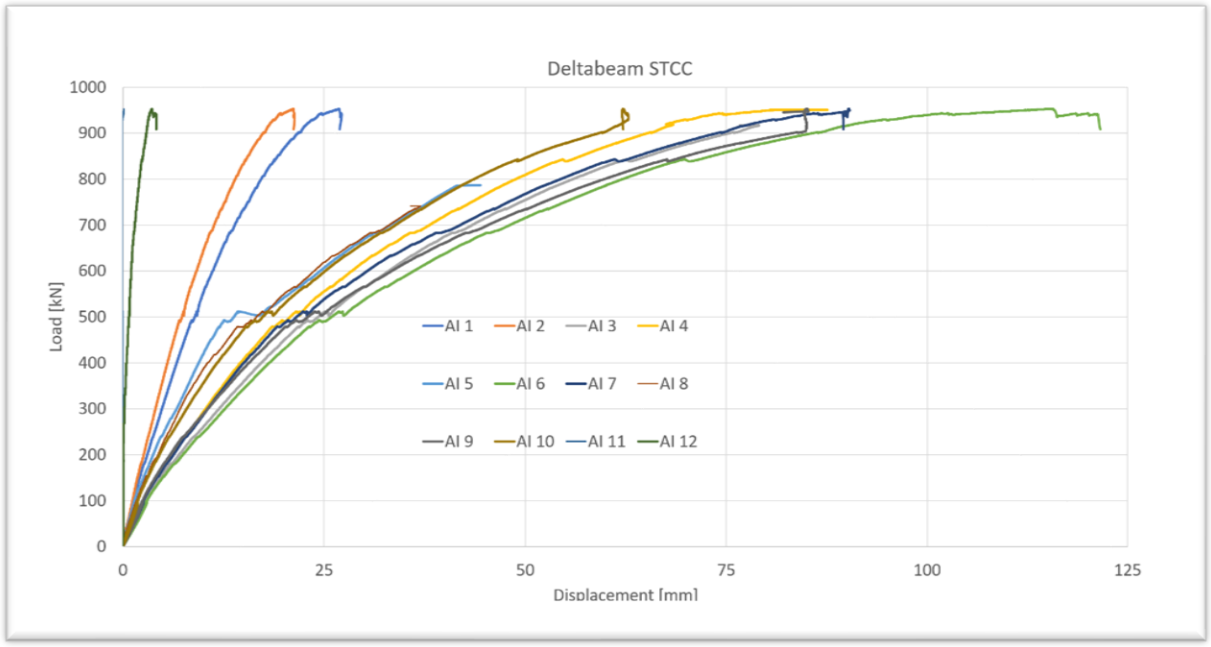
Kuva 70. Ensimmäisten näkyvien muodonmuutosten syntyminen



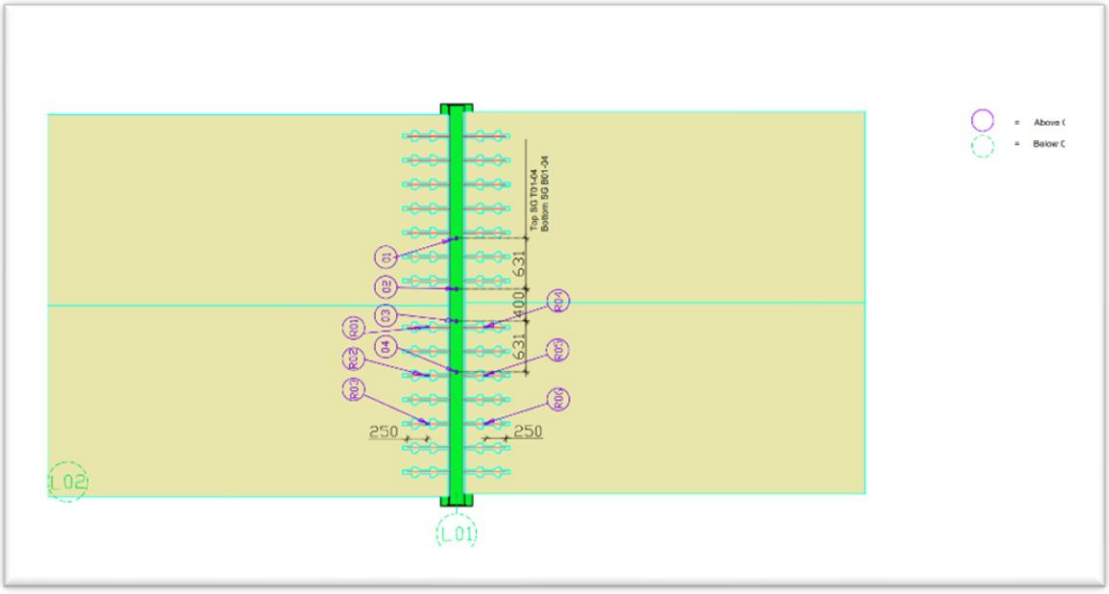
Kuva 71. Välipohjarakenteen lopullinen maksimi kantokyky oli 953 kN



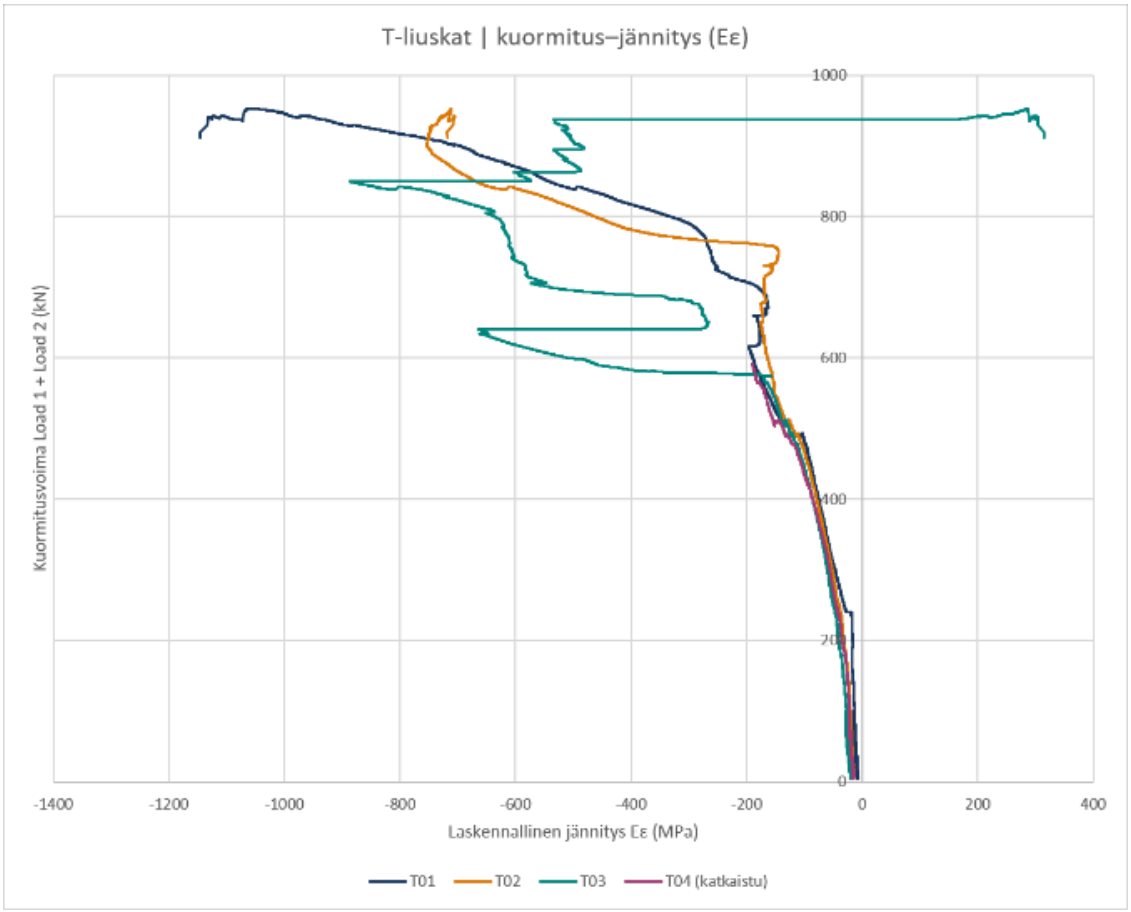
Kuva 72. Siirtymäantureiden sijainnit



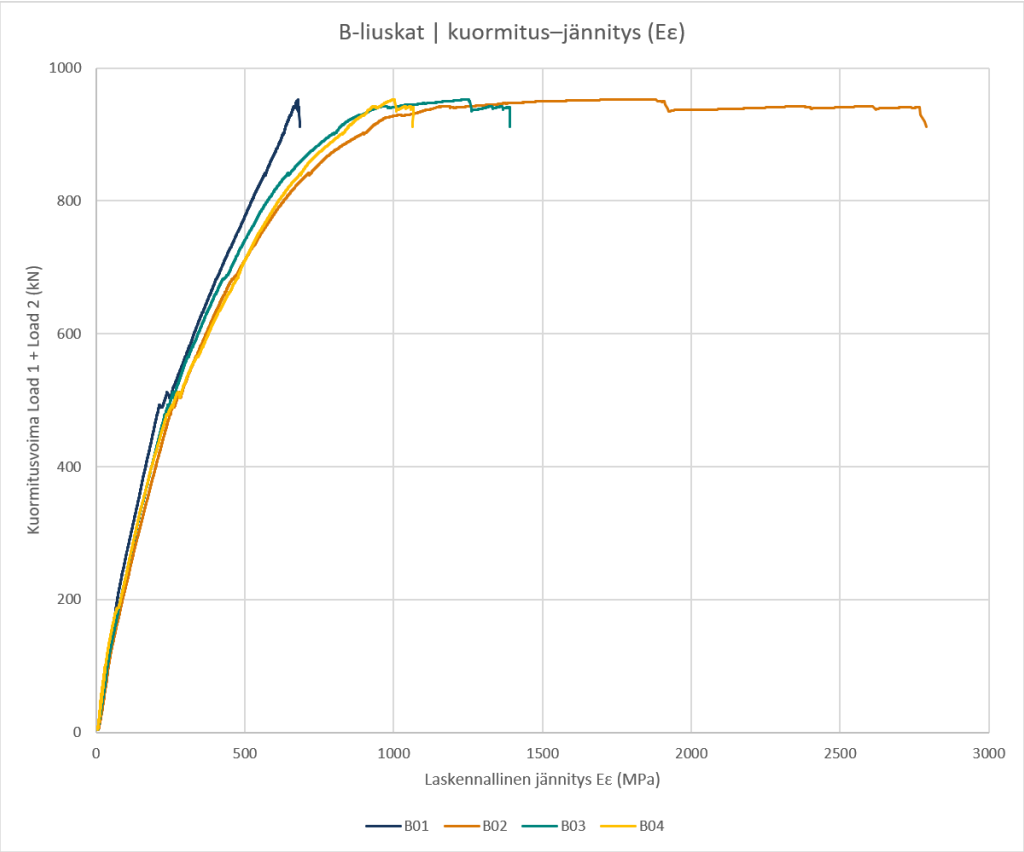
Kuva 73. Siirtymäantureiden kuvaajat



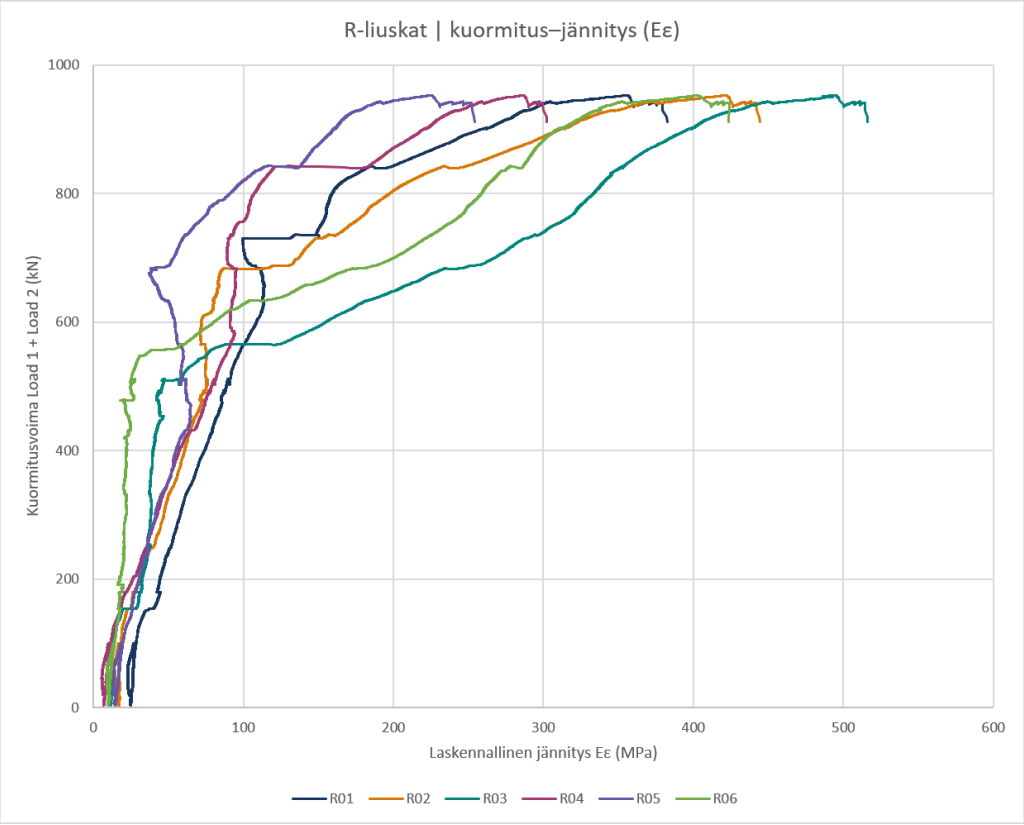
Kuva 74. Venymäliuskojen sijainnit



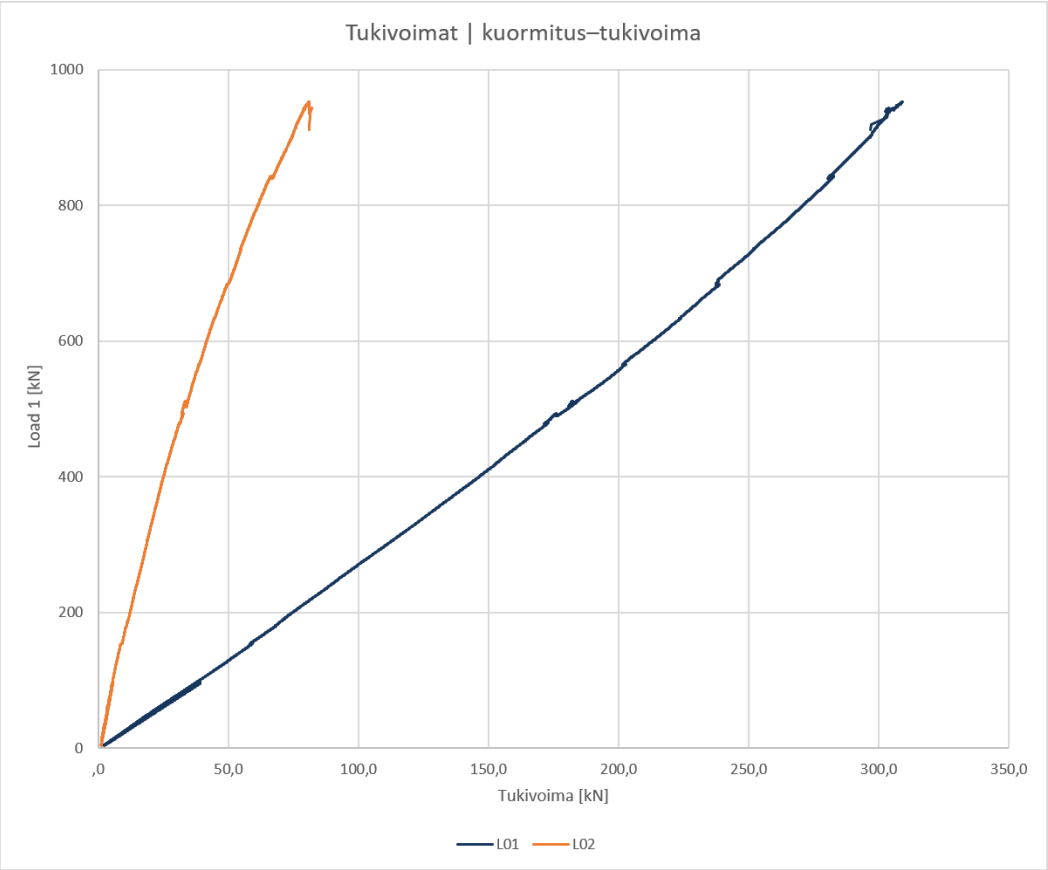
Kuva 75. Venymäliuskat - DELTABEAM®-palkin yläpinnassa



Kuva 76. Venymäliuskat – DELTABEAM®-palkin alapinnassa



Kuva 77. Venymäliuskat - harjateräksissä



Kuva 78. Tukivoimat kahden pilarin osalta

3.2.2 Vauriot ja murtumismekanismi

Ennen murtumistaan rakenne rakenteesta kuului vaurioista kuuluvia ääniä, mikä viittaa leikkausliittimien(ruuvien) leikkautumiseen. Betoni pysyi kuitenkin pääosin tiukasti kiinni CLT:n pinnassa. Vain CLT-panel 2:n kuormituslinjan läheisyydessä betoni irtosi silminnähden alustastaan ja puun ja betonin väliin syntyi noin 5mm:n levyinen rako. Betoni halkeili alustasta irronneen osuuden läheisyydessä, sekä keskituella, DELTA-BEAM®-palkin molemmin puolin. Halkeilu oli kuitenkin hyvin hillittyä, eikä laatasta irronnut yhtään irtonaista palaa kuormituksen aikana.



Kuva 79. Lopulliset vauriot CLT-panel 2 kyljsen puolella. Betoni on halkeillut ja 5mm irti CLT:n pinnasta.



Kuva 80. Betonivalun halkeilua keskituella, DELTABEAM®-palkin pään kohdalla

CLT-levyjä tarkemmin tutkiessa havaitsimme, että CLT-panel 2:n ja 4:n alalamelleja oli jonkin verran katkennut. CLT-levyjen kohtaloksi koitui siis taivutusmurto. Myös levyjen 2 ja 4 välinen rako oli kasvanut ja oli suurempi DELTABEAM®-palkkia kohti mentäessä.

CLT-panel 1 ja 3 alueilla ei ollut nähtävissä vaurioita, niiden puoli asetelmasta säilyi ehjänä. DELTABEAM®-palkki ei palautunut kuormituksen jälkeen enää alkuperäiseen muotoonsa, vaan siihen jäi noin 100mm:n suuruinen pysyvä taipuma.



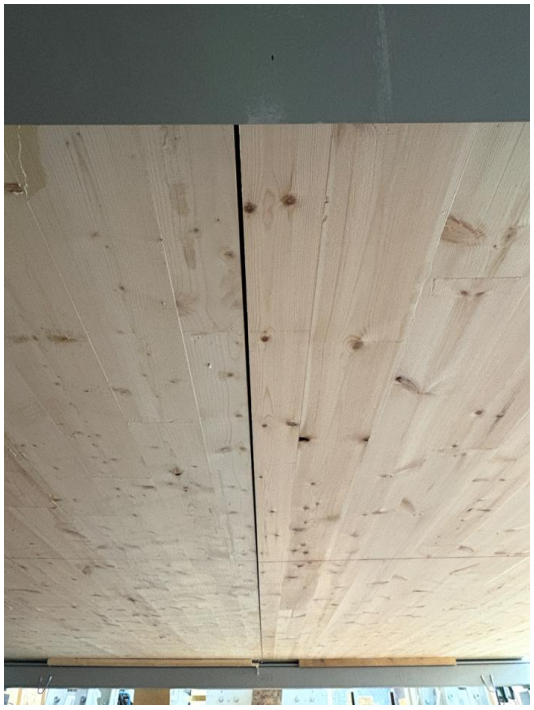
Kuva 81. Lähikuva CLT-panel 2:n kyljestä. Myös CLT on murtunut alapinnastaan (taivutusmurto), alalamelli on katkennut sormijatkoksen viereltä.



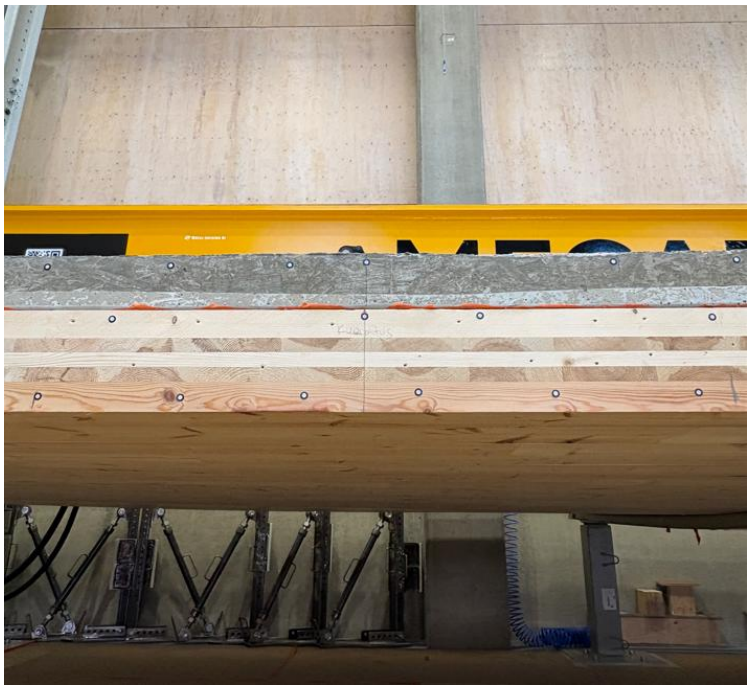
Kuva 82. CLT-panel 2:n alapinta. Yksi alalamelli katkennut oksan kohdalta.



Kuva 83. CLT-panel 4:n kylki ja alapinta. Reunimmainen CLT:n alalamelli katkennut sormijatkoksen viereltä. Kaksi alalamellia poikki myös keskemmältä, oksien kohdilta (taivutusmurto).



Kuva 84. CLT-panel 4:n ja 2:n välinen sauma DELTABEAM®-palkin suunnasta katsottuna. Rako levenee DELTABEAM®-palkkia kohti.



Kuva 85. CLT-panel 1:n kylki ja alapinta kuomrituksen jälkeen, kuormituslinjan kohdalta. Ei silmin nähtäviä vaurioita. Betoni tiukasti kiinni alustassaan.

Kuormituskokeen tavoitteena oli kuormittaa välipohjarakenne 1000 kN:n kuormitukseen asti. Rakenne kesti kuormitusta 953 kN:n tasolle saakka, mikä vastasi noin 19 kN/m² kuormitusta koko noin 50 m²:n suuruiselle koerakenteelle. Kuormitustaso vastasi noin kymmenkertaista mitoituskuormaa, mikä osoittaa rakenteen poikkeuksellisen suuren kantokyvyn tavanomaisiin käyttötilanteisiin verrattuna.



Kuva 86. Välipohjarakenne kesti kuormitusta 19 kN/m²

3.2.3 Tulosten yhteenveto

Kokeen aikana havaittiin, että puun, betonin ja teräksen välinen yhteistoiminta säilyi tehokkaana aina lähelle murtorajaa. Rakenteen eri materiaalikomponentit pystyivät yhdessä vastaanottamaan huomattavan suuria kuormia, mikä korostaa hybridiratkaisun etuja verrattuna yksimateriaalisisiin rakenteisiin. Kuormituksen kasvaessa rakenteessa havaittiin hallittua halkeilua, muodonmuutosten asteittaista kasvua sekä sitkeää käyttäytymistä ennen lopullista murtumista. Rakenteen käyttäytyminen oli ennakoitavaa, eikä äkillistä tai hallitsematonta sortumista tapahtunut.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että puu–betoni–teräs-hybridirakenne tarjoaa erinomaisen kantokyvyn, jäykkyyden ja erityisesti turvallisuusmarginaalin merkittävän muodonmuutoskyvyn seurauksena. Täysimittainen testaus tuotti arvokasta tietoa rakenteen toiminnasta todellisia käyttöolosuhteita vastaavassa mittakaavassa. Tällaiset kokeet ovat kansainvälisestikin verrattain harvinaisia niiden suuren koon, korkeiden kustannusten ja vaativien valmisteluiden vuoksi, minkä vuoksi niiden tuottama tutkimustieto on erityisen arvokasta.

Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää uusien välipohjaratkaisujen kehittämisessä, materiaalien käytön optimoinnissa sekä suunnittelu- ja laskentamenetelmien luotettavuuden varmentamisessa. Lisäksi kokeen tulokset lisäävät ymmärrystä puu–betoni–teräs-hybridirakenteiden käyttäytymisestä ja vahvistavat niiden potentiaalia tulevaisuuden vähähiilisessä rakentamisessa.

Puurakentamisen yleistyessä tarve pitkäjänteisille, resurssitehokkaille ja vähähiilisille välipohjaratkaisuille kasvaa. Hybridirakenteissa puun keveys ja hiiltä sitovat ominaisuudet yhdistyvät betonin jäykkyyteen sekä teräksen lujuuteen. Näiden materiaalien yhteistoiminnalla voidaan saavuttaa suorituskykyisiä rakenteita, jotka mahdollistavat pidemmät jännevälit, tehokkaan materiaalien käytön sekä kestävän rakentamisen tavoitteiden saavuttamisen.

LÄHTEET

Youtube video. From Optimisation to Extreme Testing: The HIFO PuuHyVä Project (Real Test)! | [4K]. https://www.youtube.com/watch?v=Nt9BNiox2_g&t=19s.

KUVALUETTELO

Kuva 1. Hybridirakenteinen välipohja
Kuva 2. Liittolaattalattia
Kuva 3. Teräksinen päätypilari ja -palkki
Kuva 4. Deltabeam® D20-200
Kuva 5. Voima-anturi DELTABEAM®-palkin ja pilarin välissä
Kuva 6. Venymäliuskan kiinnitys liimalla DELTABEAM®-palkin yläpintaan
Kuva 7. Venymäliuskojen kiinnitys kolmeen harjateräkseen, molempiin päihin.
Kuva 8. Venymäliuskan kiinnitys harjateräkseen
Kuva 9. Venymäliuskojen sijainnit DELTABEAM®-palkissa ja harjateräksissä
Kuva 10. CLT-elementtien asennus päätyteräspalkkien päälle
Kuva 11. CLT-elementtien asennus DELTABEAM®-palkin leukojen päälle, elementtejä ei kiinnitetty DELTABEAM®-palkkiin
Kuva 12. CLT-elementtien järjestys liittolaattalattiassa
Kuva 13. CLT-elementtikuva, jossa on toisessa päässä koloukset juotosvalua varten
Kuva 14. CLT-elementtien koloukset, jotka olivat DELTABEAM®-palkkia kohti
Kuva 15. Lattian alapuolelle asennettiin mustat terästolpat, jotka mittasivat taipumaa mittakellojen avulla
Kuva 16. CLT-elementtien kiinnitys vinoruuveilla
Kuva 17. Harjaterästen T8 k300 L1230 sijainti CLT-elementtien varauskoloissa
Kuva 18. Harjateräs asennettuna CLT-elementtien varauskoloihin
Kuva 19. Harjaterästen asennus varauskoloihin, venymäliuskat kolmessa harjateräkä
Kuva 20. Tuennat DELTABEAM®-palkin alle juotosvalun ajaksi
Kuva 21. Juotosbetonivalu ja tiivistys betonitäryllä
Kuva 22. Valmis juotosvalu kovettunut 14 vuorokautta
Kuva 23. Valmis juotosvalu ja venymäliuskojen johdot
Kuva 24. Juotosvalun kovetuttua, DELTABEAM®-palkin päädyn muotti purettiin pois
Kuva 25. Ruuvityyppi
Kuva 26. Ruuvauskaavio
Kuva 27. CLT-elementteihin asennetut ruuvit 3 kappaleen ryhmissä
Kuva 28. CLT-elementteihin asennetut ruuvit ruuvauslinjojen mukaisesti
Kuva 29. Kuormitustestauspalkiston asettelua ennen kuormitusta Load Framella
Kuva 30. Raudoituskaavio
Kuva 31. CLT-elementtien päälle asennetut raudoitusverkot, limitys 600 mm.

Kuva 32. Liittovalu tehtiin pumppuauton avulla ja tiivistys betonitäryllä
Kuva 33. Betonivalun pinnan tasoitus
Kuva 34. Betonipinnan hiertäminen
Kuva 35. Valmis liittovalu
Kuva 36. Valumuotit irrotettuina
Kuva 37. Lattiarakenteen poikittaissuuntainen käyristyminen, tuen kohdalla kulmissa havaittavissa oleva rako
Kuva 38. Laserkeilauksen kohdistuspisteet
Kuva 39. Siirtymäanturit valmiina lattian alapuolella mittaamaan murtorajatilakuormituksen lineaarista liikettä
Kuva 40. Siirtymäanturit asennettuna lattian alapuolella
Kuva 41. Siirtymäantureiden sijainnit
Kuva 42. Horisontaalisten siirtymäanturien paikat
Kuva 43. Siirtymäanturien johdot kiinnitettynä tiedonkeruujärjestelmään
Kuva 44. Murtorajatilakuormituksen valmistelu
Kuva 45. Heel Drop ja taipumamittauskohdat
Kuva 46. Teräspalkkien taipumamittaukset, 1 kN kuorma
Kuva 47. Teräspalkkien ominaistaajuumittaukset
Kuva 48. Taipumamittaus 1 kN painolla CLT-elementtien asennuksen jälkeen
Kuva 49. Taipumamittaustulokset CLT-elementtien asennuksen jälkeen, 1 kN kuorma
Kuva 50. Ominaistaajuusmittaustulokset CLT-elementtien asennuksen jälkeen
Kuva 51. Taipumamittaustulokset vinoruuvauksen jälkeen, 1 kN kuorma
Kuva 52. Ominaistaajuusmittaukset vinoruuvauksen jälkeen
Kuva 53. Taipumamittaukset juotosvalun jälkeen, 1 kN kuorma
Kuva 54. Ominaistaajuusmittaukset juotosvalun jälkeen
Kuva 55. Juotosbetonin lujuuden kehitys koekappaleissa
Kuva 56. Liittovalun betonin koekappaleiden lujuuden kehitys
Kuva 57. Ominaistaajuusmittaukset liittolaattalattialle Heel-Drop-menetelmällä
Kuva 58. Valmiin liittolaattalattian taipumamittaustulokset, 1 kN kuorma
Kuva 59. Valmiin liittolaattalattian ominaistaajuusmittaustulokset
Kuva 60. Taipuma- ja ominaistaajuusmittausten mittapisteiden paikat
Kuva 61. Taipumamittaustulokset eri rakennusvaiheissa, 1 kN kuormasta
Kuva 62. Ominaistaajuusmittaustulokset eri rakennusvaiheissa
Kuva 63. Testirakenteen taipuma rakennusvaiheen aikana

Kuva 64. Mittauskohdat testijärjestelyssä
Kuva 65. Värähtelyantureiden tuottama data 23.4. tehtyjen ominaistaajuusmittausten ja kävelytestien aikana, tallenteen kesto noin 2 tuntia. Pystysuuntaiset kiihtyvyysmuutokset eri mittapisteissä, skaala 1G±0.1G. Ominaistaajuusmittauksissa värähtelyä oli mitattavissa noin 5 sekuntia kaikilla antureilla Heel-drop impulssin suorittamisen jälkeen.
Kuva 66. Arduino kiihtyvyysantureiden sijainnit, asetelman alapuolella ja kyljissä.
Kuva 67. Kuormituskokeen aloitus
Kuva 68. Kuormituskokeessa käytettiin teräspalkistoa, joka jakoi kuorman viivakuormana tasaisesti välipohjarakenteelle
Kuva 69. Välipohjarakenteen muutosten seuraaminen antureiden avulla
Kuva 70. Ensimmäisten näkyvien muodonmuutosten syntyminen
Kuva 71. Välipohjarakenteen lopullinen maksimi kantokyky oli 953 kN
Kuva 72. Siirtymäantureiden sijainnit
Kuva 73. Siirtymäantureiden kuvaajat
Kuva 74. Venymäliuskojen sijainnit
Kuva 75. Venymäliuskat - DELTABEAM®-palkin yläpinnassa
Kuva 76. Venymäliuskat – DELTABEAM®-palkin alapinnassa
Kuva 77. Venymäliuskat - harjateräksissä
Kuva 78. Tukivoimat kahden pilarin osalta
Kuva 79. Lopulliset vauriot CLT-panel 2 kyljsen puolella. Betoni on halkeillut ja 5mm irti CLT:n pinnasta.
Kuva 80. Betonivalun halkeilua keskituella, DELTABEAM®-palkin pään kohdalla
Kuva 81. Lähikuva CLT-panel 2:n kyljestä. Myös CLT on murtunut alapinnastaan (taivutusmurto), alalamelli on katkennut sormijatkoksen viereltä.
Kuva 82. CLT-panel 2:n alapinta. Yksi alalamelli katkennut oksan kohdalta.
Kuva 83. CLT-panel 4:n kylki ja alapinta. Reunimmainen CLT:n alalamelli katkennut sormijatkoksen viereltä. Kaksi alalamellia poikki myös keskemmältä, oksien kohdilta (taivutusmurto).
Kuva 84. CLT-panel 4:n ja 2:n välinen sauma DELTABEAM®-palkin suunnasta katsottuna. Rako levenee DELTABEAM®-palkkia kohti.
Kuva 85. CLT-panel 1:n kylki ja alapinta kuomrituksen jälkeen, kuormituslinjan kohdalta. Ei silmin nähtäviä vaurioita. Betoni tiukasti kiinni alustassaan.
Kuva 86. Välipohjarakenne kesti kuormitusta 19 kN/m²

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Välipohjan rakennusvaiheet