



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# LVL-SEINÄELEMENTTIEN VÄLISEN TERÄSLEVYLIITOKSEN KUORMITUS- KOKKEET

TEKIJÄ: Erkka Puustinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Erkka Puustinen			
Työn nimi LVL-seinäelementtien välisen teräslevyliitoksen kuormituskokeet			
Päiväys	28.5.2020	Sivumäärä/Liitteet	62/1
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja rakennetekniikan lehtori, DI Matti Mikkonen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Puu paremmaksi -hanke			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä kuormituskokeita LVL-seinäelementtien väliselle teräslevy-ruuviliitokselle. Työssä analysoitiin kokeiden tuloksia ja pohdittiin liitoksen soveltuvuutta puukerrostalon jäykistävien seinäelementtien liitoksiin. Liitoksessa liitettävien LVL-massiivielementtien syrjiin upotetaan teräslevy, joka kiinnitetään ankkuriruuveilla elementteihin. Kuormituskokeissa pyrittiin aineenkoestuskoneen avulla simuloimaan rakennukseen kohdistuvien vaakavoimien aiheuttamia leikkausvoimia elementtien saumoissa. Työ on osa uuden LVL-puukerrostalojärjestelmän kehittämistä.</p> <p>Koekappaleet valmistettiin ja kokeet toteutettiin Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa. Tutkittavaa liitosta kuormitettiin kokeissa elementtien saumojen suuntaisesti. Koekappaleita tehtiin käyttämällä eri ruuvimääriä ja puun pääasiallista syysuuntaa vaihtamalla. Liitoksessa käytettäville ruuveille tehtiin myös erikseen vetokokeita. Koejärjestelyt ja kokeisiin tarvittavat osat tehtiin yhteistyökumppani Per-Anders Daergan suunnitelmien mukaan. Työn teoriaosuudessa käytiin läpi LVL:ää rakennusmateriaalina ja uutta rakennejärjestelmää sekä laskettiin Eurokoodistandardien mukaan liitoksen laskennallinen kapasiteetti.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin mittauslaitteiden tulokset liitoskokeista, joita työssä analysoitiin ja verrattiin laskennallisiin tuloksiin. Analysoinnin tueksi kaikki työvaiheet dokumentoitiin valokuvoin ja koekappaleille tehtiin kokeiden jälkeisiä avauksia. Liitostyyppi todettiin toimivaksi sen suunniteltuihin käyttötarkoituksiin. Liitosta voisi kuitenkin kehittää esimerkiksi testaamalla sitä eri liitintyypeillä ja -väleillä. Tätä työtä voi käyttää osana liitoksen jatkokehitystä.</p>			
Avainsanat LVL, liitoskokeet, kuormituskokeet, puuliitokset, liitos, puukerrostalo			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Engineering			
Author Erkka Puustinen			
Title of Thesis Tensile Tests for a Screwed Steel Plate Connection between LVL Wall Panels			
Date	28 May 2020	Pages/Appendices	62/1
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, PhD, Principal Lecturer and Mr Matti Mikkonen, M.Sc., Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners <i>Puu paremmaksi</i> project			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final project was to make load tests for a screwed steel plate connection between LVL wall panels. In this thesis the test results were analyzed and the suitability of the connection for joining stiffening wall elements of a multi-storey timber building was reflected. In this connection, a steel plate is embedded in the edge of the LVL solid panels to be joined. The steel plate is then attached to the elements with anchor screws. The load tests were made with a material testing machine to simulate the shear forces in the panel joints caused by the horizontal forces acting on the building. The work is a part of the development of a new LVL structural system.</p> <p>The test specimens were prepared, and the tests were performed in the timber testing laboratory of Savonia University of Applied Sciences. In the tests the connection was loaded parallel to the seams of the panels. The test specimens were made with different amounts of screws and by changing the main grain direction of the wood. Separate tensile tests were also made to the screws used in this connection. The test arrangements and parts required for the tests were made according to the plans of Per-Anders Daerga, an associate in this project. In the theoretical part of the thesis, the LVL as a construction material and the new structural system were reviewed and the capacity of the connection was calculated according to the Eurocode standards.</p> <p>As a result of the thesis, the results of the connection tests were obtained from the measuring devices and they were analyzed and compared to the calculated results. To support the analysis, all work stages were documented by photographing, and the specimens were taken apart after the tests. The connection type was found to be functional for its intended uses. However, the connection could be developed, for example, by testing it with different connector types and spacings. This work can be used as a part of a further development of the connection.</p>			
<p>Keywords LVL, connection tests, strength tests, timber connections, joint, multi-storey timber building</p>			

## ESIPUHE

Haluan kiittää opinnäytetyön ohjaajaa, rakennetekniikan yliopettaja Arto Puurulaa työn tarjoamisesta ja ohjaamisesta, testausinsinööri Emmi Närheä laboratoriotilojen esittelystä ja testeissä avustamisesta sekä laboratorioinsinööri Juha Lehtikantoa kuormituskokeissa ohjaamisesta.

Lisäksi haluan kiittää syksyn 2019 Puurakenteet 3 -kurssin osallistujia kokeissa ja koekappaleiden valmistuksessa avustamisessa. Kiitos Karri Huikuri, Kari Kukkonen, Ville Laitinen, Jesse Lampinen, Marianne Luostarinen, Paavo Luukkonen, Herkko Nykänen, Paavo Paasonen, Jaakko Palokangas, Anna Raatikainen, Eemil Ruotsalainen, Topi Tynkkynen, Veera Varis, Oskari Viiliäinen ja Joni Åman.

## SISÄLTÖ

ALKUSANAT .....	4
1 JOHDANTO .....	7
1.1 Puu paremmaksi -hanke .....	7
1.2 Lyhenteet ja määritelmät.....	8
2 LVL RAKENNUSMATERIAALINA .....	9
3 RAKENNEJÄRJESTELMÄ PUUKERROSTALOILLE .....	13
4 LVL-SEINÄELEMENTTIEN VÄLINEN LIITOS .....	15
5 LIITOKSEN LASKENNALLINEN KAPASITEETTI .....	18
5.1 Puikkoliitosteoria .....	18
5.2 Liitokseen kohdistuvia kuormia .....	18
5.3 Lähtötiedot.....	19
5.4 Ruuviryhmän kestävyys.....	21
5.5 Puusta murtuminen.....	27
5.6 Teräslevyn reunapuristuslujuus.....	27
6 LIITOSKOKEET .....	30
6.1 Koesuunnitelma .....	30
6.2 Koekappaleiden valmistus.....	31
6.3 Ekstensometrien kalibrointi .....	33
6.4 Liituskokeiden suoritus .....	35
6.4.1 Testauslaitteisto.....	35
6.4.2 Koestus .....	36
6.5 Koetulosten analysointi.....	37
6.5.1 Koesarja A1 .....	39
6.5.2 Koesarja A2 .....	42
6.5.3 Koesarja B1 .....	45
6.5.4 Koesarja B2 .....	48
6.5.5 Yhteenveto .....	51
6.6 Vertailu laskennallisiin tuloksiin .....	53
6.7 Ruuvien myötömomentin testaus.....	54
6.7.1 Koestus .....	54
6.7.2 Koetulosten analysointi.....	56

6.7.3 Myötömomentin laskenta.....	57
7 POHDINTA.....	60
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	61
LIITE 1: VETOKOKEIDEN TULOKSET .....	63

## 1 JOHDANTO

Materiaali-, tuotanto ja rakennustekniikan kehitys mahdollistaa nyt suurtenkin rakennuskompleksien pystytyksen kokonaan käyttämällä puurunkoa. Puukerrostalorakentamisen ratkaisuihin ja eri ratkaisujen yhteensovittamisessa on kuitenkin edelleen kehittämiskohteita, joihin paneutuminen on nyt ajankohtaista. Opinnäytetyössä tutkitaan Per Anders Daergan suunnittelemaa LVL-seinäelementtien välistä piiloliitosta, joka toteutetaan LVL-elementin syrjään upotetun teräslevyn sekä ruuvien avulla. Liitoksen tutkimustyö on osa uuden LVL-rakennejärjestelmän kehittämistä.

Tutkittava liitos toimii osana LVL-rakenteisen puukerrostalon jäykistämistä ja sitä on tarkoitus käyttää seinäelementtien välisissä liitoksissa. Opinnäytetyössä tutkitaan liitoksen kykyä ottaa vastaan vierekkäisten sekä päällekkäisten seinäelementtien saumoihin kohdistuvia voimia. Tarkastelua varten tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa 12 koekappaletta, joita kuormitettiin aineenkuestuslaitteella LVL-kappaleiden välisen sauman suunnassa simuloiden tuulen ja muiden vaakakuormien aiheuttamaa elementtien väliin kohdistuvaa leikkausvoimaa. Lisäksi liitoksessa käytettäville ruuveille tehtiin poikittaiskuormituskokeita sen myötömomentin laskemiseksi.

Työn teoriaosuudessa esitellään LVL:n ominaisuuksia, valmistusta ja käyttökohteita. Teoriaosuudessa esitellään myös kehitteillä oleva puukerrostalojen rakennejärjestelmä, johon tämä tutkimustyö liittyy sekä liitos, mitä tutkitaan. Teoriaosuuden jälkeen on laskentaosuus, jossa tarkastellaan liitoksen laskennallinen kapasiteetti nykyaikaisten euronormien pohjalta. Laskentaosuuden jälkeen esitellään liituskokeiden koejärjestelyt, valmistelut, kokeiden suoritus ja tulokset. Koetuloksia analysoidaan kuormitus-siirtymä -kaavioiden sekä koekappaleiden avausten avulla.

Opinnäytetyössä *LVL -rakenteisen puukerrostalon jäykistäminen ja liituskokeet* (Miettinen 2018) tutkittiin samankaltaisen liitoksen kykyä ottaa vastaan elementtien saumaan nähden kohtisuoraan kohdistuvia voimia, jota liitokseen kohdistuu esimerkiksi tuulikuorman imuvaikutuksesta sekä tuulikuorman aiheuttamasta nostavasta voimasta. Opinnäytetyö oli osa MFBS-järjestelmän jatkokehitystä, jossa LVL-levy on kahden masoniittilevyn välissä. Tämä työ osaltaan täydentää myös Miettisen työtä, sillä tässä testattava liitos on hyvin samanlainen kuin Miettisen työssä, ja nyt saadaan tutkittua tietoa myös liitoksen kestävyyydestä toiseen suuntaan.

### 1.1 Puu paremmaksi -hanke

Työn toimeksiantaja on vuoden 2019 alussa käynnistetty Savonia-ammattikorkeakoulun Puu paremmaksi -hanke, jonka tarkoituksena on luoda paikallisille viennin avulla kasvua hakeville puurakentamiseen liittyville toimijoille vientiformaatti tai alusta. Hankkeen kohderyhmänä ovat vientihakuiset Pohjois-Savossa toimivat rakennustuotteita valmistavat yritykset sekä rakentamiseen sidoksissa olevat toimijat kuten esimerkiksi puutuotteiden suunnittelijat, valmistajat, arkkitehtiyrietykset ja ilmanvaihtoyrietykset sekä puuteollisuusalan ja rakennusalan yritykset. (Puu paremmaksi -hanke.)

Työn tarkoituksena on palvella myös toimeksiantajaa. Tässä työssä ollaan mukana kehittämässä uutta liitosta, jota sovelletaan LVL-rakenteisen kerrostalon jäykistämässä ja puuteollisuuden asiakaita tuotteet kiinnostavat varmasti sitä enemmän, mitä enemmän ja mitä parempia käyttötarkoituksia tuotteelle on.

## 1.2 Lyhenteet ja määritelmät

Aksiaalinen = akselin suuntainen, pituussuuntainen

CLT = Cross Laminated Timber, ristiinlaminoitu massiivipuulevy

Ekstensometri = laite, jolla mitataan pituuden muutosta, tässä tapauksessa liitettävien osien välistä siirtymää sekä ruuvien taipumaa

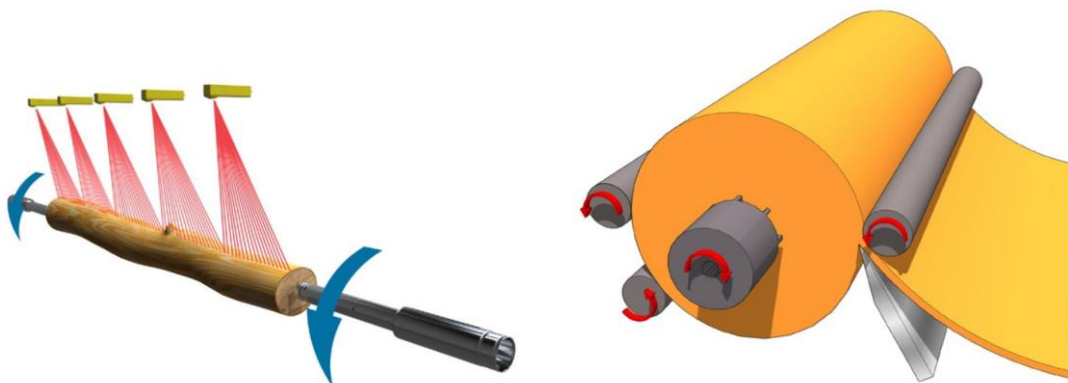
Kalibrointi = mittauslaitteen antaman tuloksen virittäminen vastaamaan mittanormaalia

Köysivaikutus = ilmiö, joka syntyy, kun poikittaiskuormitettu liitin alkaa taipuessaan ottamaan vastaan kuormia myös sen pituussuunnassa

LVL = Laminated Veneer Lumber, viilupuun

## 2 LVL RAKENNUSMATERIAALINA

LVL eli viilupuu on puutavaraa, joka koostuu 3 mm paksuista, havupuusta, pääosin kuusesta sorva-  
tuista puuviiluista, jotka ovat liimattu yhteen fenolipohjaisella liimalla korkean lämpötilan ja paineen  
alla. Muitakin puulajeja LVL:n valmistukseen käytetään, mutta suomalaisista puulajeista kuusella on  
paras paino-lujuussuhde ja sen etuna tuotannon kannalta on myös esimerkiksi mäntyyn verrattuna  
pieni pihkapitoisuus. Puun viiluiksi sorvaaminen ja viilumattojen päällekkäin latominen jakaa puun  
luonnolliset viat, kuten oksakohdat ja halkeamat pitkin valmista tuotetta. Tämä tekee LVL:stä esi-  
merkiksi sahatavaraan verrattuna lujemman ja homogeenisemmän materiaalin. LVL:n sanotaankin  
olevan massaansa nähden kaksi kertaa lujempaa kuin teräs. (LVL-käsikirja, 9, 21.)



KUVA 1. Tukin kohdistus sorvin karojen väliin laserskannauksen avulla (LVL-käsikirja, 27)

KUVA 2. Leikkuuterän avulla viilujen vuoleminen pyörivästä tukista (LVL-käsikirja, 27)

LVL sopii todella moniin käyttötarkoituksiin ja se on helppo yhdistää muihin rakenteisiin ja materiaa-  
leihin. Se voi lähteä tehtaalta korkeassa valmiusasteessa tarkkoihin mittoihin tuotettuna, mikä vä-  
hentää sahausjätettä sekä työmäärää työmaalla. Tehtaalla voidaan esimerkiksi asiakkaan piirustus-  
ten tai 3D-mallien perusteella tehdä CNC-työstönä elementteihin halutut reiät, lovet ja viisteet. LVL  
on toisaalta myös helposti käsin työstettävissä, eikä vaadi perinteiseen puutavaraan verrattuna mi-  
tään erikoistyökaluja. Tehtaalta lähtiessä LVL on kuivaa, kosteuspitoisuudeltaan 8–10 %. (LVL-käsi-  
kirja, 9–11, 34.) Tämä minimoi puulle ominaisen kuivumiskutistumisen, minkä aiheuttamat muodon-  
muutokset voisivat suurissa rakennuksissa osoittautua merkittäviksi.

LVL on myös ympäristöystävällistä, siihen käytetty puu on uusiutuvaa, uudelleen käytettävää ja sen  
sisältämä energia voidaan lopulta ottaa talteen. LVL toimii myös hiilinieluna ja sen materiaalien alku-  
perä on jäljitettävissä. Viilujen liittämiseen käytettävien liimojenkin formaldehydipäästöt alittavat  
standardien raja-arvot reilusti. LVL:ää käytettäessä kantavissa rakenteissa rakenteiden mitat voidaan  
suunnitella pienemmiksi kuin esimerkiksi sahatavaraa käyttämällä. Pienetkin tukit, jotka eivät esi-  
merkiksi sovellu sahatavaraksi, voidaan hyödyntää LVL:n valmistukseen. LVL on kantaviin rakentei-  
siin materiaalimenekin kannalta tehokas tapa hyödyntää puu. Yhden LVL kuutiometrin valmistami-  
seen tarvitaan noin 2,5 m<sup>3</sup> raakapuuta, kun taas esimerkiksi CLT:llä ja liimapuulla vastaava arvo on  
noin 2,6–2,8 m<sup>3</sup>. (LVL-käsikirja, 9, 21.) LVL:n kustannukset ovat kuitenkin luonnollisesti korkeammat  
kuin tavallisella puutavaralla.

LVL-rakenteiden suunnittelussa on otettava kosteustekniset seikat erityisen tarkasti huomioon, sillä kosteuden alla se on altis lahottajasienille, jotka pehmentävät sitä ja vievät siltä lujuutta samalla tavalla kuin tavanomaisessa puutavarassa. Emäksien ja vahvojen happojen kanssa kontaktia on vältettävä. Liima LVL:ssä on säänkestävää, mutta säärasitukselle alttiit rakenteet on syytä pintakäsittää. (LVL by Stora Enso, 12.) Palonkesto LVL:llä on hieman parempi kuin sahatavaralla, mutta puu on monissa kohteissa ja rakenteissa palosuojattava esimerkiksi kemikaaleilla tai levyttämällä. Etuna on kuitenkin se, että puun palokäyttäytyminen on ennalta arvattavaa, mikä helpottaa suunnittelua.

LVL:n viiluja liimataan tuotteesta riippuen joko siten, että kaikki viilut ovat syysuunnaltaan samansuuntaisesti tai siten, että osa viiluista on liimattu ristiin. Yhteen suuntaan liimattuna LVL sopii sauvamaisiin rakenteisiin, kuten palkkeihin ja ristikoihin. Ristiin liimaaminen taas tekee LVL:stä levymäisemmän rakenteen, joka sopii paremmin esimerkiksi seinäelementteihin ja tekee esimerkiksi sen aukottamisesta vapaampaa.



KUVA 3. Stora Enson S-laadun LVL, jossa viilujen syysuunta on sama (Puumerkki.fi)

KUVA 4. Stora Enson X-laadun LVL, jossa osa viiluista on liimattu ristiin (Puumerkki.fi)

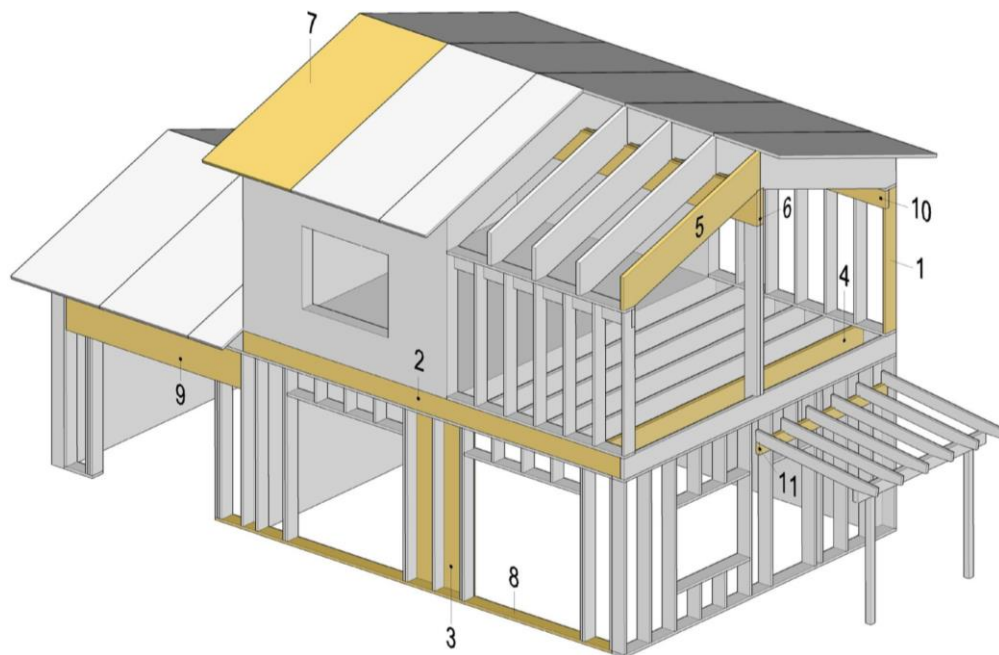
Yhteen suuntaan laminoitujen LVL-tuotteiden käyttökohteita ovat muun muassa (LVL-käsikirja, 10):

- katto- ja lattiapalkit
- aukonylityspalkit
- kattotuolien kannatuspalkit
- kehät
- ristikot
- ripa- ja kotelolaatat
- pystytolpat, pilarit
- sauvamaiset jäykisteet
- tukirakenteet, muotit
- ikkunoiden ja ovien karmit

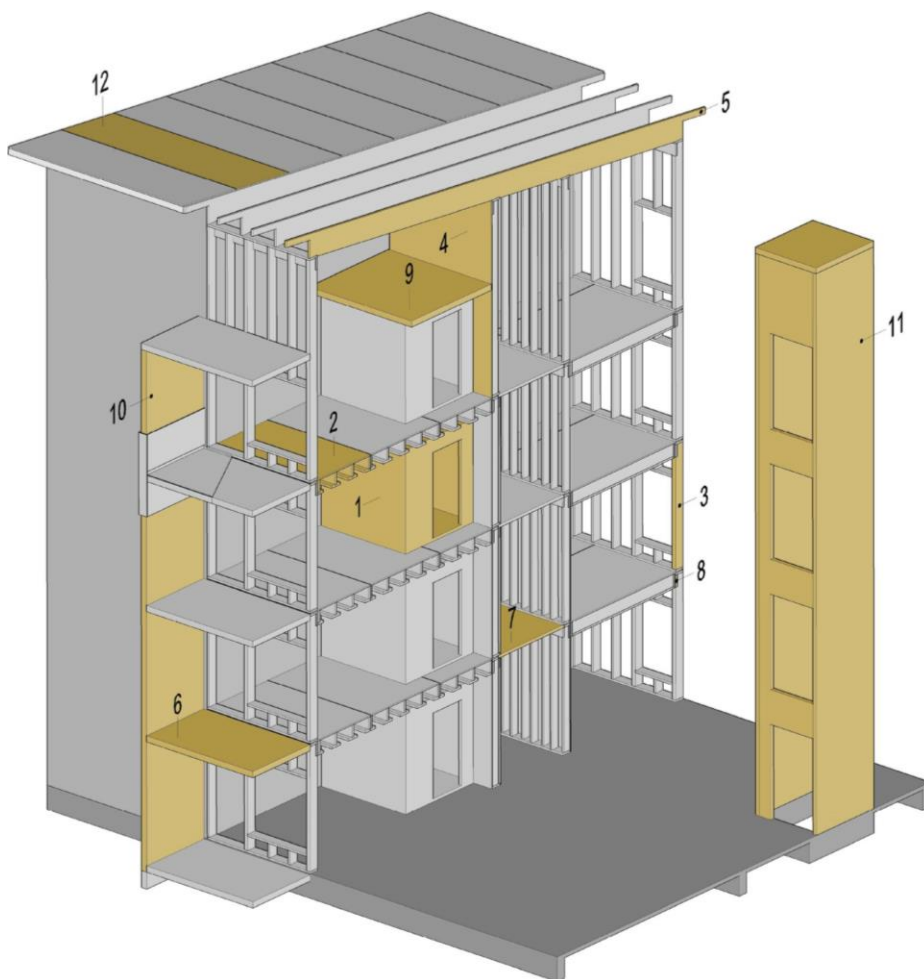
Ristiin laminoitujen LVL- tuotteiden käyttökohteita ovat muun muassa (LVL-käsikirja, 11):

- seinäelementit
- kattoelementit
- lattiaelementit
- muut jäykistävät ja kantavat-levyt
- ulokkeet
- vanhojen rakenteiden lujittaminen
- korkeat palkit
- kaarevat osat
- ovilevyt

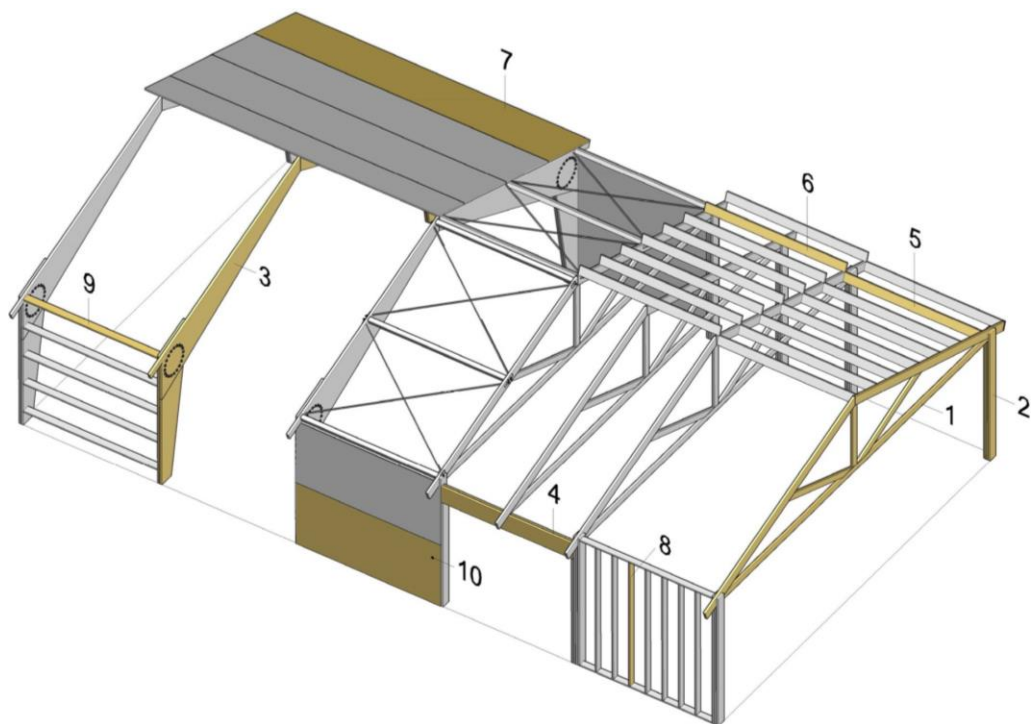
Kuvissa 5, 6 ja 7 on esitetty tyypillisiä LVL:n käyttökohteita.



KUVA 5. LVL-tuotteiden käyttökohteita pientalorakentamisessa (LVL-käsikirja, 12)



KUVA 6. LVL-tuotteiden käyttökohteita kerrostalorakentamisessa (LVL-käsikirja, 13)



KUVA 7. LVL-tuotteiden käyttökohteita hallirakentamisessa (LVL-käsikirja, 15)

### 3 RAKENNEJÄRJESTELMÄ PUUKERROSTALOILLE

Kehitteillä oleva rakennejärjestelmä, johon tämä työ liittyy, on puupohjainen hybridijärjestelmä, joka yhdistää kaksi rakennejärjestelmää; tasoelementti- ja pilari-palkkijärjestelmät. Järjestelmät voidaan yhdistää tai niitä voidaan käyttää erikseen. Myös rakennukset tällä järjestelmällä voivat olla itsenäisiä tai ne voidaan integroida osaksi olemassa olevia rakennuksia. Rakennejärjestelmä on modulaarinen ja joustava, helposti koottavissa ja purettavissa. Se on mukautettavissa toiminnallisiin edellytyksiin ja tarpeisiin. Elementtien liitokset ovat tehty kestämään erityisesti korkeissa rakennuksissa syntyviä rasituksia. (Daerga 2019-10-14.)

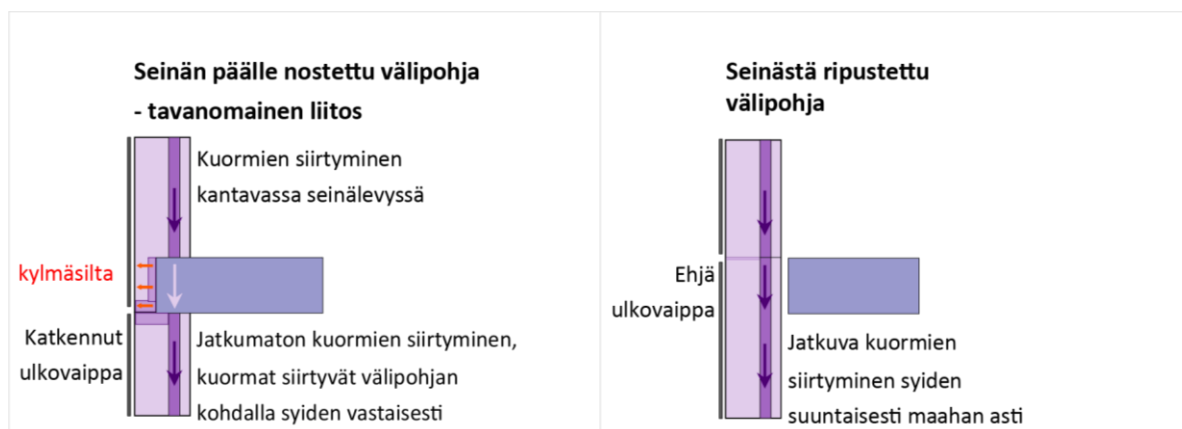
Tuotanto- ja materiaalitekniikan edistyminen mahdollistaa nyt suuretkin monikerroksiset puurakennukset, joissa materiaaleina ovat hallinneet perinteisesti betoni ja teräs. Työmaat on päivitetty tehokkaiksi kokoonpanolaitoksiksi, joihin kokoonpanovalmiita rakennusosia saapuu jatkuvasti ja jotka sitten nostetaan paikalleen. Puu, ja etenkin nykyaikainen rakennepuu, kuten LVL ja CLT sopivat hyvin nykyaikaiseen teolliseen moduulirakentamiseen. Puulla on korkea tuotantokapasiteetti, se on kevytensä vuoksi helppo kuljettaa, ja lisäksi työmaan ympäristön ja liikenteen häiriöt ovat lyhytaikaisia ja hyvin rajallisia. (Daerga 2019-10-14.)

Puu materiaalina on helppo työstää ja jalostaa. Tehdasvalmisteiset osat ovat mittatarkkoja ja tasalaatuisia, sillä laadunvarmistus tehtaalla on helpompaa kuin työmaalla. Rakennusmateriaalien käyttö tehdasolosuhteissa on myös tehokkaampaa, sillä materiaalihukkaa ei synny niin paljon kuin työmaalla. Elementtien nostamiseen työmaalla voi riittää suurta työmaanosturia kevyemmät ja halvemat ratkaisut, kuten autonosturit ja kurottajat. Kokoonpanoajatkain ovat korkean valmiusasteen, puuelementtien helpon kasauksen, yksinkertaisten liitostekniikoiden ja kuivien rakennusolosuhteiden takia lyhyempiä kuin perinteisessä suurten rakennusten kokoonpanossa. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela ja Viljakainen 2013, 31–32.)

Rakennejärjestelmän ominaisuuksia:

- Kaksi rakennejärjestelmää yhdessä: tasoelementit ja pilari-palkkijärjestelmät. Voidaan yhdistää keskenään tai käyttää erillään.
- Tasoelementit korkeisiin rakennuksiin: tasoelementtijärjestelmän seinät suunnitellaan kestämään korkeita rakennuksia
- Ripustetut välipohjat: sekä tasoelementtijärjestelmässä, että pilari-palkkijärjestelmässä välipohjat ripustetaan seinistä. Näin ulkovaippa säilyy ehjänä, mikä on kosteuden ja energian kannalta välttämätöntä. Painumat ovat myös minimaaliset, sillä seinä-välipohjaliitoksiin ei tule vaakasuuntaista puuta, missä kuormat tulisivat syysuuntaa vastaan.
- Seiniin ei tule pystysuuntaisia vetotankoja: Rakennuksen tuulen puolelle syntyvät tuulen aiheuttamat nostovoimat otetaan kerrosten välissä vastaan seinän sisällä olevilla piiloliitoksilla. Tämä helpottaa seinien rakentamista ja asentamista.

- Modulaariset katto-, seinä ja lattiaelementit: Jokainen kerros voidaan suunnitella yksilöllisesti halutun toiminnan ja tehtävän perusteella. Kantavana materiaalina voi olla LVL, CLT tai vastaava. (Daerga 2019-10-14.)



KUVA 8. Ulkoseinä-välipohjaliitoksen periaate (muokattu lähteestä Daerga 2019-10-01)

Tasoelementtijärjestelmä on kehitetty siten, että elementit ovat toiminnallisesti kestäviä ja helppoja koota. Järjestelmää voi soveltaa yli 8 kerroksiin rakennuksiin. Energian näkökulmasta on tärkeää, että ulkoseinät ovat tiiviitä eikä niissä ole kylmäsiltoja.

Tasoelementtijärjestelmän suunnittelun suuntaviivoja:

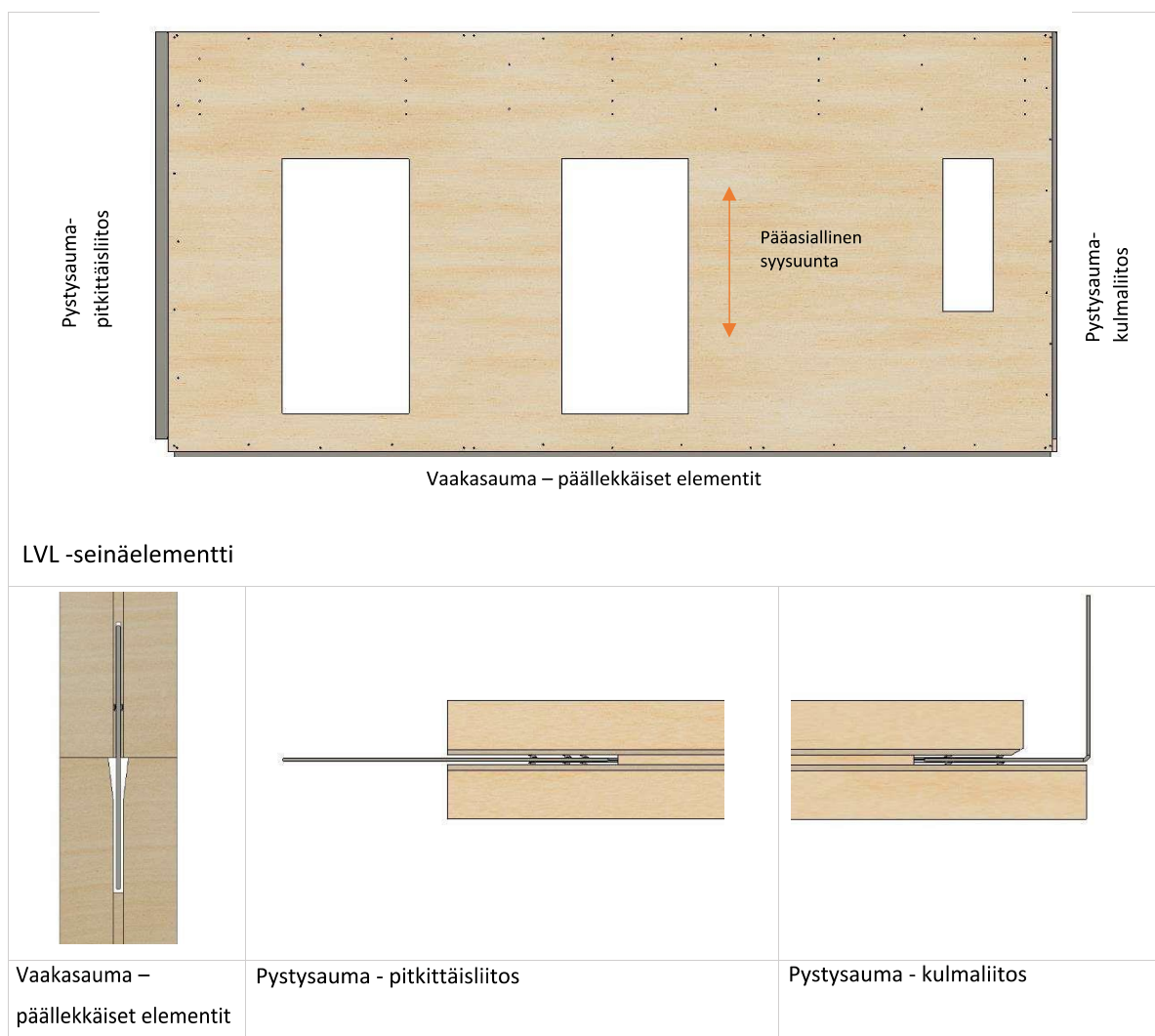
- Modulaarinen monikerrosrakenne on optimaalisin turvallisuusvaatimuksien sekä toiminnallisten vaatimuksien täyttämiseksi.
- Rakennuksen ulkovaipat säilyvät ehjänä.
- Ulkoseiniin ei tule kylmäsiltoja, eikä liitoksen rakenne vaarana ulkoseinien diffuusio- ja ilmatii-veyttä.
- Painuminen minimoidaan poistamalla vaakasuuntainen puu välipohjaliitoksista.
- Välipohja on akustisesti irti seinästä, joka minimoi äänen ja värähtelyn siirtymistä rungossa.
- Liitokset ovat uriin upotettuja piiloliitoksia, ne ovat esteettisiä ja paloturvallisuuden kannalta edullisia.
- Asennuksen periaate on se, että ulkoseinät asennetaan käyttämällä välipohjaa työtasona. (Daerga 2019-10-14.)

Järjestelmä on joustava ja nykyajan tarpeisiin sopiva sekä ekologinen. Haasteena kokoonpanossa voi olla piiloliitosten toteuttaminen työmaalla, mutta toimiessaan se on kapasiteetiltaan hyvä sekä esteettinen ja paloturvallinen.

#### 4 LVL-SEINÄELEMENTTIEN VÄLINEN LIITOS

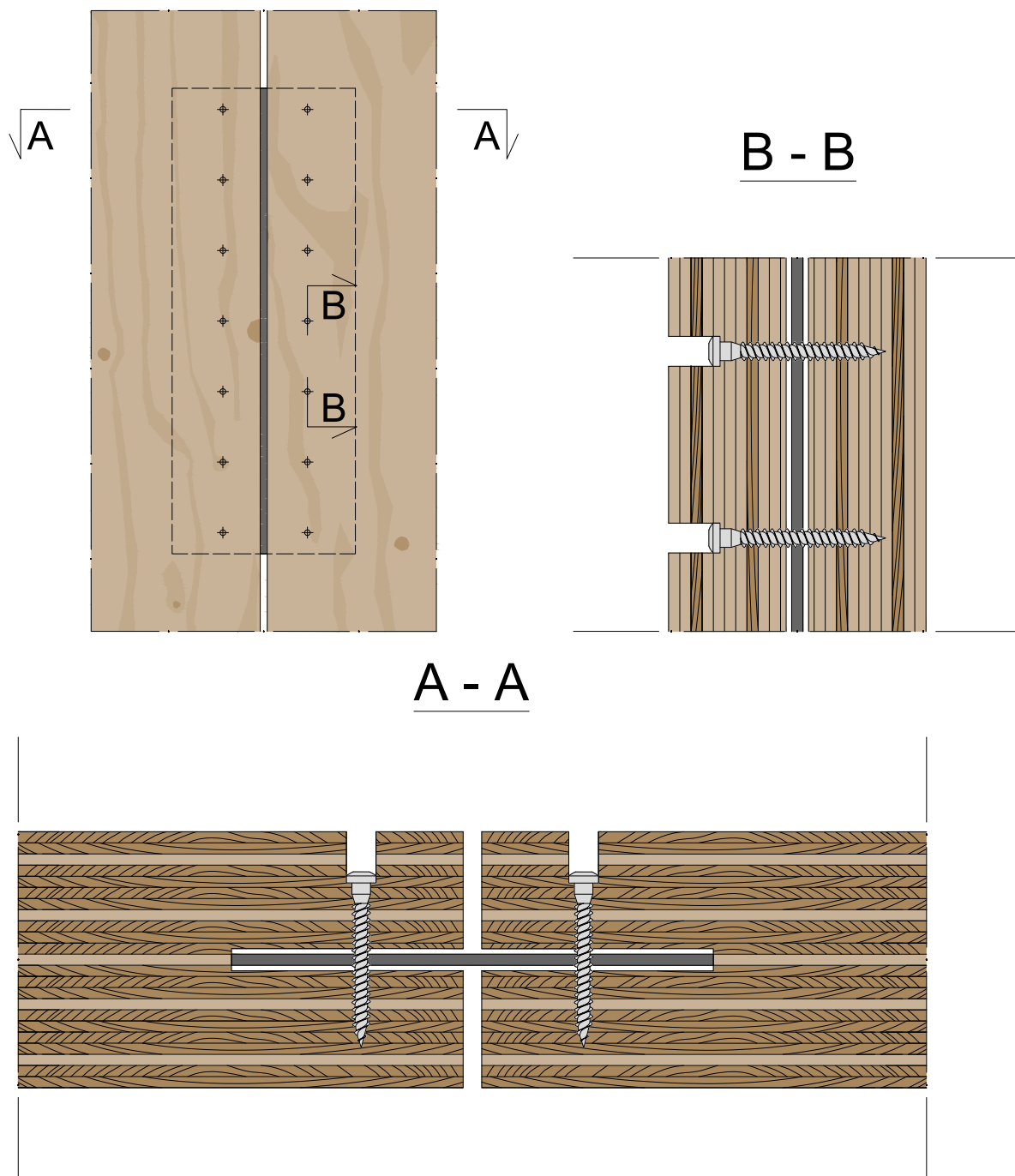
Työssä tarkasteltava liitos on teräslevyjen ja ankkuriruuvien kanssa toteutettava LVL-levyn syrjään upotettu piiloliitos, jota on tarkoitus käyttää LVL-seinäelementtien saumoissa monikerroksisissa puurakennuksissa kuten puukerrostaloissa. Liitoksen tehtävänä on kytkeä elementit toisiinsa sekä ottaa vastaan elementtien saumoissa vaikuttavia voimia, jotka voivat monikerroksisessa puurakennuksessa olla jo huomattavan suuria. Näitä voimia aiheuttavat rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat, suurimpana tekijänä tuulikuorma. Liitos toimii siis osana rakennuksen jäykistämistä. Tämän tyyppinen puikkoliittimillä ja teräslevyllä toteutettu upotettu liitos on tavallinen puuliitoksissa, mutta tämä on uusi sovellus puukerrostalorakentamisessa.

Tällaisessa liitoksessa etuna on, että kuormitus tulee keskeisesti, eikä siihen kohdistu vääntöä. Liitos on myös paloteknisesti erittäin toimiva, sillä sekä teräslevyt että ruuvit ovat puun sisällä eivätkä täten ole alttiita palolle eivätkä vaadi erillistä palosuojausta täyttääkseen palonkestovaatimukset. Saumat ja ruuvien reiät on kuitenkin tiivistettävä.

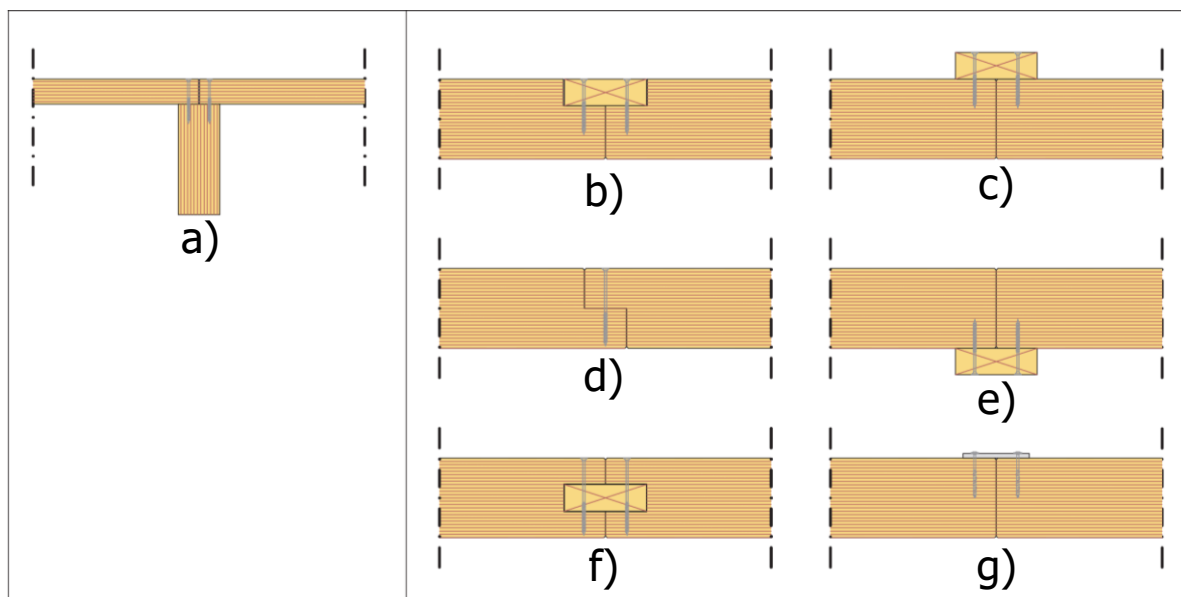


KUVA 9. LVL-seinäelementti upotetuilla piiloliitoksilla (Muokattu lähteestä Daerga 2019-10-01)

Vierekkäisten seinien pystysaumojen liitoksissa on teräslevy varten levyä leveämmät urat, sillä liitoksen asennus työmaalla on tarkoitettu tehtäväksi siten, että teräslevy tai -levyt pudotetaan uraan elementtien ollessa jo paikallaan. Päällekkäisten seinien liitoksissa taas päällimmäisen seinän alareunassa ura on teräslevyn paksuinen ja alemman seinän yläreunassa taas leveämpi. Teräslevy on tarkoitettu kiinnittämään päällimmäiseen seinäelementtiin valmiiksi ennen sen laskemista alapuolisen elementin päälle ja sen asemoimisen helpottamiseksi ura alemmassa seinässä on leveämpi.



KUVA 10. Esimerkkidetali liitoksen käytöstä seinäelementtien välissä



KUVA 11. Tavallisia LVL-seinäelementtien välisiä voimansiirtoliitoksia (LVL käsikirja, 49)

Kuvassa X on esitetty erilaisia ratkaisuja LVL-seinien välisiä leikkausvoimia vastaan ottaville liitoksille. Liitoksessa a) liitokseen on hyödynnetty risteävää seinää ilman erillisiä liitokskappaleita. Kuvan oikean puolen liitokset ovat itsekantavia. Liitoksissa b), c), e) ja f) on hyödynnetty puusoiroa liitokskappaleena. Näistä kapasiteetiltaan ja esteettisyydeltään paras vaihtoehto on f), sillä siinä liitokskappale on piilossa seinän sisällä ja liitoksessa on kaksi leikkaustasoa. Myös vaihtoehto b) on ulkonäköseikkojen kannalta hyvä, ja sen asentaminen voi olla helpompi kuin vaihtoehdon f), mutta sillä ei ole yhtä liittintä kohti niin hyvää kapasiteettia, koska siinä on vain yksi leikkaustaso. Vaihtoehdoissa c) ja e) on se etu, että niissä seinäelementtejä ei tarvitse loveta, mutta niissäkin on vain yksi leikkaustaso. Vaihtoehdossa g) on liitokskappaleena teräslevy, joka on kestävämpi kuin puusoiro eikä siinä ole vaarana halkeaminen, mutta se on palolle alttiina ja sen palosuojaus tulisi suunnitella hyvin. Liitoksessa d) kyseessä on lapaliitos, jossa vastakkaiset seinät lovetaan ja liitetään yhteen ilman erillistä liitokskappaleita. Lapaliitoksessa tarvitsee vain yhden liitinrivin, mutta siinä voi olla vaarana puun murtuminen.

Tässä työssä tarkasteltava liitoksen etu teoriassa kaikkiin edellä esitettyihin liitoksiin on se, että siinä teräsosat, eli levy ja ruuvit ovat kokonaan puun ympäröimät eikä siten palolle alttiita. Lisäksi seinäelementteihin tarvitsee siinä teräslevyä varten tehdä vain kapeat urat, ja liitos on kapasiteetiltaan erittäin hyvä vähemmällä ruuvimäärällä. Työmaatoteutus voi tosin olla haastavampi kuin kuvan 11 liitoksissa.

## 5 LIITOKSEN LASKENNALLINEN KAPASITEETTI

Liitoksen kestävyyslaskelmat pohjautuvat suunnittelustandardiin Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1995). Lisäksi liitoksen teräslevyn kestävyys on tarkasteltu standardin Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1993) pohjalta. Laskelmissa tutkitaan liitoksen kestävyyttä ainoastaan liitettävien osien saumojen suuntaista voimaa vastaan, mitä myös vetokokeissa testattiin.

Laskelmissa on ensin tarkasteltu liitoksen ruuviryhmän leikkausvoimakestävyys, joka osoittautui jo liituskokeiden (otsikko 6) perusteella mitoittavaksi tekijäksi. Teräslevyn osalta on tarkasteltu reunapuristuslujuus, sillä teräslevy on pehmeämpää terästä kuin liitoksen ruuvit ja sen reunapuristuminen voisi tulla kyseeseen. Teräslevyn veto-, nurjahdus- ja palalohkeamiskestävyyskäyttöasteet ovat niin pieniä, ettei niitä tässä työssä tutkita.

Liitoksen laskennallisia kapasiteetteja on vertailtu liituskokeiden maksimikuormiin otsikon 6.6 alla.

### 5.1 Puikkoliitosteoria

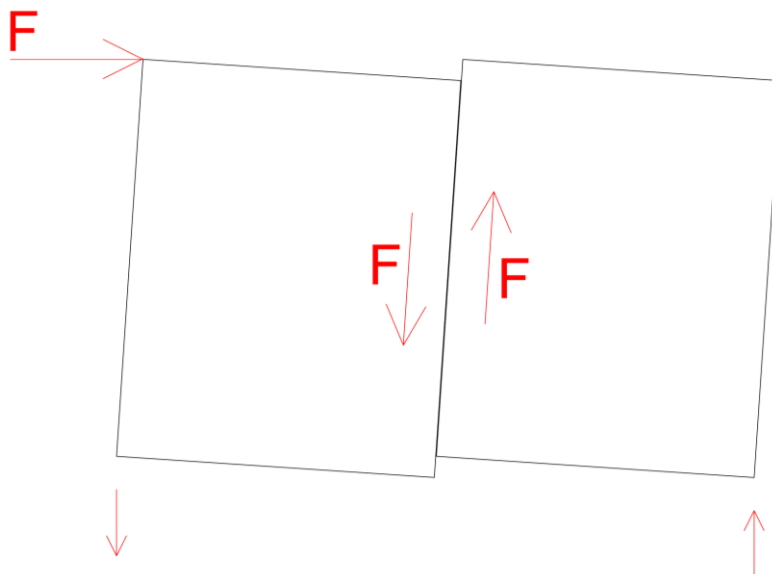
Nykyaikainen puurakenteiden puikkotyypisten liittimien avulla tehtyjen liitosten mitoitus perustuu K.W. Johansenin johtamaan puikkoliitosteoriaan. Eurokoodi 5:n metalliliittimien tehtyjen liitoksien ohjeet pohjautuvat tähän teoriaan ja sitä on siinä tarkennettu ja laajennettu. Puikkoliitosteorian perusteella liitoksen kestävyys riippuu puikkoliittimen plastisoitumisesta tai puun reunapuristumisesta tai näiden tapahtumien yhdistelmästä. Eurokoodi 5:ssä on otettu huomioon myös köysivaikutus liitoksessa ja siinä on ohjeet myös lohkeamis- ja palamurtumiskestävyydelle sekä puun syysuuntaa vastaan kohdistuvassa kuormituksessa halkeamiskestävyydelle. Eurokoodin puikkoliittimien mitoitusohje mahdollistaa liitosten laskennallisen tuotekehityksen, jossa voi optimoida liitoksen liittimien koon, materiaalit ja dimensiot. (Lahtela 2015).

### 5.2 Liitokseen kohdistuvia kuormia

Massiivipuisessa puukerrostalossa seinäelementtien saumoihin syntyvät kuormat johtuvat enimmäkseen rakennukseen kohdistuvista tuulikuormista, jotka tuulen vastaisista ulkoseinäpinoista siirtyvät rakennuksen välipohjiin ja niiden kautta tuulen suuntaisille seinille. Tuuli on puurakentamisessa ja erityisesti korkeissa rakennuksissa erityisen suuri mitoittavien kuormien aiheuttaja, sillä puu on niin kevyttä ja siksi erityisesti rakennuksen ankkurointi ja elementtisaumojen liitokset ovat tärkeitä suunnitella siten, että rakennukseen ei aiheudu kuormista haitallisia muodonmuutoksia, kuten halkeamia, painumia tai taipumia. Seinälevyjien väliset leikkausvoimat ovat sitä suurempia, mitä alemmaksi rakennusta mennään, sillä ylempiin kerroksiin vaikuttavat tuulikuormat vaikuttavat myös kaikkiin alempiin kerroksiin.

Myös päällekkäisten seinien saumoihin syntyy leikkausvoimia vaakakuormista. Päällekkäissaumoissa vaikuttaa myös vaakasauman suuntaista voimaa usein suuremmat tuulen nostavat voimat, mutta

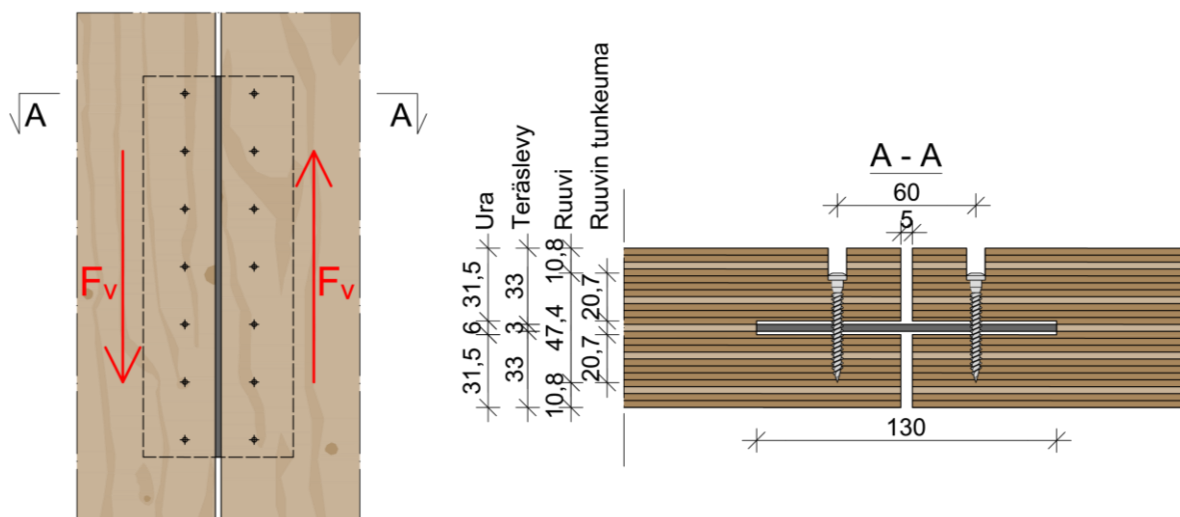
myös toiseen suuntaan kapasiteetti on hyvä tietää, minkä vuoksi tässä työssä on tutkittu liitoksen kesto myös syysuunnan ollessa saumaa vasten kohtisuorassa.



KUVA 12. Seinälevyjen välisten leikkauvoimien syntyminen vaakakuormasta

### 5.3 Lähtötiedot

Näissä laskelmissa käytetyt ruuvien ja LVL:n mitat ja ominaislujuudet ovat niiden valmistajien ilmoittamia. Molemmat tuotteet ovat CE-merkittyjä, joka varmistaa, että niiden ominaisuudet on testattu eurooppalaisten tuotestandardien mukaisesti. Vertailun vuoksi kapasiteetti on laskettu myös käyttämällä tässä työssä tehtyjen ruuvien vetokokeiden perusteella laskettua ruuvien myötömomenttia.



KUVA 13. Mitoitettava liitos

Ruuvien ominaisuudet (Gunnebo Anchorscrew 5,0x45)

”Ruuvilla tulee olla EN 14592 standardin vaatimusten mukaisesti määritettynä seuraavat lujuusominaisuudet: vääntökestävyys  $f_{tor,k}$ , myötömomenti  $M_{y,k}$  tai vetomurtolujuus  $f_{u,k}$ , ulosvetolujuusparametri  $f_{ax,k}$ , kannan läpivetolujuusparametri  $f_{head,k}$  ja vetomurtokestävyys  $f_{tens,k}$ . Ulosvetolujuusparametri  $f_{ax,k}$  voidaan määrittää testaamalla tai laskennallisesti.” (Puurakenteiden suunnitteluohje: RIL 205-1-2017, 127.)

$d$	=	4,9 mm	(kierteen ulkohalkaisija)
$d_i$	=	3,4 mm	(kierteisen osan sisähalkaisija)
$L$	=	47,4 mm	(kokonaispituus)
$l_g$	=	40 mm	(kierreosan pituus)
$f_{u,k}$	=	800 N/mm <sup>2</sup>	(vetomurtolujuuden ominaisarvo)
$f_{ax,k}$	=	9,8 N/mm <sup>2</sup>	(kärjenpuoleisen ulosvetolujuuden ominaisarvo)
$M_{y,k,1}$	=	6800 Nmm	(myötömomentin ominaisarvo, valmistajan ilmoittama)
$M_{y,k,2}$	=	8338 Nmm	(myötömomentin ominaisarvo, vetokokeiden perusteella, kts. kohta 6.7.3)

Poikittain kuormitettujen ruuvien kierteisen osan vaikutus tulee ottaa huomioon käyttämällä tehollista halkaisijaa  $d_{ef}$  määritettäessä niiden kestävyyttä. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 70.) Tämän tyyppisessä täyskierteisessä ruuvissa tehollisen halkaisijan määrittämiseksi käytetään kaavaa (1).

$$d_{ef} = 1,1d_i \quad (1)$$

$$d_{ef} = 3,74 \text{ mm} \quad (\text{tehollinen halkaisija})$$

Puun ominaisuudet (LVL by Stora Enso, X-laatu, paksuus 69 mm)

Näissä laskuissa tarvitaan tietää liitoksen puusta vain sen ominaistiheys reunapuristuslujuuden määrittämiseksi.

$$\rho_k = 480 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{tiheys})$$

## 5.4 Ruuviryhmän kestävyys

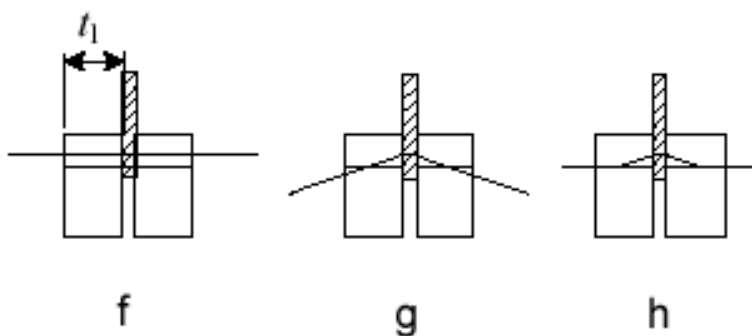
Poikittain kuormittuvien ruuvien kestävyys ominaisarvon laskemiseen sovelletaan Eurokoodi 5:n kohtaa 8.2: Metallisten puikkotyypistien liittimien poikittaiskuormakestävyys. Lisäksi näille ruuveille ovat voimassa suunnitteluohjeen naulaliitoksia koskevat säännöt, sillä ruuvin tehollinen halkaisija  $d_{ef} < 6$  mm. Jos tehollinen halkaisija olisi suurempi kuin 6 mm, voimassa olisivat pulttiliitoksia koskevat säännöt. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 70.)

Kun käytetään teräslevyä kaksileikkeisen liitoksen keskikappaleena levyn paksuudesta riippumatta, niin ruuvien kestävyys yhtä leikkaustasoa ja liittintä kohti saadaan kaavan (2) lausekkeista saatavaa minimiarvoa. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 57.) Kuvasta 14 näkee, mitä murtumistapoja kaavat edustavat.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} f \\ g \\ h \end{array} \quad (2)$$

missä:

$F_{v,Rk}$	on kestävyys ominaisarvo leikkaustasoa ja ruuvia kohti
$f_{h,1,k}$	on puuosan reunapuristuslujuuden ominaisarvo
$t_1$	on ruuvin tunkeuma
$d$	on ruuvin paksuus tai halkaisija (tässä $d_{ef}$ )
$M_{y,Rk}$	on ruuvin myötömomentin ominaisarvo
$F_{ax,Rk}$	on ruuvin ulosvetokestävyys ominaisarvo



KUVA 14. Kaavan (2) murtumistavat, kuvissa teräslevy kahden puuosan välissä (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 57)

Kaavassa (2) oikean puolen ensimmäinen termi on puikkoliitosteorian mukainen kestävyys ja toinen termi  $F_{ax,Rk}/4$  on köysivaikutuksesta tuleva osuus, joka saadaan kokonaisuudessaan huomioida, kun liittimenä käytetään ruuvia. Sen suuruus saa kuitenkin olla korkeintaan puikkoliitosteorian mukaisen

osuuden verran. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 55.) Vertailuksi poikittaiskuormakestävyden mitoituksessa köysivaikutusilmiön osuus verrattuna puikkoliitosteorian mukaiseen osuuteen saa olla pulteilla korkeintaan 25 %, pyöreillä nauloilla korkeintaan 15 % ja tappivaarnoilla 0 %. Tämä perustuu liittimien erilaisiin pintoihin, esimerkiksi tappivaarnat ovat pinnaltaan niin sileitä, että niiden ei katsota ottavan pituussuuntaisia kuormia vastaan.

Ruuvien kestävyys ominaisarvon laskemiseksi täytyy laskea ensin ruuvin tunkeuma  $t_1$ , puun reunapuristuslujuuden ominaisarvo  $F_{h,1,k}$  sekä ruuvin ulosvetokestävyys ominaisarvo  $F_{ax,Rk}$ .

#### Ruuvin tunkeuma puussa

Ruuvi on keskeisesti puussa, joten tunkeuma on

$$t_1=t_2 = 20,7 \text{ mm}$$

#### LVL:n reunapuristuslujuus

Eurokoodin poikittain kuormitettujen naulojen ohjeissa sanotaan, että naulan paksuuden ollessa enintään 8 mm käytetään LVL:n reunapuristuslujuuden ominaisarvona esiporatuilla rei'illä kaavaa (3). Ruuvi on itseporautuva, joten sovelletaan siihen tätä kaavaa. Mikäli kyseessä olisi naula, joka lyödään esiporaamattomaan reikään, laskettaisiin reunapuristuslujuus kaavalla (4) ja se antaisi yli 10 N/mm<sup>2</sup> heikomman tuloksen. Mielestäni Eurokoodissa on tältä osalta tulkinnanvaraa. Kuormituksen suunnalla syysuuntaan nähden ei ole näissä laskuissa ruuvien kestävyys kannalta merkitystä.

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (\text{esiporatut reiät}) \quad (3)$$

$$f_{h,k} = 0,082\rho_k d^{-0,3} \quad (\text{esiporaamattomat reiät}) \quad (4)$$

missä:

$$d=d_{ef} = 3,74 \text{ mm} \quad (\text{ruuvin tehollinen halkaisija})$$

$$\rho_k = 480 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{puun tiheys})$$

$$f_{h,k} = 37,9 \text{ N/mm}^2$$

Ruuvien ulosvetolujuuden ominaisarvo

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{array} \right. \quad (5)$$

missä:

$$f_{ax,k} = 13,44 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{kärjenpuoleisen ulosvetolujuuden ominaisarvo})$$

$$f_{head,k} = \text{ei ilmoitettu} \quad (\text{kannanpuoleisen läpivetolujuuden ominaisarvo})$$

$$d = d_{ef} = 3,74 \text{ mm} \quad (\text{ruuvien tehollinen halkaisija})$$

$$d_h = 8 \text{ mm} \quad (\text{ruuvien kannan halkaisija})$$

$$t_{pen} = 20,7 \text{ mm} \quad (\text{kärjenpuoleinen tunkeuma})$$

Ruuvien valmistaja ei ole ilmoittanut kannanpuoleisen läpivetolujuuden ominaisarvoa  $f_{head,k}$ , mutta sillä ei ole tässä tapauksessa merkitystä, koska kaavan (5) alempi termi olisi suurempi jo sijoittamalla siihen kärjenpuoleisen ulosvetolujuuden ominaisarvon  $f_{ax,k}$ , joka taas on varmasti pienempi kuin ruuvien  $f_{head,k}$  -arvo, joten ulosvetolujuuden ominaisarvo  $F_{ax,Rk}$  tulee kaavasta  $f_{ax,k} d t_{pen}$ .

$$F_{ax,Rk} = 1040,5 \text{ N}$$

Kaavassa (2) huomioitava köysivaikutuksen osuus on vain neljäsosa arvosta  $F_{ax,Rk}$ , joten se lisää kapasiteettia murtumistapojen  $g$  ja  $h$  mukaisissa kaavoissa (kuva 14) vain 260,1 N.

Ruuvien leikkauskestävyys yhtä leikkaustasoa ja liitintä kohti

Lasketaan ruuvien leikkauskestävyys vertailun vuoksi sekä ruuvien valmistajan ilmoittamalla, että ruuvikokeiden perusteella (6.7.2) lasketulla myötömomentilla. Seuraavaksi sijoitetaan arvot kaavaan (2).

$$F_{h,1,k} = 37,9 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{LVL:n reunapuristuslujuus})$$

$$t_1 = 17,7 \text{ mm} \quad (\text{ruuvien tunkeuma})$$

$$d_{ef} = 3,74 \text{ mm} \quad (\text{tehollinen halkaisija})$$

$$M_{y,Rk,1} = 6800 \text{ Nmm} \quad (\text{myötömomentin ominaisarvo, valmistajan ilmoittama})$$

$$M_{y,Rk,2} = 8338 \text{ Nmm} \quad (\text{myötömomentin ominaisarvo, vetokokeiden perusteella})$$

$$F_{ax,Rk} = 1040,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{ulosvetolujuuden ominaisarvo})$$

Leikkauskestävyyden ominaisarvo ruuvin valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla:

$$F_{v,Rk,1} = \min \begin{matrix} 2933,2 & \text{N} \\ 3789,7 & \text{N} \\ 2517,8 & \text{N} \end{matrix} = 2517,8 \text{ N} = R_{k,1}$$

Leikkauskestävyyden ominaisarvo ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla:

$$F_{v,Rk,2} = \min \begin{matrix} 2933,2 & \text{N} \\ 3911,1 & \text{N} \\ 2760,2 & \text{N} \end{matrix} = 2760,2 \text{ N} = R_{k,2}$$

Molemmissa tapauksissa mitoittavaksi tulee murtumistavan h mukainen kaava. Liitoskokeiden perusteella murtumistapa on kuitenkin lähempänä tapaa g, joten vertaillaan myös sen antamaa kapasiteettia käyttämällä ruuvikokeiden perusteella laskettua myötömomenttia:

$$F_{v,Rk,2} = 3911,1 \text{ N} = R_{k,3}$$

Ruuvien kestävyystarkastelu tehdään murtorajatilassa, joten lasketaan ruuvien kestävyysmitoitussarvo kaavalla (6).

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (6)$$

missä:

$$k_{mod} = 1,1 \quad (\text{muunnoskerroin, hetkellinen kuorma})$$

$$\gamma_M = 1,2 \quad (\text{materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku})$$

Leikkauskestävyyden mitoitussarvo ruuvin valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla:

$$R_{d,1} = 2308,0 \text{ N}$$

Leikkauskestävyyden mitoitussarvo ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla:

$$R_{d,2} = 2530,1 \text{ N}$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo tosiasiallisen murtumistavan kaavalla:

$$R_{d,3} = 3585,2 \text{ N}$$

#### Yksittäisen ruuvin leikkauskestävyys

Kaavoista (2) ja (6) saa kestävyyden mitoitusarvon yhtä leikkaustasoa ja liitintä kohti. Liitos on kaksileikkeinen, joten kapasiteetti yhtä liitintä kohti lasketaan kaavalla (7).

$$F_{v,Rd} = 2R_d \quad (7)$$

Ruuvin valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla:

$$F_{v,Rd,1} = 4616,0 \text{ N}$$

Ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla:

$$F_{v,Rd,2} = 5060,3 \text{ N}$$

Tosiasiallisen murtumistavan kaavalla:

$$F_{v,Rd,3} = 7170,4 \text{ N}$$

#### Liitinrivin leikkauskestävyys

Liitinrivin kestävyyden tehollinen mitoitusarvo lasketaan kaavalla (8).

$$F_{v,ef,Rd} = n_{ef} F_{v,Rd} \quad (8)$$

missä:

$n_{ef}$  on liitinrivin liittimien tehollinen määrä

$F_{v,Rd}$  on yksittäisen liittimen kestävyyden mitoitusarvo

Eurokoodissa sanotaan, että voiman vaikuttaessa syysuuntaan lasketaan syysuuntaisen naularivin (tässä ruuvirivin) kestävyys käyttämällä liittimien tehollista määrää  $n_{ef}$  mikäli rivin peräkkäisiä nauvoja ei ole sijoitettu vähintään mitan  $1d$  verran sivuun syysuunnasta. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden

suunnittelu, 55.) RIL:n puurakenteiden suunnitteluohjeen mukaan Kerto-Q LVL:n lappeen suuntaisissa liitoksissa ei ruuvien limittämistä syysuunnasta sivuun kuitenkaan tarvitse tehdä. (RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje, 114.) Stora Enson X-laadun LVL on rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan vastaavaa, joten käytetään laskuissa ruuvien todellista lukumäärää eli  $n_{ef} = n$ .

Liitoksen kapasiteetti ruuvin valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla:

Ruuvimäärä [kpl]	Kapasiteetti [kN]
3	13,85
7	32,31

Liitoksen kapasiteetti ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla:

Ruuvimäärä [kpl]	Kapasiteetti [kN]
3	15,18
7	35,42

Tosiasiallisen murtumistavan kaavalla:

Ruuvimäärä [kpl]	Kapasiteetti [kN]
3	21,51
7	50,19

Liitoksen laskennallisia kapasiteetteja vertaillaan liituskokeiden maksimikuormiin otsikon 6.6 alla.

## 5.5 Puusta murtuminen

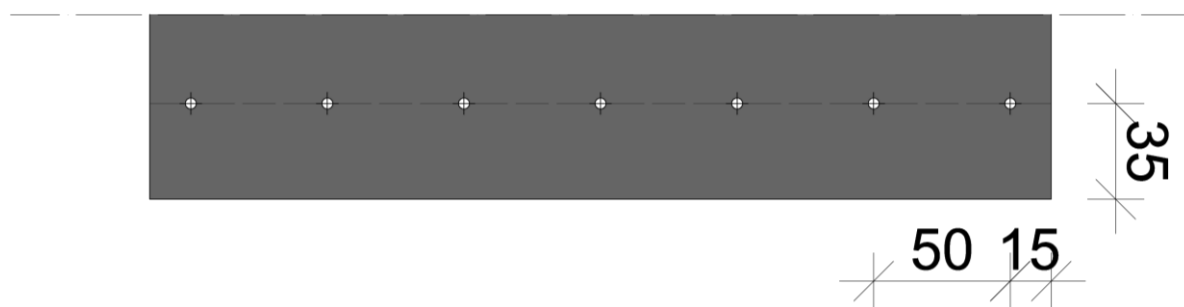
Teräksen ja puun välisissä puikkoliitoksissa, joissa kohdistuu syysuuntaisia voimia lähellä puusauvan päätä, tulee tehdä lohkeamismurtotarkastelu. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 100.) Lohkeamismurtotarkastelua ei kuitenkaan tehdä liitoksille, joissa liittimet ovat yhdessä puun syiden suuntaisessa rivissä. (RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje, 114.) Tässä liitoksessa liittimet ovat yhdessä rivissä ja sen lisäksi suurten massiivipuulementtien välissä, eikä siis ole muutenkaan alttiina lohkeamismurtumiselle.

Jos puun syysuuntaa vastaan kohtistuu vetorasitusta, on halkeamiskestävyys yleensä tarkastettava. Ristiinviilutettu LVL ei kuitenkaan ole herkkä halkeamiselle, joten tarkastelua ei tehdä. (RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje, 105). Näkisin myös, että puukerrostalon rakenteet ja liitokset suunnitellaan siten, että valtavia syysuuntaa vastaan vaikuttavia voimia ei liitoksiin ainakaan seinäelementeissä kohdistu. Ripustusliitoksissa halkeamistarkastelu on kuitenkin syytä tehdä. Miettisen (2018, 65, 70) opinnäytetyössä näkee, miten halkeaminen kuitenkin on mahdollista tämän tyyppisessä liitoksessa syysuuntaa vastaan kohdistuvassa vedossa myös ristiinviilutetussa LVL-levyssä.

## 5.6 Teräslevyn reunapuristuslujuus

Etenkin ohuita teräsosia puikkoliitoksessa käytettäessä on syytä tutkia reunapuristuskestävyys. Jos reunapuristuskapasiteetti ylittyy, teräslevyn reiät venyvät soikeiksi ja muodonmuutos on pysyvä.

### Teräslevyn ominaisuudet (S355)



KUVA 15. Teräslevyn reikien keskinäiset etäisyydet sekä reunaetäisyydet

$f_u$	=	470	N/mm <sup>2</sup>	(vetomurtolujuus)
$d_0$	=	4,3	mm	(ruuvien reiän halkaisija)
$e_1$	=	15	mm	(reiän keskiön ja levyn reunan välinen etäisyys voiman suunnassa)
$e_2$	=	35	mm	(reiän keskiön ja levyn reunan välinen etäisyys kohtisuorassa voimaan nähden)
$p_1$	=	50	mm	(ruuvien keskiöiden välinen etäisyys voimien suunnassa, 7 ruuvia)
$t$	=	3	mm	(levyn paksuus)

Reunapuristuslujuus

Teräslevyn reunapuristuslujuuden mitoitusarvo saadaan Eurokoodi 5:n osan 1-8 mukaan kaavasta (9). (Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu, 28)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (9)$$

missä:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right. \quad (10)$$

$$k_1 = \min \begin{array}{l} 21,1 \\ 2,5 \end{array} = 2,5$$

$$a_b = \min \left\{ \begin{array}{l} a_d \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,0 \end{array} \right. \quad (11)$$

missä:

$$a_d = \frac{e_1}{3d_0} \quad (\text{levyn pään ruuveille}) \quad (12)$$

$$a_d = 1,16$$

$$a_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \quad (\text{muille kuin pään ruuveille}) \quad (13)$$

$$a_d = 3,63$$

Käytetään pienempää  $a_d$ :n arvoa, jotta saadaan mitoittava reunapuristuslujuus.

$$f_{ub} = 1200 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{ruuvin vetomurtolujuus})$$

$$1,16$$

$$a_b = \min \begin{array}{l} 1,16 \\ 2,55 \end{array} = 1,0$$

$$1,0$$

$$d = 4,9 \text{ mm} \quad (\text{ruuvin nimellishalkaisija})$$
$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad (\text{osavarmuusluku})$$

Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo yksittäiselle ruuvin reiälle

Sijoitetaan edellä esitetyt arvo kaavaan (9).

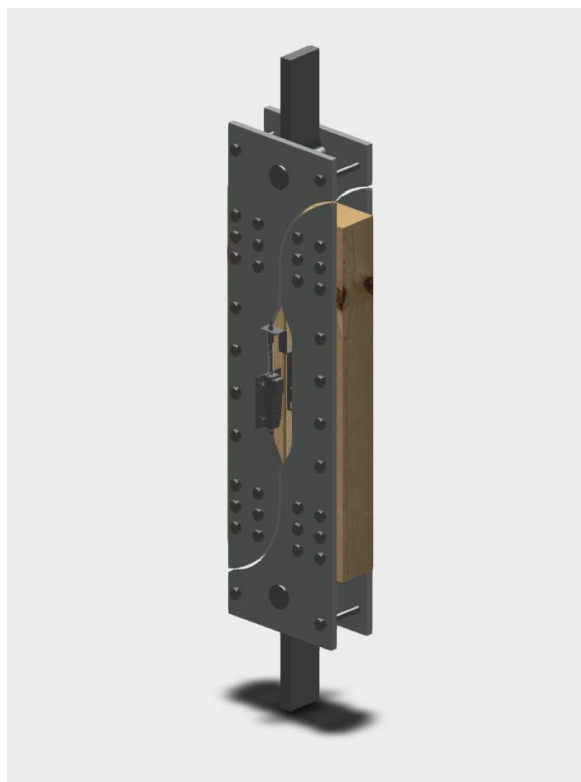
$$F_{b,Rd} = 13,8 \text{ kN}$$

Teräslevyn reikien reunapuristuskapasiteetin pitäisi tässä liitoksessa kestää kuormaan 13,8 kN/ruuvi asti. Yksittäisen ruuvin kestävä maksimikuorma tässä liitoksessa on kuitenkin vain noin 4,3 kN, joten teräslevyn reunapuristumisen käyttöaste on melko pieni. Liituskokeiden tulosten analysoinnista (kohta 6) huomaakin, etteivät teräslevyn reiät ole kokeneet merkittävää muodonmuutosta.

## 6 LIITOSKOKEET

### 6.1 Koesuunnitelma

Per Anders Daerga on laatinut kuormituskokeita varten koesuunnitelman ja suunnitellut niihin tarvittavat osat. Kokeita varten tarvittavat osat ovat valmistettu Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa.



KUVA 16. 3D-malli testijärjestelyistä (Daerga)

TAULUKKO 1. Koejärjestelyt

Koe-kappaleet	Pääasiallinen syy-suunta (saumaa vasten)	Ruuvien määrä   Välistys [kpl]   [mm]	Uran leveys kappale 1   kappale 2 [mm]	Teräslevyn paksuus [mm]	Testien lukumäärä
A1-3	Samansuuntaisesti	3   150	6   6	3	3
A2-3	Samansuuntaisesti	7   50	6   6	3	3
B1-3	Kohtisuoraan	3   150	3   6	3	3
B2-3	Kohtisuoraan	7   50	3   6	3	3

## 6.2 Koekappaleiden valmistus

LVL saapui laboratoriolle 800 x 800 mm levyinä, joista ajettiin sirkkelillä 120 x 600 mm kappaleita, ja niiden toiselle syrjäpuolelle kappaleen läpi 62,5 mm syvyiset ja 3 tai 6 mm paksut urat teräslevyä varten, jolloin koekappaleiden väliin jäi 5 mm rako.



KUVA 17. LVL-levyt liitoskoikeita varten



KUVA 18. Koekappaleiden valmistus

LVL-kappaleiden väliin asetettiin keskeisesti 3 mm teräslevy, jonka jälkeen sapluunan avulla tehtiin akkuporakoneella merkit porattavien reikien kohdalle. Tämän jälkeen ankkuriruuveja varten esiporattiin reiät 4,3 mm terällä, joka oli aiemmin testattu sopivan kokoiseksi ruuveja varten. Esiporaus tehtiin teräslevyn läpäisyyn asti. Esiporatut reiät puhdistettiin paineilmalla, jonka jälkeen ankkuriruuvit porattiin paikalleen ja niiden tunkeuma tarkastettiin työntömitalla.

Puristimilla pyrittiin pitämään huolta siitä, ettei teräslevy liiku kappaleiden välissä ruuvien asennuksen aikana, sillä pienikin poikkeama reiän asemassa vaikeutti ruuvien porautumista teräslevyn läpi huomattavasti. Ongelmia tuli vain muutaman ruuvien kohdalla, mutta koetuloksista huomaa ruuvien tunkeuman vaikutuksen niissä koekappaleissa, joissa joitain ruuveja ei ole saatu porattua loppuun asti.



KUVA 19. Valmis koekappale A2<sub>1</sub> ennen veto-osien asennusta



KUVA 20. Veto-osien asennus

Veto-osia varten porattiin magneettiporakoneella 12 mm reiät kappaleiden läpi, jonka jälkeen osat kiinnitettiin testikappaleeseen 8.8 lujuusluokan M12 pulteilla sekä muttereilla. Muttereita ei vielä tässä vaiheessa kiristetty, sillä kiristäminen vaikeutti kuormituskoneen leukoihin tulevien osien kytke- mistä. Osia oli valmistettu yhteensä kahdeksan eli kahteen koekappaleeseen kerrallaan, joten ne täytyi kahden vetokokeen jälkeen aina irrottaa ja siirtää seuraaviin.

### 6.3 Ekstensometrien kalibrointi

Ensimmäisten kuormituskokeiden jälkeen huomattiin, että eri puolten kuormituksen suuntaista siirtymää mittaavista ekstensometreistä saatiin huomattavasti toisistaan eroavia tuloksia, vaikka testikap- paleet olivat keskilinjaan ja kuormitukseen nähden lähes symmetrisiä. Ekstensometrit kalibroitiin käyttäen apuna mekaanista Mitutoyon mikrometriä, jonka mittatarkkuus on 0,0001 tuumaa eli noin 0,0024 senttimetriä ja mittausalue yhden tuuman. Yksi kierros mikrometrissä vastaa 0,025 tuumaa ja se on jaettu viivoilla 250 osaan.

Ekstensometri ja mikrometri kiinnitettiin niitä varten valmistettuun alustaan, jonka jälkeen ekstensometri liitettiin tietokoneeseen, jotta sen antamaa tietoa voitaisiin tarkastella koestuslaitteen ohjau- ssa ja tiedonkeruuhjelmistossa, Matertest Oy:n FMT-ProgSys Win:ssä.



KUVA 21. Ekstensometrin kalibroinnin järjestely

Kalibrointi suoritettiin siten, että mikrometrin ruuvi ruuvattiin ääriasentoon, jonka jälkeen ekstensometrin kärki asetettiin ruuvin kärkeen ja ekstensometrin siirtymä nollattiin tietokoneelta. Tämän jäl- keen mikrometriä ruuvattiin kiinnipäin kierros kerrallaan kymmenen kierroksen ajan taulukoiden eks- tensometrin antama tulos joka kierroksen jälkeen.

Mikrometrin ja ekstensometrin antamat tulokset muunnettiin samaan yksikköön ja määritettiin kor- jauskerroin, jolla ekstensometrin siirtymä saataisiin vastaamaan mikrometrin ruuvin siirtymää. Se saatiin kertomalla mikrometrin siirtymän ja ekstensometrin siirtymän suhde aiemmin ohjelmistoon

määritetyn korjauskertoimen kanssa. Uusi korjauskerroin syötettiin ohjelmistoon ja tehtiin sama toimenpide uudelleen. Tässä vaiheessa huomattiin, että ekstensometrin mittauksen ero mikrometriin on lineaarinen ja oikean korjauskertoimen avulla sen tulokset saadaan oikeelliseksi. Kalibrointi tehtiin molemmille ekstensometreille. Ennen kalibrointia suoritettujen liitoskokeiden tulokset ovat korjattu.

TAULUKKO 2. Korjauskertoimen määrittäminen ekstensometri S1:lle

<b>S1</b>				
<b>Kierros</b>	<b>Mikrometrin siirtymä ["]</b>	<b>Ekstensometrin siirtymä [mm]</b>	<b>Ekstensometrin siirtymä ["]</b>	<b>Ekstensometrin siirtymä/mikrometrin siirtymä</b>
1.	0,025	0,725	0,029	0,876
2.	0,050	1,443	0,057	0,880
3.	0,075	2,157	0,085	0,883
4.	0,100	2,879	0,113	0,882
5.	0,125	3,599	0,142	0,882
6.	0,150	4,331	0,171	0,880
7.	0,175	5,042	0,199	0,882
8.	0,200	5,765	0,227	0,881
9.	0,225	6,488	0,255	0,881
10.	0,250	7,207	0,284	0,881
<b>Keskiarvo</b>				0,8808
<b>Alkuperäinen korjauskerroin</b>				1,3493
<b>Uusi korjauskerroin</b>				1,1885

TAULUKKO 3. Kalibroinnin jälkeisten tulosten tarkastus

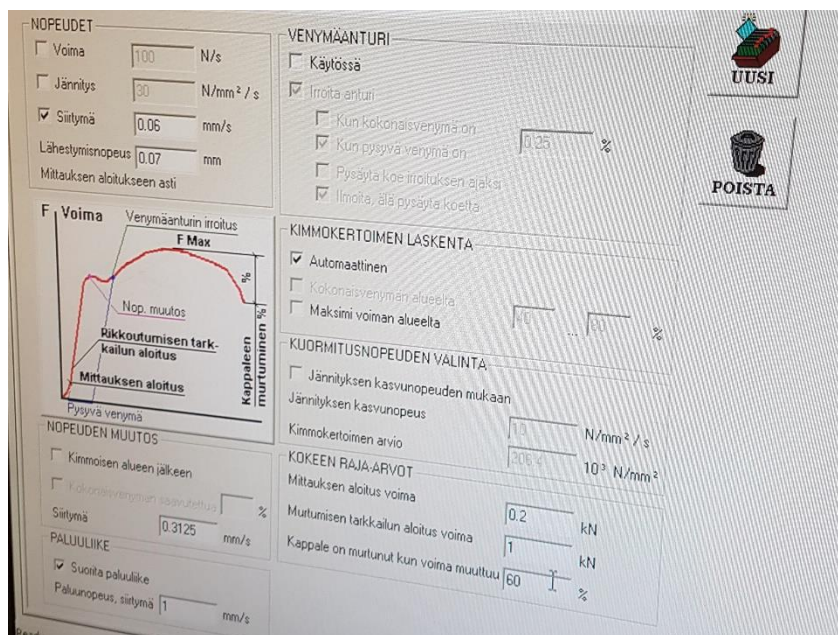
<b>S1</b>				
<b>Kierros</b>	<b>Mikrometrin siirtymä ["]</b>	<b>Ekstensometrin siirtymä [mm]</b>	<b>Ekstensometrin siirtymä ["]</b>	<b>Ekstensometrin siirtymä/mikrometrin siirtymä</b>
<b>1.</b>	0,025	0,633	0,025	1,003
<b>2.</b>	0,050	1,265	0,050	1,004
<b>3.</b>	0,075	1,903	0,075	1,001
<b>4.</b>	0,100	2,535	0,100	1,002
<b>5.</b>	0,125	3,169	0,125	1,002
<b>6.</b>	0,150	3,819	0,150	0,998
<b>7.</b>	0,175	4,444	0,175	1,000
<b>8.</b>	0,200	5,076	0,200	1,001
<b>9.</b>	0,225	5,708	0,225	1,001
<b>10.</b>	0,250	6,346	0,250	1,001

Uuden korjauskertoimen määrittämisen jälkeen huomataan, että nyt ekstensometrin siirtymä vastaa ainakin 1/1000 tuuman tarkkuudella mikrometrin ruuvin siirtymää. Millimetreiksi muutettuna tarkkuus on nyt vähintään 0,0254 mm, joka on näiden testien kannalta varsin riittävä.

## 6.4 Liitoskoekiden suoritus

### 6.4.1 Testauslaitteisto

Testauslaitteena oli Matertest Oy:n tietokoneohjattava ruuvikäyttöinen aineenkoestuskone, jonka kuormitusvoima on 400 kN. Laitteeseen oli kytkettyä vetoleuat, joista alempi piti koekappaleen alaosan paikallaan ja ylempi liikkui kuormituspalkin mukana. Laitteessa on voima- sekä siirtymänmittausjärjestelmä. Koekappaleiden liitettävien osien välistä siirtymää mitattiin kuitenkin ulkoisilla Gefran -ekstensometreillä, jotka kiinnitettiin koekappaleen molemmin puolin.



KUVA 22. Parametrit vetokokeita varten FMT-ProgSys WIN:ssä



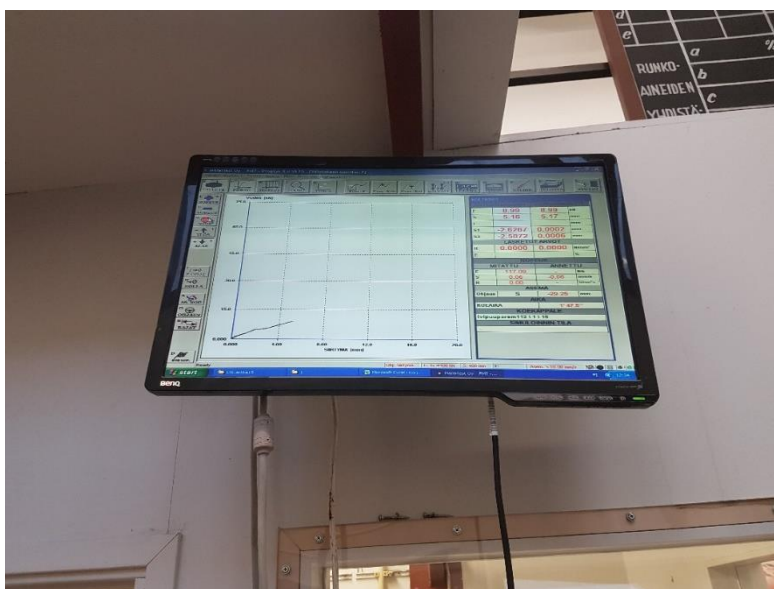
KUVA 23. Ekstensometrien ja niiden vastakappaleiden kiinnitys koekappaleeseen

## 6.4.2 Koestus

Liitoskoheet suoritettiin 14., 15., 21. ja 22. marraskuuta 2019 sekä 5. joulukuuta 2019. Ennen kuormituksen aloittamista koekappaleeseen kiinnitettiin ruuveilla ekstensometrit sekä niiden vastakappaleet molemmin puolin. Koekappale nostettiin kuormituskoneen leukojen väliin ja veto-osien pultit kiristettiin 30 Nm momenttiin. Vetokohteessa liitoksen molemmat puuosat pääsivät liikkumaan vapaasti, nivelet ylä- ja alaosassa toimivat, eikä koejärjestelyissä ollut huomattavissa liitokseen kohdistuvia epätoivottuja voimia.



KUVA 24. Koekappale kiinnitettynä testauslaitteeseen



KUVA 25. Kuormitus-siirtymä -kaaviota pystyi vetokokeiden aikana seuraamaan reaaliajassa

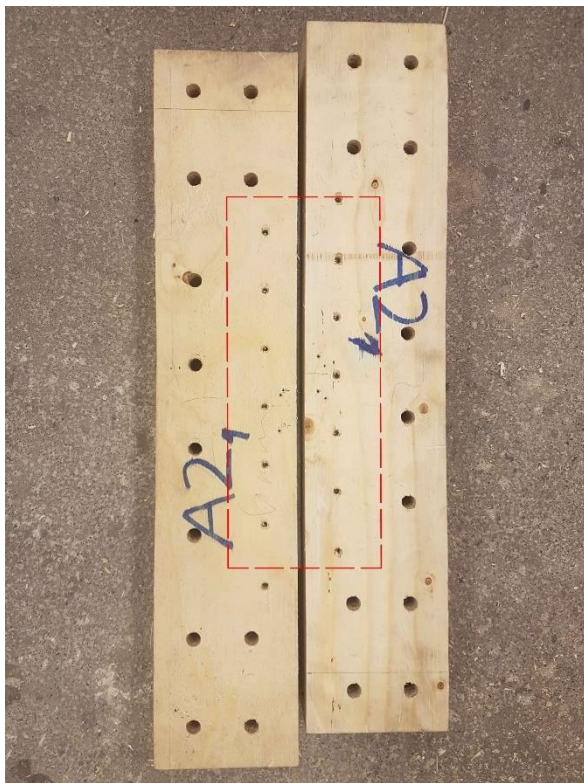


KUVA 26. Koekappaleen muodonmuutos vetokokeen aikana

## 6.5 Koetulosten analysointi

Koesarjat olivat A1, A2, B1 ja B2, jossa A-sarjojen kappaleita kuormitettiin pääasiassa syysuuntaa pitkin ja B-sarjojen kappaleita syysuuntaa vastaan. A-sarjoissa molempien liitoskappaleiden urat teräslevyä varten olivat leveydeltään 6 mm ja B-sarjoissa toisen kappaleen ura oli 6 mm ja toisen 3 mm. Koekappaleet, joissa oli kolme ruuvia puolellaan, on merkattu numerolla 1 ja koekappaleet, joissa oli seitsemän ruuvia puolellaan, on merkattu numerolla 2. Kaikista sarjoista on kolmen vetokokeen otanta (ks. Taulukko 1).

Näillä ruuvimäärillä syysuunnasta huolimatta liitos petti lopullisesti joka kerta ruuvien katkettua toiselta puolelta. B-sarjoissa ruuvit katkesivat poikkeuksetta siltä puolelta, missä oli leveämpi (6 mm ura) teräslevylle. Kun A- ja B-sarjojen maksimivoimien ja siirtymien keskiarvoja katsoo, ei huomattavia eroavaisuuksia ole. Itse asiassa suurin maksimivoima löytyy B-sarjasta, jossa liitosta vedetään LVL:n kannalta heikompaan suuntaan. Liitoksen murtumistavoissa näyttäisi olevan kuitenkin pieniä eroavaisuuksia. Mainittakoon vielä, että käyrien alkupäiden erot johtuvat osittain testauslaitteen leukojen ja testikappaleiden välisestä luistamisesta ja osittain veto-osien kiinnityspulttien asettumisesta, mutta nämä seikat eivät vaikuta kokeiden lopputuloksiin.

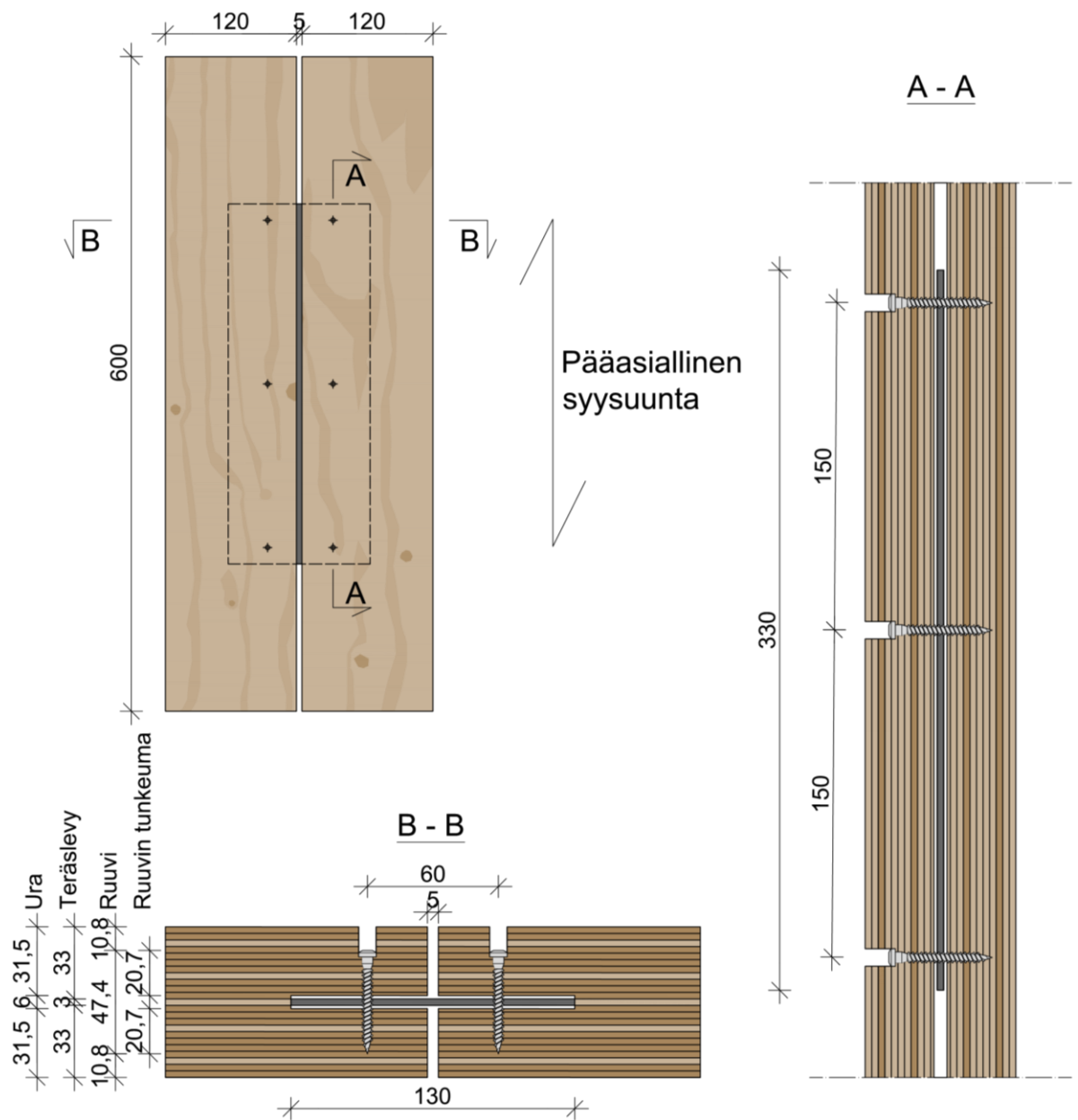


KUVA 27. Koekappaleen tyypillinen muodonmuutos

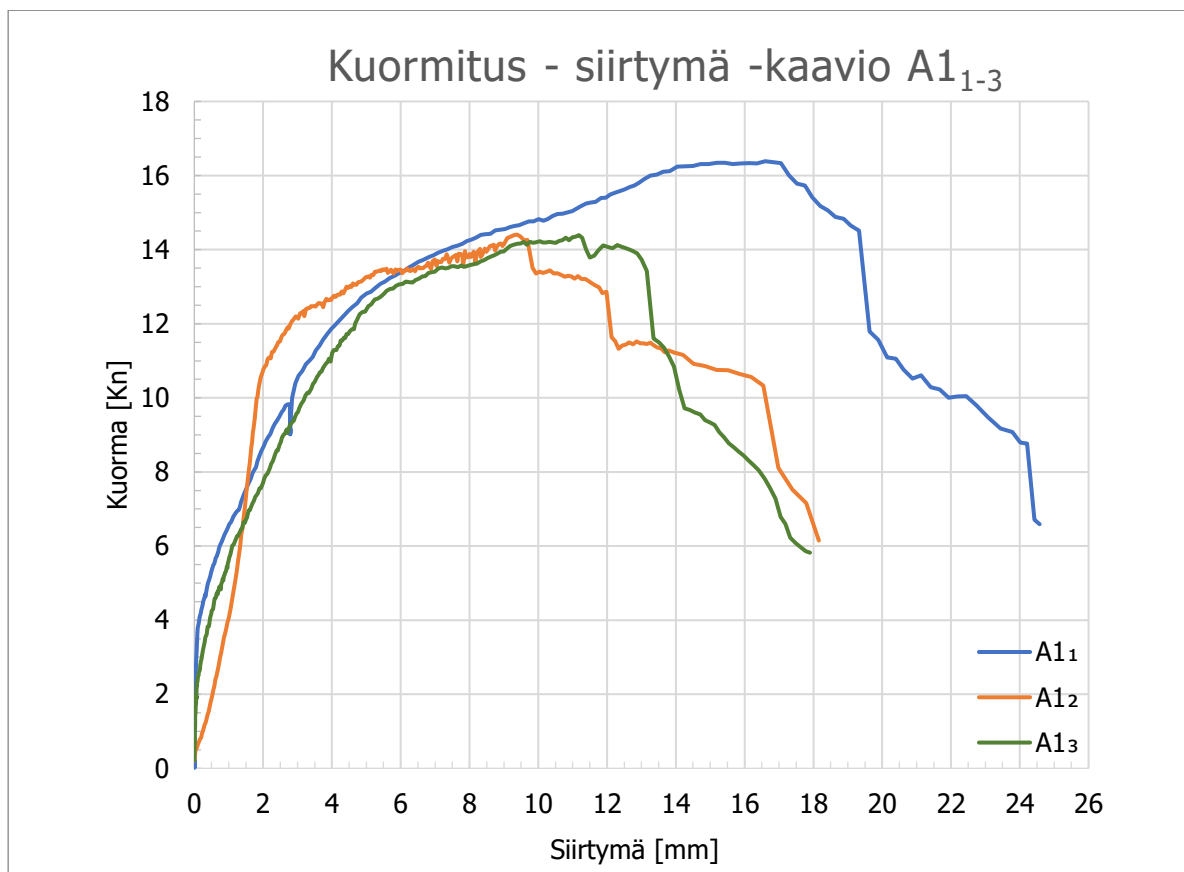
Liitoksia on vetokokeiden jälkeen päältä päin tarkasteltu, ja poikkeavissa tapauksissa on tehty tarkempia avauksia ja pohdittu poikkeamien aiheuttajia. Kuvassa 27 on esitetty tyypillinen koekappaleiden muodonmuutos, jossa ruuvien katkeamisen toiselta puolelta (kuvassa vasemmalta) huomaa ruuvirivien sijainnista teräslevyyn nähden jo ilman kappaleen avaamista. Teräslevyn sijanti on hahmoteltu kuvaan punaisella katkoviivalla.

## 6.5.1 Koesarja A1

Koesarjassa A1 liitoksessa on kolme ruuvia puolellaan, molempien LVL-kappaleiden urat teräslevyä varten ovat leveydeltään 6 mm ja veto kohdistuu pääasiallista syysuuntaa pitkin.



KUVA 28. A1-koesarjan koekappale



KUVIO 1. A1-koesarjan koekappaleiden kuormitus-siirtymä -kaavio

TAULUKKO 4. A1-koesarjan vetokokeiden kuormien maksimiarvot, liitettävien osien välinen siirtymä murtumishetkellä ja murtumisajankohta testauksen aloittamisesta

<b>A1</b>	<b>Max kuorma [kN]</b>	<b>Siirtymän keskiarvo [mm]</b>	<b>Aika [s]</b>
<b>A1<sub>1</sub></b>	16,39	16,60	224
<b>A1<sub>2</sub></b>	14,41	9,39	215
<b>A1<sub>3</sub></b>	14,39	11,18	228
<b>Keskiarvo</b>	15,06	12,39	222

Liitoksen elastisuus on säilynyt 11...13 kN voimaan asti käyrän kuitenkin olematta täysin lineaarinen johtuen puun myötäämisestä ruuvien painaessa sitä vasten (vrt. kohdan 6.7 pelkän ruuvin kuormitus-taipuma -kaavion alun lineaarisuuteen). Voiman tästä kasvaessa käyrän kulmakertoimen muutoksesta huomaa liitoksen siirtymisen plastiselle alueelle, missä muodonmuutos on pysyvä, vaikka kuorma poistuisikin. Koekappaleissa A1<sub>2</sub> ja A1<sub>3</sub> ensimmäinen ruuvi on mennyt poikki noin 14,4 kN voiman kohdalla siirtymien ollessa noin 9–11 mm. Ensimmäisessä koekappaleessa A1<sub>1</sub> kuitenkin liitoksen myötääminen on jatkunut sallien yli 16 mm siirtymän ennen murtumista. Kappale on avattu tarkemmin ja tutkittu mahdollista syytä murtotapahtuman poikkeavuudelle.

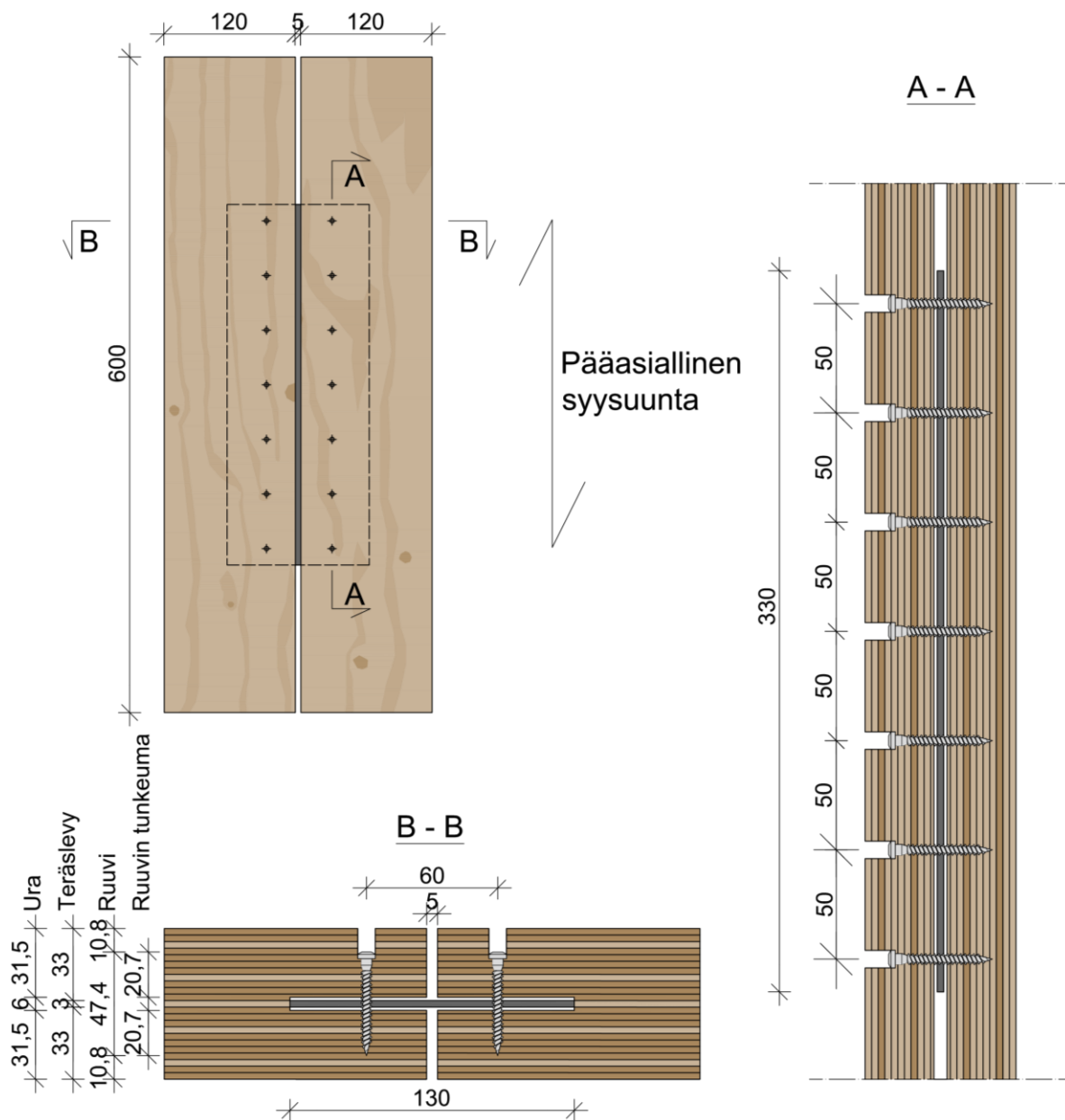


KUVA 29. Koekappaleen A1<sub>1</sub> sisään katkennut ruuvi

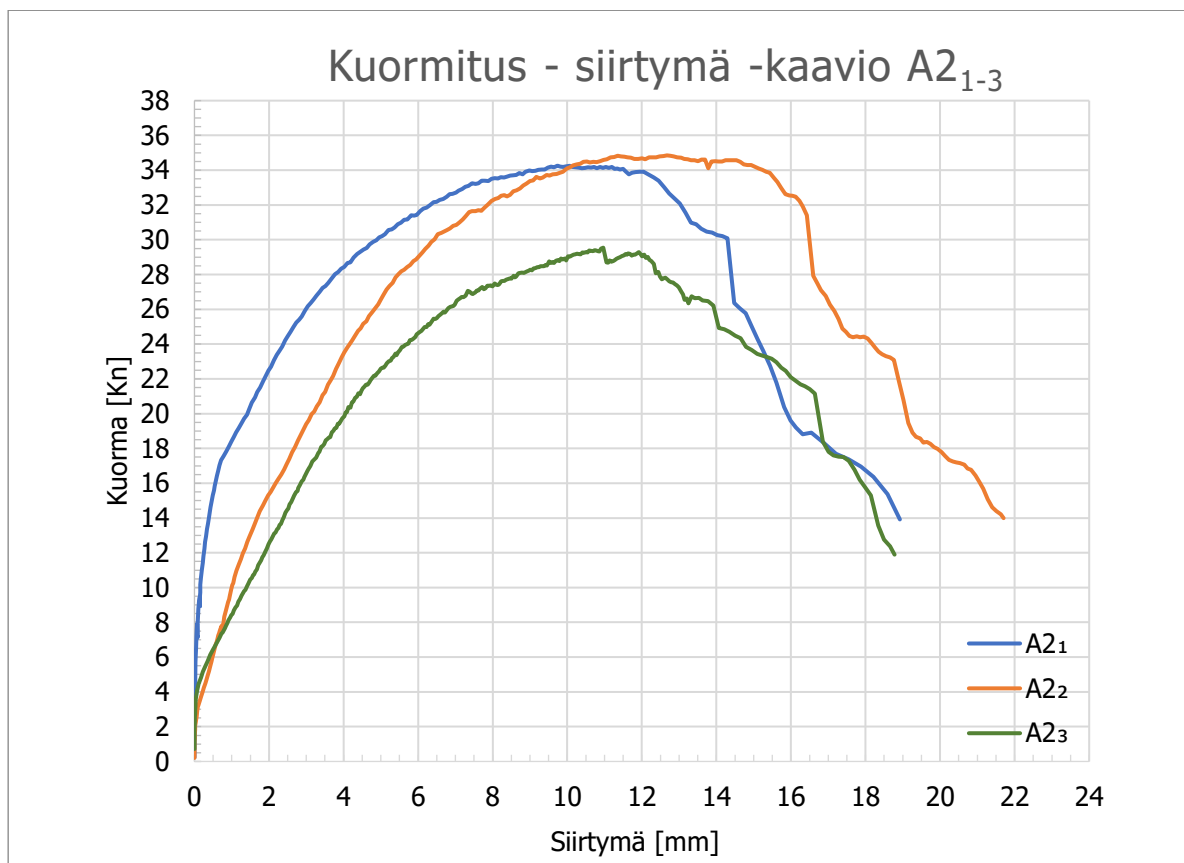
Koekappaleen A1<sub>1</sub> sisällä oli epäonnistuneesta ruuvauksesta jäänyt katkennut ruuvin pää, joka on taipumasta päätellen ottanut toispuoleisesti osaa liitokseen ja selittää osaltaan myös eri puolten ekstensometrien siirtymien eron (liite 1) sekä plastisen venymisen pidemmän jatkuvuuden.

## 6.5.2 Koesarja A2

Koesarjassa A2 liitoksessa on seitsemän ruuvia puolellaan, molempien LVL-kappaleiden urat teräslevy varten ovat leveydeltään 6 mm ja veto kohdistuu pääasiassa syysuuntaa pitkin.



KUVA 30. A2-koesarjan koekappale



KUVIO 2. A2-koesarjan koekappaleiden kuormitus-siirtymä -kaavio

TAULUKKO 5. A2-koesarjan vetokokeiden kuormien maksimiarvot, liitettävien osien välinen siirtymä murtumishetkellä ja murtumisajankohta testauksen aloittamisesta

<b>A2</b>	<b>Max kuorma [kN]</b>	<b>Siirtymän keskiarvo [mm]</b>	<b>Aika [s]</b>
<b>A2<sub>1</sub></b>	34,25	9,74	116
<b>A2<sub>2</sub></b>	34,85	12,67	230
<b>A2<sub>3</sub></b>	29,54	10,96	259
<b>Keskiarvo</b>	32,88	11,12	218

Onnistuneesti valmistetut koekappaleet A2<sub>1</sub> ja A2<sub>2</sub> kestivät noin 34 kN rasituksen ennen murtumista. Niissä plastisuusraja on viimeistään 28 kN ja 30 kN välillä, jonka jälkeen liitos kuitenkin kestää murtumatta vielä noin 4–6 kN voiman ja sallii noin 6 mm siirtymän ennen maksimivoiman saavuttamista. Huomattavaa on, että maksimivoiman saavuttamisen jälkeen voima ei lähde heti jyrkästi laskemaan vaan liitoksessa riittää kapasiteettia vielä senkin jälkeen siirtymän kasvaessa, kunnes liitinryhmästä pottää useampi ruuvi. Kolmen ruuvin liitoksessa murtumisen jälkeen kapasiteetti lähti hyvin äkkiä laskemaan. Koekappaletta A2<sub>3</sub> on tutkittu tarkemmin sen heikomman kapasiteetin vuoksi.



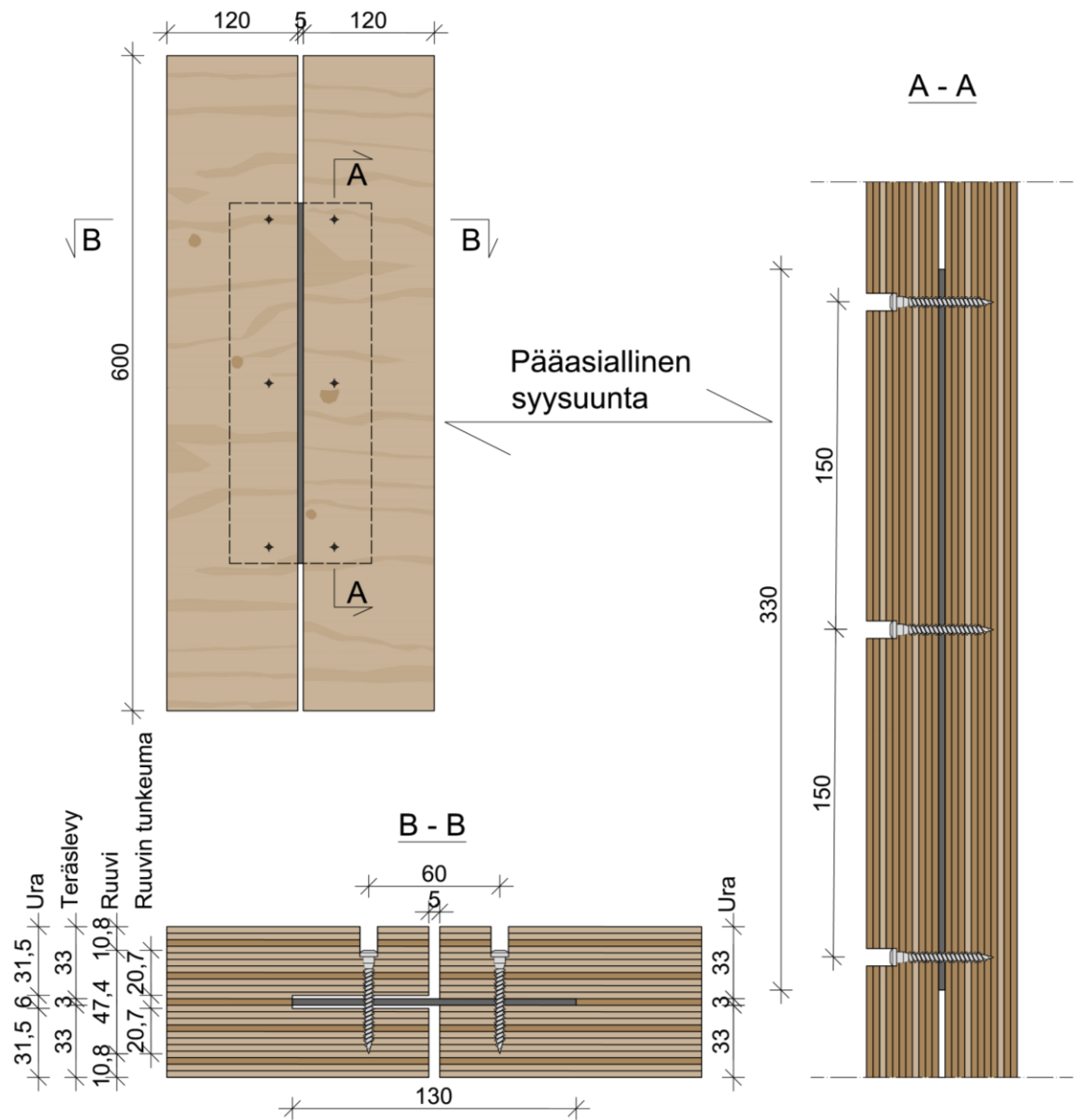
KUVA 31. Koekappaleen A2<sub>3</sub> reunimmaisten ruuvien tunkeuma

Koekappale A2<sub>3</sub> kesti noin 5 kN muiden sarjan koekappaleiden maksimikuormaa vähemmän. Syynä on neljän reunimmaisten ruuvien riittämätön tunkeuma puussa. Pienin tunkeuma oli kappaleen päältä päin mitattuna noin 2,8 mm. Jotta ruuvi olisi keskeisesti liitoksessa, mitan tulisi olla 10,8 mm. Nyt tämän liitoksen kestävyuden kannalta huonoimman ruuvin kärjenpuoleinen tunkeuma on enää noin 12,7 mm, joka on 8 mm vähemmän kuin suunniteltu. Tämä vaikuttaa ruuvien toimintaan liitoksessa huomattavasti. Laskennallisestikin kaikissa Eurokoodin leikkausrasitettujen ruuvien kestävyyslaskujen kaavoissa suurempi tunkeuma on edullinen kapasiteetin kannalta.

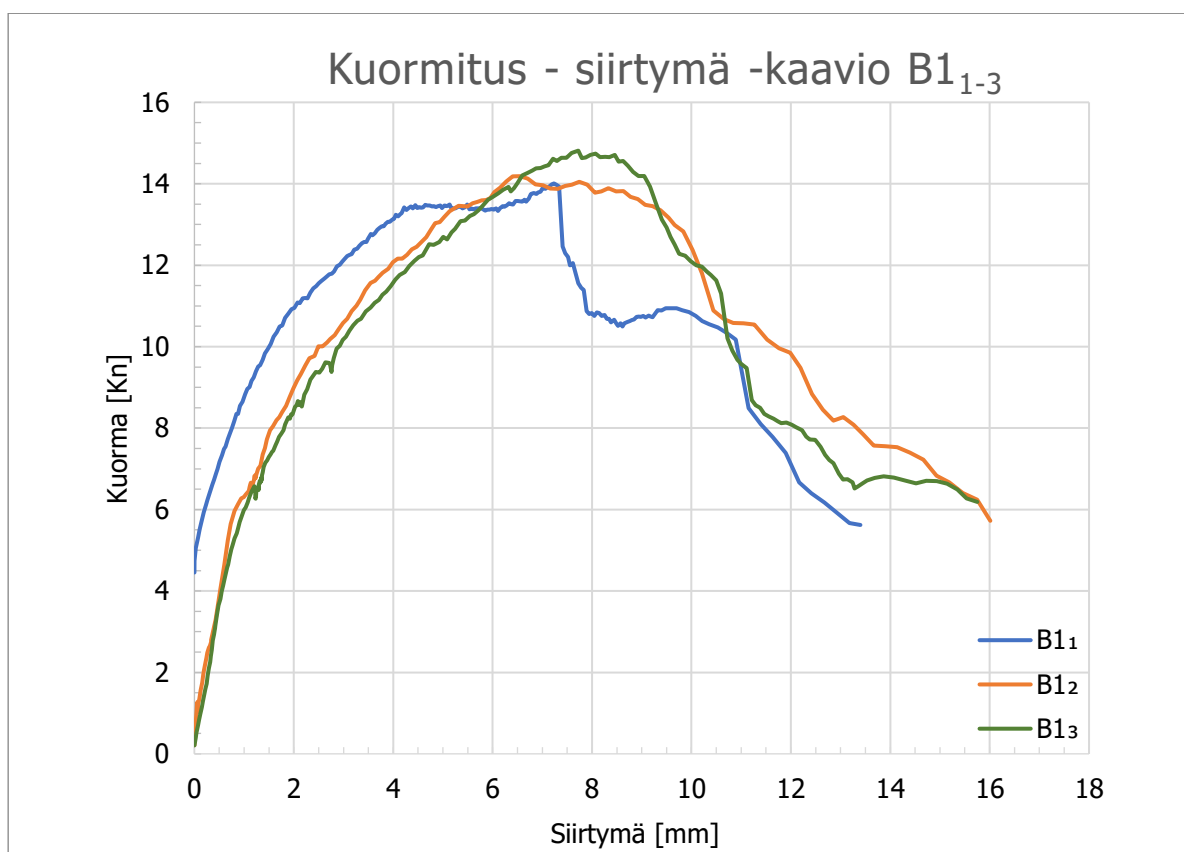
Se, että ruuveja ei ole saatu riittävän syväälle asti, johtuu teräslevyn pienestä liikkumisesta ruuvausvaiheessa, mikä tapahtuu helposti, kun 3 mm teräslevy on vapaasti 6 mm leveässä urassa. Ruuvi ei ole tällöin osunut esiporatun reiän keskelle eikä lähtenyt kunnolla pureutumaan. Huonosti tunkeutuneiden ruuvien kapasiteetti on myös voinut kärsiä ylimääräisestä vääntörasituksesta, kun niitä on yritetty porata syvemmälle. Liitoksen toteuttamisessa työmaalla saattaisi tulla tässä myös haasteita esiporatun reiän sijainnin toleranssin ollessa niin pieni.

## 6.5.3 Koesarja B1

Koesarjassa B1 liitoksessa on kolme ruuvia puolellaan, toisen LVL-kappaleen ura on leveydeltään 6 mm ja toisen 3 mm. Veto kohdistuu pääasiallista syysuuntaa vastaan.



KUVA 32. B1-koesarjan koekappale



KUVIO 3. B1-koesarjan koekappaleiden kuormitus-siirtymä -kaavio

TAULUKKO 6. B1-koesarjan vetokokeiden kuormien maksimiarvot, liitettävien osien välinen siirtymä murtumishetkellä ja murtumisajankohta testauksen aloittamisesta

<b>B1</b>	<b>Max kuorma [kN]</b>	<b>Siirtymän keskiarvo [mm]</b>	<b>Aika [s]</b>
<b>B1<sub>1</sub></b>	14,01	7,24	159
<b>B1<sub>2</sub></b>	14,19	6,54	111
<b>B1<sub>3</sub></b>	14,81	7,72	163
<b>Keskiarvo</b>	14,34	7,17	144

Koesarjan B1 kuormitus-siirtymä -käyrän alussa eli liitoksen elastisella alueella ei ole A1 sarjaan verrattaessa huomattavia eroavaisuuksia. Myös liitoksen kestävät maksimikuormat ovat samoissa lukemissa ja uskon että koesarjojen maksimikuormien keskiarvot olisivat suuremmalla otannalla vielä lähempänä toisiaan. Pääasiallisen syysuunnan vaikutuksen huomaa kuitenkin, kun tarkastelee kaavion plastisen osuuden käyriä, murtumisajankohtaa testin aloittamisesta ja siirtymää murtumishetkellä.

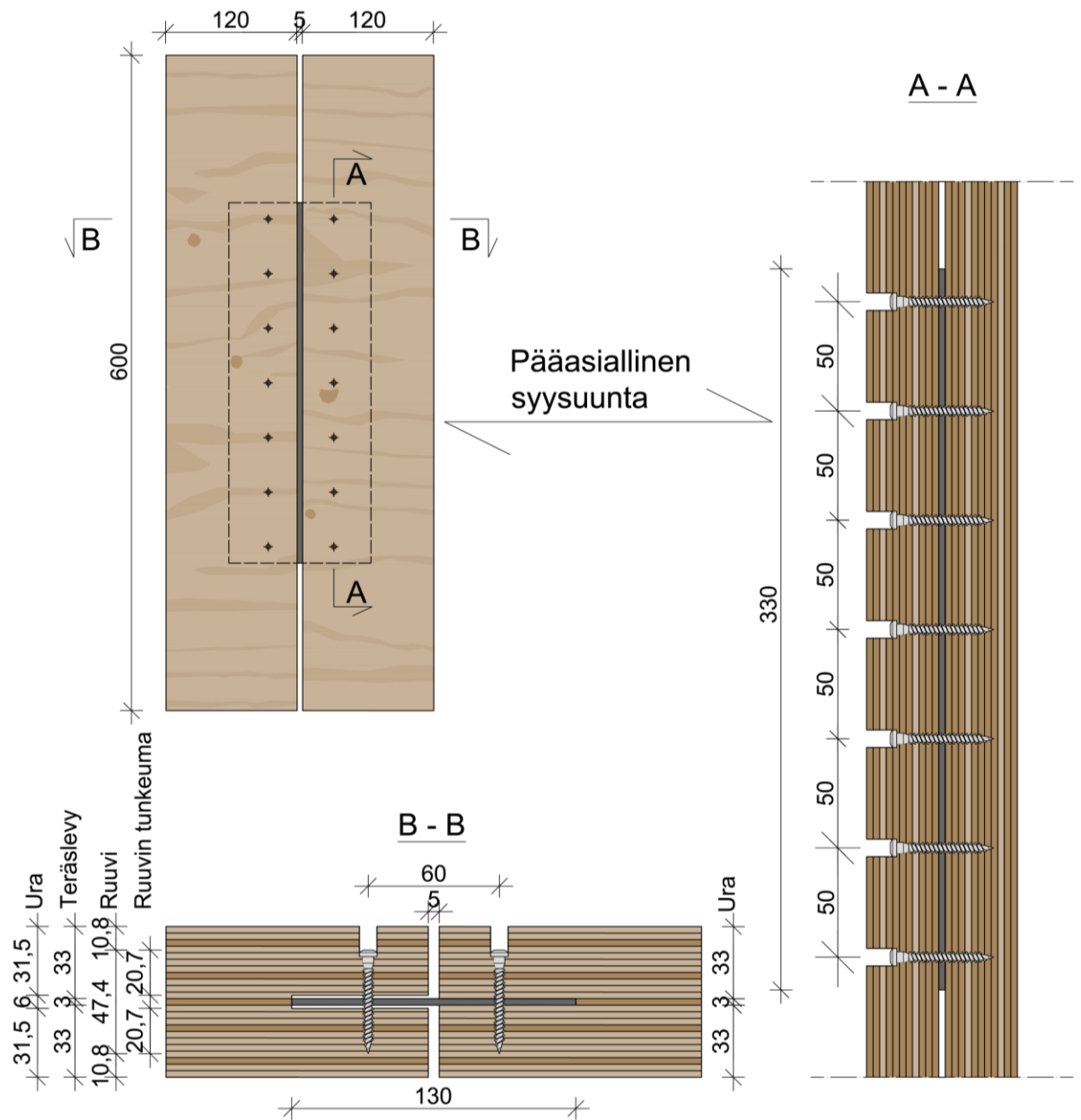
Sarjan B1 koekappaleiden välisen siirtymän keskiarvo murtumishetkellä on noin 7 mm, kun sarjassa A1 se oli noin 12 mm (suuremmalla otannalla todennäköisesti noin 9–11 mm). Murtuminen on myös tapahtunut huomattavasti nopeammin plastiselle alueelle siirtymisen jälkeen kuin sarjassa A1, jossa

käyrä on ennen maksimivoiman saavuttamista huomattavasti loivempi kuin sarjassa B1. Murtumisaikojen keskiarvoissa on myös 78 sekunnin ero, joka on huomattava. Ero johtuu todennäköisesti heikommasta puun reunapuristuslujuudesta ruuvien painautuessa siihen pääasiallista syysuuntaa vastaan. Puu siis antaa herkemmin periksi ja ruuvit toimivat tällöin itsenäisemmin, jolloin vetokokeen kuormitus-siirtymä -kaaviokin muistuttaa enemmän pelkän ruuvin vetokokeen käyrää. Pienempi siirtymä johtuu varmasti osittain siitä, että teräslevy on toiselta puolelta tiukasti 3 mm lovessa, jolloin ruuvit eivät siltä puolelta pääse taipumaan niin paljon.

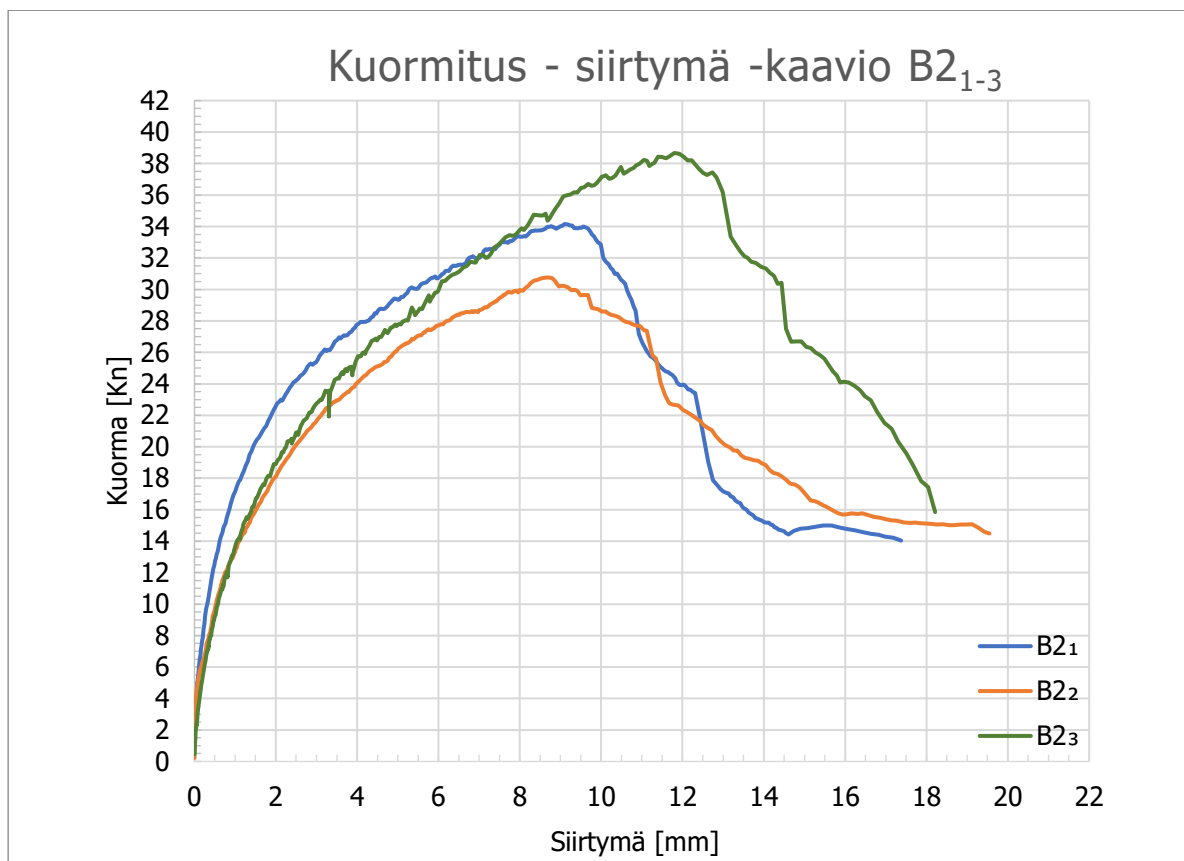
Koekappaleessa B1<sub>1</sub> noin 13,5 kN kuorman kohdalla voiman kasvaminen on loppunut hetkeksi, joka viittaa siihen, että jossain kohdassa liitosta ruuvin ja puun välisen tartunnan aiheuttama köysivaikutus on lakannut, eli toisin sanoen ruuvi tai ruuvit ovat alkaneet vetäytymään puusta, jolloin ruuvi ei enää ota voimia vastaan sen pituussuunnassa. Liitoksen kapasiteetin menetys on myös tapahtunut todella nopeasti maksimikuorman saavuttamisen jälkeen. Ruuvien ollessa pääasiallisen syysuunnan vastaisessa rivissä tämän tyyppinen murtotapahtuma näyttäisi tapahtuvan herkemmin kuin kuormituksen ollessa syysuuntaa pitkin. Kuten todettu myös kohdassa 5.5.2, siihen vaikuttaa tosin myös ruuvin tunkeuma, joka tulisi olla todella lähelle sellainen kuin laskelmissa, jotta liitos toimii suunnitellusti.

## 6.5.4 Koesarja B2

Koesarjassa B2 liitoksessa on seitsemän ruuvia puolellaan, toisen LVL-kappaleen ura on leveydeltään 6 mm ja toisen 3 mm. Veto kohdistuu pääasiallista syysuuntaa vastaan.



KUVA 33. B2-koesarjan koekappale



KUVIO 4. B2-koesarjan koekappaleiden kuormitus-siirtymä -kaavio

TAULUKKO 7. B2-koesarjan vetokokeiden kuormien maksimiarvot, liitettävien osien välinen siirtymä murtumishetkellä ja murtumisajankohta testauksen aloittamisesta

<b>B2</b>	<b>Max kuorma [kN]</b>	<b>Siirtymän keskiarvo [mm]</b>	<b>Aika [s]</b>
<b>B2<sub>1</sub></b>	34,16	9,10	235
<b>B2<sub>2</sub></b>	30,76	8,77	248
<b>B2<sub>3</sub></b>	38,67	11,80	288
<b>Keskiarvo</b>	34,53	9,89	257

Myös B2-koesarjaan pätee edellisessä kohdassa (5.5.3) huomaamani pääsiallisen syysuunnan vaikutus käyrien muotoon, kun verrataan käyriä koesarjan A2 käyriin. Liitoksen siirtyminen plastiselle alueelle on huomattavasti jyrkempi ja liitoksen maksimiarvon saavutettua liitoksen kapasiteetti häviää kuormituksen jatkuessa nopeammin kuin koesarjan A2 kappaleissa. Näiden seitsemän ruuvien sarjojen murtumisajalla ei kuitenkaan ollut enää samanlaista eroa kuin kolmen ruuvien sarjojen välillä ja maksimikuorman aikaisten siirtymienkin ero on vain 1–2 mm.

B2-koesarjassa maksimikuormien hajonta oli kaikista sarjoista suurin. Toisaalta sarjasta löytyy myös testien suurin maksimikuorma 38,67 kN. Murtotapahtumat koekappaleissa B2<sub>1</sub> ja B2<sub>3</sub> olivat samankaltaisia. Niissä ruuvit ovat leikkautuneet teräslevyn mukana, mutta puuhun tunkeutuneet päät ovat pysyneet kiinni puussa. Köysivaikutus on ollut siis jossain määrin voimassa koko vedon ajan ruuvien

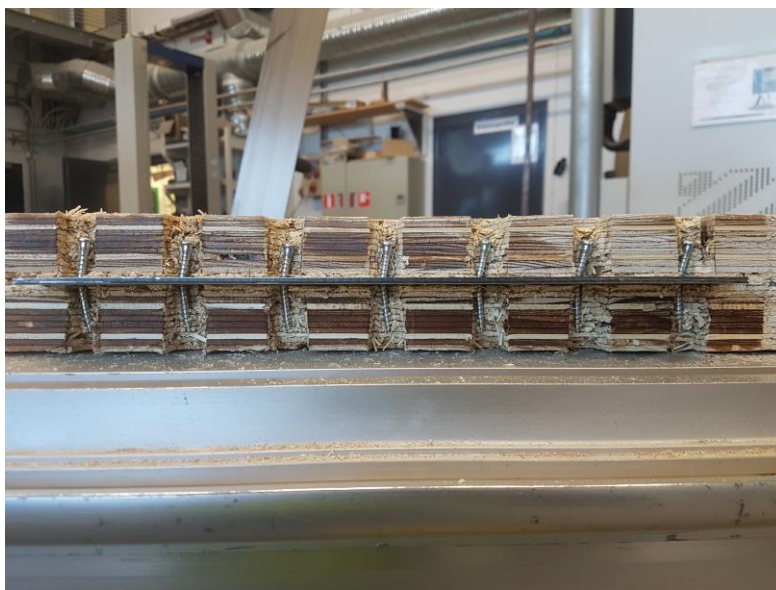
katkeamiseen asti. Koekappaleen B<sub>2</sub> heikompi kapasiteetti johtuu taas siitä, että ainakin osa ruuveista on menettänyt tartunnan puuhun ja liukunut pois rei'istäään. Koekappaleen ruuvien asentamisessa oli samanlaisia ongelmia kuin koekappaleessa A<sub>2</sub><sub>3</sub> (kohta 5.5.2), mutta tunkeumat olivat lopulta lähellä suunniteltua. Murtotapahtuma on siitäkin huolimatta ollut erilainen verrattaessa muihin sarjan koekappaleisiin (vrt. esim. kuvan 38 murtotapahtumaan). Kuvasta 34 huomaa, kuinka etenkin kuvassa ruuvirivin oikeassa päässä ruuvien kärjen puolet ovat alkaneet vetäytymään ulos puusta kuormituksen johdosta.



Kuva 34. Koekappaleen B<sub>2</sub> katkenneiden ruuvien kärkipuolet

### 6.5.5 Yhteenveto

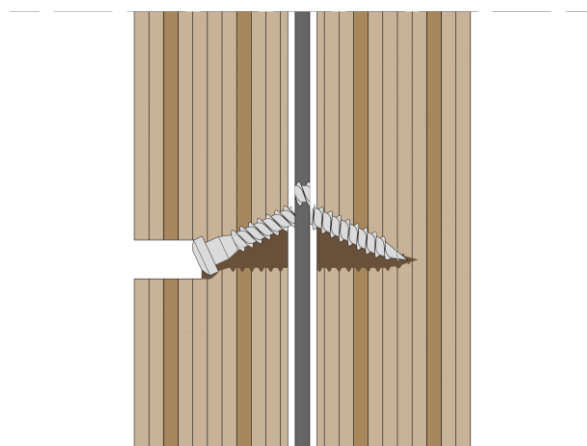
Kaikissa koesarjoissa liitos murtui odotetusti ruuvien pettäessä. Teräslevyissä ei ollut huomattavia muodonmuutoksia, eivätkä niihin poratut reiät ole korruptoituneet (kuva 36). Puussa tapahtuneet muodonmuutokset rajoittuivat ruuvien painamisesta aiheutuneeseen ruuvireikien venymiseen ja sisäosien lähimpänä teräslevyä olevien viilujen halkeiluun (kuva 38). Koko poikkileikkauksessa tapahtuvaa lohkeamista tai muuta muodonmuutosta ei missään kohtaa ollut havaittavissa. Tyypillisin murtotapahtuma ja vastapuolen ruuvien muodonmuutos on esitetty edellä olevissa kuvissa. Poikkeavat murtotapahtumat ovat esitetty edellisissä kohdissa.



KUVA 35. Koekappaleen B2<sub>3</sub> toisen puolen taipuneet, mutta katkeamattomat ruuvit



KUVA 36. Teräslevyn reiät vetokokeen jälkeen



KUVA 37. Tyypillinen ruuvien murtotapahtuma



Kuva 38. Halkaistut A2 ja B2 -koeryhmien koekappaleet katkenneiden ruuvien puolelta

Kaikki liitoksen ruuvit toimivat tehokkaasti liitoksen osana. Liitos toimii testausolosuhteissa odotusten mukaisesti ja sen kapasiteetti on laskelmia vastaava. Huomattavaa on syysuunnan vaikutus liitoksen kestävyys lähellä murtumispistettä. Vaikka liitosten kestävät maksimikuormat olivat syysuunnasta huolimatta samanlaisia, niin kuorman kohdistuessa pääasiassa syysuuntaa pitkin liitos vaikutti kestävämpään ennen lopullista kapasiteetin menetystä. Kuorman kohdistuessa pääasiassa syysuuntaa vastaan liitos taas petti nopeammin maksimikuorman saavutettua. Tärkeä huomio on myös, että ruuvien oikealla tunkeumasyyvydellä on suuri merkitys tässä liitoksessa.

## 6.6 Vertailu laskennallisiin tuloksiin

Liitosten kapasiteetit euronormeihin perustuvien laskujen perusteella vastaavat vetokokeiden perusteella todettuja kapasiteetteja hyvin. Laskut ovat koetuloksiin verrattuna noin 2–9 % varmalla puolella, kun vertailussa käytetään koesarjojen maksimikuormien keskiarvoja. Ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla tulokset ovat noin saman verran heikolla puolella. Koesarjojen heikoimpiin kappaleisiin verrattaessa laskennalliset kapasiteetit ovat varmalla puolella kolmen ruuvin sarjoissa, mutta seitsemän ruuvin liitoksissa laskennallinen kapasiteetti on hieman suurempi. Molemmilla sarjoissa tosin heikoimmat koekappaleet olivat osittain epäonnistuneita. Liitoksen kapasiteetti on vertailuissa murtorajatilan mitoitusarvoina. On otettava myös huomioon, että liitosta mitoittaessa euronormien mukaan myös siihen kohdistuvat kuormat kerrotaan tapauskohtaisilla osavarmuuskerroilla.

TAULUKKO 8. Liituskokeiden koesarjojen maksimikuormien keskiarvojen vertailu laskennallisiin kapasiteetteihin

Koesarja	Liituskokeiden maksimikuorman keskiarvo [kN]	Ruuvin valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla		Ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla	
		Laskennallinen kapasiteetti [kN]	Koetulokset/laskelmat	Laskennallinen kapasiteetti [kN]	Koetulokset/laskelmat
A1	15,06	13,85	108,8 %	15,18	99,2 %
A2	32,88	32,31	101,8 %	35,42	92,8 %
B1	14,34	13,85	103,6 %	15,18	94,5 %
B2	34,53	32,31	106,9 %	35,42	97,5 %

TAULUKKO 9. Liituskokeiden koesarjojen pienimmän maksimikuorman vertailu laskennallisiin kapasiteetteihin

Koesarja	Liituskokeiden pienin maksimikuorma [kN]	Ruuvin valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla		Ruuvikokeiden perusteella lasketulla myötömomentilla	
		Laskennallinen kapasiteetti [kN]	Koetulokset/laskelmat	Laskennallinen kapasiteetti [kN]	Koetulokset/laskelmat
A1	14,39	13,85	103,9 %	15,18	94,8 %
A2	29,54	32,31	91,4 %	35,42	83,4 %
B1	14,01	13,85	101,2 %	15,18	92,3 %
B2	30,76	32,31	95,2 %	35,42	86,8 %

Verrataan vielä lähimpänä tosiasiallista murtumistapaa g edustavan kaavan (Kuva 14) avulla laskettuja kapasiteetteja liitoskokeisiin.

TAULUKKO 10. Liitoskokeiden koesarjojen maksimikuormien keskiarvojen vertailu todellista murtumistapaa edustavan laskukaavan kapasiteetteihin

Koe-sarja	Liitoskokeiden maksimikuorman keskiarvo [kN]	Laskennallinen kapasiteetti [kN]	Koetulokset/laskelmat
<b>A1</b>	15,06	21,51	70,0 %
<b>A2</b>	32,88	50,19	65,5 %
<b>B1</b>	14,34	21,51	66,7 %
<b>B2</b>	34,53	50,19	68,8 %

Huomataan, että vaikka kyseisen kaavan edustama murtumistapa on lähimpänä todellista murtumistapaa, niin siitä saadaan näissä laskuissa huomattavasti suurempi kapasiteetti, mitä liitoskokeiden perusteella liitos oikeasti kestää. Kaava ei siis tällaisenaan ole sovellettavissa liitoksen kestävyuden arviointiin. Täytyy ottaa huomioon, että kuvan 14 tilanteet eivät kuitenkaan täysin vastaa tässä laskettua liitosta, sillä niissä puikkoliitin menee kaikkien kolmen liitososan läpi kokonaan, kun tässä liitoksessa taas liitin on puiden sisällä.

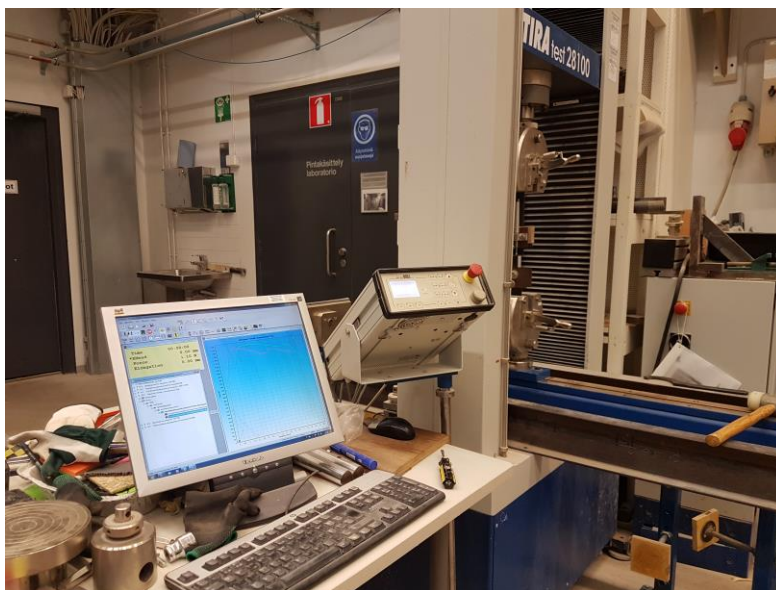
## 6.7 Ruuvien myötömomentin testaus

Liitoksessa käytettäville ruuveille tehtiin vetokokeita Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa 30.1.2020. Tarkoituksena oli testata ruuvien kestävä poikittaiskuormitus sen ollessa ruuvattuna saman kokoiseen esiporattuun reikään, missä se on edellisessä kohdassa testatussa liitoksessa ( $\varnothing 4,3$  mm). Myös teräs, jota ruuvikokeissa käytettiin, oli lujuudeltaan ja paksuudeltaan sama kuin liitoskokeissa. Tätä varten käytössä oli Per-Anders Daergan suunnittelema testilaitte, jota on käytetty aiemmin samojen ruuvien testaamiseen Miittisen (2018, 73–76) ja Kaipiaisen (2018, 10–11) opinnäytetöihin liittyen. Testijärjestelyt eroavat näistä kuitenkin siten, että niissä ruuvi oli tukien välissä vapaasti teräslevyn reiän ollessa ruuvien halkaisijaa suurempi. Vetokokeet tehtiin 10:lle ruuville.

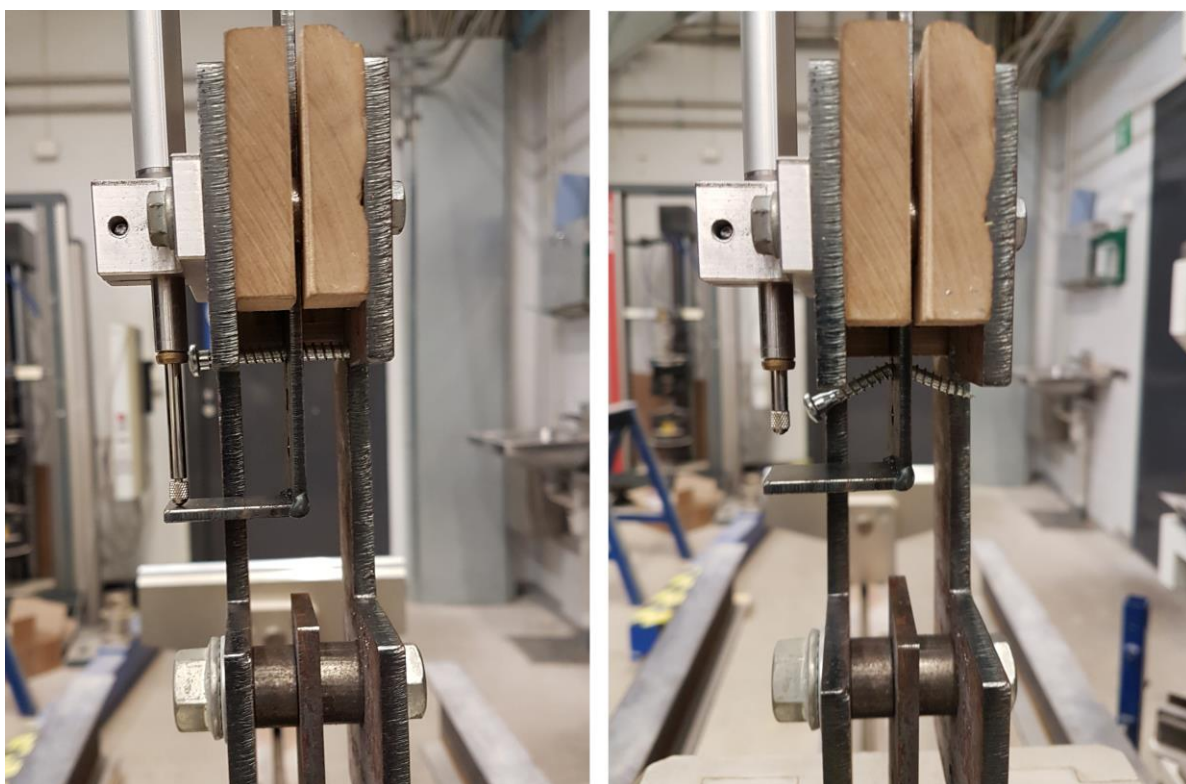
### 6.7.1 Koestus

Vetokokeissa käytettiin TIRATest 28100 -aineenkoestuslaitetta, jonka maksimi testauskuorma on 100kN. Testilaitte oli kalibroitu lokakuussa 2019. Ruuvien taipuma mitattiin ulkoisella ekstensometrillä. Testeissä ruuvien kierteinen osa oli 27 mm etäisyydellä toisistaan olevia tukia vasten ja sen keskelle kohdistettiin vetorasitusta. Ruuvi pääsi tiukasta kiinnityksestä huolimatta liikkumaan vapaasti tuilla, joten testin kannalta epätoivottuja aksiaalisia voimia ruuviin ei voinut paljon muodostua. Testin

lopussa ruuvien kanta tarttui tuen reunaan ottaen vastaan myös aksiaalisesti kuormaa, mutta siinä vaiheessa ruuvien kestävä maksimivoima oli jo saavutettu.



KUVA 39. TIRA Test 28100 -ainekoestuslaite ja tietokoneella sen ohjaus- ja tiedonkeruuohjelmisto



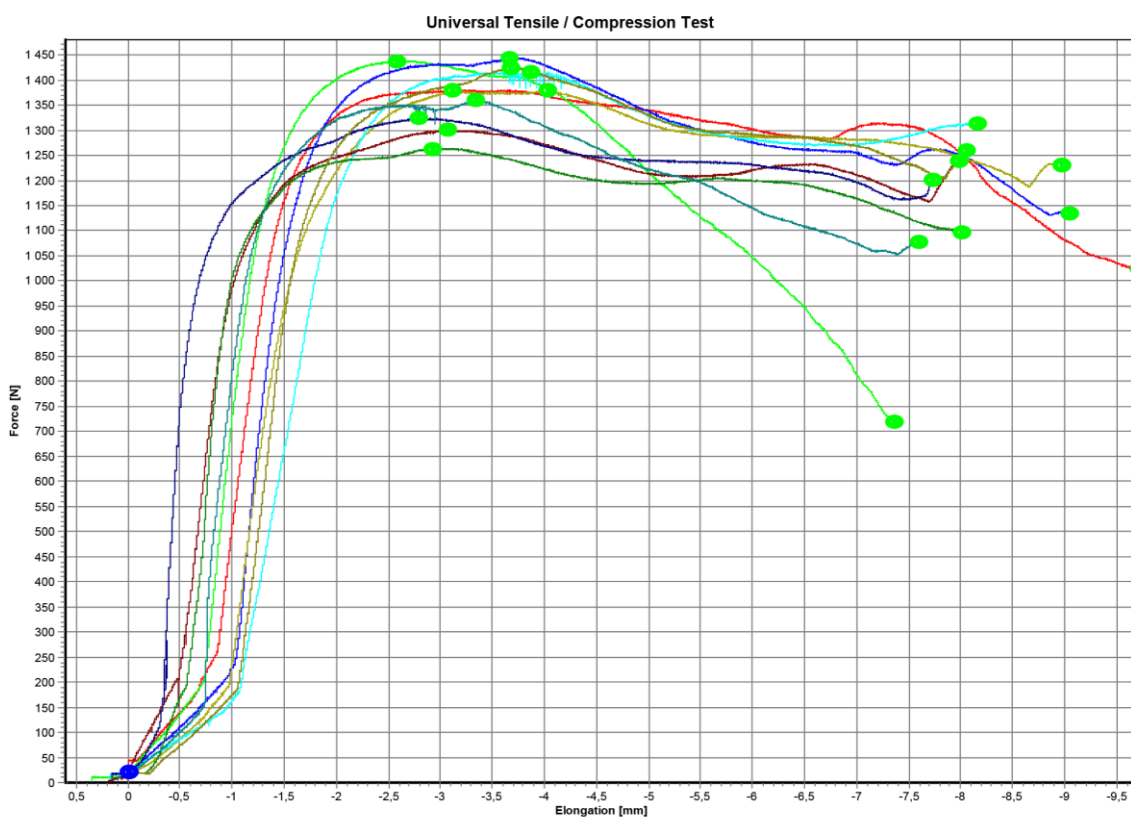
KUVA 40. Ruuvi ennen vetokoetta ja taipuneena sen jälkeen

## 6.7.2 Koetulosten analysointi

Kymmenen kappaleen otannalla ruuvin kestävä maksimikuorma vaihteli välillä 1263–1444 N taipuman ollen murtumahetkellä 2,6–4,0 mm.

TAULUKKO 11. Ruuvin vetokokeiden maksimikuormat ja taipumat maksimikuorman aikana

Ruuvi	Max kuorma [N]	Taipuma [mm]
1	1379	3,1
2	1439	2,6
3	1444	3,7
4	1380	4,0
5	1417	3,9
6	1300	3,1
7	1263	2,9
8	1325	2,8
9	1425	3,7
10	1361	3,3
<b>Keskiarvo</b>	<b>1373</b>	<b>3,3</b>



KUVIO 5. Ruuvin vetokokeiden kuormitus-taipumakäyrä TIRAtest -ohjelmistosta

Kuviosta X näkyvät käyrien alkujen hajonnat johtuvat testilaitteen lattarautojen luistamisesta koestuskoneen leukojen välissä. Tämä johtuu siitä, että testilaitteen L-muotoista rautaa joutui lyhentämään uutta reikää varten, jolloin se ei enää yltänyt aivan koestuskoneen yläleuan pohjaan asti. Käyristä näkee kuitenkin, että ruuvien myötöraja on noin välillä 1100–1300 N, jolloin taipuma on ollut 1–2 mm. Maksimiarvo on saavutettu keskimäärin 1373 N kuorman kohdalla taipuman ollessa keskimäärin 3,3 mm. Käyrien lopussa voimien uudelleen nousuun lähtö johtuu siitä, että ruuvien kanta otti riittävästi taipuneena testilaitteen tuen reunaan kiinni, mutta sitä ei tässä huomioida.

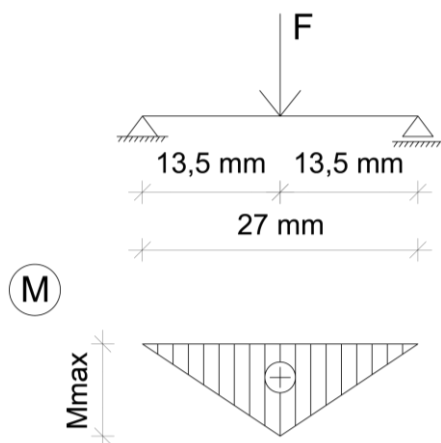
TAULUKKO 12. Kapasiteetti yhtä ruuvia kohti liitoskokeiden koesarjoissa.

Koesarja	Liitoskokeiden maksimikuorman keskiarvo [kN]	Kapasiteetti/ruuvi [N]
A1	15,06	5020
A2	32,88	4697
B1	14,34	4780
B2	34,53	4933

Taulukossa 12 on laskettu kapasiteetti yhtä ruuvia kohti, kun se on osana LVL-teräslevyliitosta. Liitoksessakin kuormitus kohdistuu samalla tavalla 3 mm teräslevystä keskeisesti ruuviin, mutta tuet ovat siinä näihin ruuvikokeisiin verrattuna erilaiset, joten osana liitosta se kestää lähes 4-kertaisen kuorman näiden ruuvikokeiden tuloksiin verrattuna. Koesarjojen välillä ei näitäkään tarkastellessa vaikuta olevan suuria eroja.

### 6.7.3 Myötömomentin laskenta

Ruuvien myötömomentit ovat laskettu käyttämällä vetokokeiden maksimiarvoja. Momentti lasketaan keskeiseen pistekuormaan sovellettavalla kaavalla (14).



KUVA 41. Ruuvien vapaakappalekuva sekä taivutusmomenttikuvio

$$M_y = \frac{F \times l}{4} \quad (14)$$

TAULUKKO 13. Kaavalla (14) lasketut myötömomentit koekappaleille.

Ruuvi	$M_y$ [Nmm]
1	9310
2	9710
3	9747
4	9318
5	9562
6	8777
7	8526
8	8940
9	9621
10	9184

Myötömomentin ominaisarvo testien perusteella lasketaan kaavalla (15). Testitulokset oletetaan logaritmisesti normaalijakautuneiksi. (SFS-EN 14358:2016, 5)

$$M_{y,k} = e^{y - k_s(n)s_y} \quad (15)$$

missä:

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln M_i \quad (\text{luonnollinen logaritmi myötömomenttien keskiarvosta}) \quad (16)$$

$$y = 9,134$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln M_i - y)^2}, 0,05 \right\} \quad (\text{keskihajonta}) \quad (17)$$

$$s_y = \max \begin{matrix} 0,0453 \\ 0,05 \end{matrix}$$

$$s_y = 0,05$$

$$k_s(n) = 2,10 \quad (\text{kerroin EN 14358 taulukosta 1})$$

Sijoitetaan arvot kaavaan (15), niin saadaan näiden testien perusteella ruuvien myötömomentin ominaisarvo:

$$M_{y,k} = 8338 \text{ Nmm}$$

Näillä koejärjestelyillä ja laskentatavalla ruuvien myötömomentti on (8338-6700) Nmm = 1638 Nmm suurempi kuin valmistajan ilmoittama. Kohdassa 4.3 on laskettu ruuvien poikittaiskuormakestävyys LVL-seinäelementtien välisessä liitoksessa sekä valmistajan ilmoittamalla myötömomentilla, että tässä kohdassa lasketulla myötömomentilla. Mainittakoon vielä, että ruuvien myötömomentin testit on euronormin mukaan suoritettava standardin EN 409 mukaisesti ja testaustulosten perusteella myötömomentti ja muutkin ominaislujuusarvot on laskettava standardin EN 14358 mukaisesti. (SFS-EN 14592:2008, 15–16.) Nämä koejärjestelyt eivät perustu standardiin EN 409, mutta ominaislujuusarvo on laskettu standardin EN 14358 mukaan.

## 7 POHDINTA

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia puukerrostalorakentamisessa uudentyypeistä liitosta kuormituskokeiden avulla. Tarkoitus oli analysoida tutkimustuloksia ja pohtia liitoksen soveltuvuutta seinäelementtien leikkauskuormitettuihin liitoksiin. Työssä laskettiin myös liitoksen kapasiteetti eurokoodistandardeja noudattaen. Työssä perehdyttiin myös LVL-rakentamiseen ja suunnitteilla olevaan LVL-rakennusjärjestelmään.

Kuormituskokeet ja niiden tulokset ovat työssä esitetty koekappaleiden valmistuksesta lähtien tarkasti ja tulokset on käyty perusteellisesti läpi. Pidän testituloksia luotettavina, sillä mittauslaitteet olivat kalibroituja sekä puutavara on säilytetty sille tarkoitettuun tilaan puulaboratoriossa. Kaikista työvaiheista on otettu valokuvia ja testitulokset on tallennettu, joten dokumentoinnista on pidetty huolta. Testeissä yllättävää oli, ettei ristiinviilutetun LVL:n pääasiallisella syysuunnalla ole juurikaan merkitystä liitoksen kapasiteettiin. Eurokoodin mukaan myöskään laskelmissa näillä ruuveilla syysuuntaa ei oteta huomioon. Työssä laskelmat ovat esitetty tarkasti ja niiden mukana on perustelut. Laskuja varten täytyi tutkia eurokoodeja todella tarkasti, sillä lyhennetyissä ohjeissa ja esim RIL:ssä ei suoraan ole tämän tyyppisen liitoksen mitoitusohjeita. Tällä laskentatavalla ollaan vain niukasti varmallalla puolella liitoskokeiden maksimikuormiin verrattuna, joten siinä voisi olla kehittämistä.

Tutkimusten perusteella liitos on soveltuva elementtien liittämiseksi ja osaksi puukerrostalon jäykistämistä. Liitoksella on hyvä kapasiteetti ottamaan vastaan siihen kohdistuvia kuormia. Sen etuja on myös, ettei siihen kohdistu vääntöä ja se on paloteknisesti erittäin toimiva. Liitoksen yksityiskohtia voisi vielä kehittää esimerkiksi eri liittintyyppiä testaamalla. Porakärkisillä ruuveilla välttäisi esiporaamisen, leveimmillä kierteillä olevalla ruuvilla olisi parempi tartunta puuhun ja esimerkiksi tappivaarna voisi olla työmaalla helpompi asentaa.

Opinnäytetyön yhteydessä oppi paljon puun liitostekniikoista käytännön tasolta teoriaan. Myös standardien soveltaminen omiin laskuihin tuli entistä tutummaksi ja uskon, että tulevaisuudessa suunnittelijana niiden ymmärtämisestä on hyötyä. Opinnäytetyö tulee toivon mukaan edistämään ja parantamaan tämän yksittäisen liitostekniikan lisäksi omalta osaltaan myös puukerrostalo- ja massiivipuurakentamisen alan ratkaisuja.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

DAERGA, Per Anders 2019-10-01. Shear test program for LVL panel and slotted-in connections. [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Arto Puurula. Saatavissa: Sähköposti tekijän hallussa.

DAERGA, Per Anders 2019-10-14. High Rise - ett modulärt byggsystem för höga trähus. [PDF-esitelmä]

EUROKOODI 3: TERÄSRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. SFS-EN 1993-1-8, Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

EUROKOODI 5: PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1995-1-1, Helsinki: Suomen Standardoimisliitto

KAUPIAINEN, Jani 2018. LVL-LIITOKSEN TYÖMAATEKNINEN KEHITTÄMINEN. Savonia-ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2020-03-24.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805036394>

LAHTELA, Tero. 2015. Puuinfo. Vaativien puurakenteiden suunnittelu [koulutusmateriaali]. [Viitattu 2020-04-02.] Sijainti: Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulun sisäinen verkko.

LVL by Stora Enso. Technical brochure 2017 [verkkoaineisto]. [Viitattu 2020-03-26]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-brochures/wood-products/lvl-by-stora-enso-technical-brochure-en.pdf>

MIETTINEN, Sini 2018. LVL -rakenteisen puukerrostalon jäykistäminen ja liitoskokeet. Savonia-ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2020-03-24.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201804164805>

Puu paremmaksi -hanke [verkkoaineisto]. [Viitattu 2020-02-11.] Saatavissa: <https://portal.savonia.fi/amk/fi/tutkimus-ja-kehittaminen/projekti-ja-hanketoiminta/projektit-ja-hankkeet?id=1103>

Puumerkki.fi [verkkoaineisto]. [Viitattu 2020-03-26]. Saatavissa: [https://www.puumerkki.fi/tuotteet\\_ja\\_tuotemerkit/tuotteet/liimapuu\\_ ja\\_viiilupuu\\_tuotteet.html](https://www.puumerkki.fi/tuotteet_ja_tuotemerkit/tuotteet/liimapuu_ ja_viiilupuu_tuotteet.html)

Puutuoteteollisuus ry. 2019. LVL Handbook Europe [E-kirja]. Saatavissa: <https://puutuoteteollisuus.fi/faktoja-ja-ohjeita/lvl-kasikirja>

RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje. (Koottu: EN 1995-1-1). Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

SFS-EN 14358:2016. Timber structures. Calculation and verification of characteristic values. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto [Viitattu 2020-05-20.]

SFS-EN 14592:2008. Puurakenteet. Puikkoliittimet. Vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto [Viitattu 2020-03-25.]

TOLPPANEN, Janne, KARJALAINEN Markku, LAHTELA Tero, VILJAKAINEN Mikko. 2013. Suomalainen puukerrostalo – Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Tampere: Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy.

## LIITE 1: VETOKOKEIDEN TULOKSET

