

# LVL -RAKENTEISEN PUUKERROSTALON JÄYKISTÄMINEN JA LIITOSKOKKEET

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Sini Miettinen			
Työn nimi LVL -rakenteisen puukerrostalon jäykistäminen ja liitoskokeet			
Päiväys	16.4.2018	Sivumäärä/Liitteet	84/2
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja lehtori, Insinööri (ylempi AMK) Hannu Haaranen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Wood Innovation Network (WIN) -hanke			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa kuormituskokeita uudentyypiselle liitokselle LVL -rakenteisten puukerrostalojen jäykistämistä varten. Tavoitteena oli saada tutkittua tietoa LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen kyvystä ottaa vastaan LVL -seinäelementtiin kohdistuvia voimia. Puukerrostalojen markkinaosuus kasvaa koko ajan, joten niiden liitostekniikoiden kehittäminen oli ajankohtainen aihe.</p> <p>Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa toteutetuissa liitoskokeissa tutkittiin eroavaisuuksia liitosten kapasiteeteissa erilaisilla ominaisuuksilla, joita olivat LVL -levyjen viilujen puunsyiden pääasiallisen suunnan ja ruuvimäärän vaikutukset liitoksen kestävyys. Lisäksi testattiin liitoskokeissa käytettyjen ruuvien todellista myötömomenttia ja LVL -levyn reunapuristuslujuutta. Teoriaosuudessa tutkittiin LVL -rakentamista, puukerrostalon rungon jäykistämistä ja mekaanisten liitosten teoriaa. Teoriatietojen pohjalta laskettiin mallikerrostalon seinäelementtiin kohdistuvat voimat sekä LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen laskennallinen kapasiteetti.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena olivat liitoskokeet ja tulosten käsittely sekä analysointi. Liitoskokeiden tuloksia verrattiin laskennallisiin arvoihin, jotta voitiin helpommin arvioida liitostyyppin todellista kapasiteettia ja toimivuutta. Liitoskokeiden tulosten perusteella todettiin, että LVL:n ja teräslevyn välinen ruuviliitos oli toimiva liitostyyppi LVL -rakenteisten puukerrostalojen jäykistämiseen. Opinnäytetyön tuloksia tullaan käyttämään liitoksen jatkokehityksessä.</p>			
Avainsanat puukerrostalo, LVL, jäykistävät liitokset, liitoskokeet, mekaaniset liitokset, reunapuristuslujuus.			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Engineering			
Author(s) Sini Miettinen			
Title of Thesis Stabilization and Connection Tests of a LVL -Framed Multi-Storey Timber Building			
Date	April 16, 2018	Pages/Appendices	84/2
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, PhD, Principal Lecturer and Mr Hannu Haaranen, MEng, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Wood Innovation Network (WIN) project			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final project was to make tension tests to a new type of connection for stabilization of LVL - framed multi-storey timber buildings. The aim was to gather reliable information about the load-carrying capacity of the slotted-in steel-plate connection for LVL panels.</p> <p>Firstly, the effects of the direction of grains in LVL and the number of screws in the connection were studied in the connection tests made in the laboratory of Savonia University of Applied Sciences. In addition, the yield moment of the screws in bending tests and the embedment strength of the LVL were tested. Secondly, theory about LVL construction, stabilization of multi-storey timber buildings and mechanical joints was studied. With this information, the forces that apply to an example building and the estimated capacity of the tested connection were calculated.</p> <p>The results of the connection tests were analyzed and compared to the calculated values of the capacity of the slotted-in steel-plate connection. As a conclusion, the connection was proved to be suitable for stabilization of the LVL -framed multi-storey timber buildings. The results of this thesis will be used in further development of the connection.</p>			
<p>Keywords multi-storey timber building, LVL, stabilization, connection tests, mechanical joints, bearing strength.</p>			

## ALKUSANAT

Tämä insinöörityö on opinnäytetyö, eikä tätä voi käyttää rakennesuunnitelmien asiakirjana eikä puukerrostalojen rakennesuunnitteluohjeena.

Haluan kiittää laboratorioinsinööri Juha Lehtikantoa Savonia ammattikorkeakoulun/TeKu laboratorio-tiloissa tehtyjen kuormituskokeiden avustamisesta, insinööriopiskelija Jani Kaipasta yhteistyöstä liitoskokeiden tekemisessä sekä ohjaajaani, rakennetekniikan yliopettaja Arto Puurulaa, työn ohjaamisesta.

## SISÄLTÖ

ALKUSANAT .....	4
1 JOHDANTO .....	7
1.1 Tausta ja tavoitteet .....	8
1.2 Tutkimusmenetelmät .....	8
1.3 WIN-hanke .....	9
1.4 Lyhenteet ja määritelmät .....	9
2 LVL -RAKENTAMINEN .....	10
2.1 LVL -tuotteet .....	10
2.2 Käyttökohteet .....	11
2.3 Jatkojalostus .....	12
3 PUUKERROSTALON RUNGON MITOITUS .....	13
3.1 Rakenteiden kuormitukset .....	13
3.1.1 Pystykuormat .....	13
3.1.2 Vaakakuormat .....	14
3.2 Käyttörajatilamitoitus .....	15
3.3 Murtorajatilamitoitus .....	16
3.4 Rungon jäykistäminen .....	16
4 JÄYKISTÄVÄN LVL -SEINÄELEMENTIN MITOITUS .....	18
4.1 Mallikerrostalo .....	18
4.2 Mallikerrostaloon kohdistuvien vaakakuormien laskentaesimerkki .....	24
4.3 Mallikerrostalon jäykistävän LVL -seinäelementin mitoitusesimerkki .....	30
4.3.1 Jäykisteen leikkauskestävyys .....	34
4.3.2 Jäykisteen leikkaussiirtymä .....	34
4.3.3 Jäykisteen tukien kestävyys .....	36
4.3.4 Jäykisteen ankkurointitarve .....	39
4.3.5 Jäykisteen nurjahduskestävyys .....	39
4.3.6 Tulostentarkistus FEM-Design 3D Structure -ohjelmalla .....	44
5 LIITOKSET MASSIIVIPIUURAKENTAMISESSA .....	45
5.1 Leikkausvoimia välittävät levysaumot .....	46
5.2 Normaaliveoimia välittävät levysaumot .....	47
5.3 Liitoksen teräslevyn vaurioituminen .....	47

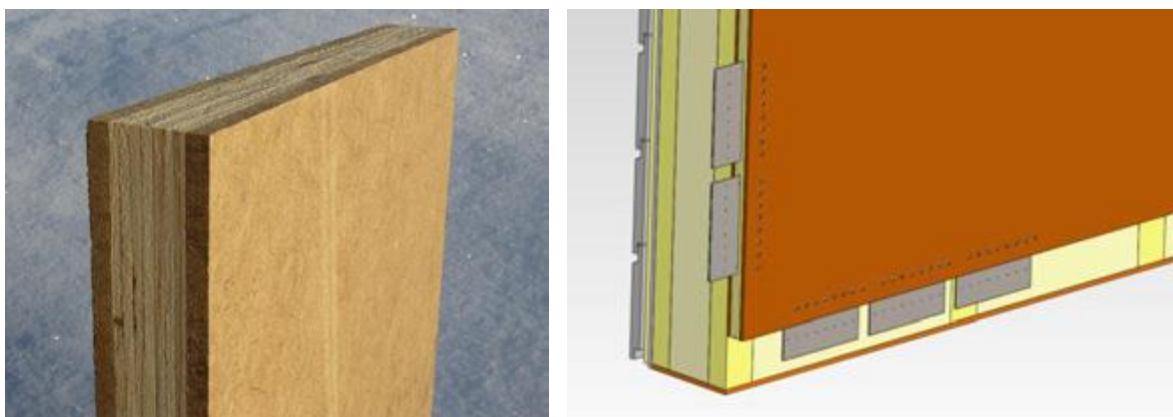
5.4	LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen mitoitusesimerkki .....	48
5.4.1	Ristiinviilutetun LVL:n reunapuristuslujuus .....	48
5.4.2	Mekaaniset liitokset .....	49
5.4.3	Leikkauskuormitetut liittimet .....	49
5.4.4	Liitinryhmän kestävyys pystysuuntaisen voiman ankkuroinnissa .....	52
5.4.5	Lohkeamismurtokestävyys .....	53
5.4.6	Rivileikkautumiskestävyys .....	56
6	LIITOSKOKEET .....	58
6.1	LVL:n ja teräslevyn välinen ruuviliitos .....	58
6.1.1	Koestus .....	58
6.1.2	Koetulokset ja niiden analysointi .....	62
6.1.3	Koetulosten vertaaminen laskennalliseen kapasiteettiin .....	72
6.2	Ruuvien myötömomentti .....	73
6.2.1	Koestus .....	73
6.2.2	Koetulokset ja niiden analysointi .....	73
6.3	LVL -levyn reunapuristuslujuus .....	77
6.3.1	Koestus .....	77
6.3.2	Koetulokset ja niiden analysointi .....	78
7	POHDINTA.....	82
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	83
	LIITE 1: LIITOSKOKEIDEN TESTAUSOHJELMA .....	85
	LIITE 2: LIITOSKOKEIDEN KUORMITUS-SIIRTYMÄ -KAAVIOT .....	87

## 1 JOHDANTO

Puukerrostalojen markkinaosuus kasvaa koko ajan ja niihin liittyvien rakennejärjestelmien kehittäminen on ajankohtainen aihe. Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa luotettavaa tietoa uudeltaisesta puukerrostalojen rakennejärjestelmästä ja kehittää LVL -elementtien liitostekniikkaa. Uudeltaisille rakennejärjestelmille puukerrostalorakentamisessa on kysyntää ja LVL -elementit kantavina rakenteina niissä ovat yksi toimivista rakennetyypeistä.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Wood Innovation Network (WIN) -hanke sekä Per Anders Daerga (ent. tutkija Uumajan yliopisto, nykyisin uuden puukerrostalojärjestelmän rakennesuunnittelija ja yrittäjä). Daerga on suunnitellut liitostyyppin ja testausohjelman LVL -liitostyypille.

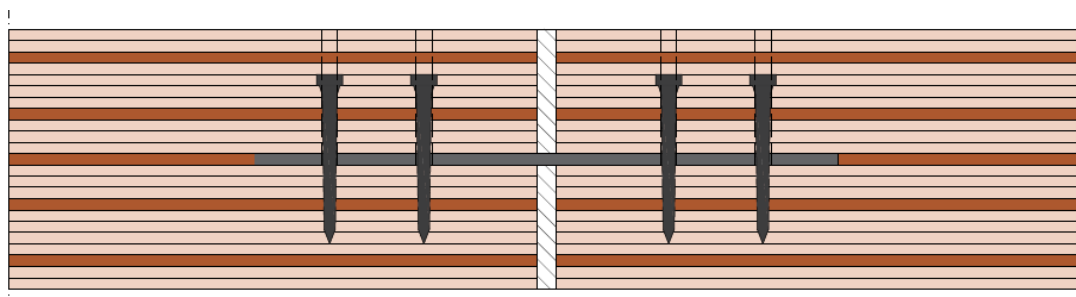
Testattava LVL -liitos perustuu Masonite Flexible Building System for Multi-Storey Timber Buildings (MFBS) -järjestelmän jatkokehitykseen. MFBS -järjestelmässä on käytetty yhdistelmälevyä (kuva 1), jossa LVL on kahden masoniitti -kovalevyn välissä. Kuvassa 2 on MFBS -järjestelmän mukainen seinäelementti, jossa teräslevylliset liituskappaleet on ruuvattu paikoilleen jo elementin työstövaiheessa.



KUVA 1. MFBS -järjestelmässä käytetty levytyyppi, jossa LVL -levy on masoniitti -kovalevyn välissä (Daerga, Girhammar, Källsner 2012, 2)

KUVA 2. Havainnekuva MFBS -järjestelmän mukaisesta seinäelementistä (Daerga ym. 2012, 2)

Opinnäytetyössä tutkitaan LVL -seinäelementtien kiinnitykseen käytettävän jäykistävän liitostyyppin kestävyyttä, kun se toteutetaan LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen avulla (kuva 3). Testattavassa liitoksessa teräslevy asetetaan LVL -elementin sivuun sahattuun uraan ja ruuvataan paikoilleen. Liitostyypin elementit ovat kokonaan Stora Enson tuottamaa LVL -levyä. Testattava liitostyyppi on tarkoitettu erityisesti monikerroksisten rakennusten rungon LVL -seinäelementtien välisiin jäykistäviin liitoksiin. Liitosta voidaan käyttää seinäelementtien yhteen liittämässä esimerkiksi tuuli-kuorman imuvaikutusta vastaan sekä seinäelementtien ankkurointiin alempaan kerrokseen tuuli-kuorman aiheuttamaa nostavaa voimaa vastaan.



KUVA 3. Esimerkki LVL:n ja teräslevyn välisestä ruuviliitoksesta, jossa kaksi seinäelementtiä on kiinnitetty toisiinsa liitoksen avulla (Miettinen 2018-01-26).

Rakennetekniikan yliopettaja, TKT Arto Puurula on kevään 2017 aikana toteuttanut esikokeita LVL:n ja teräslevyn välisille ruuviliitoksille, joiden testausta opinnäytetyössä jatketaan. Esikokeista on saatu pohjatietoa koekappaleiden dimensioista ja ominaisuuksista, joiden perusteella opinnäytetyön liitostekokeet on suunniteltu. Opinnäytetyössä toteutetaan laajempia kuormituskokeita esitestien perusteella valituille LVL:n ja teräslevyn välisille ruuviliitoksille, jotta saadaan luotettavaa mittatietoa liitoksen kapasiteetista. Jani Kaipainen osallistui liitostekokeiden toteutukseen ja tarvittavien koekappaleiden valmisteluun sekä koestuksien suunnitteluun. Kaipainen tekee liitostekokeisiin liittyen opinnäytetyön *LVL –liitoksen työmaatekninen kehittäminen*, jossa hän tutkii liitoksen työmaateknisen toteutuksen haasteita ja taloudellisuutta sekä kehittää liitoksen työmaateknistä toteutusta.

### 1.1 Tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyön tarkoituksena on toteuttaa kuormituskokeita uudentyyppiselle puukerrostalojen liitostyyppille, jotta saadaan tarkkaa ja tutkittua tietoa sen ominaisuuksista ja kyvystä ottaa vastaan LVL -seinäelementtiin kohdistuvia voimia. Tarkoituksena on tutkia eroavaisuuksia liitoskestävyyksissä, kun valtaosa LVL -levyn viilujen puunsyistä on kuormitukseen nähden pystyssä tai poikittain sekä tutkia ruuvimäärän vaikutusta liitoksen kestävyteen ja jäykkyyteen, kun ruuveja on 15 tai 29 kappaletta. Opinnäytetyössä tutkitaan myös liitostekokeissa käytettyjen ruuvien todellista myötömomenttia sekä LVL -levyjen todellista reunapuristuslujuutta. Kuormituskokeiden tulokset työstetään tietokoneella Excelissä ja niistä tehdään johtopäätökset liitoksen kestävyydelle, toimivuudelle ja käytettävyydelle puukerrostalorakentamisessa.

### 1.2 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyö koostuu teoriaosuudesta, laskennallisesta osuudesta ja liitostekokeista. Teoriaosuudessa tutkitaan LVL -rakentamista sekä puukerrostalon rungon jäykistämistä ja mekaanisten liitosten teoriaa. Teoriatiedon pohjalta lasketaan mallikerrostalon seinäelementtiin kohdistuvat ankkuroitavat voimat sekä LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen laskennallinen kapasiteetti ja kyky vastaanottaa siihen kohdistuvat kuormat. Työn tutkimuksellinen osuus, jossa tehdään määrällistä eli kvantitatiivista tutkimusta, koostuu LVL -liitostekokeista sekä LVL:n todellisen reunapuristuslujuuden ja ruuvien todellisen myötömomentin koestuksista. Työn tuloksena on tehty liitostekokeet sekä niiden tulosten käsittely ja analysointi. Liitostekokeiden tuloksia verrataan mallikerrostalon laskennallisiin arvoihin, jotta voidaan helpommin arvioida liitostyyppin todellista kapasiteettia ja toimivuutta.



### 1.3 WIN-hanke

Opinnäytetyön toimeksiantajan Wood Innovation Network (WIN) -hankkeen tavoitteena on Itä-Suomen alueen muutoshaluisten puualalla toimivien yritysten ja koko Suomessa toimivan innovaatioverkoston uusiminen yhteistyön avulla, mutta huomioiden kuitenkin markkinoiden edellytykset. WIN -hanke suosittelee vähähiilisiä ratkaisuja, jotta voidaan saavuttaa hankkeen tavoitteet ja lisätä toiminnan kansainvälisyyttä. (WIN -hanke.)

### 1.4 Lyhenteet ja määritelmät

CLT = Cross Laminated Timber

LVL = Laminated veneer lumber, viilupuu, kertopuu

MFBS = Masonite Flexible Building System (for Multi-Storey Timber Buildings)

RunkoPES = Avoin puuelementtirakentamisen teollisuusstandardi

WIN = Wood Innovation Network (WIN -hanke)

## 2 LVL -RAKENTAMINEN

LVL eli viilupuu kuuluu insinööripuutuotteisiin, joihin kuuluvat myös liimapuu, CLT ja I-palkit. Viilupuu on rakenteellinen puutuote, joka valmistetaan liimaamalla yhteen sorvattuja ohuita viiluja. Viilupua voidaan käyttää kaikessa uudis- ja korjausrakentamisessa niin teollisuudessa kuin asuinrakentamisessakin. LVL:ää voidaan käyttää kantavina rakenteina palkeissa, pilareissa, ristikoissa, kehissä sekä ikkuna- ja oviteollisuuden komponenteissa. (Puuinfo.fi a.) LVL:n tulee täyttää EN14374 standardin esittämät vaatimukset (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 54).

Suomessa LVL tehdään liimaamalla yhteen kolmen millimetrin paksuisia kuusiviiluja (kuva 4). LVL -tuotteesta riippuen viilujen syysuunnat vaihtelevat, niin että kaikkien viilujen syysuunta on tuotteen pituussuuntaan tai osa viiluista voi olla ristiinliimattuja eli kohtisuoraan pituussuuntaan nähden. LVL-elementtien enimmäisleveys on yleensä 2,5 metriä, ja niitä on mahdollista tehdä jopa 24...25 metrin pituisina. (Puuinfo.fi a.)

Materiaalina LVL on kevyttä, mutta erittäin lujaa, koska se koostuu yhteen liimatuista kerroksista. Kerroksellisuus tekee LVL:stä materiaalina tasalaatuista, vahvaa ja mittapysyvää. Myös kuormankantokyky ja työstettävyys ovat LVL:ssä erittäin hyvät. Muita etuja ovat myös sen hyvin tunnetut tekniset ja rakenteelliset ominaisuudet sekä hyvä saatavuus, eli toimitukset ovat nopeita (LVL by Stora Enso, 3, 7).



KUVA 4. LVL -levyn poikkileikkaus, jossa näkyy erisuuntaisia 3 mm paksuisia viilukerroksia. (LVL by Stora Enso 2017, 4)

### 2.1 LVL -tuotteet

Stora Enso tuottaa kolmea LVL -laatua S, X ja T, joiden ominaisuudet on suunniteltu niiden käyttökohteiden mukaan. Jokaisen viiluarkin kosteuspitoisuus, kimmomoduuli ja tiheys mitataan erikseen, jotta tuotteiden ominaisuudet voidaan optimoida käyttökohteisiin. (LVL by Stora Enso, 6–9.)

#### S -laatu

S -laadussa kaikki viilujen syyt ovat pitkittäin kappaleeseen nähden, jolloin kappaleen ominaisuudet ovat parhaat syysuunnassa, mutta ominaisuudet syysuuntaa kohtisuoraan ovat heikommat. S -laatu sopii parhaiten ominaisuuksiensa puolesta puurunkorakentamisessa palkkeihin ja kattorakentamisessa valumuotteihin. (LVL by Stora Enso, 6.)

## X -laatu

X -laadussa osa viiluista on liimattu ristiin (kuva 5), jotta materiaalin mittapysyvyys sekä sen ominaisuudet levy- ja laattakäytössä ovat paremmat. X -laatu soveltuu monipuolisiin käyttökohteisiin, erityisesti, kun levyrakenteilta (välipohjat- ja kattorakenteet) vaaditaan pitkiä jännevälejä. Parhaiten X -laatu soveltuu seinälevyihin. X -laadun vakioimitat vaihtelevat paksuudessa 33...75 mm välillä, leveydessä 198...2500 mm välillä ja maksimipituus on 24 m. (LVL by Stora Enso, 6.) Opinnäytetyön liitoksokkeet tehtiin Stora Enson tuottamalla X -laadun LVL -levyllä, jonka paksuus oli 69 mm.



KUVA 5. X -laadussa osa viiluista liimataan ristiin. (LVL by Stora Enso 2017, 6.)

## T -laatu

T -laadussa viilukerrostojen sytyt ovat pitkittäin tuotteeseen nähden. Etuina T -laadussa ovat jäykkyys, mittatarkkuus ja kieroutumattomuus. T -laadulle sopivia kohteita ovat esimerkiksi väliseinätolpat, kun edellytyksenä ovat rakenteiden mittapysyvyys, suoruus ja keveys. (LVL by Stora Enso, 6.)

## 2.2 Käyttökohteet

Puu ja erityisesti siitä jalostetut insinööripuutuotteet soveltuvat hyvin teolliseen rakennusosien valmistukseen niiden mittatarkkuuden, keveyden, lujuuden ja helpon työstettävyyden takia. Erityisesti niiden keveys mahdollistaa suurikokoistenkin osien kuljettamisen ja noston paikoilleen käyttäen keveämpiä kurottajia tai autonostureita, jolloin järeää työmanosturia ei tarvita. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela ja Viljakainen 2013, 31.)

LVL soveltuu monenlaiseen rakennus- ja teollisuuskäyttöön. Tyypillisesti sitä käytetään pilareissa ja palkeissa, vassoissa ja kattotuoleissa, puurunkorakenteissa sekä rakennuselementeissä (kuva 6). (LVL by Stora Enso 2017, 5.) LVL:ää käytetään myös vaakarakenteissa, kuten ala-, ylä- ja välipohjissa, jolloin sen tyypillinen jänneväli vaihtelee 5...12 metrin välillä. LVL:ää käytetään myös aukko- ja tukipalkeissa sekä rakennuksen jäykistävinä osina. (Puuinfo.fi a.)

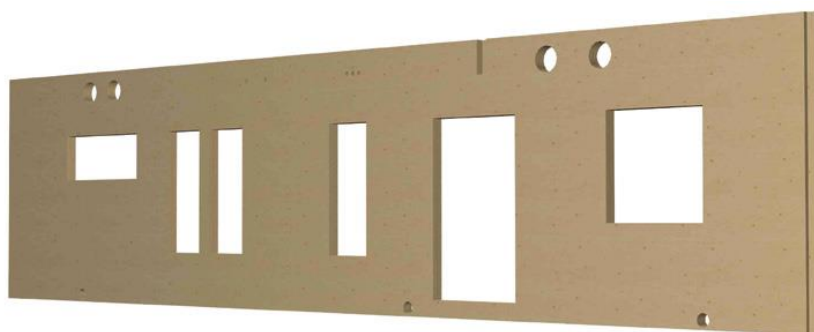


KUVA 6. Tyypillisiä LVL:n käyttökohteita kerrostaloissa. (LVL by Stora Enso. RT 38867, 3)

### 2.3 Jatkojalostus

Kerrannaisliimauksella voidaan maksimoida tuotevalikoiman kattavuus ja käyttömahdollisuudet. Kerrannaisliimaus mahdollistaa esimerkiksi maksimissaan 200 mm x 3200 mm x 19 m kokoisten seinäelementtien valmistuksen. Hyödynnettäessä erilaisia elementtipaksuuksia ja ladontamalleja, on mahdollista toteuttaa erittäin vaativia rakenteita, kuten esimerkiksi puukerrostalojen rakenteet. (LVL by Stora Enso, 10–11.)

LVL rakentamisen tuottavuutta ja tarkkuutta parantavat määrämittoihin sahatut elementit. Elementit voidaan muotoilla asiakaskohtaisesti erikoisleikkauksilla. Jatkojalostetut elementit soveltuvat erityisen hyvin katto- ja seinäelementeiksi, harja- ja tukipalkeiksi sekä lattiarakenteiksi (kuva 7). (LVL by Stora Enso, 10–11.)



KUVA 7. Esimerkki seinäelementiksi työstetystä LVL -levystä. (LVL by Stora Enso 2017, 11)

### 3 PUUKERROSTALON RUNGON MITOITUS

Puukerrostalot voidaan toteuttaa useilla erilaisilla rakennejärjestelmillä. Niitä ovat muun muassa kantavat seinät -järjestelmä rankarunkoisena tai massiivipuurakenteisena taso- tai tilaelementeistä toteutettuna. Tavallisesti kantavat seinät -järjestelmissä vaippa- ja runkorakenteet liittyvät toisiinsa kiinteästi, joten usein niitä voidaan käsitellä yhtenä kokonaisuutena. Edellisten lisäksi runkovaihtoehtoina on myös pilari-palkkijärjestelmät, joissa vaipparakenteet toteutetaan useimmiten rankarakenneisina tasoelementteinä. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela ja Viljakainen 2013, 30.) Myöhemmin opinnäytetyön laskentaesimerkissä tarkastellaan taso- tai suurelementeistä rakennettua massiivipuista kantavat seinät -järjestelmällä toteutettua asuinkerrostaloa.

#### Kantavat seinät -järjestelmä

Kerroksittainen kantaviin seiniin perustuva järjestelmä on puukerrostalorakentamisessa yleisimmin käytetty runkojärjestelmä. Tällöin kantavina rakenteina toimiville seinille johdetaan vaakarakenteiden kuormat. Puset välipohjat rajoittavat jännevälit noin 7 metriin. Kantavat linjat sijaitsevat yleensä rakennuksen ulkoseinillä ja osalla väliseinistä tai vaihtoehtoisesti rakennuksen keskivaiheille sijoitetulla pilari-palkkilinjalla. Kantavat väliseinät ovat usein huoneistojen välisiä seiniä paloteknisistä ja ääneneristyksellisistä syistä. (Tolppanen ym. 2013, 39.)

#### 3.1 Rakenteiden kuormitukset

Puurakenteet mitoitetaan eurokoodien EN 1990 Suunnittelun perusteet ja EN 1991 Rakenteiden kuormitukset sekä EN 1995 Puurakenteiden suunnitteluohjeen (2017) ja kansallisten liitteiden mukaan. Puurakenteiden mitoituksessa on huomioitava rakenteiden käyttöluokka ja kuormituksen aika-luokka, koska ne vaikuttavat käytettävän puutavaran ja liitosten mitoitusarvoihin. Rakennuksen runko suositellaan rakennettavaksi niin, että ne tuovat jäykistäville pystyrakenteilla mahdollisimman paljon pystykuormaa rakennuksen stabiliteettisuunnittelun takia. Näin jäykistävien rakenteiden ankkurointitarve pienenee. Rakenteiden kuormitusten olisi hyvä olla tasaista ( $\text{kN/m}^2$ ) tai viivamaista ( $\text{kN/m}$ ) ja pistemäisten kuormien kerääntymistä kantaville rakenteille tulisi välttää. (Tolppanen ym. 2013, 86.)

##### 3.1.1 Pystykuormat

Tässä osiossa (otsikko 3.1.1) käsitellään Eurokoodi 5 Lyhennetyt suunnitteluohjeen (puuinfo.fi b, 10-12) määrittämiä rakenteisiin kohdistuville pystykuormille, jotka muodostuvat yleensä rakennuksen omasta painosta sekä rakenteeseen kohdistuvista hyöty- ja lumikuormista.

## Omapaino

Ominaisarvo rakenteen omapainolle lasketaan sen nimellisten tilavuuksien mittojen avulla. Valmistajan antamia arvoja voidaan käyttää tehdasvalmisteisille rakennusosille ja laitteille. Havupuusta liimaamalla valmistetuille havupuumateriaaleilla, kuten LVL, tilavuusomapaino on yleensä  $5,0 \text{ kN/m}^3$ . Omaan painoon lasketaan mukaan rakennuskohteen kantavat ja ei-kantavat rakennusosat sekä kiinteät laitteet ja maakerrosten kuormat.

## Hyötykuorma

Hyötykuorma muodostuu liikkuvista kuormista, jotka tulkitaan vaikuttavaksi rakenteen mitoituksen kannalta haastavimmassa paikassa. Tilojen käyttö aiheuttaa hyötykuorman, ja tilan käyttötarkoitus vaikuttaa rakenteisiin kohdistuviin kuormiin, jotka voivat olla tasaisesti jakaantuneita kuormia, pisteittäisiä kuormia ja vaakasuuntaisia viivakuormia.

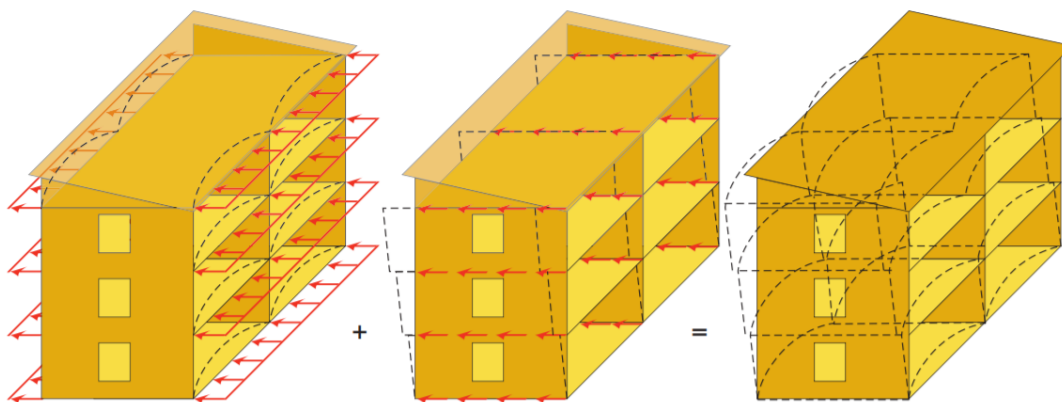
## Lumikuorma

Rakenteisiin kohdistuvaan lumikuormaan vaikuttaa rakennuksen sijainti ja katon muotokerroin. Suunnittelunormeista saadaan rakennuskohteessa maanpinnalla vaikuttava ominaislumikuorman arvo, joka kerrotaan katon muotokertoimen mukaisella kertoimella, jolloin saadaan rakennuksen katon vaikuttavan lumikuorman ominaisarvo. Jos rakennuksen katoilla on tasoeroja, esteitä tai ulkonemia, on huomioitava myös kinostuvan lumen aiheuttamat kuormat sekä ylemmältä katonosalta mahdollisesti alemmalle osalle kasaantuvat liukuvat lumet.

### 3.1.2 Vaakuormat

Suomessa rakennukseen kohdistuva vaakuorma muodostuu pääasiassa tuulikuormasta (Luntta 2013,12). Tuulikuorman arvoon vaikuttavat rakennuksen maastoluokka, ja sen korkeuden mukainen tuulen nopeuspaineen ominaisarvo (Puuinfo.fi b, 12).

Rakenteiden suunnittelussa on tuulikuorman lisäksi huomioitava myös rungon pystyrakenteiden alkuvuonoudesta, ja esimerkiksi asennusvuonoudesta, johtuvat lisävaakavoimat. Kuvassa 8 näkyy tuulikuorman siirtyminen ja sen aiheuttamat muodonmuutokset tyypillisessä massiivipuulevy jäykisteisessä rungossa. Tuulikuorma siirtyy rakennuksen ulkopinnoilta välipohjan levyjäykisteiselle tasolle imu- ja painekuormina, ja siitä edelleen jäykistäville levyseinille. Levyseinät siirtävät kuormat alemmille kerrostasolle tai suoraan maaperään perustusten kautta. Tuulenpaineen oletetaan kohdistuvan vaakarakenteille kohtisuoraan. Kuvan 8 mukainen tyypillinen tilanne syntyy esimerkiksi tapauksessa, jossa julkisivurakenne on kiinni suoraan välipohjarakenteessa. (Luntta 2013, 12.)



KUVA 8. Rakennuksen rungon voimaresultantit ja muodonmuutokset, jotka ovat aiheutuneet siihen kohdistuvista vaakavoimista (Martinsons 2006, 61).

### 3.2 Käyttörajatilamitoitus

Käyttörajatilamitoituksessa tarkastellaan vaaka- ja pystyrakenteiden taipumia, rungon pystysuoraa painumaa, rungon vaakasuoraa siirtymää sekä välipohjien värähtelyä. Vaakarakenteiden mitoitus käyttörajatilassa kannattaa usein tehdä ennen muita mitoitustarkasteluja, koska se tulee usein määräväväksi. Suunnittelunormissa esitetään taipumarajat rakennusosille. Taipumatarkastelussa tulee huomioida myös vaakarakenteiden tasaisuusvaatimukset, koska kuormitus ja mahdollinen esikorotus aiheuttavat rakenteeseen muodonmuutoksia. Taipumien tarkastelussa tulee ottaa huomioon puurakenteiden viruma, levyuumapalkeissa ja kapeissa suorakaidepalkeissa leikkausmuodonmuutosten aiheuttamat lisätaipumat sekä mekaanisilla liittimillä koottujen rakenteiden liitoksissa tapahtuvien muodonmuutosten vaikutukset. Vaakakuormista saattaa aiheutua pystyrakenteisiin myös vaakasuoria taipumia. Nämä taipumat ovat kuitenkin usein hetkellisiä, eikä niistä yleensä aiheudu pysyviä muodonmuutoksia rakenteisiin. (Tolppanen ym. 2013, 86–87.)

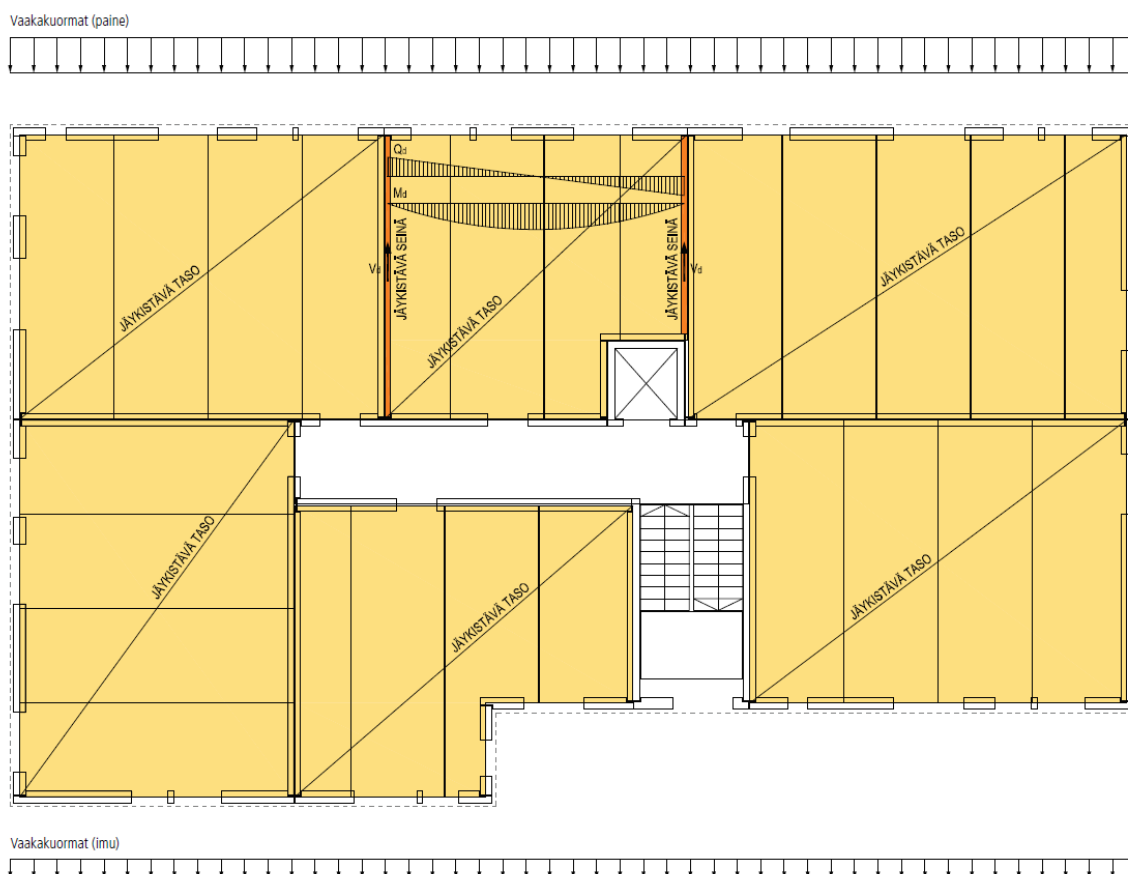
Rungon pystysuoran painuman arviointi ja laskenta ovat haasteellisia. Nykyisin käytetyillä rakennustekniikoilla puukerrostaloissa rungon painumat ovat noin 2...5 mm kerroksessa. Painumat johtuvat yleensä puuosien kuivumiskutistumasta, puun virumisesta kuormituksesta johtuen sekä puuosien välisistä liitoksista, kun rakenteen kasvava paino aiheuttaa niiden tiivistymistä. Haastavissa rakennuksissa on usein hyvä käyttää ristiinviilutettua LVL:ää tai CLT:tä, koska painumat ovat sitä suurempia, mitä enemmän pystyrakenteissa on syysuunnaltaan vaakasuunnassa olevia puutuotteita. Myös liitosten tiivis toteutus onnistuu paremmin insinööripuutuotteilla niiden mittatarkkuuden ansiosta. Rakennuksen tulisi painua mahdollisimman tasaisesti kaikilta osin, ja erityistä huomiota on kiinnitettävä eri tavoin painuvien osien liittymiin, kuten betonirakenteisen porrashuoneen käyttämiseen osana puurakenteista kerrostaloa. (Tolppanen ym. 2013, 87–88.)

### 3.3 Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilamitoitus tehdään kantavien ja jäykistävien rakenteiden määrävillä kuormitusyhdistelmillä suunnittelunormien mukaan. Kuormituksen aikaluokka ja rakenteen käyttöluokka vaikuttavat materiaalin lujuusominaisuuksiin, joten usein samalle rakenteelle voidaan joutua tekemään monia mitoitustarkasteluja eri aikaluokissa. (Tolppanen ym. 2013, 90.)

### 3.4 Rungon jäykistäminen

Tolppasen ym. (2013, 90) mukaan levyjäykisteinä toimivat vaakarakenteet, kuten väli- ja yläpohjat, siirtävät vaakakuormat jäykistäville pystyraketeille, kuten seinille ja mastopilareille. Jäykistystekninen toiminta puurakenteisissa ja betonirakenteisissa asuinkerrostaloissa eroavat periaatteiltaan toisistaan. Betonirakenteinen välipohja voidaan toteuttaa jäykistysteknisesti jatkuvana yhtenäisenä tasona, jolloin kuormat jakautuvat tasaisesti kaikille rakennuksen jäykistäville pystyrakenteille. Puurakenteisissa kerrostaloissa välipohja täytyy katkaista huoneistojen välisten seinien kohdilta ääni- ja värähtelyteknisistä syistä (kuva 9). Tästä syystä välipohja ei ole äärettömän jäykkä koko rakennuksen kokoisena laattana, joten kuormat eivät jakaudu kaikille jäykistäville seinille tasaisesti.



KUVA 9. Puurakenteisen asuinkerrostalon välipohjan toiminta, jossa välipohja on katkaistu huoneistojen välisten seinien kohdilta. (RunkoPES 1.0 2012, 11).

Puurakenteisissa asuinkerrostaloissa jokainen huoneisto muodostaa oman jäykistesysteeminsä, jotka kytketään yhteen pistemäisesti. Tarkoituksena on jakaa vaakakuormat eri huoneistoille ja näin siis



eri jäykistesysteemeille. Jos välipohjan värähtely tai äänten siirtyminen huoneistosta toiseen ei aiheuta ongelmia, voidaan puurakenteinen välipohja toteuttaa myös jatkuvana tasona. Tällaisia kohteita voivat olla esimerkiksi toimistorakennukset. Tällöin vaakakuormat jakautuvat kaikille jäykistävälle pystyrakenteille, samoin kuin betonirakenteisissa kerrostaloissa. Mutta on muistettava, että puurakenteinen välipohja on joka tapauksessa joustava eikä äärettömän jäykkä ja myös jäykistävien osien väliset liitokset ovat joustavia. Joustavuus on huomioitava, kun mitoitetaan jatkuvaa yhteistä tasoa ja sen kykyä siirtää kuormia pystyrakenteille. Puurakenteisissa kerrostaloissa on otettava huomioon, että jäykistävälle pystyrakenteelle voi siirtyä jäykistäväältä välipohjalta vain sellainen voima, jonka liitos niiden välillä pystyy välittämään. (Tolppanen ym. 2013, 90.)

Pystyrakenteen ja välipohjan liittymät tulee suunnitella niin, että välipohjaan kohdistuvat vaakavoimat voidaan siirtää luontevasti jäykistävälle pystyrakenteille. Massiivipuurakenteinen seinä toimii sellaisenaan jäykistävänä rakenteena ja ottaa pystykuormia vastaan. Asuinpuukerrostaloissa jäykistävänä rakenteina toimivat lähes kaikki huoneistojen väliset seinät ja kantavat ulkoseinät. Jäykistäviä seiniä ei usein kannata sijoittaa huoneistojen sisälle, koska niiden palosuojauksesta tulee silloin tarpeettoman järeä, kun palokuorma voi kohdistua seinän molempiin pintoihin samanaikaisesti. (Tolppanen ym. 2013, 92.)

Tolppasen ym. (2013, 92) mukaan jäykistävät pystyrakenteet tulisi sijoittaa kaikissa kerroksissa päällekkäin, jotta vaaka- ja pystykuormien kuljettaminen perustuksille onnistuu suoraviivaisesti. Rungon olisi hyvä olla mahdollisimman syvä poikittaissuunnassa, jolloin jäykistävät seinät voivat olla pitempiä ja näin niiden ankkurointivoimat voidaan minimoida. On myös edullista, jos koko ankkurointitarve saadaan kumottua vaakarakenteiden omalla painolla tai ainakin minimoitua se mahdollisimman pieneksi, koska ankkurointirakenteet ovat kustannuksiltaan korkeita toteuttaa.

## 4 JÄYKISTÄVÄN LVL -SEINÄELEMENTIN MITOITUS

Tässä osiossa lasketaan mallikerrostalon jäykistävän puurakenteisen seinäelementin mitoitusta. Mallikerrostalo on esitelty seuraavassa osiossa. Selvitetään mallikerrostalon ensimmäisen puurakenteisen kerroksen jäykistävään seinäelementtiin kohdistuvat vaakavoimat, ja niiden aiheuttama ankkurointitarve nostavalle voimalle. Tavoitteena on havainnollistaa liitoskokeissa koestetun LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen käytännöllisyyttä puukerrostalon jäykisteiden liitosratkaisuna. Havainnollistamisessa käytetään RunkoPES 2.0 -aineistosta (Puuinfo.fi c) löytyviä mallikerrostalon rakennuslupapääkirustuksia.

RunkoPES on avoin puuelementtistandardi, jossa määritellään puuelementtirakentamisen vakioita asuntotuotannossa. RunkoPES -järjestelmä soveltuu pääasiallisesti kantaviin suurelementteihin, ja siinä on esitetty periaatteita esimerkkirakennetyypeistä ja liittymädetaljeista. (Puuinfo.fi c.)

### 4.1 Mallikerrostalo

RunkoPES:in mallikerrostalo (Puuinfo.fi c) on nelikerroksinen puuelementtirakenteinen asuinkerrostalo, jonka ensimmäinen kerros on betonirakenteinen. Opinnäytetyön esimerkkilaskentaa varten kyseinen mallikerrostalo on muutettu viisikerroksiseksi, pohjakuvaa muokattu ja osa parvekkeista poistettu, mutta muuten rakenteet ovat RunkoPES -mallitalon mukaiset (kuvat 10-14). Jotta kohdetta voidaan hyödyntää laskentaesimerkinä LVL -liitokselle, oletetaan, että sen kantavat rakenteet, kuten ulkoseinät, välipohjat ja kantavat väliseinät, ovat massiivipuuta (LVL, X -laatu).



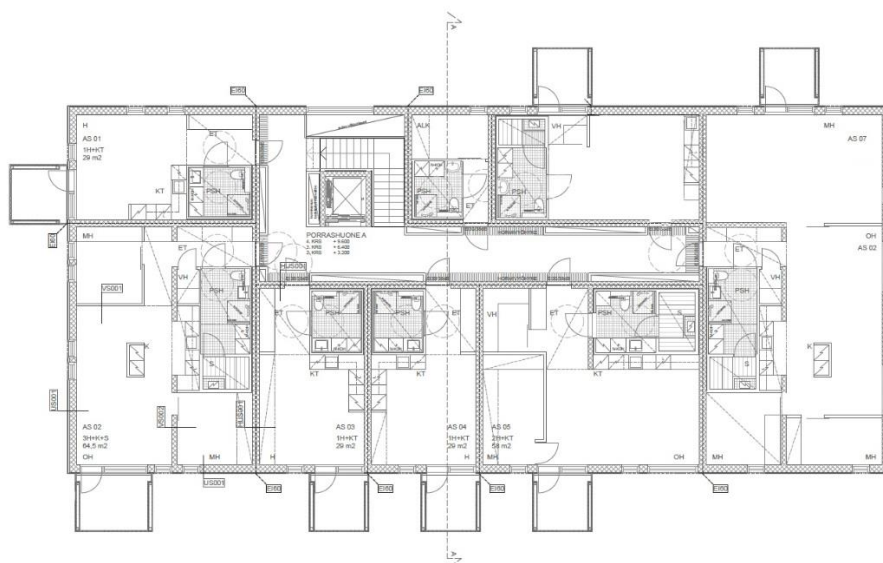
KUVA 10. Havainnekuva esimerkkikohteesta laskennalliseen tarkasteluun (Puuinfo.fi c. 2014, 1; muokannut Miettinen 2018-01-13)



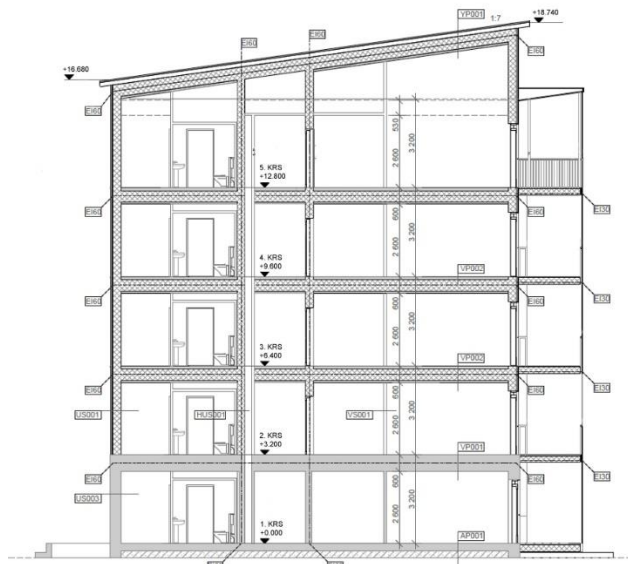
KUVA 11. Julkisivu etelään (Puuinfo.fi c. 2014, 4; muokannut Miettinen 2018-02-08)



KUVA 12. Julkisivut itään ja länteen (Puuinfo.fi c. 2014, 5; muokannut Miettinen 2018-02-08)



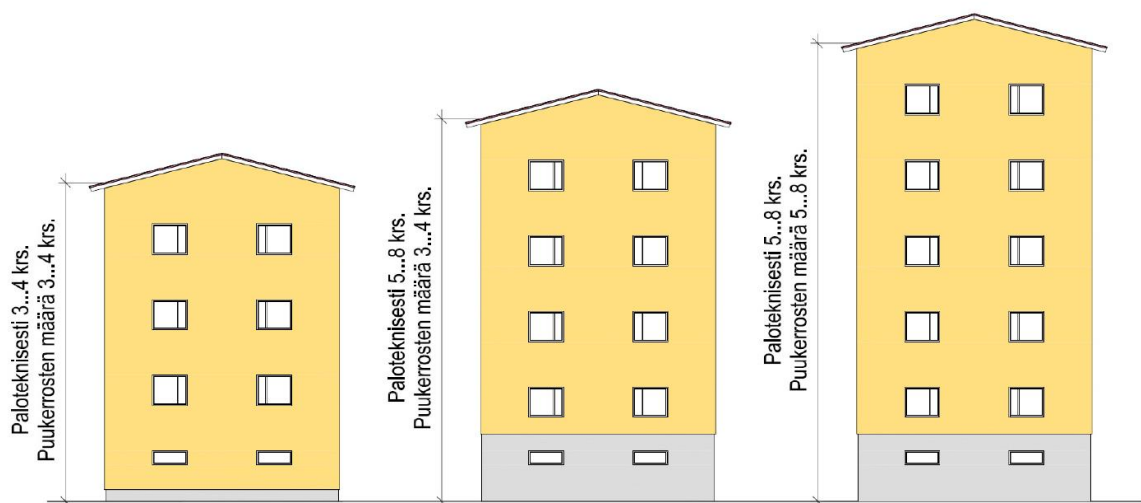
...  
KUVA 13. Pohjapiirustus (Puuinfo.fi c. 2014, 2; muokannut Miettinen 2018-02-08)



KUVA 14. Rakenneleikkaus (Puuinfo.fi c. 2014, 3; muokannut Miettinen 2018-01-13)

### Rakennetyypit

Puuinfo.fi (d) polusta löytyy RunkoPES 2.0 mukaisia mallirakennetyyppejä puukerrostalorakenteille. Laskentaesimerkkiin on valittu rakennetyypit, jotka täyttävät mallikerrostalon vaatimukset ja joiden kantavarakenne vastaa mahdollisimman tarkasti liitostokeissa käytettävän LVL -levyn ominaisuuksia. RunkoPES:in (Puuinfo.fi d) rakennetyypeissä huomioidaan rakennuksen paloluokka, paloteknisten kerrosten lukumäärä ja maksimimäärä puukerroksille (kuva 15). Kaikissa opinnäytetyöhön valituissa rakennetyypeissä (kuvat 16–20) kantavarunke on CLT -rakenteinen, paitsi yläpohja on ristikkorakenteinen. Laskennan hyödyllisyyden kannalta liitostokeisiin peilaten, mallirakennetyyppien kantavat rakenteet on muutettu CLT:stä LVL -rakenteisiksi, jotta kerrostalon jäykistävän seinän laskentaa on helpompi verrata liitostokeiden tuloksiin.

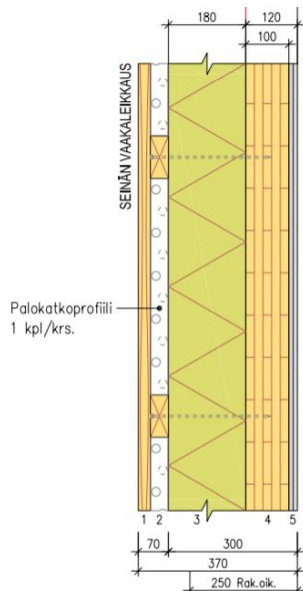


KUVA 15. Puukerrostalojen paloteknisen kerrosmäärän mukainen lajittelu, joista mallikerrostalo kuuluu keskimmääseen luokkaan (Puuinfo.fi d 2013, 1).

Seuraavassa on esiteltyä kantavien rakenteiden rakennetyypit mitoitusimerkin pohjaksi.

### Kantava ulkoseinä

Kantava ulkoseinä P2 luokan rakennukseen, jossa on paloteknisesti 5...8 kerrosta ja enintään neljä puukerrosta. Rakennetyypin paloluokka on REI60. Kantava rakenne oletetaan 69 mm paksuksi LVL -rakenteeksi.



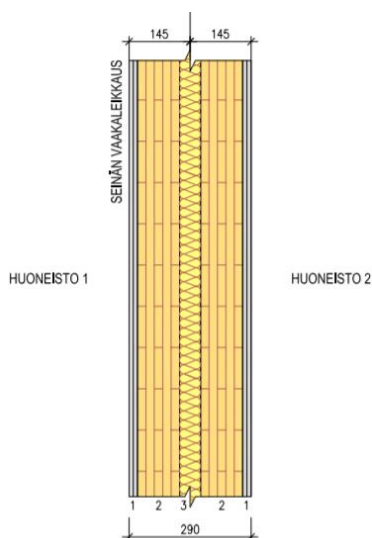
NRO	TARKOITUS	TUOTE	MITTA [mm]	PAINO NOIN
1	Ulkoverhous (D-s2, d2)	Ulkoverhouspaneeli ARK mukaan	28	0,12 kN/m <sup>2</sup>
2	Ulkoverhouksen kiinnitys (D-s2, d2)/Tuuletus	Puurangat k600	42	0,02 kN/m <sup>2</sup>
3	Palosuojaus (A2-s1, d0)/Lämmöneristys	Jäykkä kivivilla (sis. tuulensuoja)	180	0,18 kN/m <sup>2</sup>
4	Kantava rakenne ilman- ja höyrynsulku	CLT-levy RAK mukaan	69	0,35 kN/m <sup>2</sup>
5	Palosuojaus (A2-s1, d0)/Sisäverhous	Kuitukipsilevy	10+10/20	0,10 kN/m <sup>2</sup>

KUVA 16. Kantava ulkoseinä US404KM (Puuinfo.fi d 2013, 93; muokannut Miettinen 2018-02-08)

Ulkoseinän omapaino 0,77 kN/m<sup>2</sup> (opinnäytetyön tekijän laskema arvio)

### Kantava väliseinä huoneistojen välillä

Kantava väliseinä huoneistojen välille P2 luokan rakennukseen, jossa on paloteknisesti 5...8 kerrosta ja enintään neljä puukerrosta. Rakennetyypin paloluokka on REI60 ja ilmajäeneneristävyyden  $R'_w \geq 55$  dB. Kantava rakenne oletetaan LVL -rakenteiseksi.



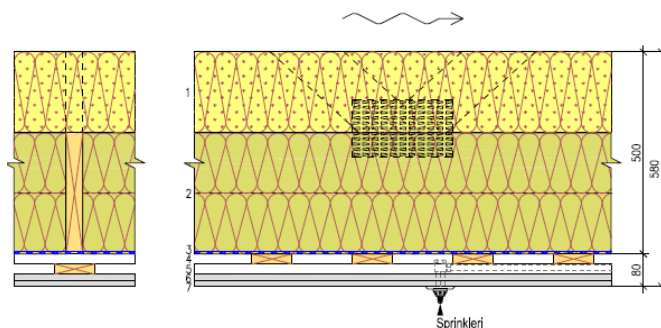
NRO	TARKOITUS	TUOTE	MITTA [mm]
1*	Palosuojaus (A2-s1, d0)/Sisäverhous	Kuitukipsilevy	10+10/20
2*	Kantava rakenne	CLT-levy RAK mukaan	100
3	Ääneneristys (A2-s1, d0)	Mineraalivilla	50

\*) Toimii myös rakenteen ääniteknisenä massana

KUVA 17. Kantava väliseinä huoneistojen välillä HVS402KM (Puuinfo.fi d 2013, 129)

## Yläpohja

Yläpohja P2 luokan rakennukseen, jossa on paloteknisesti 3...8 kerrosta. Rakennetyypin paloluokka on REI60.

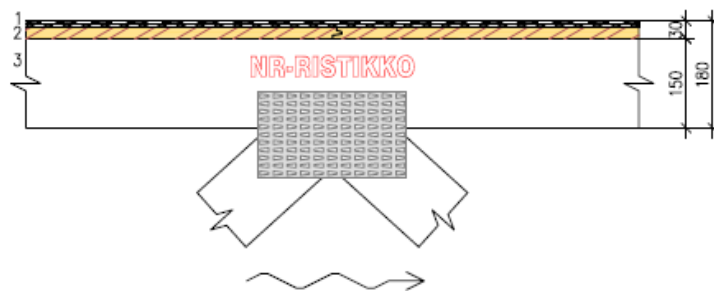


NRO	TARKOITUS	TUOTE	MITTA [mm]	PAINO NOIN
1	Lämmöneristys (A2-s1, d0)	Puhallusvilla	200	0,08 kN/m <sup>2</sup>
2	Kantava rakenne k900 (palotilanteessa)	Ristikön alapaarre RAK mukaan	300	0,17 kN/m <sup>2</sup>
	Lämmöneristys* (A2-s1, d0)	Kivilla	300	0,18 kN/m <sup>2</sup>
3	Ilman- ja höyrnsulku	Muovi (SFS 4225 E-luokka)	0,2	
4	Installaatiotila/Alakaton kannatus	Puurangat k250	25	0,05 kN/m <sup>2</sup>
5	Installaatiotila/Alakaton kannatus	Puurangat k400	25	0,05 kN/m <sup>2</sup>
6	Palosuojaus (A2-s1, d0)	Palokipsilevy	15	0,15 kN/m <sup>2</sup>
7	Palosuojaus (A2-s1, d0)/Sisäverhous	Palokipsilevy	15	0,15 kN/m <sup>2</sup>

KUVA 18. Yläpohja YP801NR (Puuinfo.fi d 2013, 140)

## Vesikatto

Vesikatto P2 luokan rakennukseen.



NRO	TARKOITUS	TUOTE	MITTA [mm]	PAINO NOIN
1	Vesikate (B <sub>roof</sub> (t2))	Bitumikermikate ARK mukaan	10	0,05 kN/m <sup>2</sup>
2	Kantava rakenne	Puulevy RAK mukaan	20	0,08 kN/m <sup>2</sup>
3	Kantava rakenne k900	Paarre/Palkki RAK mukaan	150	sis. ristikönpainoon

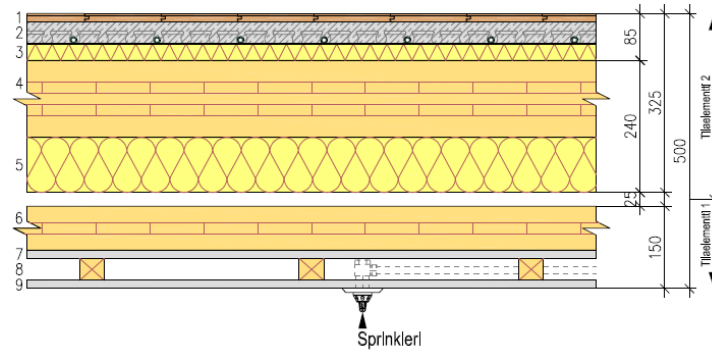
KUVA 19. Vesikatto VK802 (Puuinfo.fi d 2013, 143)

Yläpohjarakenteen omapaino 0,96 kN/m<sup>2</sup> (opinnäytetyön tekijän laskema arvio)



## Välipohja

Massiivirunkoinen välipohja P2 luokan rakennukseen, jossa on paloteknisesti 3...8 kerrosta. Palo-  
luokka on REI60, ilmaääneneristävyyden  $R'_w \geq 55$  ja askelääneneristävyyden  $L'_{n,w} \leq 53$  dB. Kantavara-  
kenne oletetaan LVL -rakenteiseksi.



NRO	TARKOITUS	TUOTE	MITTA [mm]	PAINO NOIN
1	Lattianpinnoite	Parketti ARK mukaan	15	0,08 kN/m <sup>2</sup>
2*	Palosuojaus (A2-s1, d0) Valusuoja/Lämmitysputkien kiinnitys	Pikaplaano RAK mukaan Asennuslevy	40	0,68 kN/m <sup>2</sup>
3	Ääneneristys (A2-s1, d0)	Askelääneneristevilla	30	0,03 kN/m <sup>2</sup>
4	Kantava rakenne	XXX-levy RAK mukaan LVL	140	0,71 kN/m <sup>2</sup>
5	Ääneneristys (A2-s1, d0)	Mineraalivilla	100	0,10 kN/m <sup>2</sup>
6	Alakaton kannatus	XXX-levy RAK mukaan LVL	80	0,41 kN/m <sup>2</sup>
7*	Palosuojaus (A2-s1, d0)	Palokipsilevy	15	0,13 kN/m <sup>2</sup>
8	Installaatiotila	Puurangat k400	40	0,03 kN/m <sup>2</sup>
9*	Palosuojaus (A2-s1, d0)/Sisäverhous	Palokipsilevy	15	0,13 kN/m <sup>2</sup>

KUVA 20. Välipohjarakenne VP801ML (Puuinfo.fi 2013, 150)

Välipohjan omapaino 2,3 kN/m<sup>2</sup> (opinnäytetyön tekijän laskema arvio)

## 4.2 Mallikerrostaloon kohdistuvien vaakakuormien laskentaesimerkki

Rakennukseen kohdistuvaan tuulikuorman ominaisarvoon vaikuttavat tuulta vastaan kohtisuorassa olevan alueen pinta-ala, rakennuksen sijainti, muoto ja korkeus sekä maastoluokkaa vastaava tuulen nopeuspaine. Lasketaan seuraavaksi mallikerrostaloon kohdistuva tuulikuorma Eurokoodi 5 Puurakenteiden lyhennetyin suunnitteluohjeen (Puuinfo.fi b, 12-14) mukaisesti tavanomaisille rakennuksille tarkoitetulla yksinkertaistetulla menettelyllä. Tuulikuorma kohdistuu rakennuksen pitkää sivua vasten kohtisuorassa.

TAULUKKO 1. Lähtötiedot Puuinfo.fi b (12-14) suunnitteluohjeen mukaan (Miettinen 2018-01-16)

**Lähtötiedot:**

<i>Maastoluokka</i>	2
<i>Rakennuksen kokonaiskorkeus <math>h</math></i>	18,7 m
<i>Tuulikuorman voimakkeroin <math>c_f</math></i>	1,3
<i>Tuulen nopeuspaine <math>q_k(h)</math></i>	0,75

Tuulikuorman ominaisarvo

Taulukossa 1 on rakennuksen lähtötiedot tuulikuorman laskentaan. Rakennukseen kohdistuva tasainen tuulikuorma saadaan 1,25 -kertoimen avulla. Kerroin tulee muunnoksesta, jossa koko projektipinnalle kohdistuva tuulenpaine korvataan rakennuksen yläosaan sijoittuvalla tasaisella kuormalla, jonka oletetaan vaikuttavan 0,8H vyöhykkeellä (kuva 21). (Puuinfo.fi e, 16.)

$$q_{w,k} = 1,25 * c_f * q_k(h) \quad (1)$$

$$q_{w,k} = 1,25 * 1,3 * 0,75 \frac{kN}{m^2} = 1,22 \frac{kN}{m^2}$$

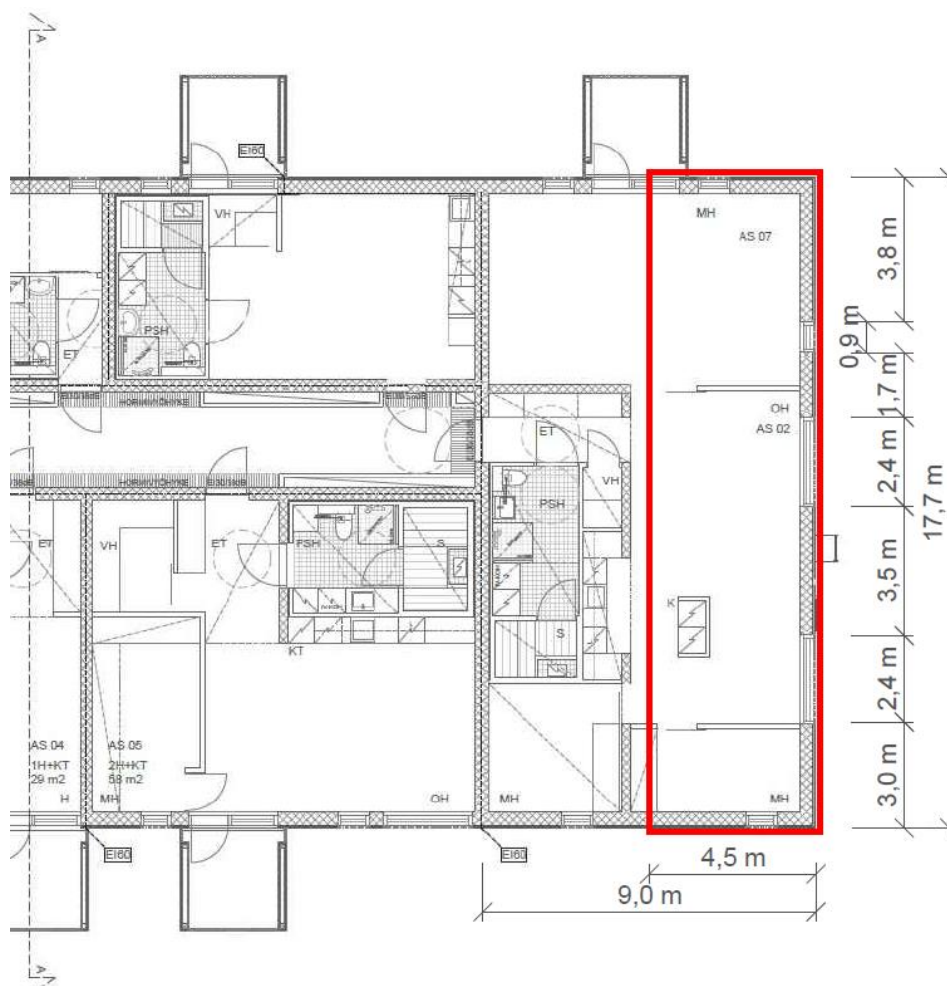


KUVA 21. 0,8H vyöhykkeellä vaikuttava tuulenpaine tasaisena kuormana (Puuinfo.fi c. 2014, 5; muokannut Miettinen 2018-01-16)



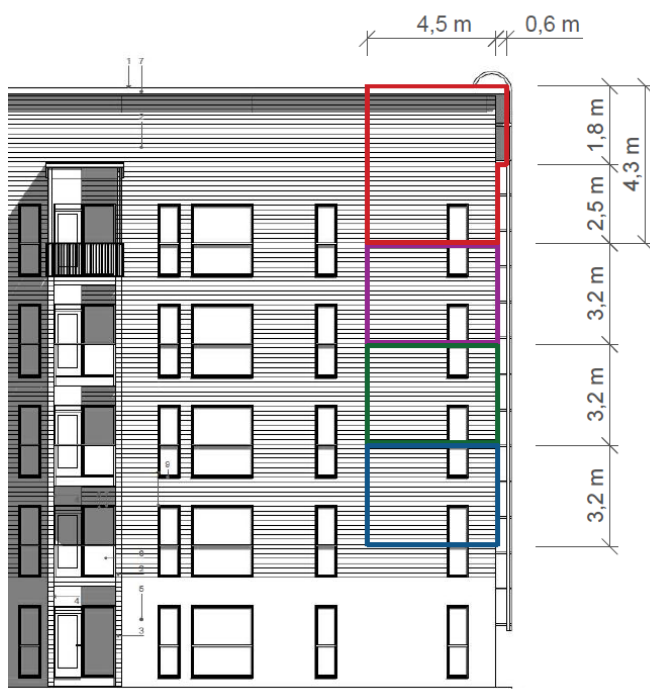
### Tuulikuormat kerroksittain

Koska puukerrostalon jokainen huoneisto on oma jäykistesysteeminsä, jokainen "huoneistotorni" on mitoitettava erikseen. Laskennassa otetaan huomioon koko yksittäiseen torniin kohdistuva tuulikuorma, joten kuormia ei siis jaeta muiden moduulien kesken. Esimerkkilaskussa lasketaan päätyhuoneiston (kuva 22) jäykistävälle seinälle kohdistuvat kerroskohtaiset tuulikuormat. päätyhuoneiston leveys on 9 metriä, joten jäykistävälle ulkoseinälle kohdistuvan tuulikuorman leveys on puolet siitä eli 4,5 metriä.



KUVA 22. Kuormitusala, joka kohdistuu päätyhuoneiston jäykistävälle ulkoseinälle (Puuinfo.fi c. 2014, 2; muokannut Miettinen 2017-02-08)

Tuulikuormaan vaikuttaa myös oleellisesti huoneistojen korkeudet. Jokaiselle huoneistolle on laskettava erikseen tuulikuorman kuormitusala kerroksittain, ja ylimmässä kerroksessa on huomioitava myös räystäään ala (kuvat 23). Kuormitusalojen perustella voidaan laskea kerroskohtaisten ominais-tuulikuormien arvot  $H_w$ .



KUVA 23. Kuormitusalat kerroksittain. (Puuinfo.fi c. 2014, 4; muokannut Miettinen 2017-02-08)

Tuulikuorman resultantit kerroksittain:

Lasketaan kerroksittain vaikuttavat tuulikuormien resultantit, jotka saadaan kertomalla tuulikuorman ominaisarvo  $q_{w,k}$  (kaava 1) kuormituspinta-alalla. Murtorajatilassa osavarmuuskerroin on 1,5, koska mitoitusyhdistelmässä tuulikuorma on pääkuormana.

$H_{w5}$  (huomioidaan räystäään vaikutus):

Kuormitusala:

$$A_{HW5} = 4,5 \text{ m} * 2,5 \text{ m} + (4,5 \text{ m} + 0,6 \text{ m}) * 1,8 \text{ m} = 20,43 \text{ m}^2$$

Tuulen ominaiskuorman resultantti:

$$H_{w5} = q_{w,k} * A_{HW5} = 1,22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 20,43 \text{ m}^2 = 24,9 \text{ kN}$$

Tuulen murtorajatilan resultantti:

$$H_{w5, MRT} = 1,5 * H_{w5} = 37,3 \text{ kN}$$

$H_{w4}$

Kuormitusala:

$$A_{HW4} = 4,5 \text{ m} * 3,2 \text{ m} = 14,40 \text{ m}^2$$

Tuulen ominaiskuorman resultantti:

$$H_{w4} = q_{w,k} * A_{HW4} = 1,22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 14,40 \text{ m}^2 = 17,6 \text{ kN}$$

Tuulen murtorajatilan resultantti:

$$H_{w4, MRT} = 1,5 * H_{w4} = 26,3 \text{ kN}$$

H<sub>w3</sub>

Kuormitusala:

$$A_{HW3} = 4,5 \text{ m} * 3,2 \text{ m} = 14,40 \text{ m}^2$$

Tuulen ominaiskuorman resultantti:

$$H_{W3} = q_{w,k} * A_{HW3} = 1,22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 14,40 \text{ m}^2 = 17,6 \text{ kN}$$

Tuulen murtorajatilan resultantti:

$$H_{W3, MRT} = 1,5 * H_{W3} = 26,3 \text{ kN}$$

H<sub>w2</sub>

Kuormitusala:

$$A_{HW2} = 4,5 \text{ m} * 3,2 \text{ m} = 14,40 \text{ m}^2$$

Tuulen ominaiskuorman resultantti:

$$H_{W2} = q_{w,k} * A_{HW2} = 1,22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 14,40 \text{ m}^2 = 17,6 \text{ kN}$$

Tuulen murtorajatilan resultantti:

$$H_{W2, MRT} = 1,5 * H_{W2} = 26,3 \text{ kN}$$

### Rakenteiden vinoudesta aiheutuneet lisävaakavoimat

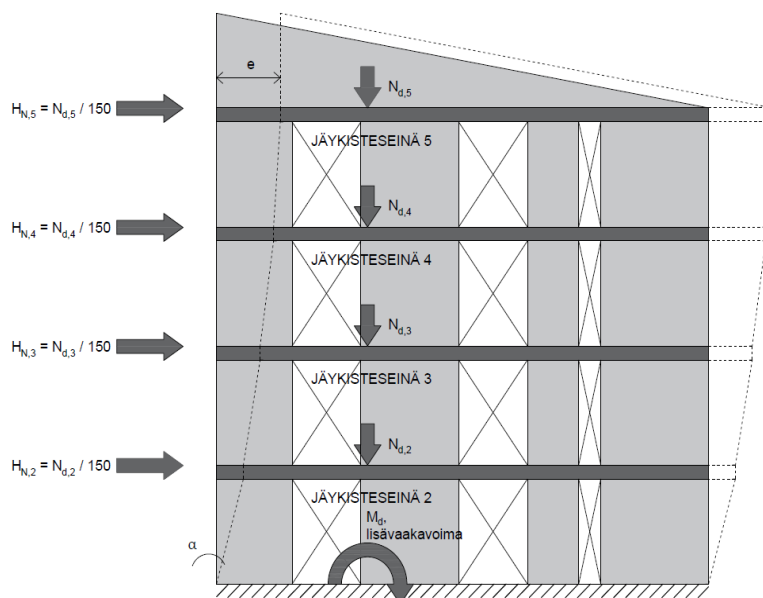
Tuulikuormiin on lisättävä rakenteiden vinoudesta johtuvat lisävaakavoimat H<sub>N</sub>. Lisävaakavoimien arvo H<sub>N</sub> muodostuu rakenteiden omasta painosta N, johon huomioidaan kantavien ulkoseinien paino ja väli- sekä yläpohjan painot. Omat painot on tässä tapauksessa kerrottava kertoimella 0,9. Lisävaakavoimat kertyvät kerroksittain kuvan 24 periaatteen mukaisesti.

Kuormitusalat, kuvat 22 ja 23):

Seinän pituus	L: 17,7 m
Kuormitus leveys	b: 5,1 m (H <sub>5</sub> ) tai 4,5 m (H <sub>2</sub> -H <sub>4</sub> )
Kerroskorkeus	h: 4,3 m (H <sub>5</sub> ) tai 3,2 m (H <sub>2</sub> -H <sub>4</sub> )

Rakenteiden omapainot rakennetyyppien mukaisesti:

Kantava ulkoseinä	N <sub>US</sub> = 0,9*0,77 kN/m <sup>2</sup> = 0,69 kN/m <sup>2</sup>
Yläpohja	N <sub>YP</sub> = 0,9*0,96 kN/m <sup>2</sup> = 0,86 kN/m <sup>2</sup>
Välipohja	N <sub>VP</sub> = 0,9*2,30 kN/m <sup>2</sup> = 2,07 kN/m <sup>2</sup>



KUVA 24. Lahtelan (2015) luentomateriaalin pohjalta periaatekuva rakenteiden vinoudesta aiheutuvien lisävaakavoimien kertymisestä puukerrosissa (Miettinen 2018-01-15).

Lisävaakavoimat lasketaan kaavalla 2:

$$H_N = \frac{N}{150} \quad (2)$$

Kerrosittain vaikuttavat resultantit lisävaakavoimista:

$$H_{N5} = \frac{N_{US} \cdot h_5 \cdot L + N_{YP} \cdot b_5 \cdot L}{150} = 0,9 \text{ kN}$$

$$H_{N4} = \frac{N_{US} \cdot h_4 \cdot L + N_{YP} \cdot b_4 \cdot L}{150} = 1,4 \text{ kN}$$

$$H_{N3} = \frac{N_{US} \cdot h_3 \cdot L + N_{YP} \cdot b_3 \cdot L}{150} = 1,4 \text{ kN}$$

$$H_{N2} = \frac{N_{US} \cdot h_2 \cdot L + N_{YP} \cdot b_2 \cdot L}{150} = 1,4 \text{ kN}$$

Jäykistävälle seinälle kohdistuvat kerrosittain vaikuttavat vaakavoimat yhteensä

Käyttörajatilassa:

$$H_5 = H_{W5} + H_{N5} = 25,8 \text{ kN}$$

$$H_4 = H_{W4} + H_{N4} = 18,9 \text{ kN}$$

$$H_3 = H_{W3} + H_{N3} = 18,9 \text{ kN}$$

$$H_2 = H_{W2} + H_{N2} = 18,9 \text{ kN}$$

Kerrosittain vaikuttavat vaakavoimat yhteensä käyttörajatilassa:

(eli ensimmäisen puurakenteisen kerroksen seinäelementille kohdistuvat vaakavoimat yhteensä)

$$H = F_{v,Ek} = 82,5 \text{ kN}$$

Murtorajatilassa:

$$H_5 = H_{W5, MRT} + H_{N5} = 38,2 \text{ kN}$$

$$H_4 = H_{W4, MRT} + H_{N4} = 27,7 \text{ kN}$$

$$H_3 = H_{W3, MRT} + H_{N3} = 27,7 \text{ kN}$$

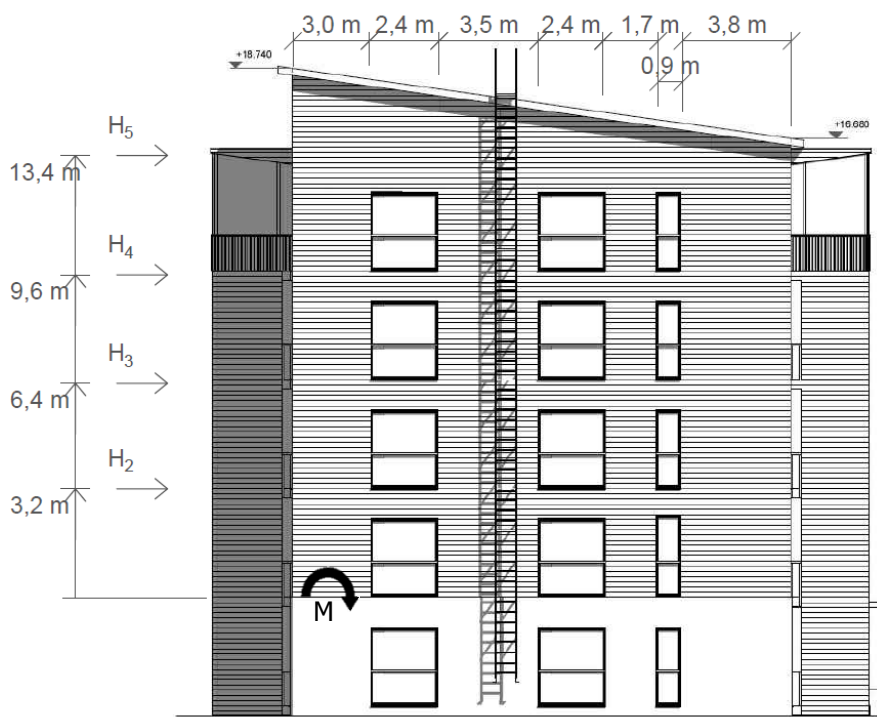
$$H_2 = H_{W2, MRT} + H_{N2} = 27,7 \text{ kN}$$

Kerrosittaiset vaakavoimat yhteensä murtorajatilassa:

(eli ensimmäisen puurakenteisen kerroksen seinäelementille kohdistuvat vaakavoimat yhteensä)

$$H = F_{v,Ed} = 121,3 \text{ kN}$$

Kerrosittain vaikuttavien vaakavoimien resultanttien korkeudet (kuva 25), ensimmäisestä betonirakenteisesta kerroksesta ylöspäin lukien ovat  $h_2 = 3,2 \text{ m}$ ;  $h_3 = 6,4 \text{ m}$ ;  $h_4 = 9,6 \text{ m}$  ja  $h_5 = 13,4 \text{ m}$ .



KUVA 25. Jäykistäville seinille kohdistuvat vaakakuormat kerrosittain (Puuinfo.fi c. 2014, 5; muokannut Miettinen 2018-01-18)

#### Vaakavoimien aiheuttama kokonaismomentti

Lasketaan rakennukseen kohdistuvien vaakavoimien aiheuttama kokonaismomentti (kuva 25), joka vaikuttaa ensimmäisessä puurakenteisessa kerroksessa. Tämä kokonaismomentti jaetaan myöhemmin neljän jäykistävän seinäelementin kesken niiden jäykkyyksien suhteessa laskettaessa seinäelementin kestävyttä.

$$M = H_5 \cdot h_5 + H_4 \cdot h_4 + H_3 \cdot h_3 + H_2 \cdot h_2 = 1044 \text{ kNm}$$

(3)

### 4.3 Mallikerrostalon jäykistävän LVL -seinäelementin mitoitus esimerkki

Lasketaan seuraavaksi mallitalon ensimmäisen puurakenteisen kerroksen seinäelementin kestävyys CrossLamin laskenta-aineistoon pohjautuen (CrossLam.fi). CrossLamin laskuesimerkki on tarkoitettu CLT -seinäelementin laskemiseen, mutta sovelletaan sitä LVL -levylle soveltuvaksi. Valitaan jäykistävän seinäelementin tyypiksi LVL -levy rakennetyypin (kuva 16) mukaan ja huomioidaan LVL:n ominaisuuksien vaikutus (taulukko 2) mitoituksessa.

LVL -jäykiste mitoitetaan ylemmistä kerroksista alaslaskettaville kumuloituville vaaka- ja pystyvoimille. Tarkasteltavat mitoitukset ovat (CrossLam.fi.):

- leikkauskestävyys,
- jäykisteen leikkaussiirtymä,
- jäykisteen tukien kestävyys,
- Jäykisteen ankkurointitarve ja
- jäykisteen nurjahduskestävyys.

Jäykiste on 69 mm paksu ristiinliimattu LVL -levy, jolloin se vastaa liitoskokeessa käytettyä LVL -levyä (kuva 26).



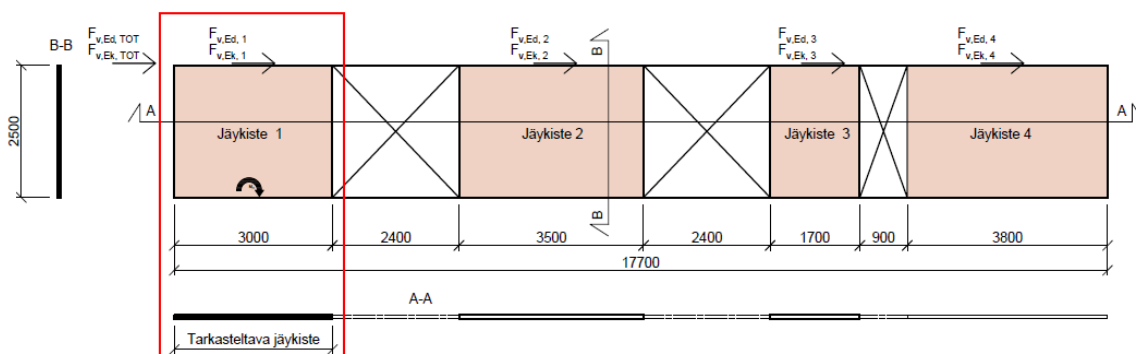
KUVA 26. Liitoskokeissa käytettävä LVL -levy on Stora Enson X -laatua, jossa 5 viilukerrosta on ristiinliimattu kohtisuoraan pääasialliseen viilujen suuntaan nähden (Miettinen 2017-10-11).

#### Kuormitus

Kuvassa 27 on laskettavaan seinäelementtiin kohdistuvien kuormien jakautuminen. Huoneiston jäykistäväseinä koostuu neljästä jäykisteosasta, joiden pituudet ovat 3,0 m, 3,5 m, 1,7 m ja 3,8 m. Tarkastellaan seuraavaksi 3,0 metriä pitkän jäykisteen 1 kestävyyttä.

Koska jäykistäväseinä koostuu neljästä jäykisteestä, ulkoinen vaakakuormitus täytyy jakaa jäykistäville osille niiden jäykkyyksien suhteessa (CrossLam.fi, 1). Laskennassa oletetaan rakenteen seuraamusluokaksi CC2, jolloin  $K_{FI}$  -kerroin on 1,0, joten sitä ei esitetä erikseen laskelmissa.

Mitoituksessa tarkastellaan ainoastaan kuormitustapaus, jossa tuuli on pääkuormana, jolloin omat painot on kerrottu 0,9 -kertoimella. Näin on saavutettu mahdollisimman haastava tilanne rakennuksen jäykistämisen kannalta, eli mahdollisimman vähän pystysuuntaista stabiloivaa normaalivoimaa ja paljon tuulenaiheuttamaa vaakavoimaa. Todellisuudessa tulisi tarkastaa myös muut kuormitustapaukset.



KUVA 27. Tuulikuormien jakaantuminen jäykisteosille (Miettinen 2018-01-19)

### Mitoitusarvot

Taulukossa 2 on esitetty suunnitteluarvot Stora Enson tuottamille LVL -tuotteille. Käytetään laskennassa jatkossa näitä arvoja.

TAULUKKO 2. LVL:n suunnitteluarvot (LVL by Stora Enso. RT 38867, 3)

SUUNNITTELUARVOT			Yksikkö	S -laatu 24–75 mm	X -laatu 24–69 mm	T -laatu 27–75 mm
Taivutuslujuus	syrjä	$f_{m,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	44	32	27
	lape	$f_{m,flat,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	50	36	32
Kokonaisvaikutuseksponentti		s	-	0,15	0,15	0,15
Vetolujuus	syiden suuntaan	$f_{t,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	35	26	24
	kohtisuoraan syitä vastaan	$f_{t,90,edge,k}$	N/mm <sup>2</sup>	0,8	6	
Puristuslujuus	syiden suuntaan	$f_{c,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	35	26	26
	kohtisuoraan syitä vastaan	$f_{c,90,edge,k}$	N/mm <sup>2</sup>	6	9	
Leikkauslujuus	syrjä	$f_{v,0,edge,k}$	N/mm <sup>2</sup>	4,1	4,5	
	lape	$f_{v,0,flat,k}$	N/mm <sup>2</sup>	2,3	1,3	
Kimmomoduuli	syiden suuntaan, keskiarvo	$E_{0,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	13 800	10 500	10 000
	syiden suuntaan, 5 % fraktiili	$E_{0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	11 600	8 800	8 800
Liukumoduuli	syrjä, keskiarvo	$G_{edge,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	600	600	
	syrjä, 5 % fraktiili	$G_{edge,k}$	N/mm <sup>2</sup>	400	400	
Tiheys	keskiarvo	$\rho_{mean}$	kg/m <sup>3</sup>	510	510	440
	5 % fraktiili	$\rho_k$	kg/m <sup>3</sup>	480	480	410

### Ulkoseinän jäykisteosien leikkausjäykkyydet

Lasketaan seinän jäykistävien osien 1, 2, 3 ja 4 jäykkyydet, jotta voidaan jakaa ulkoiset vaakavoimat niille jäykkyyksien suhteessa. On huomioitava, että kaava 4 on suunnattu CLT -levyjen leikkausjäykkyyden laskentaan, joten tuloksia voidaan pitää vain suuntaa-antavina. Lisäksi  $G_{mean}$  arvo on tarkoitettu LVL -levylle, jossa pääasiallinen syysuunta on vaakatasossa ja laskentaesimerkissä syyt ovat pystyssä. Kun selvitetään jäykkyyksien suhdetta vaakakuorman jakamista varten, oheisia arvoja voidaan kuitenkin käyttää.

$$G_{mean} = 600 \text{ N/mm}^2 \text{ liukumoduuli (taulukko 2)}$$

$$H = 2500 \text{ mm (jäykisteen korkeus)}$$

$$L_1 = 3000 \text{ mm (jäykisteen 1 pituus), } L_2 = 3500 \text{ mm (jäykisteen 2 pituus)}$$

$$L_3 = 1700 \text{ mm (jäykisteen 3 pituus), } L_4 = 3800 \text{ mm (jäykisteen 4 pituus)}$$

$$t = 69 \text{ mm (jäykisteen paksuus)}$$

### Leikkausjäykkyydet

$$C_V = \frac{1}{\frac{H}{L * G_{mean} * t}} \quad (4)$$

$$C_{V,1} = 49\,680 \text{ N/mm (jäykisteen 1 leikkausjäykkyys)}$$

$$C_{V,2} = 57\,960 \text{ N/mm (jäykisteen 2 leikkausjäykkyys)}$$

$$C_{V,3} = 28\,152 \text{ N/mm (jäykisteen 3 leikkausjäykkyys)}$$

$$C_{V,4} = 62\,928 \text{ N/mm (jäykisteen 4 leikkausjäykkyys)}$$

$$C_{V,TOT} = 198\,720 \text{ N/mm (leikkausjäykkyydet yhteensä)}$$

### Jäykisteosille kohdistuvat vaakakuormat

Lasketaan alimman puurakenteisen kerroksen neljälle jäykisteelle kohdistuvat vaakavoimat niiden jäykkyyksien suhteessa.

$$F_{v,EK,TOT} = 82,5 \text{ kN (kokonaisvaakavoima käyttörajatilassa)}$$

$$F_{v,Ed,TOT} = 121,3 \text{ kN (kokonaisvaakavoima murtorajatilassa)}$$

$$F_v = \frac{C_v}{C_{v,TOT}} * F_{v,TOT} \quad (5)$$

KRT	MRT	Osuus kokonaisvaakavoimista
$F_{v,EK,1} = 20,6 \text{ kN}$	$F_{v,Ed,1} = 30,3 \text{ kN}$	25,00 %
$F_{v,EK,2} = 24,1 \text{ kN}$	$F_{v,Ed,2} = 35,4 \text{ kN}$	29,17 %
$F_{v,EK,3} = 11,7 \text{ kN}$	$F_{v,Ed,3} = 17,2 \text{ kN}$	14,17 %
$F_{v,EK,4} = 26,1 \text{ kN}$	$F_{v,Ed,3} = 38,4 \text{ kN}$	31,67 %



### Tarkastellaan mitoitustarkastelussa jatkossa jäykistettä 1 (kuva 28).

Lasketaan alas jäykisteeseen 1 kohdistuvat kerroksittaiset vaakavoimat murtorajatilassa, eli 25,0 % kokonaisvaakavoimasta. Kaavassa  $h_2$ – $h_5$  ovat vaakakuormien korkeudet betonirakenteisesta kerroksesta ylöspäin lukien (kuva 25):

$$M_{H5,MRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{5,MRT} * h_5 = 128,0 \text{ kNm}$$

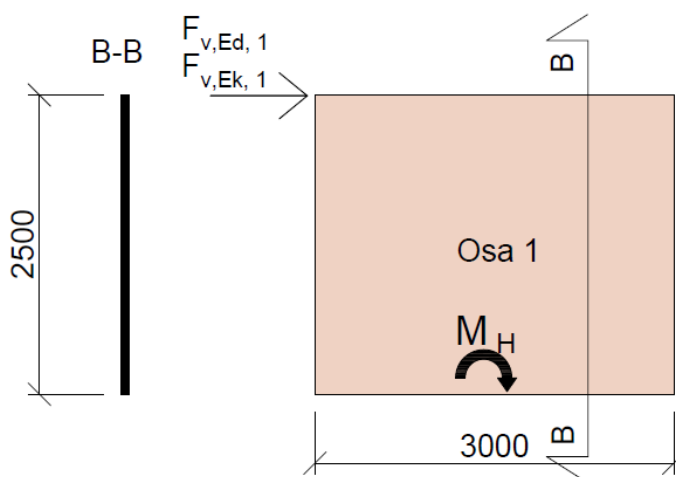
$$M_{H4,MRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{4,MRT} * h_4 = 66,4 \text{ kNm}$$

$$M_{H3,MRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{3,MRT} * h_3 = 44,3 \text{ kNm}$$

$$M_{H2,MRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{2,MRT} * h_2 = 22,1 \text{ kNm}$$

Vaakavoimien aiheuttama kokonaismomentti, joka kertyy jäykistettä 1 kohti alimmassa puurakenteisessa kerroksessa:

$$M_{jäykiste1} = 260,9 \text{ kNm}$$



KUVA 28. Jäykiste 1 alimmassa puurakenteisessa kerroksessa (Miettinen 2018-02-09)

#### Poikkileikkaus

Jäykisteenlujuutta laskettaessa on huomioitava halkeilun vaikutus, joka tehdään kertoimella  $k_{cr}$ . Standardien mukaisilla LVL -tuotteilla  $k_{cr}$  on 1,0. (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 75.) Käytetään laskennassa Stora Enson tarjoamia LVL:n suunnitteluarvoja, jotka on esitetty taulukossa 2.

$$L_1 = 3000 \text{ mm (jäykisteen 1 pituus)}$$

$$t = 69 \text{ mm (jäykisteen paksuus)}$$

Jäykisteen 1 poikkileikkausala

$$A = k_{cr} * t * L_1$$

$$A = 207\,000 \text{ mm}^2$$

(6)

## 4.3.1 Jäykisteen leikkauskestävyys

$$k_{\text{mod}} = 1,1 \text{ (hetkellinen aikaluokka/käyttöluokka 1) (Puuinfo.fi b, 17)}$$

$$\gamma_M = 1,20 \text{ (LVL) (Puuinfo.fi b, 15)}$$

$$f_{v,k} = 4,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (taulukko 2, leikkauslujuus syrjällään)}$$

$$V_d = F_{v,Ed} = 30,3 \text{ kN}$$

## Leikkausjännitys

$$\tau_d = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{A} \quad (7)$$

$$\tau_d = 0,2 \text{ N/mm}^2$$

## Leikkauskestävyys

$$f_{v,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} * f_{v,k} \quad (8)$$

$$f_{v,d} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

## Mitoitusehto

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$0,2 \text{ N/mm}^2 < 4,1 \text{ N/mm}^2$$

## Käyttöaste

5 %

Ok! kestää.

## 4.3.2 Jäykisteen leikkaussiirtymä

Jäykisteen kokonaissiirtymä muodostuu leikkausvoimasta ja taivutusmomentista johtuvista siirtymistä sekä jäykisteen ja sen alustan liittymän välisestä siirtymästä (CrossLam.fi, 2). Seuraavassa laskentaesimerkissä lasketaan ainoastaan leikkausvoimasta johtuva siirtymä. Tarkastelussa on huomioitava, että tulokset ovat suuntaa-antavia, koska leikkausjäykkyyden  $C_v$  arvo on laskettu CLT -levylle tarkoitetulla kaavalla, ja liukumoduulin  $G_{\text{mean}}$  arvo on tarkoitettu tapaukseen, jossa LVL -levyn viilujen puunsiyöt ovat pääasiallisesti kuormituksen suunnassa. Mitoituslaskussa puunsiyöt ovat pysyissä eli kohtisuoraan kuormitukseen nähden.

Jäykisteen leikkausjäykkyys (kaava 4):

$$C_{v,1} = 49\,680 \text{ N/mm}$$

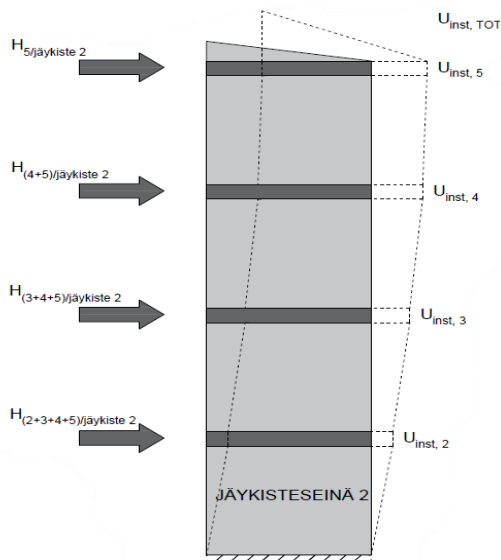
Jäykisteelle 1 kohdistuvat vaakavoimat käyttörajatilassa kerroksittain

$$H_{5,jäykiste1} = 0,250 * H_5 = 6,44 \text{ kN} \quad (9)$$

$$H_{4,jäykiste1} = 0,250 * H_4 = 4,73 \text{ kN}$$

$$H_{3,jäykiste1} = 0,250 * H_3 = 4,73 \text{ kN}$$

$$H_{2,jäykiste1} = 0,250 * H_2 = 4,73 \text{ kN}$$



KUVA 29. Lahtelan (2015) luentoaineiston mukaan jäykisteiden leikkaussiirtymät kertyvät kerroksittain kumuloituvista vaakavoimista (Miettinen 2018-02-09)

Jäykisteen 1 leikkaussiirtymät kerroksittain

Lasketaan jäykisteen 1 leikkaussiirtymät kerroksittain, jotta voidaan laskea koko rakennuksen yläreunan leikkaussiirtymä  $u_{inst,TOT}$ . Leikkaussiirtymä lasketaan kaavalla 10, jossa  $V_k$  on kerroksittain kumuloituvaa vaakavoimaa (kuva 29) käyttörajatilassa ja  $C_{v,1}$  on jäykisteen 1 leikkausjäykkyys.

$$u_{inst} = \frac{V_k}{C_{v,1}} \quad (10)$$

$$u_{inst,2} = 0,42 \text{ mm}$$

$$u_{inst,3} = 0,32 \text{ mm}$$

$$u_{inst,4} = 0,22 \text{ mm}$$

$$u_{inst,5} = 0,13 \text{ mm}$$

Jäykisteen 1 kohdalla rakennuksen yläreunan kokonaisleikkaussiirtymä

$$u_{inst,TOT} = 1,1 \text{ mm}$$

Rakennuksen yläreunan vaakavoimista aiheutunut leikkaussiirtymä jäykisteen 1 kohdalla on 1,1 mm. Todellisuudessa siirtymä on huomattavasti suurempi, koska siinä täytyisi huomioida myös taivutusmomentin aiheuttama siirtymä sekä jäykisteen ja sen alustan välisestä liitoksesta johtuva siirtymä.

### 4.3.3 Jäykisteen tukien kestävyys

Kun mitoitetaan jäykisteen tukipinnan kestävyyttä, huomioidaan LVL:stä vain pystysuuntaiset viilut. Laskelmassa pystykuorman resultantti  $R$  muodostuu kuormista, jotka kohdistuvat jäykisteeseen 1 (3,0 m) (kuva 30). Lasketaan tukien kestävyys CrossLamin laskentaohjeen mukaan (CrossLam.fi, 3):

Rakenteiden omapainot (KRT) rakennetyyppien mukaisesti:

Kantava ulkoseinä	$N_{US} = 0,77 \text{ kN/m}^2$
Yläpohja	$N_{YP} = 0,96 \text{ kN/m}^2$
Välipohja	$N_{VP} = 2,30 \text{ kN/m}^2$

Kuormitusalat kuvien 22, 23 mukaan, mutta huomioidaan ainoastaan jäykistävän osan osuus ja lisäksi puolet ikkunan leveydestä:

Jäykistävä osuu	$L: 3,0 \text{ m}$
Ikkunan leveys (1/2)	$L_{ikk}: 1,2 \text{ m}$
Kuormitus leveys	$b: 4,5 \text{ m}$
Seinän korkeus	$h: 4,3 \text{ m (H}_5\text{) tai } 3,2 \text{ m (H}_2\text{-H}_4\text{)}$

Rakenneosien painot:

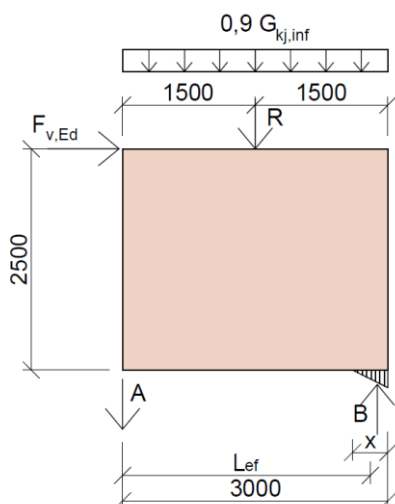
Kantavan ulkoseinän paino	$N_{us,5} = 3,3 \text{ kN/m} * 3 \text{ m} = 9,9 \text{ kN}$
Kantavan ulkoseinän paino	$N_{us,4} = 2,5 \text{ kN/m} * 3 \text{ m} = 7,4 \text{ kN}$
Yläpohjan paino	$N_{yp} = 4,3 \text{ kN/m} * 3 \text{ m} = 13,0 \text{ kN}$
Välipohjan paino	$N_{vp} = 10,4 \text{ kN/m} * 3 \text{ m} = 31,1 \text{ kN}$

Jäykisteelle 1 kohdistuvan normaalivoiman resultantti  $R$ :

$$G_{kj,inf} = N_{us,5} + N_{us,4} + N_{us,3} + N_{yp} + N_{vp,4} + N_{vp,3} + N_{vp,2} \quad (11)$$

$$G_{kj,inf} = 130,8 \text{ kN}$$

$$R = 0,9 * G_{kj,inf} = 117,7 \text{ kN}$$



KUVA 30. Jäkiste 1 tukien kestävyys (Miettinen 2018-04-14)

### Puristetun alueen pituus x tukireaktiolle B

$$t_{ef} = 18 \cdot 3 \text{ mm} = 54 \text{ mm (pystysuuntaisten viilujen paksuus yhteensä)}$$

$$L = 3000 \text{ mm (jäkistein pituus)}$$

$$R = 117,7 \text{ kN (tasaisen pysyvän kuorman resultantti)}$$

$$k_{mod} = 1,1 \text{ (hetkellinen aikaluokka/käyttöluokka 1) (Puuinfo.fi b, 17)}$$

$$\gamma_M = 1,20 \text{ (LVL) (Puuinfo.fi b, 15)}$$

$$f_{c,0,k} = 26 \text{ N/mm}^2 \text{ (taulukko 2, puristuslujuus syiden suuntaan)}$$

### Puristuslujuus

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * f_{c,0,k} \quad (12)$$

$$f_{c,0,d} = 23,8 \text{ N/mm}^2$$

Ratkaistaan puristuspuunnan pituus (x) tuella B

$$x = \frac{\frac{F_{v,Ed} * H}{(L - \frac{x}{3})} + \frac{R * \frac{L}{2}}{(L - \frac{x}{3})}}{0,5 * f_{c,0,d} * t_{ef}} \quad (13)$$

Muokataan kaavaa 13 siten, että voidaan huomioida kaikista kerroksista jäkisteelle 1 kertynyt kokonaismomentti  $M_{jäykiste 1} = 260,9 \text{ kNm}$ .

$$x = \frac{\frac{M_{jäykiste 1}}{(L - \frac{x}{3})} + \frac{R * \frac{L}{2}}{(L - \frac{x}{3})}}{0,5 * f_{c,0,d} * t_{ef}}$$

$$-\frac{1}{3}x^2 + Lx - \frac{M_{\text{jäkiste 1}} + R \cdot \frac{L}{2}}{0,5 \cdot f_{c,0,d} \cdot t_{ef}} = 0$$

$$-\frac{1}{3}x^2 + Lx - 679\,947,3 = 0$$

$$x = 233 \text{ mm} \quad , \text{ käy!}$$

$$x = 8\,767 \text{ mm} \quad , \text{ ei käy!}$$

Seinäelementissä puristuspuunnan pituus tuella B on oltava vähintään 233 mm.

### Tuen B tukipainekestävyys

Lasketaan seinäelementin tukipainekestävyys tuella B.

$$k_{\text{mod}} = 1,1 \text{ (hetkellinen aikaluokka/käyttöluokka 1) (Puuinfo.fi b, 17)}$$

$$\gamma_M = 1,20 \text{ (LVL) (Puuinfo.fi b, 15)}$$

$$f_{c,0,d} = 23,8 \text{ N/mm}^2 \text{ (kaava 12)}$$

Jotta tukipainekestävyys voidaan laskea, täytyy aluksi selvittää tukireaktioiden A ja B välinen etäisyys  $L_{ef}$ .

$$L_{ef} = L - \frac{x}{3} \tag{14}$$

$$L_{ef} = 2\,922 \text{ mm}$$

B tukireaktio

$$B = \frac{F_{v,Ed} \cdot H}{L_{ef}} + \frac{R \cdot \frac{L}{2}}{L_{ef}} \tag{15}$$

Muokataan kaavaa 15 siten, että voidaan huomioida kaikista kerroksista jäykisteelle 1 kertynyt kokonaismomentti  $M_{\text{jäkiste 1}} = 260,9 \text{ kNm}$ .

$$B = \frac{M_{\text{jäkiste 1}}}{L_{ef}} + \frac{R \cdot \frac{L}{2}}{L_{ef}}$$

$$B = 149,7 \text{ kN}$$

Tukipainejännitys tuella B

$$f_{c,d,mean} = \frac{B}{0,5 \cdot t_{ef} \cdot x} \quad (16)$$

$$f_{c,d,mean} = 23,8 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$f_{c,0,d} \leq f_{c,d,mean}$$

$$23,8 \text{ N/mm}^2 \leq 23,8 \text{ N/mm}^2$$

Käyttöaste

100 %

Ok! kestää.

Edellisessä tarkastelussa jo laskuedellytyksenä on puristuslujuuden 100% käyttäminen.

#### 4.3.4 Jäykisteen ankkurointitarve

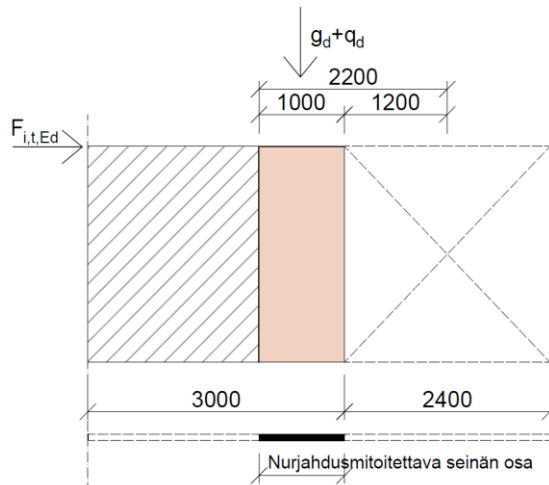
Lasketaan voima, joka tarvitaan tuen A ankkurointiin.

$$A = B - R = 32,0 \text{ kN}$$

Tuki A tulee siis ankkuroida alustaan nostavalle pystysuuntaiselle voimalle 32,0 kN ja vaakavoimalle 30,3 kN. Tarkastellaan laskuesimerkissä (otsikko 5.4) liitoskokeiden LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen laskennallista kapasiteettia edellisen pystysuuntaisen voiman ankkurointiin.

#### 4.3.5 Jäykisteen nurjahduskestävyys

Lasketaan jäykisteen 1 nurjahduskestävyys soveltaen rankarunkoisen seinäelementin puristuspuolen runkotolpan nurjahduskestävyyden laskuohjetta (Puuinfo.fi e, 60 - 66). Tarkastellaan nurjahdustarkastelussa jäykisteen puristuspuolella olevaa 1 metrin levyistä osiota (kuva 31).



KUVA 31. Nurjahdusmitoitettava jäykisteen osa (Miettinen 2014-03-18)

Nurjahdustarkastelussa käytetään murtorajatilamitoituksen kuormitusyhdistelmänä tapausta, jossa hyötykuorma on pääkuormana, jolloin se saa kertoimen 1,5. Muut kuormat saavat tässä tapauksessa pienennetyt kertoimet, eli lumikuorma 1,05 ja tuulikuorman 0,9. Omapainot kerrotaan 1,15.

Nurjahdustarkastelun lähtötiedot:

$$h = 69 \text{ mm (LVL -levyn paksuus)}$$

$$b_1 = 1000 \text{ mm (jäykisteen puristuspuolen tarkasteltava leveys)}$$

$$b_{ikk} = 2400 \text{ mm (jäykisteen vieressä olevan ikkuna-aukon leveys, kuormituksen laskennassa leveydestä huomioidaan puolet)}$$

$$b = 3000 \text{ mm (jäykisteenkokonaisleveys)}$$

$$L_s = 2500 \text{ mm (jäykisteen nurjahduspituus eli korkeus)}$$

### Jäykisteseinän puristuspuolen tarkasteltavalle osiolla kertyvä kuorma

Vaakavoimien aiheuttama puristus

Lasketaan ensin tuulikuorman jäykisteeseen 1 aiheuttama kokonaismomentti käyttörajatilassa.

Lasketaan alas jäykisteeseen 1 kohdistuvat kerroksittaiset vaakavoimat käyttörajatilassa, eli 25,0 % kokonaisvaakavoimasta, missä  $h_2 - h_5$  ovat vaakakuormien resultanttien korkeudet betonirakenteisesta kerroksesta ylöspäin lukien (kuva 25):

$$M_{H5,KRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{5,KRT} * h_5 = 86,3 \text{ kNm}$$

$$M_{H4,KRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{4,KRT} * h_4 = 45,4 \text{ kNm}$$

$$M_{H3,KRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{3,KRT} * h_3 = 30,3 \text{ kNm}$$

$$M_{H2,KRT/jäykiste1} = 0,250 * H_{2,KRT} * h_2 = 15,1 \text{ kNm}$$

Momentti, joka kertyy jäykistettä 1 kohti alimmassa puurakenteisessa kerroksessa:

$$M_{jäykiste1,KRT} = 177,1 \text{ kNm}$$

Vaakavoimien aiheuttama puristus lasketaan kaavalla 17

$$F_{i,t,Ek} = \frac{M_{jäykiste1,KRT}}{L_{ef}} = 60,6 \text{ kN} \quad (17)$$

$$F_{i,t,Ed} = 0,9 * F_{i,t,Ek} = 54,5 \text{ kN}$$

missä

$L_{ef} = 2922 \text{ mm}$ . Eli kaavan 14 mukaisesti laskettu jäykisteen tukireaktioiden A ja B välinen etäisyys, kun resultantti B on puristuspuolen pituus/3 etäisyydellä jäykisteen puristuspuolen reunasta (kuva 30).



Lasketaan seuraavaksi rakenteiden omasta painosta, hyötykuormasta ja lumikuormasta kertyvä pys-tykuorma.

Rakenteiden omapainot (KRT) rakennetyyppien mukaisesti:

Kantava ulkoseinä	$N_{US} = 0,77 \text{ kN/m}^2$
Yläpohja	$N_{VP} = 0,96 \text{ kN/m}^2$
Välipohja	$N_{VP} = 2,30 \text{ kN/m}^2$

Kuormitusalat kuvien 22, 23 mukaan, mutta huomioidaan ainoastaan tarkasteltavan osuuden leveys ja puolet ikkuna-aukon leveydestä:

Tarkasteltava leveys	L: 1,0 m
Ikkunan leveys	$L_{ikk}: 1,2 \text{ m}$ (puolet ikkuna-aukon leveydestä)
Kuormitusleveys	b: 4,5 m
Seinän korkeus	h: 4,3 m ( $H_5$ ) tai 3,2 m ( $H_2-H_4$ )

Rakenneosien painot

Kantavan ulkoseinän paino	$N_{us,5} = 3,3 \text{ kN/m} * 1 \text{ m} = 3,3 \text{ kN}$
Kantavan ulkoseinän paino	$N_{us,4} = 2,5 \text{ kN/m} * 1 \text{ m} = 2,5 \text{ kN}$
Yläpohjan paino	$N_{yp} = 4,3 \text{ kN/m} * (1\text{m}+1,2\text{m}) = 9,5 \text{ kN}$
Välipohjan paino	$N_{vp} = 10,4 \text{ kN/m} * (1 \text{ m}+1,2\text{m}) = 22,8 \text{ kN}$

Omapainot yhteensä KRT

$$g_k = N_{us,5} + N_{us,4} + N_{us,3} + N_{yp} + N_{vp,4} + N_{vp,3} + N_{vp,2}$$

$$g_k = 86,1 \text{ kN}$$

Omapainot yhteensä MRT

$$g_d = 1,15 * g_k = 99,0 \text{ kN}$$

Hyötykuorma ja lumikuorma

Kuormitusalat kuvien 22, 23 mukaan, mutta huomioidaan ainoastaan tarkasteltavan osuuden leveys ja puolet ikkunan leveydestä:

Tarkasteltava osuus	L: 1,0 m
Ikkunan osuus	$L_{ikk}: 1,2 \text{ m}$
Kuormitus leveys (hyöty)	$b_1: 4,5 \text{ m}$
Kuormitus leveys (lumi)	$b_1: 5,1 \text{ m}$ (sis. 0,6 m leveän räystäään)

Lumikuorman ominaisarvo 2,0 N/mm<sup>2</sup>

Hyötykuorman ominaisarvo 2,0 N/mm<sup>2</sup>

Lumikuorma  $q_{k,lumi} = 22,4 \text{ kN}$

Hyötykuorma  $q_{k,hyöty} = 59,4 \text{ kN}$  (kertyy 3:lta kerrokselta)

MRT

$$q_{lumi} = 1,05 * q_{k,lumi} = 23,6 \text{ kN}$$

$$q_{hyöty} = 1,5 * q_{k,hyöty} = 89,1 \text{ kN}$$

Pystykuormat yhteensä 180,8 kN

Jäykisteseinän puristuspuolen kuormaksi tulee

$$F = 54,5 \text{ kN} + 180,8 \text{ kN} = 235,3 \text{ kN}$$

Jäykisteen puristuspuolen nurjahduskestävyys

$$L_c = 1,0 * L_s = 2500 \text{ mm}$$

$$h = 69 \text{ mm (LVL – levyn paksuus)}$$

$$b = 1000 \text{ mm (tarkasteltava osio puristuspuolella)}$$

Poikkileikkauksen jäyhyysäde y -akselin suhteen

$$i_y = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad (18)$$

$$i_y = 19,9 \text{ mm}$$

Poikkileikkauksen heikomman suunnan hoikkuusluku

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad (19)$$

$$\lambda_y = 125,5$$

Nurjahduskertoimeksi saadaan  $k_{c,y}$  0,2. Nurjahduskerroin katsotaan kuvaajalta hoikkuusluvun perusteella. Kuvaajassa on huomioita eri materiaalit, sauvojen alkukäyryys ja laskennallinen lisätaipuma. (Puuinfo.fi b, 27).

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F}{b * h} \quad (20)$$

$$\sigma_{c,0,d} = 3,41 \text{ MPa}$$

## Puristuslujuus

$k_{mod} = 1,1$  (hetkellinen aikaluokka/käyttöluokka 1) (Puuinfo.fi b, 17)

$\gamma_M = 1,20$  (LVL) (Puuinfo.fi b, 15)

$f_{c,0,k} = 26,0 \text{ N/mm}^2$  (taulukko 2)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} * k_{mod}}{\gamma_M} \quad (21)$$

$$f_{c,0,d} = 23,83 \text{ MPa}$$

## Maksimi taivutusmomentti tuulesta

$q_k(h) = 0,75 \text{ kN/m}^2$  (tuulen nopeuspaine, maastoluokka 2)

$c_{pe,10} = 1,7$  (tuulenpaineen nettokerroin,  $A < 1 \text{ m}^2$ . Arvo pitäisi interpoloida lineaarisesti, kun tarkasteltava ala on 1–10  $\text{m}^2$ , mutta valitaan arvo varmalta puolelta laskelman yksinkertaistamiseksi. (Puuinfo b, 14)

$L_s = 2,5 \text{ m}$  (jäykisteen korkeus)

$k_1 = 2,2 \text{ m}$  (tuulen kuormitusleveys)

$$M_{w,k} = \frac{c_{p,net} * q_k(h) * k_1 * L_s^2}{8} \quad (22)$$

$$M_{w,k} = 2,19 \text{ kNm}$$

$$M_d = 0,9 * M_{w,k} \quad (23)$$

$$M_d = 1,97 \text{ kNm}$$

## Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 * M_d}{b * h^2} \quad (24)$$

$$\sigma_{m,y,d} = 2,76 \text{ MPa}$$

## Taivutuslujuus

$f_{m,k} = 32 \text{ MPa}$  (taivutuslujuus, taulukko 2)

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} * k_{mod}}{\gamma_M} \quad (25)$$

$$f_{m,d} = 29,33 \text{ MPa}$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{c,y,d}}{k_{c,y} * f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (26)$$

$$0,09 + 0,72 \leq 1$$

$$0,81 \leq 1$$

Käyttöaste

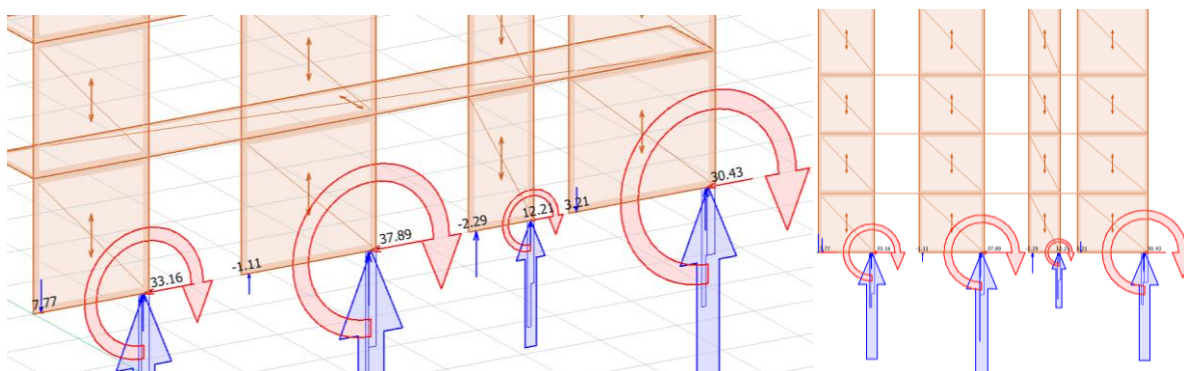
81 %

Ok! kestää.

#### 4.3.6 Tulostentarkistus FEM-Design 3D Structure -ohjelmalla

Tarkastetaan vaakavoimien jakaminen jäykisteille niiden jäykkyyksien suhteessa FEM-Design 3D Structure -ohjelmalla. Kuvassa 32 on koko jäykistävälle seinälle kohdistuvat vaaka- ja normaalivoimat sekä jäykisteiden tukireaktiot vaakavoimille, jotka ohjelma on jakanut jokaisen tuen molemmille reunoille. FEM-Design 3D Structure -ohjelman tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että ohjelma huomioi laskennassa myös tuulikuorman sijoittumisen rakennukseen. Eli jäykisteeseen 1 kohdistuu suurempi tuulikuorma kuin seuraavaan jäykisteeseen ja niin edelleen 3. ja 4. jäykisteeseen kohdistuu siis edelleen pienempi kuorma. Ohjelman tulokset ovat muuten samansuuntaiset käsin laskun kanssa, kun edelliset asiat otetaan huomioon. Voidaan siis todeta, että todennäköisesti aiemmin käsin laskettu vaakavoimien jakautuminen jäykisteille on laskettu kohtuudella oikein.

Osuus vaakavoimista	Käsin laskettuna	FEM-Design 3D Structure
$F_{v,Ek,1} =$	25,00 %	33,75 %
$F_{v,Ek,2} =$	29,17 %	30,33 %
$F_{v,Ek,3} =$	14,17 %	8,18 %
$F_{v,Ek,4} =$	31,67 %	27,74 %

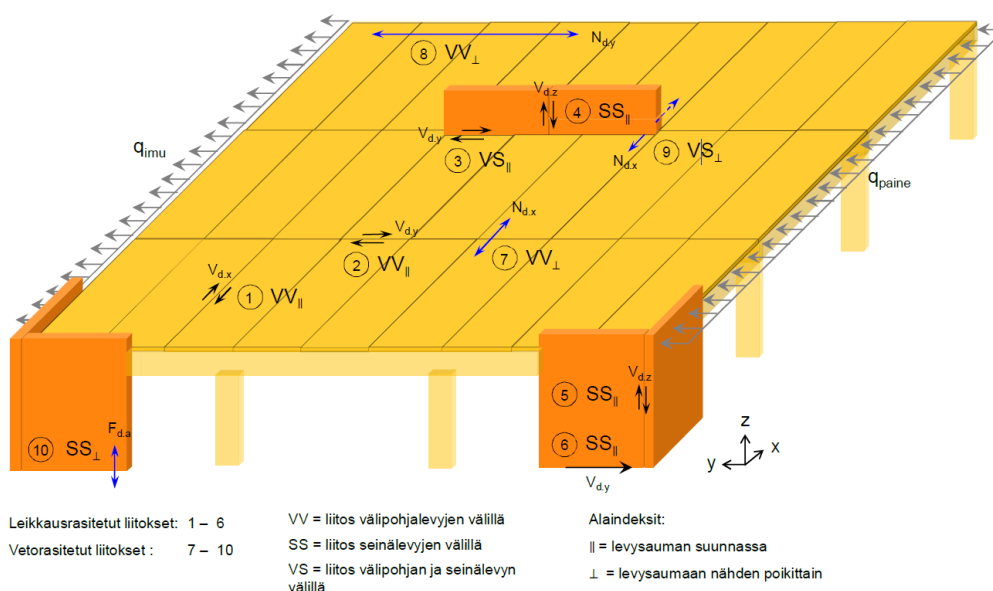


KUVA 32. Jäykisteiden tukireaktiot rakenteisiin kohdistuville vaakavoimille ja normaalivoimille jaettuna jäykisteiden jäykkyyksien suhteessa (Miettinen 2018-02-24).

## 5 LIITOKSET MASSIIVIPIPUURAKENTAMISESSA

Luntta (2013, 13) toteaa Aalto Yliopistolle tekemässään diplomityössä, että levyseinät voidaan analysoida vaakakuormitettuna levykenttänä, kun ne koostuvat vähintään kahdesta toisiinsa kytketystä levystä. Luntan diplomityö käsittelee ristiinliimattua massiivipuulevykenttää rungon vaakavoimia siirtävänä rakenteena.

Puurakenteisessa jäykistysjärjestelmässä vaakakuormien siirtyminen erillisin levyin rakennetusta jäykistysjärjestelmästä on riippuvainen levyjen välisestä yhteistoiminnasta, joka taas riippuu liitostekniikasta. Levyt tulisi saada liitettyä toisiinsa mahdollisimman jäykästi, koska puuosien liittäminen toisiinsa ei ole mahdollista monoliittisesti, kuten betonirakentamisessa. Suomessa levyt liitetään toisiinsa mekaanisin liitososin. Liimasaumojen käyttäminen Suomen rakennusmääräyskokoelman vaatimusten mukaan on mahdollista ainoastaan käyttörajatilamitoituksessa valvotuissa olosuhteissa. Jäykistysjärjestelmän toiminta on riippuvainen mekaanisten liitososien joustamisesta. (Luntta 2013, 30).



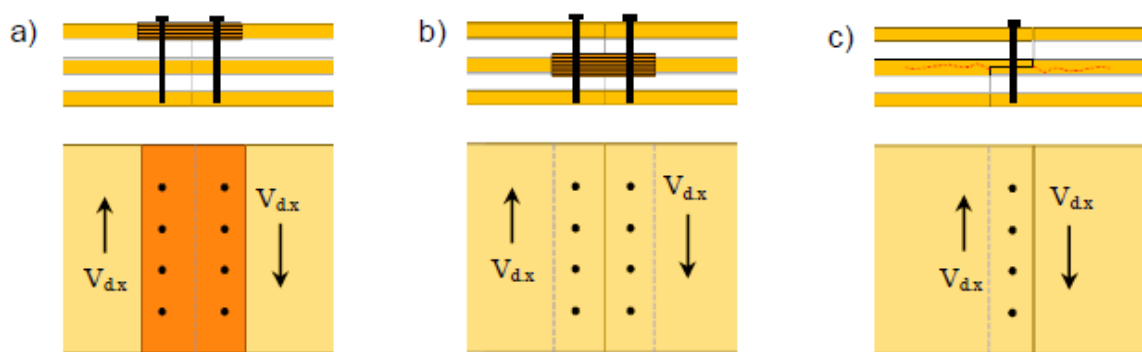
KUVA 33. Massiivipuulevyrakenteisen tason liitoskohdissa vaikuttavat voimat niiden sijainnin mukaan eroteltuna. V on välipohjalevy ja S on seinälevy. (Luntta 2013, 30.)

Kuormitusuunta, joka kohdistuu liitokseen, vaikuttaa joustavien liitosten toimintaan merkittävästi. Tästä syystä täytyy erottaa kohdat, jolloin liitoksiin vaikuttaa leikkaus- ja vetovoimia. Kuvassa 33 liitoskohdissa 1–6 vaikuttaa voimat levysauman suunnassa (leikkausrasitukset) ja liitoskohdissa 7–10 levysaumaan nähden poikittaisessa suunnassa (vetorasitukset). Liitokset joihin kohdistuu vetorasituksia, kuten liitos 8, estävät levysaumojen aukeamisen liitosta kohtisuoraan vaikuttavien vetojännitysten vaikutuksesta. Tällaisia rasituksia voivat olla esimerkiksi tuulen aiheuttamat imukuormat. Liitos 8 siis käytännössä vastaa vaikutukseltaan levykentän toiminnassa betonielementt välipohjan rengasraudoitusta. (Luntta 2013, 30–31.)

Opinnäytetyön liitoskokeissa tutkittiin liitosta, johon kohdistuu levysaumaan nähden poikittaisessa suunnassa olevia kuormia eli vetorasituksia (kuvassa 33 liitoskohdat 7–10). Liitoskokeissa ei tämän opinnäytetyön yhteydessä tutkittu leikkausrasitusten mukaisia tapauksia. Jatkossa on kuitenkin mahdollisesti tarkoitus toteuttaa kokeita myös leikkausrasituksille. LVL:n ja teräslevyn välisellä ruuviliitoksella on pyritty hakemaan mahdollisimman jäykkää ratkaisua, jotta levyjen välinen yhteistoiminta olisi mahdollisimman hyvin rakennusta jäykistävä.

## 5.1 Leikkausvoimia välittävät levysaumamat

Kuvassa 33 esimerkiksi kohdat 1 ja 2 kuvaavat leikkausvoimia välittäviä saumoja. Kuvassa 33 leikkausvoimat kohdistuvat välipohjatasoon, mutta vastaavalle periaatteella voidaan muodostaa myös pystysaumojen liitokset levyseinien väleillä. Kuvassa 34 on esitetty kolme tällä hetkellä tyypillisintä liitostyyppiä, jotka ottavat vastaan tason suuntaisia leikkausvoimia. Liitoksissa voimia siirretään levyjen väleillä tappiliittimin, useimmiten porakärkisillä ruuveilla, joiden halkaisija 6...8 mm. (Luntta 2013, 31.)



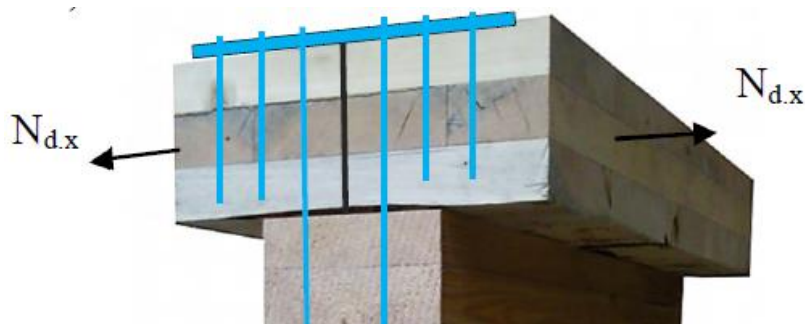
KUVA 34. Tyypilliset liitosratkaisut leikkausrasitetuille levysaumoille (Luntta 2013, 32)

Vaihtoehdoissa a) ja b) (kuva 34) CLT -levyyn jyrityssä urassa on erillinen puusoiro (esim. LVL, vaneri, sahatavara). Levykentille on kuitenkin tyypillistä, että ne kutistuvat kuivuessaan, jolloin sahatavara valmistettu soiro voi haljeta ja ei siten enää välitä leikkausvoimia. Tästä syystä esimerkiksi teräslevy tai vaneri toimivat liitoskappaleena paremmin. Vaihtoehdossa b) liitoksen jäykkyys ja kapasiteetti ovat vaihtoehtoon a) verrattuna paremmat, koska siinä on käytetty kahta leikkaustasoa yksileikkeisen liitoksen a) sijaan. Liitostyyppissä c) käytössä on vain yksi liitin rivi, mikä nopeuttaa asennustyötä, mutta vaarana siinä on loveuksen halkeaminen tasoa vastaan kohtisuoran kuormituksen johdosta. (Luntta 2013, 32).

Opinnäytetyön liitoskokeiden liitostyyppin voidaan arvioida olevan edellisistä tyypillisistä liitosratkaisuista lähimpänä vaihtoehtoa b), mutta voiman suunta syysuuntaan nähden on eri kuin liitoskokeissa. Vaihtoehdolla b) todennäköisesti on myös paras kapasiteetti saumaan kohdistuvien kuormien siirtäjänä, kun jokainen mekaaninen liitos on kaksileikkeinen, eikä ongelmana ole esimerkiksi loveuksen mahdollinen halkeaminen.

## 5.2 Normaalivoimia välittävät levysaumamat

Levysaumaan nähden kohtisuoria vetorasituksia voi muodostua mm. tuulen imupaineesta. Levy-sauma tulee tästä syystä vahvistaa myös saumaan nähden poikittaisessa suunnassa. Poikittaisvahvistus onnistuu joko paikallisesti yksittäisten saumojen väleillä tai koko levykentän ympäröivillä si-teillä. Yksittäisissä levysaumoissa levyn reunaan vastaan kohtisuorassa oleva vetorasitus voidaan siir-tää levysauman yli esimerkiksi lattateräs–ruuviliitoksella (kuva 35). (Lunnta 2013, 33–34.)



KUVA 35. Esimerkki vetorasituksia siirtävästä levyjen välisestä liitoksesta (Lunnta 2013, 34)

Opinnäytetyön liitoskokeiden liitostyyppi on saman tyyppinen kuin edellä mainittu lattateräs–ruuviliit-tos (kuva 35). Liitoskokeissa teräslevy vain on upotettuna LVL:n sisään, joten liitos on kaksileikkei-nen yksileikkeisen sijaan, mikä parantaa sen kapasiteettia.

## 5.3 Liitoksen teräslevyn vaurioituminen

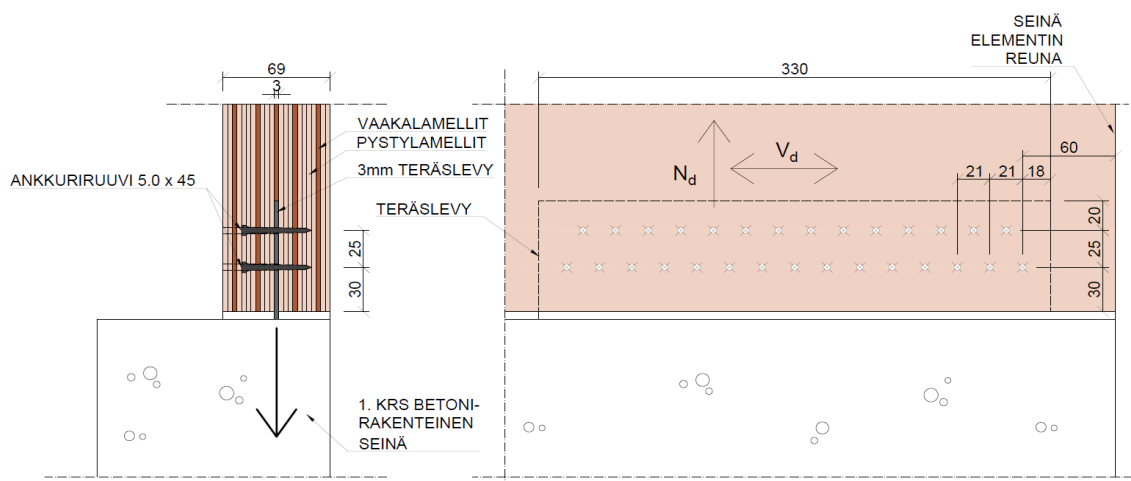
Jos teräslevy -liitososa sijoitetaan liitoksessa kuvan 34a mukaisesti puuosien pinnalle, voi se joutua ympäristön rasituksille alttiiksi. Kosteusvauriot (kuva 36) ja palokuormat esimerkiksi voivat vaurioit-taa teräslevyä. Liitoskokeiden LVL:n ja teräslevyn välisessä ruuviliitoksessa teräslevy on upotettu LVL:ään tehtyyn uraan, jolloin se on suojassa kosteudelta ja muilta ympäristörasituksilta.



KUVA 36. Teräslevyn kosteusvaurioituminen (Lahtela 2015)

#### 5.4 LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen mitoitus-esimerkki

Lasketaan Eurokoodin 1995-1-1 mukaisesti RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohjeen (2017) mukaan LVL -seinäelementin liitos betonirakenteeseen ensimmäisen kerroksen kantavaan seinään. Kuvassa 37 on mekaanisin liittimin toteutettava mitoittettava liitos. Lasketaan seuraavaksi siis liitostokokeiden mukaisen LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen laskennallinen kestävyys. Mitoitetaan ruuviliitoksen kestävyys LVL -levyssä ja jätetään teräslevy ja sen kiinnitys betonirakenteeseen tässä yhteydessä huomioimatta.



KUVA 37. Mitoitettava jäykisteen liitos 1. kerroksen betoniseinään (Miettinen 2018-02-10)

Tarkastellaan LVL -jäykisteen liitosta betonirakenteeseen seinään edellisen laskuesimerkin (kts. otsikko 4.3) mukaisille voimille. Rakenteen seuraamusluokka on CC2, ja laskenta tehdään puurakenteiden osalta Puurakenteiden suunnitteluohjeen (2017) mukaan. Liitokseen kohdistuu vaakavoima  $V_d = 30,3$  kN ja ankuroitavoima  $N_d = 32,0$  kN. Voimien aikaluokka on hetkellinen (tuulikuorma) ja rakenteen käyttöluokka on 1. Käytetään liitoksen laskennassa Stora Enson tuottamaa standardien mukaista 69 mm paksua X -laadun LVL -levyä liitostokokeiden mukaisesti.

Huomioidaan seuraavissa laskuissa ainoastaan pystysuunnassa vaikuttava voima, koska opinnäytetyössä toteutetut liitostokokeet tehtiin tämän suuntaisilla kuormilla. Eli liitokseen kohdistettiin vetorasi-tusta molemmissa pääasiallisissa puunsyiden suunnissa. Tällöin voidaan vertailla laskennallisia arvoja liitostokokeiden tuloksiin. Liitokseen kohdistuu myös samanaikaista vaakavoimaa, joka on seuraavassa laskussa jätetty huomioimatta.

##### 5.4.1 Ristiinviilutetun LVL:n reunapuristuslujuus

Ristiinviilutetulle LVL -levylle reunapuristuslujuus kulmassa  $\alpha$  syysuuntaan nähden lasketaan Puurakenteiden mitoitusohjeen (2017, 122) mukaisesti kaavalla (27).

$$f_{h,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (27)$$

$$f_{h,k, 0^\circ} = 35,62 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{syiden suuntainen voima, kulma } 0^\circ)$$

$$f_{h,k, 90^\circ} = 29,53 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{kohtisuoraan syihin vaikuttava voima, kulma } 90^\circ)$$



missä

$$f_{h,0,k} = 37 * (1 - 0,01 * d_{ef}) = 35,62 \text{ N/mm}^2 \text{ (ristiinviilutettu LVL)} \quad (28)$$

$$k_{90} = 1,15 + 0,015 * d_{ef} = 1,206 \text{ (ristiinviilutettu LVL)} \quad (29)$$

$d_{ef} = 3,74 \text{ mm}$  (ruuvien tehollinen halkaisija, kts. kaava 30)

#### 5.4.2 Mekaaniset liitokset

Tarkastellaan seuraavaksi liitoskokeessa käytetyn LVL:n ja teräslevyn välistä ruuviliitosta mekaanisten liitosten teorian pohjalta Puurakenteiden suunnitteluohjeen (2017) mukaan. Mekaanisten liitosten laskennassa siis jatkossa oletetaan, että liitokseen kohdistuu kuormitus pääasiallisen syysuunnan suuntaisesti sekä kohtisuorassa syysuuntaan, koska silloin tulokset ovat vertailukelpoisia liitoskokeiden koetulosten kanssa. Liitoskokeissa vetorasitus kohdistettiin liitokseen molemmissa syysuunnissa.

Puutavaran ja teräslevyn välinen liitos

Kun teräslevy on osana liitosta, myös sen lujuus tulee tarkistaa EN 1993 (Eurokoodi 3) mukaan. Puuosien väliin sijoitetun teräslevyn nurjahdusta ei kuitenkaan tarvitse huomioida, jos puuosien leviäminen on estetty siten, että teräslevylle varattu rako on enintään 25 % teräslevyn paksuutta suurempi. (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 106). Laskuesimerkissä oletetaan, että raon koko toteuttaa edellä mainitun ehdon. Teräslevyn lujuutta ei lasketa tässä laskuesimerkissä.

#### 5.4.3 Leikkauskuormitetut liittimet

Teräslevyn ja puun välisissä liitoksissa ruuvien ominaisleikkauskestävyys lasketaan teräslevyn ja puun välisen pulttiliitoksen kaavalla (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 125). Jotta edellistä ohjetta voidaan käyttää, täytyy pultin paksuuden olla  $d \leq 24 \text{ mm}$  ja vetomurtolujuuden  $f_{u,k} \leq 800 \text{ N/mm}^2$  sekä puutavaraa olevien reunaliitososien paksuudet  $t_1$  ja  $t_2$  vähintään  $4*d = 15,0 \text{ mm}$  (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 121).

Ankuriruuvin (5.0 x 45 mm) tiedot:

$$d = 4,9 \text{ mm} \quad (\text{halkaisija})$$

$$d_i = 3,4 \text{ mm} \quad (\text{kierteisen osan sisähalkaisija})$$

$$l = 47,4 \text{ mm} \quad (\text{pituus})$$

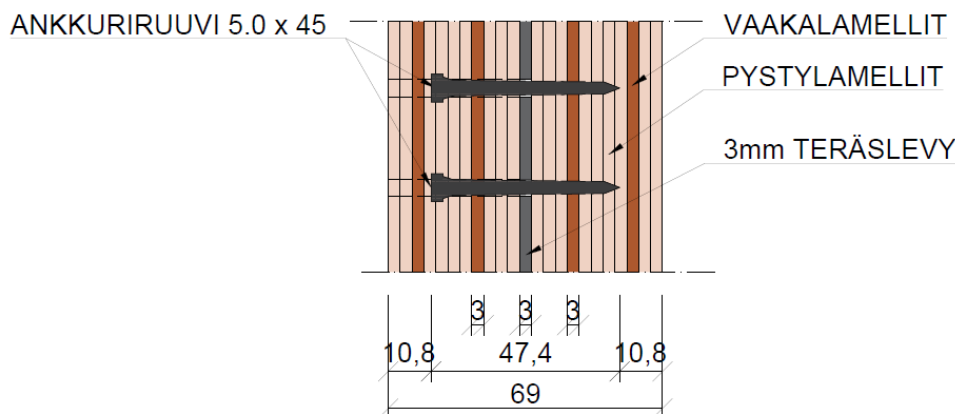
Liitoskokeissa käytetyn ankuriruuvin tehollinen halkaisija  $d_{ef}$ .

$$d_{ef} = 1,1 * d_i \quad (30)$$

$$d_{ef} = 3,74 \text{ mm}$$

Liitoskokeen liitoksessa ruuvien tunkeumasyyvyys puussa on ruuvien koko pituus, josta vähennetään teräslevyn paksuus 3 mm sekä ristiinliimattujen viilujen osuus eli edellisen 3 mm lisäksi vielä  $2*3$

mm (kuva 38). Ruuvien tunkeumasyyvyys yhteensä on  $47,4 - 9 \text{ mm} = 38,4 \text{ mm}$ . Ruuvien tunkeumasyyvyys  $t_1 = t_2$  teräslevyn molemmin puolin on siis  $38,4/2 = 19,2 \text{ mm}$  ( $>15 \text{ mm}$ ), joten yllä oleva ehto toteutuu.



KUVA 38. Ankkuriruuvien tunkeumasyyvyys LVL -levyssä (Miettinen 2018-03-10)

Ruuvien valmistajan ilmoittama myötöraja koetuksissa käytetyille ankkuriruuveille on  $M_y = 6800 \text{ Nmm}$ . Käytetään jatkossa ruuvien leikkausmitoitustalaskennassa valmistajan tarjoamaa arvoa. Ruuvien todellisen myötömomentin koetuloksien yhteydessä (otsikko 6.2.2) on laskettu ruuveille niiden todellinen myötömomentti koetulosten maksimiarvojen perusteella.

Lasketaan ruuvien vetomurtolujuus ruuvien myötörajan avulla pultin myötömomentin laskukaavalla 31 (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 122):

$$M_y = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} \quad (31)$$

$$f_{u,k} = \frac{M_y}{0,3 * d^{2,6}}$$

$$f_{u,k} = 734,4 \text{ N/mm}^2$$

missä

$$M_y = 6800 \text{ Nmm}$$

$$d_{ef} = 3,74 \text{ mm}$$

Ruuvien vetomurtolujuuden ominaisarvo on siis  $734 \text{ N/mm}^2$  ( $<800 \text{ N/mm}^2$ ) eli mitoituksessa voidaan käyttää teräksen ja puun välisen pulttiliitoksen laskentaohjetta.

#### Ruuvien leikkauskestävyys leikettä kohden

Liittimen (ankkuriruuvi 5.0 x 45) ominaisleikkauskestävyys  $R_k$  lasketaan teräslevyn ja puun välisen pulttiliitoksen kaavalla. Pultin halkaisijan on oltava  $\leq 30 \text{ mm}$ , jotta laskukaavaa voidaan käyttää. Kun kyseessä on kaksileikkeinen liitos, jossa keskimäinen osa on teräslevy, lasketaan liittimen leikkauskestävyys kaavalla 32. (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 125-126.)

Ankkuriruuvien ominaisleikkauskestävyys kaksileikkeisessä liitoksessa:

$$R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} f_h * t * d \\ 1,3 * f_h * t * d * \left[ \sqrt{2 + \frac{4 * M_y}{f_h * d * t^2}} - 1 \right] \\ 3 * \sqrt{M_y * f_h * d} \end{array} \right. \quad (32)$$

$R_{k,1} = 1988,5 \text{ N}$  (puunsyiden suuntaan vaikuttava voima)

$R_{k,2} = 1746,1 \text{ N}$  (kohtisuoraan puunsyihin vaikuttava voima)

missä

$f_{h,1} = 35,62 \text{ N/mm}^2$  (LVL:n reunapuristuslujuuden ominaisarvo, syiden suuntaan vaikuttava voima)

$f_{h,2} = 29,53 \text{ N/mm}^2$  (LVL:n reunapuristuslujuuden ominaisarvo, kohtisuoraan syihin vaikuttava voima)

$t = 19,2 \text{ mm}$  (puun paksuus, kaksileikkeisessä liitoksessa ohuemman puun paksuus, nyt t on ruuvien tunkeuma, koska ruuvi ei mene kokonaan puuosan läpi)

$d = 3,74 \text{ mm}$  (liittimen paksuus)

$M_y = 6800 \text{ Nmm}$  (liittimen myötömomenti)

Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo leikettä kohden:

Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo leikettä kohden teräslevyn ja puutavaran välisessä liitoksessa lasketaan kaavalla 33 (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 103.)

$$R_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} * R_k \quad (33)$$

$R_{1,d} = 1822,8 \text{ N}$  (syiden suuntaan vaikuttava voima)

$R_{2,d} = 1600,6 \text{ N}$  (kohtisuoraan syihin vaikuttava voima)

missä

$k_{mod} = 1,1$  (hetkellinen aikaluokka/käyttöluokka 1) (Puuinfo.fi b, 17)

$\gamma_M = 1,20$  (LVL) (Puuinfo.fi b, 15)

### Monileikkeiset liitokset

Monileikkeisen liitoksen kestävyys lasketaan siten, että kerrotaan pienin yhden leikkeen liitinkestävyys liittimen leikkeiden lukumäärällä ja liittimien tehollisella lukumäärällä (Puurakenteiden suunnittelu ohje 2017, 104). Koska laskuesimerkissä kyseessä on kaksileikkeinen liitos, jossa teräslevy on kahden puukerroksen välissä, voidaan jokaisen puikkoliittimen liitinkestävyys laskea kaavalla 34:

$$R_{d,tot} = 2 * R_d \quad (34)$$

$R_{1,d,tot} = 3645,6 \text{ N}$  (syiden suuntaan vaikuttava voima)

$R_{2,d,tot} = 3201,2 \text{ N}$  (kohtisuoraan syihin vaikuttava voima)

missä

$R_{1,d}$  ja  $R_{2,d}$  on yhden liittimen mitoituskestävyys leikettä kohden

Eli jokaisen liitoksessa olevan kaksileikkeisen ruuvin mitoitusleikkauskestävyys on 3645 N pääasialliseen puunsyiden suuntaan ja 3201 N kohtisuoraan pääasialliseen puunsyiden suuntaan.

#### 5.4.4 Liitinryhmän kestävyys pystysuuntaisen voiman ankkuroinnissa

Lasketaan seuraavaksi liitinryhmien (15 ruuvia ja 29 ruuvia) kestävyudet pystysuuntaan vaikuttavalle nostavalle voimalle ( $N_d$  32,0 kN) viilujen molempiin pääasiallisiin syysuuntiin.

Liitoksessa 29 ruuvia:

$$F_{R1,d} = 29 * 3646 \text{ N} = 106 \text{ kN (syiden suuntaan vaikuttava voima)}$$

Käyttöaste 30 %

$$F_{R2,d} = 29 * 3201 \text{ N} = 93 \text{ kN (kohtisuoraan syihin vaikuttava voima)}$$

Käyttöaste 34 %

Liitoksessa 15 ruuvia:

$$F_{R1,d} = 15 * 3646 \text{ N} = 55 \text{ kN (syiden suuntaan vaikuttava voima)}$$

Käyttöaste 59 %

$$F_{R2,d} = 15 * 3201 \text{ N} = 48 \text{ kN (kohtisuoraan syihin vaikuttava voima)}$$

Käyttöaste 67 %

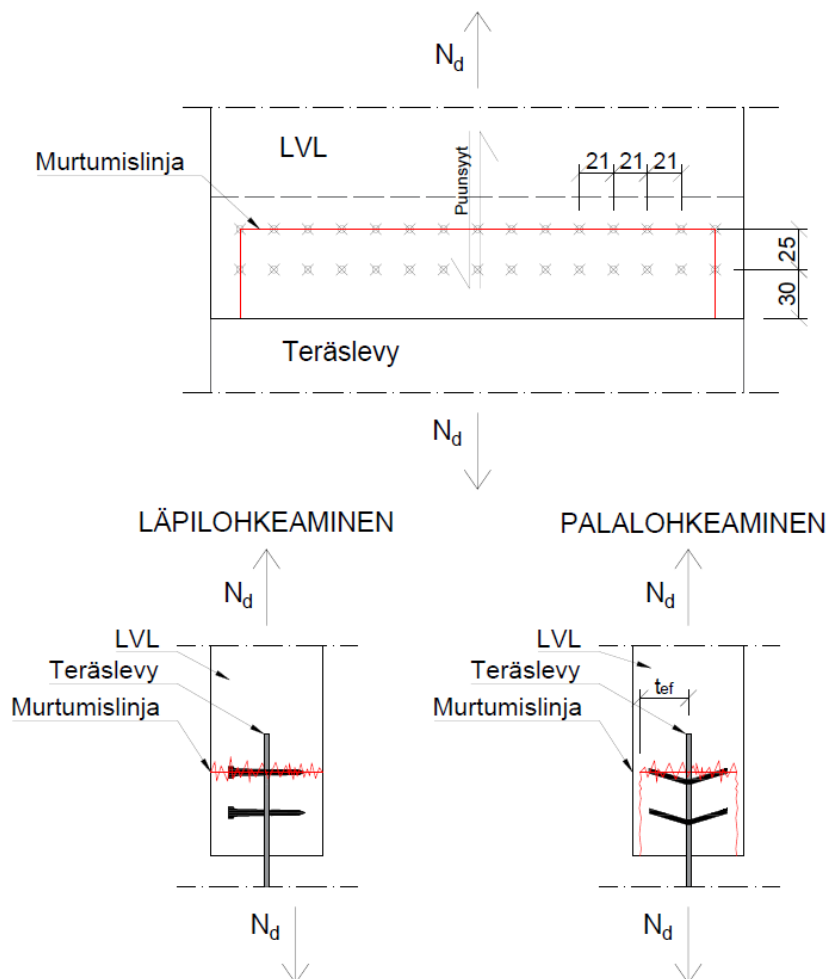
Viisikerroksisen puukerrostalon, jonka ensimmäinen kerros on betonirakenteinen, ensimmäisen puurakenteisen kerroksen jäykistävän seinäelementin kiinnitys pystysuuntaista voimaa vastaan betonirakenteeseen onnistuu siis edellä lasketuilla liitinryhmillä. Käyttöasteet jäävät 29 ruuvien liitinryhmässä alle 35 % ja 15 ruuvien liitinryhmässä alle 68 %. Tässä laskussa ei ole huomioitu vaakasuuntaisten voimien vaikutusta, koska liitokskeissa ei tätä suuntaa koestettu tämän opinnäytetyön yhteydessä. Aiemmin laskettu vaakavoima 30,3 kN saadaan kuitenkin todennäköisesti myös helposti ankkuroitua liitososilla. Erityisesti, kun kyseinen vaakavoima jaettaisiin kahden liitososan kesken, koska liitososia on tarkoitus sijoittaa jokaisen jäykisteen molempiin alakulmiin vastaanottamaan vaakavoimia molemmista suunnista.

Liitoksen laskennallisen kapasiteetin arvoja verrataan liitokskeiden tuloksiin otsikossa 6.1.3.

## 5.4.5 Lohkeamismurtokestävyys

Lohkeamismurto (kuva 39) tarkastetaan teräslevyllisissä liitoksissa. Yleensä läpilojkeaminen tulee tarkastaa pultti- ja tappivaarnaliitoksissa ja palalohkeaminen teräslevyn ja pintaliittimien tapauksessa. Ruuvit lasketaan yleensä pintaliittimiksi. Palalohkeaminen voi tulla kyseeseen myös silloin, kun tappivaarna ei ulotu ulommaisiin lamelleihin saakka teräslevyllisissä liitoksissa. Yleensä ristiviilutettujen LVL:n ja teräslevyn välisissä pultti- ja tappivaarnaliitoksissa on tarkastettava läpileikkautuminen ja palalohkeamiskestävyys. (Puurakenteiden suunnitteluohje 2017, 106-107). Lasketaan seuraavaksi molemmat lohkeamistavat. Laskentaesimerkissä kyseessä on tapaus edellisten väliltä, koska teräslevy on upotettu LVL -levyn sisään ja ruuvit eivät ulotu LVL -levyn pintoihin asti.

Tehdään seuraavat lohkeamismurtokestävyuden tarkastelut laskelman yksinkertaistamiseksi tapauksille, joissa liitinryhmässä on 30 ruuvia yhdessä ja 15 ruuvia kahdessa rivissä (yht. 30 ruuvia). Lasketaan kestävyydelle sekä ala- että ylärajat, koska liitoksokkeiden liitos ei vastaa edellisiä tapauksia täysin vaan on niiden väliltä kahden ruuvirivin ollessa limittäin keskenään (kuva 37). Alaraja kestävyydelle saadaan, kun oletetaan, että kahden ruuvirivin tapauksessa ruuvirivit ovat samassa linjassa keskenään (kuva 39) ja yläraja kestävyydelle saadaan, kun oletetaan, että kaikki 30 ruuvia on yhdessä rivissä. Tarkasteluissa oletetaan, että kuormitus liitokseen kohdistuu sen pääasiallisessa syy-suunnassa.



KUVA 39. Teräslevyllisissä liitoksissa tarkastettavat lohkeamismurtotapaukset ovat läpilojkeaminen ja palalohkeaminen (Miettinen 2018-04-07)

## Läpiloikeaminen

Laskenta Puurakenteiden suunnitteluohjeen (2017, 108) mukaan. Ristiviilutetussa LVL:ssä läpiloikeamiskestävyuden ominaisarvo voidaan laskea kahdella tavalla (kaavat 35 ja 37). Läpiloikeamistarkastelussa on huomioitava, että läpiloikeaminen on käytännössä mahdollinen, vaikka ruuvi ei ulotu kaan puun pintaan asti, koska ehjää puuta jää molemmin puolin ruuvia vain 10,8 mm (puun paksaus - ruuvien pituus).

Ominaisarvo läpiloikeamiskestävyydelle:

Tapa 1.

$$F_{bt,k} = L_{net,t} * t_1 * k_{bt} * f_{t,0,k} \quad (35)$$

$$F_{bt,k1} = 604 \text{ kN (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$F_{bt,k2} = 292 \text{ kN (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

missä

$$f_{t,0,k} \text{ on } 26 \text{ N/mm}^2 \text{ (puun vetolujuus, taulukko 1)}$$

$$k_{bt} \text{ on } 1,25 \text{ (LVL, Puurakenteiden suunnitteluohje (2017,108))}$$

$$t_1 \text{ on } 38,4 \text{ mm (liittimen tunkeuma puussa)}$$

$$L_{net,t} = (n_2 - 1) * (a_2 - D) \quad (36)$$

$$L_{net,t1} = 484 \text{ mm (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$L_{net,t2} = 234 \text{ mm (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

missä

$$n_2 \text{ on } 30 \text{ tai } 15 \text{ (liitinrivien lukumäärä kohtisuorassa puunsiyihin nähden)}$$

$$a_2 \text{ on } 21 \text{ mm (liitinrivien välinen etäisyys kohtisuorassa puunsiyihin nähden)}$$

$$D \text{ on } 4,3 \text{ mm (liittimelle poratun reiän halkaisija)}$$

Tapa 2.

$$F_{bs,k} = L_{net,t} * t_1 * f_{t,0,k} + 0,7 * L_{net,v} * t_1 * f_{v,k} \quad (37)$$

$$F_{bs,k1} = 491 \text{ kN (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$F_{bs,k2} = 246 \text{ kN (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

missä

$$f_{v,k} \text{ on } 4,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (syrjäleikkauslujuus ristiviilutetulle LVL:lle syysuunnassa, taulukko 1)}$$

$$a_3 \text{ on } 30 \text{ mm (liitinten päätyetäisyys)}$$

$$a_1 \text{ on } 0 \text{ mm tai } 25 \text{ mm (liitinten välinen etäisyys puunsiyiden suunnassa)}$$

$$n_1 \text{ on } 1 \text{ tai } 2 \text{ (liitinrivien lukumäärä puun syysuunnassa)}$$

$$L_{net,v} = 2 * (a_3 + (n_1 - 1) * (a_1 - D)) \quad (38)$$

$$L_{net,v1} = 60 \text{ mm (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$L_{net,v2} = 101 \text{ mm (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

Valittaessa laskutapojen väliltä ominaisarvoja lohkeamiskestävyyden ylä- ja alarajaksi huomataan, että tapa 2 antaa pienemmät arvot molemmissa tapauksissa. Liitoksen läpilohkeamiskestävyyden ominaisarvon yläraja on 491 kN ja alaraja on 246 kN. Esimerkkitalon liitos ei läpilohkea.

Käyttöaste, kun läpilohkeamisen ominaisarvoja verrataan liitokseen kohdistuvaan pystysuuntaiseen voimaan:

$$\frac{N_d}{F_{bs,k1}} = 7 \% \quad (\text{yläraja}) \quad \text{Ok, kestä!}$$

$$\frac{N_d}{F_{bs,k2}} = 13 \% \quad (\text{alaraja}) \quad \text{Ok, kestä!}$$

### Palalohkeaminen

Laskenta Puurakenteiden suunnitteluohjeen (2017, 108) mukaan. Lasketaan palalohkeamisen ominaisarvo edellisen laskun mukaisille kaksileikkisille liitoksille, eli 30 ruuvin liitokselle, joissa ruuvit ovat yhdessä tai kahdessa rivissä (kuva 39). Puurakenteiden suunnitteluohjeen kaavaa joudutaan hieman muokkaamaan, koska laskettavassa tapauksessa murtopintoja syntyy kaksi yhden sijaan. Kerrotaan kaavan loppuosa kahdella.

Ominaisarvo palalohkeamiskestävyydelle:

$$F_{ps,k} = L_{net,t} * \left[ t_{ef} * f_{t,0,k} + \left( (a_3 + (n_1 - 1) * a_1) * f_{v,0,k} \right) * 2 \right] \quad (39)$$

$$F_{ps,k1} = 414 \text{ kN} \quad (30 \text{ ruuvia yhdessä rivissä})$$

$$F_{ps,k2} = 215 \text{ kN} \quad (15 \text{ ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia})$$

missä

$L_{net,t}$ ,  $f_{t,0,k}$ ,  $a_3$ ,  $n_1$ , ja  $a_1$  kaavojen 35–38 mukaan

$f_{v,0,k}$  on 1,3 N/mm<sup>2</sup> (LVL:n tasoleikkauslujuus, taulukko 1)

$R_k$  on 3977,1 N (liittimen leikkauskestävyys, 2 leikettä/liitin)

$d$  on 3,74 mm (liittimelle paksuus, ruuvin tehollinen paksuus)

$f_{h,0,k}$  on 35,62 N/mm<sup>2</sup> (LVL:n reunapuristuslujuus syysuunnassa)

$$t_{ef} = \frac{R_k}{d * f_{h,0,k}} \quad (40)$$

$$t_{ef} = 29,9 \text{ mm}$$

Käyttöaste kun palalohkeamisen ominaisarvoja verrataan liitokseen kohdistuvaan pystysuuntaiseen voimaan:

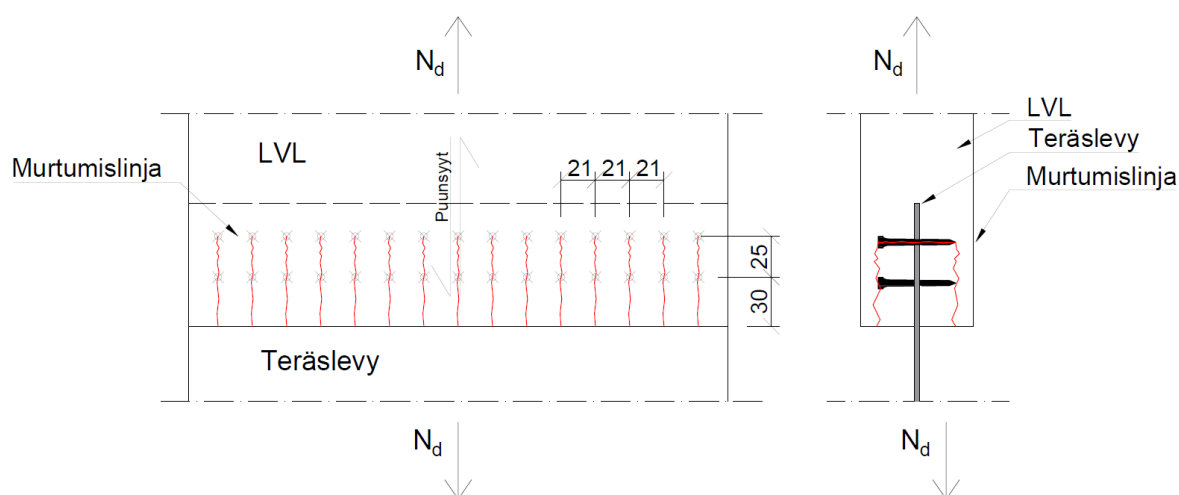
$$\frac{N_d}{F_{ps,k1}} = 7,7 \% \quad \text{yläraja} \quad \text{Ok, kestä!}$$

$$\frac{N_d}{F_{ps,k2}} = 14,9 \% \quad \text{alaraja} \quad \text{Ok, kestä!}$$

Liitoksen palalohkeamiskestävyuden ominaisarvon yläraja on 414 kN ja alaraja on 215 kN. Liitos ei siis palalohkea verrattuna esimerkkitalossa vaikuttaviin voimiin. Palalohkeamistarkastelussa on huomioitava, että  $t_{ef}$  arvo on melko suuri, joten ruuvien molempiin päihin jää ehjää puuta vain vähän ja todellisuudessa kuvan 39 mukaista tapausta ei todennäköisesti pääse syntymään.

#### 5.4.6 Rivileikkautumiskestävyys

Lasketaan liitoksen rivileikkautuminen Vaativien puurakenteiden suunnittelu -luentomateriaalin (Lah-tela 2015) pohjalta. Esimerkissä on esitetty kulmalevyn pulttiliitos perustukseen. Tehdään seuraavat rivileikkauskestävyyden tarkastelut laskelman yksinkertaistamiseksi tapauksille, joissa liitinryhmässä on 30 ruuvia yhdessä ja 15 ruuvia kahdessa rivissä (yht. 30 ruuvia), kuten lohkeamismurtotarkaste-luissa. Lasketaan kestävyydelle jälleen sekä ala- että yläraja. Alaraja kestävyydelle saadaan, kun oletetaan, että kahden ruuvirivin tapauksessa ruuvirivit ovat samassa linjassa keskenään (kuva 40) ja yläraja kestävyydelle saadaan, kun oletetaan, että kaikki 30 ruuvia on yhdessä rivissä. Tarkaste-luissa oletetaan, että kuormitus liitokseen kohdistuu sen pääasiallisessa syysuunnassa.



KUVA 40. Rivileikkautumisen murtumislinjat teräslevyllisissä liitoksissa (Miettinen 2018-04-15)

Peräkkäisten liittimien tehollinen lukumäärä liitoksessa:

$$n_{ef} = \min \left\{ n_i, n_i^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{a*t}{50*d^2}} \right\} \quad (41)$$

$$n_{ef1} = 0,99 \text{ (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$n_{ef2} = 1,76 \text{ (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

missä

$n_i = 1$  tai  $2$  (liittimien määrä syiden suunnassa)

$d = 4,90$  mm (ruuvien todellinen halkaisija)

$a = \min(a_1, a_3) = 30$  mm tai  $25$  mm (liittimien etäisyys syysuunnassa, yhden ruuvirivin tapauksessa käytetään liittimien reunaetäisyyttä  $a_3$ )

$t = 38,4$  mm (liittimien tunkeuma puussa)



Liitinryhmän ruuvien tehollinen lukumäärä:

$$N_{ef1} = 30 * n_{ef1} = 29 \text{ kpl (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$N_{ef2} = 15 * n_{ef2} = 26 \text{ kpl (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

Liitoksen kestävyys, kun kuormitus on syiden suuntainen.

$$N_{R,d} = N_{ef} * R_d \tag{42}$$

$$N_{R,d1} = 105,7 \text{ kN (30 ruuvia yhdessä rivissä)}$$

$$N_{R,d2} = 94,8 \text{ kN (15 ruuvia kahdessa rivissä, yht. 30 ruuvia)}$$

missä

$R_d = 3645,6 \text{ N}$  (kaksileikkeisen liittimen leikkauskestävyyden mitoitusarvo syysuunnassa, kaava 34)

Käyttöaste, kun rivileikkautumiskestävyyden ominaisarvoa verrataan liitokseen kohdistuvaan pystysuuntaiseen voimaan:

$$\frac{N_d}{N_{R,d1}} = 30 \% \text{ yläraja} \quad \text{Ok, kestäää!}$$

$$\frac{N_d}{N_{R,d2}} = 34 \% \text{ alaraja} \quad \text{Ok, kestäää!}$$

Rivileikkautumisen ylärajaksi saadaan 105,7 kN ja alarajaksi 94,8 kN. Liitos kestäää siihen kohdistuvat esimerkkitalon ankkurointivoimat rivileikkautumatta molemmissa tapauksissa.

## 6 LIITOSKOKEET

Liitoskokeiden koetulokset liittyvät LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen koestuksiin osana WIN - hanketta. Liitoskokeissa koestettiin kolmea osa-aluetta. Ensimmäisissä kokeissa testattiin LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen kapasiteettia yhdellä ja kahdella ruuvirivillä kuormituksen ollessa ristiinliimatun LVL -levyn viilujen pääasiallisen syysuunnan suuntainen sekä kohtisuoraan sitä vastaan. Lisäksi koestettiin liitoskokeissa käytetyn ruovin myötömomenttia sekä LVL -levyn reunapuristuslujuutta syiden suunnassa ja kohtisuoraan syitä vastaan.

### 6.1 LVL:n ja teräslevyn välinen ruuviliitos

Liitoskokeissa testattiin LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen kapasiteettia erilaisilla parametreilla, joita olivat ruuvirivien määrä ja LVL:n viilukerrosten pääasiallinen syysuunta. Liitoskokeissa koekappaleiden ruuviliitokseen kohdistettiin vetorasitusta niin kauan, että liitos antoi periksi. Tuloksena oli maksimiarvo kuormitukselle, jonka liitos kesti ennen murtumistapahtumaa, maksimikuorman aikainen siirtymä sekä kuormitus–siirtymä -kaaviot, joissa kuvataan kuormituksen ja siirtymän suhdetta kokeen edetessä.

#### 6.1.1 Koestus

Liitoskokeiden toimeksianto saatiin Uumajan yliopistossa tutkijana olleelta, nykyiseltä uuden puukerrostalojärjestelmän rakennesuunnittelijalta ja yrittäjältä, Per-Anders Daergalta. Liitoskokeet toteutettiin Daergan laatimien suunnitelmien ja testausohjelman (liite 1) mukaan. Koestus tehtiin Juha Lehtikannan (laboratorioinsinööri, Savonia ammattikorkeakoulu) ohjauksessa Savonia ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa Fiskars -kuormituskoneella, jossa oli käytössä 400 kN kenno. Rakennetekniikan yliopettaja Arto Puurula (Savonia ammattikorkeakoulu) neuvotteli Daergan kanssa testaus suunnitelmasta ja Lehtikannan kanssa suunnitelmien toteuttamisesta Savonian laboratoriotiloissa. Koestus ja sitä varten tarvittavat koekappaleet toteutettiin yhteistyössä insinööriopiskelija Jani Kaipaisen kanssa.

Liitoskokeet tehtiin neljälle erilaiselle liitossarjalle, joissa jokaisessa oli viisi koekappaletta. Yhteensä toteutettiin 22 koetta, joista 4 oli esikokeita. Esikokeet tehtiin neljälle kahden ruuvirivin koekappaleelle (C1, D1, E1 ja F1), jotta saatiin selville pääkokeita varten optimaalinen ruuvirivien etäisyys. Kaksi esikokeiden tuloksista lisättiin lopullisiin koetuloksiin (C1 ja F1) ja kaksi hylättiin (D1 ja E1).

Koetulokset kattavat 20 kuormituskoetta, joihin kuuluu 4 erilaista koesarjaa, 5 koekappaletta sarjaan (kuva 41).

Koekappaleet nimettiin seuraavasti:

- A1-A5: 15 ruuvia, 1 rivi, veto syysuuntaan,
- B1-B5: 15 ruuvia, 1 rivi, veto kohtisuoraan syihin,
- C1-C5: 29 ruuvia, 2 riviä, väli 5d (25mm), veto syysuuntaan ja
- F1-F5: 29 ruuvia, 2 riviä, väli 8d (40mm), veto kohtisuoraan syihin.



KUVA 41. Koekappaleet A1, B1, C1 ja F1 ennen kuormituskoetta (Miettinen 2017-10-27 ja 2017-10-11)

### Koekappaleiden valmistelu

LVL -koekappaleet (paksuus 69 mm) leikattiin sirkkelillä haluttuun kokoon (330 x 200 mm), jonka jälkeen niihin tehtiin etukäteen määritetyn (65–90 mm) syvyinen ura liitokseen kuuluvalla teräslevylle. Uraan sijoitettavat 3 mm paksut teräslevyt (330 x 160 mm) leikattiin haluttuun kokoon CNC -työstönä. Koekappaleet kiinnitettiin kuormituskoneeseen yhteensä kymmenellä M16 pultilla.

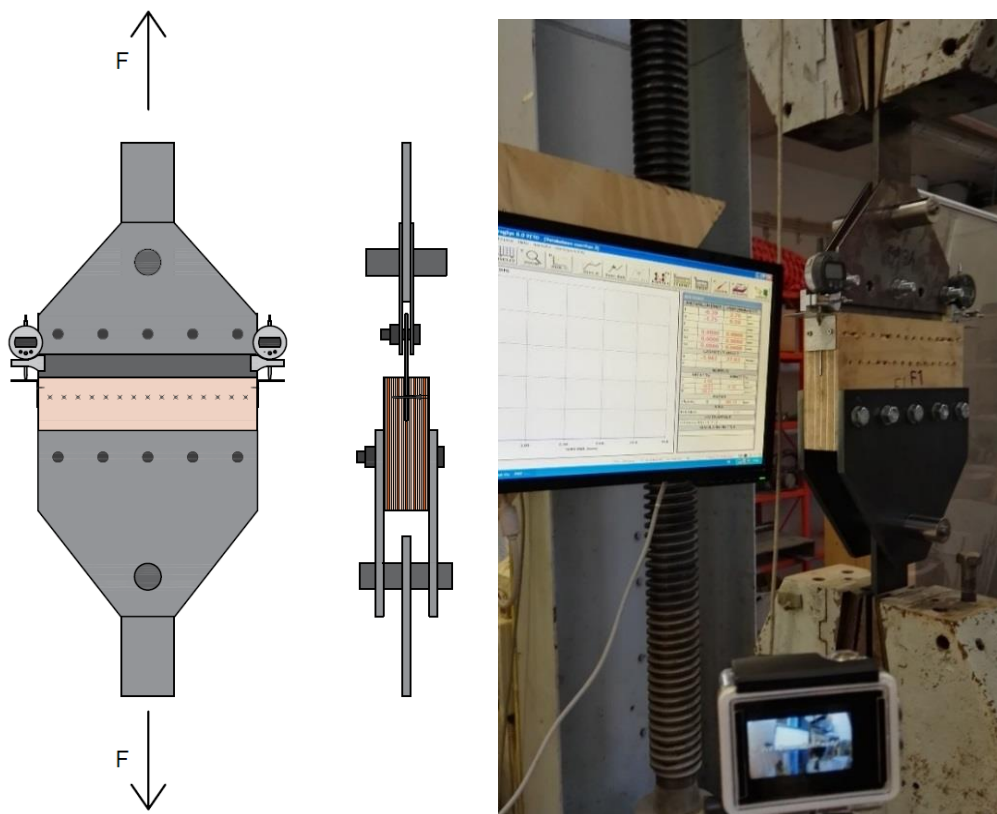
Kun teräslevy oli sijoitettu paikoilleen, tehtiin koekappaleisiin liitoksen ruuveille esiporaus pylväsporausporakoneella 4,3 mm poralla (kuva 41). Esiporaus tehtiin toiselta puolelta levyä teräslevyn läpäisyyn saakka. Esiporausten jälkeen koekappaleet koottiin ruuvaamalla tarvittava määrä (15 tai 29 kpl) ruuveja paikoilleen (kuva 42). Ruuvit olivat 5.0 x 45 mm sähkösinkittyjä ankkuriruuveja.



KUVA 42. Koekappaleisiin tehtiin esiporaus 5 mm ruuveille, ja ruuvit ruuvattiin paikoilleen akkupora-koneella (Miettinen 2017-10-02)

### Liituskokeiden suoritus

Liituskokeet toteutettiin kolmena päivänä 11.10.2017, 1.11.2017 ja 6.11.2017. Koestuksessa kuormituskone kohdisti koekappaleiden ruuviliitokseen vetorasitusta. Koneenleuat kiinnitettiin pulttiliitoksella koekappaleessa oleviin teräsosiin nivelellisesti (kuva 43). Nivelet mahdollistivat koekappaleen vapaan kiertymisen sivusuunnassa, jotta kaikki tuloksiin vaikuttavat ei-toivotut voimat saatiin minimoitua. Liitosta kuormitettiin murtoon asti ja edelleen, kunnes voima tippui ja liitos antoi lopullisesti periksi.



KUVA 43. Havainnekuva LVL -liituskokeen koejärjestelystä (Miettinen 2018-01-23)

KUVA 44. Kuormituskokeen koejärjestely (Miettinen 2017-10-11)

### Tulosten taltiointi

Kuormituskokeet tallennettiin kahdella action -videokameralla (kuva 44) ja valokuvaamalla. Kuormituskone antoi jokaisesta kokeesta numeerisen datan, jossa näkyi koeaika, kuorma (kN) ja koneen leuan siirtymä. Emme voineet hyödyntää koneen siirtymäarvoja, koska niissä ei huomioida teräslevyissä ja muussa koejärjestelmässä tapahtuvia muodonmuutoksia. Tästä syystä mittasimme kahdella mittakellolla (tarkkuudet 0,01 mm ja 0,001 mm) liitoksessa tapahtuvat todelliset siirtymät. Mittakellojen tulokset tallentuivat videotallenteelle (kuva 45). Kokeiden jälkeen keräsimme videotallenteelta todelliset siirtymäarvot kuorma–siirtymä -käyriksi Excel -ohjelmaa apuna käyttäen.



KUVA 45. Kuvakaappaus videotallenteelta, jolta kerättiin siirtymät koekappaleen molemmissa reunoissa (Miettinen 2017-11-01)

### Koekappaleiden painokosteus prosentit

Ennen koestuksia LVL -levyjen kosteus oli tasaantunut n. 8...10 paino-%, mikä on myös Stora Enson lupaama painokosteus kohteeseen toimitettavalle LVL -materiaalille. Kosteuden mittaus tehtiin koestuksien jälkeen viidelle näytepalalle kuiva-painomenetelmällä, jotta saatiin varmuus koekappaleiden painokosteudesta koestushetkellä. Koepalojen painokosteus laskettiin kaavalla 43.

$$Kosteus (\%) = 100\% * \frac{a - b}{b} \quad (43)$$

missä

a on kappaleen paino koestuksen jälkeen

b on kappaleenpaino absoluuttisen kuivana

TAULUKKO 3. Koekappaleiden painokosteudet (Miettinen 2017-11-09)

Kosteuden mittaus			
	a - paino (g) koestuksen jälkeen	b - paino (g) absoluuttisen kuivana	Painokosteus (%)
<b>B3</b>	447,68	412,44	8,54
<b>B5</b>	486,60	448,77	8,43
<b>C4</b>	447,64	413,08	8,37
<b>C5</b>	496,43	457,95	8,40
<b>F3</b>	439,96	405,15	8,59

Koekappaleiden painokosteus oli kokeiden jälkeen 8,37...8,59 % (taulukko 3). Eli koekappaleiden painokosteus vastaa Stora Enson lupaamaan kosteuspuitoisuutta kohteeseen toimitettavissa LVL - tuotteissa. Voidaan siis olettaa, että liitoskokeet ovat koekappaleiden painokosteuden puolesta luotettavia.

## 6.1.2 Koetulokset ja niiden analysointi

Seuraavaksi esitellään liitoskokeiden tulokset. Taulukossa 4 on liitoskokeiden huipputulosten keskiarvot sarjoittain. *Voima* sarakkeessa on liitoskokeen maksimivoima. *Siirtymä* sarakkeessa on maksimivoiman aikainen siirtymä (vasemman ja oikean mittakellon keskiarvo). *Koeaika* sarakkeessa on koeaika, jolloin maksimivoima saavutettiin.

TAULUKKO 4. Liitoskokeiden maksimiavot sarjoittain (Miettinen 2018-01-12)

Sarja	kokeiden lukumäärä	Vedon suunta	Ruuvien määrä	Ruuvirivien etäisyys	Voima F (kN)	Siirtymä s (mm)	Koeaika t (s)
A	5	syysuuntaan	15	-	77,2	6,3	205
B	5	kohtisuoraan syihin	15	-	46,9	3,2	110
C	4(5)	syysuuntaan	29	väli 5d (25mm)	156,5	6,9	280
F	5	kohtisuoraan syihin	29	väli 8d (40mm)	99,9	2,8	194

Taulukossa 4 esitetyistä koetuloksista voidaan havaita, että LVL -levy kestää huomattavasti suurempia rasituksia, kun sen viilut ovat pääasiassa vetorasituksen suunnassa. Tämä tukee oletusta, että puumateriaalit kestävät puunsyiden suuntaan olevaa rasitusta paremmin. LVL -levy kestää myös muodonmuutoksia paremmin syysuuntaan. Voidaan myös huomata, että kahden ruuvirivin käyttäminen, ja näin ruuvimäärän tuplaaminen, vaikuttaa huomattavasti liitoksen kestävyys. Liitoksen siirtymät pysyvät lähes samoina ruuvimäärästä riippumatta. Tulosten mukaan kestävin on koesarja C ja heikoin on koesarja B.

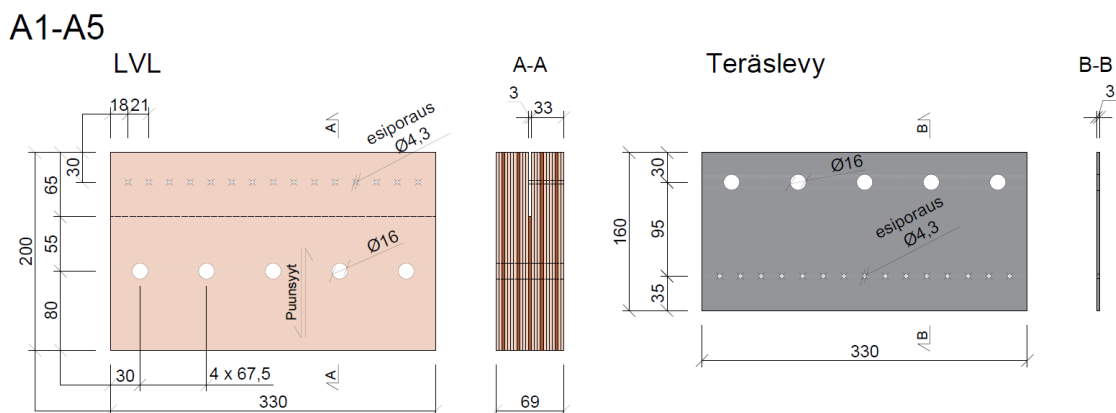
Seuraavaksi esitellään liitoskokeiden tulokset sarjoittain. Tulokset on jaettu neljään osaan (A, B, C ja F) niiden tarkempaa analysointia varten. Kuormitus–siirtymä -kaavioissa on jokaisen koekappaleen vasemman ja oikean mittakellon tulosten keskiarvot. Kunkin sarjan koekappaleiden tulokset on esitetty yhdessä kuormitus–siirtymä -kaaviossa tulosten tulkinnan helpottamiseksi. Liitteessä 2 on tarkemmat kuormitus–siirtymä -kaaviot, joissa on esitetty jokaisen koekappaleen molempien mittakellojen tulokset erikseen.

Tuloksia tulkittaessa on huomioitava liitosten maksimiavojen lisäksi kimmoinen alue. Eli alue jolloin kuormitus–siirtymä -kaaviossa käyrä pysyy suhteellisen suorana. Tällä alueella voidaan olettaa, ettei esimerkiksi suurempia pysyviä muodonmuutoksia vielä ole alkanut syntymään. Joissakin mitoitustapauksissa liitosten kapasiteetista voidaan hyödyntää vain tuo kimmoinen alueen kapasiteetti.



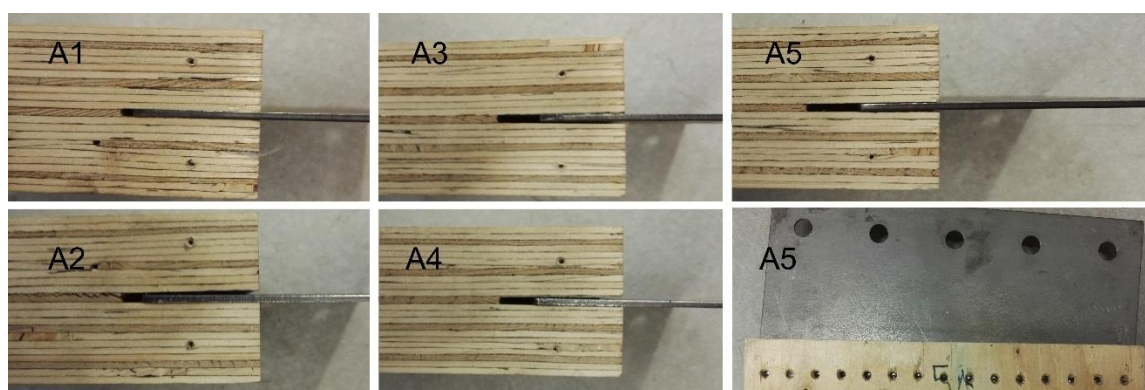
## A -koesarja

A -sarjassa (kuva 46) LVL -koekappaleiden puunsiyöt ovat valtaosassa viilukerroksista vedon suuntaan ja LVL:n ja teräslevyn välinen liitos on toteutettu 15 ruuvilla, jotka ovat yhdessä rivissä

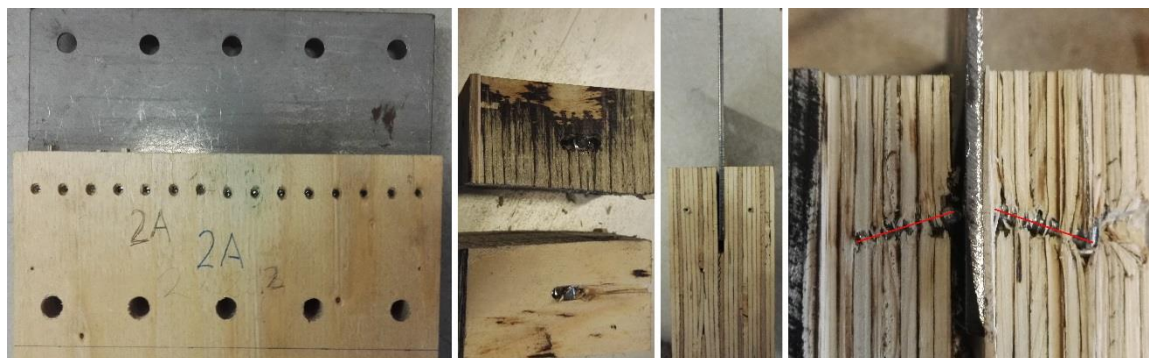


KUVA 46. A -sarjan koekappaleet (Miettinen 2018-01-31)

Kuvissa 47 ja 48 on esitetty sarjan A murtotapahtuma. Sarjan kaikki koekappaleet murtuivat samantyyllisesti. Liitoksen lopullinen murto tapahtui, kun ruuvit antoivat periksi ja katkesivat. Koska A -sarjan koekappaleissa puunsiyöt ovat valtaosaltaan kuorman suuntaisia, LVL -levy kesti rasitusta hyvin, ja ruuvit olivat liitoksen heikompi osa. Koekappaleissa oli ulkoapäin havaittavissa vain pieniä muodonmuutoksia koestuksen jälkeen. Teräslevyt olivat nousseet uristaan hieman ulospäin, mutta LVL:ien rakenne säilyi melko muuttumattomana. Koekappaleen leikkauksesta (kuva 48) näkyy, että myös puu on myödennyt, kun ruuvi on alkanut taipumaan ennen katkeamistaan.



KUVA 47. A -sarjan murtotapahtuman kuvaus (Kaipiainen 2017-11-06)

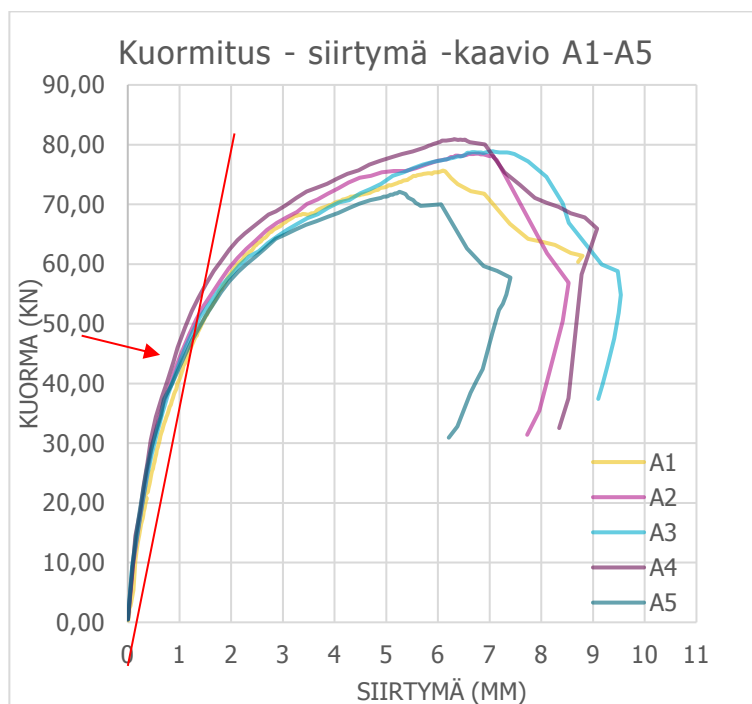


KUVA 48. Koekappaleen A2 murtotapahtuma, jossa näkyy katkenneet ruuvit (Miettinen 2017-11-06)

Taulukossa 5 on A -sarjan koetulokset. A -sarjan koekappaleiden kestävät maksimivoimat ennen lopullista murtoa vaihtelevat 72 kN ja 81 kN välillä. Tulosten hajonta on suhteellisen pientä, joten koetuloksia voidaan pitää luotettavina. Myös maksimikuorman aikaiset siirtymät kappaleiden vasemman ja oikean reunan välillä ovat melko lähellä toisiaan. Liitos antoi siis periksi todennäköisesti lähes kohtisuorassa linjassa rasitukseen nähden, ja ruuvit myötäsivät useammassa kohdassa yhtä aikaa.

TAUKUKKO 5. Koekappaleiden A1–A5 maksimivoima sekä sen aikainen siirtymä ja koeaika (Miettinen 2017-01-12)

	Voima F (kN)	Siirtymä s (mm) vasemman ja oikean mittakellon keskiarvo	Siirtymä (mm) vasen mit- takello	Siirtymä (mm) oikea mit- takello	Koeaika t (s)
<b>A1</b>	75,66	6,10	6,81	5,39	216
<b>A2</b>	78,49	6,78	7,50	6,07	208
<b>A3</b>	78,89	7,06	7,48	6,64	221
<b>A4</b>	80,92	6,32	5,98	6,65	204
<b>A5</b>	72,10	5,25	5,91	4,59	178
<b>Keskiarvo</b>	77,21	6,30	6,74	5,87	205



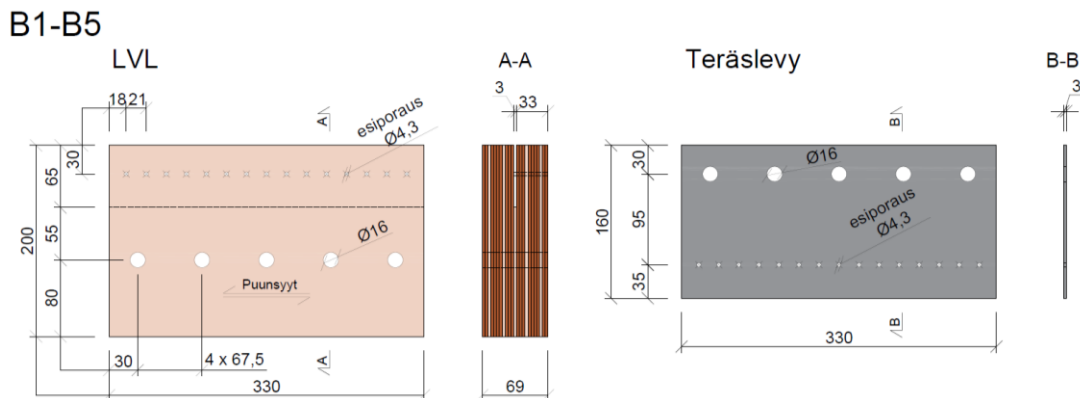
KUVIO 1. Koekappaleiden A1–A5 kuormitus–siirtymä -kaavio, jossa pystyakselilla on vetorasitus (kN) ja vaaka-akselilla siirtymä mittakellojen tulosten keskiarvona. (Miettinen 2017-01-05)

A -sarjan kuormitus–siirtymä -kaaviosta voidaan päätellä koekappaleiden kapasiteettia (kuvio 1). Kuormituksen ja siirtymän suhteesta voidaan nähdä, että A -sarjan koekappaleet ovat saavuttaneet kimmoisen alueen rajan noin 45 kN kohdalla, kun siirtymien keskiarvo on ollut noin 1,0...1,2 mm. Tämän jälkeen koekappaleiden kuvaajat alkavat taipumaan enemmän, eli alkaa tapahtumaan pysyviä muodonmuutoksia.



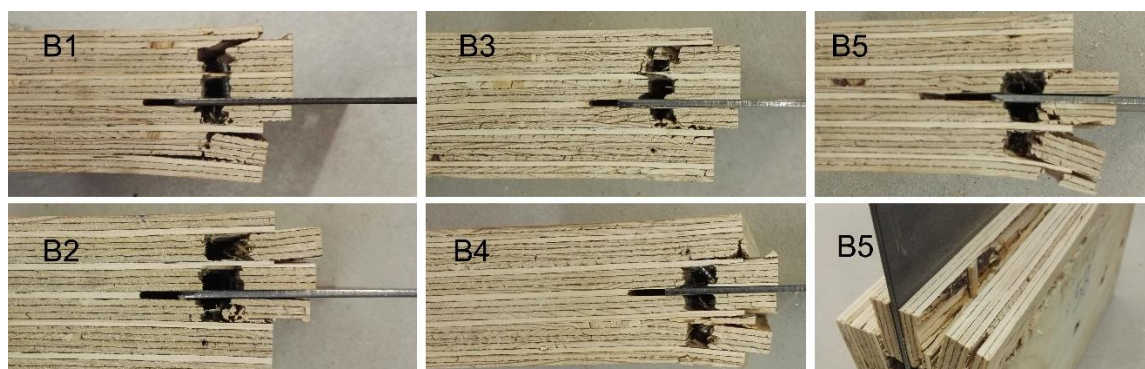
## B -koesarja

B -sarjassa (kuva 49) LVL -koekappaleiden puunssyyt ovat vedon suuntaan kohtisuorassa valtaosassa viilukerroksista ja LVL :n ja teräslevyn välinen liitos on toteutettu 15 ruuvilla, jotka ovat yhdessä rivissä.



KUVA 49. B -sarjan koekappaleet (Miettinen 2018-01-31)

Kuvissa 50 ja 51 on esitetty sarjan B murtotapahtuma. Sarjan kaikki koekappaleet murtuivat samantyyllisesti, ja liitoksen lopullinen murto tapahtui, kun LVL -levyn vaakasuunnassa olleet viilut antoivat periksi. Kyseessä on siis puusta murtuminen, koska liitoksen ruuvit säilyivät katkeamattomina. Koska B -sarjan koekappaleissa viilujen puunssyyt ovat valtaosaltaan kuorman suuntaan nähden kohtisuorassa, ne ovat liitoksen heikoin osa. LVL -levy ei kestänyt rasitusta niin hyvin, kuin esimerkiksi sarjan A koekappaleet. Koekappaleissa on ulkoapäin havaittavissa suuria muodonmuutoksia ja repeämiä. Teräslevyt ovat nousseet uristaan ulos huomattavasti, kun vaakasuuntaiset viilut ovat antaneet periksi.



KUVA 50. B -sarjan murtotapahtuman kuvaus (Kaipiainen, Miettinen 2017-11-06)

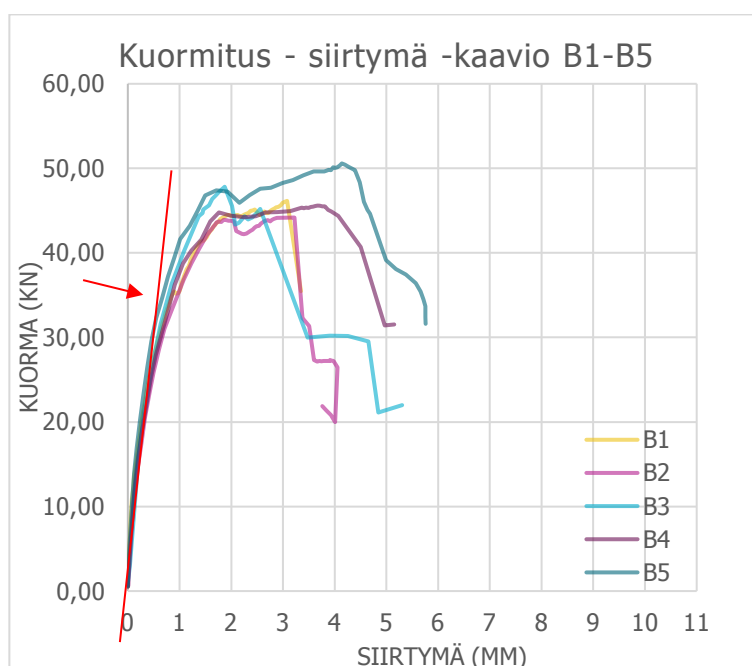


KUVA 51. Koekappaleen B2 murtotapahtuman kuvaus, jossa näkyy puusta murto. Ruuvit ovat kuorman vaikutuksesta taipuneet. (Miettinen 2017-11-06.)

Taulukossa 6 on B -sarjan koetulokset. B -sarjan koekappaleiden kestävät maksimivoimat ennen lopullista murtoa vaihtelivat 44 kN ja 50,6 kN välillä. Tulosten hajonta on suhteellisen pientä, joten koetuloksia voidaan pitää jälleen luotettavina. Maksimikuorman aikaiset siirtymät kappaleiden vasemman ja oikean reunan välillä vaihtelevat hieman, ja siirtymistä voidaan päätellä, että koekappaleiden viilut ovat yleensä B -sarjassa antaneet periksi aina ensin toisesta reunasta.

TAULUKKO 6. Koekappaleiden B1–B5 maksimivoima ja maksimivoiman aikainen siirtymä sekä koeaika (Miettinen 2017-01-12)

	Voima F (kN)	Siirtymä s (mm) vasemman ja oikean mittakellon keskiarvo	Siirtymä (mm) vasen mit- takello	Siirtymä (mm) oikea mit- takello	Koeaika t (s)
<b>B1</b>	46,15	3,08	2,82	3,34	119
<b>B2</b>	44,18	3,22	2,91	3,53	113
<b>B3</b>	47,82	1,87	1,40	2,35	47
<b>B4</b>	45,59	3,67	4,18	3,15	123
<b>B5</b>	50,58	4,14	5,08	3,20	148
<b>Keskiarvo</b>	46,86	3,20	3,28	3,11	110



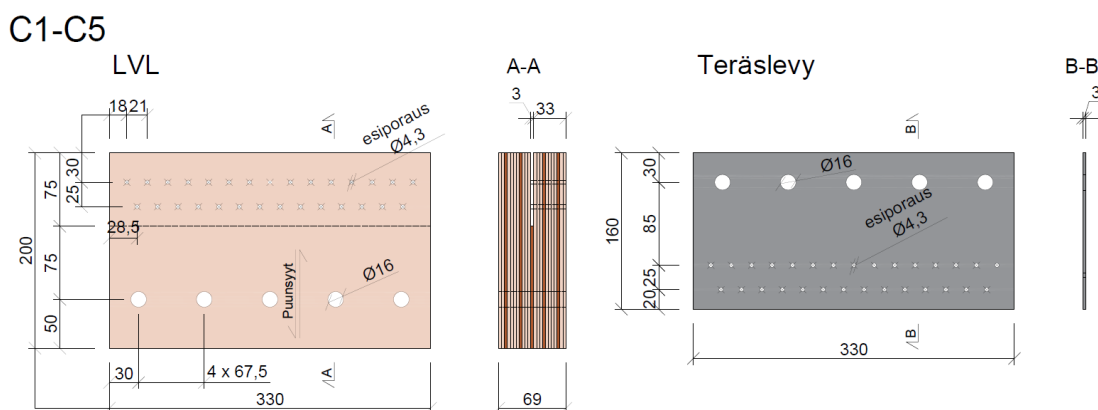
KUVIO 2. Koekappaleiden B1–B5 kuormitus–siirtymä -kaavio, jossa pystyakselilla on vetorasitus (kN) ja vaaka-akselilla siirtymä mittakellojen tulosten keskiarvona. (Miettinen 2017-01-05.)

B -sarjan kuormitus–siirtymä -kaaviosta voidaan arvioida koekappaleiden kapasiteettia (kuvio 2). Kuvaajista voidaan päätellä, että B -sarjan koekappaleet ovat saavuttaneet kimmoisen alueen rajan noin 35 kN kohdalla, kun siirtymien keskiarvo on ollut noin 0,5...0,7 mm. Tämän jälkeen koekappaleiden käyrät alkavat taipumaan enemmän, eli alkaa tapahtua pysyviä muodonmuutoksia. Koekappaleiden kestävyyksissä alkaa muutenkin näkyä suurempia eroavaisuuksia 40 kN jälkeen. Tähän on voinut vaikuttaa se, että koekappaleet ovat murtuneet puusta eivätkä ruuveista, kuten esimerkiksi sarjassa A.

## C -koesarja

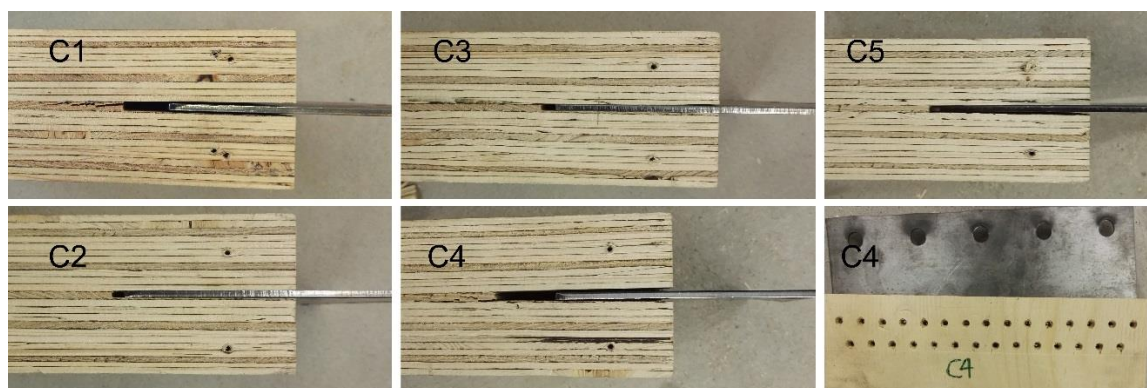
C -sarjassa (kuva 52) LVL -koekappaleiden puunssyyt ovat vedon suuntaan valtaosassa viilukerrokista ja LVL :n ja teräslevyn välinen liitos on toteutettu 29 ruuvilla, jotka ovat kahdessa rivissä.

C2 koekappaleen tulokset eivät tallentuneet videotallenteelle, joten sen mittakellojen siirtymät puuttuvat taulukosta ja kaavioista. Kuormituksen arvot olivat C -sarjan liitoksilla niin suuria, että LVL:n ja kuormituskoneen välinen pulttiliitos antoi periksi ennen ruuviliitosta koekappaleissa C2 ja C3. C4 ja C5 koekappaleet päätettiin kiinnittää kuormituskoneeseen pulttien lisäksi momentti/kitkaliitoksella, jossa pultit kiristettiin 90Nm tiukkuuteen.

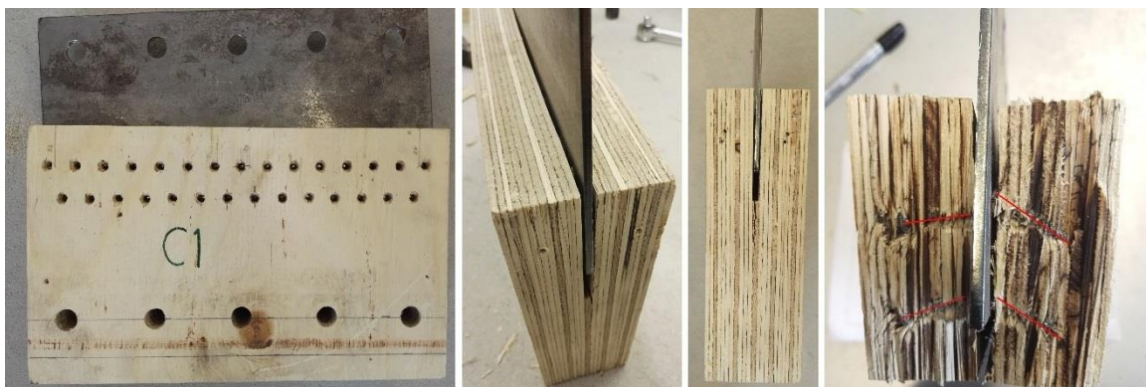


KUVA 52. C -sarjan koekappaleet (Miettinen 2018-01-31)

Kuvissa 53 ja 54 on esitetty sarjan C murtotapahtuma. Sarjan kaikki koekappaleet murtuivat samantyyllisesti ja liitoksen lopullinen murto tapahtui, kun ruuvit antoivat periksi ja katkesivat. Koska C -sarjan koekappaleissa puunssyyt ovat valtaosaltaan kuorman suuntaisia LVL -levy kesti rasitusta hyvin, ja ruuvit olivat jälleen liitoksen heikompi osa. Koekappaleissa on ulkoapäin havaittavissa vain pieniä muodonmuutoksia koestuksen jälkeen. Teräslevyt ovat nousseet uristaan hieman ulos, mutta LVL: ien rakenne on säilynyt muuten melko muuttumattomana. C -sarjan koestuksessa liitokseen kohdistui niin suuret voimat, että myös liitoksen teräslevy alkoi myötäämään pulttikiinnitysten kohdalta. Tämä ei kuitenkaan vaikuta koetuloksiin, koska siirtymien arvot luettiin LVL -levyihin kiinnitetyistä mittakelloista. Koekappaleen leikkauksesta (kuva 54) voidaan havaita, että ruuvit ovat katkenneet rasituksen voimasta.



KUVA 53. C -sarjan murtotapahtuman kuvaus (Miettinen 2017-11-06)

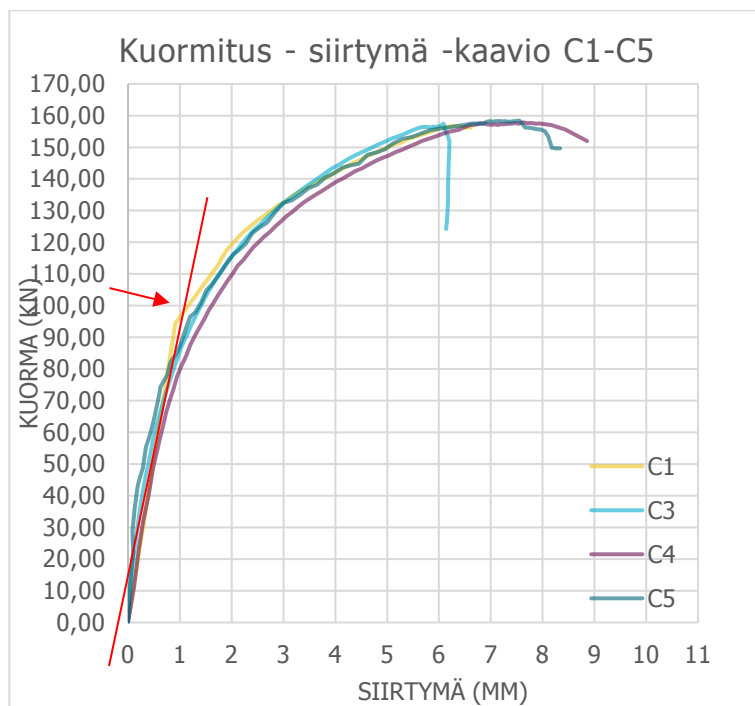


KUVA 54. Koekappaleen C1 murtotapahtuman kuvaus, jossa näkyy katkenneet ruuvit (Miettinen 2017-11-06)

Taulukossa 7 on C -sarjan koetulokset. C -sarjan koekappaleiden kestänyt maksimivoimat ennen lopullista murtoa vaihtelivat 152 kN ja 159 kN välillä. Tulosten hajonta oli erittäin pientä, joten koetuloksia voidaan pitää luotettavina. Maksimikuorman aikaiset siirtymät kappaleiden vasemman ja oikean reunan välillä ovat melko lähellä toisiaan, eli liitos antoi periksi todennäköisesti kohtisuorassa linjassa rasitukseen nähden, ja ruuvit antoivat periksi useammassa kohdassa yhtä aikaa. C -sarjan tulokset ovat aiempiin sarjoihin verrattuna tasaisempia. Koska liitoksessa on kaksi ruuviriviä yhden sijaan, yhden ruuvin antaessa periksi, viereinen alkaa toimia täydellä kapasiteetilla ja jatkaa kuormien siirtämistä tasaisemmin. C -sarjan tuloksissa on kaikkein vähiten hajontaa, vaikka se kesti suurimman rasituksen.

TAULUKKO 7. Koekappaleiden C1–C5 maksimivoima, maksimivoiman aikainen siirtymä ja koeaika (Miettinen 2017-01-12)

	Voima F (kN)	Siirtymä s (mm) vasemman ja oikean mittakellon keskiarvo	Siirtymä (mm) vasen mit- takello	Siirtymä (mm) oikea mit- takello	Koeaika t (s)
<b>C1</b>	156,72	6,29	5,41	7,17	178
<b>C2</b>	151,95	-	-	-	290
<b>C3</b>	157,44	6,08	5,59	6,58	297
<b>C4</b>	157,85	7,63	7,60	7,66	338
<b>C5</b>	158,42	7,55	8,11	6,98	299
<b>Keskiarvo</b>	156,48	6,89	6,68	7,10	280

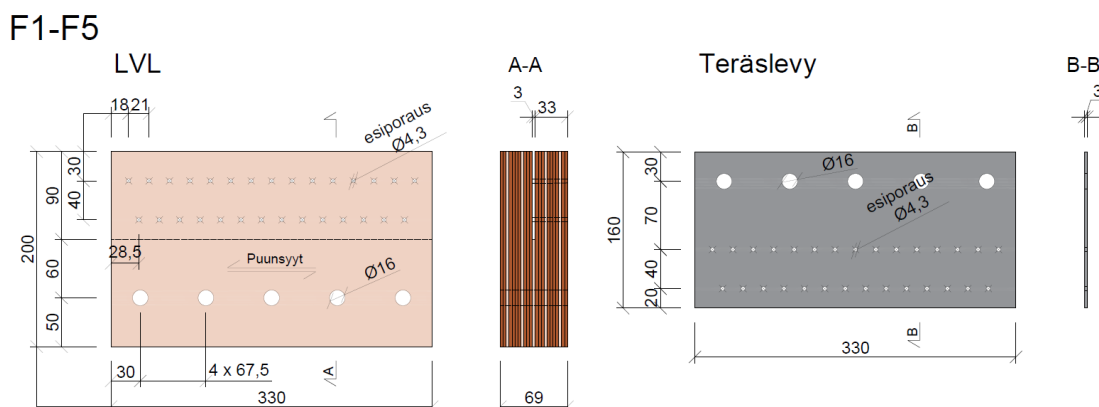


KUVIO 3. Koekappaleiden C1–C5 kuormitus–siirtymä -kaavio, jossa pystyakselilla on vetorasitus (kN) ja vaaka-akselilla siirtymä mittakellojen tulosten keskiarvona. (Miettinen 2017-01-05.)

C -sarjan kuormitus–siirtymä -kaaviosta voidaan tulkita koekappaleiden kapasiteettia (kuvio 3). Kuormituksen ja siirtymän suhteesta voidaan päätellä, että C -sarjan koekappaleet ovat saavuttaneet kimmoisen alueen rajan noin 100 kN kohdalla, kun siirtymien keskiarvo on ollut noin 1,0–1,5 mm. Tämän jälkeen koekappaleiden käyrät alkavat taipumaan enemmän, eli alkaa tapahtua pysyviä muodonmuutoksia. C -sarjan käyristä on suhteellisen vaikea löytää kimmoisen alueen rajaa, koska sen käyrät kaareutuvat melko tasaisesti ennen lopullista murtotapahtumaa. LVL -levyn kuorman suuntaiset viilut myötäävät suhteellisen tasaisesti ja liitoksessa on paljon ruuveja, jotka jakavat kuormaa tasaisemmin.

### F -koesarja

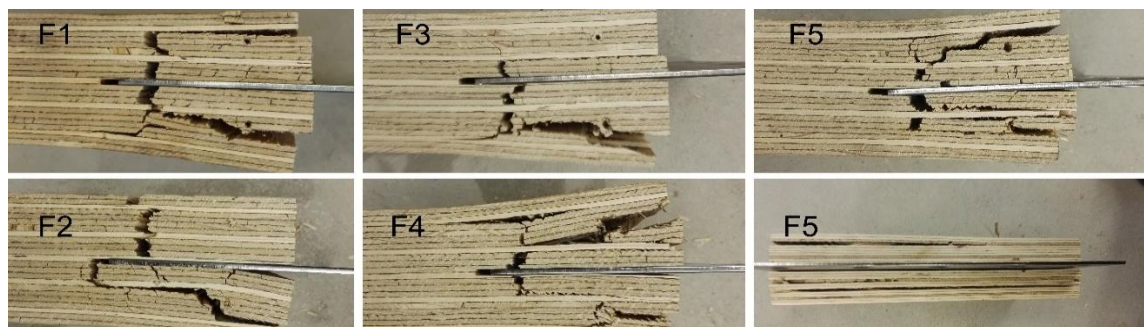
F -sarjassa (kuva 55) LVL -koekappaleen puunsiyyt ovat vedon suuntaan kohtisuorassa valtaosassa viilukerroksista ja LVL:n ja teräslevyn välinen liitos on toteutettu 29 ruuvilla, jotka ovat kahdessa rivissä.



KUVA 55. F -sarjan koekappaleet (Miettinen 2018-01-31)



Kuvissa 56 ja 57 on esitetty sarjan F murtotapahtuma. Sarjan kaikki koekappaleet murtuivat samantyyllisesti, ja liitoksen lopullinen murto tapahtui, kun LVL -levyn vaakasuunnassa olleet viilut antoivat periksi. Kyseessä on puusta murtuminen. Kuormituksen johdosta liitoksen ruuvit antoivat periksi ja taipuvat, mutta kestivät niihin kohdistetun rasituksen kuitenkin katkeamatta, koska LVL murtui ennen ruuvien kapasiteetin täyttymistä. Koska F -sarjan koekappaleissa puunsiyöt ovat valtaosaltaan kuorman suuntaan nähden kohtisuorassa, ne ovat liitoksen heikoin osa. Koekappaleissa oli ulkoapäin havaittavissa suuria muodonmuutoksia ja repeämiä koestuksen jälkeen. Teräslevyt ovat nousseet uristaan ulos, kun vaakasuuntaiset viilut ovat antaneet periksi.



KUVA 56. F -sarjan murtotapahtuman kuvaus (Miettinen 2014-11-06)

Koekappaleen leikkauksesta (kuva 57) voidaan havaita, että koekappaleiden yläreunassa LVL:n rakenne on murtunut lähes kokonaan ruuvien kohdilta. Pystysuuntaiset lamellit ovat myös osittain säilyneet paremmin, mutta voidaan olettaa, että ne ovat kuitenkin paikallisesti repeytyneet ruuvien kohdilta.

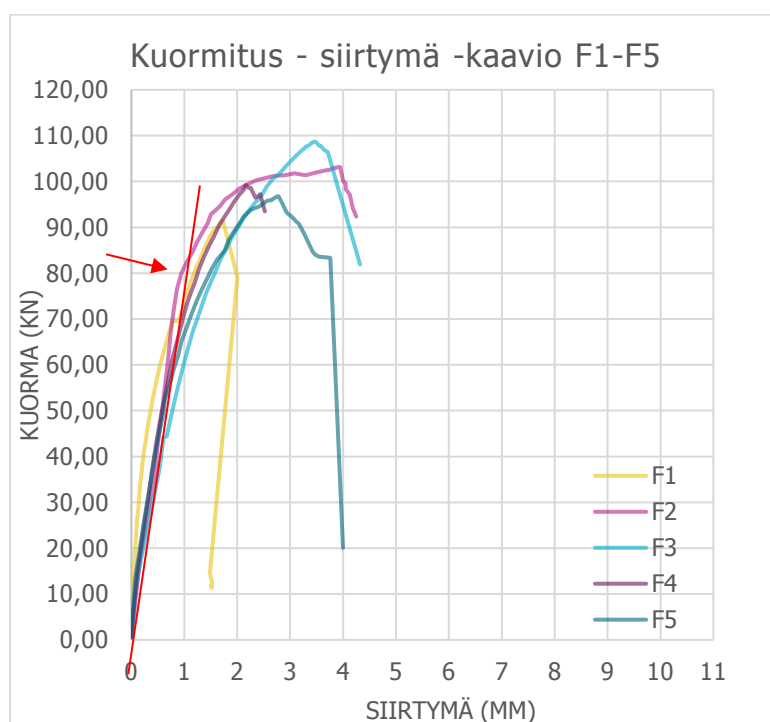


KUVA 57. Koekappaleen F2 murtotapahtuman kuvaus, jossa näkyy puusta murto. Ruuvit ovat kuorman vaikutuksesta taipuneet. (Miettinen 2017-11-06.)

Taulukossa 8 on F -sarjan koetulokset. F -sarjan koekappaleiden kestänyt maksimivoimat ennen lopullista murtoa vaihtelivat 91 kN ja 109 kN välillä. Tulosten hajonta oli suhteellisen pientä, mutta kuitenkin suurempaa kuin muissa sarjoissa. Koetuloksia voidaan kuitenkin pitää melko luotettavina, koska suuria poikkeamia ei esiinny. Maksimikuorman aikaiset siirtymät kappaleiden vasemman ja oikean reunan välillä vaihtelevat hieman osassa koekappaleista, joten niissä lopullinen murto on tapahtunut ensin toisesta reunasta. Osassa koekappaleista siirtymät taas ovat hyvin lähellä toisiaan maksimikuorman aikana. Nämä eroavaisuudet näyttävät aiheuttaneen koetulosten maksimiarvoihin hieman muita sarjoja suurempaa vaihtelua ennen lopullista murtoa.

TAULUKKO 8. Koekappaleiden F1–F5 maksimivoima ja maksimivoiman aikainen siirtymä sekä koeaika (Miettinen 2017-01-12)

	Voima F (kN)	Siirtymä s (mm)	Siirtymä (mm)	Siirtymä (mm)	Koeaika t (s)
		vasemman ja oikean mittakellon keskiarvo	vasen mittakello	oikea mittakello	
<b>F1</b>	91,45	1,72	0,90	2,54	253
<b>F2</b>	103,15	3,95	3,95	3,95	182
<b>F3</b>	108,71	3,46	3,77	3,14	203
<b>F4</b>	99,23	2,16	2,56	1,77	160
<b>F5</b>	96,79	2,78	2,99	2,57	171
<b>Keskiarvo</b>	99,87	2,81	2,83	2,79	194



KUVIO 4. Koekappaleiden F1–F5 kuormitus-siirtymä -kaavio, jossa pystyakselilla on vetorasitus (kN) ja vaaka-akselilla siirtymä mittakellojen tulosten keskiarvoina. (Miettinen 2017-01-05.)

F -sarjan kuormitus-siirtymä -kaaviosta voidaan havainnoida koekappaleiden kapasiteettia (kuvio 4). F -sarjan koekappaleet ovat saavuttaneet kimmoisen alueen rajan noin 80 kN:in kohdalla, kun siirtymien keskiarvo on ollut noin 1,5...2,0 mm. Tämän jälkeen koekappaleiden käyrät alkavat taipumaan enemmän, eli liitoksissa alkaa tapahtua pysyviä muodonmuutoksia. F -sarjassa koetulokset ovat vaihdelleet muita enemmän jo pienemmissä rasituksissa.

#### Yhteenveto liitoskoekokeiden tuloksista

Koetulokset antoivat jossakin määrin ennako-odotusten mukaisia tuloksia, koska koekappaleet, joissa valtaosa viiluista oli kuormituksen suunnassa, kestivät paremmin ja myös ruuvimäärällä oli suurivaikutus liitoksen kestävyteen. C -sarjan liitokset kestivät odotettua suurempia kuormituksia, koska liitoksen toisen reunan pulttikiinnitys antoi periksi ennen ruuviliitosta kahden koekappaleen

kohdalla. Koetulosten hajonnassa sarjat A ja C olivat tasaisempia kuin B ja F -sarjat, koska niissä murto tapahtui ruuveista. Murron tapahtuessa puusta tuloksissa on enemmän vaihtelua, koska puu on epähomogeenisempi materiaali kuin teräs, vaikka kyseessä onkin tasalaatuinen LVL.

Sarjojen koetukoksissa voidaan huomata hajontaa myös suhteessa ruuvimääriin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että kun ruuvirivejä on yksi, liitosten ensimmäisten ruuvien ja ruuvien ympärillä olevan puun myötäämisen jälkeen sillä on vähemmän kapasiteettia, jolla alkaa ottamaan vastaan rasituksia. Kun kyseessä on kahden ruuvirivin liitos, tulokset ovat tasaisempia, koska hajonneen ruuvin tilalla alkaa sen viereiset ruuvit toimia täydellä kapasiteetilla tehokkaammin.

### 6.1.3 Koetulosten vertaaminen laskennalliseen kapasiteettiin

Kun verrataan liitoksen laskennallista kapasiteettia (otsikko 5.4.4) liitoskokeiden tuloksiin, voidaan huomata, että tulokset mukailevat toisiaan melko hyvin, ja että kolmessa sarjassa neljästä laskennalliset arvot ovat pienemmät kuin koetulosten maksimiarvot, eli laskennalliset tulokset ovat varmalla puolella. Koesarjassa B laskennallinen kapasiteetti on hieman suurempi kuin koetulosten maksimiarvot. Tämä voi johtua, esimerkiksi koesarjojen pienuudesta tai siitä, että B koesarjassa oli tuloksissa huomattavasti enemmän hajontaa muihin sarjoihin verrattuna, koska siinä murto tapahtui puusta (viiluista, joissa syyt olivat kuormitukseen nähden kohtisuorassa) ja siinä on vain yksi rivi ruuveja jakamassa kuormitusta.

Muuten tuloksista voidaan huomata, että valtaosan viilujen puunsiyistä ollessa kuormituksen suunnassa (A ja C -sarjat), laskennallisen ja liitoskokeiden tulosten ero oli suurempi ja laskennallinen kapasiteetti oli reilusti vähemmän kuin koetulosten maksimiarvot. Sarjassa F murto tapahtui kuormaan nähden kohtisuorista viiluista, ja siinä eroa tulosten välillä on vain noin 7 kN varmalle puolelle.

Tuloksista voidaan todeta, että laskennallisella tavalla päästään melko tarkkoihin tuloksiin, ja yleisesti ne ovat varmalla puolella tai lähellä koetulosten arvoja. Koetulokset antavat aihetta jatkotutkimuksiin tapauksissa, jolloin kuormitus on syysuuntaa vastaan erityisesti silloin, kun kyseessä on yksi ruuvirivi.

TAULUKKO 9. Liitoskokeiden maksimiarvojen ja liitoslaskelman suhde antaa liitoksen "kokonaisvarmuuden murtorajatilassa". (Miettinen 2018-04-15)

	<b>Liitoskokeiden maksimiarvo</b>	<b>Laskennallinen kapasiteetti</b>	<b>Liitoskokeet/ laskennallinen kapasiteetti (%)</b>
<b>Sarja A</b>	77,2 kN	54,7 kN	141,2 %
<b>Sarja B</b>	46,9 kN	48,0 kN	97,7 %
<b>Sarja C</b>	156,5 kN	105,7 kN	148,0 %
<b>Sarja F</b>	99,9 kN	92,8 kN	107,6 %

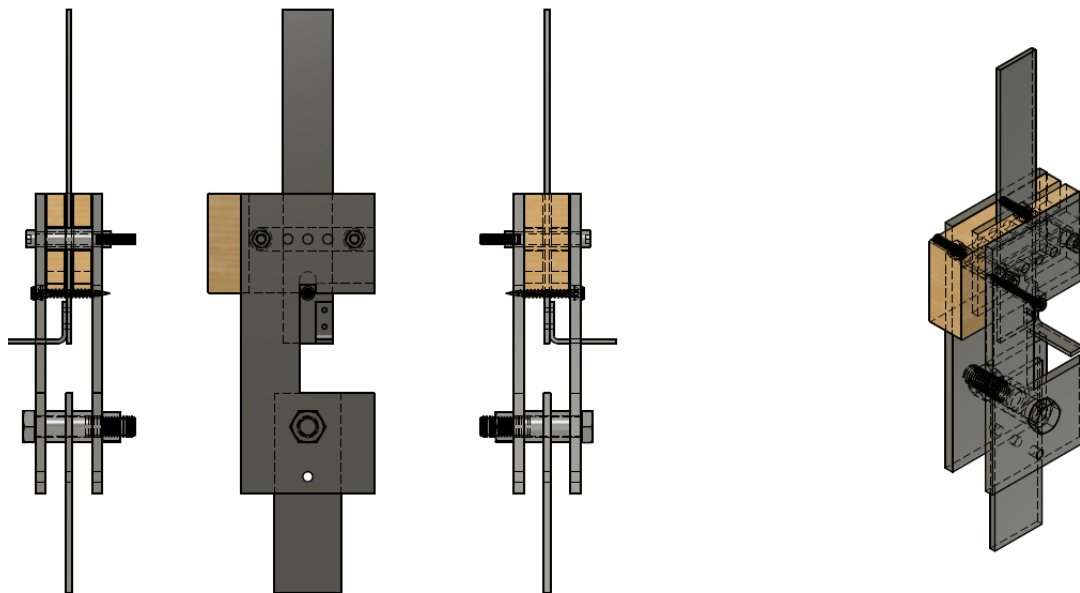


## 6.2 Ruuvien myötömomentti

Myötömomenttikokeissa testattiin LVL:n ja teräslevyn ruuviliitoksen koestuksessa käytettyjä 5.0 x 45 mm sähkösinkittyjä ankkuriruuveja. Koestuksella haluttiin selvittää ruuvien todellinen myötömomentin raja, jotta sitä voitiin verrata laskennallisiin tuloksiin ja koetuloksiin. Ankkuriruuveja testattiin 20 kappaletta. Ruuvien myötömomentti kokeet tehtiin kahdessa osassa, koska ensimmäisten kokeiden jälkeen kävi ilmi, että kokeessa oli käytetty liian paksua levyä ruuvien puoliväliin kohdistettavan rasi- tuksen kohdalla. Tästä syystä otsikon 6.2 asiat on koottu kahdelta koestuskerralta. Valokuvat ovat ensimmäiseltä koestuksesta ja koetulokset ovat toiselta kerralta. Molemmilla kerroilla kokeet tehtiin muuten samalla tavalla, mutta toisella koestuskerralla testilaitteen keskimäinen teräslevy vaihdettiin ohuempaan, ja ruuveja vedettiin pidemmälle, eli suurempiin taipumiin.

### 6.2.1 Koestus

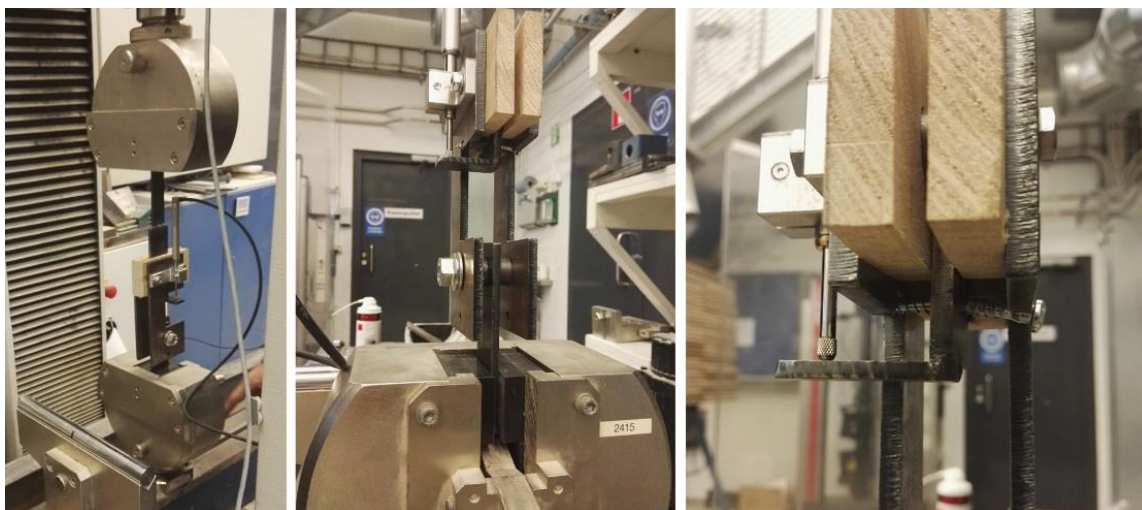
Ruuvien koestus toteutettiin 5.2.2018 ja 16.3.2018 Savonia-ammattikorkeakoulun Puulaboratoriossa Juha Lehtikannon ohjauksessa. Jani Kaipainen osallistui molempiin koestuksiin ja Sini Miettinen ensimmäiseen koestukseen. Käytössä oli kuormituskone TIRAtest 100kN, jonka minimitarkeus on 1 kN. Kokeessa tarvittavan testilaitteen (kuva 58) on suunnitellut ja teettänyt Per-Anders Daerga. Daerga vastasi myös koejärjestelyn suunnittelusta. Testilaitte viimeisteltiin Savonian tiloissa. Kokeessa testilaitteeseen asetetun ruuvien puoliväliin kohdistettiin vetorasitusta, ja kokeen tuloksena saatiin ruuvien kestävyyksille siirtymä- ja kuormitusarvot.



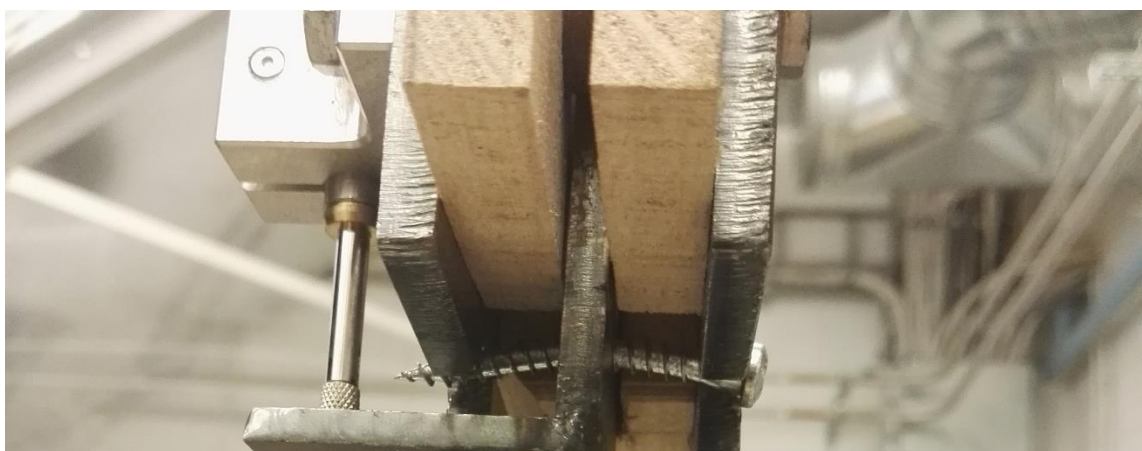
KUVA 58. Havainnekuva ruuvien myötömomentin määrittämiseksi käytetystä testilaitteesta (Daerga 2018-01-16)

### 6.2.2 Koetulokset ja niiden analysointi

Koetulokset ovat siis toiselta koestuskerralta, jolloin testattiin yhteensä 20 ruuvia. 10 ruuvia testattiin niin, että ruuvien kierteen alkupiste asetettiin ylöspäin ja 10 kappaletta testattiin niin että kierteen alkupiste asetettiin alaspäin. Tässä haluttiin selvittää ruuvien kierteiden alkupisteen kohdan vaikutusta niiden kestävyyskykyyn.



KUVA 59. Ruuvien todellisen myötömomentin 1. koestuskerta (Miettinen 2018-02-05)



KUVA 60. Ruuvi taipuneessa tilassa kokeen lopussa, 1. koestuskerta (Miettinen 2018-02-05)

Kuvissa 59 ja 60 on kuvia 1. koestustilanteesta ja ruuveista taipuneessa tilassa koestuksen jälkeen. Kuvat ovat havainnollistamassa koestustilannetta, vaikka 1. koestuskerran tuloksia ei voidakaan hyödyntää. Taulukoissa 10 ja 11 on koetulokset 2. koestuskerralta. Taulukoissa on maksimivoimat, jotka ruuvit kestivät sekä maksimivoimien aikaiset siirtymät.

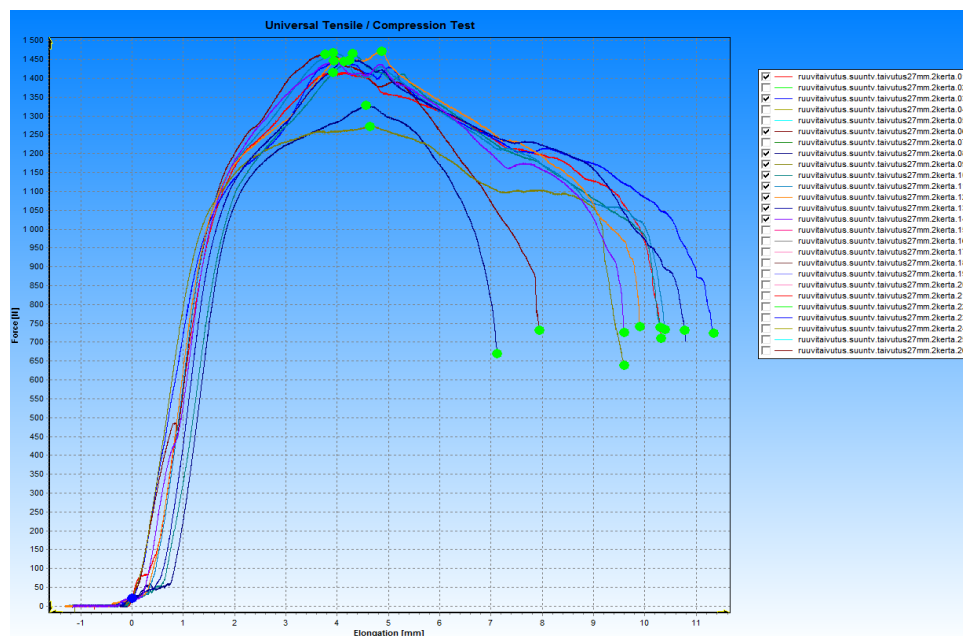
TAULUKKO 10. Koekappaleet 1–11. Ruuvien maksimivoimat ja maksimivoiman aikaiset siirtymät. Ruuvien kierteen alkupiste ylöspäin. (Kaipiainen 2018-03-16.)

	Maksimivoima (N)	Siirtymä (mm)
Ruuvi 1	1416,3	3,92
Ruuvi 3	1444,8	4,13
Ruuvi 4	1265,0	4,44
Ruuvi 5	1291,3	5,54
Ruuvi 6	1463,4	3,76
Ruuvi 7	1295,7	5,33
Ruuvi 8	1328,6	4,56
Ruuvi 9	1272,7	4,64
Ruuvi 10	1465,6	4,30
Ruuvi 11	1467,8	3,91
Keskiarvo	1371,1	4,45

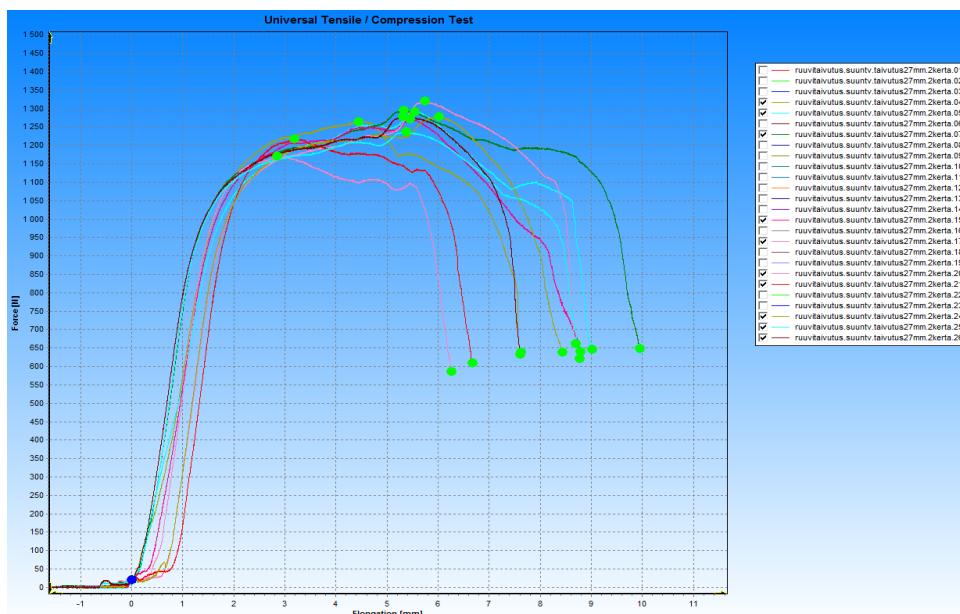
TAULUKKO 11. Koekappaleet 12–26. Ruuvien maksimivoimat ja maksimivoiman aikaiset siirtymät. Ruuvien kierteen alkupiste ylöspäin. (Kaipiainen 2018-03-16.)

	Maksimivoima (N)	Siirtymä (mm)
<b>Ruuvi 12</b>	1471,1	4,87
<b>Ruuvi 13</b>	1449,1	4,24
<b>Ruuvi 14</b>	1446,9	3,93
<b>Ruuvi 15</b>	1271,6	5,45
<b>Ruuvi 17</b>	1319,8	5,75
<b>Ruuvi 20</b>	1170,7	2,85
<b>Ruuvi 21</b>	1217,9	3,19
<b>Ruuvi 24</b>	1278,1	6,02
<b>Ruuvi 25</b>	1237,6	5,37
<b>Ruuvi 26</b>	1277,0	5,32
<b>Keskiarvo</b>	1314,0	4,70

Koetuloksissa oli erittäin vähän hajontaa ja koetulosten maksimivoimat vaihtelivat välillä 1170...1471 N (taulukko 10 ja 11). Keskiarvot maksimivoimille ovat ruuvien kierteen alkupisteen ollessa ylöspäin 1371 N ja kierteen alkupisteen ollessa alaspäin 1314 N. Koetulosten perusteella siis kierteen alkupisteen suunnalla ei näytä olevan suurta merkitystä, vaikka tulosten keskiarvo onkin hieman parempi kierteen alkupisteen sijaitessa ylöspäin. Maksimikuormien avulla voidaan laskea ruuvien todellinen myötömomentti. Kuvioissa 5 ja 6 on kuormituskoneen tuottamat kuormitus–siirtymä -kaaviot, joissa pystyakselilla on rasitus (N) ja vaaka-akselilla siirtymät (mm).



KUVIO 5. Koekappaleiden 1–11 (ruuvien kierteen alkupiste ylöspäin) kuormitus–siirtymä -kaaviot, jossa pystyakselilla on vetorasitus (N) ja vaaka-akselilla siirtymä. (Kaipiainen 2018-03-16.)



KUVIO 6. Koekappaleiden 12–26 (ruuvien kierteen alkupiste alaspäin) kuormitus–siirtymä -kaaviot, jossa pystyakselilla on vetorasitus (N) ja vaaka-akselilla siirtymä. (Kaipiainen 2018-03-16.)

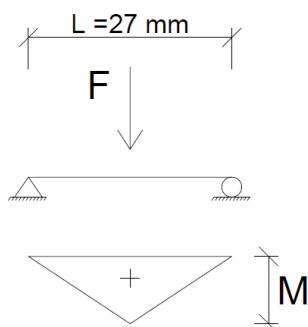
#### Ruuvien todellisen myötömomentin laskeminen

Myötömomentti lasketaan kaavalla 44, jossa  $F$  on maksimivoimien keskiarvo, jonka ruuvit kestävät ja  $L$  on ruuvin jänneväli tukipisteiden välissä. Kuvassa on 61 on rakennemalli myötömomentin laskemiselle. Tukipisteiden väli oli koetuksessa 27 mm ja pistekuorma  $F$  kohdistettiin tukipisteiden puoliväliin  $L/2$ .  $M_1$  tulos on koekappaleille 1–11 ja  $M_2$  tulos koekappaleille 12–26.

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad (44)$$

$$M_1 = 9255 \text{ Nmm}$$

$$M_2 = 8869 \text{ Nmm}$$



KUVA 61. Rakennemalli ruuvien myötömomentin laskemiselle (Miettinen 2018-02-10)

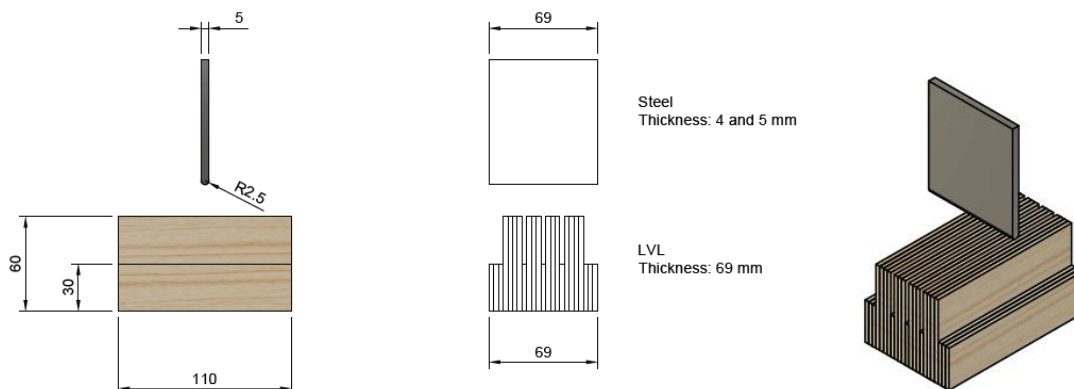
Koetulosten perusteella ruuvien todellinen myötömomentti on siis 8869...9255 Nmm. LVL:n ja teräslevyn välisen ruuviliitoksen mitoituslaskennassa (otsikko 5.4) käytetty ruuvien toimittajan antama arvo 6800 Nmm on siis selvästi varmallalla puolella, koska koetulosten arvot ovat sitä 30...36 % suuremmat.

### 6.3 LVL -levyn reunapuristuslujuus

LVL -levyn reunapuristuslujuuden koestuksissa testattiin todellista reunapuristuslujuutta liitoskoikeissa käytetylle Stora Enson tuottamalle X -laadun LVL -levylle. Koestuksella haluttiin selvittää LVL:ien todellinen reunapuristuslujuus, jotta sitä voidaan verrata laskennallisiin arvoihin ja liitoskoikeiden tuloksiin. Koestus tehtiin LVL -levylle kahdessa suunnassa, eli 10 testausta niin, että viilujen pääasiallinen syysuunta oli kuormaan nähden kohtisuorassa ja 10 testausta niin, että pääasiallinen sydensuunta oli kuormituksen suunnassa.

#### 6.3.1 Koestus

LVL -levyjen reunapuristuslujuuden koestus toteutettiin 5.2.2018 Savonia-ammattikorkeakoulun Puulaboratoriossa Juha Lehtikannon ohjauksessa. Käytössä oli kuormituskone TIRAtest 100kN, jonka minimitarkeus on 1 kN. Per-Anders Daerga on suunnitellut koejärjestelyn ja testikappaleiden ja painimien dimensiot (kuva 62).



Kuva 62. LVL -levyn todellisen reunapuristuslujuuden testauksen koejärjestely (Daerga 2018-01-16)

Valmistelimme koekappaleet yhteistyössä Jani Kaipiaisen ja Juha Lehtikannon kanssa Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa koestussuunnitelman mukaisesti. Koekappaleista poistettiin ristikkäin olleet viilukerrokset sekä ulommat viilut, jotta saatiin tulokset puhtaasti vaakasuuntaisille viiluille ja pystysuuntaisille viiluille käytettyjen ruuvien pituudelta. Reunapuristuslujuutta testattiin kahdella eri paksuisella painimella, 4 mm ja 5 mm. Paininlevyt kuvastivat liitoskoikeissa käytettyjä ruuveja. Koekappaleita tehtiin yhteensä 20 kappaletta.

Koekappaleet nimettiin seuraavalla tavalla:

- A1–A5: 4 mm painin, kuormitus puunsyiden suunnassa
- B1–B5: 5 mm painin, kuormitus puunsyiden suunnassa
- C1–C5: 4 mm painin, kuormitus puunsyihin nähden kohtisuorassa
- D1–D5: 5 mm painin, kuormitus puunsyihin nähden kohtisuorassa



## 6.3.2 Koetulokset ja niiden analysointi

Kuvissa 63, 64 ja 65 on kuvia koestustilanteesta ja LVL -levyistä koestusten jälkeen.



KUVA 63. Koejärjestely LVL -levyjen reunapuristuslujuuden määrittämiseksi (Miettinen 2018-02-5)



KUVA 64. Koekappaleet A3 ja B1 koestuksen jälkeen. Puunsiyät kuormituksen suunnassa (Miettinen 2018-02-05)



KUVA 65. Koekappale D2 koestuksen jälkeen, puunsiyät kohtisuorassa kuormitukseen (Miettinen 2018-02-05)

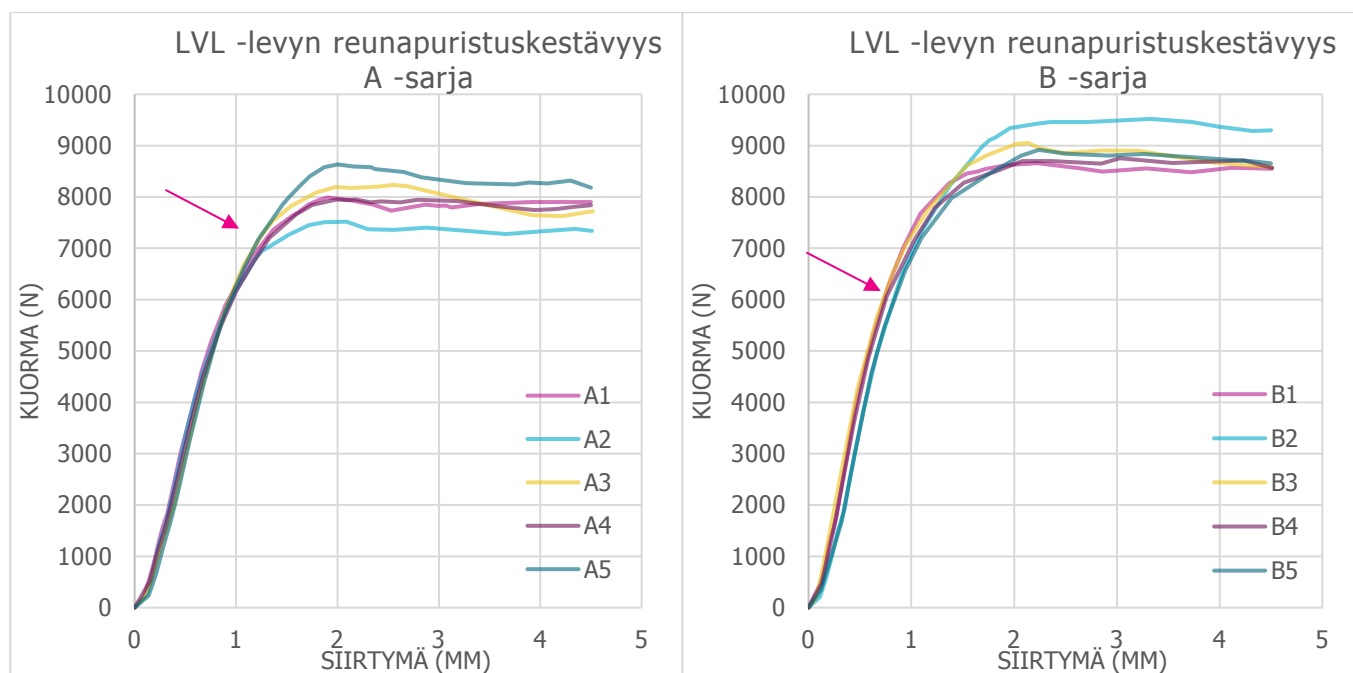
Koetuloksista tuotetuista kuormitus-siirtymä -kaavioista etsittiin LVL -levyjen "kimmoisen alueen" raja, eli maksimivoima suhteessa siirtymään ennen kuin kuvaajassa tapahtuu muutoksia, kuten kaa-reutumista, tai sen kulmakerroin muuttuu merkittävästi. Maksimivoimat kerättiin taulukkoon 12.

TAULUKKO 12. LVL -levyjen reunapuristuslujuuden koetulokset (Miettinen 2018-02-11)

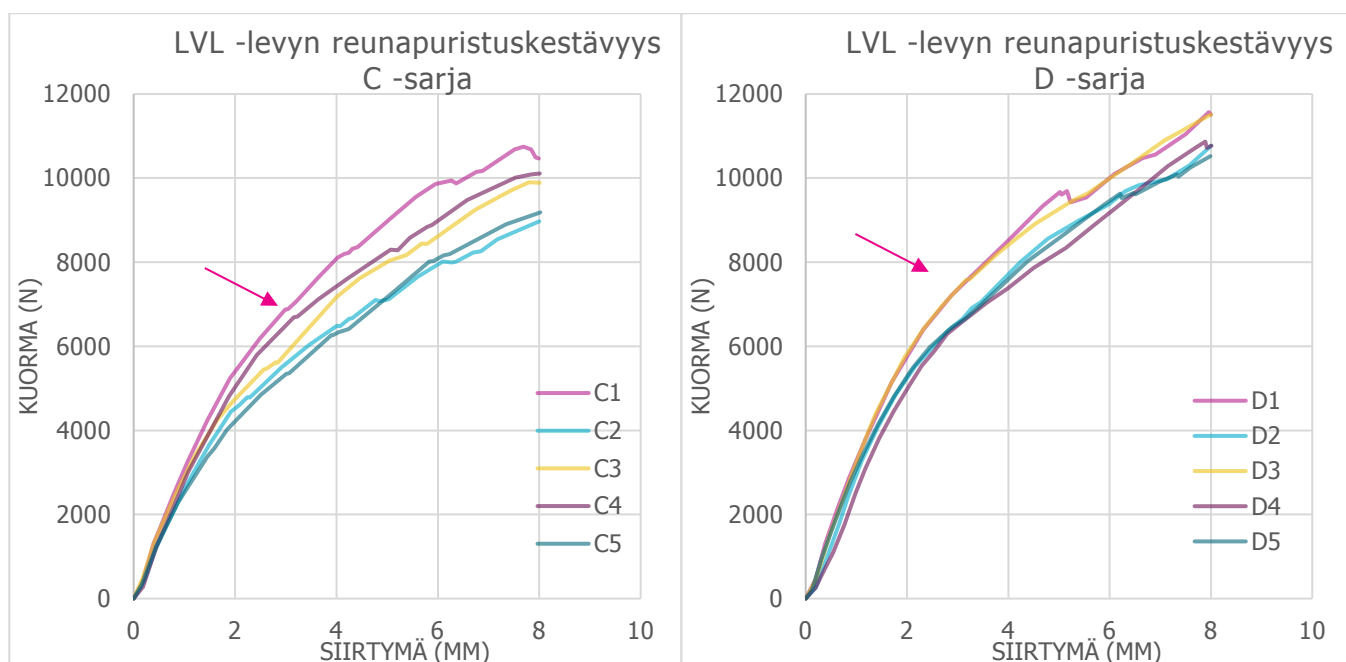
	Maksimivoima			Maksimivoima	
<b>A1</b>	7350	N	<b>C1</b>	5250	N
<b>A2</b>	7000	N	<b>C2</b>	6500	N
<b>A3</b>	7500	N	<b>C3</b>	5600	N
<b>A4</b>	7250	N	<b>C4</b>	6650	N
<b>A5</b>	7250	N	<b>C5</b>	6250	N
<b>Keskiarvo</b>	<b>7270</b>	<b>N</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>6050</b>	<b>N</b>

	Maksimivoima			Maksimivoima	
<b>B1</b>	8250	N	<b>D1</b>	6500	N
<b>B2</b>	8250	N	<b>D2</b>	7000	N
<b>B3</b>	8600	N	<b>D3</b>	7550	N
<b>B4</b>	8250	N	<b>D4</b>	7750	N
<b>B5</b>	8000	N	<b>D5</b>	6500	N
<b>Keskiarvo</b>	<b>8270</b>	<b>N</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>7060</b>	<b>N</b>

Koetulokset sarjoittain (keskiarvot) vaihtelivat hieman riippuen LVL -levyn viilujen puunsyiden suunnista ja painimien paksuudesta. A ja B -sarjoissa kuormitus kohdistui puunsyiden suunnassa ja oletusti tällöin LVL -levyt kestivät suuremman kuorman suhteessa painumaan. B -sarjassa painin oli 1 mm paksumpi, ja myös maksimi-arvot ovat hieman suuremmat. C ja D -sarjoissa kuormitus oli puunsyihin nähden kohtisuorassa, eli heikommassa suunnassa ja koestutulokset myös tukevat edellistä väittämää. Yleisesti tuloksista voidaan huomata, että eroavaisuudet sarjojen väleillä eivät ole suuria. Kuvioissa 7–10 on koetulokset kerättyinä sarjoittain kuormitus–siirtymä -kaavioihin.



KUVIOT 7 ja 8. Sarjan A ja B koetulokset kuormitus–siirtymä -kaavioissa sarjoittain (Miettinen ja Kai-piainen 2018-02-06)



KUVIOT 9 ja 10. Sarjan C ja D koetulokset kuormitus-siirtymä -kaavioissa sarjoittain (Miettinen ja Kaipiainen 2018-02-06)

#### LVL -levyjen todellisen reunapuristuslujuuden laskeminen

Lasketaan seuraavaksi koestusten perusteella LVL -levyjen todellinen reunapuristuslujuus. Laskennassa käytetään koetulosten maksimiarvojen keskiarvoja sarjoittain. Todellinen reunapuristuslujuus lasketaan kaavalla 45, missä F on voima (N) ja A on puristimen LVL:n reunaan vaikuttanut ala.

$$f_{h,k} = \frac{F}{A} \quad (45)$$

Reunapuristuslujuudet:

$$f_{h,k,A} = \frac{F_A}{A_{4mm \text{ painin}}} = \frac{7270 \text{ N}}{168 \text{ mm}^2} = 43,27 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Sarja A, 4 mm painin})$$

$$f_{h,k,B} = \frac{F_B}{A_{5mm \text{ painin}}} = \frac{8270 \text{ N}}{210 \text{ mm}^2} = 39,38 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Sarja B, 5 mm painin})$$

$$f_{h,k,C} = \frac{F_C}{A_{4mm \text{ painin}}} = \frac{6050 \text{ N}}{168 \text{ mm}^2} = 36,01 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Sarja C, 4 mm painin})$$

$$f_{h,k,D} = \frac{F_D}{A_{5mm \text{ painin}}} = \frac{7060 \text{ N}}{210 \text{ mm}^2} = 33,62 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Sarja D, 5 mm painin})$$

Laskennallinen kapasiteetti LVL -levyjen reunapuristuslujuuksille on laskettu kaavan 27 mukaan huomioiden LVL -levyjen viilujen pääasiallisen sydensuunnan ja painimien paksuuden.

Laskennallisesti 4 mm painimella syiden suuntaan reunapuristuslujuus on 35,52 N/mm<sup>2</sup> ja kohtisuoraan syihin 29,45 N/mm<sup>2</sup> sekä 5 mm painimella syiden suuntaan 35,15 N/mm<sup>2</sup> ja kohtisuoraan syihin 29,14 N/mm<sup>2</sup>. Tulokset on taulukoituna (taulukko 13) niiden vertailun helpottamiseksi.



TAULUKKO 13. LVL:n reunapuristuslujuudet koetulosten ja laskennallisten tulosten perusteella (Miettinen 2018-03-10)

	<b>Todellinen reunapuristus- lujuus</b>	<b>Laskennallinen reunapuristus- lujuus</b>	<b>Ero</b>	<b>%</b>
<b>A (4 mm painin, kuormitus syiden suunnassa)</b>	43,27 N/mm <sup>2</sup>	35,52 N/mm <sup>2</sup>	7,75 N/mm <sup>2</sup>	22 %
<b>B (5 mm painin, kuormitus syiden suunnassa)</b>	39,38 N/mm <sup>2</sup>	35,15 N/mm <sup>2</sup>	4,23 N/mm <sup>2</sup>	12 %
<b>C (4 mm painin, kuormitus kohtisuoraan syihin)</b>	36,01 N/mm <sup>2</sup>	29,45 N/mm <sup>2</sup>	6,56 N/mm <sup>2</sup>	22 %
<b>D (5 mm painin, kuormitus kohtisuoraan syihin)</b>	33,62 N/mm <sup>2</sup>	29,14 N/mm <sup>2</sup>	4,48 N/mm <sup>2</sup>	15 %

Laskennalliset tulokset ovat siis varmalla puolella verrattuna koetuloksiin. Koetulosten arvot ovat syiden suunnassa noin 22 % suuremmat ja kohtisuoraan syihin nähden noin 12–15 % suuremmat kuin laskemalla saadut kapasiteetit.

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyön aihe oli erittäin mielenkiintoinen ja ajankohtainen. Oli erittäin mielenkiintoista päästä osaksi uudenlaisen puuliitoksen kehitystyötä ja tehdä kokeita, joita mahdollisesti tulevaisuudessa hyödynnetään liitoksen jatkokehitystyössä. Koska työssä tutkittiin aluksi teorianpohjalta ja laskennallisesti liitoskokeiden liitosta ja myös mahdollisia kuormien määriä, oli erittäin havainnollista tulkita koetuloksia ja verrata niitä laskennallisiin arvoihin.

Liitoskokeet olivat mielenkiintoisia toteuttaa ja oppimisen kannalta oli hyvä päästä näkemään LVL -levyn käyttäytymistä kuormituksessa murtoon asti, ja päästä vertailemaan murtumistapoja viilujen eri puunsyiden suunnissa.

Liitostyyppissä on haasteensa työmaatekniseltä näkökulmalta ajateltuna, koska liitokseen tulee runsaasti ruuveja, jotka voi olla haasteellista kiinnittää huonossa työasennossa. Toisaalta liitoksella on hyvä palon- ja kosteudenkestävyys, koska teräslevy on suojattuna puun sisällä. Liitoksen toteutus on myös edullista, koska kaikki sen osat ovat saatavissa hyllytavarana. Insinööriopiskelija Jani Kaipainen tutkii mm. näitä asioita opinnäytetyössään *LVL –liitoksen työmaatekninen kehittäminen*. Liitostyyppille täytyisi tehdä vielä laajempi liitoskokeita, jotta liitoksen todellinen kapasiteetti saataisiin selville ja voitaisiin minimoida muuttuvat tekijät ja esimerkiksi häiriötilanteet. Näitä voivat olla esimerkiksi puutavarassa, ruuveissa tai teräslevyissä olevat mahdolliset valmistusvirheet ja heikkouskohdat tai liitoksen kiinnitystekniikassa olevat puutteet.

Kerrostaloon kohdistuvien kuormien laskenta, jäykisteseinien kestävyden mitoitus sekä liitoksen murtumistapojen tarkastelu osoittautuivat melko haastaviksi, koska lähdemateriaalia oli niukasti saatavilla. Erityisesti LVL -rakenteisen kerrostalon mitoituksesta ei löytynyt juurikaan valmista ohjeistusta, vaan käytännössä oli sovellettava CLT:lle tarkoitettuja mitoitusohjeita.

Liitoskokeissa testattiin ainoastaan vetorasitusta, joka kohdistuu teräslevyn ja LVL -levyn välille ruuviliitokseen. Voidaan malliesimerkin laskennan perusteella todeta, että LVL:n ja teräslevyn välistä ruuviliitosta voidaan hyödyntää puukerrostalon jäykistävien LVL -seinäelementtien kiinnitykseen pysytysuuntaista voimaa vastaan. Liitoksen kestävyydelle vaakavoimia vastaan tulisi tehdä lisää kokeita, joissa selvitetään liitoksen leikkausvoimakestävyttä. Opinnäytetyön jatkokehitys voisi koostua liitoksen lisäkoestuksista, kun kuormitus on LVL -levyn reunan suuntainen.

Opinnäytetyön lopputulos onnistui hyvin. Se on selkeä ja uskon, että sitä voidaan jatkossa hyödyntää liitoksen jatkokehityksessä ja miksi ei myös esimerkiksi insinööriopiskelijoiden oppimateriaalina. Kokeiden tulokset ovat hyvin johdonmukaisia, mikä auttoi niiden tulkintaa. Hajontaa oli vähän ja yleisesti kaikki tulokset voitiin ottaa huomioon. Lopputuloksena teoriaosuus, laskentaosuus ja liitoskokeet tukevat toisiaan mielestäni erittäin hyvin.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

CrossLam.fi. Jäykistävän seinän kestävyys [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-15.] Saatavissa: <http://www.crosslam.fi/> Polku: Crosslam.fi. Tekniset määrittelyt. Jäykistävän seinän kestävyys (pdf).

DAERGA, Per Anders, GIRHAMMAR, Ulf Arne, KÄLLSNER, Bo 2012. Slotted-in Steel-plate Connections for Panel Wall Elements: Experimental and Analytical Study [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-08.] Saatavissa: <http://tu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1004019/FULLTEXT01.pdf>

DAERGA, Per Anders 2017-09-19. Slotted-in Connection for Wall Elements, Test Program [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Arto Puurula. [Tulostettu 2017-09-20.] Saatavissa: Sähköposti tekijän hallussa.

DAERGA, Per Anders 2018-01-16. Fastener Bend Fixture [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Arto Puurula. [Tulostettu 2018-01-23] Saatavissa: Sähköposti tekijän hallussa.

LAHTELA, Tero 2015. Puuinfo. Vaativien puurakenteiden suunnittelu [koulutusmateriaali]. [Viitattu 2017-01-14.] Sijainti: Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulun sisäinen verkko.

LUNTTA, Jarkko 2013. Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Aalto-yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Talonrakennustekniikka. Diplomityö. Sijainti: Espoo: Aalto-Yliopisto.

LVL by Stora Enso. RT 38867 [verkkoaineisto]. Rakennustieto Oy. [Viitattu 2018-01-09.] Saatavissa: <http://rt.rakennustieto.fi.ezproxy.savonia.fi/resource/juha/content/23956#page=2>

LVL by Stora Enso, tekninen esite 2017 [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-08.] Saatavissa: <http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/LVL%20technical%20manual%20FI%20250817%20light.pdf>

MARTINSONS 2006. Massivträ Handboken [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-09.] Saatavissa: <https://www.martinsons.se/default.aspx?id=9090>

Puuinfo.fi a [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-04.] Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/> Polku: Puuinfo.fi. Puutieto. Insinööripuutuotteet. Viilupuu (LVL).

Puuinfo.fi b. Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu, lyhennetty suunnitteluohje [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-09.] Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi5lyhennettysuunnitteluohjewewwwkolmaspainos10913rilinkorjauksin.pdf>

Puinfo.fi c. RunkoPES 2.0. Mallikerrostalo, rakennuslupapaperustukset [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-13.]

Saatavissa: <http://www.puinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20> Polku: RunkoPES 2.0. Rakennuslupapaperustukset.

Puinfo.fi d. Rakennetyyppikirjasto [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-14.] Saatavissa:

<http://www.puinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20> Polku: RunkoPES 2.0. Osa 11. Rakennetyyppikirjasto.

Puinfo.fi e. Eurokoodi 5 Sovelluslaskelmat, asuinrakennus [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-16.]

Saatavissa: <http://www.puinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus0.pdf>

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

RunkoPES 1.0 2012. Puukerrostalon rakenteet [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-09.] Saatavissa:

<http://www.puinfo.fi/sites/default/files/RunkoPES.pdf>

TOLPPANEN, Janne, KARJALAINEN, Markku, LAHTELA, Tero ja VILJAKAINEN, Mikko, Opetushallitus, Puinfo 2013. Suomalainen Puukerrostalo: Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Tampere: Juvenes Print, Suomen Yliopistopaino.

WIN -hanke [verkkoaineisto]. [Viitattu 2018-01-04.] Saatavissa: <http://www.win-hanke.fi/> Polku:

WIN-hanke.fi. WIN-hanke.

## LIITE 1: LIITOSKOKEIDEN TESTAUSOHJELMA

Liitoskokeiden testausohjelma (DAERGA, Per Anders 2017-09-19).

## Slotted-in connection for wall elements Test program

9/19/2017

Test program for LVL &amp; slotted-in connection / PAD

1

## TEST PROGRAM FOR SLOTTED-IN WALL CONNECTIONS

### LAB TESTS

#### 1. Tension tests on slotted-in steel plate and screw fasteners

- 1 row – 15 screws (par. & perp. to grain) 5 tests/direction × 2 = 10 tests in total
- 2 rows – 29 screws (par. & perp. to grain) 5 tests/direction × 2 = 10 tests in total

#### 2. Tests to determine the yield bending moment of screw in 3-point bending

- Anchorscrew 5.0 × 45 mm 10 tests
- Optional alternative screw (full threaded and small head) 10 tests

#### 3. Tests to determine the embedment strength of LVL (par. & perp. to grain)

- 4, 5 & 6 mm (par. & perp. grain) 5 tests/direction × 3 = 15 tests in total

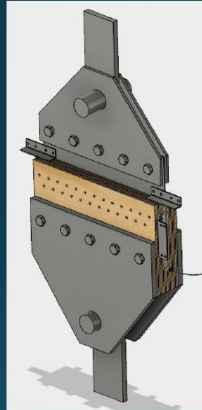
Components: LVL X grade 69 mm, anchorscrew 5.0 × 45 mm, steel plate 3 mm (alt. 2 mm)

9/19/2017

Test program for LVL &amp; slotted-in connection / PAD

2

## 1 Tension tests on slotted-in steel plate and screw fasteners



Test setup

Aim: To determine the complete load-displacement curve for the connection

9/19/2017

Test program for LVL & slotted-in connection / PAD

3

## 2 Tests to determine the yield bending moment of screw

Test setup

Aim: To determine the yield bending moment of screw in 3-point bending

Image to be shown later

9/19/2017

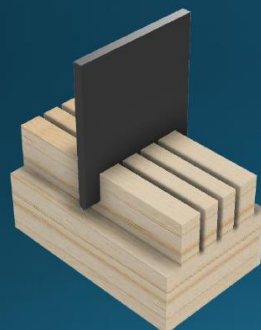
Test program for LVL & slotted-in connection / PAD

4

## 3 Tests to determine the embedment strength of LVL

Test setup

Aim: To determine the embedment strength of the LVL with respect to the screw diameter (4, 5 and 6 mm)



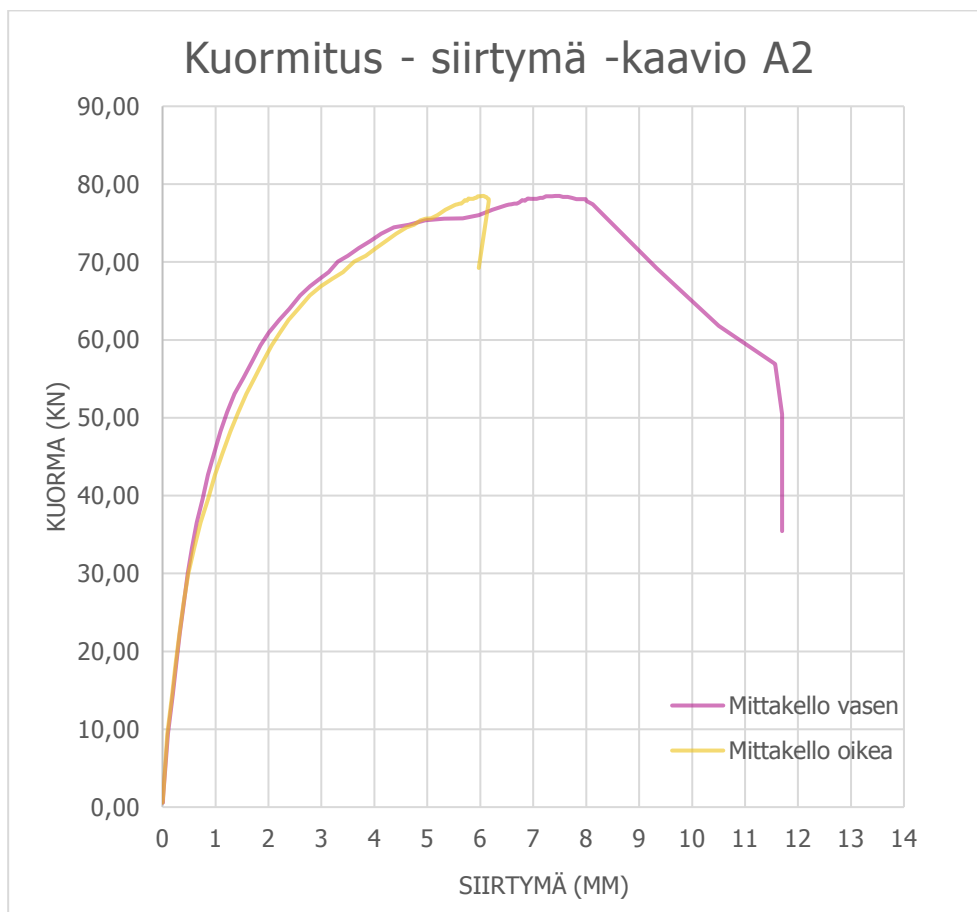
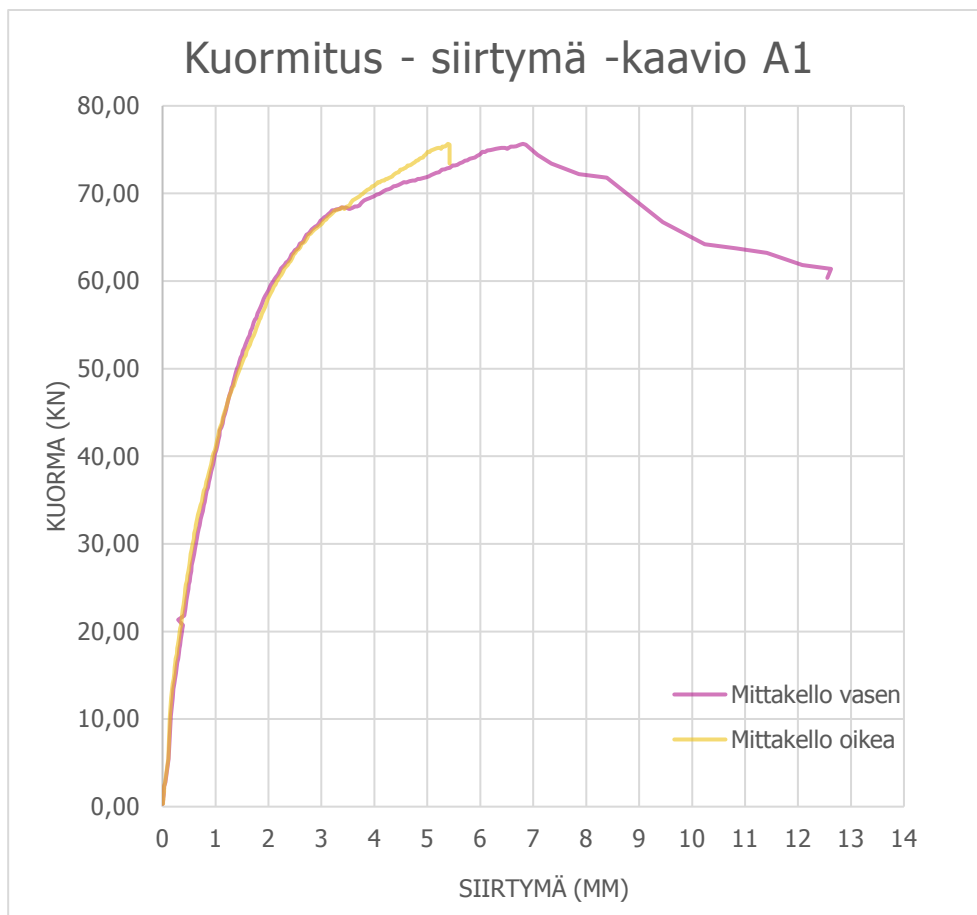
9/19/2017

Test program for LVL & slotted-in connection / PAD

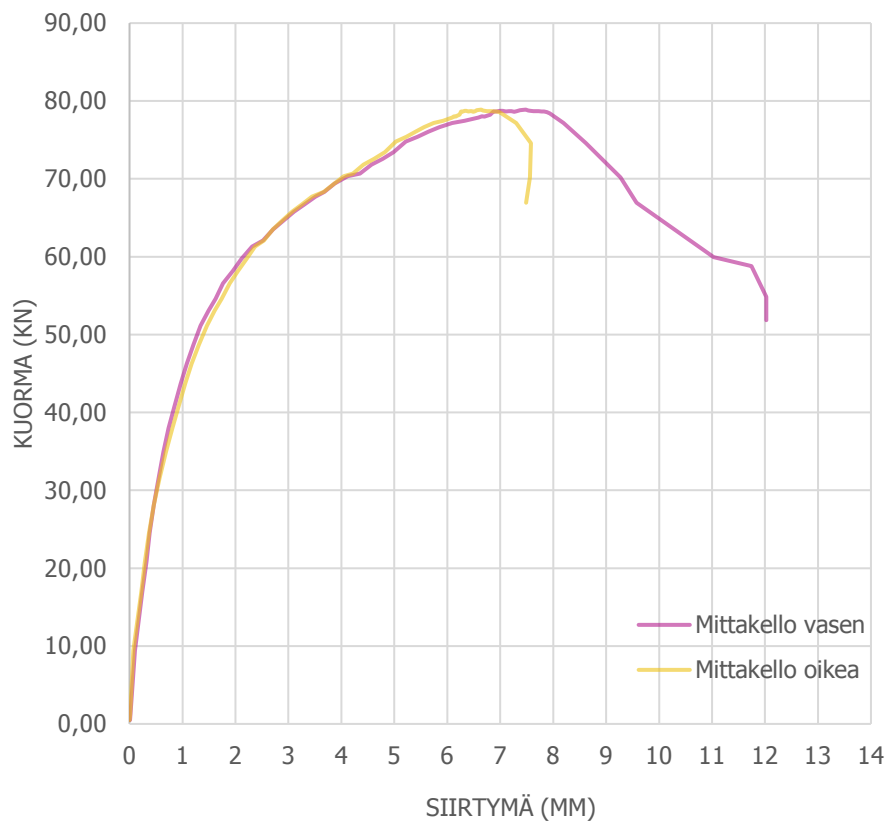
5

## LIITE 2: LIITOSKOKEIDEN KUORMITUS-SIIRTYMÄ -KAAVIOT

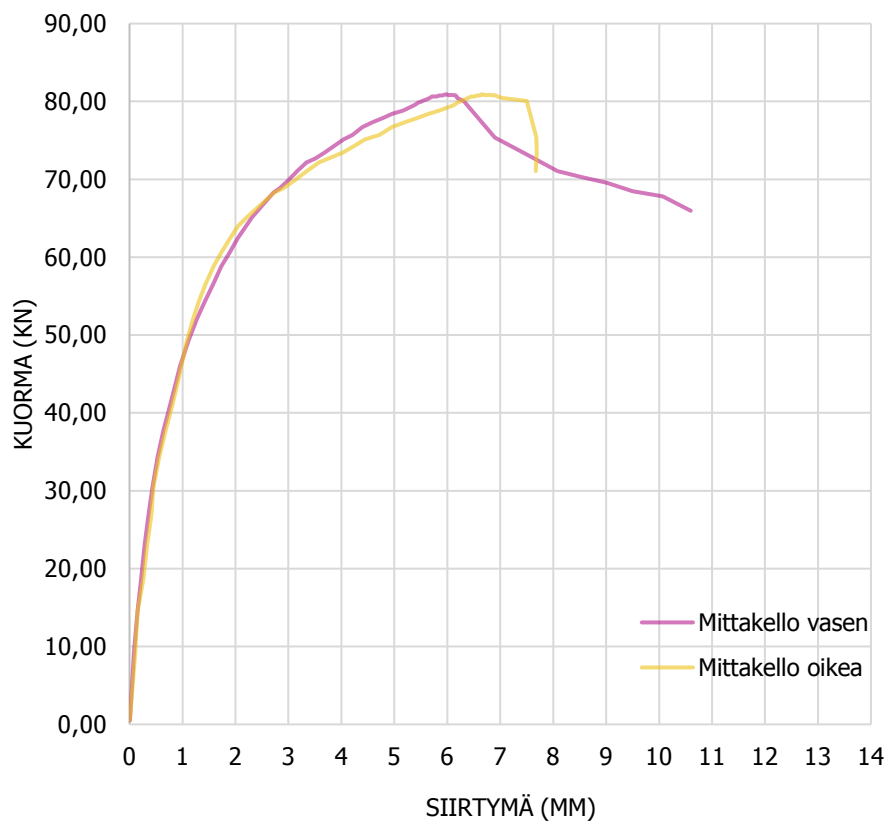
LVL-liitoskokeiden tulokset kuormitus-siirtymä -kaaviossa, joissa tulokset on eroteltuna vasemman ja oikean mittakellon siirtymille.



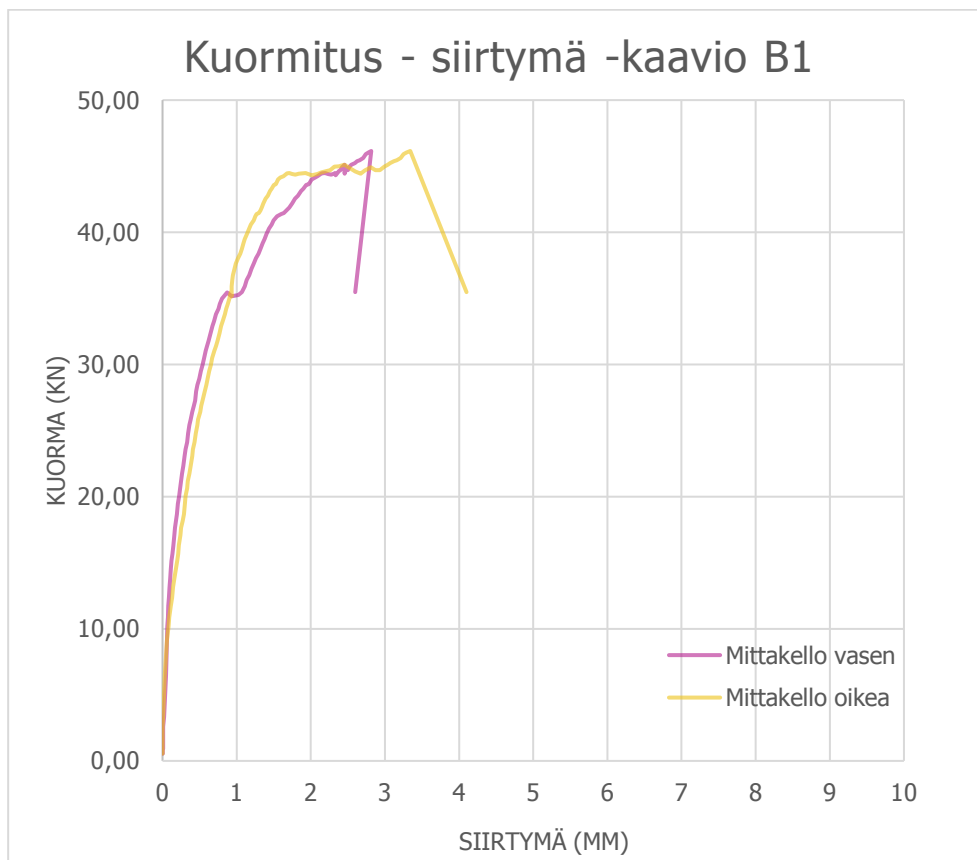
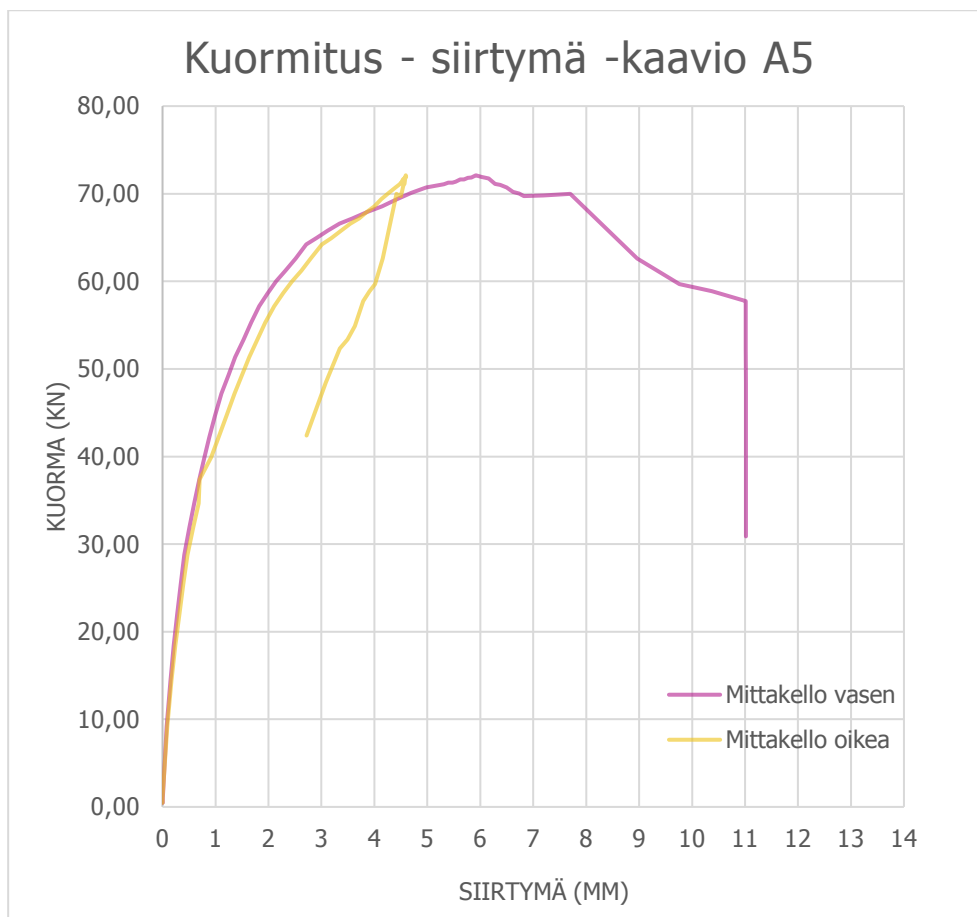
Kuormitus - siirtymä -kaavio A3

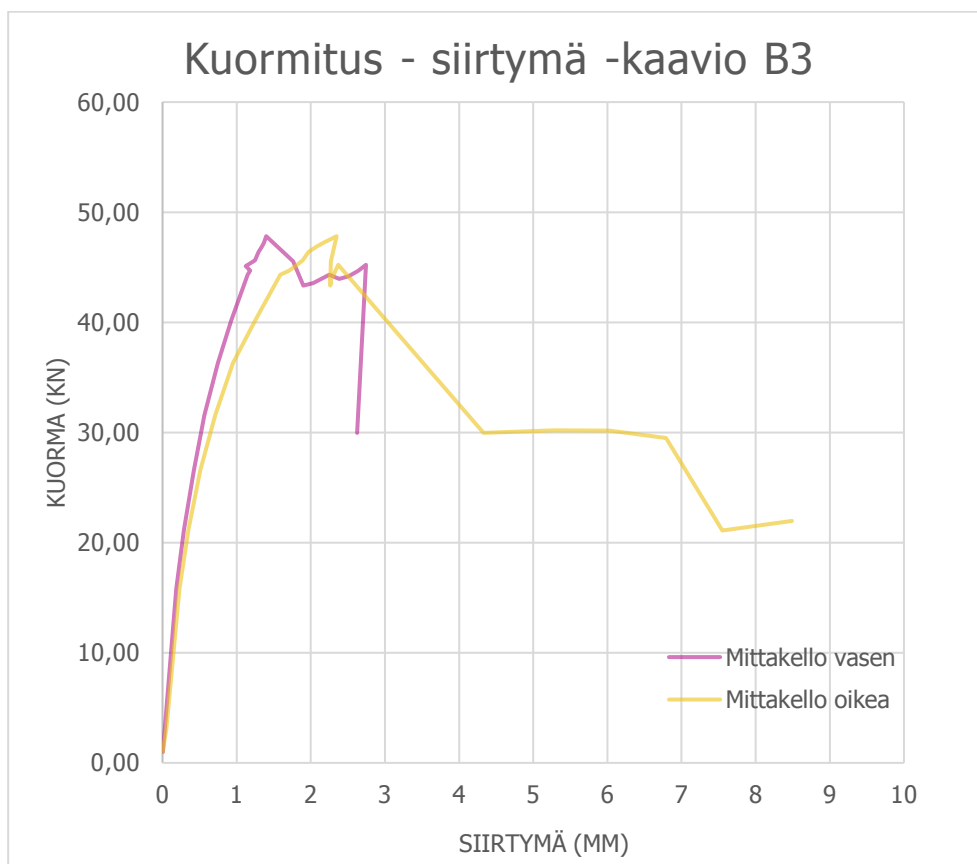
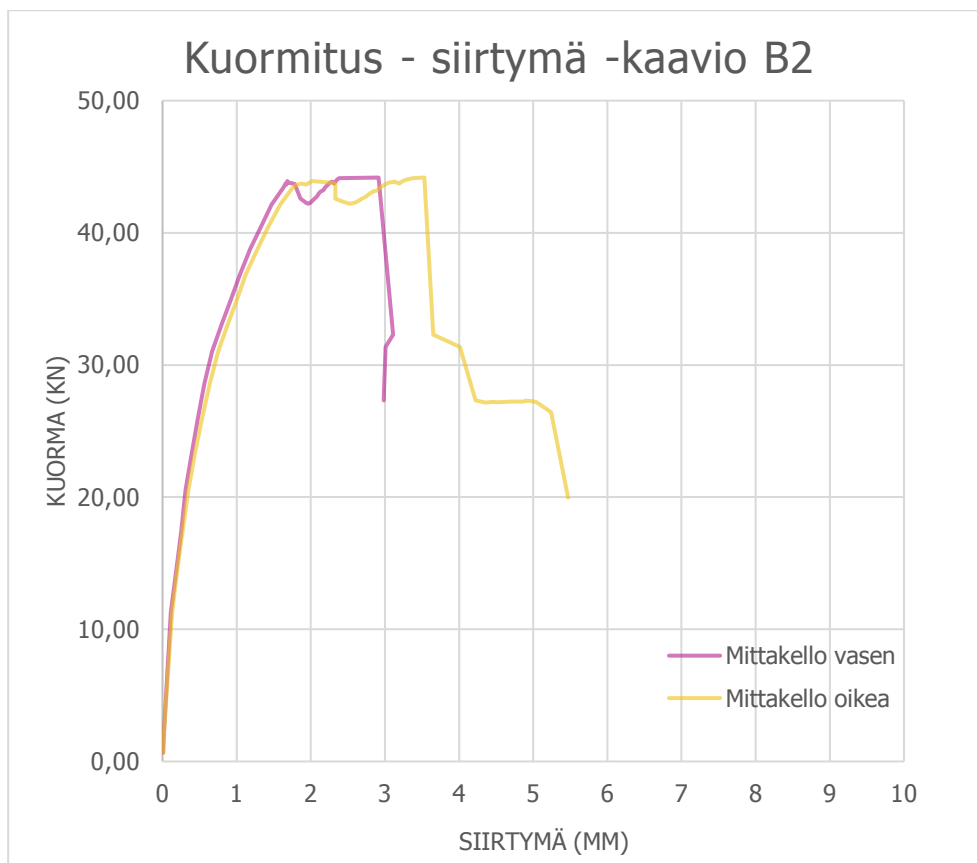


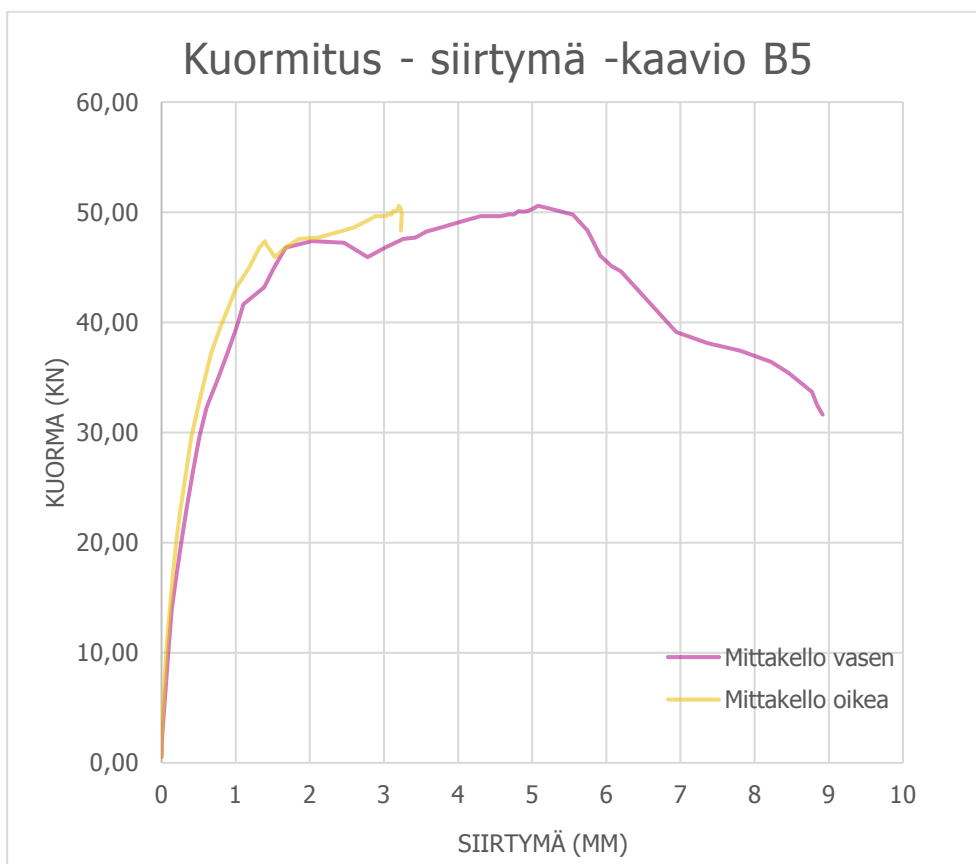
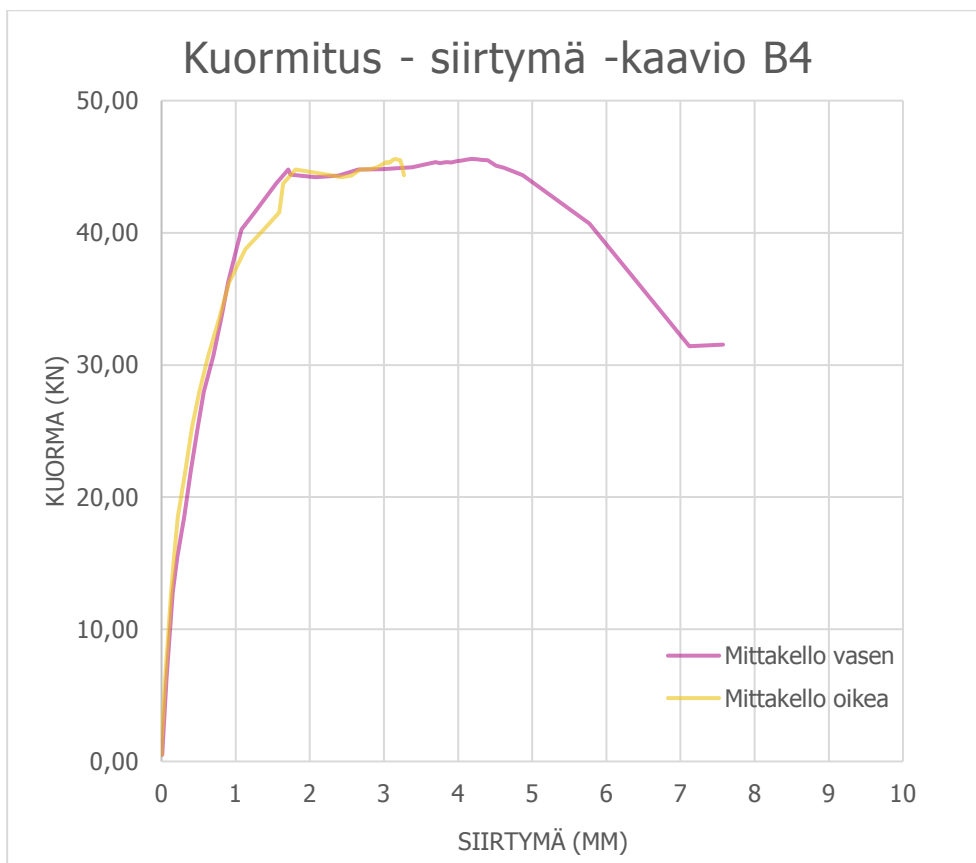
Kuormitus - siirtymä -kaavio A4



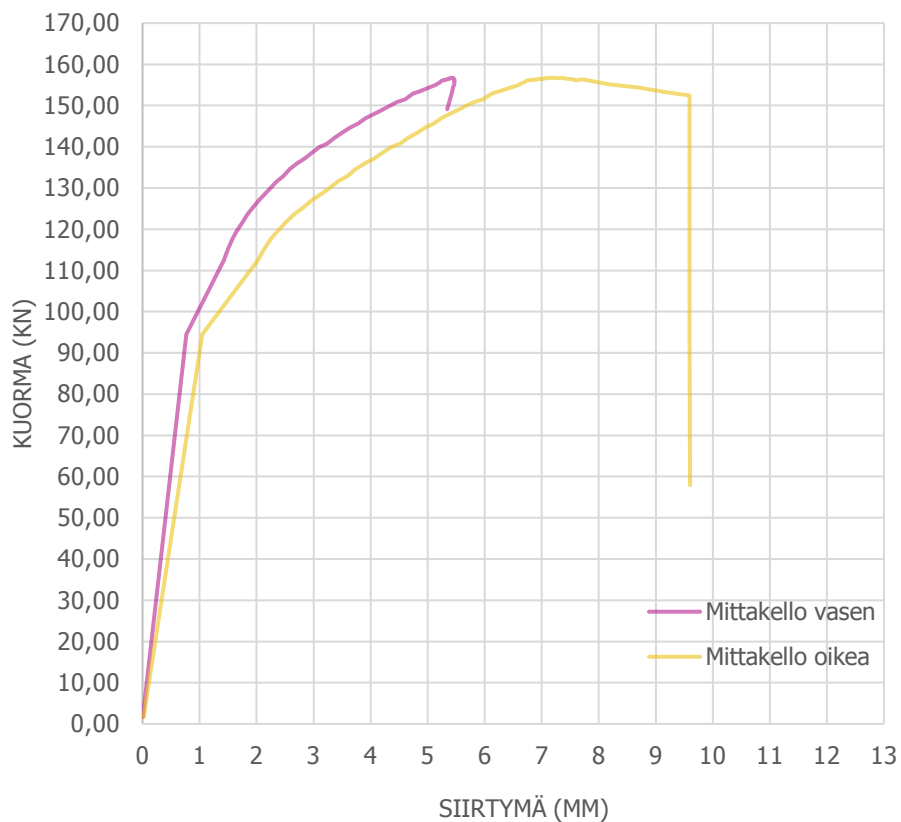




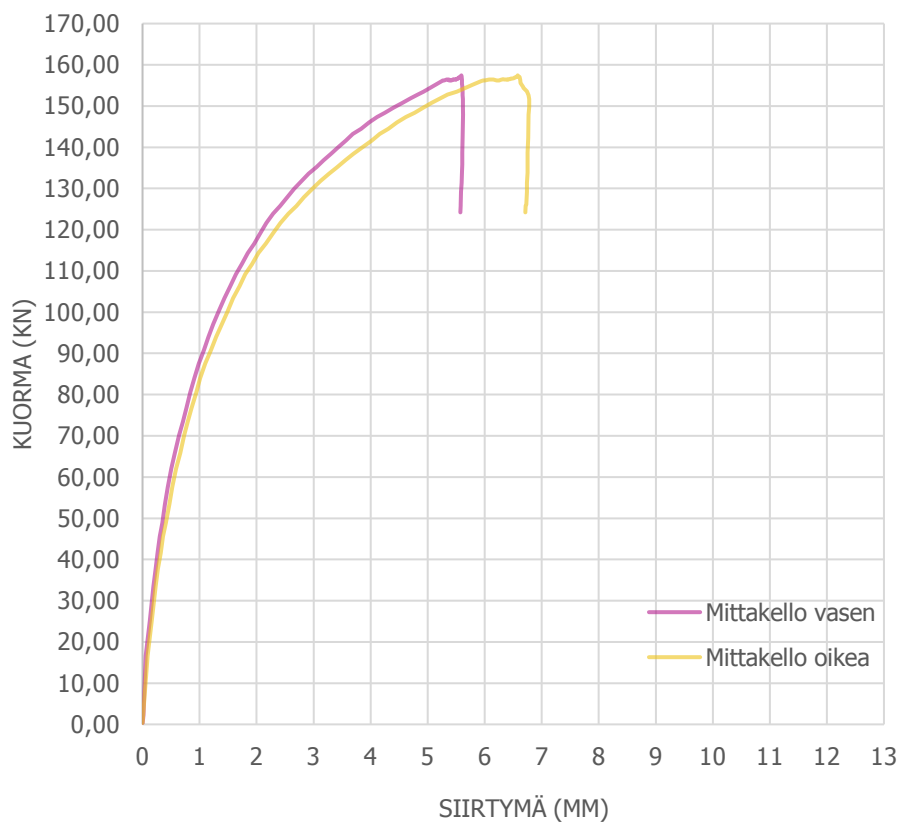




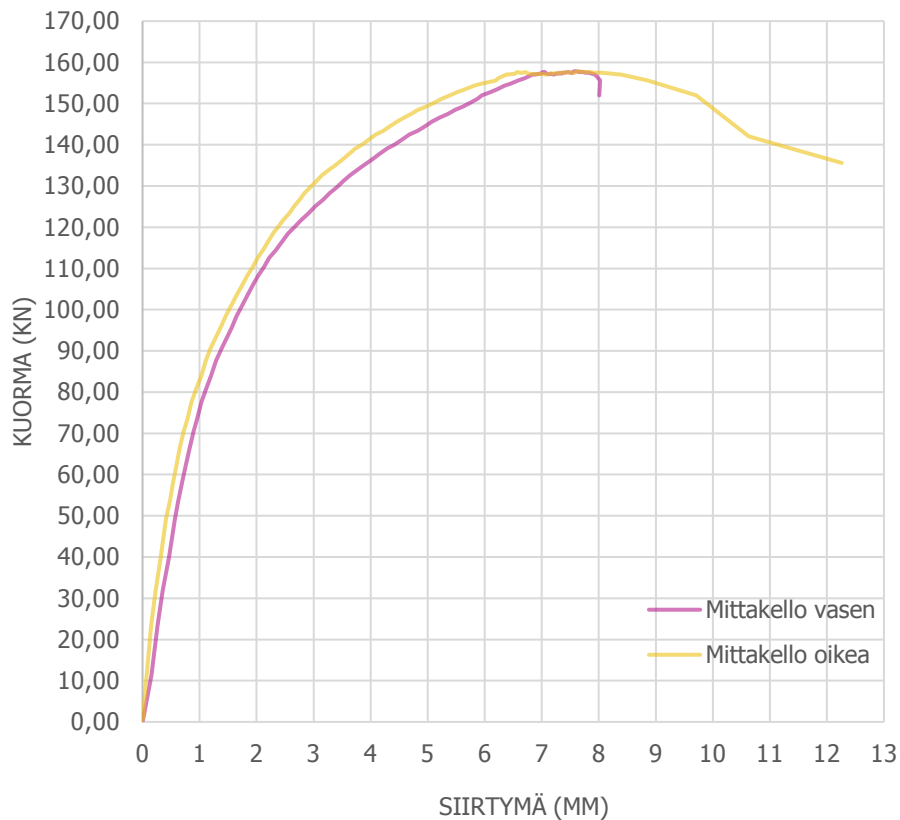
Kuormitus - siirtymä -kaavio C1



Kuormitus - siirtymä -kaavio C3



Kuormitus - siirtymä -kaavio C4



Kuormitus - siirtymä -kaavio C5

